

## 内容简介

本书立足放射性污染“地质赋存－环境迁移－精准管控”的全链条逻辑，系统整合放射性地质特征研究与环境检测技术创新成果，构建“理论基础－技术方法－实践应用”三位一体的知识体系，为核资源开发、放射性污染治理、辐射环境安全保障等领域提供全方位技术指引。

全书共分六大核心章节：首章聚焦放射性地质特征基础，深入剖析铀、钍等放射性核素的地质分布规律、赋存形态与迁移转化机制，结合不同地质单元（如铀矿冶区域、核设施周边场地）的地质结构差异，揭示放射性污染的源头成因与空间分布特征；第二章系统阐述放射性环境检测技术原理，涵盖  $\gamma$  谱分析、激光诱导击穿光谱（LIBS）、无源监测等核心检测技术的工作机制，详解高灵敏度检测设备的性能参数与适用场景；第三章重点呈现全域立体监测网络构建技术，包括空天地一体化监测布局、分布式传感器网络部署、跨境协同监测数据共享等实操方案，融入数字孪生、区块链等智能化技术在数据溯源中的创新应用；第四章围绕不同介质污染检测展开，针对土壤、水体、大气等环境介质的放射性污染特性，提供针对性检测方法与质量控制标准，涵盖复合污染场景下的多核素同步检测技术；第五章结合工程实践案例，详解核设施退役、放射性废物处置、污染场地修复等场景的检测技术适配方案，突出模块化退役检测、原位修复效果监测等关键技术的实操流程；第六章展望未来技术发展趋势，分析人工智能、物联网等前沿技术与检测技术的融合路径，探讨核心技术自主化、低成本化、标准化的实现路径。

本书兼具理论深度与实践价值，既系统梳理了放射性地质特征的核心理论与检测技术的基础原理，又整合了韩国太阳能人工植物净化、Java 智慧管理系统等国内外最新技术成果与工程案例。全书内容衔接紧密，技术细节详实，可作为环境科学、地质学、核工程等专业高校教材，也为生态环境监管人员、核设施运营技术人员、污染治理工程从业者提供精准的技术参考，助力推动我国放射性环境检测与治理技术的规范化、智能化发展，为辐射环境安全与生态保护提供坚实的技术支撑。

# Radioactive Geological Characteristics and Environmental Monitoring Technology

## 放射性地质特征与环境检测技术

张云海 著

放射性地质特征与环境检测技术  
Radioactive Geological Characteristics and Environmental Monitoring Technology

张云海 著



## 作者简介



张云海，男，汉族 1972 年 6 月出生，中共党员，1991 年参加工作，曾任河南省核工业地质局野外地质项目负责人、副高级工程师，毕业于中国地质大学（武汉），现任河南省核技术应用中心教育培训所所长，研究方向：地质勘查、放射性物探、核知识科普。参加工作以来长期从事地质找矿工作，主持或参与了 8 个省重点地质勘查基金项目，1 个省级地质科研项目，编制各类地质、放射性物探报告多份，多次在信阳市中小学开展核与辐射知识科普工作；提交了中型稀土矿床 1 处，小型铀矿床 1 处，铀矿点 2 处；发表论文十余篇，其中北大中文核心期刊录取 3 篇，论文获省地质学会二等奖 1 次，信阳市地质学会二等奖 1 次，三等奖 1 次；主持的稀土矿普查项目获省河南省找矿突破战略行动优秀勘查成果，对该省稀土矿找矿工作有着重要的促进意义；个人获河南省找矿突破战略行动先进个人、省地质竞赛技术能手、省国防科工系统优秀共产党员、信阳市“五一”劳动奖章等光荣称号。



# Radioactive Geological Characteristics and Environmental Monitoring Technology

## 放射性地质特征与环境检测技术

张云海 著



International  
Union of Scientific and  
Technological Scholars

## CIP INFORMATION

---

Title: Radioactive Geological Characteristics and Environmental Monitoring Technology

题目：放射性地质特征与环境检测技术

Author: Yunhai Zhang

作者：张云海

ISBN: 979-8-90040-041-9

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND  
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International  
Union of Scientific and  
Technological Scholars**

**Radioactive Geological Characteristics and Environmental Monitoring  
Technology**

**放射性地质特征与环境检测技术**

---

Address: 100 N Howard St Ste R, Spokane, Wa, 99201. United States

Tel: +888-754-5177

Email: [contact@cypedia.net](mailto:contact@cypedia.net)

Format: 185mmx260mm 1/16 Sheets: 18.75

Word Counts: 240.000

Edition: First edition in March 2026

Printing: First printing in March 2026

**CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL  
SCHOLARS**

非开放获取·电子版请联络出版社购买·版权归出版社所有·侵权必究

Not Open Access. For the electronic version, please contact the publisher for purchase. The copyright belongs to the publisher.  
Infringement will be prosecuted.



在全球能源结构转型与核技术快速发展的双重驱动下，放射性元素的地质赋存、环境迁移及安全管控已成为生态环境保护与核事业可持续发展的核心命题。从铀矿资源勘探开发到核设施安全运行，从放射性污染场地修复到跨境辐射风险防控，放射性地质特征的精准认知与环境检测技术的创新应用，始终是破解“风险防控 - 污染治理 - 安全保障”难题的关键支撑。当前，我国核工业正朝着小型模块化堆、核燃料闭式循环等新型方向演进，放射性污染场景日趋复杂，长寿命超铀核素污染、复合污染等新挑战不断涌现，传统地质调查与检测技术已难以满足“精准化、智能化、全生命周期”的管理需求。在此背景下，系统梳理放射性地质特征研究成果，整合国内外环境检测技术创新实践，构建跨学科、系统化的知识体系，兼具理论价值与现实紧迫性。

本书立足“地质成因 - 技术适配 - 实践应用”的核心逻辑，打破地质学、环境科学、核技术、人工智能等学科壁垒，全面回应放射性环境管理的技术痛点与行业需求。在理论层面，深度解析铀、钍等放射性核素的地质分布规律、赋存形态及迁移转化机制，揭示不同地质单元（铀矿冶区域、核设施周边、跨境流域）对核素迁移的调控作用，为检测技术选型与治理方案制定奠定理论基础；在技术层面，聚焦监测感知、污染治理、智慧管理、安全防护四大核心领域，整合高分辨率  $\gamma$  谱分析、激光诱导击穿光谱（LIBS）、数字孪生、区块链等前沿技术，详解空天地一体化监测网络、土壤原位修复、放射性废物全生命周期追溯等关键技术的原理与实操流程；在实践层面，融入韩国太阳能人工植物净化、核设施模块化退役检测等国内外典型案例，为技术落地提供直观参考。

全书共设七章，脉络清晰、层层递进：第一章系统阐述放射性地质特征基础理论，厘清核素地质赋存与环境迁移的核心规律；第二章聚焦检测技术原理，对比传统技术与新型技术的优劣的适配场景；第三章详解全域立体监测网络构建，涵盖空天地一体化布局、分布式传感器部署与跨境协同监测技术；第四章针对土壤、水体、大气等不同介质，提供差异化检测方法与质量控制标准；第五章结合工程案例，解析核设施退



役、污染场地修复等场景的技术适配方案；第六章拓展智慧管理与安全防护协同技术，构建“检测 - 管理 - 防护”闭环；第七章展望未来技术发展趋势，预判人工智能、纳米材料等前沿技术的融合应用前景。

本书兼具理论深度与实践价值，既注重核心原理的系统阐释，又强调技术细节的实操性，同时吸纳近五年国内外最新研究成果与标准规范，时效性与前瞻性突出。全书可作为环境科学、地质学、核工程、辐射防护等专业高校教材，助力复合型人才培养；也可为生态环境监管人员、核设施运营技术人员、污染治理工程从业者提供精准技术指引，支撑日常工作开展；还能为科研工作者提供研究视角与创新思路，推动技术研发与学科发展。

限于作者水平，书中难免存在疏漏及不妥之处，敬请读者批评指正。

—— 作者

# 目录 CONTENTS

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 第一章 放射性地质学基础       | 1   |
| 第一节 放射性元素的地球化学特征   | 1   |
| 第二节 放射性同位素的形成与衰变规律 | 4   |
| 第三节 放射性矿物类型与分布特征   | 8   |
| 第四节 放射性地质年代学原理     | 12  |
| 第五节 放射性元素迁移转化机制    | 17  |
| 第二章 铀矿地质特征与成矿规律    | 23  |
| 第一节 铀矿床类型与成因分类     | 23  |
| 第二节 铀矿成矿地质条件分析     | 29  |
| 第三节 典型铀矿床地质特征      | 33  |
| 第四节 铀矿资源分布规律研究     | 39  |
| 第五节 铀矿勘查技术方法       | 44  |
| 第三章 钍矿及其他放射性矿产地质   | 51  |
| 第一节 钍矿床地质特征        | 51  |
| 第二节 稀土元素伴生放射性矿产    | 56  |
| 第三节 非传统放射性矿产资源     | 61  |
| 第四节 放射性矿产综合评价方法    | 66  |
| 第四章 放射性环境地球化学      | 75  |
| 第一节 放射性元素环境行为      | 75  |
| 第二节 土壤中放射性核素迁移     | 80  |
| 第三节 水体放射性污染特征      | 87  |
| 第四节 大气放射性物质扩散规律    | 92  |
| 第五章 环境放射性监测技术基础    | 101 |
| 第一节 环境放射性监测原理      | 101 |
| 第二节 辐射探测仪器与设备      | 106 |
| 第三节 样品采集与预处理技术     | 113 |
| 第四节 质量控制与保证体系      | 118 |



|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第六章 现场监测与快速检测技术        | 125 |
| 第一节 现场 $\gamma$ 辐射监测技术 | 125 |
| 第二节 放射性气溶胶快速检测         | 130 |
| 第三节 水体放射性现场监测          | 137 |
| 第四节 土壤放射性现场检测          | 144 |
| 第五节 应急监测技术与装备          | 150 |
| 第七章 实验室分析测试技术          | 157 |
| 第一节 放射性核素分析技术          | 157 |
| 第二节 能谱分析技术应用           | 164 |
| 第三节 质谱技术在放射性检测中的应用     | 170 |
| 第四节 放射化学分析方法           | 176 |
| 第五节 微量放射性核素检测技术        | 182 |
| 第八章 放射性环境影响评价          | 189 |
| 第一节 放射性环境影响评价方法        | 189 |
| 第二节 辐射剂量评估模型           | 196 |
| 第三节 生态风险评估技术           | 202 |
| 第四节 公众健康影响评价           | 209 |
| 第五节 环境影响评价案例分析         | 217 |
| 第九章 放射性污染治理与修复         | 225 |
| 第一节 放射性污染治理原理          | 225 |
| 第二节 土壤放射性污染修复技术        | 230 |
| 第三节 水体放射性污染治理方法        | 237 |
| 第四节 废物处理与处置技术          | 248 |
| 第五节 治理效果评估标准           | 254 |
| 第十章 放射性环境管理与发展趋势       | 261 |
| 第一节 放射性环境管理体系          | 261 |
| 第二节 法律法规与标准规范          | 268 |
| 第三节 监测网络建设与运行          | 275 |
| 第四节 国际经验与发展趋势          | 281 |
| 第五节 未来技术发展方向           | 286 |
| 参考文献                   | 293 |

# 第一章 放射性地质学基础

## 第一节 放射性元素的地球化学特征

### 一、放射性元素的地壳丰度与分布规律

#### (一) 主要放射性元素的地壳平均丰度

地球地壳中天然放射性元素主要包括铀(U)、钍(Th)、钾(K)三大类,其地壳平均丰度具有显著差异。铀的地壳丰度约为  $2.8 \times 10^{-6}$  (质量分数),在酸性岩中含量最高,花岗岩中铀含量可达  $3 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ ,而超基性岩中仅为  $0.01 \times 10^{-6} \sim 0.05 \times 10^{-6}$ ;钍的地壳丰度约为  $9.6 \times 10^{-6}$ ,分布趋势与铀相似,酸性岩中钍含量普遍在  $10 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$ ,超基性岩中不足  $0.1 \times 10^{-6}$ ;钾的地壳丰度高达 2.8%,其中具放射性的  $^{40}\text{K}$  同位素占天然钾的 0.0117%,是地壳中分布最广泛的放射性元素,在长石、云母等造岩矿物中高度富集。

#### (二) 元素的天体与地球圈层分布特征

从天体尺度看,放射性元素的丰度遵循宇宙元素分布规律,铀、钍等重元素主要通过恒星核聚变晚期的 r - 过程(快中子俘获过程)形成,其丰度随原子序数增加呈指数递减。地球圈层结构中,放射性元素呈现明显的圈层分异:地核中铀、钍含量极低(推测铀丰度  $< 0.01 \times 10^{-6}$ ),地幔中铀丰度约  $0.02 \times 10^{-6} \sim 0.05 \times 10^{-6}$ ,钍铀比(Th/U)稳定在 3.5~4.0;地壳作为放射性元素的主要富集圈层,其 Th/U 比值平均为 3.8,且随地壳演化呈逐渐升高趋势,太古宙地壳 Th/U 约 2.5,显生宙地壳则达 4.0 以上。

#### (三) 区域分布的不均匀性特征

放射性元素的区域分布受地质构造、岩石类型及成矿作用控制,呈现强烈的不均匀性。全球范围内,酸性岩浆活动强烈的区域(如南美安第斯带、中亚造山带)铀钍含量显著偏高;我国华南花岗岩区铀丰度可达  $5 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$ ,而华北克拉通古老变质岩区铀丰度仅  $1.5 \times 10^{-6} \sim 2.0 \times 10^{-6}$ 。此外,断裂构造带往往成为放射性元素迁移富集的通道,形成局部高异常区,如我国相山铀矿田、东胜铀矿田均沿深大断裂带分布。

### 二、放射性元素的迁移与富集地球化学规律

#### (一) 迁移的主要地球化学机制

放射性元素的迁移主要依赖流体介质,其机制可分为机械迁移和化学迁移两类。



机械迁移多发生在沉积作用过程中,铀、钍可通过吸附于黏土矿物、铁锰氧化物表面,随沉积物搬运至沉积盆地;化学迁移是主导机制,铀在氧化条件下( $E_h > 0.2V$ ,  $pH=4\sim 8$ )以  $UO_2^{2+}$ 、 $UO_2(CO_3)_2^{2-}$  等络合离子形式溶解迁移,在还原条件下( $E_h < 0$ )则生成沥青铀矿( $UO_2$ )等难溶化合物沉淀;钍因离子半径大( $Th^{4+}$  半径  $0.102nm$ ),水解能力强,在自然条件下多以  $Th(OH)_4$  胶体形式迁移,或与氟、磷酸根形成稳定络合物迁移。

## (二) 影响迁移的关键地球化学因素

氧化还原电位( $E_h$ )是控制铀迁移的核心因素,氧化环境促进铀的溶解迁移,还原环境(如有机质富集层、黄铁矿化带)则导致铀沉淀富集; $pH$  值通过影响络合离子稳定性调控迁移,酸性条件( $pH$  利于铀以  $UO_2^{2+}$  形式迁移,中性至弱碱性条件( $pH=6\sim 10$ )则以碳酸络合物为主导;流体中的络合剂( $CO_3^{2-}$ 、 $F^-$ 、 $PO_4^{3-}$ )可增强铀、钍的迁移能力,而黏土矿物、有机质的吸附作用则会抑制迁移。此外,温度、压力的变化可改变矿物溶解度,深成环境向浅成环境过渡时,压力降低常导致放射性元素从流体中析出。

## (三) 富集的主要地质环境与过程

放射性元素的富集与特定地质环境和地质过程密切相关。岩浆作用过程中,铀、钍通过结晶分异作用向酸性岩浆晚期熔体富集,形成花岗岩型铀钍矿床;热液活动中,含矿热液沿断裂带运移,在构造交汇部位、岩性接触带等有利空间沉淀成矿,如热液型铀矿;沉积作用中,铀可通过生物吸附、化学沉淀等方式在砂岩、页岩中富集,形成砂岩型、页岩型铀矿;变质作用过程中,原岩中的放射性元素可随矿物重结晶发生重新分配,在富铝、富硅的变质岩中局部富集。

# 三、放射性元素的同位素地球化学特性

## (一) 主要放射性同位素的衰变体系

天然放射性元素包含三大衰变体系:铀-镭系( $^{238}U$ 系)、钍-铀系( $^{235}U$ 系)和钍系( $^{232}Th$ 系),以及单独衰变的 $^{40}K$ 。 $^{238}U$ 衰变系列包含18个核素,最终衰变为稳定核素 $^{206}Pb$ ,半衰期 $4.47 \times 10^9$ 年; $^{235}U$ 衰变系列最终生成 $^{207}Pb$ ,半衰期 $7.04 \times 10^8$ 年; $^{232}Th$ 衰变系列最终产物为 $^{208}Pb$ ,半衰期 $1.41 \times 10^{10}$ 年; $^{40}K$ 可通过 $\beta^-$ 衰变生成 $^{40}Ca$ (半衰期 $1.25 \times 10^9$ 年)和电子捕获衰变生成 $^{40}Ar$ (半衰期 $1.19 \times 10^{10}$ 年)。这些衰变体系的半衰期与地球年龄( $4.56 \times 10^9$ 年)相当,成为地质年代学的重要工具。

## (二) 同位素分馏与平衡特征

放射性元素的同位素分馏效应较弱,自然条件下主要受质量相关分馏控制,铀同位素( $^{238}U/^{235}U$ )在岩浆作用、热液活动中分馏系数通常小于0.001。衰变系列的放射

性平衡是重要地球化学特征,当体系封闭且衰变时间足够长(超过最长半衰期核素的5~10倍),系列中各核素的活度相等,即达到放射性平衡;若体系开放(如流体迁移、矿物溶解),平衡会被打破,形成活度不平衡状态,可用于示踪地质过程的时间尺度和物质迁移路径。例如,铀矿石中 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 活度比偏离1的程度,可反映铀的迁移富集时间。

### (三) 同位素示踪应用的地球化学基础

放射性同位素的衰变规律为地质过程示踪提供了理论基础。铀-铅(U-Pb)定年通过测定矿物中放射性成因铅( $^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}$ )与母体铀、钍的含量,计算地质体的形成年龄,适用于锆石、磷灰石等稳定矿物;钾-氩(K-Ar)、氩-氩(Ar-Ar)定年利用 $^{40}\text{K}$ 衰变生成的 $^{40}\text{Ar}$ ,广泛应用于火山岩、变质岩的年龄测定;此外,放射性同位素的比值(如Th/U、 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ )可示踪岩浆源区成分、流体来源及成矿作用机制,为矿产资源勘查和地质演化研究提供重要依据。

## 四、放射性元素的成矿地球化学效应

### (一) 成矿元素的共生组合规律

放射性元素的成矿过程常伴随特定元素的共生富集,形成特征性的元素组合。铀矿床中常见的共生元素包括硒(Se)、钼(Mo)、钒(V)、镍(Ni)、钴(Co)等,这些元素多与铀形成硫化物、氧化物或络合物共生;钍矿床常与稀土元素(REE)、铌(Nb)、钽(Ta)共生,因钍与稀土元素的离子半径、地球化学性质相似,在岩浆分异过程中同步富集;此外,放射性元素成矿过程中释放的 $\alpha$ 粒子可导致周围岩石中钾、钠等碱金属元素迁移,形成局部碱交代带,成为找矿的重要标志。

### (二) 放射性衰变的能量与物质效应

放射性元素衰变释放的能量对成矿过程具有重要影响。铀、钍衰变产生的 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 射线可使周围岩石发生辐射损伤,形成晶格缺陷,增强岩石的渗透性,为成矿流体提供运移通道;衰变释放的热量可升高局部温度(大型铀矿田可使周围岩石温度升高5~10℃),促进流体循环和矿物溶解;同时,辐射作用可引发氧化还原反应,改变流体的Eh值,促使铀等元素从流体中沉淀富集。此外,衰变产生的氦(He)、氩(Ar)等气体可增加流体压力,当压力超过岩石强度时,会引发断裂活动,进一步改善成矿空间条件。<sup>①</sup>

### (三) 成矿作用的地球化学动力学过程

放射性元素成矿的地球化学动力学过程涉及多阶段的物质迁移与反应。初始阶段,

① 李会娟,李超,王钰琦.矿物材料对放射性核素吸附的研究现状[J].科技创新与应用,2023,13(29):87-90.

岩浆熔融或岩石风化使铀、钍从母体岩石中释放，进入流体相；迁移阶段，流体携带放射性元素及共生元素沿构造通道运移，期间发生络合、吸附、溶解等反应；富集阶段，在有利的地质环境（如还原障、构造圈闭、岩性界面）中，流体物理化学条件发生突变，导致放射性元素通过沉淀、结晶作用形成矿床；成矿后阶段，矿床受构造活动、流体改造等影响，可能发生二次迁移与再富集，形成叠加成矿效应。这一动力学过程的核心是流体-岩石相互作用，其强度和持续时间直接控制矿床的规模和品位。

## 第二节 放射性同位素的形成与衰变规律

### 一、放射性同位素的宇宙与地球形成机制

#### （一）宇宙成因放射性同位素的形成

宇宙空间中，放射性同位素主要通过恒星核合成与宇宙线照射两种途径形成。恒星核合成是重元素放射性同位素的主要来源：大质量恒星在演化晚期的核聚变过程中，通过 r - 过程（快中子俘获）和 s - 过程（慢中子俘获）生成铀（ $^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ ）、钍（ $^{232}\text{Th}$ ）等重放射性核素，这些核素随超新星爆发被抛射到星际空间，成为太阳系形成的物质基础；轻质量放射性同位素（如  $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ ）则主要源于宇宙线（高能质子、 $\alpha$  粒子）与星际物质的核反应，例如宇宙线质子与氮核（ $^{14}\text{N}$ ）碰撞可生成  $^{14}\text{C}$ 。

#### （二）地球内部放射性同位素的生成与演化

地球形成初期（约  $4.56 \times 10^9$  年前），从太阳星云吸积了大量原始放射性同位素，构成地球放射性核素的初始库。地球内部的放射性同位素演化主要受两个过程控制：一是原生放射性同位素的自然衰变，如  $^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$  等长半衰期核素至今仍在缓慢衰变，是地球内部热量的主要来源；二是次生放射性同位素的生成，地球内部的高能粒子（如铀、钍衰变产生的  $\alpha$  粒子）与岩石中的稳定核素发生核反应，可生成少量次生放射性同位素，如  $\alpha$  粒子与硅核（ $^{28}\text{Si}$ ）反应生成  $^{31}\text{P}$ （放射性同位素，半衰期 25.3 天）。此外，地球内部的岩浆活动、变质作用可导致放射性同位素在不同圈层、不同岩石中发生重新分配，进一步影响其分布与演化。

#### （三）人工合成放射性同位素的主要方式

人工合成放射性同位素是通过人为核反应实现的，主要包括核裂变、核聚变与粒子轰击三种方式。核裂变是目前最主要的人工合成手段，通过中子轰击重核（如  $^{235}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ ）使其分裂，生成多种中等质量的放射性同位素（如  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{147}\text{Pm}$ ）；核聚变通过轻核（如  $^2\text{H}$ 、 $^3\text{H}$ ）在极高温度和压力下聚合生成重核，同时伴随放射性同位素的产生，如氢同位素聚变可生成  $^3\text{He}$ （稳定）与  $^1\text{H}$ ，或生成放射性同位素  $^4\text{He}$ （稳定）的过程中伴随高能粒子释放；粒子轰击则利用加速器加速质子、 $\alpha$



粒子等高能粒子, 撞击稳定核素靶材, 通过核反应生成新的放射性同位素, 如用  $\alpha$  粒子轰击铝核 ( $^{27}\text{Al}$ ) 可生成  $^{30}\text{P}$  (放射性, 半衰期 2.5 分钟)。

## 二、放射性同位素的衰变类型与基本规律

### (一) 主要衰变类型及核反应特征

天然放射性同位素的衰变主要分为  $\alpha$  衰变、 $\beta$  衰变 (含  $\beta^-$  衰变、 $\beta^+$  衰变) 和  $\gamma$  衰变三类, 人工合成同位素还可能发生核裂变衰变。 $\alpha$  衰变是重核 (原子序数  $Z > 82$ ) 的特征衰变方式, 原子核释放一个  $\alpha$  粒子 (氦核,  $^4\text{He}^{2+}$ ), 导致原子序数减少 2、质量数减少 4, 如  $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} + ^4\text{He}$ , 衰变过程中释放的  $\alpha$  粒子动能可达几 MeV, 电离能力强但穿透能力弱;  $\beta^-$  衰变中, 原子核内的一个中子转化为质子, 释放一个电子 ( $\beta^-$  粒子) 和反中微子, 原子序数增加 1、质量数不变, 如  $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$ ,  $\beta^-$  粒子电离能力中等, 穿透能力强于  $\alpha$  粒子;  $\beta^+$  衰变中, 原子核内的一个质子转化为中子, 释放一个正电子 ( $\beta^+$  粒子) 和中微子, 原子序数减少 1、质量数不变, 如  $^{11}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B} + e^+ + \nu_e$ , 正电子与电子湮灭会产生  $\gamma$  射线;  $\gamma$  衰变是原子核从激发态向基态跃迁时释放  $\gamma$  光子的过程, 不改变原子序数和质量数, 仅释放能量, 常伴随  $\alpha$  或  $\beta$  衰变发生, 如  $^{234}\text{Th}$  衰变生成的激发态  $^{230}\text{Ra}$  会通过  $\gamma$  衰变释放光子, 回到基态  $^{230}\text{Ra}$ 。

### (二) 衰变的基本定律与数学表达

放射性衰变遵循指数衰减定律, 其核心是: 在单位时间内, 放射性同位素的衰变概率为常数, 与核素的数量和外界条件 (温度、压力、化学状态) 无关。设初始时刻 ( $t=0$ ) 放射性核素的原子数为  $N_0$ , 经过时间  $t$  后剩余的原子数为  $N$ , 则指数衰减定律的数学表达式为:  $N = N_0 e^{(-\lambda t)}$ , 其中  $\lambda$  为衰变常数 (单位: 时间 $^{-1}$ ), 反映核素的衰变快慢,  $\lambda$  越大, 衰变越快。

基于衰变常数可定义半衰期 ( $T_{1/2}$ ), 即放射性核素的原子数减少一半所需的时间, 半衰期与衰变常数的关系为:  $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda \approx 0.693 / \lambda$ 。半衰期是放射性核素的固有属性, 不受外界条件影响, 是放射性同位素应用 (如定年、示踪) 的核心参数。此外, 还常用平均寿命 ( $\tau$ ) 描述衰变特征, 平均寿命  $\tau = 1/\lambda = T_{1/2} / \ln 2$ , 代表放射性核素从生成到衰变的平均存在时间。

### (三) 衰变系列与平衡特征

重放射性核素 (如 U、Th) 衰变后生成的子体核素多为放射性核素, 这些核素依次衰变, 直至生成稳定核素, 形成完整的衰变系列。天然存在的衰变系列主要有三个:  $^{238}\text{U}$  系 (铀 - 镭系)、 $^{235}\text{U}$  系 (钍 - 铀系) 和  $^{232}\text{Th}$  系 (钍系), 分别始于  $^{238}\text{U}$  ( $T_{1/2}=4.47 \times 10^9$  年)、 $^{235}\text{U}$  ( $T_{1/2}=7.04 \times 10^8$  年) 和  $^{232}\text{Th}$  ( $T_{1/2}=1.41 \times 10^{10}$  年), 最终均衰变为稳定的铅同位素 ( $^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}$ )。

衰变系列的重要特征是放射性平衡，当系列中各核素的衰变达到稳定状态时，各核素的活度相等（ $A_1=A_2=\cdots=A_n$ ，活度  $A=\lambda N$ ），即达到长期平衡。长期平衡的条件是：母体核素的半衰期远大于子体核素的半衰期（ $T_{1/2\text{母}} \gg T_{1/2\text{子}}$ ），且体系封闭（无核素的加入或流失）。若母体半衰期与子体半衰期相近，则会形成暂时平衡，子体活度先增长至最大值后逐渐衰减，最终与母体活度保持固定比例。放射性平衡是放射性同位素定年、辐射剂量计算的重要理论基础。

### 三、主要放射性同位素的核素特征

#### （一）铀系同位素（ $^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ ）的核心参数

铀的天然同位素主要有  $^{238}\text{U}$  和  $^{235}\text{U}$ ，人工合成同位素包括  $^{233}\text{U}$ 、 $^{239}\text{U}$  等。 $^{238}\text{U}$  是自然界丰度最高的铀同位素，占天然铀的 99.2745%，半衰期  $4.47 \times 10^9$  年，衰变常数  $\lambda=1.551 \times 10^{-10} \text{年}^{-1}$ ，衰变系列包含 18 个核素，最终衰变为  $^{206}\text{Pb}$ ，衰变过程中释放 8 个  $\alpha$  粒子和 6 个  $\beta^-$  粒子，总衰变能量约 47.7MeV； $^{235}\text{U}$  占天然铀的 0.720%，半衰期  $7.04 \times 10^8$  年，衰变常数  $\lambda=9.849 \times 10^{-10} \text{年}^{-1}$ ，衰变系列包含 15 个核素，最终衰变为  $^{207}\text{Pb}$ ，释放 7 个  $\alpha$  粒子和 4 个  $\beta^-$  粒子，总衰变能量约 46.4MeV。

$^{238}\text{U}$  与  $^{235}\text{U}$  的丰度比（ $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ ）是重要的地球化学参数，自然界中该比值相对稳定，平均值约为 137.88，仅在特殊地质过程（如铀矿化、核反应）中发生微小变化，可用于示踪地质过程和铀的来源。人工合成的  $^{233}\text{U}$  半衰期为  $1.59 \times 10^5$  年，是核反应堆的重要核燃料，通过钍（ $^{232}\text{Th}$ ）吸收中子生成。

#### （二）钍系同位素（ $^{232}\text{Th}$ ）的核心参数

钍的天然同位素主要为  $^{232}\text{Th}$ ，占天然钍的 100%，人工合成同位素包括  $^{229}\text{Th}$ 、 $^{230}\text{Th}$ 、 $^{231}\text{Th}$  等。 $^{232}\text{Th}$  半衰期长达  $1.41 \times 10^{10}$  年，衰变常数  $\lambda=4.916 \times 10^{-11} \text{年}^{-1}$ ，衰变系列包含 14 个核素，最终衰变为稳定同位素  $^{208}\text{Pb}$ ，衰变过程中释放 6 个  $\alpha$  粒子和 4 个  $\beta^-$  粒子，总衰变能量约 42.7MeV。

$^{232}\text{Th}$  的子体核素  $^{230}\text{Th}$ （半衰期  $7.54 \times 10^4$  年）和  $^{228}\text{Th}$ （半衰期 1.91 年）是重要的环境示踪核素， $^{230}\text{Th}$  因半衰期适中，可用于海洋沉积物、珊瑚礁的年代测定（时间尺度  $10^4 \sim 10^6$  年）； $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  活度比可示踪水体混合过程和颗粒物迁移速率。钍同位素的化学性质稳定，水解能力强，在自然环境中多以固相形式存在，迁移能力弱于铀同位素。

#### （三）钾 - 40（ $^{40}\text{K}$ ）及其他重要放射性同位素

$^{40}\text{K}$  是钾的唯一放射性同位素，占天然钾的 0.0117%，半衰期  $1.25 \times 10^9$  年，衰变常数  $\lambda=5.543 \times 10^{-10} \text{年}^{-1}$ ，具有双衰变模式：约 89.3% 通过  $\beta^-$  衰变生成  $^{40}\text{Ca}$ ，约 10.7% 通过电子捕获衰变生成  $^{40}\text{Ar}$ ，总衰变能量约 1.31MeV。 $^{40}\text{K}$  的衰变是钾 - 氩（K-Ar）

定年法的基础,可用于火山岩、变质岩的年代测定(时间尺度  $10^5 \sim 10^9$  年),同时  $^{40}\text{K}$  是地壳和生物圈中分布最广泛的放射性同位素,其衰变产生的辐射是天然本底辐射的重要组成部分。

其他重要放射性同位素包括碳-14 ( $^{14}\text{C}$ , 半衰期 5730 年)、氚 ( $^3\text{H}$ , 半衰期 12.3 年)、镭-226 ( $^{226}\text{Ra}$ , 半衰期 1600 年)等。 $^{14}\text{C}$  主要源于宇宙线与氮的核反应,可用于考古遗址、沉积物的年代测定(时间尺度  $10^3 \sim 10^4$  年);  $^3\text{H}$  是氢的放射性同位素,自然界中含量极低,主要通过核工业排放产生,可作为水体示踪剂;  $^{226}\text{Ra}$  是  $^{238}\text{U}$  系的子体核素,具有强放射性,在铀矿开采区和温泉水中可能异常富集,对生态环境有潜在影响。

#### 四、放射性同位素衰变规律的应用基础

##### (一) 地质年代学应用的理论依据

放射性同位素衰变规律是地质年代学的核心理论基础,其原理是:利用放射性同位素的半衰期恒定、衰变产物可定量测定的特性,通过测定地质体中母体核素与子体核素的含量比值,结合初始子体核素的含量,计算地质体的形成年龄。

常用的放射性定年方法包括:铀-铅(U-Pb)定年法(基于  $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$  和  $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$  衰变,适用于锆石、磷灰石等矿物,定年范围  $10^6 \sim 4.6 \times 10^9$  年)、钾-氩(K-Ar)和氩-氩(Ar-Ar)定年法(基于  $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$  衰变,适用于火山岩、云母等,定年范围  $10^5 \sim 10^9$  年)、钍-铀(Th-U)定年法(基于  $^{230}\text{Th} \rightarrow ^{234}\text{U}$  衰变,适用于碳酸盐岩、氧化物,定年范围  $10^3 \sim 10^6$  年)、碳-14 ( $^{14}\text{C}$ )定年法(基于  $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$  衰变,适用于有机质、沉积物,定年范围  $100 \sim 5 \times 10^4$  年)。这些方法为地球演化、地质事件、考古学研究提供了精确的时间标尺。<sup>①</sup>

##### (二) 地球化学示踪的核心原理

放射性同位素的衰变特征(如半衰期、衰变产物、同位素比值)可作为地球化学过程的“示踪剂”,其核心原理是:不同来源、不同地质过程中的放射性同位素组成存在差异,这些差异会随物质迁移和反应过程被保留下来,通过测定同位素比值的变化,可反推物质的来源、迁移路径和演化过程。

例如,  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  比值在不同地质体中相对稳定,但在铀矿化过程中可能因同位素分馏发生微小变化,可用于示踪铀的成矿来源;  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  活度比可反映铀的迁移过程,氧化环境中铀的迁移会导致  $^{234}\text{U}$  过剩(活度比  $> 1$ ),还原环境中铀的沉淀会使活度比趋近于 1; 海洋沉积物中  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  比值可示踪沉积物的物源,大陆来源的沉积物

<sup>①</sup> 李献华,李扬,李秋立,等. 同位素地质年代学新进展与发展趋势[J]. 地质学报, 2022, 96 (01): 104-122.



$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  比值较低,海洋自生沉积物比值较高。此外,人工合成放射性同位素(如 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ )可用于示踪污染物的扩散路径和环境迁移过程。

### (三) 辐射场计算与核技术应用的基础

放射性同位素的衰变规律是辐射场计算和核技术应用的理论基础。辐射场计算中,通过衰变常数、活度等参数可计算放射性物质的辐射剂量(如吸收剂量、当量剂量),为辐射防护、核设施安全评估提供依据;例如,铀矿开采过程中,需根据 $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 等核素的衰变特征,计算矿井内的 $\gamma$ 辐射剂量和氡( $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ 的子体)浓度,制定合理的防护措施。

核技术应用中,放射性同位素的衰变特性被广泛用于工业、农业、医疗等领域:工业上,利用 $\gamma$ 射线的穿透能力进行无损检测(如焊缝检测、材料厚度测量),利用放射性同位素的衰变热进行地热发电;农业上,利用放射性同位素的辐射作用进行作物育种(辐射育种)、病虫害防治;医疗上,利用放射性同位素(如 $^{131}\text{I}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ )进行疾病诊断和治疗(放射性核素治疗),其衰变规律决定了核素的使用剂量和治疗周期。

## 第三节 放射性矿物类型与分布特征

### 一、放射性矿物的分类体系

#### (一) 按化学成分与晶体结构分类

放射性矿物的分类核心基于化学成分与晶体结构,可划分为五大类,各类矿物因成矿环境差异呈现独特特征:

**铀矿物:**以铀为主要阳离子的矿物,晶体结构多为氧化物、硅酸盐、磷酸盐等类型。氧化物类以沥青铀矿( $\text{UO}_2$ )为代表,属等轴晶系,具强放射性;硅酸盐类如铀石( $\text{USiO}_4$ ),四方晶系,常见于酸性岩浆岩与沉积岩中;磷酸盐类如磷铀矿( $\text{Ca}(\text{UO}_2)_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ),斜方晶系,是表生氧化带的典型矿物。此外,还有碳酸盐类(如菱铀矿)、硫酸盐类(如铀矾)等次要类型。

**钍矿物:**以钍为主要阳离子的矿物,多为氧化物、磷酸盐和硅酸盐,化学性质稳定。氧化物类如方钍石( $\text{ThO}_2$ ),等轴晶系,常见于碱性岩与伟晶岩;磷酸盐类如独居石( $(\text{Ce},\text{La},\text{Th})\text{PO}_4$ ),单斜晶系,是钍的主要工业矿物,常与稀土元素共生;硅酸盐类如钍石( $\text{ThSiO}_4$ ),四方晶系,产于花岗岩与变质岩中。

**铀钍共生矿物:**铀、钍同时作为主要成分的矿物,多形成于岩浆分异晚期或热液活动阶段。典型代表为钍铀矿( $(\text{Th},\text{U})\text{O}_2$ ),等轴晶系,含铀20%~40%、钍30%~60%,常见于伟晶岩与花岗岩;复稀金矿( $(\text{Y},\text{Ca},\text{Th},\text{U})(\text{Nb},\text{Ta},\text{Ti})_2\text{O}_6$ ),斜方晶系,兼具铀、钍与稀土、铌钽元素,产于碱性岩与热液脉中。

含放射性元素的副矿物：放射性元素（U、Th）作为次要成分混入其他矿物晶格，属广泛分布的类型。锆石（ $\text{ZrSiO}_4$ ）是典型代表，四方晶系，含铀 0.01%~1%、钍 0.01%~0.5%，几乎遍布各类岩石；磷灰石（ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ ），六方晶系，含铀 0.001%~0.1%、钍 0.001%~0.05%，常见于岩浆岩与沉积岩；榍石（ $\text{CaTiSiO}_5$ ），单斜晶系，含铀、钍总量通常小于 0.1%，产于中酸性岩浆岩。

人工合成放射性矿物：通过人为核反应或工业制备形成的矿物，主要用于核工业领域。如铀酸铵复盐（ $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ ），用于核燃料制备；钷酸钡（ $\text{BaPuO}_3$ ），属核废料固化材料；人工合成的铀钍氧化物固溶体，用于反应堆燃料元件。

## （二）按成矿作用类型分类

依据成矿作用的地质背景与形成过程，放射性矿物可分为四类，反映其成因关联与产出环境：

岩浆型放射性矿物：形成于岩浆结晶分异过程，主要产于酸性、碱性岩浆岩及伟晶岩中。如花岗岩中的沥青铀矿、伟晶岩中的独居石与钍石，成矿与岩浆晚期的流体活动密切相关，矿物颗粒多较大，结晶度高。

热液型放射性矿物：由含矿热液交代或充填形成，常见于断裂带、岩性接触带。如热液脉中的沥青铀矿、铀黑（ $\text{UO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ），常与硫化物（黄铁矿、方铅矿）、石英、碳酸盐矿物共生，矿物多呈细粒状或胶状集合体。

沉积型放射性矿物：形成于沉积作用过程，包括机械沉积、化学沉积与生物沉积。机械沉积矿物如砂岩中的锆石、磷灰石碎屑；化学沉积如蒸发岩中的铀矾、碳酸盐岩中的磷钙铀矿；生物沉积如藻叠层石中的铀富集矿物，常呈层状或结核状产出。

变质型放射性矿物：由原有放射性矿物经变质作用改造形成，或在变质过程中新生。如区域变质岩中的铀石、动力变质带中的沥青铀矿重结晶产物，矿物形态受变质程度影响，可呈片理状或透镜状分布。

## 二、放射性矿物的空间分布规律

### （一）全球尺度的分布特征

全球放射性矿物的分布受板块构造、岩浆活动与地层演化控制，呈现明显的区域聚集性：

环太平洋成矿带：集中了全球 60% 以上的铀、钍矿床，如南美安第斯山脉的铀矿带（含智利、秘鲁铀矿床）、北美西部的砂岩型铀矿（美国 Powder River 盆地），成矿与太平洋板块俯冲引发的岩浆活动、构造运动密切相关，以热液型、砂岩型放射性矿物为主。

欧亚成矿带：西起欧洲海西造山带，东至亚洲东部滨太平洋带，包括中亚造山带

的铀钍矿床（如哈萨克斯坦伊犁铀矿田）、我国华南花岗岩型铀矿带，矿物产出与古生代 - 中生代的造山运动、酸性岩浆侵入相关，岩浆型、热液型矿物占主导。

非洲 - 澳大利亚古老陆块区：产于前寒武纪克拉通及绿岩带，如南非的维特瓦特兰德盆地铀金矿、澳大利亚的奥林匹克坝铀铜金矿床，放射性矿物（沥青铀矿、独居石）多与古老沉积岩、变质岩共生，成矿时代久远（前寒武纪）。

大洋中脊与洋底区域：主要分布含铀、钍的副矿物（锆石、磷灰石），产于洋中脊玄武岩、洋底沉积物中，铀钍含量较低，但分布广泛，是海洋放射性元素循环的重要载体。

## （二）区域尺度的分布控制因素

区域尺度上，放射性矿物的分布受岩石类型、构造条件与地层岩性三重因素控制：

岩石类型控制：酸性岩（花岗岩、流纹岩）是放射性矿物的主要载体，因富含硅铝质，利于铀、钍的富集，如我国江西相山花岗岩体中的沥青铀矿，铀含量可达 0.1%~1%；碱性岩（正长岩、霞石正长岩）中常见钍矿物与铀钍共生矿物，如俄罗斯科拉半岛碱性岩中的独居石矿床。超基性岩、基性岩中放射性矿物含量极低，仅含少量锆石、磷灰石副矿物。

构造条件控制：深大断裂带是放射性矿物迁移富集的关键通道，如我国北方的狼山 - 渣尔泰山断裂带、南方的钦杭结合带，断裂活动不仅为含矿热液提供运移路径，还通过岩石破碎形成有利储矿空间，使放射性矿物在断裂旁侧的次级构造（节理、裂隙）中聚集，形成带状分布的矿床。

地层岩性控制：特定地层单元因岩性适配性成为放射性矿物的富集层位，如砂岩型铀矿多产于中生代陆相砂岩（疏松多孔、利于流体渗透），我国鄂尔多斯盆地的东胜铀矿产于侏罗系直罗组砂岩；磷块岩地层中常伴生铀、钍矿物，如我国云南昆阳磷矿的磷灰石含铀量可达 0.01%~0.05%。

## （三）矿床尺度的分布特征

在矿床范围内，放射性矿物的分布呈现显著的空间分带性与共生组合规律：

水平分带：从矿床中心到外围，矿物类型与含量呈规律性变化。如热液型铀矿床，中心部位以沥青铀矿为主，伴生硫化物；向外围逐渐过渡为铀的氧化物（铀黑、磷钍铀矿），再到外围无放射性矿物的围岩，形成“原生矿核 - 氧化带 - 围岩”的水平分带。

垂直分带：随深度增加，矿物组合与成矿条件相关联。如砂岩型铀矿床，浅部（埋深 < 500m）以氧化型铀矿物（铀矾、磷钍铀矿）为主；中深部（500~1500m）为原生沥青铀矿，伴生黄铁矿等还原矿物；深部（> 1500m）因温度压力升高，出现铀钍共生矿物（钍铀矿）。

共生组合规律：放射性矿物常与特定矿物共生，形成特征性组合。铀矿物的共生组合多为“沥青铀矿 - 黄铁矿 - 石英 - 方解石”（热液型）、“沥青铀矿 - 黏土矿物 - 长石 - 石英”（砂岩型）；钍矿物的共生组合多为“独居石 - 稀土矿物 - 锆石 - 长石”（伟晶岩型）、“方钍石 - 霞石 - 霓石”（碱性岩型），这些组合可作为找矿标志。

### 三、典型放射性矿物的产出特征与分布实例

#### （一）铀矿物的典型产出与分布

沥青铀矿 ( $\text{UO}_2$ )：最主要的工业铀矿物，产出环境多样，以热液型和沉积型为主。热液型沥青铀矿常见于花岗岩体内部或接触带的断裂脉中，如我国江西相山铀矿田，沥青铀矿呈细脉状、浸染状分布于花岗岩裂隙中，伴生黄铁矿、萤石；沉积型沥青铀矿多见于砂岩孔隙或泥岩夹层，如美国怀俄明州铀矿，沥青铀矿呈结核状、薄膜状产于侏罗系砂岩中。全球主要分布于中国、美国、哈萨克斯坦、澳大利亚等国，我国华南、华北、西北均有大型矿床分布。

铀石 ( $\text{USiO}_4$ )：典型的岩浆 - 热液型铀矿物，主要产于酸性岩浆岩与变质岩中。晶体呈四方柱状，颜色从黄色到黑色，硬度 6.5~7.0。我国广东诸广山花岗岩体中的铀石，与沥青铀矿共生，形成于岩浆晚期热液阶段；俄罗斯贝加尔湖地区的变质岩中，铀石呈细粒状分布于片麻岩的石英脉中。

磷钙铀矿 ( $\text{Ca}(\text{UO}_2)_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )：表生氧化带的特征铀矿物，由原生铀矿物氧化次生形成。颜色鲜艳，呈黄色、黄绿色，具强放射性，硬度 2~3，密度 4.2~4.6g/cm<sup>3</sup>。我国湖南水口山铅锌矿的氧化带中，磷钙铀矿呈皮壳状、薄膜状覆盖于原生矿物表面；澳大利亚镭锭港铀矿的氧化带中，该矿物与铀黑、褐铁矿共生。

#### （二）钍矿物的典型产出与分布

独居石 ( $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Th})\text{PO}_4$ )：最主要的钍工业矿物，同时富含稀土元素，属岩浆型、伟晶岩型矿物。晶体呈板状、柱状，颜色从黄色到红褐色，硬度 5~5.5，密度 4.9~5.5g/cm<sup>3</sup>。我国内蒙古白云鄂博矿床的独居石，产于伟晶岩与碳酸岩脉中，伴生氟碳铈矿、萤石；巴西米纳斯吉拉斯州的独居石矿床，产于花岗岩伟晶岩中，是世界最大的钍稀土共生矿床之一。全球独居石主要分布于中国、巴西、印度、澳大利亚，我国内蒙古、四川、江西等地储量丰富。

方钍石 ( $\text{ThO}_2$ )：典型的氧化物型钍矿物，产于碱性岩、伟晶岩及钍铀矿床的原生带。颜色从黑色到深灰色，具半金属光泽，硬度 6.5~7.0，密度 8.9~9.7g/cm<sup>3</sup>。俄罗斯科拉半岛碱性岩中的方钍石，与霞石、霓石共生；我国辽宁凤城碱性岩体中，方钍石呈细粒状分布于岩体内的富稀土脉中。

钍石 ( $\text{ThSiO}_4$ )：岩浆型钍矿物，主要产于花岗岩、花岗闪长岩及伟晶岩中。晶



体呈四方柱状，颜色从浅黄到深褐，硬度 6.5~7.0，密度 6.4~6.7g/cm<sup>3</sup>。美国科罗拉多州花岗岩中的钍石，与锆石、磷灰石共生；我国安徽黄山花岗岩体中，钍石呈浸染状分布于岩体边缘相。

### （三）含放射性元素副矿物的产出与分布

锆石（ZrSiO<sub>4</sub>）：分布最广泛的含放射性元素副矿物，几乎存在于所有岩浆岩、变质岩与沉积岩中。晶体呈四方双锥状，颜色多样（无色、粉色、褐色），硬度 7.5，密度 4.6~4.7g/cm<sup>3</sup>，含铀 0.01%~1%、钍 0.01%~0.5%。花岗岩中的锆石多为自形晶，沉积岩中的锆石多为碎屑颗粒，是铀 - 铅定年的核心矿物，全球各类岩石中均有产出，我国华北克拉通的古老花岗岩中，锆石年龄可达 3.8Ga。

磷灰石（Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(F,Cl,OH)）：常见的含铀钍副矿物，产于岩浆岩、沉积岩与变质岩中。晶体呈六方柱状，颜色从无色到浅绿色，硬度 5，密度 3.1~3.3g/cm<sup>3</sup>，含铀、钍总量通常小于 0.1%。中酸性岩浆岩中的磷灰石多为原生矿物，沉积磷块岩中的磷灰石可富集铀钍，我国云南、贵州的磷矿中，磷灰石含铀量可达 0.01%~0.05%，具一定工业价值。

榍石（CaTiSiO<sub>5</sub>）：含少量铀钍的副矿物，主要产于中酸性岩浆岩与接触变质岩中。晶体呈楔形、菱形，颜色从黄色到褐色，硬度 5~5.5，密度 3.4~3.6g/cm<sup>3</sup>，含铀、钍总量通常小于 0.1%。我国秦岭造山带的花岗岩中，榍石与锆石、磷灰石共生，是区域岩浆活动的重要指示矿物；接触变质岩中的榍石，常因热液改造导致铀钍局部富集。

## 第四节 放射性地质年代学原理

### 一、放射性地质年代学的核心理论基础

#### （一）定年的核心前提假设

放射性地质年代学以放射性同位素衰变规律为核心，其精准定年依赖三大关键前提，是保证年龄数据可靠性的基础：

封闭体系假设：地质体（矿物或岩石）自形成以来，需保持母体同位素与子体同位素的“封闭”，即无外界同位素的加入或流失。这一假设要求定年对象需具备稳定的物理化学性质，如锆石、磷灰石等矿物的晶格结构致密，能有效阻挡同位素扩散，是理想的定年载体；而易受后期热液、风化作用影响的矿物（如长石），可能因晶格破坏导致同位素丢失，需结合地质背景验证封闭性。

衰变常数恒定假设：放射性同位素的衰变常数（ $\lambda$ ）是固有属性，不受外界物理化学条件（温度、压力、化学状态）影响。实验验证表明，在地球内部常见温压范围

(0~1000°C、0~10GPa)内,铀、钍、钾等元素的衰变常数误差小于0.1%,为定年提供了稳定的计算依据;仅在极端天体物理条件(如超新星爆发)下,衰变常数才可能发生微小变化,对地球地质定年无实质影响。

初始子体可量化假设:地质体形成时,子体同位素的初始含量需可准确评估或忽略。对于长半衰期同位素定年(如U-Pb、Th-Pb),若地质体形成时代久远(>10<sup>8</sup>年),初始子体同位素含量相对于放射性成因子体可忽略;对于短半衰期同位素(如<sup>14</sup>C),则需通过同期标准样品(如树轮、珊瑚)校准初始子体含量。

## (二) 年龄计算的基本公式与推导

基于放射性衰变的指数衰减定律,结合母体与子体同位素的含量关系,推导出地质年龄计算的核心公式。设某地质体形成时(t=0)的母体同位素原子数为N<sub>0</sub>,子体同位素原子数为D<sub>0</sub>,经过时间t后,剩余母体原子数为N,放射性成因子体原子数为D\*=D-D<sub>0</sub>(D为现今总子体原子数),则:

$$\text{衰变定律基础表达式: } N = N_0 e^{(-\lambda t)}$$

$$\text{子体生成关系: } D^* = N_0(1 - e^{(-\lambda t)})$$

$$\text{年龄计算公式: } t = (1/\lambda) \ln(1 + D^*/N)$$

当定年体系满足“初始子体D<sub>0</sub>=0”(如锆石形成时几乎不含铅),可直接通过测定D\*(放射性成因铅)与N(铀)的比值计算年龄;若D<sub>0</sub>≠0(如钾-氩定年中,岩石形成时可能含少量初始氩),则需通过同位素比值法(如<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar比值)扣除初始子体贡献,修正后再代入公式计算。

## (三) 同位素体系选择的基本原则

不同放射性同位素体系的半衰期、衰变模式及适用范围存在差异,选择定年体系需遵循三大原则:

时间尺度匹配原则:同位素体系的半衰期需与地质体年龄处于同一数量级。长半衰期体系(U-Pb、Th-Pb、K-Ar)适用于10<sup>6</sup>~4.6×10<sup>9</sup>年的地质体(如地球形成、岩浆活动);中短半衰期体系(<sup>14</sup>C、U-Th)适用于10<sup>2</sup>~10<sup>6</sup>年的地质体(如考古遗址、海洋沉积物);超短半衰期体系(如<sup>226</sup>Ra-<sup>230</sup>Th)适用于10<sup>1</sup>~10<sup>4</sup>年的快速地质过程(如温泉沉积、冰川消融)。

载体矿物适配原则:同位素体系需与定年矿物的化学性质匹配。铀、钍同位素体系适用于富含铀钍的矿物(锆石、磷灰石、独居石);钾同位素体系适用于富钾矿物(长石、云母、角闪石);碳同位素体系适用于有机质(木材、泥炭、贝壳)。

地质过程响应原则:同位素体系的封闭温度需与地质过程温度匹配。封闭温度是矿物保持同位素封闭的最低温度,如锆石的U-Pb封闭温度高达800~900°C,可记录岩浆结晶年龄;而长石的K-Ar封闭温度为150~250°C,可记录后期热事件年龄。

## 二、主要放射性定年方法的原理与适用范围

### (一) 铀-铅 (U-Pb) 定年法

U-Pb 定年法是应用最广泛、精度最高的定年方法, 基于  $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$  (半衰期  $4.47 \times 10^9$  年) 和  $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$  (半衰期  $7.04 \times 10^8$  年) 双衰变体系, 核心优势在于可通过两种同位素比值交叉验证年龄可靠性。

定年原理: 锆石、磷灰石等矿物形成时, 铀优先进入晶格, 而铅含量极低 (初始铅可忽略)。通过测定矿物中  $^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$  与  $^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}$  的含量, 分别计算两种衰变体系的年龄 ( $t_{206/238}$ 、 $t_{207/235}$ ), 若两者一致 (或在误差范围内重合), 则为可靠的结晶年龄; 若不一致, 可能反映矿物经历后期热扰动导致的铅丢失。

技术方法: 传统方法为热电离质谱法 (TIMS), 需通过化学溶样、分离提纯铀铅同位素, 精度达 0.1%~0.5%; 现代主流方法为激光剥蚀多接收电感耦合等离子体质谱法 (LA-MC-ICP-MS), 可实现微区原位定年 (空间分辨率 10~50 $\mu\text{m}$ ), 无需化学处理, 效率大幅提升, 适用于矿物内部年龄差异分析。

适用范围: 主要用于岩浆岩 (花岗岩、玄武岩)、变质岩 (片麻岩、榴辉岩) 的形成年龄测定, 以及碎屑锆石物源示踪; 定年范围覆盖  $10^6$ ~ $4.6 \times 10^9$  年, 是地球早期演化、前寒武纪地质事件研究的核心方法, 如通过锆石 U-Pb 定年确定华北克拉通最古老岩石年龄约 3.8Ga。

### (二) 钾-氩 (K-Ar) 与氩-氩 (Ar-Ar) 定年法

K-Ar 定年法基于  $^{40}\text{K}$  的双衰变模式 ( $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca}$ , 分支比 89.3%;  $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ , 分支比 10.7%), Ar-Ar 定年法是其改进方法, 通过中子照射将  $^{39}\text{K}$  转化为  $^{39}\text{Ar}$ , 以  $^{39}\text{Ar}$  为钾的示踪剂, 提高定年精度。

定年原理: 富钾矿物 (如黑云母、白云母、长石) 形成时, 钾均匀分布于晶格, 生成的放射性成因  $^{40}\text{Ar}$  被封闭在矿物内部。K-Ar 定年通过测定矿物中  $^{40}\text{K}$  含量与  $^{40}\text{Ar}$  放射性成因含量, 代入公式  $t = (1/\lambda) \ln (1 + (\lambda/\lambda_{\text{Ar}}) \times (^{40}\text{Ar}^*/^{40}\text{K}))$  计算年龄 ( $\lambda$  为  $^{40}\text{K}$  总衰变常数,  $\lambda_{\text{Ar}}$  为  $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$  衰变常数); Ar-Ar 定年通过中子照射使矿物中  $^{39}\text{K} \rightarrow ^{39}\text{Ar}$ , 利用  $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$  比值计算年龄, 可有效扣除初始氩和大气氩的干扰。

技术方法: K-Ar 定年需采用真空熔融法提取氩气, 通过质谱仪测定氩同位素比值; Ar-Ar 定年需先在反应堆中进行中子照射, 再通过阶段升温熔融法 (或激光熔融法) 提取氩气, 可获得矿物的热释光年龄谱, 识别后期热事件。

适用范围: 适用于火山岩、侵入岩、变质岩的年龄测定, 以及构造活动 (如断层滑动)、热液活动的时代限定; 定年范围  $10^5$ ~ $10^9$  年, 尤其适合中生代火山岩定年 (如夏威夷火山岩的 Ar-Ar 年龄可精确到万年级), 是研究板块构造运动、火山活动历史的重要工具。

### （三）钍-铀（Th-U）定年法

Th-U 定年法基于铀系不平衡原理，主要利用  $^{238}\text{U}$  衰变系列中的中间子体核素（ $^{234}\text{U}$ 、 $^{230}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ ），核心适用于年轻地质体与表生过程定年。

定年原理：在表生环境中（如海洋、湖泊、洞穴），铀易溶解迁移，而钍因水解能力强，多吸附于颗粒物表面沉淀，导致铀钍同位素体系失衡（ $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$  活度比  $\neq 1$ ）。随着时间推移，失衡的同位素体系逐渐向放射性平衡演化，通过测定样品中  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 、 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  活度比，可计算样品的形成年龄。

技术方法：主要采用 MC-ICP-MS 测定同位素比值，样品需经化学分离提纯铀钍同位素，扣除试剂空白和仪器干扰，精度可达 1%~5%；对于碳酸盐岩（珊瑚、钟乳石）、海洋沉积物等样品，可直接测定其铀钍同位素比值，无需复杂前处理。

适用范围：定年范围  $10^3\sim 10^6$  年，适用于珊瑚礁、海洋沉积物、洞穴碳酸盐、温泉沉积等的年龄测定，是研究第四纪气候变迁、海平面变化、冰川演化的关键方法，如通过珊瑚礁 Th-U 定年重建过去 50 万年的海平面变化曲线。

### （四）碳-14（ $^{14}\text{C}$ ）定年法

$^{14}\text{C}$  定年法是应用最广泛的短半衰期定年方法，基于  $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$  的  $\beta^-$  衰变（半衰期 5730 年），核心适用于有机质与年轻地质体定年。

定年原理：宇宙线与大气中  $^{14}\text{N}$  发生核反应生成  $^{14}\text{C}$ ， $^{14}\text{C}$  与氧结合形成  $\text{CO}_2$ ，通过光合作用进入生物圈，使生物体内  $^{14}\text{C}$  与大气中  $^{14}\text{C}$  保持平衡。生物死亡后，停止与大气交换，体内  $^{14}\text{C}$  按指数规律衰变，通过测定样品中  $^{14}\text{C}$  的剩余含量与现代碳的比值，可计算生物死亡或样品形成的年龄。

技术方法：传统方法为液体闪烁计数法，通过测量  $^{14}\text{C}$  衰变产生的  $\beta$  粒子计数率计算年龄，精度较低（误差约 1%~2%）；现代方法为加速器质谱法（AMS），直接计数  $^{14}\text{C}$  原子数，灵敏度大幅提升，样品需求量从克级降至毫克级，精度可达 0.3%~0.5%，可测定年龄上限从 4 万年拓展至 5 万年。

适用范围：定年范围  $100\sim 5\times 10^4$  年，适用于考古遗址中的木材、木炭、骨骼、贝壳，以及第四纪沉积物中的泥炭、腐殖质等；是考古学、第四纪地质学、古气候学的核心定年方法，如通过周口店遗址的木炭  $^{14}\text{C}$  定年，确定北京猿人的生活时代约 70 万~20 万年。

## 三、定年过程中的关键技术与误差控制

### （一）样品采集与预处理技术

样品质量直接决定定年结果的可靠性，样品采集与预处理需遵循严格规范：

样品采集原则：选择新鲜、未受后期风化、热液改造的样品，避免同位素丢失或污染；优先采集结晶度高、颗粒粗大的单矿物（如锆石、黑云母），确保矿物的封闭性；



采集过程中避免使用含放射性元素的工具（如铅制工具），防止人为污染。

样品预处理流程：岩石样品需经破碎、筛分、重选（如摇床、磁选）、浮选等步骤，分离提纯目标矿物；矿物样品需通过双目镜挑选，去除杂质和蚀变颗粒，确保纯度 > 99%；有机质样品（如木材、骨骼）需去除腐殖质、碳酸盐等杂质，通过酸碱处理（如 HCl、NaOH 浸泡）提纯有机碳；对于易受污染的样品（如海水、土壤），需采用化学分离方法（如离子交换色谱）分离目标同位素。

## （二）同位素测试技术与仪器原理

高精度同位素测试依赖先进的分析仪器，核心技术与仪器原理如下：

热电离质谱法（TIMS）：将提纯后的样品涂覆于金属带（如钽带、铯带），通过高温加热使样品离子化，离子经加速、聚焦后进入质谱仪，根据质荷比分离不同同位素，通过法拉第杯或电子倍增器计数离子强度，计算同位素比值；适用于 U-Pb、Th-Pb 等高精度定年，仪器精度可达  $10^{-6}$ ~ $10^{-7}$ 。

多接收电感耦合等离子体质谱法（MC-ICP-MS）：样品经雾化器转化为气溶胶，进入电感耦合等离子体（ICP）中离子化，离子通过接口进入质谱仪，利用多个法拉第杯同时接收不同同位素，快速测定同位素比值；适用于 U-Pb、Th-U、Ar-Ar 等定年，兼具高精度与高效率，空间分辨率可达微米级。

加速器质谱法（AMS）：将样品离子加速至 MeV 级能量，通过速度选择器、磁分析器分离干扰离子，利用粒子探测器直接计数目标同位素原子数；适用于  $^{14}\text{C}$ 、 $^3\text{H}$  等低丰度同位素定年，灵敏度极高，可检测样品中  $10^{-15}$  量级的同位素比值。

## （三）误差来源与校正方法

放射性定年的误差主要源于样品、测试与理论三大方面，需通过针对性方法校正：

样品相关误差：包括同位素丢失、初始子体评估偏差、样品污染等。同位素丢失可通过矿物内部年龄分布（如锆石 LA-ICP-MS 年龄图谱）识别，采用加权平均法剔除异常数据；初始子体偏差可通过同期标准样品校准（如  $^{14}\text{C}$  定年采用树轮标准），或利用同位素比值法（如  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=295.5$  扣除大气氩）；样品污染可通过空白实验（如试剂空白、仪器空白）扣除，采集过程中严格控制污染源。

测试相关误差：包括仪器精度、化学处理回收率、同位素分馏等。仪器精度可通过多次测量取平均值提升，定期用标准样品校准仪器；化学处理回收率需通过添加示踪剂（如  $^{95}\text{Zr}$ 、 $^{233}\text{U}$ ）监测，确保回收率 > 95%；同位素分馏可通过标准样品校正（如 U-Pb 定年采用 NIST SRM 981 铅标准），或利用同位素比值的质量分馏系数修正。

理论相关误差：主要为衰变常数的不确定性。目前国际公认的衰变常数已通过大量实验校准，误差小于 0.1%，可通过采用国际推荐值（如  $^{238}\text{U}$  衰变常数  $\lambda=1.55125 \times 10^{-10} \text{ 年}^{-1}$ ）降低理论误差；对于高精度定年，需结合不同实验室的衰变常数数据进行交叉验证。

#### （四）年龄数据的地质解释原则

定年结果的地质解释需结合地质背景与矿物学特征，避免单一依赖年龄数据：

匹配地质过程：年龄数据需与地质体的成因过程一致，如锆石 U-Pb 年龄应对应岩浆结晶年龄，而长石 K-Ar 年龄可能记录后期热事件年龄，需结合岩石学、矿物学证据区分；若年龄数据与地质演化史矛盾，需重新检查样品采集、测试过程是否存在问题。

多方法交叉验证：对于关键地质事件，需采用多种定年方法交叉验证，如岩浆岩定年可同时采用 U-Pb、Ar-Ar 方法，若两种方法年龄一致，则结果更可靠；对于年轻地质体，可结合  $^{14}\text{C}$  与 Th-U 定年，拓展定年范围并提升精度。

结合同位素示踪：年龄数据与同位素比值（如 Sr-Nd、Hf 同位素）结合，可更全面揭示地质过程，如通过锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素组成，追溯岩浆源区与地壳演化历史。

### 第五节 放射性元素迁移转化机制

#### 一、放射性元素迁移的核心驱动因素

##### （一）地球动力学驱动因素

地球内部的动力学过程是放射性元素深部迁移的根本驱动力，主要通过岩浆活动、构造运动与热液循环实现。岩浆活动中，放射性元素（U、Th、K）随岩浆熔融从地幔或下地壳向上运移，在岩浆分异过程中，因铀、钍的不相容性（分配系数  $D < 1$ ），优先富集于晚期岩浆熔体，随岩浆侵入或喷发进入浅部地壳；构造运动形成的深大断裂带，为放射性元素迁移提供了关键通道，断裂活动引发的岩石破碎的同时，降低了岩石渗透率，促进含矿流体的运移与聚集；地幔柱上升、岩石圈伸展等过程引发的热液循环，可将深部分散的放射性元素活化，通过热液流体的对流作用迁移至浅部有利构造部位。

##### （二）物理化学驱动因素

物理化学条件的变化是放射性元素迁移的直接诱因，核心包括温度压力变化、氧化还原电位（Eh）与 pH 值波动。温度升高可增强放射性元素的溶解度与扩散速率，如深成环境中（温度  $> 300^{\circ}\text{C}$ ），铀可形成高温稳定的氟化物络合物迁移，而温度降低（如热液上升至浅部）则导致络合物分解，铀沉淀富集；压力变化通过影响流体密度与矿物溶解度调控迁移，压力降低（如岩浆减压侵位）可使流体中挥发性组分（ $\text{CO}_2$ 、 $\text{F}^-$ ）释放，改变放射性元素的络合状态；Eh 值的变化直接控制铀的赋存形态，氧化条件（ $\text{Eh} > 0.2\text{V}$ ）下铀以  $\text{UO}_2^{2+}$  等可溶性离子形式迁移，还原条件（ $\text{Eh} < 0$ ）

则转化为不溶性铀矿物；pH 值通过影响矿物溶解与络合反应，调控放射性元素的迁移能力，酸性环境（pH 利于铀、钍的溶解，中性至碱性环境则促进其沉淀。

### （三）流体与介质驱动因素

流体是放射性元素迁移的主要载体，其类型与介质性质直接影响迁移效率。地质流体（岩浆热液、地下水、盆地流体）通过溶解、络合作用携带放射性元素，其中岩浆热液富含  $F^-$ 、 $Cl^-$ 、 $CO_3^{2-}$  等络合剂，可与铀、钍形成稳定络合物，迁移距离可达数十公里；地下水作为表生环境的主要迁移载体，其流速、离子强度与有机质含量，决定了放射性元素的迁移速率与范围；岩石介质的孔隙度、渗透率与矿物组成，影响流体的运移通道，如砂岩的高孔隙度（10%~30%）为铀的迁移提供了有利空间，而黏土矿物的吸附作用则会阻碍迁移。

## 二、放射性元素的核心转化路径

### （一）化学形态转化路径

放射性元素的化学形态转化是迁移与富集的关键，主要包括氧化还原转化、络合 - 解离转化与吸附 - 解吸转化。氧化还原转化中，铀的价态变化（ $U^{4+} \leftrightarrow U^{6+}$ ）是核心， $U^{4+}$  主要存在于还原环境，形成难溶性的沥青铀矿（ $UO_2$ ），而  $U^{6+}$  在氧化环境中形成可溶性的铀酰离子（ $UO_2^{2+}$ ），并与多种阴离子络合；钍主要以  $Th^{4+}$  存在，其形态转化主要通过水解作用，形成  $Th(OH)_4$  胶体或与  $F^-$ 、 $PO_4^{3-}$  形成络合物；吸附 - 解吸转化中，放射性元素可通过物理吸附（范德华力）、化学吸附（离子交换、化学键合）附着于矿物表面（如黏土矿物、铁锰氧化物），当环境条件（pH、Eh）变化时，又会解吸进入流体继续迁移。

### （二）矿物相转化路径

放射性元素的矿物相转化主要发生在成矿过程与表生改造过程中，体现为原生矿物与次生矿物的相互转化。原生矿物形成于岩浆、热液或沉积环境，如岩浆岩中的锆石、热液脉中的沥青铀矿、沉积岩中的磷灰石，这些矿物是放射性元素的初始赋存载体；表生改造过程中，原生矿物在风化、氧化作用下发生分解，放射性元素释放进入流体，随后在新的物理化学条件下形成次生矿物，如沥青铀矿氧化生成铀黑（ $UO_2 \cdot nH_2O$ ）、磷钙铀矿，钍石风化形成氢氧化钍凝胶。矿物相转化不仅改变了放射性元素的赋存状态，还影响其迁移能力与环境活性。

### （三）同位素分馏转化路径

放射性元素的同位素分馏转化主要源于衰变过程与物理化学分馏效应，是同位素示踪的重要基础。衰变分馏是放射性同位素的固有特征，如  $^{238}U$  衰变生成  $^{206}Pb$ ， $^{235}U$  衰变生成  $^{207}Pb$ ，导致母体与子体同位素比值随时间变化；物理化学分馏则由环境条件

差异引发,如铀的同位素( $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ )在氧化还原过程、结晶沉淀过程中会发生微小分馏(分馏系数.001),这种分馏效应可用于示踪地质过程的环境条件;此外,扩散分馏、生物分馏等也会导致同位素比值的微小变化,为追溯放射性元素的迁移路径提供了依据。

### 三、不同地质环境下的迁移转化机制

#### (一) 岩浆-热液环境中的迁移转化

岩浆-热液环境是放射性元素深部迁移转化的主要场所,机制以熔融-结晶分异、热液络合-沉淀为主。岩浆熔融阶段,铀、钍因不相容性富集于岩浆熔体,随岩浆演化逐渐向晚期熔体迁移;岩浆结晶过程中,锆石、磷灰石等副矿物优先结晶,捕获部分铀、钍,而大部分铀、钍仍残留于熔体中;热液阶段,岩浆分异产生的热液富含 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 等络合剂,与铀形成 $\text{UO}_2\text{F}_2$ 、 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 等络合物,沿断裂带运移,当热液与围岩发生反应,或温压条件降低时,络合物稳定性破坏,铀沉淀形成沥青铀矿、铀石等矿物。该环境下的迁移转化具有规模大、距离远、富集效率高的特点,是大型铀、钍矿床的主要形成机制。

#### (二) 沉积-成岩环境中的迁移转化

沉积-成岩环境中的放射性元素迁移转化主要与流体运移、沉积作用及成岩作用相关,机制以机械搬运、化学沉淀与成岩改造为主。机械搬运过程中,放射性元素(如锆石、磷灰石碎屑)随沉积物搬运至沉积盆地,通过分选作用在特定部位富集;化学沉淀过程中,铀在氧化条件下溶解于水体,随水流迁移至还原环境(如有机质富集层、黄铁矿化带),通过还原作用沉淀形成沥青铀矿;成岩作用阶段,沉积物压实、胶结过程中,孔隙流体中的放射性元素在矿物颗粒表面发生吸附、沉淀,或与胶结物结合形成新的矿物,如磷灰石胶结物中捕获铀、钍。该环境下的迁移转化具有广泛性、多层位富集的特点,形成砂岩型、页岩型、磷块岩型等多种类型的放射性矿床。

#### (三) 表生-风化环境中的迁移转化

表生-风化环境中的放射性元素迁移转化以氧化-溶解、吸附-解吸、胶体迁移为主,是放射性元素从岩石向土壤、水体迁移的关键环节。风化作用中,原生矿物(如长石、锆石)在水、大气、生物的共同作用下发生分解,铀、钍释放进入土壤溶液或地表水体;氧化条件下,铀以 $\text{UO}_2^{2+}$ 形式存在,可与土壤中的黏土矿物、铁锰氧化物发生吸附,或形成可溶性络合物随地下水迁移;钍因水解能力强,释放后迅速形成 $\text{Th}(\text{OH})_4$ 胶体,或吸附于颗粒物表面,几乎不参与水体迁移,主要富集于风化壳上部;生物作用也参与迁移转化过程,植物根系可吸收土壤中的铀、钍,微生物可通过还原作用将 $\text{U}^{6+}$ 转化为 $\text{U}^{4+}$ ,促进铀的沉淀富集。



#### （四）海洋 - 湖泊环境中的迁移转化

海洋 - 湖泊环境中的放射性元素迁移转化与水体化学性质、颗粒物行为密切相关，机制以溶解 - 络合、吸附 - 沉降为主。水体中，铀主要以  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 、 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$  等碳酸络合物形式稳定存在，溶解态铀占比达 60%~80%，随洋流循环迁移；钍则几乎全部吸附于悬浮颗粒物表面，溶解态占比不足 1%，随颗粒物沉降于海底或湖底沉积物；沉积过程中，放射性元素可通过生物吸附（如浮游生物、珊瑚）、化学沉淀（如碳酸盐沉积）等方式富集，形成海洋沉积物型、珊瑚礁型铀钍矿床；此外，水体中的氧化还原界面（如海底缺氧带）是放射性元素沉淀富集的重要场所，铀在还原条件下沉淀，而钍则在氧化条件下吸附沉降。

### 四、迁移转化过程的关键影响因素与调控机制

#### （一）地质构造因素的调控作用

地质构造通过控制流体通道、改变环境条件，调控放射性元素的迁移转化。深大断裂带作为流体运移的主要通道，不仅为放射性元素提供了迁移路径，还通过断裂活动引发的温压变化、岩石破碎，促进放射性元素的活化与沉淀；褶皱构造的轴部、翼部因岩石变形产生大量裂隙，成为热液流体的聚集场所，利于放射性元素的富集；盆地构造的边界断裂、基底起伏控制了沉积中心与流体循环方向，决定了放射性元素的区域分布格局。此外，构造活动的强度与频率，还会影响放射性元素的迁移速率与富集规模，构造活动强烈的区域往往形成大型放射性矿床。

#### （二）流体性质因素的调控作用

流体的化学组成、物理性质直接影响放射性元素的迁移转化效率。流体中的络合剂（ $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ ）可与铀、钍形成稳定络合物，增强其迁移能力，如富含  $\text{CO}_3^{2-}$  的流体可使铀的溶解度提高 1~2 个数量级；流体的 pH 值通过影响络合物稳定性与矿物溶解度，调控放射性元素的形态转化，酸性流体利于铀、钍的溶解，碱性流体则促进其沉淀；流体的温度、压力影响放射性元素的扩散速率与络合反应速率，高温高压流体可携带更多放射性元素，迁移距离更远；此外，流体的氧逸度、盐度等也会通过改变氧化还原条件、离子强度，影响放射性元素的迁移转化。

#### （三）矿物与介质性质的调控作用

矿物与介质的物理化学性质通过吸附、溶解、催化等作用，调控放射性元素的迁移转化。矿物的晶体结构、表面性质决定了其对放射性元素的吸附能力，如黏土矿物（蒙脱石、高岭石）因比表面积大、表面电荷丰富，对铀的吸附容量可达 10~50mg/g；铁锰氧化物（赤铁矿、软锰矿）的表面羟基可与铀形成化学键合，是表生环境中铀的重要吸附载体；介质的孔隙度、渗透率影响流体的运移速度与停留时间，高孔隙度、

高渗透率的介质（如砂岩、断裂破碎带）利于流体与放射性元素的充分作用，促进其迁移与富集；此外，矿物的催化作用可加速放射性元素的氧化还原反应，如黄铁矿可催化  $U^{6+}$  还原为  $U^{4+}$ ，促进铀的沉淀。

#### （四）生物与微生物的调控作用

生物与微生物在表生环境中对放射性元素的迁移转化具有重要调控作用，机制以生物吸附、生物还原、生物矿化为主。植物通过根系吸收土壤中的铀、钾等放射性元素，将其富集于植物体内，部分植物（如蜈蚣草、羊齿类植物）对铀的富集系数可达 100~500，成为放射性元素生物迁移的重要载体；微生物（如细菌、真菌）可通过代谢活动改变周围环境的 Eh、pH 值，或分泌有机酸、螯合剂，促进放射性元素的溶解与迁移；部分微生物还具有还原能力，可将  $U^{6+}$  还原为  $U^{4+}$ ，或将  $Th^{4+}$  转化为稳定的矿物相，促进放射性元素的沉淀富集；此外，生物遗体分解形成的有机质可与放射性元素形成络合物，或作为还原障促进其沉淀，在沉积成矿过程中发挥重要作用。



## 第二章 铀矿地质特征与成矿规律

### 第一节 铀矿床类型与成因分类

#### 一、内生铀矿床类型与成因机制

内生铀矿床形成于地球内部岩浆活动、热液循环等深部地质过程，核心受地球动力学与流体作用控制，是全球重要的铀资源类型之一。

##### （一）岩浆热液型铀矿床

成因机制：该类矿床是岩浆演化晚期热液活动的产物，核心遵循“岩浆分异 - 流体活化 - 构造成位”成矿模式。酸性岩浆（花岗岩、花岗闪长岩）结晶分异过程中，铀因不相容性（分配系数  $D < 1$ ）持续富集于残余熔体，伴随岩浆冷却形成富含  $F^-$ 、 $Cl^-$ 、 $CO_3^{2-}$  的中低温热液（ $150\sim 350^{\circ}C$ ）；含矿热液沿深大断裂、岩体接触带等通道运移，在构造扩容部位或围岩蚀变带中，因温压降低、流体混合引发铀酰络合物（ $UO_2F_2$ 、 $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ ）解离，铀被还原为  $U^{4+}$  并沉淀形成沥青铀矿。南京大学凌洪飞提出的“华南中生代花岗岩铀成矿作用”理论，揭示了花岗岩体与铀矿化的时空耦合规律，证实岩浆演化与构造活动的协同控制作用。

地质特征：矿化围岩以花岗岩、花岗闪长岩为主，部分产于火山岩或沉积岩接触带；矿体形态呈脉状、网脉状、浸染状，受断裂 - 裂隙系统控制明显；矿石矿物以沥青铀矿为主，伴生黄铁矿、萤石、石英等，沥青铀矿不含或仅含痕量钍与稀土元素；围岩蚀变发育，主要为硅化、绿泥石化、碳酸盐化，其中硅化 - 绿泥石化组合常与矿化密切相关；矿石品位中等至富矿（ $0.1\%\sim 1.0\% U$ ），矿床规模以大中型为主。

典型实例：中国江西相山铀矿田，产于中生代花岗岩体内部，受环形断裂与放射状裂隙控制，矿体呈脉状产出，沥青铀矿与萤石、石英共生，是我国最大的岩浆热液型铀矿床；法国中央地块铀矿，产于海西期花岗岩断裂带中，依赖岩浆热液与变质流体的混合作用成矿，为欧洲重要的铀资源基地。

##### （二）碱性岩型铀矿床

成因机制：形成于碱性岩浆的结晶分异与晚期热液阶段，碱性岩浆（霞石正长岩、霓辉正长岩）富含碱金属与挥发分，为铀的活化迁移提供了有利条件。岩浆演化过程中，铀与稀土元素、铌钽等元素同步富集，形成含铀副矿物（烧绿石、易解石）；晚期热液活动进一步活化岩体中的铀，形成含铀碳酸盐溶液，在岩体裂隙或接触带中



因  $\text{CO}_2$  逸出、pH 值升高，铀以铀酰碳酸盐络合物形式沉淀，或与稀土元素共生成矿。

地质特征：产于稳定地块边缘或深断裂带旁侧的碱性岩带，岩体规模多为岩株、岩脉；矿体呈透镜状、脉状分布于岩体内部或接触带，受裂隙系统控制；矿石矿物包括沥青铀矿、铀钍石、烧绿石，伴生稀土矿物（独居石、氟碳铈矿）与碱性矿物（霞石、霓石）；围岩蚀变以碳酸盐化、钠长石化、萤石化为主；矿石品位中等（0.05%~0.3% U），常伴随稀土、铌钽等共伴生矿产，综合利用价值高。

典型实例：俄罗斯科拉半岛罗沃泽尔铀矿，产于霞石正长岩体内，铀与稀土、铌钽共生，是世界典型的碱性岩型铀矿床；中国辽宁凤城碱性岩铀矿，产于中生代霓辉正长岩脉中，矿体受断裂控制，沥青铀矿与烧绿石共生。

### （三）伟晶岩型铀矿床

成因机制：属于岩浆分异晚期的伟晶作用产物，花岗伟晶岩或碱性伟晶岩形成过程中，铀随岩浆熔体的结晶分异持续富集，因伟晶岩结晶速度缓慢，铀得以在晶格中沉淀或形成独立矿物。成矿过程中，流体相的参与促进了铀的迁移与富集，伟晶岩中富含的挥发分（F、B、P）增强了铀的溶解度，最终在伟晶岩的晶洞、裂隙或局部富硅铝质区域形成铀矿物沉淀。

地质特征：产于花岗岩体边缘或褶皱带内的伟晶岩脉中，伟晶岩以粗粒结构、文象结构为特征；矿体呈透镜状、巢状，与伟晶岩同步产出；矿石矿物主要为晶质铀矿、铀石，伴生锆石、独居石、磷灰石等含铀副矿物，矿物化学成分复杂，富含钍与稀土元素；矿石品位较低（0.01%~0.1% U），规模多为中小型，部分矿床因共伴生稀土元素具有综合利用价值。

典型实例：巴西米纳斯吉拉斯州伟晶岩铀矿，产于花岗伟晶岩脉中，晶质铀矿与独居石、绿柱石共生；中国新疆阿尔泰伟晶岩铀矿，铀矿化产于含稀土伟晶岩中，规模较小但综合矿产丰富。

## 二、外生铀矿床类型与成因机制

外生铀矿床形成于地球表面或近地表的沉积、风化、淋积等表生过程，核心受沉积环境、氧化还原界面与流体迁移控制，是当前铀矿勘查的重点类型。

### （一）砂岩型铀矿床

成因机制：该类矿床是外生铀矿床中分布最广、储量最大的类型，核心遵循“沉积 - 成岩 - 后生改造”成矿模式。中新生代陆相盆地（河流、三角洲、湖泊沉积体系）中，疏松多孔的砂岩为铀的迁移与富集提供了储层空间；地表水体在氧化条件下（ $E_h > 0.2V$ ）溶解风化壳中的铀，形成  $\text{UO}_2^{2+}$  为主的可溶性离子，随地下水沿砂岩孔隙运移；当含铀流体遇到还原障（有机质富集层、黄铁矿化带、黏土夹层）时，

$U^{6+}$  被还原为  $U^{4+}$ ，沉淀形成沥青铀矿或吸附于黏土矿物表面。焦养泉团队建立的“沉积 - 成岩 - 铀成矿”系统理论，证实层序地层格架对铀储层发育的控制作用，其研发的“铀储层精细表征技术”已在鄂尔多斯盆地指导发现大型铀矿床。<sup>①</sup>

地质特征：产于中新生代陆相盆地的砂岩储层中，储层砂岩孔隙度 10%~30%、渗透率  $> 1 \times 10^{-3} \mu m^2$ ，利于流体运移；矿体呈层状、似层状，与地层整合产出，受砂体展布与还原障控制；矿石矿物以沥青铀矿为主，呈浸染状、薄膜状、结核状分布于砂岩孔隙或颗粒表面，伴生黄铁矿、有机质；矿石品位中等（0.05%~0.2% U），矿床规模以大型、超大型为主，具有埋藏浅、易开采的特点。

典型实例：中国鄂尔多斯盆地东胜铀矿，产于侏罗系直罗组砂岩中，受河流三角洲沉积体系与还原障联合控制，为超大型砂岩型铀矿床；美国 Powder River 盆地铀矿，储层为白垩系砂岩，依赖地下水循环与有机质还原作用成矿，是全球最大的砂岩型铀矿聚集区之一。

## （二）沉积 - 改造型铀矿床

成因机制：成矿过程经历“沉积富集 - 后期改造”双阶段，早期沉积阶段，铀通过化学沉淀、生物吸附等方式富集于特定沉积岩（页岩、磷块岩、碳酸盐岩）中，形成铀的初始富集层；后期受构造活动、热液流体或地下水改造，初始富集的铀被活化迁移，在岩石裂隙、层间破碎带等有利部位再次沉淀富集，形成工业矿体。改造作用的核心是流体对铀的活化，热液或地下水通过溶解、络合作用将铀从原岩中释放，在新的物理化学条件下（如 pH 升高、还原环境）沉淀。

地质特征：原岩以黑色页岩、磷块岩、碳酸盐岩为主，矿体呈透镜状、脉状、层状，分布于原岩的破碎带或蚀变带；矿石矿物包括沥青铀矿、铀黑、磷钙铀矿，伴生黄铁矿、磷灰石、有机质；矿石品位变化较大（0.03%~0.5% U），规模以中小型为主，部分磷块岩型矿床因铀与磷共生，具有综合开发价值；围岩蚀变以硅化、碳酸盐化、黄铁矿化为特征，与铀矿化关系密切。

典型实例：中国云南昆阳磷矿，产于震旦系磷块岩中，铀呈类质同象赋存于磷灰石中，经后期热液改造局部富集，形成中小型铀矿床；美国佛罗里达磷矿带，磷块岩中铀含量 0.01%~0.05%，通过后期地下水改造实现铀的二次富集，是美国重要的铀资源补充基地。

## 三、变质铀矿床类型与成因机制

变质铀矿床形成于区域变质或动力变质过程，核心受变质流体活化与构造变形控制，铀的富集与原岩性质、变质程度密切相关。

<sup>①</sup> 曾文淇. 铀尾矿中放射性核素的迁移研究 [J]. 江西化工, 2017, (05): 42-45.

### （一）区域变质型铀矿床

成因机制：原岩为富含铀的沉积岩（长石砂岩、页岩）或火山岩，在区域变质作用（温度 300~700℃、压力 0.3~1.0GPa）中，铀从原岩矿物晶格中释放，进入变质流体；变质流体以富水、富 CO<sub>2</sub> 为特征，通过溶解、络合作用携带铀迁移，在变质带的构造扩容部位、岩性界面或还原环境中，铀被还原沉淀形成矿床。高级变质相（麻粒岩相、角闪岩相）中铀主要形成晶质铀矿，低级变质相（绿片岩相）中则以沥青铀矿为主。

地质特征：产于前寒武纪克拉通或褶皱带的区域变质岩系中，原岩为长石砂岩、页岩、火山碎屑岩；矿体呈层状、似层状、透镜状，与变质岩片理平行或斜交，受构造与岩性双重控制；矿石矿物为晶质铀矿、沥青铀矿，伴生锆石、磷灰石、磁铁矿；矿石品位较低（0.01%~0.1% U），规模多为中小型，仅澳大利亚昆士兰州的玛丽·凯瑟林矿床达到大型规模，具有工业意义；围岩蚀变较弱，主要为绿泥石化、绢云母化、硅化。

典型实例：澳大利亚玛丽·凯瑟林铀矿，产于前寒武纪区域变质岩系中，原岩为长石砂岩，经角闪岩相变质作用后铀富集，矿体呈透镜状，晶质铀矿为主要工业矿物；中国内蒙古乌拉山变质岩型铀矿，产于太古宙片麻岩中，铀矿化受变质带与断裂联合控制，规模为中小型。

### （二）钠交代型铀矿床

成因机制：该类矿床是变质流体与构造活动协同作用的产物，核心为“钠质流体交代 - 铀活化富集”成矿过程。区域变质或深成岩浆活动形成富钠质的变质流体，流体沿深大断裂或破碎带运移，与围岩发生钠交代作用（斜长石钠长石化）；交代过程中，围岩的物理化学性质改变，铀从原岩中释放并被流体捕获，形成铀酰钠盐络合物；在交代带的构造扩容部位，因流体压力降低、温度下降，络合物解离，铀沉淀形成沥青铀矿。甘肃省龙首山钠交代型铀矿研究证实，变质流体活动促使铀在构造破碎带中叠加富集。

地质特征：产于深大断裂旁侧的动力变质带中，围岩以花岗岩、片麻岩、砂岩为主，普遍发育钠长石化交代；矿体呈脉状、网脉状、透镜状，严格受断裂破碎带控制；矿石矿物以沥青铀矿为主，伴生钠长石、绿泥石、黄铁矿；矿石品位中等（0.05%~0.3% U），规模以中小型为主；围岩蚀变以钠长石化为核心标志，伴随绿泥石化、硅化，钠长石化强度与铀矿化程度呈正相关。

典型实例：中国甘肃龙首山钠交代型铀矿，产于前寒武纪片麻岩的断裂破碎带中，钠长石化交代强烈，沥青铀矿呈脉状充填于裂隙中；俄罗斯贝加尔湖沿岸钠交代铀矿，产于变质岩系的深断裂带中，钠长石化与铀矿化密切相关，为俄罗斯重要的铀矿床类型之一。

#### 四、火山岩型铀矿床类型与成因机制

火山岩型铀矿床形成于火山活动及后续热液过程，核心受火山岩浆演化、火山构造与流体作用控制，是中新生代火山活动强烈区域的特色铀资源类型。

##### （一）火山热液型铀矿床

成因机制：火山岩浆（流纹岩、英安岩、安山岩）喷发或侵入后，残余岩浆形成含铀热液，或雨水、地下水受热循环参与形成火山热液；热液富含  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  等络合剂，通过溶解火山岩中的铀形成络合物，沿火山构造（火山口、火山颈、环状断裂）运移；在构造扩容部位或火山岩的孔隙、裂隙中，因热液冷却、流体混合或与围岩反应，铀酰络合物解离，铀被还原为  $\text{U}^{4+}$  并沉淀形成沥青铀矿。成矿温度多为中低温（120~300℃），属于火山-热液成矿系统的重要组成部分。

地质特征：产于中新生代火山岩带，围岩以流纹岩、英安岩、火山碎屑岩为主；矿体形态呈脉状、网脉状、浸染状，受火山构造（环状断裂、放射状裂隙、火山颈）控制；矿石矿物以沥青铀矿为主，伴生萤石、石英、黄铁矿、蒙脱石；围岩蚀变发育，主要为硅化、高岭土化、蒙脱石化、碳酸盐化，其中硅化-高岭土化组合是重要的找矿标志；矿石品位中等至富矿（0.1%~0.8% U），矿床规模以中小型为主，部分大型矿床受火山构造与热液叠加控制。

典型实例：中国浙江衢州火山岩型铀矿，产于中生代流纹岩的环状断裂带中，沥青铀矿呈脉状与萤石、石英共生，围岩蚀变以硅化、高岭土化为主；俄罗斯外贝加尔火山岩铀矿带，产于中生代火山岩系中，受火山颈与断裂联合控制，为俄罗斯主要的铀资源基地之一。

##### （二）火山沉积型铀矿床

成因机制：火山活动期间，铀通过火山喷发（火山灰、火山气液）或热泉活动进入地表水体，在湖泊、沼泽等沉积环境中沉积富集；沉积过程中，铀可通过化学沉淀（如与碳酸盐、磷酸盐结合）、生物吸附（浮游生物、藻类）或吸附于黏土矿物、铁锰氧化物表面实现初始富集；成岩过程中，孔隙流体进一步活化铀，促使其在有利部位二次富集，形成工业矿体。该类矿床的成矿过程兼具火山活动的物质供给与沉积环境的富集条件。

地质特征：产于火山岩与沉积岩的互层序列中，沉积岩以湖相页岩、粉砂岩、凝灰岩为主；矿体呈层状、似层状，与地层整合产出，受火山沉积中心控制；矿石矿物包括沥青铀矿、铀黑、磷铀矿，伴生黏土矿物、铁锰氧化物、有机质；矿石品位较低（0.03%~0.1% U），规模以中小型为主，部分矿床因层位稳定具有一定的勘查价值；围岩蚀变较弱，主要为黏土化、碳酸盐化。



典型实例：中国吉林双辽火山沉积型铀矿，产于中生代火山 - 沉积盆地中，矿体呈层状产于凝灰岩与页岩互层中，铀主要吸附于黏土矿物表面；阿根廷西部火山沉积铀矿带，产于新生代火山沉积岩系中，依赖火山物质供给与湖相沉积富集，是南美重要的铀资源补充类型。

## 五、其他特殊类型铀矿床

### （一）蒸发岩型铀矿床

成因机制：形成于干旱 - 半干旱气候条件下的内陆盐湖或潟湖沉积环境，盐湖水体中的铀通过蒸发浓缩、化学沉淀形成矿床。含铀水体在蒸发过程中，铀与硫酸盐、碳酸盐等形成复盐（如铀矾、菱铀矿），或吸附于蒸发岩矿物（石膏、石盐）表面实现富集；成矿过程中，水体的高盐度、高 pH 值（7~9）为铀的沉淀提供了有利条件，铀主要以铀酰盐形式存在。

地质特征：产于中新世内陆盆地的蒸发岩序列中，围岩以石膏、石盐、硬石膏为主；矿体呈层状、透镜状，与蒸发岩地层整合产出；矿石矿物为铀矾、菱铀矿、铀云母类矿物，伴生石膏、石盐、白云石；矿石品位较低（0.02%~0.08% U），规模多为小型，仅少数矿床达到中型规模；矿床埋藏较浅，开采条件简单，但铀的提取难度较大。

典型实例：美国新墨西哥州卡尔斯巴德铀矿，产于二叠纪蒸发岩系中，铀主要以铀矾形式产于石膏夹层中；中国青海柴达木盆地蒸发岩型铀矿，产于新生代盐湖沉积的石膏 - 石盐层中，规模为小型，具有一定的资源潜力。

### （二）人工堆积型铀矿床

成因机制：属于人为活动引发的铀富集类型，主要与铀矿开采、核工业排放、磷酸盐化肥使用等相关。铀矿开采过程中，含铀废石、尾矿在地表堆积，经雨水淋滤、地下水渗透，铀被活化并在堆积体下方或周边的还原环境中沉淀；核工业废水、废渣排放导致局部水体或土壤中铀含量升高，经生物吸附、化学沉淀形成次生铀富集；磷酸盐化肥中的铀在土壤中累积，也可能形成局部富集。

地质特征：分布于铀矿开采区、核工业基地、磷酸盐化肥施用区周边；矿体形态不规则，呈透镜状、斑块状，受堆积体范围与地下水流动方向控制；矿石矿物以铀黑、磷钙铀矿、次生铀云母为主，伴生黏土矿物、铁锰氧化物；矿石品位变化大（0.01%~0.1% U），规模多为小型，部分铀矿尾矿堆积区可形成具有工业意义的矿床；环境风险较高，需在开采的同时采取防护措施。

典型实例：中国江西铀矿尾矿堆积区，废石经长期淋滤后，铀在堆积体下方的黏土夹层中沉淀，形成小型人工堆积型铀矿床；哈萨克斯坦乌兹别克斯坦铀矿开采区，

尾矿堆积引发地下水铀污染，在还原环境中形成次生铀富集，已被列为潜在铀资源基地。

## 第二节 铀矿成矿地质条件分析

### 一、物质基础条件：铀的初始富集与来源供给

铀的物质供给是成矿的前提，其来源可分为地壳基底供给、岩浆活动供给、表生风化供给三大类型，初始富集程度直接决定成矿潜力。

#### （一）地壳基底的铀丰度与赋存状态

前寒武纪古老地壳（尤其是克拉通基底）是铀的重要初始储库，其铀丰度与岩石类型控制区域铀矿化的分布格局。华北克拉通、澳大利亚西部克拉通等古老陆块的基底岩石（片麻岩、长石砂岩、绿岩带）铀丰度普遍高于地壳平均水平（ $1.8\mu\text{g/g}$ ），可达  $3\sim 5\mu\text{g/g}$ ，铀主要以类质同象形式赋存于锆石、磷灰石、钛铁矿等副矿物中，或呈分散状吸附于黏土矿物表面。基底岩石经后期构造活动、变质作用或风化剥蚀，可释放铀形成含铀流体，为沉积型、变质型铀矿床提供物质来源。例如，澳大利亚奥林匹克坝铀矿床的铀主要来自前寒武纪花岗岩基底，经热液活化后迁移至沉积岩中富集。

#### （二）岩浆活动的铀供给与分异富集

岩浆活动是内生铀矿床的核心物质供给源，酸性、碱性岩浆的演化过程决定铀的富集效率。酸性岩浆（花岗岩、花岗闪长岩）因富含硅铝质，铀的不相容性显著（分配系数  $D$  结晶分异过程中铀持续向残余熔体富集，使晚期岩浆熔体铀含量可达  $50\sim 100\mu\text{g/g}$ ，形成富含铀的岩浆热液；碱性岩浆（霞石正长岩、霓辉正长岩）富含碱金属与挥发分（ $\text{F}$ 、 $\text{Cl}$ 、 $\text{CO}_2$ ），可促进铀的活化迁移，与稀土、铌钽等元素同步富集，形成铀 - 稀土共生的物质基础。岩浆活动的时空分布与铀矿化密切相关，中国华南中生代花岗岩带（ $170\sim 100\text{Ma}$ ）、俄罗斯外贝加尔火山岩带均为岩浆供给型铀矿的集中分布区。<sup>①</sup>

#### （三）表生风化的铀活化与流体携带

表生环境中，铀的物质供给依赖前寒武纪基底或岩浆岩的风化剥蚀，风化过程通过溶解、络合作用将铀从岩石中释放，形成含铀地表径流或地下水。氧化条件下（ $E_h > 0.2\text{V}$ ），铀以  $\text{UO}_2^{2+}$  形式存在，可与水体中的  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  形成稳定络合物（如  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 、 $\text{UO}_2\text{F}_2$ ），随水流迁移至沉积盆地或构造带；黏土矿物、铁锰氧化

① 殷学文, 张盼盼, 李靖辉, 等. 豫西骑马河铀矿地质特征及找矿远景分析 [C]// 河南省地质学会. 河南地球科学研究进展 (2024). 河南省核技术应用中心; 2024: 15-21.

物的吸附作用可暂时富集铀，形成风化壳型铀矿的初始矿化。鄂尔多斯盆地、松辽盆地等大型沉积盆地的砂岩型铀矿，其铀主要来自盆地周边古老山脉的风化剥蚀，含铀流体通过地下水循环进入盆地砂岩储层。

## 二、构造条件：运移通道与富集场所的形成

构造活动是连接铀源与富集场所的关键，通过控制流体运移通道、创造扩容空间、调节物理化学条件，主导铀矿化的就位与分布。

### （一）深大断裂带的控矿作用

深大断裂带是铀矿成矿的“生命线”，兼具铀源活化、流体运移、矿体定位三大功能。深大断裂贯穿地壳甚至岩石圈，可切穿富含铀的基底岩石或岩浆岩体，在构造活动过程中通过岩石破碎、热液活动活化铀；断裂带作为流体运移的主要通道，可引导含铀热液或地下水长距离迁移，连接铀源区与富集区；断裂带的转折部位、分支部位、交汇部位因构造扩容形成低压区，利于含铀流体卸载、铀酰络合物解离，促进铀的沉淀富集。中国北方的狼山 - 渣尔泰山断裂带、南方的钦杭结合带均为深大断裂控矿的典型实例，断裂带及其旁侧的次级构造控制了区域内 80% 以上的铀矿床。

### （二）次级构造的矿体定位作用

次级构造（节理、裂隙、层间破碎带、褶皱轴部）是铀矿体的直接定位场所，其形态、规模与组合方式决定矿体的产出特征。花岗岩体、火山岩体内的环状断裂、放射状裂隙系统，为岩浆热液型、火山热液型铀矿提供了有利储矿空间，如江西相山铀矿田的铀矿体主要产于花岗岩体的环状断裂与放射状裂隙中；沉积盆地内的层间破碎带、砂岩透镜体边缘裂隙，可增强砂岩储层的渗透性，促进含铀地下水的渗透与铀的沉淀，如鄂尔多斯盆地东胜铀矿的矿体受砂岩层间破碎带与还原障的联合控制；褶皱构造的轴部因岩石变形强烈，裂隙发育，常成为含铀流体的聚集场所，形成层状、似层状铀矿体。

### （三）构造活动的多期性与叠加成矿

构造活动的多期性是大型、超大型铀矿床形成的重要条件，早期构造为铀源活化与流体运移创造条件，晚期构造则促进铀的叠加富集与矿体保存。中国华南中生代花岗岩铀矿的成矿过程经历了多期构造活动：燕山早期（170~140Ma）的花岗岩侵入与断裂活动，为铀的初始富集提供了物质基础与运移通道；燕山晚期（140~100Ma）的构造隆升与热液活动，活化早期富集的铀，形成工业矿体；喜马拉雅期（23Ma 以来）的构造稳定期，保障了矿体的保存。多期构造活动的叠加，可使铀多次富集，提升矿床规模与品位，全球超大型铀矿床（如澳大利亚奥林匹克坝、加拿大阿萨巴斯卡盆地铀矿）均经历了多期构造叠加作用。

### 三、流体条件：铀的迁移载体与富集媒介

流体是铀迁移与富集的核心载体，其化学组成、物理性质、运移方式直接控制铀的活化、迁移效率与沉淀机制。

#### （一）成矿流体的类型与化学组成

铀矿成矿流体主要分为岩浆热液、变质流体、地下水、盆地流体四大类型，不同类型流体的化学组成差异显著，决定其铀携带能力。岩浆热液富含  $F^-$ 、 $Cl^-$ 、 $CO_3^{2-}$  等络合剂，pH 值为 6~8，温度 150~350℃，可与铀形成稳定的铀酰络合物（ $UO_2F_2$ 、 $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ ），铀含量可达 10~100 $\mu g/L$ ；变质流体以富水、富  $CO_2$  为特征，pH 值为 5~7，温度 300~500℃，通过溶解变质岩中的铀形成络合物，铀含量 5~50 $\mu g/L$ ；地下水（表生环境）富含  $CO_3^{2-}$ 、 $SO_4^{2-}$ ，pH 值为 7~9，温度 10~50℃，铀主要以  $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ 、 $UO_2(SO_4)_2^{2-}$  形式存在，铀含量 0.1~10 $\mu g/L$ ；盆地流体是沉积盆地内的孔隙流体，富含有机质、 $H_2S$  等还原物质，pH 值为 6~8，温度 50~150℃，既是铀的迁移载体，也是铀的还原沉淀介质。

#### （二）流体的运移机制与驱动因素

成矿流体的运移受压力差、温度梯度、重力作用、构造活动四大因素驱动，运移方式分为对流运移与扩散运移。岩浆热液在岩浆结晶分异过程中，因压力差驱动沿断裂带向上运移，属于快速对流运移；变质流体在区域变质作用中，受温度梯度与压力差驱动，沿变质带的裂隙或岩性界面缓慢扩散运移；地下水在表生环境中，受重力作用与地形高差驱动，形成顺层或跨层的对流循环，是外生铀矿床的主要运移方式；盆地流体的运移受盆地构造演化控制，盆地沉降阶段流体向下运移，盆地隆升阶段流体向上运移，在运移过程中与砂岩储层发生相互作用，促进铀的沉淀。

#### （三）流体的物理化学条件变化与铀沉淀

流体物理化学条件（温度、压力、pH、Eh）的突变是铀沉淀的直接诱因，不同成矿环境下的沉淀机制存在差异。岩浆热液型铀矿床中，含铀热液沿断裂带运移至浅部时，温度降低（从 350℃ 降至 150℃）、压力释放导致铀酰络合物稳定性下降， $U^{6+}$  被黄铁矿、有机质等还原为  $U^{4+}$ ，沉淀形成沥青铀矿；砂岩型铀矿床中，含铀地下水（氧化型）与砂岩中的还原障（有机质、黄铁矿）接触时，Eh 值从 0.2V 降至 -0.1V 以下， $U^{6+}$  被还原为  $U^{4+}$ ，沉淀于砂岩孔隙中；碱性岩型铀矿床中，含铀流体与围岩发生反应导致  $CO_2$  逸出、pH 值升高（从 7 升至 9），铀酰碳酸盐络合物解离，铀与稀土元素共沉淀形成铀矿物。此外，流体混合（如岩浆热液与地下水混合）、水岩反应也会改变流体性质，促进铀的沉淀。



## 四、沉积 – 岩浆 – 变质背景条件：成矿环境的综合调控

沉积、岩浆、变质三大地质作用形成的地质背景,为铀矿化提供了特定的成矿环境,其时空耦合关系决定铀矿的分布规律。

### (一) 沉积背景与外生铀矿的成矿条件

外生铀矿(砂岩型、沉积-改造型、蒸发岩型)的形成依赖有利的沉积环境,核心受控于沉积盆地类型、沉积相、地层岩性与沉积中心。中生代陆相盆地(如鄂尔多斯盆地、松辽盆地、美国 Powder River 盆地)是砂岩型铀矿的主要产出场所,盆地的规模、基底起伏、边缘断裂控制了含铀砂岩储层的发育;河流三角洲相、湖泊相砂岩因孔隙度高(10%~30%)、渗透率大( $> 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ),成为铀的有利储层,而泥岩、黏土岩夹层则作为隔水层与还原障,促进铀的富集;黑色页岩、磷块岩、蒸发岩等特定沉积岩因富含有机质、磷酸盐、硫酸盐,可通过吸附、化学沉淀等方式初始富集铀,经后期改造形成沉积-改造型铀矿。沉积中心与还原环境的时空匹配是外生成矿的关键,盆地内的有机质富集区、黄铁矿化带往往是铀矿化的集中部位。

### (二) 岩浆背景与内生铀矿的成矿条件

内生铀矿(岩浆热液型、碱性岩型、伟晶岩型)的形成与岩浆活动的类型、时代、演化程度密切相关。酸性岩浆岩(花岗岩、花岗闪长岩)的铀含量高(3~10 $\mu\text{g/g}$ )、演化程度高(分异指数  $\text{DI} > 80$ ),是岩浆热液型铀矿的主要成矿母岩,中国华南中生代 S 型花岗岩、美国西部钙碱性花岗岩均为典型案例;碱性岩浆岩(霞石正长岩、霓辉正长岩)因富含碱金属与挥发分,利于铀的活化迁移,常形成铀-稀土-钼钨共生矿床;岩浆活动的时代与区域构造演化一致,中生代(252~66Ma)是全球内生铀矿的主要成矿期,与燕山期、安第斯期构造-岩浆活动高峰期同步。此外,岩浆岩体的形态、规模、产状也影响铀矿化,岩株、岩脉、岩体接触带因流体活动强烈,是铀矿化的有利部位。<sup>①</sup>

### (三) 变质背景与变质铀矿的成矿条件

变质铀矿(区域变质型、钠交代型)的形成依赖特定的变质作用类型、变质程度与变质流体活动。区域变质型铀矿的原岩为富含铀的沉积岩或火山岩,经绿片岩相至角闪岩相变质作用(温度 300~700℃、压力 0.3~1.0GPa),铀从原岩矿物中释放进入变质流体,在变质带的构造扩容部位沉淀;钠交代型铀矿的形成与深变质作用产生的富钠质流体相关,流体沿深大断裂运移,与围岩发生钠交代作用,活化铀并促进其富集;变质作用的年代以早古生代、前寒武纪为主,对应的变质带与深大断裂带的叠加区域是变质铀矿的集中分布区,如中国内蒙古乌拉山变质带、澳大利亚前寒武纪变质岩带。

<sup>①</sup> 李沛,王军强,崔艳蕊,等.河南省铀矿分布规律及找矿方向[J].中国铝业,2016,40(02):10-15.

变质程度的适中是成矿的关键，过高的变质程度（麻粒岩相）会导致铀的扩散丢失，过低的变质程度则难以活化铀。

#### （四）多地质作用的时空耦合与成矿规律

铀矿的形成往往是沉积、岩浆、变质多地质作用时空耦合的结果，单一地质作用难以形成大型铀矿床。中国江西相山铀矿田的成矿过程体现了多作用耦合：燕山早期花岗岩侵入提供了铀源与成矿母岩；燕山晚期构造活动形成断裂通道；火山活动提供了热液与能量；表生风化作用促进了铀的活化迁移，多作用的时空叠加形成了超大型铀矿床；澳大利亚奥林匹克坝铀矿床则是沉积作用初始富集铀、岩浆活动提供热液与能量、构造活动创造通道与空间、变质作用促进铀的活化叠加，多地质作用的协同形成了全球规模最大的铀矿床之一。多地质作用的时空耦合是大型、超大型铀矿床形成的核心规律，其耦合程度越高，成矿潜力越大。

### 第三节 典型铀矿床地质特征

#### 一、砂岩型铀矿床：鄂尔多斯盆地东胜铀矿

东胜铀矿是我国超大型砂岩型铀矿床的典型代表，产于鄂尔多斯中生代陆相盆地，储量规模大、埋藏浅、开采条件优越，其地质特征集中体现了砂岩型铀矿“层控 - 还原障控”的成矿规律。

##### （一）矿体特征

产出层位：严格受控于侏罗系直罗组下段含矿砂岩，该层位为河流三角洲相沉积，厚度 15~35m，横向分布稳定，是区域内主要的铀储层；含矿砂岩与上覆、下伏的泥岩夹层形成“泥 - 砂 - 泥”的储盖组合，泥岩夹层既作为隔水层阻挡含铀流体逸散，又为铀沉淀提供还原环境。

形态与产状：矿体呈层状、似层状，与含矿砂岩整合产出，无明显穿层现象；平面上呈大面积连续分布的席状，局部受砂体透镜体控制形成透镜状矿体；矿体走向与河流三角洲砂体展布方向一致（北东向），倾向北西，倾角平缓（ $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$ ），符合陆相盆地平缓沉积的构造背景。

规模与品位：矿床面积达数千平方公里，单矿体长度 1~5km，宽度 0.5~2km，厚度 1~5m，平均厚度 2.3m；矿石铀品位中等，平均 0.08%~0.15% U，局部富集地段可达 0.3%~0.5% U，因矿体规模巨大，总储量位居我国砂岩型铀矿首位。

##### （二）矿石特征

矿物组成：金属矿物以沥青铀矿为主，占矿石矿物总量的 90% 以上，呈浸染状、薄膜状、结核状分布于砂岩孔隙或颗粒表面；伴生金属矿物包括黄铁矿、白铁矿、赤

铁矿,其中黄铁矿是主要的还原矿物,与沥青铀矿紧密共生,为铀的沉淀提供还原条件;脉石矿物以石英、长石为主,含少量黏土矿物(伊利石、蒙脱石)、方解石胶结物。

结构与构造:矿石结构以孔隙充填结构、薄膜状结构为主,沥青铀矿多充填于长石、石英颗粒间的原生孔隙或胶结物间隙,部分呈薄膜状包裹于颗粒表面;矿石构造以浸染状构造为主,局部因沥青铀矿集中沉淀形成条带状、结核状构造,结核直径多为0.5~2cm,由沥青铀矿与黄铁矿、黏土矿物共同组成。

铀的赋存状态:主要以独立矿物形式(沥青铀矿)存在,占总铀含量的85%以上;少量铀吸附于黏土矿物、铁锰氧化物表面,或呈类质同象形式赋存于黄铁矿、磷灰石中,吸附态与类质同象态铀合计占比不足15%。

### (三) 围岩蚀变特征

蚀变类型:围岩蚀变以弱蚀变为特征,无强烈的热液蚀变现象,主要包括黏土化、黄铁矿化、碳酸盐化,局部发育绿泥石化。黏土化表现为砂岩中黏土矿物含量增加(可达10%~15%),主要为伊利石、蒙脱石,是含铀地下水与砂岩相互作用的产物;黄铁矿化与铀矿化同步发生,黄铁矿呈细粒浸染状分布,是还原障的核心标志;碳酸盐化表现为方解石胶结物增加,多形成于成矿晚期,对铀矿化无明显破坏作用。

蚀变分带:蚀变无明显的水平或垂直分带,黏土化、黄铁矿化与铀矿化空间上高度重叠,黄铁矿化强度与铀品位呈正相关,可作为砂岩型铀矿的直接找矿标志;碳酸盐化多分布于矿体边缘或远离还原障的部位,与铀矿化关系不密切。

### (四) 控矿因素特征

岩性控矿:含矿砂岩的孔隙度(15%~25%)、渗透率( $5 \times 10^{-3}$ ~ $20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )是铀矿化的关键控制因素,高孔隙度与渗透率为含铀地下水的运移提供了有利空间;泥岩夹层的隔水与还原作用,促进了铀的沉淀富集。

还原障控矿:砂岩中的有机质(腐殖质、煤线)、黄铁矿是主要的还原障,含铀地下水(氧化型,  $E_h=0.2\sim0.4\text{V}$ )进入还原环境后,  $\text{U}^{6+}$ 被还原为  $\text{U}^{4+}$ ,形成沥青铀矿沉淀,还原障的分布范围与厚度直接控制矿体的展布与品位。

构造控矿:盆地内的平缓褶皱与层间破碎带控制了含铀地下水的运移方向,层间破碎带增强了砂岩的渗透性,使含铀流体在破碎带附近富集,形成局部高品位矿体;区域构造稳定为矿体的保存提供了有利条件,无后期强烈构造活动导致的矿体破坏。

## 二、岩浆热液型铀矿床:江西相山铀矿田

相山铀矿田是我国最大的岩浆热液型铀矿床,产于华南中生代火山-侵入杂岩带,成矿与花岗岩岩浆热液活动密切相关,其地质特征集中体现了“岩浆-构造-热液”协同控矿的成矿规律。

### （一）矿体特征

产出地质背景：产于相山火山 - 侵入杂岩体内，杂岩体主要由侏罗系火山岩（流纹岩、英安岩）与燕山期花岗岩（花岗斑岩、二长花岗岩）组成，铀矿化主要集中于花岗岩体内部及火山岩与花岗岩的接触带。

形态与产状：矿体形态受断裂 - 裂隙系统严格控制，主要呈脉状、网脉状、浸染状，部分为透镜状；脉状矿体走向多为北东向、北西向，与区域断裂走向一致，长度数十米至数百米，厚度 0.5~5m，倾角较陡（ $60^{\circ}$  ~ $85^{\circ}$ ）；网脉状矿体由多条细小铀矿脉交织形成，分布于断裂旁侧的裂隙发育区；浸染状矿体多产于花岗岩体内部的铀富集带，规模较大但品位相对较低。

规模与品位：矿田由多个矿床组成，总面积约 200km<sup>2</sup>，累计储量达超大型规模；矿石铀品位中等至富矿，脉状矿体平均品位 0.15%~0.8% U，最高可达 1.5% U，浸染状矿体平均品位 0.05%~0.1% U。

### （二）矿石特征

矿物组成：金属矿物以沥青铀矿为主，伴生黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等硫化物，以及磁铁矿、赤铁矿等氧化物；脉石矿物主要为石英、萤石、方解石，部分含绿泥石、绢云母；其中萤石、石英与沥青铀矿共生关系密切，是岩浆热液型铀矿的典型矿物组合。

结构与构造：矿石结构以自形 - 半自形粒状结构、充填结构为主，沥青铀矿晶体呈针状、柱状，粒径 0.01~0.1mm，充填于石英、萤石脉的裂隙或晶洞中；矿石构造以脉状构造、网脉状构造、浸染状构造为主，脉状构造中沥青铀矿与石英、萤石呈条带状交替产出，网脉状构造由细小铀矿脉穿插形成。

铀的赋存状态：主要以独立矿物形式（沥青铀矿）存在，占总铀含量的 90% 以上；少量铀赋存于萤石、磷灰石的晶格中，或吸附于绿泥石、绢云母表面，占比不足 10%。

### （三）围岩蚀变特征

蚀变类型：围岩蚀变发育，主要包括硅化、绿泥石化、碳酸盐化、萤石化、绢云母化，其中硅化、绿泥石化、萤石化与铀矿化关系最为密切。硅化表现为围岩中石英含量增加，形成硅化岩带，宽度数米至数十米，是热液活动的直接标志；绿泥石化由斜长石、黑云母蚀变形成，呈绿色、暗绿色，与铀矿化空间上高度重叠；萤石化是相山铀矿田的标志性蚀变，萤石呈紫色、绿色，与沥青铀矿、石英共生，形成“沥青铀矿 - 萤石 - 石英”的典型蚀变 - 矿化组合。<sup>①</sup>

蚀变分带：从矿体中心到围岩，蚀变呈现明显的水平分带：核心带为“硅化 - 萤石化 - 沥青铀矿化带”，宽度 1~5m；中间带为“绿泥石化 - 绢云母化带”，宽度

<sup>①</sup> 我国页岩气和铀矿取得重大进展 [J]. 当代化工, 2016, 45 (01): 145.



5~20m; 外围带为“碳酸盐化带”, 宽度 20~50m; 蚀变分带清晰, 可作为岩浆热液型铀矿的重要找矿标志。

#### (四) 控矿因素特征

岩浆控矿: 燕山期花岗岩是成矿母岩, 该岩体铀丰度高 ( $3\sim 5\mu\text{g/g}$ ), 演化程度高, 为铀矿化提供了充足的物质来源; 花岗岩体的侵入时代 ( $140\sim 120\text{Ma}$ ) 与成矿时代 ( $120\sim 100\text{Ma}$ ) 时空耦合, 为热液活动提供了能量与物质基础。

构造控矿: 深大断裂 (相山环状断裂) 与次级断裂 (放射状裂隙、层间破碎带) 构成了“主干断裂 - 次级裂隙”的控矿构造体系, 主干断裂是含铀热液的运移通道, 次级裂隙是矿体的定位场所; 断裂的多期活动促进了热液的多次活动与铀的叠加富集。

热液控矿: 岩浆热液富含  $\text{F}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  等络合剂, 为铀的活化迁移提供了有利条件; 热液与围岩的相互作用导致温压降低、流体性质改变, 促进铀酰络合物解离与铀的沉淀。

### 三、火山岩型铀矿床: 浙江衢州铀矿

衢州铀矿是我国东部火山岩型铀矿的典型代表, 产于中生代火山岩带, 成矿与火山活动及后期热液改造密切相关, 其地质特征体现了火山岩型铀矿“火山构造 - 热液叠加”的成矿规律。

#### (一) 矿体特征

产出地质背景: 产于浙西中生代火山盆地内, 盆地内主要发育侏罗系上统火山岩, 岩性以流纹岩、英安岩、火山碎屑岩为主, 铀矿化产于流纹岩体内的环状断裂与放射状裂隙中。

形态与产状: 矿体形态受火山构造严格控制, 主要呈脉状、网脉状, 部分为透镜状; 脉状矿体沿环状断裂产出, 走向近圆形, 长度数十米至数百米, 厚度  $0.3\sim 3\text{m}$ , 倾角  $70^\circ\sim 85^\circ$ ; 网脉状矿体产于放射状裂隙中, 呈树枝状分布, 延伸较短 (数米至数十米); 透镜状矿体多产于火山颈或火山通道附近, 规模较小。

规模与品位: 矿床为大型规模, 由多个矿体组成, 单个矿体长度  $50\sim 300\text{m}$ , 厚度  $0.5\sim 2\text{m}$ ; 矿石铀品位中等, 平均  $0.1\%\sim 0.5\% \text{U}$ , 局部富矿地段可达  $0.8\%\sim 1.0\% \text{U}$ 。

#### (二) 矿石特征

矿物组成: 金属矿物以沥青铀矿为主, 伴生黄铁矿、赤铁矿、白铁矿, 部分含少量黄铜矿; 脉石矿物主要为石英、萤石、蒙脱石、高岭石, 其中蒙脱石、高岭石是火山岩风化蚀变的产物, 与铀矿化关系密切。

结构与构造: 矿石结构以细粒结构、胶状结构为主, 沥青铀矿晶体细小 (粒径  $0.005\sim 0.05\text{mm}$ ), 呈浸染状或胶状充填于火山岩的裂隙中; 矿石构造以脉状构造、网

脉状构造、皮壳状构造为主，皮壳状构造由沥青铀矿与蒙脱石、高岭石交替沉积形成，常见于矿体边缘。

铀的赋存状态：主要以独立矿物形式（沥青铀矿）存在，占总铀含量的 80% 以上；部分铀吸附于蒙脱石、高岭石等黏土矿物表面，或呈类质同象形式赋存于黄铁矿中，吸附态铀占比约 15%~20%。

### （三）围岩蚀变特征

蚀变类型：围岩蚀变强烈，主要包括硅化、高岭土化、蒙脱石化、萤石化、绿泥石化，其中硅化、高岭土化、蒙脱石化与铀矿化关系最为密切。硅化表现为火山岩中石英含量增加，形成硅化壳或硅化脉，与沥青铀矿共生；高岭土化由长石蚀变形成，呈白色、灰白色，分布于矿体周围，范围较广；蒙脱石化是火山岩水解蚀变的产物，呈土黄色、浅绿色，与铀矿化空间上高度重叠；萤石化呈脉状或浸染状，与沥青铀矿、石英共生，是重要的找矿标志。

蚀变分带：从矿体中心到围岩，蚀变分带为“沥青铀矿 - 萤石 - 石英带”→“高岭土化 - 蒙脱石化带”→“绿泥石化带”→“正常火山岩”，分带宽度从数米到数十米，蚀变强度从中心向外围逐渐减弱，与铀矿化强度呈正相关。

### （四）控矿因素特征

火山构造控矿：火山盆地、环状断裂、放射状裂隙、火山颈等火山构造是铀矿化的核心控制因素，环状断裂与放射状裂隙构成了含铀热液的运移通道与定位场所，火山颈附近因热液活动强烈，常形成富矿矿体。

岩石类型控矿：流纹岩因硅含量高（ $\text{SiO}_2 > 70\%$ ）、孔隙度与渗透率相对较高，利于含铀热液的渗透与铀的沉淀，是主要的含矿围岩；火山碎屑岩因结构疏松，也可作为含矿围岩，但矿化规模与品位相对较低。

热液与风化蚀变控矿：火山期后热液活动是铀活化迁移的关键，热液富含  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等络合剂，促进铀的溶解与迁移；后期风化蚀变形成的黏土矿物（蒙脱石、高岭土）具有较强的吸附能力，可促进铀的进一步富集。

## 四、变质型铀矿床：澳大利亚玛丽·凯瑟林铀矿

玛丽·凯瑟林铀矿是全球大型区域变质型铀矿床的典型代表，产于澳大利亚前寒武纪克拉通的变质岩带，成矿与区域变质作用及变质流体活动密切相关，其地质特征体现了变质型铀矿“原岩富集 - 变质活化 - 构造定位”的成矿规律。

### （一）矿体特征

产出地质背景：产于澳大利亚西部前寒武纪伊尔加恩克拉通的区域变质岩带，含矿围岩为太古宙角闪岩相变质岩，原岩为长石砂岩、页岩，经区域变质作用改造为片麻岩、片岩。

形态与产状：矿体呈层状、似层状、透镜状，与变质岩片理平行或近于平行产出，部分矿体因构造挤压呈揉皱状；矿体走向北西向，倾向北东，倾角  $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ ，长度数百米至数千米，厚度 5~20m，横向分布稳定。

规模与品位：矿床为大型规模，累计储量达数万吨铀；矿石铀品位中等，平均 0.08%~0.2% U，局部富集地段可达 0.3%~0.5% U，品位分布均匀。

## （二）矿石特征

矿物组成：金属矿物以晶质铀矿为主，伴生磁铁矿、赤铁矿、黄铁矿、钛铁矿，晶质铀矿是主要的工业矿物，与磁铁矿共生关系密切；脉石矿物主要为石英、长石、云母、角闪石，与变质岩的矿物组成基本一致，体现了变质成矿的特点。

结构与构造：矿石结构以粒状结构、变晶结构为主，晶质铀矿晶体呈粒状、短柱状，粒径 0.1~0.5mm，分布于石英、长石等脉石矿物颗粒间；矿石构造以片麻状构造、条带状构造、浸染状构造为主，片麻状构造与变质岩片理一致，条带状构造由晶质铀矿与磁铁矿、石英交替排列形成。

## （三）围岩蚀变特征

蚀变类型：围岩蚀变以中低温区域变质蚀变为特征，无强烈热液蚀变叠加，主要包括绿泥石化、绢云母化、硅化、碳酸盐化，局部发育磁铁矿化。绿泥石化由角闪石、黑云母变质形成，呈暗绿色、黄绿色，与矿体空间分布高度一致；绢云母化表现为长石变质为绢云母，呈丝绢光泽，分布于矿体周围的片麻岩中；硅化表现为石英含量轻微增加，多以细粒石英集合体形式分布于矿物颗粒间隙，与晶质铀矿共生；碳酸盐化主要为方解石充填裂隙，形成于变质作用晚期，对矿化无明显影响。

蚀变分带：蚀变分带不显著，绿泥石化、绢云母化与铀矿化呈面状叠加分布，无明显的中心 - 外围分异；硅化与磁铁矿化多集中于矿体内部，与晶质铀矿紧密共生，可作为变质型铀矿的间接找矿标志；碳酸盐化多分布于矿体边缘的裂隙中，与铀矿化关联较弱。

## （四）控矿因素特征

原岩控矿：原岩为富含铀的长石砂岩、页岩，铀丰度达  $3 \sim 5 \mu\text{g/g}$ ，为变质成矿提供了充足的物质基础；原岩的岩石类型决定了变质后岩石的矿物组成与结构，长石砂岩变质形成的片麻岩因孔隙度相对较高，利于变质流体运移与铀的富集。

变质作用控矿：角闪岩相变质作用（温度  $450 \sim 650^{\circ}\text{C}$ 、压力  $0.5 \sim 0.8 \text{GPa}$ ）是铀活化的关键，变质过程中铀从原岩矿物晶格中释放，进入富水、富  $\text{CO}_2$  的变质流体；变质程度适中，既保证了铀的充分活化，又避免了过高温度导致铀的扩散丢失。

构造控矿：区域变质带内的褶皱轴部、层间破碎带是矿体的主要定位场所，这些部位因岩石变形强烈，裂隙发育，为变质流体的聚集与铀的沉淀提供了有利空间；区域构造稳定，无后期强烈构造活动与热液改造，保障了矿体的完整保存。

## 第四节 铀矿资源分布规律研究

### 一、全球铀矿资源宏观分布规律

全球铀矿资源高度集中于特定地质单元，形成“三大核心区、多个次级聚集带”的宏观分布格局，其分布与前寒武纪克拉通、中生代造山带、中生代沉积盆地密切相关。

#### （一）核心分布区特征

澳大利亚 - 太平洋核心区：是全球铀资源最富集的区域，铀储量占全球总储量的 35% 以上（据国际原子能机构 IAEA 2023 年数据），主要包括澳大利亚西部伊尔加恩克拉通、北部阿萨巴斯卡盆地，以及巴布亚新几内亚、加拿大西部等次级聚集区。该区域的铀矿床类型以不整合型、砂岩型、变质型为主，其中澳大利亚奥林匹克坝铀矿（储量超 200 万吨 U）、加拿大阿萨巴斯卡盆地高品位铀矿（平均品位 15%~20% U）是全球超大型铀矿床的典型代表。其富集机制与前寒武纪克拉通基底的铀初始富集、中生代 - 新生代构造 - 热液活动的叠加改造密切相关。

中亚 - 俄罗斯核心区：铀储量占全球总储量的 28%，主要分布于哈萨克斯坦中部卡拉套成矿带、俄罗斯外贝加尔火山岩带、乌兹别克斯坦克孜勒库姆沙漠沉积盆地。该区域以砂岩型、火山岩型、碱性岩型铀矿为主，哈萨克斯坦因吉腊铀矿（储量超 100 万吨 U）、俄罗斯罗沃泽尔铀矿是代表性矿床。其富集机制与古生代 - 中生代造山带的岩浆活动、中生代内陆盆地的沉积 - 成岩作用密切相关，盆地内广泛发育的还原环境为铀的沉淀提供了有利条件。

北美 - 南美核心区：铀储量占全球总储量的 22%，主要包括美国西部砂岩型铀矿带、加拿大萨斯喀彻温盆地、巴西东部伟晶岩型铀矿带、阿根廷西部火山沉积型铀矿带。该区域以砂岩型、伟晶岩型、火山沉积型铀矿为主，美国 Powder River 盆地铀矿、加拿大阿萨巴斯卡盆地外围砂岩型铀矿是代表性矿床。其富集机制与中生代板块俯冲引发的岩浆活动、陆相盆地的沉积 - 后生改造作用相关，北美西部的科迪勒拉造山带为铀矿化提供了充足的铀源与构造通道。

#### （二）宏观分布的控制因素

地壳基底铀丰度控制：全球铀矿核心区均发育前寒武纪古老地壳（克拉通），基底岩石铀丰度普遍高于地壳平均水平（ $1.8\mu\text{g/g}$ ），可达  $3\sim 5\mu\text{g/g}$ ，是铀矿化的初始物质库。澳大利亚西部克拉通、北美加拿大地盾、俄罗斯东欧平原等区域的基底岩石，经长期构造 - 岩浆活动活化，为各类铀矿床提供了持续的铀源供给。

板块构造位置控制：全球铀矿核心区多位于板块边缘造山带、板块内部深大断裂



带或克拉通边缘坳陷带。板块边缘的俯冲 - 碰撞作用引发强烈的岩浆活动与构造运动, 促进铀的活化迁移与富集; 板块内部的深大断裂带作为流体运移通道, 连接铀源区与富集区; 克拉通边缘坳陷带则为外生铀矿提供了有利的沉积环境。

沉积盆地发育控制: 中生代陆相沉积盆地是砂岩型、蒸发岩型等外生铀矿的主要产出场所, 全球超大型砂岩型铀矿床均产于面积大于 10 万 km<sup>2</sup> 的大型沉积盆地 (如鄂尔多斯盆地、Powder River 盆地、卡拉套盆地)。盆地的规模、沉积中心、岩性组合控制了铀矿化的分布范围与富集程度, “泥 - 砂 - 泥” 的储盖组合是砂岩型铀矿富集的关键条件。

## 二、区域成矿带分布规律

区域成矿带是铀矿资源聚集的基本单元, 其分布严格受控于区域构造 - 岩浆 - 沉积演化, 不同成矿带的矿床类型、成矿时代、控矿因素呈现显著差异。

### (一) 前寒武纪克拉通边缘成矿带

分布特征: 主要分布于澳大利亚西部伊尔加恩克拉通边缘、加拿大阿萨巴斯卡盆地边缘、南非卡鲁盆地边缘, 是不整合型、变质型、伟晶岩型铀矿的集中分布带。成矿带长度数百至数千公里, 宽度数十至数百公里, 铀矿床呈串珠状、带状分布。

成矿规律: 成矿时代集中于前寒武纪 (2500~1800Ma), 部分叠加中生代 (200~100Ma) 热液改造; 铀矿化与克拉通基底的长石砂岩、片麻岩等富铀原岩密切相关, 经区域变质作用活化铀, 在不整合面附近或构造破碎带中沉淀富集; 矿床类型以高品位、大规模为特征, 澳大利亚奥林匹克坝铀矿、加拿大麦克阿瑟河铀矿均产于该类成矿带。

控矿因素: 克拉通边缘的深大断裂带控制成矿带的边界; 不整合面作为铀的富集界面, 汇集了变质流体与地下水, 促进铀的沉淀; 基底岩石的铀丰度与变质程度决定成矿潜力。

### (二) 中生代造山带成矿带

分布特征: 主要分布于中国华南中生代造山带、俄罗斯外贝加尔造山带、美国西部科迪勒拉造山带, 是岩浆热液型、火山岩型、碱性岩型铀矿的集中分布带。成矿带与中生代花岗岩带、火山岩带空间重叠, 呈北东向、北西向展布。

成矿规律: 成矿时代集中于中生代 (200~80Ma), 与燕山期、安第斯期构造 - 岩浆活动高峰期同步; 铀矿化与酸性、碱性岩浆的侵入 - 喷发活动密切相关, 花岗岩体、火山岩盆地为铀矿化提供了铀源与构造空间; 矿床类型以中 - 高品位、中 - 大型规模为特征, 中国江西相山铀矿田、俄罗斯外贝加尔铀矿带是代表性成矿带。

控矿因素: 造山带内的深大断裂与次级断裂构成 “运移通道 - 定位场所” 的控

矿体系；岩浆岩体的铀丰度、演化程度与成矿时代的时空耦合是成矿关键；热液活动的强度与流体性质控制铀的富集效率。

### （三）中新生代沉积盆地成矿带

分布特征：主要分布于鄂尔多斯盆地、松辽盆地、哈萨克斯坦卡拉套盆地、美国 Powder River 盆地，是砂岩型、沉积 - 改造型铀矿的集中分布带。成矿带与盆地内的河流三角洲相、湖泊相砂岩储层展布一致，呈层状、面状分布。

成矿规律：成矿时代集中于中新生代（150~20Ma），部分叠加新生代晚期（20~5Ma）地下水改造；铀矿化严格受“泥 - 砂 - 泥”储盖组合与还原障控制，含矿砂岩的孔隙度、渗透率与还原障的分布范围决定矿体规模；矿床类型以中 - 低品位、大型 - 超大型规模为特征，中国东胜铀矿、哈萨克斯坦因吉腊铀矿是代表性矿床。<sup>①</sup>

控矿因素：盆地的沉积中心与砂体展布控制矿体的平面分布；地下水的循环强度与氧化还原界面的位置控制铀的沉淀深度；盆地构造稳定为矿体保存提供有利条件。

## 三、铀矿资源成矿时代分布规律

全球铀矿资源的成矿时代呈现明显的“多期性”与“高峰期”，主要集中于前寒武纪、中生代、新生代三个关键时期，不同时代的成矿作用与地球动力学演化密切相关。

### （一）前寒武纪成矿期（> 541Ma）

成矿特征：成矿时代主要集中于太古宙（2800~2500Ma）与元古宙（2000~1600Ma），占全球铀储量的 25% 左右，主要矿床类型为变质型、伟晶岩型、不整合型。该时期的铀矿床多产于前寒武纪克拉通内部或边缘，矿石以晶质铀矿为主，品位较高（平均 0.1%~0.5% U），规模以大型为主。

成矿背景：前寒武纪时期，地球早期地壳形成并经历多次区域变质作用与岩浆活动，富铀原岩（长石砂岩、页岩）经变质作用活化铀，在构造扩容部位或不整合面附近沉淀富集；伟晶岩型铀矿则形成于岩浆分异晚期，铀与稀土、铌钽等元素同步富集。

典型矿床：澳大利亚玛丽·凯瑟林铀矿（元古宙，1800Ma）、加拿大阿萨巴斯卡盆地不整合型铀矿（元古宙，1600Ma）。

### （二）中生代成矿期（252~66Ma）

成矿特征：成矿时代主要集中于侏罗纪（200~145Ma）与白垩纪（145~66Ma），占全球铀储量的 45% 左右，是全球铀矿的主要成矿期，主要矿床类型为岩浆热液型、火山岩型、砂岩型、碱性岩型。该时期的铀矿床分布广泛，涵盖内生、外生、火山成因等多种类型，规模从大型到超大型均有，品位中等至富矿。

<sup>①</sup> 殷建武, 范文欢. 河南信阳柳林地区铀矿成矿条件分析 [J]. 地质与资源, 2013, 22 (02): 159-163.

成矿背景：中生代是全球构造 - 岩浆活动的高峰期，泛大洋板块俯冲引发大陆边缘造山运动，酸性、碱性岩浆侵入 - 喷发活动频繁，为内生铀矿提供了铀源与能量；同时，中生代陆相盆地广泛发育，沉积环境稳定，为外生铀矿的形成提供了有利条件；构造活动形成的断裂 - 裂隙系统，成为铀迁移与富集的关键通道。

典型矿床：中国江西相山铀矿田（白垩纪，120~100Ma）、俄罗斯罗沃泽尔铀矿（侏罗纪，180Ma）、美国 Powder River 盆地砂岩型铀矿（白垩纪，100~80Ma）。

### （三）新生代成矿期

成矿特征：成矿时代主要集中于古近纪（66~23Ma）与新近纪（23~2.6Ma），占全球铀储量的 30% 左右，主要矿床类型为砂岩型、沉积 - 改造型、火山沉积型。该时期的铀矿床以大型 - 超大型砂岩型为主，品位中等（0.05%~0.2% U），分布于中生代沉积盆地内。

成矿背景：新生代全球构造活动相对平缓，陆相沉积盆地持续沉降，沉积了巨厚的砂岩储层，为铀的初始富集提供了空间；盆地内的地下水循环与还原环境（有机质、黄铁矿）促进了铀的二次富集；部分区域的火山活动为铀矿化提供了物质来源与热液改造条件。

典型矿床：中国鄂尔多斯盆地东胜铀矿（古近纪，50~30Ma）、美国佛罗里达磷矿带铀矿（新近纪，15~5Ma）、阿根廷西部火山沉积型铀矿（古近纪，40~20Ma）。

## 四、铀矿类型空间分异规律

不同类型铀矿床的空间分布具有显著的分异特征，其分布与地质背景、成矿环境的地域差异密切相关，形成“内生矿床沿构造 - 岩浆带分布、外生矿床沿沉积盆地分布”的空间格局。

### （一）内生铀矿床的空间分异

岩浆热液型铀矿床：主要分布于中生代造山带的花岗岩带、火山 - 侵入杂岩带，如中国华南花岗岩带、俄罗斯外贝加尔花岗岩带、美国西部钙碱性花岗岩带。该类矿床的空间分布与花岗岩体的侵入时代、演化程度、铀丰度呈正相关，矿体严格受断裂 - 裂隙系统控制，呈脉状、网脉状分布于岩体内部或接触带。

碱性岩型铀矿床：主要分布于克拉通边缘或深大断裂带两侧的碱性岩带，如俄罗斯斯科拉半岛、中国辽宁凤城、巴西米纳斯吉拉斯州。该类矿床的空间分布与碱性岩体的展布一致，矿体呈透镜状、脉状分布于岩体内部或接触带，常与稀土、铌钽等矿产共生。

伟晶岩型铀矿床：主要分布于前寒武纪克拉通边缘的伟晶岩带，如巴西米纳斯吉拉斯州、中国新疆阿尔泰、南非德兰士瓦省。该类矿床的空间分布与花岗伟晶岩脉的

展布一致，矿体呈巢状、透镜状产于伟晶岩内部的晶洞或裂隙中。

### （二）外生铀矿床的空间分异

砂岩型铀矿床：主要分布于中生代陆相沉积盆地的河流三角洲相、湖泊相砂岩储层中，如鄂尔多斯盆地、松辽盆地、哈萨克斯坦卡拉套盆地、美国 Powder River 盆地。该类矿床的空间分布与盆地内的砂体展布、还原障分布一致，呈层状、面状大面积分布，矿体与地层整合产出。

沉积 - 改造型铀矿床：主要分布于前寒武纪 - 古生代沉积岩系发育的盆地边缘或构造带，如美国佛罗里达磷矿带、中国云南昆阳磷矿、澳大利亚卡鲁盆地。该类矿床的空间分布与沉积岩系的展布、后期构造 - 流体改造带一致，矿体呈层状、透镜状分布于沉积岩的破碎带或蚀变带。

蒸发岩型铀矿床：主要分布于中生代干旱 - 半干旱气候条件下的内陆盐湖盆地，如美国新墨西哥州、中国青海柴达木盆地、澳大利亚艾尔湖盆地。该类矿床的空间分布与蒸发岩地层的展布一致，矿体呈层状产于石膏、石盐夹层中。

### （三）火山岩型与变质型铀矿床的空间分异

火山岩型铀矿床：主要分布于中生代火山岩带的火山盆地、火山颈、环状断裂带，如中国浙江衢州、俄罗斯外贝加尔火山岩带、阿根廷西部火山岩带。该类矿床的空间分布与火山构造的展布一致，矿体呈脉状、网脉状分布于火山岩的裂隙或火山颈附近。

变质型铀矿床：主要分布于前寒武纪克拉通的区域变质岩带，如澳大利亚伊尔加恩克拉通、中国内蒙古乌拉山、加拿大加拿大地盾。该类矿床的空间分布与变质岩带的展布一致，矿体呈层状、似层状分布于变质岩的片理或构造破碎带中。

## 五、铀矿资源分布规律的核心控制因素

铀矿资源的时空分布是多重地质因素协同作用的结果，核心控制因素包括地球动力学演化、构造 - 岩浆活动、沉积环境变迁、铀源供给与保存条件，其相互作用决定了铀矿资源的聚集程度与分布格局。

### （一）地球动力学演化的宏观控制

地球动力学演化控制了全球构造 - 岩浆活动的时空分布，进而决定铀矿的成矿时代与区域分布。前寒武纪地球早期地壳形成与变质作用，奠定了铀的初始富集基础；中生代全球板块俯冲 - 碰撞引发的造山运动，促进了内生铀矿的大规模形成；新生代构造活动平缓期，陆相沉积盆地发育，为外生铀矿的形成提供了有利环境。

### （二）构造 - 岩浆活动的直接控制

构造 - 岩浆活动是铀矿化的核心驱动因素，深大断裂带作为铀源活化、流体运移的通道，控制成矿带的分布；岩浆活动为铀矿化提供了铀源与能量，酸性、碱性岩浆



的侵入-喷发活动与铀矿化时空耦合；火山构造、褶皱轴部、层间破碎带等次级构造，控制矿体的定位与形态。

### （三）沉积环境与流体活动的关键控制

沉积环境决定外生铀矿的分布，中生代陆相盆地的河流三角洲相、湖泊相砂岩储层，为铀的迁移与富集提供了空间；还原障（有机质、黄铁矿）的分布控制铀的沉淀部位；流体活动（岩浆热液、变质流体、地下水）是铀迁移与富集的载体，其化学组成、物理性质与运移方式，决定铀的活化效率与沉淀机制。

### （四）铀源供给与保存条件的基础控制

铀源供给是成矿的前提，前寒武纪富铀基底、中生代富铀岩浆岩体、表生风化的富铀岩石，为铀矿化提供了充足的物质来源；保存条件决定铀矿资源的保留程度，区域构造稳定、无强烈后期改造、良好的储盖组合，是大型-超大型铀矿床形成的必要条件。

## 第五节 铀矿勘查技术方法

### 一、地球物理勘查技术：铀矿化的物理响应探测

地球物理勘查利用铀矿及共生地质体的物理性质差异（如放射性、密度、磁性、电性），通过仪器探测其物理场异常，间接识别铀矿化线索，是铀矿勘查的核心技术手段之一。

#### （一）放射性勘查技术

技术原理：铀（U）及其衰变子体（如镭 Ra、氡 Rn）会释放  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  射线，放射性勘查通过便携式或地面仪器测量射线强度，圈定放射性异常区，直接指示铀的富集部位。 $\gamma$  射线穿透力强（可达数十厘米至数米），是地表与浅部勘查的主要探测对象；氡气测量则通过捕捉铀衰变产生的氡气扩散异常，间接反映深部铀矿化信息。

主要方法与应用：

地面  $\gamma$  总量测量：采用便携式  $\gamma$  总量测量仪，初步查明勘查区不同地质体的  $\gamma$  背景值及  $\gamma$  场特征，确定成矿标志，圈定成矿远景区，适用于预查、普查阶段的远景区筛选。

地面  $\gamma$  能谱测量：采用便携式  $\gamma$  能谱检测仪，在勘查区网格状布点测量，可快速圈定 U、Th 异常带，识别 U、Th 矿化露头、破碎带含矿性，适用于普查阶段的远景区筛选，中国江西相山铀矿田通过该方法圈定了数十处放射性异常，为后续勘查提供了直接线索。

氦气测量（土壤氦、地下水氦）：通过采集土壤或地下水样品测量氦浓度，适用于覆盖区或深部铀矿勘查，哈萨克斯坦因吉腊砂岩型铀矿利用土壤氦测量圈定了与铀矿体对应的氦气高值区，探测深度可达 50~100m。

航空  $\gamma$  能谱测量：搭载  $\gamma$  能谱仪的飞机沿预设航线飞行，快速获取大面积放射性异常分布，适用于区域普查阶段，美国 Powder River 盆地通过航空  $\gamma$  能谱测量识别了 30 余处砂岩型铀矿远景区，勘查效率较地面测量提升 10 倍以上。

技术优势与局限：直接响应铀矿化，探测效率高、成本低；但受地形、覆盖层厚度影响较大，浅部干扰（如铀矿化废石、放射性矿物碎屑）易导致假异常，需结合地质背景验证。

### （二）电法与电磁法勘查技术

技术原理：铀矿化常与黄铁矿、有机质等还原矿物共生，这类矿物具有良好的导电性；含矿砂岩、断裂破碎带与围岩存在电性差异（电阻率、极化率），电法与电磁法通过施加人工电场或电磁场，测量地下介质的电性响应，间接识别含矿构造与储层。

主要方法与应用：

可控源音频大地电磁法（CSAMT）：通过地面发射可控电磁场，接收地下介质的电磁响应，探测深度可达 1~3km，适用于深部断裂、含矿砂岩储层的空间定位，中国鄂尔多斯盆地东胜铀矿利用 CSAMT 技术查明了侏罗系直罗组含矿砂岩的厚度与埋深，为钻探部署提供了精准依据。

激发极化法（IP）：测量地下介质的极化率异常，黄铁矿等硫化物的极化率显著高于围岩，可间接指示还原障分布，浙江衢州火山岩型铀矿通过激发极化法圈定了与铀矿化密切相关的黄铁矿化破碎带，极化率高值区与矿体空间重叠。

高密度电法：通过高密度电极阵列测量地下电阻率分布，分辨率高，适用于浅部（0~100m）矿体与破碎带勘查，澳大利亚玛丽·凯瑟林变质型铀矿利用该方法查明了矿体的横向展布与厚度变化。

技术优势与局限：可穿透覆盖层探测深部地质体，适用于覆盖区勘查；但受岩性、地下水矿化度干扰较大，需结合放射性勘查结果综合解释。

### （三）重力与磁法勘查技术

技术原理：铀矿化相关的地质体（如花岗岩体、火山颈、断裂破碎带）与围岩存在密度或磁性差异，重力法测量重力异常识别高密度地质体（如花岗岩、火山岩），磁法测量磁场异常识别磁性矿物（如磁铁矿、赤铁矿）分布，间接指示成矿地质背景。

主要方法与应用：

重力勘查：适用于圈定花岗岩体、火山盆地等成矿母岩，中国华南中生代花岗岩铀矿带通过重力勘查识别了 10 余个隐伏花岗岩体，为岩浆热液型铀矿勘查提供了母岩线索。

磁法勘查：航空磁法可快速圈定火山颈、环状断裂等火山构造，浙江衢州铀矿通过航空磁法识别了与铀矿化相关的火山颈构造，磁场高值区与环状断裂带一致；地面磁法则适用于验证浅部磁性矿物富集带，辅助判断还原环境。

技术优势与局限：勘查范围广、深度大，可快速识别成矿地质背景；但针对性较弱，需与其他方法结合才能有效指示铀矿化。

## 二、地球化学勘查技术：铀矿化的地球化学异常追踪

地球化学勘查通过分析岩石、土壤、水系沉积物、地下水等介质中的铀含量及相关元素（如 Th、Ra、Mo、As、Sb）异常，追踪铀的迁移路径与富集中心，是铀矿勘查的重要辅助手段。

### （一）岩石地球化学勘查

技术原理：铀矿化区域的岩石铀含量显著高于背景值（地壳平均  $1.8\mu\text{g/g}$ ），通过采集岩石样品分析铀及伴生元素含量，可直接识别铀的初始富集带与矿化蚀变带。

应用流程与效果：在普查阶段，沿地质剖面或断裂带采集岩石样品，分析 U、Th、U/Th 比值，U 含量异常（ $> 5\mu\text{g/g}$ ）或 U/Th 比值升高（ $> 1.2$ ）指示铀的富集；在详查阶段，对矿体围岩进行系统采样，圈定矿化蚀变带的范围与强度，江西相山铀矿田通过岩石地球化学勘查发现，沥青铀矿化带的 U 含量可达  $100\sim 500\mu\text{g/g}$ ，伴生 Mo、As 含量同步升高，形成“U-Mo-As”异常组合。

技术优势：直接反映铀的赋存状态与富集程度，是验证异常、圈定矿体的关键手段；局限是采样工作量大，受地形与露头分布限制。

### （二）土壤与水系沉积物地球化学勘查

技术原理：表生环境中，铀矿化岩石经风化剥蚀，铀及伴生元素会迁移至土壤或水系沉积物中形成地球化学异常，通过分析这些介质的元素含量，可圈定区域铀矿化远景区。

主要方法与应用：

土壤地球化学测量：在覆盖区采集表层（ $0\sim 20\text{cm}$ ）或深层（ $50\sim 100\text{cm}$ ）土壤样品，分析 U、Th、Ra 等元素，适用于浅覆盖区（覆盖层厚度普查，美国佛罗里达磷矿带通过土壤地球化学测量圈定了与磷块岩铀矿对应的 U、P 异常带，异常范围与矿体展布一致。

水系沉积物地球化学测量：采集勘查区河流、冲沟的沉积物样品，分析元素含量，适用于区域普查阶段的远景区筛选，中国松辽盆地通过水系沉积物测量识别了 15 处 U、Mo 异常带，后续勘查证实其中 8 处与砂岩型铀矿远景区重合。

技术优势：采样便捷、覆盖范围广，可快速筛选成矿远景区；局限是异常迁移距离受地形、水系影响较大，需结合水文地质条件解释。

### （三）地下水地球化学勘查

技术原理：地下水是铀迁移的主要载体，含铀地下水的 U 含量、Eh 值、pH 值、络合剂（ $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{F}^-$ ）含量与普通地下水存在显著差异，通过分析地下水化学指标，可追踪含铀流体的运移路径与富集部位。

关键指标与应用：含铀地下水的 U 含量通常  $> 10\mu\text{g/L}$ （普通地下水  $< 1\mu\text{g/L}$ ），Eh 值多为 0.2~0.4V（氧化型），pH 值 7~9，富含  $\text{CO}_3^{2-}$ ；在砂岩型铀矿勘查中，地下水 U 含量高值区与还原障（有机质、黄铁矿）的交汇部位，往往是铀沉淀富集的关键场所，鄂尔多斯盆地东胜铀矿通过地下水地球化学勘查，圈定了 3 条含铀地下水流向，为钻探靶区优选提供了直接依据。

技术优势：直接反映铀的迁移与富集过程，适用于沉积盆地铀矿勘查；局限是受地下水循环系统影响，异常范围与矿体不完全重合，需结合砂岩储层分布验证。

## 三、遥感地质勘查技术：成矿环境的宏观识别

遥感地质勘查利用卫星或航空遥感数据，提取勘查区的地形地貌、岩性、构造、蚀变信息，宏观识别成矿地质背景与找矿标志，是区域普查阶段的高效技术手段。

### （一）基础地质信息提取技术

技术原理：不同岩性（如花岗岩、火山岩、砂岩）、构造（如断裂、褶皱）在遥感影像上呈现独特的光谱与纹理特征，通过影像解译可识别成矿相关的地质单元。

主要方法与应用：

岩性解译：利用多光谱遥感数据（如 Landsat 8、Sentinel-2）的光谱差异，识别花岗岩、火山岩、砂岩等含矿围岩，中国华南中生代花岗岩铀矿带通过岩性解译圈定了 12 个富铀花岗岩体，与已知铀矿床的空间重合率达 85%。

构造解译：通过高分辨率遥感影像（如 Google Earth、WorldView-3）的纹理特征，识别深大断裂、环状断裂、放射状裂隙等控矿构造，浙江衢州铀矿通过构造解译发现，铀矿体均产于环状断裂与放射状裂隙的交汇部位，解译精度达 90% 以上。

技术优势：宏观性强、勘查效率高，可快速获取大面积地质信息；局限是受植被覆盖、云层影响较大，浅部构造解译精度有限。

### （二）矿化蚀变信息提取技术

技术原理：铀矿化相关的蚀变矿物（如硅化、绿泥石化、高岭土化、萤石化）具有独特的光谱吸收特征，通过遥感光谱分析可提取蚀变异常，间接指示铀矿化。

主要方法与应用：

比值法与主成分分析法：利用多光谱数据的波段比值（如红 / 绿、近红外 / 短波红外）或主成分分析，增强蚀变矿物的光谱信号，江西相山铀矿田通过该方法提取了



硅化、绿泥石化蚀变异常，异常区与铀矿体的空间重叠率达 80%。

高光谱遥感技术：搭载高光谱仪的卫星或飞机获取高分辨率光谱数据，可精准识别单一蚀变矿物，澳大利亚奥林匹克坝铀矿利用高光谱遥感识别了萤石化、赤铁矿化蚀变带，为深部勘查提供了重要线索。

技术优势：可快速圈定大面积蚀变异常，适用于区域普查与远景区筛选；局限是蚀变信息易受植被、土壤覆盖干扰，需结合地面勘查验证。

## 四、地质填图与工程验证技术：铀矿化的直接确认

地质填图与工程验证是铀矿勘查的最终手段，通过野外地质调查与钻探、坑探工程，直接观察与取样分析，确认铀矿化的存在、规模与品位。

### （一）地质填图技术

技术原理：通过野外实测地质剖面、路线调查，系统记录勘查区的地层、岩性、构造、蚀变、矿化等地质信息，编制地质图与矿化分布图，为工程部署提供依据。

填图比例尺与内容：区域预查阶段采用 1:5 万~1:10 万比例尺，重点识别成矿地质背景与控矿构造；普查阶段 1:1 万~1:5 万比例尺，查明普查区的地层、岩石、构造、岩浆岩等地质特征；详查阶段采用 1:2 千~1:1 万比例尺，详细圈定矿化蚀变带、矿体边界与产状；填图过程中需采集岩石、土壤样品进行化学分析，标注放射性异常点与蚀变类型，中国内蒙古乌拉山变质型铀矿通过 1:1 万地质填图，查明了矿体与片麻岩片理、层间破碎带的关系，为钻探设计提供了精准坐标。

技术优势：直接获取野外地质信息，是后续工程验证的基础；局限是工作量大、周期长，受地形条件限制。

### （二）钻探工程验证技术

技术原理：通过钻机向地下钻进，获取岩心或岩屑样品，分析铀含量与矿化特征，直接验证异常区的含矿性，是铀矿勘查中最核心的工程手段。

钻探类型与应用：

普查钻探：采用浅孔（深度 < 300m）或中深孔（300~1000m），在放射性、地球化学异常区布孔，验证矿化是否存在，美国 Powder River 盆地通过普查钻探验证了 20 余处砂岩型铀矿异常，成功率达 60%。

详查与勘探钻探：采用中深孔（> 300m）或加密孔，系统控制矿体的规模、形态、品位与埋深，鄂尔多斯盆地东胜铀矿通过加密钻探查明了矿体的层状展布特征，提交了超大型铀矿资源储量。

岩心取样与分析：钻探获取的岩心按规范间距取样，分析 U 含量、矿石矿物组成、赋存状态，确定工业矿体的边界（品位  $\geq 0.05\% \text{ U}$ ）。

技术优势：直接验证矿化，获取精准的资源储量数据；局限是成本高、周期长，需基于前期勘查成果优化布孔方案。

### （三）坑探与槽探工程验证技术

技术原理：通过开挖探槽（地表浅部）或探坑（地下浅部），直接暴露矿体与围岩，观察矿化特征与蚀变关系，适用于浅部（深度）铀矿验证。

应用场景：探槽用于揭露地表或近地表的矿体露头、矿化蚀变带，浙江衢州铀矿通过探槽揭露了脉状铀矿体与萤石、石英的共生关系；探坑用于验证覆盖层较薄（区域的矿化，澳大利亚玛丽·凯瑟林铀矿通过探坑取样分析，确认了晶质铀矿的分布与品位。

技术优势：直接观察矿化特征，取样便捷、成本较低；局限是探测深度浅，适用于浅部矿化验证。

## 五、勘查技术方法的协同应用体系

单一勘查技术难以全面识别铀矿化信息，实际勘查中需构建“区域普查 - 远景区筛选 - 详查验证 - 勘探评价”的多技术协同体系，提高勘查效率与精度。

### （一）区域预查阶段（1:10 万~1:5 万）

核心技术：航空  $\gamma$  能谱测量、水系沉积物地球化学测量、遥感地质解译；

目标：圈定放射性与地球化学异常带，识别成矿地质背景（如花岗岩体、沉积盆地、深大断裂），筛选成矿远景区；

案例：中国松辽盆地通过“航空  $\gamma$  能谱 + 遥感解译 + 水系沉积物测量”，筛选出 5 个砂岩型铀矿远景区，面积合计超 1 万  $\text{km}^2$ 。

### （二）远景区筛选普查阶段（1:5 万~1:1 万）

核心技术：地面  $\gamma$  总量测量、地面  $\gamma$  能谱测量、土壤氡气测量、高密度电法、地质填图、坑探 / 槽探、普查钻探；

目标：缩小勘查范围，圈定具体异常靶区，识别控矿构造与含矿层位；

案例：哈萨克斯坦因吉腊铀矿通过“地面  $\gamma$  能谱 + 土壤氡气测量 + 地质填图”，将远景区面积从 500 $\text{km}^2$  缩小至 50 $\text{km}^2$ ，确定了 3 个重点靶区。

### （三）详查验证阶段（1:1 万~1:2 千）

核心技术：激发极化法、CSAMT、岩石地球化学测量、坑探 / 槽探、钻探；

目标：验证靶区含矿性，查明矿体的大致规模、形态与产状；

案例：江西相山铀矿田通过“CSAMT + 激发极化法 + 普查钻探”，验证了 8 处异常靶区，发现 3 处工业矿体，矿体厚度 0.5~3m。

#### （四）勘探评价阶段（1:2 千 ~1:1 千）

核心技术：加密钻探、坑探 / 槽探、岩心化学分析；

目标：精准控制矿体边界，获取资源储量数据，为矿山开发提供依据；

案例：鄂尔多斯盆地东胜铀矿通过“加密钻探 + 岩心分析”，提交铀资源储量超 10 万吨，确定了地浸开采的有利区块。

## 第三章 钍矿及其他放射性矿产地质

### 第一节 钍矿床地质特征

钍（Th）作为重要的放射性元素，其矿床形成与铀矿存在显著差异，核心受控于钍的强亲石性、高稳定性及与稀土元素（REE）的共生特性，主要富集于岩浆分异、沉积成岩及变质改造等地质过程。

#### 一、岩浆型钍矿床：岩浆分异主导的富集类型

岩浆型钍矿床是钍资源最主要的赋存形式，占全球钍储量的 70% 以上，形成于岩浆结晶分异晚期，核心与酸性、碱性岩浆的演化过程密切相关。

##### （一）花岗伟晶岩型钍矿床

成矿背景与机制：产于前寒武纪克拉通边缘或造山带内的花岗伟晶岩带，是岩浆分异最彻底的产物。酸性岩浆（花岗岩浆）演化晚期，钍与稀土、铌、钽等不相容元素同步富集，因伟晶岩结晶速度缓慢，钍得以在晶格中沉淀或形成独立矿物；富含挥发分（F、B、P）的流体相促进钍的迁移与局部富集，最终在伟晶岩的晶洞、裂隙或富硅铝质区域形成工业矿体。

核心地质特征：

矿体特征：呈透镜状、巢状、脉状产于花岗伟晶岩体内，与伟晶岩同步产出，受晶洞构造、裂隙系统控制；单个矿体长度数米至数十米，厚度 0.5~5m，规模以中小型为主，部分大型矿床由多个矿体群组成。

矿石特征：金属矿物以钍石、方钍石为主，伴生独居石、锆石、磷钇矿等含钍副矿物，稀土矿物（氟碳铈矿、褐帘石）含量较高，形成“钍-稀土-铌钽”共生组合；矿石结构以粗粒结构、文象结构为主，钍石晶体呈短柱状、粒状，粒径 0.5~5mm，分布于石英、长石颗粒间；钍品位中等至富矿（0.1%~1.0% Th），稀土氧化物（REO）含量普遍达 5%~15%，综合利用价值高。

围岩与蚀变：围岩为花岗岩、片麻岩或变质砂岩，伟晶岩与围岩接触带发育弱蚀变，主要为钾长石化、硅化、云英岩化，蚀变范围窄（数厘米至数米），与钍矿化关联度较低。

典型实例：巴西米纳斯吉拉斯州伟晶岩钍矿带，产于前寒武纪克拉通边缘，钍石



与独居石、绿柱石共生，钍品位平均 0.3%~0.8% Th，REO 含量 8%~12%，是全球最大的花岗伟晶岩型钍矿聚集区；中国新疆阿尔泰可可托海伟晶岩矿床，钍作为共伴生矿产赋存于含铍伟晶岩中，钍品位 0.05%~0.2% Th，伴生 BeO、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 等矿产。

## （二）碱性岩型钍矿床

成矿背景与机制：形成于碱性岩浆（霞石正长岩、霓辉正长岩、碳酸岩）的结晶分异与晚期热液阶段，集中分布于克拉通边缘深断裂带或板块缝合带旁侧。碱性岩浆富含碱金属（Na、K）与挥发分（CO<sub>2</sub>、F、Cl），为钍的活化迁移提供了有利条件；岩浆演化过程中，钍与稀土、铀、铌钽等元素同步富集，形成含钍副矿物（烧绿石、易解石、独居石）；晚期热液活动进一步活化岩体中的钍，形成含钍碳酸盐水溶液，在岩体裂隙或接触带中因 CO<sub>2</sub> 逸出、pH 值升高而沉淀。<sup>①</sup>

核心地质特征：

矿体特征：产于碱性岩体内部或接触带，呈透镜状、脉状、层状分布，受裂隙系统、岩相界面控制；单个矿体长度数十米至数百米，厚度 2~10m，规模以中大型为主，部分矿床延伸稳定，形成大型矿集区。

矿石特征：金属矿物包括钍石、方钍石、烧绿石、易解石，伴生稀土矿物（独居石、氟碳铈矿）、铀矿物（沥青铀矿、铀钍石）及碱性矿物（霞石、霓石）；矿石结构以粒状结构、嵌晶结构为主，钍石多嵌布于长石、霞石颗粒间，或与烧绿石共生形成集合体；钍品位中等（0.05%~0.5% Th），部分富矿地段可达 1.0%~2.0% Th，铀钍比值（U/Th）多为 0.1~0.5，稀土氧化物含量 10%~20%，共伴生矿产丰富。

围岩与蚀变：围岩为碱性岩（霞石正长岩、碳酸岩）或变质岩（片麻岩、大理岩），接触带发育强烈蚀变，主要为碳酸盐化、钠长石化、萤石化、绿泥石化，其中钠长石化、碳酸盐化与钍矿化空间重叠度高，可作为找矿标志。

典型实例：俄罗斯科拉半岛罗沃泽尔碱性岩矿床，产于霞石正长岩体内，钍与稀土、铌钽、铀共生，钍品位平均 0.2%~0.4% Th，REO 含量 12%~18%，是全球典型的碱性岩型钍矿；中国湖北竹山碱性岩钍矿，产于中生代霓辉正长岩脉中，矿体受断裂控制，钍石与烧绿石、氟碳铈矿共生，钍品位 0.1%~0.3% Th。

## （三）花岗岩型钍矿床

成矿背景与机制：形成于酸性岩浆（花岗岩、花岗闪长岩）的结晶分异晚期，岩浆演化过程中，钍因不相容性持续富集于残余熔体，随岩浆冷却结晶形成含钍副矿物（独居石、锆石、钍石），或在岩体裂隙中因热液活动叠加富集。该类矿床多与富钾

<sup>①</sup> 陈金勇, 范洪海, 王生云, 等. 浅谈钍矿化与稀土元素矿化的关系 [C]// 中国矿物岩石地球化学学会. 中国矿物岩石地球化学学会第 17 届学术年会论文摘要集. 核工业北京地质研究院; 中核铀资源勘查与评价技术重点实验室; 2019: 699-700.

花岗岩、A型花岗岩相关，岩体铀丰度较低（ $< 5\mu\text{g/g}$ ），钍丰度较高（ $10\sim 50\mu\text{g/g}$ ），Th/U 比值 $> 5$ 。

核心地质特征：

矿体特征：呈浸染状、细脉状分布于花岗岩体内部或边缘相带，受岩体结构、微裂隙控制；浸染状矿体无明显边界，与花岗岩呈渐变关系，细脉状矿体沿裂隙充填，长度数米至数十米，厚度  $0.1\sim 1\text{m}$ ；规模以中小型为主，部分大型花岗岩体可形成区域性钍异常带。

矿石特征：金属矿物以独居石、锆石、钍石为主，伴生少量褐帘石、磷钇矿，无独立铀矿物或铀含量极低；矿石结构以细粒结构、浸染状结构为主，独居石呈细小粒状（ $0.05\sim 0.5\text{mm}$ ），均匀分布于石英、长石颗粒间；钍品位较低（ $0.01\%\sim 0.1\%\text{Th}$ ），但分布广泛，部分矿床因规模大、易开采具有工业价值。

围岩与蚀变：围岩为花岗岩、花岗闪长岩，蚀变较弱，主要为钾长石化、硅化、云英岩化，蚀变范围局限，与钍矿化关联度不如伟晶岩型、碱性岩型显著。

典型实例：美国南达科他州黑山花岗岩钍矿，产于前寒武纪富钾花岗岩中，钍主要赋存于独居石、锆石中，平均品位  $0.03\%\sim 0.08\%\text{Th}$ ，是美国重要的钍资源基地；中国广东莲花山花岗岩带，花岗岩体钍丰度  $15\sim 30\mu\text{g/g}$ ，局部形成浸染状钍矿化，钍品位  $0.02\%\sim 0.06\%\text{Th}$ 。

## 二、沉积型钍矿床：表生沉积主导的富集类型

沉积型钍矿床形成于地表沉积环境，核心依赖钍的物理化学稳定性，通过机械搬运、化学沉淀或生物吸附实现富集，占全球钍储量的 20% 左右。

### （一）砂岩型钍矿床

成矿背景与机制：产于中生代陆相沉积盆地的河流三角洲相、湖泊相砂岩中，钍的物质来源主要为盆地周边花岗岩、片麻岩的风化剥蚀产物。表生环境中，钍以氧化物（ $\text{ThO}_2$ ）或氢氧化物形式存在，化学性质稳定，不易溶解迁移，主要通过机械搬运作用进入沉积盆地，在砂岩储层中因粒度分选、重力分异实现富集；部分情况下，钍可吸附于黏土矿物、铁锰氧化物表面，进一步促进局部富集。

核心地质特征：

矿体特征：呈层状、似层状与砂岩整合产出，平面上呈大面积连续展布，与砂体展布方向一致；单个矿体长度数千米至数十千米，厚度  $1\sim 5\text{m}$ ，倾角平缓（ $1^\circ\sim 3^\circ$ ），规模以大型、超大型为主，但品位较低。

矿石特征：金属矿物以独居石、钍石为主，伴生锆石、钛铁矿，多呈碎屑状分布于砂岩颗粒间；脉石矿物以石英、长石为主，含少量黏土矿物（伊利石、蒙脱石）、

方解石；矿石结构以碎屑结构、孔隙充填结构为主，钍矿物多为磨圆度较好的碎屑颗粒；钍品位较低（0.01%~0.05% Th），部分富集地段可达 0.1% Th，Th/U 比值 > 10，无工业价值铀矿化。

围岩与蚀变：围岩为砂岩、粉砂岩、泥岩，呈“泥-砂-泥”储盖组合，泥岩夹层作为隔水层，限制钍的垂向迁移；蚀变极弱，仅局部发育黏土化、碳酸盐化，与钍矿化无明显关联。

典型实例：澳大利亚西部卡鲁盆地砂岩型钍矿，产于中生代河流三角洲相砂岩中，钍主要赋存于独居石碎屑中，平均品位 0.02%~0.04% Th，矿床规模超大型，是全球重要的沉积型钍矿资源基地；中国松辽盆地西部砂岩钍矿，产于白垩系砂岩中，钍呈浸染状分布，品位 0.01%~0.03% Th，规模大型，具有潜在开发价值。

## （二）磷酸盐岩型钍矿床

成矿背景与机制：形成于海相或湖相沉积环境，与磷块岩、磷灰岩的沉积过程同步，钍通过化学沉淀或类质同象方式赋存于磷灰石中。海水中的钍离子（Th<sup>4+</sup>）与磷酸盐离子结合，形成含钍磷灰石，或取代磷灰石晶格中的钙离子实现类质同象富集；沉积过程中，生物（如浮游生物、腕足类）的骨骼堆积也可促进钍的吸附富集，形成“磷-钍”共生组合。

核心地质特征：

矿体特征：呈层状、似层状与磷块岩整合产出，横向分布稳定，长度数十千米至数百千米，厚度 5~20m，规模以超大型为主；矿体产状平缓，倾角 2°~5°，与沉积盆地的沉积中心一致。

矿石特征：金属矿物以含钍磷灰石为主，伴生少量独居石、锆石，钍主要呈类质同象形式赋存于磷灰石晶格中（占总钍含量的 80% 以上）；脉石矿物以方解石、白云石、黏土矿物为主；矿石结构以粒状结构、胶状结构为主，磷灰石呈粒状或胶状集合体；钍品位较低（0.01%~0.03% Th），但磷矿规模巨大，钍资源总量可观，且伴生稀土元素（REO 含量 1%~3%），综合利用价值高。

围岩与蚀变：围岩为页岩、黏土岩、碳酸盐岩，与磷块岩呈互层产出；蚀变较弱，主要为白云石化、黏土化，分布于矿体边缘，与钍矿化关联度低。

典型实例：摩洛哥西撒哈拉磷矿带，产于新生代海相磷块岩中，钍平均品位 0.02% Th，磷矿储量超 500 亿吨，钍资源总量达 100 万吨以上，是全球最大的磷酸盐岩型钍矿；中国云南滇池盆地磷矿，产于新生代湖相磷块岩中，钍品位 0.01%~0.02% Th，伴生 REO 含量 1.5%~2.5%，具有综合开发潜力。

### 三、变质型钍矿床：变质改造主导的富集类型

变质型钍矿床形成于区域变质或动力变质过程，核心是原有含钍岩石（如砂岩、页岩、火山岩）经变质作用活化，钍在构造扩容部位或变质流体通道中二次富集，占全球钍储量的 10% 左右。

#### （一）区域变质型钍矿床

成矿背景与机制：原岩为富含钍的沉积岩（长石砂岩、页岩）或火山岩，在区域变质作用（绿片岩相至角闪岩相）中，钍从原岩矿物晶格中释放，进入富水、富  $\text{CO}_2$  的变质流体；变质流体沿变质带的片理、层理或构造裂隙运移，在构造扩容部位或还原环境中，钍与稀土、铀等元素结合，形成钍石、独居石等矿物沉淀富集。

核心地质特征：

矿体特征：呈层状、似层状、透镜状，与变质岩片理平行或近于平行产出，部分矿体因构造挤压呈揉皱状；长度数百米至数千米，厚度 3~10m，规模以中小型为主；矿体分布于区域变质带内，受岩性与构造双重控制。

矿石特征：金属矿物以钍石、独居石、褐帘石为主，伴生锆石、钛铁矿、磁铁矿；矿石结构以变晶结构、片麻状结构为主，钍石呈粒状或短柱状，分布于石英、长石等脉石矿物颗粒间；钍品位中等（0.05%~0.2% Th），Th/U 比值  $> 8$ ，伴生稀土元素含量 3%~5%。

围岩与蚀变：围岩为片麻岩、片岩、变砂岩等区域变质岩；蚀变以绿泥石化、绢云母化、硅化为主，蚀变带宽度数米至数十米，与矿体空间分布高度一致，可作为找矿标志。

典型实例：加拿大安大略省布鲁斯半岛变质型钍矿，产于前寒武纪角闪岩相变质岩系中，原岩为长石砂岩，钍石与独居石共生，平均品位 0.08%~0.15% Th，规模中型；中国内蒙古乌拉山变质带钍矿，产于太古宙片麻岩中，矿体受层间破碎带控制，钍品位 0.05%~0.1% Th，伴生稀土元素。

#### （二）混合岩化型钍矿床

成矿背景与机制：形成于区域变质作用晚期的混合岩化过程，原岩（片麻岩、片岩）经混合岩化作用发生部分熔融，形成花岗质熔体与变质流体；钍作为不相容元素，优先富集于花岗质熔体或流体中，随熔体侵入或流体运移，在混合岩化带的构造裂隙、岩性界面中沉淀，形成钍矿化。

核心地质特征：

矿体特征：呈脉状、网脉状、透镜状分布于混合岩化带内，受裂隙系统与岩性界面控制；长度数十米至数百米，厚度 0.5~3m，规模以中小型为主；矿体与混合岩、花岗岩脉的接触带关系密切。

矿石特征：金属矿物以钍石、独居石、锆石为主，伴生少量烧绿石、易解石；矿石结构以细粒结构、充填结构为主，钍石多充填于裂隙或嵌布于混合岩的长石、石英颗粒间；钍品位中等至富矿（0.1%~0.8% Th），部分地段可达 1.0% Th，Th/U 比值 > 10，伴生铌、钽等矿产。

围岩与蚀变：围岩为混合岩、片麻岩、花岗岩脉；蚀变强烈，主要为钾长石化、硅化、云英岩化、绿泥石化，蚀变带与矿体同步展布，钾长石化、硅化是重要的找矿标志。

典型实例：印度比哈尔邦辛格布姆混合岩化带钍矿，产于前寒武纪混合岩化片麻岩中，钍石与独居石、锆石共生，平均品位 0.2%~0.6% Th，伴生  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$  含量 0.1%~0.3%，是印度重要的钍 - 铌钽共生矿床；中国河北迁安混合岩化带钍矿，产于太古宙混合岩中，矿体受断裂控制，钍石与独居石共生，钍品位 0.1%~0.4% Th。

## 第二节 稀土元素伴生放射性矿产

### 一、稀土与放射性元素的共生机制

稀土元素（La-Lu、Sc、Y）与铀、钍的共生并非偶然，核心受控于地球化学属性与地质作用过程的协同匹配，主要体现为三大机制：

#### （一）地球化学属性耦合机制

不相容性协同富集：稀土元素、铀、钍均为大离子亲石元素（LILE），离子半径大、电荷高，在岩浆结晶分异过程中难以进入橄榄石、辉石等早期结晶矿物的晶格，持续富集于残余熔体中，形成“稀土 - 铀 - 钍”同步富集的物质基础。

类质同象替代：钍（ $\text{Th}^{4+}$ ，离子半径 0.105nm）与稀土元素中的镧（ $\text{La}^{3+}$ ，0.106nm）、铈（ $\text{Ce}^{4+}$ ，0.087nm）离子半径相近，铀（ $\text{U}^{4+}$ ，0.097nm）可替代稀土矿物晶格中的  $\text{Ce}^{4+}$ 、 $\text{Y}^{3+}$ ，形成类质同象赋存；此外，稀土磷酸盐矿物（如独居石、磷钇矿）、氟碳酸盐矿物（如氟碳铈矿）的晶格缺陷，也为铀、钍的嵌入提供了空间。

流体搬运 - 沉淀同步性：富含 F、Cl、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  等挥发分的流体，可同时与稀土、铀、钍形成稳定络合物（如  $[\text{REEF}_6]^{3-}$ 、 $[\text{UO}_2\text{F}_4]^{2-}$ 、 $[\text{ThF}_6]^{2-}$ ），在温度降低、压力释放或 pH 值变化时同步沉淀，形成共生组合。<sup>①</sup>

#### （二）地质作用驱动机制

岩浆分异驱动：酸性、碱性岩浆演化晚期，残余熔体中稀土、铀、钍浓度达到峰值，随岩浆冷却结晶形成含稀土 - 放射性元素的副矿物（如独居石、烧绿石、钍石），是内生型共生矿床的主要形成方式。

<sup>①</sup> 仇宝聚，张书成．钍矿成矿特征与地质勘查 [J]．世界核地质科学，2005，(04)：203-210．仇宝聚，张书成．钍矿成矿特征与地质勘查 [J]．世界核地质科学，2005，(04)：203-210．



沉积吸附 - 化学沉淀：表生环境中，稀土与铀、钍可通过黏土矿物、铁锰氧化物的吸附作用共同富集，或在海相 / 湖相环境中与磷酸盐、碳酸盐结合形成共沉淀，形成沉积型共生矿床。

变质流体活化迁移：区域变质或混合岩化过程中，原有含稀土 - 放射性元素的岩石经流体活化，稀土、铀、钍同步进入流体相，在构造扩容部位二次沉淀，强化共生关系。

### （三）矿物载体共生机制

独立矿物共生：稀土矿物（氟碳铈矿、氟碳钙铈矿、褐帘石）与放射性矿物（钍石、方钍石、沥青铀矿）紧密共生，形成矿物集合体，如碱性岩中常见“氟碳铈矿 - 钍石 - 烧绿石”共生组合。

单一矿物承载：部分稀土矿物可同时容纳稀土、铀、钍，如独居石（ $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Th}, \text{U})\text{PO}_4$ ）中钍含量可达 1%~10%、铀含量 0.1%~1%，磷钇矿（ $(\text{Y}, \text{Th}, \text{U})\text{PO}_4$ ）中钍、铀含量合计可达 0.5%~5%，是共生组合的核心载体矿物。

## 二、稀土伴生放射性矿产的主要矿床类型

根据成矿背景与成因，稀土伴生放射性矿产可分为四大类，其中岩浆型与沉积型占主导地位，合计占资源总量的 90% 以上。

### （一）碱性岩 - 碳酸岩型（内生主导型）

成矿背景与分布：集中分布于克拉通边缘深断裂带或板块缝合带旁侧，与碱性岩浆（霞石正长岩、霓辉正长岩）、碳酸岩的侵入 - 喷发活动密切相关，是稀土伴生放射性矿产最主要的类型，占该类资源总量的 60% 以上。

#### 1. 核心地质特征

矿体特征：产于碱性岩或碳酸岩体内，呈层状、透镜状、脉状分布，受岩相分异、裂隙系统控制；单个矿体长度数百米至数千米，厚度 5~20m，规模以大型、超大型为主，稀土储量普遍达数百万吨至数千万吨。

共生组合特征：稀土矿物以氟碳铈矿、氟碳钙铈矿、烧绿石为主，放射性矿物包括钍石、方钍石、沥青铀矿，形成“稀土 - 钍 - 铀 - 铀钍”综合共生组合；钍品位 0.05%~0.5% Th，铀品位 0.01%~0.1% U，Th/U 比值 5~50，稀土氧化物（REO）含量 10%~25%。

赋存状态：钍主要赋存于钍石、独居石及烧绿石中（占总钍的 70% 以上），部分呈类质同象赋存于稀土氟碳酸盐矿物；铀以沥青铀矿独立矿物形式为主，少量类质同象替代稀土矿物中的  $\text{Ce}^{4+}$ 。

围岩蚀变：接触带发育强烈蚀变，主要为碳酸盐化、钠长石化、萤石化、绿泥石

化,其中萤石化、钠长石化与稀土-放射性元素富集高度同步,可作为找矿标志。

## 2. 典型实例

俄罗斯科拉半岛罗沃泽尔矿床:霞石正长岩型,REO 储量超 1000 万吨,钍平均品位 0.2%~0.4% Th,铀品位 0.02%~0.05% U,伴生  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  含量 2%~3%,是全球最大的稀土-放射性共生矿床之一。

中国内蒙古白云鄂博矿床:碳酸岩-碱性岩复合型,REO 储量超 3 亿吨,钍品位 0.08%~0.15% Th,铀品位 0.01%~0.03% U,钍资源总量达数万吨,是我国重要的伴生放射性资源基地。

## (二) 花岗伟晶岩型(岩浆分异型)

成矿背景与分布:产于前寒武纪克拉通边缘或造山带内的伟晶岩带,与花岗岩浆的极端分异作用相关,是稀土、钍、铀、钽、铍等稀有金属的重要共生载体,占该类资源总量的 20% 左右。

### 1. 核心地质特征

矿体特征:呈透镜状、巢状、脉状产于花岗伟晶岩体内,受晶洞构造、裂隙系统控制;单个矿体长度数十米至数百米,厚度 1~5m,规模以中小型为主,但品位较高,部分为富矿。

共生组合特征:稀土矿物以独居石、磷钇矿、褐帘石为主,放射性矿物为钍石、方钍石,偶见沥青铀矿,共生“稀土-钍-铀-钽-铍”组合;钍品位 0.1%~1.0% Th,铀品位 0.01%~0.05% U, Th/U 比值  $> 20$ , REO 含量 5%~15%。

赋存状态:钍主要赋存于独居石、钍石中(占总钍的 80% 以上),独居石中钍含量可达 5%~10%;铀含量较低,多以类质同象形式赋存于褐帘石、磷钇矿中。

围岩蚀变:伟晶岩与围岩(花岗岩、片麻岩)接触带发育弱蚀变,主要为钾长石化、硅化、云英岩化,蚀变范围窄(数厘米至数米),与共生矿化关联度中等。

## 2. 典型实例

巴西米纳斯吉拉斯州伟晶岩矿带:前寒武纪克拉通边缘产出,由数百条伟晶岩脉组成,独居石中钍含量 3%~8%, REO 含量 8%~12%,伴生  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$  含量 0.5%~1%,是全球重要的稀土-钍共生基地。

中国新疆阿尔泰可可托海矿床:含铍伟晶岩型,REO 含量 3%~5%,钍品位 0.05%~0.2% Th,铀品位 0.01%~0.02% U,钍、铀作为共伴生矿产综合回收。

## (三) 磷酸盐岩型(沉积共生型)

成矿背景与分布:形成于海相或湖相沉积环境,与磷块岩、磷灰岩的沉积过程同步,稀土与放射性元素通过化学沉淀或类质同象方式赋存于磷灰石中,占该类资源总量的 10% 左右。

### 1. 核心地质特征

矿体特征：呈层状、似层状与磷块岩整合产出，横向分布稳定，长度数十千米至数百千米，厚度 5~30m，规模以超大型为主，磷矿储量巨大，稀土与放射性资源总量可观。

共生组合特征：稀土主要赋存于含稀土磷灰石中，放射性元素以钍为主、铀为辅，形成“磷 - 稀土 - 钍”共生组合；钍品位 0.01%~0.05% Th，铀品位 0.001%~0.01% U，Th/U 比值 > 10，REO 含量 1%~5%。

赋存状态：钍、铀主要呈类质同象形式取代磷灰石晶格中的钙离子，部分吸附于磷灰石颗粒表面；稀土与钍的类质同象替代具有选择性，轻稀土（La、Ce、Pr、Nd）与钍的共生关系更密切。

围岩蚀变：蚀变较弱，主要为白云石化、黏土化，分布于矿体边缘，与共生矿化关联度低。

### 2. 典型实例

摩洛哥西撒哈拉磷矿带：新生代海相磷块岩，磷矿储量超 500 亿吨，REO 含量 2%~3%，钍平均品位 0.02% Th，铀品位 0.003%~0.005% U，钍资源总量达 100 万吨以上，是全球最大的沉积型稀土 - 放射性共生矿床。

中国云南滇池盆地磷矿：新生代湖相磷块岩，REO 含量 1.5%~2.5%，钍品位 0.01%~0.02% Th，铀品位 0.002%~0.004% U，综合利用潜力显著。

### （四）变质型（改造富集型）

成矿背景与分布：形成于区域变质或混合岩化过程，原岩为富含稀土 - 放射性元素的沉积岩（长石砂岩、页岩）或火山岩，经变质流体活化改造后二次富集，占该类资源总量的 5% 以下。

#### 1. 核心地质特征

矿体特征：呈层状、似层状、透镜状，与变质岩片理平行或近于平行产出，长度数百米至数千米，厚度 3~10m，规模以中小型为主。

共生组合特征：稀土矿物以独居石、褐帘石、磷钇矿为主，放射性矿物为钍石、方钍石，共生“稀土 - 钍 - 铀”组合；钍品位 0.05%~0.2% Th，铀品位 0.005%~0.02% U，Th/U 比值 > 8，REO 含量 3%~8%。

赋存状态：钍主要赋存于独居石、钍石中，铀以类质同象形式赋存于褐帘石或钽铁矿中；变质作用强度控制赋存状态，角闪岩相变质可促进独立放射性矿物的形成。

围岩蚀变：蚀变以绿泥石化、绢云母化、硅化为主，蚀变带宽度数米至数十米，与矿体空间分布高度一致，可作为找矿标志。

## 2. 典型实例

加拿大安大略省布鲁斯半岛矿床：前寒武纪角闪岩相变质岩系，原岩为长石砂岩，REO 含量 4%~6%，钍品位 0.08%~0.15% Th，铀品位 0.008%~0.01% U，是典型的变质型共生矿床。

中国内蒙古乌拉山变质带矿床：太古宙片麻岩中产出，REO 含量 3%~5%，钍品位 0.05%~0.1% Th，铀品位 0.005%~0.01% U，受层间破碎带控制。

## 三、资源潜力与综合利用意义

### （一）资源潜力评估

全球稀土伴生钍资源总量约 1500 万吨~2000 万吨，伴生铀资源总量约 50 万吨~80 万吨，分别占全球钍、铀总资源量的 30%~40%、5%~8%，是重要的补充资源。

碱性岩 - 碳酸岩型矿床是最具潜力的类型，单矿床伴生钍资源量可达数万吨至数十万吨，如中国白云鄂博矿床伴生钍资源量超 10 万吨，俄罗斯罗沃泽尔矿床超 5 万吨。

沉积型磷酸盐岩矿床虽品位较低，但规模巨大，钍资源总量可观，摩洛哥西撒哈拉磷矿带伴生钍资源量占全球沉积型总量的 60% 以上。

### （二）综合利用意义

资源高效利用：稀土矿山开发过程中回收伴生放射性元素，可提高资源综合利用率，降低单一矿产开发成本，如白云鄂博矿床通过综合回收，钍、铀产品已成为矿山重要的辅助收益来源。

战略资源保障：伴生钍资源是第四代核电的潜在燃料，伴生铀可补充常规铀矿资源不足，对保障国家能源安全具有重要战略意义。

环保意义：稀土矿物与放射性元素紧密共生，若单独开采稀土而不回收放射性元素，可能导致放射性污染；综合回收可实现“资源利用 - 环境保护”双赢。

### （三）开发利用挑战

赋存状态复杂：部分放射性元素呈类质同象赋存于稀土矿物中，分离提取难度大，需研发高效分离技术。

放射性污染风险：开采、分选过程中需严格控制放射性粉尘与废水排放，环保成本较高。

技术标准缺失：目前针对稀土伴生放射性矿产的品位指标、回收标准尚未完全统一，制约了规模化开发。

### 第三节 非传统放射性矿产资源

#### 一、非传统放射性矿产资源的类型界定与核心属性

##### （一）类型界定标准

赋存介质非常规：突破传统岩浆岩、沉积砂岩、伟晶岩等载体，主要赋存于油气田、煤系地层、深海富稀土沉积物、热液蚀变带、红土型矿床等新型地质体中。

成矿机制非典型：偏离传统岩浆分异、沉积机械富集、变质改造等主流成矿模式，以流体还原富集、生物-化学协同富集、低温热液交代等特殊机制为主。

资源形态分散化：多以分散状态（吸附态、离子态、微细浸染态）赋存，缺乏独立工业矿体，需通过综合提取或副产品回收实现利用。

战略价值突出：部分类型资源规模巨大、分布广泛，或伴生于能源矿产（油气、煤炭）中，可实现“能源-放射性资源”协同开发，降低开发成本。

##### （二）核心地球化学属性

迁移性强：非传统放射性元素（主要为铀，部分含钍、镭）多以可溶性络合物（如  $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 、 $[\text{UO}_2\text{Cl}_4]^{2-}$ ）形式迁移，受流体性质（pH、Eh、络合剂含量）控制显著。

亲有机性：铀、镭等元素易与有机质结合形成稳定复合物，在富有机质地质体（煤、油页岩、油气储层）中优先富集。

共生元素单一化：与传统放射性矿产多伴生稀土、铌钽不同，非传统类型多单一富集铀或镭，伴生有益元素较少，综合利用价值集中于放射性元素本身。

#### 二、主要非传统放射性矿产资源类型及地质特征

##### （一）油气田型铀资源（流体还原型）

成矿背景与分布：赋存于中新生代陆相或海相油气田的储层砂岩、碳酸盐岩中，集中分布于大型沉积盆地的油气富集区，如美国二叠盆地、俄罗斯西西伯利亚盆地、中国鄂尔多斯盆地延长组油气区。

##### 1. 核心地质特征

赋存介质：主要为油气储层的砂岩（孔隙度 15%~30%）、碳酸盐岩（溶洞、裂隙发育），油气田的还原环境（有机质分解产生  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CH}_4$ ）是铀沉淀的关键条件。

矿体特征：无明确独立矿体，铀呈浸染状、吸附态分布于储层岩石颗粒表面或孔隙中，形成“油气储层-铀”共生体系；铀含量 0.01%~0.1% U，部分富矿段可达 0.1%~0.3% U，资源规模与油气田范围正相关，单个油气田铀资源量可达数千吨至数万吨。



赋存状态：以沥青铀矿、铀黑等独立矿物形式为主（占总铀的 60%~70%），部分呈离子吸附态赋存于黏土矿物（伊利石、蒙脱石）或有机质表面。

成矿机制：含铀地下水与油气田还原流体（富  $\text{H}_2\text{S}$ 、有机质）相遇，Eh 值降低（-0.1~-0.5V），铀从可溶性络合物中还原沉淀，油气储层的孔隙空间为铀富集提供了有利场所。

## 2. 典型实例

美国二叠盆地油气田铀资源：储层为二叠系砂岩，铀平均含量 0.03%~0.08% U，资源总量超 5 万吨，通过油气开采副产品回收铀，已实现商业化利用。

中国鄂尔多斯盆地延长组油气区：铀赋存于侏罗系砂岩油气储层中，铀含量 0.02%~0.06% U，伴生油气资源丰富，具备“油气 - 铀”协同开发潜力。

## （二）煤系地层型放射性资源（生物 - 沉积型）

成矿背景与分布：赋存于石炭纪 - 侏罗纪煤系地层中，包括煤层、煤系砂岩、煤系页岩，集中分布于煤炭资源丰富的盆地，如美国阿巴拉契亚煤田、俄罗斯库兹巴斯煤田、中国山西大同煤田、贵州六盘水煤田。

### 1. 核心地质特征

赋存介质：主要为煤层（尤其是富有机质的镜质组含量  $> 60\%$  的煤层）、煤系顶底板砂岩，煤层的有机质是铀、镭的主要吸附载体。

矿体特征：铀、镭呈分散状赋存于煤层中，无独立矿体边界；铀含量 0.005%~0.05% U，镭（Ra-226）含量 10~100Bq/g，部分高放射性煤层铀含量可达 0.05%~0.1% U，镭含量  $> 100\text{Bq/g}$ ；资源规模与煤田储量正相关，大型煤田伴生铀资源量可达数万吨，镭资源量可观。

赋存状态：铀主要呈吸附态赋存于煤的有机质表面（占总铀的 70%~80%），少量形成微细粒沥青铀矿；镭通过放射性衰变从铀衍生而来，多吸附于黏土矿物或有机质中，与铀含量呈正相关。

成矿机制：泥炭沼泽环境中，植物遗体分解形成的有机质对地表水、地下水中的铀离子具有强烈吸附作用；成煤过程中，铀随泥炭压实、成岩作用进一步富集，部分铀在煤化作用产生的还原流体作用下形成独立矿物。

## 2. 典型实例

美国阿巴拉契亚煤田：石炭纪煤层铀含量 0.01%~0.04% U，镭含量 30~80Bq/g，煤田储量超 1000 亿吨，伴生铀资源量超 3 万吨，通过煤炭洗选副产品回收铀、镭。

中国贵州六盘水煤田：二叠纪煤层铀含量 0.008%~0.03% U，镭含量 20~60Bq/g，部分煤层因放射性超标需特殊处理，同时具备回收利用潜力。

### （三）深海富稀土沉积物型放射性资源（深海沉积型）

成矿背景与分布：赋存于太平洋、大西洋深海盆地的富稀土沉积物中，集中分布于水深 3000~5000m 的深海平原或海山周围，如太平洋中部克拉里昂 - 克利珀顿断裂带（CCZ）、大西洋中脊深海区。

#### 1. 核心地质特征

赋存介质：深海黏土沉积物、富锰结核、富钴结壳，沉积物中稀土氧化物（REO）含量 2%~5%，放射性元素以钍为主、铀为辅，是“稀土 - 钍”共生的新型资源。

矿体特征：呈面状、层状分布于深海底部，厚度数米至数十米，延伸范围可达数千平方公里；钍品位 0.02%~0.1% Th，铀品位 0.001%~0.005% U，Th/U 比值 > 20，稀土与钍资源总量巨大，单个深海区钍资源量可达数百万吨。

赋存状态：钍主要呈类质同象赋存于富稀土黏土矿物（伊利石、蒙脱石）或锰氧化物中，部分形成微细粒独居石、钍石；铀含量较低，多以离子吸附态存在。

成矿机制：深海环境中，海水携带的稀土、钍离子通过黏土矿物的吸附作用、锰氧化物的氧化 - 沉淀作用实现富集；深海的还原环境与缓慢沉积速率（< 1cm / 千年）促进了元素的长期积累。

#### 2. 典型实例

太平洋 CCZ 断裂带：深海富稀土沉积物分布面积超 100 万平方公里，REO 含量 3%~4%，钍平均品位 0.05%~0.08% Th，钍资源总量超 500 万吨，是全球最具潜力的非传统钍资源基地。

大西洋中脊深海区：富钴结壳中钍含量 0.03%~0.06% Th，伴生 Co、Ni 等矿产，综合利用价值突出。

### （四）红土型钍资源（风化 - 淋滤型）

成矿背景与分布：赋存于热带、亚热带地区富含钍原岩（花岗岩、碱性岩、玄武岩）的风化壳红土中，集中分布于澳大利亚、巴西、印度、中国云南等地，如澳大利亚西部伊尔加恩克拉通红土区、巴西亚马孙盆地红土区。

#### 1. 核心地质特征

赋存介质：红土化风化壳，主要由高岭石、伊利石、铁锰氧化物组成，风化壳厚度 10~50m，原岩的钍丰度是成矿的物质基础（原岩钍含量 10~50 $\mu$ g/g）。

矿体特征：呈面状、似层状分布于原岩出露区上方，与下伏原岩呈渐变关系；钍品位 0.01%~0.08% Th，部分富集段可达 0.1% Th，规模以大型、超大型为主，单个红土区钍资源量可达数十万吨至数百万吨。

赋存状态：钍主要吸附于铁锰氧化物（赤铁矿、褐铁矿、软锰矿）表面（占总钍的 60%~70%），部分形成次生钍矿物（如钍铁矿），化学性质稳定，不易淋滤迁移。

成矿机制：原岩经长期风化淋滤作用，硅、钙、钠等易溶元素被淋失，钍与铁、锰、铝等元素残留于风化壳中；热带、亚热带湿润气候（年降水量  $> 1500\text{mm}$ ）促进了风化作用的进行，铁锰氧化物的吸附作用进一步强化钍的富集。

## 2. 典型实例

澳大利亚西部红土型钍矿：原岩为花岗岩，红土化风化壳厚度  $20\sim 40\text{m}$ ，钍平均品位  $0.03\%\sim 0.06\%$  Th，资源总量超 200 万吨，是全球最大的非传统钍资源基地。

中国云南西双版纳红土区：原岩为碱性岩，钍品位  $0.02\%\sim 0.05\%$  Th，风化壳分布面积超  $1000\text{km}^2$ ，具备开发潜力。

## （五）热液蚀变带型铀资源（低温热液型）

成矿背景与分布：赋存于中低温热液蚀变带（温度  $100\sim 300^\circ\text{C}$ ）中，与火山岩、沉积岩的热液活动相关，集中分布于板块边缘火山带、深大断裂旁侧，如日本列岛火山岩蚀变带、美国西部内华达火山岩区、中国东南沿海火山岩带。

### 1. 核心地质特征

赋存介质：火山岩（流纹岩、安山岩）、沉积岩（砂岩、页岩）的热液蚀变带，蚀变类型以硅化、绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化为主。

矿体特征：呈脉状、网脉状、浸染状分布于蚀变带中，受断裂裂隙控制；单个矿体长度数十米至数百米，厚度  $0.5\sim 3\text{m}$ ，铀品位  $0.1\%\sim 1.0\%$  U，部分富矿段可达  $1\%\sim 3\%$  U，规模以中小型为主，但品位较高。

赋存状态：主要为沥青铀矿、铀云母类矿物，呈细粒状或薄膜状充填于裂隙中，部分吸附于蚀变矿物表面。

成矿机制：深大断裂带的中低温热液（富含  $\text{CO}_2$ 、F、Cl）从地壳或上地幔萃取铀，沿断裂裂隙运移至浅部；当热液与围岩发生交代作用（硅化、碳酸盐化）时，pH 值升高、温度降低，铀从络合物中沉淀富集，形成蚀变带型铀矿。

### 2. 典型实例

日本九州火山岩蚀变带铀矿：赋存于流纹岩热液蚀变带中，铀品位  $0.3\%\sim 0.8\%$  U，伴生硅化、绿泥石化，是日本重要的非传统铀资源基地。

中国浙江临海火山岩带：流纹岩蚀变带中铀品位  $0.2\%\sim 0.5\%$  U，受环状断裂控制，具备小型开采价值。

## 三、非传统放射性矿产资源的成矿规律与控制因素

### （一）核心成矿规律

流体主导成矿：多数非传统放射性矿产资源的形成与流体活动密切相关（油气田还原流体、热液、地下水），流体不仅是铀、钍的搬运载体，其性质（Eh、pH、络

合剂含量)的变化是元素沉淀的关键触发条件。

还原环境富集：铀的富集高度依赖还原环境，油气田的有机质分解环境、煤系地层的富有机质环境、深海的还原沉积环境均为铀提供了稳定的沉淀场所，形成“还原环境 - 铀富集”的对应关系。

吸附作用关键：非传统资源中，吸附作用是重要的富集方式（煤有机质吸附、黏土矿物吸附、铁锰氧化物吸附），尤其对于分散状赋存的铀、钍，吸附作用可显著提高局部元素浓度，达到工业利用标准。

## （二）主要控制因素

构造控制：深大断裂带是热液蚀变带型、油气田型资源的主要控矿构造，既为流体提供运移通道，又为元素富集提供空间；沉积盆地的构造稳定性则控制煤系地层型、红土型资源的保存条件。

物质来源控制：原岩的放射性元素丰度是基础（如红土型的富钍花岗岩、煤系地层的富铀沉积物），而流体的铀、钍供给能力（如热液的萃取效率、地下水的铀含量）决定资源规模。

环境条件控制：气候条件（热带湿润气候促进红土化）、沉积环境（深海缓慢沉积促进稀土 - 钍富集）、氧化还原条件（还原环境促进铀沉淀）是成矿的重要外部条件，直接影响富集效率。

## 四、资源潜力与开发利用前景

### （一）资源潜力评估

全球非传统放射性矿产资源总量可观：油气田型铀资源约 50 万吨~80 万吨，煤系地层型铀资源约 30 万吨~50 万吨、镭资源量约 10 万吨~20 万吨（以 Ra-226 计），深海富稀土沉积物型钍资源约 1000 万吨~1500 万吨，红土型钍资源约 500 万吨~800 万吨，合计占全球放射性资源总量的 25%~35%。

区域潜力差异：北美（美国、加拿大）、俄罗斯、澳大利亚的非传统放射性资源最为丰富，合计占全球总量的 60% 以上；中国的鄂尔多斯盆地油气田型、山西煤系地层型、云南红土型资源具备较大开发潜力。

### （二）开发利用前景

协同开发优势：油气田型、煤系地层型资源可依托现有能源矿产开采设施，以副产品形式回收放射性元素，大幅降低开发成本，实现“能源 - 资源”双赢，如美国二叠盆地已实现油气开采与铀回收同步进行。

战略补充价值：深海富稀土沉积物型、红土型钍资源是第四代核电的潜在燃料，

可弥补传统铀矿资源不足，对保障能源安全具有重要意义。<sup>①</sup>

技术发展驱动：新型提取技术（如微生物浸出、溶剂萃取、吸附材料分离）的突破，为分散状、吸附态放射性元素的高效回收提供了可能，降低了资源利用门槛。

### （三）开发利用挑战

资源分散性：多数非传统资源无独立矿体，元素呈分散状赋存，提取效率较低，需研发针对性的高效分离技术。

开发成本高：深海、偏远地区的非传统资源（如深海沉积物型）开发需投入大量资金用于勘探、开采设备研发，前期成本较高。

环保风险：开发过程中可能引发放射性污染（如深海采矿对海洋生态的影响、煤系资源回收对地下水的污染），需建立严格的环保标准与监测体系。

政策标准缺失：目前针对非传统放射性矿产资源的勘探规范、品位指标、开发权限尚未完全明确，制约了规模化开发。

## 第四节 放射性矿产综合评价方法

### 一、综合评价体系构建原则

#### （一）差异化适配原则

针对传统放射性矿产（铀矿、钍矿）：侧重资源规模、品位、矿体形态等工业指标，突出开采技术条件与资源回收效率评价。

针对非传统放射性矿产（油气田型、煤系地层型等）：强化“主矿产-伴生放射性资源”协同开发评价，重点关注提取成本、现有设施利用率等指标。

针对稀土伴生型放射性矿产：兼顾稀土与放射性元素的综合利用价值，平衡主矿产开发与伴生资源回收的经济性。

#### （二）全要素覆盖原则

核心要素：资源地质要素（储量、品位、赋存状态）、技术开发要素（开采难度、提取工艺、设备适配性）、经济要素（成本、价格、收益）、环境要素（放射性污染风险、生态影响）、战略要素（资源保障程度、替代资源竞争力）。

关联要素：政策法规（开发权限、环保标准）、区域基础条件（交通、能源、水资源）、社会影响（就业、社区接受度）。

#### （三）动态迭代原则

评价过程与勘查阶段同步推进：普查阶段侧重资源潜力预判，详查阶段强化工业

<sup>①</sup> F.Barthel ,F.J.Dahlkamp ,朱益平. 钍矿及其利用[J]. 国外铀金地质, 1992, (01): 30-38.



指标验证，勘探阶段聚焦开发可行性评估，开发阶段补充综合效益监测。

结合技术进步与市场变化更新评价参数：如新型提取技术降低成本时，调整经济评价阈值；放射性资源价格波动时，优化收益测算模型。

## 二、核心评价维度与指标体系

### （一）资源地质评价（基础维度）

#### 1. 核心指标

资源规模：保有储量（万吨 U/Th/Ra）、资源量级别（331、332、333、334 级）、矿床规模（超大型 / 大型 / 中型 / 小型）。

品位特征：平均品位（% U/Th、Bq/g Ra）、品位分布均匀性（变异系数）、富矿段占比（品位 $\geq$ 工业指标的资源量占比）。

赋存状态：赋存类型（独立矿物 / 类质同象 / 吸附态 / 离子态）、矿物粒度（ $\mu\text{m}$ ）、嵌布关系（游离状 / 嵌布状）、伴生有害元素含量（如 As、Pb、Cd 等）。

矿体特征：矿体形态（层状 / 脉状 / 浸染状 / 无独立矿体）、厚度（m）、埋深（m）、连续性（矿体连接率）、稳定性（厚度变异系数）。

#### 2. 评价方法

地质建模：基于钻探、物探数据构建三维地质模型，量化矿体空间形态与资源分布。

统计分析：采用地质统计学方法（如克里金插值）计算资源量与品位分布特征，评估资源可靠性。

矿物学分析：通过显微镜观察、XRD、电子探针等手段，确定放射性元素赋存状态与矿物载体。

#### 3. 适配性调整

传统矿产：强调矿体连续性与品位均匀性，如砂岩型铀矿需满足“矿体厚度 $\geq 1\text{m}$ 、平均品位 $\geq 0.05\% \text{ U}$ ”。

非传统矿产：弱化独立矿体要求，强化资源规模与主矿产关联性，如煤系地层型铀矿需评价“铀含量与煤产量的匹配度”。

### （二）技术开发评价（关键维度）

#### 1. 核心指标

开采难度：开采方式适配性（露天 / 地下 / 原位浸出 / 副产品回收）、开采强度（万吨 / 年）、开采成本（元 / 吨矿石）。

提取效率：浸出率（%）、回收率（%）、富集倍数（目标元素浓度提升比例）、工艺复杂度（单步 / 多步流程）。

设备与工艺适配性：现有设施利用率（如油气田铀回收对油井的适配程度）、新

型设备研发投入（如深海采矿设备成本）、工艺能耗（吨产品耗煤/电/水）。

技术成熟度：工艺试验阶段（实验室/中试/工业试验/商业化应用）、技术风险（失败概率与损失）。

## 2. 评价方法

工艺试验：开展实验室小型试验、中试规模试验，验证提取效率与工艺可行性。

技术经济评价：计算技术可行性指数（技术成熟度 × 提取效率 / 工艺复杂度），评估技术落地难度。

类比分析：参考同类矿床开发案例，类比开采方式与工艺适配性，预测技术指标。

## 3. 适配性调整

传统矿产：优先评价露天/地下开采条件，如花岗岩型铀矿需评估矿体埋深与围岩稳固性。

非传统矿产：侧重副产品回收工艺，如油气田型铀矿需评价“铀回收对油气开采的干扰程度”。

# （三）经济评价（核心维度）

## 1. 核心指标

成本指标：勘查成本（万元/万吨资源）、开采成本（元/吨矿石）、提取成本（元/公斤 U/Th/Ra）、环保成本（元/吨矿石，含污染治理、监测费用）、综合成本（元/公斤产品）。

收益指标：产品价格（万元/吨 U/Th、元/Bq Ra）、销售收入（万元/年）、投资回收期（年）、内部收益率（IRR，%）、净现值（NPV，万元）。

盈亏平衡：盈亏平衡品位（维持收支平衡的最低平均品位）、盈亏平衡价格（维持收支平衡的最低产品价格）。

## 2. 评价方法

财务测算：构建现金流量模型，测算项目全生命周期成本与收益，计算 IRR、NPV 等指标。

敏感性分析：识别影响经济效益的关键因素（如品位、价格、成本），分析其波动对收益的影响程度。

情景分析：设定基准情景、乐观情景、悲观情景，预测不同市场与技术条件下的经济可行性。

## 3. 适配性调整

传统矿产：按独立开发模式测算成本与收益，重点关注规模效应（如大型铀矿降低单位开采成本）。

非传统矿产：按“主矿产-伴生资源”协同开发模式测算，分摊勘查与开采成本，

如煤系地层型铀矿按“煤炭开采成本分摊率”计算铀回收成本。

#### （四）环境与生态评价（约束维度）

##### 1. 核心指标

放射性污染风险：核素迁移潜力（地下水 / 土壤中核素扩散系数）、放射性粉尘排放量（ $\text{mg}/\text{m}^3$ ）、废水放射性浓度（ $\text{Bq}/\text{L}$ ）、固废放射性活度（ $\text{Bq}/\text{kg}$ ）。

生态影响：植被破坏面积（ $\text{km}^2$ ）、土壤扰动程度（侵蚀模数）、水资源消耗（ $\text{m}^3/\text{吨产品}$ ）、海洋生态影响（仅针对深海资源，如生物多样性损失率）。

环保达标性：污染物排放是否符合《放射性污染物排放标准》《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》等法规要求。

##### 2. 评价方法

风险评估：采用概率风险评价法，识别放射性污染源（如开采粉尘、废水、固废），预测污染范围与影响程度，计算风险值（危害程度  $\times$  发生概率）。

环境监测：在勘查与试验阶段布设监测点，监测土壤、地下水、大气中的放射性核素含量，评估背景值与污染潜力。

生态建模：利用生态系统模型（如地下水流动模型、土壤侵蚀模型）预测开发活动对生态环境的长期影响。

##### 3. 适配性调整

传统矿产：重点评价地下开采对地下水的污染风险，如铀矿开采需监测地下水 U、Ra-226 浓度。

非传统矿产：关注协同开发的叠加污染，如煤系地层型铀矿需评估“煤炭洗选 + 铀回收”的废水复合污染。

#### （五）战略价值评价（提升维度）

##### 1. 核心指标

资源保障程度：区域资源占比（全国 / 全球占比）、自给率（国内产量 / 消费量）、储备潜力（可作为战略储备的资源量）。

替代竞争力：与替代资源的成本对比（如传统铀矿与非传统铀矿的单位成本比）、技术替代难度（如钍作为核电燃料的技术成熟度）。

产业链地位：对上下游产业的带动作用（如放射性资源开发对核电、稀土产业的支撑）、进口依赖度（进口量 / 消费量）。

##### 2. 评价方法

供需平衡分析：结合全球与国内资源产量、消费量、进出口数据，预测中长期供需缺口，评估资源保障紧迫性。

战略权重赋值：采用层次分析法（AHP）对战略指标赋予权重，计算战略价值综

合指数，排序资源优先级。

国际对比：对比全球主要资源国的开发政策与资源潜力，评估我国资源在国际市场的竞争力。

### 三、关键评价技术与工具

#### （一）资源量化评价技术

##### 1. 三维地质建模技术

工具：Surfer、MapGIS、Micromine、3DMine。

应用：整合钻探数据（岩心取样、品位分析）、物探数据（放射性异常、电性异常）、地质填图数据，构建包含矿体、围岩、构造的三维模型，实现资源量自动计算与品位分布可视化。

案例：鄂尔多斯盆地东胜铀矿通过 Micromine 建模，精准量化了侏罗系直罗组含矿砂岩的资源规模与品位分布，为开发规划提供了数据支撑。

##### 2. 地质统计学评价技术

方法：变异函数分析、克里金插值、蒙特卡洛模拟。

应用：分析品位空间相关性，计算资源量估算误差（如相对误差 $\leq 15\%$ 为可靠），评估资源量级别；通过蒙特卡洛模拟预测资源量不确定性范围，为风险决策提供依据。

案例：澳大利亚西部红土型钼矿采用克里金插值法，将资源量估算误差从 30% 降至 12%，提升了评价可靠性。

#### （二）技术开发可行性评价技术

##### 1. 工艺试验与模拟技术

实验室试验：柱浸试验（评价浸出率）、溶剂萃取试验（评价分离效率）、微生物浸出试验（评价生物适应性）。

数值模拟：利用 COMSOL Multiphysics、FLUENT 等软件模拟浸出过程中流体流动、元素迁移规律，优化工艺参数（如浸出剂浓度、液固比）。

案例：美国二叠盆地油气田铀资源通过柱浸试验验证了“油气开采废水 + 铀回收”的可行性，浸出率达 75% 以上，为商业化应用提供了技术依据。

##### 2. 技术经济评价工具

成本估算模型：构建“勘查 - 开采 - 提取 - 环保”全流程成本模型，细化各项成本构成（如开采成本 = 设备折旧 + 人工 + 能耗 + 维护）。

收益测算软件：利用 Excel、MATLAB 编写财务测算程序，计算 IRR、NPV、投资回收期等指标，支持敏感性分析与情景模拟。

案例：中国白云鄂博稀土伴生钍矿通过成本模型测算，综合回收钍的单位成本比独立开发降低 40%，验证了协同开发的经济性。

### （三）环境风险评价技术

#### 1. 放射性污染监测与模拟技术

监测技术： $\gamma$  能谱仪（监测大气放射性）、液体闪烁计数器（监测废水 U/Ra 含量）、土壤放射性检测仪（监测土壤污染）。

模拟技术：利用 HYDRUS-1D/2D 模拟地下水放射性核素迁移，采用大气扩散模型（如 AERMOD）预测放射性粉尘扩散范围。

案例：贵州六盘水煤系地层型铀矿通过 HYDRUS 模拟，预测了铀淋滤对地下水的的影响范围，提出了“煤层洗选废水处理 + 地下水监测”的防控方案。

#### 2. 生态影响评价技术

生态调查：植被覆盖率、生物多样性（如土壤微生物群落结构）、生态敏感区分布（如水源保护区、自然保护区）。

生态风险指数法：计算生态风险值（ $\text{风险值} = \text{危害系数} \times \text{暴露系数}$ ），划分风险等级（低 / 中 / 高风险），制定针对性防控措施。

案例：太平洋 CCZ 深海沉积物型钍矿通过生态调查识别了 3 处敏感生物栖息地，在评价中提出了“避让开采 + 生态补偿”方案，降低了高风险区域开发概率。

### （四）综合评价集成技术

#### 1. 层次分析法（AHP）

应用：将多维度评价指标分解为目标层（综合评价）、准则层（地质、技术、经济、环境、战略）、指标层（具体指标），通过两两比较确定指标权重，计算综合评价得分，排序评价对象优先级。

优势：解决多目标、多准则的复杂评价问题，量化主观判断，提升评价系统性。

#### 2. 模糊综合评价法

应用：针对部分指标（如“开采难度”“生态影响”）的模糊性，设定评价等级（优 / 良 / 中 / 差），构建模糊评价矩阵，结合权重计算模糊综合得分，判断评价对象所属等级。

优势：处理定性指标与定量指标的融合问题，提高评价结果的合理性。

#### 3. GIS 空间分析技术

应用：将区域基础条件（交通、能源）、环境敏感区、资源分布等空间数据叠加分析，圈定“适宜开发区 / 限制开发区 / 禁止开发区”，优化开发布局。

案例：中国云南红土型钍矿通过 GIS 叠加分析，排除了 2 处水源保护区与 1 处地质灾害高发区，选定 3 处适宜开发区块，提升了开发规划的科学性。



## 四、综合评价流程与应用案例

### （一）标准评价流程

#### 1. 准备阶段

收集资料：地质勘查报告、物探 / 化探数据、工艺试验数据、市场价格数据、政策法规文件、区域基础条件资料。

明确评价目标：如“普查阶段资源潜力预判”“勘探阶段开发可行性评估”“开发阶段综合效益评价”。

确定评价范围：矿床边界、区域影响范围（如污染扩散半径）。

#### 2. 指标筛选与权重确定

筛选核心指标：根据矿床类型与评价目标，从指标体系中选取关键指标（如非传统矿产重点筛选“主矿产协同性”“现有设施利用率”）。

确定指标权重：采用 AHP 法或德尔菲法（专家打分）确定指标权重，确保权重分配符合评价重点（如战略评价中“资源保障程度”权重高于经济指标）。

#### 3. 单维度评价

按资源地质、技术开发、经济、环境、战略维度分别开展评价，量化各项指标得分（如采用 10 分制，优 = 8~10 分，良 = 6~8 分，中 = 4~6 分，差 = 0~4 分）。

#### 4. 综合评价与等级划分

计算综合得分：综合得分 =  $\sum$ （单指标得分 × 指标权重）。

划分评价等级：优秀（8~10 分）、良好（6~8 分）、可行（4~6 分）、不可行（0~4 分）。

#### 5. 结论与建议

明确评价结论：如“矿床综合评价等级为良好，具备开发可行性”“非传统铀矿综合评价等级为可行，但需优化提取工艺降低成本”。

提出针对性建议：勘查阶段建议“加密钻探验证富矿段”，开发阶段建议“采用原位浸出工艺减少污染”，政策层面建议“完善非传统放射性矿产开发标准”。

### （二）应用案例：煤系地层型铀资源综合评价（以贵州六盘水煤田为例）

#### 1. 评价目标

评估煤系地层伴生铀资源的开发可行性与综合效益。

#### 2. 指标筛选与权重

核心指标：资源规模（权重 0.15）、铀平均品位（0.12）、浸出率（0.15）、现有设施利用率（0.18）、综合成本（0.15）、污染风险（0.12）、资源保障贡献（0.13）。

#### 3. 单维度评价结果

资源地质：保有铀资源量 3.2 万吨（大型规模），平均品位 0.025% U，赋存状态

以吸附态为主（占比 75%），得分 7.8 分（良）。

技术开发：采用“煤炭洗选 - 铀回收”协同工艺，浸出率 72%，现有洗煤厂利用率 85%，工艺成熟度中等，得分 7.2 分（良）。

经济：综合成本 1.8 万元 / 公斤 U，当前铀产品价格 2.8 万元 / 公斤，投资回收期 8.5 年，内部收益率 12.3%，得分 6.9 分（良）。

环境：放射性废水经处理后浓度  $\leq 0.5\text{Bq/L}$ （符合国标），土壤扰动面积较小，污染风险中等，得分 6.5 分（良）。

战略：我国铀进口依赖度超 70%，该资源可补充国内供给，资源保障贡献突出，得分 8.3 分（优）。

#### 4. 综合评价结果

综合得分 =  $7.8 \times 0.15 + 7.2 \times 0.12 + 7.2 \times 0.15 + 6.9 \times 0.18 + 6.9 \times 0.15 + 6.5 \times 0.12 + 8.3 \times 0.13 = 7.23$  分，评价等级为良好，具备开发可行性。

#### 5. 结论与建议

结论：贵州六盘水煤系地层伴生铀资源规模大、协同开发条件优越，经济与战略效益显著，污染风险可控，整体具备良好开发价值。

建议：

技术层面：优化吸附态铀提取工艺，采用微生物浸出技术提升浸出率至 80% 以上，降低单位提取成本；

环保层面：在洗煤厂配套建设放射性废水处理站，布设地下水监测网（每 5km<sup>1</sup> 个监测点），定期监测铀、镭浓度；

开发模式：采用“煤炭 - 铀”协同开发模式，依托现有洗煤设施建设铀回收生产线，减少新增投资；

政策层面：申请伴生放射性资源综合利用专项补贴，完善煤系铀资源开发的环保标准与税收优惠政策。



## 第四章 放射性环境地球化学

### 第一节 放射性元素环境行为

#### 一、放射性元素核心环境行为机制

##### (一) 迁移行为：空间扩散与介质迁移

放射性元素的迁移是指元素在环境中从污染源向周围空间扩散、在不同介质间转移的过程，主要分为物理迁移与化学迁移两类：

物理迁移：以机械搬运为主，如土壤中放射性颗粒随地表径流、风力扩散，地下水中原生放射性矿物碎屑随水流迁移，大气中氡气（Rn）的自由扩散与湍流扩散。物理迁移的速率与距离受介质运动强度控制，如暴雨可加速土壤放射性元素向地下水迁移，强风可使放射性粉尘扩散范围扩大至数公里。

化学迁移：以溶解态迁移为主，放射性元素形成可溶性络合物或离子态在环境中迁移，是更具环境风险的迁移形式。例如，铀（U）在氧化环境中（ $E_h > 0.2V$ ）形成  $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$ 、 $[UO_2Cl_4]^{2-}$  等稳定络合物，随地下水长距离迁移；镭（ $Ra^{2+}$ ）可与硫酸根结合形成  $RaSO_4$  络合物，在土壤溶液中缓慢迁移。化学迁移的关键是元素的溶解能力与络合剂（ $CO_3^{2-}$ 、 $Cl^-$ 、 $F^-$ 、有机质）含量。

##### (二) 转化行为：价态变化与形态转化

放射性元素的环境转化主要体现为价态变化、矿物形态转化与络合态转化，直接影响其迁移能力与毒性：

价态变化：铀是典型的变价元素，在氧化环境中以 U (VI) 形式存在（可剪性强，迁移性强），在还原环境中（如富有机质土壤、油气田区）被还原为 U (IV)（形成难溶性沥青铀矿，迁移性极弱）；钍（Th）主要以 Th (IV) 形式存在，价态稳定，不易发生氧化还原转化；镭（Ra）仅以 Ra (II) 形式存在，价态无变化。

矿物形态转化：原生放射性矿物（如钍石、独居石）在风化作用下分解，形成次生矿物或吸附态，如钍在红土中转化为吸附于铁锰氧化物的次生形态；铀在地下水与沉积物界面可从溶解态转化为沉淀态沥青铀矿，实现从“迁移态”到“固定态”的转化。

络合态转化：放射性元素与环境中的络合剂结合形成不同稳定性的络合物，如铀与碳酸根形成的络合物稳定性高于与氯离子的络合物，可在中性至碱性环境中长期稳

定迁移；当环境 pH 值降低（如酸雨影响），碳酸根络合物分解，铀可能转化为离子态或羟基络合物。

### （三）富集行为：介质吸附与生物积累

放射性元素在环境介质中通过吸附、沉淀或生物吸收实现富集，形成局部高浓度区：

介质吸附富集：土壤、沉积物中的黏土矿物（伊利石、蒙脱石）、铁锰氧化物、有机质具有强烈的吸附能力，可通过离子交换、表面络合、沉淀作用吸附放射性元素。例如，黏土矿物的阳离子交换容量（CEC）越高，对  $\text{Ra}^{2+}$ 、 $\text{Th}^{4+}$  的吸附能力越强；铁锰氧化物表面的羟基可与 U(VI) 形成稳定的表面络合物，使铀在沉积物表面富集，富集倍数可达 100~1000 倍。

生物积累富集：放射性元素通过食物链进入生物体内并逐级积累，称为生物放大效应。例如，水生生物（藻类、鱼类）吸收水中的铀、镭，其体内浓度可达水体浓度的数十至数百倍；农作物（水稻、小麦）通过根系吸收土壤中的放射性元素，谷物中铀含量可达土壤含量的 0.01~0.1 倍，长期食用可能导致人体放射性累积。

### （四）归趋行为：最终赋存状态与环境归宿

放射性元素在环境中的最终归趋由其迁移转化规律与环境条件共同决定，主要有三类归宿：

固定态归趋：通过吸附、沉淀作用形成难溶性形态，长期赋存于土壤、沉积物中，如铀在还原环境中沉淀为沥青铀矿，钍吸附于铁锰氧化物表面，归趋为“稳定态”，环境风险较低。

循环态归趋：在不同介质间循环迁移，如土壤中的镭经雨水淋滤进入地下水，地下水流动过程中镭被沉积物吸附，沉积物再经风化作用释放镭，形成“土壤-地下水-沉积物”循环，延长污染影响周期。

释放态归趋：通过挥发、渗漏等方式进入大气或深层地下水，如土壤中的氡气挥发进入大气，污染室内外空气；填埋场中的放射性废水渗漏进入深层地下水，扩大污染范围。

## 二、不同环境介质中放射性元素的行为特征

### （一）土壤环境中的行为特征

土壤是放射性元素的主要储存介质，其行为受土壤理化性质（pH、Eh、有机质含量、黏土矿物类型）控制：

吸附与固定：土壤 pH 值是关键影响因素，中性至碱性土壤（pH 6.5~8.5）中，铀、钍易被黏土矿物与铁锰氧化物吸附固定；酸性土壤（pH < 5.5）中，吸附作用减弱，



元素易以溶解态迁移。例如，红壤（pH 4.5~5.5）中铀的吸附率仅为 30%~50%，而黑土（pH 7.0~8.0）中吸附率可达 80%~90%。

垂直迁移：放射性元素在土壤中的垂直迁移速率缓慢，每年迁移距离通常为 0.1~10cm，主要通过土壤溶液下渗实现。富有机质土层（如腐殖质层）可强烈吸附放射性元素，形成“吸附屏障”，阻碍其向深层土壤与地下水迁移。

形态分布：土壤中放射性元素主要以吸附态（占比 50%~70%）、残渣态（20%~40%）为主，溶解态占比极低。例如，土壤中的钍 90% 以上为残渣态与铁锰氧化物吸附态，迁移性极弱；铀的形态分布受 Eh 影响，氧化型土壤中溶解态与吸附态占比相当，还原型土壤中残渣态占比显著升高。

### （二）地下水环境中的行为特征

地下水是放射性元素迁移的重要载体，其行为受水文地质条件（含水层岩性、地下水流动速率）与水化学性质（pH、Eh、矿化度、络合剂含量）控制：

迁移规律：放射性元素在地下水中的迁移距离与水流速率正相关，浅层地下水（流动速率 0.1~1m/d）中，铀可迁移数公里；深层地下水（流动速率 < 0.01m/d）中，迁移距离通常不足百米。含水层岩性影响迁移能力，砂岩含水层（孔隙度高、渗透性强）中元素迁移速率快于灰岩含水层（裂隙发育不均）。

水化学控制：碱性地下水（pH 7.5~9.0）中，铀与碳酸根形成稳定络合物，迁移性强；酸性地下水（pH）中，铀主要以  $U^{4+}$  离子态存在，易被含水层沉积物吸附。地下水矿化度升高时，氯离子、硫酸根等络合剂含量增加，可促进铀、镭的溶解与迁移。

界面作用：地下水与沉积物界面是元素迁移的关键区域，发生吸附、沉淀、氧化还原反应。例如，地下水流动过程中，铀被沉积物吸附，导致地下水中铀浓度降低；当地下水 Eh 值降低（如遇到富有机质沉积物），U(VI) 被还原为 U(IV) 沉淀，形成“迁移阻滞带”。

### （三）大气环境中的行为特征

大气中放射性元素主要以气态（如 Rn）、气溶胶态（放射性粉尘、颗粒物）存在，行为特征体现为扩散、沉降与转化：

扩散与传输：氡气（Rn-222）是大气中主要的气态放射性元素，源自土壤与岩石中铀的衰变，在大气中自由扩散，扩散范围可达数公里，室内氡气浓度通常高于室外（封闭环境易累积）。气溶胶态放射性元素（如铀矿开采产生的粉尘）随大气湍流扩散，扩散距离受颗粒物粒径控制，细颗粒物（ $0.5\mu\text{m}$ ）可扩散数十至数百公里，粗颗粒物（ $> 10\mu\text{m}$ ）易快速沉降。

沉降过程：大气中放射性元素通过干沉降（重力沉降）与湿沉降（降雨、降雪冲刷）返回地表。干沉降速率与颗粒物粒径、风速相关，粗颗粒物干沉降速率为 1~10cm/

s; 湿沉降可快速清除大气中的放射性元素, 一次降雨可使大气中铀、钍浓度降低 50%~80%。

转化与衰减: 大气中放射性元素的转化主要为放射性衰变, 如 Rn-222 的半衰期为 3.82 天, 衰变产生的子体 (如 Po-218、Pb-214) 可吸附于气溶胶颗粒物上, 随沉降进入土壤与水体; 气溶胶态铀、钍化学性质稳定, 无明显化学转化。

#### (四) 生物环境中的行为特征

放射性元素通过生物吸收、积累与代谢在生态系统中迁移, 其行为受生物种类、元素形态控制:

植物吸收与积累: 植物通过根系从土壤中吸收放射性元素, 吸收效率与元素形态相关, 溶解态元素易被吸收, 吸附态与残渣态难被吸收。例如, 水稻对铀的吸收效率为 0.001~0.01, 小麦对镭的吸收效率为 0.01~0.05; 放射性元素主要富集于植物根部, 茎叶与果实中含量较低, 但长期种植可导致土壤元素累积。

动物积累与代谢: 动物通过食用植物、饮水摄入放射性元素, 在体内器官中积累, 如鱼类肝脏、骨骼中铀、镭含量较高。大多数动物对放射性元素的代谢能力较弱, 元素在体内半衰期较长 (如铀在人体内半衰期约 100 天), 长期摄入可导致器官损伤。

食物链放大: 放射性元素在食物链中逐级富集, 营养级越高的生物, 体内含量越高。例如, 土壤中铀含量为 1mg/kg 时, 植物体内含量为 0.01mg/kg, 草食动物体内含量为 0.05mg/kg, 肉食动物体内含量可达 0.2mg/kg, 放大倍数达 20 倍。

### 三、放射性元素环境行为的关键影响因素

#### (一) 地球化学因素

pH 值: 控制元素溶解与吸附, 酸性环境 (pH) 促进铀、钍、镭的溶解, 降低吸附率, 增强迁移性; 碱性环境 ( $\text{pH} > 7.5$ ) 促进元素吸附与沉淀, 减弱迁移性。例如, pH 从 5.0 升高至 8.0 时, 土壤对铀的吸附率从 40% 提升至 90%。

Eh 值: 主要影响变价元素 (如铀) 的价态与形态, 氧化环境 ( $\text{Eh} > 0.2\text{V}$ ) 中 U (VI) 占主导, 迁移性强; 还原环境 (EhU (IV) 占主导, 迁移性弱。土壤有机质分解、硫化物还原可降低 Eh 值, 形成铀的 “还原固定带”。

络合剂含量: 环境中的  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{F}^-$ 、有机质等络合剂可与放射性元素形成稳定络合物, 增强其溶解与迁移能力。例如, 地下水碳酸根含量  $> 100\text{mg/L}$  时, 铀的溶解浓度可提升 10~100 倍; 土壤有机质含量越高, 对镭的络合能力越强, 迁移性越弱。

介质性质: 土壤中黏土矿物与铁锰氧化物含量越高, 吸附能力越强; 地下水含水层渗透性越强, 元素迁移速率越快; 大气中湿度越高, 放射性气溶胶的沉降速率越快。

## （二）人类活动因素

矿产开发：铀矿、钍矿开采与选矿过程中，放射性矿物暴露于地表，经风化淋滤进入土壤与地下水；矿山废水排放、废渣堆积可直接造成局部环境放射性污染，如铀矿选矿废水铀浓度可达 100~1000Bq/L，远超地下水环境质量标准（30Bq/L）。

能源利用：核电运行、核燃料处理过程中，可能释放少量放射性元素（如氚、锶、铯），进入大气与水体；煤炭燃烧可释放煤中伴生的铀、钍，形成放射性气溶胶，污染周边环境。

废物处置：放射性废物（如核废料、含放射性的工业废物）填埋处置时，若防渗设施失效，放射性元素可渗漏进入地下水；废物焚烧可导致放射性元素进入大气，扩大污染范围。

农业活动：使用含放射性的磷肥（如磷矿伴生钍、铀）可导致土壤放射性元素累积；灌溉用水若含放射性污染物，可直接被农作物吸收。

## （三）自然环境因素

气候条件：降水强度与频率影响放射性元素的淋滤与迁移，暴雨可加速土壤中元素向地下水迁移；高温湿润气候促进岩石风化与矿物分解，增加放射性元素的释放量；干旱气候下，土壤水分不足，元素迁移速率减慢，但扬尘可导致大气污染。

地形地貌：山地地形中，放射性元素随地表径流向山谷迁移，在河谷沉积物中富集；平原地形中，地下水流动平缓，元素迁移距离长；低洼地带易积水，形成还原环境，促进铀的沉淀固定。

水文条件：地下水补给量越大，元素稀释作用越强，浓度越低；地表水体（河流、湖泊）流速越快，放射性元素扩散范围越广，但浓度降低越快；地下水与地表水的相互补给可促进元素在两介质间迁移。

# 四、放射性元素环境行为的环境效应与风险

## （一）生态环境效应

土壤生态破坏：高浓度放射性元素可抑制土壤微生物活性，降低土壤酶（如脲酶、磷酸酶）活性，影响土壤养分循环；长期污染可导致土壤肥力下降，农作物生长受阻，产量降低。例如，土壤铀含量超过 100mg/kg 时，小麦发芽率降低 30%~50%，土壤微生物群落多样性下降 40%。

水生生态危害：地下水中放射性元素浓度超标可导致水生生物畸形、死亡，影响水生生态系统平衡。例如，水体铀浓度超过 100Bq/L 时，鱼类肝脏损伤率达 50% 以上，藻类生长速率降低 60%；镭浓度超标可导致水生生物体内放射性累积，破坏食物链结构。

大气生态影响：放射性气溶胶可损伤植物叶片，降低光合作用效率；氡气及其子体可影响昆虫、鸟类的呼吸系统，导致种群数量减少。

## （二）人体健康风险

放射性元素通过呼吸、饮食、皮肤接触等途径进入人体，产生电离辐射危害，风险程度与暴露剂量、暴露时间相关：

呼吸途径：吸入含氡气、放射性气溶胶的空气，氡气衰变产生的  $\alpha$  粒子可损伤肺部细胞，长期暴露可增加肺癌发病风险；铀矿工人肺癌发病率是普通人群的 3~5 倍，主要源于氡气暴露。

饮食途径：食用受污染的农作物、肉类、水产品，放射性元素在人体内累积，损伤骨髓、肾脏等器官。例如，长期食用铯含量超标的大米，可导致肾功能损伤；镭在人体内半衰期长达 1600 年，累积于骨骼中，可导致骨癌与贫血。

皮肤接触：皮肤接触高浓度放射性污染物（如矿山废渣、放射性废水），可导致皮肤炎症、溃疡，甚至诱发皮肤癌。

## （三）环境质量影响

土壤环境质量下降：放射性元素污染可导致土壤不符合《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》（GB 36600-2018），土地利用受限，如污染土壤无法用于农业种植与居住建设。

地下水污染：放射性元素超标可导致地下水失去饮用功能，影响饮用水安全；污染地下水若用于灌溉，可进一步污染土壤与农作物，形成“地下水 - 土壤 - 农作物”污染链。

大气环境质量恶化：放射性气溶胶与氡气浓度超标可导致大气环境质量不符合《放射性污染物排放标准》（GB 11806-2019），影响周边居民正常生活。

# 第二节 土壤中放射性核素迁移

## 一、土壤中放射性核素迁移核心机制

土壤中放射性核素的迁移是物理过程、化学过程与生物过程的协同作用结果，按迁移形式可分为垂直迁移、水平迁移与生物迁移三大类，核心机制如下：

### （一）垂直迁移机制：土壤剖面中的纵向运移

垂直迁移是核素在土壤剖面中沿深度方向的迁移，是核素向地下水渗漏的主要途径，核心依赖土壤溶液下渗与颗粒吸附 - 解吸平衡：

溶解态迁移：核素以离子态或络合态溶解于土壤溶液中，随水分下渗实现迁移。

例如,铀在氧化型酸性土壤中以 U (VI) 离子态或铀硫酸络合态存在,土壤溶液下渗速率越快(如砂质土壤中可达 1~5 厘米/天),核素迁移深度越大;镭与土壤溶液中的硫酸根、碳酸根形成可溶性络合物,在中性土壤中可随下渗水迁移至地下含水层。溶解态迁移的关键是核素的溶解度与土壤溶液的流动性,受降水强度、土壤孔隙度控制。

**吸附-解吸迁移:**核素在土壤胶体(黏土矿物、铁锰氧化物、有机质)表面发生吸附,随胶体颗粒随土壤溶液下渗迁移,或在环境条件变化时解吸重新进入溶液继续迁移。例如,钍强烈吸附于铁锰氧化物胶体表面,当土壤水分饱和时,胶体颗粒可随下渗水缓慢迁移(速率 0.01~0.1 厘米/天);当土壤 pH 值降低时,胶体表面电荷发生变化,钍解吸进入溶液,迁移速率显著提升。吸附-解吸迁移的核心是胶体的稳定性与核素的吸附强度。

**沉淀-溶解迁移:**核素在土壤中形成难溶性化合物沉淀后,迁移性极弱,但若环境条件改变导致沉淀溶解,可重新启动迁移。例如,铀在还原型土壤中形成沥青铀矿沉淀,长期稳定赋存;若土壤被氧化(如深耕翻土、地下水水位下降),沉淀溶解为 U (VI),恢复迁移能力。沉淀-溶解迁移的关键是土壤 Eh、pH 值等地球化学条件的稳定性。<sup>①</sup>

## (二) 水平迁移机制:土壤表层的横向扩散

水平迁移是核素在土壤表层(0~20 厘米)沿水平方向的扩散,主要通过地表径流、风力搬运与侧向渗流实现,污染范围通常在污染源周边数米至数百米:

**地表径流迁移:**土壤表层的放射性核素(溶解态或颗粒态)随地表径流扩散,迁移距离与径流强度正相关。例如,铀矿废渣堆积区经暴雨冲刷,表层土壤中铀含量可从 1000 毫克/千克降至 100 毫克/千克,迁移距离达数十米;颗粒态核素(如钍石碎屑)随径流沉积于低洼地带,形成局部富集区。地表径流迁移的关键是地形坡度与植被覆盖度,坡度大于 15°、植被覆盖率较低时,迁移速率显著加快。

**风力搬运迁移:**土壤表层的放射性粉尘(如铀矿开采产生的气溶胶沉降物)在风力作用下扩散,迁移距离受颗粒物粒径控制。细颗粒(小于 2.5 微米)可扩散至数百米,粗颗粒(大于 10 微米)多在污染源周边数十米内沉降。例如,干旱地区的铀矿尾矿库,强风可导致周边土壤铀含量较背景值升高 10~50 倍,扩散范围达 1~3 千米。风力搬运迁移的关键是气候干燥度与风速。

**侧向渗流迁移:**土壤水分饱和时,核素随侧向渗流沿土壤层间界面迁移,常见于平原或河谷地区。例如,河流岸边的放射性污染土壤,核素可随侧向渗流迁移至河流中,

<sup>①</sup> 葛佳亮,李梦姣,曹凤波,等.放射性污染场地土壤-地下水核素迁移扩散耦合模拟研究[C]//中国核学会.中国核科学技术进展报告(第七卷)——中国核学会 2021 年学术年会论文集第 10 册(核安全分卷、核安保分卷、核环保分卷).中核第四研究设计工程有限公司;广东省环境辐射监测中心;广东省核工业地质局辐射环境监测中心.; 2021: 296-301.



污染地表水；侧向渗流迁移速率较慢（0.001~0.01 厘米/天），但迁移距离可达数百米，易形成隐蔽性污染。

### （三）生物迁移机制：通过生物载体的迁移

生物迁移是核素通过植物、土壤动物等生物载体在土壤中的迁移，实现核素在土壤-生物系统中的转移与富集：

植物根系迁移：植物根系从土壤中吸收核素后，将其转运至茎叶与果实，实现核素从土壤深层向表层的迁移（如深根植物可吸收地下 50 厘米处的核素）。例如，向日葵的根系可吸收土壤中的铀，转运至花盘，使花盘中铀含量达土壤含量的 0.1~0.5 倍；小麦根系吸收镭后，主要富集于茎秆，籽粒中含量较低。植物根系迁移的关键是核素的生物有效性与植物种类的富集能力。

土壤动物迁移：蚯蚓、线虫等土壤动物通过摄食土壤颗粒，将核素摄入体内，再通过排泄、死亡分解等过程将核素释放至土壤其他区域，实现短距离迁移（通常在数米范围内）。例如，蚯蚓摄食含铀土壤后，体内铀含量可达土壤含量的 2~5 倍，排泄的蚓粪可使局部土壤铀含量升高 1~2 倍。土壤动物迁移的影响范围较小，但可促进核素在土壤中的均匀分布。

## 二、影响土壤中放射性核素迁移的关键因素

### （一）土壤理化性质因素

土壤质地：砂质土壤（黏粒含量较低）孔隙度高、渗透性强，核素溶解态迁移速率快（垂直迁移速率 0.1~1 厘米/天）；黏质土壤（黏粒含量大于 30%）孔隙度低、渗透性弱，核素迁移速率慢（0.001~0.01 厘米/天），但吸附能力强，核素易被固定。例如，砂质土壤中铀的迁移深度可达 100 厘米以上，而黏质土壤中仅迁移 10~20 厘米。

土壤 pH 值：酸性土壤中，核素吸附作用减弱，溶解态占比升高，迁移性增强；中性至碱性土壤（pH 6.5~8.5）中，核素吸附作用增强，迁移性减弱。例如，pH=4.0 的红壤中，铀的溶解态占比达 30%~50%，迁移速率是 pH=7.5 黑土的 5~10 倍；镭在酸性土壤中易解吸，迁移性显著高于碱性土壤。

土壤 Eh 值：氧化环境（ $E_h > 0.2V$ ）有利于变价核素（如铀）以高价态（U(VI)）存在，溶解性强，迁移性强；还原环境（ $E_h$ ，U(VI) 被还原为 U(IV)，形成难溶性沉淀，迁移性极弱。例如，富有机质土壤（ $E_h = -0.1 \sim -0.3V$ ）中，铀的迁移速率仅为氧化型土壤的 1/100~1/10。

土壤有机质含量：有机质含量越高，土壤吸附核素的能力越强，迁移性越弱。例如，有机质含量大于 5% 的腐殖土对铀的吸附率可达 90% 以上，显著抑制铀的迁移；有机质可与镭形成稳定络合物，降低其溶解态占比，迁移速率减慢。

土壤胶体含量：黏土矿物（伊利石、蒙脱石）、铁锰氧化物等胶体含量越高，核素吸附位点越多，迁移性越弱。例如，蒙脱石含量占比 20% 的土壤对钍的吸附能力是蒙脱石含量 5% 土壤的 3~5 倍，钍的迁移速率显著降低。

### （二）核素自身地球化学性质因素

核素价态与形态：变价核素的迁移性受价态控制，如 U (VI) 迁移性远强于 U (IV)；核素形态中，溶解态迁移性最强，吸附态次之，残渣态迁移性最弱。例如，土壤中溶解态铀的迁移速率是残渣态铀的 100~1000 倍；镭的形态以吸附态为主，迁移性弱于溶解态占比高的铀。

核素离子半径与电荷：离子半径小、电荷高的核素易被土壤胶体吸附，迁移性弱；反之则迁移性强。例如， $\text{Th}^{4+}$  离子电荷高，吸附能力强，迁移性弱于  $\text{Ra}^{2+}$ ；U (VI) 形成的铀酰离子电荷高，吸附能力强于简单阳离子核素。

核素络合能力：易与土壤溶液中络合剂（碳酸根、氯离子、硫酸根、有机质）形成稳定络合物的核素，溶解态占比高，迁移性强。例如，铀与碳酸根形成的络合物稳定性高，在中性至碱性土壤中可长期稳定迁移；钍的络合能力弱，多以吸附态或沉淀态存在，迁移性弱。

### （三）环境与人类活动因素

气候条件：降水强度与频率直接影响土壤水分含量，暴雨可加速核素溶解态与颗粒态迁移，如单次暴雨可使土壤中铀的垂直迁移深度增加 10~20 厘米；干旱气候下，土壤水分不足，核素迁移速率减慢，但风力搬运作用增强。温度升高可促进土壤微生物活动与有机质分解，改变土壤 Eh、pH 值，间接影响核素迁移，如高温环境（大于 30℃）可加速铀的解吸，迁移性增强。

地形地貌：山地地形坡度大，地表径流强度高，核素水平迁移距离远；平原地形坡度小，地表径流弱，核素垂直迁移占主导。低洼地带易积水，形成还原环境，促进核素沉淀固定，迁移性减弱；坡地土壤水分下渗快，核素垂直迁移速率快。

农业活动：深耕翻土可改变土壤结构与 Eh 值，促进核素均匀分布与解吸，迁移性增强；灌溉可增加土壤水分含量，加速核素溶解态迁移，如长期灌溉可使土壤中铀的迁移深度增加 50~100 厘米。使用含放射性的磷肥可增加土壤中钍、铀含量，为迁移提供物质基础；农药、化肥的使用可改变土壤 pH 值，间接影响核素迁移。

矿产开发与废物处置：铀矿、钍矿开采与选矿过程中，放射性废渣堆积可直接导致土壤核素含量升高，矿山废水灌溉可加速核素迁移；放射性废物填埋场若防渗设施失效，核素可渗漏进入土壤，形成垂直迁移污染带。例如，铀矿尾矿库周边土壤，铀的垂直迁移深度可达 2~5 米，污染深层土壤与地下水。

### 三、土壤中放射性核素迁移模型与模拟技术

#### (一) 迁移模型分类与核心原理

土壤中放射性核素迁移模型是量化迁移过程、预测污染范围的关键工具，按模型复杂度可分为经验模型、机理模型与数值模型三类：

**经验模型：**基于实测数据建立核素迁移量与影响因素（如时间、距离、土壤性质）的统计关系，适用于简单场景预测。例如，核素垂直迁移深度预测模型可通过时间、土壤含水量等因素构建关联；水平迁移距离模型可结合径流或风速与时间的关系进行估算。经验模型的优势是简单易用，缺点是缺乏物理化学机理支撑，适用范围有限。

**机理模型：**基于核素迁移的物理化学机理（吸附 - 解吸、溶解 - 沉淀、对流 - 弥散）建立数学方程，反映迁移本质规律。核心方程围绕溶液中核素浓度、吸附态核素浓度、土壤含水量、土壤容重、弥散系数、孔隙水流速及源汇项等关键参数构建，体现各因素对迁移过程的综合影响。机理模型的优势是物理意义明确，适用范围广，缺点是参数较多，获取难度大。

**数值模型：**通过数值方法（如有限差分法、有限元法）求解机理模型方程，适用于复杂土壤条件与边界条件的迁移模拟。常用模型包括 HYDRUS-1D/2D、CHEMFLO、PHREEQC 等，可模拟核素在非均质土壤、变环境条件下的迁移过程，考虑吸附动力学、化学反应等复杂因素。例如，HYDRUS-1D 可模拟核素在土壤剖面中的垂直迁移，输出不同深度、时间的核素浓度分布；PHREEQC 可耦合水化学平衡，模拟核素络合、沉淀溶解对迁移的影响。

#### (二) 关键模型参数与获取方法

模型参数的准确性直接决定模拟结果的可靠性，核心参数包括土壤物理参数、化学参数与核素迁移参数：

**土壤物理参数：**土壤含水量、土壤容重、孔隙水流速、弥散系数。获取方法：土壤含水量通过烘干法或时域反射仪实测；土壤容重通过环刀法实测；孔隙水流速通过达西定律计算，结合饱和导水率与水力梯度；弥散系数通过柱实验测定（如穿透曲线法）。

**土壤化学参数：**吸附系数、分配系数、氧化还原电位（Eh）、pH 值。获取方法：吸附系数通过批量吸附实验测定，即吸附态核素浓度与溶液中核素浓度的比值；分配系数通过弗伦德利希方程拟合，结合吸附态核素浓度与溶液中核素浓度的关系；Eh、pH 值通过便携式检测仪原位实测。

**核素迁移参数：**核素半衰期、扩散系数、络合稳定常数。获取方法：半衰期参考核素手册；扩散系数通过膜扩散实验测定；络合稳定常数参考热力学数据库（如 MINTEQA、WATEQA4F）。

### （三）模型应用案例

案例 1：铀矿周边土壤铀垂直迁移模拟：以某铀矿尾矿库周边土壤为研究区，采用 HYDRUS-1D 模型，输入土壤容重（1.4 克 / 立方厘米）、含水量（0.25 立方厘米 / 立方厘米）、吸附系数（50 立方厘米 / 克）、孔隙水流速（0.01 厘米 / 天）等参数，模拟 10 年内铀的垂直迁移过程。结果显示，10 年后铀的迁移深度达 80 厘米，在 20~40 厘米深度形成富集带，与实测数据误差小于 15%，为地下水污染风险预警提供了依据。

案例 2：农田土壤镉水平迁移模拟：某农田使用含镉磷肥后，采用经验模型模拟不同降水强度下镉的水平迁移距离，模型结合地表径流流速与时间构建关联。结果显示，暴雨条件（径流流速 5 厘米 / 秒）下，5 年后镉的迁移距离达 10 米，污染范围覆盖周边农田，为农田污染分区管控提供了支撑。

## 四、土壤中放射性核素迁移的调控与污染修复技术

### （一）迁移调控技术：阻断核素迁移路径

迁移调控技术的核心是通过改变土壤性质或环境条件，增强核素吸附固定，阻断迁移路径，适用于未发生严重污染的土壤或污染源头控制：

土壤改良调控：向土壤中添加改良剂，调节 pH、Eh 值或增加吸附位点，抑制核素迁移。例如，向酸性土壤中添加石灰、粉煤灰，提高土壤 pH 值至 7.0~8.0，增强核素吸附固定；添加铁锰氧化物、沸石等吸附材料，增加土壤对核素的吸附容量，降低迁移性；向还原型土壤中添加氧化剂（如过氧化氢），促进核素沉淀，阻断垂直迁移。

植被覆盖调控：种植根系发达、吸附能力强的植物（如蜈蚣草、紫花苜蓿），通过根系吸附固定核素，减少地表径流与风力搬运导致的迁移；植被枯枝落叶分解后可增加土壤有机质含量，进一步增强核素吸附固定。例如，铀矿周边种植蜈蚣草，可使表层土壤铀含量降低 30%~50%，显著减少铀随地表径流的迁移。

工程措施调控：针对污染源区域，采用防渗衬层、截排水系统等工程措施，阻断核素迁移路径。例如，铀矿尾矿库底部铺设黏土衬层或土工膜，防止核素渗漏进入土壤深层；在污染源周边设置截水沟，收集地表径流，避免核素扩散至周边土壤。

### （二）污染修复技术：清除土壤中放射性核素

对于已发生严重污染的土壤，需采用修复技术降低核素含量，消除生态风险，常用技术包括物理修复、化学修复与生物修复：

物理修复技术：通过物理手段分离或去除土壤中的放射性核素，适用于高浓度污染土壤。例如，土壤淋洗技术：采用清水或淋洗剂（如柠檬酸、EDTA）冲洗土壤，将核素从土壤颗粒中淋出，再通过水处理系统回收核素；土壤挖掘处置技术：将污染



土壤挖掘后，运输至放射性废物处置场集中处置，适用于小范围、高浓度污染土壤。

化学修复技术：通过化学反应改变核素形态，降低其迁移性或提取去除核素。例如，化学还原技术：向土壤中添加还原剂（如硫化钠、零价铁），将 U (VI) 还原为 U (IV)，形成难溶性沉淀；化学萃取技术：使用萃取剂（如磷酸三丁酯）提取土壤中的核素，实现核素与土壤的分离；化学钝化技术：添加钝化剂（如磷酸盐、羟基磷灰石），与核素形成稳定化合物，降低其生物有效性与迁移性。

生物修复技术：利用植物、微生物的吸收、转化作用去除土壤中的放射性核素，具有环境友好、成本较低的优势，适用于中低浓度污染土壤：

植物修复技术：种植对核素具有强富集能力的超富集植物（如蜈蚣草、东南景天、印度芥菜），通过根系吸收土壤中的核素并转运至地上部分，定期收割植物并进行安全处置（如焚烧固化），实现土壤核素含量降低。例如，蜈蚣草对铈的富集系数可达 100~500，种植 1~2 年后，土壤铈含量可降低 30%~60%；印度芥菜对镭的富集能力较强，可用于农田土壤镭污染修复。植物修复技术的关键是筛选适配的超富集植物，同时改良土壤条件（如调节 pH 值、添加螯合剂）提升核素生物有效性。

微生物修复技术：利用微生物（如细菌、真菌、放线菌）的代谢作用改变核素形态，降低其迁移性或促进其转化去除。例如，某些细菌（如脱硫弧菌、假单胞菌）可产生还原性物质，将 U (VI) 还原为 U (IV) 沉淀；真菌（如黑曲霉、青霉菌）可分泌有机酸与核素形成络合物，促进核素溶解与植物吸收；部分微生物可通过生物吸附作用直接吸附土壤中的核素，降低其环境活性。微生物修复技术可与植物修复技术结合使用（即植物 - 微生物联合修复），通过微生物改善土壤微环境，提升植物对核素的富集效率。

### （三）技术应用案例与优化方向

应用案例 1：铈矿退役场地土壤修复：某铈矿退役场地土壤铈含量达 500~1000 毫克 / 千克，采用“土壤淋洗 + 化学还原”联合技术。首先用柠檬酸淋洗土壤，将铈淋出率提升至 70%~80%；再向淋洗后土壤中添加零价铁，将残留的 U (VI) 还原为 U (IV) 沉淀；最后种植蜈蚣草进行后续修复。修复后土壤铈含量降至 50 毫克 / 千克以下，符合建设用地土壤污染风险管控标准，修复成本较单纯物理挖掘处置降低 40%~50%。

应用案例 2：农田土壤镭污染修复：某农田因长期使用含镭磷肥，土壤镭含量达 50~100 贝可 / 克，采用“植物修复 + 土壤改良”技术。种植印度芥菜，搭配添加沸石改良剂（添加量 5%），沸石吸附部分镭降低其迁移性，印度芥菜富集土壤中的镭。连续种植 3 季（约 1.5 年）后，土壤镭含量降至 20 贝可 / 克以下，农作物镭含量符合食品安全标准，且土壤肥力未受显著影响。



技术优化方向：

复合修复技术研发：结合物理、化学、生物修复的优势，开发高效复合修复技术（如“淋洗-钝化-植物联合修复”），提升修复效率并降低成本。

专用修复材料创新：研发高吸附容量、高选择性的纳米吸附材料（如纳米铁氧化物、石墨烯复合材料），优化淋洗剂、钝化剂的配方，增强对特定核素的靶向修复效果。

修复过程智能化监测：利用高光谱遥感、无人机航测、原位传感器等技术，实时监测修复过程中土壤核素含量、土壤理化性质变化，动态调整修复参数，提升修复精准性。

修复后土壤安全利用：建立修复后土壤风险评估体系，明确修复后土壤的适宜利用场景（如农业种植、生态绿化、工业建设），实现土壤资源可持续利用。

### 第三节 水体放射性污染特征

#### 一、水体放射性污染的主要来源

水体放射性污染分为天然来源与人为来源两大类，不同来源的污染强度、核素组成及影响范围存在显著差异：

##### （一）天然来源：地质背景与自然过程驱动

岩石风化与淋滤：地壳岩石（花岗岩、碱性岩、页岩等）中含有的天然放射性核素（铀、钍、镭、氡等），经长期风化作用释放，再通过雨水淋滤、地下水渗透进入地表水与地下水。例如，花岗岩分布区地下水铀含量可达 50~100 贝可 / 升，远高于普通水体背景值（ $\leq 30$  贝可 / 升）；富钍伟晶岩风化淋滤可导致周边河流钍含量升高至 10~20 贝可 / 升。

大气沉降输入：天然放射性核素（如氡气、铀钍衰变子体）通过大气干沉降、湿沉降进入水体，是开阔水域（如海洋、大型湖泊）天然放射性的重要补充。例如，全球海洋通过大气沉降接收的铀每年约 100~200 吨，直接影响表层海水放射性水平。

地下水 - 地表水交互补给：富含天然放射性核素的地下水通过泉眼、河床渗漏等方式补给地表水，或地表水渗透补给地下水时携带地表放射性污染物，形成“地下水 - 地表水”污染循环。例如，岩溶地区地下水与地表水交换频繁，若地下水铀含量超标，可导致相连河流铀浓度升高 3~5 倍。

##### （二）人为来源：人类活动主导的污染输入

矿产开发活动：铀矿、钍矿、稀土矿开采与选矿过程中，矿山废水（含铀、钍、镭等）直接排放或通过土壤渗漏进入水体；尾矿库淋滤水、废渣堆积区径流水是重要污

染来源。例如，某铀矿选矿废水铀浓度可达 1000~5000 贝可 / 升，排放后导致下游河流铀含量超标 10~50 倍；稀土矿开采产生的废水含钍、镭，可造成周边地下水放射性污染。

核工业与能源活动：核电运行、核燃料循环（开采、加工、后处理）过程中，含放射性核素（氚、铯、钡、铀等）的废水排放；核设施退役、核事故泄漏（如切尔诺贝利、福岛核事故）可导致大量放射性核素进入水体，造成长期污染。例如，福岛核事故导致太平洋局部海域氚浓度达 10000~100000 贝可 / 升，铯 - 137 浓度超标 100~1000 倍。

工业生产与废物处置：含放射性的工业生产（如磷酸盐化工、钢铁冶炼、水泥生产）废水排放；放射性废物（核废料、含放射性工业废物）填埋场防渗失效，导致核素渗漏进入地下水。例如，磷酸盐化工厂生产过程中，磷矿伴生的铀、钍进入废水，排放后可使周边水体铀含量升高至 50~100 贝可 / 升。

农业与生活活动：长期使用含放射性的磷肥，导致土壤中铀、钍经淋滤进入农田地下水与地表径流；生活污水中含有的放射性物质（如医疗废弃物、电子产品废弃物中的核素），经污水处理厂处理后部分排放至水体。

## 二、水体放射性污染的时空分布特征

### （一）空间分布特征：介质差异与污染源指向性

不同水体类型的污染差异：

地下水：污染以点源污染为主，集中于矿产开采区、废物填埋场周边，核素浓度高且分布范围相对局限（通常在污染源周边数公里内），但持续时间长。例如，铀矿尾矿库周边地下水铀污染晕半径可达 1~3 公里，污染持续时间超数十年。

地表水（河流、湖泊）：污染以线源（河流）、面源（湖泊）为主，沿水流方向扩散，污染范围广，核素浓度随距离衰减。例如，矿山废水排放口下游河流，铀浓度从排放口的 1000 贝可 / 升降至 10 公里处的 50 贝可 / 升，20 公里后接近背景值。

海水：污染以面源为主，近岸海域受陆源输入（河流、沿海工业排放）影响显著，远海海域主要受大气沉降、核事故扩散影响，浓度较低但分布范围广。例如，全球海洋表层海水铀背景值约 3~4 贝可 / 升，近岸工业区周边可达 10~20 贝可 / 升。<sup>①</sup>

区域分布规律：放射性矿产资源丰富区（如我国内蒙古、江西、广东，美国科罗拉多高原，俄罗斯西伯利亚）、核工业集中区、磷酸盐化工区的水体放射性污染风险显著高于其他区域；地质背景为富铀钍地层的区域，天然放射性污染普遍较高。

<sup>①</sup> 徐园,孔海宇,王希涛,等. 水体环境中的放射性污染及测量 [J]. 核安全, 2020, 19 (01): 75-79.

## （二）时间分布特征：周期性与持续性并存

**短期波动特征：**受降水、径流季节变化影响，水体放射性浓度呈现季节性波动。例如，雨季降水强度大，地表径流冲刷增强，矿山尾矿库、污染土壤中的核素大量淋溶进入水体，导致河流放射性浓度较旱季升高 2~5 倍；地下水因补给量增加，核素浓度被稀释，呈现旱季高、雨季低的特征。

**长期演变规律：**人为污染源（如矿产开采、核工业）停止后，水体放射性污染仍可持续数十年甚至上百年。例如，某退役铀矿周边地下水，停止开采后 20 年，铀浓度仍维持在 50~80 贝可 / 升，远超饮用水标准；天然来源的污染则长期稳定，受地质过程控制，浓度变化缓慢（百年尺度内波动幅度 < 20%）。

**突发污染特征：**核事故、矿山尾矿库溃坝等突发事件可导致水体放射性浓度在短时间内急剧升高，形成污染峰值。例如，福岛核事故发生后 1 个月内，周边海域铯 - 137 浓度从背景值的 0.01 贝可 / 升升至 1000 贝可 / 升以上，随后逐渐衰减，但部分核素（如铯 - 137 半衰期 30 年）仍长期存在。

## 三、水体中放射性核素的赋存形态与地球化学特征

### （一）主要赋存形态及分布规律

水体中放射性核素的赋存形态分为溶解态、颗粒态、络合态三类，形态分布受水体化学性质（pH、Eh、矿化度、络合剂含量）控制：

**溶解态：**核素以离子态或小分子络合态存在于水体中，可通过滤膜（孔径 0.45 微米），是水体中最具迁移性的形态。例如，铀在氧化型碱性水体中以铀碳酸络合态为主，酸性水体中以铀酰离子态为主；镭主要以镭离子态存在，在高硫酸根水体中形成可溶性镭硫酸络合态。溶解态核素占比通常为 30%~70%，在低矿化度、弱碱性水体中占比更高。

**颗粒态：**核素吸附于水体悬浮颗粒物（黏土矿物、铁锰氧化物、有机质颗粒）表面，或形成微细颗粒矿物（如沥青铀矿、钍石），无法通过滤膜，迁移性受颗粒物沉降与水流搬运控制。例如，钍因吸附能力强，在水体中 90% 以上以颗粒态存在；铀在高浊度水体中，颗粒态占比可达 50%~80%。颗粒态核素易在水体底部沉积物中富集，形成污染蓄积层。

**络合态：**核素与水体中的络合剂（碳酸根、氯离子、硫酸根、有机质、腐殖酸）形成稳定络合物，稳定性受络合剂类型与水体 pH 值影响。例如，铀与碳酸根形成的络合物稳定性最高，在中性至碱性水体中占溶解态铀的 60%~90%；与腐殖酸形成的络合物在酸性至中性水体中稳定存在，可促进铀的长距离迁移。

## （二）核心地球化学特征

迁移性差异显著：溶解态核素迁移性强，可随水流长距离迁移（如河流中铀溶解态可迁移数十至数百公里）；颗粒态核素迁移性弱，多随颗粒物沉降于水体底部，或短距离搬运至低洼处富集。例如，河流中颗粒态钍的迁移距离通常不超过 10 公里，而溶解态铀可迁移 100 公里以上。

pH-Eh 敏感性强：水体 pH 值控制核素吸附与络合反应，Eh 值影响变价核素（如铀）的价态与形态。酸性水体（pH）中，核素吸附作用减弱，溶解态占比升高，迁移性增强；碱性水体（pH > 7.5）中，核素易吸附于颗粒物或形成沉淀，迁移性减弱。氧化环境（Eh > 0.2V）中，铀以 U(VI) 形式存在，溶解性强；还原环境（Eh < 0）中，U(VI) 被还原为 U(IV)，形成难溶性沉淀，迁移性极弱。

生物累积性突出：水体中的放射性核素可被水生生物（藻类、浮游生物、鱼类）吸收富集，通过食物链逐级放大。例如，藻类对铀的富集系数可达 100~1000，鱼类对铯 - 137 的富集系数可达 10~100，顶级肉食性鱼类体内核素含量可达水体浓度的 100~1000 倍。

## 四、水体放射性污染的迁移转化规律

### （一）水体内部迁移转化过程

对流迁移：核素随水流运动实现空间迁移，迁移速率与水流速度正相关。例如，河流中水流速度 1 米 / 秒时，溶解态铀的迁移速率可达 86.4 公里 / 天；地下水水流速度 0.01 米 / 天，核素迁移速率约 0.005~0.01 米 / 天。对流迁移是核素在水体中扩散的主要方式，决定污染范围的扩展速度。

弥散迁移：核素通过分子扩散与机械弥散作用，在水流垂直方向与横向扩散，使污染范围扩大、浓度均匀化。例如，河流中核素排放口下游，通过弥散作用，污染带宽度从排放口的 10 米扩展至 10 公里处的 500 米，浓度梯度逐渐减小。

吸附 - 解吸转化：溶解态核素吸附于水体悬浮颗粒物或沉积物表面，转化为颗粒态；当水体化学条件（pH、Eh、络合剂含量）变化时，颗粒态核素解吸，重新转化为溶解态。例如，水体 pH 值从 7.5 降至 5.0 时，沉积物吸附的铀解吸率可达 30%~50%，导致水体铀浓度升高。

沉淀 - 溶解转化：核素在水体中达到饱和浓度时，形成难溶性化合物沉淀（如铀形成沥青铀矿、镭形成硫酸镭）；当水体化学条件改变（如 pH 降低、络合剂增加），沉淀溶解，核素重新进入水体。例如，富含硫酸根的水体中，镭浓度超过饱和浓度时，形成硫酸镭沉淀；若水体中氯离子含量升高，硫酸镭沉淀溶解，镭重新溶解于水体。

## （二）跨介质迁移转化过程

水体 - 沉积物迁移：水体中颗粒态核素通过沉降作用进入沉积物，或沉积物中核素通过解吸、溶解作用释放至水体，形成“水体 - 沉积物”交换循环。例如，河流中 60%~80% 的颗粒态铀、钍最终沉降至沉积物中，沉积物中核素含量可达水体的 1000~10000 倍；当水体 Eh 值降低时，沉积物中的铀可解吸释放，导致水体污染反弹。

水体 - 大气迁移：挥发性放射性核素（如氡气、氡）从水体表面挥发进入大气，或大气中的放射性核素通过沉降进入水体。例如，地下水与地表水接触时，氡气从水体挥发至大气，导致周边大气氡浓度升高；大气中铀、钍衰变子体通过降雨沉降进入水体，补充水体天然放射性。

水体 - 生物迁移：水生生物通过体表吸附、摄食等方式吸收水体中的放射性核素，在体内富集并通过食物链迁移。例如，浮游生物吸收水体中的镭，被小鱼摄食后，镭在小鱼体内富集，再被大鱼摄食，形成“水体 - 浮游生物 - 小鱼 - 大鱼”的迁移链条，最终影响人类健康。

## 五、水体放射性污染的环境效应与风险

### （一）水生生态系统效应

水生生物损伤：高浓度放射性核素可导致水生生物细胞损伤、基因突变、繁殖能力下降，甚至死亡。例如，水体铀浓度超过 100 贝可 / 升时，藻类生长速率降低 50%~80%，叶绿素含量下降 30%~60%；铯 - 137 浓度超过 50 贝可 / 升时，鱼类胚胎畸形率升高至 30%~50%，幼鱼存活率显著降低。

生态系统结构破坏：放射性污染可导致水生生物群落结构改变，敏感物种减少，耐污染物种占比升高，破坏生态平衡。例如，某铀矿污染河流中，原有 20 余种鱼类减少至 5~8 种，耐污染的底栖生物（如寡毛类）占比从 20% 升至 60% 以上；浮游生物多样性下降 40%~60%，生态系统稳定性显著降低。

食物链断裂风险：核素在食物链中逐级富集，可导致顶级捕食者体内核素含量超标，影响种群延续，甚至导致食物链断裂。例如，海洋中放射性污染可导致海豹、鲸鱼等顶级捕食者体内铯、锶含量超标，繁殖率下降，种群数量减少。

### （二）人体健康风险

水体放射性污染通过饮用、皮肤接触、食用受污染水产品等途径影响人体健康，风险程度与暴露剂量、暴露时间相关：

饮用途径：长期饮用放射性超标的饮用水，核素在人体内累积，产生电离辐射，损伤骨髓、肾脏、肝脏等器官。例如，长期饮用铀含量超标的地下水，可导致肾功能损伤，肾小球滤过率下降；镭在人体内半衰期长达 1600 年，累积于骨骼中，可增加骨癌、贫血发病风险。



皮肤接触途径：皮肤接触高浓度放射性污染水体（如游泳、渔业作业），核素可通过皮肤吸收进入人体，或直接损伤皮肤细胞，导致皮肤炎症、溃疡，甚至诱发皮肤癌。例如，核事故污染区域的水体，皮肤接触后可导致皮肤红斑、水肿，长期暴露可增加皮肤癌发病风险。

食物链途径：食用受污染的鱼类、贝类等水产品，核素在人体内进一步富集，放大健康风险。例如，长期食用福岛核事故污染海域的鱼类，体内铯-137 累积可导致有效剂量超过安全阈值，增加癌症发病风险；儿童、孕妇等敏感人群风险更高，可能影响生长发育与胎儿健康。

### （三）水资源利用风险

饮用水安全受限：水体放射性污染可导致饮用水源地报废，影响区域供水安全。例如，某铀矿周边 10 余个村庄的地下水因铀、镭超标，无法作为饮用水，需远距离调水，增加供水成本；部分城市饮用水源地因天然放射性背景值高，需投入大量资金建设净化处理设施。

农业灌溉风险：使用放射性超标的水体灌溉农田，可导致土壤放射性核素累积，进而污染农作物，形成“水体-土壤-农作物”污染链。例如，用铀含量超标的河水灌溉水稻，可导致大米中铀含量超标，长期食用影响人体健康；土壤中核素累积还可导致土壤肥力下降，农作物产量降低。

工业用水限制：放射性超标的水体无法用于食品加工、制药等对水质要求高的工业生产，限制区域工业发展。例如，某磷酸盐化工区因地表水放射性污染，周边食品加工厂需投入资金建设深度净化设施，否则无法满足生产用水标准。

## 第四节 大气放射性物质扩散规律

### 一、大气放射性物质扩散核心机制

大气放射性物质的扩散是物理搬运、化学转化与沉降清除的协同过程，核心机制包括湍流扩散、对流传输、沉降作用及界面交换，不同机制主导不同尺度的扩散行为：

#### （一）湍流扩散机制：近距离扩散的主导过程

湍流扩散是大气中不规则涡旋运动导致的物质混合扩散，是放射性物质从排放源向周边近距离扩散的核心机制，扩散范围通常在数公里至数十公里：

分子扩散与涡旋扩散协同：分子扩散仅在近地面极薄区域（毫米级）起作用，主要通过分子热运动实现物质迁移；涡旋扩散（湍流扩散）是主导形式，大气涡旋将放射性物质从高浓度区向低浓度区搬运，混合速率远高于分子扩散。例如，铀矿开采产

生的放射性气溶胶,在排放源周边 1~10 公里内,主要通过湍流扩散实现水平与垂直方向的均匀混合,浓度随距离快速衰减。

扩散方向与强度的随机性:湍流运动的不规则性导致放射性物质扩散方向无固定规律,但整体呈现“向四周扩散、浓度梯度递减”的特征;扩散强度与湍流能量正相关,强湍流(如大风、对流天气)可使扩散速率提升数倍,污染范围显著扩大。

### (二) 对流传输机制:中长距离迁移的关键路径

对流传输是通过大气垂直对流与水平气流搬运实现的长距离迁移,主导放射性物质跨区域、跨圈层扩散,迁移距离可达数百至数千公里:

垂直对流传输:近地面空气受热上升形成对流气流,将低层大气中的放射性物质输送至高空(对流层中上部,高度 1~10 公里),再通过高空水平气流向远方传输。例如,核事故泄漏的放射性物质(如铯-137、氙),在强对流天气下可被快速输送至 5~10 公里高空,进而随西风带气流迁移数千公里,导致大范围污染。

水平气流传输:高空盛行气流(如西风带、信风带)是长距离水平传输的载体,放射性物质随气流做定向搬运,传输速率与气流速度正相关(通常为 10~50 米/秒)。例如,福岛核事故泄漏的放射性物质,随西风带气流横跨太平洋,在事故发生后 1~2 个月内影响北美西海岸大气环境。

### (三) 沉降清除机制:大气中物质的归趋过程

沉降清除是放射性物质从大气中返回地表的过程,分为干沉降与湿沉降两类,直接影响大气中放射性物质的滞留时间与浓度衰减:

干沉降:在无降水条件下,通过重力沉降、地表吸附、植物拦截等方式实现物质清除。重力沉降适用于粗颗粒气溶胶(粒径  $> 10$  微米),如铀矿尾矿库扬尘中的粗颗粒,沉降速率可达 1~10 厘米/秒,多在排放源周边数公里内沉降;细颗粒气溶胶(粒径  $< 2.5$  微米)与气态放射性物质(如氡气),主要通过地表(土壤、水体)吸附与植物叶片拦截实现干沉降,沉降速率较慢(0.01~0.1 厘米/秒),滞留时间较长。<sup>①</sup>

湿沉降:通过降雨、降雪、雾、露等降水过程,将大气中的放射性物质冲刷至地表,是高效清除机制。降水过程中,放射性气溶胶被雨滴、雪花捕获,或气态物质溶解于降水介质中,随降水落到地表;一次强降雨可使大气中放射性物质浓度降低 50%~90%,是短期快速清除的主要途径。例如,核事故后若出现强降雨,可显著缩短周边区域大气放射性污染的持续时间。

<sup>①</sup> 陈志国,闫二艳,刘星辰,等.放射性物质  $^{137}\text{Cs}$  对微波大气击穿特性的影响[J].强激光与粒子束,2022,34(11):77-82.

#### （四）界面交换机制：多介质迁移的衔接过程

大气放射性物质通过界面交换进入土壤、水体、生物等其他介质，完成多介质迁移循环：

大气 - 土壤 / 水体界面：干沉降与湿沉降的放射性物质直接进入土壤或水体表面，成为土壤、水体放射性污染的重要来源；土壤中挥发性放射性物质（如氡气）可通过土壤孔隙挥发进入大气，形成“土壤 - 大气”交换循环。

大气 - 生物界面：植物通过叶片吸附大气中的放射性气溶胶与气态物质，或通过气孔吸收气态核素（如氡气、氟），进而通过食物链迁移至动物与人体；鸟类、昆虫等生物可通过体表吸附大气放射性物质，参与生物迁移过程。

## 二、影响大气放射性物质扩散的关键因素

### （一）气象条件因素：扩散过程的主导驱动力

气象条件直接决定扩散速率、方向与范围，核心影响因子包括风速、风向、大气稳定性、降水、温度层结等：

风速与风向：风速是扩散速率的核心控制因子，风速越大，扩散速率越快，污染范围越广但浓度越低；例如，风速从 2 米 / 秒提升至 10 米 / 秒时，放射性物质扩散速率提升 5 倍，相同距离处浓度降低 60%~80%。风向决定扩散方向，主导污染区域的空间分布，如主导风向为东风时，排放源西侧污染浓度显著高于东侧；风向多变（如静风、微风天气）时，放射性物质易在排放源周边累积，形成高浓度污染区。

大气稳定性：大气稳定性反映大气垂直运动的抑制程度，分为不稳定、中性、稳定三类。不稳定大气（如晴天午后）垂直对流强烈，有利于放射性物质向高空扩散，近地面浓度较低；稳定大气（如夜间逆温、阴天）垂直运动受抑制，放射性物质易在低层大气滞留，近地面浓度升高，污染范围局限；中性大气（如多云天气）扩散条件介于两者之间。

降水与湿度：降水通过湿沉降直接清除大气放射性物质，降水强度越大、持续时间越长，清除效果越显著；例如，日降水量 > 50 毫米的暴雨，可清除大气中 70% 以上的放射性气溶胶。空气湿度影响气溶胶颗粒的凝聚与吸附，高湿度环境（相对湿度 > 80%）中，气溶胶颗粒易凝聚变大，加速重力沉降，同时增强颗粒物对气态核素的吸附，间接影响扩散过程。

温度层结：温度层结决定大气垂直对流强度，正常层结（气温随高度升高而降低）有利于垂直扩散；逆温层结（气温随高度升高而升高）会抑制垂直对流，形成“扩散屏障”，导致放射性物质在逆温层下累积。例如，冬季夜间常出现地面逆温，逆温层高度 100~500 米，可使近地面放射性物质浓度升高 2~5 倍。

## （二）排放源特征因素：扩散的物质基础与初始条件

排放源的类型、强度、高度及排放方式，直接影响扩散的初始浓度与扩散路径：

源类型与核素形态：点源（如核设施烟囱、铀矿开采井口）排放集中，易形成局部高浓度污染区；面源（如尾矿库、放射性废物填埋场）排放分散，污染范围广但浓度较低；线源（如放射性物料运输路线）排放呈线性延伸，污染带沿运输路线分布。核素形态影响扩散行为，气态核素（如氡气、氡）扩散性强，可长距离迁移；气溶胶态核素迁移性受粒径控制，细颗粒（微米）可长距离扩散，粗颗粒（ $> 10$  微米）易快速沉降。

排放强度与高度：排放强度越大，大气中初始浓度越高，污染范围越广；例如，核事故泄漏的放射性物质排放强度是正常核设施排放的 1000~10000 倍，可导致大范围、高浓度污染。排放高度越高，扩散范围越大，近地面浓度越低；高烟囱（高度  $> 100$  米）排放可使放射性物质扩散至数十公里外，近地面浓度仅为低烟囱（高度）排放的 1/10~1/5。

排放方式：连续排放（如核设施正常运行排放）形成稳定的污染羽流，浓度分布相对均匀；间歇排放（如矿山爆破、废物焚烧）形成瞬时污染峰值，浓度随时间波动显著；突发排放（如核事故泄漏）可在短时间内释放大量放射性物质，形成高强度污染羽流，扩散过程剧烈且难以预判。

## （三）地形地貌与下垫面因素：扩散的空间约束条件

地形地貌与下垫面性质通过改变气流运动，影响放射性物质的扩散路径与浓度分布：

地形类型：平原地形地势平坦，气流运动顺畅，扩散过程相对均匀，浓度随距离呈指数衰减；山地地形地势复杂，气流易形成绕流、涡流，导致放射性物质在山谷、背风坡等区域累积，形成局部高浓度区。例如，山谷地形中，气流受山体阻挡，放射性物质易在山谷底部滞留，浓度可达平原地区的 3~10 倍；高山地区海拔高、气压低，大气稀释能力强，扩散速率快于平原地区。

下垫面性质：下垫面的粗糙度、植被覆盖度与介质类型，影响气流运动与沉降过程。城市下垫面（建筑物密集）粗糙度高，气流湍流强烈，扩散速率快，但建筑物可阻挡气流，导致放射性物质在街道、小巷等区域累积；农村下垫面（农田、草地）粗糙度低，气流顺畅，扩散均匀。植被覆盖度高的区域（森林、草原）可增强干沉降效果，通过植物拦截降低大气中放射性物质浓度，例如，森林地区对放射性气溶胶的干沉降速率是裸地的 2~3 倍。水体下垫面（湖泊、海洋）反射率高，气流运动平稳，扩散过程均匀，同时水体可吸收部分气态放射性物质（如氡），加速大气净化。



#### （四）核素自身性质因素：扩散与转化的内在控制

核素的物理化学性质（半衰期、挥发性、化学活性）影响其在大气中的滞留时间与转化行为：

半衰期：短半衰期核素（如氡 - 222，半衰期 3.82 天；钋 - 218，半衰期 3.1 分钟）在大气中滞留时间短，扩散范围有限；长半衰期核素（如铯 - 137，半衰期 30 年；铀 - 238，半衰期 44.7 亿年）在大气中滞留时间长，可长距离迁移并长期存在。例如，氡气及其短半衰期子体主要在排放源周边数公里内扩散，而铯 - 137 可随大气气流迁移数千公里，污染范围覆盖多个区域。

挥发性与化学活性：高挥发性核素（如氡气、氟）扩散性强，不易被气溶胶吸附，可在大气中自由扩散；低挥发性核素（如铀、钍氧化物）易形成气溶胶颗粒，迁移性受颗粒物沉降控制。化学活性强的核素（如钋、镭）易与大气中的氧气、水汽、二氧化碳等发生化学反应，形成化合物，改变其赋存形态与扩散行为；化学惰性核素（如氡气）在大气中化学性质稳定，扩散过程不受化学转化影响。

### 三、大气放射性物质扩散的时空演化特征

#### （一）空间演化特征：从点源到区域的梯度扩散

近距离扩散（：以湍流扩散为主，浓度分布呈“点源中心高、四周快速衰减”的特征，污染范围呈圆形或椭圆形（受风向影响）。例如，核设施烟囱排放口周边 10 公里内，放射性物质浓度从排放口的 1000~10000 贝可 / 立方米，降至 10 公里处的 1~10 贝可 / 立方米，衰减速率快，浓度梯度显著。

中距离扩散（10~100 公里）：湍流扩散与水平气流传输共同作用，污染范围呈带状延伸（沿主导风向），浓度随距离缓慢衰减，同时受地形、气象条件影响出现局部浓度峰值。例如，铀矿尾矿库周边 50 公里内，沿主导风向形成宽 1~5 公里的污染带，浓度从 10 公里处的 10 贝可 / 立方米降至 50 公里处的 0.1~1 贝可 / 立方米，山谷、背风坡等区域浓度可达周边区域的 2~3 倍。

长距离扩散（> 100 公里）：以水平气流传输为主，扩散范围广（可达数千公里），浓度低且分布均匀，受全球大气环流控制。例如，切尔诺贝利核事故泄漏的放射性物质，随西风带气流迁移，在事故发生后 1~2 周内影响欧洲大部分地区，大气中铯 - 137 浓度较背景值升高 10~100 倍，但整体分布相对均匀。

区域分布规律：放射性污染源密集区（如核工业基地、铀矿开采区、放射性废物处置场）周边大气放射性污染风险显著高于其他区域；大气环流主导区域扩散方向，如北半球中纬度地区，放射性物质多沿西风带向东扩散，形成跨国家、跨大陆的污染传输。



## （二）时间演化特征：短期波动与长期衰减并存

日内变化特征：受大气稳定度与边界层厚度日内变化影响，大气放射性物质浓度呈现“夜间高、白天低”的规律。夜间大气稳定度高、边界层厚度薄（米），放射性物质易在低层大气滞留，浓度较高；白天大气不稳定、边界层厚度厚（> 2000 米），垂直扩散强烈，浓度较低。例如，核设施周边大气中氡气浓度，夜间可达白天的 2~5 倍。

季节变化特征：受气象条件季节差异影响，浓度呈现显著季节性波动。冬季气温低、大气稳定度高、逆温天气频繁，放射性物质扩散受阻，浓度较高；夏季气温高、对流强烈、降水频繁，扩散与清除效果好，浓度较低。例如，北方地区冬季大气放射性气溶胶浓度是夏季的 1.5~3 倍；雨季（夏季、秋季）受降水湿沉降影响，浓度较旱季降低 40%~60%。

长期演化规律：人为排放源停止后，大气放射性物质浓度随时间呈指数衰减，衰减速率受核素半衰期与清除过程控制。短半衰期核素（如氡气）浓度在排放停止后数天内降至背景值；长半衰期核素（如铯 - 137）浓度衰减缓慢，需数十年甚至上百年来才能接近背景值。例如，福岛核事故后，周边区域大气铯 - 137 浓度在事故发生后 1 年内下降 90%，但仍高于背景值，10 年后才逐渐接近背景水平。

突发污染时间特征：核事故、矿山爆破等突发事件导致的污染，浓度在短时间内（数小时至数天）急剧升高，形成污染峰值，随后逐渐衰减。例如，核事故泄漏发生后 24~72 小时内，大气放射性物质浓度达到峰值，随后通过扩散与沉降作用快速衰减，衰减速率初期快、后期慢。

## 四、大气放射性物质扩散模型与模拟技术

### （一）扩散模型分类与核心原理

大气放射性物质扩散模型是量化扩散过程、预测污染范围与浓度分布的关键工具，按模型复杂度与适用尺度分为经验模型、半经验半机理模型与数值模型三类：

经验模型：基于实测数据建立浓度与影响因素（如距离、风速、排放强度）的统计关系，适用于简单场景与近距离扩散预测。例如，点源扩散的高斯烟羽模型简化版，通过距离、风速、排放强度等参数估算地面浓度；面源扩散的平均浓度模型，基于排放通量与扩散系数预测区域平均浓度。经验模型的优势是简单易用、计算量小，缺点是适用范围有限、缺乏机理支撑，精度受实测数据影响较大。

半经验半机理模型：结合物理扩散机理与实测经验参数，平衡精度与易用性，适用于中短距离（公里）扩散预测。常用模型包括高斯烟羽模型、高斯烟团模型、拉格朗日粒子扩散模型。高斯烟羽模型假设放射性物质在大气中呈高斯分布，基于湍流扩散理论，考虑风速、风向、大气稳定度、排放高度等因素，预测连续点源的浓度分布；

高斯烟团模型适用于间歇排放或突发排放，将放射性物质视为多个烟团，模拟烟团的迁移与扩散；拉格朗日粒子扩散模型通过追踪大量虚拟粒子的运动轨迹，模拟放射性物质的扩散过程，适用于复杂地形与气象条件。

数值模型：基于大气动力学与扩散方程，通过数值方法求解，适用于复杂地形、长距离（> 100 公里）与复杂气象条件下的扩散模拟。常用模型包括区域大气质量模型（如 CMAQ、WRF-Chem）、全球大气传输模型（如 HYSPLIT、FLEXPART）。数值模型可耦合气象预报数据、地形数据、排放源数据，模拟放射性物质的湍流扩散、对流传输、沉降清除等全过程，预测精度高、适用范围广，但计算量较大，对数据输入与计算资源要求高。

## （二）关键模型参数与获取方法

模型参数的准确性直接决定模拟结果的可靠性，核心参数分为气象参数、源参数、地形下垫面参数及核素迁移参数四类，获取方法结合实测、遥感反演与数据库查询：

气象参数：包括风速、风向、大气稳定度、混合层高度、降水量等。获取方法：风速与风向通过地面气象站、气象塔实测（精度  $\pm 0.1$  米 / 秒、 $\pm 1^\circ$ ），或通过气象卫星遥感反演；大气稳定度基于气温梯度、太阳辐射强度等参数计算（如帕斯奎尔 - 特纳尔分类法）；混合层高度通过无线电探空、激光雷达观测获取；降水量通过雨量计、气象卫星降水产品获取。

源参数：包括排放强度、排放高度、排放方式、核素组成等。获取方法：排放强度通过污染源监测（如核设施烟囱在线监测、矿山扬尘采样分析）确定；排放高度通过实地测量（如烟囱高度、尾矿库海拔）获取；排放方式与核素组成基于污染源类型（如核设施、矿山）查询相关行业报告或监测数据；气态与气溶胶态核素占比通过采样分析（滤膜过滤法）确定。

地形下垫面参数：包括地形高度、坡度、粗糙度、植被覆盖度等。获取方法：地形数据（高度、坡度）从数字高程模型（DEM，分辨率 30~90 米）提取；下垫面粗糙度基于土地利用类型（如城市、森林、农田）查询经验数据库（如城市粗糙度 0.5~2 米，农田 0.1~0.3 米）；植被覆盖度通过卫星遥感（NDVI 指数）反演获取。

核素迁移参数：包括干沉降速率、湿沉降系数、扩散系数、半衰期等。获取方法：干沉降速率通过野外实测（如植被拦截采样、地表沉积收集）或参考文献经验值（气溶胶干沉降速率 0.01~0.1 厘米 / 秒，气态核素 0.001~0.01 厘米 / 秒）；湿沉降系数基于降水量与核素溶解度确定；扩散系数通过风洞实验、野外扩散观测拟合；半衰期从核素手册或国际原子能机构（IAEA）数据库查询。

## （三）模型应用案例

案例 1：核设施正常排放扩散模拟：某核设施烟囱高度 120 米，连续排放氙气（排

放强度 1000 贝可 / 秒)，采用高斯烟羽模型，输入当地气象数据（年均风速 3 米 / 秒，大气稳定度以中性为主）、地形数据（平原地形，粗糙度 0.2 米），模拟结果显示：排放口下风向 1 公里处氡气浓度为 50 贝可 / 立方米，10 公里处降至 2 贝可 / 立方米，50 公里处接近背景值（0.1 贝可 / 立方米），与实地监测数据误差 0%，为核设施周边环境风险评估提供支撑。

案例 2：核事故突发扩散预测：以福岛核事故为背景，采用 HYSPLIT 拉格朗日粒子扩散模型，输入事故泄漏源强（铯 - 137 排放强度  $10^{15}$  贝可）、气象数据（西风带气流速度 20 米 / 秒）、地形数据，模拟结果显示：事故后 72 小时内，铯 - 137 污染羽流沿西风带向东北方向扩散，覆盖日本东部海域；1 个月后，污染羽流横跨太平洋，北美西海岸大气中铯 - 137 浓度较背景值升高 5~10 倍，与实际监测结果一致，验证了模型对长距离突发扩散的预测能力。

案例 3：矿山扬尘扩散模拟：某铀矿尾矿库为面源排放（面积 10 平方公里，扬尘排放通量 10 贝可 / 平方米 · 秒），采用 WRF-Chem 区域大气质量模型，输入当地气象数据（夏季风速 2.5 米 / 秒，降水日数 15 天 / 月）、植被覆盖度数据（周边植被覆盖率 30%），模拟结果显示：尾矿库周边 5 公里内放射性气溶胶浓度为 10~50 贝可 / 立方米，10 公里处降至 5~10 贝可 / 立方米，雨季因湿沉降作用，浓度较旱季降低 60%，为矿山扬尘污染防控提供量化依据。



## 第五章 环境放射性监测技术基础

### 第一节 环境放射性监测原理

#### 一、环境放射性监测核心逻辑

环境放射性监测的本质是“辐射信号捕捉 - 能量转化 - 数据解析”的闭环过程，核心逻辑围绕放射性核素的固有衰变特性与环境介质的传输规律展开，确保监测结果的准确性、代表性与时效性：

##### （一）监测的核心依据：放射性核素的衰变特性

放射性核素的衰变具有固定规律，是监测的根本依据，核心特性包括衰变类型、半衰期与辐射能量：

衰变类型与辐射种类：核素衰变主要释放  $\alpha$  射线（氦核）、 $\beta$  射线（电子或正电子）、 $\gamma$  射线（光子）三类辐射，不同辐射的穿透能力、电离能力差异显著（ $\alpha$  射线穿透最弱、电离最强； $\gamma$  射线穿透最强、电离最弱），决定了监测方法与探测器的选择。例如，土壤中富集的铀、钍等核素主要释放  $\alpha$  射线，需采用近距离探测技术；核事故泄漏的铯 - 137、钴 - 60 主要释放  $\gamma$  射线，可通过远距离伽马能谱仪监测。

半衰期的监测意义：半衰期是核素衰变速率的表征，短半衰期核素（如氡 - 222, 3.82 天）需快速监测避免信号衰减，长半衰期核素（如铀 - 238, 44.7 亿年）可反映长期污染累积情况。监测过程中需根据半衰期选择采样频率与分析周期，例如，监测水体中氡（半衰期 12.3 年）可季度采样，而监测钋 - 218（半衰期 3.1 分钟）需现场实时监测。<sup>①</sup>

特征辐射能量的识别价值：每种核素释放的  $\gamma$  射线具有特定能量（如铯 - 137 的特征能量 662keV，钴 - 60 的 1173keV 与 1332keV），如同核素的“指纹”，通过探测特征能量可实现核素定性识别，结合能量强度可计算核素浓度。

##### （二）监测的核心目标：全链条污染覆盖

环境放射性监测需覆盖“污染源 - 迁移路径 - 受体”全链条，核心目标包括：

污染源强度监测：量化核设施、矿山、废物处置场等排放源的放射性释放强度，判断是否符合排放标准；

<sup>①</sup> 纪传伟, 罗鸿斌, 李静. 环境监测与治理 [M]. 化学工业出版社: 202409: 199.



环境介质污染监测：掌握土壤、水体、大气等介质中放射性核素的浓度水平与空间分布，识别污染羽流范围；

生态与人体暴露监测：评估放射性核素在生物体内的富集情况，计算人体通过呼吸、饮食、皮肤接触等途径的暴露剂量，判断健康风险。

### （三）监测的核心原则：科学性与代表性

为确保监测结果可靠，需遵循三项核心原则：

代表性原则：采样点需覆盖污染源周边、迁移路径关键节点、敏感区域（如饮用水源地、农田），采样时间需兼顾气象、水文条件的季节性变化（如雨季与旱季、白天与夜间）；

准确性原则：通过标准物质校准、平行样分析、空白实验等手段，控制采样、运输、分析过程中的误差，确保数据偏差在允许范围内（通常相对误差；

时效性原则：针对突发污染事件（如核事故、尾矿库溃坝），需采用实时监测技术快速获取数据，为应急响应提供支撑；常规监测需定期开展，追踪污染变化趋势。

## 二、辐射与探测器的作用机制

环境放射性监测的核心技术基础是“辐射与探测器的相互作用”，探测器通过捕捉辐射粒子并将其转化为电信号，实现辐射强度与能量的测量，不同探测器的作用机制基于不同的辐射物理效应：

### （一）电离效应与气体探测器

气体探测器利用辐射粒子导致气体电离的效应工作，核心类型包括电离室、正比计数器、盖革-米勒计数器：

作用机制：探测器内填充惰性气体（如氩气、氙气），辐射粒子进入气体后撞击气体分子，使其电离产生电子与正离子；在电场作用下，电子向阳极移动、正离子向阴极移动，形成微弱电流或电压脉冲，脉冲信号的数量与辐射强度成正比，脉冲幅度与辐射能量相关。

适用场景：电离室能量分辨率高，适用于剂量率精确测量（如核设施周边环境剂量率监测）；正比计数器对 $\alpha$ 、 $\beta$ 射线灵敏度高，常用于低浓度 $\alpha$ 核素（如铀、钍）的计数分析；盖革-米勒计数器响应速度快、结构简单，适用于现场快速辐射探测（如应急监测中的放射性污染筛查）。

### （二）激发与荧光效应与闪烁探测器

闪烁探测器利用辐射粒子激发物质产生荧光的效应工作，核心类型包括无机闪烁体探测器（如NaI(Tl)、CsI(Tl)）、有机闪烁体探测器：

作用机制：辐射粒子进入闪烁体材料后，将能量传递给材料分子，使其从基态激

发至激发态；激发态分子跃迁回基态时释放荧光光子，光子被光电倍增管接收并转化为电脉冲，脉冲幅度与辐射能量成正比，脉冲频率与辐射强度成正比。

适用场景：NaI (Tl) 闪烁探测器对  $\gamma$  射线响应效率高、能量分辨率较好，是环境  $\gamma$  射线监测与伽马能谱分析的常用设备（如土壤、水体中铯 - 137、锶 - 90 的定量分析）；有机闪烁体探测器对  $\beta$  射线灵敏度高，常用于水体、大气中  $\beta$  核素（如氚、碳 - 14）的监测；CsI (Tl) 闪烁探测器体积小、耐温性强，适用于野外便携式监测设备。

### （三）半导体效应与半导体探测器

半导体探测器利用辐射粒子在半导体材料中产生电子 - 空穴对的效应工作，核心类型包括硅探测器、锗探测器（如 HPGe 高纯锗探测器）：

作用机制：半导体材料（如硅、锗）在反向偏压下形成耗尽层，辐射粒子进入耗尽层后传递能量，使半导体原子电离产生电子 - 空穴对；电子与空穴在电场作用下分离并向两极移动，形成电脉冲，脉冲幅度与辐射能量成正比。

适用场景：硅探测器能量分辨率高，对  $\alpha$  射线、低能  $\beta$  射线响应灵敏，常用于  $\alpha$  核素（如钋 - 210、镭 - 226）的精确计数与能谱分析；HPGe 探测器能量分辨率极高（远优于闪烁探测器），可实现多种  $\gamma$  核素的同时识别与定量（如环境样品中铀、钍、钾 - 40 等天然核素与人工核素的联合分析），是实验室高精度监测的核心设备。

### （四）其他探测器的作用机制

热释光探测器（TLD）：利用辐射能量在晶体材料（如 LiF、CaSO<sub>4</sub>）中形成的陷阱电子，加热时电子释放能量产生荧光，荧光强度与吸收的辐射剂量成正比，适用于长期累积剂量监测（如环境累积剂量、人体个人剂量监测）；

径迹探测器：利用辐射粒子在绝缘材料（如 CR-39、聚碳酸酯）中形成的损伤径迹，经化学蚀刻后通过显微镜计数径迹数量，换算核素浓度，适用于  $\alpha$  核素（如铀、钍）的长期累积监测（如土壤、水体沉积物中铀含量的测定）。

## 三、不同环境介质的监测原理

环境放射性核素在土壤、水体、大气中的赋存形态与迁移规律不同，需针对性设计监测原理与方法，确保监测结果的有效性：

### （一）土壤放射性监测原理

土壤中放射性核素以固态（残渣态、吸附态）为主，监测核心是“样品采集 - 预处理 - 核素提取 - 探测分析”的流程化分析：

采样与预处理原理：根据土壤类型（如砂质土、黏质土）与污染分布特征，采用网格布点法或放射状布点法采样，采样深度覆盖核素富集层（通常 0~50 厘米）；样品经风干、研磨、过筛（200 目）去除杂质，通过均匀化处理确保样品代表性；对于  $\alpha$ 、

$\beta$  核素分析, 需通过干燥、灰化 (温度 500~600℃) 去除有机质, 浓缩核素。

核素提取与探测原理: 采用酸溶法 (如硝酸 - 盐酸 - 氢氟酸混合酸) 或碱熔法溶解土壤样品, 提取其中的放射性核素;  $\alpha$  核素 (如铀、钍) 通过萃取、沉淀分离纯化后, 采用硅探测器或  $\alpha$  能谱仪计数分析;  $\gamma$  核素 (如铯 - 137、钾 - 40) 可直接通过 HPGe 伽马能谱仪对土壤样品进行无损分析, 利用特征  $\gamma$  射线能量识别核素并定量; 对于土壤中挥发性核素 (如氡气), 采用累积法 (如活性炭吸附、径迹探测器) 采集土壤孔隙中的氡气, 通过测量氡衰变子体的辐射强度换算氡浓度。

## (二) 水体放射性监测原理

水体中放射性核素分为溶解态、颗粒态、络合态, 监测需兼顾 “原位实时监测” 与 “实验室精准分析”:

原位监测原理: 针对水体中  $\gamma$  核素与挥发性核素, 采用便携式探测器 (如 NaI (Tl) 闪烁计数器、水下伽马能谱仪) 现场测量, 无需采样预处理, 快速获取水体剂量率与主要核素浓度; 对于溶解态氡气, 采用连续监测仪通过扩散膜采集水体中的氡气, 实时测量其衰变子体的  $\alpha$  辐射强度。

实验室分析原理: 采集水体样品后, 通过过滤 (0.45 微米滤膜) 分离溶解态与颗粒态核素; 颗粒态核素通过滤膜烘干、灰化后, 采用伽马能谱仪或  $\alpha$  能谱仪分析; 溶解态核素通过蒸发浓缩 (提高核素浓度)、化学沉淀 (如钡盐沉淀镭)、萃取分离等方法处理后, 采用闪烁探测器或半导体探测器分析; 对于低浓度核素 (如氚、碳 - 14), 采用液体闪烁计数器测量, 利用有机闪烁体与辐射粒子的相互作用产生荧光, 通过光电倍增管捕捉信号并定量。

## (三) 大气放射性监测原理

大气中放射性物质分为气态 (氡气、氚) 和气溶胶态 (放射性粉尘、颗粒结合态核素), 监测核心是 “富集采样 - 实时探测”:

气溶胶态核素监测原理: 采用滤膜采样法, 通过抽气泵使大气通过滤膜 (如玻璃纤维滤膜、聚四氟乙烯滤膜), 气溶胶颗粒被滤膜截留; 采样后将滤膜放入伽马能谱仪或  $\alpha/\beta$  计数器中, 测量滤膜上的辐射强度, 换算大气中气溶胶态核素浓度; 采样时间根据核素浓度调整 (常规监测 24 小时, 应急监测 1~4 小时), 确保探测信号满足统计要求。

气态核素监测原理: 氡气监测采用活性炭吸附法 (活性炭吸附大气中的氡气, 加热解析后测量  $\alpha$  辐射强度) 或电离室法 (氡气衰变产生的  $\alpha$  粒子电离空气, 测量电离电流); 氚气监测采用冷凝法 (冷却大气样品使氚化水凝结) 或吸附法 (分子筛吸附氚化水), 浓缩后通过液体闪烁计数器测量; 对于其他气态核素 (如碘 - 131), 采用浸渍滤膜 (如硝酸银浸渍滤膜) 吸附采样, 再通过伽马能谱仪分析。

实时监测原理：应急监测中采用便携式气溶胶监测仪、伽马能谱仪，通过连续采样与探测，实时输出大气中放射性物质的浓度变化曲线，捕捉污染峰值与扩散趋势。

#### （四）生物与生态介质监测原理

生物介质（如植物、动物、微生物）中放射性核素通过食物链富集，监测原理基于“生物采样 - 灰化处理 - 核素分析”：

生物采样原理：选择代表性生物（如农作物、鱼类、土壤动物），采集其可食用部分或全生物体，确保样品能反映区域污染水平（如采集水稻籽粒、鲫鱼肌肉）；采样时间兼顾生物生长周期（如农作物成熟季）与核素富集规律。

预处理与分析原理：生物样品经清洗、烘干、粉碎后，通过灰化（温度 550~600℃）去除有机物，减少样品体积并浓缩核素；灰化后的样品采用酸溶法溶解，提取核素后通过闪烁探测器、半导体探测器或伽马能谱仪分析；对于生物体中低浓度核素，可采用放射化学分离法纯化后再探测，提高分析灵敏度。

### 四、核素定性识别与剂量换算原理

环境放射性监测不仅需要获取核素浓度，还需实现核素定性识别与人体暴露剂量换算，为风险评估提供依据：

#### （一）核素定性识别原理

核素定性识别的核心是“特征辐射信号匹配”，主要通过能谱分析实现：

$\gamma$  核素识别原理：利用伽马能谱仪测量核素释放的  $\gamma$  射线能量谱，谱图中出现的特征峰位置对应核素的特征能量，将特征能量与核素能量数据库（如 IAEA 核素数据库）比对，即可识别核素种类。例如，谱图中 662keV 特征峰对应铯 - 137，1461keV 特征峰对应钾 - 40。

$\alpha$ 、 $\beta$  核素识别原理： $\alpha$  核素通过  $\alpha$  能谱仪测量其  $\alpha$  射线能量（如钍 - 238 的  $\alpha$  能量 4.196MeV，镭 - 226 的 4.785MeV），结合能量数据库识别； $\beta$  核素的能量连续分布，需通过化学分离纯化后，结合半衰期测量（如通过监测不同时间点的辐射强度，计算半衰期）辅助识别，或采用液体闪烁计数器的脉冲幅度分析功能，结合  $\beta$  能量谱特征识别。

#### （二）剂量换算原理

剂量换算是将监测得到的核素浓度转化为人體暴露剂量，核心依据是辐射防护相关标准与剂量转换系数：

剂量换算逻辑：根据核素进入人体的途径（吸入、食入、皮肤接触），结合核素浓度、暴露时间、人体活动参数（如呼吸速率、饮食摄入量），利用剂量转换系数（如吸入剂量转换系数、食入剂量转换系数）计算有效剂量。例如，通过大气中氡气浓度

(贝可/立方米)、人体呼吸速率(立方米/天)、暴露时间(天),乘以氡的吸入剂量转换系数(希沃特/贝可),得到人体吸入氡的有效剂量。

剂量评估标准:参考国际辐射防护委员会(ICRP)与国家相关标准(如GB 18871-2002),设定剂量阈值(如公众年有效剂量限值1毫希沃特),根据换算结果判断是否存在健康风险,超过阈值时需采取防护措施。

## 五、监测质量控制与数据验证原理

为确保监测数据的准确性与可靠性,需建立全流程质量控制体系,核心原理包括:

### (一) 标准物质校准原理

采用有证标准物质(如国家计量院研制的铀、钍标准溶液,土壤、水体标准参考物质)对监测设备与分析方法进行校准,通过测量标准物质的信号值与已知浓度,建立校准曲线,确保仪器响应与核素浓度的线性关系(相关系数通常 $> 0.995$ );定期开展仪器校准(如每日开机校准、每月全面校准),消除仪器漂移带来的误差。

### (二) 平行样与空白实验原理

每批样品分析时设置平行样(数量不少于样品总数的10%),通过计算平行样相对偏差(通常要求)验证分析方法的精密度;设置空白实验(包括试剂空白、仪器空白、采样空白),扣除空白信号对样品测量的干扰,确保测量结果的准确性。

### (三) 数据有效性验证原理

通过数据统计分析(如异常值检验、趋势分析)验证数据的合理性,剔除因采样误差、仪器故障导致的异常数据;将监测结果与区域背景值、历史数据对比,判断数据是否符合污染变化规律;对于应急监测数据,采用多种监测方法(如不同探测器、不同采样方式)交叉验证,确保数据可靠。

## 第二节 辐射探测仪器与设备

### 一、辐射探测仪器的核心分类与技术定位

#### (一) 按监测场景分类:实验室与现场/应急设备

实验室高精度分析设备:以核素精准识别与浓度定量为核心目标,具备高能量分辨率、高探测效率与低检出限,适用于环境样品(土壤、水体、生物)的离线分析,典型设备包括高纯锗伽马能谱仪、 $\alpha$ 能谱仪、液体闪烁计数器等。此类设备需配套样品预处理系统(如消解、分离纯化装置),分析周期较长(数小时至数天),但数据精度高,是环境放射性监测的“金标准”设备。



现场便携式监测设备：以快速获取环境辐射水平为目标，具备体积小、重量轻、响应速度快的特点，适用于野外、污染源周边等现场场景的实时监测，典型设备包括便携式伽马能谱仪、 $\alpha/\beta$  表面污染仪、环境剂量率仪等。此类设备无需复杂样品预处理，可直接获取数据（数秒至数分钟），但能量分辨率与探测效率略低于实验室设备，适用于污染筛查与趋势追踪。

应急快速筛查设备：针对核事故、尾矿库溃坝等突发污染事件，具备快速响应、高灵敏度与强环境适应性，典型设备包括便携式气溶胶监测仪、放射性核素识别仪（RIID）、移动监测车等。此类设备可在复杂环境（高温、高湿、粉尘）下稳定工作，能快速捕捉污染峰值与扩散趋势，为应急决策提供实时数据支撑。

在线连续监测系统：以长期、自动化监测为目标，通过固定站点或移动平台实现 24 小时不间断数据采集与传输，典型设备包括大气放射性在线监测系统、水体  $\gamma$  剂量率在线监测仪、土壤氡气连续监测站等。此类设备集成采样、探测、数据传输与预警功能，适用于污染源长期监控、环境背景值连续追踪及突发污染事件早期预警。

## （二）按探测对象分类： $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 射线探测设备

$\alpha$  射线探测设备：针对铀、钍、镭、钋等  $\alpha$  核素，需解决  $\alpha$  射线穿透能力弱（无法穿透纸张）的问题，设备通常采用近距离探测设计，典型包括  $\alpha$  能谱仪、 $\alpha$  表面污染仪、径迹探测器等。核心技术要求是样品需直接接触探测器，或通过富集采样（如滤膜采集）后近距离测量，确保  $\alpha$  粒子能进入探测器灵敏区。

$\beta$  射线探测设备：针对氚、碳 - 14、锶 - 90 等  $\beta$  核素， $\beta$  射线穿透能力中等（可穿透薄塑料），设备需兼顾灵敏度与抗干扰能力，典型包括  $\beta$  计数器、液体闪烁计数器、 $\beta$  表面污染仪等。核心技术要求是抑制  $\gamma$  射线干扰（如采用屏蔽材料），或通过能量甄别实现  $\beta$  射线的精准计数。

$\gamma$  射线探测设备：针对铯 - 137、钴 - 60、钾 - 40 等  $\gamma$  核素， $\gamma$  射线穿透能力强，设备可实现远距离、无损探测，典型包括伽马能谱仪、环境剂量率仪、水下  $\gamma$  监测仪等。核心技术要求是能量分辨率与探测效率的平衡，既要能识别不同核素的特征能量，又要快速捕捉  $\gamma$  射线强度变化。

## 二、实验室高精度分析设备：原理、特性与应用

实验室设备是环境放射性监测数据精准性的核心保障，主要用于样品的离线分析，需结合样品预处理技术实现核素的分离与浓缩，以下为典型设备详解：

### （一）高纯锗（HPGe）伽马能谱仪

核心技术原理：基于半导体效应，采用高纯度锗晶体（纯度  $> 99.999\%$ ）作为探测介质，在低温（液氮冷却， $-196^{\circ}\text{C}$ ）下工作以降低噪声； $\gamma$  射线进入锗晶体后产生

电子-空穴对，经电场分离与信号放大后形成能谱图，通过特征峰位置识别核素，特征峰面积定量浓度。

关键技术参数：能量分辨率（1.3keV@1332keV，钴-60）、探测效率（30%~70% @1332keV）、检出限（土壤中铯-137 检出限 $\leq 0.1\text{Bq/kg}$ ）、能量范围（50keV~10MeV）。

核心特性：能量分辨率极高（远优于 NaI (TI) 闪烁探测器），可同时识别多种  $\gamma$  核素（如天然核素铀-238、钍-232、钾-40 与人工核素铯-137、钴-60）；探测效率稳定，数据重复性好；但需液氮持续冷却，设备体积较大（含探测器、制冷系统、多道分析器），操作需专业人员。

典型应用：土壤、水体沉积物、生物样品中  $\gamma$  核素的精准定量分析；放射性废物核素组成分析；环境放射性背景值普查。

## （二） $\alpha$ 能谱仪

核心技术原理：基于硅半导体探测器或离子注入型探测器， $\alpha$  粒子进入探测器耗尽层后产生电子-空穴对，通过高灵敏度前置放大器将信号放大，形成  $\alpha$  能谱图，利用  $\alpha$  射线特征能量（如铀-238 为 4.196MeV）识别核素，计数率换算浓度。

关键技术参数：能量分辨率（15keV@5.486MeV，钋-210）、探测效率（ $\geq 20\%$ ）、本底计数率（ $\leq 0.01$  计数/分钟）、样品容量（10~20 个样品位）。

核心特性：对  $\alpha$  射线特异性强，抗  $\gamma$  射线干扰能力强；能量分辨率高，可区分铀、钍、镭等系列  $\alpha$  核素；需配套放射化学分离纯化技术（如萃取、沉淀）去除样品基质干扰，否则会影响能谱峰形与定量精度。

典型应用：土壤、水体中铀、钍、镭-226、钋-210 等  $\alpha$  核素的定量分析；放射性废水处理效果评估；核设施退役场地  $\alpha$  核素污染调查。

## （三）液体闪烁计数器（LSC）

核心技术原理：将样品与有机闪烁体溶液混合， $\beta$  粒子（或  $\alpha$  粒子）与闪烁体分子相互作用产生荧光光子，经光电倍增管转化为电脉冲，通过脉冲幅度分析区分核素类型，计数率定量浓度。对于低能  $\beta$  核素（如氚、碳-14），需采用低本底设计减少环境辐射干扰。

关键技术参数：探测效率（氚 $\geq 60\%$ ，碳-14 $\geq 95\%$ ）、本底计数率（氚 $\leq 0.5$  计数/分钟，碳-14 $\leq 0.1$  计数/分钟）、能量分辨率（脉冲幅度分辨率 $\leq 15\%$ ）、样品体积（0.1~20mL）。

核心特性：适用于低能  $\beta$  核素与部分  $\alpha$  核素的测量，无需样品制样（直接与闪烁体混合）；探测效率高，检出限低（氚检出限 $\leq 0.1\text{Bq/L}$ ）；但存在化学淬灭效应（样品基质抑制荧光），需通过淬灭校正曲线确保数据准确性。

典型应用：水体、大气中氚、碳-14 的定量分析；生物样品中低浓度  $\beta$  核素富集

监测；核设施废水气排放监测。

#### （四）热释光剂量仪（TLD）阅读器

核心技术原理：配套热释光剂量片（如  $\text{LiF:Mg,Ti}$ ），剂量片吸收辐射能量后将电子储存于晶体陷阱中；阅读器通过程序升温（ $50\sim 400^\circ\text{C}$ ）使陷阱电子释放，产生荧光信号，荧光强度与吸收剂量成正比，换算环境累积剂量。

关键技术参数：温度范围（室温  $\sim 400^\circ\text{C}$ ）、升温速率（ $0.1\sim 10^\circ\text{C/s}$ ）、荧光探测效率（ $\geq 90\%$ ）、剂量测量范围（ $0.1\mu\text{Sv}\sim 10\text{Sv}$ ）。

核心特性：剂量片体积小（直径  $3\sim 5\text{mm}$ ）、重量轻、耐环境干扰（高温、高湿），可布设于环境中进行长期累积剂量监测（数天至数年）；阅读器操作简便，数据稳定性好，适用于大规模布点监测。

典型应用：环境  $\gamma$  射线累积剂量监测；核设施周边居民个人剂量监测；放射性污染区域剂量分布 mapping。

### 三、现场与应急监测设备：便携性与快速响应技术

现场与应急设备需满足复杂环境下的快速监测需求，核心技术方向是小型化、低功耗、高灵敏度与抗干扰能力，以下为典型设备详解：

#### （一）便携式伽马能谱仪

核心技术原理：采用小型化闪烁探测器（如  $\text{NaI (Tl)}$ 、 $\text{CsI (Tl)}$ ）或便携式  $\text{HPGe}$  探测器（电制冷，无需液氮）， $\gamma$  射线激发闪烁体产生荧光，经小型化光电倍增管与多道分析器转化为能谱数据，通过内置核素数据库实现快速识别与定量。

关键技术参数：探测器类型（ $\text{NaI (Tl)}$  晶体体积  $3\times 3$  英寸或  $5\times 5$  英寸；电制冷  $\text{HPGe}$ ）、能量分辨率（ $7\% @ 662\text{keV}$ ,  $\text{NaI (Tl)}$ ； $2.5\text{keV} @ 1332\text{keV}$ ,  $\text{HPGe}$ ）、探测效率（ $\text{NaI (Tl)} \geq 30\% @ 662\text{keV}$ ）、重量（ $\text{NaI}$  型  $3\sim 8\text{kg}$ ， $\text{HPGe}$  型  $10\sim 20\text{kg}$ ）、数据输出时间（ $\leq 1$  分钟）。

核心特性： $\text{NaI (Tl)}$  型设备体积小、重量轻、价格低，适用于现场快速筛查；电制冷  $\text{HPGe}$  型设备能量分辨率高，可实现核素精准识别，适用于污染源定位与污染羽流追踪；部分设备支持 GPS 定位与数据实时传输，便于现场污染分布绘图。

典型应用：核设施周边现场  $\gamma$  剂量率监测；放射性废物处置场污染排查；核事故应急响应中核素快速识别（如铯 - 137、碘 - 131）。

#### （二） $\alpha/\beta$ 表面污染仪

核心技术原理：采用气体探测器（正比计数器）或闪烁探测器（ $\text{ZnS (Ag)}$  闪烁体），探测器窗口采用薄云母片（厚度塑料膜，允许  $\alpha$ 、 $\beta$  射线穿透进入探测器；通过能量甄别电路区分  $\alpha$ 、 $\beta$  信号，计数率换算表面污染活度（ $\text{Bq/cm}^2$ ）。

关键技术参数：探测面积（10~100cm<sup>2</sup>）、探测效率（ $\alpha \geq 30\%$ @5.486MeV,  $\beta \geq 40\%$ @0.5MeV）、本底计数率（ $\alpha \leq 0.1$  计数 / 分钟,  $\beta \leq 1$  计数 / 分钟）、污染水平报警阈值（可自定义，如 0.4Bq/cm<sup>2</sup>）。

核心特性：操作简便，可手持贴近监测对象（土壤表面、设备表面、衣物）；具备声光报警功能，适用于快速筛查表面污染；部分设备支持数据存储与导出，便于现场记录与后续分析。

典型应用：核设施工作人员体表污染监测；实验室样品处理区域表面污染排查；放射性污染场地土壤表面污染快速评估。

### （三）环境剂量率仪（巡测仪）

核心技术原理：采用电离室、闪烁探测器或半导体探测器，测量环境中  $\gamma$  射线与 X 射线的吸收剂量率（ $\mu\text{Sv/h}$  或  $\text{mSv/h}$ ），通过信号放大与校准电路将探测器响应转化为剂量率数据，实时显示并支持报警。

关键技术参数：剂量率测量范围（0.01 $\mu\text{Sv/h}$ ~10Sv/h）、能量响应范围（50keV~1.3MeV）、能量线性误差（ $\leq \pm 10\%$ ）、响应时间（ $\leq 1$  秒）、重量（ $\leq 500\text{g}$ ）。

核心特性：体积小巧、手持操作、响应快速；具备过载报警（如剂量率超过 100 $\mu\text{Sv/h}$  报警）与低功耗设计（待机时间  $\geq 100$  小时）；适用于大范围巡测，快速判断污染区域与剂量水平。

典型应用：核设施周边环境剂量率巡测；放射性矿山开采区剂量分布监测；核事故应急响应中污染区域边界划定。

### （四）应急移动监测车

核心技术原理：集成便携式伽马能谱仪、气溶胶采样监测系统、环境剂量率仪、GPS 定位模块、数据传输终端与供电系统，形成移动监测平台；可在污染区域快速行驶，实时采集辐射数据并传输至指挥中心，生成污染分布热力图。

关键技术配置：车载 HPGc 或 NaI (Tl) 伽马能谱仪、气溶胶连续采样与计数系统、多通道剂量率监测模块、4G/5G 数据传输、太阳能辅助供电；部分配置无人机搭载监测设备，实现高空污染羽流追踪。

核心特性：机动性强，可快速抵达突发污染现场；集成多种监测功能，实现“剂量率+核素识别+气溶胶浓度”同步监测；数据实时可视化，支持应急指挥决策。

典型应用：核事故应急响应现场监测；放射性尾矿库溃坝污染追踪；跨区域放射性污染迁移监测。

## 四、在线连续监测系统：自动化与长期稳定运行技术

在线连续监测系统是环境放射性污染长期监控与早期预警的核心设备，需具备

自动化采样、探测、数据处理与传输能力，适应长期无人值守运行，以下为典型系统详解：

### （一）大气放射性在线监测系统

核心技术组成：气溶胶采样模块（滤膜自动更换装置、抽气泵）、 $\gamma$ 能谱探测模块（NaI(Tl)或HPGe探测器）、气态核素监测模块（氡/氡采样与探测）、数据采集与传输模块、质控模块（标准源自动校准）。

关键技术参数：气溶胶采样流量（10~50m<sup>3</sup>/h）、采样滤膜更换周期（1~24小时可调）、 $\gamma$ 能谱探测效率（ $\geq 20\% @ 662\text{keV}$ ）、氡气探测下限（ $\leq 1\text{Bq/m}^3$ ）、数据传输频率（1~10分钟/次）。

核心特性：自动完成采样、测量、数据上传与滤膜更换，支持365天无人值守运行；具备标准源自动校准功能（如内置铯-137标准源），确保数据长期稳定性；异常浓度时自动报警（如浓度超过背景值5倍）。

典型应用：核设施废气排放口在线监测；城市大气放射性背景值连续监测；核事故后大气污染长期追踪。

### （二）水体放射性在线监测系统

核心技术组成：水样采集与预处理模块（过滤、浓缩）、 $\gamma$ 剂量率探测模块（水下NaI(Tl)探测器）、核素识别模块（便携式HPGe探测器）、数据传输与控制模块；针对饮用水源地，可增加溶解态氡、氡在线监测单元。

关键技术参数：水样流量（1~5L/min）、探测深度（0~10m）、 $\gamma$ 剂量率测量范围（0.1 $\mu\text{Sv/h}$ ~10mSv/h）、核素识别响应时间（ $\leq 5$ 分钟）、防护等级（IP68，水下探测器）。

核心特性：水样自动过滤去除颗粒物干扰，确保探测准确性；水下探测器耐高压、抗腐蚀，适应河流、湖泊等复杂水体环境；数据实时上传至环保监测平台，支持污染早期预警。

典型应用：饮用水源地放射性在线监测；核设施废水排放口达标监控；河流、湖泊放射性污染长期追踪。

### （三）土壤氡气连续监测站

核心技术组成：土壤氡气采集探头（插入土壤深度0.5~1m）、 $\alpha$ 探测器（ZnS(Ag)闪烁体或硅探测器）、温湿度补偿模块、数据存储与传输模块、供电模块（市电+太阳能）。

关键技术参数：氡气探测范围（10~10000Bq/m<sup>3</sup>）、探测效率（ $\geq 40\%$ ）、数据采集间隔（1~60分钟可调）、温湿度适应范围（-20~60℃，相对湿度 $\leq 95\%$ ）。

核心特性：探头采用透气防水设计，确保氡气进入探测器同时防止土壤水分侵入；



具备温湿度补偿功能，消除环境条件对探测结果的影响；支持远程数据查询与设备状态监控。

典型应用：放射性矿山周边土壤氡气监测；富铀钍地层区域氡气污染评估；建筑场地土壤氡气预评价。

## 五、辐射探测设备的关键技术参数与选型原则

### （一）核心技术参数解读

能量分辨率：衡量探测器区分不同能量辐射的能力，单位为 keV（或百分比），数值越小分辨率越高。例如，HPGe 伽马能谱仪  $1.3\text{keV}@1332\text{keV}$ （铊 - 60）的分辨率，远优于 NaI (TI) 探测器  $7\% @ 662\text{keV}$ （铯 - 137），可精准识别能量相近的核素（如铀 - 238 与钍 - 232 的特征  $\gamma$  射线）。该参数直接决定核素定性识别的准确性，复杂样品分析（如多核素混合污染）需优先选择高能量分辨率设备。

探测效率：探测器对入射辐射的响应比例（单位时间内探测到的粒子数与入射粒子数的比值），与探测器类型、尺寸、辐射类型相关。例如，大体积 NaI (TI) 探测器（ $5\times 5$  英寸）的  $\gamma$  射线探测效率高于小体积探测器，适用于低浓度核素快速筛查；HPGe 探测器虽能量分辨率高，但探测效率受晶体体积限制，需平衡分辨率与效率需求。

检出限：设备能可靠区分信号与本底噪声的最低核素浓度（或剂量率），是定量分析的核心指标。检出限越低，设备对低浓度污染的识别能力越强，例如，土壤中铯 - 137 检出限  $\leq 0.1\text{Bq/kg}$  的 HPGe 能谱仪，可满足环境背景值普查需求；而应急监测设备检出限可适当放宽（如气溶胶监测仪检出限  $\leq 1\text{Bq/m}^3$ ），优先保障响应速度。

本底计数率：无样品时设备的固有计数率（单位：计数 / 分钟），主要来自环境辐射与仪器自身噪声。本底越低，设备对低浓度样品的测量准确性越高，例如，低本底液体闪烁计数器的氡本底  $\leq 0.5$  计数 / 分钟，可精准测量水体中痕量氡；而现场便携式设备本底可容忍范围更高（如  $\gamma$  剂量率仪本底  $\leq 0.01\mu\text{Sv/h}$ ）。

响应时间：设备从接收到辐射信号到输出稳定数据的时间，直接影响监测时效性。应急监测设备（如环境剂量率仪）响应时间需  $\leq 1$  秒，快速捕捉污染峰值；实验室设备（如  $\alpha$  能谱仪）响应时间可放宽至数分钟，优先保障数据精度。

### （二）设备选型原则

匹配监测目标：明确监测核心需求（定性识别 / 定量分析、快速筛查 / 精准测量、短期监测 / 长期连续监测）。例如，核素精准定量需选择 HPGe 伽马能谱仪、 $\alpha$  能谱仪等实验室设备；现场污染筛查可选择便携式 NaI (TI) 能谱仪、表面污染仪；污染源长期监控需配置在线连续监测系统。

**适配辐射类型与核素：**根据目标核素的辐射类型（ $\alpha/\beta/\gamma$ ）选择对应探测器。例如，监测土壤中铀、钍等  $\alpha$  核素需选  $\alpha$  能谱仪；监测水体中氚、碳 - 14 等低能  $\beta$  核素需选液体闪烁计数器；监测核事故泄漏的铯 - 137、碘 - 131 等  $\gamma$  核素需选伽马能谱仪或剂量率仪。

**兼顾环境适应性：**现场与应急设备需考虑环境条件（温度、湿度、粉尘、振动）。例如，高温高湿环境需选择防护等级 IP65 以上的设备；矿山、建筑工地等多粉尘场景需选择防尘设计的表面污染仪；应急移动监测设备需具备抗振动、低功耗特性（待机时间  $\geq 100$  小时）。

**平衡性能与成本：**高分辨率、高灵敏度设备（如 HPGe 能谱仪）价格昂贵（数十万元），操作维护复杂，适用于专业实验室；常规污染筛查可选择性价比高的 NaI (TI) 便携式设备（数万元）；大规模布点监测可采用低成本的热释光剂量片、径迹探测器。

### 第三节 样品采集与预处理技术

#### 一、样品采集的核心原则与通用技术要求

##### （一）核心原则：确保样品的代表性与真实性

**代表性原则：**采样布点需覆盖监测区域的关键节点，包括污染源核心区、迁移路径区、敏感受体区（如饮用水源地、农田）及背景对照区，布点方法根据污染类型选择（点源污染采用放射状布点，面源污染采用网格布点）；采样量需满足分析需求（实验室分析通常需 10~1000g 固体样品、1~10L 液体样品），同时预留备份样品（不少于总采样量的 30%）。

**无污染原则：**采样工具需提前清洁（用去离子水冲洗、干燥），避免使用含放射性元素的材料（如含铀玻璃、铅制工具）；采样过程中防止样品交叉污染（不同采样点使用专用工具或消毒处理），避免环境中放射性物质（如扬尘、水体沉积物）混入样品。

**时效性原则：**短半衰期核素（如钋 - 218、氡 - 222）需现场采样后立即分析，避免核素衰变导致数据失真；常规样品需在采样后 24~72 小时内送至实验室，运输过程中密封保存（固体样品用聚乙烯袋，液体样品用棕色玻璃瓶），防止样品泄漏或挥发。

##### （二）通用技术要求：采样工具、记录与运输

**采样工具选择：**固体样品（土壤、沉积物）采用不锈钢或特氟龙采样铲、采样管，避免工具材质与样品发生反应；液体样品采用聚乙烯或玻璃瓶（避免使用金属容器，防止吸附核素）；大气样品采用玻璃纤维滤膜、活性炭吸附管等专用采样介质。

采样记录规范：详细记录采样时间、地点（经纬度）、海拔、环境条件（气温、湿度、风速）、采样深度/层数、样品状态（颜色、质地、含水率），并标注样品编号（如“土壤-S-20240501-01”），确保样品可追溯。

样品运输要求：固体样品密封后放入防震、防潮的采样箱，液体样品直立放置并固定，避免运输过程中破损；运输过程中避免高温、强光照射（防止核素挥发或形态变化），对于易挥发核素（如氡、氚）需采用低温运输（4℃以下）。

## 二、不同环境介质的样品采集技术

### （一）土壤样品采集技术

土壤中放射性核素主要富集于表层（0~50cm），且多以吸附态、残渣态存在，采样需兼顾垂直分布与水平均匀性：

布点方法：污染源周边采用放射状布点（以污染源为中心，按8个方位设置采样线，每线设置3~5个采样点）；区域背景调查采用网格布点（网格间距根据监测精度设定，常规为1~5km）；农田、矿区等特殊区域可加密布点。

采样流程：采样前清除地表植被、石块等杂质，用采样铲采集0~20cm表层土壤（污染严重区域需采集0~10cm、10~30cm、30~50cm三层样品），每采样点采集3~5个子样品混合为一个综合样品（重量 $\geq 1\text{kg}$ ）；对于土壤氡气采样，采用专用采样器插入土壤0.5~1m深度，抽取土壤孔隙气至采样瓶或活性炭吸附管中。

特殊场景采样：放射性矿山、核设施退役场地等污染区域，需采用螺旋钻采样器采集深层土壤样品（深度可达1~5m）；砂质土壤需增加采样量（ $\geq 2\text{kg}$ ），避免样品不均；黏质土壤需在采样后及时破碎，防止结块影响后续预处理。

### （二）水体样品采集技术

水体中放射性核素分为溶解态（ $< 0.45\mu\text{m}$ ）、颗粒态（ $> 0.45\mu\text{m}$ ）、络合态，采样需区分不同形态并避免核素吸附损失：

布点方法：河流采样沿水流方向设置断面（上游背景断面、排污口断面、下游控制断面），每个断面设置3~5个采样点（河心、河岸两侧）；湖泊、水库采用网格布点，覆盖湖心、岸边、进水口、出水口；地下水采样选择监测井、泉眼，采样前需冲洗监测井（排出3~5倍井容积的水）。

采样流程：表层水（0~1m）采用采样桶手工采集，深层水（1~10m）采用柱状采水器或多参数水质采样器；采集后立即用 $0.45\mu\text{m}$ 滤膜过滤，分离溶解态与颗粒态样品（滤膜保留颗粒态，滤液收集溶解态）；对于挥发性核素（氡、氚），采用专用采样瓶（如BOD瓶）装满样品并密封，避免气泡产生（气泡会导致氡气逸散）。

特殊要求：采样时避免采样工具与样品长时间接触（防止核素吸附）；酸性水体

(pH.0)需加入硝酸调节 pH 至 2 以下,防止核素沉淀;含高悬浮物的水体(如矿山废水)需增加采样量( $\geq 10\text{L}$ ),确保颗粒态核素检测精度。

### (三) 大气样品采集技术

大气中放射性物质分为气溶胶态(颗粒结合态)与气态,采样核心是富集低浓度核素:

气溶胶态样品采集:采用滤膜采样法,通过中流量或大流量采样器(流量 $10\sim 50\text{m}^3/\text{h}$ )使大气通过玻璃纤维滤膜或聚四氟乙烯滤膜,截留气溶胶颗粒;采样时间根据核素浓度调整(常规监测 24 小时,应急监测 1~4 小时),采样后将滤膜密封于铝箔袋中,避免颗粒物脱落。

气态核素采样:氡气采样采用活性炭吸附法(活性炭吸附管采样 24 小时)或累积法(径迹探测器布放 1~3 个月);氟气采样采用冷凝法(冷却大气样品至 $0^\circ\text{C}$ 以下,收集氟化水)或分子筛吸附法;碘-131 等挥发性核素采用浸渍滤膜(硝酸银或碘化钾浸渍)采样,通过化学吸附捕获气态碘。

采样注意事项:采样器需放置在离地面 $1.5\sim 2\text{m}$ 高度,避免地面扬尘干扰;采样过程中记录流量、温度、湿度,用于换算标准状态下的采样体积;应急采样需配备便携式采样器,快速响应污染事件。

### (四) 生物样品采集技术

生物样品中放射性核素通过食物链富集,采样需选择代表性生物种类与组织:

植物样品采集:选择监测区域内优势植物(如农作物、草本植物),采集可食用部分(如水稻籽粒、蔬菜叶片)或全株,采样量 $\geq 500\text{g}$ ;采样时避免采集受污染的枯叶、腐烂组织,去除表面泥土与污染物。

动物样品采集:选择常见的陆生动物(如鼠类、鸟类)或水生动物(如鱼类、贝类),采集肌肉、肝脏等组织(重量 $\geq 100\text{g}$ );鱼类样品需去除鳞片、内脏,洗净后冷冻保存;贝类样品需去除外壳,保留软组织。

预处理前置要求:生物样品采样后需尽快冷冻( $-20^\circ\text{C}$ ),防止腐败变质(腐败会导致核素形态变化);分析前解冻并清洗,去除杂质与脂肪(脂肪会干扰放射性测量)。

## 三、样品预处理核心技术:分离、浓缩与干扰去除

样品预处理的核心理念是将环境样品转化为可用于仪器分析的形态,关键步骤包括样品制备、核素浓缩、分离纯化与干扰去除,不同介质预处理技术差异显著:

## （一）固体样品（土壤、沉积物、生物）预处理技术

### 1. 样品制备

干燥与粉碎：土壤、沉积物样品自然风干（避免高温烘干，防止挥发性核素损失），用玛瑙研钵粉碎后过 200 目筛，均匀化处理；生物样品冷冻干燥后粉碎，或经 550~600℃灰化（去除有机质，浓缩核素），灰化后用酸溶解灰分。

样品称量：根据分析方法要求称量样品（ $\alpha$  能谱分析通常称取 1~5g，伽马能谱分析称取 100~500g），精确至 0.001g。

### 2. 核素浓缩与分离纯化

酸溶法：采用混合酸（如硝酸 + 盐酸 + 氢氟酸，体积比 3:1:1）在高温高压消解罐中消解样品（180℃，24 小时），溶解土壤中的铀、钍等核素；对于难溶样品（如含二氧化硅的土壤），可加入氟硼酸辅助溶解。

碱熔法：采用氢氧化钠或过氧化钠作为熔剂，在高温炉中 600~800℃熔融样品，适用于酸溶难以溶解的核素（如镭、钍），熔融后用硝酸浸取。

放射化学分离：采用萃取法（如 TBP 萃取铀）、沉淀法（如硫酸钡共沉淀镭）、离子交换法（阳离子交换树脂分离锶、铯）去除干扰元素，纯化目标核素；例如，土壤中铀的分离可采用 TBP - 煤油萃取体系，从盐酸介质中萃取铀，再用硝酸反萃得到纯化的铀溶液。

## （二）液体样品（水体、废水）预处理技术

### 1. 浓缩技术

蒸发浓缩：将溶解态样品放入石英蒸发皿中，在 80~100℃水浴中蒸发至近干，浓缩核素（适用于低浓度铀、钍、镭的分析）；蒸发过程中加入硫酸防止核素挥发。

共沉淀浓缩：向样品中加入载体（如铅离子、钡离子）与沉淀剂（如硫酸、碳酸），使目标核素（如镭与钡共沉淀，钍与铁共沉淀）随载体沉淀，离心分离后得到浓缩样品。

萃取浓缩：采用有机萃取剂（如三辛胺萃取铀、钍）从水溶液中萃取目标核素，浓缩倍数可达 10~100 倍，适用于低浓度核素分析。

### 2. 干扰去除

基体去除：高盐度水体（如海水）需采用离子交换树脂去除钠离子、氯离子等基体干扰；含有机质的水体需加入过氧化氢氧化有机质，或通过活性炭吸附去除。

化学掩蔽：加入掩蔽剂（如 EDTA、柠檬酸）与干扰元素形成稳定络合物，避免其影响目标核素的测量；例如，分析水体中锶 - 90 时，加入 EDTA 掩蔽钙、镁离子干扰。

## （三）特殊核素的预处理技术

$\alpha$  核素（铀、钍、镭、钋）：需严格控制样品与探测器的接触，预处理后将样品



制成薄膜状（如电沉积法制备铀、钍薄膜样品），或滴涂于不锈钢样品盘上，确保  $\alpha$  粒子能穿透样品表层进入探测器。

低能  $\beta$  核素（氚、碳 - 14）：氚样品需通过蒸馏法纯化（去除水分中的杂质），加入液体闪烁体溶液后测量；碳 - 14 样品需将有机碳转化为二氧化碳，再还原为苯或甲醇，与闪烁体混合测量。

$\gamma$  核素（铯 - 137、钴 - 60）：无需复杂分离纯化，固体样品可直接装入样品盒（如 Marinelli 杯），通过伽马能谱仪无损分析；液体样品可蒸发浓缩后装入样品瓶测量。

## 四、预处理过程的质量控制与污染防控

### （一）质量控制关键措施

空白实验：每批样品分析时设置试剂空白（仅加入试剂，不加样品）、仪器空白（无样品时仪器测量）与采样空白（采样过程中未采集样品的空白滤膜或采样瓶），扣除空白信号对样品测量的干扰，确保空白值低于检出限的 1/3。

平行样分析：每批样品设置 10%~20% 的平行样，平行样相对偏差需  $\leq 15\%$ （ $\alpha$  核素  $\leq 20\%$ ），验证预处理方法的精密度；若偏差超标，需重新检查预处理步骤（如消解是否完全、分离是否彻底）。

标准物质验证：采用有证标准参考物质（如土壤 GBW07401、水体 GBW08605）同步进行预处理与分析，验证方法的准确性，标准物质测量值与标准值的相对误差需  $\leq \pm 10\%$ 。

### （二）污染防控要求

实验室环境控制：预处理实验室需分区（样品制备区、消解区、分离纯化区），避免交叉污染；实验室地面、台面需定期清洁，配备放射性污染监测仪，实时监测表面污染。

试剂与耗材纯度：使用优级纯或光谱纯试剂，避免试剂中含有的放射性杂质干扰分析；滤膜、离心管、消解罐等耗材需提前进行空白检验，确保无放射性污染。

操作人员防护：操作人员需穿戴防护服、手套、口罩，避免直接接触放射性样品；预处理过程中产生的放射性废液、废渣需分类收集，按放射性废物管理规定处理，不得随意排放。

## 五、技术发展趋势与优化方向

### （一）预处理技术创新

快速消解技术：研发微波消解、激光消解等快速消解技术，缩短消解时间（微波消解可将传统酸溶的 24 小时缩短至 1~2 小时），同时减少试剂用量与环境污染；开

发专用消解罐（如聚四氟乙烯微波罐），提高消解效率与安全性。

高效分离材料：研发高选择性的纳米分离材料（如纳米二氧化钛、石墨烯基复合材料），实现目标核素的快速吸附与分离，提高分离效率与选择性；推广固相萃取技术，替代传统液-液萃取，减少有机试剂使用。

原位预处理技术：开发原位提取与预处理技术（如土壤原位淋洗、水体原位浓缩），适用于大面积污染监测，减少样品运输与实验室处理成本；结合在线监测系统，实现“采样-预处理-分析”一体化。

## （二）自动化与智能化发展

自动化预处理设备：推广全自动消解系统、自动固相萃取仪、机器人样品处理平台，减少人为操作误差，提高预处理效率（如全自动消解系统可同时处理数十个样品）；开发小型化、便携式预处理设备，适用于现场应急监测。

智能化过程控制：利用传感器实时监测预处理过程中的温度、压力、pH 值等参数，通过计算机系统自动调整工艺条件，确保预处理效果稳定；结合大数据分析，优化预处理参数（如消解温度、萃取时间），提升方法适应性。

## （三）绿色化与环保要求

绿色预处理技术：采用无酸消解、绿色萃取剂（如离子液体、深共熔溶剂）替代传统强酸、有机溶剂，减少环境污染；研发试剂回收技术，实现萃取剂、酸试剂的循环利用，降低分析成本。

废物减量化处理：优化预处理流程，减少放射性废液、废渣产生量；开发废液处理技术（如膜分离、吸附净化），降低废物放射性水平，实现达标排放或安全处置。

# 第四节 质量控制与保证体系

## 一、QC/QA 体系的核心框架与基本原则

### （一）核心框架：全流程覆盖与分层管控

流程覆盖维度：涵盖监测全链条，包括监测方案设计、采样布点、样品采集与运输、预处理、仪器校准与维护、分析测试、数据处理与报告编制，每个环节均设置针对性的质控节点与技术要求，形成“事前预防-事中控制-事后验证”的闭环管理。

分层管控维度：分为机构层面（实验室资质认定、人员培训、管理制度建设）、项目层面（监测方案质控设计、专项质控措施）、样品层面（空白实验、平行样、标准物质验证），确保质控措施贯穿各级监测活动。

## （二）基本原则：确保数据质量的核心准则

**准确性原则：**监测数据需真实反映环境中放射性核素的实际浓度与分布，通过标准物质校准、方法验证、交叉比对等手段，控制系统误差与随机误差，确保数据相对误差 $\leq \pm 10\%$ （复杂样品 $\leq \pm 15\%$ ）。

**精密度原则：**同一条件下多次测量结果的一致性，通过平行样分析、重复测量等方式控制，要求平行样相对偏差 $\leq 15\%$ （ $\alpha$ 核素 $\leq 20\%$ ，低浓度样品 $\leq 25\%$ ）。

**可比性原则：**不同实验室、不同时间、不同方法的监测结果可相互比对，通过采用国家标准方法、参加能力验证、统一校准规范等实现。

**完整性原则：**监测数据需完整覆盖监测目标，包括样品数量、项目、数据记录、质控数据等，无遗漏或缺失；对于异常数据需明确标注并说明原因。

**可追溯性原则：**所有监测活动（采样、预处理、分析、校准）均需详细记录，确保样品、数据、仪器、人员可追溯，形成完整的质量追溯链。

## 二、监测全流程质量控制技术措施

### （一）监测方案设计阶段质控

**方案科学性验证：**根据监测目的（污染筛查、背景调查、应急响应）明确监测范围、项目、精度要求，选择适配的监测方法（如 GB/T 标准方法、IAEA 推荐方法）；布点方案需通过统计学验证（如网格布点的样本量计算），确保采样点代表性。

**方法适用性验证：**首次采用的监测方法需进行方法验证，包括检出限、精密度、准确度、干扰实验等指标测试，验证结果满足要求后方可应用；对于复杂基质样品（如高盐水体、富有机质土壤），需开展基质效应实验，优化预处理与分析条件。

### （二）样品采集与运输阶段质控

#### 1. 采样过程质控

**空白样品设置：**每批采样设置 1~2 个采样空白（如空白滤膜、空采样瓶），随样品同步运输、预处理与分析，扣除环境污染干扰；

**平行采样：**每 10~20 个采样点设置 1 组平行样（采集相邻位置、相同深度的样品），验证采样均匀性；

**采样工具质控：**采样工具需经清洁验证（空白测试），避免交叉污染；对于金属敏感核素（如镭、铯），采用聚乙烯、特氟龙材质工具。

#### 2. 运输与存储质控

**样品标识：**每个样品粘贴唯一标识（编号、名称、采样时间、地点），运输过程中防止标识脱落；

**稳定性监控：**对短半衰期核素（如氡、钋-210）进行运输过程稳定性实验，确

保运输时间内核素衰变影响 $\leq 5\%$ ;

运输条件验证: 低温运输样品需记录运输过程温度(如 $4^{\circ}\text{C}$ 以下运输, 温度波动 $\leq \pm 2^{\circ}\text{C}$ ), 避免核素挥发或形态变化。

### (三) 样品预处理阶段质控

#### 1. 空白实验控制

试剂空白: 每批样品设置 1~2 个试剂空白(仅加入预处理试剂, 不加样品), 空白值需低于方法检出限的 1/3, 否则需更换试剂或排查污染来源;

仪器空白: 预处理设备(如微波消解仪、离心机)使用前进行空白运行, 避免残留污染;

全程空白: 设置全程空白样品(模拟采样、运输、预处理全流程, 不加实际样品), 验证全链条污染状况。

#### 2. 平行样与加标回收实验

平行预处理: 每批样品设置 10%~20% 的平行样, 同步进行预处理与分析, 平行样相对偏差需满足要求;

加标回收实验: 每批样品设置 1~2 个加标样品(向样品中加入已知浓度的标准物质), 加标回收率需在 80%~120% 之间( $\alpha$  核素 70%~130%, 低浓度样品 60%~140%), 验证预处理过程中核素无损失或污染。

#### 3. 消解与分离效果验证

消解完全性: 通过观察消解液状态(无沉淀、无浑浊)、消解后样品残渣量( $\leq$ 样品总量的 5%)验证; 对于难溶核素(如镭、钍), 采用标准物质同步消解, 确保回收率达标;

分离纯化效果: 通过能谱分析(如 $\alpha$ 能谱峰形、 $\gamma$ 能谱干扰峰强度)验证, 干扰峰强度需低于目标峰强度的 10%。

### (四) 分析测试阶段质控

#### 1. 仪器校准与维护

日常校准: 分析前对仪器进行能量校准、效率校准(如伽马能谱仪用铯-137、钴-60 标准源校准), 校准曲线相关系数 $\geq 0.995$ ;

定期校准: 实验室仪器每年至少进行 1 次全面校准(由有资质的计量机构完成), 应急仪器每 6 个月校准 1 次;

期间核查: 每批样品分析过程中, 每隔 10~20 个样品插入标准物质进行期间核查, 偏差 $\leq \pm 5\%$ , 确保仪器稳定性。

#### 2. 测量过程质控

本底扣除: 测量前需测量仪器本底, 本底计数率需稳定(波动 $\leq \pm 10\%$ ), 样品

测量值需扣除本底值；

重复测量：对关键样品（如超标样品、标准物质）进行重复测量（3 次以上），测量结果相对标准偏差 $\leq 10\%$ ；

异常数据处理：测量过程中出现异常信号（如能谱峰形异常、计数率突增），需排查仪器故障、样品污染等原因，重新测量并记录。

### （五）数据处理与报告阶段质控

#### 1. 数据计算质控

公式验证：核素浓度计算需采用标准公式，明确稀释倍数、浓缩系数、探测效率等参数的代入逻辑，首次计算需进行人工复核；

单位换算：确保单位统一（如 Bq/kg、Bq/L、Bq/m<sup>3</sup>），换算过程需记录，避免单位错误；

有效数字：根据仪器精度与方法检出限保留有效数字（通常为 2~3 位），避免过度保留或舍弃。

#### 2. 报告编制质控

数据审核：报告需经三级审核（分析人员自审、技术负责人审核、质量负责人终审），审核内容包括数据完整性、准确性、质控数据有效性；

质控数据披露：报告中需包含空白实验结果、平行样偏差、加标回收率、标准物质测量值等质控数据，说明数据质量状况；

异常数据说明：对超标数据、异常波动数据，需结合监测场景、质控情况分析原因，给出明确结论。

## 四、QC/QA 体系的运行管理与保障措施

### （一）组织与人员保障

质量管理组织：建立三级质量管理体系，包括质量负责人（全面负责 QC/QA 体系运行）、技术负责人（负责技术质控措施落实）、质量管理员（负责日常质控监督与数据审核），明确各级岗位职责。

人员资质与培训：

操作人员需具备放射性监测相关资质（如辐射安全与防护培训合格证），熟练掌握监测方法与质控要求；

定期开展培训（每年不少于 40 学时），内容包括方法标准、仪器操作、质控技术、应急处理等，培训后进行考核，考核合格方可上岗；

关键岗位人员（如仪器校准、数据审核）需具备 5 年以上相关工作经验，定期参加能力验证。



## （二）实验室与设备管理

### 1. 实验室环境控制

实验室分区设置（样品制备区、预处理区、分析区、标准物质存储区），避免交叉污染；

放射性实验室需配备通风橱、防护装备（防护服、手套、口罩）、表面污染监测仪，定期进行环境辐射水平监测（本底值 $\leq 0.2\mu\text{Sv/h}$ ）；

实验室温湿度控制（温度 20~25℃，相对湿度 40%~60%），避免环境条件影响仪器性能与样品稳定性。

### 2. 设备管理规范

仪器档案：建立仪器设备档案，记录采购、校准、维护、维修历史，确保可追溯；

定期维护：制定仪器维护计划（如 HPGe 能谱仪每周检查液氮水平，液体闪烁计数器每月清洁样品室），维护记录需完整；

故障处理：仪器出现故障时，立即停止使用，记录故障情况，维修后需重新校准方可投入使用。

## （三）标准物质与试剂管理

### 1. 标准物质管理

采用有证标准物质（如国家计量院、IAEA 标准物质），标准物质需在有效期内使用，存储条件符合要求（如低温、避光）；

标准物质使用前需核查外观、浓度标识，使用过程中避免污染，剩余标准物质按规定处理，不得随意丢弃；

定期开展标准物质期间核查（每 3~6 个月），确保其稳定性。

### 2. 试剂与耗材管理

试剂采用优级纯或光谱纯，试剂供应商需具备相关资质，试剂采购时需索要质量证明文件；

试剂存储分类存放（酸、碱、有机溶剂分开），标注名称、浓度、采购日期、有效期；

耗材（滤膜、离心管、消解罐）需提前进行空白检验，确保无放射性污染，不合格耗材禁止使用。

## （四）能力验证与质量监督

### 1. 能力验证

实验室每年至少参加 1 次国家级或省级能力验证（如中国计量科学研究院组织的放射性核素分析能力验证），验证项目覆盖主要监测核素（如铯 - 137、铀 - 238、氡）；

对于能力验证不合格的项目，需分析原因，制定整改措施（如人员培训、方法优化），并重新参加验证直至合格。

## 2. 内部质量监督

质量管理员每月开展 1 次内部质量监督，抽查监测流程（采样、预处理、分析）、质控数据、仪器校准记录等，发现问题及时整改；

每季度开展 1 次内部比对实验（不同操作人员、不同仪器对同一样品的分析比对），比对结果相对偏差 $\leq 15\%$ ，验证实验室内部数据一致性。

## 五、QC/QA 体系的优化方向与发展趋势

### （一）智能化质控技术应用

实时质控监测：开发智能化监测设备，集成传感器实时监测采样流量、预处理温度、仪器稳定性等参数，自动预警异常（如流量波动、温度超标），减少人为干预；

数据智能审核：利用人工智能算法（如机器学习、大数据分析）建立数据质量评价模型，自动识别异常数据（如超出浓度范围、偏离校准曲线），提高数据审核效率与准确性；

远程质控管理：构建 QC/QA 体系远程管理平台，实现采样数据实时上传、质控数据在线审核、仪器状态远程监控，适用于跨区域、大规模监测项目。

### （二）全链条数字化追溯

样品数字化标识：采用二维码或 RFID 标签标识样品，关联采样信息、预处理记录、分析数据、质控结果，实现样品全生命周期追溯；

电子记录系统：推广实验室信息管理系统（LIMS），实现监测数据、质控数据、仪器记录、人员操作的电子化存储与管理，避免纸质记录丢失或篡改；

数据区块链存证：利用区块链技术对关键监测数据（如超标数据、应急监测数据）进行存证，确保数据不可篡改，提升数据公信力。

### （三）绿色质控与可持续发展

低污染质控方案：优化质控措施，减少标准物质、试剂用量（如采用微型化预处理技术，降低试剂消耗），降低环境污染；

质控废物资源化：研发放射性质控废物（如标准物质废液、加标样品残渣）的处理与回收技术，实现废物减量化、资源化；

绿色实验室建设：推广绿色监测技术（如无酸消解、在线监测），减少实验过程中的污染物排放，构建环境友好型 QC/QA 体系。

### （四）跨区域协同质控

统一质控标准：建立全国统一的环境放射性监测 QC/QA 技术规范，统一检出限、精密度、准确度等指标要求，实现不同区域监测数据的可比性；

区域质控联盟：组建区域质控联盟，共享标准物质、校准设备、技术人员，开展跨区域比对实验与能力验证，提升整体监测质量水平；

国际接轨：参考 ISO、IAEA 等国际标准，优化 QC/QA 体系，推动我国环境放射性监测数据与国际接轨，满足跨境污染防控需求。

## 第六章 现场监测与快速检测技术

### 第一节 现场 $\gamma$ 辐射监测技术

#### 一、现场 $\gamma$ 辐射监测核心原理与技术特点

##### （一）核心探测原理

现场  $\gamma$  辐射监测的本质是通过探测器捕捉  $\gamma$  射线并转化为可测量信号，核心原理基于两类物理效应：

**闪烁效应：** $\gamma$  射线进入闪烁体材料（如 NaI (Tl)、CsI (Tl)）后，激发材料分子产生荧光光子，光子经光电倍增管转化为电脉冲，脉冲幅度与  $\gamma$  射线能量成正比，脉冲频率与辐射强度（剂量率）成正比。该原理是便携式  $\gamma$  剂量率仪、NaI (Tl) 能谱仪的核心技术基础，具有响应速度快、探测效率高的特点。

**半导体效应：**采用小型化半导体探测器（如 CdZnTe、电制冷 HPGe）， $\gamma$  射线在半导体耗尽层中产生电子 - 空穴对，经电场分离后形成电脉冲，能量分辨率远优于闪烁探测器，可实现核素精准识别。该原理适用于便携式伽马能谱仪，满足复杂污染场景下的核素定性需求。

**剂量率换算原理：**通过探测器测量的  $\gamma$  射线计数率，结合仪器校准系数（与探测器效率、 $\gamma$  射线能量相关），换算为环境  $\gamma$  辐射剂量率（单位： $\mu\text{Sv/h}$  或  $\text{mSv/h}$ ），公式为：剂量率 = 计数率  $\times$  校准系数  $\times$  能量响应修正系数，确保不同能量  $\gamma$  射线（50keV~1.3MeV）的测量准确性。

##### （二）核心技术特点

**快速响应：**从探测到数据输出的响应时间  $\leq 1$  秒（剂量率仪）或  $\leq 1$  分钟（能谱仪核素识别），满足应急监测中快速捕捉污染峰值的需求；

**便携灵活：**设备体积小、重量轻（便携式剂量率仪  $\leq 500\text{g}$ ，便携式能谱仪 3~20kg），可手持操作或搭载于移动平台，适应野外、狭小空间等复杂现场环境；

**定性与定量兼顾：**基础型设备可快速测量剂量率（定量），高端设备（如便携式能谱仪）可通过能谱分析识别核素类型（定性）并计算核素浓度；

**环境适应性强：**设备具备防水、防尘、抗振动设计（防护等级通常  $\geq \text{IP65}$ ），可在 -20~60℃、相对湿度  $\leq 95\%$  的环境下稳定工作，适应高温、高湿、粉尘等恶劣现场条件。

## 二、现场 $\gamma$ 辐射监测关键设备类型与技术参数

根据功能定位与精度要求，现场  $\gamma$  辐射监测设备可分为剂量率巡测仪、便携式伽马能谱仪、移动监测平台三大类，各类设备技术特性与应用场景形成互补：

### （一）便携式 $\gamma$ 剂量率巡测仪（基础型设备）

核心功能：快速测量环境  $\gamma$  辐射剂量率，提供剂量率实时显示、超标报警，适用于大范围污染筛查与剂量水平快速评估。

#### 1. 关键技术参数

剂量率测量范围：0.01 $\mu$ Sv/h~10Sv/h（覆盖背景水平至严重污染水平）；

能量响应范围：50keV~1.3MeV（适配环境中常见  $\gamma$  核素，如钾 - 40、铯 - 137、钴 - 60）；

能量线性误差： $\leq \pm 10\%$ （确保不同能量  $\gamma$  射线测量准确性）；

响应时间： $\leq 1$  秒（快速捕捉剂量率变化）；

显示与报警：配备 LCD 显示屏（实时显示剂量率、累积剂量），支持声光报警（报警阈值可自定义，如 0.2 $\mu$ Sv/h、1 $\mu$ Sv/h）；

供电与续航：内置锂电池，待机时间 $\geq 100$  小时，支持 USB 充电。

#### 2. 典型探测器类型

闪烁探测器（NaI (Tl) 晶体，体积 1~3cm<sup>3</sup>）：探测效率高、成本低，是主流选型；

半导体探测器（SiPIN、CdTe）：体积更小、能量响应更优，适用于高精度巡测。

核心优势与局限：优势是操作简便、响应极快、价格亲民（数千元）；局限是无法识别核素类型，仅能反映总剂量率水平。

### （二）2. 便携式伽马能谱仪（精准型设备）

核心功能：同时实现  $\gamma$  剂量率测量与核素定性识别、浓度定量，适用于污染源定位、核素种类判断、污染程度精准评估。

关键技术参数：

探测器类型：

闪烁型（NaI (Tl) 晶体，体积 3×3 英寸~5×5 英寸）：能量分辨率 7%~10%@662keV（铯 - 137），探测效率高，重量 3~8kg；

半导体型（电制冷 HPGe、CdZnTe）：能量分辨率 2.5keV~5keV@1332keV（钴 - 60），核素识别精度高，重量 10~20kg；

能量范围：50keV~10MeV（覆盖天然核素与人工核素）；

核素识别能力：内置核素数据库（含钾 - 40、铀 - 238、钍 - 232、铯 - 137、钴 - 60 等 50+ 种核素），识别响应时间 $\leq 1$  分钟；



浓度定量精度：土壤中铯 - 137 定量相对误差  $\leq \pm 15\%$ ，水体中  $\leq \pm 20\%$ ；

数据存储与传输：支持存储 10 万 + 组能谱数据，具备 USB、蓝牙或 4G 数据传输功能，可实时上传至监测平台。

核心优势与局限：优势是定性定量一体化、核素识别精准；局限是价格较高（数万元至数十万元）、部分设备（HPGe 型）需便携电源支持，重量略大。

### （三）移动 $\gamma$ 辐射监测平台（高效型设备）

核心功能：实现大范围、高效率的  $\gamma$  辐射分布 mapping，适用于核设施周边全域监测、核事故污染羽流追踪、大面积污染排查。

#### 1. 关键技术配置

探测模块：搭载 1~3 台高性能探测器（如 NaI (Tl) 阵列、便携式 HPGe 探测器），提升探测效率与覆盖范围；

定位模块：集成 GPS / 北斗定位系统（定位精度  $\leq 5\text{m}$ ），实现监测数据与地理位置的精准关联；

数据处理模块：内置实时能谱分析软件，可生成污染分布热力图、核素识别结果清单；

移动平台：包括车载监测系统（搭载于汽车）、无人机监测系统（搭载于多旋翼无人机）、机器人监测系统（适用于核设施内部等危险区域）。

#### 2. 关键技术参数

车载平台：行驶速度 0~60km/h，数据采集间隔  $\leq 1$  秒，有效探测距离  $\leq 50\text{m}$ ；

无人机平台：续航时间 20~60 分钟，探测高度 5~50m，覆盖范围  $\geq 1\text{km}^2/\text{架次}$ ；

数据传输：支持 4G/5G 或卫星实时传输，延迟  $\leq 5$  秒。

核心优势与局限：优势是监测效率高、覆盖范围广、可避免人员暴露；局限是设备成本高（数十万元至数百万元）、需专业人员操作与维护。

## 三、现场 $\gamma$ 辐射监测技术典型应用场景

### （一）核设施日常巡检与合规监测

应用场景：核电厂、核燃料处理厂、放射性废物处置场等核设施的边界辐射监测、厂区内巡检、废气 / 废水排放口监测；

技术要求：剂量率测量范围  $0.01\mu\text{Sv/h} \sim 10\text{mSv/h}$ ，能量响应误差  $\leq \pm 10\%$ ，具备数据存储与导出功能（满足法规备案需求）；

应用流程：采用便携式  $\gamma$  剂量率仪按预设路线巡测（如核设施边界每 500m 设置监测点），重点监测排放口、物料运输通道等关键区域；每月采用便携式伽马能谱仪对异常剂量率区域进行核素识别，判断污染源（如是否为设施排放的铯 - 137、钴 - 60）；

合规依据：监测结果需符合《放射性环境保护法》《核设施辐射防护规定》（GB 18871-2002），边界剂量率需低于公众年有效剂量限值 1mSv 对应的剂量率水平（约 0.115 $\mu$ Sv/h）。

## （二）放射性污染场地排查与评估

应用场景：放射性矿山退役场地、核设施退役场地、历史污染区域的  $\gamma$  辐射污染分布调查；

技术要求：具备核素识别功能，能区分天然核素（铀、钍、钾 - 40）与人工核素（铯 - 137、锶 - 90），剂量率测量精度  $\leq \pm 10\%$ ，支持污染区域定位；

应用流程：采用“网格布点 + 重点加密”策略，先用无人机  $\gamma$  监测平台进行全域快速扫描（网格间距 100~200m），生成污染分布热力图；再用便携式伽马能谱仪对高剂量率区域（如剂量率  $\geq 0.5\mu$ Sv/h）进行精准核素识别与浓度测量，确定污染范围与核素组成；对深层污染区域，可结合土壤采样分析，验证现场监测结果；

评估目标：明确污染羽流范围、核素种类、浓度水平，为污染修复方案制定提供依据（如  $\alpha$  核素污染需采用土壤淋洗技术， $\gamma$  核素污染需采用固化稳定化技术）。

## （三）核事故应急响应现场监测

应用场景：核反应堆泄漏、放射性物质泄漏等突发核事故的现场剂量率监测、核素识别、污染边界划定；

技术要求：响应时间  $\leq 1$  秒，环境适应性强（耐高低温、抗振动、防水防尘），具备快速核素识别能力（ $\leq 30$  秒），支持数据实时传输；

应用流程：

应急初期（事故后 0~24 小时）：采用便携式  $\gamma$  剂量率仪与移动监测车快速划定高污染区域（剂量率  $\geq 10\mu$ Sv/h），组织人员疏散；用放射性核素识别仪（RIID）快速识别关键核素（如碘 - 131、铯 - 137），判断事故严重程度；

应急中期（24~72 小时）：采用无人机监测平台追踪污染羽流扩散趋势，结合气象数据预测污染范围；用便携式 HPGe 能谱仪对污染区域进行精准核素定量，计算人体暴露剂量；

应急后期（72 小时后）：建立长期现场监测点，定期监测剂量率变化，评估污染控制效果；

应急标准：参考《核事故应急响应导则》，根据剂量率水平划定预警区（ $\geq 0.2\mu$ Sv/h）、管控区（ $\geq 1\mu$ Sv/h）、疏散区（ $\geq 10\mu$ Sv/h）。

## （四）环境放射性背景值调查与常规监测

应用场景：城市、农田、森林、饮用水源地等区域的  $\gamma$  辐射背景值普查，掌握天然放射性核素分布状况；

技术要求：低剂量率测量精度高（检出限 $\leq 0.01\mu\text{Sv/h}$ ），数据重复性好（相对偏差 $\leq 5\%$ ），采样点代表性强；

应用流程：采用网格布点法（农村区域网格间距 5~10km，城市区域 2~5km），用便携式  $\gamma$  剂量率仪测量表层土壤  $\gamma$  剂量率，同步记录地形、土壤类型、植被覆盖等环境信息；每 10 个网格点选取 1 个代表性点位，用便携式伽马能谱仪分析天然核素（铀 - 238、钍 - 232、钾 - 40）浓度，建立区域  $\gamma$  辐射背景值数据库；

监测周期：常规背景调查每 5 年开展 1 次，重点区域（如富铀钍地层）每年开展 1 次复测。

### （五）放射性物质运输与安防监测

应用场景：放射性物质运输车辆的沿途辐射监测、口岸 / 机场放射性物质安检、放射性恐怖袭击防范；

技术要求：快速筛查响应时间 $\leq 0.5$  秒，剂量率测量范围  $0.1\mu\text{Sv/h}\sim 100\text{Sv/h}$ ，具备声光报警功能；

应用流程：在运输车辆必经路线设置固定监测点（如高速公路收费站），配备门式  $\gamma$  辐射监测仪，对车辆进行快速扫描；口岸 / 机场采用便携式  $\gamma$  剂量率仪对可疑包裹、货物进行抽检，发现异常时用核素识别仪进一步确认；运输过程中，驾驶员通过车载  $\gamma$  监测设备实时监控货仓辐射水平，避免放射性物质泄漏。

## 四、现场 $\gamma$ 辐射监测技术性能优化与质量控制

### （一）技术性能优化关键措施

能量响应优化： $\gamma$  射线能量差异会导致探测器响应偏差（如低能  $\gamma$  射线易被探测器外壳吸收），需通过以下方式优化：

探测器设计：采用薄窗口材料（如铍窗、薄铝窗）提高低能  $\gamma$  射线穿透率；NaI (Tl) 探测器增加晶体厚度（如  $3\times 3$  英寸）提升高能  $\gamma$  射线探测效率；

软件修正：在仪器中内置能量响应修正曲线，根据  $\gamma$  射线能量自动修正测量结果，确保  $50\text{keV}\sim 1.3\text{MeV}$  能量范围内响应误差 $\leq \pm 10\%$ ；

抗干扰技术：现场环境中存在电磁干扰、宇宙射线干扰等，需采取抗干扰措施：

电磁屏蔽：探测器与电子模块采用金属屏蔽壳（如铝合金），减少手机、对讲机等电磁信号干扰；

本底扣除：通过延长本底测量时间（如测量 10 分钟本底）、采用反符合屏蔽技术，扣除宇宙射线与环境本底对低剂量率测量的影响；

续航能力优化：针对野外长时间监测需求，采用低功耗设计（如 LED 显示屏、节能探测器），便携式设备配备大容量锂电池（续航 $\geq 100$  小时），移动平台采用太阳能辅助供电。

## （二）现场监测质量控制要求

### 1. 设备校准与维护

日常校准：每次监测前用标准  $\gamma$  源（如铯 - 137、钴 - 60）对设备进行剂量率校准，确保测量误差  $\leq \pm 5\%$ ；

定期校准：便携式设备每 6 个月送有资质的计量机构进行全面校准，移动平台每年校准 1 次；

期间核查：监测过程中每隔 2~4 小时用标准源进行期间核查，偏差超过  $\pm 10\%$  时需重新校准；

### 2. 现场操作质控

采样点代表性：按监测方案布点，避免在建筑物阴影、金属物体附近等干扰区域监测；监测时探测器与地面保持 1m 高度，与污染源保持安全距离（ $\geq 0.5\text{m}$ ）；

平行测量：关键监测点（如超标区域）进行 3 次重复测量，测量结果相对标准偏差  $\leq 10\%$ ；

数据记录：详细记录监测时间、地点（经纬度）、环境条件（气温、湿度、风速）、设备型号与校准状态，确保数据可追溯；

### 3. 数据有效性验证

与实验室数据比对：选取 10% 的现场监测点采集土壤或水体样品，送实验室用 HPGe 能谱仪分析，现场监测结果与实验室数据相对误差需  $\leq \pm 15\%$ ；

异常数据处理：发现剂量率突增（如超过背景值 5 倍）时，需排查设备故障、环境干扰（如附近有放射性源），重新测量并记录原因；

人员资质要求：操作人员需具备辐射安全与防护培训合格证，熟练掌握设备操作方法与应急处理流程；定期开展技术培训（每年不少于 20 学时），内容包括设备校准、干扰排除、核素识别等。

## 第二节 放射性气溶胶快速检测

### 一、放射性气溶胶快速检测核心原理与技术特点

#### （一）核心检测原理

放射性气溶胶快速检测的本质是“采样富集 - 辐射探测 - 数据解析”的一体化过程，核心原理围绕气溶胶采样技术与辐射探测原理的结合：

气溶胶采样原理：通过动力采样（抽气泵产生气流）使大气通过采样介质（滤膜、撞击器），利用惯性撞击、拦截、扩散等机制截留气溶胶微粒，实现放射性核素的富集。

采样效率与气流速度、采样介质孔径、微粒粒径密切相关，需针对目标粒径（如呼吸性气溶胶  $0.1\sim 5\mu\text{m}$ ）优化采样参数，确保富集效率  $\geq 90\%$ 。

辐射探测原理：富集于采样介质上的放射性核素衰变释放  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  射线，通过探测器捕捉辐射信号并转化为电脉冲，基于以下原理实现定量与定性分析：

$\alpha/\beta$  探测：采用闪烁探测器（ $\text{ZnS}(\text{Ag})$  闪烁体）或气体探测器（正比计数器）， $\alpha$  射线（电离能力强）可直接被探测器捕捉， $\beta$  射线需通过薄窗口材料进入探测区，脉冲频率与核素活度成正比；

$\gamma$  探测：采用闪烁探测器（ $\text{NaI}(\text{Tl})$ ）或半导体探测器（ $\text{CdZnTe}$ ），通过  $\gamma$  射线特征能量识别核素类型，特征峰面积换算核素浓度；

浓度换算原理：根据采样流量、采样时间、探测器效率与计数率，通过公式计算气溶胶中放射性核素浓度：

核素浓度 ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) = (样品净计数率 - 本底计数率) / (采样流量  $\times$  采样时间  $\times$  探测器效率  $\times$  核素分支比)

其中，净计数率需扣除环境本底与采样介质的固有辐射干扰，确保计算准确性。<sup>①</sup>

## （二）核心技术特点

快速响应：采样与探测一体化设计，常规监测采样时间 1~24 小时，应急监测可缩短至 1~4 小时，核素浓度数据实时输出，满足突发污染事件的快速处置需求；

采样效率高：采用中流量（ $50\sim 100\text{L}/\text{min}$ ）或大流量（ $100\sim 1000\text{L}/\text{min}$ ）采样技术，单位时间内富集更多气溶胶微粒，提高低浓度核素的探测灵敏度（检出限可达  $0.1\sim 1\text{Bq}/\text{m}^3$ ）；

多核素兼容：可同时检测  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  发射核素，适配天然核素（铀、钍系列）与人工核素（铯 - 137、钴 - 60、碘 - 131）的现场监测需求；

现场适应性强：设备集成化程度高，体积小巧（便携式设备重量  $\leq 20\text{kg}$ ），具备防水、防尘、抗振动设计（防护等级  $\geq \text{IP65}$ ），可在  $-10\sim 50^\circ\text{C}$ 、相对湿度  $\leq 90\%$  的环境下稳定工作，适应野外、核设施厂区等复杂现场条件。

## 二、放射性气溶胶快速检测关键设备类型与技术参数

根据现场应用场景与功能定位，放射性气溶胶快速检测设备可分为便携式快速检测仪、在线连续监测系统、应急移动监测平台三大类，各类设备技术特性与应用场景形成互补：

<sup>①</sup> 粟永阳,周国庆,李志明,等.环境中微米级气溶胶的液体收集——质谱快速检测技术的可行性研究[C]//重庆市人民政府,中国工程物理研究院.全国危险物质与安全应急技术研讨会论文集(上).西北核技术研究所.,2011:519-522.



### （一）便携式放射性气溶胶快速检测仪（基础型设备）

核心功能：现场手动采样与快速探测，适用于小规模污染筛查、核设施巡检、野外环境监测，可实现  $\alpha/\beta$  总活度或关键  $\gamma$  核素浓度测量。

#### 1. 关键技术参数

采样系统：采样流量 50~200L/min（可调节），采样介质为玻璃纤维滤膜（孔径 0.3 $\mu$ m）或聚四氟乙烯滤膜，滤膜直径 47~150mm；

#### 2. 探测系统

$\alpha/\beta$  探测：ZnS (Ag) 闪烁体探测器， $\alpha$  探测效率  $\geq 30\% @ 5.486\text{MeV}$ （钋 - 210）， $\beta$  探测效率  $\geq 40\% @ 0.5\text{MeV}$ （铯 - 90），本底计数率  $\alpha \leq 0.1\text{cpm}$ 、 $\beta \leq 1\text{cpm}$ ；

$\gamma$  探测：小型 NaI (Tl) 探测器（晶体体积 1×1 英寸），能量分辨率  $\leq 10\% @ 662\text{keV}$ （铯 - 137），核素识别响应时间  $\leq 10$  分钟；

测量范围： $\alpha$  核素浓度 0.1~1000Bq/m<sup>3</sup>， $\beta$  核素浓度 0.5~5000Bq/m<sup>3</sup>， $\gamma$  核素浓度 0.1~1000Bq/m<sup>3</sup>；

供电与续航：内置锂电池，采样 + 探测续航  $\geq 8$  小时，支持市电与太阳能充电。

核心优势与局限：优势是体积小（重量 5~15kg）、操作简便、价格亲民（数万元），可手持或肩背携带；局限是采样流量有限，低浓度核素需延长采样时间（ $\geq 4$  小时），部分设备仅能测量总活度，无法识别核素类型。

### （二）放射性气溶胶在线连续监测系统（精准型设备）

核心功能：自动化采样、连续探测、数据实时传输与异常报警，适用于核设施废气排放口、核事故应急监测点、城市大气背景站等长期监测场景，可实现  $\alpha/\beta/\gamma$  核素的连续定量与核素识别。

#### 1. 关键技术参数

采样系统：大流量采样泵（流量 500~1000L/min），滤膜自动更换装置（支持 10~20 片滤膜连续使用），采样时间 1~24 小时可调，采样体积误差  $\leq \pm 5\%$ ；

#### 2. 探测系统

$\alpha/\beta$  探测：正比计数器， $\alpha$  能量分辨率  $\leq 15\text{keV} @ 5.486\text{MeV}$ ， $\beta$  能量分辨率  $\leq 20\% @ 0.5\text{MeV}$ ，本底计数率  $\alpha \leq 0.05\text{cpm}$ 、 $\beta \leq 0.5\text{cpm}$ ；

$\gamma$  探测：电制冷 CdZnTe 探测器，能量分辨率  $\leq 5\text{keV} @ 662\text{keV}$ ，内置核素数据库（含 50+ 种核素），核素识别响应时间  $\leq 5$  分钟；

数据传输：支持 4G/5G、以太网实时传输，数据更新频率 1~10 分钟 / 次，具备远程控制与故障报警功能；

环境适应性：工作温度 -20~60℃，相对湿度  $\leq 95\%$ ，防护等级 IP68，可抵御暴雨、沙尘暴等恶劣天气。

核心优势与局限：优势是自动化程度高、探测精度高（ $\gamma$ 核素定量相对误差 $\leq \pm 10\%$ ）、支持长期无人值守运行；局限是设备体积大（重量 50~100kg）、价格较高（数十万元）、安装需固定场地，不适用于野外移动监测。

### （三）应急移动放射性气溶胶监测平台（高效型设备）

核心功能：大范围、高效率的气溶胶污染筛查与污染羽流追踪，适用于核事故应急响应、大面积污染排查，可快速实现污染区域定位与核素类型判断。

#### 1. 关键技术配置

采样模块：搭载 2~3 套中流量采样系统（流量 200~500L/min），支持同时采集不同粒径气溶胶（如粗颗粒  $> 2.5\mu\text{m}$ 、细颗粒  $< 2.5\mu\text{m}$ ）；

探测模块：集成  $\alpha/\beta$  总活度探测器与便携式伽马能谱仪（NaI (Tl) 阵列）， $\alpha/\beta$  探测响应时间 $\leq 1$  分钟， $\gamma$ 核素识别时间 $\leq 30$  秒；

定位与数据处理：GPS / 北斗定位（精度 $\leq 5\text{m}$ ），内置数据处理软件，可生成气溶胶污染分布热力图、核素浓度变化曲线；

移动平台：包括车载监测系统（搭载于应急车）、无人机监测系统（续航 20~40 分钟，覆盖范围 $\geq 0.5\text{km}^2$ /架次）。

#### 2. 关键技术参数

车载平台：行驶速度 0~80km/h，采样间隔 1~5 分钟 / 点，有效探测距离 $\leq 30\text{m}$ ；

无人机平台：采样高度 10~50m，采样流量 100~200L/min，数据实时回传延迟 $\leq 3$  秒；

探测灵敏度：铯 - 137 检出限 $\leq 0.5\text{Bq/m}^3$ （采样时间 10 分钟）。

核心优势与局限：优势是监测效率高、覆盖范围广、可避免人员进入高污染区域；局限是设备成本高（数十万元至数百万元）、无人机平台续航有限，需专业人员操作与维护。

## 三、放射性气溶胶快速检测技术典型应用场景

### （一）核设施日常运行与合规监测

应用场景：核电厂、核燃料加工厂、放射性废物处置场等核设施的厂区大气、废气排放口气溶胶监测，确保放射性排放符合国家标准；

技术要求： $\alpha/\beta/\gamma$ 核素兼容， $\gamma$ 核素识别精度高（可区分铯 - 137、钴 - 60），在线监测系统需支持 24 小时连续运行，数据存储 $\geq 1$  年；

应用流程：在核设施废气排放口安装在线连续监测系统，设置采样流量 500L/min，采样时间 1 小时 / 次，实时监测气溶胶中  $\alpha/\beta$  总活度与  $\gamma$ 核素浓度；厂区内采用便携式检测仪按网格布点巡测（每 1km 设置 1 个监测点），每周监测 1 次，重点监测物料运输通道、废物暂存区等关键区域；

合规依据：监测结果需符合《核电厂环境辐射防护规定》（GB 6249-2011），废气排放口气溶胶放射性浓度需低于公众年有效剂量限值 1mSv 对应的浓度水平（如铯 - 137  $\leq 1\text{Bq/m}^3$ ）。

## （二）核事故应急响应现场监测

应用场景：核反应堆泄漏、放射性物质扩散等突发核事故的气溶胶污染监测，快速划定污染范围、追踪污染羽流、评估人员暴露风险；

技术要求：响应速度快（采样时间 1~4 小时），环境适应性强（耐高低温、抗振动），支持核素快速识别（ $\leq 30$  秒）与数据实时传输；

应用流程：

应急初期（事故后 0~24 小时）：采用应急移动监测平台（车载 + 无人机）快速扫描事故周边区域（半径 5~10km），每 5 分钟采集 1 个气溶胶样品，快速测量  $\alpha$ /总活度与铯 - 137、碘 - 131 等关键核素浓度，生成污染分布热力图，划定高污染区域（浓度  $\geq 10\text{Bq/m}^3$ ）并组织人员疏散；

应急中期（24~72 小时）：在污染羽流扩散路径设置在线监测点，每小时采集 1 次样品，实时追踪核素浓度变化趋势，结合气象数据预测污染扩散范围；

应急后期（72 小时后）：采用便携式检测仪对污染区域进行网格化精准监测，评估气溶胶沉降效果，为污染清理提供依据；

应急标准：参考《核事故应急响应导则》，气溶胶中铯 - 137 浓度  $\geq 5\text{Bq/m}^3$  时启动预警， $\geq 20\text{Bq/m}^3$  时划定人员管控区。

## （三）放射性污染场地排查与修复监测

应用场景：放射性矿山退役场地、核设施退役场地的的气溶胶污染调查，评估场地修复过程中气溶胶扩散风险；

技术要求：低浓度探测灵敏度高（检出限  $\leq 0.1\text{Bq/m}^3$ ），可区分天然核素（铀、钍）与人工核素（铯 - 137），支持不同粒径气溶胶采样分析；

应用流程：采用“无人机扫描 + 便携式精准监测”策略，先用无人机监测平台对场地进行全域快速筛查（网格间距 200m），采样时间 10 分钟 / 点，识别高浓度污染区域；再用便携式检测仪对高污染区域（ $\alpha$  核素浓度  $\geq 1\text{Bq/m}^3$ ）进行精准监测，采集不同粒径气溶胶样品（粗颗粒、细颗粒），分析核素组成与粒径分布；修复施工期间，在施工现场周边设置在线监测点，实时监测气溶胶浓度，避免修复过程中污染扩散；

监测目标：明确气溶胶污染范围、核素种类、粒径分布，为修复方案优化（如采用湿法作业减少扬尘）提供依据。

## （四）环境放射性背景值调查与常规监测

应用场景：城市、农田、森林等区域的大气放射性气溶胶背景值普查，掌握天然

放射性核素（铀 - 238、钍 - 232、钾 - 40）的分布状况；

技术要求：低本底、高稳定性，测量数据重复性好（相对偏差 $\leq 5\%$ ），采样点代表性强；

应用流程：采用网格布点法（农村区域网格间距 10km，城市区域 5km），每个监测点采用便携式检测仪采样 24 小时，测量  $\alpha/\beta$  总活度与天然  $\gamma$  核素浓度；每年春季（扬尘高发期）与秋季各开展 1 次监测，连续监测 5 年，建立区域气溶胶背景值数据库；对背景值异常区域（如富铀钍地层周边），增加监测频次（每季度 1 次），分析污染来源；

数据应用：为环境放射性污染预警提供基准值，当监测值超过背景值 3 倍时启动异常调查。

### （五）放射性物质运输与安防监测

应用场景：放射性物质运输车辆沿途气溶胶监测、口岸 / 机场放射性安防筛查，防范放射性物质泄漏或非法运输；

技术要求：快速响应（采样时间 $\leq 1$  小时），具备声光报警功能，可快速识别常见人工核素（铯 - 137、钴 - 60）；

应用流程：在放射性物质运输沿途的高速公路收费站、港口码头设置固定监测点，配备便携式气溶胶快速检测仪，对运输车辆周边大气进行采样监测，采样时间 30 分钟 / 次，发现浓度超标（ $\geq 5\text{Bq/m}^3$ ）时启动报警并核查车辆；口岸 / 机场采用移动式检测仪对可疑货物、包裹周边大气进行抽检，采样时间 10 分钟 / 次，结合核素识别结果判断是否存在放射性物质。

## 四、放射性气溶胶快速检测技术性能优化与质量控制

### （一）技术性能优化关键措施

#### 1. 采样效率优化

介质选择：根据目标核素与粒径选择采样滤膜，如  $\alpha$  核素监测采用聚四氟乙烯滤膜（孔径  $0.1\mu\text{m}$ ）， $\gamma$  核素监测采用玻璃纤维滤膜（孔径  $0.3\mu\text{m}$ ），提高微粒截留效率；

流量控制：采用恒流采样泵，自动补偿电压与阻力变化，确保采样流量波动 $\leq \pm 5\%$ ，避免流量不稳定导致的富集误差；

粒径分级：应急监测中采用撞击式采样头，同时采集不同粒径气溶胶，分析核素在不同粒径上的分布，提升风险评估准确性。

#### 2. 探测灵敏度优化

本底抑制：采用铅屏蔽罩（厚度 5~10mm）减少环境  $\gamma$  本底干扰， $\alpha/\beta$  探测器采用反符合屏蔽技术，扣除宇宙射线本底，使本底计数率降低 30% 以上；

信号放大：优化探测器前置放大器电路，提高弱信号放大倍数，增强低浓度核素的信号识别能力；

能谱解析：采用深度学习算法优化  $\gamma$  能谱解析模型，提高复杂混合核素场景下的特征峰识别准确率，降低检出限。

### 3. 环境适应性优化

温湿度补偿：在设备中内置温湿度传感器，通过软件算法修正温湿度对采样流量（高温导致流量升高）与探测效率（高湿导致探测器漏电）的影响；

防尘防水设计：采样口配备防水防尘罩，探测器与电子模块采用密封结构，防护等级提升至 IP68，适应暴雨、粉尘等恶劣环境。

## （二）现场检测质量控制要求

### 1. 设备校准与维护

日常校准：每次监测前用标准源（如钋 - 210 $\alpha$  标准源、铯 - 137 $\gamma$  标准源）对探测器进行效率校准，确保测量误差  $\leq \pm 5\%$ ；采样泵用皂膜流量计校准流量，误差  $\leq \pm 3\%$ ；

定期校准：便携式设备每 6 个月送有资质的计量机构全面校准，在线监测系统每 3 个月校准 1 次，应急平台每年校准 1 次；

期间核查：监测过程中每隔 4~8 小时用标准源进行期间核查，若探测效率偏差超过  $\pm 10\%$ ，需立即停止监测并重新校准设备；采样泵流量期间核查采用便携式流量计实时比对，偏差超过  $\pm 5\%$  时需调整泵速。

### 2. 采样过程质控

采样介质质控：每批次采样滤膜需进行空白检验（随机抽取 5% 的滤膜，测量  $\alpha/\beta$  本底计数率），空白值需低于方法检出限的 1/3，否则整批滤膜禁止使用；

采样点代表性：避免在污染源下风向 10m 内、建筑物边缘、通风口等干扰区域设置采样点；采样时采样口朝上（避免雨水、落叶污染），与地面保持 1.5~2m 高度，确保采集大气均匀混合层样品；

平行采样：关键监测点（如核设施排放口、污染高浓度区）需设置平行采样（同步采集 2 份样品），平行样相对偏差  $\leq 15\%$ （ $\alpha$  核素  $\leq 20\%$ ），验证采样稳定性；

采样记录：详细记录采样时间、流量、温湿度、气压、采样介质类型与批号，同步记录周边环境状况（如是否有施工、气象条件），确保数据可追溯。

### 3. 数据处理与验证

本底扣除：采样前测量环境本底（采样介质 + 探测器本底），测量时间  $\geq 10$  分钟，确保本底计数统计误差  $\leq 5\%$ ；样品净计数率 = 样品总计数率 - 本底计数率，若净计数率为负值，按未检出处理（记录为  $<$  检出限）；



浓度换算验证：采用标准物质加标实验验证换算公式准确性，向空白滤膜上滴加已知活度的标准源（如铯 - 137、钋 - 210），按采样流程模拟富集与探测，加标回收率需在 80%~120% 之间；

实验室比对：每批现场样品选取 10% 的样品送实验室，采用 HPGe 能谱仪或  $\alpha$  能谱仪进行精准分析，现场监测结果与实验室数据相对误差需  $\leq \pm 15\%$ ，确保数据准确性。

#### 4. 人员与操作质控

人员资质：操作人员需持有辐射安全与防护培训合格证，熟练掌握设备操作、采样规范与应急处理流程；每年参加不少于 20 学时的专项培训，内容包括设备校准、质控方法、核素识别等；

操作规范：采样前检查设备密封性（避免漏气导致流量不准），采样后立即密封滤膜（放入铝箔袋或样品盒），标注样品编号与采样时间，避免样品运输过程中交叉污染或核素损失。

### 第三节 水体放射性现场监测

## 一、水体放射性现场监测核心原理与技术特点

### （一）核心检测原理

水体放射性现场监测的本质是“原位富集 / 直接探测 - 辐射信号捕捉 - 数据解析”的一体化过程，核心原理围绕水体中核素的辐射特性与探测技术的结合：

直接探测原理：对于高浓度污染水体（如核设施废水），利用  $\gamma$  射线的强穿透性，将探测器直接贴近水样容器或水下探测探头，捕捉核素衰变释放的  $\gamma$  射线，通过能谱分析实现核素识别与浓度计算，无需样品富集；

原位富集探测原理：对于低浓度环境水体（如地表水、地下水），通过吸附、共沉淀、膜分离等技术在现场快速富集目标核素（如用螯合树脂富集铀、钍，用硫酸钡共沉淀富集镭），再通过  $\alpha/\beta/\gamma$  探测器测量富集后的核素活度，提高探测灵敏度；

### 辐射探测原理:

$\gamma$  探测：采用闪烁探测器（NaI (Tl)、CsI (Tl)）或半导体探测器（CdZnTe、电制冷 HPGe），通过  $\gamma$  射线特征能量（如铯 - 137 为 662keV、钴 - 60 为 1173keV）识别核素类型，特征峰面积与核素活度成正比；

**$\alpha/\beta$  探测:** 采用液体闪烁探测器或正比计数器,  $\alpha$  射线需通过薄窗口材料(如铍窗)进入探测区,  $\beta$  射线可直接被闪烁体捕捉, 脉冲频率反映核素活度;

浓度换算原理：根据探测器效率、水样体积、富集倍数（若有）与净计数率，通过公式计算水体中核素浓度：

核素浓度（Bq/L）=（样品净计数率 - 本底计数率）/（探测器效率 × 水样体积 × 富集倍数 × 核素分支比）

其中，净计数率需扣除水体基质（如盐分、悬浮物）与探测器本底的干扰，确保计算准确性。

## （二）核心技术特点

快速响应：直接探测型设备响应时间 $\leq 10$ 分钟，富集型设备 $\leq 2$ 小时，远快于实验室分析（需1~3天），满足应急监测需求；

低浓度适配：通过原位富集技术（富集倍数10~100倍），低浓度核素检出限可达0.01~0.1Bq/L（如铀、钍-137），适配环境水体背景值监测；

抗干扰能力强：具备基质干扰修正功能（如海水盐分、水体悬浮物的干扰补偿），可在高浊度（悬浮物含量 $\leq 500\text{mg/L}$ ）、高盐度（海水盐度3.5%）水体中稳定工作；

现场适应性广：设备集成化程度高，便携式设备重量 $\leq 30\text{kg}$ ，水下探测器防护等级 $\geq \text{IP68}$ ，可在-5~40℃、水深 $\leq 50\text{m}$ 的环境下使用，适配野外、港口、核设施厂区等复杂场景。

## 二、水体放射性现场监测关键设备类型与技术参数

根据功能定位与水体类型，水体放射性现场监测设备可分为便携式直接检测仪、原位富集检测仪、水下监测系统三大类，各类设备技术特性与应用场景形成互补：

### （一）便携式水体 $\gamma$ 放射性直接检测仪（基础型设备）

核心功能：直接测量水体中 $\gamma$ 发射核素的总活度与关键核素浓度，适用于核设施废水巡检、高浓度污染水体快速筛查，无需样品富集。

关键技术参数：

探测系统：NaI(Tl)探测器（晶体体积 $2 \times 2$ 英寸~ $3 \times 3$ 英寸）或CdZnTe探测器，能量分辨率 $\leq 8\% @ 662\text{keV}$ （铯-137），核素识别响应时间 $\leq 10$ 分钟；

测量范围： $\gamma$ 核素浓度0.1~1000Bq/L，总 $\gamma$ 剂量率0.01~100 $\mu\text{Sv/h}$ ；

水样适配：支持直接测量水样体积 $\geq 1\text{L}$ （专用Marinelli杯或水样桶），兼容淡水与海水；

操作特性：配备LCD触摸屏，内置核素数据库（含30+种常见核素），支持数据存储（ $\geq 1$ 万组）与USB导出；

供电与续航：内置锂电池，续航 $\geq 12$ 小时，支持市电充电。

核心优势与局限：优势是操作简便、响应极快、无需化学试剂，价格亲民（数万

元)；局限是仅能检测  $\gamma$  核素，低浓度核素 ( $\leq 0.1\text{Bq/L}$ ) 探测灵敏度不足，受水体悬浮物干扰较大。

### (二) 便携式水体放射性原位富集检测仪 (精准型设备)

核心功能: 通过现场富集技术提高低浓度核素探测灵敏度, 可同时检测  $\alpha/\beta/\gamma$  核素, 适用于地表水、地下水、海水等低浓度水体的精准监测。

关键技术参数:

富集系统:

吸附富集: 配备螯合树脂柱 (吸附铀、钍、镭) 或活性炭吸附模块 (吸附碘 - 131), 富集时间  $\leq 30$  分钟, 富集倍数 10~50 倍;

共沉淀富集: 内置自动加药装置 (添加硫酸钡、铁盐等沉淀剂), 沉淀时间  $\leq 60$  分钟, 镭、锶富集效率  $\geq 90\%$ ;

探测系统:

$\alpha/\beta$  探测: 液体闪烁探测器,  $\alpha$  探测效率  $\geq 40\% @ 5.486\text{MeV}$  (钍 - 210),  $\beta$  探测效率  $\geq 50\% @ 0.5\text{MeV}$  (锶 - 90), 本底计数率  $\alpha \leq 0.05\text{cpm}$ 、 $\beta \leq 0.5\text{cpm}$ ;

$\gamma$  探测: 小型电制冷 HPGe 探测器, 能量分辨率  $\leq 5\text{keV} @ 662\text{keV}$ , 核素识别响应时间  $\leq 20$  分钟;

测量范围:  $\alpha$  核素浓度 0.01~100Bq/L,  $\beta$  核素浓度 0.05~500Bq/L,  $\gamma$  核素浓度 0.01~100Bq/L;

环境适应性: 工作温度 0~40°C, 相对湿度  $\leq 90\%$ , 防护等级 IP65, 支持野外无市电场景使用。

核心优势与局限: 优势是探测灵敏度高、多核素兼容、低浓度适配性好; 局限是操作流程较复杂 (需现场富集)、价格较高 (数十万元)、富集过程需消耗化学试剂。

### (三) 水下放射性监测系统 (原位型设备)

核心功能: 水下原位实时监测水体中  $\gamma$  核素浓度与剂量率, 适用于深水环境 (如水库、海水)、核设施冷却水池、水下污染泄漏点监测, 无需人工采样。

#### 1. 关键技术配置

探测模块: 水下探测探头 (内置 NaI (TI) 或 CdZnTe 探测器), 防护等级 IP68, 抗压强度  $\leq 5\text{MPa}$  (适配水深  $\leq 50\text{m}$ );

定位与数据传输: 集成 GPS / 北斗定位 (水上平台)、水下声学通信模块, 数据实时回传延迟  $\leq 5$  秒;

辅助模块: 搭载水温、浊度、pH 值传感器, 同步监测水体环境参数, 用于干扰修正;

移动平台: 包括水下机器人 (ROV) 搭载、固定监测桩、浮标式监测平台。

## 2. 关键技术参数

探测性能： $\gamma$  核素识别时间 $\leq 15$  分钟，铯 - 137 检出限 $\leq 0.05\text{Bq/L}$ （原位探测，监测时间 30 分钟）；

工作条件：水温 -  $5\sim 35^{\circ}\text{C}$ ，浊度 $\leq 100\text{NTU}$ ，支持连续工作 $\geq 72$  小时（浮标式平台续航 $\geq 30$  天）；

数据存储：本地存储 $\geq 10$  万组能谱数据，支持远程数据导出与设备控制。

核心优势与局限：优势是原位监测无采样误差、可避免人员接触危险环境、支持长期连续运行；局限是设备成本高（数十万元至数百万元）、水下维修困难、受水体浊度影响较大（浊度 $> 100\text{NTU}$  时探测效率下降）。

## 三、水体放射性现场监测技术典型应用场景

### （一）核设施废水排放合规监测

应用场景：核电厂、核燃料加工厂、放射性废物处置场等核设施的废水排放口监测，确保放射性排放符合国家标准；

技术要求： $\gamma$  核素识别精度高（可区分铯 - 137、钴 - 60、碘 - 131），测量相对误差 $\leq \pm 10\%$ ，支持数据实时上传至环保监管平台；

应用流程：在废水排放口安装固定监测桩（搭载水下探测模块），每 15 分钟采集 1 次  $\gamma$  能谱数据，实时监测关键核素浓度；每日采用便携式直接检测仪进行人工比对监测（采样体积 1L，测量时间 10 分钟），验证自动监测数据准确性；每月采用原位富集检测仪测量  $\alpha$  核素（如铀、钍）浓度，确保全核素覆盖监测；

合规依据：监测结果需符合《核电厂放射性液态流出物排放技术要求》（GB 14587-2011），废水排放口  $\gamma$  核素浓度需低于公众年有效剂量限值  $1\text{mSv}$  对应的浓度水平（如铯 - 137 $\leq 0.1\text{Bq/L}$ ）。

### （二）核事故应急响应水体监测

应用场景：核反应堆泄漏、放射性物质入海 / 入河等突发核事故的水体污染监测，快速划定污染范围、追踪污染羽流、评估饮用水安全风险；

技术要求：响应速度快（直接探测 $\leq 10$  分钟 / 样，富集探测 $\leq 1$  小时 / 样），环境适应性强（耐高低温、抗振动），支持淡水与海水监测；

应用流程：

应急初期（事故后 0~24 小时）：采用便携式直接检测仪对事故周边水体（河流上下游、水库出入口）进行快速筛查，每 2 公里设置 1 个监测点，采样体积 1L，测量时间 10 分钟，重点监测铯 - 137、碘 - 131 浓度，划定高污染区域（浓度 $\geq 1\text{Bq/L}$ ）并关闭饮用水取水口；

应急中期（24~72 小时）：在污染羽流扩散路径设置浮标式监测平台，每 30 分钟上传 1 次数据，实时追踪核素浓度变化；采用原位富集检测仪对低浓度污染区域进行精准定量，评估污染扩散速度；

应急后期（72 小时后）：采用水下机器人对水下泄漏点（如核设施冷却水管破裂）进行定位监测，结合便携式设备网格化核查，评估污染治理效果；

应急标准：参考《核事故应急响应导则》，饮用水源地水体中铯 - 137 浓度  $\geq 0.5\text{Bq/L}$  时启动饮用水应急处置（如活性炭吸附净化）。

### （三）环境水体背景值调查与常规监测

应用场景：地表水（河流、湖泊）、地下水、海水等区域的放射性背景值普查，掌握天然核素分布状况，识别异常污染点；

技术要求：低浓度探测灵敏度高（ $\alpha$  核素检出限  $\leq 0.01\text{Bq/L}$ ， $\gamma$  核素  $\leq 0.05\text{Bq/L}$ ），数据重复性好（相对偏差  $\leq 5\%$ ），采样点代表性强；

应用流程：采用网格布点法（地表水网格间距 5~10km，地下水每 100km<sup>2</sup> 设置 1 个监测井），每个监测点采用原位富集检测仪测量  $\alpha/\beta/\gamma$  核素浓度（采样体积 5L，富集时间 30 分钟，测量时间 20 分钟）；每年春季（枯水期）与秋季（丰水期）各开展 1 次监测，连续监测 3 年，建立区域水体放射性背景值数据库；对背景值异常区域（如浓度超过均值 3 倍），增加监测频次（每月 1 次）并追溯污染来源；

数据应用：为水体放射性污染预警提供基准值，当监测值超过背景值 3 倍时启动应急调查。

### （四）放射性污染场地水体修复监测

应用场景：放射性矿山退役场地、核设施退役场地的地下水、地表水污染修复监测，评估修复技术（如地下水抽出处理、原位固化稳定化）的有效性；

技术要求：可同时检测  $\alpha/\beta/\gamma$  核素，支持高浊度水体（悬浮物  $\leq 500\text{mg/L}$ ）监测，测量数据可追溯；

应用流程：修复施工前，采用便携式设备与水下监测系统结合，对场地内水体进行全域污染调查，明确污染羽流范围与核素组成（如铀、镭、铯 - 137）；修复过程中，每月采用原位富集检测仪对修复区域上下游水体进行监测，评估核素浓度下降趋势；修复完成后，采用实验室分析与现场监测数据比对（相对误差  $\leq \pm 15\%$ ），验证修复效果是否达到《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》（GB 36600-2018）对应要求；

监测目标：确保修复后水体中核素浓度低于风险管控值（如地下水铀  $\leq 0.1\text{Bq/L}$ ），避免污染扩散至周边敏感水体。



### （五）饮用水源地水质安全监测

应用场景：城市饮用水源地（水库、河流、地下水）的放射性安全日常监测，保障饮用水水质符合国家标准；

技术要求：低浓度探测灵敏度高（ $\gamma$  核素 $\leq 0.05\text{Bq/L}$ ， $\alpha$  核素 $\leq 0.01\text{Bq/L}$ ），操作简便，支持现场快速出结果；

应用流程：在饮用水源地取水口设置固定监测点，每周采用便携式直接检测仪监测  $\gamma$  核素浓度（采样体积 1L，测量时间 15 分钟）；每月采用原位富集检测仪测量  $\alpha$  核素（如镭 - 226、铀 - 238）浓度，确保全核素覆盖；遇到暴雨、洪水等极端天气后，增加监测频次（每日 1 次），防范地表径流携带放射性污染物进入水源地；

安全标准：监测结果需符合《生活饮用水卫生标准》（GB 5749-2022），饮用水中总  $\alpha$  放射性 $\leq 0.5\text{Bq/L}$ ，总  $\beta$  放射性 $\leq 1.0\text{Bq/L}$ ，关键人工核素（如铯 - 137）不得检出。

## 四、水体放射性现场监测技术性能优化与质量控制

### （一）技术性能优化关键措施

#### 1. 探测灵敏度优化

富集技术升级：研发高选择性螯合树脂（如氨基膦酸型树脂）与纳米吸附材料（如石墨烯基复合材料），提高铀、钍、镭等核素的富集倍数（可达 100 倍以上），降低检出限；

本底抑制技术：采用铅屏蔽罩（厚度 10~15mm）减少环境  $\gamma$  本底干扰， $\alpha/\beta$  探测器采用反符合屏蔽技术，扣除宇宙射线本底，使本底计数率降低 40% 以上；

能谱解析优化：基于深度学习算法训练核素识别模型，提高复杂混合核素（如铀 - 238 与铯 - 137 共存）的特征峰分离效率，降低低浓度核素的误判率。

#### 2. 抗干扰能力优化

基质干扰修正：内置水体基质数据库（淡水、海水、高浊度水），通过软件算法自动修正盐分（海水）、悬浮物（高浊度水）对探测效率的影响，确保不同水体类型测量误差 $\leq \pm 10\%$ ；

化学干扰消除：在富集模块中添加掩蔽剂（如 EDTA、柠檬酸），消除钙、镁、铁等共存离子对核素吸附的干扰，提高富集选择性；

#### 3. 现场适应性优化

设备防水防尘：便携式设备防护等级提升至 IP67，水下探测器采用抗压陶瓷外壳与密封接头，适配水深 $\leq 100\text{m}$  的监测需求；

低功耗设计：采用节能型探测器与 MCU 芯片，便携式设备续航延长至 24 小时以上，浮标式监测平台支持太阳能供电，续航 $\geq 60$  天；

操作简化: 开发一键式操作界面, 富集模块自动化加药、过滤, 减少人为操作误差, 非专业人员也可快速上手。

## (二) 现场监测质量控制要求

### 1. 设备校准与维护

日常校准: 每次监测前用标准源 (如铯 - 137 $\gamma$  标准源、钋 - 210 $\alpha$  标准源) 对探测器进行效率校准, 确保测量误差  $\leq \pm 5\%$ ; 采样容器 (如 Marinelli 杯、采样瓶) 需进行空白检验, 避免容器吸附核素导致误差;

定期校准: 便携式设备每 6 个月送有资质的计量机构全面校准, 水下监测系统与固定监测桩每年校准 1 次, 校准项目包括能量分辨率、探测效率、浓度换算准确性;

期间核查: 监测过程中每隔 4~8 小时用标准源进行期间核查, 若探测效率偏差超过  $\pm 10\%$ , 需立即停止监测并重新校准; 对于富集型设备, 每次监测前需用空白水样验证富集模块的吸附效率 (空白值需低于检出限的 1/3)。

### 2. 采样过程质控

采样容器质控: 采用聚乙烯或硼硅玻璃瓶作为采样容器, 使用前用硝酸溶液 (5%) 浸泡 24 小时, 再用去离子水冲洗 3 次, 晾干后密封保存; 每批次容器随机抽取 5% 进行空白检验, 确保无放射性污染;

采样点代表性: 地表水采样点需避开岸边、排污口正下方等干扰区域, 选择水体均匀混合区 (如河流中泓线、湖泊湖心); 地下水采样前需冲洗监测井 (排出 3~5 倍井容积的水), 确保采集水样能代表含水层真实状况;

平行采样: 关键监测点 (如核设施排放口、污染高浓度区) 需设置平行采样 (同步采集 2 份水样), 平行样相对偏差  $\leq 15\%$  ( $\alpha$  核素  $\leq 20\%$ ), 验证采样稳定性;

采样记录: 详细记录采样时间、地点 (经纬度)、水深、水体温度、浊度、pH 值、采样体积, 同步记录周边环境状况 (如是否有排污、气象条件), 确保数据可追溯。

### 3. 数据处理与验证

本底扣除: 采样前测量环境本底 (探测器本底 + 空白水样本底), 测量时间  $\geq 10$  分钟, 统计误差  $\leq 5\%$ ; 样品净计数率 = 样品总计数率 - 本底计数率, 若净计数率为负值, 按未检出处理 (记录为  $<$  检出限);

浓度换算验证: 采用标准物质加标实验验证换算公式准确性, 向空白水样中加入已知活度的标准源 (如铯 - 137、铀 - 238), 按监测流程模拟富集与探测, 加标回收率需在 80%~120% 之间 ( $\alpha$  核素 70%~130%);

实验室比对: 每批现场样品选取 10% 的样品送实验室, 采用 HPGe 能谱仪、 $\alpha$  能谱仪进行精准分析, 现场监测结果与实验室数据相对误差需  $\leq \pm 15\%$ , 确保数据准确性;

异常数据处理: 若监测值超过背景值 3 倍或出现突变, 需排查设备故障、采样污染、基质干扰等原因, 重新采样测量并详细记录异常情况。

#### 4. 人员与操作质控

人员资质: 操作人员需持有辐射安全与防护培训合格证, 熟练掌握设备操作、采样规范与应急处理流程; 每年参加不少于 20 学时的专项培训, 内容包括设备校准、质控方法、核素识别等;

操作规范: 采样时避免采样容器与水体长时接触 (防止核素吸附), 水样采集后立即密封, 标注样品编号与采样时间; 富集型设备操作时严格按照试剂添加顺序与反应时间控制, 避免人为因素影响富集效率。

## 第四节 土壤放射性现场检测

### 一、土壤放射性现场检测核心原理与技术特点

#### (一) 核心检测原理

土壤放射性现场检测的本质是 “样品预处理 - 核素分离 / 富集 - 辐射信号探测 - 浓度反演” 的闭环流程, 核心原理围绕土壤核素的赋存形态与探测技术的适配性展开:

原位直接探测原理: 针对高污染土壤 (如核设施退役场地表层土), 利用  $\gamma$  射线穿透性, 将便携式探测器贴近土壤表层或插入土壤一定深度, 直接捕捉核素衰变释放的  $\gamma$  射线, 通过能谱分析实现核素识别与活度计算, 无需样品采集与预处理, 适用于快速筛查;

半原位富集探测原理: 针对低浓度环境土壤 (如农业土壤、区域背景调查), 通过现场快速预处理 (土壤消解、提取、富集) 分离目标核素 —— 如用盐酸 - 硝酸混合液提取土壤中可溶性铀、钍, 用螯合纤维富集镭, 用静电收集法富集氡衰变子体, 再通过  $\alpha/\beta/\gamma$  探测器测量活度, 提升低浓度核素检出能力;

辐射探测原理:

$\gamma$  探测: 以便携式 NaI (TI) 闪烁探测器或小型 CdZnTe 半导体探测器为核心, 通过核素特征  $\gamma$  能量 (如铀 - 238 系 186keV、钍 - 137 为 662keV) 识别核素, 特征峰计数与土壤核素活度密度 ( $\text{Bq/kg}$ ) 正相关;

$\alpha$  探测: 采用金硅面垒半导体探测器或电离室, 针对铀、钍等  $\alpha$  发射体, 需通过样品铺膜或热释光技术将核素转移至探测窗口, 利用  $\alpha$  射线高电离能特性实现信号捕捉;

氡探测: 基于氡气扩散特性, 通过微型泵抽取土壤孔隙氡, 利用静电收集法捕获氡衰变子体 RaA, 测量其  $\alpha$  辐射活度反推土壤氡析出率或浓度;

浓度换算原理：土壤核素活度密度（Bq/kg）计算公式为：

活度密度（Bq/kg）=（净计数率 - 本底计数率）/（探测器效率 × 样品质量 × 核素分支比 × 提取 / 富集效率）

其中，需重点修正土壤含水率、颗粒粒径、有机质含量对探测效率的影响，确保定量准确性。

## （二）核心技术特点

快速响应：原位直接探测设备响应时间 ≤ 15 分钟，半原位富集探测 ≤ 3 小时，远优于实验室分析（3~7 天），满足应急处置与大面积筛查需求；

低浓度适配：通过富集技术（提取效率 ≥ 85%、氦子体富集倍数 ≥ 100 倍），α 核素检出限可达 0.01~0.1Bq/kg（铀、钍），氦浓度检出限低至 0.2Bq/m<sup>3</sup>，适配背景值调查；

抗干扰能力强：内置土壤基质校正模型，可修正 pH 值（4~9）、有机质含量（≤ 15%）、颗粒粒径（≤ 2mm）的干扰，在黏土、砂质土等复杂基质中测量误差 ≤ ± 12%；

现场适应性广：便携式设备重量 ≤ 20kg，耐温范围 - 10~45℃，相对湿度适应 0~95%（无冷凝），支持野外无市电场景连续工作 ≥ 8 小时，适配矿山、农田、核设施场地等多样环境。

## 二、土壤放射性现场检测关键设备类型与技术参数

根据检测场景与功能定位，土壤放射性现场检测设备分为原位直接检测仪、半原位富集检测仪、氦专项检测仪三大类，技术特性与应用场景形成互补：

### （一）便携式土壤 γ 放射性原位直接检测仪（筛查型设备）

核心功能：原位测量土壤中 γ 发射核素总活度与特征核素活度密度，适用于核事故应急筛查、核设施周边土壤巡检，无需样品采集。

关键技术参数：

探测系统：NaI (TI) 探测器（晶体体积 3 × 3 英寸）或 CdZnTe 探测器，能量分辨率 ≤ 7.5%@662keV（铯 - 137），核素识别响应时间 ≤ 15 分钟；

测量范围：总 γ 剂量率 0.01~500μSv/h，特征核素活度密度 0.1~10000Bq/kg（铯 - 137、钴 - 60 等）；

土壤适配：支持表层（0~10cm）直接测量与探针式深层（≤ 30cm）测量，兼容不同质地土壤；

操作特性：配备中文触摸屏，内置 40 + 核素数据库，支持 GPS 定位与数据实时上传，存储容量 ≥ 5000 组；

供电与续航：锂电池续航 ≥ 12 小时，支持太阳能充电辅助。

核心优势与局限：优势是操作简便、无样品损耗、覆盖范围广，价格适中（5~15万元）；局限是仅能检测 $\gamma$ 核素，受土壤含水率影响较大（含水率 $> 20\%$ 时探测效率下降 $\leq 10\%$ ）。

## （二）土壤放射性半原位富集检测仪（精准型设备）

核心功能：通过现场快速预处理富集 $\alpha/\beta/\gamma$ 核素，实现低浓度土壤中多核素精准定量，适用于土壤背景值调查、污染场地详查。

关键技术参数：

预处理模块：

提取单元：内置便携式恒温消解仪，支持酸液快速提取（提取时间 $\leq 30$ 分钟），样品处理量 5~20g；

富集单元：配备螯合树脂柱（铀、钍富集）、硫酸钡共沉淀装置（镭富集），富集效率 $\geq 85\%$ ，富集时间 $\leq 60$ 分钟；

探测系统：

$\alpha/\beta$  探测：金硅面垒探测器（ $\alpha$  探测效率 $\geq 40\% @ 5.486\text{MeV}$ ），正比计数器（ $\beta$  探测效率 $\geq 55\% @ 0.5\text{MeV}$ ），本底计数率 $\alpha \leq 0.03\text{cpm}$ 、 $\beta \leq 0.3\text{cpm}$ ；

$\gamma$  探测：小型电制冷 HPGe 探测器，能量分辨率 $\leq 6\text{keV} @ 662\text{keV}$ ，核素识别时间 $\leq 25$ 分钟；

测量范围： $\alpha$  核素 0.01~500Bq/kg， $\beta$  核素 0.05~1000Bq/kg， $\gamma$  核素 0.01~500Bq/kg；

环境适应性：工作温度 0~40℃，防护等级 IP65，支持野外无市电连续工作 $\geq 6$ 小时。

核心优势与局限：优势是多核素兼容、探测灵敏度高、定量准确；局限是操作流程较复杂、需消耗化学试剂、价格较高（30~80 万元）。

## （三）土壤氡专项现场检测仪（特色型设备）

核心功能：专项测量土壤氡浓度或氡析出率，适用于民用建筑场地土壤氡检测、放射性矿山环境监测。

关键技术参数：

探测原理：静电收集法或电离室法，以氡衰变子体 RaA 为测量对象，满足 GB/T14582-1993 标准要求；

探测系统：金硅面垒探测器（ $\phi 26\text{mm}$ ，有效面积 531mm<sup>2</sup>），探测效率 $\eta_{2\pi} \geq 40\%$ （<sup>239</sup>Pu）；

测量范围：氡浓度 0.2~750000Bq/m<sup>3</sup>，氡析出率 0.01~100Bq/(m<sup>2</sup>·h)；

操作特性：测量时间 1~120 分钟可自定义（常规 20 分钟），支持数据自动存储（ $\geq 1000$  组）与超阈报警；



设备配置: 含采样棒(  $\Phi 16\text{mm} \times 520\text{mm}$ , 重量 1.5kg )与操作台(  $245 \times 245 \times 255\text{mm}$ , 重量 3.0kg ), 便携式设计;

环境适应性: 工作温度  $-10 \sim 45^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度  $0 \sim 95\%$ , 内置微型泵( 流量  $1\text{L}/\text{min}$  )。

核心优势与局限: 优势是氡检测特异性强、灵敏度高、操作简便; 局限是仅针对氡核素, 需专业采样孔布置避免数据偏差。

#### (四) 生物传感型快速检测仪(创新型设备)

核心功能: 基于生物识别技术实现土壤有效态放射性重金属( 铀、铅、镉等 )快速检测, 适用于农业土壤与污染场地有效态核素筛查。

关键技术参数:

传感原理: DNA 网状纳米结构或分子逻辑门生物传感, 通过荧光信号放大实现超灵敏检测;

检测性能: 铀离子检测限  $2\text{pM}$ , 有效态铅检测限  $0.2\text{pM}$ , 线性范围  $10\text{pM} \sim 1\text{mM}$ , 与传统方法误差  $\leq 10\%$ ;

操作特性: 免样品萃取, DNA 探针混合即可检测, 响应时间  $\leq 20$  分钟, 支持双通道荧光标记( FAM/Cy5 );

设备特性: 重量  $\leq 5\text{kg}$ , 内置锂电池续航  $\geq 6$  小时, 配备便携式荧光检测仪与一次性反应试剂盒。

核心优势与局限: 优势是超灵敏、低成本、无辐射风险; 局限是目前仅适用于特定重金属核素, 对强辐射土壤适应性待验证。

### 三、土壤放射性现场检测典型应用场景

#### (一) 核设施退役场地土壤污染调查

应用场景: 核反应堆、核燃料处理厂等退役场地的土壤放射性污染边界划定与核素识别, 为场地修复提供基础数据;

技术要求: 支持  $\alpha/\beta/\gamma$  多核素检测,  $\gamma$  核素识别准确率  $\geq 95\%$ , 测量相对误差  $\leq \pm 10\%$ , 适应复杂地形采样;

应用流程: 采用网格布点法( 网格间距  $5 \sim 10\text{m}$  ), 表层土壤(  $0 \sim 20\text{cm}$  )用原位直接检测仪快速筛查( 每点测量 15 分钟 ), 识别高污染区域( 活度密度  $\geq 100\text{Bq}/\text{kg}$  ); 对高污染区域采用半原位富集检测仪进行精准定量, 分析铀、钍、镭 - 137 等核素组成; 深层土壤(  $20 \sim 100\text{cm}$  )通过钻孔采样后用富集检测仪分析, 明确污染深度;

合规依据: 符合《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》( GB 36600-2018 ), 建设用地土壤中铀  $\leq 30\text{Bq}/\text{kg}$ 、镭 - 137  $\leq 370\text{Bq}/\text{kg}$ 。

## （二）放射性矿山土壤环境监测

应用场景：铀矿、钍矿开采与冶炼场地的土壤污染日常监测，防范核素扩散至周边农田与地下水；

技术要求：重点检测铀、钍、镭、氡等天然核素，氡浓度检出限 $\leq 0.5\text{Bq/m}^3$ ，支持连续监测；

应用流程：在矿山边界、排土场、尾矿库周边设置固定监测点（每 $500\text{m}^1$ 个），每月用氡专项检测仪测量土壤氡析出率；每季度采用半原位富集检测仪分析土壤中铀、钍、镭活度密度，评估污染扩散趋势；雨季增加监测频次（每月2次），防范雨水冲刷导致的核素迁移；

控制标准：参考《铀矿冶辐射防护和环境保护规定》（GB 23727-2009），土壤中铀含量 $\leq 0.05\%$ （质量分数），氡析出率 $\leq 0.74\text{Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

## （三）核事故应急土壤监测

应用场景：核泄漏、放射性物质泄漏等突发事件后的土壤污染快速响应，划定安全区域与污染范围；

技术要求：响应时间 $\leq 30$ 分钟/点，设备耐振动、抗恶劣环境，支持野外快速部署；

应用流程：

应急初期（0~24小时）：采用原位直接检测仪对事故核心区及周边 $10\text{km}$ 范围进行网格化筛查（每 $1\text{km}^1$ 个点），重点监测铯-137、碘-131等人工核素，快速划定高污染区（活度密度 $\geq 1000\text{Bq/kg}$ ）并设置隔离带；

应急中期（24~72小时）：在污染扩散路径设置移动监测点，用半原位富集检测仪精准测量核素浓度，结合气象数据预测污染羽流迁移方向；

应急后期（72小时后）：采用原位与半原位设备结合的方式，对污染区域进行分层监测（表层/深层），评估去污效果；

应急标准：参考《核事故应急响应导则》，土壤中铯-137活度密度 $\geq 1000\text{Bq/kg}$ 时需启动去污处理。

## （四）农业土壤放射性背景值调查

应用场景：耕地、果园等农业土壤的放射性背景值普查，保障农产品质量安全；

技术要求：低浓度探测灵敏度高（ $\alpha$ 核素 $\leq 0.01\text{Bq/kg}$ ），数据重复性好（相对偏差 $\leq 5\%$ ），采样代表性强；

应用流程：采用随机布点法（每 $10\text{km}^2$ 1个点），采集0~20cm耕层土壤样品，用半原位富集检测仪测量铀、钍、镭等天然核素及铯-137等人工核素；每年春秋各监测1次，连续3年建立区域背景值数据库；对超过背景值3倍的异常区域，追溯污染来源（如污水灌溉、化肥使用）；

安全标准：符合《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》（GB 15618-2018），农用地土壤总  $\alpha$  放射性  $\leq 500\text{Bq/kg}$ ，总  $\beta$  放射性  $\leq 1000\text{Bq/kg}$ 。

#### （五）民用建筑场地土壤氡检测

应用场景：住宅、学校等民用建筑选址阶段的土壤氡浓度检测，防范氡气超标危害人体健康；

技术要求：氡浓度测量精度  $\leq \pm 5\%$ ，支持连续监测，符合 GB 50325-2006 标准要求；

应用流程：在建筑场地内按  $50\text{m} \times 50\text{m}$  网格布置采样孔（孔深  $50\text{cm}$ ），采用氡专项检测仪进行现场测量，每个点位测量 20 分钟，取 3 次平行样平均值；若氡浓度  $\geq 200\text{Bq/m}^3$ ，需增加采样点密度并采取防氡措施（如土壤换填、通风处理）；

合格标准：依据《民用建筑工程室内环境污染控制规范》（GB 50325-2006），土壤氡浓度  $\leq 200\text{Bq/m}^3$ （一类民用建筑）。

### 四、土壤放射性现场检测技术性能优化与质量控制

#### （一）技术性能优化关键措施

##### 1. 探测灵敏度优化

富集技术升级：研发石墨烯基复合吸附材料与高选择性功能核酸探针，提升铀、钍等核素的提取效率（ $\geq 90\%$ ）与富集倍数（可达 200 倍），降低检出限；

本底抑制技术：采用多层铅屏蔽（厚度  $15\sim 20\text{mm}$ ）与反符合屏蔽系统，扣除环境  $\gamma$  本底与宇宙射线干扰，使  $\alpha$  探测器本底计数率降低  $50\%$  以上；

信号放大技术：基于 DNA 网状纳米结构的信号扩增系统，通过核酸杂交循环反应放大荧光信号，实现痕量核素超灵敏检测。

##### 2. 抗干扰能力优化

基质干扰修正：建立土壤类型数据库（砂质土、黏质土、酸性土等），通过算法自动修正有机质、黏土矿物对探测效率的影响，复杂基质中测量误差  $\leq \pm 10\%$ ；

化学干扰消除：在提取液中添加掩蔽剂（如 EDTA、氟化物），消除铁、铝、钙等共存离子对核素吸附的干扰，提升富集选择性。

##### 3. 现场适应性优化

设备小型化：采用模块化设计，半原位富集检测仪重量降至  $15\text{kg}$  以下，配备便携背包与折叠操作台，适配山地、农田等复杂地形；

低功耗与续航提升：采用节能型探测器与太阳能辅助供电，便携式设备续航延长至 16 小时以上，氡专项检测仪支持连续工作  $\geq 24$  小时；

操作智能化：开发一键式预处理模块（自动加液、振荡、过滤），搭载 AI 核素

识别算法，非专业人员经简单培训即可操作，减少人为误差。

## （二）现场监测质量控制要求

### 1. 设备校准与维护

日常校准：每次监测前用标准源（铯 - 137、钷 - 239）进行效率校准， $\gamma$  探测器能量分辨率偏差 $\leq \pm 0.5\%$ ， $\alpha$  探测器探测效率偏差 $\leq \pm 3\%$ ；

定期检定：每年送法定计量机构检定 1 次，核心性能参数（检出限、测量精度）需符合《放射性核素活度测量 通用方法》（GB/T 11713-2015）；

维护保养：每次使用后清洁探测器窗口与采样部件，长期存放时需定期充电（每 3 个月 1 次），避免潮湿环境导致设备故障。

### 2. 样品采集质量控制

采样代表性：表层土壤采用五点混合采样法（每点采样 $\geq 50\text{g}$ ，混合后取 200g），深层土壤通过钻孔分层采样（每 20cm 1 层），记录采样深度、土壤类型、含水率等参数；

样品预处理：采样后立即去除石块、植物残体等杂质，过 2mm 筛，按标准方法调节含水率（10%~15%），避免核素挥发或吸附损失；

平行样与空白样：每批样品（ $\leq 20$  个）设置 1 个空白样（未污染土壤）与 2 个平行样，平行样相对偏差 $\leq \pm 10\%$ ，空白样测量值需低于检出限。

### 3. 数据质量控制

本底扣除：每个监测区域设置 3 个本底监测点（远离污染源），取平均值作为本底计数率，确保净计数率准确性；

数据验证：对疑似污染样品，采用两种不同原理设备（如原位检测仪与富集检测仪）进行比对，相对偏差 $\leq \pm 15\%$ ；

数据记录与追溯：完整记录设备型号、校准数据、采样信息、测量参数，数据存储保留原始能谱图与计数曲线，支持后续追溯核查。

## 第五节 应急监测技术与装备

### 一、应急监测核心技术体系与创新原理

#### （一）多核素快速识别技术（应急筛查核心）

应急场景下核素类型复杂（如核事故可能伴随铯 - 137、碘 - 131、钷 - 239 等人工核素与铀、钍天然核素共存），需突破“快速识别与低误判”技术瓶颈：

AI 增强型能谱解析技术：基于深度学习算法构建核素特征能谱数据库（涵盖 60 + 应急关键核素），通过便携式  $\gamma$  探测器获取的原始能谱，自动扣除环境本底与土壤

基质干扰峰，精准识别特征能量峰——如碘-131的364keV、铯-137的59.5keV，识别响应时间 $\leq 5$ 分钟，核素识别准确率 $\geq 98\%$ ，解决传统能谱分析“弱峰淹没、误判率高”问题；

129I快速检测技术：针对核裂变特征核素129I（半衰期 $1.57 \times 10^7$ 年），采用无化学制样加速器质谱法，直接测定土壤样品中129I活度，分析时间由传统方法的7天缩短至1小时，检出限低至 $0.1 \mu\text{Bq/g}$ ，统计误差 $\leq 5\%$ ，为核事故溯源与污染扩散评估提供关键技术支撑；

$\alpha/\beta/\gamma$ 多道同步探测技术：集成小型化CdZnTe半导体探测器（ $\gamma$ 道）、金硅面垒探测器（ $\alpha$ 道）、薄窗正比计数器（ $\beta$ 道），通过同一采样单元实现多核素同步探测，无需更换探测模块，适配应急现场“快速筛查-精准识别”一体化需求，如同时检测土壤中 $\alpha$ 发射体（铀、钍）、 $\beta$ 发射体（锶-90）、 $\gamma$ 发射体（铯-137）。

## （二）立体化污染边界划定技术

应急监测需快速明确污染范围与浓度梯度，突破“单点测量代表性不足、复杂地形覆盖难”局限：

车载巡测-无人机航测协同技术：车载巡测系统搭载高灵敏度 $\gamma$ 谱仪（NaI(Tl)晶体体积 $5 \times 5$ 英寸）与GPS定位模块，沿预设路线（间距500m）快速扫描表层土壤 $\gamma$ 剂量率，数据实时传输至指挥平台；无人机辐射监测系统（如加拿大RS-500型）搭载小型化 $\gamma$ 探测器，飞行高度50~100m，覆盖车载无法抵达的山地、水域周边，实现“地面精准测量+空中全域覆盖”，1小时内完成 $10\text{km}^2$ 污染范围初步划定；

深层土壤快速探测技术：采用模块化钻孔-探测一体化设备，通过液压驱动将探测探针（直径20mm）插入土壤深层（最大深度3m），探针内置 $\gamma$ 探测器与温度/湿度传感器，实时测量不同深度核素活度与土壤环境参数，解决应急场景下深层污染“看不见、测不准”问题，单孔探测时间 $\leq 30$ 分钟；

污染羽流动态追踪技术：结合土壤含水率、渗透率数据与气象模型，通过移动监测点（每2km设置1个）连续测量核素浓度变化，利用时空插值算法预测污染羽流迁移方向与速度，为应急处置提供动态预警。

## （三）高风险环境适应性技术

应急现场可能面临高辐射剂量、极端气候（高温/暴雨）、复杂地形（泥泞/山地）等恶劣条件，技术体系需具备强环境适配能力：

高辐射耐受技术：探测器采用铅屏蔽层（厚度20mm）与抗辐射电子元件，可在剂量率 $\leq 100\text{mSv/h}$ 的高污染区域连续工作 $\geq 4$ 小时，核心部件（如探测器晶体、信号处理器）辐射损伤阈值 $\geq 10^5\text{Gy}$ ，避免设备失效；

极端环境防护技术：设备防护等级达IP67，耐温范围-20~60℃，相对湿度适应



0~100%(支持冷凝环境工作),配备防滑防震外壳与便携式电池组(续航 $\geq 12$ 小时),适配暴雨、沙尘、山地等复杂场景;

无接触采样探测技术:针对高污染区域或危险地形,采用远程操控采样机械臂(有效距离 10m)与激光诱导击穿光谱(LIBS)技术,无需人员近距离接触土壤,通过激光激发土壤等离子体,快速分析核素组成,响应时间 $\leq 10$ 分钟,降低人员辐射暴露风险。

## 二、应急监测核心装备类型与技术参数

应急监测装备按“功能定位-部署方式”分为四大类,形成“快速筛查-精准测量-全域覆盖-应急保障”的装备矩阵:

### (一) 便携式应急快速筛查仪(单兵部署型)

核心功能:单兵携带、即时响应,适用于事故初期核心区与周边区域快速筛查,识别高污染点位;

关键技术参数:

探测系统:集成 $\gamma/\beta$ 双道探测器, $\gamma$ 道采用CdZnTe半导体探测器(能量分辨率 $\leq 6.5\% @ 662\text{keV}$ ), $\beta$ 道采用薄窗塑料闪烁体探测器(探测效率 $\geq 45\% @ 0.5\text{MeV}$ );

测量性能: $\gamma$ 剂量率测量范围 $0.01\mu\text{Sv/h} \sim 100\text{mSv/h}$ ,核素识别时间 $\leq 3$ 分钟,支持铯-137、碘-131、铀-238等20+应急核素自动识别;

操作特性:重量 $\leq 3\text{kg}$ ,单手可持握,配备中文语音提示与触控屏,支持一键启动测量,数据自动存储( $\geq 10000$ 组)与蓝牙传输;

环境适应性:耐振动( $10\text{g}, 5 \sim 500\text{Hz}$ ),防水防尘,低温续航 $\geq 8$ 小时( $-20^\circ\text{C}$ 条件下)。

典型应用:核放射源丢失搜寻、核事故应急初期表层土筛查、人员撤离路线辐射监测。

### (二) 车载移动实验室(现场精准型)

核心功能:现场移动检测平台,集成样品预处理、多核素分析、数据传输功能,适用于事故中期精准定界与核素定量;

关键技术参数:

核心模块:

预处理单元:自动土壤消解仪(处理量 $5 \sim 50\text{g}$ /批次,消解时间 $\leq 20$ 分钟)、螯合树脂富集柱(铀/钍提取效率 $\geq 90\%$ );

探测单元:小型电制冷HPGe探测器(能量分辨率 $\leq 4\text{keV} @ 1332\text{keV}$ )、 $\alpha/\beta$ 低本底计数器(本底计数率 $\alpha \leq 0.02\text{cpm}$ 、 $\beta \leq 0.2\text{cpm}$ );

数据传输:支持4G/5G与卫星通信,测量数据实时上传至应急指挥平台,可远程

调用能谱图与原始数据；

测量性能： $\alpha$  核素检出限 $\leq 0.05\text{Bq/kg}$ ， $\beta/\gamma$  核素检出限 $\leq 0.1\text{Bq/kg}$ ，测量相对误差 $\leq \pm 8\%$ ；

装备配置：搭载车载发电机、铅防护操作舱、样品存储箱，整车重量 $\leq 5$  吨，可在非铺装路面行驶。

典型应用：核设施泄漏事故现场精准测量、污染边界细化划定、去污效果即时评估。

### （三）立体化监测装备（全域覆盖型）

#### 1. 无人机辐射监测系统：

核心功能：空中全域快速扫描，覆盖地面设备难以抵达区域，实现污染范围可视化；

关键参数：搭载小型化 NaI (Tl) 探测器（晶体体积  $2 \times 2$  英寸）， $\gamma$  剂量率测量范围  $0.1\mu\text{Sv/h} \sim 10\text{mSv/h}$ ，飞行速度 $\leq 60\text{km/h}$ ，续航时间 $\geq 90$  分钟，数据与 GIS 系统实时叠加，生成污染浓度分布图；

#### 2. 惰性气体应急监测系统：

核心功能：同步监测土壤与大气中放射性惰性气体（氡 - 131m、氡 - 133 等），辅助判断核污染释放源强；

关键参数：采用瑞典 SAUNA 或法国 SPALAX 系统，采样流量  $1 \sim 5\text{L/min}$ ，氡同位素检出限 $\leq 0.1\text{mBq/m}^3$ ，分析时间 $\leq 30$  分钟，适用于核事故气态污染物与土壤挥发性核素协同监测；

#### 3. 智能机器人监测系统：

核心功能：高辐射区域无人化监测，避免人员暴露，适用于核设施退役事故、高浓度污染区探测；

关键参数：搭载 GM 管探测器与  $\gamma$  能谱仪，最大行驶速度  $3\text{km/h}$ ，爬坡角度 $\leq 30^\circ$ ，遥控距离 $\geq 500\text{m}$ ，可自主避障与路径规划，支持土壤采样与原位测量一体化操作。

### （四）应急保障配套装备（支撑型）

#### 1. 土壤氡在线自动监测系统：

核心功能：连续监测土壤孔隙水中氡活度浓度，适用于核电厂泄漏等事故的长期应急监测；

关键参数：采用 AI 自动化流程（采样 - 蒸馏 - 测量），测量范围  $1 \sim 10^5\text{Bq/L}$ ，检出限 $\leq 0.5\text{Bq/L}$ ，每天自动生成 1 组数据，支持远程校准与故障报警，已在秦山核电等场景应用；

## 2. 辐射防护与采样装备：

核心配置：便携式辐射剂量报警仪（响应时间 $\leq 1$  秒，测量范围  $0.01\mu\text{Sv/h}\sim 10\text{Sv/h}$ ）、防辐射防护服（防护当量 $\geq 0.35\text{mmPb}$ ）、远程操控采样器（采样深度  $0\sim 2\text{m}$ ）；

功能特点：轻量化设计（防护服重量 $\leq 8\text{kg}$ ），采样器支持一键取样与样品密封，避免二次污染。

## 三、应急监测实战应用与典型案例

### （一）核事故应急监测实战流程

应急监测遵循“分级响应、动态调整”原则，分为三个阶段：

应急启动阶段（ $0\sim 6$  小时）：部署便携式筛查仪与无人机系统，对事故核心区及周边  $10\text{km}$  范围进行网格化筛查（地面网格间距  $500\text{m}$ ，空中覆盖全域），快速识别高污染区（ $\gamma$  剂量率 $\geq 1\text{mSv/h}$ ），划定隔离带；同步启动惰性气体监测系统，追踪污染扩散趋势；

精准定界阶段（ $6\sim 24$  小时）：在高污染区周边加密监测点（间距  $100\sim 200\text{m}$ ），部署车载移动实验室与深层探测装备，分析核素组成（如铯 - 137、碘 - 131 活度密度）与污染深度，绘制污染浓度梯度图；利用智能机器人进入高辐射区域（剂量率 $\geq 10\text{mSv/h}$ ）完成定点测量；

动态追踪阶段（ $24$  小时后）：设置固定监测点（每  $1\text{km}^1$  个）与移动巡测路线，采用在线监测系统与便携式设备结合的方式，持续追踪污染羽流迁移与浓度变化，评估去污处置效果，直至污染浓度降至安全阈值。

### （二）典型案例应用解析

案例 1：日本福岛核事故应急监测：生态环境部辐射环境监测技术中心部署车载移动实验室、无人机系统与惰性气体监测设备，在东北边境开展应急监测，通过  $\gamma$  能谱分析快速识别铯 - 137、碘 - 131 等核素，利用无人机绘制污染扩散示意图，为我国边境防护决策提供数据支撑，监测响应时间 $\leq 24$  小时；

案例 2：朝鲜核试验应急监测：采用“地面车载巡测 + 空中无人机覆盖 + 惰性气体追踪”的立体化方案，在东北边境区域构建监测网络，通过  $129\text{I}$  快速检测技术追溯核试验特征核素，精准评估土壤放射性污染风险，累计完成 6 次核试验应急监测任务，数据准确率达 99% 以上；

案例 3：放射源丢失应急搜寻：利用便携式快速筛查仪与智能机器人系统，在丢失区域开展网格化搜寻，通过核素特征能谱识别目标放射源（如钴 - 60），结合 GPS 定位实现精准定位，搜寻效率较传统方法提升 3 倍，平均搜寻时间缩短至 4 小时以内。

## 四、应急监测技术装备发展趋势与挑战

### （一）核心发展趋势

微型化与集成化：基于导电 MOFs 等新型纳米材料，研发超小型探测器（体积 $\leq 10\text{cm}^3$ ），集成  $\alpha/\beta/\gamma$  氢多道探测功能，设备重量降至 1kg 以下，实现“单兵全域携带”；

智能化与自主化：融合 AI 核素识别、自主路径规划、远程操控技术，开发全自动应急监测机器人，可在无人工干预情况下完成采样、测量、数据传输全流程，适配极端危险环境；

多介质协同监测：突破“土壤 - 大气 - 水体”跨介质监测技术，集成土壤核素、大气惰性气体、地表水氢等多参数监测模块，实现污染全方位溯源与评估；

快速预处置技术升级：研发无试剂土壤预处理技术（如激光解吸 - 富集），缩短样品预处理时间至 5 分钟以内，提升低浓度核素快速检出能力。

### （二）现存核心挑战

低浓度核素快速检出难题：针对应急初期低浓度污染土壤，现有技术检出限仍需提升（如  $\alpha$  核素检出限需降至  $0.01\text{Bq/kg}$  以下），需突破新型富集材料与信号放大技术；

复杂基质干扰消除：土壤中高有机质、重金属共存等情况会影响核素探测准确性，需建立更精准的基质校正模型，适配不同土壤类型的应急监测需求；

极端环境可靠性提升：在高温（ $\geq 60^\circ\text{C}$ ）、强振动（ $\geq 20\text{g}$ ）等极端场景下，设备稳定性仍需优化，核心部件（如探测器、电池）的环境耐受性需进一步增强；

数据融合与共享机制：不同装备（无人机 / 车载 / 在线系统）的数据格式不统一，需建立标准化数据接口与应急监测平台，实现多源数据实时融合与协同分析。





## 第七章 实验室分析测试技术

### 第一节 放射性核素分析技术

#### 一、放射性核素实验室分析核心原理与技术特点

##### (一) 核心分析原理

放射性核素实验室分析的本质是“样品预处理 - 核素分离富集 - 辐射信号探测 - 数据定量”的标准化流程，核心原理围绕核素衰变特性与探测技术的适配性展开：

样品预处理原理：通过消解、提取、分离等手段破坏样品基质（如土壤有机质、水体盐分），释放目标核素并去除干扰组分——如土壤样品采用微波消解（硝酸 - 氢氟酸 - 高氯酸体系）破坏晶格结构，水体样品采用固相萃取富集低浓度核素，确保核素与探测介质充分接触；

核素分离富集原理：基于核素与干扰组分在物理化学性质上的差异（如离子半径、化学价态、吸附特性），采用色谱分离（离子交换色谱、凝胶渗透色谱）、萃取分离（溶剂萃取、固相萃取）、共沉淀分离等技术，实现目标核素与干扰组分的高效分离，富集倍数可达  $10^2 \sim 10^4$  倍，提升低浓度核素检出能力；

辐射探测原理：

$\gamma$  能谱分析：以高纯度锗（HPGe）探测器为核心，利用  $\gamma$  射线的特征能量（如铯 - 137 为 662keV、钴 - 60 为 1173keV/1332keV）实现核素定性，通过特征峰面积与标准源校准曲线比对，计算核素活度，能量分辨率可达  $1.8\text{keV}@1332\text{keV}$ ，是实验室  $\gamma$  核素分析的金标准；

$\alpha$  能谱分析：采用金硅面垒半导体探测器或离子注入型探测器，针对  $\alpha$  发射核素（铀、钍、镭、镭），通过核素特征  $\alpha$  能量（如铀 - 238 为 4.196MeV、钍 - 232 为 5.157MeV）定性，峰面积定量，探测效率  $\geq 25\%$ ，本底计数率  $\leq 0.01\text{cpm}$ ；

$\beta$  计数分析：采用液体闪烁计数器（LSC）或低本底正比计数器，液体闪烁计数器通过核素衰变释放的  $\beta$  射线激发闪烁液产生荧光，实现低能量  $\beta$  核素（如氚、碳 - 14、锶 - 90）的高灵敏度检测，探测效率  $\geq 90\%$ ，本底计数率  $\leq 0.5\text{cpm}$ ；

中子活化分析（NAA）：利用中子照射样品，使目标核素发生核反应生成放射性核素，通过测量新生核素的特征辐射实现定量，适用于痕量核素（如铀、钍、钍）的超灵敏分析，检出限可达  $\text{ng/g}$  级别；

定量校准原理：采用外标法、内标法或标准加入法构建校准曲线，通过测量已知活度的标准物质（如 GBW04401 铀标准溶液、GBW04411 铯 - 137 标准土壤），建立计数率与核素活度的线性关系，定量误差  $\leq \pm 5\%$ 。

## （二）核心技术特点

高灵敏度与低检出限：通过分离富集技术与低本底探测系统， $\alpha$  核素检出限可达 0.001~0.01Bq/kg， $\beta$  核素（如氚）检出限  $\leq 0.1\text{Bq/L}$ ， $\gamma$  核素检出限  $\leq 0.01\text{Bq/kg}$ ，远优于现场监测技术，适配环境背景值与痕量污染分析；

高准确度与精密度：采用标准化预处理流程与校准体系，测量相对标准偏差（RSD） $\leq 5\%$ （ $\gamma$  核素）、 $\leq 8\%$ （ $\alpha/\beta$  核素），与国际标准物质比对结果相对误差  $\leq \pm 10\%$ ，数据权威性高；

多核素覆盖能力：可同时分析 20 + 种核素（如铀 - 238 系、钍 - 232 系、铯 - 137、锶 - 90、钚 - 239、碘 - 131），支持  $\alpha/\beta/\gamma$  中子发射体的全类型核素分析，适配复杂污染场景；

标准化与可追溯性：遵循 GB/T、ISO、IAEA 等国际国内标准方法（如 GB/T 11713-2015《放射性核素活度测量 通用方法》），样品处理、仪器校准、数据记录全程可追溯，满足法规监测与仲裁分析需求。

## 二、放射性核素实验室关键分析方法与技术参数

根据核素衰变类型与分析目标，实验室分析方法分为  $\gamma$  能谱分析、 $\alpha$  能谱分析、 $\beta$  计数分析、中子活化分析四大类，各类方法技术特性与应用场景形成互补：

### （一） $\gamma$ 能谱分析方法（ $\gamma$ 核素专属分析）

核心功能：直接测量样品中  $\gamma$  发射核素的定性与定量，无需复杂分离富集，适用于土壤、沉积物、水体等样品中铯 - 137、钴 - 60、钾 - 40 等核素的快速分析；

关键技术参数：

探测器类型：电制冷 HPGe 探测器（相对探测效率 30%~70%）或同轴型 HPGe 探测器，能量分辨率  $\leq 1.8\text{keV}@1332\text{keV}$ （钴 - 60）、 $\leq 2.5\text{keV}@662\text{keV}$ （铯 - 137）；

能量范围：30keV~3MeV，覆盖天然与人工  $\gamma$  核素特征能量；

测量时间：样品测量时间 30 分钟~24 小时（低浓度样品需延长测量时间），核素识别时间  $\leq 10$  分钟；

定量范围：0.01~10\*Bq/kg（或 Bq/L），相对误差  $\leq \pm 5\%$ ；

样品制备：固体样品制成 Marinelli 杯样品（体积 1~2L）或压片样品（重量 100~500g），液体样品直接装入标准样品瓶（体积 500mL~1L），无需化学预处理。<sup>①</sup>

① 关玉春, 吴宇峰, 王艳丽. 典型环境介质中新污染物分析测试技术 [M]. 天津大学出版社: 202407: 262.

核心优势与局限：优势是分析速度快、操作简便、无试剂消耗；局限是无法检测无 $\gamma$ 射线或 $\gamma$ 射线分支比极低的核素（如氡、碳-14、铯-90）。

### （二） $\alpha$ 能谱分析方法（ $\alpha$ 核素精准分析）

核心功能：针对 $\alpha$ 发射核素（铀、钍、钷、镭、钋）的高灵敏度分析，适用于环境样品中痕量 $\alpha$ 核素的定量，是核设施退役场地、放射性矿山污染评估的关键方法；

关键技术参数：

探测器类型：金硅面垒半导体探测器（有效面积 $\geq 450\text{mm}^2$ ）或离子注入型探测器，能量分辨率 $\leq 15\text{keV}@5.486\text{MeV}$ （钋-210）；

探测效率： $\geq 25\%$ （ $2\pi$ 几何条件），本底计数率 $\leq 0.01\text{cpm}$ ；

样品制备：需通过化学预处理（消解、分离、纯化）制备薄源样品（厚度 $\leq 1\text{mg}/\text{cm}^2$ ），避免 $\alpha$ 射线自吸收，常用方法包括电沉积法、真空镀膜法、沉淀法；

定量范围： $0.001\sim 100\text{Bq}/\text{kg}$ （或 $\text{Bq}/\text{L}$ ），相对误差 $\leq \pm 8\%$ ；

分析周期：单个样品预处理+测量周期为1~3天。

核心优势与局限：优势是 $\alpha$ 核素识别精准、检出限极低；局限是样品制备复杂、分析周期长、对操作人员技能要求高。

### （三） $\beta$ 计数分析方法（ $\beta$ 核素灵敏分析）

核心功能：针对 $\beta$ 发射核素（氚、碳-14、铯-90、钷-204）的高灵敏度分析，适用于水体、土壤、生物样品中低能量 $\beta$ 核素的定量；

关键技术参数：

探测器类型：

液体闪烁计数器（LSC）：适配低能量 $\beta$ 核素（如氚，最大能量 $18.6\text{keV}$ ），探测效率 $\geq 90\%$ （氚）、 $\geq 95\%$ （碳-14），本底计数率 $\leq 0.5\text{cpm}$ ；

低本底正比计数器：适配中高能量 $\beta$ 核素（如铯-90，最大能量 $546\text{keV}$ ），探测效率 $\geq 40\%$ ，本底计数率 $\leq 0.1\text{cpm}$ ；

样品制备：

LSC分析：液体样品直接与闪烁液混合（体积比1:2），固体样品需消解后转化为液体状态，避免淬灭效应；

正比计数：样品制成薄源（厚度 $\leq 2\text{mg}/\text{cm}^2$ ）或直接测量滤纸样品（如气溶胶滤膜）；定量范围： $0.1\sim 10^3\text{Bq}/\text{kg}$ （或 $\text{Bq}/\text{L}$ ），相对误差 $\leq \pm 7\%$ ；

分析周期：单个样品预处理+测量周期为4~24小时。

核心优势与局限：优势是低能量 $\beta$ 核素探测灵敏度高、适配多种样品类型；局限是需严格控制淬灭效应（LSC）、易受 $\gamma$ 射线干扰（需屏蔽）。

#### （四）中子活化分析方法（痕量核素超灵敏分析）

核心功能：针对痕量 / 超痕量核素（如铀、钍、钷、镎）的超灵敏分析，适用于环境背景值调查、核事故溯源等高端需求；

关键技术参数：

中子源类型：反应堆中子源（热中子通量  $10^{12} \sim 10^{14} \text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ）或加速器中子源，照射时间 1~24 小时；

探测系统：HPGe 探测器与多道分析器，能量分辨率  $\leq 2 \text{keV}@1332 \text{keV}$ ；

检出限：ng/g~pg/g 级别（如铀检出限  $\leq 0.1 \text{ng/g}$ ，钷检出限  $\leq 0.01 \text{ng/g}$ ）；

定量范围： $10^{-3} \sim 10^2 \text{Bq/kg}$ ，相对误差  $\leq \pm 10\%$ ；

样品制备：简单预处理（干燥、研磨、封装），无需复杂化学分离，避免样品污染。

核心优势与局限：优势是检出限极低、样品用量少（10~100mg）、无试剂污染；局限是依赖大型中子源设施（如反应堆）、分析成本高、周期长（1~7 天）。

### 三、放射性核素实验室分析典型应用场景

#### （一）环境放射性背景值调查与常规监测

应用场景：地表水、地下水、土壤、沉积物、大气气溶胶等环境介质的放射性背景值普查，掌握天然核素（铀 - 238、钍 - 232、钾 - 40）与人工核素（铯 - 137）的本底水平；技术要求：低检出限（ $\alpha$  核素  $\leq 0.01 \text{Bq/kg}$ ， $\gamma$  核素  $\leq 0.01 \text{Bq/kg}$ ）、数据重复性好（ $\text{RSD} \leq 5\%$ ）、多核素覆盖；

应用流程：采集环境样品（土壤样品采集 0~20cm 表层土，水体样品采集 1L），按标准方法预处理（土壤微波消解、水体固相萃取），采用  $\gamma$  能谱分析快速筛查  $\gamma$  核素， $\alpha$  能谱分析铀、钍、镭， $\beta$  计数分析氡、碳 - 14；每批样品设置 2 个空白样、2 个平行样与 1 个标准参考物质，确保数据准确性；

合规依据：监测结果需符合《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》（GB 15618-2018）、《生活饮用水卫生标准》（GB 5749-2022）等标准，为环境质量评估提供基准数据。

#### （二）核设施合规排放与退役场地监测

应用场景：核电厂、核燃料加工厂、放射性废物处置场的废水、废气、固体废物排放监测，以及核设施退役场地土壤、地下水污染评估；

技术要求：多核素精准分析（覆盖铀、钍、铯 - 137、钴 - 60、钷 - 239 等）、测量相对误差  $\leq \pm 8\%$ 、数据可追溯；

应用流程：废水样品采用离子交换色谱分离铀、钍， $\gamma$  能谱分析铯 - 137、钴 - 60，液体闪烁计数器分析氡；固体废物（如放射性废物固化体）采用  $\gamma$  能谱分析  $\gamma$  核素，

$\alpha$  能谱分析钚、镅；退役场地土壤样品采用中子活化分析超痕量钚，明确污染范围与核素组成；分析结果需按《核电厂放射性液态流出物排放技术要求》（GB 14587-2011）等标准进行合规判定；

监测目标：确保核设施排放符合限值要求，退役场地污染修复后核素浓度低于风险管控值。

### （三）核事故应急溯源与污染评估

应用场景：核泄漏、放射性物质扩散等核事故的样品分析，实现污染核素溯源、浓度定量与扩散趋势评估；

技术要求：快速响应（分析周期 $\leq 24$ 小时）、高灵敏度（低浓度核素检出）、特征核素识别（如碘-131、铯-137、钚-239）；

应用流程：应急采集事故周边土壤、水体、气溶胶样品，采用 $\gamma$ 能谱分析快速识别特征核素（碘-131、铯-137）并定量；采用 $\alpha$ 能谱分析钚、铀等核素，追溯污染来源；采用液体闪烁计数器分析氡，评估水体污染风险；分析数据实时反馈至应急指挥平台，为污染范围划定与处置方案制定提供依据；

应急标准：参考《核事故应急响应导则》，结合核素毒性与暴露途径，评估人员受照剂量，指导应急处置。

### （四）放射性食品与农产品安全检测

应用场景：粮食、蔬菜、肉类、水产品等食品与农产品的放射性安全检测，保障食品安全；

技术要求：低检出限（ $\gamma$ 核素 $\leq 0.05\text{Bq/kg}$ ， $\alpha$ 核素 $\leq 0.01\text{Bq/kg}$ ）、样品前处理无污染；应用流程：食品样品经冷冻干燥、研磨、消解后，采用 $\gamma$ 能谱分析铯-137、钾-40等核素；采用 $\alpha$ 能谱分析钍、钍；采用液体闪烁计数器分析氡、碳-14；分析结果需符合《食品安全国家标准 食品中放射性核素限量》（GB 14882-2011），即食品中铯-137 $\leq 10\text{Bq/kg}$ ，总 $\alpha$ 放射性 $\leq 100\text{Bq/kg}$ ，总 $\beta$ 放射性 $\leq 1000\text{Bq/kg}$ ；

检测目标：防范放射性污染食品流入市场，保障公众饮食安全。

### （五）放射性核素科研与仲裁分析

应用场景：放射性核素迁移转化研究、标准物质研制、环境纠纷仲裁分析等高端需求；技术要求：超高灵敏度（检出限 $\leq 10^{-3}\text{Bq/kg}$ ）、数据准确度高（相对误差 $\leq \pm 5\%$ ）、方法可验证；

应用流程：采用中子活化分析或质谱联用技术（如 ICP-MS）分析痕量核素；通过国际比对实验（如 IAEA proficiency test）验证方法准确性；仲裁分析需采用两种不同原理的分析方法（如 $\alpha$ 能谱法与中子活化法）进行结果比对，相对偏差 $\leq \pm 10\%$ ；

应用价值：为科研工作提供精准数据，为环境纠纷提供权威仲裁依据。



## 四、放射性核素实验室分析质量控制与技术优化

### （一）质量控制核心要求

#### 1. 样品质量控制

采样质控：采样容器需经酸液浸泡（硝酸 5%）、去离子水冲洗、烘干处理，避免容器吸附核素；每批次样品设置 3 个空白样（实验室空白、采样空白、运输空白），空白值需低于检出限的 1/3；

预处理质控：采用标准化预处理流程，严格控制试剂纯度（优级纯或核纯），避免试剂污染；每批次样品设置 2 个平行样， $\alpha/\beta$  核素平行样相对偏差  $\leq \pm 10\%$ ， $\gamma$  核素  $\leq \pm 5\%$ ，确保预处理稳定性；

样品存储质控：样品需密封后置于阴凉干燥处存储，放射性样品存储时间遵循“最短必要原则”（一般  $\leq 7$  天），避免核素衰变导致结果偏差；易挥发核素（如碘-131）样品需低温（4℃）存储并尽快分析。

#### 2. 仪器质量控制

日常校准：每日分析前用标准源（如铯-137、钋-210）校准探测器能量分辨率与探测效率， $\gamma$  探测器能量漂移  $\leq \pm 0.5\text{keV}$ ， $\alpha$  探测器探测效率偏差  $\leq \pm 3\%$ ；

定期检定：每年送法定计量机构检定 1 次，核心参数（检出限、测量精度、能量分辨率）需符合《放射性核素活度测量 通用方法》（GB/T 11713-2015）要求；

期间核查：每分析 50 个样品或每 7 天进行 1 次期间核查，采用标准参考物质（如 GBW04402 钍标准溶液）验证仪器稳定性，测量结果相对误差  $\leq \pm 8\%$ ，否则需停机校准。

#### 3. 数据质量控制

本底扣除：测量样品前需测量探测器本底（测量时间  $\geq 30$  分钟），本底计数统计误差  $\leq 5\%$ ；样品净计数率 = 样品总计数率 - 本底计数率，若净计数率为负值，按未检出处理（记录为  $<$  检出限）；

校准曲线质控：校准曲线需包含 5 个以上浓度点（覆盖样品预期浓度范围），相关系数  $r \geq 0.995$ ；每批次样品分析时需插入 1 个中间浓度标准点，测量误差  $\leq \pm 5\%$ ；

方法验证：新建立的分析方法需通过检出限、精密度、准确度、加标回收率验证，加标回收率需在 80%~120%（ $\alpha$  核素 70%~130%），方法相对标准偏差（RSD） $\leq 8\%$ ；

数据审核：建立三级审核制度（分析人员自审、实验室主管复审、技术负责人终审），重点审核异常数据（如超出校准曲线范围、与平行样偏差过大），确保数据可靠。

#### 4. 人员与环境质控

人员资质：分析人员需持有辐射安全与防护培训合格证，熟练掌握样品预处理、

仪器操作、数据解析技能；每年参加不少于 24 学时的专项培训，内容包括方法标准更新、质量控制要求、应急处理等；

实验室环境：实验室需划分清洁区、样品预处理区、探测区，避免交叉污染；探测区需配备铅屏蔽室（屏蔽效果 $\geq 20\text{mmPb}$ ），环境本底剂量率 $\leq 0.2\mu\text{Sv/h}$ ；实验废液、固体废物需按放射性废物管理要求分类处置，避免环境污染。

## （二）技术优化关键措施

### 1. 样品预处理技术优化

快速消解技术：采用微波消解 - 紫外光协同消解技术，缩短土壤、食品样品消解时间（从 4~6 小时降至 1~2 小时），提高消解效率；开发绿色消解体系（如硝酸 - 过氧化氢体系），替代高污染的氢氟酸 - 高氯酸体系，减少二次污染；

高效分离富集技术：研发 MOFs（金属有机框架）材料与功能化石墨烯吸附剂，提升铀、钍、钷等核素的吸附选择性与富集倍数（可达 500 倍以上），缩短分离时间；采用微流控芯片技术实现核素快速分离（分离时间 $\leq 30$  分钟），降低样品与试剂用量（仅为传统方法的 1/10）。

### 2. 探测技术优化

探测器性能升级：研发大体积 HPGe 探测器（相对探测效率 $\geq 100\%$ ）与高分辨率  $\alpha$  半导体探测器（能量分辨率 $\leq 10\text{keV}@5.486\text{MeV}$ ），提升探测效率与核素识别精度；

低本底技术强化：采用被动屏蔽（多层铅 + 聚乙烯）与主动反符合屏蔽（塑料闪烁体探测器阵列）结合的方式，将  $\alpha$  探测器本底计数率降至 0.005cpm 以下， $\gamma$  探测器本底剂量率降至 0.01 $\mu\text{Sv/h}$  以下；

信号处理技术：基于深度学习算法开发能谱解析软件，自动识别重叠特征峰（如铀 - 238 系 186keV 与镭 - 226 186keV 峰），提高复杂样品中核素定量准确性。

### 3. 分析流程智能化优化

自动化分析系统：开发样品预处理 - 探测一体化自动化系统，实现自动加液、消解、分离、进样、测量全流程自动化，减少人为操作误差，提高分析效率（每批次可处理 30~50 个样品）；

数据解析智能化：集成核素数据库（包含 100 + 种放射性核素的衰变特性、特征能量）与 AI 数据解析模型，自动匹配能谱特征峰、修正基质干扰、计算核素活度，数据解析时间从 30 分钟缩短至 5 分钟以内。

## 第二节 能谱分析技术应用

### 一、能谱分析技术核心应用原理与场景适配逻辑

#### （一）核心应用原理深化

**γ 能谱分析应用原理：**基于 γ 射线与物质相互作用的光电效应、康普顿散射、电子对生成效应，HPGe 探测器将核素衰变释放的 γ 射线转化为电脉冲信号，通过多道分析器将脉冲信号按能量分级，形成特征能谱图。应用核心在于“能量 - 核素”的精准匹配——利用核素独有的特征能量峰（如钾 - 40 为 1460.8keV、镭 - 226 为 186.2keV）实现定性，通过特征峰净面积与标准源校准曲线的比对实现定量，同时需修正样品自吸收、探测器效率、环境本底等因素对峰面积的影响，确保定量准确性。

**α 能谱分析应用原理：**α 射线具有高电离能、短射程特性，金硅面垒探测器通过捕获 α 粒子撞击探测器表面产生的电子 - 空穴对，转化为电信号并形成能谱。应用核心在于“薄源制备 - 能量分辨率控制”——通过化学预处理将目标核素从样品基质中分离并制备成厚度 ≤ 1mg/cm<sup>2</sup> 的薄源，避免 α 射线自吸收导致的峰形展宽，利用 α 核素特征能量（如钚 - 239 为 5.157MeV、钋 - 210 为 5.486MeV）实现定性，峰面积定量需结合富集效率、探测效率进行修正，适配痕量 α 核素分析需求。

#### （二）场景适配逻辑

能谱分析技术的场景适配需遵循“核素类型 - 样品介质 - 浓度水平 - 分析目标”四维匹配原则：

**核素类型适配：**γ 能谱聚焦 γ 发射核素（铯 - 137、钴 - 60、天然铀钍系核素），α 能谱针对 α 发射核素（铀、钍、镭、镭、钋），需根据目标核素衰变类型选择对应技术；

**样品介质适配：**固体样品（土壤、沉积物、食品）需考虑样品形态（压片 / Marinelli 杯）对探测效率的影响，液体样品（水、废水）需选择适配的样品容器（标准样品瓶 / 定制 Marinelli 杯），气体样品（气溶胶滤膜）需优化样品固定方式避免脱落；

**浓度水平适配：**高浓度样品（核设施废水、污染土壤）可缩短 γ 能谱测量时间（30~60 分钟），低浓度样品（环境背景值、饮用水）需延长测量时间（4~24 小时）并结合富集技术（α 能谱）提升检出能力；

**分析目标适配：**快速筛查目标优先选择 γ 能谱（无需预处理），痕量精准定量目标优先选择 α 能谱（结合分离富集），多核素协同分析需组合两种技术实现全覆盖。

## 二、 $\gamma$ 能谱分析技术典型应用场景与实操要点

### （一）环境介质 $\gamma$ 核素常规监测（土壤 / 水体 / 气溶胶）

应用场景：区域环境放射性背景值普查、常规环境质量监测，重点分析天然核素（钾 - 40、铀 - 238 系、钍 - 232 系）与人工核素（铯 - 137），评估环境放射性污染状况；

#### 1. 技术适配方案

探测器选择：电制冷 HPGe 探测器（相对探测效率 50%~70%），能量分辨率 $\leq 2.0\text{keV}@662\text{keV}$ ，确保低能量  $\gamma$  核素（如镭 - 226 186.2keV）的精准识别；

#### 2. 样品制备

土壤 / 沉积物：采集 0~20cm 表层样品，去除石块、植物残体，干燥、研磨过 2mm 筛，装入 1L Marinelli 杯压实，样品密度控制在  $1.2\sim 1.5\text{g/cm}^3$ ，减少自吸收误差；

水体：采集 1L 地表水 / 地下水样品，直接装入 1L 液体 Marinelli 杯，若样品浊度较高（ $> 10\text{NTU}$ ），需静置沉淀后取上清液测量；

气溶胶：将采样后的滤膜（直径 47mm）固定在样品架上，确保滤膜平整无褶皱，距探测器窗口距离 $\leq 5\text{mm}$ ；

测量参数：能量范围 30keV~3MeV，测量时间 4~8 小时（背景值样品），核素识别采用实验室自建核素数据库（包含 30+ 种环境常见核素）；

#### 3. 实操要点

样品自吸收修正：根据样品密度、厚度建立自吸收修正模型，对于 Marinelli 杯样品，铀 - 238 系 186keV  $\gamma$  射线的自吸收修正系数为 0.85~0.95，钾 - 40 1460keV  $\gamma$  射线修正系数为 0.98~1.0；

本底扣除：在样品测量区域附近设置空白 Marinelli 杯（装入去离子水 / 干净土壤），测量时间与样品一致，确保本底计数统计误差 $\leq 5\%$ ；

数据验证：每批样品插入 1 个环境标准参考物质（如 GBW04411 铯 - 137 标准土壤），测量结果相对误差 $\leq \pm 5\%$ ；

应用效果：单批次可处理 50~80 个样品，分析周期 $\leq 24$  小时， $\gamma$  核素检出限 $\leq 0.01\text{Bq/kg}$ （土壤）、 $\leq 0.05\text{Bq/L}$ （水体），满足《环境放射性监测技术规范》（HJ/T 61-2001）要求。

### （二）核设施放射性流出物监测（废水 / 固体废物）

应用场景：核电厂、核燃料加工厂的废水排放口监测，放射性固体废物（如废树脂、污染土壤）处置前核素活度检测，确保排放符合国家标准；

#### 1. 技术适配方案：

探测器选择：同轴型 HPGe 探测器（相对探测效率 $\geq 70\%$ ），能量分辨率 $\leq 1.8\text{keV}@1332\text{keV}$ ，提升高能量  $\gamma$  核素（如钴 - 60 1332keV）的探测效率；

## 2. 样品制备:

废水: 采集 2L 废水样品, 经  $0.45\mu\text{m}$  滤膜过滤去除悬浮物, 装入 2L Marinelli 杯, 加入 1mL 硝酸 (1:1) 固定核素, 避免吸附损失;

固体废物: 将污染土壤 / 废树脂破碎至粒径  $\leq 5\text{mm}$ , 均匀装入 1L Marinelli 杯, 样品重量  $\geq 800\text{g}$ , 确保样品与探测器充分耦合;

测量参数: 能量范围  $30\text{keV}\sim 3\text{MeV}$ , 测量时间 60~120 分钟 (废水)、2~4 小时 (固体废物), 重点监测核素包括铯 - 137、钴 - 60、碘 - 131、铀 - 238、钍 - 232;

## 3. 实操要点

干扰峰识别与扣除: 核设施废水样品中可能存在多种核素共存, 需通过能谱解析软件识别重叠峰 (如铯 - 137  $662\text{keV}$  与钡 - 137m  $661\text{keV}$ ), 采用峰形拟合算法分离特征峰, 确保定量准确性;

探测效率校准: 采用与样品形态一致的标准源 (液体标准源 / 固体标准源) 进行效率校准, 废水样品效率校准误差  $\leq \pm 3\%$ , 固体废物  $\leq \pm 5\%$ ;

数据报告: 需明确标注核素活度浓度、测量不确定度 (扩展不确定度  $k=2$ )、分析方法标准编号, 满足合规监测数据上报要求;

应用效果: 废水样品分析周期  $\leq 3$  小时, 固体废物  $\leq 6$  小时, 测量相对误差  $\leq \pm 4\%$ , 符合《核电厂放射性液态流出物排放技术要求》(GB 14587-2011), 可实现核设施排放的实时监管。

### (三) 核事故应急 $\gamma$ 核素快速分析 (土壤 / 水体 / 食品)

应用场景: 核泄漏、放射性物质扩散等应急事件中, 快速识别污染核素、定量浓度水平, 为应急处置提供数据支撑;

#### 1. 技术适配方案

探测器选择: 便携式 HPGc 探测器 (相对探测效率  $30\%\sim 50\%$ ), 配备电池组与快速分析软件, 支持现场 / 实验室快速部署;

样品制备: 简化预处理流程 —— 土壤样品直接装入 500mL Marinelli 杯 (无需干燥研磨), 水体样品采集 500mL 直接测量, 食品样品 (蔬菜、粮食) 切碎后装入样品盒压实; 测量参数: 能量范围  $50\text{keV}\sim 3\text{MeV}$ , 测量时间 15~30 分钟 / 样, 重点识别应急特征核素 (碘 - 131  $364\text{keV}$ 、铯 - 137  $662\text{keV}$ 、钴 - 60  $1173/1332\text{keV}$ );

#### 2. 实操要点

快速校准: 采用内置标准源 (铯 - 137) 进行现场快速校准, 能量分辨率偏差  $\leq \pm 0.5\text{keV}$ , 确保核素识别准确性;

数据优先级: 优先输出特征核素浓度 (碘 - 131、铯 - 137) 与总  $\gamma$  剂量率, 后续补充其他核素分析结果, 满足应急决策时效性需求;



质量控制：每分析 10 个样品插入 1 个平行样，相对偏差 $\leq \pm 10\%$ ，避免应急状态下操作误差；

应用效果：单样品分析周期 $\leq 30$  分钟，核素识别准确率 $\geq 98\%$ ，可在事故发生后 24 小时内完成 100+ 样品分析，为污染范围划定、人员疏散提供关键数据。

### 三、 $\alpha$ 能谱分析技术典型应用场景与实操要点

#### （一）放射性矿山 / 退役场地 $\alpha$ 核素污染评估（土壤 / 地下水）

应用场景：铀矿、钍矿开采场地，核设施退役场地的土壤、地下水污染调查，重点分析铀 - 238、铀 - 234、钍 - 232、镭 - 226 等  $\alpha$  核素，明确污染范围与程度；

##### 1. 技术适配方案

探测器选择：离子注入型  $\alpha$  探测器（有效面积 $\geq 500\text{mm}^2$ ），能量分辨率 $\leq 12\text{keV}@5.486\text{MeV}$ ，本底计数率 $\leq 0.008\text{cpm}$ ，提升痕量  $\alpha$  核素检出能力；

##### 2. 样品预处理与制备

土壤样品：称取 20g 土壤样品，采用微波消解（硝酸 - 氢氟酸 - 过氧化氢体系），消解液经赶酸、定容后，通过离子交换色谱分离铀、钍，采用电沉积法制备薄源（沉积电流 0.8~1.2A，沉积时间 40~60 分钟）；

地下水样品：采集 5L 地下水，通过螯合树脂柱富集铀、镭，洗脱液经蒸发浓缩后，采用共沉淀法（硫酸钡）制备镭薄源，铀采用电沉积法制备；

测量参数：能量范围 4~8MeV，测量时间 24~48 小时，核素识别基于  $\alpha$  核素特征能量与半衰期（如铀 - 238 为 4.196MeV、镭 - 226 为 4.784MeV）；

##### 3. 实操要点

薄源质量控制：薄源厚度 $\leq 1\text{mg}/\text{cm}^2$ ，表面均匀性偏差 $\leq \pm 5\%$ ，通过显微镜观察薄源形态，避免裂纹、结块导致的自吸收误差；

分离效率验证：采用标准加入法验证分离效率，铀、钍分离效率 $\geq 90\%$ ，镭 $\geq 85\%$ ，分离效率偏差 $\leq \pm 5\%$ ；

本底抑制：探测器置于铅屏蔽室（厚度 20mmPb），配备反符合屏蔽系统，本底计数率降低 50% 以上，提升痕量核素检出限；

应用效果： $\alpha$  核素检出限可达 0.001~0.01Bq/kg（土壤）、0.005~0.05Bq/L（地下水），测量相对误差 $\leq \pm 8\%$ ，可精准识别污染羽流范围与核素组成，为场地修复提供技术依据。

#### （二）饮用水 / 食品 $\alpha$ 核素安全检测（饮用水 / 粮食 / 水产品）

应用场景：饮用水源地水质安全监测，粮食、水产品等食品的放射性安全检测，重点分析铀、镭 - 226 等  $\alpha$  核素，保障公众健康；

### 1. 技术适配方案

探测器选择：金硅面垒  $\alpha$  探测器（有效面积  $\geq 450\text{mm}^2$ ），能量分辨率  $\leq 15\text{keV}@5.486\text{MeV}$ ，本底计数率  $\leq 0.01\text{cpm}$ ，平衡灵敏度与分析效率；

### 2. 样品预处理与制备

饮用水：采集 10L 饮用水，通过固相萃取柱（三辛胺萃取树脂）富集铀，洗脱液浓缩后电沉积制备薄源；镭采用活性炭吸附 - 共沉淀法制备薄源；

食品样品：称取 50g 粮食 / 水产品，冷冻干燥后研磨，采用硝酸 - 过氧化氢微波消解，消解液经分离富集后制备薄源；

测量参数：能量范围 4~8MeV，测量时间 12~24 小时，重点监测核素铀 - 238、铀 - 234、镭 - 226；

### 3. 实操要点

污染控制：实验器具需经酸液浸泡（硝酸 10%）、去离子水冲洗 3 次，避免铀、镭吸附污染；试剂采用优级纯，空白值需低于检出限的 1/3；

定量校准：采用铀、镭标准溶液制备系列浓度薄源，构建校准曲线（相关系数  $r \geq 0.995$ ），每批样品插入 1 个中间浓度标准点，误差  $\leq \pm 5\%$ ；

标准符合性判定：根据《生活饮用水卫生标准》（GB 5749-2022）、《食品安全国家标准 食品中放射性核素限量》（GB 14882-2011），饮用水总  $\alpha$  放射性  $\leq 0.5\text{Bq/L}$ ，食品总  $\alpha$  放射性  $\leq 100\text{Bq/kg}$ ；

应用效果：饮用水样品分析周期  $\leq 48$  小时，食品样品  $\leq 72$  小时，检出限满足安全标准要求，测量结果相对误差  $\leq \pm 7\%$ ，可有效防范  $\alpha$  核素污染的食品安全风险。

### （三）核材料与放射性废物 $\alpha$ 核素仲裁分析（核燃料元件 / 固化体）

应用场景：核燃料元件中铀、钚含量分析，放射性废物固化体中  $\alpha$  核素活度检测，用于核材料核算与废物处置合规判定；

### 1. 技术适配方案

探测器选择：高分辨率  $\alpha$  能谱仪（能量分辨率  $\leq 10\text{keV}@5.486\text{MeV}$ ），配备多探测器阵列，提升测量效率与准确性；

样品预处理与制备：核燃料元件样品采用密闭消解（氢氟酸 - 硝酸体系），通过萃取色谱分离铀、钚，制备高纯度薄源；放射性废物固化体采用机械破碎 - 微波消解，分离富集后制备薄源；

测量参数：能量范围 4~8MeV，测量时间 48~72 小时，采用同位素稀释法进行定量（如采用铀 - 233 作为内标）；

### 2. 实操要点

同位素稀释法应用：精准称量内标物质（铀 - 233），确保内标与样品充分混合，

稀释因子计算误差 $\leq \pm 0.1\%$ ;

方法验证：通过国际标准物质（如 IAEA-384 铀钚标准溶液）验证方法准确性，测量结果与标准值相对偏差 $\leq \pm 3\%$ ;

仲裁要求：采用两种不同分离方法（如离子交换色谱与萃取色谱）进行平行分析，结果相对偏差 $\leq \pm 5\%$ ，确保仲裁数据权威性；

应用效果：测量相对误差 $\leq \pm 4\%$ ，不确定度（ $k=2$ ） $\leq \pm 6\%$ ，符合核材料核算与废物处置仲裁分析要求，为核安全监管提供权威数据支撑。

## 四、能谱分析技术应用优化与质量控制强化

### （一）应用优化关键措施

#### 1. 样品制备优化

$\gamma$  能谱：开发模块化样品制备装置，实现土壤样品的自动干燥、研磨、装杯一体化，减少人为操作误差，样品制备时间缩短 30%；

$\alpha$  能谱：研发新型电沉积液（如硫酸 - 草酸体系），提升薄源均匀性与稳定性，沉积时间从 60 分钟缩短至 30 分钟，薄源合格率从 85% 提升至 98%；采用微波辅助富集技术，铀、镅等核素富集时间缩短 50%，富集效率提升至 95% 以上；

探测系统优化：

硬件升级： $\gamma$  能谱仪配备数字化多道分析器（16384 道），提升能量分辨率与峰形识别能力，重叠峰分离效率提升 40%； $\alpha$  能谱仪采用制冷型探测器（ $-20^{\circ}\text{C}$ ），降低电子噪声，本底计数率进一步降至 0.005cpm 以下；

软件智能化：开发 AI 能谱解析系统，集成核素特征峰自动识别、重叠峰拟合、干扰峰扣除算法， $\gamma$  能谱数据解析时间从 30 分钟缩短至 5 分钟， $\alpha$  能谱峰形拟合误差 $\leq \pm 3\%$ ；内置样品类型适配模型，自动匹配不同介质（土壤 / 水体 / 食品）的探测效率校准参数，减少人为设置误差；

#### 2. 流程效率优化

批量处理技术： $\gamma$  能谱仪配备多样品自动进样系统（支持 20 + 样品连续测量），实现无人值守分析，单日样品处理量提升至 100 个以上；

预处理 - 探测联动：开发样品预处理与能谱测量联动系统， $\alpha$  能谱薄源制备完成后自动转运至探测器测量位，减少样品转移过程中的污染风险与时间损耗。

### （二）质量控制强化方案

#### 1. 全流程质控体系构建

样品采集质控：制定针对性采样规范——土壤样品采用“五点混合采样法”，每点采样量 $\geq 100\text{g}$ ，混合后缩分至 500g，记录采样深度、土壤类型、含水率；水体

样品采集时同步测量 pH、浊度、温度，避免核素吸附或挥发；采样容器需经放射性清洗（硝酸 5% 浸泡 24 小时），每批次随机抽取 5% 进行空白检验，空白值低于检出限；

预处理质控： $\alpha$  能谱样品预处理需设置方法空白、实验室空白、加标空白，加标回收率控制在 80%~120%（镭核素 70%~130%）；每处理 20 个样品插入 1 个平行样，相对偏差  $\leq \pm 10\%$ ； $\gamma$  能谱样品装杯后需标注样品重量、体积、密度，确保探测效率校准准确性；

## 2. 仪器质控细化

日常校准：每日开机后用标准源（ $\gamma$  能谱用铯 - 137、钴 - 60； $\alpha$  能谱用钋 - 210、钍 - 238）进行能量与效率校准， $\gamma$  探测器能量漂移  $\leq \pm 0.3\text{keV}$ ， $\alpha$  探测器探测效率偏差  $\leq \pm 2\%$ ；

期间核查：每分析 30 个样品进行期间核查，采用标准参考物质（如 GBW04401 铀标准溶液、GBW04411 铯 - 137 标准土壤）验证仪器稳定性，测量结果相对误差  $\leq \pm 5\%$ ，否则停机重新校准；

年度检定：核心性能参数（能量分辨率、探测效率、本底计数率）需通过法定计量机构检定，检定合格后方可使用，检定结果纳入仪器档案；

## 3. 数据质控强化

异常数据判定与处理：设定数据异常阈值—— $\gamma$  核素测量值超出校准曲线范围  $\pm 20\%$ 、 $\alpha$  核素平行样相对偏差  $> 15\%$  时，判定为异常数据，需重新制备样品测量并追溯原因（如预处理污染、仪器故障）；

不确定度评定：建立统一的不确定度评定模型，涵盖样品制备、仪器校准、探测效率、本底扣除等环节， $\gamma$  核素测量扩展不确定度（ $k=2$ ） $\leq \pm 8\%$ ， $\alpha$  核素  $\leq \pm 10\%$ ；

实验室间比对：每半年参加 1 次全国放射性核素分析能力验证（如生态环境部能力验证计划），结果需达到“满意”等级（ $z$  值  $\leq \pm 2$ ），确保数据可比性与权威性。

# 第三节 质谱技术在放射性检测中的应用

## 一、质谱技术在放射性检测中的核心原理与技术特征

### （一）核心应用原理

放射性检测中常用的质谱技术包括电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）、加速器质谱（AMS）、热电离质谱（TIMS），其核心原理围绕“核素离子化 - 质量分离 - 信号检测”的闭环流程展开：

### 1. 离子化原理

ICP-MS：通过电感耦合等离子体（温度 8000~10000K）将样品原子 / 分子电离为单电荷离子（如  $\text{U}^+$ 、 $\text{Pu}^+$ ），电离效率  $\geq 90\%$ ，适用于液体、固体消解液样品；

AMS：利用加速器将样品离子加速至 MeV 级能量，通过剥离器去除离子中的电子，转化为高价态离子（如  $\text{U}^{3+}$ ），同时破坏分子干扰离子（如  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^+$ ），适用于固体样品中痕量核素检测；

TIMS：通过热电离源（钨带 / 铯带，温度 1500~2500℃）将样品中核素转化为离子，基于不同核素的电离能差异实现选择性电离，适用于高纯度核素样品的同位素比值分析；

质量分离原理：基于离子在磁场 / 电场中的运动轨迹差异 —— 离子经加速后进入质量分析器（四极杆、扇形磁场），不同质量数的离子因偏转半径不同被分离，仅目标质量数的离子到达检测器；

### 2. 定量与比值分析原理

定量分析：通过测量目标离子的计数率，与标准曲线（或内标物质计数率）比对，结合电离效率、传输效率修正，计算核素活度浓度；

同位素比值分析：直接测量目标核素与其同位素的离子计数率比值（如  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}$ ），无需定量校准，比值精度可达  $10^{-6}$  级别，为核素来源溯源提供关键依据。

### （二）核心技术特征

超痕量检测能力：AMS 技术检出限可达  $10^{-6}\text{Bq/kg}$ （如  $^{14}\text{C}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ ），ICP-MS 检出限  $\leq 10^{-3}\text{Bq/kg}$ （如 U、Th），远优于能谱分析，适配环境背景值、核事故后期低浓度污染检测；

同位素比值精准分析：TIMS 与 AMS 的同位素比值测量精度  $\leq 0.1\%$ （RSD），可通过同位素指纹（如核设施钚同位素比值特征）实现污染来源甄别；

无辐射依赖：直接检测核素原子，无需依赖核素衰变释放的  $\alpha/\beta/\gamma$  射线，可检测无辐射或长半衰期核素（如  $^{238}\text{U}$ 、 $^{129}\text{I}$ ），弥补能谱分析短板；

多核素同时分析：ICP-MS 可同时检测 20+ 种核素（U、Th、Pu、Am、Cs 等），分析周期  $\leq 30$  分钟，适配复杂污染场景的多核素覆盖需求；

样品用量少：AMS 与 TIMS 仅需毫克级固体样品（1~10mg），ICP-MS 需毫升级液体样品（1~5mL），适用于珍贵样品或微量污染样品检测。

## 二、放射性检测中常用质谱技术类型与技术参数

根据应用场景与技术特性，放射性检测常用质谱技术分为 ICP-MS、AMS、TIMS 三大类，各类技术形成互补适配体系：



### （一）电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）——常规多核素快速检测

核心功能：液体样品中痕量放射性核素的快速定量与多核素同步分析，适用于环境监测、核设施流出物检测等常规需求；

关键技术参数：

离子源：电感耦合等离子体（RF 功率 1200~1500W，冷却气流量 15~18L/min）；

质量分析器：四极杆质量分析器（质量范围 2~250amu）或扇形磁场分析器；

检测器：电子倍增器（脉冲模式 / 模拟模式切换），检出限  $\leq 0.01\text{ng/L}$ （U、Th）、 $\leq 0.1\text{ng/L}$ （Pu、Am）；

测量性能：同位素比值精度  $\leq 1\%$ （RSD），多元素同时分析周期  $\leq 5$  分钟 / 样，测量相对误差  $\leq \pm 5\%$ ；

样品要求：液体样品（pH 2~4），固体样品需消解为液体（如微波消解、酸溶），样品盐度  $\leq 0.1\%$ （避免矩管堵塞）；

核心优势与局限：优势是分析速度快、操作简便、多核素覆盖、成本适中（80~200 万元）；局限是易受分子离子干扰（如  $^{238}\text{U}^+\text{H}^+$  干扰  $^{239}\text{Pu}^+$ ）、对超痕量核素（如  $10^{-6}\text{Bq/kg}$  级别）检出能力不足。<sup>①</sup>

### （二）加速器质谱（AMS）——超痕量核素与同位素比值检测

核心功能：固体样品中超痕量长半衰期核素（ $^{14}\text{C}$ 、 $^{129}\text{I}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ ）的定量与同位素比值分析，适用于核事故溯源、环境背景值调查、核材料甄别等高端需求；

关键技术参数：

加速器类型：串列静电加速器（加速电压 0.5~3MeV）；

离子源：负离子源（Cs<sup>+</sup> 溅射源），离子束强度  $\geq 10\mu\text{A}$ ；

检测器：硅表面屏障探测器或飞行时间检测器，检出限  $\leq 10^{-6}\text{Bq/kg}$ （ $^{14}\text{C}$ ）、 $\leq 10^{-5}\text{Bq/kg}$ （ $^{239}\text{Pu}$ ）；

测量性能：同位素比值精度  $\leq 0.01\%$ （RSD），单个样品分析周期 30~60 分钟，测量相对误差  $\leq \pm 3\%$ ；

样品要求：固体样品（土壤、沉积物、生物组织）需预处理为石墨靶（ $^{14}\text{C}$ ）或金属氧化物靶（U、Pu），样品用量 1~10mg；

核心优势与局限：优势是检出限极低、同位素比值精度高、抗干扰能力强；局限是设备体积庞大（需专用实验室）、成本高昂（800~2000 万元）、分析周期长。

<sup>①</sup> 廖俊生. 核材料生产研制中的质谱技术 [C]// 中国质谱学会（中国物理学会质谱分会），中国化学会质谱分析专业委员会，中国仪器仪表学会分析仪器分会质谱仪器专业委员会. 2018 年中国质谱学术大会（CMSC 2018）论文集. 中国工程物理研究院材料研究所. 2018: 215.

### （三）热电离质谱（TIMS）——高纯度核素同位素比值精准分析

核心功能：高纯度核素样品（核燃料、标准物质）的同位素比值精准测量，适用于核材料核算、标准物质研制、仲裁分析等高精度需求；

关键技术参数：

离子源：热电离源（钨带 / 铯带，温度 1800~2200℃），电离效率  $\geq 5\%$ （U、Pu）；质量分析器：双聚焦扇形磁场分析器（质量分辨率  $\geq 5000$ ）；

检测器：法拉第杯检测器（高丰度同位素）+ 电子倍增器（低丰度同位素），同位素比值精度  $\leq 0.001\%$ （RSD）；

测量性能：单个同位素比值分析周期 60~90 分钟，测量相对误差  $\leq \pm 0.1\%$ ；

样品要求：高纯度固体样品（纯度  $\geq 99.9\%$ ），需制备为硝酸盐或氧化物形式，样品用量 10~100 $\mu\text{g}$ ；

核心优势与局限：优势是同位素比值精度极高、干扰极低；局限是样品要求严格、分析周期长、仅适用于高纯度样品、成本高（500~1000 万元）。

### （四）串联质谱（ICP-MS/MS）——复杂基质核素精准检测

核心功能：高盐、高有机质等复杂基质样品（如海水、土壤消解液）中痕量核素的精准定量，解决传统 ICP-MS 的干扰问题；

关键技术参数：

双四极杆质量分析器（Q1+Q2），Q1 筛选目标离子，Q2 引入反应气（如  $\text{O}_2$ 、 $\text{NH}_3$ ）消除干扰；

检出限  $\leq 0.005\text{ng/L}$ （U、Th）、 $\leq 0.05\text{ng/L}$ （Pu、Am），同位素比值精度  $\leq 0.5\%$ （RSD）；

反应模式：氧化模式（消除金属离子干扰）、还原模式（消除分子离子干扰），适配不同基质样品；

核心优势与局限：优势是抗干扰能力强、复杂基质适配性好；局限是成本高于传统 ICP-MS（150~300 万元）、操作难度略高。

## 三、质谱技术在放射性检测中的典型应用场景与实操要点

### （一）环境痕量放射性核素背景值调查（土壤 / 海水 / 气溶胶）

应用场景：全球环境放射性本底监测、偏远地区核素迁移研究，重点分析 U、Th、Pu、 $^{129}\text{I}$  等痕量核素，建立区域背景值数据库；

#### 1. 技术适配方案

核素类型：超痕量长半衰期核素（ $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{129}\text{I}$ ）采用 AMS 技术，常规痕量核素（U、Th、Cs）采用 ICP-MS/MS 技术；

## 2. 样品预处理

土壤样品：称取 10g 土壤，微波消解（硝酸 - 氢氟酸 - 高氯酸体系），赶酸后定容至 50mL，采用固相萃取柱（TRU 树脂）富集 Pu、Am；

海水样品：采集 100L 海水，通过螯合树脂柱（Chelex-100）富集 U、Th，洗脱液浓缩至 1mL；

气溶胶滤膜：将滤膜剪碎，酸溶后采用 ICP-MS/MS 直接测量；

仪器参数：AMS 加速电压 1MeV，ICP-MS/MS 采用反应模式（O<sub>2</sub> 气，消除 <sup>238</sup>U<sup>1</sup>H<sup>+</sup> 干扰）；

## 3. 实操要点

空白控制：实验器具经酸液浸泡（硝酸 10%）、超纯水冲洗，试剂采用核纯级，空白值低于检出限的 1/3；

富集效率验证：采用标准加入法验证固相萃取柱富集效率，Pu、Am 富集效率 ≥ 95%，U、Th ≥ 90%；

数据验证：每批样品插入 1 个环境标准参考物质（如 IAEA-384 土壤），测量结果相对误差 ≤ ± 5%；

应用效果：<sup>239</sup>Pu 检出限 ≤ 10<sup>-5</sup>Bq/kg（土壤）、<sup>129</sup>I 检出限 ≤ 10<sup>-4</sup>Bq/L（海水），U、Th 测量相对误差 ≤ ± 4%，满足《环境放射性监测技术规范》（HJ/T 61-2001）对背景值调查的要求。

## （二）核设施流出物与核材料核算（废水 / 核燃料元件）

应用场景：核电厂、核燃料加工厂的废水排放监测，核燃料元件中 U、Pu 含量与同位素比值分析，用于核材料衡算与合规判定；

### 1. 技术适配方案

废水监测：采用 ICP-MS 技术，同时检测 U、Th、Cs、Co 等核素，分析周期 ≤ 30 分钟 / 样；

核燃料元件分析：采用 TIMS 技术分析 <sup>235</sup>U/<sup>238</sup>U、<sup>239</sup>Pu/<sup>240</sup>Pu 比值，ICP-MS 定量 U、Pu 含量；

### 2. 样品预处理

废水样品：经 0.45μm 滤膜过滤，加入硝酸酸化（pH=2），直接进样 ICP-MS；

核燃料元件：采用密闭消解（氢氟酸 - 硝酸体系），萃取色谱分离 U、Pu，制备 TIMS 分析用靶样；

### 3. 实操要点

干扰消除：ICP-MS 采用碰撞池技术（He 气）消除多原子离子干扰，TIMS 通过样品纯化去除杂质（纯度 ≥ 99.99%）；

同位素比值校准：采用国际标准物质（如 NIST SRM 950a U 标准溶液）校准 TIMS，比值测量精度 $\leq 0.005\%$ ；

数据溯源：测量结果需溯源至国家计量基准，扩展不确定度（ $k=2$ ） $\leq \pm 3\%$ ；

应用效果：废水样品 U、Th 检出限 $\leq 0.01\text{ng/L}$ ，测量相对误差 $\leq \pm 3\%$ ；核燃料元件  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  比值测量精度 $\leq 0.001\%$ ，符合《核电厂放射性液态流出物排放技术要求》（GB 14587-2011）与核材料核算标准。

### （三）核事故应急溯源与污染评估（土壤 / 食品 / 生物样品）

应用场景：核泄漏事故后，通过同位素比值分析甄别污染来源，定量低浓度核素（如  $^{129}\text{I}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ ）浓度，评估污染扩散范围；

#### 1. 技术适配方案

快速筛查：采用 ICP-MS 技术快速定量 Cs、I、Co 等核素，分析周期 $\leq 15$  分钟 / 样；

溯源分析：采用 AMS 技术分析  $^{129}\text{I}/^{131}\text{I}$ 、 $^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}$  比值，匹配核设施特征同位素指纹；

样品预处理：简化流程——土壤样品酸溶后直接进 ICP-MS，生物样品（动植物组织）冷冻干燥后研磨，酸溶富集后分析；

#### 2. 实操要点

快速前处理：采用微波辅助消解技术，样品消解时间从 4 小时缩短至 30 分钟；

比值优先原则：优先分析特征同位素比值（如核事故释放的  $^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}$  比值通常为 0.06~0.15），快速锁定污染来源；

质量控制：每 10 个样品设置 1 个平行样，相对偏差 $\leq \pm 8\%$ ，确保应急数据可靠性；

应用效果：ICP-MS 单样品分析周期 $\leq 15$  分钟，AMS 同位素比值分析周期 $\leq 40$  分钟，可在事故后 72 小时内完成 50+ 样品溯源分析，为污染处置提供关键依据。

### （四）放射性食品与饮用水安全检测（饮用水 / 粮食 / 水产品）

应用场景：饮用水源地、粮食产区、水产品养殖区的放射性安全检测，重点分析 U、Th、Ra、 $^{14}\text{C}$  等核素，保障食品安全；

#### 1. 技术适配方案

饮用水检测：采用 ICP-MS/MS 技术，直接测量 U、Th、Ra，检出限 $\leq 0.005\text{ng/L}$ ；

食品样品：采用 AMS 技术分析  $^{14}\text{C}$ ，ICP-MS 分析 U、Th；

样品预处理：

饮用水：采集 10L 水样，通过固相萃取柱富集 Ra，浓缩后 ICP-MS/MS 分析；

粮食样品：称取 50g 样品，冷冻干燥后酸溶，萃取分离后测量；

#### 2. 实操要点

污染防控：实验器具专用，避免交叉污染，空白样品测量值需低于检出限；

标准符合性判定：根据《生活饮用水卫生标准》（GB 5749-2022）、《食品安全

国家标准《食品中放射性核素限量》(GB 14882-2011), 饮用水  $U \leq 0.01\text{mg/L}$ , 食品总  $\alpha$  放射性  $\leq 100\text{Bq/kg}$ ;

加标回收验证: 每批样品进行加标回收实验, 回收率控制在 85%~115%;

应用效果: 饮用水  $U$ 、 $Th$  检出限  $\leq 0.001\text{ng/L}$ , 食品样品  $^{14}\text{C}$  检出限  $\leq 0.1\text{Bq/kg}$ , 测量相对误差  $\leq \pm 6\%$ , 满足食品安全监管要求。

### (五) 放射性废物处置合规检测(固化体/渗滤液)

应用场景: 放射性废物固化体(水泥固化体、玻璃固化体)中核素活度检测, 渗滤液中痕量核素监测, 确保废物处置符合《放射性废物管理规定》(GB 14500-2002), 防范长期环境风险;

#### 1. 技术适配方案

固化体检测: 采用 ICP-MS/MS 技术定量  $U$ 、 $Th$ 、 $Pu$ 、 $Am$  等核素, AMS 技术分析超痕量  $^{129}\text{I}$ ;

渗滤液检测: 采用 ICP-MS 技术快速筛查, 结合固相萃取富集低浓度核素;

#### 2. 样品预处理

固化体: 机械破碎至粒径  $\leq 1\text{mm}$ , 称取 5g 样品采用微波消解(硝酸-氢氟酸-氟硼酸体系), 消解液经赶酸、定容后分析;

渗滤液: 采集 10L 渗滤液, 通过螯合树脂柱富集核素, 洗脱液浓缩至 5mL;

#### 3. 实操要点

消解完全性验证: 通过添加内标物质(如  $^{185}\text{Re}$ )验证消解效果, 内标回收率  $\geq 85\%$ ;

基体效应校正: 采用标准加入法或基体匹配标准曲线, 校正固化体消解液中高盐、高基体带来的抑制效应;

长期稳定性监测: 对固化体样品进行周期性检测(每半年 1 次), 跟踪核素浸出规律;

应用效果: 固化体中  $U$ 、 $Pu$  检出限  $\leq 0.01\text{ng/g}$ , 渗滤液中核素检出限  $\leq 0.005\text{ng/L}$ , 测量相对误差  $\leq \pm 7\%$ , 满足放射性废物处置合规判定要求。

## 第四节 放射化学分析方法

### 一、放射化学分析方法的核心原理与技术特征

#### (一) 核心应用原理

放射化学分析方法的本质是“基于核素化学性质差异的靶向分离与富集”, 核心原理围绕核素在化学过程中的选择性反应、吸附、萃取等行为展开:

分离原理: 利用目标核素与基质、干扰核素在化学性质上的差异(如离子半径、



化学价态、络合能力、吸附特性、溶解度），通过特定化学手段（如离子交换、溶剂萃取、共沉淀）实现分离——例如铀（VI）在酸性条件下易与磷酸三丁酯（TBP）形成络合物被有机溶剂萃取，而钙、镁等基质离子则留在水相；

富集原理：通过多次分离操作或高选择性吸附材料，将目标核素从大量样品基质中浓缩至小体积溶液或固相材料中，提升核素浓度与探测信号强度，降低检出限——例如从 100L 海水中富集铀，最终浓缩至 1mL 溶液，富集倍数达  $10^4$ ；

形态分析原理：利用不同形态核素（如 U (IV)/U (VI)、Cr (III)/Cr (VI)）在化学反应活性、吸附特性上的差异，通过选择性分离技术（如氧化还原调节、特异性吸附）实现不同形态核素的分别检测，反映核素的环境迁移活性与生物毒性；

定量校准原理：通过加入已知活度的示踪剂（如  $^{232}\text{U}$ 、 $^{242}\text{Pu}$ ），跟踪目标核素在分离富集过程中的回收率，修正化学操作中的损失，确保定量准确性——示踪剂回收率需控制在 80%~120%。

## （二）核心技术特征

高选择性分离：针对不同核素设计专属分离体系（如 TRU 树脂选择性吸附三价锕系核素、银盐沉淀选择性分离碘），干扰去除率  $\geq 99.9\%$ ，确保目标核素纯度；

高倍数富集能力：富集倍数可达  $10^3\sim 10^5$  倍，可将环境样品中  $10^{-6}\text{Bq/kg}$  级别的痕量核素浓缩至可探测水平，弥补直接探测技术的检出限短板；

复杂基质适配性：可处理高盐（海水、盐湖卤水）、高有机质（土壤、生物样品）、高放射性干扰（多核素共存样品）等复杂基质样品，消除基质对探测技术的抑制或干扰；

核素形态分析能力：可区分核素的化学形态（价态、络合态、结合态），如通过离子交换树脂分离 U (IV) 与 U (VI)，为核素迁移转化研究与毒性评估提供数据支撑；

操作标准化：流程可标准化、可重复，遵循 GB/T、ISO、IAEA 等国际国内标准方法（如 GB/T 11220-2016《土壤中铀的测定 放射化学分析法》），数据可追溯。

## 二、放射化学分析方法的关键技术类型与技术参数

根据分离富集机制，放射化学分析方法主要分为离子交换色谱法、溶剂萃取法、共沉淀法、固相萃取法四大类，各类技术形成互补适配体系：

### （一）离子交换色谱法——高精度多核素分离

核心功能：复杂样品中多种核素的精准分离（如锕系、镧系核素分组分离），适用于核设施流出物、放射性废物等多核素共存样品的检测；

关键技术参数：

离子交换树脂：强酸型阳离子树脂（如 Dowex 50W）、强碱型阴离子树脂（如

Dowex 1)、专用螯合树脂(如 TRU 树脂、TEVA 树脂);

分离条件:淋洗液 pH 值(0.1~10)、淋洗流速(0.5~2mL/min)、淋洗液浓度(0.1~5mol/L 酸或盐溶液);

分离效率:目标核素与干扰核素分离系数 $\geq 10^3$ , 单次分离周期 3~8 小时;

富集倍数:  $10^2 \sim 10^3$  倍, 回收率 85%~110%;

核心优势与局限:优势是分离精度高、可同时分离多种核素、树脂可重复使用;局限是操作周期长、淋洗液消耗量大、对操作人员技能要求高。

## (二) 溶剂萃取法——快速批量分离富集

核心功能:大批量样品中目标核素的快速分离与富集(如铀、钍、钷的快速萃取),适用于环境监测、核事故应急等批量样品检测;

关键技术参数:

萃取体系:有机相(萃取剂+稀释剂)——如 TBP-煤油(萃取铀)、N235-正庚烷(萃取钍)、PMBP-苯(萃取稀土核素);水相(样品溶液, pH 1~6);

萃取条件:相比(有机相:水相=1:1~1:10)、振荡时间(5~30 分钟)、萃取温度(室温~60℃);

分离效率:单级萃取率 $\geq 90\%$ , 多级萃取(3~5 级)总萃取率 $\geq 99\%$ ;

富集倍数: 10~100 倍, 分析周期 30 分钟~2 小时/批;

核心优势与局限:优势是操作快速、可批量处理、设备简单;局限是有机溶剂污染环境、易乳化、选择性低于离子交换色谱法。

## (三) 共沉淀法——痕量核素初步富集

核心功能:大量样品中痕量核素的初步富集(如从大体积水样中富集镭、钋),适用于低浓度核素检测的前处理环节;

关键技术参数:

沉淀剂:硫酸钡(富集镭)、氢氧化铁(富集铀、钍)、氯化银(富集碘)、铋磷酸盐(富集钷);

沉淀条件: pH 值(2~10)、沉淀剂用量(过量 5%~10%)、陈化时间(1~24 小时);  
富集效率:富集倍数 $\geq 10^3$ , 目标核素回收率 80%~95%;

样品要求:适用于大体积液体样品(10~100L)或固体样品消解液;

核心优势与局限:优势是设备简单、成本低、可处理大体积样品;局限是分离精度低、易引入沉淀剂杂质、后续需进一步纯化。

## (四) 固相萃取法——高效快速富集分离

核心功能:中小体积样品中目标核素的高效富集与快速分离(如饮用水、食品样品中铀、镭的检测),适配质谱、能谱的快速分析需求;

关键技术参数：

固相萃取材料：螯合树脂（Chelex-100、XAD-7）、功能化硅胶（氨基膦酸型、冠醚型）、MOFs 材料（金属有机框架）；

操作条件：样品 pH 值（2~8）、流速（1~5mL/min）、洗脱液类型（1~5mol/L 硝酸 / 盐酸）；

富集效率：富集倍数  $10^2 \sim 10^4$  倍，回收率 90%~110%；

分析周期：15~60 分钟 / 样，可批量处理；

核心优势与局限：优势是操作快速、试剂消耗少、无乳化问题、可自动化；局限是吸附容量有限、不适用于极高体积样品（> 100L）。

### （五）核素形态分析专用方法

核心功能：目标核素的化学形态（价态、络合态）分析，适用于环境迁移研究、生物毒性评估；

关键技术：

价态分离：利用不同价态核素的氧化还原特性（如用亚铁离子将 Pu (VI) 还原为 Pu (IV)，再用 TBP 萃取）、吸附特性（如 U (VI) 可被钛酸吸附，U (IV) 不吸附）；

络合态分离：采用凝胶渗透色谱（GPC）分离不同分子量的核素络合物（如铀 - 腐殖酸络合物与游离铀离子）；

技术参数：形态分离效率  $\geq 90\%$ ，分析周期 2~4 小时 / 样。

## 三、放射化学分析方法的典型应用场景与实操要点

### （一）环境复杂基质样品痕量核素检测（土壤 / 海水 / 沉积物）

应用场景：土壤、海水、沉积物中痕量铀、钍、镭、钚等核素的背景值调查或污染检测，样品基质复杂（高有机质、高盐、高干扰核素）；

#### 1. 技术适配方案

土壤样品（铀、钍检测）：采用“微波消解 - 离子交换色谱分离”方案——称取 10g 土壤，硝酸 - 氢氟酸 - 高氯酸微波消解，赶酸后用盐酸溶解，通过 Dowex 1 阴离子交换树脂分离铀、钍，洗脱液浓缩后供  $\alpha$  能谱分析；

海水样品（镭检测）：采用“共沉淀 - 固相萃取纯化”方案——采集 100L 海水，加入氯化钡溶液生成硫酸钡共沉淀（富集镭），沉淀酸溶后通过 Sr 树脂纯化镭，制备  $\alpha$  能谱薄源；

沉积物样品（钚检测）：采用“碱熔 - TRU 树脂分离”方案——称取 5g 沉积物，过氧化钠碱熔，浸出液酸化后通过 TRU 树脂分离钚，电沉积制备  $\alpha$  能谱薄源；

## 2. 实操要点

消解完全性：土壤、沉积物样品需确保晶格破坏完全，可通过加入氢氟酸或碱熔实现，消解后赶酸彻底（避免氟离子干扰树脂吸附）；

示踪剂加入：在样品预处理初期加入示踪剂（如  $^{232}\text{U}$ 、 $^{242}\text{Pu}$ ），跟踪回收率，确保回收率在 80%~120%；

基质干扰消除：海水样品需先通过共沉淀去除大量盐类，再进行纯化；土壤样品需通过硝酸浸出去除有机质，避免干扰树脂分离；

应用效果：铀、钍检出限  $\leq 0.001\text{Bq/kg}$ （土壤），镭检出限  $\leq 0.005\text{Bq/L}$ （海水），钷检出限  $\leq 10^{-5}\text{Bq/kg}$ （沉积物），满足《环境放射性监测技术规范》（HJ/T 61-2001）要求。

### （二）核设施流出物与退役场地多核素检测（废水 / 污染土壤）

应用场景：核电厂、核燃料加工厂废水排放检测，核设施退役场地污染土壤中铀、钷、镭、铯等多核素同步分析，需同时解决“多核素分离”与“高干扰”问题；

#### 1. 技术适配方案

废水样品（多核素同步检测）采用“固相萃取 - 离子交换色谱分组分离”方案——废水经  $0.45\mu\text{m}$  滤膜过滤，通过 Chelex-100 树脂富集所有金属核素，洗脱液经盐酸酸化后，依次通过 TRU 树脂（分离锕系核素）、Cs 树脂（分离铯），分别收集洗脱液供  $\alpha$  能谱、 $\gamma$  能谱分析；

污染土壤（铀、钷、镭检测）：采用“微波消解 - 萃取色谱分离”方案——土壤微波消解后，用硝酸溶解，通过 TEVA 树脂分离钷、镭，再通过 UTEVA 树脂分离铀，分别定量；

#### 2. 实操要点

流速控制：离子交换色谱分离时流速需稳定（ $0.5\sim 1\text{mL/min}$ ），避免流速过快导致分离不完全；

淋洗液配制：严格控制淋洗液浓度与 pH 值（如分离钷需用  $0.3\text{mol/L}$  盐酸淋洗干扰核素，用  $0.05\text{mol/L}$  氢氟酸洗脱钷）；

放射性防护：核设施样品放射性水平较高，操作需在通风橱或手套箱内进行，避免交叉污染与人员暴露；

应用效果：可同时分离检测 5~8 种核素，铀、钷、镭检出限  $\leq 0.01\text{ng/L}$ （废水）、 $\leq 0.005\text{Bq/kg}$ （土壤），测量相对误差  $\leq \pm 8\%$ ，符合《核电厂放射性液态流出物排放技术要求》（GB 14587-2011）。

### （三）食品与饮用水安全检测（饮用水 / 粮食 / 水产品）

应用场景：饮用水、粮食、水产品中铀、镭、钍等核素的安全检测，样品基质复

杂（食品中高有机质、饮用水中低浓度核素），需兼顾富集效率与污染防控；

#### 1. 技术适配方案

饮用水（铀、镭检测）：采用“固相萃取快速富集”方案——采集 10L 饮用水，通过氨基膦酸型固相萃取柱富集铀、镭，用 5mol/L 硝酸洗脱，洗脱液浓缩后供 ICP-MS 分析；

粮食样品（铀检测）：采用“冷冻干燥 - 微波消解 - 溶剂萃取”方案——粮食冷冻干燥后研磨，硝酸 - 过氧化氢微波消解，消解液用 TBP - 煤油萃取铀，反萃后供  $\alpha$  能谱分析；

水产品（镭检测）：采用“灰化 - 共沉淀”方案——水产品灰化后，酸溶浸出，加入氯化钡共沉淀镭，沉淀纯化后供  $\alpha$  能谱分析；

#### 2. 实操要点

污染防控：实验器具需专用，经硝酸浸泡（10%）、超纯水冲洗 3 次，避免交叉污染；试剂采用优级纯或核纯级，空白值低于检出限；

有机质去除：食品样品需通过灰化或硝酸 - 过氧化氢消解去除有机质，避免干扰萃取或吸附过程；

标准符合性：根据《生活饮用水卫生标准》（GB 5749-2022）、《食品安全国家标准 食品中放射性核素限量》（GB 14882-2011），确保检测结果低于限值；

应用效果：饮用水铀检出限  $\leq 0.001\text{ng/L}$ 、镭检出限  $\leq 0.005\text{Bq/L}$ ，食品铀检出限  $\leq 0.01\text{Bq/kg}$ ，测量相对误差  $\leq \pm 7\%$ ，满足食品安全监管要求。

### （四）放射性废物处置合规检测（固化体 / 渗滤液）

应用场景：放射性废物固化体（水泥、玻璃固化体）中核素浸出检测，渗滤液中痕量核素监测，需解决“固化体消解”与“渗滤液低浓度核素富集”问题；

#### 1. 技术适配方案

固化体（铀、钚检测）：采用“机械破碎 - 微波消解 - 离子交换分离”方案——固化体破碎至粒径  $\leq 1\text{mm}$ ，称取 5g 样品，硝酸 - 氢氟酸 - 氟硼酸微波消解，消解液赶酸后通过 TRU 树脂分离铀、钚，定量分析；

渗滤液（痕量核素检测）：采用“大体积富集 - 串联固相萃取”方案——采集 50L 渗滤液，通过 Chelex-100 树脂初步富集，再通过专用树脂（如 Sr 树脂、TRU 树脂）纯化目标核素；

#### 2. 实操要点

消解体系选择：玻璃固化体需加入氟硼酸溶解硅基质，确保核素完全浸出；

浸出试验：固化体浸出检测需按《放射性废物浸出试验方法》（GB/T 7023-2011）进行，控制浸出剂 pH、温度与浸出时间；



回收率验证：每批样品加入示踪剂，确保浸出与分离过程总回收率 $\geq 85\%$ ；

应用效果：固化体中铀、钚检出限 $\leq 0.01\text{ng/g}$ ，渗滤液中核素检出限 $\leq 0.005\text{ng/L}$ ，测量相对误差 $\leq \pm 9\%$ ，满足放射性废物处置合规判定要求。

### （五）核素形态分析（环境迁移与生物毒性评估）

应用场景：环境样品中核素价态（如 U (IV)/U (VI)、Cr (III)/Cr (VI)）、络合态（如铀 - 腐殖酸络合物）分析，用于核素环境迁移活性评估与生物毒性预测；

#### 1. 技术适配方案

价态分析（U (IV)/U (VI)）：采用“选择性吸附 - 离子交换分离”方案——样品溶液调节 pH 至 3，通过钛酸吸附剂选择性吸附 U (VI)，U (IV) 留在溶液中，分别洗脱后供 ICP-MS 定量；

络合态分析（铀 - 腐殖酸）：采用“凝胶渗透色谱 - 固相萃取联用”方案——样品经凝胶渗透色谱分离不同分子量络合物（腐殖酸分子量  $10^3\sim 10^5\text{Da}$ ），收集目标分子量区间组分，通过固相萃取富集铀，分析游离态与络合态铀含量；

#### 2. 实操要点

氧化还原控制：价态分析过程中需加入抗氧化剂（如抗坏血酸），避免 U (IV) 被氧化为 U (VI)，确保价态稳定性；

色谱条件优化：凝胶渗透色谱需控制流动相 pH（5~7）与流速（ $0.5\text{mL/min}$ ），避免络合物解离；

形态回收率验证：分别加入 U (IV)、U (VI) 标准溶液，验证形态分离效率 $\geq 90\%$ ；

应用效果：U (IV)/U (VI) 分离效率 $\geq 95\%$ ，游离态与络合态铀检出限 $\leq 0.005\text{Bq/L}$ ，可精准反映核素在环境中的迁移活性，为污染风险评估提供数据支撑。

## 第五节 微量放射性核素检测技术

### 一、微量放射性核素检测技术的核心原理与技术特征

#### （一）核心应用原理

微量放射性核素检测技术的本质是“信号放大与干扰抑制的协同优化”，核心原理围绕“富集 - 探测 - 校准”三大环节展开：

痕量富集原理：通过放射化学预处理技术（如固相萃取、共沉淀、离子交换），将目标核素从大量样品基质中分离并浓缩，提升核素浓度与探测信号强度，富集倍数可达  $10^3\sim 10^5$  倍，使微弱信号达到探测阈值——例如从 1000L 饮用水中富集镭，浓缩至 1mL 溶液后供检测；

**高灵敏度探测原理：**采用低本底、高分辨率的探测技术（如低本底  $\alpha/\beta$  计数器、高分辨率 HPGe  $\gamma$  能谱、AMS），捕捉核素衰变释放的  $\alpha/\beta/\gamma$  射线或核素离子信号，通过信号放大、脉冲甄别技术，区分目标信号与本底干扰，实现微量核素的定性（能量/质量识别）与定量（计数统计）；

**干扰抑制原理：**通过“化学预处理去干扰”（如分离共存核素、去除基质成分）与“探测技术抗干扰”（如脉冲形状甄别、能量窗设置、反应气消除分子干扰）双重手段，降低本底计数与干扰信号，目标信号与干扰信号比值  $\geq 10:1$ ；

**精准校准原理：**采用示踪剂法（如加入  $^{232}\text{U}$ 、 $^{242}\text{Pu}$  示踪剂）修正化学回收率，通过标准参考物质校准探测效率，结合计数统计学方法评估测量不确定度，确保定量误差  $\leq \pm 10\%$ 。

## （二）核心技术特征

**超痕量检出能力：**综合检出限可达  $10^{-6}\text{Bq/kg}$ （ $\alpha$  核素）、 $10^{-4}\text{Bq/L}$ （ $\beta$  核素）、 $10^{-3}\text{Bq/kg}$ （ $\gamma$  核素），远优于常规检测技术（常规技术检出限通常  $\geq 10^{-2}\text{Bq/kg}$ ）；

**复杂基质适配性：**可处理高盐（海水、盐湖卤水）、高有机质（土壤、生物样品）、多核素共存（核设施流出物）等复杂样品，基质干扰去除率  $\geq 99.9\%$ ；

**多技术协同联动：**必须依赖“放射化学预处理 + 物理探测”的协同，单一技术无法满足检测需求——例如仅靠 HPGe  $\gamma$  能谱无法检测环境样品中  $10^{-5}\text{Bq/kg}$  级的钚，需结合 TRU 树脂分离富集；

**低本底环境依赖：**探测过程需在低本底实验室环境中进行（本底剂量率  $\leq 0.1\mu\text{Sv/h}$ ），配合低本底探测设备，降低环境辐射对微弱信号的干扰；

**定量准确性高：**通过回收率修正、效率校准、不确定度评定等多重手段，测量相对误差  $\leq \pm 8\%$ ，数据可溯源至国家计量基准。

## 二、微量放射性核素检测技术的关键类型与适配体系

根据探测原理与技术协同方式，微量放射性核素检测技术主要分为“ $\alpha$  核素微量检测”“ $\beta$  核素微量检测”“ $\gamma$  核素微量检测”“多核素同步检测”四大类，各类技术形成针对性适配体系：

### （一） $\alpha$ 核素微量检测技术（U、Th、Pu、Ra 系核素）

**核心技术组合：**放射化学分离富集 + 低本底  $\alpha$  能谱仪 / AMS

**关键技术参数：**

**预处理技术：**TRU 树脂分离、电沉积薄源制备、共沉淀富集（如硫酸钡富集镭），富集倍数  $10^3 \sim 10^5$  倍，回收率 85%~110%；

**探测设备：**低本底  $\alpha$  能谱仪（能量分辨率  $\leq 12\text{keV}@5.486\text{MeV}$ ，本底计数率  $\leq$

0.008cpm)、AMS(检出限 $\leq 10^{-6}\text{Bq/kg}$ ) ;

检测对象:  $^{238}\text{U}$ 、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{240}\text{Pu}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Po}$  等  $\alpha$  发射核素;

分析周期: 24~72 小时 / 样 (含预处理);

适配场景: 环境土壤 / 沉积物中痕量钍、海水 / 饮用水中痕量镭、核设施退役场地痕量铀钍;

核心优势与局限: 优势是检出限极低、干扰少; 局限是预处理复杂、分析周期长。

## (二) $\beta$ 核素微量检测技术 ( $^{14}\text{C}$ 、 $^3\text{H}$ 、 $^{129}\text{I}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ )

核心技术组合: 样品前处理富集 + 低本底液体闪烁计数器 (LSC) / AMS

关键技术参数:

预处理技术: 氧化燃烧 ( $^{14}\text{C}$  转化为  $\text{CO}_2$ )、蒸馏分离 ( $^3\text{H}$ )、银盐沉淀 ( $^{129}\text{I}$ )、冠醚萃取 ( $^{90}\text{Sr}$ ) , 富集倍数  $10^2\sim 10^4$  倍;

探测设备: 低本底 LSC (计数效率 $\geq 95\%$ , 本底计数率 $\leq 0.5\text{cpm}$ )、AMS ( $^{14}\text{C}$  检出限 $\leq 10^{-6}\text{Bq/kg}$ ) ;

检测对象:  $^3\text{H}$  (氚)、 $^{14}\text{C}$  (碳 - 14)、 $^{90}\text{Sr}$  (锶 - 90)、 $^{129}\text{I}$  (碘 - 129) 等  $\beta$  发射核素;

分析周期: 12~48 小时 / 样;

适配场景: 饮用水中痕量氚、食品中  $^{14}\text{C}$ 、核设施流出物中  $^{90}\text{Sr}$ 、环境样品中  $^{129}\text{I}$ ;

核心优势与局限: 优势是可检测低能量  $\beta$  核素、样品用量少; 局限是易受化学发光干扰、需严格样品纯化。

## (三) $\gamma$ 核素微量检测技术 ( $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{131}\text{I}$ )

核心技术组合: 简化预处理 + 低本底高分辨率 HPGe  $\gamma$  能谱仪

关键技术参数:

预处理技术: Marinelli 杯装样 (固体样品)、浓缩 (液体样品), 无需复杂分离 ( $\gamma$  射线穿透性强);

探测设备: 低本底 HPGe  $\gamma$  能谱仪 (相对探测效率 $\geq 50\%$ , 能量分辨率 $\leq 2.0\text{keV}$  @662keV, 本底剂量率 $\leq 0.01\mu\text{Sv/h}$ ) ;

检测对象:  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{40}\text{K}$  等  $\gamma$  发射核素;

分析周期: 4~24 小时 / 样 (低浓度样品需延长测量时间);

适配场景: 环境本底中痕量  $^{137}\text{Cs}$ 、核事故后期低浓度  $^{131}\text{I}$ 、食品中  $^{226}\text{Ra}$ ;

核心优势与局限: 优势是无需复杂预处理、分析快速; 局限是低能量  $\gamma$  核素检出限较高、易受样品自吸收影响。

## (四) 多核素同步微量检测技术 ( $\alpha/\beta/\gamma$ 核素协同)

核心技术组合: 多步放射化学分离 + 能谱 / 质谱联用 (如  $\alpha$  能谱 +  $\gamma$  能谱 + ICP-MS)

关键技术参数：

预处理技术：串联树脂分离（如 TRU 树脂 + Cs 树脂 + Sr 树脂），同步分离铀系、钍系、镭等多核素，富集倍数  $10^3 \sim 10^4$  倍；

探测设备：多探测器联用（低本底  $\alpha$  能谱 + HPGe  $\gamma$  能谱 + ICP-MS/MS），可同时检测  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  核素；

检测对象：环境样品中 U、Th、Pu、Cs、Sr、I 等多类微量核素；

分析周期：24~72 小时 / 样；

适配场景：核事故后多核素污染监测、环境本底多核素普查、放射性废物多核素合规检测；

核心优势与局限：优势是全覆盖检测、数据互补性强；局限是操作复杂、设备成本高。

### 三、微量放射性核素检测技术的典型应用场景与实操要点

#### （一）环境本底微量核素调查（土壤 / 海水 / 气溶胶）

应用场景：全球环境放射性本底监测，重点分析土壤、海水、气溶胶中  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{14}\text{C}$  等微量核素，建立区域本底数据库；

##### 1. 技术适配方案

土壤样品（ $^{239}\text{Pu}$  检测）：“碱熔 - TRU 树脂分离 - 电沉积 - 低本底  $\alpha$  能谱分析”，富集倍数  $10^4$  倍，检出限  $\leq 10^{-6}\text{Bq/kg}$ ；

海水样品（ $^{226}\text{Ra}$  检测）：“共沉淀（硫酸钡）- Sr 树脂纯化 - 低本底  $\alpha$  能谱分析”，处理 100L 海水浓缩至 1mL，检出限  $\leq 10^{-5}\text{Bq/L}$ ；

气溶胶样品（ $^{137}\text{Cs}$  检测）：“滤膜采样 - 直接装样 - 低本底 HPGe  $\gamma$  能谱分析”，测量时间 24 小时，检出限  $\leq 10^{-4}\text{Bq/m}^3$ ；

##### 2. 实操要点

本底控制：实验器具经核纯级酸液浸泡 24 小时，空白样品测量值低于检出限的 1/3；

示踪剂应用：土壤、海水样品预处理初期加入  $^{242}\text{Pu}$ 、 $^{232}\text{U}$  示踪剂，回收率控制在 80%~120%；

测量时间优化：低浓度样品采用“长时累积计数”，如气溶胶  $^{137}\text{Cs}$  测量时间延长至 48 小时，提升信号强度；

应用效果：各类核素检出限满足《环境放射性监测技术规范》（HJ/T 61-2001）要求，测量相对误差  $\leq \pm 7\%$ ，可精准获取区域环境本底数据。

## （二）核事故后期低浓度污染监测（土壤 / 食品 / 饮用水）

应用场景：核泄漏事故后 1~5 年，监测土壤、食品、饮用水中残留的微量  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{239}\text{Pu}$  等核素，评估污染消退趋势；

### 1. 技术适配方案

土壤样品（ $^{137}\text{Cs}+^{90}\text{Sr}$  同步检测）：“微波消解 - 冠醚萃取（分离 Sr）-Cs 树脂分离（分离 Cs）-LSC+ $\gamma$  能谱分析”， $^{90}\text{Sr}$  检出限  $\leq 10^{-4}\text{Bq/kg}$ ， $^{137}\text{Cs}$  检出限  $\leq 10^{-3}\text{Bq/kg}$ ；

食品样品（ $^{137}\text{Cs}$  检测）：“冷冻干燥 - 研磨 - 装样 - 低本底 HPGe  $\gamma$  能谱分析”，测量时间 12 小时，检出限  $\leq 0.1\text{Bq/kg}$ ；

饮用水样品（ $^3\text{H}$  检测）：“蒸馏富集 - 液体闪烁计数”，处理 10L 水样浓缩至 10mL，检出限  $\leq 0.1\text{Bq/L}$ ；

### 2. 实操要点

干扰消除：土壤样品中  $^{137}\text{Cs}$  检测需通过 Cs 树脂分离去除 Ba、Rh 等干扰核素，干扰去除率  $\geq 99.9\%$ ；

快速预处理：采用微波消解 + 自动化固相萃取系统，单样品预处理时间从 8 小时缩短至 2 小时；

质量控制：每 10 个样品设置 1 个平行样与 1 个加标样，平行样相对偏差  $\leq \pm 10\%$ ，加标回收率 85%~115%；

应用效果：可在 24 小时内完成 30 + 样品检测，核素识别准确率 100%，为污染风险评估与人群健康防护提供数据支撑。

## （三）食品安全微量放射性检测（粮食 / 水产品 / 乳制品）

应用场景：粮食、水产品、乳制品中痕量 U、Th、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{14}\text{C}$  等核素检测，保障食品安全，符合 GB 14882-2011 标准要求；

### 1. 技术适配方案

粮食样品（U 检测）：“灰化 - 微波消解 - 固相萃取（Chelex-100 树脂）-ICP-MS/MS 分析”，检出限  $\leq 0.01\text{Bq/kg}$ ；

水产品样品（ $^{226}\text{Ra}$  检测）：“灰化 - 酸溶 - 共沉淀（硫酸钡）- $\alpha$  能谱分析”，检出限  $\leq 0.005\text{Bq/kg}$ ；

乳制品样品（ $^{14}\text{C}$  检测）：“氧化燃烧 - 石墨化 - AMS 分析”，检出限  $\leq 0.1\text{Bq/kg}$ ；

### 2. 实操要点

污染防控：实验器具专用，避免交叉污染，空白值需低于检出限；

有机质去除：粮食、水产品样品通过灰化（550℃，4 小时）去除高有机质，避免干扰萃取过程；



标准符合性判定：严格对照 GB 14882-2011 限值（如粮食总  $\alpha$  放射性  $\leq 100\text{Bq/kg}$ ），检测结果需附不确定度报告；

应用效果：各类食品核素检出限远低于国家标准限值，测量相对误差  $\leq \pm 6\%$ ，可有效防范食品安全风险。

#### （四）核设施流出物与退役场地微量核素检测（废水/污染土壤）

应用场景：核电厂废水排放口微量核素监测，核设施退役场地土壤中 U、Pu、Np、Cs 等多核素检测，确保排放与处置合规；

##### 1. 技术适配方案

废水样品（多核素同步检测）：“过滤 - 固相萃取（TRU+Cs+Sr 树脂串联）- $\alpha$  能谱 +  $\gamma$  能谱 + ICP-MS 分析”，可同时检测 U、Pu、Cs、Sr 等 8 种核素，检出限  $\leq 0.001\text{ng/L}$ ；

污染土壤样品（U、Pu 检测）：“微波消解 - 萃取色谱（TEVA+UTEVA 树脂）- $\alpha$  能谱分析”，U 检出限  $\leq 0.005\text{Bq/kg}$ ，Pu 检出限  $\leq 10^{-5}\text{Bq/kg}$ ；

##### 2. 实操要点

流速控制：串联树脂分离时流速稳定在  $0.5\text{mL/min}$ ，确保分离完全；

放射性防护：操作需在手套箱内进行，避免高辐射样品暴露；

数据溯源：测量结果需溯源至国家计量基准，扩展不确定度（ $k=2$ ） $\leq \pm 8\%$ ；

应用效果：废水样品分析周期  $\leq 4$  小时，土壤样品  $\leq 24$  小时，符合《核电厂放射性液态流出物排放技术要求》（GB 14587-2011），为核安全监管提供权威数据。

#### （五）放射性废物处置合规微量检测（固化体/渗滤液）

应用场景：放射性废物固化体（水泥、玻璃固化体）中微量核素浸出检测，渗滤液中痕量核素监测，确保处置符合 GB 14500-2002 标准；

##### 1. 技术适配方案

固化体样品（U、Pu 检测）：“机械破碎 - 微波消解（硝酸 - 氢氟酸 - 氟硼酸）-TRU 树脂分离 - $\alpha$  能谱分析”，检出限  $\leq 0.01\text{ng/g}$ ；

渗滤液样品（痕量核素检测）：“大体积富集（50L）- 串联固相萃取 - ICP-MS/MS 分析”，检出限  $\leq 0.005\text{ng/L}$ ；

##### 2. 实操要点

消解完全性：玻璃固化体需加入氟硼酸溶解硅基质，确保核素完全浸出；

浸出试验：按 GB/T 7023-2011 标准控制浸出剂 pH、温度与时间；

长期稳定性：对固化体样品进行周期性监测（每季度 1 次），跟踪核素浸出规律，评估长期环境风险；

回收率验证: 每批样品加入示踪剂 (如  $^{232}\text{U}$ 、 $^{242}\text{Pu}$ ) , 确保浸出与分离过程总回收率  $\geq 85\%$  , 修正定量误差;

应用效果: 固化体中 U、Pu 检出限  $\leq 0.01\text{ng/g}$  , 渗滤液中核素检出限  $\leq 0.005\text{ng/L}$  , 测量相对误差  $\leq \pm 9\%$  , 满足《放射性废物管理规定》(GB 14500-2002) 合规判定要求, 为放射性废物安全处置提供技术保障。

## 第八章 放射性环境影响评价

### 第一节 放射性环境影响评价方法

#### 一、放射性环境影响评价方法的核心原理与技术特征

##### （一）核心应用原理

REIA 方法体系的本质是“放射性迁移 - 暴露 - 效应”的量化与评估，核心原理围绕四大环节展开：

源项识别与量化原理：通过工程分析、监测数据核定，明确放射性污染物的种类（如  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $\text{U}$ 、 $\text{Pu}$ ）、排放强度（活度浓度、年排放量）、排放方式（连续 / 间断排放、气态 / 液态 / 固态），建立源项清单——例如核电厂正常运行时气态流出物中  $^{131}\text{I}$  的年排放量、放射性废物处置场的核素浸出速率；

环境迁移预测原理：基于放射性核素的物理化学性质（半衰期、分配系数、迁移系数）与环境介质特征（大气扩散参数、水文地质条件、土壤理化性质），采用数学模型模拟核素在大气、水、土壤、生物等介质中的迁移扩散路径与浓度时空分布，预测不同情景下的环境暴露水平；

剂量核算原理：根据核素在环境中的浓度分布，结合暴露途径（如吸入、食入、皮肤接触、外照射）、暴露参数（如呼吸速率、饮食摄入量、暴露时间），采用剂量学方法（如剂量转换系数法、蒙特卡罗法）计算受体（公众、生态生物）的有效剂量与器官剂量，评估暴露水平是否符合剂量限值要求；

风险评估原理：基于剂量核算结果，结合辐射风险模型（如线性无阈模型 LNT、相对风险模型），量化放射性辐射对人体健康的超额致癌风险、遗传风险，以及对生态系统的潜在危害（如种群数量下降、生物多样性降低），明确风险可接受水平；

防控优化原理：通过对比不同污染防控方案（如改进排放控制技术、优化选址、设置防护距离）的影响削减效果与成本效益，筛选技术可行、经济合理的最优防控措施，确保辐射影响降至“可合理达到的尽量低水平”（ALARA 原则）。

##### （二）核心技术特征

源项驱动性：源项分析是 REIA 的基础，所有迁移预测、剂量核算均依赖精准的源项数据，源项误差需控制在  $\pm 10\%$  以内，否则将导致后续评估结果失真；

模型化与定量化：依赖成熟的放射性迁移模型、剂量学模型进行量化分析，避免

定性描述，预测结果需给出具体的浓度值、剂量值与风险值，且需包含不确定性分析；

多介质多路径整合：需综合考虑核素在大气、水、土壤、生物链等多介质中的迁移转化，覆盖吸入、食入、外照射等全暴露路径，避免遗漏关键影响途径；

长期累积影响关注：放射性核素半衰期长（如  $^{238}\text{U}$  半衰期  $4.47 \times 10^9$  年），需评估项目运行期及退役后长期（数十年至数百年）的环境累积影响，而非仅关注短期效应；

标准适配性：所有评估结果需对照国家 / 国际辐射防护标准（如 GB 18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》、IAEA 安全标准），确保评价结论的合规性。

## 二、放射性环境影响评价的关键方法与技术体系

根据评价流程，REIA 方法体系主要分为“源项分析方法”“环境迁移预测方法”“剂量核算方法”“风险评估方法”“综合评估与防控优化方法”五大类，各类方法形成协同适配体系：

### （一）源项分析方法——评价基础与前提

核心功能：明确放射性污染物的来源、种类、强度与排放特征，建立精准的源项清单；

关键方法：

工程分析法：通过分析项目工艺（如核反应堆运行、放射性废物处理工艺），结合设计参数（如堆芯功率、燃料成分、处理效率），计算放射性污染物的产生量与排放量；

监测数据核定法：对现有项目或同类项目的排放口进行现场监测（如气态流出物采样分析、液态流出物在线监测），结合监测数据反推源项强度，验证工程分析结果；

类比法：参考同类放射性项目的源项数据，结合本项目的规模、工艺差异进行修正，适用于新建项目的源项估算；

技术参数：源项清单需包含核素名称、活度浓度（ $\text{Bq}/\text{m}^3$  或  $\text{Bq}/\text{L}$ ）、年排放量（ $\text{Bq}/\text{a}$ ）、排放方式、排放高度、排放时间等关键信息，核素识别覆盖率  $\geq 95\%$ ；

适配场景：所有放射性项目的源项核定，尤其是新建核设施、放射性废物处置场的源项预测；

核心优势与局限：优势是源项量化精准、逻辑清晰；局限是依赖详细的工程设计资料，新建项目缺乏实测数据支撑时不确定性较高。

### （二）环境迁移预测方法——影响量化的核心

核心功能：模拟放射性核素在环境介质中的迁移扩散过程，预测不同时空节点的环境浓度分布；

关键方法：

大气迁移预测：采用高斯扩散模型（如 ISC-AERMOD、CALPUFF），结合气象参数（风速、风向、稳定度）、地形条件，模拟气态放射性污染物的扩散路径与地面浓度分布，预测范围覆盖项目周边 50~100km；

水迁移预测：

地表水：采用河流 / 湖泊水质模型（如 QUAL2K、EFDC），模拟液态污染物在水体中的对流扩散、吸附解吸、沉降降解过程，预测断面浓度；

地下水：采用溶质运移模型（如 MODFLOW、MT3DMS），结合水文地质参数（渗透系数、孔隙度、弥散系数），模拟核素在地下水含水层中的迁移路径与浓度时空分布；

土壤与生物迁移预测：采用土壤吸附 - 淋溶模型（如 LEACHM）模拟核素在土壤中的垂直迁移，采用生物富集模型（如 BCF 生物浓缩因子法）计算核素在食物链中的富集系数（如植物→动物→人类）；

技术参数：模型需校准关键参数（如大气扩散参数  $\sigma_y/\sigma_z$ 、土壤分配系数  $K_d$ 、生物浓缩因子 BCF），校准误差  $\leq 15\%$ ；预测结果需给出不同置信水平（如 95% 置信区间）的浓度值；

适用场景：核设施气态 / 液态流出物迁移预测、放射性废物处置场核素浸出迁移预测、核事故应急扩散预测；

核心优势与局限：优势是可量化核素时空分布、适用范围广；局限是依赖精准的环境参数，复杂地形 / 水文条件下模型适用性需验证。<sup>①</sup>

### （三）剂量核算方法——暴露效应量化

核心功能：基于环境浓度预测结果，计算受体的辐射暴露剂量，评估暴露水平是否合规；

关键方法：

剂量转换系数法（deterministic method）：采用国际辐射防护委员会（ICRP）推荐的剂量转换系数（如吸入剂量转换系数、食入剂量转换系数），结合暴露浓度与暴露参数，计算有效剂量：

有效剂量（E）=  $\Sigma$ （环境浓度 C × 暴露量  $E_x$  × 剂量转换系数 DCF）；

蒙特卡罗法（probabilistic method）：通过随机抽样生成暴露参数（如饮食摄入量、呼吸速率）与模型参数的概率分布，模拟剂量核算的不确定性，给出剂量分布区间；

实测剂量验证法：通过现场布设剂量监测点（如环境  $\gamma$  剂量率监测仪、个人剂量计），实测受体的实际暴露剂量，验证模型核算结果；

① 邱国华. 铀矿山探采设设施退役治理工程放射性环境影响评价 [J]. 铀矿地质, 2008, (03): 188-192.



技术参数: 暴露途径需覆盖吸入、食入( 饮水、饮食)、皮肤接触、外照射( $\gamma$  射线、 $\beta$  射线), 剂量核算结果需包含有效剂量( 单位: Sv/a)与关键器官剂量( 如甲状腺剂量), 计算误差 $\leq \pm 10\%$ ;

适配场景: 公众辐射剂量评估、职业人员剂量评估、生态生物剂量评估;

核心优势与局限: 优势是计算简便、标准统一; 局限是依赖默认暴露参数, 不同区域人群暴露特征差异可能导致核算结果偏差。

#### (四) 风险评估方法 —— 影响程度判定

核心功能: 基于剂量核算结果, 量化放射性辐射的健康风险与生态风险, 明确风险可接受性;

关键方法

人体健康风险评估:

致癌风险评估: 采用线性无阈(LNT)模型, 致癌风险( $R$ ) = 有效剂量( $E$ )  $\times$  致癌风险系数(SF), 其中SF参考ICRP推荐值(如 $\gamma$ 射线致癌风险系数 $5.5 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ );

非致癌风险评估: 计算危害商( $HQ$ ) = 实际剂量 / 参考剂量(RfD),  $HQ \leq 1$  为可接受;

生态风险评估:

商值法: 计算生态生物的辐射剂量与物种特异性基准剂量的比值, 比值 $\leq 1$  为低风险;

种群影响模型: 模拟长期辐射暴露对生物种群数量、繁殖能力的影响, 预测种群衰退风险;

技术参数: 公众致癌风险可接受水平通常设定为 $\leq 1 \times 10^{-6}$  (即每百万人超额致癌风险 $\leq 1$ ), 职业人员致癌风险可接受水平 $\leq 1 \times 10^{-4}$ ; 生态风险需覆盖关键物种(如陆生植物、哺乳动物、水生生物);

适配场景: 核设施运行、放射性废物处置、核事故应急等各类放射性活动的风险评估;

核心优势与局限: 优势是风险量化直观、决策导向性强; 局限是低剂量辐射效应存在科学争议, LNT模型的适用性在学术上仍有讨论。

#### (五) 综合评估与防控优化方法 —— 决策支持

核心功能: 综合评估放射性活动的环境影响程度, 筛选最优污染防控方案, 提出环境管理要求;

关键方法:

综合指数法: 构建包含源项强度、环境浓度、暴露剂量、风险水平的综合评价指数, 按指数等级(如低、中、高影响)判定总体影响程度;

成本效益分析法：对比不同防控方案（如改进废气处理技术、增加防护距离、优化废物处置方式）的环境效益（剂量削减量、风险降低率）与经济成本，筛选成本效益比最优的方案；

ALARA 原则优化：以“可合理达到的尽量低水平”为目标，通过敏感性分析识别关键影响因素（如排放强度、迁移系数），提出针对性的优化措施；

技术参数：综合评价需包含现状影响、预测影响、叠加背景影响的全面评估；防控方案需明确技术措施、实施成本、预期效果，剂量削减率 $\geq 30\%$ ；

适配场景：项目可行性研究阶段的影响评估、现有项目的环境管理优化、放射性废物处置场的选址评估；

核心优势与局限：优势是决策支持性强、兼顾技术与经济可行性；局限是综合指数权重设定具有主观性，需通过专家论证优化。

### 三、放射性环境影响评价的典型应用场景与实操要点

#### （一）核设施正常运行环境影响评价（核电厂、核燃料循环设施）

应用场景：核电厂、核燃料加工厂、核技术应用设施等正常运行时的放射性环境影响评价，重点评估气态 / 液态流出物对周边环境与公众健康的影响；

##### 1. 技术适配方案

源项分析：工程分析法 + 类比法，核定正常运行时气态流出物（如  $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{85}\text{Kr}$ ）与液态流出物（如  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、U）的年排放量；

迁移预测：大气扩散模型（AERMOD）预测气态污染物地面浓度，地表水 / 地下水模型预测液态污染物迁移路径；

剂量核算：采用剂量转换系数法，计算公众通过吸入、食入（饮水、食用当地农产品）、外照射的有效剂量；

风险评估：量化公众致癌风险，评估是否满足 $\leq 1 \times 10^{-6}$ 的可接受水平；

##### 2. 实操要点

源项精准化：结合同类项目实测数据修正工程分析结果，源项误差控制在 $\pm 10\%$ 以内；

参数本地化：采用项目所在地的气象数据（近 5 年逐时气象资料）、水文地质数据、人群暴露参数（如当地饮食结构、饮水来源），避免使用默认参数；

叠加背景影响：需叠加区域天然放射性本底剂量（如土壤中  $^{40}\text{K}$ 、U、Th 的天然辐射剂量），计算总剂量；

应用效果：核电厂正常运行时公众年均有效剂量通常 $\leq 0.01\text{mSv}$ ，远低于 GB 18871-2002 规定的公众年剂量限值  $1\text{mSv}$ ，致癌风险 $\leq 5 \times 10^{-7}$ ，满足可接受要求，为项目运行许可提供依据。

## （二）放射性废物处置场环境影响评价（低中放废物处置场、高放废物地质处置库）

应用场景：放射性废物处置场（尤其是高放废物地质处置库）的选址与运行环境影响评价，重点评估核素长期浸出迁移对地下水、土壤环境的累积影响；

### 1. 技术适配方案

源项分析：采用浸出试验法（如 GB/T 7023-2011）测定放射性废物的核素浸出速率，结合处置库设计参数（如库容、处置量、屏障材料），预测长期源项释放强度；

迁移预测：采用地下水溶质运移模型（MT3DMS）模拟核素通过处置库屏障（如膨润土缓冲层、围岩）的迁移过程，预测数千年内地下水核素浓度；

剂量核算：假设地下水被饮用，计算公众通过饮水途径的长期暴露剂量；

风险评估：评估长期辐射暴露的致癌风险与遗传风险，验证处置库的长期安全性；

### 2. 实操要点

长期参数验证：需通过实验室试验与现场监测确定核素迁移系数、屏障材料渗透系数等长期参数，考虑参数随时间的变化（如膨润土老化）；

情景分析：设置正常情景、异常情景（如屏障破损）、事故情景（如地震导致处置库破坏），分别评估不同情景下的环境影响；

不确定性分析：采用蒙特卡罗法分析模型参数、源项强度的不确定性对评价结果的影响，给出风险概率分布；

应用效果：低中放废物处置场运行期内公众年均有效剂量 $\leq 0.1\text{mSv}$ ，高放废物地质处置库数千年内的累积剂量 $\leq 1\text{mSv}$ ，满足长期安全要求，为处置场选址与审批提供技术支撑。

## （三）核事故应急环境影响评价（核泄漏事故）

应用场景：核设施发生泄漏事故时的应急环境影响评价，重点预测事故工况下放射性污染物的扩散范围、暴露剂量与风险水平，为应急响应提供决策支持；

### 1. 技术适配方案

源项分析：基于事故类型（如反应堆堆芯熔毁、废物储罐泄漏），采用事故后果分析模型（如 MACCS、ARAC）估算事故源项强度与释放持续时间；

迁移预测：采用应急大气扩散模型（如 CALPUFF 应急版）、地表水应急模型，快速预测污染物在短时间内（数小时至数天）的扩散范围与浓度分布；

剂量核算：计算事故情景下公众的短期暴露剂量（如 24 小时有效剂量），评估是否超过应急干预水平（如  $10\text{mSv}$ ）；

风险评估：量化短期高剂量辐射的急性健康风险（如放射病风险）与长期致癌风险，为人员疏散、隐蔽等应急措施提供依据；

## 2. 实操要点

快速响应：采用简化模型与实时监测数据联动，缩短评价周期（ $\leq 24$  小时），满足应急决策时效性要求；

多情景模拟：模拟不同气象条件（如风向变化）、泄漏强度下的影响范围，划定高风险区域；

应急措施有效性评估：预测疏散、隐蔽、服用碘片等应急措施的剂量削减效果，提出最优应急方案；

应用效果：可快速划定事故影响范围（如高剂量区、低剂量区），例如预测 24 小时内放射性污染物扩散至项目周边 30km 范围，高风险区（剂量  $> 10\text{mSv}$ ）面积  $\leq 5\text{km}^2$ ，为人员疏散范围划定、应急物资调配提供精准依据，有效降低公众健康风险。

### （四）核技术应用项目环境影响评价（医用放射性同位素、工业辐照装置）

应用场景：医用放射性同位素生产、工业辐照装置运行、放射性测井等核技术应用项目的环境影响评价，重点评估项目运行过程中放射性污染物的泄漏风险与局部环境影响；

#### 1. 技术适配方案

源项分析：工程分析法 + 监测数据核定法，核定放射性同位素使用量、泄漏风险源项（如密封源破损泄漏量）、废水 / 废气排放量；

迁移预测：采用小型大气扩散模型（如 ISCST3）预测局部区域（项目周边 5~10km）气态污染物扩散，采用地下水局部运移模型预测泄漏核素的短期迁移；

剂量核算：计算职业人员（如操作工人）与周边公众的暴露剂量，重点关注近距离操作的职业剂量；

风险评估：评估密封源泄漏、废水排放等情景下的健康风险，职业人员致癌风险  $\leq 1 \times 10^{-4}$ ，公众  $\leq 1 \times 10^{-6}$ ；

#### 2. 实操要点

泄漏风险量化：采用故障树分析法（FTA）、事件树分析法（ETA）量化密封源破损、管道泄漏等事故的发生概率，明确关键风险点；

职业剂量控制：重点核算职业人员的操作剂量，确保符合 GB 18871-2002 规定的职业人员年剂量限值 20mSv；

防控措施针对性：针对核技术应用项目“源项集中、影响范围小”的特点，提出密封防护、泄漏监测、应急处置等针对性措施；

应用效果：核技术应用项目正常运行时，职业人员年均有效剂量  $\leq 5\text{mSv}$ ，公众  $\leq 0.05\text{mSv}$ ，泄漏事故发生概率  $\leq 1 \times 10^{-5}/\text{年}$ ，满足安全运行要求，为项目许可审批提供技术支撑。

## 第二节 辐射剂量评估模型

### 一、辐射剂量评估模型的核心原理

辐射剂量评估模型的本质是“暴露 - 剂量”的量化映射，核心原理围绕“浓度表征 - 暴露计算 - 剂量转换”的逻辑链展开：

环境浓度表征原理：通过模型输入或耦合环境迁移模型，获取核素在空气、水、土壤、食物等介质中的时空浓度分布（如空气活度浓度  $C_a$ 、饮用水浓度  $C_w$ 、土壤表层浓度  $C_s$ ），明确剂量计算的基础数据；

暴露量计算原理：基于受体的暴露行为特征（如呼吸速率、饮食摄入量、暴露时间），结合暴露途径（吸入、食入、皮肤接触、外照射），计算受体对核素的实际摄入量（摄入量  $I = \text{浓度 } C \times \text{暴露参数 } E_x \times \text{暴露时间 } t$ ）；

剂量转换原理：采用国际公认的剂量转换系数（如 ICRP 推荐值），将核素摄入量转换为生物学效应等效剂量（有效剂量  $E = \text{摄入量 } I \times \text{剂量转换系数 } DCF$ ），实现“环境浓度 - 生物剂量”的跨尺度量化；

剂量叠加原理：考虑多核素、多途径、多介质的联合暴露，通过代数叠加计算总有效剂量（ $E_{\text{total}} = \sum E_i$ ,  $i$  为单个核素 / 单个途径的剂量贡献），确保剂量评估的全面性。

### 二、典型辐射剂量评估模型的技术细节与参数体系

#### （一）确定性剂量模型——常规评估主流工具

##### 1. 核心模型：剂量转换系数法（基础模型）

建模逻辑：基于固定参数输入，通过公式直接计算剂量，不考虑参数变异性，适用于快速获取确定性结果；

核心公式：

吸入有效剂量： $E_{\text{inh}} = C_a \times VR \times t \times DCF_{\text{inh}}$

（ $VR$  = 呼吸速率， $t$  = 暴露时间， $DCF_{\text{inh}}$  = 吸入剂量转换系数）

食入有效剂量： $E_{\text{ing}} = C_f \times DI \times t \times DCF_{\text{ing}}$

（ $C_f$  = 食物中核素浓度， $DI$  = 饮食摄入量）

外照射有效剂量： $E_{\text{ext}} = D_{\gamma} \times t \times W_T$

（ $D_{\gamma}$  = 环境  $\gamma$  剂量率， $W_T$  = 组织权重因子）

关键参数体系：

暴露参数：采用默认标准值（如成人呼吸速率  $10\text{m}^3/\text{d}$ 、饮水摄入量  $2\text{L}/\text{d}$ 、暴露时间  $2000\text{h}/\text{a}$ ），参考 ICRP 66、GB/T 18871-2002；



剂量转换系数：按核素类型（ $\alpha/\beta/\gamma$  发射体）、暴露途径分类，如  $^{137}\text{Cs}$  食入剂量转换系数为  $1.3 \times 10^{-8} \text{Sv/Bq}$ ， $^{226}\text{Ra}$  吸入剂量转换系数为  $2.8 \times 10^{-7} \text{Sv/Bq}$ ；

组织权重因子：参考 ICRP 103，如性腺 0.08、乳腺 0.08、甲状腺 0.04；

技术优势与局限：

优势：计算速度快（单核素多途径剂量计算  $\leq 5$  分钟）、参数标准化、结果直观，适用于批量样品快速评估；

局限：忽略参数空间 / 时间变异性，不确定性未量化，复杂场景下精度不足。

## 2. 典型应用模型：EPA PATHWAY 模型

模型功能：整合大气、水、土壤、生物链多介质暴露途径，支持多核素同步剂量计算，适用于核设施正常运行、放射性废物处置场常规剂量评估；

核心模块：

介质迁移模块：简化耦合大气沉降、土壤吸附、生物富集计算，获取各介质核素浓度；

暴露计算模块：覆盖吸入、食入（饮水、蔬菜、谷物、肉类、鱼类）、皮肤接触、外照射（空气  $\gamma$ 、土壤  $\gamma$ ）6 类核心途径；

剂量输出模块：输出单个途径剂量、核素贡献占比、总有效剂量，支持剂量贡献分析；

技术参数：

核素覆盖：支持 U、Th、Pu、Cs、Sr、I 等 50 + 种常见放射性核素；

计算精度：剂量计算误差  $\leq \pm 10\%$ （与实测数据对比）；

输出结果：有效剂量（Sv/a）、器官剂量（Sv/a）、剂量贡献占比（%）。

## （二）概率性剂量模型——不确定性量化工具

### 1. 核心模型：蒙特卡罗剂量模型

建模逻辑：将关键参数（如暴露参数、剂量转换系数）设定为概率分布（正态分布、均匀分布），通过随机抽样生成数千组参数组合，计算剂量分布区间，量化不确定性；

建模步骤：

参数分布设定：如呼吸速率服从正态分布（均值  $10 \text{m}^3/\text{d}$ ，标准差  $1.5 \text{m}^3/\text{d}$ ），土壤分配系数服从对数正态分布；

随机抽样：采用拉丁超立方抽样法生成 N 组（ $N \geq 10000$ ）参数组合；

剂量计算：每组参数代入确定性剂量公式，得到 N 个剂量结果；

结果统计：输出剂量均值、中位数、标准差、95% 置信区间（P5~P95）；

关键参数体系：

概率分布参数：需基于区域实测数据或文献调研确定，如我国南方人群饮水摄入量服从均匀分布（1.5~2.5L/d）；

敏感性参数：通过敏感性分析筛选关键参数（如核素浓度、饮食摄入量），重点优化其分布设定；

技术优势与局限：

优势：量化不确定性，结果更科学严谨，适用于低剂量辐射风险评估、长期累积剂量评估；

局限：计算量大（需专业软件支持）、参数分布设定依赖大量数据，建模周期长（ $\geq 3$  天）。

## 2. 典型应用工具：Crystal Ball + Excel 建模

模型功能：基于 Excel 搭建确定性剂量计算框架，通过 Crystal Ball 插件实现参数概率分布设定与随机抽样，适用于科研项目、高风险项目的精细化剂量评估；

实操要点：

公式嵌入：在 Excel 中编写多途径剂量计算公式，关联参数单元格；

分布赋值：对关键参数（如暴露时间、剂量转换系数）赋值概率分布；

模拟运行：设置抽样次数（10000~50000 次），运行后自动输出剂量分布直方图与统计结果；

应用案例：高放废物地质处置库数千年剂量评估，通过蒙特卡罗模拟，得到 P95 累积剂量  $\leq 1.2\text{mSv}$ ，满足安全标准。

## （三）应急剂量模型 —— 事故场景快速响应工具

### 1. 核心模型：MACCS-II 应急剂量模块

模型功能：耦合事故源项分析、大气扩散模拟、应急剂量计算，适用于核反应堆堆芯熔毁、放射性物质泄漏等事故的短期剂量评估；

核心公式（简化版）：

短期吸入剂量： $E_{\text{inh,emerg}} = C_a(t) \times VR \times t_{\text{emerg}} \times DCF_{\text{inh,short}}$

（ $C_a(t)$ = 随时间变化的空气浓度， $t_{\text{emerg}}$  = 应急暴露时间，如 24h）

应急干预剂量： $E_{\text{interv}} = \sum E_i$ ，用于判断是否启动疏散、隐蔽等应急措施；

关键参数：

应急暴露参数：短期呼吸速率  $15\text{m}^3/\text{d}$ （应急状态下活动水平提升）、暴露时间 24/72h（按事故持续时间设定）；

应急剂量转换系数：短期暴露专用系数（如  $^{131}\text{I}$  吸入 24h 剂量转换系数  $3.7 \times 10^{-6}\text{Sv/Bq}$ ）；

干预水平：参考 IAEA 标准，如 24h 有效剂量 10mSv（疏散干预水平）、1mSv（隐蔽干预水平）；

技术优势：

快速响应：单场景剂量计算  $\leq 30$  分钟，支持应急决策时效性要求；

多情景模拟：可模拟不同泄漏强度、气象条件下的剂量分布，划定高风险区域。

## 2. 补充模型：ARAC 应急剂量评估系统

模型特点：实时耦合气象监测数据、辐射监测数据，实现剂量动态更新，适用于核事故应急现场指挥；

核心功能：

实时剂量预测：每 15 分钟更新一次污染物扩散范围与剂量分布；

应急措施模拟：预测疏散、服用碘片（甲状腺阻断效率  $\geq 90\%$ ）后的剂量削减效果；

可视化输出：通过 GIS 地图展示剂量等值线、高风险区域，支持直观决策。<sup>①</sup>

## （四）生态剂量模型——非人类生物剂量评估工具

### 1. 核心模型：ERICA Tool

模型功能：针对陆生 / 水生生物（如植物、昆虫、鱼类、哺乳动物）的物种特异性剂量评估，适用于放射性生态风险评价；

建模逻辑：

暴露途径：覆盖吸入、食入、皮肤接触、外照射（介质  $\gamma$ 、沉积物  $\gamma$ ），针对不同生物调整暴露参数（如鱼类呼吸速率、植物根系吸收系数）；

剂量计算：采用“浓度 - 剂量”转换因子（CRDF），生态剂量  $E_{eco} = C_{medium} \times CRDF \times \text{暴露时间}$ ；

关键参数体系：

物种参数：内置 12 种代表性生物（如小麦、家兔、鲤鱼、蜜蜂）的默认参数，支持自定义物种参数；

转换因子：按生物类型、核素、介质分类，如鲤鱼对  $^{137}\text{Cs}$  的水体 - 生物转换因子为 100L/kg；

技术输出：

剂量结果：个体有效剂量（ $\mu\text{Gy/h}$ ）、累积剂量（ $\text{mGy/a}$ ）；

风险判定：对比物种特异性剂量基准（如鱼类 100 $\mu\text{Gy/h}$ ），判定生态风险等级（低 / 中 / 高）。

<sup>①</sup> 马秀兰：加强稀土生产中放射性环境影响评价 [J]. 稀土, 2002, (05): 75-77.

## 2. 补充模型：RESRAD-BIOTA

模型优势：支持放射性核素在食物链中的多级富集模拟（如藻类→浮游动物→鱼类→水鸟），量化食物链传递的剂量贡献；

适配场景：放射性废水排放、核事故泄漏对水生生态系统的影响评估。

## 三、模型参数校准与验证方法

### （一）参数校准技术

校准目标：使模型参数与项目所在地实际情况匹配，降低参数不确定性，确保剂量计算误差 $\leq \pm 15\%$ ；

关键参数校准：

暴露参数本地化：通过现场调研（如饮食结构问卷调查、暴露时间统计）获取区域特异性参数（如我国南方人群大米摄入量  $0.4\text{kg/d}$ ，高于默认值  $0.3\text{kg/d}$ ）；

剂量转换系数修正：结合核素形态（如  $\text{U (IV)}/\text{U (VI)}$ ）、介质特性（如土壤 pH 值影响吸附系数）修正默认转换系数；

校准方法：采用最小二乘法，以实测剂量数据（如个人剂量计监测值、环境剂量率监测值）为目标，反向优化模型参数。

### （二）模型验证方法

#### 1. 数据验证

实测数据对比：将模型计算结果与现场监测数据（如核设施周边公众个人剂量、土壤  $\gamma$  剂量率）对比，相对误差 $\leq \pm 20\%$  为验证合格；

跨模型对比：采用 2 种及以上不同模型（如 EPA PATHWAY 与 ERICA Tool）计算同一场景剂量，结果偏差 $\leq \pm 15\%$  为合理；

#### 2. 案例验证

历史事故验证：用模型复现切尔诺贝利、福岛核事故后的剂量分布，与实测数据对比，验证模型在极端场景下的适用性；

同类项目验证：参考已运行项目的剂量监测数据，验证模型在相似场景下的计算精度。

## 四、典型应用场景与实操要点

### （一）核设施正常运行剂量评估（核电厂）

技术适配：确定性剂量模型（EPA PATHWAY）为主，概率性模型为辅（蒙特卡罗法量化不确定性）；

实操要点：

源项耦合：整合核电厂气态 / 液态流出物排放数据（如  $^{131}\text{I}$  年排放量  $1 \times 10^{10}\text{Bq}$ ），通过大气扩散模型（AERMOD）获取周边空气浓度；

剂量贡献分析：重点计算食入（当地农产品、饮用水）与外照射的剂量贡献（通常占总剂量的 70% 以上）；

叠加背景：叠加区域天然放射性本底剂量（如我国年均天然本底剂量  $0.4\text{mSv/a}$ ），计算总有效剂量；

应用效果：核电厂周边公众年均有效剂量  $\leq 0.01\text{mSv}$ ，远低于 GB 18871-2002 规定的  $1\text{mSv/a}$  限值，剂量贡献占比最高的途径为食入当地蔬菜（约 40%）。

## （二）高放废物处置库长期剂量评估

技术适配：概率性剂量模型（蒙特卡罗法）+ 生态剂量模型（ERICA Tool）；

实操要点：

长期参数设定：考虑核素衰变链（如  $^{238}\text{U}$  衰变至  $^{226}\text{Ra}$ ）、屏障材料老化（膨润土渗透系数随时间增大）；

情景分析：设置正常情景（核素缓慢浸出）、异常情景（屏障破损），分别计算 P95 累积剂量；

生态剂量同步评估：重点关注处置库周边关键物种（如地下水鱼类、陆生哺乳动物）的长期辐射剂量；

应用效果：正常情景下数千年内公众累积剂量  $\leq 0.8\text{mSv}$ ，异常情景下  $\leq 1.5\text{mSv}$ ，生态生物剂量  $\leq 50\mu\text{Gy/a}$ ，满足长期安全要求。

## （三）核事故应急剂量评估（福岛型核泄漏）

技术适配：应急剂量模型（MACCS-II + ARAC 系统）；

实操要点：

快速源项估算：基于事故泄漏面积、放射性监测数据，估算  $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  等核素的小时排放量；

多情景模拟：模拟主导风向（如东风）、降雨冲刷等条件下的剂量分布，划定 24h 剂量  $> 10\text{mSv}$  的高风险区域；

应急措施优化：预测服用碘片后甲状腺剂量削减 90%，疏散后公众剂量降低 80%，提出最优应急方案；

应用效果：24h 内完成高风险区域划定（面积  $\leq 10\text{km}^2$ ），为人员疏散、污染防控提供精准依据，应急响应效率提升 40%。

## （四）放射性废水排放生态剂量评估

技术适配：生态剂量模型（ERICA Tool + RESRAD-BIOTA）；



实操要点:

食物链富集模拟: 计算核素(如 $^{90}\text{Sr}$ )在藻类→浮游动物→鲤鱼→水鸟的富集系数(累计富集倍数可达 $10^3$ );

物种剂量对比: 重点评估对辐射敏感物种(如鱼类胚胎、昆虫)的剂量影响;

应用效果: 废水排放后水生生物最大剂量 $\leq 80\mu\text{Gy/a}$ , 低于生态剂量基准( $100\mu\text{Gy/a}$ ), 风险等级判定为“低风险”, 未对水生生态系统造成显著影响, 为废水排放许可审批提供生态安全性依据。

### 第三节 生态风险评估技术

#### 一、放射性生态风险评估技术的核心原理与技术特征

##### (一) 核心应用原理

放射性生态风险评估技术的本质是“核素暴露-生态效应”的量化关联, 核心原理围绕四大环节展开:

生态风险源识别原理: 基于放射性核素的物理化学特性(半衰期、辐射类型、迁移系数)与排放特征, 识别对生态系统具有潜在危害的关键核素(如 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{131}\text{I}$ 等), 明确其释放途径(气态沉降、液态排放、土壤浸出)与环境归趋;

生态暴露量化原理: 通过现场监测与模型模拟, 获取核素在空气、水、土壤、沉积物等介质中的浓度分布, 结合不同生物的暴露行为(呼吸、摄食、体表接触)与生理特征(体型、代谢速率), 量化生物个体的辐射暴露剂量;

生态效应关联原理: 基于辐射生态学数据(实验室毒理试验、野外调查), 建立“暴露剂量-生态效应”响应关系(如剂量-存活率、剂量-繁殖力、剂量-种群增长率), 明确不同效应等级对应的剂量阈值;

风险等级判定原理: 通过对比实际暴露剂量与效应阈值, 结合生态系统服务功能(如物质循环、生物多样性维持)的潜在损失, 采用定量或半定量方法判定风险等级(低/中/高/极高风险), 为防控措施制定提供依据。<sup>①</sup>

##### (二) 核心技术特征

物种特异性强: 不同生物类群(植物、昆虫、鱼类、哺乳动物)的辐射敏感性差异显著(如鱼类胚胎对 $^{131}\text{I}$ 的敏感性是成体的5~10倍), 需针对代表性物种定制评估方案;

多介质多路径耦合: 核素可通过大气沉降、水体迁移、土壤吸附、食物链富集等

① 陈宇波, 曾秀兰. 水利工程放射性环境影响评价方法探讨[J]. 人民珠江, 1994, (05): 39-42.

多途径影响生态系统，需整合多介质暴露剂量，避免单一途径评估遗漏；

长期累积效应主导：长半衰期核素（如  $^{137}\text{Cs}$  半衰期 30 年、 $^{238}\text{U}$  半衰期  $4.47 \times 10^9$  年）的长期累积暴露，对生态系统的影响远大于短期急性暴露，需延长评估时间尺度至数十年；

生态链传递放大效应：核素在食物链中可逐级富集（如藻类→浮游动物→鱼类的  $^{137}\text{Cs}$  富集倍数可达  $10^3$  级），高营养级生物面临更高暴露风险，需重点关注食物链顶端物种；

标准适配性多元：需同时参考辐射防护标准（如 IAEA 生态辐射防护指南）、生态环境质量标准（如 GB 3095-2012）与物种敏感性基准，确保评估结论合规且科学。

## 二、放射性生态风险评估的关键技术方法体系

根据评估流程与技术特性，放射性生态风险评估技术主要分为“风险识别技术”“生态剂量量化技术”“生态效应评估技术”“风险等级判定技术”四大类，各类技术协同形成完整评估链条：

### （一）风险识别技术——评估基础与前提

核心功能：明确评估范围、关键核素、敏感物种与主要暴露途径，为后续量化评估划定边界；

关键方法：

核素危害性排序法：基于核素的辐射毒性（ $\alpha/\beta/\gamma$  射线毒性系数）、半衰期、迁移能力、生物富集系数，采用层次分析法（AHP）对核素进行危害性评分，筛选前 3~5 种高危害核素（如核事故场景下优先关注  $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ ，放射性废物处置场景下优先关注 U、Pu）；

敏感物种筛选法：结合评估区域生态调查数据，筛选代表性物种（覆盖不同营养级、生态位），优先纳入辐射敏感物种（如鱼类胚胎、鸟类、小型哺乳动物）与关键生态功能物种（如传粉昆虫、分解者）；

暴露途径识别法：通过分析核素排放方式与环境介质特性，识别主导暴露途径（如气态排放以大气吸入为主，液态排放以水体摄食为主，土壤污染以根系吸收为主）；

技术参数：核素危害性评分指标权重（辐射毒性 0.4、半衰期 0.3、迁移能力 0.15、生物富集系数 0.15），敏感物种筛选需覆盖 3 个以上营养级、5 种以上代表性生物；

适配场景：所有放射性项目的生态风险评估启动阶段，尤其适用于新建核设施、核事故应急等缺乏历史数据的场景；

核心优势与局限：优势是快速聚焦评估重点、降低评估复杂度；局限是依赖生态调查与核素特性数据，缺乏基础数据时易产生偏差。

## （二）生态剂量量化技术——风险量化核心

核心功能：精准计算敏感物种的实际辐射暴露剂量，为效应评估提供量化基础；

关键方法：

物种特异性剂量模型法：采用生态剂量专用模型（如 ERICA Tool、RESRAD-BIOTA），输入介质核素浓度与物种生理参数（如呼吸速率、摄食率、体重），计算个体有效剂量（ $\mu\text{Gy/h}$  或  $\text{mGy/a}$ ）；

食物链富集剂量法：基于生物浓缩因子（BCF）、生物积累因子（BAF），计算核素在食物链各营养级的浓度，进而量化高营养级生物的摄食暴露剂量：

食物链剂量  $E_{\text{chain}} = \Sigma (\text{低营养级核素浓度 } C_i \times \text{摄食率 } R_i \times \text{剂量转换系数 DCF})$ ；

现场实测验证法：通过生物样品监测（如采集鱼类、植物组织分析核素含量），反推生物实际摄入量与暴露剂量，验证模型计算结果；

技术参数：模型需采用物种特异性参数（如鲤鱼呼吸速率  $0.5\text{L}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ 、小麦根系吸收系数  $10^{-3}\text{L}/\text{kg}$ ），食物链富集剂量计算需包含 2~3 个营养级，实测验证相对误差  $\leq \pm 20\%$ ；

适配场景：所有生态风险量化评估环节，尤其适用于复杂生态系统（如湿地、海洋）的多物种剂量计算；

核心优势与局限：优势是剂量计算精准、物种针对性强；局限是依赖物种生理参数数据库，部分珍稀物种参数缺失。

## （三）生态效应评估技术——风险本质判定

核心功能：分析辐射剂量与生态效应的关联关系，明确核素暴露对生物个体、种群、群落的潜在危害；

关键方法：

个体水平效应评估：采用实验室毒理试验法，观测不同剂量梯度下生物的急性毒性（存活率、死亡率）与慢性毒性（繁殖力、生长速率、器官损伤），如  $^{137}\text{Cs}$  暴露对鱼类胚胎孵化率的影响、 $^{226}\text{Ra}$  对植物生长量的抑制效应；

种群水平效应评估：采用种群动态模型（如 Logistic 增长模型、矩阵模型），模拟长期辐射暴露对种群数量、出生率、死亡率的影响，预测种群衰退风险（如小型哺乳动物种群在  $100\mu\text{Gy/a}$  剂量下的年衰退率）；

群落水平效应评估：通过野外调查法，对比污染区域与对照区域的生物多样性指数（Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数）、群落结构（优势种占比、物种均匀度），分析辐射对群落完整性的影响；

生态功能效应评估：监测生态系统关键功能指标（如光合作用效率、有机物分解

速率、养分循环速率），评估辐射对生态系统服务功能的潜在损失；

技术参数：实验室毒理试验剂量梯度设置 5~7 组（含空白对照组），种群模型模拟时间尺度 $\geq 30$  年，群落调查样方数量 $\geq 30$  个，生态功能指标监测周期 $\geq 1$  年；

适配场景：核设施长期运行、放射性废物处置场长期影响、核事故后期生态恢复评估；

核心优势与局限：优势是效应评估全面、从个体到生态系统多维度覆盖；局限是周期长、成本高，长期效应监测难度大。

#### （四）风险等级判定技术——决策支持核心

核心功能：综合剂量与效应数据，量化风险等级，为防控措施制定提供明确依据；

关键方法：

商值法（HQ）：最常用的定量判定方法，通过计算实际暴露剂量与基准剂量的比值判定风险：

$$HQ = \text{实际暴露剂量} (E_{\text{actual}}) / \text{基准剂量} (E_{\text{benchmark}})$$

（ $HQ \leq 1$  为低风险， $1 < HQ \leq 10$  为中风险， $HQ > 10$  为高风险），基准剂量参考 IAEA 推荐值（如鱼类  $100\mu\text{Gy/h}$ 、陆生植物  $500\mu\text{Gy/h}$ ）；

模糊综合评价法：针对多核素、多物种、多效应指标的复杂场景，采用模糊数学方法构建评价矩阵，结合指标权重计算综合风险指数，划分风险等级（低 / 中 / 高 / 极高）；

情景分析法：设置不同防控措施情景（如优化排放方案、设置生态缓冲带），对比不同情景下的风险等级变化，筛选最优防控方案；

技术参数：商值法基准剂量需根据物种类型调整（敏感物种基准剂量取常规值的  $1/2 \sim 1/3$ ），模糊综合评价法指标权重通过专家打分确定，情景分析需包含 3 种以上防控情景；

适配场景：项目环评决策阶段、核设施运行环境管理、放射性污染修复效果评估；

核心优势与局限：优势是风险量化直观、决策导向性强；局限是基准剂量的物种特异性差异大，模糊评价权重设定存在主观性。

### 三、典型应用场景与实操要点

#### （一）核设施正常运行生态风险评估（核电厂周边生态系统）

应用场景：核电厂正常运行时，气态 / 液态流出物中  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{90}\text{Sr}$  等核素对周边陆生（农田、林地）与水生（河流、湖泊）生态系统的潜在风险评估；

技术适配方案：

风险识别：筛选高危害核素（ $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{131}\text{I}$ ）、敏感物种（小麦、鲤鱼、家兔、蜜蜂），

主导暴露途径（农田生态系统以土壤根系吸收 + 作物摄食为主，水生生态系统以水体摄食 + 体表接触为主）；

生态剂量量化：采用 ERICA Tool 计算各物种剂量（小麦  $0.5\mu\text{Gy/h}$ 、鲤鱼  $2.3\mu\text{Gy/h}$ 、家兔  $1.1\mu\text{Gy/h}$ ），结合食物链富集模型计算水鸟剂量（ $5.7\mu\text{Gy/h}$ ）；

生态效应评估：通过野外调查对比核电厂周边与对照区域的小麦生长量、鲤鱼繁殖力、鸟类种群数量，未发现显著差异；

风险等级判定：采用商值法，所有物种  $HQ \leq 0.06$ （远低于 1），判定为“低风险”；  
实操要点：

介质浓度监测：重点监测土壤表层（0~20cm）、水体表层（0~1m）核素浓度，监测频率为每季度 1 次；

物种剂量验证：采集小麦籽粒、鲤鱼肌肉组织实测核素含量，反推剂量与模型计算值对比，相对误差  $\leq \pm 15\%$ ；

背景值扣除：需扣除区域天然放射性本底对生物剂量的贡献（通常占比  $\leq 10\%$ ）；

应用效果：明确核电厂正常运行对周边生态系统无显著风险，为项目持续运行许可提供生态安全依据。

## （二）放射性废物处置场生态风险评估（低中放废物处置场）

应用场景：低中放废物处置场运行期及退役后，核素（U、Th、 $^{137}\text{Cs}$ ）浸出对周边土壤 - 植被生态系统、地下水水生生态系统的长期风险评估；

### 1. 技术适配方案

风险识别：筛选高危害核素（U、 $^{137}\text{Cs}$ ）、敏感物种（草本植物、啮齿类动物、地下水虾类），主导暴露途径（土壤 - 植被 - 啮齿类的食物链传递、地下水虾类的水体摄食）；

生态剂量量化：采用 RESRAD-BIOTA 模型模拟长期剂量，考虑核素浸出速率与土壤吸附特性，预测 50 年内啮齿类动物最大剂量  $12\mu\text{Gy/h}$ ，地下水虾类最大剂量  $8\mu\text{Gy/h}$ ；

生态效应评估：通过种群动态模型模拟，50 年内啮齿类种群数量无显著衰退（年增长率  $\geq 0.98$ ），地下水虾类存活率维持在 90% 以上；

风险等级判定：商值法判定啮齿类  $HQ=0.12$ ，地下水虾类  $HQ=0.08$ ，均为“低风险”；设置屏障破损异常情景，剂量升至  $85\mu\text{Gy/h}$ （ $HQ=0.85$ ），仍为“低风险”；

### 2. 实操要点

长期参数设定：考虑土壤 pH 值变化、植被演替对核素迁移的影响，浸出速率采用实测值（如 U 浸出速率  $\leq 10^{-7}\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ）；

生态缓冲带设置：评估处置场周边 300m 生态缓冲带的剂量削减效果（削减率  $\geq 40\%$ ）；



敏感生态区避让：确保处置场周边 1km 内无珍稀物种栖息地、重要湿地等敏感生态区；

应用效果：验证处置场设计的长期生态安全性，为处置场选址优化与运行管理提供技术支撑。

### （三）核事故应急生态风险评估（福岛型核泄漏）

应用场景：核事故泄漏后，高浓度  $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  对周边农田、森林、河流生态系统的短期急性风险与长期累积风险评估，为生态应急防控与恢复提供依据；

#### 1. 技术适配方案

风险识别：筛选高危害核素（ $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ ）、敏感物种（农作物、鸟类、鱼类），主导暴露途径（大气沉降→植物叶片吸收、水体污染→鱼类摄食）；

生态剂量量化：采用 ARAC 应急生态剂量模块快速计算，事故后 72h 农作物叶片剂量达  $150\mu\text{Gy/h}$ ，河流鱼类剂量达  $200\mu\text{Gy/h}$ ；

生态效应评估：短期效应（农作物叶片坏死、鱼类急性死亡率升高），长期效应（鸟类繁殖力下降、森林群落物种多样性降低）；

风险等级判定：短期农作物  $\text{HQ}=1.5$ （中风险），鱼类  $\text{HQ}=2.0$ （中风险）；采取应急措施（农田覆盖、水体截流）后，1 个月内剂量降至  $12\mu\text{Gy/h}$ （ $\text{HQ}=0.12$ ），风险等级降至“低风险”；

#### 2. 实操要点

快速响应：采用简化模型在 48h 内完成急性风险评估，支撑应急决策；

重点区域优先：优先评估农田、饮用水源地周边生态系统，确保农产品与水资源安全；

长期跟踪：制定为期 10 年的生态风险跟踪评估计划，每半年监测 1 次物种数量与群落结构；

应用效果：快速划定中风险区域（农田  $20\text{km}^2$ 、河流  $15\text{km}$ ），针对性提出生态应急措施，有效降低核事故对生态系统的破坏。

### （四）放射性废水排放生态风险评估（核燃料循环设施）

应用场景：核燃料加工厂废水排放对受纳水体（河流、近海）水生生态系统（浮游生物、底栖生物、鱼类）的风险评估，确保排放合规；

#### 1. 技术适配方案

风险识别：筛选高危害核素（ $^{90}\text{Sr}$ 、 $\text{U}$ 、 $^{129}\text{I}$ ），敏感物种（浮游藻类、枝角类、鲤鱼、水鸟），主导暴露途径（水体摄食、食物链传递）；

生态剂量量化：采用 ERICA Tool + 食物链富集模型，计算各营养级生物剂量（浮游藻类  $0.3\mu\text{Gy/h}$ 、枝角类  $1.2\mu\text{Gy/h}$ 、鲤鱼  $3.5\mu\text{Gy/h}$ 、水鸟  $8.9\mu\text{Gy/h}$ ）；

生态效应评估：实验室毒理试验表明， $^{90}\text{Sr}$  浓度  $\leq 0.1\text{Bq/L}$  时，鲤鱼胚胎孵化率  $\geq 95\%$ ，无显著毒性效应；

风险等级判定：所有物种  $\text{HQ} \leq 0.09$ ，判定为“低风险”，满足 GB 3838-2002《地表水环境质量标准》要求；

## 2. 实操要点

废水浓度监测：排放口设置在线监测设备，实时监测核素浓度，确保排放浓度  $\leq$  限值（如  $^{90}\text{Sr} \leq 1\text{Bq/L}$ ）；

食物链剂量验证：采集受纳水体不同营养级生物样品，实测核素含量与模型预测值对比，误差  $\leq \pm 20\%$ ；

生态流量保障：确保废水排放时受纳水体生态流量  $\geq$  最小生态需水量，避免高浓度废水局部累积；

应用效果：明确废水排放对水生生态系统无显著风险，为排放许可审批与环境管理提供依据。

# 四、质量控制体系与不确定性分析

## （一）全流程质量控制体系

### 1. 数据质量控制

监测数据质控：介质核素浓度监测遵循 GB/T 14583-1993 标准，生物样品分析采用平行样（相对偏差  $\leq \pm 10\%$ ）、加标回收（回收率  $85\% \sim 115\%$ ）、标准参考物质验证（误差  $\leq \pm 8\%$ ）；

模型参数质控：生态剂量模型参数需优先采用区域实测数据（如本地物种生理参数、土壤 / 水体理化参数），缺乏实测数据时采用权威数据库默认值（如 ERICA Tool 内置参数），参数误差  $\leq \pm 15\%$ ；

效应数据质控：实验室毒理试验需设置 3 次重复，数据变异系数  $\leq \pm 10\%$ ；野外调查样方需随机布设，样方数量满足统计学要求（置信水平  $95\%$ ）。

### 2. 评估过程质控

方法适配性审查：根据评估场景（正常运行 / 事故应急、陆生 / 水生生态系统）选择合适的评估方法，如应急场景优先采用商值法，复杂生态系统采用模糊综合评价法；

专家论证：评估报告需组织辐射生态学、生态模型、核环境科学等领域专家评审，重点审查敏感物种筛选合理性、剂量计算准确性、效应评估科学性；

文档完整性：归档资料需包含生态调查报告、监测数据、模型参数文件、专家评审意见，确保评估过程可追溯、可复核。

### 3. 人员与机构质控

机构资质：评估机构需具备核与辐射环境影响评价专项资质，实验室需通过 CMA/CNAS 认证；

人员资质：评估人员需具备生态学与辐射防护交叉学科背景，持有辐射安全与防护培训合格证，每年参加不少于 24 学时专项培训。

### （二）不确定性分析方法

#### 1. 不确定性来源识别

数据不确定性：监测数据的随机误差、物种参数的空间变异性（如不同区域鲤鱼的呼吸速率差异）；

模型不确定性：剂量模型的简化假设（如忽略核素在生物体内的代谢过程）、效应模型的物种外推误差（从实验室模式生物外推至野外物种）；

方法不确定性：风险等级判定中基准剂量的选择差异、权重设定的主观性。

#### 2. 不确定性量化方法

敏感性分析：采用单参数扰动法（参数  $\pm 20\%$  变化），识别对风险等级影响最大的关键参数（如核素浓度、生物富集系数）；

蒙特卡罗模拟：对不确定参数（如暴露剂量、基准剂量）设定概率分布，通过 10000 次以上抽样，计算风险等级的概率分布（如“低风险”概率 92%、“中风险”概率 8%）；

#### 3. 不确定性应对措施

关键参数实测：对敏感性系数  $\geq 0.5$  的参数（如核素浓度、物种摄食率）进行现场实测，降低数据不确定性；

多方法对比验证：采用 2 种以上评估方法（如商值法 + 模糊综合评价法）计算风险等级，结果一致时方可确认；

保守性假设：在不确定性无法完全量化时，采用保守参数（如取敏感物种基准剂量的下限值），确保评估结果偏安全。

## 第四节 公众健康影响评价

### 一、公众健康影响评价的核心原理与技术特征

#### （一）核心应用原理

公众健康影响评价的本质是“放射性暴露 - 健康效应”的量化关联，核心原理围绕四大环节展开：

公众暴露场景识别原理：基于放射性项目的排放特征（源项类型、排放方式、强

度)与周边环境特征(人口分布、生活习惯、饮食结构),识别公众的核心暴露场景(如居住、饮食、户外活动)与关键暴露途径(吸入、食入、外照射、皮肤接触);

多途径剂量核算原理:整合环境监测与模型模拟数据,获取核素在空气、水、食物、土壤等介质中的浓度分布,结合人群暴露参数(呼吸速率、饮食摄入量、暴露时间),量化公众个体及群体的综合有效剂量;

健康风险关联原理:基于辐射流行病学数据与国际公认的风险评估模型(如线性无阈模型 LNT),建立“辐射剂量-健康效应”关联关系,量化致癌风险、非致癌风险与遗传风险;

风险防控优化原理:通过识别高风险人群、高贡献途径,结合成本效益分析,筛选针对性防护措施(如优化排放方案、设置防护距离、调整饮食结构),将公众健康风险降至“可合理达到的尽量低水平”(ALARA 原则)。

## (二) 核心技术特征

人群特异性强:不同人群(成人/儿童/孕妇、城市/农村居民)的暴露参数与辐射敏感性差异显著(如儿童甲状腺对 $^{131}\text{I}$ 的敏感性是成人的3~5倍),需针对敏感人群定制评估方案;

多途径联合核算:公众暴露涵盖吸入(气态核素)、食入(饮水、农产品、水产品)、外照射(环境 $\gamma$ 射线、土壤 $\beta$ 射线)、皮肤接触(土壤/水体核素)等多途径,需叠加各途径剂量,避免单一途径遗漏;

低剂量长期效应主导:公众暴露以低剂量( $\leq 1\text{mSv/a}$ )、长期累积(数十年)为主要特征,需重点关注低剂量辐射的潜在致癌风险与遗传效应;

风险分布可视化:需结合人口分布数据,实现健康风险的空间精细化表达(如高风险区域、高风险人群分布),支撑精准防控;

标准适配性严格:需严格遵循国家辐射防护标准(GB 18871-2002)、公众健康风险可接受水平(如致癌风险 $\leq 1 \times 10^{-6}$ ),确保评价结论合规。

## 二、公众健康影响评价的关键技术方法体系

根据评估流程与技术特性,公众健康影响评价技术主要分为“暴露场景识别技术”“公众剂量核算技术”“健康风险量化技术”“风险防控优化技术”四大类,各类技术协同形成完整评估链条:

### (一) 暴露场景识别技术——评估基础与前提

核心功能:明确评估范围、关键核素、暴露人群、核心途径与场景,为后续量化评估划定边界;

关键方法：

人群特征调查法：通过问卷调查、人口统计数据整合，明确评估区域人口数量、年龄结构（儿童 / 成人 / 老人占比）、生活习惯（如户外活动时间、饮食结构）、居住分布（距污染源距离），识别敏感人群（孕妇、儿童、老年人）；

暴露途径优先级排序法：基于核素排放方式与环境介质特性，采用矩阵法分析各途径的暴露概率与剂量贡献潜力，排序筛选主导途径（如核电厂气态排放以吸入为主，放射性废水排放以饮水 + 食入为主）；

场景分类构建法：结合人群活动特征，构建典型暴露场景（如“居住 - 户外活动 - 本地饮食”场景、“通勤 - 外购饮食”场景），覆盖 90% 以上公众的活动模式；

技术参数：人群调查样本量  $\geq 500$  份（置信水平 95%），敏感人群识别需覆盖儿童（0~14 岁）、孕妇、老年人（ $\geq 65$  岁），暴露途径排序指标权重（暴露概率 0.5、剂量贡献潜力 0.5）；

适配场景：所有放射性项目的公众健康影响评价启动阶段，尤其适用于人口密集区核技术应用项目；

核心优势与局限：优势是快速聚焦评估重点、贴合公众实际暴露特征；局限是依赖详细的人群调查数据，缺乏基础数据时易产生偏差。

## （二）公众剂量核算技术——风险量化核心

核心功能：精准计算不同人群、不同途径的辐射暴露剂量，为健康风险评估提供量化基础；

关键方法：

多途径剂量叠加法：整合各暴露途径剂量，计算公众个体综合有效剂量：

$$E_{\text{total}} = E_{\text{inh}} (\text{吸入}) + E_{\text{ing}} (\text{食入}) + E_{\text{ext}} (\text{外照射}) + E_{\text{skin}} (\text{皮肤接触})；$$

人群特异性剂量模型法：采用公众剂量专用模型（如 RESRAD-OFFSITE、PATHWAY），输入介质核素浓度、人群暴露参数（如儿童呼吸速率  $7\text{m}^3/\text{d}$ 、成人饮水摄入量  $2\text{L}/\text{d}$ ），计算不同人群剂量；

现场实测验证法：通过布设环境  $\gamma$  剂量率监测点、采集公众饮食样品（大米、蔬菜、饮用水）分析核素含量，反推公众实际暴露剂量，验证模型计算结果；

技术参数：暴露参数需采用本地化数据（如我国成人日均大米摄入量  $0.3\text{kg}/\text{d}$ 、儿童户外活动时间  $3\text{h}/\text{d}$ ），剂量计算需包含有效剂量（ $\text{Sv}/\text{a}$ ）与关键器官剂量（甲状腺、性腺、骨髓），实测验证相对误差  $\leq \pm 15\%$ ；

适配场景：所有公众健康风险量化评估环节，尤其适用于复杂暴露场景（如人口密集区核设施）；

核心优势与局限：优势是剂量计算全面、人群针对性强；局限是依赖本地化暴露



参数数据库，部分区域参数缺失。

### （三）健康风险量化技术——风险本质判定

核心功能：基于剂量核算结果，量化放射性暴露对公众的健康风险，明确风险可接受性；

关键方法：

致癌风险评估：采用线性无阈（LNT）模型，结合 ICRP 推荐的致癌风险系数（如  $\gamma$  射线致癌风险系数  $5.5 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ ），计算超额致癌风险：

$R_{\text{cancer}} = E_{\text{total}} \times \text{SF}$ （致癌风险系数）；

（可接受水平：公众致癌风险  $\leq 1 \times 10^{-6}$ ，高风险人群  $\leq 1 \times 10^{-5}$ ）；

非致癌风险评估：计算危害商（HQ）= 实际剂量 / 参考剂量（RfD）， $HQ \leq 1$  为可接受，重点关注放射性核素对甲状腺、肾脏的非致癌损伤；

遗传风险评估：采用遗传风险系数（如 ICRP 推荐值  $1.3 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ ），计算遗传风险：

$R_{\text{genetic}} = E_{\text{total}} \times \text{GF}$ （遗传风险系数），评估对后代的潜在遗传危害；

风险分布分析：结合人口分布数据，采用 GIS 技术绘制健康风险空间分布图，识别高风险区域与高风险人群；

技术参数：风险计算需覆盖主要放射性核素（如  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、U、Pu），高风险人群风险贡献占比需单独核算，风险分布空间分辨率  $\leq 1\text{km}$ ；

适配场景：核设施运行、放射性废物处置、核事故应急等各类场景的公众健康风险评估；

核心优势与局限：优势是风险量化直观、决策导向性强；局限是低剂量区间（ $< 100\text{mSv}$ ）LNT 模型适用性存在学术争议，遗传风险数据积累不足。

### （四）风险防控优化技术——决策支持核心

核心功能：基于风险评估结果，筛选最优防护措施，降低公众健康风险；

关键方法：

措施有效性评估：量化不同防护措施的剂量削减率与风险降低率，如“优化排放高度”可使吸入剂量削减 30%，“设置 500m 防护距离”可使外照射剂量削减 60%；

成本效益分析：对比不同防护方案的经济成本（如技术改造费用、土地征用成本）与健康效益（如避免的致癌病例数、医疗费用节省），筛选成本效益比最优方案；

ALARA 原则优化：以“可合理达到的尽量低水平”为目标，通过敏感性分析识别关键风险因子（如排放强度、暴露时间），提出针对性优化措施；

技术参数：防护措施需明确剂量削减率  $\geq 30\%$ 、风险降低率  $\geq 40\%$ ，成本效益比  $\leq 1:5$ （每投入 1 元可避免 5 元以上健康损失）；

适配场景：项目环评决策阶段、核设施运行环境管理、放射性污染修复效果评估；

核心优势与局限：优势是措施针对性强、兼顾技术与经济可行性；局限是成本效益分析依赖健康经济损失核算数据，部分数据难以量化。

### 三、典型应用场景与实操要点

#### （一）核设施正常运行公众健康影响评价（核电厂）

应用场景：核电厂正常运行时，气态 / 液态流出物中  $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{90}\text{Sr}$  等核素对周边 50km 范围内公众的健康风险评估；

##### 1. 技术适配方案

暴露场景识别：调查周边人口分布（重点关注距厂区 10km 内村庄）、饮食结构（以本地农产品、饮用水为主），识别敏感人群（儿童、孕妇），主导暴露途径（食入 + 外照射）；

公众剂量核算：采用 RESRAD-OFFSITE 模型，输入本地化暴露参数（成人饮水摄入量 2L/d、儿童甲状腺剂量转换系数  $1.2 \times 10^{-6} \text{Sv/Bq}$ ），计算公众年均有效剂量（成人 0.008mSv/a、儿童 0.015mSv/a）；

健康风险量化：成人致癌风险  $4.4 \times 10^{-7}$ ，儿童致癌风险  $8.3 \times 10^{-7}$ ，均低于  $1 \times 10^{-6}$  可接受水平，非致癌风险  $\text{HQ}=0.05 \leq 1$ ；

风险防控优化：提出“优化排放高度至 120m + 加强农产品监测”方案，剂量削减率 35%，成本效益比 1:8；

##### 2. 实操要点

介质浓度监测：重点监测土壤、饮用水、本地农产品核素浓度，监测频率每季度 1 次；

敏感人群重点核算：儿童、孕妇剂量与风险需单独评估，采用更保守的暴露参数；

背景风险扣除：扣除区域天然放射性本底导致的健康风险（约占总风险的 10%~20%）；

应用效果：明确核电厂正常运行对公众健康风险可接受，为项目持续运行许可提供健康安全依据。

#### （二）放射性废物处置场公众健康影响评价（低中放废物处置场）

应用场景：低中放废物处置场运行期及退役后，核素（U、Th、 $^{137}\text{Cs}$ ）浸出对周边 30km 范围内公众的长期健康风险评估；

##### 1. 技术适配方案

暴露场景识别：调查周边人口分布（以农村居民为主）、饮水来源（地下水占比 60%），主导暴露途径（饮水 + 土壤 - 农产品食入）；

公众剂量核算：采用 PATHWAY 模型模拟 50 年长期剂量，考虑核素浸出速率与

土壤吸附特性，公众年均有效剂量最高  $0.05\text{mSv/a}$ （地下水饮用人群）；

健康风险量化：地下水饮用人群致癌风险  $2.8 \times 10^{-6}$ ，接近可接受水平，需强化防控；

风险防控优化：提出“设置地下水监测井 + 优化处置库防渗屏障”方案，剂量削减率 50%，致癌风险降至  $1.4 \times 10^{-6}$ ；

## 2. 实操要点

长期参数设定：考虑核素衰变链、土壤 pH 值变化对核素迁移的影响，浸出速率采用实测值（如 U 浸出速率  $\leq 10^{-7}\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ）；

高风险人群聚焦：重点评估地下水饮用人群、近处置场居住人群的健康风险；

长期跟踪计划：制定为期 50 年的健康风险跟踪评估计划，每 5 年监测 1 次介质核素浓度与公众剂量；

应用效果：通过优化防控措施，公众健康风险降至可接受水平，为处置场选址与运行管理提供技术支撑。

## （三）核事故应急公众健康影响评价（福岛型核泄漏）

应用场景：核事故泄漏后，高浓度  $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  对周边 100km 范围内公众的短期急性风险与长期累积风险评估，为应急响应提供依据；

### 1. 技术适配方案

暴露场景识别：快速调查人口分布、疏散通道，识别高风险区域（主导风向下风向 20km）与敏感人群（儿童、医院患者），主导暴露途径（吸入 + 外照射）；

公众剂量核算：采用 MACCS-II 应急剂量模块，快速计算事故后 72h 公众短期有效剂量（高风险区域成人  $15\text{mSv}$ 、儿童  $25\text{mSv}$ ）；

健康风险量化：短期急性致癌风险  $1.1 \times 10^{-3}$ （超可接受水平 1000 倍），长期累积致癌风险  $3.5 \times 10^{-4}$ ；

风险防控优化：提出“高风险区域人员疏散 + 服用碘片（甲状腺剂量削减 90%）+ 隐蔽防护”方案，72h 内将公众剂量降至  $1\text{mSv}$  以下；

### 2. 实操要点

快速响应：采用简化模型与实时监测数据联动，48h 内完成风险评估与应急方案制定；

分级防控：按风险等级（高 / 中 / 低）划定防控区域，针对性采取疏散、隐蔽、服用碘片等措施；

短期与长期结合：既要评估短期急性风险，也要预测长期累积风险，制定长期跟踪监测计划；

应用效果：快速划定高风险区域（ $20\text{km}^2$ ），针对性采取应急措施，使公众急性

健康风险降低 95% 以上，有效避免大规模健康损害。

#### （四）放射性废水排放公众健康影响评价（核燃料循环设施）

应用场景：核燃料加工厂废水排放对受纳水体周边公众（以渔民、沿岸居民为主）的健康风险评估；

##### 1. 技术适配方案

暴露场景识别：调查沿岸人口分布、职业特征（渔民占比 15%）、饮食结构（水产品摄入量  $0.1\text{kg/d}$ ），主导暴露途径（食入水产品 + 饮水）；

公众剂量核算：采用 PATHWAY 模型，结合水产品核素富集系数（如鲤鱼对  $^{137}\text{Cs}$  的富集系数  $100\text{L/kg}$ ），计算渔民年均有效剂量  $0.03\text{mSv}$ ，普通居民  $0.005\text{mSv}$ ；

健康风险量化：渔民致癌风险  $1.7 \times 10^{-6}$ （接近可接受水平），普通居民  $3.0 \times 10^{-7}$ （低风险）；

风险防控优化：提出“废水深度处理（核素浓度削减 50%）+ 水产品定期监测”方案，渔民致癌风险降至  $8.5 \times 10^{-7}$ ；

##### 2. 实操要点

重点人群聚焦：优先评估水产品摄入量高的渔民、沿岸居民，单独核算其风险贡献；

食物链剂量验证：采集受纳水体水产品实测核素含量，反推剂量与模型计算值对比，误差  $\leq \pm 20\%$ ；

排放管控：确保废水排放浓度  $\leq \text{GB } 8978-1996$  限值（如  $^{90}\text{Sr} \leq 1\text{Bq/L}$ ），设置排放口在线监测设备；

应用效果：明确废水排放对公众健康风险可接受，为排放许可审批与环境管理提供依据。

### 四、质量控制体系与不确定性分析

#### （一）全流程质量控制体系

##### 1. 数据质量控制

监测数据质控：介质核素浓度监测遵循 GB/T 14583-1993 标准，饮食样品分析采用平行样（相对偏差  $\leq \pm 10\%$ ）、加标回收（回收率 85%~115%）、标准参考物质验证（误差  $\leq \pm 8\%$ ）；人群暴露参数调查需经过信度检验（Cronbach's  $\alpha \geq 0.8$ ），确保数据可靠性；

模型参数质控：剂量模型与风险评估模型参数需优先采用本地化实测数据，缺乏实测数据时选用 ICRP、EPA 等权威机构推荐值，参数误差  $\leq \pm 15\%$ ；模型输入数据需经过逻辑校验（如核素浓度数值范围合理性、暴露时间与人群活动特征匹配性）；

风险数据质控：健康风险计算需进行交叉验证（如不同模型计算结果对比），致

癌风险、遗传风险数值需符合量级逻辑（如低剂量暴露下风险值应在  $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-6}$  区间）。

## 2. 评估过程质控

方法适配性审查：根据项目类型（正常运行 / 事故应急）、人群特征（人口密集 / 稀疏）选择合适的评估方法，如事故应急场景优先采用简化模型快速计算，人口密集区需采用精细化风险分布分析；

专家论证：评估报告需组织辐射防护、流行病学、公共卫生等领域专家评审，重点审查暴露场景识别合理性、剂量核算准确性、风险量化科学性与防控措施可行性；

文档完整性：归档资料需包含人群调查报告、监测数据报告、模型参数文件、专家评审意见、修改说明等，确保评估过程可追溯、可复核。

## 3. 人员与机构质控

机构资质：评估机构需具备核与辐射环境影响评价专项资质，实验室需通过 CMA（检验检测机构资质认定）、CNAS（实验室认可）；

人员资质：评估人员需持有辐射安全与防护培训合格证、环境影响评价工程师职业资格证书，具备辐射剂量学与公共卫生交叉学科背景，每年参加不少于 24 学时专项培训。

## （二）不确定性分析方法

### 1. 不确定性来源识别

数据不确定性：监测数据的随机误差（如  $\gamma$  剂量率监测误差  $\pm 5\%$ ）、人群暴露参数的个体差异（如不同居民饮食摄入量波动）；

模型不确定性：剂量模型的简化假设（如忽略核素在人体内的代谢过程）、风险评估模型的外推误差（如从流行病学数据外推至普通人群）；

方法不确定性：风险可接受水平的选择差异（不同国家 / 地区标准略有不同）、防控措施效果的预测误差（如防护距离实际剂量削减率与模型预测值偏差）。

### 2. 不确定性量化方法

敏感性分析：采用单参数扰动法（参数  $\pm 20\%$  变化），识别对风险结果影响最大的关键参数（如核素浓度、饮食摄入量、风险系数），敏感性系数  $\geq 0.5$  的参数需重点优化；

蒙特卡罗模拟：对不确定参数（如暴露剂量、风险系数）设定概率分布（正态分布、均匀分布），通过 10000 次以上随机抽样，计算风险结果的概率分布（如致癌风险的均值、中位数、95% 置信区间）；

误差传递分析：采用方差传递公式量化各环节误差的累积影响，总误差 =  $\sqrt{(\text{数据误差}^2 + \text{模型误差}^2 + \text{方法误差}^2)}$ ，确保总误差  $\leq \pm 25\%$ 。



3. 不确定性应对措施

关键参数实测：对敏感性系数高的参数（如核素浓度、人群饮食摄入量）进行现场实测或专项调查，降低数据不确定性；

多模型对比验证：采用 2 种及以上不同类型的模型（如 RESRAD-OFFSITE 与 PATHWAY）计算同一场景剂量与风险，结果偏差 $\leq \pm 15\%$ 方可确认；

保守性假设：在不确定性无法完全量化时，采用保守性假设（如取最大排放强度、最不利暴露参数）确保评估结果偏安全，保守因子控制在 1~3 倍，避免过度保守导致资源浪费。

第五节 环境影响评价案例分析

一、案例分类与核心分析维度

（一）案例分类体系

根据项目类型、评价阶段与环境风险特征，放射性环境影响评价案例可分为四大类，各类案例的核心特征与评价重点如下：

| 案例类型     | 代表项目                     | 核心特征                | 评价重点                        |
|----------|--------------------------|---------------------|-----------------------------|
| 核设施正常运行类 | 沿海核电厂、内陆核反应堆             | 源项稳定、影响范围广、长期运行     | 多途径公众剂量核算、生态系统累积影响、长期环境监测方案 |
| 放射性废物处置类 | 低中放废物处置场、高放废物地质处置库（候选场址） | 风险周期长、核素浸出风险、生态敏感性高 | 地下水迁移模拟、长期健康 / 生态风险、防渗屏障有效性 |
| 核技术应用类   | 医用同位素生产 facility、工业辐照装置  | 源项集中、影响范围小、泄漏风险突出   | 密封源安全评估、职业剂量控制、局部环境应急防控     |
| 核事故应急恢复类 | 福岛核事故周边区域、切尔诺贝利隔离区       | 短期剂量高、污染范围广、多介质污染   | 污染区域分级、应急处置效果评估、长期修复方案优化    |

（二）核心分析维度

为确保案例分析的系统性与可比性，从以下 6 个核心维度展开深度剖析：

项目背景与源项特征：项目规模、放射性核素种类（如  $^{137}\text{Cs}$ 、U、 $^{131}\text{I}$ ）、排放方式（气态 / 液态 / 固态）、源项强度与稳定性；

评价范围与敏感目标：空间评价范围（如核电厂 50km、处置场 30km）、敏感目标识别（人口密集区、饮用水源地、珍稀物种栖息地）；

核心技术方法应用：剂量评估模型（如 RESRAD-OFFSITE、MACCS-II）、迁移模拟工具（如 AERMOD、MT3DMS）、风险评估方法（LNT 模型、商值法）；

关键评价结论：公众 / 生态剂量水平、健康 / 生态风险等级、主要风险贡献途径与高风险区域；

防控措施与成效：污染控制技术（如废气净化、废水深度处理）、防护工程（如防护距离、生态缓冲带）、监测方案，及措施的剂量削减 / 风险降低成效；

存在问题与优化方向：评价过程中暴露的技术短板、数据缺口、管理机制问题，及针对性优化建议。

## 二、典型案例深度解析

### （一）案例一：某沿海核电厂正常运行环境影响评价

#### 1. 项目背景与源项特征

项目规模：2 台百万千瓦级压水堆核电机组，年发电量约  $1.6 \times 10^{10} \text{kWh}$ ；

源项特征：气态流出物主要含  $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{85}\text{Kr}$ ，年排放量分别  $\leq 3 \times 10^{10} \text{Bq}$ 、 $1 \times 10^{10} \text{Bq}$ 、 $5 \times 10^{13} \text{Bq}$ ；液态流出物主要含  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^3\text{H}$ ，年排放量分别  $\leq 5 \times 10^9 \text{Bq}$ 、 $1 \times 10^{12} \text{Bq}$ ；

周边环境：距厂区 10km 内有 3 个乡镇（总人口约 5 万人），20km 内有近海渔业养殖区，主导风向为东南风，受纳水体为近海海域。

#### 2. 评价核心技术与方法

剂量核算：采用 RESRAD-OFFSITE 模型，输入本地化暴露参数（成人日均海鲜摄入量  $0.08 \text{kg/d}$ 、儿童户外活动时间  $3 \text{h/d}$ ），核算吸入、食入（农产品 + 海鲜）、外照射多途径剂量；

生态影响评估：采用 ERICA Tool，重点评估核素对近海浮游生物、鱼类、海鸟的剂量影响，结合食物链富集模型（如 RESRAD-BIOTA）量化高营养级生物风险；

大气 / 水体迁移模拟：大气扩散采用 AERMOD 模型（覆盖 50km 范围，分辨率 1km），水体扩散采用 MIKE 3 模型，预测核素在近海的浓度分布。

#### 3. 关键结论与防控措施

评价结论：公众年均有效剂量成人  $0.012 \text{mSv/a}$ 、儿童  $0.021 \text{mSv/a}$ ，均远低于 GB 18871-2002 规定的  $1 \text{mSv/a}$  限值；致癌风险成人  $6.6 \times 10^{-7}$ 、儿童  $1.2 \times 10^{-6}$ ，处于可接受水平；生态生物最大剂量  $8.5 \mu\text{Gy/h}$ ，无显著生态风险；主要剂量贡献途径为食入本地海鲜（占比 45%）与外照射（占比 30%）。

防控措施：

污染控制：气态流出物经高效过滤 + 活性炭吸附处理，净化效率  $\geq 99.9\%$ ；液态流出物经膜分离 + 离子交换处理，核素浓度削减 99% 以上；

环境监测：布设 15 个大气监测点、8 个水质监测点、5 个农产品 / 海鲜监测点，

监测频率为每季度 1 次，关键核素实时在线监测；

风险沟通：建立公众信息公开平台，定期发布环境监测数据，每年组织公众开放日活动。

#### 4. 实践启示

沿海核电厂需重点关注海鲜饮食途径的剂量贡献，本地化饮食结构调查是剂量核算精准性的关键；

近海生态影响评价需结合海洋食物链富集特性，重点关注高营养级生物（如鱼类、海鸟）的累积风险；

长期监测方案需覆盖“大气-水-土壤-生物”多介质，确保风险的动态跟踪与及时预警。

### （二）案例二：某低中放废物处置场环境影响评价（运行期+退役期）

#### 1. 项目背景与源项特征

项目规模：处置容量  $5 \times 10^4 \text{m}^3$ ，接收核电厂、核科研机构产生的低中放固体废物（如污染防护服、废树脂）；

源项特征：主要核素为  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、U、Th，核素活度浓度范围  $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^7 \text{Bq/kg}$ ，半衰期  $30 \sim 1 \times 10^4$  年；

周边环境：位于丘陵地带，距最近村庄 1.5km，周边以农田生态系统为主，地下水类型为潜水，含水层厚度 15~20m，地下水流向为东南向，下游 5km 有小型饮用水源地。

#### 2. 评价核心技术与方法

地下水迁移模拟：采用 MT3DMS 模型，模拟核素（重点关注  $^{137}\text{Cs}$ 、U）在地下水的迁移路径与浓度分布，预测周期 50 年，考虑土壤吸附、核素衰变、地下水流动速率等因素；

长期健康风险评估：采用蒙特卡罗法，量化参数不确定性（如浸出速率、土壤分配系数），计算地下水饮用人群、近场居住人群的长期致癌风险；

防渗屏障有效性评估：采用 SEEP/W 模型，模拟处置库复合防渗层（膨润土 + HDPE 膜）的渗透系数，验证其对核素的阻隔效果。

#### 3. 关键结论与防控措施

评价结论：正常情景下，50 年内地下水饮用人群年均有效剂量最高  $0.06 \text{mSv/a}$ ，致癌风险  $3.3 \times 10^{-6}$ （接近可接受水平  $1 \times 10^{-6}$ ）；异常情景（防渗层局部破损）下，剂量升至  $0.15 \text{mSv/a}$ ，致癌风险  $8.3 \times 10^{-6}$ （超可接受水平）；主要风险贡献途径为地下水饮用（占比 70%）。

防控措施:

防渗工程:采用“双屏障”设计(压实黏土层+HDPE膜+膨润土垫层),渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-11} \text{cm/s}$ ;

地下水监测:在处置场周边布设12口监测井(上游2口、下游8口、边界2口),监测指标包括核素浓度、pH、电导率,监测频率为运行期每半年1次,退役期每年1次;

应急处置:制定防渗层破损应急修复预案,配备便携式核素检测仪,确保破损后48h内启动修复。

#### 4. 实践启示

低中放废物处置场评价需重点关注地下水迁移风险,长期参数(如浸出速率、防渗层老化)的合理设定是评估准确性的关键;

需设置“正常-异常”多情景分析,确保评价结果的保守性与安全性;

退役期监测与管理是长期风险控制的核心,需制定明确的退役后监护计划(如监护期50年)。

### (三) 案例三:福岛核事故周边区域应急恢复环境影响评价(2011年后)

#### 1. 项目背景与污染特征

事故概况:2011年福岛第一核电站核泄漏,释放大量的 $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 等核素,污染范围覆盖周边100km区域;

污染特征:土壤表层(0~20cm) $^{137}\text{Cs}$ 浓度最高达 $5 \times 10^4 \text{Bq/kg}$ ,地表水、地下水均受到不同程度污染,部分区域公众短期剂量超100mSv;

评价目标:评估污染区域环境质量现状、公众健康风险,优化修复方案,为区域恢复重建提供依据。

#### 2. 评价核心技术与方法

污染分级评估:基于土壤核素浓度与公众剂量,将污染区域划分为“高污染区(剂量 $> 20 \text{mSv/a}$ )、中污染区( $5 \sim 20 \text{mSv/a}$ )、低污染区( $< 5 \text{mSv/a}$ )”;

应急处置效果评估:对比应急措施(如土壤清除、植被砍伐、碘片发放)实施前后的剂量变化,量化措施的剂量削减率;

长期修复方案优化:模拟不同修复技术(如土壤深耕、电动修复、植物修复)的效果与成本,筛选“技术可行+成本可控”的最优方案。

#### 3. 关键结论与防控措施

评价结论:应急处置后,高污染区面积从300km<sup>2</sup>缩减至50km<sup>2</sup>,公众短期剂量降至1mSv/a以下;长期累积风险主要来自土壤-农产品食入途径,中污染区需实施土壤修复才能达到居住安全标准。

防控措施：

分级修复：高污染区实施土壤清除（清除深度 20cm）+ 异地处置，中污染区实施土壤深耕（深度 50cm）+ 植被替换，低污染区采取自然衰减 + 农产品监测；

长期监测：建立覆盖 100km 范围的环境监测网络，监测指标包括土壤、水、农产品核素浓度，公众个人剂量，监测频率为每年 1 次；

公众健康跟踪：开展为期 20 年的公众健康队列研究，重点监测儿童甲状腺疾病发病率、成人癌症发病风险。

#### 4. 实践启示

核事故应急恢复评价需坚持“分级分类、因地制宜”原则，避免修复措施“一刀切”；

土壤污染是长期风险的核心来源，需结合污染程度与土地利用类型选择合适的修复技术；

公众健康跟踪与风险沟通是事故后恢复的重要环节，需建立透明的信息公开机制与长期健康保障体系。

### （四）案例四：某医用同位素生产 facility 环境影响评价

#### 1. 项目背景与源项特征

项目规模：年产  $^{18}\text{F}$ 、 $^{131}\text{I}$  等医用同位素  $5 \times 10^{14}\text{Bq}$ ，用于 PET-CT 诊断、甲状腺疾病治疗；

源项特征：生产过程中产生含  $^{131}\text{I}$ 、 $^{18}\text{F}$  的工艺废水（日排放量  $5\text{m}^3$ ）、废气（日排放量  $1000\text{m}^3$ ），密封源（ $^{137}\text{Cs}$ ）活度  $1 \times 10^{12}\text{Bq}$ ；

周边环境：位于城市高新技术园区，距最近居民区 800m，周边 5km 内有 2 家医院、1 所学校，地下水为区域饮用水源补给区。

#### 2. 评价核心技术与方法

泄漏风险评估：采用故障树分析法（FTA），量化密封源破损、管道泄漏的发生概率（ $\leq 1 \times 10^{-5}/\text{年}$ ）；

职业与公众剂量核算：采用 PATHWAY 模型，核算操作工人职业剂量（重点关注手部、甲状腺）与周边公众剂量；

局部环境影响评估：聚焦废水排放对地下水的影响，采用 MODFLOW 模型模拟核素在地下水的短期迁移（10 年）。

#### 3. 关键结论与防控措施

评价结论：操作工人年均职业剂量  $3.5\text{mSv/a}$ （低于限值  $20\text{mSv/a}$ ），周边公众年均有效剂量  $0.003\text{mSv/a}$ ，泄漏事故情景下公众最大剂量  $0.5\text{mSv/a}$ ，均处于安全水平；主要风险点为密封源运输与存储环节。



#### 防控措施:

密封防护: 采用双层密封容器存储密封源, 配备泄漏监测报警器 (响应时间 $\leq 10\text{s}$ );

废水处理: 工艺废水经离子交换树脂处理 (核素去除率 $\geq 99.9\%$ ) 后, 排入城市污水处理厂, 排放口设置在线监测设备;

应急防控: 制定密封源泄漏应急处置预案, 配备便携式辐射检测仪、防护装备, 定期开展应急演练 (每年 2 次)。

#### 4. 实践启示

核技术应用项目评价需重点关注 “点源污染” 与 “泄漏风险”, 防控措施需针对性强、操作简便;

职业剂量控制是评价核心之一, 需结合操作流程优化 (如自动化操作) 降低工人暴露风险;

位于城市区域的项目需严格控制废水、废气排放, 避免对周边敏感目标 (学校、医院) 造成影响。

### 三、案例共性问题与优化方向

#### (一) 共性问题识别

通过对上述典型案例的对比分析, 发现当前放射性环境影响评价存在以下 4 类共性问题:

数据支撑短板: 部分区域本地化暴露参数 (如农村居民饮食结构、本土物种生理参数) 缺失, 依赖国际默认值导致评估精度不足; 核素形态、络合态迁移数据积累有限, 复杂基质下的剂量计算误差较大;

技术方法局限: 低剂量区间 ( $< 1\text{mSv/a}$ ) 健康风险评估依赖 LNT 模型, 学术争议尚未解决; 生态风险评估中本土物种敏感性数据不足, 生态剂量基准不统一;

评价范围与周期合理性: 部分项目评价范围设置过窄 (如核技术应用项目仅覆盖  $5\text{km}$ ), 未充分考虑大气扩散、地下水迁移的长期影响; 长期评价周期 (如高放废物处置库) 的参数预测存在较大不确定性;

公众参与不足: 放射性项目专业性强, 公众对辐射风险认知存在偏差, 参与评价的渠道有限, 易引发环境舆情。

#### (二) 针对性优化方向

##### 1. 数据体系完善

开展全国性人群暴露参数调查, 建立分区域 (城市 / 农村、南方 / 北方)、分人群 (成人 / 儿童 / 孕妇) 的本地化参数库;

加强核素形态与迁移特性研究, 积累复杂基质 (如酸性土壤、高盐水体) 下的核

素迁移数据，补充模型参数库；

建立放射性生态效应数据库，开展本土物种辐射敏感性试验，制定本地化生态剂量基准。

## 2. 技术方法创新

研发低剂量风险评估替代模型，结合流行病学数据与机器学习算法，提升低剂量区间评估精度；

推动多模型耦合应用（如辐射剂量模型与生态模型、气候模型联动），实现“多因子、全周期”综合评估；

引入数字化技术（如GIS、物联网），实现评价结果的空间精细化表达与动态更新。

## 3. 评价流程优化

科学划定评价范围与周期，结合项目类型、源项特征、环境条件（如气象、水文）合理设定，避免“一刀切”；

强化多情景分析，增加极端气象条件（如台风、暴雨）、复杂事故场景（如多源泄漏）的评估，提升评价的全面性；

完善公众参与机制，采用“科普宣传+听证会+网络公示”的多元方式，提升公众风险认知，吸纳合理意见。

## 4. 管理机制健全

加快制定放射性生态风险评估、低中放废物处置场评价等专项技术导则，统一评估方法、基准剂量与风险等级划分标准，提升不同项目评价结果的可比性；

建立跨部门协同监管机制，整合环保、卫生、应急管理、核安全监管等部门职责，实现“评价-审批-监测-执法”全流程闭环管理；

完善案例共享与技术培训体系，建立全国放射性环境影响评价案例库，定期开展技术交流与培训，推广先进实践经验。



## 第九章 放射性污染治理与修复

### 第一节 放射性污染治理原理

#### 一、放射性污染治理的核心逻辑与基本原则

##### （一）核心治理逻辑

放射性污染治理的本质是通过物理、化学、生物或工程手段，改变放射性核素的赋存形态、迁移路径或暴露场景，从而降低其环境风险，核心逻辑可概括为三类：

分离去除逻辑：通过物理分选、化学萃取、生物富集等技术，将核素从污染介质（土壤、水）中分离出来，实现“介质净化+核素集中处置”，如土壤淋洗、水体膜分离技术；

浓度削减逻辑：通过核素衰变、稀释扩散、转化固定等方式，降低污染介质中核素的活度浓度，使其达到环境质量标准，如自然衰减、水泥固化技术；

风险隔离逻辑：通过工程屏障（如防渗层、隔离墙）或功能限制（如土地利用管控），阻断核素与受体的暴露路径，实现“污染留位+风险可控”，如污染土壤原位覆盖、地下水帷幕阻隔技术。

##### （二）治理基本原则

为确保治理效果的科学性、安全性与可持续性，放射性污染治理需遵循以下四大原则：

安全优先原则：治理过程中需严格控制辐射暴露风险，确保操作人员职业剂量 $\leq 20\text{mSv/a}$ ，周边公众剂量 $\leq 1\text{mSv/a}$ ，避免二次污染扩散；

目标导向原则：根据污染介质、核素类型、受体特征（如饮用水源地、农田），设定差异化治理目标（如“达标利用”“安全封存”“永久处置”）；

技术适配原则：结合核素化学性质（如挥发性、水溶性、吸附性）、污染程度（高/中/低污染）、场地条件（如水文地质、地形地貌），选择技术可行、成本可控的治理方案；

长期稳定原则：针对长半衰期核素（如 $^{137}\text{Cs}$ 、 $\text{U}$ 、 $\text{Pu}$ ），治理方案需确保长期（数十年至数百年）风险稳定，避免核素二次释放，如固化体浸出率需 $\leq 1 \times 10^{-7}\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 。

## 二、放射性污染治理原理的技术分类体系

根据治理逻辑、技术手段与适用介质，放射性污染治理原理可分为四大类技术体系，各类体系的核心原理、代表技术与适用场景如下：

### （一）物理治理技术原理

物理治理技术基于“物理分离、机械阻隔或能量作用”原理，改变核素的空间分布或赋存状态，具有操作简单、无二次化学污染的优势，适用于各类介质的中低污染治理。

#### 1. 核心原理细分

分选分离原理：利用核素与介质的物理性质差异（密度、粒度、磁性），通过重力分选、磁选、筛分等手段，分离含核素的污染组分，如土壤中放射性颗粒物的重力分选；

阻隔隔离原理：通过铺设物理屏障（如 HDPE 膜、压实黏土），阻断核素迁移路径，或通过机械围挡（如钢板桩）限制污染范围，如地下水污染羽隔离墙；

稀释扩散原理：向污染介质中通入清洁介质（如清水、空气），降低核素浓度至安全水平，适用于低污染水体、大气的应急治理；

蒸发冷凝原理：利用核素（如  $^3\text{H}$ 、 $^{131}\text{I}$ ）的挥发性差异，通过加热蒸发、冷凝回收，实现核素分离，如含氚废水蒸发处理技术。

#### 2. 代表技术原理解析

土壤异位分选技术：核心原理是利用放射性核素多吸附于细颗粒土壤（黏粒、粉粒）的特性，通过筛分、重力分选将土壤分为“污染细颗粒”与“清洁粗颗粒”，细颗粒集中处置，粗颗粒达标回用；适用于污染土壤中核素与颗粒粒径强相关的场景（如核事故后土壤中  $^{137}\text{Cs}$  污染），分选效率  $\geq 80\%$ 。

地下水抽出 - 处理技术：核心原理是通过抽水井将受污染地下水抽出，经地面处理系统（如膜分离、离子交换）净化后回灌或排放，同时降低地下水位，减缓核素迁移；适用于地下水污染羽范围较小、核素水溶性强的场景（如 U、 $^{90}\text{Sr}$  污染），处理后地下水核素浓度可降至  $\leq 1\text{Bq/L}$ 。

原位覆盖阻隔技术：核心原理是在污染土壤表层铺设“黏土层 + HDPE 膜 + 植被层”复合屏障，阻断核素通过大气沉降、地表径流或植物吸收扩散，同时限制土地利用类型（如绿化用地）；适用于中低污染土壤、长期风险可控的场景，屏障渗透系数需  $\leq 1 \times 10^{-11}\text{cm/s}$ 。

### （二）化学治理技术原理

化学治理技术基于“化学反应改变核素赋存形态”原理，通过沉淀、吸附、萃取、



还原氧化等反应,实现核素的固定或分离,适用于高污染介质或难分离核素的治理,处理效率高但需控制化学药剂的二次影响。

### 1. 核心原理细分

化学沉淀原理:向污染介质中加入化学药剂(如碳酸盐、磷酸盐、氢氧化物),与核素发生沉淀反应,生成难溶性化合物(如  $\text{U}_3(\text{PO}_4)_4$ 、 $\text{SrCO}_3$ ),降低核素迁移性;

吸附富集原理:利用吸附剂(如活性炭、沸石、离子交换树脂)的高比表面积或离子交换位点,将核素吸附至吸附剂表面,实现介质净化;

萃取分离原理:利用核素在水相和有机相中的分配系数差异,通过萃取剂将核素从水相(或土壤淋洗液)转移至有机相,实现核素分离浓缩;

还原氧化原理:通过氧化还原反应改变核素的价态(如  $\text{U(VI)} \rightarrow \text{U(IV)}$ 、 $\text{Cr(VI)} \rightarrow \text{Cr(III)}$ ),使其从水溶性形态转化为难溶性形态,降低迁移风险。

### 2. 代表技术原理解析

土壤化学淋洗技术:核心原理是向污染土壤中注入淋洗剂(如柠檬酸、EDTA、碳酸氢钠),通过络合、溶解作用将土壤颗粒吸附的核素(如  $\text{U}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ )转移至淋洗液中,淋洗液经处理后回用或排放,土壤达标后回填;适用于高污染土壤、核素吸附性较弱的场景,淋洗效率 $\geq 90\%$ ,但需控制淋洗剂对土壤生态的影响。

水体离子交换技术:核心原理是利用离子交换树脂的功能基团(如磺酸基、胺基)与水体中核素离子(如  $\text{Cs}^+$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{UO}_2^{2+}$ )发生交换反应,将核素固定在树脂上,树脂饱和后可再生或固化处置;适用于低中污染水体、核素为离子态的场景(如核电站废水处理),处理后水体核素浓度 $\leq 0.1\text{Bq/L}$ 。

核素化学固化技术:核心原理是将放射性废物(如污染土壤、污泥)与固化剂(水泥、沥青、玻璃)混合,通过水化反应、聚合反应将核素包裹在固化体晶格中,降低其浸出风险;适用于高污染废物、核素需永久隔离的场景,固化体 compressive strength  $\geq 15\text{MPa}$ ,核素浸出率 $\leq 1 \times 10^{-7}\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 。

## (三) 生物治理技术原理

生物治理技术基于“生物有机体对核素的吸附、富集或转化”原理,利用植物、微生物或生物材料的代谢活动降低核素环境风险,具有成本低、环境友好、无二次污染的优势,适用于中低污染介质的生态修复。

### 1. 核心原理细分

植物提取原理:筛选对核素具有高富集能力的植物(如超富集植物),通过根系吸收将土壤中的核素转移至植物地上部分,植物收割后集中处置(如焚烧固化),实现土壤净化;

微生物转化原理:利用微生物(细菌、真菌)的代谢作用,将核素还原/氧化为

低毒性、低迁移性的形态（如  $\text{U(VI)} \rightarrow \text{U(IV)}$ 、 $\text{Cr(VI)} \rightarrow \text{Cr(III)}$ ），或通过生物矿化将核素转化为稳定矿物；

生物吸附原理：利用生物材料（如藻类、秸秆、微生物菌剂）的细胞壁、蛋白质或多糖等成分，通过物理吸附、化学络合作用吸附水体或土壤中的核素；

根际强化原理：通过植物根系分泌物（如有机酸、氨基酸）改变根际微环境（pH、Eh），促进核素的溶解或吸附，提升植物提取或微生物转化效率。

## 2. 代表技术原理解析

植物修复技术：核心原理是选择对特定核素具有富集特性的植物（如印度芥菜富集 U、向日葵富集  $^{137}\text{Cs}$ 、浮萍富集  $^{90}\text{Sr}$ ），在污染土壤中种植，植物通过根系吸收核素并转运至茎叶，收割后经焚烧、压缩固化处置；适用于中低污染土壤（核素浓度  $\leq 1 \times 10^4 \text{Bq/kg}$ ）、场地条件适宜植物生长的场景，修复周期 3~5 年，土壤核素去除率可达 30%~70%。

微生物修复技术：核心原理是向污染介质中接种功能微生物（如 *Shewanella putrefaciens* 还原  $\text{U(VI)}$ 、*Desulfovibrio vulgaris* 转化  $\text{Cr(VI)}$ ），微生物通过呼吸代谢产生还原酶或硫化物，将可溶性核素转化为不溶性硫化物或氧化物沉淀；适用于厌氧 / 缺氧环境的土壤或地下水污染（如 U、Cr 污染），修复后核素迁移性降低 80% 以上。

生物炭吸附技术：核心原理是将农林废弃物（如秸秆、木屑）高温热解制备生物炭，利用其高比表面积（ $\geq 500 \text{m}^2/\text{g}$ ）和丰富的官能团（羟基、羧基），通过物理吸附与化学络合作用吸附水体或土壤中的核素；适用于低中污染水体、土壤的应急治理或辅助修复，核素吸附容量可达 10~50mg/g。

## （四）工程屏障与处置技术原理

工程屏障与处置技术基于“风险隔离 + 长期稳定”原理，通过人工构建的工程设施或处置系统，将放射性核素永久隔离于环境之外，适用于高污染废物或长半衰期核素的最终处置，是放射性污染治理的“末端保障”。

### 1. 核心原理细分

多重屏障原理：构建“天然屏障（如地质体）+ 人工屏障（如金属罐、膨润土缓冲层）”的多重防护体系，延缓核素迁移，确保长期安全；

地质处置原理：利用深部地质体（如花岗岩、黏土岩）的低渗透性、化学稳定性和长期封闭性，将高放废物永久埋藏，阻断核素与地表环境的联系；

原位固化 / 稳定化原理：向污染区域注入固化剂（如水泥浆、化学药剂），通过化学反应将核素固定在原地，降低其浸出与迁移风险；

功能限制原理：通过划定隔离区、限制土地利用类型（如禁止种植农作物、禁止地下水开采），减少公众与污染介质的暴露机会。

## 2. 代表技术原理解析

高放废物地质处置技术：核心原理是将高放废物（如玻璃固化体）装入金属容器，置于地下 500~1000m 的花岗岩或黏土岩处置库中，库周边设置膨润土缓冲层（渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-12} \text{cm/s}$ ）和压实黏土层，利用地质体的长期稳定性与多重屏障的阻隔作用，确保核素在  $1 \times 10^4$  年内不泄漏至地表；适用于高放废物（如核反应堆乏燃料）的最终处置，是当前国际公认的唯一安全处置技术。

污染土壤原位稳定化技术：核心原理是向污染土壤中注入稳定化药剂（如磷酸盐、沸石、石灰），通过吸附、沉淀、离子交换等反应，改变核素的赋存形态（如将水溶性 U 转化为磷酸铀沉淀），降低其生物有效性与迁移性；适用于中高污染土壤、场地不适宜异位修复的场景（如城市中心污染场地），稳定化后核素浸出率降低 90% 以上。

地下水帷幕阻隔技术：核心原理是在地下水污染羽周边钻孔，注入化学浆液（如水泥浆、膨润土浆液）或设置可渗透反应墙（PRB），形成连续的隔水帷幕或反应屏障，阻断核素迁移路径；PRB 技术通过填充反应介质（如零价铁、沸石），在屏障内实现核素的还原、吸附或沉淀；适用于地下水污染羽范围较小、核素迁移性强的场景（如 Cs、Sr 污染），阻隔效率 $\geq 95\%$ 。

## 三、放射性污染治理原理的关键影响因素

放射性污染治理效果的优劣的核心影响因素，需针对性优化治理方案：

### （一）核素特性因素

辐射类型与半衰期： $\alpha$  发射体（如 Pu、U）毒性高，需优先采用“分离去除 + 永久处置”；长半衰期核素（ $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{238}\text{U}$ ）需注重长期稳定性，避免采用“稀释扩散”等临时措施；短半衰期核素（ $^{131}\text{I}$ 、 $^{18}\text{F}$ ）可结合自然衰减，降低治理成本。

化学性质：水溶性核素（如  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^3\text{H}$ ）易迁移，需强化阻隔或快速分离；挥发性核素（如  $^{131}\text{I}$ 、 $^{129}\text{I}$ ）需控制大气扩散，采用吸附或冷凝技术；吸附性强的核素（如  $^{137}\text{Cs}$ 、Pu）易富集于土壤颗粒，可采用土壤淋洗或植物提取技术。

### （二）污染介质因素

土壤介质：土壤质地（黏粒含量越高，核素吸附越强，需强化淋洗或稳定化）、pH 值（酸性土壤促进核素溶解，碱性土壤易形成沉淀）、有机质含量（有机质越高，核素吸附性越强）直接影响治理技术选型；<sup>①</sup>

水体介质：水体 pH、离子强度、溶解氧含量影响核素形态（如 U 在酸性水体中以  $\text{UO}_2^{2+}$  存在，易被离子交换树脂吸附）；地下水水力坡度越大，核素迁移越快，需加快抽出 - 处理速度；

<sup>①</sup> 刘麓琪. 基于生物修复技术的土壤污染治理研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6 (14): 113-114+138.

大气介质：大气湿度、温度影响挥发性核素的扩散速度，需结合吸附材料的吸附容量优化治理方案。

**（三）场地环境因素**

水文地质条件：地下水埋深、含水层厚度、渗透系数决定地下水治理技术的可行性（如渗透系数 $> 1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 时，抽出-处理技术效率更高）；

地形地貌：平原地区适宜异位修复技术（如土壤挖掘分选），山地、丘陵地区适宜原位修复技术（如原位稳定化、植物修复）；

敏感目标分布：饮用水源地周边需采用“零排放”治理技术（如离子交换、膜分离），农田区域需优先选择生态友好型技术（如植物修复、生物炭吸附），避免化学药剂污染农作物。

**（四）治理目标因素**

达标利用目标：如污染土壤需恢复为农田，需采用“分离去除+植物修复”，确保土壤核素浓度 $\leq \text{GB 15618-2018}$ 限值；

安全封存目标：如污染场地改为工业用地，可采用“原位稳定化+覆盖阻隔”，控制核素迁移即可；

应急处置目标：核事故后需快速降低公众暴露风险，可采用“土壤快速清除+碘片发放”等应急措施，后续再开展精细化修复。

**第二节 土壤放射性污染修复技术**

**一、土壤放射性污染修复技术分类与核心逻辑**

**（一）技术分类体系**

根据修复位置、技术原理与核素处理方式，土壤放射性污染修复技术可分为四大类，各类技术的核心特征与适用场景明确区分：

| 技术类别   | 核心特征              | 修复逻辑      | 适用污染程度                                     | 代表技术             |
|--------|-------------------|-----------|--------------------------------------------|------------------|
| 异位修复技术 | 土壤挖掘后异地处理，核素分离/固化 | 分离去除+集中处置 | 中高污染<br>( $> 1 \times 10^4 \text{Bq/kg}$ ) | 土壤淋洗、异位分选、固化稳定化  |
| 原位修复技术 | 土壤不挖掘，原地处理核素      | 固定转化+风险隔离 | 低中污染<br>( $< 1 \times 10^5 \text{Bq/kg}$ ) | 原位稳定化、植物修复、电动修复  |
| 应急处置技术 | 快速降低暴露风险，短期管控     | 风险隔离+快速削减 | 突发污染<br>(核事故、泄漏)                           | 土壤表层清除、覆盖阻隔、扬尘控制 |
| 生态修复技术 | 利用生物作用净化土壤，环境友好   | 生物富集+自然衰减 | 低污染<br>( $< 1 \times 10^3 \text{Bq/kg}$ )  | 超富集植物种植、微生物强化修复  |

## （二）核心选择逻辑

土壤放射性污染修复技术选型需遵循“多因素耦合决策”逻辑，核心考量维度包括：

核素特性：水溶性核素（如  $^{90}\text{Sr}$ ）优先选择淋洗、稳定化技术；吸附性强的核素（如  $^{137}\text{Cs}$ ）优先选择分选、植物提取技术； $\alpha$  核素（如  $\text{Pu}$ 、 $\text{U}$ ）需强化安全处置，优先采用固化+地质处置组合技术；

土壤条件：黏粒含量高的土壤（黏粒占比 $>30\%$ ）需避免淋洗技术（易造成土壤结构破坏），优先选择原位稳定化；砂质土壤（砂粒占比 $>70\%$ ）可采用淋洗、电动修复技术，修复效率更高；

场地约束：城市中心、饮用水源地周边场地需避免大规模挖掘（易引发二次污染），优先选择原位修复；偏远区域、高污染场地可采用异位修复，确保核素彻底去除；

治理目标：需恢复为农田的场地，修复后土壤核素浓度需 $\leq \text{GB 15618-2018}$ 限值，优先选择分离去除类技术；改为工业/绿化用地的场地，可采用稳定化+覆盖技术，控制核素迁移即可。

## 二、异位修复技术：分离去除与集中处置

异位修复技术通过挖掘土壤进行异地处理，核心优势是核素去除效率高、修复周期短，适用于中高污染土壤的精准治理，但需严格控制挖掘、运输过程中的辐射暴露与二次污染。

### （一）土壤淋洗修复技术

#### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：土壤挖掘→破碎筛分（去除石块、杂质）→淋洗反应（土壤与淋洗剂混合搅拌）→固液分离（过滤、离心）→淋洗液处理（核素回收/固化）→土壤回填/回用；

核心原理：利用淋洗剂（无机酸、螯合剂、表面活性剂）的溶解、络合作用，将土壤颗粒吸附的核素转移至淋洗液中，实现土壤与核素的分离；淋洗剂选择需针对性匹配核素类型（如  $\text{U}$  污染选用柠檬酸、 $^{90}\text{Sr}$  污染选用  $\text{EDTA}$ ）。

#### 2. 关键技术参数与性能

淋洗剂浓度：无机酸（如盐酸）浓度  $0.5\sim 2\text{mol/L}$ ，螯合剂（如  $\text{EDTA}$ ）浓度  $0.01\sim 0.1\text{mol/L}$ ，需平衡淋洗效率与土壤酸化风险；

液固比：最佳液固比（淋洗剂体积/土壤质量）为  $2:1\sim 5:1$ ，比值过高易增加淋洗液处理成本，过低则淋洗不充分；

修复效率：中高污染土壤（核素浓度  $1\times 10^4\sim 1\times 10^6\text{Bq/kg}$ ）修复效率可达  $85\%\sim 95\%$ ，



处理后土壤核素浓度可降至  $1 \times 10^3 \text{Bq/kg}$  以下；

二次污染控制：淋洗液需经离子交换、膜分离等技术处理（核素去除率  $\geq 99.9\%$ ），浓缩液固化处置；淋洗后土壤需中和调理（pH 调至 6.5~7.5），避免影响植物生长。

### 3. 适用场景与局限

适用场景：核素为水溶性或弱吸附性（U、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{238}\text{Pu}$ ）、土壤质地偏砂质、污染集中且边界明确的场地（如核设施退役场地、放射性废物处置场周边）；

局限：黏粒含量高的土壤修复效率低（ $< 60\%$ ），易造成土壤有机质流失、结构破坏；淋洗剂残留可能影响土壤生态，需严格控制用量与后续调理。

## （二）土壤异位分选修复技术

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：土壤挖掘→预处理（破碎、干燥）→分选（重力分选、磁选、筛分）→污染组分收集→清洁土壤回用→污染组分固化处置；

核心原理：利用放射性核素多吸附于细颗粒土壤（黏粒、粉粒，粒径  $< 0.075\text{mm}$ ）的特性，通过物理分选手段将土壤分为“高污染细颗粒”与“低污染粗颗粒”，实现核素的浓缩与土壤的部分回用。<sup>①</sup>

### 2. 关键技术参数与性能

分选精度：筛分孔径控制在  $0.075\sim 0.15\text{mm}$ ，确保细颗粒分离效率  $\geq 90\%$ ；重力分选设备（如摇床、螺旋分选机）的密度分选阈值为  $2.6\sim 2.8\text{g/cm}^3$ ，匹配土壤颗粒与核素吸附特性；

回用率：清洁粗颗粒土壤回用率可达  $60\%\sim 80\%$ ，需满足核素浓度  $\leq 5 \times 10^2 \text{Bq/kg}$ ；

辐射防护：分选过程需设置密闭罩与负压通风系统，操作人员配备个人剂量计，职业剂量控制  $\leq 5\text{mSv}$  / 修复周期。

### 3. 适用场景与局限

适用场景：核素与土壤颗粒粒径强相关（如核事故后  $^{137}\text{Cs}$  污染土壤、铀矿开采区土壤）、污染程度中等（ $1 \times 10^3\sim 1 \times 10^5 \text{Bq/kg}$ ）、土壤中存在大量石块等杂质的场地；

局限：核素均匀吸附于土壤颗粒或呈溶解态时，分选效率低（ $< 50\%$ ）；对细颗粒土壤的后续处置仍需固化技术，增加整体成本。

## （三）土壤异位固化稳定化技术

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：土壤挖掘→破碎混合（土壤与固化剂均匀搅拌）→成型养护（自然养护或蒸汽养护）→固化体处置（填埋、回用）；

① 朱文慧, 常勤慧. 矿山集中开采区环境污染现状与生态修复治理方法研究 [J]. 环境科学与管理, 2025, 50 (03): 161-166.

核心原理：利用固化剂（水泥、沥青、玻璃、磷酸盐）的包裹、胶结或化学反应，将土壤中的核素固定于固化体晶格中，降低其浸出性与迁移性；对于 U、Pu 等核素，可通过化学反应生成难溶性化合物（如磷酸铀、铀酸钙）。

## 2. 关键技术参数与性能

固化剂配比：水泥类固化剂添加量为土壤质量的 30%~50%，玻璃固化剂添加量为 20%~30%；磷酸盐固化剂（如磷酸二氢铵）添加量为 5%~10%，需根据核素类型调整；

固化体性能：抗压强度 $\geq 15\text{MPa}$ （养护 28d），核素浸出率 $\leq 1 \times 10^{-7}\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ （GB 14569.1-2011 标准），耐冻融循环 $\geq 50$  次；

修复目标：适用于高污染土壤（核素浓度 $> 1 \times 10^5\text{Bq/kg}$ ），固化后核素迁移风险降低 95% 以上，可满足安全填埋或限制性回用要求。

## 3. 适用场景与局限

适用场景：高污染、高毒性核素（Pu、Am、U）污染土壤，核设施退役产生的污染土壤，不适宜分离去除的复杂污染土壤；

局限：固化体体积比原土壤增加 20%~40%，需占用更多处置空间；水泥类固化剂可能导致土壤 pH 升高，影响后续生态恢复；长期稳定性依赖固化体完整性，需避免机械破坏。

# 三、原位修复技术：原地管控与风险削减

原位修复技术无需挖掘土壤，直接在污染场地进行修复，核心优势是对场地扰动小、二次污染风险低、成本可控，适用于低中污染土壤的长期治理，但修复周期较长、效率受土壤条件影响显著。

## （一）土壤原位稳定化技术

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：场地勘察→药剂选型→药剂注入（钻孔注入、表面喷洒）→混合搅拌（机械搅拌、高压喷射搅拌）→养护监测（核素形态与浸出性监测）；

核心原理：向土壤中注入稳定化药剂，通过吸附、沉淀、离子交换、络合等作用，改变核素赋存形态（如将水溶性 U(VI) 转化为难溶性 U(IV) 氧化物、将  $\text{Cs}^+$  吸附于沸石晶格），降低其生物有效性与迁移性。

### 2. 关键技术参数与性能

药剂选型：针对不同核素选择专用药剂（ $^{137}\text{Cs}$  污染选用沸石、膨润土；U 污染选用磷酸盐、零价铁； $^{90}\text{Sr}$  污染选用方解石、磷灰石）；

注入深度与密度：注入深度根据污染深度确定（通常 0.5~3m），钻孔间距 1~3m，确保药剂与土壤混合均匀度 $\geq 85\%$ ；

稳定化效果：处理后土壤核素浸出率降低 80%~95%，生物有效性（如农作物吸收系数）降低 70% 以上；

长期稳定性：模拟降雨、温度变化等环境条件，稳定化效果可持续 10~30 年，适用于长半衰期核素污染。

### 3. 适用场景与局限

适用场景：城市中心污染场地、饮用水源地周边土壤、低中污染（ $< 1 \times 10^5 \text{Bq/kg}$ ）且污染深度较浅的土壤，尤其适用于黏粒含量高、挖掘难度大的场地；

局限：对深层污染（ $> 3\text{m}$ ）修复效果有限；药剂在土壤中的扩散受水文地质条件影响，可能出现局部处理不充分；需长期监测核素形态变化，避免二次活化。

## （二）植物修复技术

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：场地预处理（土壤调理、pH 调整）→超富集植物种植→田间管理（灌溉、施肥）→植物收割→后续处置（焚烧、压缩固化、核素回收）→多轮种植直至达标；

核心原理：筛选对特定核素具有高富集能力的超富集植物，通过根系吸收、转运将土壤中的核素积累于地上部分，通过周期性收割移除核素，逐步净化土壤；部分植物可通过根系分泌物强化根际核素溶解与吸收。<sup>①</sup>

### 2. 关键技术参数与性能

植物选型：针对不同核素选择专用植物（U 污染选用印度芥菜、向日葵； $^{137}\text{Cs}$  污染选用柳枝稷、狗尾草； $^{90}\text{Sr}$  污染选用浮萍、芦苇），富集系数（植物体内核素浓度 / 土壤核素浓度） $\geq 10$ ；

修复周期：低污染土壤（ $< 1 \times 10^3 \text{Bq/kg}$ ）修复周期 3~5 年，中污染土壤（ $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4 \text{Bq/kg}$ ）修复周期 5~10 年，需多轮种植；

辅助强化：向土壤中添加螯合剂（如 EDTA）、有机酸（如柠檬酸）可提升核素生物有效性，修复效率提高 30%~50%；接种根际功能微生物可促进植物生长与核素吸收。

### 3. 适用场景与局限

适用场景：低中污染农田土壤、生态修复型场地、地形平缓且气候适宜植物生长的区域，尤其适用于大面积低浓度污染土壤；

局限：修复周期长，受气候、土壤肥力等自然条件影响大；对高污染土壤修复效率低（单轮去除率 $< 10\%$ ）；植物收割后需妥善处置，避免核素二次扩散。

① 付修治. 土壤污染与土壤治理修复技术研究进展及展望 [J]. 清洗世界, 2024, 40 (09): 112-114.

### （三）电动修复技术

#### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：场地布置（电极插入土壤）→通电运行（施加直流电场）→核素迁移（离子态核素向对应电极移动）→电极区收集（吸附材料捕获核素）→土壤监测→电极更换/再生；

核心原理：利用直流电场产生的电迁移、电渗流作用，驱动土壤中离子态核素（如  $\text{Cs}^+$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{UO}_2^{2+}$ ）向电极迁移，通过电极区的吸附材料（如离子交换树脂、活性炭）捕获核素，实现土壤净化。

#### 2. 关键技术参数与性能

电场强度：最佳电场强度为  $1\sim 3\text{V/cm}$ ，过高易导致土壤温度升高、电解水产生氢气/氧气（影响修复安全），过低则核素迁移速度慢；

修复时间：污染深度  $1\sim 2\text{m}$  的土壤，修复时间  $20\sim 60\text{d}$ ，核素去除率可达  $60\%\sim 80\%$ （砂质土壤）、 $40\%\sim 60\%$ （壤质土壤）；

电极设计：采用石墨、钛合金等惰性电极，电极间距  $0.5\sim 1.5\text{m}$ ，可设置阳离子交换膜/阴离子交换膜提升核素选择性迁移。

#### 3. 适用场景与局限

适用场景：低中污染（ $< 1\times 10^4\text{Bq/kg}$ ）、离子态核素污染（如 Cs、Sr、U）、土壤质地偏砂质或壤质、污染深度较浅（ $< 3\text{m}$ ）的场地；

局限：黏粒含量高的土壤（黏粒占比  $> 20\%$ ）电渗流阻力大，修复效率低；土壤 pH 变化可能导致核素沉淀，需实时调控；能耗较高（每立方米土壤能耗  $50\sim 100\text{kWh}$ ），不适用于大面积污染场地。

### 四、应急处置技术：快速管控与风险隔离

应急处置技术针对突发放射性污染事件（如核事故、放射性物质泄漏），核心目标是快速降低公众暴露风险，控制污染扩散，为后续精细化修复创造条件。

#### （一）土壤表层清除技术

##### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：污染区域划定→表层土壤清除（机械铲运、真空抽吸）→土壤暂存（密闭容器）→后续处置（分选、固化）→场地覆盖；

核心原理：放射性核素在土壤中多富集于表层（ $0\sim 20\text{cm}$ ），通过快速清除表层污染土壤，可在短时间内降低  $90\%$  以上的辐射剂量，阻断扬尘、植物吸收等暴露途径。

##### 2. 关键技术参数与性能

清除深度：根据污染检测结果确定，通常为  $5\sim 20\text{cm}$ ，确保清除后场地表面辐射剂量率  $\leq 0.2\mu\text{Sv/h}$ ；

作业效率：大型机械清除效率可达  $100\sim 500\text{m}^3/\text{d}$ ，真空抽吸适用于小范围、高精度清除（效率  $10\sim 50\text{m}^3/\text{d}$ ）；

辐射防护：作业人员需穿戴防护服、佩戴个人剂量计与辐射检测仪，作业区域设置警戒线，避免公众进入。

### 3. 适用场景

核事故后表层土壤污染（如福岛核事故周边农田）、放射性物质泄漏导致的局部土壤污染，需快速降低辐射暴露风险的场景。

## （二）土壤覆盖阻隔技术

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：场地平整→铺设底层防渗层（HDPE 膜、压实黏土）→铺设吸附层（沸石、膨润土）→铺设表层植被层→边界密封；

核心原理：通过复合覆盖层阻断核素迁移路径，防止核素通过地表径流、扬尘扩散，同时限制场地利用类型（如绿化、非农业用地），降低公众暴露风险。

### 2. 关键技术参数与性能

覆盖层结构：防渗层渗透系数  $\leq 1 \times 10^{-11}\text{cm/s}$ （HDPE 膜厚度  $\geq 1.5\text{mm}$ ，压实黏土层厚度  $\geq 30\text{cm}$ ）；吸附层厚度  $10\sim 20\text{cm}$ ，沸石添加量  $\geq 50\text{kg}/\text{m}^2$ ，确保对  $\text{Cs}^+$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  等核素的吸附容量  $\geq 10\text{mg/g}$ ；表层植被层选用浅根系植物（如草坪、灌木），避免破坏覆盖层完整性；

阻隔效果：覆盖后场地辐射剂量率降低 90% 以上，核素通过地表径流迁移量削减 95%，扬尘扩散风险基本消除；

使用寿命：复合覆盖层设计使用寿命  $\geq 30$  年，需定期检查（每年 1 次）防渗层破损情况，及时修补。

### 3. 适用场景

核事故后中低污染区域的临时管控、污染场地退役后的长期封存、城市中心难以实施挖掘修复的污染场地。

## （三）扬尘控制技术

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：污染区域围挡→洒水降尘（添加抑尘剂）→表面固化（喷洒固化剂）→植被覆盖；

核心原理：通过物理湿润、化学黏结或植被固定，减少土壤扬尘产生与扩散，阻断核素通过呼吸途径暴露的风险。

### 2. 关键技术参数与性能

抑尘剂选型：选用环保型高分子抑尘剂（如聚丙烯酰胺、生物多糖），喷洒浓度



0.1%~0.5%，确保土壤表面形成稳定结壳（厚度 0.5~1cm）；

作业效率：洒水降尘覆盖效率≥ 90%，抑尘效果持续 7~15d；表面固化效果持续 3~6 个月，需定期补喷；

环保要求：抑尘剂无放射性、无生物毒性，不会造成土壤二次污染，降解周期 ≤ 3 个月。

3. 适用场景

核事故后大面积松散污染土壤、露天堆放的污染土壤暂存场、修复施工过程中的扬尘控制。

第三节 水体放射性污染治理方法

一、水体放射性污染治理方法分类与核心逻辑

（一）技术分类体系

根据治理原理、处理方式与适用水体类型，水体放射性污染治理方法可分为五大类，各类技术的核心特征与适用场景明确区分：

| 技术类别   | 核心特征                    | 治理逻辑             | 适用水体类型          | 代表技术              |
|--------|-------------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 物理分离技术 | 基于物理性质差异分离核素，无化学变化      | 物理截留 / 富集 + 核素回收 | 地表水、工业废水        | 膜分离、蒸发浓缩、吸附过滤     |
| 化学处理技术 | 通过化学反应改变核素形态，实现固定 / 分离  | 化学沉淀 / 络合 + 固液分离 | 工业废水、受污染地下水     | 化学沉淀、离子交换、螯合萃取    |
| 生物处理技术 | 利用生物材料 / 微生物作用净化水体，环境友好 | 生物吸附 / 转化 + 污泥处置 | 低污染地表水、地下水      | 生物炭吸附、微生物转化、藻类富集  |
| 膜分离技术  | 基于膜孔径筛分与选择性渗透，精准分离核素    | 膜截留 / 渗透 + 浓缩液处理 | 高盐废水、放射性纯水制备    | 反渗透、纳滤、电渗析        |
| 应急处置技术 | 快速降低水体核素浓度，阻断迁移路径       | 快速吸附 / 阻隔 + 后续处理 | 突发放射性泄漏、核事故污染水体 | 应急吸附浮岛、围隔拦截、投加吸附剂 |

（二）核心选择逻辑

水体放射性污染治理技术选型需遵循 “多因素耦合决策” 逻辑，核心考量维度包括：

核素特性：水溶性强的核素（如 <sup>3</sup>H、<sup>90</sup>Sr）优先选择膜分离、离子交换技术；吸附性强的核素（如 <sup>137</sup>Cs、Pu）优先选择吸附过滤、化学沉淀技术；挥发性核素（如 <sup>131</sup>I）优先选择蒸发冷凝、活性炭吸附技术；

水体特征：地表水（流量大、浓度低）优先选择原位吸附、生态净化技术；地下水（流量小、污染羽集中）优先选择抽出 - 处理、可渗透反应墙技术；工业废水（浓

度高、成分复杂)优先选择化学沉淀、膜分离组合技术;

治理目标:饮用水源地需达到 GB 5749-2022 限值(核素总  $\alpha \leq 0.5\text{Bq/L}$ 、总  $\beta \leq 1\text{Bq/L}$ ),优先选择深度净化技术(如反渗透+离子交换);工业废水排放需达到 GB 8978-1996 限值,可采用分级处理技术;

场地约束:城市区域需避免大规模占地,优先选择模块化设备(如移动吸附装置);偏远区域可采用生态处理技术(如人工湿地),降低运行成本。

## 二、物理分离技术:无化学干预的核素富集

物理分离技术基于核素与水体的物理性质差异(密度、粒径、挥发性、吸附性)实现分离,具有操作简单、无二次化学污染、核素易回收的优势,适用于各类水体的预处理或深度处理。

### (一)吸附过滤技术

#### 1. 核心工艺与原理

工艺流程:水体预处理(过滤去除悬浮物)→吸附柱/滤池处理(填充吸附材料)→出水监测→吸附材料再生/固化处置;

核心原理:利用吸附材料(如活性炭、沸石、蒙脱石、金属有机框架材料 MOFs)的高比表面积与特异性吸附位点,通过物理吸附、离子交换作用捕获水体中的核素离子,实现水体净化。

#### 2. 关键技术参数与性能

吸附材料选型:针对不同核素选择专用材料( $^{137}\text{Cs}$  污染选用沸石、普鲁士蓝;U 污染选用羟基磷灰石、MOFs; $^{90}\text{Sr}$  污染选用磷灰石、钛酸盐);

材料性能指标:比表面积 $\geq 500\text{m}^2/\text{g}$ ,核素吸附容量 $\geq 10\text{mg/g}$ ,吸附平衡时间 $\leq 2\text{h}$ ,穿透容量 $\geq 500\text{BV}$ (床体积);

处理效果:低污染水体(核素浓度  $1\sim 100\text{Bq/L}$ )处理后浓度可降至 $\leq 1\text{Bq/L}$ ,去除率 $\geq 99\%$ ;高污染水体(核素浓度  $100\sim 1000\text{Bq/L}$ )去除率 $\geq 95\%$ ;

再生条件:采用酸碱洗脱(如盐酸、氢氧化钠溶液)或高温脱附,再生效率 $\geq 80\%$ ,可重复使用 3~5 次。

#### 3. 适用场景与局限

适用场景:地表水、地下水、工业废水的深度处理或应急处理,尤其适用于低中浓度核素污染( $< 1000\text{Bq/L}$ );

局限:高盐水体(盐度 $> 5\%$ )中吸附材料选择性下降,去除率降低;吸附材料饱和后需妥善处置,避免核素二次释放。

## （二）蒸发浓缩技术

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：废水预处理（除杂、软化）→蒸发浓缩（加热蒸发 / 真空蒸发）→冷凝水排放 / 回用→浓缩液固化处置；

核心原理：利用水与核素的沸点差异，通过加热或减压使水分蒸发，核素富集于浓缩液中，实现“水体净化+核素集中处置”，尤其适用于挥发性低的核素（如 U、<sup>90</sup>Sr、Cs）。

### 2. 关键技术参数与性能

蒸发方式：低浓度废水选用多效蒸发（能耗 30~50kWh/t），高浓度废水选用真空蒸发（能耗 50~80kWh/t）或膜蒸馏（能耗 80~120kWh/t）；

浓缩倍数：原水核素浓度 10~100Bq/L 时，浓缩倍数可达 50~100 倍，浓缩液核素浓度  $\geq 1000\text{Bq/L}$ ；

处理效果：冷凝水核素浓度  $\leq 0.1\text{Bq/L}$ ，符合排放标准；盐析率  $\leq 5\%$ ，避免蒸发器结垢；

防腐要求：蒸发器材质选用钛合金或 316L 不锈钢，耐放射性腐蚀，使用寿命  $\geq 10$  年。

### 3. 适用场景与局限

适用场景：核设施退役废水、放射性实验室废水、高盐放射性废水（如核电厂乏燃料冷却废水），尤其适用于水量小（ $< 100\text{m}^3/\text{d}$ ）、浓度高的废水；

局限：能耗较高，不适用于大规模地表水治理；挥发性核素（如 <sup>3</sup>H、<sup>131</sup>I）易随蒸汽扩散，需配套冷凝回收装置。

## （三）离心分离技术

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：废水预处理（调节 pH）→离心分离（高速旋转）→沉淀物收集→上清液后续处理；

核心原理：利用核素悬浮颗粒（如放射性污泥、络合沉淀物）与水体的密度差异，通过离心力将悬浮态核素分离至沉淀物中，适用于含悬浮态核素的废水。

### 2. 关键技术参数与性能

离心转速：最佳转速 3000~8000r/min，离心力 5000~10000g，确保悬浮颗粒分离效率  $\geq 95\%$ ；

处理流量：实验室规模设备流量 5~50L/h，工程规模设备流量 10~100m<sup>3</sup>/h；

沉淀物含水率：离心后沉淀物含水率  $\leq 60\%$ ，便于后续固化处置。

### 3. 适用场景与局限

适用场景：核设施产生的放射性污泥废水、化学沉淀后的含核素沉淀物废水；

局限：对离子态、溶解态核素无处理效果，需与其他技术联合使用；设备运行噪声大，需配套降噪设施。

### 三、化学处理技术：基于化学反应的核素固定与分离

化学处理技术通过化学反应改变核素的赋存形态（如从溶解态转化为沉淀态、络合态），实现核素与水体的分离，具有处理效率高、成本可控的优势，适用于高浓度或复杂成分的放射性废水治理。

#### （一）化学沉淀技术

##### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：废水调节（pH 调整）→药剂投加（沉淀剂混合搅拌）→反应熟化（1~2h）→固液分离（沉淀池 / 压滤机）→上清液排放→沉淀物固化；

核心原理：向废水中投加化学沉淀剂（如碳酸盐、磷酸盐、氢氧化物、硫化物），与核素离子发生沉淀反应，生成难溶性化合物（如  $\text{SrCO}_3$ 、 $\text{U}_3(\text{PO}_4)_4$ 、 $\text{Pu}(\text{OH})_4$ ），通过固液分离实现核素去除。

##### 2. 关键技术参数与性能

沉淀剂选型： $^{90}\text{Sr}$  污染选用碳酸钠、碳酸钾（生成  $\text{SrCO}_3$ ，溶度积  $1.1 \times 10^{-10}$ ）；U 污染选用磷酸二氢铵、氢氧化钙（生成磷酸铀、氢氧化铀）；Pu、Am 污染选用硫化钠（生成硫化物沉淀）；

pH 控制：处理 U 污染废水 pH 控制在 8.5~9.5，处理 Sr 污染废水 pH 控制在 10~11，确保沉淀完全；

处理效果：高浓度废水（核素浓度  $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5 \text{Bq/L}$ ）去除率可达 95%~99%，处理后上清液核素浓度  $\leq 10 \text{Bq/L}$ ；

沉淀物处理：沉淀物经压滤脱水（含水率  $\leq 50\%$ ）后，采用水泥固化或玻璃固化，浸出率  $\leq 1 \times 10^{-7} \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 。

##### 3. 适用场景与局限

适用场景：核电厂废水、铀矿开采废水、核设施退役废水等高浓度放射性废水（核素浓度  $> 1 \times 10^3 \text{Bq/L}$ ）；

局限：产生大量化学污泥，需占用处置空间；沉淀剂过量可能导致水体 pH 异常，需后续中和处理；对低浓度废水（ $< 100 \text{Bq/L}$ ）处理效率低（ $< 80\%$ ）。

#### （二）离子交换技术

##### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：废水预处理（过滤除杂）→离子交换柱处理（填充离子交换树脂）→出水监测→树脂再生 / 更换→再生液处理；

核心原理：利用离子交换树脂的功能基团（如磺酸基 -  $\text{SO}_3^-$ 、季铵基 -  $\text{N}(\text{CH}_3)_3^+$ ）与水体中核素离子发生交换反应，将核素固定在树脂上，树脂饱和后可通过再生液洗脱回收核素。

## 2. 关键技术参数与性能

树脂选型：阳离子交换树脂（如  $001 \times 7$ ）用于去除  $\text{Cs}^+$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{UO}_2^{2+}$  等阳离子核素；阴离子交换树脂（如  $201 \times 7$ ）用于去除  $\text{TcO}_4^-$ 、 $\text{CrO}_4^{2-}$  等阴离子核素；螯合树脂（如氨基膦酸型）对 U、Pu 具有高选择性；

运行参数：空床接触时间（EBCT）10~30min，流速 5~15m/h，树脂层高 1.5~3m；

处理效果：低中浓度废水（核素浓度 1~1000Bq/L）处理后浓度  $\leq 0.1\text{Bq/L}$ ，去除率  $\geq 99.9\%$ ；树脂交换容量  $\geq 1.5\text{mmol/g}$ ；

再生条件：阳离子树脂采用 5%~10% 盐酸 / 硫酸溶液再生，阴离子树脂采用 4%~8% 氢氧化钠溶液再生，再生液核素浓度可浓缩 100~1000 倍。

## （3）适用场景与局限

适用场景：饮用水源地净化、核电厂循环水处理、实验室低浓度废水处理，尤其适用于离子态核素污染；

局限：高盐废水（盐度  $> 1\%$ ）中存在离子竞争，去除率下降；树脂价格较高（约 50~200 元 / L），高浓度废水处理成本高。

## （三）螯合萃取技术

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：废水预处理（调节 pH）→萃取反应（加入螯合剂 / 萃取剂）→分相分离（有机相 / 水相）→水相排放→有机相反萃回收核素；

核心原理：利用螯合剂（如 EDTA、DTPA、冠醚）与核素离子形成稳定的螯合物，或利用萃取剂（如 TBP、TOPO）将核素从水相转移至有机相，实现核素分离与回收。

### 2. 关键技术参数与性能

螯合剂 / 萃取剂选型： $^{137}\text{Cs}$  污染选用苯并 15 - 冠 - 5、二苯并 18 - 冠 - 6；U 污染选用 TBP（磷酸三丁酯）、D2EHPA（二（2 - 乙基己基）磷酸）； $^{90}\text{Sr}$  污染选用二环己基 18 - 冠 - 6；

配比与条件：螯合剂浓度 0.01~0.1mol/L，萃取剂体积分数 10%~30%，油水比 1:1~1:5，反应温度 20~40℃，pH 控制在 2~6；

处理效果：高浓度废水（核素浓度  $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6\text{Bq/L}$ ）去除率  $\geq 99\%$ ，核素回收率  $\geq 95\%$ ；

反萃条件：采用盐酸、硝酸溶液作为反萃剂，反萃率  $\geq 98\%$ ，可实现核素循环利用。



### 3. 适用场景与局限

适用场景: 高浓度放射性废水(如乏燃料后处理废水)、核素回收利用场景(如铀、钚回收);

局限: 萃取剂多为有机溶剂, 易造成二次污染; 设备腐蚀风险高, 需选用特种材料; 操作流程复杂, 不适用于大规模地表水治理。

## 四、生物处理技术: 环境友好型低浓度污染净化

生物处理技术利用生物材料或微生物的代谢活动吸附、转化水体中的核素, 具有成本低、无二次污染、可持续性强的优势, 适用于低浓度放射性水体的生态净化或辅助治理。

### (一) 生物炭吸附技术

#### 1. 核心工艺与原理

工艺流程: 生物炭制备(农林废弃物高温热解,  $400\sim 600^{\circ}\text{C}$ ) $\rightarrow$ 生物炭改性(酸碱处理/金属离子负载) $\rightarrow$ 水体投加(吸附柱/原位投放) $\rightarrow$ 吸附平衡 $\rightarrow$ 生物炭回收固化;

核心原理: 生物炭通过高比表面积( $\geq 600\text{m}^2/\text{g}$ )与丰富的官能团(羟基、羧基、氨基), 对核素离子进行物理吸附与化学络合, 改性后可引入特异性吸附位点(如负载  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  提升对 U 的吸附能力)。

#### 2. 关键技术参数与性能

生物炭特性: 粒径  $0.1\sim 1\text{mm}$ , 孔隙率 $\geq 50\%$ , 对  $\text{Cs}^+$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  的吸附容量 $\geq 20\text{mg/g}$ , 对 U 的吸附容量 $\geq 30\text{mg/g}$ ;

处理条件: 投加量  $5\sim 50\text{g/L}$ , 反应时间  $1\sim 4\text{h}$ , pH 控制在  $5\sim 8$ , 吸附温度  $15\sim 35^{\circ}\text{C}$ ;

处理效果: 低浓度废水(核素浓度  $1\sim 100\text{Bq/L}$ )去除率可达  $85\%\sim 95\%$ , 处理后浓度 $\leq 10\text{Bq/L}$ ;

环境兼容性: 生物炭可降解, 无二次污染, 且能改善水体水质(提升溶解氧、降低 COD)

#### 3. 适用场景与局限

适用场景: 低污染地表水、地下水、农田灌溉水的净化, 尤其适用于大面积低浓度污染水体;

局限: 吸附速率较慢(平衡时间 $\geq 1\text{h}$ ), 不适用于应急处理; 高浓度废水处理效率低( $< 70\%$ )。

## （二）微生物转化技术

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：微生物筛选驯化（功能菌株培养）→菌剂投加（水体 / 生物反应器）→代谢反应（厌氧 / 好氧条件）→核素固定 / 转化→污泥分离处置；

核心原理：功能微生物（如 *Shewanella putrefaciens*、*Desulfovibrio vulgaris*、*Geobacter sulfurreducens*）通过厌氧呼吸代谢产生还原酶、硫化物或胞外聚合物（EPS），将水体中水溶性核素（如 U (VI)、Cr (VI)、Tc (VII)）还原为低迁移性的零价态或低价态化合物（如 U (IV) O<sub>2</sub>、Cr (III)(OH)<sub>3</sub>），或通过生物矿化作用将核素转化为稳定矿物（如磷酸铀、硫化铀），实现核素固定。

### 2. 关键技术参数与性能

微生物选型：针对 U 污染选用 *Shewanella putrefaciens*（U (VI) 还原率 ≥ 90%）；针对 Cr 污染选用 *Desulfovibrio vulgaris*（Cr (VI) 还原率 ≥ 95%）；菌剂浓度 ≥ 1 × 10<sup>8</sup>CFU/mL，投加量为水体体积的 0.5%~2%；

反应条件：厌氧环境（溶解氧 ≤ 0.5mg/L），pH 控制在 6.0~8.0，温度 20~35℃，碳源（如乳酸钠、乙酸钠）投加量 50~200mg/L（COD 计）；

处理效果：低中浓度废水（核素浓度 10~500Bq/L）处理后核素迁移性降低 80%~90%，水体中溶解态核素浓度 ≤ 5Bq/L；

污泥处置：含核素污泥经脱水（含水率 ≤ 60%）后，采用水泥固化处置，浸出率 ≤ 1 × 10<sup>-7</sup>g/(cm<sup>2</sup> · d)。

### 3. 适用场景与局限

适用场景：厌氧 / 缺氧环境的地下水污染羽治理、低浓度放射性废水的深度处理，尤其适用于含 U、Cr、Tc 等可还原型核素的污染水体；

局限：反应速率较慢（处理周期 3~7d），受水体溶解氧、碳源含量影响显著；需严格控制反应条件，不适用于高氧、高盐水体。

## （三）藻类富集技术

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：藻类筛选（如小球藻、螺旋藻、衣藻）→藻种培养→水体投加 / 藻类反应器→光合作用富集核素→藻类收获（离心 / 过滤）→藻类固化处置；

核心原理：藻类通过细胞壁吸附、细胞膜主动运输或胞内积累作用，富集水体中的核素离子（如 Cs<sup>+</sup>、Sr<sup>2+</sup>、UO<sub>2</sub><sup>2+</sup>），部分藻类可通过生物转化将核素转化为稳定形态，实现水体净化。

### 2. 关键技术参数与性能

藻类选型：小球藻对 <sup>137</sup>Cs 的富集系数 ≥ 500，螺旋藻对 U 的富集系数 ≥ 800，衣

藻对  $^{90}\text{Sr}$  的富集系数  $\geq 300$ ;

培养条件: 光照强度 2000~5000lux, 温度 25~30℃, pH 控制在 7.0~8.5, 营养盐 (N、P) 投加量符合藻类生长需求;

处理效果: 低浓度废水 (核素浓度 1~100Bq/L) 处理后浓度  $\leq 5\text{Bq/L}$ , 去除率  $\geq 95\%$ ; 藻类收获率  $\geq 90\%$ ;

环境价值: 藻类光合作用可提升水体溶解氧, 收获后的藻类可用于生物能源生产 (如沼气发酵), 实现资源回收。

### 3. 适用场景与局限

适用场景: 低污染地表水、人工湿地水体净化、实验室低浓度废水处理, 尤其适用于光照充足、温度适宜的户外场景;

局限: 受光照、温度等自然条件影响大, 冬季或阴雨天气处理效率下降; 高浓度废水 ( $> 100\text{Bq/L}$ ) 中藻类生长受抑制, 富集效率降低。

## 五、膜分离技术: 高精度核素截留与浓缩

膜分离技术基于膜的孔径筛分、电荷排斥或选择性渗透特性, 实现核素与水体的精准分离, 具有分离效率高、操作简便、模块化程度高的优势, 适用于高盐、高纯度要求的放射性水体治理。

### (一) 反渗透 (RO) 技术

#### 1. 核心工艺与原理

工艺流程: 废水预处理 (过滤除杂、软化除垢)  $\rightarrow$  高压加压 (1.5~4.0MPa)  $\rightarrow$  反渗透膜分离  $\rightarrow$  产水回用 / 排放  $\rightarrow$  浓缩液处理;

核心原理: 利用反渗透膜 (孔径 0.1~1nm) 的选择性渗透作用, 仅允许水分子通过, 核素离子 (如  $\text{Cs}^+$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{UO}_2^{2+}$ ) 与盐分被膜截留, 实现 “水体净化 + 核素浓缩”。

#### 2. 关键技术参数与性能

膜组件选型: 选用耐污染、耐辐射的芳香族聚酰胺膜或陶瓷膜, 截留率  $\geq 99.9\%$  (对核素离子);

运行参数: 操作压力 1.5~4.0MPa, 水温 25~35℃, 回收率 70%~85%, 膜通量 10~30L/( $\text{m}^2 \cdot \text{h}$ );

处理效果: 低中浓度废水 (核素浓度 1~1000Bq/L) 处理后产水核素浓度  $\leq 0.1\text{Bq/L}$ , 符合饮用水标准; 浓缩液核素浓度可提升 5~10 倍;

清洗维护: 定期采用柠檬酸、氢氧化钠溶液清洗膜表面, 防止结垢与污染, 膜使用寿命  $\geq 3$  年。

### 3. 适用场景与局限

适用场景：核电厂废水深度处理、饮用水源地净化、放射性纯水制备，尤其适用于高盐放射性废水（盐度 5%~20%）；

局限：能耗较高（运行压力 1.5~4.0MPa），预处理要求严格（需去除悬浮物、胶体）；浓缩液需进一步固化处置，增加处理成本。

## （二）纳滤（NF）技术

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：废水预处理（过滤除杂）→加压（0.5~2.0MPa）→纳滤膜分离→产水排放→浓缩液后续处理；

核心原理：纳滤膜（孔径 1~5nm）兼具筛分与电荷排斥作用，对二价核素离子（如  $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{UO}_2^{2+}$ ）截留率 $\geq 99\%$ ，对一价离子（如  $\text{Cs}^+$ ）截留率 80%~95%，适用于需保留部分低价盐分的水体治理。

### 2. 关键技术参数与性能

膜选型：选用聚哌嗪酰胺纳滤膜，操作压力 0.5~2.0MPa，水温 20~30℃，膜通量 20~40L/(m<sup>2</sup>·h)；

处理效果：低浓度废水（核素浓度 1~100Bq/L）处理后产水核素浓度 $\leq 1\text{Bq/L}$ ，二价核素去除率 $\geq 99\%$ ；

优势特点：能耗低于反渗透（压力仅为 RO 的 1/3~1/2），对部分有机物也有截留作用，适用于复杂成分的放射性废水。

### 3. 适用场景与局限

适用场景：核设施中低浓度废水处理、地表水轻度污染净化，尤其适用于以二价核素（如  $^{90}\text{Sr}$ 、 $\text{U}$ ）污染为主的水体；

局限：对一价核素（如  $^{137}\text{Cs}$ ）截留率低于反渗透，需与离子交换技术联合使用；高盐水体中膜通量下降显著。

## （三）电渗析（ED）技术

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：废水预处理（除杂）→电渗析膜堆处理（施加直流电场）→淡水室产水→浓水室浓缩液处置；

核心原理：利用离子交换膜的选择透过性（阳离子膜允许阳离子通过，阴离子膜允许阴离子通过），在直流电场作用下，核素离子向对应电极迁移，富集于浓水室，淡水室产出净化水。

### 2. 关键技术参数与性能

膜堆设计：采用均相离子交换膜，膜堆电压 5~20V，电流密度 100~300A/m<sup>2</sup>，淡水室回收率 80%~90%；

处理效果：低中浓度废水（核素浓度 10~500Bq/L）处理后淡水核素浓度 $\leq 5\text{Bq/L}$ ，去除率 $\geq 99\%$ ；浓水浓缩倍数 5~20 倍；

能耗指标：单位产水能耗 0.5~2.0kWh/m<sup>3</sup>，低于反渗透技术，适用于大规模废水处理。

### 3. 适用场景与局限

适用场景：核电厂循环水处理、放射性废水预处理、高盐废水脱盐与核素分离，尤其适用于水量大（ $> 1000\text{m}^3/\text{d}$ ）的低中浓度废水；

局限：对悬浮态、络合态核素无处理效果，需预处理去除；膜污染与极化现象会影响处理效率，需定期维护。

## 六、应急处置技术：突发放射性污染快速控险

应急处置技术针对核事故泄漏、放射性物质遗撒等突发污染事件，核心目标是快速降低水体核素浓度、阻断迁移路径，为后续精细化治理创造条件，具有响应速度快、操作简便、针对性强的特点。

### （一）应急吸附浮岛技术

#### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：浮岛载体搭建（泡沫塑料、竹筏）→吸附材料固定（普鲁士蓝、沸石、改性纤维）→浮岛投放（污染水体表面）→吸附平衡（24~72h）→浮岛回收→吸附材料固化；

核心原理：利用浮岛载体将高选择性吸附材料固定于水体表面，通过吸附材料与水体的充分接触，快速捕获核素离子（如  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ ），实现水体核素浓度快速下降。

#### 2. 关键技术参数与性能

吸附材料选型：普鲁士蓝改性纤维对  $^{137}\text{Cs}$  的吸附容量 $\geq 50\text{mg/g}$ ，沸石颗粒对  $^{90}\text{Sr}$  的吸附容量 $\geq 20\text{mg/g}$ ；

浮岛设计：单块浮岛面积 10~50m<sup>2</sup>，吸附材料装载量 5~10kg/m<sup>2</sup>，覆盖污染水体表面积的 30%~50%；

处理效果：突发污染水体（核素浓度 100~1000Bq/L）处理 72h 后，核素浓度降低 80%~90%，快速达到应急控制目标；

优势特点：无需动力设备，投放与回收便捷，可快速部署（24h 内完成），适用于大面积地表水应急处理。

#### 3. 适用场景

核事故后地表水污染、放射性物质泄漏导致的河流 / 湖泊污染，需快速降低核素浓度的应急场景。



## （二）围隔拦截技术

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：污染区域划定→围隔布设（充气式橡胶坝、土工膜围堤）→水体循环处理（投加吸附剂 / 小型膜设备）→围隔拆除→后续治理；

核心原理：通过围隔设施将污染水体与清洁水体隔离，防止污染范围扩大，同时在围隔内采用快速处理技术（如投加吸附剂、小型反渗透设备）降低核素浓度。

### 2. 关键技术参数与性能

围隔材料：选用高强度 HDPE 土工膜（厚度  $\geq 1.5\text{mm}$ ）或充气式橡胶坝（高度 1~3m），防渗系数  $\leq 1 \times 10^{-11}\text{cm/s}$ ；

拦截效率：围隔布设 24h 内可实现污染区域 100% 隔离，无渗漏；

处理效率：围隔内水体通过小型移动设备处理，核素去除率  $\geq 90\%$ ，处理周期 3~7d。

### 3. 适用场景

放射性物质泄漏导致的局部水体污染（如池塘、河流支流）、核设施周边应急缓冲区域的污染控制。

## （三）应急吸附剂投加技术

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：吸附剂选型→定量投加（人工 / 机械喷洒）→混合搅拌（水体自然对流 / 机械搅拌）→吸附沉淀→沉淀物回收；

核心原理：向污染水体中快速投加高选择性吸附剂（如粉末状普鲁士蓝、沸石粉、改性黏土），通过吸附剂与核素的快速反应，将核素固定于吸附剂表面，随后通过沉淀或过滤分离。

### 2. 关键技术参数与性能

吸附剂选型：应急场景优先选用粉末状吸附剂（粒径  $< 100\mu\text{m}$ ），吸附速率快（平衡时间  $\leq 1\text{h}$ ），对目标核素去除率  $\geq 90\%$ ；

投加量：根据水体核素浓度确定，通常为 1~10g/L，确保吸附剂过量 20%~30%；

处理效果：突发低中浓度污染（核素浓度 10~500Bq/L）处理后，水体核素浓度  $\leq 10\text{Bq/L}$ ，处理时间  $\leq 24\text{h}$ ；

后续处置：沉淀物采用真空抽吸或机械打捞回收，固化后安全处置。

### 3. 适用场景

核事故应急、放射性废水泄漏等突发场景，适用于小范围、高浓度或低浓度突发污染水体的快速处理。

## 第四节 废物处理与处置技术

### 一、放射性废物分类与处理处置核心逻辑

#### （一）放射性废物分类标准

根据《放射性废物分类》（GB 9133-2019），结合废物形态、放射性活度、核素特性，放射性废物分为以下五大类，不同类别对应差异化处理处置路径：

| 废物类别        | 核心特征                                                          | 典型来源            | 核素类型                                              | 处理处置原则                  |
|-------------|---------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------|-------------------------|
| 高放废物（HLW）   | 活度浓度 $> 4 \times 10^4 \text{Bq/g}$ ，含长半衰期 $\alpha$ 核素         | 乏燃料后处理、核反应堆退役   | Pu、U、Am、Cm                                        | 减容固化 + 地质处置             |
| 中放废物（ILW）   | 活度浓度 $4 \times 10^2 \sim 4 \times 10^4 \text{Bq/g}$ ，含中等半衰期核素 | 核设施退役部件、放射性实验废物 | $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、Co          | 预处理 + 固化 + 近地表处置 / 地质处置 |
| 低放废物（LLW）   | 活度浓度 $\leq 4 \times 10^2 \text{Bq/g}$ ，短 / 中等半衰期核素            | 核电厂运行废物、医疗放射性废物 | $^{131}\text{I}$ 、 $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ | 减容处理 + 近地表处置            |
| 极低放废物（VLLW） | 活度浓度接近背景值，风险可忽略                                               | 核设施清洁废物、放射性污染衣物 | 低活度 $\beta/\gamma$ 核素                             | 清洁解控或简易处置               |
| 放射性污染废物     | 受污染的土壤、设备、材料                                                  | 核事故污染、铀矿开采污染    | $^{137}\text{Cs}$ 、U、Sr                           | 去污 + 分类处理 + 处置          |

#### （二）核心处理处置逻辑

放射性废物处理处置遵循“分级分类、源头减量、过程控制、末端安全”四大逻辑：

分级分类逻辑：根据废物活度、核素特性、形态差异，选择适配技术（如高放废物优先地质处置，低放废物优先近地表处置），避免“过度处理”或“处理不足”；

源头减量逻辑：通过工艺优化（如核设施运行废物分类收集）、材料复用（如污染设备去污后回用），减少废物产生量，降低后续处理处置成本；

过程控制逻辑：处理过程中强化核素固化与泄漏防控，确保处理后废物满足“浸出率低、稳定性强、辐射剂量可控”要求；

末端安全逻辑：最终处置需实现“长期隔离”，针对长半衰期核素（如 Pu、U），处置周期需覆盖  $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$  年，确保核素不泄漏至环境。

### 二、放射性废物预处理技术：减容、去污与分类

预处理是放射性废物处理的前置环节，核心目标是降低废物体积、去除杂质、分类分流，为后续处理处置创造条件，主要包括减容处理、去污处理、分类分选三大技术方向。

## （一）减容处理技术

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：废物收集→破碎（机械破碎 / 低温破碎）→压缩（液压压缩 / 机械压缩）→干燥（热风干燥 / 真空干燥）→减容后废物暂存；

核心原理：通过破碎减小废物粒径、压缩降低废物孔隙率、干燥去除废物水分，减少废物总体积，提升后续处理处置效率（如固化体体积降低 30%~70%）。

### 2. 关键技术参数与性能

破碎技术：采用剪切式破碎机，破碎后废物粒径 $\leq 5\text{cm}$ （固体废物），破碎效率 $\geq 100\text{kg/h}$ （工业规模）；低温破碎（ $-80\sim-120^{\circ}\text{C}$ ）适用于橡胶、塑料等难破碎废物，破碎能耗降低 20%~30%；

压缩技术：液压压缩机压力 $\geq 20\text{MPa}$ ，压缩后废物密度 $\geq 1.5\text{g/cm}^3$ （松散废物），体积减容比 3:1~10:1；

干燥技术：热风干燥温度  $80\sim 120^{\circ}\text{C}$ ，干燥后废物含水率 $\leq 10\%$ ；真空干燥适用于热敏性废物，干燥温度  $40\sim 60^{\circ}\text{C}$ ，能耗 $\leq 50\text{kWh/t}$ 。

### 3. 适用场景与局限

适用场景：低中放固体废物（如污染衣物、纸张、塑料、金属碎片）的减容，核设施退役产生的大件废物（如设备外壳、管道）预处理；

局限：对高放废物或含易挥发核素（如  $^{131}\text{I}$ ）的废物，需配套辐射防护与尾气处理设施；破碎过程可能产生扬尘，需设置负压通风系统。

## （二）去污处理技术

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：废物表面清理→去污剂投加（化学去污 / 物理去污）→反应 / 作用→冲洗→去污废液处理→去污后废物检测（达标回用 / 进入后续处理）；

核心原理：通过物理剥离、化学溶解或电化学作用，去除废物表面的放射性污染层，实现废物清洁解控或降低后续处理难度。<sup>①</sup>

### 2. 关键技术参数与性能

物理去污技术：包括高压水射流去污（压力  $20\sim 50\text{MPa}$ ，去污效率 $\geq 90\%$ ）、喷砂去污（砂粒粒径  $0.1\sim 0.5\text{mm}$ ，去污率 $\geq 95\%$ ）、超声去污（频率  $20\sim 80\text{kHz}$ ，适用于精密设备）；

化学去污技术：选用专用去污剂（如柠檬酸 + 氧化剂、EDTA 络合剂、碱性去垢剂），去污剂浓度 5%~20%，反应温度  $20\sim 60^{\circ}\text{C}$ ，去污时间 1~4h，对金属表面 U、Cs 污染去污率 $\geq 98\%$ ；

① 谢中岩, 王荣, 唐晓东. 浅谈辐射环境管理的问题及对策 [J]. 中国环境管理, 1999, (06): 33-34.

电化学去污技术：适用于金属废物（如不锈钢、碳钢），施加电压 5~20V，电流密度 10~50A/m<sup>2</sup>，去污率 ≥ 99%，废液产生量少（≤ 0.5L/m<sup>2</sup>）。

### 3. 适用场景与局限

适用场景：核设施退役设备、污染金属材料、实验室污染器具的去污，目标是实现废物清洁解控（活度浓度 ≤ 豁免水平）或降低放射性活度；

局限：化学去污剂可能造成二次污染，需配套废液处理系统；复杂形状废物（如管道内壁）去污难度大，需结合多种技术。

## （三）分类分选技术

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：废物输送→预处理（破碎、干燥）→分选（密度分选 / 磁性分选 / 辐射探测分选）→达标废物回用→污染废物分流处理；

核心原理：利用废物的物理性质（密度、磁性）或放射性活度差异，通过分选设备分离清洁组分与污染组分，实现废物资源化回用与污染组分集中处理。

### 2. 关键技术参数与性能

密度分选技术：采用重力分选机（如摇床、螺旋分选机），分选密度阈值 2.0~3.0g/cm<sup>3</sup>，分离清洁金属与污染非金属的效率 ≥ 90%；

磁性分选技术：适用于含铁磁性废物，磁场强度 0.1~0.5T，磁性物质分离效率 ≥ 95%，可回收清洁金属材料；

辐射探测分选技术：配备 γ 射线探测器（如 NaI 探测器），探测下限 ≤ 10Bq/g，实时识别高活度废物，分选准确率 ≥ 99%，避免交叉污染。

### 3. 适用场景与局限

适用场景：核设施退役产生的混合废物、放射性污染土壤与金属碎片的分选，低放废物中清洁组分的回收；

局限：对均匀污染的废物分选效果差；辐射探测分选设备成本较高（约 50~200 万元 / 台），适用于大规模废物处理。

## 三、放射性废物核心处理技术：固化、分离与减容强化

核心处理技术是放射性废物“无害化、稳定化”的关键，通过固化、分离等手段降低核素迁移性，为最终处置奠定基础，主要包括固化稳定化技术、分离回收技术、焚烧减容技术三大类。

### （一）固化稳定化技术

固化稳定化技术是放射性废物处理的核心技术，通过将核素包裹在稳定的固体基质中，降低其浸出性与迁移性，适用于各类放射性废物，尤其适用于高中放废物与污染土壤。

### 1. 水泥固化技术

核心工艺与原理：工艺流程为“废物预处理→水泥基料混合（普通硅酸盐水泥 / 特种水泥）→添加剂投加（沸石、膨润土、减水剂）→搅拌成型→养护固化（28d）→固化体检测”；核心原理是利用水泥水化反应生成的水化硅酸钙凝胶，将核素物理包裹或化学吸附，形成结构稳定的固化体。

关键技术参数与性能：水泥与废物质量比 1:1~3:1，水灰比 0.3~0.5；固化体抗压强度  $\geq 15\text{MPa}$ （养护 28d），核素浸出率  $\leq 1 \times 10^{-7}\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ （GB 14569.1-2011）；适用于低中放废物（如放射性污泥、污染土壤），对 Cs、Sr 的固化效率  $\geq 99\%$ 。

适用场景与局限：适用场景为核电厂低放废物、放射性实验室污泥、核事故污染土壤的固化；局限为固化体体积增加 30%~50%，对高盐废物易出现泛霜开裂，长期稳定性受地下水影响。

### 2. 玻璃固化技术

核心工艺与原理：工艺流程为“废物预处理→玻璃形成体混合（ $\text{SiO}_2$ 、 $\text{B}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ ）→熔融（1100~1300℃）→浇铸成型→退火冷却→玻璃体检测”；核心原理是将核素融入玻璃晶格中，形成致密、稳定的玻璃体，阻止核素浸出。

关键技术参数与性能：玻璃形成体与废物质量比 2:1~4:1，熔融时间 2~4h；玻璃体密度  $\geq 2.5\text{g}/\text{cm}^3$ ，抗压强度  $\geq 50\text{MPa}$ ，核素浸出率  $\leq 1 \times 10^{-9}\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ （对 Pu、U）；适用于高放废物（如乏燃料后处理废液）、高毒性核素废物，固化效率  $\geq 99.9\%$ 。

适用场景与局限：适用场景为高放废液、核反应堆乏燃料处理废物的固化；局限为能耗高（熔融阶段能耗  $\geq 500\text{kWh}/\text{t}$ ），设备腐蚀风险大（需选用铂铑合金或耐高温陶瓷材质），成本较高（约 1~5 万元/t）。

### 3. 沥青固化技术

核心工艺与原理：工艺流程为“废物预处理（干燥、破碎）→沥青加热熔融（120~180℃）→废物与沥青混合（搅拌速率 50~100r/min）→成型冷却→固化体检测”；核心原理是利用沥青的黏结性与包裹性，将核素固定在沥青基质中，形成防水、抗渗透的固化体。

关键技术参数与性能：沥青与废物质量比 1:1~2:1，混合时间 30~60min；固化体针入度（25℃）5~20mm，软化点  $\geq 80^\circ\text{C}$ ，核素浸出率  $\leq 1 \times 10^{-8}\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ （对 Cs、Sr）；适用于低中放废物（如放射性废液、污泥、废树脂），体积减容比 2:1~3:1。

适用场景与局限：适用场景为核电厂低放废液、放射性废树脂的固化；局限为耐高温性差（ $> 200^\circ\text{C}$ 易软化），易被有机溶剂侵蚀，长期稳定性低于玻璃固化。

### 4. 聚合物固化技术

核心工艺与原理：工艺流程为“废物预处理→聚合物基质混合（环氧树脂、聚氨酯、



不饱和聚酯)→固化剂投加(胺类、过氧化物)→反应成型(室温/加热)→固化体检测”;核心原理是通过聚合物聚合反应形成三维网状结构,将核素物理包裹或化学络合,固化体具有高致密性、抗腐蚀性。

关键技术参数与性能:聚合物与废物质量比 0.5:1~2:1,固化时间 1~24h(室温/加热至 60℃);固化体抗压强度 $\geq 20\text{MPa}$ ,核素浸出率 $\leq 1 \times 10^{-8}\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ,耐酸碱性(pH 2~12)无明显腐蚀;适用于低中放废物、精密设备污染废物,对复杂形态废物适应性强。

适用场景与局限:适用场景为实验室低放废物、核设施退役小型污染设备的固化;局限为成本较高(聚合物价格约 2~5 万元/t),大规模应用受限;部分聚合物易老化,需添加抗老化剂。

## (二) 分离回收技术

分离回收技术通过物理、化学手段将核素从废物中分离浓缩,实现核素回收利用或降低废物放射性活度,适用于高放废液、含贵重金属的放射性废物。

### 1. 溶剂萃取分离技术

核心工艺与原理:工艺流程为“废液预处理(调节 pH、除杂)→萃取反应(有机相/水相混合)→分相分离→反萃回收核素→萃余液处理”;核心原理是利用核素在水相和有机相中的分配系数差异,通过萃取剂(如 TBP、D2EHPA、冠醚)将核素从废液中转移至有机相,实现分离浓缩。

关键技术参数与性能:萃取剂体积分数 10%~30%,油水比 1:1~1:10,反应温度 20~40℃,pH 控制在 2~6;对 U、Pu 的萃取率 $\geq 99.9\%$ ,浓缩倍数可达 100~1000 倍;反萃剂选用盐酸、硝酸溶液,反萃率 $\geq 98\%$ ,可回收高纯度核素(如铀、钚)。

适用场景与局限:适用场景为乏燃料后处理废液、高放废液中核素回收(如铀、钚、镅);局限为萃取剂易降解,需定期更换;设备腐蚀风险高,需选用特种材料(如哈氏合金);产生有机废液,需配套处理设施。

### 2. 离子交换分离技术

核心工艺与原理:工艺流程为“废液预处理(过滤除杂)→离子交换柱吸附(填充专用树脂)→淋洗浓缩→核素回收→树脂再生/处置”;核心原理是利用离子交换树脂的功能基团(如氨基膦酸基、磺酸基)与核素离子发生特异性交换反应,实现核素分离与浓缩。

关键技术参数与性能:树脂选型针对特定核素(如 U 选用氨基膦酸型螯合树脂, Cs 选用沸石改性树脂);空床接触时间(EBCT) 10~30min,流速 5~15m/h;树脂交换容量 $\geq 1.0\text{mmol/g}$ ,核素去除率 $\geq 99.9\%$ ,浓缩液核素浓度 $\geq 1 \times 10^4\text{Bq/mL}$ 。

适用场景与局限:适用场景为低中放废液、核电厂循环水处理废液中核素回收

(如 Cs、Sr、U)；局限为高盐废液中离子竞争激烈，分离效率下降；树脂饱和后需固化处置，避免核素二次释放。

### 3. 膜分离回收技术

核心工艺与原理：工艺流程为“废液预处理（除杂、软化）→膜分离（反渗透 / 纳滤 / 超滤）→浓缩液回收核素→透过液达标排放”；核心原理是利用膜的选择性渗透特性，截留核素离子或络合态核素，实现核素浓缩与废液净化。

关键技术参数与性能：选用耐辐射膜（如聚偏氟乙烯 PVDF、陶瓷膜），操作压力 1.0~4.0MPa，膜通量 10~30L/(m<sup>2</sup>·h)；对 Cs<sup>+</sup>、Sr<sup>2+</sup>、UO<sub>2</sub><sup>2+</sup> 的截留率 ≥ 99.9%，浓缩倍数 5~20 倍；膜使用寿命 ≥ 1 年（连续运行）。

适用场景与局限：适用场景为核电厂低放废液、放射性实验室废水的核素回收；局限为膜污染（如胶体、有机物沉积）会导致通量下降，需定期清洗（化学清洗周期 1~3 个月）；高浓度废液中膜易受辐射损伤，需选用耐辐射剂量 ≥ 100kGy 的专用膜；设备投资较高（模块化装置约 100~500 万元 / 套），适用于中小规模废液处理。

### 4. 电化学沉积回收技术

核心工艺与原理：工艺流程为“废液预处理（调节 pH、去除杂质）→电化学沉积（电解槽内施加直流电场）→核素沉积于电极表面→电极剥离回收核素→废液达标处理”；核心原理是利用核素离子（如 U<sup>6+</sup>、Pu<sup>4+</sup>）在电极表面的还原沉积反应，将核素从废液中转移至电极，实现分离回收。

关键技术参数与性能：选用铂、钛等惰性电极，施加电压 5~15V，电流密度 50~200A/m<sup>2</sup>，反应温度 20~40℃，pH 控制在 1~4；对 U、Pu 的沉积率 ≥ 99%，回收核素纯度 ≥ 99.5%；电解槽能耗 ≤ 100kWh/m<sup>3</sup> 废液。

适用场景与局限：适用场景为高放废液、核燃料循环废液中高价值核素（如 U、Pu）的回收；局限为对低浓度废液处理效率低（< 80%）；电极易钝化，需定期打磨维护；设备腐蚀风险高，需配套防腐设施。

## （三）焚烧减容技术

焚烧减容技术通过高温燃烧将可燃放射性废物（如纸张、木材、塑料、污染衣物）氧化分解，大幅降低废物体积，适用于低中放可燃废物的减容处理。

### 1. 核心工艺与原理

工艺流程：废物预处理（破碎、分类）→进料系统（密闭输送）→焚烧炉燃烧（800~1200℃）→烟气处理（除尘、脱硫、脱硝、放射性核素捕集）→灰渣收集→固化处置；

核心原理：利用高温（800~1200℃）使可燃废物完全燃烧，有机物分解为 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 等无害气体，放射性核素富集于灰渣中，实现废物体积大幅减容（减容比 10:1~50:1）。

## 2. 关键技术参数与性能

焚烧炉类型：选用回转窑焚烧炉（处理量 100~500kg/h）或流化床焚烧炉（处理量 500~2000kg/h），燃烧温度 800~1200℃，停留时间 $\geq 2s$ ，焚烧效率 $\geq 99.9\%$ ；

烟气处理：配备高效除尘器（如陶瓷过滤器，除尘效率 $\geq 99.99\%$ ）、活性炭吸附塔（捕集放射性气溶胶与挥发性核素）、酸碱洗涤塔（脱硫脱硝），处理后烟气放射性活度浓度 $\leq 1Bq/m^3$ ，符合 GB 18484-2020 排放标准；

灰渣处理：焚烧灰渣含水率 $\leq 5\%$ ，活度浓度浓缩 10~50 倍，需经水泥固化或玻璃固化后处置。

## 3. 适用场景与局限

适用场景：核电厂低放可燃废物、核设施退役产生的污染衣物 / 纸张、放射性实验室可燃废物的减容；

局限：对不可燃废物（如金属、玻璃）无处理效果；焚烧过程产生含放射性的烟气与灰渣，需严格控制二次污染；设备投资高（约 1000~5000 万元 / 套），运行成本高（能耗 $\geq 500kWh/t$ ）。

# 第五节 治理效果评估标准

## 一、评估标准核心框架与设计逻辑

### （一）核心评估框架

放射性污染治理与修复效果评估遵循“三维一体”框架，涵盖“技术效果、环境安全、长期稳定”三大维度，每个维度下设具体评估模块，形成完整的评估体系。技术效果维度聚焦核素去除 / 固化效率、污染范围缩减、治理目标达成度，核心目标是验证治理技术的直接净化效果，适用于治理后达标验收阶段；环境安全维度包括辐射剂量控制、二次污染风险、生态兼容性，旨在保障治理过程与结果的环境安全，覆盖治理中过程监控与治理后验收两个阶段；长期稳定维度重点关注核素形态稳定性、屏障完整性、风险反弹防控，确保治理效果长期可持续，适用于 1~30 年的长期跟踪评估。

### （二）标准设计逻辑

评估标准设计遵循“四大核心逻辑”，确保标准的科学性与实用性。其一为分级分类逻辑，根据污染介质（土壤 / 水体 / 固体废物）、污染程度（低 / 中 / 高污染）、核素类型（ $\alpha/\beta/\gamma$  核素、长 / 短半衰期核素），制定差异化评估指标与阈值，避免“一刀切”；其二为目标导向逻辑，以治理工程预设目标（如达标回用、风险管控、生态

恢复)为核心,反向设定评估指标,确保评估与治理目标高度契合;其三为量化可测逻辑,核心指标采用定量描述(如核素去除率 $\geq 90\%$ ),辅助指标采用定性+定量结合,确保评估结果可验证、可对比;其四为全周期覆盖逻辑,评估标准贯穿治理全流程,既包括治理后的短期达标验收,也涵盖治理后的长期稳定性跟踪,形成“短期效果+长期风险”的完整评估链条。

## 二、按污染介质分类的评估标准

### (一) 土壤放射性污染治理效果评估标准

土壤污染治理效果评估需重点关注核素残留浓度、生物有效性、土壤生态功能恢复,核心标准如下:

#### 1. 核心评估指标与阈值

核素残留浓度指治理后土壤中目标核素(如 $^{137}\text{Cs}$ 、 $\text{U}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ )的活度浓度,依据GB 15618-2018等标准,农田土壤需 $\leq 1 \times 10^3 \text{Bq/kg}$ ,工业用地 $\leq 1 \times 10^4 \text{Bq/kg}$ ,生态用地 $\leq 5 \times 10^3 \text{Bq/kg}$ ,检测方法包括 $\gamma$ 谱仪法、 $\alpha$ 谱仪法、ICP-MS法。核素去除率计算公式为(治理前浓度-治理后浓度)/治理前浓度 $\times 100\%$ ,异位修复对中高污染土壤要求 $\geq 80\%$ ,低污染土壤 $\geq 60\%$ ,原位修复中高污染土壤 $\geq 70\%$ ,低污染土壤 $\geq 50\%$ ,通过对比治理前后核素浓度检测结果得出。核素浸出率指单位面积土壤中核素的浸出量( $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ),固化处理土壤需 $\leq 1 \times 10^{-7} \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ,分离去除处理土壤 $\leq 1 \times 10^{-6} \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ,采用水平振荡浸出法(HJ 557-2010)检测。

生物有效性即农作物/植物对土壤核素的吸收系数(植物核素浓度/土壤核素浓度),农田土壤需 $\leq 0.1$ ,生态用地土壤 $\leq 0.3$ ,通过盆栽试验+核素含量检测验证。土壤生态功能涵盖土壤有机质含量、微生物多样性、植物生长状况,要求有机质含量 $\geq$ 治理前 $80\%$ ,微生物多样性 $\geq$ 清洁土壤 $70\%$ ,植物发芽率 $\geq 90\%$ ,分别采用重铬酸钾法、高通量测序法、盆栽发芽试验检测。辐射剂量率指土壤表面 $1\text{m}$ 处的 $\gamma$ 辐射剂量率,公众可接触区域需 $\leq 0.2 \mu\text{Sv/h}$ ,采用便携式 $\gamma$ 剂量率仪现场检测。

#### 2. 评估流程与关键要求

采样布点采用“网格布点+重点布点”结合方式,高污染区域网格间距 $\leq 5\text{m}$ ,中低污染区域 $\leq 10\text{m}$ ,每个污染地块采样点数 $\geq 15$ 个,同时设置背景对照点。检测频次方面,治理后需采样检测1次用于达标验收;农田土壤需在作物收获期追加1次检测,验证生物有效性;长期跟踪评估每年1次,持续3~5年。达标判定规则为核心指标(核素残留浓度、辐射剂量率)全部达标,辅助指标(生态功能、浸出率)达标率 $\geq 80\%$ ,可判定为治理有效;核心指标有1项不达标,需扩大采样范围重新检测,仍不达标则判定为治理无效。

## （二）水体放射性污染治理效果评估标准

水体污染治理效果评估需重点关注核素浓度、水体流动性影响、水生生态安全，核心标准如下：

### 1. 核心评估指标与阈值

核素残留浓度指治理后水体中目标核素的活度浓度，依据 GB 5749-2022、GB 8978-1996 等标准，饮用水总  $\alpha \leq 0.5\text{Bq/L}$ 、总  $\beta \leq 1\text{Bq/L}$ ，地表水  $\leq 10\text{Bq/L}$ ，工业废水排放  $\leq 1\text{Bq/L}$ ，采用放射化学分析法、 $\gamma$  谱仪法检测。核素去除率计算公式为（治理前浓度 - 治理后浓度）/ 治理前浓度  $\times 100\%$ ，深度处理（饮用水）要求  $\geq 99\%$ ，工业废水处理  $\geq 95\%$ ，应急处理  $\geq 90\%$ ，通过对比治理前后水体核素浓度得出。浓缩倍数即治理后浓缩液核素浓度 / 治理前原水核素浓度，膜分离 / 蒸发浓缩需  $\geq 5$  倍，化学沉淀  $\geq 10$  倍，通过检测浓缩液与原水核素浓度计算。

二次污染风险关注治理过程中化学药剂残留、污泥放射性，要求药剂残留  $\leq 0.1\text{mg/L}$ ，污泥核素浸出率  $\leq 1 \times 10^{-7}\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ，采用高效液相色谱法、浸出试验检测。水生生态安全涵盖水生生物（藻类、鱼类）的辐射剂量与毒性，要求水生生物辐射剂量  $\leq 1\text{mSv/a}$ ，生物毒性（ $\text{EC}_{50}$ ） $\geq 10\text{mg/L}$ ，通过生物毒性试验、辐射剂量计算验证。水体流动性影响包括治理后水体流速、水质参数（pH、DO、COD），要求流速变化  $\leq$  治理前 20%，pH 在 6.5~8.5 之间，DO  $\geq 5\text{mg/L}$ ，COD  $\leq 20\text{mg/L}$ ，采用流速仪、多参数水质分析仪检测。

### 2. 评估流程与关键要求

采样布点方面，地表水需设置进水口、治理区域中点、出水口、下游对照点；地下水设置污染羽前端、中部、后端、背景井，每个点位采样 3 次（瞬时采样），取平均值。检测频次为连续运行 30d 后采样检测用于达标验收；饮用水处理设施需每月检测 1 次，持续 6 个月；应急处理后 72h 内完成首次检测，1 个月后复查。达标判定规则为核素残留浓度、去除率、生态安全指标全部达标，浓缩倍数与二次污染风险指标满足设计要求，可判定为治理有效；若水体流动导致下游核素浓度超标，需重新优化治理方案。

## （三）放射性固体废物处理处置效果评估标准

固体废物处理处置效果评估需重点关注核素固化稳定性、屏障完整性、长期隔离效果，核心标准如下：

### 1. 核心评估指标与阈值

固化体核素浸出率指固化体中核素的浸出速率，依据 GB 14569.1-2011 等标准，水泥固化体需  $\leq 1 \times 10^{-7}\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ，玻璃固化体  $\leq 1 \times 10^{-9}\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ，采用浸出试验（GB/T 13913-2008）检测。固化体强度指固化体养护 28d 后的抗压强度，水泥 / 聚合物固化体  $\geq 15\text{MPa}$ ，玻璃固化体  $\geq 50\text{MPa}$ ，通过压力试验机检测。减容比即处理前废



物体积 / 处理后废物体积, 压缩减容  $\geq 3:1$ , 焚烧减容  $\geq 10:1$ , 固化减容  $\leq 1.5:1$  (体积增加率  $\leq 50\%$ ), 采用体积称量法计算。

处置场屏障完整性包括防渗层渗透系数、覆盖层完整性, 要求渗透系数  $\leq 1 \times 10^{-11} \text{cm/s}$ , 覆盖层无破损、无渗漏, 采用渗透试验、无人机巡检 + 雷达探测验证。放射性气溶胶浓度指处理处置过程中产生的放射性气溶胶活度浓度, 工作区域  $\leq 1 \text{Bq/m}^3$ , 排放口  $\leq 0.1 \text{Bq/m}^3$ , 通过气溶胶采样 +  $\alpha/\beta$  计数器检测。长期稳定性指固化体 / 处置场在模拟环境条件下的性能衰减, 模拟降雨 / 冻融 50 次后, 浸出率变化  $\leq \pm 20\%$ , 采用加速老化试验 (GB/T 25498-2010) 检测。

## 2. 评估流程与关键要求

采样与检测方面, 固化体采样采用“随机抽样”, 每批次采样  $\geq 3$  个, 每个样品检测浸出率、强度等指标; 处置场每 5 年开展 1 次屏障完整性检测, 包括防渗层、覆盖层、缓冲材料。评估阶段分为, 处理后固化体需在养护 28d 后进行首次评估; 处置场在关闭后第 1、3、5、10 年开展跟踪评估, 之后每 10 年评估 1 次, 持续  $\geq 30$  年。达标判定规则为固化体浸出率、强度、减容比全部达标; 处置场屏障完整、气溶胶浓度符合要求; 长期稳定性试验无明显衰减, 可判定为处理处置有效。

## 三、核心评估指标的检测方法与质量控制

### (一) 核心指标检测方法规范

为确保评估结果准确可靠, 核心指标需采用标准化检测方法。核素浓度检测中,  $\gamma$  核素 ( $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$ ) 推荐采用  $\gamma$  谱仪法, 依据 GB/T 11713-2015, 检测下限  $\leq 1 \text{Bq/kg}$  (土壤)、 $\leq 0.1 \text{Bq/L}$  (水体);  $\alpha$  核素 (U、Pu、Am) 采用  $\alpha$  谱仪法 / ICP-MS 法, 依据 GB/T 13696-2015、HJ 751-2015, 检测下限  $\leq 0.01 \text{Bq/kg}$  (土壤)、 $\leq 0.001 \text{Bq/L}$  (水体);  $\beta$  核素 ( $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ ) 采用液体闪烁计数法 / 放射化学分析法, 依据 GB/T 12375-2019、HJ 841-2017, 检测下限  $\leq 0.1 \text{Bq/L}$  (水体)、 $\leq 1 \text{Bq/kg}$  (土壤)。

物理化学指标检测中, 土壤有机质采用重铬酸钾氧化 - 滴定法, 依据 NY/T 1121.6-2006, 相对误差  $\leq \pm 5\%$ ; 水体 pH/DO 采用多参数水质分析仪法, 依据 GB/T 6920-1986、GB/T 11913-1989, pH 精度  $\pm 0.01$ , DO 精度  $\pm 0.01 \text{mg/L}$ ; 固化体抗压强度采用压力试验机法, 依据 GB/T 50081-2019, 力值精度  $\pm 1\%$ ; 渗透系数采用变水头渗透试验法, 依据 GB/T 50123-2019, 检测下限  $\leq 1 \times 10^{-13} \text{cm/s}$ 。

### (二) 检测过程质量控制要求

样品采集与保存质量控制方面, 采样工具需经放射性去污处理 (污染水平  $\leq$  豁免水平), 避免交叉污染; 土壤样品采集后用密封聚乙烯袋包装, 水体样品用棕色玻璃瓶 (含挥发性核素) 或聚乙烯瓶 (其他核素) 密封,  $4^\circ\text{C}$  冷藏保存, 保存时间  $\leq 7\text{d}$  (放

射性核素)；每批样品需设置空白样品(采样工具空白、实验室空白)、平行样品(平行样比例 $\geq 10\%$ )，确保采样过程可靠性。

实验室分析质量控制方面，实验室需通过放射性检测资质认定(CMA)，检测人员持证上岗；采用标准物质(如 GBW04401 铀标准土壤、GBW08604 钚标准水)进行校准，校准曲线相关系数 $\geq 0.999$ ；每批样品分析时，空白样品检测结果需低于方法检测下限，平行样品相对偏差 $\leq 10\%$ (核素浓度)、 $\leq 5\%$ (物理化学指标)，否则需重新检测。

数据审核与溯源方面，检测数据需经过“三级审核”(检测人员自查→技术负责人复核→质量负责人终审)，确保数据准确无误；建立数据溯源体系，记录采样时间、地点、检测设备、标准物质编号、操作人员等信息，确保数据可追溯；异常数据需进行原因分析，若为检测误差需重新采样检测，若为实际污染波动需在评估报告中说明。

## 四、治理效果综合评估方法与分级

### (一) 综合评估方法

采用“加权评分法”进行综合评估，步骤如下：第一步为指标权重确定，采用层次分析法(AHP)确定各指标权重，技术效果维度权重 0.4，环境安全维度权重 0.3，长期稳定维度权重 0.3；核心指标(如核素残留浓度、浸出率)权重为辅助指标的 2 倍。第二步为指标评分，根据指标检测结果与阈值的契合度，分为“优秀(90~100 分)、良好(75~89 分)、合格(60~74 分)、不合格( $< 60$  分)”四级评分。第三步为综合得分计算，综合得分 $=\sum(\text{指标得分} \times \text{指标权重})$ 。第四步为评估等级判定，综合得分 $\geq 85$  分为“优秀”，70~84 分为“良好”，60~69 分为“合格”， $< 60$  分为“不合格”。

### (二) 评估等级与处置要求

优秀等级的判定标准为综合得分 $\geq 85$  分，核心指标全部优秀，辅助指标无不合格，后续处置要求为治理工程验收通过，可投入使用/恢复原用途；长期跟踪评估周期可延长至每 3~5 年 1 次。良好等级的判定标准为综合得分 70~84 分，核心指标全部合格，辅助指标不合格项 $\leq 1$  项，后续处置要求为验收通过，针对不合格辅助指标制定优化措施；长期跟踪评估每年 1 次，持续 3 年。

合格等级的判定标准为综合得分 60~69 分，核心指标全部合格，辅助指标不合格项 $\leq 2$  项，后续处置要求为 conditional 验收通过，限期 3~6 个月内完成整改，整改后重新检测评估；长期跟踪评估每年 1 次，持续 5 年。不合格等级的判定标准为综合得分 $< 60$  分，核心指标有 1 项及以上不合格，或辅助指标不合格项 $\geq 3$  项，后续处置要求为验收不通过，需重新制定治理方案，返工治理；治理后重新开展全面评估。

## 五、长期跟踪评估标准与要求

### （一）长期跟踪评估核心指标

长期跟踪评估需聚焦“稳定性”与“风险防控”，核心指标包括核素形态变化、屏障完整性、环境介质污染反弹、生态功能恢复持续性。核素形态变化需监测土壤 / 固化体中核素从稳定态向活性态转化的比例，要求转化比例 $\leq 10\%$ /年；屏障完整性针对处置场、原位修复区域，监测防渗层、覆盖层、缓冲材料的破损情况与渗透系数变化，确保渗透系数始终 $\leq 1 \times 10^{-11} \text{cm/s}$ 。

环境介质污染反弹指治理后土壤 / 水体核素浓度随时间的回升幅度，要求年均回升幅度 $\leq 5\%$ ，且不超过初始达标浓度的 120%；生态功能恢复持续性监测土壤微生物多样性、植物生长状况、水生生物群落结构，要求持续保持治理后验收时的 80% 以上水平。

### （二）长期跟踪评估流程与周期

评估流程分为基线建立、定期监测、风险评估、措施优化四个阶段。基线建立需在治理后验收完成时，系统记录核素浓度、形态、屏障状态、生态功能等数据，作为长期跟踪的对比基准；定期监测需按预设周期开展样品采集与检测，土壤污染区域每年 1 次，水体污染区域每半年 1 次（前 3 年），之后每年 1 次，处置场按关闭后第 1、3、5、10 年及每 10 年 1 次的频率监测。

风险评估需结合监测数据，采用数值模拟法预测核素迁移趋势与环境风险，每 5 年开展 1 次全面风险评估；措施优化针对监测中发现的问题（如屏障破损、浓度反弹），及时采取修补屏障、补充治理等优化措施，确保风险可控。评估周期需根据核素半衰期与治理目标确定，短半衰期核素（半衰期 $< 30$  年）跟踪周期 $\geq 10$  年，长半衰期核素（半衰期 $\geq 30$  年）跟踪周期 $\geq 30$  年，处置场跟踪周期 $\geq 100$  年。

### （三）长期跟踪评估质量保障与数据应用

长期跟踪评估的质量保障需建立“全流程管控”机制，确保评估数据的真实性、连续性与有效性。首先，监测点位需保持固定，不得随意变更，若因客观条件需调整，需在评估报告中详细说明变更原因及对数据可比性的影响；其次，监测设备需定期校准维护，每年至少开展 1 次全面校准，确保检测精度符合标准要求；同时，建立数据共享与备案制度，将监测数据、评估报告提交至环保监管部门备案，接受行业监督。

数据应用方面，长期跟踪评估数据需用于三大场景：一是风险预警，通过趋势分析识别核素浓度反弹、屏障破损等潜在风险，提前发出预警信号；二是技术优化，针对评估中发现的治理技术短板（如固化体长期稳定性不足），反馈至技术研发端，推动治理技术迭代升级；三是标准完善，结合长期跟踪数据，动态调整评估指标阈值与检测方法，提升评估标准的科学性与适配性。



## 第十章 放射性环境管理与发展趋势

### 第一节 放射性环境管理体系

#### 一、放射性环境管理体系核心框架与设计原则

##### （一）核心管理框架

放射性环境管理体系遵循“五维一体”核心框架，涵盖“法规标准体系、管理责任体系、全流程管控体系、技术支撑体系、监管执法体系”五大维度，各维度相互衔接、协同发力，形成完整的管理闭环：

法规标准体系是管理的“基础依据”，明确管理边界、管控要求与技术规范；

管理责任体系是管理的“组织保障”，界定政府、企业、第三方机构的责任分工；

全流程管控体系是管理的“核心路径”，实现从源头到末端的全生命周期风险防控；

技术支撑体系是管理的“工具手段”，为管理决策、过程监控、风险评估提供技术保障；

监管执法体系是管理的“强制约束”，确保各项管理要求落地执行。

##### （二）体系设计原则

放射性环境管理体系设计遵循“四大核心原则”，确保体系的科学性、实用性与可操作性：

风险导向原则：以放射性污染风险等级为核心，对高风险场景（如高放废物处置、核设施运行）实施严格管控，对低风险场景（如医疗放射性应用）实施差异化管理，避免“过度管控”或“管控不足”；

全生命周期原则：将管理范围延伸至核设施规划、建设、运行、退役，放射性物质生产、运输、使用、处置的全流程，实现“从摇篮到坟墓”的全过程风险防控；

权责对等原则：明确政府监管责任、企业主体责任、第三方机构技术支撑责任，构建“谁污染、谁治理，谁受益、谁负责”的责任传导机制；

国际接轨原则：借鉴国际原子能机构（IAEA）安全标准、欧盟辐射防护委员会（ICRP）建议等国际先进经验，结合我国核事业发展实际，构建与国际接轨、符合国情的管理体系。



## 二、放射性环境管理核心要素与管控要求

### （一）源头防控管理

源头防控是放射性环境管理的首要环节，核心目标是从源头减少放射性污染产生，降低后续管控压力，主要包括规划管控、准入管理、总量控制三大核心要素：

#### 1. 规划管控

核心要求：将放射性污染防治纳入国民经济和社会发展规划、生态环境保护规划，划定放射性污染防治重点区域、核设施限制开发区域，明确区域环境容量与风险管控目标；

关键措施：核设施选址需开展严格的环境影响评价与安全评价，避开饮用水源地、生态保护区、人口密集区等敏感区域；区域开发规划需开展放射性背景调查，确保开发活动不突破区域辐射安全底线；

管控标准：核设施与敏感区域的防护距离需满足 GB 18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》要求，确保公众年辐射剂量 $\leq 0.1\text{mSv}$ 。

#### 2. 准入管理

核心要求：建立放射性相关活动的市场准入制度，对核设施运营、核技术应用、放射性废物处理处置等活动实施许可管理，确保从业主体具备相应的技术能力与风险防控水平；

关键措施：核设施运营单位需取得《核设施安全许可证》《辐射安全许可证》，配备专业技术人员与辐射防护设施；放射性废物处理处置单位需取得《放射性废物经营许可证》，具备符合标准的处理处置设施与安全保障能力；

准入条件：从业单位需建立完善的辐射安全管理制度、应急预案与风险防控体系，技术人员需通过专业培训并持证上岗，设施设备需符合国家相关技术标准。

#### 3. 总量控制

核心要求：对放射性污染物排放实施总量控制，根据区域环境容量与核设施污染排放水平，制定年度排放总量指标，确保污染物排放不超过环境承载能力；

关键措施：核设施运营单位需按照总量控制指标制定排放计划，采用清洁生产技术减少放射性污染物产生；环保部门定期开展总量核查，对超总量排放单位实施限期整改、处罚等措施；

控制标准：放射性污染物排放需符合 GB 14589-93《核电厂环境辐射防护规定》、GB 18484-2020《危险废物焚烧污染控制标准》等要求，排放口放射性活度浓度需低于标准限值。

## （二）过程监管管理

过程监管是放射性环境管理的核心环节，核心目标是实时监控放射性污染产生与扩散过程，及时发现并处置风险隐患，主要包括运行监控、运输监管、使用监管三大核心要素：

### 1. 运行监控

核心要求：核设施、放射性废物处理处置设施等运营单位需建立常态化运行监控体系，实时监测设施运行状态、放射性污染物排放情况，确保设施稳定运行与污染物达标排放；

关键措施：配备在线监测设备（如  $\gamma$  辐射剂量率仪、放射性气溶胶监测仪、废水核素浓度监测仪），对设施边界辐射剂量、排放口污染物浓度进行 24 小时连续监测；建立运行记录制度，详细记录设施运行参数、监测数据、维护情况，确保数据可追溯；

监控标准：设施运行过程中，边界辐射剂量率需  $\leq 2.5\mu\text{Sv/h}$ （公众可接触区域），排放口放射性活度浓度需符合相应排放标准，监测数据需实时上传至环保监管部门。

### 2. 运输监管

核心要求：对放射性物质运输实施全过程监管，防范运输过程中放射性物质泄漏、丢失等风险，确保运输安全；

关键措施：放射性物质运输需使用符合标准的专用运输工具（如放射性物质运输罐、专用运输车辆），配备防盗、防泄漏、辐射屏蔽等设施；运输单位需取得《放射性物品运输许可证》，运输人员需经过专业培训并持证上岗；运输前需制定运输方案与应急预案，明确运输路线、时间与应急处置措施，避开敏感区域与高峰时段；

监管标准：放射性物质运输需符合 GB 11806-2019《放射性物品安全运输规程》要求，运输工具表面辐射剂量率需  $\leq 2\text{mSv/h}$ ，运输过程中需全程携带辐射监测设备与应急物资。

### 3. 使用监管

核心要求：对放射性同位素与射线装置的使用实施严格监管，防范使用过程中放射性污染与辐射伤害风险；

关键措施：使用单位需建立放射性同位素与射线装置台账，详细记录采购、使用、储存、报废等情况；使用场所需划定控制区与监督区，设置辐射警示标志与防护设施；定期开展辐射安全检查与设备维护，确保设备正常运行；

监管标准：使用场所辐射剂量率需符合 GB 18871-2002 要求，操作人员职业照射剂量需  $\leq 20\text{mSv/a}$ ，单次照射剂量需  $\leq 5\text{mSv}$ ；放射性同位素储存需符合安全标准，防止丢失、被盗或泄漏。

### （三）末端处置管理

末端处置管理是放射性环境管理的收尾环节，核心目标是确保放射性废物安全处置，实现长期风险隔离，主要包括废物分类管理、处置许可管理、长期监护管理三大核心要素：

#### 1. 废物分类管理

核心要求：按照放射性废物的活度浓度、核素特性、形态等进行分类管理，根据分类结果采用适配的处理处置技术，提高处置效率与安全性；

关键措施：遵循 GB 9133-2019《放射性废物分类》标准，将废物分为高放废物、中放废物、低放废物、极低放废物与放射性污染废物；建立废物分类收集、储存制度，不同类别废物分开存放，避免交叉污染；废物包装需符合标准，明确标注废物类别、核素类型、活度浓度等信息；

管理要求：分类后的废物需及时转运至相应的处理处置单位，转运过程需符合放射性物质运输管理要求，确保废物可追溯。

#### 2. 处置许可管理

核心要求：对放射性废物处置实施许可管理，确保处置单位具备相应的处置能力与安全保障水平，处置过程符合环保与安全要求；

关键措施：处置单位需取得《放射性废物经营许可证》，具备符合标准的处置设施（如近地表处置场、地质处置库）、技术人员与管理制度；处置前需开展处置方案论证，明确处置技术、屏障设计、长期监护措施等；处置过程需严格按照方案执行，确保废物安全隔离；

许可条件：处置设施需通过环境影响评价与安全评价，处置技术需符合国家相关标准，长期监护方案需可行，确保处置后长期风险可控。

#### 3. 长期监护管理

核心要求：对放射性废物处置场实施长期监护，确保处置场屏障完整性与核素长期隔离效果，防范后期风险反弹；

关键措施：处置场关闭后，建立长期监护机制，定期开展屏障完整性检测、地下水核素浓度监测、土壤辐射剂量监测等；建立监护档案，详细记录监测数据、维护情况与风险评估结果；制定应急处置预案，针对屏障破损、核素泄漏等突发事件制定处置措施；

监护周期：近地表处置场监护周期 $\geq 30$ 年，地质处置库监护周期 $\geq 100$ 年，直至核素活度降至背景值水平，风险可忽略。

### （四）核事故应急管理

核事故应急管理是放射性环境管理的特殊环节，核心目标是快速响应核事故，控

制污染扩散，降低事故损失，主要包括应急体系建设、应急准备、应急处置三大核心要素：

### 1. 应急体系建设

核心要求：建立“国家 - 省 - 市 - 企业”四级核事故应急体系，明确各级应急组织机构、职责分工与协调机制，确保应急响应高效有序；

关键措施：国家层面制定核事故应急总体预案，地方层面制定专项应急预案，企业层面制定现场处置方案；建立应急指挥中心，统筹协调应急资源，实现信息共享与协同作战；组建专业应急救援队伍，配备应急监测设备、防护装备与处置物资；

体系要求：应急体系需覆盖核设施事故、放射性物质泄漏、核技术应用事故等各类场景，确保应急响应全覆盖、无死角。

### 2. 应急准备

核心要求：做好核事故应急准备工作，确保应急响应时能够快速启动、有效处置；

关键措施：定期开展应急演练，每年至少开展 1 次综合应急演练，提升应急救援队伍的实战能力；储备充足的应急物资，包括辐射监测仪器、个人防护装备、吸附材料、泄漏收集装置等；建立应急通信保障体系，确保应急指令及时传达、信息畅通；开展公众应急宣传教育，普及核事故应急知识与防护技能；

准备标准：应急物资需满足事故处置需求，应急演练需覆盖预警、响应、处置、恢复等全流程，公众应急知晓率需 $\geq 80\%$ 。

### 3. 应急处置

核心要求：核事故发生后，快速启动应急预案，采取有效措施控制污染扩散，降低辐射风险；

关键措施：立即开展现场监测，明确污染范围、核素类型与浓度水平；采取隔离、封堵、吸附等措施控制污染源头，防止污染扩散；组织受影响人员疏散、转移或隐蔽，发放个人防护用品，减少辐射暴露；对污染区域进行去污处理，降低环境核素浓度；

处置标准：应急处置需确保公众辐射剂量控制在安全水平，污染范围不进一步扩大，事故损失降至最低；处置后需开展环境评估，明确后续治理与恢复措施。

## 三、放射性环境管理实施机制与保障措施

### （一）实施机制

#### 1. 目标责任机制

核心内容：建立放射性环境管理目标责任制，将放射性污染防治目标分解至各级政府、相关部门与企业，明确责任主体与考核指标；

实施方式：各级政府将放射性污染防治纳入年度绩效考核，对完成目标的单位给

予表彰，对未完成目标的单位进行约谈、问责；企业将辐射安全责任落实到具体岗位与个人，建立责任追究制度；

考核指标：包括放射性污染物排放达标率、核设施安全运行率、应急响应及时率、废物安全处置率等核心指标。

## 2. 全过程监管机制

核心内容：构建“事前审批 - 事中监控 - 事后评估”的全过程监管机制，实现对放射性相关活动的全流程管控；

实施方式：事前审批环节严格审查核设施选址、放射性废物处置方案等，确保符合环保与安全要求；事中监控环节通过在线监测、现场检查等方式，实时掌握设施运行与污染排放情况；事后评估环节对治理效果、处置效果进行评估，总结经验并优化管理措施；

监管频次：对高风险企业（如核电厂、高放废物处理单位）每季度开展 1 次现场检查，对中低风险企业每年开展 1 次现场检查，在线监测数据实时审核。

## 3. 社会监督机制

核心内容：建立放射性环境管理社会监督机制，鼓励公众、媒体参与监督，提升管理透明度与公信力；

实施方式：公开放射性环境监测数据、核设施审批信息、事故应急处置情况等，接受公众查询；建立举报奖励制度，对举报放射性污染违法行为的单位或个人给予奖励；邀请公众代表参与核设施环境影响评价、处置方案论证等工作，听取公众意见；

监督渠道：设立举报电话、邮箱、网络平台等监督渠道，确保公众监督诉求得到及时回应。

# （二）保障措施

## 1. 法规制度保障

核心内容：完善放射性环境管理法规制度体系，为管理工作提供坚实的法律依据；

关键措施：以《中华人民共和国放射性污染防治法》为核心，配套制定《核设施安全监督管理条例》《放射性废物安全管理条例》《放射性物品运输安全管理条例》等行政法规；修订完善相关国家标准，包括辐射防护标准、污染物排放标准、废物分类标准等；建立法规制度动态更新机制，根据核事业发展与技术进步及时修订完善；

制度要求：法规制度需明确管理边界、责任分工、管控要求与处罚措施，确保管理工作有法可依、有章可循。

## 2. 技术支撑保障

核心内容：加强放射性环境管理技术研发与推广，为管理决策、过程监控、风险评估提供技术支撑；



关键措施：建立国家级放射性环境监测网络，整合各级监测资源，实现全国放射性环境状况实时监控；研发高精度辐射监测技术、核素快速分析技术、风险评估数值模拟技术等，提升管理技术水平；推广智能化管理技术，如物联网、大数据、人工智能等，实现管理过程自动化、精准化；建立技术共享平台，促进先进技术推广应用；

技术要求：监测技术需满足检测下限低、精度高、响应快的要求，风险评估技术需具备科学性与可靠性，智能化管理技术需具备实用性与安全性。

### 3. 资金投入保障

核心内容：建立稳定的放射性环境管理资金投入机制，保障管理工作顺利开展；

关键措施：各级政府将放射性污染防治资金纳入财政预算，重点支持监测网络建设、应急能力提升、废物处置场建设与长期监护等工作；落实企业污染治理主体责任，要求企业足额投入资金用于污染防治、设施维护、应急准备等；鼓励社会资本参与放射性污染治理与废物处置，形成多元化资金投入格局；

资金使用：资金需专款专用，加强资金使用监管，确保资金使用效率与安全性。

### 4. 人才队伍保障

核心内容：加强放射性环境管理人才队伍建设，培养一支专业素养高、业务能力强的管理与技术人才队伍；

关键措施：建立专业人才培养体系，高校设置放射性环境管理、辐射防护等相关专业，培养复合型人才；开展在职人员培训，定期组织管理干部、技术人员参加专业培训，提升业务能力；建立人才激励机制，吸引与留住优秀人才，鼓励人才创新创造；

队伍要求：人才队伍需具备辐射防护、环境科学、核技术等专业知识，熟悉相关法规标准与管理流程，具备应急处置与风险评估能力。

## 四、不同场景放射性环境管理重点

### （一）核设施运营环境管理

核心管理重点：核设施（如核电厂、核反应堆、核燃料循环设施）运营过程中的辐射安全管控、放射性污染物排放控制、核事故应急准备；

关键管理措施：严格执行核设施安全许可制度，开展常态化运行监控，确保设施边界辐射剂量与排放口污染物浓度达标；制定完善的核事故应急预案，定期开展应急演练；加强核设施退役规划管理，提前制定退役方案与污染治理计划；

管理标准：设施运行期间公众年辐射剂量 $\leq 0.1\text{mSv}$ ，放射性污染物排放符合 GB 14589-93 等标准，退役后场地核素浓度需满足相应用地标准。

### （二）核技术应用环境管理

关键管理措施：建立放射性同位素与射线装置全生命周期台账，实现采购、使用、

储存、报废的全程可追溯；使用单位需定期开展辐射安全自查，每年至少 1 次委托第三方机构开展辐射安全检测；加强对医疗、工业、科研等领域放射性应用的分类监管，医疗领域重点防控放射性药物泄漏与患者辐射防护，工业探伤领域重点管控现场辐射剂量与作业人员防护；

管理标准：放射性同位素储存场所需设置实体防护设施与辐射警示标志，使用过程中公众辐射剂量 $\leq 0.1\text{mSv/a}$ ，报废的放射性同位素与射线装置需交由有资质单位处理，禁止擅自处置。

### （三）放射性废物处理处置环境管理

核心管理重点：放射性废物分类收集、运输、处理、处置的全流程风险管控，确保废物不泄漏、不扩散，处置后长期安全；

关键管理措施：严格执行废物分类标准，禁止混合收集、运输不同类别放射性废物；处理处置单位需建立废物接收、处理、处置台账，详细记录废物来源、类别、处理工艺、处置位置等信息；环保部门定期对处理处置单位开展现场检查，核查处理处置工艺是否符合标准、监测数据是否真实可靠；

管理标准：废物运输需符合 GB 11806-2019 要求，处理后固化体浸出率、强度等指标需满足 GB 14569.1-2011，处置场屏障渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-11}\text{cm/s}$ ，长期监护期间核素泄漏量需控制在安全水平。

### （四）核事故应急后环境恢复管理

核心管理重点：核事故应急处置后的污染区域治理、生态修复与长期风险管控，确保区域环境质量恢复至安全水平；

关键管理措施：制定污染区域治理方案，采用去污、固化、隔离等技术降低环境核素浓度；开展生态修复工作，种植耐辐射植物，恢复土壤生态功能；建立长期监测机制，持续跟踪污染区域核素浓度与生态环境变化；开展公众健康风险评估，及时发布监测数据与风险评估结果；

管理标准：治理后污染区域土壤核素浓度需满足相应用地标准，公众年辐射剂量 $\leq 0.1\text{mSv}$ ，生态系统功能恢复至事故前 80% 以上。

## 第二节 法律法规与标准规范

### 一、法律法规与标准规范体系层级架构

#### （一）法律层级：体系核心与根本遵循

法律层级是放射性环境管理的最高依据，具有强制性与普遍约束力，明确管理基本准则、责任主体与违法惩戒，核心包括：

《中华人民共和国放射性污染防治法》：我国放射性污染防治的“根本大法”，界定了放射性污染防治的适用范围、管理体制、各方责任，覆盖核设施、核技术应用、放射性废物、铀钍矿冶等领域的污染防治要求，确立了“预防为主、防治结合、严格管理、安全第一”的基本原则；

《中华人民共和国核安全法》：聚焦核设施与核材料安全，明确核安全责任体系、许可制度、应急管理等核心要求，与《放射性污染防治法》形成互补，共同构建核与辐射安全的法律基础；

《中华人民共和国环境保护法》：作为生态环境保护的基础性法律，其“损害担责”“公众参与”等原则适用于放射性环境管理，为放射性污染防治提供上位法支撑。

### （二）行政法规层级：具体实施与责任细化

行政法规是对法律的细化与补充，明确具体管理流程、许可条件与处罚标准，核心包括：

《核设施安全监督管理条例》：规范核设施选址、建造、运行、退役全流程安全监管，明确核设施安全许可、运行监控、应急处置等具体要求；

《放射性废物安全管理条例》：界定放射性废物分类、收集、运输、处理、处置的管理要求，确立废物处理处置许可制度与长期监护责任；

《放射性物品运输安全管理条例》：规范放射性物品运输许可、运输工具、运输过程安全监管，明确运输单位、承运人的责任与义务；

《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》：针对核技术应用领域，细化放射性同位素与射线装置的生产、销售、使用、储存等环节的安全管控要求。

### （三）部门规章层级：操作细则与监管规范

部门规章由生态环境部等主管部门制定，聚焦具体监管环节的操作流程与技术要求，核心包括：

《核设施安全许可管理办法》：明确核设施安全许可证的申请、审批、变更、注销等流程，细化许可条件与提交材料要求；

《辐射安全许可证管理办法》：规范辐射安全许可证的核发与监管，明确核技术应用单位的资质要求与日常管理义务；

《放射性废物经营许可管理办法》：界定放射性废物处理处置单位的许可条件、审批流程与监督管理要求；

《核事故应急管理办法》：细化核事故应急响应流程、应急物资储备、应急演练等具体要求，衔接国家与地方应急体系。

### （四）标准规范层级：技术支撑与量化依据

标准规范是法律法规的技术延伸，分为国家标准（GB）、行业标准（HJ）等，

提供量化指标、检测方法与技术要求，核心包括辐射防护标准、污染物排放标准、废物管理标准、监测分析方法标准四大类，是管理执行与执法监督的直接依据。

## 二、核心法律法规与标准规范内容解析

### （一）辐射防护类核心规范

辐射防护类规范是放射性环境管理的基础，明确辐射剂量限值、防护原则与实施要求，核心包括：

《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002)：辐射防护领域的“基石标准”，规定了公众年辐射剂量 $\leq 0.1\text{mSv}$ 、职业照射剂量 $\leq 20\text{mSv/a}$ 、单次照射剂量 $\leq 5\text{mSv}$ 的核心限值，确立了“实践正当化、防护最优化、剂量约束”三大原则，适用于所有放射性相关活动；

《放射性测井辐射安全与防护》(HJ 1325-2023)：针对石油、矿产勘探中的放射性测井活动，明确作业现场辐射剂量控制、人员防护、设备安全等具体要求，确保测井过程辐射安全；

辐射防护类规范的核心特点：以“剂量控制”为核心，兼顾职业人员与公众健康，既设定刚性限值，又允许在防护最优化原则下动态调整，适配不同场景的风险管控需求。

### （二）污染物排放类核心规范

污染物排放类规范明确放射性污染物排放的浓度限值、排放方式与监测要求，核心包括：

《核动力厂环境辐射防护规定》(GB 6249-2025)：2025年5月实施的新版标准，替代GB 6249-2011，新增“供汽供热”用途核动力厂适用范围，界定单堆堆芯热功率 $\leq 300\text{MW}$ 的小型模块化核动力厂定义，对除氙和碳-14外的流出物排放量提出更严格要求，新增液态流出物核素活度浓度管控指标，强化在线监测与监测大纲定期优化要求；

《核电厂环境辐射防护规定》(GB 14589-93)：规范核电厂正常运行与事故状态下的辐射防护要求，明确放射性流出物排放总量与浓度限值，确保核电厂周边环境辐射水平可控；

《危险废物焚烧污染控制标准》(GB 18484-2020)：适用于放射性危险废物焚烧处置，规定焚烧烟气放射性活度浓度 $\leq 1\text{Bq/m}^3$ ，明确焚烧温度、停留时间等工艺要求；

污染物排放类规范的核心特点：聚焦“达标排放”与“总量控制”双重目标，新版标准更注重多用途核设施适配性与监测数据实时性，体现“从严管控”与“精准监管”相结合的思路。

### （三）废物管理类核心规范

废物管理类规范覆盖放射性废物分类、处理、处置全流程技术要求，核心包括：

《放射性废物分类》（GB 9133-2019）：将放射性废物分为高放废物、中放废物、低放废物、极低放废物与放射性污染废物五大类，明确分类依据、判定方法与包装标识要求，为差异化处理处置提供基础；

《铀矿冶放射性废物辐射环境管理技术规定》（GB 14585-2024）：2024年10月实施，替代GB 14585-93，强化铀矿冶废物的辐射环境管理，明确废物收集、储存、处置的辐射安全要求，具备强制执行效力；

《放射性固体废物岩洞处置安全规定》（GB 13600-2024）：2025年1月实施，替代GB 13600-92，规范放射性固体废物岩洞处置的选址、设计、建造、运行与关闭要求，提升处置场长期安全性；

《低水平放射性废物包特性鉴定 — 水泥固化体》（GB 41930-2022）：明确低放废物水泥固化体的性能要求，包括浸出率 $\leq 1 \times 10^{-7} \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 、抗压强度 $\geq 15 \text{MPa}$ 等核心指标；

《废放射源近地表处置安全要求》（HJ 1336-2023）：2024年3月实施，规范废放射源近地表处置的选址、设计、运行与长期监护要求，确保废放射源安全隔离；

废物管理类规范的核心特点：突出“分类管控”与“长期稳定”，新版标准普遍强化了处置场选址要求、屏障设计标准与长期监护责任，适配高风险废物的安全处置需求。

### （四）监测分析方法类核心规范

监测分析方法类规范为放射性污染物检测提供统一技术路径，确保数据准确可比，核心包括：

《生物中氚和碳-14的分析方法 管式燃烧法》（HJ 1324-2023）：2024年1月实施，明确生物样品中氚和碳-14的管式燃烧检测方法，检测下限与精度满足环境监测需求；

《水中铅-210的分析方法 冠醚树脂分离- $\beta$ 计数器法》（HJ 1323-2023）：2024年1月实施，规范水中铅-210的分离与检测流程，为水体放射性污染监测提供技术依据；

《建设项目竣工环境保护设施验收技术规范 核技术利用》（HJ 1326-2023）：2024年2月实施，明确核技术利用项目环保验收的监测指标、采样方法与达标判定规则；

监测分析方法类规范的核心特点：强调“标准化”与“可操作性”，方法选择兼顾检测精度与实操效率，新版标准新增多种特征核素的专项检测方法，适配复合污染监测需求。



### （五）运输安全类核心规范

运输安全类规范聚焦放射性物品运输全流程风险管控，核心包括：

《放射性物品安全运输规程》（GB 11806-2019）：放射性物品运输的基础性标准，明确运输容器设计、运输工具要求、运输路线规划、辐射剂量控制等核心要求，规定运输工具表面辐射剂量率 $\leq 2\text{mSv/h}$ ；

《放射性物品运输容器提升装置和栓系装置安全要求》（HJ 1385-2024）：2025年1月实施，细化运输容器提升与栓系装置的安全设计、强度要求与检验方法，防范运输过程中容器脱落、泄漏风险；

《乏燃料运输容器设计要求》（HJ 1355-2024）：2024年5月实施，规范乏燃料运输容器的结构设计、屏蔽性能、密封要求与安全检验，确保乏燃料运输过程安全；

《六氟化铀运输容器》（GB/T 42343-2023）：2023年6月实施，明确六氟化铀运输容器的材料、结构、性能与检验要求，适配核燃料循环过程中的运输需求；

运输安全类核心规范的特点：以“容器安全”与“过程管控”为核心，新版标准强化了运输辅助设施（如提升、栓系装置）的安全要求，覆盖特殊放射性物品（如乏燃料、六氟化铀）的专项运输需求。

## 三、法律法规与标准规范最新修订动态与趋势

### （一）2023–2025 年核心修订亮点

近年来，我国放射性环境管理法规标准进入密集修订期，2023-2025年新实施标准达10余项，核心修订亮点包括：

适配新型核设施需求：如GB 6249-2025新增小型模块化核动力厂、供汽供热类核动力厂的辐射防护要求，填补了新型核能应用的标准空白；

强化管控刚性：如GB 14585-2024、GB 13600-2024等替代老旧标准，提高了废物处置、铀矿冶污染管控的指标要求，明确强制执行效力；

完善检测方法体系：HJ 1323-2023、HJ 1324-2023等新增特征核素专项检测方法，解决了部分核素监测无统一标准的问题；

突出全生命周期管理：新版标准普遍强化了“选址 - 建设 - 运行 - 退役 - 长期监护”的全流程管控，如HJ 1326-2023规范核技术利用项目环保验收，HJ 1336-2023明确废弃放射源处置的长期监护要求；

衔接国际标准：修订过程中充分借鉴IAEA安全标准、欧盟辐射防护标准，如GB 6249-2025的选址假想事故剂量准则、流出物监测要求与国际接轨。

### （二）修订驱动因素分析

政策导向：党中央、国务院对核与辐射安全的高度重视，要求通过法规标准升级

强化事中事后监管，保障公众健康与环境安全；

技术发展：核能技术迭代（如小型模块化堆、多用途核动力厂）与污染治理技术进步，对法规标准的适配性提出新要求，需填补新型场景管控空白；

实践需求：老旧标准（部分为 90 年代制定）已无法满足当前风险防控需求，如原 GB 13600-92 对岩洞处置的安全要求偏低，需通过修订提升管控水平；

国际协同：为适应全球核事业发展与国际合作需求，需推动国内标准与国际先进标准协调，提升我国核技术与核产品的国际认可度。

### （三）未来修订趋势预判

场景精细化：针对核燃料循环、先进核反应堆、放射性复合污染等细分场景，制定专项法规标准，避免“一刀切”管控；

指标严格化：持续收紧放射性污染物排放浓度、废物浸出率等核心指标，强化对长寿命核素、超铀核素的管控要求；

技术智能化：将在线监测、大数据溯源、无人机巡检等智能化技术纳入标准，明确智能化监管的技术要求与数据应用规范；

责任明晰化：进一步细化政府监管责任、企业主体责任、第三方机构技术责任，完善责任追究与损害赔偿条款；

公众参与化：在标准制定、修订过程中扩大公众参与渠道，明确公众知情权、参与权的保障机制，提升标准的社会认可度。

## 四、法律法规与标准规范实施保障机制

### （一）宣贯培训机制

分层级培训：面向核安全监管部門、地方生态环境部門开展执法培训，面向核电集团、核技术应用单位开展合规培训，确保相关人员准确理解标准要求；

多渠道宣贯：通过生态环境部官网、行业研讨会、线上课程等方式解读标准修订背景与核心内容，回应行业关切；

案例化教学：结合放射性污染违法案例与合规实践案例，强化培训针对性，提升相关单位的合规意识与执行能力。

### （二）执法监督机制

精准执法：以法规标准为依据，对核设施运营、废物处理处置等高风险单位开展常态化现场检查，重点核查排放达标、废物处置合规等情况；

技术赋能：利用在线监测数据、无人机巡检、全生命周期追溯系统等技术手段，提升执法效率与精准度，及时发现违法线索；

从严处罚：对违反法规标准的行为，依据《放射性污染防治法》《核安全法》等

法律法规实施罚款、停产停业、吊销许可证等处罚，情节严重的追究刑事责任。

### （三）技术支撑机制

标准物质保障：建立放射性标准物质共享体系，为检测机构提供校准依据，确保监测数据准确可比；

检测能力认证：对放射性检测机构实施资质认定（CMA），规范检测流程，提升检测技术水平；

技术帮扶指导：针对新版标准实施中的技术难题，组织专家为企业提供技术帮扶，指导企业升级治理设施与监测设备，确保合规达标。

### （四）反馈优化机制

实施评估：标准实施后 1-2 年内开展实施效果评估，收集监管部门、企业、行业协会的反馈意见，分析标准的适用性与可操作性；

动态修订：建立法规标准动态更新机制，根据实施评估结果、技术发展与政策调整，及时修订完善相关法规标准，形成“制定 - 实施 - 评估 - 修订”的闭环；

争议解决：设立标准执行争议咨询渠道，由生态环境部牵头组织专家解读，统一执行尺度，避免因理解分歧影响标准落地。

## 五、不同场景法规标准适用重点

### （一）核设施运营场景

核心适用法规：《核安全法》《放射性污染防治法》《核设施安全监督管理条例》；

核心适用标准：GB 6249-2025（核动力厂辐射防护）、GB 14589-93（核电厂排放）、GB 18871-2002（辐射防护基本要求）；

适用重点：严格执行核设施安全许可与运行监控要求，确保流出物排放浓度与总量双达标，落实核事故应急准备与演练要求。

### （二）核技术应用场景

核心适用法规：《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》；

核心适用标准：HJ 1325-2023（放射性测井防护）、HJ 1326-2023（环保验收）、GB 11806-2019（运输安全）；

适用重点：规范放射性同位素采购、使用、储存、报废全流程台账管理，确保使用场所辐射剂量达标，落实操作人员个人防护要求。

### （三）放射性废物处理处置场景

核心适用法规：《放射性废物安全管理条例》；

核心适用标准：GB 14585-2024（铀矿冶废物管理）、GB 13600-2024（岩洞处置安全）、HJ 1336-2023（废放射源处置）；

适用重点：严格执行废物分类与处置许可制度，确保固化体性能达标，落实处置场长期监护责任与监测要求。

#### （四）放射性物品运输场景

核心适用法规：《放射性物品运输安全管理条例》；

核心适用标准：GB 11806-2019（运输规程）、HJ 1385-2024（容器提升装置）、HJ 1355-2024（乏燃料运输容器）；

适用重点：规范运输容器检验与运输路线审批，确保运输过程辐射剂量可控，落实应急物资储备与应急处置预案。

### 第三节 监测网络建设与运行

#### 一、监测网络核心架构与布设原则

##### （一）三级监测网络架构

我国已形成“国家-省-地市”三级联动的放射性环境监测网络架构，各级网络定位清晰、功能互补，形成全域覆盖的监测格局：

国家级监测网（国控网）：2007年正式建立，是监测网络的核心骨干，覆盖全国各地级及以上城市、重要江河流域、重点湖泊、饮用水水源地、国家重点监管核与辐射设施周边、边境口岸及海岛等关键区域，主要承担全国辐射环境质量背景监测、跨区域污染趋势跟踪、重大核设施监督性监测与全国性数据汇总任务，由31个省级辐射环境监测机构及青岛生态环境监测中心共32家单位协同承担；

省级监测网：作为国控网的延伸与补充，覆盖辖区内核技术应用单位、放射性废物处理处置场、铀矿冶区域等重点污染源，承担区域内辐射环境质量监测、污染源监督性监测、应急监测及国控网数据核验任务，省级监测机构均通过检验检测机构资质认定与监测能力评估；

地市级监测网：聚焦辖区内重点污染源周边、敏感区域的精细化监测，承担日常监测数据采集、应急监测现场响应、污染隐患排查等基层监测任务，实现监测数据的就近获取与快速反馈。

##### （二）监测点位布设原则

监测点位布设遵循“科学精准、全面覆盖、重点突出、动态优化”四大原则，确保监测数据的代表性与有效性：

全面覆盖原则：兼顾大气、水体、土壤、生物、电磁等多环境介质，覆盖城市、农村、生态保护区、工业区等不同功能区域，确保无监测盲区；

重点突出原则：在核电厂、核燃料循环设施、放射性废物处置场等重点污染源周边加密布设监测点，核电厂周边均已建立大气辐射环境实时监测系统，实现全天候监控；

梯度布设原则：从污染源中心向周边区域按浓度梯度布设监测点，形成“核心区-缓冲区-背景区”的梯度监测格局，精准捕捉污染扩散趋势；

动态优化原则：结合核设施建设、核技术应用发展、污染治理成效等因素，每 3-5 年对监测点位进行评估与调整，新增新型核设施周边监测点，撤销污染已消除区域的冗余点位。

### （三）监测网络功能定位

监测网络核心功能涵盖“质量监测、污染源监控、应急响应、数据支撑”四大维度，形成全场景监测能力：

环境质量监测：常态化跟踪大气吸收剂量率、水体放射性核素浓度、土壤核素残留等指标，掌握全国及区域辐射环境质量本底水平与变化趋势；

污染源监控：对核设施流出物排放口、放射性废物运输路线、核技术应用单位排污口等实施实时监控，监督排污单位达标排放；

应急响应监测：针对核事故、放射性物质泄漏等突发事件，快速启动移动监测设备，划定污染范围、判定污染程度、跟踪污染变化；

数据支撑服务：为全国辐射环境质量报告编制、监管执法决策、公众信息公开提供精准数据支撑，生态环境部官网实时发布全国辐射环境自动监测站空气吸收剂量率数据。

## 二、监测网络建设核心技术标准

### （一）监测介质与指标体系

监测网络覆盖多环境介质，建立了标准化的监测指标体系，核心包括：

大气监测：重点监测空气吸收剂量率、放射性气溶胶（总  $\alpha$ 、总  $\beta$ ）、特征核素（ $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、U、Pu 等），核设施周边增设氡、碳-14 等气态流出物监测指标，采用自动监测站实现 24 小时连续监测；

水体监测：涵盖地表水、地下水、饮用水水源地、海水等，监测指标包括总  $\alpha$ 、总  $\beta$  活度浓度及铀、钍、镭、锶-90 等特征核素，重点水源地加密监测频次；

土壤与生物监测：土壤监测指标包括各类放射性核素活度浓度，生物监测涵盖农作物、动植物体内核素累积量，重点关注农田土壤与食用生物的核素含量；

电磁辐射监测：针对输变电设施、移动通信基站等电磁辐射源，监测电场强度、磁场强度等指标，确保符合电磁辐射防护标准。



## （二）监测设备技术要求

监测设备需满足“高灵敏度、高稳定性、抗干扰性、自动化”技术要求，核心设备技术标准如下：

自动监测站设备：大气辐射环境自动监测站需配备高分辨率 $\gamma$ 谱仪、气溶胶采样器、数据自动传输模块，检测下限 $\leq 0.1\text{Bq/m}^3$ （气溶胶），时间分辨率 $\leq 1$ 小时，具备数据自动校准与故障报警功能；

实验室分析设备：包括低本底 $\alpha/\beta$ 计数器、ICP-MS、高纯度锗 $\gamma$ 谱仪等，检测下限需满足 HJ 1323-2023、HJ 1324-2023 等监测方法标准要求，如水中铅-210 检测下限 $\leq 0.001\text{Bq/L}$ ；

应急监测设备：便携式 $\gamma$ 剂量率仪、便携式核素分析仪、移动监测车等，响应时间 $\leq 1$ 秒，测量范围 $0.1\mu\text{Sv/h}$ - $10\text{Sv/h}$ ，具备现场快速定性定量分析能力；

数据传输设备：采用 4G/5G、卫星通信等双模传输技术，确保偏远地区数据稳定传输，数据传输延迟 $\leq 15$ 分钟，传输成功率 $\geq 99\%$ 。

## （三）监测点位建设规范

监测点位建设需符合“标准化、规范化、安全化”要求，核心建设规范包括：

站点选址：避开高大建筑物、电磁场干扰源、污染源直接排放口等影响监测结果的区域，大气自动监测站海拔高度需符合区域地形特征，距地面高度 1.5-2 米；

基础设施：监测站需配备防风、防雨、防雷、恒温设施，实验室监测点位需设置样品制备区、分析区、质控区，实现功能分区；

安全防护：核设施周边监测点需设置辐射警示标志与实体防护设施，配备个人防护装备与应急处置物资，确保监测人员安全；

标准化配置：国控网监测站统一配备设备型号、数据采集软件、校准标准，确保全国监测数据的可比性。

# 三、监测网络运行管理机制

## （一）质量管理体系

质量管理是监测网络运行的核心，建立“全流程、多层次”质控机制，确保数据“真、准、全”：

事前质控：监测机构需通过 CMA 资质认定，操作人员需持证上岗，监测设备定期进行计量校准，每年至少 1 次，校准依据国家计量标准；

事中质控：样品采集采用“空白样、平行样、加标样”三重质控，平行样比例 $\geq 10\%$ ，加标回收率需在 80%-120% 之间；自动监测设备每日进行零点校准与跨度校准，定期开展比对试验；

事后质控：数据采用“三级审核”制度，操作人员自查、技术负责人复核、质量负责人终审，异常数据需进行溯源分析，明确原因后方可上报；

统一质控标准：遵循《2024 年全国辐射环境监测质量保证方案》要求，从机构资质、人员要求、样品采集、数据处理等全环节规范质控行为。

## （二）运行维护机制

建立“常态化维护 + 专业化保障”的运行维护机制，确保监测网络连续稳定运行：

日常维护：每日远程监控设备运行状态，每周现场检查设备供电、通信、采样系统，每月清洁设备传感器与采样管路；

定期维护：每季度进行设备性能测试与校准，每半年更换易损部件（如采样滤膜、光源），每年开展全面检修与性能评估；

分级保障：国家级监测网由生态环境部辐射环境监测技术中心统筹维护，省级监测网由省级机构负责，地市级监测网实行“属地化维护 + 省级技术支援”模式；

应急保障：建立设备故障应急预案，储备关键备件，故障响应时间 $\leq 2$ 小时，偏远地区 $\leq 24$ 小时，确保监测中断时间最短。

## （三）数据管理流程

构建“采集 - 传输 - 存储 - 审核 - 应用”的全链条数据管理流程，实现数据规范化管理：

数据采集：自动监测设备实时采集数据并进行初步预处理，实验室数据通过标准化分析流程获取，原始数据直接存储，不可篡改；

数据传输：采用加密传输协议，实现监测数据实时上传至各级监测平台，传输过程中进行数据校验，确保数据完整性；

数据存储：依托“云上贵州”等云计算平台，建立分布式数据存储系统，实现海量监测数据的安全存储与快速检索，数据保存期限 $\geq 30$ 年；

数据审核：按“三级审核”流程完成数据质量控制，审核通过的数据纳入有效数据库，未通过的数据标注异常原因并重新采集；

数据共享：建立跨部门、跨区域数据共享机制，实现生态环境、核安全、卫生健康等部门的数据互通，企业监测数据与监管部门实时共享。

# 四、监测网络数据应用与效能

## （一）监管执法支撑应用

监测数据为放射性环境监管执法提供直接依据，实现“精准监管、科学执法”：

污染源监管：通过对比污染源排放口监测数据与排放标准，判定企业是否达标排放，对超标的企业发出预警并督促整改；

执法取证：将连续监测数据作为执法依据，对恶意排污、数据造假等违法行为进行查处，确保执法过程有数据可依；

区域管控：基于区域监测数据，划定辐射污染重点管控区域，实施差异化监管措施，提升监管效率；

效果评估：通过治理前后监测数据对比，评估放射性污染治理效果，为治理方案优化提供支撑。

## （二）风险预警与应急响应

监测网络是核与辐射风险预警的核心手段，构建“早发现、早预警、早处置”的应急响应体系：

常态预警：设置监测指标阈值，当数据超出正常范围时自动触发预警，通过短信、平台推送等方式通知监管人员，及时排查风险隐患；

应急响应：核事故发生后，监测网络快速切换至应急模式，移动监测设备与固定监测站协同工作，1小时内获取污染核心区域数据，4小时内划定污染范围；

趋势预测：基于监测数据与数值模拟技术，预测污染扩散路径与浓度变化，为人员疏散、污染处置提供决策支持；

应急评估：应急处置后，通过持续监测评估治理效果，直至环境质量恢复至安全水平。

## （三）公众信息公开与科普宣传

监测数据公开是保障公众知情权的重要途径，提升公众对辐射环境安全的信任度：

实时公开：通过生态环境部官网、辐射环境监测技术中心网站，实时发布全国辐射环境自动监测站空气吸收剂量率数据，公众可随时查询；

定期发布：每年编制并公开全国辐射环境质量报告，详细说明全国及重点区域辐射环境质量状况、污染源排放情况、监测网络运行情况；

科普宣传：以监测数据为基础，通过图表、短视频等形式向公众普及辐射环境知识，解读监测指标含义，消除公众对辐射的恐慌心理；

互动反馈：设立公众咨询渠道，解答公众对监测数据、辐射安全的疑问，收集公众意见建议，优化监测网络建设。

## （四）决策支持与科学研究

监测数据为放射性环境管理决策与科学研究提供数据支撑，推动管理水平提升：

政策制定：基于长期监测数据，分析辐射环境质量变化趋势，为放射性污染防治政策、法规标准修订提供科学依据；

规划编制：为核设施选址、放射性废物处置场规划等提供区域环境容量数据支撑，确保规划的科学性与安全性；

科学研究：为辐射环境迁移转化规律、污染治理技术研发、辐射生态影响评估等科研工作提供基础数据，推动放射性污染防治技术进步。

## 五、监测网络建设与运行的挑战与优化方向

### （一）当前面临的主要挑战

#### 1. 区域监测能力不平衡

我国东中西部地区监测能力存在显著差距，东部发达地区监测设备先进、技术人员充足，而中西部部分偏远地区监测设备老化、专业人才短缺，难以满足精细化监测需求。

#### 2. 新型污染监测能力不足

随着核技术发展，长寿命超铀核素、放射性复合污染等新型污染场景不断涌现，现有监测设备对部分特征核素的检测灵敏度不足，监测方法体系有待完善。

#### 3. 数据融合与智能化水平有待提升

各级监测网络数据格式不统一，数据融合共享存在壁垒；智能化分析技术应用不充分，数据挖掘、趋势预测等能力不足，未能充分发挥监测数据的价值。

#### 4. 运行维护资金与技术保障压力大

监测网络运行维护需持续投入资金、技术与人力，部分地区存在资金不足、维护技术落后等问题，影响监测网络的稳定性与数据质量。

### （二）优化升级方向

#### 1. 完善监测网络布局

补齐区域短板：加大对中西部地区监测能力建设的投入，更新老化设备，加强技术人员培训，缩小区域差距；

聚焦新型场景：在小型模块化核动力厂、先进核反应堆等新型核设施周边增设监测点，补充长寿命核素、复合污染监测设备，提升新型污染监测能力；

强化跨境监测：在边境地区、跨境河流增设监测点，加强跨境放射性污染监测，防范跨境污染风险。

#### 2. 提升智能化与信息化水平

统一数据标准：制定全国统一的监测数据格式与传输协议，打破数据壁垒，实现各级监测网络数据无缝融合共享；

智能化升级：推广物联网、大数据、人工智能技术，建设智能监测平台，实现监测数据自动分析、风险智能预警、趋势精准预测；

装备智能化：研发高精度、自动化、小型化的监测设备，配备无人机、无人船等移动监测平台，提升复杂环境下的监测能力。

### 3. 强化质量管理与技术支持

完善质控体系：细化全流程质控要求，推广盲样考核、实验室间比对等质控方式，提升监测数据质量；

技术创新支撑：加大监测技术研发投入，开发新型核素检测方法、高灵敏度监测设备，提升监测技术水平；

标准物质保障：扩大放射性标准物质种类与覆盖范围，建立标准物质共享平台，确保监测数据的准确性与可比性。

### 4. 健全保障机制

资金保障：建立稳定的监测网络运行维护资金投入机制，将资金纳入各级财政预算，确保资金足额到位；

人才培养：建立专业人才培养体系，高校设置辐射环境监测相关专业，开展在职人员培训，培养复合型监测人才；

社会参与：鼓励第三方监测机构参与监测网络建设与运行，引入市场竞争机制，提升监测服务质量与效率。

## 第四节 国际经验与发展趋势

### 一、国际组织引领：全球放射性环境管理的核心框架

#### （一）国际原子能机构（IAEA）的核心作用

IAEA 作为全球核与辐射安全的权威机构，通过制定安全标准、开展同行评审、推动技术合作，构建了全球放射性环境管理的基本框架：

安全标准体系建设：形成“安全基本法则 - 安全要求 - 安全指南”三级标准体系，覆盖辐射防护、核设施安全、放射性废物管理、应急响应等全领域。2024 年发布的《在研究和教育中使用辐射源的辐射安全》指南，首次将辐射安全管理延伸至中学教育阶段，明确了学术机构辐射源使用、废物处置、应急防护的全流程要求，为培养青少年安全文化奠定基础；

同行评审与能力建设：通过 INSARR（研究堆安全评审）、OSART（运行安全评审）等同行评审机制，为成员国提供独立的安全评估与改进建议，荷兰、菲律宾等国通过参与 INSARR 评审，显著提升了研究堆辐射安全管理水平；

全球监测网络协调：主导建立环境放射性测量分析实验室网络（ALMERA），目前已覆盖 68 个国家的 200 个成员实验室，通过开展全球能力验证、技术交流与数据共享，推动各国监测技术标准化与数据可比性，我国辐射环境监测技术中心已作为意向成员单位参与其协调会议，分享中国经验；



应急响应协同：建立全球核应急响应网络，整合成员国应急资源与技术力量，在核事故处置中提供监测支持、技术咨询与物资援助，形成“快速响应、跨境协同”的应急机制。

## （二）其他国际组织的补充支撑

除 IAEA 外，欧盟辐射防护委员会（ICRP）、联合国环境规划署（UNEP）等组织从不同维度补充完善全球放射性环境管理体系：

ICRP：聚焦辐射防护科学研究，提出“剂量约束、防护最优化”等核心原则，不断更新辐射剂量限值标准，其研究成果为各国辐射防护法规制定提供科学依据；

UNEP：侧重放射性污染的生态环境影响评估，推动将放射性污染防治纳入全球生态环境保护议程，协调开展跨境放射性污染治理合作；

欧盟：通过《辐射防护指令》《放射性废物管理指令》等区域性法规，构建了统一的欧盟放射性环境管理体系，要求成员国实现监测数据互通、监管标准一致，形成区域协同治理典范。

## 二、典型国家实践：放射性环境管理的标杆案例

### （一）美国：全生命周期管控与技术创新驱动

美国构建了“联邦 - 州”两级协同的放射性环境管理体系，核心经验集中在废物管理、监测技术与应急响应三大领域：

放射性废物全生命周期管理：建立“分类处置 + 长期监护”的闭环体系，针对高放废物，选址尤卡山地质处置库，采用多重屏障设计确保 100 万年以上的安全隔离；针对低放废物，采用商业化处置模式，由专业企业负责运输、处理与处置，政府承担监管责任；

智能监测网络建设：打造“全国辐射监测网络（NRMN）”，整合 1200 余个固定监测站、移动监测车与卫星监测设备，采用物联网技术实现数据实时传输与智能分析，可在 1 小时内完成全国辐射环境状况评估；

应急响应体系：建立“核应急支持团队（NEST）”，配备模块化应急监测设备与专业处置队伍，可快速部署至事故现场，结合数值模拟技术精准预测污染扩散趋势，为应急处置提供决策支持。

### （二）法国：核电密集区协同治理与公众沟通

法国作为核电依赖度最高的国家（核电占比超 70%），在高密度核设施环境管理与公众信任构建方面积累了丰富的丰富经验：

区域环境容量管控：在核电密集的诺曼底、普罗旺斯等地区，建立“核设施 - 环境 - 公众”三位一体的监测体系，加密布设大气、水体、土壤监测点，严格控制区域

放射性污染物排放总量，确保公众年辐射剂量低于 0.1mSv；

放射性废物循环利用：推行核燃料闭式循环政策，通过后处理技术回收铀、钚等核素，减少高放废物产生量，后处理产生的废物经固化处理后送入地质处置库，实现资源循环与安全处置的双重目标；

公众沟通与参与：建立“透明化信息公开”机制，通过专门网站实时发布核设施排放数据、环境监测结果；设立公众咨询委员会，吸纳居民、环保组织代表参与核设施规划、废物处置等决策过程，提升公众信任度。

### （三）日本：核事故后修复与精细化管理

福岛核事故后，日本在放射性污染治理、监测网络优化与应急体系完善方面形成了独特经验：

污染区域分级治理：将福岛周边划分为“隔离区、限制居住区、避难指示解除区”，针对不同区域污染程度采用差异化治理措施，包括土壤去污、植被清除、地下水净化等，目前已有 90% 以上区域恢复正常居住；

精细化监测网络重构：在福岛周边构建“高密度 + 多介质”的监测网络，平均每 10 平方公里布设 1 个监测点，涵盖大气、水体、土壤、食品等 12 类监测介质，实现污染状况的精准追踪；

应急响应体系升级：建立“全国核应急指挥中心”，整合气象、环保、核电企业等多部门数据，开发核事故扩散预测系统，可根据实时监测数据动态调整应急响应策略，提升应急处置的精准性。

### （四）德国：退出核电后的污染修复与风险管控

德国在逐步退出核电的过程中，形成了核设施退役与污染场地修复的系统经验：

核设施退役标准化流程：制定“退役规划 - 去污拆除 - 场地修复 - 长期监护”的标准化流程，要求核设施运营单位提前制定退役方案并预留退役资金，确保退役过程安全可控；

污染场地修复技术创新：开发土壤电动修复、生物修复等低成本、低扰动技术，针对不同污染类型采用适配的修复方案，修复后的场地需通过第三方检测机构评估，确保符合居住或生态用地标准；

长期风险管控机制：建立退役核设施与污染场地的长期监护数据库，定期开展辐射环境监测与风险评估，监护周期不少于 30 年，确保后期风险可控。

## 三、全球放射性环境管理核心发展趋势

### （一）管理理念：从“末端治理”向“全生命周期风险前置”转变

传统放射性环境管理侧重污染后的治理与处置，当前全球正转向“源头防控 - 过

程管控 - 末端处置 - 长期监护”的全生命周期管理，核心特征包括：

源头减量：通过清洁生产技术、核燃料循环利用等方式，减少放射性废物产生量，从源头降低污染风险；

风险前置：在核设施选址、核技术应用规划阶段，开展充分的环境影响评价与安全评估，避开敏感区域，预留防护距离；

全流程追溯：利用区块链、物联网等技术，建立放射性物质从生产、运输、使用到处置的全生命周期追溯系统，确保每一个环节都可监控、可追溯。

## （二）技术方向：智能化、高精度化与一体化融合

技术创新是放射性环境管理升级的核心驱动力，全球正朝着智能化、高精度化、一体化方向快速发展：

监测技术智能化：推广无人机、无人船、卫星遥感等移动监测平台，结合传感器网络实现监测点位的全域覆盖；采用人工智能算法对监测数据进行实时分析与异常预警，提升风险识别效率；

检测设备高精度化：研发高灵敏度、低检测限的监测设备，如新型高纯度锗 $\gamma$ 谱仪、激光光谱分析仪等，可实现对长寿命超铀核素、低浓度放射性污染物的精准检测；

管理平台一体化：构建“监测 - 分析 - 预警 - 处置”一体化管理平台，整合监测数据、监管信息、应急资源等，实现管理决策的智能化与高效化，如美国 NRMN 平台、欧盟辐射环境信息系统（EURIS）。

## （三）治理模式：跨境协同与区域一体化深化

放射性污染的跨境扩散特性推动全球治理模式向协同化、一体化演进：

跨境监测合作：相邻国家共建跨境监测网络，共享监测数据，联合开展跨境放射性污染风险评估，如欧洲多国联合建立的“跨境辐射监测网络”；

区域标准统一：区域组织推动成员国采用统一的监管标准、监测方法与应急响应流程，如欧盟实现了辐射防护标准、废物处置要求的全区域统一；

国际资源共享：通过 IAEA 等国际组织，共享放射性标准物质、监测技术方案、应急处置经验等资源，尤其为发展中国家提供技术援助与能力建设支持。

## （四）公众参与：从“信息公开”向“深度参与”拓展

全球越来越重视公众在放射性环境管理中的作用，参与模式从单纯的信息公开向决策参与、监督参与深化：

透明化信息公开：通过官方网站、移动应用等渠道，实时公开监测数据、核设施运行状况、污染治理进展等信息，保障公众知情权；

决策过程参与：在核设施选址、废物处置场规划等重大决策中，通过听证会、公众咨询委员会等形式，充分听取公众意见，将公众诉求纳入决策考量；

公众监督赋能：鼓励公众参与放射性污染隐患举报，提供举报奖励，形成“政府监管 + 公众监督”的多元治理格局。

#### （五）法规标准：场景精细化与国际协同化

各国放射性环境法规标准正朝着场景细化、指标严格、国际接轨的方向发展：

场景精细化：针对新型核设施（如小型模块化堆、先进快堆）、新型污染场景（如放射性复合污染），制定专项管理标准，避免“一刀切”管控；

指标严格化：持续收紧放射性污染物排放浓度、废物浸出率等核心指标，强化对长寿命核素、超铀核素的管控要求；

国际协同化：各国法规标准制定过程中充分借鉴 IAEA 等国际组织的安全标准，推动国内标准与国际先进标准协调，提升核技术与核产品的国际认可度。

### 四、国际经验对中国的借鉴与适配路径

#### （一）核心借鉴方向

##### 1. 完善全生命周期管理体系

借鉴美国、法国经验，建立放射性废物“分类处置 + 循环利用 + 长期监护”的闭环管理体系，推动核燃料闭式循环技术研发与应用，减少高放废物产生量；要求核设施运营单位提前制定退役方案与资金储备计划，确保退役过程安全可控。

##### 2. 升级智能监测网络

参考美国 NRMN 与日本福岛监测网络建设经验，加大对无人机、卫星遥感、人工智能等技术的应用力度，统一各级监测网络数据标准，构建全国一体化智能监测平台，提升监测数据的实时性、精准性与共享性；加强与 ALMERA 等国际监测网络的合作，提升我国监测技术的国际化水平。

##### 3. 强化区域协同与跨境治理

借鉴欧盟区域协同经验，在长三角、珠三角等核设施密集区域，建立区域协同监测与监管机制，实现监测数据互通、监管执法联动；在边境地区、跨境河流增设监测点，加强与周边国家的跨境监测合作，防范跨境放射性污染风险。

##### 4. 优化公众沟通与参与机制

学习法国公众沟通经验，建立“透明化信息公开 + 多元化公众参与”机制，通过通俗易懂的方式向公众普及辐射安全知识，实时公开核设施运行与监测数据；设立公众咨询委员会，吸纳公众代表参与重大决策，提升公众信任度。

#### （二）中国适配优化路径

##### 1. 结合国情差异化推进

考虑到我国东中西部监测能力不平衡、核技术应用场景多样的实际情况，避免盲

日照搬国际经验，采用“先试点后推广”的模式，在核电密集区、核技术应用发达地区率先开展智能监测、公众参与等试点，总结经验后逐步推广至全国。

## 2. 强化技术自主创新

在借鉴国际先进技术的同时，加大自主研发投入，重点突破高灵敏度监测设备、核废物处理处置等“卡脖子”技术，构建具有自主知识产权的放射性环境管理技术体系，降低对国外技术的依赖。

## 3. 深化国际合作与交流

积极参与 IAEA 等国际组织的同行评审、能力验证等活动，学习先进管理经验；加强与美国、法国、日本等国家的双边合作，开展监测技术、应急响应、废物处置等领域的联合研发与交流，提升我国放射性环境管理的国际化水平。

## 4. 完善法规标准体系

参考 IAEA 最新安全指南与欧盟指令，结合我国新型核设施发展与污染治理需求，动态修订我国放射性环境管理法规标准，细化不同场景的管控要求，推动国内标准与国际标准接轨，同时保持标准的科学性与可操作性。

# 第五节 未来技术发展方向

## 一、监测感知技术：全域精准化与智能感知升级

监测感知技术将突破传统“固定点位 + 人工巡检”模式，向“全域覆盖、多维度感知、智能化识别”方向演进，实现对放射性环境的实时精准把控：

### （一）高灵敏度检测设备革新

核素精准识别技术：研发下一代高分辨率  $\gamma$  谱仪、激光诱导击穿光谱（LIBS）检测仪，突破长寿命超铀核素（如钚 - 239、镅 - 241）、低浓度放射性污染物的快速检测瓶颈，检测下限降至 0.001Bq/L 以下，检测时间从数小时缩短至分钟级，适配复合污染场景的多核素同步识别需求；

便携式应急监测装备：开发模块化、小型化应急监测设备，集成  $\gamma$  剂量率检测、核素定性定量分析、数据实时传输功能，重量控制在 5kg 以内，响应时间  $\leq 1$  秒，支持单人便携操作，满足复杂地形、无电力供应场景下的快速应急监测需求；

无源监测技术突破：探索基于中子俘获、核共振荧光的无源监测技术，无需放射源即可实现对密封放射性物质的非接触式检测，解决传统有源监测设备的辐射安全与维护难题，适用于核设施退役、放射性废物储存等场景。



## （二）全域立体监测网络构建

空天地一体化监测：整合高分辨率卫星遥感、无人机集群、无人船 / 水下机器人，构建“天空 - 地面 - 水体”全域监测网络。卫星遥感实现大范围辐射环境背景监测与污染扩散趋势追踪，无人机集群完成核设施周边、污染区域的精细化巡检，无人船针对河流、近海开展水体放射性核素浓度监测，实现无死角覆盖；

分布式传感器网络：部署低功耗、自组网式放射性传感器，采用物联网技术实现传感器间数据互通与自主组网，可在核设施厂区、废物处置场等区域形成密集监测网络，实时捕捉辐射剂量率、核素浓度的微小变化，为风险预警提供数据支撑；

跨境协同监测技术：研发跨境放射性污染监测数据共享平台，采用加密传输与数据标准化技术，实现与周边国家监测网络的数据实时互通，支持跨境污染风险联合评估与预警，适配放射性污染跨区域扩散的管控需求。

## （三）智能化数据处理与预警

AI 驱动异常识别：基于机器学习算法构建辐射环境数据模型，通过对历史监测数据的深度学习，自动识别正常波动与异常污染信号，异常预警准确率提升至 95% 以上，避免误报、漏报；

污染扩散数值模拟：融合气象、地形、水文等多源数据，开发高精度核素迁移扩散数值模拟系统，可根据实时监测数据动态调整模拟参数，精准预测污染扩散路径、浓度分布与影响范围，预测误差控制在 10% 以内；

数据可视化与溯源：采用三维 GIS、数字孪生技术构建辐射环境数字孪生体，直观呈现监测点位分布、核素浓度变化、污染扩散趋势；结合区块链技术建立监测数据溯源体系，确保数据不可篡改，为监管执法提供可靠依据。

## 二、污染治理技术：高效低碳化与资源化转型

污染治理技术将突破传统“末端处置”局限，向“源头减量、高效净化、资源回收、低碳环保”方向发展，大幅提升放射性污染治理效能与可持续性：

### （一）土壤放射性污染治理技术

新型高效净化技术：推广韩国太阳能人工植物净化技术，该技术模拟植物蒸腾作用，无需电力与额外水源，仅通过太阳能驱动即可抽取土壤中含放射性铯的水分，经特制吸附材料捕获铯离子后，净化水自然蒸发回归土壤，20 天内净化率可达 95% 以上，且吸附材料可重复使用，大幅降低治理成本与生态扰动；

低扰动修复技术：优化土壤电动修复、生物修复技术，开发靶向性微生物菌剂，可特异性吸附土壤中的铀、钍等核素，修复过程对土壤结构破坏小，成本较传统挖掘处置降低 40% 以上，适用于农田、生态保护区等敏感区域；

污染土壤资源化利用：研发污染土壤无害化处理与资源化技术，通过高温熔融、化学稳定化等工艺，将放射性核素固定在玻璃体或陶瓷体中，转化为建筑材料或路基材料，实现“减量化、无害化、资源化”协同。

## （二）水体放射性污染治理技术

高效吸附材料研发：开发新型纳米吸附材料（如石墨烯基复合材料、金属有机框架材料 MOFs），对水体中铯 - 137、锶 - 90 等核素的吸附容量提升至传统材料的 3-5 倍，吸附速率提高 2 倍以上，且易于再生，可重复使用 50 次以上；

膜分离与高级氧化联用：集成反渗透、纳滤膜分离技术与高级氧化技术（如光催化、电催化），不仅可高效截留水体中的放射性核素，还能降解共存的化学污染物，实现放射性与化学复合污染水体的同步净化，出水水质满足饮用水标准；

地下水原位修复：研发地下水原位注入技术，通过井群系统向污染区域注入吸附材料悬浮液或微生物菌剂，无需抽取地下水即可实现原位净化，大幅降低治理成本与环境扰动，适用于深层地下水污染治理。

## （三）放射性废物处理处置技术

源头减量与资源化：推广核燃料闭式循环技术，通过后处理回收铀、钚等核素，重新用于核燃料生产，减少高放废物产生量；开发放射性废物减容技术，采用高温高压压缩、熔融固化等工艺，将废物体积减容 50%-80%；

高放废物安全处置：优化深地质处置库多重屏障设计，研发高性能缓冲材料（如膨润土改性材料）、密封材料，提高屏障系统的抗腐蚀、抗渗透、抗辐射性能，确保高放废物与环境隔离 100 万年以上；

疑难废物处理技术：针对放射性有机废物、含重金属放射性废物等疑难废物，开发等离子体气化、超临界水氧化等技术，实现废物彻底无害化处理，处理效率较传统技术提升 3 倍以上，且无二次污染。

## （四）核设施退役与去污技术

模块化退役技术：开发核设施模块化退役技术，将退役过程分解为若干标准化模块，采用遥控机械臂、无人拆除设备进行去污、拆除作业，减少人员辐射暴露，退役周期缩短 30% 以上；

高效去污技术：研发激光去污、等离子体去污技术，可快速去除核设施表面的放射性污染，去污效率较传统化学去污提高 2-3 倍，且对设备基体损伤小，适用于核反应堆、管道等关键设备去污；

退役废物分类与回收：建立退役废物精细化分类与资源化回收体系，通过  $\gamma$  扫描、中子探测等技术精准识别废物中的放射性核素与有价金属，实现金属材料的回收再利用，资源回收率提升至 60% 以上。

### 三、智慧管理技术：一体化协同化与自主化发展

智慧管理技术将整合物联网、大数据、人工智能等前沿技术，构建“全流程覆盖、多部门协同、智能化决策”的放射性环境智慧管理体系，大幅提升管理效率与精准度：

#### （一）全生命周期智慧管理系统

一体化管理平台：开发基于 Java 等跨平台技术的核与辐射环境智慧管理系统，整合辐射源管理、废物管理、监测数据、应急响应、法规标准等核心功能模块，实现从放射性物质生产、运输、使用到处置的全生命周期信息化跟踪管理；

辐射源精准管控：采用 RFID、北斗定位技术为放射源配备智能标签，实时追踪放射源位置、状态，实现“定位 - 监控 - 报警 - 追溯”全流程管控，有效防范放射源丢失、被盗风险；

废物全流程信息化：建立放射性废物电子台账，详细记录废物产生源头、类别、核素浓度、处理工艺、处置位置等信息，实现废物从产生到处置的全程可追溯，确保处置合规。<sup>①</sup>

#### （二）多部门协同管理技术

数据共享与互通：建立统一的放射性环境管理数据共享平台，打破生态环境、公安、交通运输、卫生健康等部门的信息壁垒，实现监测数据、监管信息、应急资源等多源数据实时互通，提升协同管理效率；

跨区域协同监管：开发跨区域协同监管系统，支持不同省份、地市监管部门共享监测数据、联合开展执法检查、协同处置突发事件，解决放射性污染跨区域管控难题；

企业端智能管控：为核设施运营、核技术应用企业提供智能化管理终端，集成在线监测、设备维护、人员培训、合规自查等功能，助力企业提升自主管理水平，实现“政府监管 + 企业自律”协同。

#### （三）智能化决策支持技术

风险评估与预警：基于机器学习算法构建放射性环境风险评估模型，结合长期监测数据、设施运行状态、环境条件等多源信息，定期开展区域风险评估，提前识别潜在风险点，为管控措施优化提供决策支持；

应急决策智能化：开发核事故应急决策支持系统，整合应急监测数据、数值模拟结果、应急资源信息，自动生成应急处置方案（如人员疏散路线、污染控制措施、物资调配计划），缩短应急决策时间至 30 分钟以内；

政策制定辅助：通过对海量监测数据、执法数据、污染治理数据的深度挖掘，分析辐射环境质量变化趋势、污染治理效果、管理政策实施成效，为法规标准修订、管理政策制定提供科学依据。

<sup>①</sup> 杨昌述，梁树枝，范正年．城市放射性源调查及放射性环境管理对策[J]．环境科学动态，1994，(03): 5-8.

## 四、安全防护技术：精准化与人性化提升

安全防护技术将围绕“人员防护、设施防护、应急防护”三大核心，向“精准剂量监测、高效屏蔽、人性化设计”方向发展，最大限度降低辐射暴露风险：

### （一）个人辐射防护技术

**精准剂量监测设备：**开发微型化、智能化个人剂量计，可实时监测个人累积剂量、瞬时剂量，支持蓝牙、NFC 数据传输，与手机 APP 联动实现剂量超标报警，重量控制在 10g 以内，佩戴舒适；

**高效防护装备：**研发新型轻量化辐射防护材料（如超高分子量聚乙烯复合材料、纳米屏蔽材料），防护性能较传统铅板提升 20% 以上，重量降低 50%，且柔韧性好，可制作成防护服、防护手套、防护眼镜等，提升佩戴舒适性与作业灵活性；

**智能防护预警：**将个人剂量计与防护装备、作业环境监测设备联动，当作业环境辐射剂量超标或个人累积剂量接近限值时，自动发出预警，提醒人员采取防护措施或撤离，实现“监测 - 防护 - 预警”协同。

### （二）核设施安全防护技术

**智能物理防护：**部署智能视频监控、红外报警、振动传感等设备，构建核设施物理防护智能预警系统，可实时识别非法入侵、异常操作等风险，报警响应时间 $\leq 5$  秒；

**辐射屏蔽优化：**采用数值模拟与实验验证相结合的方法，优化核设施辐射屏蔽设计，开发模块化、可拆卸屏蔽装置，根据不同作业场景灵活调整屏蔽方案，在保障防护效果的同时降低建设成本；

**本质安全技术：**推动核设施本质安全技术研发，通过优化设计、采用容错技术，降低设施运行故障与事故发生概率，从源头提升核设施安全水平。

### （三）应急防护技术与装备

**模块化应急装备：**研发模块化核应急防护装备，包括便携式辐射监测仪、个人防护装备、污染去污设备、应急通信设备等，可快速组装、灵活部署，满足不同规模核事故应急处置需求；

**公众应急防护：**开发公众应急防护智能终端（如手机 APP），可实时推送核事故预警信息、辐射安全知识、防护措施建议、疏散路线指引，提升公众应急响应能力；

**应急去污技术：**优化应急去污剂配方，开发快速去污泡沫、凝胶，可在核事故现场快速去除人员、设备、建筑物表面的放射性污染，去污效率达 90% 以上，且对人体与环境无二次伤害。

## 五、技术发展保障与挑战应对

### （一）技术发展保障措施

**研发投入机制：**建立“政府引导+企业主导+社会参与”的多元化研发投入机制，加大对放射性环境管理关键核心技术的研发支持，重点扶持高灵敏度监测设备、高效污染治理材料、智慧管理系统等“卡脖子”技术研发；

**产学研协同创新：**构建产学研协同创新平台，整合高校、科研院所、企业的技术资源与人才优势，开展联合研发、技术攻关与成果转化，缩短技术从实验室到实际应用的周期；

**标准体系建设：**制定放射性环境管理新技术、新装备的技术标准与检测方法，规范技术应用与市场准入，确保技术应用的安全性与可靠性；

**人才培养：**加强放射性环境管理相关专业人才培养，高校设置辐射环境监测、核污染治理、智慧管理等交叉学科专业，开展在职人员技术培训，培养复合型技术人才与管理人才。

### （二）面临的主要挑战与应对

**核心技术自主化不足：**部分高灵敏度监测设备、高端吸附材料等依赖进口，需加大自主研发投入，突破核心技术瓶颈，构建具有自主知识产权的技术体系；

**技术成本较高：**新型技术与装备初期研发与应用成本较高，需通过规模化应用、技术优化降低成本，同时建立财政补贴、税收优惠等激励机制，推动新技术推广；

**多技术融合难度大：**监测感知、数据处理、污染治理等技术的深度融合需要跨学科协作，需打破学科壁垒，建立跨领域技术创新团队；

**技术标准滞后：**新技术发展速度快于标准制定，需建立标准动态更新机制，及时将成熟技术纳入标准体系，引导技术规范发展。





## 参考文献

- [1] 李会娟,李超,王钰琦. 矿物材料对放射性核素吸附的研究现状 [J]. 科技创新与应用, 2023, 13 (29): 87-90.
- [2] 李献华,李扬,李秋立,等. 同位素地质年代学新进展与发展趋势 [J]. 地质学报, 2022, 96 (01): 104-122.
- [3] 曾文淇. 铀尾矿中放射性核素的迁移研究 [J]. 江西化工, 2017, (05): 42-45.
- [4] 殷学文,张盼盼,李靖辉,等. 豫西骑马河铀矿地质特征及找矿远景分析[C]// 河南省地质学会. 河南地球科学研究进展 (2024). 河南省核技术应用中心, 2024: 15-21.
- [5] 李沛,王军强,崔艳蕊,等. 河南省铀矿分布规律及找矿方向 [J]. 中国钼业, 2016, 40 (02): 10-15.
- [6] 我国页岩气和铀矿取得重大进展 [J]. 当代化工, 2016, 45 (01): 145.
- [7] 殷建武,范文欢. 河南信阳柳林地区铀矿成矿条件分析 [J]. 地质与资源, 2013, 22 (02): 159-163.
- [8] 陈金勇,范洪海,王生云,等. 浅谈钍矿化与稀土元素矿化的关系[C]// 中国矿物岩石地球化学学会. 中国矿物岩石地球化学学会第17届学术年会论文摘要集. 核工业北京地质研究院;中核铀资源勘查与评价技术重点实验室, 2019: 699-700.
- [9] 仇宝聚,张书成. 钍矿成矿特征与地质勘查 [J]. 世界核地质科学, 2005, (04): 203-210.
- [10] F.Barthel ,F.J.Dahlkamp ,朱益平 . 钍矿及其利用 [J]. 国外铀金地质, 1992, (01): 30-38.
- [11] 葛佳亮,李梦姣,曹凤波,等. 放射性污染场地土壤-地下水核素迁移扩散耦合模拟研究[C]// 中国核学会. 中国核科学技术进展报告 (第七卷) ——中国核学会2021年学术年会论文集第10册 (核安全分卷、核安保分卷、核环保分卷). 中核第四研究设计工程有限公司;广东省环境辐射监测中心;广东省核工业地质局辐射环境监测中心, 2021: 296-301.
- [12] 徐园,孔海宇,王希涛,等. 水体环境中的放射性污染及测量 [J]. 核安全, 2020, 19 (01): 75-79.
- [13] 陈志国,闫二艳,刘星辰,等. 放射性物质 $^{137}\text{Cs}$ 对微波大气击穿特性的影响 [J]. 强激光与粒子束, 2022, 34 (11): 77-82.
- [14] 纪传伟,罗鸿斌,李静. 环境监测与治理[M]. 化学工业出版社: 202409: 199.

- [15] 粟永阳,周国庆,李志明,等. 环境中微米级气溶胶的液体收集——质谱快速检测技术的可行性研究[C]// 重庆市人民政府,中国工程物理研究院. 全国危险物质与安全应急技术研讨会论文集(上). 西北核技术研究所, 2011: 519-522.
- [16] 关玉春,吴宇峰,王艳丽. 典型环境介质中新污染物分析测试技术[M]. 天津大学出版社: 202407: 262.
- [17] 廖俊生. 核材料生产研制中的质谱技术[C]// 中国质谱学会(中国物理学会质谱分会),中国化学会质谱分析专业委员会,中国仪器仪表学会分析仪器分会质谱仪器专业委员会. 2018年中国质谱学术大会(CMSC 2018)论文集. 中国工程物理研究院材料研究所, 2018: 215.
- [18] 邱国华. 铀矿山探采冶设施退役治理工程放射性环境影响评价[J]. 铀矿地质, 2008, (03): 188-192.
- [19] 马秀兰. 加强稀土生产中放射性环境影响评价[J]. 稀土, 2002, (05): 75-77.
- [20] 陈宇波,曾秀兰. 水利工程放射性环境影响评价方法探讨[J]. 人民珠江, 1994, (05): 39-42.
- [21] 刘麓琪. 基于生物修复技术的土壤污染治理研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6 (14): 113-114+138.
- [22] 朱文慧,常勤慧. 矿山集中开采区环境污染现状与生态修复治理方法研究[J]. 环境科学与管理, 2025, 50 (03): 161-166.
- [23] 付修冶. 土壤污染与土壤治理修复技术研究进展及展望[J]. 清洗世界, 2024, 40 (09): 112-114.
- [24] 谢中岩,王茱,唐晓东. 浅谈辐射环境管理的问题及对策[J]. 中国环境管理, 1999, (06): 33-34.
- [25] 杨昌述,梁树枝,范正年. 城市放射性源调查及放射性环境管理对策[J]. 环境科学动态, 1994, (03): 5-8.