

**Research on Environmental Monitoring Technology
and Pollution Prevention and Control Strategies**

环境监测技术与污染防治策略研究

范秋香 著



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

CIP INFORMATION

Title: Research on Environmental Monitoring Technology and Pollution Prevention and Control Strategies

题目：环境监测技术与污染防治策略研究

Author: Qiuxiang Fan

作者：范秋香

ISBN: 979-8-90040-418-9

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

**Research on Environmental Monitoring Technology and Pollution
Prevention and Control Strategies**
环境监测技术与污染防治策略研究

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

Tel: +888-754-5177

Email: contact@cypedia.net

Format: 170mmx240mm 1/16 Sheets: 15.75

Word Counts: 200.000

Edition: First edition in July 2026

Printing: First printing in July 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.

前言

PREFACE

随着工业化、城市化进程加快推进，各地生态环境治理体系、治理能力持续提升，我国生态环境质量整体保持稳中向好，但大气、水体、土壤等环境领域仍面临着复杂严峻的形势，大气灰霾、水体黑臭、土壤重金属超标等环境问题时有发生，生态环境质量成为影响人类健康与社会可持续发展的核心议题。环境监测作为生态环境保护的“耳目”，是精准识别污染、科学评估环境质量、有效制定防治策略的基础支撑；污染防治则是守护生态安全的“屏障”，二者协同发力是破解环境治理难题的关键路径。在此背景下，编撰一部系统整合监测技术与防治策略的专著，对推动环保事业高质量发展具有重要意义。

当前，环境监测正经历从“点式监测”到“立体组网”、从“人工分析”到“智能感知”的转型，物联网、大数据、人工智能等技术的深度融合，为实现环境质量实时、动态、全覆盖监测提供可能。但同时，监测技术标准化不足、数据共享不畅、多介质协同监测能力薄弱等问题仍突出；污染防治领域则面临污染源复杂、治理技术适配性差、区域协同不足、政策执行不到位等挑战，亟需构建“监测—评估—治理—监管”闭环体系。

本书以“问题导向、技术引领、策略落地”为编撰理念，系统梳理环境监测技术发展脉络与污染防治实践经验，核心特色体现在三个维度：一是“全介质覆盖”，全面解析大气、水、土壤等五大介质的监测技术，构建多介质协同监测框架；二是“全链条贯通”，打通从监测数据获取到污染防治方案制定、政策落地的全流程，实现技术与管理的深度融合；三是“全技术融合”，既夯实传统监测技术基础，又聚焦现代技术创新应用，为不同场景提供适配技术方案。

本书编写遵循“理论与实践结合、传统与创新并重”原则。在监测技术部分，详细阐述各类监测方法的原理、流程、适用范围及质量控制要点，结

合实际案例说明技术应用效果；在污染防治策略部分，从污染源解析入手，提出针对性治理技术与管理措施，兼顾技术可行性与经济合理性，为环保决策提供科学依据。

本书旨在为环境监测人员提供系统技术指引，助力其提升监测数据准确性与可靠性；为污染治理工程师提供技术选型与方案设计参考，提高治理效率与效果；为环保管理者提供“技术－管理－政策”协同的决策框架，推动环境治理体系完善；为相关专业师生搭建完整知识体系，培养兼具理论素养与实操能力的复合型环保人才。

我们期望本书能推动环境监测技术标准化与规范化发展，促进污染防治策略科学化与精准化实施，助力我国生态环境质量持续改善，为建设美丽中国、推动全球生态环境治理贡献力量。同时，本书也为国内外环保领域学术交流提供平台，推动环境监测与污染防治领域的理论创新与技术进步。

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 环境监测技术概论	1
第一节 环境监测基本概念与分类	1
第二节 环境监测技术的发展历程	5
第三节 环境监测技术体系构成	9
第四节 环境监测的质量保证与控制	14
第二章 大气环境监测技术	21
第一节 大气污染物与监测方法概述	21
第二节 常规气态污染物与颗粒物监测技术	25
第三节 特征污染物监测技术	30
第四节 空气质量自动监测与遥感技术	35
第五节 监测质量保证与数据分析应用	40
第三章 水环境监测技术	47
第一节 水质监测指标体系	47
第二节 地表水监测技术方法	51
第三节 地下水监测技术体系	56
第四节 废水污染源监测技术	60
第五节 水环境自动监测系统	65
第四章 土壤环境监测技术	71
第一节 土壤污染特征与监测要求	71
第二节 土壤采样与预处理技术	75
第三节 土壤重金属监测方法	80

第四节 土壤有机污染物监测技术	84
第五节 土壤环境质量评价方法	88
第五章 噪声与辐射环境监测	93
第一节 环境噪声监测技术	93
第二节 工业噪声监测方法	97
第三节 电磁辐射监测技术	103
第四节 电离辐射监测技术	110
第五节 噪声与辐射环境影响评价	117
第六章 生物监测技术	123
第一节 生物监测基本原理	123
第二节 大气生物监测技术	129
第三节 水体生物监测方法	133
第四节 土壤生物监测体系	138
第五节 生物标志物在环境监测中的应用	143
第七章 现代环境监测新技术	149
第一节 遥感监测技术应用	149
第二节 物联网在环境监测中的应用	153
第三节 大数据与环境监测	157
第五节 环境监测仪器的新进展	163
第八章 大气污染防治策略	169
第一节 大气污染源解析技术	169
第二节 工业大气污染控制技术	174
第三节 移动源污染控制策略	178
第四节 区域大气污染联防联控	182
第五节 大气污染防治政策与法规	186

第九章 水污染防治策略	193
第一节 水污染源解析与评估	193
第二节 工业废水治理技术	197
第三节 城市污水处理与回用	201
第四节 流域水污染综合治理	206
第五节 水污染防治政策与法规	211
第十章 固体废物污染防治策略	217
第一节 固体废物分类与管理	217
第二节 危险废物处理技术	222
第三节 生活垃圾资源化利用	227
第四节 工业固废综合利用	231
第五节 固体废物污染防治政策与法规	235
参考文献	241

第一章 环境监测技术概论

第一节 环境监测基本概念与分类

环境监测是环境保护工作的基础支撑与核心手段，贯穿于污染防治、生态保护、环境管理的全流程。在全球生态环境问题日益突出、环保治理要求不断提高的背景下，环境监测的精准性、系统性、时效性直接决定环境决策的科学性与有效性。明确环境监测的基本概念、梳理分类逻辑、认知核心价值，是构建环境监测技术体系、推动监测工作规范化开展的前提。本节将从核心概念界定、分类逻辑梳理、核心价值阐释三个维度，系统构建环境监测基本认知框架，为后续技术内容的展开奠定理论基础。

一、核心概念：定义、目的与核心任务，及在环境保护中的基础地位

环境监测的核心概念涵盖定义、目的、核心任务三大核心要素，三者相互关联、有机统一，共同界定了环境监测的工作范畴与功能定位，其在环境保护中的基础地位的核心在于为全链条环保工作提供科学数据支撑与决策依据。

（一）环境监测的定义

环境监测是指通过科学的技术方法与手段，对影响环境质量的各类要素、污染物及相关环境指标进行系统采集、分析、评价，精准反映环境质量状况、污染物变化规律及生态环境演变趋势的系统性活动。其核心特质在于“科学性、系统性、连续性”，并非单一数据的采集与分析，而是通过建立标准化的监测流程，实现对环境状况的全方位感知与精准研判。从广义上看，环境监测涵盖自然环境要素、污染源、生态系统等多维度监测对象，贯穿数据采集、处理、分析、评价、应用的全流程，是连接环境现状与环保决策的关键纽带。

（二）环境监测的目的与核心任务

环境监测的核心目的是精准掌握环境质量状况、识别污染问题、研判生态演变趋势，为环境保护工作提供科学依据，最终实现生态环境质量改善与可持续发展。围绕这一核心目的，环境监测的核心任务可分为三大维度。一是基础调查与

现状掌握，通过系统性监测明确区域环境质量本底值，厘清污染物种类、浓度分布及来源，构建区域环境质量数据库，为环境管理提供基础支撑。二是污染监控与动态追踪，对污染源排放、污染物迁移转化过程进行实时监测，追踪污染物变化轨迹，及时发现污染异常情况，为污染防治提供精准靶向。三是趋势研判与预警预报，基于长期监测数据构建分析模型，预判环境质量变化趋势，针对潜在环境风险发布预警信息，为应急处置与风险防控提供提前量。

（三）在环境保护中的基础地位

环境监测是环境保护工作的“耳目”与“基石”，其基础地位体现在环保工作的全流程与各环节。在污染防治层面，监测数据为污染源管控、污染治理方案制定、治理效果评估提供精准依据，确保污染防治工作靶向发力、精准高效。在环境管理层面，监测数据是环境规划、环境标准制定、环境执法监管、环境考核评价的核心依据，支撑环境管理从经验决策向数据决策转型。在生态保护层面，通过对生态系统关键指标的长期监测，研判生态系统健康状况与演变趋势，为生态保护修复、生物多样性保护提供科学支撑。在公众参与层面，监测数据的公开披露可以满足公众对环境质量的知情权，引导公众参与环境保护，形成全社会共治的良好格局。

二、分类逻辑：按监测对象、监测目的、监测方式划分类型

环境监测的分类逻辑基于监测工作的不同维度与需求，形成多维度、全覆盖的分类体系。按监测对象、监测目的、监测方式三大核心维度划分类型，可清晰界定不同监测工作的范畴、目标与方法，为监测工作的规范化开展与技术适配提供依据。

（一）按监测对象划分

按监测对象划分是环境监测最核心的分类方式，聚焦环境系统中的不同要素与污染载体，可分为大气环境监测、水环境监测、土壤环境监测、生态环境监测及其他专项监测五大类。大气环境监测聚焦大气中颗粒物、气态污染物等指标，监测范围涵盖近地面大气、高空大气及特定区域大气环境，核心是掌握大气污染状况与扩散规律。水环境监测覆盖地表水、地下水、海水、污水等各类水体，监测指标包括水质理化指标、污染物浓度、水生生物状况等，精准反映水体污染程度与水生态健康状况。土壤环境监测针对土壤中的重金属、有机物、病原体等污

染物，结合土壤理化性质开展监测，研判土壤污染状况及对农作物、地下水的潜在影响。生态环境监测以生态系统为核心，监测植被覆盖、生物多样性、生态系统结构与功能等指标，评估生态系统健康状况与演变趋势。此外，还包括噪声监测、振动监测、放射性监测、固体废物监测等专项监测，覆盖特殊污染类型与环境要素。

（二）按监测目的划分

按监测目的划分可精准匹配不同环保工作需求，明确监测工作的核心目标与应用场景，主要分为常规监测、应急监测、专项监测、研究性监测四大类。常规监测又称例行监测，是指按固定频次、固定指标、固定范围开展的常态化监测，核心目的是长期掌握环境质量变化趋势，为环境管理与考核提供基础数据，是环境监测工作的核心组成部分。应急监测针对突发环境污染事件开展，具有时效性强、针对性强的特点，核心任务是快速掌握污染范围、污染物浓度、扩散趋势，为应急处置、风险评估、善后处理提供实时数据支撑。专项监测围绕特定环保任务或环境问题开展，如污染源达标排放监测、污染治理效果监测、环境影响评价监测等，聚焦具体目标提供精准监测数据。研究性监测为环境科学研究、新技术验证、环境标准制定提供支撑，通常针对特定环境问题开展系统性、深层次监测，探索污染物迁移转化规律与生态演变机制。

（三）按监测方式划分

按监测方式划分基于监测技术的实施路径与操作模式，核心分为手动监测与自动监测两大类，两类方式各有优劣、相互补充，共同构建全方位的监测体系。手动监测又称人工监测，是指通过人工操作完成样品采集、现场测定、样品送检、实验室分析等全流程工作，其优势在于灵活性强、适配复杂监测场景，可针对特殊区域、特殊指标开展精准监测，适用于应急监测、专项监测及自动监测点位校准等场景；不足在于监测频次有限、耗时耗力、人为误差相对较大，难以满足大规模、常态化实时监测需求。自动监测依托自动化监测设备、传感器、数据传输网络构建监测体系，实现样品采集、分析、数据传输、预警的全流程自动化，其优势在于监测频次高、实时性强、数据连续、人为误差小，可满足大规模、常态化监测需求，是常规监测的主要方式；不足在于设备投入与运维成本较高，对监测环境要求严格，部分复杂指标仍需结合手动监测补充验证。

三、核心价值：为污染防治、环境管理、政策制定提供科学数据支撑

环境监测的核心价值集中体现为数据支撑能力，通过精准、连续、系统的监测数据，为污染防治、环境管理、政策制定三大核心领域提供科学依据，推动环境保护工作从“粗放式”向“精准化”“科学化”转型，实现生态环境质量的持续改善。

（一）为污染防治提供精准靶向支撑

污染防治工作的精准开展离不开监测数据的支撑，环境监测通过精准识别污染源、追踪污染轨迹、评估治理效果，为污染防治提供全流程数据支撑，提升污染治理的针对性与有效性。在污染源管控层面，通过对工业污染源、农业面源、生活污染源的排放监测，精准识别超标排放行为与重点污染源头，为污染源管控、执法监管提供靶向依据，推动污染源达标排放。在污染治理过程中，通过实时监测污染物浓度变化，动态调整治理方案与工艺参数，确保治理工作高效推进。在治理效果评估层面，通过对比治理前后的监测数据，科学评估污染治理效果，判断治理措施的有效性与稳定性，为治理方案优化升级提供依据，避免治理工作盲目开展。

（二）为环境管理提供科学决策支撑

环境监测是环境管理工作的核心数据来源，支撑环境管理全流程的科学决策，提升环境管理的规范化、精细化水平。在环境规划层面，基于区域环境质量本底监测数据，结合经济社会发展需求，科学划定生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线，制定合理的环境规划与发展布局，实现经济发展与环境保护的协调推进。在环境执法层面，监测数据作为环境执法的核心证据，为超标排放、污染环境等违法行为的认定与处罚提供科学依据，推动环境执法从“经验执法”向“数据执法”转型，提升执法公信力与权威性。在环境考核层面，监测数据是区域环境质量考核、环保工作成效评估的核心指标，通过客观、精准地监测数据，量化环保工作成效，倒逼地方政府与相关企业落实环保责任。

（三）为政策制定提供坚实依据支撑

环境政策的科学性、可行性与针对性，直接依赖于全面、精准的环境监测数据，环境监测为环境政策制定、修订、完善提供全周期依据支撑。在政策制定阶段，通过系统性监测掌握区域环境质量现状、污染问题及演变趋势，结合经济社

会发展实际，科学制定环境标准、污染防治方案、生态保护政策等，确保政策符合实际需求、具备可操作性。在政策实施过程中，通过持续监测跟踪环境质量变化，评估政策实施效果，及时发现政策实施过程中存在的问题，为政策调整与优化提供依据。在政策迭代完善层面，基于长期监测数据与政策实施效果反馈，结合生态环境变化新趋势、新问题，推动环境政策的迭代升级，构建适配时代需求的环境政策体系，为生态环境保护提供长效制度支撑。

环境监测的基本概念、分类逻辑与核心价值，共同构建了环境监测工作的理论框架与实践基础。明确核心概念可精准界定监测工作的范畴与定位，清晰分类逻辑可规范监测工作的开展路径，认知核心价值可凸显监测工作在环境保护中的重要意义。随着环境监测技术的不断迭代与环保需求的持续升级，环境监测将朝着精准化、自动化、智能化、一体化方向发展，进一步强化数据支撑能力，为污染防治、环境管理、政策制定提供更加强有力的保障，助力实现生态环境可持续发展与美丽中国建设目标。

第二节 环境监测技术的发展历程

环境监测技术的发展历程，是伴随全球生态环境问题演变、科学技术进步与环保需求升级的迭代过程。从最初简单的污染物浓度测定，到自动化监测体系构建，再到智能化、立体化监测网络形成，环境监测技术逐步实现了从“单一化”到“多元化”、从“经验化”到“精准化”、从“分散式”到“一体化”的跨越。不同发展阶段的技术特征、核心手段与应用目标，既反映了特定时代的环保需求，也彰显了科技赋能环境保护的核心价值。

一、起步阶段：传统手工监测为主，聚焦污染物浓度简单测定，技术手段单一

环境监测技术的起步阶段对应全球环保意识萌芽与初步发展时期，核心特征以传统手工监测为核心，监测目标聚焦单一污染物浓度测定，技术手段简陋、流程粗放，整体处于“被动响应、初步感知”的初级阶段，为后续监测技术发展奠定了基础认知与实践经验。

（一）时代背景与核心需求

起步阶段主要集中在 20 世纪中期以前，此时全球工业快速发展引发初步环境污染问题，但环保意识尚未普及，环境管理工作处于起步探索阶段。核心需求集中在“识别污染存在、初步掌握污染程度”，即通过简单监测手段判断区域是否存在污染、污染物浓度是否超出基本限值，为早期污染治理与环境管控提供基础依据，无需复杂数据支撑与系统分析，监测工作的针对性与系统性较弱。

（二）核心技术特征与手段

此阶段监测技术以传统手工操作与化学分析为主，技术手段单一、设备简陋，缺乏标准化流程与规范化体系。监测过程依赖人工完成样品采集、现场记录、实验室分析全流程，无自动化采集与分析设备，样品采集频次低、覆盖范围窄，难以反映污染物时空分布特征与变化规律。分析方法以化学滴定、比色法等传统化学手段为主，仅能测定少数常规污染物浓度，如酸碱度、溶解氧、悬浮物、重金属等，无法实现微量污染物、复合污染物的精准测定。监测数据处理以人工记录、手工计算为主，易产生人为误差，数据准确性、可靠性与可比性较差，且无统一数据存储与共享机制，难以形成系统性监测成果。

（三）阶段局限与历史价值

起步阶段的环境监测技术存在明显局限：一是监测范围有限，多聚焦工业污染源周边及重点区域，无法实现全域覆盖；二是监测指标单一，仅能监测少数常规污染物，对新型污染物、潜在生态风险缺乏感知能力；三是数据时效性差，手工监测与分析周期长，难以快速响应污染问题；四是缺乏标准化体系，监测流程、分析方法、数据处理无统一规范，数据可比性与权威性不足。但该阶段的历史价值显著，不仅初步构建了环境监测的基本认知与工作框架，积累了污染物测定的基础实践经验，更推动了环保意识的觉醒，为后续监测技术的升级迭代与规范化发展提供了必要前提。

二、发展阶段：自动化监测技术兴起，监测范围扩大，数据精度与时效性提升

20 世纪中期至 21 世纪初，伴随全球环境污染问题日益突出、环保法规逐步完善与工业技术进步，环境监测技术进入快速发展阶段。核心特征为自动化监测技术兴起，监测范围持续扩大，数据精度、时效性与系统性显著提升，实现了从

“初步感知”到“精准监控”的转型，为环境管理与污染防治提供了更有力的数据支撑。

（一）时代背景与核心需求

此阶段工业规模化发展导致环境污染问题加剧，区域性、复合型污染凸显，传统手工监测已无法满足环境管理的精准化需求。核心需求从“识别污染存在”转向“精准掌握污染动态、有效管控污染排放”，要求监测技术具备更广的覆盖范围、更高的数据精度、更快的响应速度，能够实时追踪污染物排放与扩散规律，为污染源管控、污染治理方案制定、环境执法监管提供精准数据支撑，推动环境管理从“被动应对”向“主动防控”转型。

（二）核心技术特征与手段

自动化监测技术的兴起与应用是此阶段的核心突破，逐步构建起“自动化采集—智能化分析—实时化传输”的监测体系。在监测设备方面，自动化监测仪器、传感器技术快速发展，各类在线监测设备逐步替代手工操作，实现污染物浓度的实时采集与自动分析，涵盖大气、水、土壤等多环境要素，监测指标扩展至微量污染物、气态污染物、有机污染物等，监测精度大幅提升。在数据传输与处理方面，依托计算机技术与通信网络，构建自动化数据传输网络，实现监测数据的实时上传、自动存储与初步分析，替代人工数据处理模式，减少人为误差，提升数据时效性与可靠性。在监测范围方面，从单一污染源监测扩展至区域环境质量监测，从点源监测延伸至面源监测，逐步构建起重点区域、重点污染源全覆盖的监测网络，能够反映污染物时空分布特征与变化趋势。同时，监测流程逐步标准化，出台了统一的监测技术规范、分析方法与质量控制标准，保障监测数据的可比性、权威性与有效性。

（三）阶段进步与应用价值

相较于起步阶段，发展阶段的监测技术实现了多维度进步：一是监测效率显著提升，自动化设备替代手工操作，大幅缩短监测周期，实现污染物实时监测与数据快速反馈；二是监测精度与覆盖面拓展，能够精准测定微量、复合污染物，监测范围覆盖区域环境与各类污染源；三是数据质量持续优化，标准化流程与质量控制体系构建，提升了数据准确性与可比性；四是支撑能力显著增强，实时、精准的监测数据为环境执法、污染治理、环境规划提供了有力支撑。此阶段的技术发展推动环境管理工作走向规范化、精准化，有效提升了污染防治成效，为全

球环境质量改善与环保法规完善提供了核心数据支撑，也为后续智能化监测技术发展奠定了设备、网络与标准基础。

三、成熟阶段：融合遥感、物联网、大数据等新技术，迈向智能化、立体化监测

进入 21 世纪以来，随着新一代信息技术的迅猛发展，环境监测技术进入成熟阶段。核心特征为多学科、新技术深度融合，遥感、物联网、大数据、人工智能等技术与传统监测技术有机结合，构建起智能化、立体化、一体化监测网络，实现了从“精准监控”到“智慧管控”的跨越，为生态环境全方位保护与可持续发展提供了系统性支撑。

（一）时代背景与核心需求

此阶段全球生态环境问题呈现复合型、区域性、长期性特征，气候变化、生物多样性减少、新型污染物污染等问题日益凸显，环保工作从“污染防治”向“生态保护与高质量发展”转型。核心需求升级为“全方位感知、精准化研判、智能化管控”，要求监测技术能够实现全要素、全时空、全流程监测，精准研判生态环境演变趋势与潜在风险，为生态保护修复、气候变化应对、环境政策优化提供多维度、深层次数据支撑，推动环境管理从“精准防控”向“智慧治理”转型。

（二）核心技术特征与手段

成熟阶段的环境监测技术以“多技术融合、全维度覆盖、智能化管控”为核心，构建起立体化监测体系。在技术融合方面，遥感技术实现大范围、非接触式环境监测，可快速获取区域植被覆盖、水体污染、大气颗粒物分布等宏观数据；物联网技术构建“感知终端－传输网络－平台管控”的全链条体系，实现多环境要素、多污染源的实时感知与互联互通；大数据技术实现海量监测数据的深度挖掘、分析与建模，精准识别污染源、研判演变趋势；人工智能技术赋能智能预警、自动决策，实现监测数据向管理策略的高效转化，形成“感知－分析－研判－预警－处置”的闭环管控。在监测体系构建方面，逐步形成“空天地一体化”监测网络，整合卫星遥感、航空遥感、地面监测站、移动监测设备、在线监测终端等多类型监测资源，实现大气、水、土壤、生态、噪声等全要素覆盖，打破传统监测的时空限制，构建全维度、立体化监测格局。在数据应用方面，构建智能化监测平台，实现监测数据的集中管理、共享复用与深度应用，支撑环境管理的智

能化决策、精准化执法与高效化治理，同时推动监测数据与政务数据、社会数据融合，构建全方位生态环境治理体系。

（三）阶段优势与发展方向

成熟阶段的监测技术具备显著优势：一是监测维度更全面，实现全要素、全时空、全流程监测，能够精准捕捉复合型污染与生态环境变化；二是分析研判更精准，依托大数据与人工智能技术，实现污染溯源、趋势预判与风险预警的智能化；三是管控效率更高效，构建闭环管控体系，实现从数据采集到决策处置的全流程优化；四是协同能力更强，实现跨区域、跨部门、跨领域监测数据共享与协同治理。未来，该阶段技术将向更高层次发展，核心方向包括：一是监测精度持续提升，聚焦新型污染物、微量污染物实现更精准测定；二是智能化水平不断升级，强化人工智能与监测技术的深度融合，实现自主感知、自主决策、自主优化；三是一体化协同深化，推动“监测－管理－治理”全链条融合，构建全域协同的生态环境智慧治理体系；四是绿色低碳转型，研发低能耗、环保型监测设备与技术，实现监测工作本身的绿色化。

环境监测技术的发展历程，是科技进步与环保需求同频共振的生动体现，从传统手工监测到自动化监测，再到智能化、立体化监测，每一次技术迭代都推动环保工作迈向更高水平。当前，成熟阶段的监测技术已构建起多技术融合、全维度覆盖的智慧监测体系，为生态环境治理提供了强大支撑。随着技术的持续创新，环境监测将朝着更精准、更智能、更协同、更绿色的方向发展，进一步强化数据支撑能力，助力生态环境质量持续改善，为全球生态环境保护与可持续发展贡献核心力量。

第三节 环境监测技术体系构成

环境监测技术体系是实现精准、高效、系统监测的核心载体，是整合监测流程、技术模块与应用需求的有机整体。经过长期发展，该体系已从单一监测环节、零散技术应用，逐步形成涵盖全流程核心环节、多类型技术支撑、兼具综合性与协同性的架构体系。明确技术体系的核心环节、关键技术支撑与核心特征，是把握环境监测技术逻辑、规范监测工作开展、提升监测数据质量的重要前提。

一、核心环节：涵盖样品采集、预处理、分析测试、数据处理与报告输出全流程

环境监测技术体系的核心环节贯穿监测工作全流程，从样品采集到报告输出形成闭环链路，每个环节紧密衔接、相互影响，直接决定监测数据的准确性、可靠性与有效性。各环节遵循标准化流程规范，确保监测工作有序开展、成果可追溯，为后续环境决策提供科学依据。

（一）样品采集：监测工作的基础前提

样品采集是环境监测的首要环节，核心目标是获取具有代表性、客观性的环境样品，为后续分析测试提供可靠载体，其科学性直接影响整个监测工作的质量。样品采集需遵循针对性、代表性、随机性与规范性原则，结合监测对象、监测目的与区域环境特征，制定科学的采样方案。

采样过程中需明确采样点位、采样频次、采样量与采样方法，根据大气、水、土壤等不同监测对象的特性，选用适配的采样工具与保存方式，避免样品在采集过程中发生组分变化、污染或损耗。同时，需做好采样记录，详细标注采样时间、地点、环境条件、样品编号等信息，建立完整的样品溯源体系。此外，采样工作需兼顾时效性与覆盖面，确保采集的样品能够真实反映区域环境质量状况与污染物分布特征，为后续环节提供高质量基础素材。

（二）样品预处理：分析测试的关键准备

样品预处理是连接样品采集与分析测试的关键环节，核心目的是消除样品基质干扰、浓缩目标污染物组分，将复杂样品转化为适合分析测试的形态，提升分析测试的准确性与灵敏度。多数环境样品组分复杂、基质多样，且目标污染物浓度可能低于分析仪器检出限，直接测试难以获得精准结果，需通过预处理环节优化样品状态。

预处理方法需根据样品类型、污染物性质与分析要求选择，常用方法包括消解、萃取、分离、浓缩、净化等，不同方法适配不同场景，需遵循高效、环保、无二次污染的原则。预处理过程中需严格控制操作条件，规范试剂使用与仪器操作，避免引入新的污染或导致目标组分损失，同时做好预处理记录，确保流程可追溯。高质量的样品预处理能够有效提升分析测试的精准度，减少基质干扰对监测结果的影响，为后续环节提供合格的测试样品。

（三）分析测试：精准测定的核心手段

分析测试是环境监测的核心环节，核心任务是通过科学的技术方法与仪器设备，精准测定样品中目标污染物的种类、浓度及相关指标，量化反映环境质量状况。该环节依赖先进的分析技术与仪器设备，结合标准化测试流程，实现对污染物的精准识别与定量分析。

分析测试方法分为化学分析方法与仪器分析方法，根据监测指标的特性、浓度范围与精度要求选择适配方法，确保测试结果满足监测需求。测试过程中需严格遵循技术规范，做好仪器校准、空白试验、平行样测试等质量控制工作，减少系统误差与人为误差。同时，需实时记录测试数据、仪器状态、操作参数等信息，保障测试过程可追溯、数据可验证。分析测试的精准度直接决定监测数据的科学性，是连接样品信息与环境质量评价的关键纽带。

（四）数据处理与报告输出：成果转化的最终环节

数据处理与报告输出是监测工作的收尾环节，核心是对分析测试获得的原始数据进行整理、分析、评价，最终形成标准化监测报告，实现监测数据向环境决策依据的转化。该环节需遵循科学性、客观性、规范性原则，确保数据处理精准、报告内容完整。

数据处理阶段需对原始数据进行筛选、校正、统计分析，剔除异常数据，计算平均值、标准差等统计指标，结合质量控制结果评估数据可靠性，同时将测试数据转化为具有环境意义的评价指标。报告输出阶段需整合采样记录、预处理信息、测试数据、分析结论等内容，明确监测目的、范围、方法、结果与评价意见，清晰地反映区域环境质量状况、污染物变化规律及潜在环境风险。监测报告需符合标准化格式要求，数据详实、结论客观，为污染防治、环境管理、政策制定提供直接的数据支撑与决策参考。

二、技术支撑：包括化学分析技术、仪器分析技术、生物监测技术等关键技术模块

环境监测技术体系的有效运行，依赖多类型关键技术模块的支撑，各技术模块相互补充、协同发力，覆盖不同监测对象、指标与场景需求。这些技术模块涵盖化学、仪器、生物等多个学科领域，随着科技进步持续迭代升级，为监测体系的精准化、高效化提供核心动力。

（一）化学分析技术：基础核心技术模块

化学分析技术是环境监测中最基础、最核心的技术模块之一，主要通过化学反应定量或定性分析样品中目标污染物的组成与含量，适用于常规污染物、常量污染物的监测，具备操作简便、成本较低、适用性广的特点，是环境监测技术体系的基础支撑。

该技术模块以化学原理为核心，常用方法包括滴定法、比色法、重量法、分光光度法等，通过控制化学反应条件，利用物质的特征化学性质实现对污染物的识别与定量。化学分析技术广泛应用于水、大气、土壤等各类环境样品的常规指标监测，如酸碱度、溶解氧、化学需氧量、悬浮物等指标的测定。虽然化学分析技术在微量、痕量污染物监测中存在局限性，但凭借其成熟的技术体系、标准化的操作流程，仍是环境监测工作中不可或缺的基础技术，为后续仪器分析技术的应用提供基础参考。

（二）仪器分析技术：精准监测的核心支撑

仪器分析技术是依托先进分析仪器实现精准监测的技术模块，核心是利用物质的物理或物理化学性质，通过仪器设备捕捉物质的特征信号，实现对污染物的精准识别与定量分析，适用于微量、痕量、复合污染物的监测，是提升监测精度与广度的核心支撑。

该技术模块涵盖光谱分析、色谱分析、质谱分析、电化学分析等多个分支，各类分析仪器具备不同的检测优势与适用场景，可实现对不同类型污染物的精准监测。仪器分析技术具有灵敏度高、检出限低、准确性强、自动化程度高等特点，能够满足复杂环境样品中微量污染物、新型污染物的监测需求，大幅拓展了环境监测的指标范围与精度水平。随着仪器制造技术的进步，分析仪器逐步向自动化、智能化、小型化方向发展，操作流程更简便、检测效率更高，为环境监测的精准化、实时化提供了强大支撑。

（三）生物监测技术：生态评价的特色技术模块

生物监测技术是利用生物个体、种群或群落的反应，评估环境质量与污染物影响的技术模块，核心是通过生物对环境变化的敏感性，间接反映环境质量状况，适用于生态环境健康评价、污染物生态效应监测，是传统理化监测的重要补充。

该技术模块常用方法包括生物指示法、生物毒性测试法、生物群落分析法等，通过观察生物的生长状况、生理指标、行为变化、群落结构等，评估污染物对生

态系统的影响，反映环境质量的综合状况。生物监测技术具备综合性、长期性、敏感性的特点，能够捕捉理化监测难以发现的潜在环境风险，全面反映污染物的生态效应，为生态保护修复、生物多样性保护提供科学依据。随着生态环境保护需求的升级，生物监测技术与理化监测技术的融合日益深化，进一步完善了环境监测技术体系的生态评价能力。

三、体系特征：多技术融合、多对象覆盖、多维度联动的综合技术架构

环境监测技术体系并非各环节、各技术的简单叠加，而是形成了具有多技术融合、多对象覆盖、多维度联动特征的综合技术架构，这种架构既保障了监测工作的精准性与系统性，又具备较强的适应性与扩展性，能够适配不断升级的环保需求。

（一）多技术融合：跨学科协同赋能

多技术融合是环境监测技术体系的核心特征，体现为跨学科、多类型技术的有机整合与协同赋能，打破单一技术的局限性，提升监测体系的综合能力。随着环保需求的升级，单一技术已无法满足复杂环境问题的监测需求，需通过技术融合实现优势互补。

技术融合体现在多个层面：一是核心技术模块的融合，如化学分析技术与仪器分析技术结合，实现常规指标与微量指标的同步监测；二是传统技术与新技术的融合，如理化监测技术与生物监测技术、遥感技术融合，实现环境质量与生态效应的综合评估；三是监测技术与信息技术的融合，如分析测试技术与大数据、人工智能技术融合，实现监测数据的深度挖掘与智能化研判。多技术融合推动监测技术体系向多元化、智能化方向发展，大幅提升了对复杂环境问题的监测能力与研判水平。

（二）多对象覆盖：全要素监测无死角

多对象覆盖体现为监测体系能够覆盖大气、水、土壤、生态、噪声、放射性等各类环境要素，涵盖污染源、环境介质、生态系统等多类型监测对象，实现全要素、全方位的环境监测，无监测死角。

该特征依托不同技术模块的适配性，针对不同监测对象的特性，制定差异化监测方案，实现对各类环境要素的精准监测。从大气中颗粒物、气态污染物，到

水中理化指标、重金属,再到土壤中有机物、病原体,以及生态系统中的植被覆盖、生物多样性,监测体系均能提供对应的监测技术与方法。同时,监测对象从点源污染扩展至面源污染,从常规污染物扩展至新型污染物,从环境介质扩展至生态系统,形成全要素、全范围的监测覆盖格局,全面反映区域生态环境质量状况。

（三）多维度联动：全流程协同闭环

多维度联动体现为监测体系的各环节、各技术模块、各应用场景之间的协同联动,形成“监测—分析—评价—应用”的全流程闭环,确保监测数据的高效流转与深度应用,提升监测体系的整体效能。

联动性贯穿监测全流程:在环节联动上,样品采集、预处理、分析测试、数据处理与报告输出各环节紧密衔接,形成闭环链路,确保数据从采集到应用的无缝流转;在技术联动上,核心技术与辅助技术相互支撑,不同技术模块协同发力,满足复杂监测需求;在应用联动上,监测数据与污染防治、环境管理、政策制定等场景深度融合,为环保工作全流程提供数据支撑,实现监测成果的高效转化。同时,跨区域、跨部门的监测数据联动共享,构建起全域协同的监测网络,提升了对区域性、复合型环境问题的应对能力。

环境监测技术体系以全流程核心环节为骨架、多类型技术模块为支撑,形成了多技术融合、多对象覆盖、多维度联动的综合架构,是实现精准、高效、系统环境监测的核心保障。随着生态环境保护需求的持续升级与科技的不断进步,环境监测技术体系将进一步优化完善,朝着更精准、更智能、更协同、更全面的方向发展,不断强化数据支撑能力,为污染防治、生态保护、环境管理提供更有力的保障,助力实现生态环境可持续发展与美丽中国建设目标。

第四节 环境监测的质量保证与控制

环境监测的质量保证与控制是环境监测工作的核心保障,贯穿监测全流程,直接决定监测数据的可靠性与权威性,进而影响环境决策的科学性与有效性。随着环保工作向精准化、规范化推进,监测数据的质量要求不断提升,构建完善的质量保证与控制体系,成为规范监测行为、规避监测风险、提升监测成果价值的关键。

一、质量核心：确保监测数据的准确性、完整性、代表性、可比性与合法性

环境监测数据的质量核心体现为“五性”，即准确性、完整性、代表性、可比性与合法性，这五大要素相互关联、缺一不可，共同构成监测数据质量的评价体系，是衡量监测工作成效、保障监测成果可用的核心标准。

（一）准确性：数据的核心基础

准确性是监测数据的首要属性，指监测数据与被监测对象真实值的吻合程度，反映监测结果的精准度，是避免决策偏差的核心前提。准确性的保障需贯穿监测全流程，从样品采集的科学性、预处理的规范性，到分析测试的精准性、数据处理的合理性，每个环节都需严格把控，最大限度减少系统误差、人为误差与随机误差。

确保数据准确性，需依托标准化的技术方法、经校准的仪器设备、合格的试剂材料，以及规范的操作流程，同时通过空白试验、平行样测试、加标回收等质量控制手段，验证数据的精准度，及时纠正偏差。只有保证数据准确性，才能真实反映环境质量状况与污染物浓度水平，为污染防治、环境管理提供可靠依据。

（二）完整性：数据的覆盖效能

完整性指监测数据的全面覆盖程度，涵盖监测指标、监测范围、监测频次等维度，确保数据能够系统反映监测对象的整体状况，避免因数据缺失导致对环境问题的片面判断。完整性体现为监测数据无遗漏、无中断，能够满足环境评价与决策的全面需求。

保障数据完整性，需在监测方案设计阶段明确合理的监测范围与频次，确保覆盖监测对象的时空分布特征；在监测实施过程中，做好样品与数据的全程追溯，避免样品损耗、数据丢失或记录不全；在数据处理阶段，对缺失数据进行科学研判与补充，确保数据链条完整。完整的数据体系能够为环境趋势分析、风险预判提供全面支撑，提升监测成果的应用价值。

（三）代表性：数据的映射价值

代表性指监测数据对被监测区域、时段、对象的典型反映能力，即采集的样品与获取的数据能够真实代表整体环境质量状况，是连接局部监测与全局评价的关键。环境监测多为抽样监测，数据的代表性直接决定监测结果的适用性，若缺

乏代表性，即使数据精准，也无法反映整体环境状况。

提升数据代表性，需结合监测对象的特性与区域环境特征，科学布设监测点位、确定采样频次与方法，确保样品能够反映污染物的时空分布规律；同时，针对不同环境介质、污染源类型，制定差异化的监测方案，避免因点位不合理、采样不规范导致数据代表性不足，确保监测数据能够有效映射整体环境质量。

（四）可比性：数据的关联效能

可比性指不同时间、不同区域、不同机构开展的同类监测数据能够相互对比，便于分析环境质量变化趋势、横向评估区域环境状况，是实现监测数据共享复用、提升数据应用效能的重要前提。可比性要求监测工作遵循统一的技术规范、分析方法与评价标准，确保数据口径一致。

保障数据可比性，需统一监测指标的定义、测定方法、计量单位与质量控制要求，避免因方法差异导致数据不可比；同时，建立数据标准化处理流程，确保不同来源、不同时段的数据能够有效关联。通过提升数据可比性，可实现区域间环境质量对比、不同时期污染变化趋势分析，为跨区域协同治理、政策效果评估提供支撑。

（五）合法性：数据的权威属性

合法性指监测数据的获取与使用符合国家法律法规、技术规范与管理要求，具备法律效力与权威性，是环境执法、行政决策、纠纷仲裁的重要依据。合法性体现为监测机构具备相应资质、监测人员持证上岗、监测流程符合规范、数据记录可追溯。

确保数据合法性，需严格遵循《环境监测管理办法》《环境监测技术规范》等相关规定，监测机构需通过资质认定，监测人员需具备相应专业能力并持证上岗；监测过程需做好完整记录，建立数据溯源体系，确保数据从采集到应用的全流程可核查；同时，监测数据需经过审核验收，符合法定要求后方可作为执法、决策依据，保障监测工作的规范性与权威性。

二、控制环节：样品采集与保存、仪器校准、实验室质量控制、人员能力保障

环境监测质量控制需覆盖监测全流程，聚焦样品采集与保存、仪器校准、实验室质量控制、人员能力保障四大核心环节，通过有针对性地管控措施，规避各

环节质量风险，构建全链条质量防控体系，确保监测数据质量符合“五性”要求。

（一）样品采集与保存：源头质量管控

样品采集与保存是质量控制的源头环节，其质量直接决定后续分析测试与数据结果的可靠性，需从源头规避污染、损耗、组分变化等问题，确保样品的代表性与完整性。

在样品采集环节，需严格遵循监测方案，科学布设采样点位，选用清洁、适配的采样工具，规范采样操作流程，避免采样过程中引入污染或导致目标组分损失；同时，做好采样记录，详细标注采样时间、地点、环境条件、样品信息等，建立样品溯源体系。在样品保存环节，根据样品类型、污染物性质，选用合适的保存容器与保存方法，控制保存温度、pH 值、保存时间等条件，防止样品组分发生氧化、降解、吸附等变化；样品运输过程中需做好防护措施，避免样品破损、污染或变质，确保样品从采集到实验室分析的质量稳定。

（二）仪器校准：精准测试保障

仪器设备是分析测试的核心载体，仪器的精准度直接影响监测数据的准确性，仪器校准是确保仪器设备处于正常工作状态、规避系统误差的关键措施，需建立常态化的仪器校准与维护体系。

仪器校准需遵循国家计量校准规范，对分析测试所用仪器设备定期进行校准，包括首次使用前校准、定期校准、维修后校准及日常核查，确保仪器的测量范围、精度、稳定性符合监测要求；校准需选用合格的标准物质，严格按照校准流程操作，做好校准记录，粘贴校准标识，明确校准有效期。同时，建立仪器设备档案，记录仪器采购、校准、维护、维修等信息，定期对仪器进行维护保养，及时排查仪器故障，确保仪器设备长期处于稳定、精准的工作状态，为精准分析测试提供保障。

（三）实验室质量控制：核心流程管控

实验室是分析测试与数据处理的核心场所，实验室质量控制涵盖样品预处理、分析测试、数据处理等环节，需通过标准化的管控措施，减少人为误差与操作风险，确保实验室环节的质量稳定。

在样品预处理环节，规范试剂使用与操作流程，选用纯度合格的试剂与耗材，严格控制预处理条件，避免引入新的污染或导致目标组分损失，做好预处理记录。在分析测试环节，严格遵循标准分析方法，控制测试条件，做好空白试验、平行

样测试、加标回收试验等质量控制工作，空白试验结果需符合要求，平行样相对偏差需在允许范围之内，加标回收率需满足精准度要求，通过这些手段验证测试结果的可靠性。在数据处理环节，规范数据计算、统计与校正流程，剔除异常数据需有明确依据，做好数据处理记录，确保数据处理过程可追溯、结果可验证。

（四）人员能力保障：人为风险管控

监测人员是监测工作的实施主体，人员的专业能力、操作规范性直接影响监测全流程质量，人员能力保障是质量控制的重要人文因素，需通过培训、考核、管理等措施，提升人员专业素养与责任意识。

建立健全人员管理制度，监测人员需具备相应专业背景，通过资质考核并持证上岗，明确各岗位人员职责；定期开展专业培训，涵盖技术规范、操作流程、仪器使用、质量控制、应急处置等内容，提升人员的专业技能与规范操作水平；建立考核评价机制，对人员的操作能力、数据处理能力、质量意识进行定期考核，考核不合格者需暂停上岗并接受再培训；同时，强化人员责任意识，要求严格遵守监测规范与操作流程，做好全程记录，杜绝人为操作失误与数据造假行为，从人员层面保障监测质量。

三、实施标准：遵循国家环境监测技术规范与质量控制标准，建立全流程质量体系

环境监测质量保证与控制的有效实施，需以标准化为支撑，严格遵循国家环境监测技术规范与质量控制标准，构建覆盖监测全流程、责任明确、流程规范、管控到位的质量体系，实现质量管控的常态化、制度化、规范化。

（一）遵循国家技术规范与质量标准

国家环境监测技术规范与质量控制标准是开展质量保证与控制工作的根本依据，为监测流程、技术方法、质量要求、数据管理等提供统一规范，确保监测工作有章可循、质量可控。

监测工作需严格遵循各类专项技术规范，包括大气、水、土壤、生态等不同环境要素的监测技术规范，明确采样、预处理、分析测试、数据处理等环节的操作要求；同时，遵循质量控制相关标准，明确质量控制指标、方法与评价要求，如空白试验、平行样测试、加标回收等的允许范围，仪器校准的技术要求等。此外，需关注标准规范的更新迭代，及时学习并执行最新标准，确保监测工作与国

家要求保持一致，提升监测数据的合法性与权威性。

（二）建立全流程质量体系

基于国家标准规范，结合监测工作实际，建立全流程质量保证与控制体系，将质量管控融入监测方案设计、样品采集与保存、仪器校准、实验室分析、数据处理与报告输出、人员管理等各个环节，形成闭环管控机制。

质量体系需明确各环节的质量责任，落实岗位责任制，确保每个环节都有专人负责、专人监督；制定详细的质量控制流程与操作手册，规范各环节工作内容与操作要求；建立质量审核与验收机制，对监测数据从采集到报告输出的全流程进行审核，包括采样审核、预处理审核、测试数据审核、报告审核，确保数据质量符合要求；同时，建立质量问题追溯与整改机制，对发现的质量问题及时排查原因、落实整改，做好整改记录，避免同类问题重复出现。

（三）强化质量体系运行与持续优化

质量体系的建立并非一劳永逸，需通过有效地运行管理与持续优化，确保体系落地见效，适配不断升级的监测需求与质量要求，提升质量管控效能。

加强质量体系运行管理，定期开展内部质量审核与管理评审，检查质量体系的符合性、有效性与适用性，及时发现体系运行中存在的问题并加以改进；鼓励开展外部质量控制活动，如参加实验室间比对、能力验证等，通过与其他监测机构的对比，检验自身监测质量与能力水平，查找差距并优化提升。同时，结合监测技术的发展、环保需求的升级与标准规范的更新，及时修订完善质量体系，优化质量控制流程与措施，确保质量体系始终适配监测工作实际，为监测数据质量提供持续稳定的保障。

环境监测的质量保证与控制是维系监测工作权威性、提升监测成果价值的核心，通过聚焦数据“五性”核心要求，把控全流程关键环节，遵循标准化体系规范，构建科学严谨的质量管控框架，能够有效规避质量风险，确保监测数据精准可靠。随着环保工作的深入推进与监测技术的不断升级，质量保证与控制体系需持续优化完善，朝着更精准、更全面、更高效的方向发展，进一步强化监测数据的支撑能力，为污染防治、环境管理、政策制定提供坚实保障，助力生态环境质量持续改善与可持续发展。

第二章 大气环境监测技术

第一节 大气污染物与监测方法概述

大气环境是生态环境系统的核心组成部分，其质量直接关系到人体健康、生态安全与经济社会可持续发展。随着工业化、城市化进程加快，各类大气污染物排放量持续增加，区域性、复合型大气污染问题日益突出，对大气环境监测技术的精准性、系统性提出了更高要求。大气污染物与监测方法概述作为大气环境监测技术的基础内容，明确污染物分类与来源、梳理监测方法体系、界定核心监测目标，是构建科学高效监测方案、提升污染防控效能的前提。

一、污染物分类：按形态分为气态污染物与颗粒物，明确主要污染来源

大气污染物种类繁多，按物理形态可核心分为气态污染物与颗粒物两大类，两类污染物的排放来源、迁移转化规律及环境影响存在显著差异，明确其分类与来源是精准开展监测、靶向实施污染防治的基础。

（一）气态污染物：无形扩散型污染物

气态污染物是指以气体形态存在于大气中的污染物，具有扩散速度快、覆盖范围广、易与其他物质发生化学反应的特征，部分污染物浓度低但毒性强，对人体健康与生态环境危害显著。常见气态污染物包括含硫化合物、含氮化合物、碳氢化合物、挥发性有机物（VOCs）、一氧化碳、臭氧等。

从污染来源看，气态污染物可分为自然来源与人为来源。自然来源包括火山喷发释放的二氧化硫、生物分解产生的挥发性有机物、雷电作用生成的氮氧化物等，其排放具有偶然性、区域性特征，影响范围相对有限。人为来源是气态污染物的主要排放渠道，核心包括工业生产排放、能源燃烧、交通运输、农业活动等。工业生产中，冶金、化工、建材等行业的生产过程中会直接排放二氧化硫、氮氧化物、VOCs等污染物；煤炭、石油等化石能源燃烧是含硫、含氮污染物的主要

来源；机动车尾气排放会释放氮氧化物、一氧化碳、VOCs等；农业生产中，秸秆焚烧、化肥施用等会产生氨、VOCs等污染物。

（二）颗粒物：有形悬浮型污染物

颗粒物是指悬浮在大气中的固体或液体微粒，又称大气气溶胶，其粒径大小直接决定了扩散范围、沉降速度及对环境的影响，按粒径可进一步分为可吸入颗粒物（ PM_{10} ）与细颗粒物（ $PM_{2.5}$ ）等。 PM_{10} 指粒径小于等于10微米的颗粒物，可进入人体呼吸道； $PM_{2.5}$ 指粒径小于等于2.5微米的颗粒物，可穿透呼吸道屏障进入血液循环，对人体健康危害更大。

颗粒物的污染来源同样涵盖自然与人为两类。自然来源包括土壤扬尘、沙尘天气、火山灰、植物花粉、海洋气溶胶等，其排放受气象条件、地理环境影响较大。人为来源是颗粒物的主要贡献者，核心包括工业粉尘排放、能源燃烧、交通运输、建筑施工、农业活动等。工业生产中，矿山开采、水泥制造、金属冶炼等过程会产生大量工业粉尘；化石能源燃烧会生成烟尘等细颗粒物；机动车行驶过程中产生的道路扬尘、尾气中的颗粒物均会污染大气；建筑施工中的土方作业、材料堆放、建筑垃圾清运等会产生大量扬尘；秸秆焚烧、农业翻耕等农业活动也会释放颗粒物。

（三）两类污染物的协同影响

气态污染物与颗粒物并非孤立存在，二者在大气中会发生复杂的物理化学反应，形成复合型污染，加剧对环境的影响。例如，气态污染物中的二氧化硫、氮氧化物会通过二次反应生成硫酸盐、硝酸盐等二次颗粒物，成为 $PM_{2.5}$ 的重要组成部分；颗粒物可作为气态污染物的载体，延长其在大气中的停留时间，扩大污染范围。这种协同作用使得大气污染问题更趋复杂，也对监测技术的全面性、精准性提出了更高要求。

二、监测方法分类：化学分析法、仪器分析法、生物监测法的适用场景与原理

大气环境监测方法体系基于不同学科原理与技术手段构建，核心分为化学分析法、仪器分析法、生物监测法三大类。各类方法的原理、适用场景、精准度存在差异，相互补充、协同发力，可满足不同污染物、不同监测需求下的监测工作，构建全方位的大气监测技术体系。

（一）化学分析法：基础常规监测方法

化学分析法以物质的化学反应为核心原理，通过监测化学反应过程中的现象或产物，实现对大气污染物的定性或定量分析，是大气环境监测中最基础、最成熟的常规监测方法，具备操作简便、成本较低、适用性广的特点。

该方法的核心原理是利用污染物的特征化学性质，使其与特定试剂发生反应，通过观察反应现象（如颜色变化、沉淀生成、气体释放）或测定反应产物的量，计算污染物的浓度。常用化学分析方法包括滴定法、比色法、重量法等，适用于大气中常规气态污染物（如二氧化硫、一氧化碳）、颗粒物总量等指标的监测。其适用场景多为实验室分析或现场快速监测，尤其适用于基层监测机构、应急监测等对设备要求较低的场景。但化学分析法灵敏度相对较低，难以满足微量、痕量污染物的精准监测需求，对复杂基质样品的监测效果有限。

（二）仪器分析法：精准专项监测方法

仪器分析法依托先进的分析仪器，基于物质的物理或物理化学性质（如光谱、色谱、电化学特性）实现对污染物的精准监测，具备灵敏度高、检出限低、准确性强、自动化程度高的特点，是当前大气污染物精准监测的核心方法，尤其适用于微量、痕量污染物及复杂污染物的监测。

根据原理不同，仪器分析法可分为多个分支：光谱分析法利用污染物对特定波长光的吸收、发射或散射特性进行监测，适用于二氧化硫、氮氧化物、臭氧等气态污染物及颗粒物浓度的实时监测；色谱分析法利用污染物在固定相和流动相中的分配系数差异实现分离与定量，适用于 VOCs、多环芳烃等复杂有机污染物的监测；电化学分析法利用污染物的电化学特性（如氧化还原反应）产生的电信号进行监测，适用于一氧化碳、二氧化硫等气态污染物的现场快速监测。仪器分析法适用场景广泛，可实现实验室精准分析、现场在线监测、移动监测等多种模式，但其设备投入与运维成本较高，对操作人员专业能力要求较高，需定期进行仪器校准与维护。

（三）生物监测法：生态效应监测方法

生物监测法以生物个体、种群或群落对大气污染的反应为核心，通过观察生物的生长状况、生理指标、行为变化等，间接评估大气污染程度与生态效应，是化学分析法与仪器分析法的重要补充，具备综合性、长期性、敏感性的特点。

该方法的核心原理是利用生物对大气污染物的敏感性，污染物会通过呼吸作

用进入生物体内，影响其生理代谢、生长发育，甚至导致群落结构变化，通过监测这些变化可间接反映大气污染状况与污染持续时间。常用生物监测方法包括生物指示法、生物毒性测试法、群落分析法等，例如利用苔藓、地衣的生长状况评估大气重金属与 SO_2 污染程度，通过植物叶片损伤情况判断大气污染物浓度，借助动物种群数量变化评估大气污染的生态影响。生物监测法适用于大气污染生态效应评估、长期污染状况监测等场景，能够捕捉理化监测难以发现的潜在环境风险，但监测周期较长，结果易受气候、土壤等其他环境因素影响，难以实现污染物浓度的精准定量。

三、监测核心目标：掌握大气污染时空分布特征，为污染溯源与防治提供依据

大气环境监测的核心目标并非单纯获取污染物浓度数据，而是通过系统性监测与数据分析，全面掌握大气污染的时空分布特征，精准识别污染来源，为大气污染溯源、防控方案制定、治理效果评估提供科学依据，推动大气污染防治工作从“被动应对”向“精准防控”转型。

（一）掌握污染时空分布特征，研判污染变化趋势

掌握大气污染时空分布特征是监测工作的基础目标，核心是明确污染物在不同时间、不同区域的浓度变化规律，精准捕捉污染峰值时段、高污染区域，为污染防治的精准施策提供方向。时间分布特征包括日内变化、季节变化、年际变化，不同污染物的时间变化规律与排放来源、气象条件密切相关；空间分布特征包括区域差异、城乡差异、功能区差异，反映污染排放与地理环境、产业布局的关联。

通过长期、连续的监测数据积累，结合气象数据、地形数据等，可构建污染变化趋势模型，预判未来污染发展态势，提前制定防控预案，提升污染防治的前瞻性与主动性。同时，通过分析时空分布特征，可识别污染高发的关键时段与区域，为差异化防控措施的制定提供依据，实现精准发力、高效防控。

（二）精准开展污染溯源，锁定核心污染源

污染溯源是大气污染防治的关键前提，核心目标是通过监测数据与溯源技术结合，精准识别污染物的主要排放来源、传输路径，明确不同来源的贡献比例，为污染源管控提供靶向依据。大气污染物来源复杂，且存在跨区域传输现象，单纯依靠浓度监测难以实现精准溯源，需结合多维度监测数据与溯源模型。

通过对不同污染物浓度的协同监测，结合污染物组分分析，可构建污染来源指纹库，实现对工业源、交通源、能源燃烧源、扬尘源等不同来源的精准识别；通过区域联防联控监测网络，可追踪污染物跨区域传输路径，明确区域间污染贡献关系。精准的污染溯源能够避免污染防治的盲目性，确保管控措施聚焦核心污染源，提升污染治理的针对性与有效性。

（三）支撑污染防治决策，评估治理工作成效

为大气污染防治决策提供科学依据、评估治理工作成效，是大气环境监测的最终目标，核心是将监测数据转化为决策支撑，推动污染防治工作规范化、精准化开展，确保生态环境质量持续改善。监测数据是污染防治方案制定、环境政策出台、环境执法监管的核心依据，可为污染物排放标准制定、总量控制目标设定、防控措施优化提供数据支撑。

通过对比治理前后的监测数据，可以科学评估污染治理措施的有效性，判断治理方案的实施效果，及时发现治理工作中存在的问题，优化调整治理策略。此外，监测数据可作为环境考核评价的核心指标，量化区域大气污染防治工作成效，倒逼各方落实环保责任，形成污染防治的长效机制。

大气污染物与监测方法概述构建了大气环境监测技术的基础框架，明确污染物分类与来源为精准监测提供靶向，完善监测方法体系为高效监测提供支撑，界定核心监测目标为污染防治提供方向。随着大气污染问题的日益复杂与环保需求的持续升级，大气环境监测技术将朝着更精准、更高效、更全面的方向发展，进一步强化时空分布研判、污染溯源与决策支撑能力。后续专项监测技术将基于本节基础，针对不同污染物、不同场景展开细化阐述，为大气污染精准防控与生态环境质量改善提供更有力的技术保障。

第二节 常规气态污染物与颗粒物监测技术

常规气态污染物与颗粒物是大气污染的核心组成部分，其精准监测是掌握大气污染状况、开展污染防治的关键环节。针对这类污染物的监测技术已形成成熟体系，不同技术基于差异化原理，具备各自的适用场景与操作要求。合理选用监测技术、规范操作流程、精准解读监测数据，直接决定监测结果的可靠性与应用价值。

一、气态污染物监测：红外吸收法、紫外荧光法等主流技术的原理与操作要点

常规气态污染物（如 SO_2 、 NO_x 、 CO 、 VOCs 等）的主流监测技术多基于光谱、电化学等原理，其中红外吸收法、紫外荧光法凭借灵敏度高、准确性强、自动化程度高等优势，广泛应用于室内外及固定源监测场景。掌握各技术的核心原理与操作要点，是保障监测数据质量的基础。

（一）红外吸收法

红外吸收法是利用气态污染物对特定波长红外光的选择性吸收特性，实现污染物浓度定量监测的技术，适用于 CO 、 CO_2 、 NO_x 、 VOCs 等多种气态污染物的监测，尤其在固定源排放监测与室外常规监测中应用广泛。

核心原理为：不同气态污染物分子具有独特的红外吸收光谱，当红外光穿过含有目标污染物的气体样品时，污染物分子会吸收对应波长的红外光，吸收强度与污染物浓度遵循朗伯 - 比尔定律，通过测定红外光的衰减程度，可计算出目标污染物的浓度。该技术分为非分散红外吸收法与分散红外吸收法，前者结构简单、响应速度快，后者选择性更强，适用于复杂基质样品监测。

操作要点需聚焦三方面：一是样品预处理，确保样品干燥、无颗粒物干扰，避免水分与杂质对吸收光谱产生叠加影响；二是仪器校准，监测前需用标准气体校准仪器，设定基线与吸收波长，确保仪器处于最佳工作状态；三是工况控制，保持监测环境温度、压力稳定，避免外界条件变化导致吸收强度偏移，同时定期检查光源稳定性与检测器灵敏度，及时维护设备部件。

（二）紫外荧光法

紫外荧光法是针对 SO_2 等具有荧光特性的气态污染物设计的专项监测技术，具备灵敏度高、检出限低、抗干扰能力强的特点，是当前 SO_2 常规监测的首选技术，广泛应用于环境空气自动监测站与固定源排放监测。

核心原理为：目标污染物分子在特定波长紫外光的照射下，会吸收光子能量跃迁至激发态，激发态分子不稳定，在返回基态过程中会释放出特定波长的荧光，荧光强度与污染物浓度呈线性关系，通过检测荧光强度可定量计算污染物浓度。以 SO_2 监测为例， SO_2 分子吸收 214nm 紫外光后激发，返回基态时释放 330nm 左右的荧光，通过荧光检测器捕捉该信号即可完成监测。

操作要点包括：一是光学系统调试，精准校准紫外光源波长与荧光检测器接收角度，确保激发光与荧光信号的有效捕捉；二是载气纯度控制，选用高纯度氮气作为载气，避免载气中杂质产生荧光干扰，影响监测结果；三是样品净化，去除样品中的颗粒物与水分，防止污染光学部件、衰减荧光信号；四是定期维护，清洁光源与检测器镜片，检查荧光猝灭剂性能，保障仪器长期稳定运行。

（三）其他辅助监测技术

除主流技术外，电化学法、紫外吸收法等也是气态污染物监测的常用辅助技术。电化学法基于污染物分子的氧化还原反应产生电信号，适用于现场快速监测与应急监测，操作简便、成本较低，但稳定性较差，需定期校准；紫外吸收法利用污染物对紫外光的吸收特性监测，适用于 NO_x、VOCs 等污染物，选择性较强，但易受水汽与颗粒物干扰，需做好样品预处理。各类气态污染物监测技术的核心参数汇总如下：

监测技术	适用污染物	核心优势	主要局限
红外吸收法	CO、CO ₂ 、NO _x 、VOCs	自动化程度高、响应快、适用范围广	复杂基质易产生干扰，需样品净化
紫外荧光法	SO ₂	灵敏度高、检出限低、抗干扰强	仅适用于荧光特性污染物，设备成本较高
电化学法	CO、SO ₂ 、NO _x	操作简便、成本低、适合现场快速监测	稳定性差，易受温度湿度影响，需频繁校准
紫外吸收法	NO _x 、VOCs	选择性强、响应速度快	受水汽、颗粒物干扰大

二、颗粒物监测：重量法、β 射线法、光散射法的技术特点与数据解读

颗粒物监测核心针对 PM₁₀、PM_{2.5} 等关键指标，重量法、β 射线法、光散射法是三类主流技术，分别基于质量测量、辐射衰减、光散射效应实现监测，技术特点与适用场景差异显著，数据解读需结合技术原理与质量控制要求。

（一）重量法

重量法是颗粒物监测的基准方法，通过直接测量颗粒物质量计算浓度，具备准确性高、结果可靠的特点，是校准其他颗粒物监测技术的核心依据，广泛应用于环境空气常规监测与实验室精准分析。

技术特点：核心原理为利用采样器采集一定体积空气中的颗粒物，截留于滤

膜上，通过称量滤膜采样前后的质量差，结合采样体积计算颗粒物浓度。该方法分为手工重量法与自动重量法，手工法操作繁琐、耗时较长，但准确性高；自动重量法实现采样、称量、数据计算全自动化，效率更高，适用于长期连续监测。重量法不受颗粒物组分、粒径分布影响，结果稳定性强，是颗粒物浓度监测的“金标准”。

数据解读与注意事项：监测数据直接反映颗粒物实际质量浓度，需确保滤膜处理、称量、采样等环节规范。滤膜需在恒温恒湿环境下平衡 24 小时以上，采用高精度天平称量（精度 $\geq 0.1\text{mg}$ ）；采样过程中需记录采样流量、时间、环境温度与压力，校准采样体积；数据异常时需排查滤膜污染、采样流量波动等问题，确保数据溯源可查。

（二） β 射线法

β 射线法是自动化颗粒物监测的常用技术，基于 β 射线衰减原理实现浓度监测，具备自动化程度高、监测周期短、适合连续监测的特点，广泛应用于环境空气自动监测站与移动监测场景。

技术特点：核心原理为 β 射线源发射的 β 粒子穿过含有颗粒物的滤带时，部分 β 粒子会被颗粒物吸收，导致射线强度衰减，衰减程度与颗粒物质量呈线性关系，通过测定射线强度变化计算颗粒物浓度。该技术无需人工干预，可实现实时连续监测，监测周期可灵活调整（通常为 1 小时），但受滤带污染、颗粒物组分影响较大，需定期校准与维护。

数据解读与注意事项：监测数据为实时质量浓度，需结合校准系数修正结果。日常监测中需定期用重量法校准仪器，修正系统误差；及时更换滤带，避免滤带残留颗粒物影响后续监测；当颗粒物中含有高原子序数组分（如重金属）时，会增强 β 射线吸收，导致数据偏高，需结合组分分析修正。

（三）光散射法

光散射法是基于颗粒物对光的散射效应监测浓度的技术，具备响应速度快、无耗材、适合现场快速监测的特点，广泛应用于室内空气质量监测、应急监测与移动监测，但其结果准确性受颗粒物粒径、形态、组分影响较大。

技术特点：核心原理为激光光源发射的光束照射到颗粒物上，颗粒物会向各个方向散射光，散射光强度与颗粒物浓度、粒径分布相关，通过检测散射光强度并结合校准模型，计算颗粒物浓度。该技术无需采样滤膜，无耗材消耗，响应时

间短（秒级），可实现实时监测，但受颗粒物光学特性影响显著，不同组分颗粒物的散射系数差异较大，需针对性校准。

数据解读与注意事项：监测数据为相对浓度，需通过重量法校准转化为质量浓度。室内监测中需避开光源直射与气流干扰，确保监测环境稳定；应急监测中可快速获取颗粒物浓度变化趋势，但需结合其他技术验证结果；定期清洁光学部件，避免灰尘污染影响光散射信号捕捉，确保仪器灵敏度。

三、技术适配：根据监测场景（室内、室外、固定源）选择针对性监测技术

不同监测场景的环境条件、监测需求、污染物浓度差异显著，需结合场景特点选择适配的监测技术，兼顾监测准确性、效率与成本，确保监测工作高效开展。核心原则为：室内监测侧重快速便捷与实时性，室外监测侧重连续稳定与精准性，固定源监测侧重高浓度适配与抗干扰能力。

（一）室内场景适配

室内场景污染物浓度较低、环境相对稳定，监测需求以实时掌握空气质量、快速识别污染隐患为主，优先选择操作简便、响应快、无耗材的监测技术。

气态污染物监测：优先选用电化学法、光散射法便携式仪器，可快速监测 CO、SO₂、VOCs 等污染物，适合家庭、办公场所等场景的日常监测；对精度要求较高的实验室、医疗场所，可选用小型红外吸收法仪器，兼顾准确性与便捷性。颗粒物监测：优先选用光散射法便携式仪器，实时监测 PM₁₀、PM_{2.5} 浓度，无耗材、易维护；对精度要求较高时，可搭配小型自动重量法仪器校准，确保数据可靠。

（二）室外场景适配

室外场景（如环境空气自动监测站、区域移动监测）需实现长期连续监测，兼顾数据精准性、稳定性与自动化程度，优先选择主流标准化技术，构建全方位监测体系。

气态污染物监测：SO₂ 监测优先选用紫外荧光法，NO_x、CO 监测选用红外吸收法，构建自动监测系统，实现 24 小时连续监测；移动监测可选用便携式红外吸收法或电化学法仪器，灵活捕捉区域污染时空变化。颗粒物监测：以重量法为基准，搭配 β 射线法自动监测仪器，实现连续监测与数据实时上传；偏远区域或移动监测可选用光散射法仪器，快速获取浓度趋势，定期用重量法校准。

（三）固定源场景适配

固定源（如工业锅炉、化工装置）排放污染物浓度高、组分复杂、温度湿度波动大，监测需求以达标排放检测、总量核算为主，需选择抗干扰能力强、适配高浓度、具备防爆防腐功能的监测技术。

气态污染物监测：优先选用红外吸收法（非分散型），适配高浓度 SO_2 、 NO_x 、 CO 监测，具备抗干扰能力强、稳定性好的特点； VOCs 监测选用分散红外吸收法或气相色谱法，精准分离复杂组分。颗粒物监测：优先选用自动重量法或 β 射线法，搭配高温采样系统，去除烟气中水分与杂质干扰；对高浓度粉尘监测，可选用光散射法在线监测仪，实时监控排放浓度，定期用重量法校准。同时，所有固定源监测仪器需具备防爆、防腐、抗高温性能，符合工业现场安全要求。

常规气态污染物与颗粒物监测技术的合理选用与规范应用，是大气环境监测工作的核心保障。不同技术各有优劣，需结合监测场景、精度需求、成本预算综合适配，同时通过规范操作流程、强化质量控制、精准解读数据，确保监测结果可靠。随着监测技术的迭代升级，自动化、智能化、多参数集成的监测设备将逐步普及，进一步提升不同场景下的监测效能，为大气污染精准防控、环境质量持续改善提供更有力的技术支撑。

第三节 特征污染物监测技术

特征污染物是特定行业生产过程中排放的标志性污染物，具有组分复杂、毒性强、排放浓度波动大、影响范围集中等特点，其精准监测对行业污染溯源、风险防控及生态环境安全保障具有重要意义。相较于常规污染物，特征污染物的监测需结合行业生产工艺精准识别目标污染物，选用高灵敏度、高选择性的分析技术，同时突破低浓度检测、基质干扰等技术瓶颈。本节将系统阐述特征污染物的识别方法、主流监测技术及难点突破路径，为不同行业特征污染物监测工作提供科学指导，完善大气环境监测技术体系。

一、特征污染物识别：针对特定行业（化工、冶金）的特征污染物（ VOCs 、重金属）筛选

特征污染物识别的核心是结合行业生产工艺、原料消耗、产物生成及排放规

律，筛选出具有行业标志性的污染物，明确其物理化学性质、排放形态及潜在环境风险，为后续监测技术选择、监测方案设计提供靶向依据。不同行业的生产流程差异显著，特征污染物的种类与排放特征也各不相同。

（一）核心识别原则与方法

特征污染物识别需遵循针对性、标志性、风险性三大原则：针对性即聚焦行业核心生产环节，锁定与生产工艺直接相关的污染物；标志性即该污染物在对应行业排放中占比高、易区分，可作为行业污染的“特征标识”；风险性即优先筛选毒性强、易积累、对人体健康与生态环境危害大的污染物。

常用识别方法包括工艺溯源法、排放普查法与风险评估法。工艺溯源法通过分析行业生产流程，追踪原料转化、中间产物及最终排放物，明确潜在特征污染物；排放普查法结合行业污染排放现状调查，统计不同污染物排放浓度与总量，筛选占比突出的标志性污染物；风险评估法对潜在污染物的毒性、扩散性、累积效应进行评估，优先将高风险污染物纳入特征监测范围。

（二）典型行业特征污染物筛选

不同行业的特征污染物差异显著，以化工、冶金两大重点污染行业为例，其特征污染物的种类、排放形态及来源具有明确指向性，同时涵盖部分跨行业共性特征污染物。具体筛选结果如下表所示：

行业类型	特征污染物类别	主要污染物	排放形态	核心排放环节
化工行业	挥发性有机物（VOCs）	苯、甲苯、二甲苯、甲醛、丙酮、卤代烃	气态	原料储存、反应过程、产品精馏、废水处理
	有毒有害气体	氯气、氨气、硫化氢、光气	气态	化工合成、原料分解、尾气排放
冶金行业	重金属	铅、汞、镉、铬、砷	颗粒物、气态（金属化合物）	矿石冶炼、金属精炼、废渣处理
	酸性气体	二氧化硫、氟化氢、氯化氢	气态	烧结、炼铁、炼钢、电解过程
跨行业共性	持久性有机物	多环芳烃、二噁英类	颗粒物、气体	燃料燃烧、高温反应、废物焚烧

（三）识别后的监测定位

特征污染物识别完成后，需结合其排放特征明确监测定位：对高毒性、高风险污染物（如重金属、二噁英），需设定严格的监测频次与精度要求，重点关注其扩散范围与累积效应；对易挥发、易反应的污染物（如VOCs、酸性气体），

需强化实时监测与应急监测能力，捕捉浓度波动峰值；对形态复杂的污染物（如颗粒态与气态共存的重金属），需采用多形态同步监测技术，全面掌握其排放规律。

二、监测技术选择：气相色谱 – 质谱联用（GC-MS）、高效液相色谱（HPLC）等精准分析技术

特征污染物的复杂性与低浓度特性，对监测技术的选择性、灵敏度与精准度提出了更高要求。气相色谱 - 质谱联用（GC-MS）、高效液相色谱（HPLC）是当前特征污染物精准监测的主流技术，同时搭配光谱法、离子色谱法等辅助技术，形成多技术协同的监测体系，适配不同类型特征污染物的监测需求。

（一）气相色谱 – 质谱联用（GC-MS）技术

GC-MS 技术结合了气相色谱（GC）的高效分离能力与质谱（MS）的高灵敏度定性能力，具备分离效果好、选择性强、检测限低、可同时定性定量的特点，是 VOCs、多环芳烃等挥发性、半挥发性有机特征污染物监测的首选技术。

核心原理：样品经预处理后进入气相色谱仪，通过色谱柱实现不同污染物组分的分离，分离后的组分依次进入质谱仪，在离子源中被电离为带电离子，经质量分析器筛选后，根据离子的质荷比进行定性分析，同时通过离子强度定量计算污染物浓度。该技术可分为气相色谱 - 单四极杆质谱、气相色谱 - 三重四极杆质谱，前者适用于常规定性定量监测，后者抗干扰能力更强，适用于复杂基质中低浓度污染物监测。

适用场景与操作要点：广泛应用于化工、涂装、印刷等行业 VOCs、多环芳烃等污染物监测，既适用于实验室精准分析，也可搭配便携式设备用于现场应急监测。操作要点需聚焦样品预处理与仪器参数调试，常用预处理方法包括固相微萃取、热脱附、液液萃取等，确保样品中目标污染物有效富集；仪器调试需优化色谱柱温度程序、载气流速、离子源温度等参数，定期用标准物质校准，保障分离效果与检测精度。

（二）高效液相色谱（HPLC）技术

HPLC 技术基于不同污染物组分在固定相与流动相中的分配系数差异实现分离，具备适用范围广、无需样品气化、可分离高沸点与热不稳定污染物的特点，适用于重金属离子、二噁英类、酚类等非挥发性、热不稳定特征污染物的监测。

核心原理：流动相携带预处理后的样品流经色谱柱，样品中各组分与固定相、

流动相发生相互作用，因分配系数不同而实现分离，分离后的组分通过检测器（如紫外检测器、荧光检测器、质谱检测器）产生响应信号，根据信号峰面积或峰高进行定量分析，结合保留时间进行定性判断。搭配不同检测器可拓展适用范围，如荧光检测器适用于痕量酚类、多环芳烃监测，质谱检测器适用于复杂基质中低浓度污染物精准定量。

适用场景与操作要点：主要应用于冶金、化工、医药等行业重金属、酚类、二噁英类等污染物监测，以实验室分析为主。操作要点包括流动相配制、色谱柱选择与维护、检测器校准，流动相需保证纯度与稳定性，避免杂质干扰；根据污染物极性选择适配色谱柱，定期清洗维护以延长使用寿命；监测前需用标准曲线校准仪器，确保定量准确性。

（三）其他辅助监测技术

除主流技术外，光谱法、离子色谱法等辅助技术可适配特定类型特征污染物监测：原子吸收光谱法、电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）适用于冶金行业重金属离子的精准监测，ICP-MS灵敏度极高，可实现痕量重金属多元素同时测定；离子色谱法适用于酸性气体转化后的阴离子、重金属离子等污染物监测，分离效果好、抗干扰能力强；傅里叶变换红外光谱法适用于现场快速筛查气态特征污染物，响应速度快、无需样品预处理，但精准度低于 GC-MS 与 HPLC 技术。各类特征污染物监测技术适配性汇总如下：

监测技术	适配污染物类型	核心优势	适用场景
GC-MS	VOCs、多环芳烃、半挥发性有机物	分离好、选择性强、可定性定量	化工、印刷行业实验室分析与现场应急
HPLC	重金属离子、二噁英类、酚类	适用范围广、可处理热不稳定污染物	冶金、化工行业实验室精准分析
ICP-MS	痕量重金属多元素	灵敏度极高、多元素同时测定	冶金行业痕量重金属监测
傅里叶变换红外光谱法	气态特征污染物	响应快、无需预处理、现场快速筛查	各类行业现场应急快速监测

三、监测难点突破：低浓度特征污染物的富集与检测技术优化

特征污染物常以低浓度（痕量、超痕量）形态存在于大气中，且易受复杂基质干扰，导致监测过程中出现富集效率低、检测信号弱、干扰严重等问题。突破

这些难点的核心是优化样品富集技术与检测系统，提升低浓度污染物的捕获能力与信号识别能力，确保监测数据准确可靠。

（一）低浓度污染物富集技术优化

样品富集是低浓度特征污染物监测的前置关键环节，核心目标是提高样品中目标污染物浓度，降低检测限，满足监测精度要求。当前主流富集技术包括吸附富集、萃取富集、冷凝富集三类，需结合污染物形态与性质优化技术参数。

吸附富集技术优化：适用于气态特征污染物，利用吸附剂（如活性炭、Tenax 吸附剂、分子筛）对目标污染物的吸附作用实现富集，优化方向包括选择高吸附容量、高选择性的吸附剂，控制采样流量、温度与采样时间，避免吸附饱和或吸附剂失效；同时优化脱附条件（温度、时间），确保目标污染物完全脱附，减少损失。针对 VOCs 监测，常用热脱附－吸附富集组合技术，可显著提升低浓度 VOCs 的捕获效率。

萃取富集技术优化：适用于颗粒态或溶解态特征污染物（如重金属、酚类），常用固相微萃取、液液萃取、固相萃取等方法，优化方向包括选择适配的萃取剂与萃取条件，缩短萃取时间、提升萃取效率；对痕量污染物，可采用二次富集或联用技术，进一步提高浓度。例如，固相微萃取技术通过优化萃取纤维涂层、萃取温度与时间，可实现痕量酚类污染物的高效富集。

冷凝富集技术优化：适用于高挥发性、低浓度气态污染物，通过低温冷凝将气态污染物转化为液态或固态实现富集，优化方向包括控制冷凝温度与时间，避免目标污染物冷凝不完全或与杂质共冷凝，同时搭配低温捕集装置，提升富集选择性。

（二）检测系统与干扰消除优化

低浓度特征污染物检测易受基质中杂质干扰，导致检测信号失真、数据偏差，需通过检测系统优化与干扰消除技术，提升信号识别能力与抗干扰能力。

检测系统优化：一方面优化仪器核心参数，如 GC-MS 技术中优化色谱柱分离效率、质谱仪离子源温度与检测模式，提升目标污染物信号强度；另一方面选用高灵敏度检测器，如 HPLC 联用荧光检测器、质谱检测器，替代常规紫外检测器，降低检测限。同时，采用标准加入法、内标法等定量方法，替代外标法，减少基质效应对定量结果的影响，提升低浓度污染物定量准确性。

干扰消除技术：针对基质干扰，可通过样品预处理优化（如净化、分离）去

除杂质，例如采用硅胶柱、氧化铝柱等净化装置，分离目标污染物与干扰杂质；针对共存污染物干扰，选用高选择性分离材料（如专用色谱柱），优化分离条件，实现目标污染物与共存干扰物的有效分离。此外，通过空白试验、平行样测试、加标回收试验等质量控制手段，验证干扰消除效果，及时修正数据偏差。

（三）现场与应急监测难点适配

现场与应急监测中，低浓度特征污染物的快速、精准监测面临环境条件复杂、监测时间紧迫等额外难点，需采用便携式富集-检测一体化设备，优化现场操作流程。例如，便携式 GC-MS 设备搭配在线热脱附装置，可实现现场低浓度 VOCs 的快速富集与检测；便携式 ICP-MS 设备优化进样系统，可实现现场痕量重金属的快速监测。同时，现场监测需做好环境条件控制（如温度、湿度），避免外界环境对富集效率与检测精度的影响，确保应急监测数据能够为污染处置提供及时支撑。

特征污染物监测技术的精准应用与难点突破，是精准管控行业污染、保障生态环境安全的核心支撑。通过结合行业工艺精准识别特征污染物，选用 GC-MS、HPLC 等高效精准监测技术，优化低浓度污染物富集与检测系统，可有效解决特征污染物监测中的核心难题。随着监测技术的迭代升级，富集-检测一体化、智能化、便携式设备将逐步普及，进一步提升特征污染物监测的效率与精度，为不同行业污染溯源、风险防控与治理效果评估提供更有力的技术保障，推动大气环境治理向精细化、精准化方向迈进。

第四节 空气质量自动监测与遥感技术

空气质量自动监测与遥感技术是大气环境监测体系的重要组成部分，突破了传统手工监测与定点监测的时空限制，实现了大气污染的全天候、大范围、立体化监测。自动监测系统凭借实时性与连续性优势，精准捕捉污染物浓度动态变化；遥感技术依托非接触式监测特性，快速掌握区域污染分布与扩散趋势。两类技术协同发力，构建起“点面结合、天地一体”的监测网络，显著提升了大气污染预警、溯源与管控的智能化水平。

一、自动监测系统：由采样、分析、数据传输模块组成的全天候监测体系

空气质量自动监测系统是基于自动化仪器、计算机技术与通信网络构建的一体化监测体系，核心由采样模块、分析模块、数据传输模块及质量控制模块组成，可实现对常规污染物与特征污染物的 24 小时连续监测、数据自动处理与实时上传，是当前环境空气常规监测的核心手段。

（一）系统核心模块构成与功能

各模块相互衔接、协同运行，形成闭环监测链路，确保监测数据的连续性、准确性与可靠性。采样模块作为系统前端，核心功能是采集环境空气样品并去除杂质干扰，为分析模块提供合格样品，技术上需保证采样流量稳定，具备防雨雪、防颗粒物堵塞功能以适配不同环境条件，关键组件包括采样总管、PM₁₀/PM_{2.5} 专用切割器、除湿装置及过滤器。分析模块是核心处理单元，负责对样品中目标污染物进行自动定量分析，要求设备灵敏度高、稳定性强，符合国家监测技术规范且支持多参数同步监测，常用设备涵盖 SO₂ 紫外荧光分析仪、NO_x 化学发光分析仪、PM_{2.5} β 射线分析仪及 VOCs 在线气相色谱仪等。数据传输模块承担数据实时上传与共享职责，需满足传输速率快、抗干扰能力强的要求，确保数据传输正确率不低于 95% 且支持断点续传，依托数据采集器、4G/5G 通信模块、光纤传输设备及远程监控终端实现功能。质量控制模块贯穿监测全流程，通过定期自动校准、空白试验与平行样测试保障数据质量，数据异常时可自动报警，关键设备包括标准气体发生器、自动校准装置、恒温恒湿控制系统及质量控制软件。

（二）系统运行原理与流程

自动监测系统的运行遵循“采样－预处理－分析－数据传输－质量审核”的标准化流程。首先，采样模块通过采样总管采集环境空气，经切割器分离不同粒径颗粒物（如 PM₁₀、PM_{2.5}），再通过除湿、过滤装置去除样品中的水分与大颗粒杂质，避免干扰分析结果；随后，预处理后的样品进入分析模块，不同污染物对应专属分析仪，基于光谱、电化学等原理完成浓度定量分析，实时生成原始监测数据；数据传输模块通过通信网络将原始数据快速上传至区域环境监测监控平台，同时完成数据格式标准化处理与存储；质量控制模块同步运行，定期用标准气体校准仪器，监控仪器运行状态，若出现数据异常（如浓度超标、仪器故障），

立即触发报警机制，提醒工作人员排查处理，确保系统持续稳定运行。

（三）系统适用场景与部署要求

自动监测系统广泛应用于城市环境空气常规监测、工业园区污染监控、交通干道污染物监测等场景，根据监测目标与环境特点，部署要求存在差异。城市常规监测站点需均匀布设，覆盖不同功能区（居民区、工业区、商业区），避开污染源直接影响区域，确保监测数据具有区域代表性；工业园区站点需靠近核心污染源排放口下游，重点监测特征污染物（如 VOCs、重金属），实现污染源排放实时管控；交通干道站点需设置在道路两侧，监测机动车尾气排放带来的污染物浓度变化。同时，站点部署需满足供电稳定、通信畅通、环境安全等条件，保障系统全天候不间断运行。

二、遥感监测应用：卫星遥感、无人机遥感监测大气污染大范围分布与扩散趋势

大气污染遥感监测技术基于电磁波辐射与散射原理，通过卫星、无人机等遥感平台搭载专用传感器，非接触式获取大气污染物的空间分布、浓度变化及扩散趋势信息，具备监测范围广、速度快、无地面站点限制等优势，可有效弥补地面自动监测系统的空间覆盖不足问题，形成“天地一体”的监测格局。

（一）卫星遥感监测技术及应用

卫星遥感监测以人造卫星为平台，从太空对大气环境进行大范围、长期连续观测，核心用于监测区域性、全球性大气污染状况与气候变化相关指标，是宏观污染趋势研判的重要手段。

核心原理：卫星搭载的高光谱传感器、红外传感器等设备，可捕捉大气中不同污染物对特定波长电磁波的吸收、散射特性，通过反演算法将电磁波信号转化为污染物浓度数据，同时获取污染物空间分布图像。不同污染物对应特定的光谱特征，例如，颗粒物通过散射可见光与近红外光形成特征信号， SO_2 、 NO_x 通过吸收红外光形成特征光谱，据此可实现多污染物同步监测。

主要应用：聚焦区域性大气污染分布与扩散趋势监测，可快速识别污染高值区域，追踪污染物跨区域传输路径，为区域联防联控提供数据支撑；长期监测可获取大气污染年际、季节变化趋势，为环境政策制定与治理效果评估提供宏观依据；同时，可监测温室气体（如 CO_2 、甲烷）浓度变化，为气候变化应对提供数

据参考。其局限性在于空间分辨率相对较低，难以精准捕捉小范围、点源污染细节，需结合地面监测数据验证。

（二）无人机遥感监测技术及应用

无人机遥感监测以无人机为平台，搭载小型化、高精度传感器，实现中低空、小范围大气污染精准监测，具备机动性强、分辨率高、响应快的特点，是卫星遥感与地面监测的重要补充，广泛应用于应急监测与精准溯源场景。

核心原理：无人机可灵活调整飞行高度与路径，搭载的传感器（如气体传感器、高光谱成像仪、颗粒物监测仪）可近距离捕捉污染物浓度数据与空间分布图像，部分设备支持实时传输监测数据，实现污染现场动态追踪。相较于卫星遥感，无人机遥感空间分辨率更高，可精准识别小范围污染区域；相较于地面监测，其覆盖范围更广，可到达地面站点难以覆盖的区域（如山区、水域、高空污染源）。

主要应用：在应急监测中，针对突发环境污染事件（如化学品泄漏、秸秆焚烧、工业事故），无人机可快速抵达现场，监测污染范围、浓度峰值与扩散方向，为应急处置方案制定提供实时数据；在精准溯源中，可围绕工业园区、污染源排放口开展巡航监测，精准定位污染源头，识别隐蔽排放行为；同时，可用于污染治理效果评估，通过对比治理前后的监测数据，量化治理成效。其局限性在于续航时间有限，适合小范围监测，大范围应用需多架无人机协同作业。

（三）两类遥感技术的协同应用

卫星遥感与无人机遥感并非孤立应用，二者协同可实现“宏观－微观”结合的全方位监测。卫星遥感提供区域性宏观污染分布与扩散趋势，锁定污染高发区域；无人机遥感针对高发区域开展精准巡航，聚焦污染源头与局部扩散细节，补充卫星遥感分辨率不足的短板；同时，两类技术获取的数据可与地面自动监测系统数据相互验证，修正监测误差，提升数据可靠性，为大气污染精准防控提供多维度、全方位的数据支撑。

三、技术优势：实现监测数据实时传输与动态更新，提升区域污染预警能力

空气质量自动监测与遥感技术相较于传统监测技术，在监测效率、覆盖范围、数据应用等方面具备显著优势，核心体现为数据实时传输与动态更新，能够快速捕捉污染变化、精准预警污染风险，为大气污染防治提供高效支撑，推动环境管

理向智能化、精准化转型。

（一）突破时空限制，提升监测覆盖效能

两类技术有效突破了传统手工监测“定点、定时、人工操作”的局限，实现监测范围与时间的全面覆盖。自动监测系统可24小时不间断运行，无需人工干预，精准捕捉污染物浓度的日内变化、峰值时段与季节波动，避免了手工监测频次不足导致的数据缺失；卫星遥感可实现全球性、区域性大范围监测，无地面站点限制，能够覆盖偏远地区、海洋、高空等地面监测难以触及的区域；无人机遥感具备高机动性，可灵活应对复杂地形与小范围污染监测需求，三者结合构建起“点（地面站点）-线（无人机巡航）-面（卫星遥感）”一体化监测网络，实现大气污染无死角监测。

（二）实时传输动态更新，强化数据应用价值

数据的实时性与动态性是两类技术的核心优势，显著提升了监测数据的应用价值。自动监测系统通过4G/5G、光纤等通信技术，将监测数据实时上传至监控平台，实现数据分钟级更新，工作人员可远程实时掌握污染物浓度变化动态；遥感技术可快速获取污染分布图像与扩散趋势数据，短时间内完成区域污染状况研判。实时动态的数据不仅为环境执法、污染源管控提供了及时依据，还可支撑污染溯源模型构建，通过分析数据变化规律，精准识别污染来源与传输路径，避免污染防治工作盲目开展，提升管控效率。

（三）提升预警能力，推动防控关口前移

自动监测与遥感技术的协同应用，大幅提升了区域大气污染预警能力，推动污染防控从“被动应对”向“主动预防”转型。基于实时监测数据与历史数据，结合气象条件、地形特征构建污染预警模型，可精准预判污染物浓度变化趋势，当浓度接近预警阈值时，系统自动触发分级预警机制，及时向相关部门与公众发布预警信息；针对突发污染事件，无人机遥感可快速抵达现场，实时追踪污染扩散方向与范围，为应急处置方案制定、人员疏散提供宝贵时间；在跨区域污染传输监测中，卫星遥感可提前捕捉污染迁移信号，为区域联防联控提供预警支撑，有效降低污染影响范围与危害程度。

（四）降低人工成本，保障监测规范性

自动监测与遥感技术大幅减少了人工干预，降低了监测工作的人力成本与人为误差，保障了监测工作的规范性与数据可靠性。自动监测系统实现采样、分析、

数据处理全流程自动化，替代了传统手工采样、实验室分析的繁琐流程，避免了人为操作失误对数据的影响；遥感技术采用非接触式监测，无需工作人员现场作业，尤其适用于恶劣环境与危险区域的污染监测，保障了监测人员的安全。同时，两类技术均遵循标准化运行流程与质量控制规范，监测数据的准确性、可比性与权威性显著提升，为环境决策提供了可靠支撑。

空气质量自动监测与遥感技术的发展与应用，推动大气环境监测体系实现了从“点监测”到“面监测”、从“静态监测”到“动态监测”、从“人工监测”到“智能监测”的跨越。通过自动监测系统的全天候连续监测与遥感技术的大范围精准探测，构建起“天地一体”的智能化监测网络，不仅提升了大气污染监测的效率与精度，更强化了区域污染预警、溯源与联防联控能力。随着人工智能、大数据技术与监测技术的深度融合，未来监测系统将实现更精准的污染预判、更高效的协同管控，为大气环境质量持续改善与美丽中国建设提供更加强有力的技术保障。

第五节 监测质量保证与数据分析应用

监测质量保证是大气环境监测工作的核心底线，直接决定监测数据的可靠性与权威性；数据分析应用则是挖掘监测数据价值、转化监测成果的关键环节，为空气质量管控与污染防治提供科学依据。随着大气环境监测技术向自动化、智能化升级，质量控制需适配技术发展强化全流程管控，数据分析需结合大数据手段提升挖掘深度。

一、质量控制措施：自动监测设备定期校准、零点漂移修正、平行样比对

大气环境监测的质量控制需贯穿监测全流程，聚焦自动监测设备运行、数据生成等关键环节，通过定期校准、零点漂移修正、平行样比对等针对性措施，消除系统误差与随机误差，确保监测数据符合准确性、完整性、代表性、可比性与合法性要求，为数据分析与应用奠定坚实基础。

（一）自动监测设备定期校准

自动监测设备的精准度直接影响监测数据质量，定期校准是保障设备处于最

佳工作状态、规避系统误差的核心措施，需遵循国家计量校准规范与监测技术标准，明确校准周期、方法与指标，确保校准流程标准化、可追溯。

校准工作需覆盖核心监测设备与辅助组件，针对不同类型设备制定差异化校准方案：气体分析仪（如 SO_2 紫外荧光分析仪、 NO_x 化学发光分析仪）需采用标准气体进行校准，校准周期分为日常校准与定期校准，日常校准每日开展 1—2 次，采用零点气体与跨度气体校准仪器响应值；定期校准每月至少 1 次，选用有证标准物质，优化校准参数以确保仪器测量范围、灵敏度符合要求。颗粒物监测设备（如 β 射线分析仪、重量法采样器）需定期校准采样流量、切割器粒径准确性， β 射线分析仪还需校准射线源强度与探测器灵敏度，重量法采样器需校准天平精度与采样流量稳定性。校准完成后需详细记录校准数据、仪器状态、操作人员等信息，粘贴校准标识，明确校准有效期，建立设备校准档案。

（二）零点漂移修正与日常维护

自动监测设备在长期运行过程中，易受环境温度、湿度、气压及仪器组件老化影响，出现零点漂移现象，导致监测数据偏差，需通过常态化零点漂移修正与设备维护，保障数据准确性与设备稳定性。

零点漂移修正需结合设备类型与运行工况开展，气体分析仪每日开机后、监测过程中需定期通入零点气体（如高纯氮气），修正仪器零点响应值，若漂移量超过允许范围，需及时排查原因并进行调整，必要时暂停监测并开展全面校准。颗粒物监测设备需定期清洁采样切割器、过滤器及检测部件，去除积尘与杂质，避免堵塞导致采样流量波动，同时修正环境温度、气压对采样体积的影响，确保监测数据精准。日常维护还包括检查设备供电、通信系统稳定性，清洁光学部件，更换损耗组件（如滤膜、吸附剂），及时排查设备故障，建立维护档案，确保设备长期稳定运行。

（三）平行样比对与质量审核

平行样比对是验证监测数据精密度、消除人为误差与随机误差的重要手段，质量审核则通过全流程数据核查，确保监测成果合法合规、可追溯，二者共同构成质量控制的闭环管理。

平行样比对可分为实验室平行样比对与现场平行样比对，实验室分析时需对同一批次样品设置平行样，平行样数量不低于样品总量的 10%，计算平行样相对偏差，若偏差超过允许范围，需重新分析并排查原因；现场自动监测时，可通过

同一站点多台同类型设备同步监测，或同一设备不同时段重复采样监测，对比监测结果一致性。质量审核涵盖数据采集、传输、处理、报告输出全环节，审核内容包括采样记录完整性、校准与维护记录规范性、数据异常处理合理性、报告格式合规性等，对审核发现的问题及时整改，建立审核档案，确保监测数据全流程可追溯。这两项措施与自动设备定期校准、零点漂移修正相互配合，形成闭环质量管控：自动设备定期校准需采用有证标准物质按周期开展，记录完整可追溯，适用于气体分析仪、颗粒物监测仪等各类设备，核心目标是消除系统误差、保障设备精准度；零点漂移修正需定期通入零点气体调整漂移量，超范围及时处理，适配各类自动监测设备日常运行，用于补偿设备运行偏差、稳定数据输出；平行样比对与全流程质量审核则分别聚焦数据精密度与全流程合规性，前者保障数据无随机误差，后者确保数据合法可追溯，共同筑牢监测数据质量防线。

二、数据分析方法：趋势分析、来源解析、污染负荷评估等数据挖掘技术

大气环境监测数据量大、维度丰富，需通过科学的数据分析方法开展数据挖掘，从海量数据中提取污染变化规律、来源特征与负荷分布，将原始数据转化为有价值的决策信息。趋势分析、来源解析、污染负荷评估是三类核心数据分析方法，适配不同的应用需求，相互补充形成完整的数据分析体系。

（一）趋势分析

趋势分析是通过梳理不同时间尺度的监测数据，研判大气污染物浓度变化规律与发展态势，为污染防治效果评估与政策优化提供依据，核心在于数据的连续性与标准化处理。

趋势分析可按时间尺度分为日内趋势分析、季节趋势分析与年际趋势分析：日内趋势分析聚焦污染物浓度的日内波动特征，结合污染源排放规律（如交通高峰、工业生产时段），识别浓度峰值时段与成因；季节趋势分析通过对比不同季节污染物浓度变化，结合气象条件（如风力、降水、温度），研判季节因素对污染的影响；年际趋势分析基于长期监测数据，评估污染防治政策实施效果，预判污染变化趋势。分析方法可采用统计分析法与可视化分析法，统计分析法通过计算平均值、标准差、变化率等指标，量化污染物浓度变化幅度；可视化分析法通过绘制折线图、柱状图、热力图等，直观呈现污染变化规律，辅助趋势研判。

（二）来源解析

来源解析是精准识别大气污染物核心来源、明确不同来源贡献比例的关键技术，为靶向污染管控提供科学依据，核心在于结合多维度监测数据与溯源模型，实现污染来源的精准定位。

常用解析方法包括化学质量平衡法、正定矩阵因子分解法、受体模型法等，均基于“受体－来源”的对应关系开展分析：通过监测受体（环境空气）中污染物的组分特征，结合不同污染源的排放指纹（如工业源、交通源、扬尘源的污染物组分差异），构建溯源模型，计算不同污染源对受体污染物的贡献比例。解析过程中需结合常规污染物与特征污染物监测数据，如通过 VOCs 组分分析识别工业源与交通源贡献，通过重金属组分分析识别冶金源与扬尘源贡献，同时结合遥感监测与地面监测数据，验证来源解析结果的准确性。来源解析结果可明确核心污染来源，为污染源精准管控、产业结构优化提供靶向依据。

（三）污染负荷评估

污染负荷评估是量化区域大气污染程度、明确污染防控重点区域与指标的重要方法，核心在于结合监测数据与区域特征，构建科学的评估体系，实现污染负荷的精准量化。

评估内容包括污染浓度负荷评估与污染影响负荷评估：污染浓度负荷评估通过计算区域内污染物平均浓度、超标频次、超标幅度等指标，量化区域污染严重程度，识别污染高负荷区域；污染影响负荷评估结合人口密度、生态敏感区分布等，评估污染对人体健康与生态环境的潜在影响，明确重点防控区域。评估方法可采用综合指数法，通过构建污染负荷综合指数，整合多污染物监测数据，全面反映区域污染负荷状况；同时结合空间插值法，绘制污染负荷空间分布图，直观呈现污染负荷的空间分布特征，为区域污染联防联控、防控资源优化配置提供依据。

三、应用方向：支撑空气质量日报 / 周报发布、污染预警与防治效果评估

大气环境监测数据经质量控制与分析挖掘后，需转化为实际应用成果，核心应用方向包括空气质量信息发布、污染预警、防治效果评估，同时为环境政策制定、环境执法监管提供支撑，实现监测成果的高效转化，推动大气污染防治工作精准开展。

（一）支撑空气质量日报 / 周报发布

空气质量日报 / 周报发布是保障公众知情权、引导公众健康出行的重要途径，核心在于基于标准化监测数据，形成通俗易懂、准确权威的空气质量信息，向公众与社会公开。

发布内容需涵盖核心监测指标、空气质量等级、首要污染物及健康提示，核心监测指标包括 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO、O₃ 等六项常规污染物，通过计算空气质量指数（AQI）确定空气质量等级（优、良、轻度污染、中度污染、重度污染、严重污染），明确首要污染物及超标原因。发布流程需遵循“数据审核－分析研判－信息编制－发布公开”的标准化流程，确保发布信息的准确性与时效性，日报需每日定时发布前一日空气质量状况，周报需每周发布当周空气质量汇总分析与趋势预判。同时，可结合公众需求，补充污染防控建议与健康防护提示，提升信息发布的实用性。

（二）支撑污染预警与应急处置

基于监测数据与分析结果开展污染预警，是推动污染防控关口前移、降低污染危害的关键手段，可为突发污染事件应急处置提供实时数据支撑，提升应急响应效率。

污染预警需结合趋势分析与阈值设定，构建分级预警机制，根据污染物浓度变化趋势与超标幅度，分为蓝色、黄色、橙色、红色四级预警，不同预警级别对应差异化的防控措施：低级别预警时，发布污染提示信息，提醒公众做好防护，引导污染源减少排放；高级别预警时，启动应急响应预案，采取工业企业限产停产、机动车限行、扬尘管控等强制措施，遏制污染加剧。针对突发环境污染事件，通过实时监测数据与数据分析，快速研判污染范围、浓度峰值、扩散方向，为应急处置方案制定、人员疏散、污染治理提供实时数据支撑，最大限度降低污染危害。

（三）支撑污染防治效果评估

污染防治效果评估是检验污染防控措施有效性、优化防控策略的重要依据，核心在于通过对比分析防治措施实施前后的监测数据，量化治理成效，为政策调整与措施优化提供支撑。

评估内容包括单项措施效果评估与综合防治效果评估：单项措施效果评估针对特定防控措施（如工业源治理、机动车管控、扬尘治理），对比措施实施前后对应污染物浓度变化，量化措施治理成效；综合防治效果评估结合区域空气质量

整体变化，评估污染防治政策、产业结构调整、能源结构优化等综合措施的实施效果。评估方法采用趋势分析法与对比分析法，通过计算污染物浓度下降率、超标频次减少量等指标，量化治理成效，同时结合来源解析结果，验证防控措施对核心污染源的管控效果。评估结果可用于优化污染防治策略，调整防控重点，提升污染治理的针对性与有效性，推动区域空气质量持续改善。

监测质量保证与数据分析应用是大气环境监测体系的“生命线”与“价值转换器”，质量控制措施为监测数据提供可靠性保障，数据分析技术挖掘数据核心价值，二者协同发力实现监测成果的高效转化。通过标准化质量控制、科学化数据分析，监测数据可有效支撑空气质量信息发布、污染预警与防治效果评估，为大气污染精准防控、环境政策制定提供坚实支撑。随着大数据、人工智能技术与监测技术的深度融合，未来质量控制将实现智能化全流程管控，数据分析将实现更精准的趋势预判与来源定位，进一步提升大气环境监测的价值，助力生态环境质量持续改善与美丽中国建设。

第三章 水环境监测技术

第一节 水质监测指标体系

水质监测指标体系是开展水环境监测、评估水体质量与生态健康状况的核心依据，通过选取代表性指标，系统反映水体受污染程度、理化特性及生态完整性，为水污染防控、水环境治理与生态保护提供科学支撑。水环境复杂多变，污染物形态与影响机制各异，需构建涵盖物理、化学、生物三大维度的综合指标体系，实现对水体质量的全面、精准评价。

一、物理指标：水温、浊度、色度等感官与物理性质相关指标

水质物理指标是反映水体物理性质的直观指标，多通过感官判断或简单仪器测量获取，具有监测便捷、响应快速的特点，可初步判断水体受污染程度与生态环境状况，是水质监测的基础环节。这类指标虽不直接反映污染物成分，但能间接指示污染物输入与水体自净能力，为后续化学、生物指标监测提供参考依据。

（一）核心物理指标及特性

常见水质物理指标包括水温、浊度、色度、透明度、电导率等，各类指标的核心特性、监测意义与影响因素存在显著差异，具体如下表所示：

指标名称	核心特性	监测意义	主要影响因素
水温	水体冷热程度，单位℃，影响水体理化与生物过程	关联水体溶解氧含量、化学反应速率及水生生物活性，是生态评价基础指标	气候条件、季节变化、工业温排水、水体深度
浊度	水体中悬浮颗粒物对光线的散射程度，单位 NTU	反映悬浮污染物含量，关联水体透明度与溶解氧水平，指示污染输入状况	水土流失、工业废水、生活污水、水生生物繁殖
色度	水体呈现的颜色深浅与色调，单位度，分真色与表色	直观反映水体受有机物、重金属等污染程度，判断水质感官质量	水生植物色素、腐殖质、重金属化合物、工业染料废水
透明度	水体允许光线穿透的深度，单位 m，与浊度负相关	反映水体清澈程度，影响水生植物光合作用与水体生态平衡	悬浮颗粒物含量、浮游生物量、水体颜色

续表

指标名称	核心特性	监测意义	主要影响因素
电导率	水体传导电流的能力，单位 $\mu\text{ S/cm}$ ，反映离子含量	指示水体中溶解性盐类与离子型污染物含量，判断水体矿化度	地质背景、工业废水、农业面源污染、海水入侵

（二）监测要点与评价标准

物理指标监测需遵循标准化流程，确保数据代表性与准确性：水温监测需在不同水体深度、不同时段同步开展，避免受表层气温与局部热源影响；浊度与色度监测需在采样后及时分析，防止悬浮颗粒物沉降或色素分解导致数据偏差；电导率监测需控制水温影响，必要时进行温度校正，确保数据可比性。

评价标准需结合水体功能定位（如饮用水源地、地表水、景观水体）制定，地表水物理指标严格遵循《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002）：

浊度（NTU）：Ⅰ类水体 ≤ 1 ，Ⅱ类 ≤ 3 ，Ⅲ类 ≤ 3 ；部分地方/水厂对饮用水源地原水设内控值（如Ⅰ类 ≤ 5 、Ⅱ类 ≤ 10 ），仅作内部管控参考中国环境监测总站。

色度（度）：Ⅰ - Ⅴ类水体均 ≤ 15 ，且不得呈现其他异色中国环境监测总站。

通过与 GB 3838-2002 标准限值比对，可快速判断水体物理性质是否达标，为后续污染溯源与治理提供基础依据。

二、化学指标：pH 值、COD、BOD、氨氮、重金属等污染特征指标

水质化学指标是反映水体中化学污染物种类与含量的核心指标，能精准揭示水体受污染的类型与程度，是水质监测与评价的核心环节。这类指标涵盖无机污染物、有机污染物、重金属等多个类别，监测结果直接支撑水污染溯源、总量控制与治理效果评估，对水环境管理具有重要指导意义。

（一）无机与有机污染指标

无机污染指标聚焦水体中无机离子、酸碱物质与营养盐，有机污染指标则反映水体中有机物含量与可降解性，两类指标共同构成化学污染评价的核心框架。

核心无机指标包括 pH 值、氨氮、总氮、总磷、溶解氧（DO）等：pH 值反映水体酸碱程度，正常范围为 6.5-8.5，偏离该范围会影响水生生物生存与水体自净能力，主要受工业酸碱废水、农业化肥流失影响；氨氮是水体中含氮有机物分解产物，超标会导致水体富营养化，诱发藻类暴发，是水体受生活污水、农业面源污染的重要指示指标；总氮、总磷是水体富营养化的关键驱动因子，其含量直

接决定水体藻类繁殖能力，关联水体生态健康状况；溶解氧是水体中溶解的氧气含量，反映水体自净能力与有机污染程度，含量过低会导致水生生物缺氧死亡，是评价水体生态承载力的重要指标。

核心有机污染指标包括化学需氧量（COD）、生化需氧量（BOD）、总有机碳（TOC）等：COD 指水体中能被强氧化剂氧化的有机物总量，反映水体有机污染总体水平，适用于快速监测与总量评估，但无法区分可生物降解与难降解有机物；BOD 指水体中微生物分解有机物消耗的溶解氧量，反映可生物降解有机物含量，与 COD 协同使用可判断有机物生物降解性；TOC 通过测定水体中有机碳元素总量反映有机物含量，监测速度快、干扰小，适用于批量样品分析与在线监测。

（二）重金属与其他特征指标

重金属指标是一类具有累积毒性的特征污染物，常见包括铅、汞、镉、铬、砷等，这类污染物不易被微生物降解，易在水生生物体内富集，通过食物链危害人体健康，是水质监测的重点控制指标。重金属污染主要来源于工业废水（如冶金、电镀、化工废水）、矿山开采与含重金属的农药化肥施用，监测需采用高灵敏度方法，确保痕量重金属精准定量。

其他特征化学指标包括挥发酚、氰化物、硫化物等，这类指标多具有强毒性，超标会对水体生态与人体健康造成直接危害，主要来源于工业生产废水，需针对特定行业开展专项监测。例如，挥发酚主要来自焦化、造纸、化工行业，依据《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002），Ⅰ - Ⅱ 类水体挥发酚限值 ≤ 0.002 mg/L，Ⅲ 类水体限值 ≤ 0.005 mg/L，需严格控制。

（三）监测与评价核心要求

化学指标监测需注重样品预处理与方法选择，例如重金属监测需通过消解去除样品基质干扰，采用原子吸收光谱法、电感耦合等离子体质谱法等精准定量；COD、BOD 监测需严格控制反应条件（如温度、时间、试剂用量），确保数据准确性。评价需结合《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002）、饮用水源地水质相关要求等，针对不同指标设定分级限值，例如 COD（mg/L）在Ⅰ类水体中 ≤ 15 ，Ⅱ类 ≤ 15 ，Ⅲ类 ≤ 20 ；氨氮（mg/L，以 N 计）Ⅰ类 ≤ 0.15 ，Ⅱ类 ≤ 0.5 ，Ⅲ类 ≤ 1.0 ，通过分级评价明确水体污染程度与治理优先级。

三、生物指标：细菌总数、大肠菌群、水生生物多样性等生态健康指标

水质生物指标是反映水体生态健康状况的综合性指标，通过监测水体中微生物、水生生物的种类、数量与群落结构，间接评估水体污染程度与生态完整性。这类指标能反映污染物长期累积的生态效应，弥补物理、化学指标仅能反映瞬时污染状况的不足，是水环境生态评价的重要依据。

（一）微生物指标

微生物指标主要反映水体受病原微生物污染的状况，直接关联水体饮用与接触安全性，核心指标包括细菌总数、总大肠菌群、耐热大肠菌群等。细菌总数指 1mL 水体中所含细菌的总数，反映水体受有机物污染的总体程度，数值越高说明水体污染越严重；总大肠菌群与耐热大肠菌群是粪便污染的特异性指示菌，其检出说明水体可能受人类或动物粪便污染，存在病原微生物传播风险，是饮用水源地监测的必测指标。

微生物指标监测需严格遵循无菌操作流程，避免样品污染，常用监测方法包括平板计数法、滤膜法、快速检测法等。评价需严格遵循《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002）与《生活饮用水卫生标准》（GB 5749-2022）要求，针对饮用水源地与地表水分别设定微生物指标限值。其中，集中式生活饮用水水源地执行 GB 5749-2022，要求总大肠菌群不得检出、耐热大肠菌群不得检出；地表水执行 GB 3838-2002，粪大肠菌群限值为 I - II 类 ≤ 200 个 / L、III 类 ≤ 1000 个 / L，以此保障水体生态安全与饮用水公共卫生安全。

（二）水生生物指标

水生生物指标通过监测浮游生物、底栖生物、鱼类等水生生物的群落特征，评估水体生态健康状况与自净能力，核心包括生物多样性、优势种、生物完整性指数等。不同水生生物对污染的耐受力不同，敏感物种（如部分硅藻、石蛾）的减少或消失，指示水体污染严重；耐污物种（如颤蚓、蚊幼虫）的大量繁殖，可作为水体污染的重要信号。

生物多样性指标通过计算物种丰富度、均匀度等指数，反映水生生物群落结构的稳定性，指数越高说明水体生态系统越健康；生物完整性指数通过整合水生生物的种类、数量、功能性状等指标，综合评价水体生态系统的完整性与受干扰

程度，是水环境生态评价的核心工具。例如，当水体受重金属或有机污染物污染时，鱼类种类减少、畸形率升高，底栖生物群落结构简化，可通过这些特征精准判断水体生态受损状况。

（三）监测与评价的综合性

生物指标监测需结合水体类型与生态特征，选择代表性监测点位与时段，例如浮游生物监测需在春季、夏季藻类繁殖高峰期重点开展，底栖生物监测需选取不同底质类型（泥沙、岩石、淤泥）的区域。评价需注重综合性，结合物理、化学指标监测结果，构建“理化－生物”协同评价体系，全面反映水体质量与生态健康状况。例如，水体中 COD、氨氮超标且底栖生物耐污物种占比高、生物多样性低，说明水体受有机污染严重且生态系统受损，需针对性开展污染治理与生态修复。

水质监测指标体系是水环境监测与管理的核心基础，物理、化学、生物三大类指标相互补充、协同发力，实现对水体物理性质、污染状况与生态健康的全面评价。物理指标提供直观基础判断，化学指标精准揭示污染核心，生物指标反映长期生态效应，三类指标构建的完整框架，为水污染溯源、治理效果评估与生态保护提供科学支撑。随着水环境监测技术向智能化、多参数集成升级，指标体系将不断优化完善，进一步提升对复杂水环境的评价能力，助力水环境质量持续改善与水生态系统良性循环。

第二节 地表水监测技术方法

地表水作为水环境系统的核心组成部分，涵盖河流、湖泊、水库、运河等多种类型，其质量直接关系到饮用水安全、生态系统稳定与经济社会可持续发展。地表水监测技术方法是精准掌握水体污染状况、科学开展水环境管理的关键支撑，需结合地表水流动性强、时空差异大、受外界干扰明显等特点，构建标准化、系统化的监测流程。

一、采样技术：布点原则、采样频次与样品保存方法

采样技术是地表水监测的基础环节，其科学性直接决定监测数据的代表性与准确性。需严格遵循布点原则规范设置监测点位，结合监测目标明确采样频次，

通过科学的样品保存方法减少组分变化，确保采集的样品能真实反映地表水实际质量状况。

（一）布点原则与点位设置

地表水采样布点需遵循代表性、科学性、系统性原则，结合水体类型、流域特征、污染来源及监测目标，选择合理的布点方法，确保点位能全面覆盖监测区域，精准捕捉污染特征。常用布点方法包括断面布点法与网格布点法，两类方法适配不同水体类型与监测需求。

断面布点法主要适用于河流、运河等线性水体，核心是沿水流方向设置不同功能断面，全面反映水体从上游到下游的污染变化趋势。需设置对照断面、控制断面、削减断面三类核心断面：对照断面设置于污染源上游未受污染区域，作为背景值参考；控制断面设置于污染源下游关键位置，监测污染源排放对水体的影响；削减断面设置于污染源下游一定距离处，监测水体自净能力与污染削减效果。断面内点位设置需结合水体宽度、深度确定，宽度较小时可设置单一点位，宽度较大时需在左、中、右岸分别设点，深度方向需在表层、中层、底层同步采样，确保覆盖水体整体。

网格布点法主要适用于湖泊、水库等面状水体，核心是将监测区域划分为均匀网格，在网格节点或中心设置监测点位，确保点位分布均匀，全面反映水体空间污染差异。网格大小需结合监测区域面积与污染状况确定，污染复杂区域可缩小网格密度，增加点位数量；污染相对均匀区域可扩大网格，减少监测成本。同时需结合水体功能区、污染源分布等调整点位，在污染高发区域、功能敏感区域适当加密点位，提升监测针对性。

（二）采样频次与时间

采样频次需结合监测目的、水体污染状况、水文季节变化等因素确定，核心是确保监测数据能反映地表水质量的时空变化规律，满足不同监测需求。常规监测中，河流、运河等流动性水体每月采样 1-2 次，湖泊、水库等静态水体每季度采样 1—2 次，全年采样频次需覆盖丰水期、平水期、枯水期，重点捕捉不同水文条件下的污染变化。

针对污染严重、水质波动大的区域，需适当提高采样频次，每月采样 3-4 次，必要时开展连续监测；针对污染源排放监测，需在排污高峰期同步采样，精准掌握污染源排放对地表水的影响。采样时间需遵循标准化要求，河流监测需在水流

稳定时段开展，避免暴雨、洪水等极端水文事件影响；湖泊、水库监测需兼顾昼夜差异，必要时开展昼夜连续采样，反映水体理化指标的日内变化特征。

（三）样品保存与运输

地表水样品采集后，易受物理、化学、生物作用影响导致组分变化，需及时采取保存措施，控制组分变化幅度，确保样品到达实验室后仍能反映水体实际质量。样品保存方法需结合监测指标特性确定，核心包括冷藏冷冻、添加化学试剂、避光密封等方式。

冷藏冷冻法适用于大多数理化与生物指标，采集后的样品需在 4℃ 冷藏条件下保存，生物样品需在 -20℃ 冷冻保存，抑制微生物活动与化学反应速率，延长样品保质期。添加化学试剂法需针对特定指标开展，例如测定氨氮、总氮的样品可添加硫酸调节 pH 值至小于 2，抑制氨氮挥发与微生物转化；测定重金属的样品可添加硝酸消解，防止重金属吸附沉淀。同时，所有样品需避光密封保存，避免光照导致有机物分解、重金属形态变化，运输过程中需固定样品容器，防止破损泄漏，做好采样记录与样品标识，确保样品可追溯。

二、监测技术：便携式仪器现场监测与实验室精准分析技术结合

地表水监测需结合现场快速监测与实验室精准分析的优势，构建“现场筛查—实验室定量”的协同监测体系。便携式仪器现场监测可快速获取实时数据，及时捕捉污染异常；实验室精准分析可实现低浓度污染物、复杂组分的精准定量，为污染溯源与治理提供核心依据，两类技术互补形成完整监测能力。

（一）便携式仪器现场监测技术

便携式仪器现场监测技术具备响应快速、操作简便、无需复杂预处理的特点，适用于现场快速筛查、应急监测与连续动态监测，核心用于物理指标与部分化学指标的实时测定。常用便携式仪器包括水质多参数分析仪、便携式溶解氧仪、便携式浊度仪、便携式重金属检测仪等。

现场监测需优先测定易变化指标，例如水温、pH 值、浊度、溶解氧等，这类指标受环境影响大，需在采样现场即时测定，避免样品保存运输过程中产生偏差。监测过程中需严格遵循仪器操作规范，定期校准仪器，确保监测数据准确性；针对应急监测场景，可通过便携式仪器快速锁定污染范围、浓度峰值，为应急处置方案制定提供实时数据支撑。同时，现场监测需做好记录，详细标注监测点位、

时间、环境条件、仪器状态等信息，为后续数据审核与分析提供依据。

（二）实验室精准分析技术

实验室精准分析技术是地表水监测的核心手段，适用于需要精准定量、复杂组分分离的监测指标，尤其是低浓度污染物、重金属、持久性有机物等特征指标，可通过标准化的样品预处理与仪器分析流程，实现监测数据的精准化、标准化。

样品预处理是实验室分析的前置环节，核心目的是去除基质干扰、富集目标污染物，常用方法包括过滤、消解、萃取等。过滤法用于去除样品中的悬浮颗粒物，避免干扰仪器检测；消解法适用于重金属、总氮、总磷等指标，通过高温、强酸处理破坏样品基质，使目标污染物转化为可检测形态；萃取法适用于有机污染物监测，通过有机溶剂分离目标有机物，提升检测灵敏度。

仪器分析需结合监测指标特性选择针对性方法，例如重金属监测采用原子吸收光谱法、电感耦合等离子体质谱法，具备高灵敏度、多元素同时测定的优势；有机污染物监测采用气相色谱-质谱联用、高效液相色谱法，实现复杂有机物的分离与定量；常规理化指标采用滴定法、比色法，确保分析结果的准确性与可比性。实验室分析需严格遵循质量控制要求，开展空白试验、平行样比对、标准曲线校准等工作，保障监测数据符合质量标准。

（三）两类技术的协同应用

现场监测与实验室分析并非孤立开展，二者协同配合可显著提升地表水监测的效率与精度。常规监测中，通过现场便携式仪器快速获取水温、pH 值、浊度等基础指标，初步判断水体质量状况，针对异常点位同步采集样品送实验室开展精准分析，明确污染成因；应急监测中，现场监测快速锁定污染范围与核心污染物，实验室分析精准测定污染物浓度、组分，为污染溯源与应急处置提供全面数据支撑。

可通过实验室分析结果校准现场监测数据，优化便携式仪器的监测参数，提升现场监测的准确性；现场监测数据可作为实验室分析的参考依据，优化样品预处理与仪器分析方案，提高实验室分析效率，形成“现场-实验室”双向协同的监测模式。

三、重点关注：流域关键断面、饮用水源地等敏感区域的监测优化

地表水监测需聚焦重点区域，针对流域关键断面、饮用水源地等生态敏感区

域，优化监测方案与技术手段，强化监测的针对性与有效性，确保敏感区域水环境安全。这类区域受污染影响后危害范围广、治理难度大，需通过精细化监测实现风险提前预警、精准管控。

（一）流域关键断面监测优化

流域关键断面包括跨界断面、汇入断面、生态敏感断面等，是反映流域水污染状况、区域污染责任划分、生态健康状况的核心点位，需通过监测方案优化提升数据代表性与精准度。跨界断面监测需结合区域污染特征，加密采样频次，增加特征污染物监测指标，确保能精准反映区域间污染传输情况，为跨界污染联防联控提供依据；汇入断面监测需重点关注支流对干流的污染贡献，同步监测支流与干流水质，分析污染输入强度与影响范围。

生态敏感断面（如鱼类产卵场、湿地保护区）监测需优化指标体系，增加生物指标监测比重，重点关注水生生物多样性、群落结构等生态指标，结合理化指标构建综合评价体系，全面反映断面所在区域的生态健康状况。同时，关键断面需配备自动监测设备，实现 24 小时连续监测，实时捕捉污染浓度变化，提升监测的时效性与动态性。

（二）饮用水源地监测优化

饮用水源地（包括地表水饮用水源地、水库饮用水源地）直接关系到公众饮水安全，需构建最严格的监测体系，优化监测点位、指标与频次，全面防控饮用水安全风险。监测点位设置需覆盖水源地保护区、准保护区及取水口周边区域，在取水口上游设置预警点位，提前捕捉上游污染输入风险；在保护区内均匀布设点位，监测水源地整体质量状况。

监测指标需在常规理化、生物指标基础上，增加重金属、持久性有机物、病原微生物等风险指标，实现全指标覆盖监测；采样频次需显著高于常规监测，取水口周边每日采样监测，保护区每季度开展全指标监测，枯水期、污染高发期适当加密频次。同时，需强化应急监测能力，配备便携式应急监测设备与快速检测试剂，针对突发污染事件能快速响应，及时评估对饮用水源地的影响，保障饮水安全。

（三）其他敏感区域监测优化

除流域关键断面与饮用水源地外，还需针对湖泊富营养化区域、工业园区周边地表水、农业面源污染集中区域等敏感区域优化监测方案。湖泊富营养化区域

需重点监测总氮、总磷、叶绿素 a 等指标，加密采样频次，跟踪藻类繁殖动态，预警水华爆发风险；工业园区周边地表水需增加特征污染物监测，针对园区主导产业设置专属监测指标，强化污染源排放与地表水质量的关联性监测；农业面源污染集中区域需重点监测氨氮、总磷等营养盐指标，结合降雨时段优化采样，捕捉农业面源污染的迁移规律。

地表水监测技术方法的规范应用与优化升级，是精准管控水污染、保障水环境安全的核心支撑。通过科学的采样布点、标准化的样品保存、协同化的监测技术应用，可全面掌握地表水质量的时空变化特征；针对敏感区域的监测优化，能实现污染风险精准预警与靶向管控。随着智能化、自动化监测技术的发展，地表水监测将逐步实现“自动采样－实时监测－智能分析”的全流程智能化，进一步提升监测效率与精度，为流域水环境治理、生态保护与可持续发展提供更加强有力的技术保障。

第三节 地下水监测技术体系

地下水作为水资源的重要组成部分，具有储量稳定、水质优良等特点，是饮用水、工农业生产用水的核心水源之一，同时对维持生态系统平衡、调节区域水文循环具有重要作用。相较于地表水，地下水埋藏于地下含水层中，流动性弱、更新周期长，受污染后隐蔽性强、治理难度大，因此需构建科学完善的监测技术体系，实现对地下水的长期动态管控。

一、监测网络：基于水文地质条件的监测井布局与建设规范

地下水监测网络是开展监测工作的基础载体，其布局合理性与建设规范性直接决定监测数据的代表性与可靠性。需紧密结合区域水文地质条件，精准把握含水层分布、地下水径流方向、补给排泄规律等核心要素，科学布设监测井并严格遵循建设规范，构建覆盖全面、针对性强的监测网络。

（一）监测井布局原则

监测井布局需遵循水文地质适配性、代表性、系统性原则，摒弃地表水监测的均匀布点思路，结合地下水运动特性与污染风险分布精准设点。核心需围绕水文地质单元划分监测区域，以含水层为核心监测对象，确保点位能反映不同含水

层、不同径流区段的地下水质量与水位动态。

针对不同区域特性优化布局：在地下水补给区，需布设补给型监测井，重点监测补给水源对地下水水质、水位的影响；在径流区，沿地下水流向布设系列监测井，追踪污染物迁移路径与浓度变化；在排泄区，增设排泄监测井，掌握地下水与地表水、大气降水的交换规律。同时，需在工业污染源周边、垃圾填埋场、农业种植区等污染高风险区域加密布点，在饮用水源地保护区、生态敏感区设置专属监测井，形成“全域覆盖、重点加密”的布局模式。

（二）监测井布局方法

监测井布局需以详细的水文地质勘察资料为依据，结合监测目标选择针对性方法，核心包括水文地质单元布点法、污染源追踪布点法与功能区布点法，三类方法协同应用构建完整网络。

水文地质单元布点法以完整的水文地质单元为基本单元，根据含水层厚度、岩性、渗透性等参数，在单元内均匀布设控制井，全面掌握单元内地下水整体状况，适用于区域尺度的常规监测。污染源追踪布点法针对已知污染源，沿地下水流向在污染源上游、周边、下游布设监测井，形成污染追踪剖面，精准捕捉污染物扩散范围与迁移速率，适用于污染溯源与风险管控。功能区布点法根据区域用水功能与生态定位，在饮用水源地、工农业用水集中区、生态保护区等功能区针对性设点，满足特定功能的监测需求。

（三）监测井建设规范

监测井建设需严格遵循标准化流程，重点把控井深、井结构、滤水器设置、止水封井等关键环节，防止监测井交叉污染、进水不畅等问题，确保监测数据真实可靠。井深需穿透目标含水层，到达含水层底板以下一定深度，确保能采集到目标含水层的地下水样品，同时避免穿透隔水层导致不同含水层混合污染。

井结构需采用分层设计，依次由井口、井壁管、滤水器、沉淀管组成，井口需高出地面 0.5 米以上并加装密封井盖，防止地表污水、雨水渗入；滤水器需匹配含水层岩性，保证地下水顺畅流入井内，同时阻挡泥沙颗粒进入；沉淀管设置于滤水器下方，用于沉积水中泥沙，避免堵塞滤水器；止水封井需采用优质止水材料，在井壁管与地层间隙、不同含水层之间进行密封，防止含水层间的地下水串流。建设完成后需进行洗井处理，去除井内泥沙、杂质与施工残留污染物，确保监测井正常运行。

二、监测内容：水位、水质指标的长期动态监测

地下水监测内容以水位、水质为核心，聚焦长期动态变化特征，通过持续监测掌握地下水水量稳定性与水质演变规律，及时捕捉异常变化信号，为水资源管理与污染防治提供数据支撑。监测内容需结合地下水特性设定，兼顾基础性与针对性，实现对地下水状况的全面把控。

（一）水位动态监测

地下水位监测是反映地下水水量变化、补给排泄规律的核心手段，同时能间接指示地下水受污染状况，是地下水监测的基础内容。需明确监测频次、时段与精度要求，确保能精准捕捉水位的日内、季节与年际变化。

常规监测中，地下水位每月监测 1-2 次，丰水期、枯水期及灌溉高峰期适当加密至每月 3-4 次，污染高风险区域、水源地保护区需实现每周 1 次监测，必要时配备自动水位监测设备开展 24 小时连续监测。监测时段需选择水流稳定时段，避免降雨、灌溉等短期因素干扰，确保数据代表性。监测精度需控制在 ± 0.01 米以内，采用水位计、测绳等标准化设备，监测时记录水位数值、监测时间、气象条件等信息，长期跟踪分析水位变化趋势，预判地下水超采、漏斗形成等风险。

（二）水质指标监测

地下水水质监测需参照地表水监测指标体系，结合地下水污染特征优化指标设置，涵盖物理、化学、生物三大类指标，同时增加针对性特征指标，实现对水质状况的全面评价。

基础水质指标包括水温、pH 值、浊度、电导率、溶解氧等物理指标，氨氮、总氮、总磷、COD、BOD 等常规化学指标，以及细菌总数、大肠菌群等生物指标，监测频次与地表水常规监测保持一致，每季度 1—2 次。特征指标需结合区域污染风险设定，重点包括挥发性有机物、重金属、硝酸盐、亚硝酸盐、氰化物等，工业污染区域需增加对应行业特征污染物，农业区域重点监测硝酸盐、农药残留等。水质监测需实现长期动态跟踪，分析指标演变规律，及时发现水质异常波动，为污染溯源提供线索。

三、技术要点：地下水样品防污染采集与特殊指标（挥发性有机物）监测技术

地下水监测的核心技术难点是样品防污染与特殊指标精准监测，由于地下水

样品采集过程易受地表污染、井内残留污染影响，且挥发性有机物等特殊指标易挥发、易转化，需通过标准化采集技术与针对性监测方法，确保监测数据准确可靠。

（一）地下水样品防污染采集技术

地下水样品采集需全程遵循防污染原则，从采样设备、采样流程、样品保存等环节严格管控，杜绝外界污染与样品组分变化，确保采集的样品能真实反映地下水水质状况。

采样设备需选用惰性材料，优先使用不锈钢、聚四氟乙烯材质的采样瓶、采样泵，避免使用普通塑料材质，防止设备与样品发生反应或释放污染物。采样前需对采样设备进行清洗消毒，用待采集的地下水样品润洗设备 3 次以上，去除设备残留杂质。采样过程中需控制采样流速，保持缓慢匀速采集，避免搅动井内水体与沉积物，导致样品中悬浮颗粒物增多、污染物形态变化；同时避免采样瓶装满，预留一定空间，减少样品与空气接触面积。

采样后需及时密封样品瓶，做好避光、冷藏处理，针对不同指标采取针对性保存措施，尽快运输至实验室分析，缩短样品保存时间。全程做好采样记录，详细标注监测井编号、采样深度、采样时间、设备状态等信息，确保样品可追溯，同时避免采样人员、采样工具造成交叉污染。

（二）挥发性有机物（VOCs）监测技术

挥发性有机物是地下水常见的特征污染物，多来源于工业废水、垃圾填埋场渗漏、农药化肥使用等，具有易挥发、毒性强、易在体内富集等特点，其监测需突破挥发损失、基质干扰等技术瓶颈，采用针对性的采样与分析方法。

VOCs 采样需采用无顶空采样法或吹扫捕集采样法，最大限度减少样品中 VOCs 的挥发损失。无顶空采样法需使用专用密封采样瓶，采样时使样品充满采样瓶，无气泡残留，密封后立即冷藏保存，抑制 VOCs 挥发；吹扫捕集采样法可在现场或实验室开展，通过惰性气体吹扫样品中的 VOCs，将其捕集至吸附剂中，再通过热脱附将 VOCs 解析出来，实现样品富集，提升检测灵敏度。

分析技术优先选用气相色谱 - 质谱联用（GC-MS）技术，该技术具备分离效果好、灵敏度高、选择性强的特点，可实现多种 VOCs 的同时定性与定量分析。分析过程中需采用外标法或内标法校准，确保定量准确性，同时开展空白试验、平行样比对，消除基质干扰与系统误差。针对低浓度 VOCs 样品，可采用二次富集技术，进一步提升检测灵敏度，满足痕量 VOCs 的监测需求。

（三）其他特殊指标监测要点

除 VOCs 外，地下水监测中还需关注重金属、硝酸盐等特殊指标的监测技术要点。重金属监测需采用酸溶消解技术，将样品中的重金属转化为可检测形态，避免重金属吸附于样品基质中，分析采用原子吸收光谱法、电感耦合等离子体质谱法，确保痕量重金属精准定量。硝酸盐、亚硝酸盐监测需避免样品在保存过程中发生微生物转化，采样后及时冷藏并添加化学试剂抑制微生物活动，分析采用比色法、离子色谱法，确保监测结果准确。

地下水监测技术体系的构建与完善，是保障地下水资源安全、防控污染风险的核心支撑。通过基于水文地质条件的监测网络布局、聚焦水位水质的长期动态监测、强化样品防污染与特殊指标监测技术，可实现对地下水状况的全面、精准、持续管控。相较于地表水监测，地下水监测更强调针对性与规范性，需结合其埋藏特性与污染规律不断优化技术方法。随着智能化、自动化监测技术的融入，未来地下水监测将实现监测井智能化运行、样品采集自动化、数据分析精准化，进一步提升监测效率与预警能力，为地下水资源可持续利用与生态环境保护提供坚实保障。

第四节 废水污染源监测技术

废水污染源是水环境质量恶化的核心诱因，涵盖工业废水、生活污水等主要类型，其排放的污染物种类复杂、浓度波动大，直接威胁地表水、地下水生态系统安全与水资源利用价值。废水污染源监测作为水污染防治的前端管控手段，需精准识别污染源类型与排放特征，采用科学的监测技术实现流量与浓度同步管控，通过规范化监测保障数据真实性，为污染源减排、环境执法与水环境治理提供核心依据。

一、污染源识别：工业废水、生活污水的主要污染物与排放特征

废水污染源识别是开展监测工作的前提，核心是明确不同类型污染源的排放来源、主要污染物种类、排放规律及污染特性，为针对性制定监测方案、优化监测指标提供依据。工业废水与生活污水作为两大核心污染源，在污染物组成与排放特征上存在显著差异，需分类精准识别。

（一）工业废水污染源识别

工业废水来源于各类工业生产过程，其污染物种类与排放特征直接关联生产工艺、原料消耗与产品类型，具有成分复杂、毒性强、浓度波动大、排放点集中等特点。需结合行业类型精准识别核心污染物，同时掌握其排放时段与浓度变化规律。

不同行业工业废水的污染物差异显著：重工业废水（冶金、电镀、化工）以重金属、酸性物质、有毒有机物为核心污染物，如冶金废水含铅、汞、镉等重金属及二氧化硫、氟化氢等酸性气体，电镀废水含铬、镍等重金属与氰化物；轻工业废水（造纸、纺织、食品加工）以有机污染物、悬浮物、色度物质为主，如造纸废水含大量木质素、纤维素等难降解有机物，纺织废水含染料、助剂等特征污染物。排放特征上，工业废水多为连续性排放，部分行业存在间歇性排放特点，排放浓度随生产负荷、工艺调整呈现明显波动，且多通过专用排放口集中排放，污染影响范围集中。

（二）生活污水污染源识别

生活污水来源于居民日常生活活动，涵盖洗漱、烹饪、洗涤、粪便排放等，其污染物组成相对稳定，以有机污染物、营养盐、微生物为核心，具有排放范围广、浓度相对稳定、呈面状或分散排放的特点。

主要污染物包括三类：一是有机污染物，如蛋白质、碳水化合物、脂肪等可生物降解有机物，以 COD、BOD 为核心表征指标；二是营养盐污染物，如氨氮、总氮、总磷等，过量排放易导致受纳水体富营养化，诱发水华、赤潮等生态问题；三是微生物污染物，如细菌总数、大肠菌群等，主要来源于粪便排放，存在病原微生物传播风险。排放特征上，生活污水排放量与人口密度、生活习惯密切相关，呈现明显的日内波动规律，早晚高峰排放量与污染物浓度偏高，且多通过市政污水管网集中收集处理后排放，未纳管区域则呈分散排放状态，污染影响范围较广。

（三）污染源综合识别要点

综合识别需结合污染源排放方式、区域分布与污染影响，明确监测优先级：对排放量大、污染物毒性强、影响范围广的工业污染源，列为重点监测对象，增加特征污染物监测指标与监测频次；对生活污水集中排放的市政管网、污水处理厂进出口，重点监测有机污染物与营养盐指标，掌握处理效率与排放达标情况。同时，需关注混合污染源的识别，即工业废水与生活污水混合排放的区域，需结

合两类污染源的污染物特征，综合判断核心污染因子与贡献比例。

二、监测技术：流量监测与污染物浓度同步监测技术

废水污染源监测的核心是实现流量与污染物浓度的同步监测，通过精准测定废水排放量与污染物浓度，计算污染物排放总量，全面反映污染源排放强度。常用监测技术包括在线监测与采样分析两类，二者协同应用，兼顾实时性与精准性，满足不同监测场景需求。

（一）流量监测技术

流量监测是计算污染物排放总量的基础，需根据排放口类型、废水流量范围、水体流动性等特征，选择针对性的监测方法与设备，确保流量数据准确可靠。常用流量监测技术包括流速仪法、堰槽法、超声波流量计法等，适配不同排放场景。

流速仪法适用于流量稳定、断面规则的排放口，通过测定水流流速与排放口断面面积计算流量，具备操作简便、精度较高的特点，适用于常规现场监测；堰槽法适用于流量较小、水体浑浊度较高的排放口，通过在排放口设置标准堰槽，利用水位与流量的对应关系计算流量，监测稳定性强；超声波流量计法适用于大流量、不规则断面排放口，采用非接触式监测，避免与废水直接接触，减少设备腐蚀与污染，适用于工业废水等腐蚀性较强的场景。流量监测需定期校准设备，确保监测精度，同时记录监测时段、水流状态等信息，结合浓度数据计算排放总量。

（二）污染物浓度同步监测技术

污染物浓度监测需与流量监测同步开展，确保数据时空一致性，核心分为在线监测仪实时监测与现场采样实验室分析两类技术，适配不同监测目标与精度要求。

在线监测仪监测技术具备实时性强、连续监测、数据自动传输的特点，适用于重点污染源的长期动态管控。常用在线监测设备包括 COD 在线监测仪、氨氮在线监测仪、重金属在线监测仪等，通过传感器实时捕捉污染物浓度信号，经数据处理后上传至监控平台，实现浓度异常实时报警。该技术需定期对在线监测仪进行校准、维护，开展空白试验与平行样比对，确保监测数据准确性，适用于工业废水排放口、污水处理厂进出口等重点点位。

现场采样实验室分析技术具备精度高、可实现多指标同步分析的特点，适用于常规监测、污染溯源与应急监测。现场采样需遵循标准化流程，根据污染物特

性选择合适的采样容器与保存方法，避免样品污染与组分变化；实验室分析需结合污染物类型选择针对性方法，如有机污染物采用气相色谱-质谱联用、高效液相色谱法，重金属采用原子吸收光谱法、电感耦合等离子体质谱法，常规理化指标采用滴定法、比色法。该技术可实现低浓度污染物、复杂组分的精准定量，为污染溯源与执法取证提供核心依据。

（三）两类技术协同应用

流量与浓度监测需实现深度协同，在线监测仪可实现流量与浓度的实时同步监测，快速捕捉排放异常；现场采样实验室分析可对在线监测数据进行校准与验证，修正系统误差，提升数据可靠性。常规监测中，通过在线监测实现长期动态管控，每月开展 1-2 次现场采样实验室分析，验证在线监测数据准确性；应急监测中，通过在线监测快速锁定污染范围与浓度峰值，同步开展现场采样分析，精准测定污染物组分与排放总量，为应急处置提供全面数据支撑。

三、监测重点：污染源排放口规范化监测与数据真实性保障

废水污染源监测的核心目标是获取真实、可靠、具有代表性的监测数据，需通过排放口规范化建设、标准化监测流程与全流程质量控制，强化监测重点环节管控，杜绝数据造假与失真，确保监测数据能真实反映污染源排放状况。

（一）污染源排放口规范化监测

排放口规范化是保障监测数据代表性的基础，需按照标准化要求对污染源排放口进行建设与管理，明确监测点位、监测频次与监测流程，确保监测工作有序开展。排放口建设需满足监测需求，设置规范的采样平台、监测断面与防护设施，大流量排放口需设置分流装置，便于现场采样与设备安装。

规范化监测需明确监测点位与频次：工业废水排放口需在总排放口、车间排放口分别设置监测点位，车间排放口重点监测特征污染物，总排放口监测综合污染指标；生活污水排放口需在市政管网节点、污水处理厂进出口设置监测点位。监测频次需结合污染源类型与污染状况确定，重点污染源每月监测 3-4 次，一般污染源每季度监测 1—2 次，排放浓度波动大的污染源需适当加密频次，确保能反映排放规律。同时，需规范监测记录，详细标注监测点位、时间、设备状态、监测数据等信息，确保数据可追溯。

（二）数据真实性保障措施

数据真实性是监测工作的生命线，需通过全流程质量控制、监督检查与技术防控，构建多层次数据保障体系，杜绝人为造假、设备故障导致的数据失真。全流程质量控制需覆盖采样、保存、运输、分析全环节，采样时开展平行样采集，平行样数量不低于样品总量的 10%，实验室分析时开展空白试验、标准曲线校准，确保分析结果准确。

技术防控方面，在线监测设备需加装数据加密传输模块，实现监测数据实时上传至监管平台，杜绝数据篡改；定期对在线监测设备进行现场核查与校准，对比在线数据与实验室分析数据的一致性，偏差超过允许范围时及时排查整改。监督检查方面，建立常态化监督机制，对污染源监测工作进行随机抽查，核查监测记录、设备运行日志与数据报告的一致性，严厉打击数据造假行为。同时，强化监测人员专业培训，提升操作规范性，避免人为操作失误导致的数据偏差。

（三）应急与溯源监测重点

针对突发废水污染事件，需强化应急监测能力，快速响应并开展溯源监测，为污染处置与责任认定提供依据。应急监测需优先采用便携式监测设备，快速测定核心污染物浓度与流量，锁定污染范围与排放源头；溯源监测需结合污染源排放特征与污染物组分，通过对比不同排放口、不同时间段的监测数据，精准定位污染来源，明确污染责任。同时，应急监测数据需及时整理归档，作为应急处置与后续执法的重要依据，确保监测数据的合法性与有效性。

废水污染源监测技术的规范化应用，是精准管控水污染、保障水环境质量的核 心支撑。通过精准识别工业废水与生活污水的污染物特征，采用流量与浓度同步监测技术，强化排放口规范化监测与数据真实性保障，可实现对废水污染源的全流程、精准化管控。相较于地表水、地下水监测，废水污染源监测更强调针对性、实时性与规范性，需结合污染源类型不断优化监测技术与管控措施。随着智能化、信息化技术的融入，未来废水污染源监测将实现在线监测智能化、数据管控精准化、应急响应快速化，进一步提升污染源管控效率，为水环境质量持续改善与水生态系统保护提供坚实保障。

第五节 水环境自动监测系统

水环境自动监测系统是水环境监测技术智能化、信息化发展的核心产物，通过集成自动采样、实时分析、数据传输与质量控制等功能模块，实现对各类水域水质的全天候、连续化、动态化监测，突破了传统人工监测时空受限、效率偏低的短板。该系统可快速捕捉水质异常变化，及时预警污染风险，为水环境管理、污染防控与应急处置提供高效、精准的数据支撑，是构建“全域覆盖、智能管控”水环境监测网络的关键载体。

一、系统构成：水质自动采样器、多参数分析仪、数据传输与质控模块

水环境自动监测系统采用模块化集成设计，核心由水质自动采样器、多参数分析仪、数据传输模块及质量控制模块构成，各模块协同运行、无缝衔接，形成“采样－分析－传输－质控”的全流程自动化监测链路，确保监测数据的实时性、准确性与可靠性。各模块功能定位清晰、技术特性互补，共同支撑系统稳定运行。

（一）水质自动采样器

水质自动采样器作为系统的前端核心设备，承担着水样自动采集、保存与预处理的功能，其性能直接决定后续分析数据的代表性。该设备需适配不同水域水文特征，具备定时采样、定量采样、异常触发采样等多种工作模式，可根据监测需求灵活设定采样参数，满足多样化监测场景。

核心技术特性包括：具备精准的流量计量与采样控制功能，可实现不同深度、不同点位的水样采集，适配河流、湖泊、水库等不同水域的采样需求；采样容器采用惰性材料制成，避免与水样发生化学反应或释放污染物，防止样品污染；配备样品冷藏、避光保存装置，抑制微生物活动与水样组分变化，延长样品保质期；支持自动清洗功能，减少交叉污染，确保每次采样的独立性与准确性。部分高端采样器还具备混合采样、分瓶采样功能，可满足多指标同步分析与样品留存需求，为后续实验室复核提供支撑。

（二）多参数分析仪

多参数分析仪是系统的核心分析单元，负责对采集的水样进行实时检测与指标定量，可同时监测多项水质指标，涵盖物理、化学两大类核心指标，具备检测

速度快、精度高、稳定性强的特点，是实现水质实时监测的关键设备。

设备核心特性与适配指标：采用模块化检测设计，可根据监测需求灵活配置检测模块，常规监测指标包括水温、pH 值、浊度、电导率、溶解氧、COD、氨氮、总氮、总磷等，针对特征污染监测可拓展重金属、挥发性有机物等专项检测模块；检测原理贴合指标特性，采用光谱法、电化学法、滴定法等标准化检测技术，确保检测结果符合国家监测技术规范；具备自动校准、自动清洗功能，可定期对检测传感器进行校准与清洁，消除漂移误差与污染干扰，维持设备检测精度；支持数据实时存储与本地显示，可同步输出检测结果与设备运行状态信息，为后续数据传输与质控提供基础数据。

（三）数据传输与质控模块

数据传输模块与质量控制模块是保障监测数据有效传输、精准管控的核心支撑，二者协同作用，实现数据从设备到监管平台的安全传输与全流程质量把控，杜绝数据篡改、失真与丢失。

数据传输模块采用多元化通信技术，包括 4G/5G、光纤、卫星通信等，可根据监测站点环境条件选择适配的通信方式，确保数据传输的稳定性与时效性。模块具备数据加密、断点续传功能，可实现监测数据、设备运行状态信息的实时上传，传输正确率不低于 95%，同时支持本地数据存储备份，防止极端情况下数据丢失。质量控制模块贯穿监测全流程，内置自动校准、空白试验、平行样比对等质控程序，定期对多参数分析仪进行零点校准、跨度校准，验证检测精度；实时监控设备运行状态，当出现检测异常、设备故障时及时触发报警机制，同步上传异常信息，提醒工作人员排查处理，确保系统监测数据的准确性与合法性。

二、应用场景：河流、湖泊、水库等水域的实时水质监测

水环境自动监测系统具备较强的环境适应性与场景适配性，可根据不同水域的水文特征、功能定位与监测需求，优化系统配置与安装方案，广泛应用于河流、湖泊、水库、饮用水源地等各类水域的实时水质监测，同时适配常规监测、应急监测与专项监测等多种场景，为水环境管理提供全方位数据支撑。

（一）河流水域监测

针对河流流动性强、水质时空变化明显的特征，水环境自动监测系统需优化站点布局与采样策略，重点监测河流干流、支流汇入断面、跨界断面等关键点位，

实时掌握河流水质沿程变化规律与污染迁移特征。系统可设置为定时连续监测模式，同步监测流量与水质指标，计算污染物排放总量，为流域水污染联防联控、跨界污染责任划分提供数据支撑。

在工业污染源下游、市政污水排放口附近等污染高风险区域，系统可开启异常触发采样功能，当水质指标超出预设阈值时，自动加密采样频次，快速捕捉污染峰值与变化趋势，为污染溯源与执法管控提供实时依据。同时，系统可与上游污染源在线监测系统联动，构建“污染源－受纳水体”联动监测体系，实现污染排放与水质响应的精准关联分析。

（二）湖泊、水库水域监测

湖泊、水库等静态水域具备水量大、更新周期长、水体分层明显的特征，易发生富营养化、水华等生态问题，水环境自动监测系统需适配水体分层特性与空间污染差异，优化监测配置。系统可采用多点位、多深度采样设计，同步监测表层、中层、底层水体水质，掌握水体分层污染特征与藻类繁殖动态。

重点监测总氮、总磷、叶绿素 a 等富营养化关键指标，结合水温、溶解氧等环境指标，构建水华预警模型，当指标异常时及时发出预警，为水华防控与应急处置提供时间窗口。针对饮用水源地水库，系统需强化水质安全风险监测，增加重金属、病原微生物等风险指标监测模块，实现饮用水源地全流程实时管控，保障饮水安全。

（三）其他场景适配应用

除常规水域监测外，水环境自动监测系统还可适配多种专项场景：在饮用水源地保护区，系统需按照最高监测标准配置，实现 24 小时不间断监测，重点防控上游污染输入风险，确保水源地水质安全；在工业园区周边水域，系统需拓展特征污染物监测模块，针对园区主导产业排放的特征污染物开展专项监测，强化污染源排放与水域水质的关联性分析；在应急监测场景，可部署移动便携式自动监测系统，快速抵达污染现场，实现污染范围、浓度峰值与扩散趋势的实时监测，为应急处置方案制定提供高效支撑。

三、运行保障：系统日常维护、故障诊断与数据质量控制措施

水环境自动监测系统的稳定运行与数据质量，依赖于完善的运行保障体系，需通过规范化日常维护、快速故障诊断与全流程数据质量控制，及时排查设备隐

患、修正数据偏差，确保系统长期稳定运行，监测数据真实可靠，满足水环境管理与执法应用需求。

（一）系统日常维护

日常维护是保障系统稳定运行的基础，需遵循标准化流程，覆盖设备清洁、耗材更换、参数校准等关键环节，消除设备老化、耗材损耗等潜在隐患。核心维护内容包括：定期清洁采样器、检测传感器与管路，去除附着的泥沙、藻类等杂质，防止堵塞与污染；按时更换采样容器、试剂、滤膜等耗材，确保耗材性能符合检测要求，避免因耗材变质影响监测结果；定期检查设备供电、通信系统与冷藏装置，确保各组件运行正常，及时处理线路老化、供电不稳等问题；每月开展 1-2 次全面校准，采用标准物质对多参数分析仪进行零点与跨度校准，修正系统误差，维持检测精度。

维护工作需建立标准化档案，详细记录维护时间、内容、耗材更换情况、校准数据等信息，确保维护过程可追溯，为后续故障排查与系统优化提供依据。同时，需结合季节变化调整维护策略，例如高温季节加强冷藏设备检查，雨季强化采样器防堵塞维护，提升系统环境适应性。

（二）故障诊断与应急处置

系统运行过程中易受极端天气、水质污染、设备老化等因素影响，出现采样故障、检测异常、通信中断等问题，需建立快速故障诊断与应急处置机制，缩短故障停机时间，减少数据缺失，确保监测工作连续性。

故障诊断采用自动化监测与人工排查相结合的方式：系统内置故障监测程序，实时监控各模块运行状态，当出现采样失败、检测数据异常、通信中断等故障时，自动触发声光报警，同步上传故障信息与定位，为人工排查提供指引；工作人员接到报警后，需在规定时间内抵达现场，按照“先排查核心模块、后处理辅助组件”的原则，快速定位故障原因，开展维修处置。针对常见故障，需建立标准化处置流程，例如采样器堵塞可通过反向冲洗、更换滤膜解决，传感器漂移可通过重新校准修正，通信中断可切换备用通信方式。同时，需配备应急备用设备，当核心设备故障无法即时修复时，启用备用设备替代，确保监测工作不中断。

（三）数据质量控制措施

数据质量控制是系统运行保障的核心目标，需构建“自动质控+人工复核”的多层次质控体系，覆盖监测全流程，确保监测数据符合准确性、完整性、代表

性、可比性与合法性要求。自动质控层面，系统内置的质控模块定期开展自动校准、空白试验与平行样比对，自动剔除异常数据，修正系统误差；在数据传输过程中采用加密技术，杜绝数据篡改，确保数据传输安全。

人工复核层面，定期开展现场核查与实验室比对，每月抽取一定比例的监测数据，与人工采样实验室分析结果进行比对，偏差超过允许范围时及时排查原因并修正；建立数据审核机制，安排专业人员对上传数据进行人工审核，重点核查异常数据、缺失数据的合理性，对可疑数据进行溯源验证，确保数据可追溯；强化数据档案管理，将监测数据、设备运行日志、维护记录、校准报告等资料分类归档，形成完整的数据档案，为水环境管理与执法应用提供合法依据。

水环境自动监测系统的推广应用，推动水环境监测实现了从“人工定点”到“智能全域”、从“定期监测”到“实时管控”的跨越式发展，是提升水环境管理智能化水平的核心支撑。通过模块化系统构成、场景化适配应用与全方位运行保障，该系统可精准捕捉水质动态变化，及时预警污染风险，为水环境治理、污染防控与应急处置提供高效数据支撑。

第四章 土壤环境监测技术

第一节 土壤污染特征与监测要求

土壤作为生态系统的核心载体，承担着物质循环、养分供给、污染物净化等重要功能，其环境质量直接关联农产品安全、地下水保护与人体健康。相较于水、大气环境，土壤污染具有隐蔽性强、累积性显著、治理周期长、修复难度大等特点，一旦受污染易对生态系统造成长期潜在危害。开展土壤环境监测是精准掌握污染状况、科学实施污染管控与修复的前提，需结合土壤污染特征、不同用地功能需求，遵循科学监测原则，构建针对性监测体系。

一、污染特征：重金属、有机污染物、农药残留等主要污染类型与迁移规律

土壤污染物来源广泛，涵盖工业排放、农业生产、生活垃圾堆放等多个途径，核心污染类型包括重金属、有机污染物、农药残留等，各类污染物在土壤中的存在形态、迁移转化规律存在显著差异，直接决定污染危害程度与监测重点。明确不同污染物的污染特征，是制定科学监测方案、精准溯源污染源头的关键。

（一）重金属污染特征与迁移规律

重金属是土壤中最常见的持久性污染物，具有难降解、易累积、可生物富集的特点，其污染主要来源于工业生产、矿山开采、农业化肥施用、污水灌溉等途径，一旦进入土壤易长期留存，对土壤生态与农产品安全构成严重威胁。

重金属在土壤中的迁移转化受土壤质地、pH 值、有机质含量、氧化还原电位等因素影响，迁移能力整体较弱，以垂直迁移与水平扩散为主。多数重金属进入土壤后，会与土壤胶体、有机质发生吸附、络合反应，形成稳定形态累积于表层土壤，仅有少量在淋溶作用下向深层土壤迁移，若迁移至地下水则会引发跨界污染。部分重金属可通过作物根系吸收进入植物体，经食物链逐级富集，最终危害人体健康。重金属污染具有累积性，污染程度随时间推移逐步加重，且不同重

金属的迁移活性存在差异，需结合其特性针对性开展监测。

（二）有机污染物污染特征与迁移规律

土壤有机污染物种类繁多，主要来源于工业废水、废气排放、固体废弃物填埋、石油泄漏、农业生产等，具有成分复杂、毒性差异大、易挥发与降解的特点，部分有机污染物还具有强致癌、致畸、致突变性，对土壤生态与人体健康危害显著。

有机污染物在土壤中的迁移转化过程复杂，受自身理化性质与土壤环境条件双重影响，主要通过挥发、淋溶、降解、吸附等过程迁移扩散。挥发性有机污染物易从土壤表层挥发至大气，造成大气二次污染；水溶性较强的有机污染物可在淋溶作用下向深层土壤迁移，甚至污染地下水；部分难降解有机污染物可在土壤中长期累积，逐步渗透扩散形成污染晕。有机污染物的降解速度与土壤微生物活性、温度、湿度密切相关，微生物降解是其在土壤中去除的主要途径，但其降解产物可能仍具有毒性，需纳入监测范围。

（三）农药残留污染特征与迁移规律

农药残留污染是农业用地土壤的主要污染类型，来源于农业生产中杀虫剂、杀菌剂、除草剂等农药的不合理施用，其污染程度与农药类型、施用剂量、施用频率及土壤环境条件密切相关，直接影响农产品质量安全。

农药残留在土壤中的迁移转化以降解为主，同时伴随吸附、挥发、淋溶等过程。易降解农药在土壤微生物作用下可快速分解为无害物质，残留周期较短；难降解农药则可在土壤中留存数年甚至数十年，逐步累积造成长期污染。农药的迁移能力与水溶性、吸附性相关，水溶性强的农药易通过淋溶迁移至深层土壤，吸附性强的农药则主要留存于表层土壤，通过作物吸收进入食物链。此外，农药残留还可通过地表径流迁移至地表水，或挥发至大气，形成跨介质污染，需兼顾多环境介质开展协同监测。

二、监测要求：明确不同用地类型的监测目的与标准

土壤监测需结合不同用地类型的功能定位、污染风险特征，明确差异化监测目的与标准，确保监测数据能精准支撑土壤环境管理、污染管控与风险评估需求。不同用地类型的土壤质量要求、污染风险等级存在差异，监测方案需针对性优化，提升监测的实用性与针对性。

（一）农田用地监测要求

农田用地土壤监测核心目的是保障农产品质量安全，评估土壤污染对农作物生长、农产品品质的影响，排查农业面源污染与外源污染风险，为农业生产优化、污染防控提供依据。监测范围需覆盖耕地、园地等各类农田用地，重点关注种植核心区、污水灌溉区、农药化肥集中施用区等污染高风险区域。

监测标准需严格遵循农田土壤环境质量相关标准，重点控制重金属、农药残留、兽药残留等污染物含量，确保符合农产品安全生产要求。监测指标需聚焦与农产品质量密切相关的污染物，常规监测指标包括重金属、常见农药残留、土壤理化性质（pH 值、有机质含量等）；针对污水灌溉农田，需增加有机污染物、病原菌等指标。监测频次需结合种植周期、污染风险等级确定，常规农田每 1—3 年监测 1 次，污染高风险农田每年监测 1 次，确保及时捕捉污染变化趋势。

（二）工业用地监测要求

工业用地（含工业园区、工业废弃地）土壤监测核心目的是评估土壤污染程度与生态风险，排查工业生产活动造成的土壤污染，为工业用地管控、土地修复、用途变更（如工业用地转住宅用地）提供数据支撑。此类用地污染风险高、污染物种类复杂，监测需强化针对性与全面性。

监测标准需遵循工业用地土壤污染风险管控相关标准，根据用地功能与风险等级设定污染物限值，重点控制重金属、挥发性有机污染物、半挥发性有机污染物等工业特征污染物。监测指标需结合园区主导产业类型优化，针对冶金、电镀、化工等不同行业，增加对应特征污染物监测；监测点位需覆盖生产区、排污口周边、固废堆放区、污染物泄漏高发区等关键区域，采用网格布点与重点布点相结合的方式，确保全面捕捉污染范围。监测频次需结合生产工况与污染状况确定，在产工业园区每 1—2 年监测 1 次，废弃工业用地在用途变更前需开展全面监测，修复过程中需定期跟踪监测。

（三）其他用地类型监测要求

除农田、工业用地外，还需针对住宅用地、商业用地、生态保护用地等不同类型，明确差异化监测要求。住宅用地、商业用地等城镇建设用地监测核心目的是保障人体健康，评估土壤污染对居住环境、公共空间的影响，监测需重点控制重金属、有机污染物等有毒有害物质，严格遵循城镇建设用地土壤污染风险管控标准，在土地开发利用前开展全面监测。

生态保护用地（如自然保护区、湿地、林地）监测核心目的是维护生态系统完整性，评估土壤污染对生态群落、生态功能的影响，监测指标需兼顾污染物与土壤生态指标，监测标准需符合生态保护相关要求，监测频次根据污染风险等级每3—5年监测1次，重点排查周边污染源对生态用地的影响。

三、核心原则：兼顾监测代表性与针对性，满足土壤环境质量评价需求

土壤监测需遵循科学、规范、高效的核心原则，以“兼顾代表性与针对性”为核心，统筹监测范围、点位布局、指标选择、频次设定等关键环节，确保监测数据能全面反映土壤污染状况，满足土壤环境质量评价、风险评估与污染管控的各项需求，提升监测工作的科学性与实用性。

（一）代表性原则

代表性是土壤监测数据的核心要求，需通过科学的点位布局、样品采集与处理，确保监测数据能真实反映监测区域土壤的整体质量状况与污染特征。点位布局需结合土壤类型、地形地貌、污染分布、用地功能等因素，采用网格布点、对角线布点、重点布点等多种方法，避免点位集中或遗漏，确保点位覆盖监测区域不同区域、不同污染梯度。

样品采集需兼顾土壤深度、采样数量，根据监测目的采集表层土壤与深层土壤样品，同步记录采样点位的土壤理化性质、周边环境等信息；样品处理需遵循标准化流程，避免样品污染、组分变化，确保样品能真实反映土壤实际状况。同时，需通过增加采样数量、优化采样频次，减少随机误差，提升监测数据的代表性与可靠性。

（二）针对性原则

针对性原则要求监测方案贴合监测目标、用地类型与污染特征，避免盲目扩大监测范围、增加监测指标，提升监测效率与精准度。指标选择需结合污染类型与监测目的，针对重金属污染区域重点监测重金属指标，针对有机污染区域增加有机污染物指标，针对农业用地强化农药残留监测，避免无关指标增加监测成本。

监测方法需结合污染物特性选择，针对易挥发、易降解污染物采用现场快速监测与实验室分析相结合的方式，针对痕量污染物采用高灵敏度检测方法；监测频次需结合污染风险等级优化，污染高风险区域加密监测频次，污染稳定区域适

当降低频次，确保监测工作精准对接污染管控需求。

（三）科学性与规范性原则

科学性与规范性是保障监测数据合法性、可比性的基础，需贯穿监测全流程，从点位布设、样品采集、处理分析到数据审核、报告输出，均遵循国家监测技术规范与标准，确保监测工作标准化、可追溯。监测设备需定期校准、维护，确保检测精度符合要求；监测人员需具备专业资质，严格按照操作规范开展工作，避免人为操作误差。

需结合土壤污染特征与监测技术发展，优化监测方案，采用先进、成熟的监测技术与方法，提升监测数据的精准度与时效性；建立完整的监测档案，详细记录监测过程、数据结果、设备状态等信息，确保监测数据可追溯、可核查，为土壤环境质量评价与管理决策提供可靠支撑。

土壤污染特征与监测要求是土壤环境监测工作的核心基础，明确不同污染物的迁移规律、差异化用地类型的监测标准，遵循科学监测原则，是构建精准、高效监测体系的前提。土壤监测需兼顾污染隐蔽性、累积性的特点，强化针对性与代表性，通过标准化监测流程获取可靠数据，为土壤污染溯源、风险评估、管控修复提供科学依据。随着土壤污染防治工作的深入推进，监测技术将不断优化升级，未来需进一步提升监测的智能化、精准化水平，构建“污染识别－监测评估－管控修复”的完整链路，为土壤生态环境质量持续改善、保障生态安全与人体健康提供坚实支撑。

第二节 土壤采样与预处理技术

土壤采样与预处理是土壤环境监测的核心前置环节，其规范性直接决定后续分析数据的准确性、代表性与可靠性。土壤具有空间异质性强、污染物分布不均的特点，需通过科学的布点采样方法精准捕捉污染特征，结合标准化预处理流程去除基质干扰、富集目标污染物，同时强化全流程质量控制，杜绝交叉污染与组分变化。

一、采样方法：对角线法、梅花形法等布点采样技术，采样深度与频次确定

土壤采样需兼顾空间代表性与监测针对性，结合监测区域大小、土壤类型、

污染分布特征及用地类型，选择适配的布点采样方法，科学确定采样深度与频次，确保采集的样品能真实反映监测区域土壤的整体污染状况与空间分布规律。

（一）核心布点采样技术

常用布点采样技术包括对角线法、梅花形法，同时可结合监测需求拓展网格布点法、蛇形布点法等，各类方法适配不同场景，需根据监测区域特征灵活选用，避免盲目套用统一模式。

对角线法适用于面积较小、地形平坦、污染分布相对均匀的区域，如小型农田、菜园等。采样时沿监测区域对角线布设采样点位，两端及中间均匀设置 3—5 个点位，点位数量可根据区域面积适当调整，确保覆盖区域核心范围。该方法操作简便、效率高，能快速捕捉区域土壤整体特征，适合常规监测与污染筛查。梅花形法适用于面积中等、地形平缓、污染相对集中的区域，如规模化农田、小型工业园区周边土壤。以区域中心为原点，向四周均匀布设 5—7 个点位，形成梅花状布局，可有效兼顾区域中心与周边的污染差异，提升样品代表性，尤其适用于污染呈点状扩散的区域。

特殊场景下，网格布点法可用于面积较大、污染分布复杂的区域，如大型工业园区、矿区，通过划分均匀网格设置点位，网格密度根据污染风险等级调整；蛇形布点法适用于地形复杂、污染分布不均的区域，如山地农田、不规则地块，沿区域地形呈蛇形布设点位，避免遗漏局部污染区域，提升采样全面性。

（二）采样深度确定

采样深度需结合用地类型、污染特征与监测目的设定，重点兼顾表层土壤与深层土壤，全面反映污染物在土壤垂直剖面的分布与迁移规律，避免仅采集表层土壤导致的监测偏差。

常规监测中，农田、草地等农业用地与生态用地，重点采集表层土壤，采样深度一般为 0-20cm，该层土壤受人类活动与外源污染影响最显著，能反映当前土壤污染状况；针对可能存在深层污染的区域，如工业用地、污水灌溉区、矿山周边，需增加深层土壤采样，深度可延伸至 60cm，部分污染严重区域可根据实际情况加深至 100cm，分层采集样品，分析污染物垂直迁移特征。采样时需保持采样深度均匀一致，使用标准化采样工具垂直采集，避免搅动不同深度土壤导致样品混合，确保分层样品的独立性与准确性。

（三）采样频次设定

采样频次需结合监测目的、用地类型、污染风险等级及土壤污染物特性确定，核心是确保能捕捉土壤污染的时间变化规律，满足污染评估、风险预警与管控需求。

常规监测中，农田用地结合种植周期设定频次，每年采集 1—2 次，重点在播种前与收获后开展，跟踪农药残留、重金属等污染物的累积变化；工业用地在产期间每 1—2 年采样 1 次，重点监测特征污染物排放对土壤的影响，废弃工业用地在修复前、修复中、修复后分别开展采样监测，评估修复效果；生态保护用地与污染风险较低的区域，每 3—5 年采样 1 次，排查外源污染风险。针对突发污染事件，需立即开展应急采样，加密采样频次与点位，快速锁定污染范围与浓度峰值，为应急处置提供数据支撑。

二、样品预处理：风干、研磨、消解、提取等前处理流程与操作规范

土壤样品采集后需经过标准化预处理流程，去除杂质干扰、调整样品状态、富集目标污染物，使样品满足后续仪器分析要求。预处理流程包括风干、研磨、消解、提取等核心环节，各环节需严格遵循操作规范，避免样品污染、组分变化与目标污染物损失，确保预处理后样品的稳定性与适用性。

（一）风干与研磨

风干与研磨是土壤样品预处理的基础环节，目的是去除样品水分、破碎土壤颗粒，使样品均匀化，便于后续分析测试，同时保留土壤中目标污染物的原有形态。

风干需在洁净、通风、阴凉的实验室环境中进行，避免阳光直射、高温烘烤与污染环境。将采集的土壤样品平铺于干净的搪瓷盘或聚乙烯托盘中，厚度控制在 2—3cm，定期翻动搅拌，加速水分挥发，风干过程中剔除石块、杂草、根系等杂质，记录样品风干状态。对于易挥发、易降解的污染物样品，需缩短风干时间，或采用冷冻干燥法处理，防止污染物损失。研磨需分级开展，风干后的样品先通过四分法缩分，保留适量样品用于分析，再使用玛瑙研钵或研磨机逐步研磨，分别过 20 目、60 目、100 目标准筛，根据监测指标需求选择对应粒径的样品，如重金属分析需过 100 目筛，确保样品均匀性与分析精度。研磨工具需专用，不同样品研磨前需彻底清洁，避免交叉污染。

（二）消解处理

消解处理主要用于重金属、总氮、总磷等指标的分析，目的是破坏土壤样品基质，使目标污染物从土壤颗粒中释放出来，转化为可检测的形态，消除基质干扰，提升检测灵敏度。

消解需结合污染物类型与检测方法选择适配的消解方式，常用方法包括酸消解、微波消解、高温消解等。酸消解适用于多数重金属与营养盐指标，采用硝酸、盐酸、高氯酸等混合酸，在加热条件下分解土壤基质，溶解目标污染物，操作简便、适用性广；微波消解适用于痕量重金属与易挥发污染物，利用微波加热使样品在密闭容器中快速消解，具有消解时间短、试剂用量少、污染物损失少的特点，能有效提升分析精度；高温消解适用于部分难分解基质样品，通过高温烘烤破坏土壤有机质，释放目标污染物，需严格控制温度与时间，避免目标污染物挥发损失。消解过程中需设置空白对照，校正试剂与仪器带来的系统误差，确保消解效果与数据准确性。

（三）提取处理

提取处理主要用于有机污染物、农药残留等指标的分析，目的是采用溶剂或特定方法，将土壤样品中的目标污染物提取至溶液中，实现污染物与土壤基质的分离，为后续仪器分析提供样品溶液。

提取方法需结合污染物理化性质与土壤基质特性选择，常用方法包括索氏提取法、超声提取法、固相萃取法等。索氏提取法适用于难挥发、脂溶性有机污染物，通过溶剂回流反复提取，提取效率高、效果稳定，适合批量样品处理；超声提取法适用于多数有机污染物与农药残留，利用超声波振动破坏土壤基质结构，加速污染物溶解，具有操作简便、提取时间短的特点，广泛应用于常规监测；固相萃取法适用于痕量有机污染物，通过吸附剂富集目标污染物，去除基质干扰，提升检测灵敏度，适合低浓度污染物分析。提取过程中需选择纯度符合要求的提取溶剂，避免溶剂杂质干扰检测结果，同时控制提取温度、时间、转速等参数，确保提取效果的稳定性与重复性。

三、质量控制：采样过程防交叉污染，预处理试剂纯度与仪器清洁度保障

土壤采样与预处理全流程需强化质量控制，聚焦交叉污染防控、试剂与仪器

管控等核心环节，建立标准化质控体系，及时消除潜在误差，确保样品质量与监测数据的可靠性、可比性，满足土壤环境质量评价与管理决策需求。

（一）采样过程交叉污染防控

采样过程是交叉污染的高发环节，需从采样工具、采样顺序、样品存储等方面严格管控，杜绝不同点位、不同深度样品间的污染，以及外源污染物对样品的影响。

采样工具需选用惰性材料，优先使用不锈钢、玛瑙、聚四氟乙烯材质的采样器、样品袋与托盘中，避免工具与样品发生化学反应或释放污染物；不同点位、不同深度采样时，需对采样工具进行彻底清洁，先用蒸馏水冲洗，再用待采集样品润洗3次以上，去除残留杂质；采样顺序需遵循“从清洁区域到污染区域、从表层到深层”的原则，避免污染区域样品污染清洁区域样品；样品采集后需立即密封包装，做好清晰标识，标注点位、深度、时间等信息，避免样品混淆与外源污染，运输过程中做好防护，防止样品泄漏与交叉污染。

（二）预处理试剂纯度与仪器清洁度保障

试剂与仪器是预处理环节质量控制的核心，需严格把控试剂纯度，确保仪器清洁度，避免试剂杂质与仪器残留对样品造成污染，影响分析结果准确性。

试剂选用需符合监测技术规范，优先使用优级纯或分析纯试剂，提取、消解用溶剂需经过纯化处理，去除杂质干扰；每批次试剂需进行空白试验，验证试剂纯度，若空白试验结果超出允许范围，需更换试剂并重新处理样品。仪器清洁需贯穿预处理全流程，研磨、消解、提取等设备使用前，需用蒸馏水、无水乙醇等逐步清洁，去除残留样品与试剂，对于痕量污染物分析，需采用酸液浸泡、高温烘烤等方式深度清洁；仪器需定期校准、维护，确保设备运行状态稳定，消解仪、提取仪等设备的温度、压力、转速等参数需定期校验，保证预处理效果的一致性。

（三）全流程质控辅助措施

除核心防控措施外，需配套开展平行样采集与分析、样品留存复核等辅助质控措施，全面提升数据可靠性。采样时每批次样品需设置10%—15%的平行样，与常规样品同步处理、同步分析，计算平行样相对偏差，若偏差超过允许范围，需重新采样与分析；重要样品需留存备份，冷藏或冷冻保存，用于后续复核与溯源；建立完整的质控档案，详细记录采样工具清洁情况、试剂批次与纯度、仪器校准数据、平行样分析结果等信息，确保全流程可追溯，为数据审核与问题排查

提供依据。

土壤采样与预处理技术的规范化应用，是保障土壤环境监测数据质量的核心前提。通过科学选用布点采样方法、精准控制采样深度与频次，可确保样品的代表性；遵循标准化预处理流程，能有效去除基质干扰、富集目标污染物；强化全流程质量控制，可杜绝交叉污染与系统误差。作为土壤监测的关键链路，采样与预处理需紧密衔接前文污染特征与监测要求，适配后续仪器分析需求，不断优化技术方法与质控体系。随着土壤监测技术的智能化发展，未来将逐步实现采样自动化、预处理标准化与质控精准化，进一步提升监测效率与数据可靠性，为土壤污染溯源、风险评估与管控修复提供坚实的技术支撑。

第三节 土壤重金属监测方法

土壤重金属监测是土壤环境监测的核心内容之一，其监测结果直接支撑土壤污染风险评估、溯源管控与修复效果评价。重金属在土壤中具有难降解、易累积的特性，且多以痕量、超痕量形式存在，对监测方法的灵敏度、精度与抗干扰能力提出了较高要求。需结合土壤基质特性、重金属类型及监测需求，选择适配的监测技术，同时通过针对性干扰消除手段，规避土壤基质带来的检测偏差。

一、主要技术：原子吸收分光光度法、电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）等

土壤重金属监测技术已形成多元化体系，核心技术以光谱法、质谱法为主，其中原子吸收分光光度法、电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）应用最为广泛，同时可结合监测需求选用原子荧光光谱法、X射线荧光光谱法等，各类技术基于不同检测原理，具备差异化的性能特点与适用场景。

（一）原子吸收分光光度法（AAS）

原子吸收分光光度法是土壤重金属监测的经典技术，基于物质基态原子对特征辐射光的吸收作用，实现重金属的定性与定量分析，具备操作简便、稳定性强、成本适中的特点，是常规土壤重金属监测的首选方法之一。

该技术根据检测方式可分为火焰原子吸收法（FAAS）与石墨炉原子吸收法（GFAAS）。火焰原子吸收法通过火焰将样品原子化，适用于含量较高（mg/L级）

的重金属监测，如铜、锌、铁、锰等，具有分析速度快、精密度高、基体效应相对较小的优势，适合批量样品的常规筛查；石墨炉原子吸收法通过石墨炉高温加热实现样品原子化，原子化效率更高，检测灵敏度可达 $\mu\text{g/L}$ 级，适用于痕量重金属（如铅、镉、汞等）的监测，能满足低浓度重金属的精准定量需求，但分析时间较长、试剂消耗较多，对操作人员技能要求较高。

（二）电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）

电感耦合等离子体质谱法是一种高灵敏度的痕量重金属监测技术，结合了电感耦合等离子体的高温原子化能力与质谱的高分辨率、高选择性优势，可实现多元素同时快速检测，是当前土壤痕量、超痕量重金属监测的核心技术。

该技术的核心优势是检测灵敏度极高（可达 ng/L 级），能精准测定土壤中微量、超微量重金属元素；可同时分析多种重金属，涵盖几乎所有常见有毒重金属（如铅、镉、汞、铬、砷等），大幅提升监测效率，适合复杂土壤样品的多指标同步监测；具备良好的线性范围与精密度，能适配不同浓度梯度的重金属样品，从痕量到常量均可准确测定。但该技术设备成本较高、维护难度大，对实验室环境与操作人员专业素养要求严格，适用于高精度监测、科研分析及应急溯源等场景。

（三）其他常用监测技术

除核心技术外，原子荧光光谱法（AFS）与 X 射线荧光光谱法（XRF）在土壤重金属监测中也有广泛应用。原子荧光光谱法基于原子在辐射能激发下发射的荧光强度进行定量分析，对砷、锑、铋、汞等元素具有极高的灵敏度，操作简便、干扰少，是土壤中砷、汞监测的常用方法，适配常规监测与应急筛查需求。

X 射线荧光光谱法属于无损检测技术，无需复杂样品预处理，通过 X 射线激发样品产生特征荧光，实现重金属快速定性与定量分析，具有分析速度快、样品用量少、无二次污染的优势，适用于土壤重金属的现场快速筛查与批量样品初筛；但检测灵敏度相对较低，受土壤基质影响较大，多用于污染普查与初步评估，难以满足痕量重金属的精准定量需求。

二、技术对比：不同方法的检测限、精度与适用重金属类型

不同土壤重金属监测技术在检测限、精度、适用范围等方面存在显著差异，需结合监测目标、重金属类型、浓度范围及实验室条件，针对性选择适配方法，

以兼顾监测效率与数据准确性。以下通过对比明确各类技术的核心性能差异。

监测技术	检测限	精度 (RSD)	适用重金属类型	核心优势
火焰原子吸收法 (FAAS)	mg/L 级	$\leq 2\%$	铜、锌、铁、锰等含量较高的重金属	速度快、成本低、稳定性好
石墨炉原子吸收法 (GFAAS)	$\mu\text{g/L}$ 级	$\leq 5\%$	铅、镉、汞等痕量重金属	灵敏度高、适用于低浓度样品
ICP-MS	ng/L 级	$\leq 3\%$	铅、镉、汞、铬、砷等痕量 / 超痕量重金属 (多元素同步)	灵敏度极高、多元素同时检测、线性范围宽
原子荧光光谱法 (AFS)	$\mu\text{g/L}$ 级	$\leq 4\%$	砷、锑、铋、汞等特定重金属	针对性强、干扰少、操作简便
X 射线荧光光谱法 (XRF)	mg/kg 级	$\leq 6\%$	多数重金属 (总量快速筛查)	无损检测、快速便捷、批量筛查优势明显

注：表格中检测限、精度为常规实验条件下的参考值，实际数值受样品基质、仪器状态、操作流程等因素影响，需结合具体监测场景调整。

三、干扰消除：土壤基质干扰的屏蔽与修正技术

土壤基质成分复杂，含有大量有机质、矿物质、金属氧化物及共存离子，在重金属监测过程中易产生基质干扰，导致检测信号增强或抑制，影响监测结果的准确性。需通过针对性的干扰消除技术，实现基质干扰的屏蔽与修正，确保监测数据可靠。

（一）样品预处理优化干扰消除

通过优化样品预处理流程，可有效去除土壤基质中的干扰成分，减少基质效应。核心措施包括基质分离与样品稀释两类，适配不同监测技术与干扰类型。

基质分离技术通过提取、净化等步骤，分离目标重金属与干扰基质。例如，采用固相萃取、液液萃取等方法，去除土壤提取液中的有机质与共存离子；对于复杂土壤样品，可通过离心、过滤等手段去除悬浮颗粒物，避免颗粒物对检测信号的干扰。样品稀释技术适用于基质干扰较强但重金属浓度较高的样品，通过合理稀释样品溶液，降低基质成分浓度，减弱基质效应对检测的影响，但需注意稀释倍数需在仪器线性范围内，避免因稀释导致低浓度重金属检测误差增大。

（二）化学试剂屏蔽干扰

化学试剂屏蔽法通过添加特定试剂，与土壤基质中的干扰成分发生反应，形

成稳定化合物，从而屏蔽其对目标重金属检测的干扰，是常规监测中应用广泛、操作简便的干扰消除手段。

常用屏蔽试剂包括释放剂、保护剂与掩蔽剂。释放剂可与干扰离子结合，释放出被吸附的目标重金属，消除共存离子的抑制作用，如在钙、镁离子干扰下监测铅、镉时，添加锶盐、铜盐作为释放剂；保护剂可与目标重金属结合形成稳定络合物，防止其与基质成分反应，如添加 EDTA、8-羟基喹啉等，保护痕量重金属不被吸附或沉淀；掩蔽剂可与干扰离子形成稳定络合物，降低干扰离子浓度，如添加氰化物、氟化物等，掩蔽铁、铝等共存离子的干扰。试剂添加需严格控制用量，避免过量试剂引入新的干扰。

（三）仪器参数与方法修正

通过优化仪器参数与采用方法学修正，可进一步削弱基质干扰，提升监测准确性，适配高精度监测需求。仪器参数优化方面，可调整原子化温度、载气流量、检测波长等参数，增强目标重金属的检测信号，抑制基质干扰信号，例如石墨炉原子吸收法中优化升温程序，减少基质挥发对原子化的影响；ICP-MS 中调整射频功率、雾化气流量，提升离子化效率与信号稳定性。

方法学修正方面，常用标准加入法与基体匹配法。标准加入法通过向样品中加入不同浓度的标准溶液，绘制校准曲线，消除基质效应对检测的影响，适用于基质复杂、干扰不确定的样品；基体匹配法配制与样品基质成分相似的标准溶液，使标准曲线与样品在相同基质条件下检测，减少基质差异带来的误差，适用于基质成分明确的样品。两类方法均可有效修正基质干扰，但操作相对繁琐，需结合监测精度要求选用。

土壤重金属监测方法的科学选用与干扰消除技术的规范应用，是保障监测数据准确性的核心。原子吸收分光光度法、ICP-MS 等核心技术各有优劣，需结合监测需求、实验室条件针对性选择；基质干扰的有效屏蔽与修正，需贯穿样品预处理、检测分析全流程，通过预处理优化、化学屏蔽、方法修正等手段协同发力。本节内容衔接前文采样预处理流程，明确了重金属监测的技术路径与干扰管控要点，完善了土壤环境监测技术体系。

第四节 土壤有机污染物监测技术

土壤有机污染物种类繁多、毒性强、迁移转化规律复杂，且多以痕量、超痕量形式存在，对土壤生态系统、农产品安全及人体健康构成潜在威胁。相较于重金属监测，有机污染物监测更注重前处理的富集效率与分析技术的分离能力，需通过标准化前处理技术富集目标污染物、去除基质干扰，结合高选择性分析技术实现精准定量，尤其针对低浓度污染物需强化痕量检测能力。

一、分析技术：气相色谱法、液相色谱法、红外光谱法的应用适配

土壤有机污染物分析技术以色谱法为核心，红外光谱法为辅助，各类技术基于不同分离与检测原理，具备差异化的适用范围与性能特点，需结合有机污染物的理化性质（极性、挥发性、分子量）、浓度范围及监测需求，针对性选择适配技术，兼顾分离效果、检测精度与分析效率。

（一）气相色谱法（GC）

气相色谱法是土壤挥发性、半挥发性有机污染物监测的核心技术，基于不同物质在固定相和流动相之间分配系数的差异，实现污染物的分离与定量，具备分离效率高、分析速度快、灵敏度高的特点，广泛应用于常规有机污染监测。

该技术适用于挥发性有机污染物（VOCs）、半挥发性有机污染物（SVOCs）及部分农药残留的监测，如苯系物、卤代烃、多环芳烃（低环）等。通过搭配不同检测器可拓展适用范围，氢火焰离子化检测器（FID）适用于多数有机污染物的常量与半微量分析，灵敏度适中、稳定性好；电子捕获检测器（ECD）对卤代烃等含电负性基团的污染物灵敏度极高，适合痕量卤代有机污染物监测；质谱检测器（MS）作为联用技术核心，可实现污染物的定性定量同步分析，有效解决复杂基质中污染物的分离与识别难题，提升监测精准度，适用于污染溯源与复杂样品分析。

（二）液相色谱法（HPLC）

液相色谱法适用于高沸点、强极性、热不稳定性及大分子有机污染物的监测，无需对样品进行高温气化，可有效避免有机污染物热分解，弥补气相色谱法的应用局限，是土壤有机污染物监测的重要补充技术。

该技术核心优势是适用范围广，可监测气相色谱法难以分析的污染物，如多

环芳烃（高环）、持久性有机污染物（POPs）、农药残留（热不稳定型）、抗生素等。通过优化固定相、流动相组成及洗脱程序，可实现复杂有机污染物的高效分离；搭配紫外检测器（UV）、荧光检测器（FLD）可满足常规定量需求，其中荧光检测器对多环芳烃等具有荧光活性的污染物灵敏度极高；与质谱检测器联用（HPLC-MS）后，具备高分离能力与高定性能力，可实现痕量、超痕量复杂有机污染物的精准分析，是当前有机污染监测的主流技术之一。

（三）红外光谱法（IR）

红外光谱法基于有机污染物分子对红外光的吸收特性，通过分析吸收光谱实现污染物的定性鉴定，具备操作简便、分析快速、样品用量少的特点，多作为有机污染物监测的辅助技术，配合色谱法完成定性确认。

该技术通过特征吸收峰的位置与强度，识别有机污染物的官能团与分子结构，可快速判断样品中是否存在目标污染物类型，适用于污染筛查与定性验证。例如，通过红外光谱可快速识别样品中是否含有苯环、羟基、羰基等官能团，为色谱法分析提供定性参考；傅里叶变换红外光谱法（FT-IR）的出现，大幅提升了光谱分辨率与检测灵敏度，可实现部分半挥发性有机污染物的定量分析，适用于批量样品的快速初筛，但受土壤基质干扰较大，难以满足痕量污染物的精准定量需求。

二、前处理优化：索氏提取、固相萃取等有机污染物富集技术

土壤有机污染物前处理的核心目标是富集目标污染物、去除土壤基质（有机质、矿物质等）干扰，提升样品纯度与污染物浓度，满足后续分析技术的检测要求。常用前处理技术包括索氏提取、固相萃取等，需结合污染物特性与基质类型优化操作参数，平衡富集效率、回收率与操作成本。

（一）索氏提取技术（SE）

索氏提取是土壤有机污染物前处理的经典技术，基于溶剂回流原理，通过沸腾溶剂反复萃取土壤样品中的目标污染物，具备富集效率高、回收率稳定、操作简便的特点，适用于多数半挥发性有机污染物与农药残留的提取。

优化要点包括溶剂选择与提取参数控制：溶剂需根据污染物极性选择，确保对目标污染物的溶解度高、与基质兼容性好，常用溶剂包括正己烷、丙酮、二氯甲烷等，可采用混合溶剂提升提取效果；提取参数需控制提取时间、回流速度与样品用量，一般提取时间为 6—12 小时，确保污染物充分溶出，同时避免提取时

间过长导致溶剂浪费与污染物降解；提取后需对提取液进行浓缩、净化处理，去除溶剂与部分基质杂质，提升样品纯度。该技术适用于批量样品处理，但溶剂用量大、提取时间长，存在二次污染风险，需结合绿色监测需求优化。

（二）固相萃取技术（SPE）

固相萃取技术是一种高效的样品净化与富集技术，通过吸附剂对目标污染物的选择性吸附，实现污染物与基质干扰物的分离，具备溶剂用量少、富集效率高、操作快速的特点，广泛应用于土壤有机污染物前处理的净化与痕量富集。

优化要点聚焦吸附剂选择、洗脱条件控制：吸附剂需根据污染物极性与官能团选择，常用类型包括反相吸附剂（C18、C8）、正相吸附剂（硅胶、氧化铝）、离子交换吸附剂等，例如反相吸附剂适用于非极性、弱极性有机污染物，正相吸附剂适用于极性污染物；洗脱条件需优化洗脱溶剂种类、浓度与体积，选择与吸附剂作用力强且能溶解目标污染物的溶剂，逐步洗脱目标污染物，同时减少干扰物洗脱；富集过程中需控制样品流速，确保污染物充分吸附，提升富集倍数。该技术可有效去除土壤提取液中的有机质、共存离子等干扰，大幅提升样品纯度，适配后续色谱法分析。

（三）其他前处理技术优化

除核心技术外，超声提取（UE）、微波辅助提取（MAE）等新型前处理技术在土壤有机污染物监测中应用日益广泛。超声提取利用超声波振动破坏土壤基质结构，加速溶剂对污染物的溶解，具备提取时间短（30—60分钟）、溶剂用量少、操作简便的优势，适用于多数有机污染物的快速提取，优化要点为控制超声功率、温度与时间，避免高温导致污染物降解。

微波辅助提取通过微波加热使溶剂快速升温，强化污染物溶出，具备提取效率高、时间短、能耗低的特点，适用于热稳定性较好的有机污染物，优化要点为控制微波功率、提取温度与压力，防止溶剂挥发与污染物分解。两类新型技术可有效弥补索氏提取的不足，契合绿色监测理念，逐步替代传统技术成为主流前处理手段。

三、痕量检测：低浓度有机污染物的检测技术

土壤中低浓度有机污染物（多环芳烃、持久性有机污染物等）具有毒性强、累积效应显著的特点，对检测技术的灵敏度、选择性与抗干扰能力提出极高要求。

需通过技术联用、信号放大、基质净化优化等手段，实现低浓度有机污染物的精准检测，满足污染风险评估需求。

（一）联用技术痕量检测

色谱-质谱联用技术是低浓度有机污染物痕量检测的核心手段，结合了色谱法的高效分离能力与质谱法的高灵敏度、高定性能力，可实现痕量、超痕量有机污染物的精准定性与定量，是当前有机污染监测的首选技术。

常用联用技术包括气相色谱-质谱联用（GC-MS）与液相色谱-质谱联用（HPLC-MS）：GC-MS 适用于挥发性、半挥发性低浓度有机污染物，如痕量卤代烃、低环多环芳烃等，通过选择离子监测模式（SIM）可大幅提升检测灵敏度，检测限可达 ng/L 级；HPLC-MS 适用于高沸点、热不稳定性低浓度有机污染物，如高环多环芳烃、持久性有机污染物（滴滴涕、多氯联苯等），采用电喷雾离子源（ESI）、大气压化学电离源（APCI）等，可实现污染物的高效离子化，检测限可达 pg/L 级，能满足超痕量有机污染物的监测需求。

（二）样品富集强化痕量检测

针对极低浓度有机污染物，需通过多级富集技术提升样品中污染物浓度，突破检测技术的灵敏度局限。核心手段包括前处理多级富集与检测前样品浓缩，二者协同发力提升痕量检测能力。

前处理阶段可采用“提取-净化-二次富集”流程，例如通过固相萃取完成初步富集后，采用固相微萃取（SPME）进一步浓缩，固相微萃取无需溶剂，通过纤维涂层吸附目标污染物，富集倍数可达数百倍，适用于超痕量有机污染物的富集；检测前可通过氮吹浓缩、旋转蒸发浓缩等手段，减少样品体积、提升污染物浓度，浓缩过程中需控制温度与流速，避免低沸点有机污染物挥发损失，确保富集效率与回收率。

（三）干扰抑制提升检测精度

低浓度有机污染物检测过程中，土壤基质干扰易导致检测信号抑制或增强，影响检测精度。需通过基质净化优化、检测器参数调整、方法学修正等手段，抑制基质干扰，确保检测数据可靠。

基质净化方面，采用凝胶渗透色谱（GPC）去除土壤提取液中的大分子有机质，或通过 Florisil 柱、硅胶柱进一步净化，减少基质成分对检测信号的干扰；在检测器参数调整方面，优化离子源温度、电离能量、扫描范围等参数，增强目

标污染物信号、抑制基质干扰信号；方法学修正方面，采用基质加标法、内标法校准基质效应，通过添加已知浓度的标准物质与内标物，修正基质干扰带来的误差，确保痕量检测结果的准确性与重复性。

土壤有机污染物监测技术的核心在于“高效前处理+精准分析+痕量富集”的协同配合，通过科学选用色谱法、红外光谱法等分析技术，优化索氏提取、固相萃取等前处理流程，强化痕量检测的富集与抗干扰能力，可实现低浓度有机污染物的精准监测。

第五节 土壤环境质量评价方法

土壤环境质量评价是土壤环境监测工作的核心收尾环节，通过整合土壤污染监测数据，依据标准化评价体系，科学判定土壤污染等级、量化污染程度，为土壤污染风险管控、土地用途优化、修复方案制定及环境管理决策提供核心依据。相较于监测数据的精准获取，评价方法的合理选用直接决定评价结果的科学性与实用性，需结合监测目标、污染物类型、用地功能等因素，适配对应的评价标准与方法，兼顾评价的客观性与针对性。

一、评价标准：依据国家土壤环境质量标准（GB 15618）确定评价阈值

土壤环境质量评价标准是开展评价工作的基准依据，核心用于明确不同用地类型、不同污染物的评价阈值，界定土壤是否存在污染及污染程度。我国土壤环境质量评价以国家强制性标准《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（GB 15618-2018）》为核心，配套相关行业标准与地方标准，形成分层分类的评价标准体系，确保评价工作有章可循、结果可比。

（一）核心标准框架与适用范围

GB 15618-2018 标准摒弃了传统“一刀切”的评价模式，基于土壤用途与保护目标，将评价对象分为农用地与建设用地两大类，分别设定差异化的污染风险管控阈值，提升了评价标准的针对性与实用性。其中，农用地聚焦农产品质量安全与土壤生态保护，建设用地聚焦人体健康风险防控，两类用地的评价阈值与管控要求存在显著差异。

该标准明确了各类污染物的风险筛选值与风险管制值，形成双重阈值体系：风险筛选值作为土壤污染筛查的基准，若土壤中污染物含量低于该值，表明土壤污染风险较低，无需开展进一步调查与管控；若高于该值，需启动土壤污染状况详细调查，评估污染风险；风险管制值作为土壤污染管控的底线，若污染物含量高于该值，表明土壤污染风险较高，需立即采取风险管控或修复措施，禁止或限制土地利用。标准覆盖重金属、有机污染物等核心污染物，适配不同土壤类型与用地场景，为全国范围内土壤环境质量评价提供统一基准。

（二）评价阈值的确定原则与补充标准

评价阈值的确定需遵循科学性、安全性、实用性原则，综合考虑污染物毒性、土壤迁移转化规律、农产品吸收累积特性、人体暴露风险等因素，通过大量试验与实证研究制定，确保阈值既能有效防控污染风险，又能兼顾土地资源合理利用。针对不同土壤类型（酸性、中性、碱性土壤），标准对部分污染物（如重金属）的阈值进行差异化调整，避免因土壤性质差异导致评价结果偏差。

除核心国家标准外，需结合实际评价需求配套补充标准：针对特定行业（如矿山、化工、农药生产），可参照行业土壤污染风险管控标准，增加特征污染物评价阈值；针对地方土壤环境特征与管理需求，地方可制定严于国家标准的地方标准，细化区域特色污染物的评价要求；对于未纳入国家标准的新型污染物，可参考国内外相关研究成果与行业规范，确定临时评价阈值，确保评价工作的全面性。

二、评价方法：单因子指数法、内梅罗综合指数法、污染负荷指数法

土壤环境质量评价方法已形成多元化体系，单因子指数法、内梅罗综合指数法、污染负荷指数法是应用最广泛的三类主流方法，各类方法基于不同评价逻辑，具备差异化的优势与适用场景，需结合评价目标、污染物数量及污染复杂程度针对性选用。

（一）单因子指数法

单因子指数法是最基础、最常用的土壤环境质量评价方法，核心针对单一污染物开展评价，通过计算污染物实测浓度与评价阈值的比值，量化单一污染物的污染程度，具备计算简便、结果直观、易于理解的特点，适用于单一污染物污染筛查、污染溯源及针对性评价。

该方法的核心计算公式为：单因子污染指数 = 污染物实测浓度 / 污染物评价阈值。评价结果判定标准明确：指数 ≤ 1 时，表明该污染物未超标，土壤无该污染物污染风险；指数 > 1 时，表明该污染物超标，且指数越大，污染程度越严重。单因子指数法能精准定位超标污染物及污染程度，为污染溯源提供直接依据，但无法综合反映多种污染物共存时的复合污染效应，仅适用于单一污染物评价或多污染物的分项评价，难以全面反映土壤整体污染状况。

（二）内梅罗综合指数法

内梅罗综合指数法是在单因子指数法基础上发展而来的综合评价方法，核心通过整合各污染物的单因子指数，兼顾污染物平均污染水平与最大污染程度，量化土壤复合污染状况，具备能全面反映多种污染物综合影响的优势，是当前土壤环境质量综合评价的主流方法。

该方法的计算流程为：先计算各污染物的单因子指数，再分别计算单因子指数的平均值与最大值，最后通过公式整合得到综合污染指数，公式中对最大值赋予较高权重，突出严重超标污染物对土壤质量的影响。评价结果可将土壤划分为不同污染等级，通常分为清洁（综合指数 ≤ 0.7 ）尚清洁（ $0.7 < \text{指数} \leq 1.0$ ）轻度污染（ $1.0 < \text{指数} \leq 2.0$ ）中度污染（ $2.0 < \text{指数} \leq 3.0$ ）重度污染（指数 > 3.0 ）五个等级。该方法能全面反映土壤复合污染特征，但对评价阈值依赖性较强，且权重分配固定，在污染物类型差异较大的场景下，评价结果可能存在偏差。

（三）污染负荷指数法

污染负荷指数法是一种量化土壤污染累积程度的综合评价方法，核心通过计算各污染物的污染负荷系数，整合得到区域或点位的污染负荷指数，侧重反映污染物的累积效应与相对污染贡献，适用于区域土壤污染普查、污染空间分布分析及污染趋势评估。

该方法的计算流程为：先计算各污染物的污染负荷系数（单因子指数与所有污染物单因子指数平均值的比值），再通过加权平均计算污染负荷指数，权重可根据污染物毒性、环境风险等因素调整，也可采用等权重计算。评价结果判定：污染负荷指数 < 1 时，表明土壤未受污染；指数 ≥ 1 时，表明土壤存在污染，且指数越大，污染累积程度越高。该方法能清晰地反映不同污染物对土壤污染的贡献度，便于识别核心污染因子，适合区域尺度的综合评价，但对评价标准的依赖性较强，在缺乏明确阈值的场景下应用受限。

三、评价应用：土壤污染等级划分与污染风险评估

土壤环境质量评价结果的核心应用在于土壤污染等级划分与污染风险评估，通过将评价数据转化为可落地的管理依据，为土壤污染管控、土地利用优化、修复方案制定等提供精准支撑，实现“评价－管控－修复”的闭环管理，适配不同用地类型与管理需求。

（一）土壤污染等级划分

土壤污染等级划分是评价结果最直接的应用，基于综合评价指数，结合评价标准与用地类型，将土壤划分为清洁、尚清洁、轻度污染、中度污染、重度污染五个等级，明确不同等级土壤的污染特征与管控要求，为土地用途分类管理提供依据。

等级划分需结合用地类型细化管控措施：农用地中，清洁与尚清洁土壤可正常开展农业生产，轻度污染土壤需优化种植结构、实施农艺调控，中度与重度污染土壤需暂停种植食用农产品，开展修复治理；建设用地中，清洁与尚清洁土壤可正常开发利用，轻度污染土壤需采取风险管控措施后开发，中度与重度污染土壤需完成修复治理并达标后，方可用于居住、商业等敏感用途。污染等级划分能清晰界定土壤污染程度，为差异化管控提供明确依据。

（二）土壤污染风险评估

土壤污染风险评估是评价结果的核心应用场景，基于污染等级与污染物特性，结合土地利用方式、暴露途径（如农产品摄入、皮肤接触、大气吸入），量化土壤污染对农产品安全、人体健康及生态系统的潜在风险，确定风险等级与管控范围，为风险管控与修复方案制定提供科学依据。

风险评估需分场景开展：农用地重点评估污染物通过农产品摄入对人体健康的风险，以及对土壤微生物、农作物生长的生态风险；建设用地重点评估污染物通过皮肤接触、大气吸入、地下水迁移等途径对人体健康的风险。通过风险评估，可明确风险高发区域、核心风险因子与暴露途径，针对性制定管控措施，如农用地的种植限制、建设用地的土壤阻隔、地下水防渗等；同时，风险评估结果可作为修复目标的确定依据，确保修复工作精准高效，兼顾风险防控与成本控制。

（三）其他延伸应用

除核心应用外，土壤环境质量评价结果还可延伸应用于土壤污染溯源、污染

趋势预测与环境管理决策。通过对比不同区域、不同时段的评价结果，可精准定位污染源头，分析污染扩散路径与累积规律；结合长期监测数据，可预测土壤污染变化趋势，提前预警污染风险；评价结果还可纳入土壤环境质量档案，作为土地审批、环境执法、生态补偿等管理工作的重要依据，推动土壤环境管理的科学化、规范化与精细化。

土壤环境质量评价方法的科学选用与规范应用，是连接土壤监测数据与环境管理决策的关键纽带。以 GB 15618 标准为核心的评价体系，搭配单因子指数法、内梅罗综合指数法、污染负荷指数法等主流方法，可实现土壤污染等级的精准划分与风险的科学评估。

第五章 噪声与辐射环境监测

第一节 环境噪声监测技术

环境噪声作为一种典型的物理污染，具有瞬时性、无残留性、影响范围广等特点，主要来源于交通运行、工业生产、城市建设及社会生活等活动，长期暴露会对人体听觉系统、神经系统、心血管系统造成不良影响，同时干扰生态系统平衡与居民正常生活秩序。环境噪声监测是精准管控噪声污染、保障人居环境质量的核心手段，需通过标准化的监测指标、科学的监测方法，适配不同场景的噪声特征开展监测工作，为噪声污染溯源、超标治理、标准制定及环境管理决策提供精准数据支撑。

一、监测指标：等效连续 A 声级、最大声级、噪声频谱等核心指标

环境噪声监测指标需能客观量化噪声强度、变化特征及频率分布，全面反映噪声对环境与人体的影响程度。等效连续 A 声级、最大声级、噪声频谱是应用最广泛的核心指标，各类指标分工明确、互补适配，可根据监测目标与场景需求组合选用，确保监测数据的针对性与科学性。

（一）等效连续 A 声级（ L_{eq} ）

等效连续 A 声级是环境噪声监测中最核心、最常用的指标，用于将不稳定的噪声信号转化为连续稳定的等效声级，客观反映监测时段内噪声的平均强度，其数值等效于在相同时间内，与变化噪声能量相等的连续稳态噪声的 A 计权声级。

该指标的核心优势是能兼顾噪声的时间分布与强度差异，适配各类非稳态噪声监测，如交通噪声、社会生活噪声等随时间波动明显的噪声类型。监测时段需根据场景特性设定，常规监测多采用 10 分钟、24 小时等效声级，分别用于瞬时噪声筛查与长期噪声态势评估。等效连续 A 声级是噪声污染评价、超标判定的核心依据，我国各类噪声环境质量标准均以该指标作为核心评价参数，具有统一的判定标准与应用场景。

（二）最大声级（Lmax）

最大声级是指监测时段内噪声信号的最高瞬时声级，用于反映噪声的峰值强度，补充等效连续 A 声级对瞬时强噪声的表征不足，尤其适用于存在突发噪声、脉冲噪声的场景监测。

该指标能精准捕捉监测时段内的噪声峰值，如工业企业的设备启停噪声、交通干线的鸣笛噪声、建筑施工的冲击噪声等，这类瞬时强噪声虽持续时间短，但对人体听觉与心理的冲击显著。最大声级需与等效连续 A 声级协同使用，才能全面反映噪声污染特征——等效连续 A 声级体现平均水平，最大声级体现峰值强度，二者结合可为噪声污染治理提供更精准的靶向依据，避免因仅关注平均水平而忽视瞬时强噪声的影响。

（三）噪声频谱

噪声频谱是通过分析噪声信号的频率分布特征，将噪声按频率区间拆分，量化不同频率噪声的强度，用于明确噪声的频率构成与主要污染频率段，为噪声污染溯源与治理提供技术支撑。

噪声的危害程度与频率密切相关，中高频噪声对人体听觉系统影响更显著，低频噪声则具有传播距离远、穿透能力强的特点。通过噪声频谱分析，可识别噪声的核心频率范围，如工业机械噪声多集中于中低频段，交通鸣笛噪声多集中于中高频段，据此可精准定位噪声污染源类型；同时，频谱分析结果可指导噪声治理方案制定，针对核心频率段选用适配的降噪设备与措施，提升治理效率。常规监测中，多采用 1/1 倍频程或 1/3 倍频程进行频谱分析，覆盖 20Hz-20kHz 的可听声范围。

二、监测方法：便携式声级计现场监测，布点遵循“代表性、可比性”原则

环境噪声监测以便携式声级计现场监测为核心方法，需严格遵循监测流程规范，科学布设监测点位，控制监测条件，确保监测数据的代表性、可比性与准确性。监测过程需兼顾现场环境特性与仪器操作规范，规避各类干扰因素对监测结果的影响。

（一）便携式声级计选用与操作规范

便携式声级计是现场监测的核心设备，需根据监测需求选用符合精度要求的

仪器，严格遵循操作流程开展监测。仪器精度需满足相关标准要求，常规环境噪声监测选用Ⅱ型及以上声级计，精度误差 $\leq \pm 1.5\text{dB(A)}$ ，具备A计权、快/慢响应模式切换功能，可同时测量等效连续A声级、最大声级等指标，部分高端仪器可配套频谱分析模块。

操作规范核心要点：监测前需对声级计进行校准，采用标准声源校准，校准误差需控制在 $\pm 0.5\text{dB}$ 范围内，监测后再次校准，确保仪器运行正常；监测时声级计麦克风需距地面1.2—1.5m，距障碍物1m以上，避免反射声干扰，麦克风朝向噪声源方向；根据噪声类型选择响应模式，稳态噪声选用慢响应，非稳态噪声、脉冲噪声选用快响应；监测过程中需记录仪器状态、环境条件（风速、温度、湿度）、噪声源活动情况等信息，为数据审核与异常分析提供依据。

（二）监测布点原则与方法

监测布点需严格遵循“代表性、可比性”核心原则，结合监测区域的地形地貌、噪声源分布、功能分区及监测目标，科学设定监测点位，确保点位能真实反映监测区域的噪声污染状况，且不同时段、不同区域的监测数据具有可比性。

代表性原则要求点位覆盖监测区域的核心功能区与噪声敏感点，避开异常干扰区域（如强反射面、局部遮挡物附近），在噪声源影响范围内均匀布设，兼顾区域中心与边缘、敏感点与非敏感点的差异；可比性原则要求同一监测点位、同一监测项目的监测条件保持一致，包括监测时段、仪器参数、布点高度、响应模式等，确保不同批次、不同时段的监测数据可对比分析。常用布点方法包括网格布点法、功能区布点法、敏感点布点法，分别适配区域普查、功能区评价、敏感点保护等不同监测目标，可根据实际场景灵活选用。

三、监测场景：城市区域、交通干线、工业企业边界等不同场景监测规范

不同场景的噪声源类型、强度特征、影响范围及保护目标存在显著差异，需针对性制定监测规范，明确监测时段、布点要求、评价标准等核心内容，确保监测工作贴合场景需求，数据能精准支撑场景化噪声管控。以下梳理核心场景的监测规范差异。

监测场景	核心噪声源	监测时段要求	布点规范	核心评价标准
城市区域	社会生活噪声、商业经营噪声、小型工业噪声	分昼间（6:00-22:00）夜间（22:00 – 次日 6:00）监测，每时段监测 10 分钟，连续监测 2—3 次取平均值	按功能区（居住、商业、工业、交通枢纽等）布点，每个功能区布设 3—5 个点位，点位于区域中心或敏感点附近	《声环境质量标准》（GB 3096-2008）对应功能区限值
交通干线	机动车行驶噪声、鸣笛噪声、轨道交通噪声	昼间、夜间分别监测，每时段监测 20 分钟，同步记录车流量；高峰时段（7:00-9:00、17:00-19:00）需额外监测	沿交通干线两侧布点，距路面边缘 20m 处、距地面 1.2—1.5m，避开桥梁、隧道等特殊路段，点位间距 500—1000m	《声环境质量标准》（GB 3096-2008）4a 类或 4b 类限值
工业企业边界	生产设备运行噪声、风机噪声、管道噪声	昼间、夜间分别监测，每时段监测 10 分钟，连续监测 3 次取平均值；设备正常运行时段监测，避开设备启停瞬时噪声	沿企业边界外 1m 处布点，距地面 1.2m 以上，距障碍物 1m 以上，边界长度超过 100m 至少布设 2 个点位，敏感点侧加密	《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB 12348-2008）对应类别限值

（一）城市区域与交通干线监测补充规范

城市区域监测需重点关注居住、文教、商业等不同功能区的噪声差异，居住、文教等敏感功能区需加密监测点位，确保噪声限值符合人居保护要求；监测时需避开节假日、大型活动等特殊时段，若需监测特殊时段噪声，需单独标注并说明情况。交通干线监测需同步记录车流量、车型构成等信息，建立噪声强度与车流量的关联分析，为交通噪声管控提供依据；针对高速公路、快速路等高速交通干线，布点需适当远离路面，避免气流噪声干扰监测结果。

（二）工业企业边界与其他场景监测补充规范

工业企业边界监测需在企业生产设备正常运行、负荷稳定时开展，若企业存在多台噪声源，需分别监测单台设备运行时的边界噪声，明确核心噪声源贡献度；对存在脉冲噪声的企业，需额外监测脉冲噪声的峰值与持续时间，补充常规指标的不足。此外，建筑施工场地、机场周边等特殊场景，需遵循专属监测规范：建筑施工场地监测需聚焦施工阶段（土方、结构、装修），在场地边界布点，避开施工机械直接正对点位；机场周边监测需结合航班起降时段，在敏感区域布点，同步记录航班频次与机型，评价航空噪声影响。

环境噪声监测技术的规范化应用，是精准管控噪声污染、保障人居环境质量的核心前提。通过等效连续 A 声级、最大声级、噪声频谱等核心指标的组合监测，

搭配便携式声级计现场监测与科学布点方法，可全面捕捉不同场景的噪声污染特征；针对性的场景化监测规范，确保了监测数据的适配性与实用性，为噪声污染溯源、治理与管理决策提供坚实支撑。

第二节 工业噪声监测方法

工业噪声是环境噪声污染的主要来源之一，源于工业生产过程中各类设备的运行、振动、排气及物料传输等活动，具有强度大、频谱复杂、持续性强、影响范围集中等特点。工业噪声不仅会对企业内部操作人员的听觉系统、神经系统及心血管系统造成不可逆损伤，还会通过传播扩散影响厂界周边居民的正常生活与人居环境质量，甚至干扰周边生态系统的稳定。工业噪声监测作为精准管控工业噪声污染、保障职业健康与区域环境质量的核心手段，需聚焦噪声源强与厂界排放两大核心维度，运用专业的频谱分析与源识别技术，严格遵循行业排放标准规范监测流程，为噪声污染溯源、超标治理、设备优化及环境管理决策提供精准、可靠的数据支撑。

一、监测重点：工业设备运行噪声源强与厂界噪声排放监测

工业噪声监测的核心目标是精准掌握噪声产生、传播及排放的全链条特征，为污染管控提供靶向依据，因此需聚焦两大核心重点——工业设备运行噪声源强监测与厂界噪声排放监测。二者相辅相成、层层递进，源强监测明确噪声产生的核心源头与强度特性，厂界排放监测评估噪声对外环境的实际影响程度，共同构成工业噪声监测的完整管控链路。

（一）工业设备运行噪声源强监测

设备运行噪声源强监测是工业噪声监测的基础环节，核心针对工业生产中的各类核心设备，量化其运行状态下的噪声强度、频谱特征及振动特性，明确噪声产生的核心源头、强度等级与污染贡献度，为设备降噪优化、工艺调整及噪声源头管控提供直接数据支撑。相较于厂界排放监测，源强监测更侧重对噪声产生端的精准捕捉，需深入生产现场，在设备近场开展针对性监测。

监测范围涵盖工业生产全流程的核心噪声源设备，包括动力设备（风机、水泵、空压机、发电机等）、生产加工设备（机床、冲压机、研磨机、破碎机等）、

排气设备（锅炉排气口、工艺排气管道等）及物料传输设备（输送机、提升机等）。这类设备运行时噪声特性差异显著，部分设备以空气动力性噪声为主（如风机、空压机），噪声强度高、频谱宽；部分以机械振动噪声为主（如机床、冲压机），噪声与设备转速、负载密切相关；部分以排气噪声为主（如锅炉、工业窑炉），瞬时噪声强度大、穿透力强。

源强监测需遵循“设备正常运行、工况稳定”的核心原则，在设备处于额定负荷、稳定运行状态下开展监测，避开设备启停、故障检修等非稳定工况，确保监测数据能真实反映设备常规运行的噪声水平。监测时需记录设备型号、运行参数、负载情况、安装位置及周边声学环境等信息，为后续噪声源分析、降噪方案制定提供完整背景资料。同时，源强监测需兼顾噪声与振动的协同监测，部分设备的噪声与振动直接关联，通过同步监测振动加速度、速度等参数，可精准定位噪声产生的核心部件（如轴承、齿轮、叶轮等），提升源头管控的针对性。

（二）厂界噪声排放监测

厂界噪声排放监测是工业噪声监测的核心管控环节，聚焦工业企业边界处的噪声排放水平，量化噪声通过传播后对厂界外环境的影响程度，是判断企业噪声排放是否达标、落实环境监管责任的核心依据。厂界排放监测需严格遵循相关排放标准，在企业边界的关键点位开展监测，兼顾噪声的时间分布与空间分布特征。

监测核心关注厂界处的等效连续 A 声级、最大声级等核心指标，部分场景需补充噪声频谱监测，全面反映噪声排放特征。监测范围覆盖企业全部边界，重点关注靠近居民点、学校、医院等敏感目标的边界区域，这类区域对噪声污染的耐受度低，需加密监测点位与频次。同时，厂界噪声排放受生产工况、设备运行时段、气象条件（风速、风向）等因素影响较大，监测时需同步记录企业生产负荷、运行设备数量、气象参数等信息，为数据异常分析、达标判定提供依据。

厂界噪声排放监测与源强监测存在明确关联：通过源强监测明确核心噪声源的贡献度，可针对性优化厂界监测点位；通过厂界监测发现超标问题，可反向溯源至核心噪声源，开展针对性治理。二者协同配合，既能精准管控源头，又能有效约束排放，形成工业噪声污染的全链条管控。

二、技术要点：噪声频谱分析与噪声源识别技术

工业噪声频谱复杂、来源多样，单一的噪声强度监测难以精准定位核心污染

源头、分析污染特性，需依托专业的技术手段，聚焦噪声频谱分析与噪声源识别两大核心技术要点，实现从“量化强度”到“精准溯源”的升级，为噪声污染管控提供技术支撑。

（一）噪声频谱分析技术

噪声频谱分析技术是解析工业噪声特性的核心手段，通过将复合噪声信号按频率区间拆分，量化不同频率段噪声的强度分布，明确噪声的频率构成、核心频率范围及频谱特征，为噪声源识别、降噪方案制定及污染影响评估提供精准技术依据。工业噪声多为复合噪声，包含不同频率的噪声成分，其危害程度与频率特性密切相关，仅通过等效声级难以全面反映噪声污染特征，需借助频谱分析实现深度解析。

常用的频谱分析方法包括 1/1 倍频程分析与 1/3 倍频程分析，二者分别适用于不同监测需求。1/1 倍频程分析将可听声范围（20Hz-20kHz）划分为 10 个左右的频率区间，分析效率高、结果直观，适用于常规噪声频谱筛查、噪声源类型初步判断，可快速识别噪声的核心频率段（如低频、中频、高频）；1/3 倍频程分析将频率区间进一步细化，划分出 30 个以上的频率区间，频谱分辨率更高，可精准捕捉特定频率的噪声峰值，适用于复杂噪声源解析、降噪设备适配性评估及精准溯源分析，能清晰识别不同设备噪声的频谱差异，为区分叠加噪声中的各类源贡献提供依据。

频谱分析需结合工业噪声的来源特性开展针对性解析：空气动力性噪声（如风机、空压机）的频谱多呈宽频分布，在中高频段存在明显峰值；机械振动噪声（如机床、齿轮箱）的频谱多存在离散的峰值，峰值频率与设备转速、部件固有频率相关；排气噪声的频谱多为中高频主导，且伴随明显的谐波成分。通过频谱分析定位核心频率段后，可针对性选用降噪措施，如针对低频噪声选用阻尼降噪、隔振降噪措施，针对中高频噪声选用吸声降噪、消声降噪措施，大幅提升降噪效率。

（二）噪声源识别技术

噪声源识别技术是工业噪声监测的核心进阶手段，核心通过整合噪声强度监测、频谱分析、振动监测等数据，结合专业分析方法，精准定位工业现场的核心噪声源、量化各噪声源的污染贡献度，解决多设备叠加运行场景下噪声源难以区分的问题，为靶向降噪、精准管控提供核心依据。工业生产现场往往存在多台设备同时运行的情况，噪声相互叠加、干扰，仅通过常规监测难以区分各设备的噪

声贡献,需借助专门的源识别技术实现精准拆分。

常用的噪声源识别技术包括主观判断法、频谱分析法、声强法、相关性分析法等,各类方法适配不同场景,可根据监测需求组合选用。主观判断法操作简便,依托监测人员的专业经验,结合设备运行状态、噪声特性及现场勘察,初步判断核心噪声源,适用于噪声源较少、特性差异显著的场景;频谱分析法基于不同设备噪声的频谱特征差异,通过对比叠加噪声频谱与单台设备运行频谱,识别核心噪声源及贡献度,适用于中高频噪声源识别,是工业噪声源识别的常用方法。

声强法是一种精准的客观识别技术,通过测量声音在空间中的声强矢量,确定噪声源的位置、辐射强度及传播方向,可在多噪声源叠加场景下精准定位核心源头,甚至识别隐蔽性噪声源(如管道泄漏噪声、设备内部部件噪声),适用于复杂生产现场的噪声源精准溯源;相关性分析法通过分析噪声信号与设备运行参数(如转速、负载)的相关性,量化设备运行状态与噪声强度的关联程度,明确核心噪声源,适用于机械振动噪声为主的场景。

噪声源识别需遵循“先整体后局部、先宏观后微观”的原则,先通过常规监测与主观判断初步锁定可疑噪声源,再通过频谱分析、声强法等精准技术验证,最终量化各噪声源的贡献度,形成完整的源识别报告。同时,源识别需结合设备运行工况、现场声学环境等因素,避免因工况波动、环境干扰导致识别结果偏差。

三、监测规范：按照工业企业噪声排放标准设置监测点位与频次

工业噪声监测的科学性、准确性与可比性,依赖于严格遵循标准化监测规范,核心依据《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB 12348-2008)及相关行业规范,明确监测点位、监测频次、监测条件、数据处理及达标判定等核心要求,确保监测工作有章可循、结果可靠,为环境监管与执法提供合法依据。

(一) 监测点位设置规范

监测点位的科学设置是保障监测数据代表性的核心前提,需结合监测类型(源强监测、厂界排放监测)、企业边界特征、噪声源分布及敏感目标位置,严格按照标准要求设置,兼顾代表性、合理性与可操作性。

设备运行噪声源强监测点位设置需遵循“近场监测、避开干扰”的原则,根据设备类型与噪声辐射特性确定点位位置:对于中小型设备(如机床、小型风机),监测点位设于设备外表面1m处、距地面1.2—1.5m高度,且位于噪声辐射最强

的方向；对于大型设备（如大型空压机、发电机），沿设备周边均匀布设 3—5 个点位，覆盖主要噪声辐射方向，取各点位监测结果的最大值或平均值作为设备源强；对于空气动力性噪声源（如风机进气口、排气口），点位设于进气口、排气口轴线延长线 1m 处，若排气口朝向高空，点位需对应调整至噪声辐射最强区域。同时，源强监测点位需距障碍物 1m 以上，避开反射声、回声干扰，确保监测数据能真实反映设备自身的噪声辐射水平。

厂界噪声排放监测点位设置需严格遵循 GB 12348-2008 标准要求，核心要点包括：点位设于工业企业厂界外 1m 处、距地面 1.2m 以上，且距障碍物（如围墙、建筑物）1m 以上，若厂界有围墙或遮挡物，点位需设于围墙外 1m 处，确保监测点位能反映厂界外的实际噪声水平；沿企业边界均匀布设点位，边界长度不足 100m 时至少布设 2 个点位，边界长度超过 100m 时，每 500m 增设 1 个点位，重点覆盖噪声源强较大区域及靠近敏感目标的边界段；对于存在多个噪声源、边界形状不规则的企业，需结合噪声源分布与边界特征，适当加密点位，确保全面覆盖噪声排放关键区域；点位设置需避开交通干线、社会生活噪声等外部干扰源，若无法避开，需在监测数据中注明干扰情况，并采取相应的修正措施。

（二）监测频次与时段规范

监测频次与时段的设置需结合企业生产工况、噪声特性及监测目标，确保监测数据能全面反映噪声排放的时间分布特征，避免因监测时段单一导致结果偏差，严格遵循标准要求与监管需求设定。

常规监督性监测的频次与时段需符合以下要求：监测分昼间与夜间两个时段开展，昼间时段为 6:00-22:00，夜间时段为 22:00 – 次日 6:00，若企业存在夜间生产工况，必须开展夜间监测，评估夜间噪声对周边居民的影响；每个监测时段连续监测 10 分钟，同步记录等效连续 A 声级、最大声级等核心指标，连续监测 3 次，取 3 次监测结果的平均值作为该时段的监测结果，确保数据的稳定性与代表性；对于噪声强度波动较大的企业，需适当延长监测时间至 20—30 分钟，或增加监测次数，全面捕捉噪声的波动特征。

针对性监测的频次与时段需结合监测目标调整：设备源强监测需在设备额定负荷、稳定运行状态下开展，每个设备监测 3—5 次，取平均值作为设备源强，同时记录设备运行参数与负载情况；企业整改后的验收监测，需在整改完成后、设备正常运行工况下开展，监测频次不少于常规监督性监测，确保整改效果达标；

对于存在季节性生产、间歇性生产的企业，需在生产高峰期开展监测，若生产周期较长，需分不同生产阶段开展 2—3 次监测，全面反映生产周期内的噪声排放特征。

（三）监测条件与数据处理规范

监测条件的控制与数据处理的标准化，是保障监测数据准确性、可比性与合法性的重要环节，需严格遵循标准要求，规避各类干扰因素，规范数据处理流程。

监测条件控制核心要点包括：气象条件需符合监测要求，监测时风速需控制在 5m/s 以下，避免大风对监测设备的干扰，雨天、雪天等恶劣天气需暂停监测，防止设备损坏与数据偏差；监测时需确保企业处于正常生产工况，生产负荷不低于额定负荷的 75%，核心噪声源设备正常运行，避免因停产、减产导致噪声水平偏低；监测设备需符合精度要求，选用 II 型及以上便携式声级计，具备 A 计权、快 / 慢响应模式及频谱分析功能，监测前、后需用标准声源校准，校准误差控制在 $\pm 0.5\text{dB}$ 范围内，确保设备运行正常；监测人员需避开监测点位的声传播路径，距声级计麦克风 1m 以上，避免人体对监测数据的干扰。

数据处理需遵循标准化流程：对每个监测时段的 3 次监测数据，先剔除异常值（若单次数据与平均值偏差超过 $\pm 2\text{dB}$ ，需重新监测），再计算平均值作为该时段的最终监测结果；等效连续 A 声级、最大声级等指标的计算需符合 GB 12348-2008 标准要求，频谱数据需按规定的频率区间整理；监测数据需结合监测条件、工况信息、干扰情况进行综合分析，若存在外部干扰，需在报告中注明，必要时进行数据修正；监测结果的达标判定需严格对照 GB 12348-2008 标准中对应的噪声限值（按企业所在区域声环境功能区类别确定），昼间、夜间监测结果分别判定，若任一时段超标，即判定为噪声排放不达标。

（四）监测报告与档案管理规范

工业噪声监测需形成完整的监测报告与档案资料，为环境监管、执法取证、企业整改提供合法依据，确保监测工作的可追溯性。监测报告需内容完整、数据准确、结论明确，核心包括企业基本信息、监测目的与依据、监测点位布设、监测设备与条件、监测结果与数据处理、达标判定、噪声源分析及整改建议等内容，同时需附监测点位示意图、设备校准记录、工况记录等佐证材料。

监测档案管理需遵循“完整、规范、可追溯”的原则，将监测报告、原始监测数据、设备校准记录、工况记录、点位布设图、现场照片等资料分类归档，建

立电子档案与纸质档案双重管理体系；档案资料需保存至少 5 年，涉及企业整改、执法取证的重要档案需长期保存；档案资料需专人负责管理，确保完整性与安全性，便于后续查阅、复核与追溯。

工业噪声监测方法的规范化应用，是精准管控工业噪声污染、保障职业健康与区域环境质量的核心支撑。通过聚焦设备运行噪声源强与厂界噪声排放两大监测重点，运用噪声频谱分析与源识别核心技术，严格遵循《工业企业厂界环境噪声排放标准》规范监测点位、频次、条件及数据处理，可实现工业噪声从源头产生到对外排放的全链条精准监测。本节内容衔接前文环境噪声监测基础技术，构建了针对性强、实操性高的工业噪声监测技术体系，为工业企业噪声污染自查、环境监管部门监督监测及噪声污染治理提供了全面技术指引。

第三节 电磁辐射监测技术

电磁辐射是由电荷做变速运动产生的一种物理现象，以电磁波形式在空间中传播，广泛存在于自然环境与人类生产生活中。随着电力工业、通信技术、电子设备的快速发展，移动通信基站、变电站、输电线等设施的数量大幅增加，人工电磁辐射已成为环境物理污染的重要组成部分。

一、监测对象：移动通信基站、变电站、输电线等设施的电磁辐射

电磁辐射监测的核心目标是精准捕捉人工电磁辐射源的辐射强度、分布特征及影响范围，为风险评估与管控提供靶向依据。

（一）射频电磁辐射源监测

射频电磁辐射源主要产生高频电磁波，广泛应用于通信、广播、雷达、工业加热等领域，其辐射强度与频率、功率、运行状态密切相关，是电磁辐射监测的核心重点之一。这类辐射源的特点是辐射范围广、传播距离远，易对周边居民及敏感设备造成影响，需针对性开展监测。

移动通信基站是最典型的射频电磁辐射源，包括 2G、3G、4G、5G 基站及微站、室分站等，工作频率覆盖 800MHz-6GHz 频段，通过天线向周边发射电磁波实现信号覆盖。基站电磁辐射监测重点关注天线周边的辐射功率密度、电场强度，核心监测区域为基站天线主瓣方向、周边敏感点（居民区、学校、医院等）及基站

机房周边。监测过程中需同步记录基站运行参数，包括发射功率、工作频率、天线高度、下倾角、极化方式等，这些参数直接影响辐射强度与分布范围，为辐射水平评估与溯源提供关键依据。

除移动通信基站外，射频电磁辐射源还包括广播电视发射塔、雷达站、工业射频设备等。广播电视发射塔工作频率覆盖中波、短波、超短波频段，辐射功率大、覆盖范围广，监测重点为发射塔周边辐射功率密度及电场强度，关注辐射信号对周边环境的影响；雷达站工作频率多为微波频段，辐射强度高、方向性强，监测需聚焦雷达天线扫描范围及周边敏感区域，避免高强度辐射对人体及电子设备造成干扰；工业射频设备（如射频加热器、射频焊接机）主要应用于工业生产过程，工作频率集中在特定射频频段，监测重点为设备运行时的周边辐射水平，保障操作人员职业健康与厂区周边环境安全。

（二）工频电磁辐射源监测

工频电磁辐射源主要产生低频电磁波，源于电力生产、输送与使用过程，工作频率多为 50Hz（我国工频标准），其辐射特性与电压等级、电流强度、设备结构密切相关，辐射范围相对集中但强度可能较高，需重点管控。

输电线是工频电磁辐射的主要来源之一，包括高压输电线、超高压输电线及配电线路，电压等级从 10kV 至 1000kV 不等，辐射强度随电压等级升高而增加。输电线电磁辐射监测重点关注线路下方及两侧的工频电场强度与工频磁场强度，核心监测区域为线路走廊、周边居民区、农田等敏感区域。监测需结合线路电压等级、导线高度、线间距等参数，分析辐射强度的空间分布规律，评估对周边环境及人体的潜在影响。

变电站（包括升压变电站、降压变电站、配电变电站）也是核心工频电磁辐射源，站内变压器、断路器、母线等设备运行时会产生工频电磁辐射，辐射强度集中在设备周边及变电站边界。变电站电磁辐射监测重点为站内关键设备周边、变电站边界及周边敏感点的工频电场强度与工频磁场强度，监测过程中需记录变电站运行负荷、电压等级、设备布局等信息，明确辐射源强与运行工况的关联关系，为变电站选址优化、防护措施制定提供数据支撑。此外，大型工业企业的工频用电设备、配电设施等也属于工频电磁辐射源监测范畴，需结合生产工况开展针对性监测，保障职业健康安全。

二、监测仪器：电磁辐射分析仪，明确监测频率范围与量程选择

电磁辐射监测对仪器的精度、频率响应范围、量程适配性及稳定性要求极高，核心仪器为电磁辐射分析仪，需根据监测对象的频率特性、辐射强度范围及监测指标，科学选择仪器型号，明确频率范围与量程参数，同时严格遵循仪器操作与校准规范，确保监测数据的准确性、可靠性与可比性。

（一）电磁辐射分析仪的核心类型与功能

电磁辐射分析仪按监测类型可分为射频电磁辐射分析仪与工频电磁辐射分析仪，各类仪器基于不同检测原理，具备差异化的功能特点与适用范围，需结合监测对象精准选用。

射频电磁辐射分析仪主要用于监测高频电磁辐射，核心功能为测量射频频段的电场强度、磁场强度、功率密度等指标，部分高端仪器可实现频谱分析、频率扫描、数据存储与导出等功能。这类仪器的频率响应范围需覆盖监测对象的工作频段，例如针对移动通信基站监测，需选用频率范围覆盖 800MHz-6GHz 的分析仪；针对广播电视发射塔监测，需选用覆盖中波、短波、超短波频段的分析仪。射频电磁辐射分析仪按测量方式可分为便携式与固定式，便携式分析仪操作灵活、便于现场监测，适用于移动监测、敏感点筛查及应急监测；固定式分析仪稳定性强、可连续监测，适用于长期定点监测、辐射源在线监控及数据趋势分析。

工频电磁辐射分析仪主要用于监测 50Hz 工频电磁辐射，核心功能为测量工频电场强度与工频磁场强度，部分仪器可同时测量谐波分量、电场极化方向等参数。这类仪器需具备极低的频率响应下限，确保对 50Hz 工频信号的精准捕捉，同时需具备抗干扰能力，规避现场其他电磁信号对监测结果的影响。工频电磁辐射分析仪同样分为便携式与固定式，便携式适用于变电站、输电线周边的现场监测与点位筛查；固定式适用于变电站边界、输电线走廊的长期连续监测，实时捕捉辐射强度的变化趋势。

（二）频率范围与量程的科学选择

频率范围与量程是电磁辐射分析仪选用的核心参数，直接决定仪器对监测对象的适配性与测量精度，需结合监测对象的工作频率、辐射强度特征及监测指标要求，针对性选择，避免因参数不匹配导致监测数据偏差。

频率范围选择需遵循“全覆盖、无遗漏”原则，确保仪器的频率响应范围

完全覆盖监测对象的工作频段及可能的谐波频段。例如，监测 5G 基站时，考虑到基站工作频率为 2.6GHz、3.5GHz、4.9GHz 等频段，需选用频率范围至少为 1GHz-8GHz 的射频电磁辐射分析仪，同时需确保仪器在该频段内的频率响应误差符合标准要求（一般不超过 $\pm 3\text{dB}$ ）；监测工频输电线时，需选用频率范围覆盖 50Hz 工频信号及谐波分量（100Hz、150Hz 等）的工频电磁辐射分析仪，确保对工频信号的全面捕捉。对于多频段辐射源共存的场景，可选用宽频率范围的综合型电磁辐射分析仪，兼顾不同频段的监测需求，提升监测效率。

量程选择需遵循“适配辐射强度、兼顾精度”原则，确保仪器的量程范围能覆盖监测对象的辐射强度变化区间，同时在核心监测范围内具备较高的测量精度。量程过大易导致低强度辐射信号的测量误差增大，量程过小则无法准确测量高强度辐射信号，甚至可能损坏仪器。例如，监测移动通信基站周边辐射时，考虑到基站周边功率密度通常在 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 级别，需选用功率密度量程为 $0.01\mu\text{W}/\text{cm}^2$ - $100\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的分析仪，确保低强度信号的精准测量；监测工业射频设备近距离辐射时，因辐射强度较高，需选用量程更大的分析仪（如 $0.1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ - $10\text{mW}/\text{cm}^2$ ），适配高强度辐射信号的测量需求。此外，部分高端分析仪具备自动量程调节功能，可根据现场辐射强度自动切换量程，兼顾测量范围与精度，适用于辐射强度波动较大的场景。

（三）仪器操作与校准规范

仪器的规范操作与定期校准是保障监测数据准确性的核心前提，需严格遵循仪器操作手册与国家计量校准规范，规范操作流程，定期开展校准工作，确保仪器处于正常运行状态。

仪器操作规范核心要点包括：监测前需对仪器进行通电预热，预热时间根据仪器型号确定（一般为 10—30 分钟），确保仪器性能稳定；根据监测对象与指标，正确设置仪器参数，包括频率范围、量程、测量时间、采样间隔等，确保参数设置与监测需求一致；监测时需正确安装天线，确保天线朝向与辐射源传播方向一致，射频监测时天线高度一般为 1.5m（人体高度），工频监测时探头需远离人体及金属物体，避免干扰；监测过程中需保持仪器稳定，避免震动、遮挡，同时记录现场环境条件（温度、湿度、风速、周边障碍物等），为数据异常分析提供依据；监测结束后需及时关闭仪器，整理辅助设备，做好仪器使用记录。

仪器校准需严格遵循国家计量规范，核心要求包括：新仪器投入使用前需完

成首次校准,取得计量合格证书,校准项目包括频率响应、量程误差、示值误差、稳定性等;在用仪器定期校准,校准周期根据仪器类型与使用频率确定,一般为6个月至1年,使用频繁或处于恶劣环境的仪器需缩短校准周期;校准需由具备资质的计量机构开展,采用符合标准的校准源与校准方法,确保校准结果的合法性与准确性;校准后需记录校准数据、校准证书编号、校准人员等信息,若校准误差超过允许范围,需停止使用并维修,维修后重新校准合格方可投入使用;现场监测前可使用便携式校准源对仪器进行自检,确保仪器响应正常,规避仪器故障导致的监测偏差。

三、监测标准：依据电磁环境控制限值，确定监测布点与评价方法

电磁辐射监测的科学性与规范性依赖于严格遵循国家相关标准,核心依据《电磁环境控制限值》(GB 8702-2014),明确不同频段、不同场景的电磁辐射控制限值,结合监测对象特性确定监测布点原则、监测频次及评价方法,确保监测工作有章可循、结果可靠,为环境监管与执法提供合法依据。

(一) 核心监测标准与控制限值

《电磁环境控制限值》(GB 8702-2014)是我国电磁辐射环境监测与评价的核心国家标准,明确了工频电磁辐射与射频电磁辐射的控制限值,按辐射类型、频段、暴露场景分类设定,兼顾人体健康保护与生态环境安全,同时考虑了不同辐射源的特性与影响范围。

工频电磁辐射控制限值针对50Hz工频信号,明确了工频电场强度与工频磁场强度的限值要求:公众暴露场景下,工频电场强度限值为4kV/m,工频磁场强度限值为0.1mT;职业暴露场景下,限值标准更为严格,工频电场强度限值为20kV/m,工频磁场强度限值为0.5mT。该限值适用于变电站、输电线、工频用电设备等工频辐射源的监测与评价,确保公众与从业人员的健康安全。

射频电磁辐射控制限值按频段分类设定,覆盖30MHz-300GHz频段,以功率密度或电场强度为核心评价指标:公众暴露场景下,30MHz-3000MHz频段的功率密度限值为0.4W/m²(等效电场强度为12V/m),3000MHz-300GHz频段的功率密度限值为2W/m²(等效电场强度为27.5V/m);职业暴露场景下,各频段限值均为公众暴露限值的5倍。此外,标准还对特定频段的辐射源(如移动通信基站、广播电视发射塔)设定了补充要求,明确了辐射源周边的控制区域与监测

要求，为各类射频辐射源的监测与评价提供统一基准。

（二）监测布点原则与方法

监测布点的科学设置是保障监测数据代表性的核心前提，需结合监测对象类型、辐射特性、周边环境敏感目标及监测目标，严格遵循“代表性、合理性、可操作性”原则，确定布点位置、数量及高度，确保点位能真实反映辐射源的辐射分布特征与影响范围。

射频辐射源布点需结合辐射源的方向性、功率大小及周边环境，采用“敏感点布点+网格布点+主瓣方向布点”结合的方式：移动通信基站监测需在天线主瓣方向、副瓣方向及周边敏感点（居民区、学校、医院等）布设点位，主瓣方向点位间距为50—100m，敏感点需在建筑物窗外1m处布设点位，监测高度为1.5m（人体高度）；广播电视发射塔监测需以发射塔为中心，按半径500m—2000m的范围布设网格点位，网格间距为200—500m，同时在发射塔周边敏感点加密布点，监测高度为地面1.5m或建筑物顶部；工业射频设备监测需在设备周边1m、3m、5m处布设点位，覆盖设备的主要辐射方向，同时在操作岗位布设点位，评估职业暴露风险。

工频辐射源布点需结合辐射源的电压等级、设备布局及周边环境，采用“线路走廊布点+边界布点+敏感点布点”结合的方式：输电线监测需在线路下方及两侧30m范围内布设点位，点位间距为50—100m，监测高度为地面1.5m，同时在周边居民区、农田等敏感区域加密布点；变电站监测需在站内关键设备周边、变电站边界外1m处及周边敏感点布设点位，边界布点间距为50—100m，敏感点布点需覆盖居民区、学校等区域，监测高度为1.5m；工频用电设备监测需在设备周边0.5m、1m、2m处布设点位，覆盖设备的辐射范围，同时在操作岗位布设点位，保障职业健康。

布点的补充要求：监测点位需避开金属物体、建筑物遮挡等干扰因素，距金属物体至少1m，距建筑物外墙至少0.5m，确保监测信号不受反射、遮挡影响；点位设置需便于仪器操作与数据采集，避免在危险区域（如高压线下、设备运行区）布设点位；针对复杂地形（如山地、丘陵、城市建筑群），需结合地形特征调整点位位置与高度，确保点位能真实反映辐射水平；每个监测点位需记录坐标信息、海拔、周边环境描述等，便于数据的空间分析与追溯。

（三）监测频次与评价方法

监测频次的设置需结合监测对象的运行状态、辐射特性及监测目标，确保监测数据能全面反映辐射水平的时间变化特征，避免因监测时段单一导致结果偏差；评价方法需严格依据国家标准，结合监测数据与控制限值，科学判定辐射水平是否达标，量化辐射影响程度，为风险管控提供依据。

监测频次需按监测类型分类设定：常规监督性监测针对运行稳定的辐射源（如已投入使用的基站、变电站、输电线），射频辐射源每半年至1年监测1次，每次监测连续采样3—5次，取平均值作为监测结果；工频辐射源每年监测1次，重点关注负荷高峰期的辐射水平，每次监测连续采样5—10次，确保数据稳定性。针对性监测针对新建、改建、扩建的辐射源，需在项目建成运行后开展验收监测，监测频次不少于2次，分别在设备满负荷、半负荷运行状态下开展，全面评估辐射源的运行影响；针对投诉举报、超标预警等异常情况，需立即启动应急监测，加密监测点位与频次，实时捕捉辐射水平变化，为应急处置提供数据支撑。特殊场景监测（如大型活动、设备检修）需结合实际需求调整频次，确保活动期间或检修过程中的辐射安全。

监测评价方法需遵循“单因子评价为主、综合分析为辅”的原则：单因子评价针对监测指标（电场强度、磁场强度、功率密度），将实测值与对应频段、场景的控制限值对比，计算超标倍数，判定是否达标；若实测值 $\leq$ 控制限值，判定为辐射水平达标，无超标风险；若实测值 $>$ 控制限值，判定为辐射水平超标，需进一步排查超标原因，采取管控措施。综合分析需结合监测数据、辐射源运行参数、周边环境特征等，评估辐射源的影响范围与潜在风险，明确核心超标区域与敏感目标，为污染溯源、整改方案制定提供依据。

电磁辐射监测技术的规范化应用，是精准管控电磁污染、保障人居环境安全与公共健康的核心支撑。通过聚焦移动通信基站、变电站、输电线等核心辐射源，选用专业电磁辐射分析仪并科学确定频率范围与量程，严格依据《电磁环境控制限值》规范监测布点、频次及评价方法，可实现电磁辐射从源头产生到环境影响的全链条精准监测。

第四节 电离辐射监测技术

电离辐射源于放射性物质的衰变及核反应过程，具有能量高、穿透力强、隐蔽性显著等特点，其传播无需介质，可通过直接或间接作用破坏生物体的遗传物质与细胞结构，对人体健康、生态环境造成长期潜在危害。电离辐射广泛存在于核工业生产、放射性废物处理、医疗放射、核设施运行等场景，若管控不当，会通过空气、水体、土壤等环境介质扩散，形成区域性辐射污染。电离辐射监测作为精准管控辐射风险、保障人体健康与生态环境安全的核心手段，需聚焦 α 、 β 、 γ 三类核心射线，运用专业监测仪器，针对不同污染源与环境介质开展监测，严格适配核设施周边、放射性废物处理场等场景的监测规范，为辐射污染溯源、剂量评估、风险管控及环境管理决策提供精准、可靠的数据支撑。

一、监测类型： α 、 β 、 γ 射线监测，针对放射性污染源与环境介质

电离辐射监测的核心目标是精准捕捉辐射源强度、环境介质中放射性核素含量及辐射剂量水平，为风险评估与管控提供靶向依据。监测工作需聚焦 α 、 β 、 γ 三类核心射线，兼顾放射性污染源与空气、水体、土壤等环境介质，形成“源头-介质-剂量”全链条监测体系，全面覆盖辐射产生、传播、迁移的全过程，确保无监测盲区。

（一） α 、 β 、 γ 射线专项监测

α 、 β 、 γ 射线的物理特性、穿透能力、危害程度存在显著差异，需针对性制定监测方案，选用适配技术与仪器，精准量化各类射线的辐射强度与剂量水平，为风险分级管控提供依据。三类射线的核心特性差异决定了其监测重点与技术路径的不同，需结合特性开展专项监测。

α 射线监测聚焦放射性核素衰变释放的 α 粒子，其质量大、电荷数高，电离能力极强，但穿透能力极弱，仅能穿透几厘米空气或一张薄纸，无法穿透人体皮肤表皮，主要通过吸入、食入等途径进入人体，对体内组织造成损伤。 α 射线监测重点针对放射性污染源表面、环境介质中的 α 放射性核素含量，常用表面污染监测与样品实验室分析结合的方式，监测指标包括 α 射线强度、 α 放射性核素活度浓度等，核心关注铀、钍、镭等典型 α 放射性核素，适用于核燃料

加工、放射性废物处理等场景的源头监测与环境筛查。

β 射线监测针对核素衰变释放的 β 粒子，其质量小、电荷数低，电离能力弱于 α 射线，但穿透能力强于 α 射线，可穿透几毫米厚的金属或数厘米厚的人体组织，既能造成体表损伤，也可能通过内照射危害人体健康。 β 射线监测兼顾表面污染与环境剂量监测，监测指标包括 β 射线强度、 β 放射性核素活度浓度、吸收剂量率等，核心关注氚、碳-14、锶-90 等典型 β 放射性核素。监测场景涵盖放射性污染源周边、核设施排放口、环境介质等，可通过现场快速监测与实验室精准分析结合，全面捕捉 β 射线的辐射特征。

γ 射线监测是电离辐射监测的核心重点，其本质是高频电磁波，无静止质量、电荷数为零，电离能力最弱，但穿透能力极强，可穿透数十厘米厚的混凝土或数厘米厚的铅，能远距离传播并造成外照射损伤，对人体全身组织器官均有潜在危害。 γ 射线监测聚焦辐射剂量水平与 γ 放射性核素识别，监测指标包括 γ 吸收剂量率、周围剂量当量率、 γ 放射性核素活度与种类等，核心关注钴-60、铯-137、铪-192 等典型 γ 放射性核素。监测覆盖范围最广，可通过现场实时监测、移动监测与实验室分析结合，实现辐射剂量的精准量化与核素的快速识别，适配各类电离辐射应用场景。

（二）放射性污染源与环境介质监测

电离辐射监测需兼顾“源头管控”与“介质追踪”，一方面针对放射性污染源开展直接监测，明确辐射源强与释放特征；另一方面针对空气、水体、土壤等环境介质开展监测，追踪放射性核素的迁移路径与累积规律，二者协同配合，形成完整的辐射污染管控链路。

放射性污染源监测聚焦辐射产生的核心源头，包括核设施（反应堆、核燃料处理厂等）、放射性同位素生产与使用设备、放射性废物储存容器等。监测重点为污染源表面污染水平、辐射剂量率及放射性核素释放强度，需在污染源周边、排放口等关键位置布设监测点位，实时捕捉辐射源的运行状态与释放特征，及时发现泄漏、超标等异常情况。监测过程中需同步记录污染源运行参数、负荷情况、操作流程等信息，为辐射源强评估与污染溯源提供背景资料。

环境介质监测针对放射性核素迁移扩散的载体，全面追踪辐射污染的传播路径与影响范围。空气介质监测重点采集大气气溶胶样品，分析其中放射性核素活度浓度，同时监测空气中 γ 剂量率，评估放射性核素通过呼吸途径对人体的暴

露风险；水体介质监测涵盖地表水、地下水、海水及工业废水，分析水体中 α 、 β 、 γ 放射性核素含量，重点关注饮用水源地、核设施周边水体等敏感区域；土壤介质监测聚焦土壤中放射性核素的累积情况，分析表层与深层土壤中的核素活度浓度，评估辐射污染对土壤生态及农作物安全的影响。此外，还需针对生物介质（农作物、动植物）开展监测，分析放射性核素的生物富集规律，评估食物链传递风险。

二、监测仪器：电离室剂量率仪、闪烁计数器等专业监测设备

电离辐射监测对仪器的精度、稳定性、抗干扰能力及适配性要求极高，需选用符合国家计量标准的专业监测设备，根据监测类型、射线特性及场景需求，针对性选用电离室剂量率仪、闪烁计数器等仪器，确保监测数据的准确性、可靠性与可比性。各类仪器基于不同检测原理，具备差异化的性能特点与适用范围，需科学搭配使用。

（一）核心监测仪器分类及性能特性

常用电离辐射监测仪器按检测原理可分为电离室类、闪烁计数类、半导体类等，各类仪器在检测限、精度、适用射线类型、响应速度等方面存在差异，需结合监测需求精准选用。以下梳理核心监测仪器的性能特性与适用场景，为仪器选型提供依据。

仪器类型	核心原理	适用射线类型	检测限与精度	核心优势	典型适用场景
电离室剂量率仪	射线使气体电离产生离子对，通过测量离子流强度换算剂量率	γ 射线、X 射线，部分可测 β 射线	剂量率范围： 0.01 $\mu\text{Sv/h}$ -10Sv/h，精度 $\pm 5\%$ 以内	稳定性好、响应线性佳、抗干扰能力强，可耐受高剂量辐射	核设施周边、放射性废物处理场 γ 剂量率现场监测
闪烁计数器	射线激发闪烁体产生荧光，通过光电倍增管将荧光信号转化为电信号	α 、 β 、 γ 射线，可实现多射线监测	活度浓度检测限：10-3Bq/L-10Bq/L，精度 $\pm 3\%$ - $\pm 8\%$	灵敏度高、响应速度快、可实现核素初步识别	环境介质样品分析、辐射源快速筛查、低剂量辐射监测
半导体探测器	射线在半导体材料中产生电子-空穴对，通过测量载流子迁移形成的电信号量化辐射	α 、 β 、 γ 射线，适配高精度核素分析	能量分辨率高，核素识别精度优于闪烁计数器	能量分辨率极高、测量精度高、体积小	实验室核素精准分析、便携式辐射源识别、低活度样品检测

仪器类型	核心原理	适用射线类型	检测限与精度	核心优势	典型适用场景
表面污染监测仪	基于电离或闪烁原理，检测污染源表面放射性粒子的辐射强度	α 、 β 射线，部分可测低能 γ 射线	表面污染水平检测限： 0.01Bq/cm ² - 0.1Bq/cm ²	操作简便、响应快速、可现场实时检测	核设施设备表面、放射性废物容器、操作人员体表污染监测
放射性气溶胶采样器	采集大气中气溶胶颗粒，富集其中放射性核素，配套后续分析仪器检测	α 、 β 、 γ 放射性核素（气溶胶结合态）	采样效率 $\geq 90\%$ ，可富集低浓度核素	富集效率高、适配各类后续分析仪器	大气环境放射性气溶胶监测、核设施周边空气监测

注：表格中性能参数为常规型号仪器参考值，实际数值受仪器型号、校准状态、监测环境等因素影响，需结合具体场景选用适配仪器并定期校准。

（二）仪器选用与校准规范

仪器的科学选用与定期校准是保障监测数据准确性的核心前提，需结合监测类型、射线特性、场景需求及精度要求，针对性选用仪器，同时严格遵循计量校准规范，确保仪器处于正常运行状态，监测数据具备合法性与可比性。

仪器选用需遵循“适配性、精准性、实用性”原则：针对 γ 射线剂量率监测，优先选用电离室剂量率仪，其稳定性与抗干扰能力适配现场复杂环境；针对 α 、 β 表面污染监测，选用表面污染监测仪，确保快速现场筛查；针对环境介质样品的核素精准分析，选用闪烁计数器或半导体探测器，兼顾灵敏度与分辨率；针对大气中放射性气溶胶监测，需搭配放射性气溶胶采样器与后续分析仪器，实现核素富集与精准检测。同时，需根据监测精度要求选用对应等级仪器，常规环境监测选用Ⅱ级及以上仪器，科研分析或高精度监测选用Ⅰ级仪器。

仪器校准需严格遵循国家计量规范，核心要求包括：新仪器投入使用前需完成首次校准，取得计量合格证书；在用仪器定期校准，校准周期根据仪器类型与使用频率确定，一般为6个月至1年，使用频繁或处于恶劣环境的仪器需缩短校准周期；校准需由具备资质的计量机构开展，采用符合标准的辐射源与校准方法，校准项目包括剂量率示值误差、能量响应、响应时间、稳定性等；校准后需记录校准数据、校准证书编号、校准人员等信息，若校准误差超过允许范围，需停止使用并维修，维修后重新校准合格方可投入使用。此外，现场监测前需对仪器进行自检与预热，确保仪器响应正常、参数设置准确，规避仪器故障导致的监测偏差。

三、应用场景：核设施周边、放射性废物处理场等区域的辐射环境监测

电离辐射监测的应用场景具有较强的针对性，不同场景的辐射源类型、强度特征、环境条件及保护目标存在差异，需结合场景特性制定标准化监测方案，明确监测点位、频次、指标及管控要求，确保监测工作贴合场景需求，数据能精准支撑风险管控与环境管理。核设施周边、放射性废物处理场是电离辐射监测的核心场景，同时需覆盖医疗放射、核矿开采等典型场景。

（一）核设施周边辐射环境监测

核设施（包括核反应堆、核燃料加工厂、核动力装置、核科研设施等）是电离辐射的主要源头，其运行过程中可能释放放射性核素，对周边环境与人体健康造成潜在风险，需建立全方位、多层次的辐射环境监测体系，实现全生命周期监测管控。

监测范围与点位设置需结合核设施类型、规模、放射性释放特征及周边环境敏感目标，构建“近场—中场—远场”三级监测网络：近场监测覆盖核设施厂区分边界及周边 1km 范围内，重点布设 γ 剂量率监测点位、放射性气溶胶采样点、地表水与地下水监测点，实时监测辐射剂量与核素释放情况；中场监测覆盖周边 1km—10km 范围，按网格布点与敏感点布点结合的方式，布设 γ 剂量率自动监测站、土壤与农作物监测点位，追踪放射性核素的迁移扩散规律；远场监测覆盖周边 10km 以外区域，设置背景监测点，监测区域辐射本底水平，为异常污染评估提供基准依据。同时，针对饮用水源地、居民区、学校等敏感目标，需加密监测点位，提升监测频次。

监测指标与频次需严格遵循核设施辐射环境监测规范：核心监测指标包括 γ 剂量率、周围剂量当量率、大气放射性气溶胶活度浓度、地表水与地下水放射性核素含量、土壤与农作物放射性核素含量等；监测频次分常规监测与应急监测，常规监测中， γ 剂量率实现 24 小时连续自动监测，大气、水体、土壤等介质每月至每季度监测 1 次，敏感目标每季度加密监测 1 次；应急监测针对核设施泄漏、故障等突发情况，立即启动全方位监测，加密点位与频次，实时追踪污染范围与强度，为应急处置提供数据支撑。监测过程中需同步记录核设施运行工况、气象参数、水文条件等信息，为数据异常分析与风险评估提供依据。

（二）放射性废物处理场辐射环境监测

放射性废物处理场（包括放射性废物储存库、处置场、处理厂等）是放射性核素的集中区域，废物在储存、处理、处置过程中可能发生泄漏，导致周边环境受到污染，需聚焦“储存－处理－处置”全流程，开展针对性辐射环境监测，防范泄漏风险。

监测重点包括废物储存容器表面污染、处理过程中放射性释放、处置场周边环境介质污染及辐射剂量水平。监测点位设置需覆盖关键区域：废物储存区布设表面污染监测点与 γ 剂量率监测点，定期检测容器表面污染水平与周边剂量率，及时发现泄漏；处理车间布设实时监测仪器，监测处理过程中放射性气溶胶与 γ 剂量率，确保操作环境安全；处置场边界及周边布设环境介质监测点，包括地下水监测井、土壤采样点、大气采样点，追踪放射性核素是否向周边迁移；同时，在处置场上风向、下风向设置背景监测点与对照监测点，对比分析污染影响。

监测规范与管控要求：核心监测指标包括表面污染水平、 γ 剂量率、放射性气溶胶活度浓度、地下水与土壤中放射性核素含量等；监测频次方面，储存容器表面污染每月监测 1 次，处理车间实时在线监测，处置场周边环境介质每季度监测 1 次，每年开展 1 次全面监测评估；若发现监测数据异常，需立即加密监测，排查泄漏点，采取防渗、封堵等管控措施，同时扩大监测范围，评估污染影响。此外，需监测处置场周边生态系统，分析放射性核素对动植物的影响，确保生态环境安全。

（三）其他典型应用场景监测

除核心场景外，电离辐射监测还需覆盖医疗放射、核矿开采、放射性同位素应用等典型场景，针对性制定监测方案，管控辐射风险。医疗放射场景（医院放射治疗室、核医学科等）监测重点为诊疗设备的辐射剂量输出、机房周边辐射剂量水平及操作人员体表污染，确保设备运行合规，避免对医护人员、患者及周边环境造成影响，监测频次每半年至 1 年 1 次，设备维修或更换后需及时校准监测。

核矿开采与加工场景（铀矿、钍矿等）监测聚焦开采过程中放射性粉尘的释放、矿坑废水与废渣的放射性污染，监测点位覆盖采矿工作面、选矿车间、废渣堆放场及周边水体、土壤，监测指标包括放射性粉尘浓度、废水与废渣中放射性核素含量、周边环境 γ 剂量率，确保开采与加工过程符合辐射安全标准，防范粉尘扩散与水体污染风险。

放射性同位素应用场景（工业探伤、农业育种、科研实验等）监测重点为同位素储存、运输、使用过程中的辐射泄漏与剂量水平，确保操作过程安全，避免同位素丢失或泄漏造成污染，监测频次结合使用频率确定，每次使用前需检查仪器状态与周边辐射水平，使用后开展场地污染筛查。

（四）监测数据应用与风险管控

电离辐射监测数据的核心应用在于辐射风险评估、污染溯源与管控决策，需结合监测数据与场景特性，科学评估辐射对人体健康与生态环境的潜在风险，明确风险等级，针对性制定管控措施，实现“监测－评估－管控”的闭环管理。

风险评估需结合辐射剂量水平、放射性核素种类与活度浓度、暴露途径及保护目标，采用标准化评估模型，量化辐射对人体的有效剂量与生态环境的影响程度，划分低、中、高三个风险等级。针对高风险区域，需立即采取暂停作业、隔离封锁、泄漏治理等措施，降低辐射暴露风险；针对中风险区域，需加密监测频次，优化管控措施，防范风险升级；针对低风险区域，需维持常规监测，确保风险处于可控范围。

污染溯源需结合监测数据的空间分布与时间变化规律，锁定辐射污染的核心源头与迁移路径，为精准治理提供依据。例如，通过对比不同区域土壤放射性核素含量，可追踪核素迁移方向；通过分析水体核素组成，可判断污染是否源于核设施排放或废物处理厂泄漏。同时，监测数据需纳入辐射环境质量档案，建立长期数据库，分析辐射污染变化趋势，提前预警风险，为环境管理决策、标准制定及污染治理提供数据支撑。

电离辐射监测技术的规范化应用，是精准管控辐射风险、保障人体健康与生态环境安全的核心支撑。通过聚焦 α 、 β 、 γ 射线专项监测，覆盖放射性污染源与各类环境介质，选用电离室剂量率仪、闪烁计数器等专业仪器，严格适配核设施周边、放射性废物处理场等典型场景的监测规范，可实现电离辐射从源头产生到环境迁移的全链条精准监测。

第五节 噪声与辐射环境影响评价

噪声与辐射作为典型的物理污染，其环境影响评价是环境管理体系的重要组成部分，是衔接污染监测与管控决策的关键环节。随着工业生产、城市建设、通信电力等行业的快速发展，噪声与辐射污染源的数量和类型不断增加，对人居环境、公共健康及生态系统的潜在影响日益凸显。噪声与辐射环境影响评价通过科学预测污染影响范围与程度、精准评估健康风险，为建设项目选址规划、污染防治措施制定、环保验收及日常环境监管提供核心依据，实现“预防为主、防治结合”的环保目标。

一、噪声影响评价：预测噪声对敏感点的影响程度与范围

噪声影响评价以噪声监测数据为基础，结合污染源源强特性、传播路径、地形地貌及敏感点分布，通过标准化预测模型与评价方法，量化噪声对居民区、学校、医院等敏感点的影响程度与空间范围，明确超标区域与污染贡献源，为针对性制定降噪措施、优化项目布局提供科学支撑。评价工作需遵循“监测数据支撑、模型科学适配、结果精准落地”的原则，全面覆盖噪声产生、传播、影响的全链条。

（一）评价基础与核心参数确定

噪声影响评价的准确性依赖于基础数据的完整性与核心参数的合理性，需先明确评价范围、敏感点清单及关键技术参数，为后续预测与评价奠定基础。评价范围需结合噪声源类型、强度及传播特性确定，常规工业项目、交通项目以噪声源为中心，覆盖辐射影响可达的区域，重点延伸至周边敏感点；对于噪声强度大、传播距离远的源（如交通干线、大型工业设备），评价范围需适当扩大，确保无影响盲区。

敏感点调查与清单梳理是评价的核心重点，需全面排查评价范围内的居民区、学校、医院、养老院、文保单位等敏感目标，记录敏感点的位置坐标、规模、功能属性、与噪声源的距离及高差关系，明确各敏感点的噪声控制要求（依据《声环境质量标准》GB 3096-2008 对应功能区限值）。核心技术参数包括噪声源源强、传播衰减系数、地形地貌参数等，源强参数基于前文监测技术获取的等效连续 A 声级、最大声级等数据，结合设备运行工况、负荷特性修正；传播衰减系数需考虑空气吸收、地面反射、障碍物遮挡、植被衰减等因素，按不同传播路径分别设

定；地形地貌参数需结合现场勘察结果，明确平原、山地、丘陵及城市建筑群等对噪声传播的影响。

（二）噪声影响预测模型与方法

噪声影响预测采用标准化模型，结合噪声源类型选择适配方法，量化不同时段、不同工况下噪声在空间的分布特征，预测敏感点的噪声接收水平。常用预测模型按噪声源类型分为点源、线源、面源模型，分别适配不同污染场景，确保预测结果的精准性。

点源模型适用于单个独立噪声源（如单台工业设备、小型风机），通过计算噪声源在空间某点的衰减量，得到该点的预测噪声级，核心考虑几何发散衰减、空气吸收衰减、障碍物遮挡衰减等，公式为：预测噪声级 = 源强噪声级 - 几何发散衰减量 - 空气吸收衰减量 - 遮挡衰减量 + 反射增益量（必要时）。线源模型适用于线性噪声源（如交通干线、输电线），以单位长度源强为基础，预测线源周边不同距离处的噪声水平，重点考虑线源长度、走向与敏感点的位置关系，以及车流量、车速等工况参数对源强的影响，常用于交通噪声影响预测。面源模型适用于大面积分布的噪声源（如工业园区、大型厂房），将面源划分为若干小面源，按点源叠加原理计算敏感点的总噪声级，考虑面源边界形状、面积及敏感点的相对位置，适配多源叠加场景的影响预测。

预测时段需分昼间、夜间分别开展，结合项目运行工况，预测正常运行、满负荷运行及特殊工况下的噪声影响；对于周期性运行的噪声源，需预测运行时段与非运行时段的噪声水平差异。预测过程中需同步分析噪声的时间分布特征与空间分布规律，明确噪声超标区域的范围、面积及涉及的敏感点数量，为后续影响评估与措施制定提供靶向数据。

（三）敏感点影响评估与结果判定

噪声影响评估的核心是针对居民区、学校等敏感点，对比预测噪声级与对应功能区的噪声限值，判定影响程度，分析超标原因，明确污染贡献源。评估需兼顾个体敏感点与区域整体影响，形成全面的评价结论。

单个敏感点影响评估按“预测值 - 限值对比 - 程度判定”流程开展：若预测噪声级 ≤ 对应功能区限值，判定为噪声影响可接受，无超标风险；若预测噪声级 > 限值，计算超标倍数（超标倍数 = (预测值 - 限值) / 限值），按超标倍数划分影响程度（轻度超标、中度超标、重度超标），同时分析超标原因，明确是源

强过大、传播路径无衰减、敏感点距离过近还是工况波动导致。对于学校、医院等特殊敏感点，需额外评估噪声对教学秩序、医疗活动的干扰影响，结合敏感点的使用时段（如学校上课时段、医院诊疗时段）细化评价。

区域整体影响评估需结合噪声空间分布预测结果，分析超标区域的分布特征、影响范围及涉及的敏感点规模，评估噪声对区域人居环境质量的整体影响，明确核心污染区域与关键控制节点。同时，需对比项目建设前后的噪声水平变化，评估项目建设对区域噪声环境的叠加影响，若存在多个噪声源，需开展污染贡献度分析，量化各源对敏感点的影响比例，为针对性管控提供依据。

二、辐射影响评价：辐射剂量估算与健康风险评估

辐射影响评价分为电磁辐射与电离辐射两类，以辐射监测数据为基础，通过剂量估算模型量化人体暴露剂量，结合健康风险评估标准，评估辐射对人体健康及生态环境的潜在风险，明确风险等级与管控要求。评价工作需遵循“剂量估算精准、风险评估科学、标准适配规范”的原则，兼顾职业暴露与公众暴露，全面覆盖辐射污染的潜在危害。

（一）辐射剂量估算核心内容与方法

辐射剂量估算是健康风险评估的基础，核心是计算人体在辐射暴露场景下的有效剂量、当量剂量，明确暴露途径与剂量分布特征，为风险评估提供量化依据。剂量估算需结合辐射源类型、强度、暴露时间及暴露途径，选用适配的估算模型与参数。

电磁辐射剂量估算针对射频与工频辐射，核心估算人体吸收剂量率（SAR）与暴露剂量，暴露途径主要为全身照射与局部照射（如移动通信终端贴近人体使用）。射频电磁辐射剂量估算采用电磁仿真模型，结合辐射源功率、频率、暴露距离及人体生理参数（如组织厚度、电导率），计算人体各组织器官的吸收剂量率，确保估算结果符合《电磁环境控制限值》（GB 8702-2014）要求；工频电磁辐射剂量估算重点考虑电场与磁场的叠加影响，结合暴露时间，计算累积暴露剂量，评估长期暴露的潜在影响。

电离辐射剂量估算针对 α 、 β 、 γ 射线，覆盖外照射与内照射两类暴露途径，外照射剂量通过辐射剂量率与暴露时间估算，内照射剂量通过摄入、吸入的放射性核素活度及代谢参数估算。外照射剂量估算采用点源剂量模型，结合 γ 剂量

率监测数据、暴露时间及屏蔽条件，计算人体有效剂量；内照射剂量估算需分析放射性核素在人体组织内的代谢规律，结合环境介质中核素活度浓度、人体摄入量及生物半衰期，量化内照射有效剂量。剂量估算过程中需明确暴露人群（公众、从业人员）与暴露场景（常规暴露、应急暴露），分别开展针对性估算，确保结果的针对性。

（二）健康风险评估体系与等级判定

健康风险评估以剂量估算结果为基础，结合辐射生物学效应、风险评估标准，量化辐射对人体健康的潜在风险，划分风险等级，明确风险管控边界。评估需区分电磁辐射与电离辐射的风险特性，采用差异化的评估方法与标准。

电磁辐射健康风险评估聚焦慢性暴露的潜在影响，评估内容包括神经系统、内分泌系统、生殖系统及心血管系统的损伤风险，结合剂量估算结果与国内外研究成果，判定风险可接受性。若估算剂量 $\leq$ 国家标准控制限值，且无明确的慢性损伤证据，判定为健康风险可接受；若估算剂量超过限值，或存在敏感人群（老人、儿童、孕妇）暴露，需进一步评估慢性损伤风险，分析剂量-效应关系，明确风险等级。同时，需评估电磁辐射对精密电子设备、通信系统的干扰风险，兼顾人体健康与公共安全。

电离辐射健康风险评估分为确定性效应评估与随机性效应评估，确定性效应（如皮肤损伤、造血功能障碍）存在剂量阈值，需评估实际暴露剂量是否超过阈值，若超过则判定存在确定性效应风险，量化损伤程度；随机性效应（如癌症、遗传变异）无剂量阈值，需采用风险系数法，结合有效剂量估算结果，计算超额致癌风险与遗传风险，对比国际辐射防护委员会（ICRP）推荐的风险限值（公众超额致癌风险限值为 10^{-6} - 10^{-5} ），判定风险可接受性。评估过程中需重点关注敏感人群的暴露风险，分析辐射对生态系统的潜在影响（如对动植物生长、繁殖的干扰），形成全面的风险评估结论。

（三）生态环境辐射影响补充评估

除人体健康风险外，辐射影响评价还需补充生态环境辐射影响评估，聚焦辐射对土壤、水体、植被及动植物的潜在影响，追踪放射性核素的迁移累积规律，评估生态系统的损伤程度与恢复能力。对于电离辐射，需分析放射性核素在土壤-植物-动物食物链中的富集规律，评估对生态系统结构与功能的干扰；对于高频电磁辐射，需评估对鸟类迁徙、昆虫繁殖等生物活动的影响，明确辐射对生态平

衡的潜在威胁。

生态环境辐射影响评估采用“监测数据+模型预测”结合的方式，通过监测环境介质中放射性核素含量、植被生长指标、动植物生理参数，结合生态模型，预测辐射的长期生态影响，判定生态风险等级。若辐射剂量未对生态系统造成明显损伤，且生态系统具有自我恢复能力，判定为生态风险可接受；若存在明显损伤（如植被枯萎、动物种群数量下降），需评估损伤范围与程度，制定生态修复措施与风险管控方案。

三、评价应用：支撑建设项目环境影响评价与环保验收

噪声与辐射环境影响评价结果的核心应用是支撑建设项目全生命周期环境管理，重点服务于建设项目环境影响评价（EIA）、环保验收及日常环境监管，同时为污染防治措施优化、规划布局调整及标准制定提供数据支撑，实现评价结果与管理决策的精准对接。

（一）支撑建设项目环境影响评价

在建设项目可行性研究与选址阶段，噪声与辐射环境影响评价是环境影响报告书/表的核心组成部分，为项目选址、布局优化及污染防治措施制定提供前置依据，从源头预防噪声与辐射污染。评价结果需明确项目建设的噪声与辐射环境可行性，提出针对性的源头防控措施。

对于新建、改建、扩建项目，评价需预测项目建成后噪声与辐射的影响范围、程度及风险等级，若项目选址靠近敏感点且预测结果超标，需提出选址调整建议，或优化项目布局（如将高噪声、高辐射设备布置在远离敏感点的区域）；若选址可行，需结合评价结果制定针对性的污染防治措施，如噪声源的隔声、吸声、消声措施，辐射源的屏蔽、距离防护、功率控制措施，明确措施的技术可行性与效果预期。同时，需评估项目建设与区域声环境、辐射环境功能区划的符合性，为项目审批提供核心依据。

对于交通、工业、通信等重点项目，需结合区域发展规划，开展累积影响评价，评估项目建设与周边现有污染源的叠加影响，明确区域噪声与辐射环境承载能力，为区域规划优化、产业布局调整提供支撑，避免区域污染超标。

（二）支撑建设项目环保验收

建设项目建成运行后，噪声与辐射环境影响评价结果是环保验收的核心依据，

通过对比验收监测数据与评价预测结果,验证污染防治措施的实际效果,判定项目是否满足环保验收要求,明确项目合法运行的环保边界。

环保验收阶段需开展针对性的噪声与辐射监测,监测数据需与评价阶段的预测数据对比,评估措施落实情况与效果:若验收监测数据 $\leq$ 评价预测值且符合国家标准,判定污染防治措施有效,满足验收要求;若监测数据超标或未达到预测效果,需排查原因,明确是措施落实不到位、设备运行工况变化还是评价预测存在偏差,要求建设单位整改完善,整改后重新监测验收,直至满足要求。

验收评价需重点关注敏感点的实际影响,通过现场监测验证敏感点的噪声与辐射水平是否达标,评估项目运行对敏感点的实际干扰,明确项目运行的环保管控要求(如设备运行时段限制、敏感点防护措施)。同时,需梳理项目噪声与辐射污染防治设施的运行维护方案,提出日常监管要求,确保项目长期稳定达标运行。

(三) 延伸应用于日常环境监管与措施优化

噪声与辐射环境影响评价结果还可延伸应用于日常环境监管,为环保部门的监督执法、风险管控提供依据,同时为建设单位优化污染防治措施、提升环保管理水平提供支撑。环保部门可依据评价结果明确监管重点,对超标风险较高的区域、设备开展针对性监督监测,及时发现违法超标行为,依法处置;对存在潜在风险的项目,制定常态化监管方案,防范污染事故发生。

建设单位可结合评价结果与运行过程中的监测数据,优化污染防治措施,如针对超标区域调整降噪设备参数、增加辐射屏蔽厚度,针对敏感点优化运行工况(如夜间停止高噪声设备运行),提升污染治理效率;同时,可依据评价结果建立环境管理体系,完善监测计划与应急预案,应对突发污染事件。此外,评价结果还可为地方噪声与辐射环境质量标准制定、污染防治规划编制提供数据支撑,推动区域环境质量持续改善。

噪声与辐射环境影响评价作为污染防治与环境管理的核心技术手段,通过科学预测影响范围、精准评估健康风险,为建设项目全生命周期环境管理提供了坚实支撑。无论是噪声对敏感点的影响评估,还是辐射剂量估算与健康风险判定,都需以监测数据为基础,结合科学模型与标准规范,确保评价结果的准确性与实用性。评价结果不仅服务于建设项目环境影响评价与环保验收,还延伸应用于日常监管与措施优化,形成“预测-评估-管控-优化”的闭环管理体系。

第六章 生物监测技术

第一节 生物监测基本原理

生物监测是环境监测体系的重要分支,依托生物与环境之间的相互作用关系,通过捕捉生物对污染物的敏感性反应,实现对环境质量及污染状况的精准评估。相较于物理、化学监测仅能反映瞬时污染水平的局限,生物监测可精准捕捉污染物长期累积效应与综合生态影响,为生态环境质量评价、污染溯源及生态修复提供核心依据。随着生态环境保护要求的不断提高,生物监测已广泛应用于水体、土壤、大气等多介质环境监测,成为衔接污染监测与生态保护的关键技术手段。

一、核心原理：利用生物对环境污染物的敏感性反应

生物监测的核心原理基于生物与环境的协同进化关系,各类生物(植物、动物、微生物)在长期自然演化中形成了相对稳定的生理代谢、生长繁殖及群落结构特征,当环境中出现污染物时,生物会通过生理、生化、形态及行为等方面的特异性反应,直观或间接反映污染物的存在、浓度及危害程度。这种敏感性反应具有特异性、累积性及关联性,是生物监测能够精准评估环境质量的核心支撑,其本质是污染物与生物机体相互作用的外在体现。

(一) 生物敏感性反应的产生机制

生物对污染物的敏感性反应源于污染物对生物机体的干扰与损伤,污染物进入生物体内后,会通过干扰生理代谢、破坏细胞结构、影响遗传物质、干扰群落互动等途径,引发一系列异常反应。不同生物的生理结构、代谢能力及适应能力存在差异,对不同类型污染物的敏感性也各不相同,这种差异性使得不同生物可以针对性监测特定污染物,扩大生物监测的覆盖范围。

从分子层面看,污染物会与生物体内的酶、蛋白质、核酸等生物大分子结合,抑制酶活性、破坏蛋白质结构、诱发基因突变,进而影响细胞代谢与分裂,引发生化指标异常;从个体层面看,污染物会导致生物生长迟缓、形态畸变、繁殖能

力下降、行为异常甚至死亡，这些直观反应可作为判断污染程度的重要依据；从群落层面看，污染物会改变生物群落的物种组成、数量结构及互动关系，优势物种替代、物种多样性下降等群落变化，可反映区域生态环境的综合污染状况。生物的敏感性反应具有明确的剂量－效应关系，即污染物浓度越高、暴露时间越长，生物反应越显著，这种关联性为通过生物反应量化污染程度提供了可能。

（二）不同类群生物的敏感性特征

植物、动物、微生物作为生物监测的核心类群，各自具有独特的敏感性特征，适配不同介质、不同类型污染物的监测需求，三者相互补充，构建全面的生物监测体系。

植物对大气、土壤污染物具有极强的敏感性，多数植物根系固定、无法移动，长期暴露于污染环境中，易通过叶片吸收、根系富集等方式积累污染物，进而表现出叶片发黄、斑点、枯萎、生长畸形等形态异常，部分植物还会出现生理代谢紊乱，如叶绿素含量下降、酶活性异常等。植物的敏感性反应直观易观察，且不同植物对特定污染物具有特异性，可作为大气、土壤污染物的指示载体。

动物具有活动能力强、代谢机制复杂的特点，对水体、土壤中的污染物敏感性显著，尤其是水生动物（鱼类、无脊椎动物），可通过鳃呼吸、皮肤渗透等方式快速吸收水体中的污染物，引发呼吸异常、游动行为改变、繁殖能力下降、组织病变等反应，部分敏感水生动物甚至会在高浓度污染环境中快速死亡，可直接反映水体污染的急性与慢性影响。陆生动物（鸟类、小型哺乳动物）则可通过摄食、饮水积累污染物，其种群数量、行为特征的变化，可反映区域生态环境的综合质量。

微生物个体微小、繁殖速度快、代谢活性高，对环境污染物的敏感性极强，且分布广泛、易获取，是水体、土壤污染监测的理想生物类群。污染物会影响微生物的种群数量、群落结构及代谢功能，如重金属、抗生素等污染物会抑制有益微生物生长，导致降解性微生物富集，微生物群落多样性下降，通过分析微生物群落变化及代谢产物，可精准评估污染物的存在及降解潜力。

二、监测优势：反映污染物长期累积效应与综合生态影响

相较于物理监测、化学监测等传统监测手段，生物监测凭借其独特的技术特性，在评估环境质量及污染影响方面具有不可替代的优势，核心体现在能够精准

反映污染物长期累积效应与综合生态影响，弥补传统监测的局限性，为生态环境保护提供更全面、更贴合实际的决策依据。

（一）精准反映污染物长期累积效应

物理、化学监测多为瞬时采样监测，仅能反映采样时刻的污染物浓度，无法捕捉污染物在环境中的长期累积过程及动态变化，而生物监测可通过生物体内污染物富集量及长期暴露后的特异性反应，精准呈现污染物的累积效应，反映区域环境的长期污染状况。生物在生长发育过程中，会持续吸收、积累环境中的污染物，其体内污染物含量、生理生化指标变化及形态异常程度，均与污染物长期暴露浓度、暴露时间呈正相关，可作为评估长期污染的“生物记录仪”。

例如，土壤中的重金属具有难降解、易累积的特性，化学监测仅能获取瞬时重金属浓度，而通过监测植物体内重金属富集量、土壤微生物群落变化，可反映重金属在土壤中的长期累积过程及对土壤生态系统的持续影响；水体中的持久性有机污染物（POPs）难以通过化学监测实现全程追踪，而通过水生生物体内POPs富集量及繁殖能力变化，可精准评估其长期累积带来的生态风险。这种对长期累积效应的捕捉能力，使得生物监测成为评估持久性污染物污染状况的核心手段。

（二）全面评估综合生态影响

环境中的污染物往往以复合污染形式存在，多种污染物协同作用对生态系统的影响，远复杂于单一污染物的独立作用，物理、化学监测仅能分别检测各类污染物的浓度，无法评估污染物协同作用及对生态系统的综合影响，而生物监测可通过生物个体、种群及群落的整体反应，全面呈现污染对生态系统的综合干扰，反映生态环境的整体质量。

生态系统是一个相互关联的有机整体，污染物对某一生物类群的影响，会通过食物链、食物网传递，引发连锁反应，最终影响整个生态系统的结构与功能。生物监测可通过捕捉这种连锁反应，评估污染对生态系统的综合破坏程度，如水体中重金属与有机物复合污染时，化学监测可分别检测二者浓度，但无法评估其协同毒性对水生生物群落、水体生态平衡的综合影响，而通过监测水生生物群落多样性、物种替代规律及生态功能变化，可全面掌握复合污染的综合生态效应。此外，生物监测还能反映污染物对生态系统的间接影响，如污染导致授粉昆虫减少，进而影响植物繁殖，这种间接生态影响，是传统监测手段难以捕捉的。

（三）补充传统监测的技术局限

生物监测不仅能弥补传统监测在长期累积效应与综合生态影响评估方面的不足，还能在监测范围、成本投入、实操性等方面形成补充优势。从监测范围来看，生物分布广泛，可实现对偏远区域、复杂地形（如山地、湿地）的全方位监测，无需依赖复杂的采样设备，弥补传统监测采样范围有限的局限；从成本投入来看，生物监测无需昂贵的精密仪器及化学试剂，监测流程相对简便，可大幅降低监测成本，适合大规模、长期常态化监测；从实操性来看，生物监测的反应指标直观易观察，部分监测可通过现场观察、简单实验室分析完成，无需专业技术人员全程操作，适配不同场景的监测需求。同时，生物监测还能预警潜在生态风险，当污染物浓度低于化学监测检出限时，生物可能已表现出敏感性反应，可提前预警污染风险，为污染防控争取时间。

三、基本类型：指示生物法、生物标志物法、生物群落监测法

根据监测原理、技术路径及监测对象的差异，生物监测基本可分为指示生物法、生物标志物法、生物群落监测法三类，各类方法具有独特的技术特性、适用范围及监测优势，可根据监测目标、污染类型及环境介质，针对性选择或组合使用，确保监测结果的精准性与实用性。

（一）指示生物法

指示生物法是最传统、最常用的生物监测方法，核心是利用对特定污染物或环境变化具有高度敏感性的生物（指示生物），通过观察其存在、数量、形态及行为变化，评估环境质量及污染状况。指示生物需具备敏感性强、特异性高、易观察、易获取、分布广泛等特征，能够快速、直观地反映污染的存在及程度，其反应结果可直接作为环境质量判断的依据。

根据指示生物的种类，可分为植物指示生物法、动物指示生物法、微生物指示生物法。植物指示生物法多应用于大气、土壤污染监测，如利用地衣、苔藓监测大气重金属及二氧化硫污染，地衣、苔藓无真正根系，仅能通过叶片吸收大气中的水分及养分，对大气污染物敏感性极强，污染严重区域地衣、苔藓会逐渐消失，其覆盖度、种类数量可直接反映大气污染程度；利用向日葵、菠菜等植物监测土壤重金属污染，通过观察植物生长状况、叶片形态及体内重金属富集量，评估土壤污染水平。

动物指示生物法多用于水体、土壤污染监测，如利用鱼类监测水体污染，鱼类对水体中的重金属、有机物、溶解氧等变化敏感性显著，可通过鱼类的游动行为、呼吸频率、死亡率及组织病变，评估水体污染的急性与慢性影响；利用蚯蚓监测土壤污染，蚯蚓是土壤生态系统的关键生物，对土壤中的重金属、农药等污染物具有富集作用，其存活率、繁殖能力、体重变化可反映土壤污染程度及土壤生态功能状况。微生物指示生物法可应用于多介质污染监测，如利用大肠杆菌监测水体粪便污染，大肠杆菌的数量可直接反映水体受粪便污染的程度，为饮用水安全评估提供依据；利用芽孢杆菌监测土壤重金属污染，通过分析其种群数量变化，评估重金属对土壤微生物生态的影响。

（二）生物标志物法

生物标志物法是基于生物体内特异性生化指标变化的监测方法，核心是利用污染物胁迫下生物体内产生的特异性生物标志物（如酶、蛋白质、核酸、代谢产物等），通过检测生物标志物的种类、含量及活性变化，精准量化污染物暴露水平及生物损伤程度。该方法具有灵敏度高、特异性强、可早期预警的优势，能够在生物表现出明显形态、行为异常前，捕捉污染物对生物机体的早期损伤，为污染风险早期预警提供技术支撑。

生物标志物可分为暴露生物标志物、效应生物标志物两类，二者协同作用，实现对污染暴露及损伤的全面监测。暴露生物标志物是指生物体内吸收、富集的污染物及其代谢产物，通过检测其含量，可精准判断生物是否暴露于特定污染物及暴露浓度，如检测鱼类体内重金属含量、鸟类体内有机农药代谢产物含量，可明确污染物暴露水平；效应生物标志物是指污染物暴露后，生物体内产生的特异性生化指标变化，如酶活性异常、蛋白质结构改变、基因突变等，通过检测这些指标，可评估污染物对生物机体的损伤程度，如重金属暴露会导致生物体内超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化氢酶（CAT）活性变化，通过检测酶活性，可量化重金属对生物抗氧化系统的损伤。

生物标志物法的应用需结合监测目标选择特异性标志物，确保监测结果的精准性，如监测水体有机磷农药污染，可选择胆碱酯酶作为效应生物标志物，有机磷农药会抑制胆碱酯酶活性，酶活性下降程度与农药浓度呈正相关；监测重金属污染，可选择金属硫蛋白作为效应生物标志物，重金属暴露会诱导生物体内金属硫蛋白合成，其含量变化可反映重金属暴露水平及生物解毒能力。该方法适用于

各类污染物的早期监测及损伤机制研究，是生物监测向精准化、分子化发展的核心方向。

（三）生物群落监测法

生物群落监测法是从群落水平开展的生物监测方法，核心是通过分析特定环境中生物群落的物种组成、数量结构、多样性、优势物种及互动关系变化，评估环境质量及污染对生态系统的综合影响。生物群落与环境质量密切相关，当环境受到污染时，群落结构会发生特异性变化，敏感物种减少、耐污物种富集、物种多样性下降，这种群落变化可全面反映污染的综合生态效应，是评估生态系统健康状况的核心手段。

该方法多应用于水体、土壤生态系统监测，常见的监测对象包括水生生物群落（浮游植物、浮游动物、底栖动物）、土壤生物群落（微生物、小型无脊椎动物）、植物群落等。在水体生态监测中，通过分析浮游植物群落的物种组成、细胞密度及多样性指数，可评估水体富营养化程度及有机污染状况，如水体富营养化时，蓝藻、绿藻等浮游植物大量繁殖，物种多样性下降；通过分析底栖动物群落结构，底栖动物活动范围小、寿命长、易富集污染物，其群落多样性、优势物种变化可反映水体长期污染状况，是评估水体生态系统健康的重要指标。

在土壤生态监测中，通过分析土壤微生物群落的物种多样性、功能多样性及代谢活性，可评估土壤污染程度及土壤生态功能状况，如重金属、农药污染会导致土壤微生物群落多样性下降，降解性微生物成为优势物种，微生物代谢活性改变；通过分析土壤植物群落的组成及结构变化，可反映土壤污染对植物生态系统的综合影响，如土壤重金属污染严重区域，仅耐重金属植物能够生长，植物群落结构单一。生物群落监测法需结合多样性指数、均匀度指数、优势度指数等量化指标，确保监测结果的客观性与可比性，其监测结果可直接为生态系统修复、污染治理方案制定提供依据。

生物监测基本原理围绕生物对污染物的敏感性反应展开，凭借其反映长期累积效应与综合生态影响的独特优势，成为环境监测体系中不可或缺的重要组成部分。指示生物法、生物标志物法、生物群落监测法三类基本方法，分别从个体、分子、群落三个层面实现对环境质量的精准评估，适配不同场景、不同目标的监测需求。

第二节 大气生物监测技术

大气生物监测技术是生物监测体系在大气环境领域的重要应用，依托对大气污染物敏感的生物类群，通过捕捉其特异性反应及污染物富集特征，实现对大气环境质量及污染生态效应的精准评估。相较于传统大气物理、化学监测，该技术可有效弥补瞬时监测的局限，精准反映大气污染物的长期累积效应与综合生态影响，尤其适用于大气重金属、二氧化硫（SO₂）等典型污染物的常态化监测与生态风险评估。随着大气污染防治工作向精细化、生态化推进，大气生物监测技术已成为追踪大气污染动态变化、评估环境修复效果、支撑大气环境管理决策的关键手段。

一、指示生物：利用地衣、苔藓等植物的敏感性监测大气重金属与SO₂污染

大气生物监测的核心是筛选对特定大气污染物具有高度敏感性的指示生物，其中地衣、苔藓等植物因独特的生理结构与代谢特征，成为监测大气重金属与SO₂污染的核心指示生物。这类植物对大气污染物的富集能力强、敏感性高，且生长周期长、根系固定，可长期累积大气中的污染物，直观反映区域大气环境的长期污染状况，为大气污染监测提供精准的“生物载体”。

（一）核心指示生物的生理特性与敏感性机制

地衣、苔藓作为低等植物，其生理结构与高等植物存在显著差异，这种特殊性使其对大气污染物具备极强的敏感性与富集能力。二者均无真正的根系，无法从土壤中吸收养分与水分，主要通过整个植物体表面（地衣的叶状体、苔藓的茎叶）直接吸收大气中的水分、养分及悬浮颗粒物，同时也会被动富集大气中的污染物，且无完善的污染物排泄机制，导致污染物在体内持续累积，进而引发生理代谢紊乱与形态损伤。

从敏感性机制来看，SO₂作为酸性气体，进入植物体内后会与水分结合形成亚硫酸、硫酸，破坏细胞的酸碱平衡，抑制叶绿素合成与酶活性，导致植物组织坏死、褪色；大气重金属则会通过与植物体内的蛋白质、核酸等生物大分子结合，干扰生理代谢，破坏细胞结构，诱发基因突变，最终表现为生长迟缓、形态畸变甚至死亡。地衣、苔藓的细胞结构简单，细胞壁薄，无角质层保护，污染物可快

速渗透进入细胞内，其对污染物的耐受阈值远低于高等植物，轻微污染即可引发明显的特异性反应，这种高敏感性使其成为大气污染早期预警的理想指示生物。

（二）指示生物的针对性监测范围

地衣、苔藓对不同类型大气污染物的敏感性存在差异，可针对性监测大气重金属与 SO_2 污染，同时也能间接反映大气整体污染水平，为大气污染溯源与风险评估提供依据。地衣对 SO_2 污染的敏感性极强，是监测 SO_2 污染的经典指示生物，当大气中 SO_2 浓度超过一定阈值时，地衣会逐渐表现出褪色、叶状体破损、生长停滞等症状，污染严重区域甚至会出现地衣群落消失的现象，其种类数量、覆盖度与 SO_2 浓度呈显著负相关。

苔藓则更适用于大气重金属污染监测，其细胞壁具有较强的离子交换能力，可高效富集大气中的铅、镉、汞、铜等重金属元素，体内重金属含量与大气重金属沉降量呈显著正相关，通过分析苔藓体内重金属含量，可精准量化大气重金属污染程度与沉降特征。此外，部分苔藓种类对 SO_2 也具有一定敏感性，可实现对重金属与 SO_2 复合污染的同步监测。除地衣、苔藓外，部分高等植物（如向日葵、侧柏、悬铃木等）也可作为辅助指示生物，其叶片对大气污染物的敏感性反应可补充验证地衣、苔藓的监测结果，提升监测的全面性与准确性。

二、监测方法：植物叶片污染物含量分析与伤害症状观察

大气生物监测技术以指示生物为核心，形成了植物叶片污染物含量分析与伤害症状观察两大主流监测方法，分别从定量与定性两个维度评估大气污染状况。两种方法相互补充、协同配合，既能精准量化污染物富集水平，又能直观捕捉污染造成的生态损伤，确保监测结果的科学性与实用性。监测过程需严格遵循标准化流程，控制样品采集、处理及分析环节的误差，保障监测数据的准确性与可比性。

（一）植物叶片污染物含量分析方法

植物叶片污染物含量分析是一种定量监测方法，核心通过采集指示生物样品，经前处理、实验室分析，测定体内重金属、 SO_2 代谢产物等污染物含量，结合富集系数、背景值等参数，量化大气污染程度与累积特征。该方法可精准反映大气污染物的长期沉降水平，为大气污染溯源与趋势分析提供数据支撑。

样品采集需遵循“代表性、一致性”原则，根据监测区域的地形地貌、污染分布特征，设置若干采样点，同时设置远离污染源的背景采样点作为对照；采样

时选择生长状态一致、无病虫害的指示生物个体，地衣、苔藓采集完整植株，高等植物采集成熟叶片，避免采集新生组织与衰老组织，确保样品的统一性；采样后及时去除样品表面的灰尘、杂质，低温密封保存，防止污染物流失与变质。样品前处理需根据污染物类型选择适配方法，重金属监测采用消解处理（干法消解、湿法消解或微波消解），破坏植物组织，提取重金属离子；SO₂ 相关污染物监测采用萃取法，提取体内的亚硫酸盐、硫酸盐等代谢产物。

实验室分析阶段，重金属含量可通过原子吸收分光光度法、电感耦合等离子体质谱法等精准测定，这些方法灵敏度高、检出限低，可准确测定痕量重金属含量；SO₂ 代谢产物含量可通过离子色谱法、比色法等测定，间接反映大气 SO₂ 暴露水平。分析完成后，通过计算样品与背景样品的污染物含量差值、富集系数，结合区域环境特征，量化大气污染程度，分析污染物空间分布规律与累积趋势。

（二）植物伤害症状观察方法

植物伤害症状观察是一种定性与半定量结合的监测方法，核心通过现场观察、拍照记录指示生物的形态、颜色、生长状态等变化，识别污染造成的特异性伤害症状，结合症状等级划分标准，评估大气污染程度与影响范围。该方法操作简便、无需复杂仪器，可实现现场快速监测，适用于大气污染的早期预警与大范围筛查。

观察内容需聚焦指示生物的特异性伤害症状，地衣受 SO₂ 污染后，典型症状包括叶状体由绿色、灰色变为黄色、褐色，表面出现破损、腐烂，严重时整株枯萎死亡；苔藓受重金属与 SO₂ 污染后，表现为茎叶发黄、枯萎，生长高度下降，分枝减少，部分种类会出现细胞坏死斑点。高等植物叶片受污染后，会出现叶片失绿、边缘焦枯、斑点状坏死等症状，不同污染物造成的症状具有一定特异性，可辅助判断污染物类型。

为提升观察结果的客观性，需制定标准化症状等级划分标准，按伤害程度分为无伤害、轻度伤害、中度伤害、重度伤害四级，明确各级症状的判定指标；同时记录观察时间、地点、气象条件及指示生物的生长环境，结合污染物含量分析结果，综合评估污染程度。对于大范围监测，可采用样线法、样方法，系统观察指示生物群落的覆盖度、种类数量变化，通过群落结构变化反映区域大气污染的综合生态效应。

三、应用价值：长期跟踪大气污染生态效应与环境修复效果

大气生物监测技术凭借其独特的技术优势，在大气环境管理中具有广泛的应用价值，核心体现在长期跟踪大气污染生态效应、评估环境修复效果两个方面，同时可为大气污染防治决策、环境质量评价提供核心依据，弥补传统监测技术的局限性，推动大气污染防治工作向生态化、精细化发展。

（一）长期跟踪大气污染生态效应

大气污染物的生态效应具有长期性、累积性特征，传统物理、化学监测仅能反映瞬时污染浓度，无法捕捉污染物长期暴露对生态系统的持续影响，而大气生物监测技术可通过指示生物的长期累积反应，跟踪大气污染的生态效应动态变化，为生态风险评估提供全面依据。指示生物的生长周期长，体内污染物含量与伤害症状会随大气污染状况的变化而动态调整，可作为大气污染的“长期记录仪”，精准反映区域大气环境质量的演变趋势。

通过长期监测指示生物的污染物富集量、伤害症状及群落结构变化，可分析大气污染对植物个体、种群及生态系统的影响机制，评估污染导致的生态损伤程度，明确污染的时空分布规律与影响范围。例如，通过连续多年监测苔藓体内重金属含量，可追踪大气重金属污染的沉降趋势与来源变化；通过观察地衣群落的恢复与衰退情况，可评估大气 SO_2 污染的治理成效与生态效应演变。同时，该技术可捕捉低浓度、长期累积污染的生态效应，提前预警潜在生态风险，为大气污染防治策略调整提供科学支撑。

（二）评估大气环境修复效果

在大气污染治理与环境修复工程中，大气生物监测技术是评估修复效果的核心手段，可通过监测指示生物的恢复状况，直观反映修复工程的实际成效，为修复方案优化与后续管理提供依据。大气环境修复效果的评估需结合指示生物的污染物含量变化与生长状态恢复情况，形成量化与定性结合的评估体系，确保评估结果的客观性与准确性。

在污染治理区域，若修复工程有效，大气污染物浓度会逐步下降，指示生物体内的污染物富集量会随之降低，同时受污染造成的伤害症状会逐渐缓解，枯萎的地衣、苔藓群落会逐步恢复，种类数量与覆盖度提升，高等植物叶片的伤害症状减轻，生长状态改善。通过对比修复前后指示生物的监测数据，可量化修复工

程对大气污染的削减效果，评估生态系统的恢复能力。例如，在工业废气治理区域，通过监测苔藓体内重金属含量的下降幅度、地衣群落的恢复速度，可评估废气净化设施的运行效果与区域大气环境的修复进度。

（三）延伸应用于大气环境管理决策

大气生物监测技术的应用价值还可延伸至大气环境管理决策领域，为污染源、规划布局优化、环境标准制定提供数据支撑。通过分析指示生物体内污染物的种类与含量，结合区域污染源分布特征，可精准追溯大气污染的主要来源，为污染源头管控提供靶向依据；在城市规划与产业布局中，可通过大气生物监测结果，明确大气环境敏感区域，优化工业区、居民区的布局，避免污染源对敏感区域的影响。

长期监测数据可为大气环境质量评价提供生态层面的依据，完善大气环境质量评价体系，推动评价工作从“浓度导向”向“生态导向”转变；基于监测数据与生态效应分析结果，可优化大气污染物控制限值，制定更贴合生态保护需求的环境标准。此外，该技术可应用于大气污染应急监测，在突发大气污染事件中，通过快速观察指示生物的伤害症状，可初步判断污染范围与严重程度，为应急处置提供快速参考。

大气生物监测技术以地衣、苔藓等敏感植物为核心，通过污染物含量分析与伤害症状观察两大方法，实现对大气重金属与 SO_2 污染的精准监测，在长期跟踪污染生态效应、评估环境修复效果等方面具有不可替代的应用价值。该技术弥补了传统大气监测的局限性，为大气污染防治提供了生态层面的技术支撑，推动大气环境管理向精细化、生态化方向发展。随着监测技术的不断升级，结合分子生物学、遥感技术等手段，大气生物监测的精准度、效率与覆盖范围将持续提升。

第三节 水体生物监测方法

水体生物监测方法是依托水生生物群落与水体环境的相互作用关系，通过系统调查水生生物的种类、数量、结构及功能变化，评估水体污染程度与生态系统健康状况的核心技术。相较于水体物理化学监测仅能反映瞬时污染浓度的局限，该方法可精准捕捉污染物长期累积的生态效应，直观呈现水体生态系统的结构完整性与功能稳定性，为水体污染溯源、生态修复及环境管理提供科学依据。随着

水生态环境保护工作向“水质－生态”协同管控推进，水体生物监测已广泛应用于河流、湖泊、水库、海洋等各类水体，成为水生态环境质量评价体系中不可或缺的重要组成部分。

一、监测生物：浮游生物、底栖生物、鱼类等水生生物群落

水体生物监测以水生生物群落为核心监测对象，其中浮游生物、底栖生物、鱼类因各自独特的生态习性、分布特征及对污染物的敏感性差异，成为水体监测的核心类群。三类生物分别占据水体不同生态位，构成完整的水生食物链环节，其群落变化可从不同维度反映水体环境质量，三者协同监测可全面覆盖水体生态系统的污染响应，确保监测结果的系统性与准确性。

（一）浮游生物的监测特性与适配场景

浮游生物是指生活在水体中、缺乏有效运动能力、随水流被动漂浮的生物类群，主要包括浮游植物（藻类）与浮游动物（原生动物、轮虫、枝角类等），是水体生态系统的基础生产者与初级消费者，对水体环境变化具有极强的敏感性，是水体污染早期预警的理想监测生物。

浮游生物体型微小、繁殖速度快、生命周期短，对水体中营养盐、重金属、有机物等污染物的响应迅速，污染物浓度的轻微变化即可引发其种群数量、种类组成及群落结构的显著改变。浮游植物作为水体初级生产力的核心，其群落变化直接影响水体溶解氧含量与水质状况，如水体富营养化时，蓝藻、绿藻等浮游植物会大量繁殖，形成水华，导致水体溶解氧下降、水质恶化；浮游动物则通过摄食浮游植物调节生态平衡，其群落多样性与数量变化可间接反映水体污染程度，对污染物的耐受性低于浮游植物，重度污染环境中浮游动物种类会大幅减少甚至消失。浮游生物适用于各类水体的表层污染监测，尤其适合评估水体富营养化、有机污染及重金属污染的急性与亚急性效应。

（二）底栖生物的监测特性与适配场景

底栖生物是指生活在水体底部（沉积物表面或内部）的生物类群，包括底栖动物（环节动物、软体动物、甲壳动物等）与底栖植物（水生苔藓、沉水植物等），其生态习性使其成为监测水体长期污染与沉积物污染的核心生物。

底栖生物活动范围小、寿命长、迁移能力弱，长期定居于水体底部，可持续富集沉积物中的重金属、持久性有机污染物等难降解污染物，其群落变化能精准

反映水体的长期累积污染状况。同时，底栖生物对水体溶解氧、pH 值、底质环境等变化敏感性显著，不同污染程度的水体中，底栖生物的种类组成与优势物种存在明显差异：清洁水体中，底栖生物种类丰富、多样性高，敏感物种（如蜉蝣、石蛾）占比高；污染水体中，耐污物种（如寡毛类蠕虫、摇蚊幼虫）逐渐成为优势物种，敏感物种减少，群落多样性下降。底栖生物适用于河流、湖泊、水库等水体的底质污染与长期污染监测，可有效评估水体生态系统的潜在损伤。

（三）鱼类的监测特性与适配场景

鱼类作为水体生态系统的高级消费者，处于食物链顶端，其生理代谢复杂、活动能力强、生命周期长，对水体环境的适应性与耐受性具有显著差异，是评估水体综合污染效应与生态系统完整性的核心生物。

鱼类通过鳃呼吸、皮肤渗透及摄食等多种途径接触水体中的污染物，污染物会在体内持续富集，引发生理生化指标异常、形态畸变、繁殖能力下降、行为改变甚至死亡，其体内污染物富集量可量化水体污染程度，生理行为变化可反映污染对水体生态系统的连锁效应。同时，鱼类群落的种类组成、种群数量、年龄结构等变化，可直观呈现水体生态系统的健康状况，清洁水体中鱼类种类丰富、种群结构稳定，污染严重水体中，敏感鱼类（如鲑鱼、鳟鱼）消失，耐污鱼类（如鲫鱼、鲤鱼）存活，甚至出现种群单一化现象。鱼类适用于各类水体的综合污染监测，尤其适合评估水体复合污染的长期生态效应与生态系统功能完整性。

二、监测指标：生物多样性指数、生物量、种群结构变化

水体生物监测通过量化生物多样性指数、生物量、种群结构变化三大核心指标，结合定性分析，构建“量化+定性”的综合监测体系，精准反映水体污染程度与生态系统变化趋势。各类指标相互补充，从群落、种群、个体三个层面捕捉水生生物对污染的响应，确保监测结果的科学性与客观性。

（一）生物多样性指数

生物多样性指数是衡量生物群落丰富度与均匀度的核心量化指标，通过统计水生生物的物种数量、个体数量及分布均匀性，量化群落结构的复杂程度，其数值变化与水体污染程度呈显著负相关，是评估水体生态健康状况的关键指标。

常用的生物多样性指数包括香浓-维纳指数、辛普森指数、均匀度指数等。香浓-维纳指数侧重反映物种丰富度与个体分布均匀性，指数值越高，说明群落

物种越丰富、分布越均匀,水体生态状况越好;指数值越低,说明群落物种单一、优势物种集中,水体污染越严重。辛普森指数侧重反映群落的优势度,指数值越低,说明优势物种越突出,污染程度越高。均匀度指数则直接反映物种个体分布的均匀性,均匀度越高,水体生态系统越稳定。在实际监测中,通过对比监测区域与清洁对照区域的生物多样性指数,可精准量化水体污染对生物群落的破坏程度。

（二）生物量

生物量是指单位体积或单位面积水体中水生生物的干重或湿重,反映水生生物群落的生产力水平与生物量累积状况,其变化与水体污染程度、营养盐含量密切相关,可间接反映水体环境质量与生态系统功能。

浮游生物量的变化可直接反映水体富营养化程度,水体中氮、磷等营养盐过量时,浮游植物生物量会显著增加,形成水华,导致水体溶解氧下降,进而影响其他生物的生存;浮游动物生物量则随浮游植物生物量与污染程度变化,轻度富营养化时浮游动物生物量增加,重度污染时因溶解氧不足与食物质量下降,生物量减少。底栖生物量与鱼类生物量的变化可反映水体生态系统的功能稳定性,清洁水体中,底栖生物量与鱼类生物量适中,群落结构稳定;污染水体中,耐污物种生物量可能短期增加,但整体生物量波动较大,生态系统功能受损。通过监测生物量的时空变化,可追踪水体污染的动态趋势与生态效应演变。

（三）种群结构变化

种群结构变化是指水生生物群落的物种组成、优势物种、年龄结构、性别比例等方面的改变,是水生生物对水体污染的特异性响应,可精准判断污染类型与严重程度,为污染溯源提供依据。

物种组成变化表现为敏感物种的减少与耐污物种的富集,不同污染物对物种的影响具有特异性,如重金属污染会导致敏感浮游植物与鱼类减少,耐重金属的寡毛类底栖动物增加;有机污染会促进耐污藻类与摇蚊幼虫繁殖,敏感物种消失。优势物种变化是种群结构变化的核心体现,清洁水体中无明显优势物种,群落结构复杂;污染水体中,少数耐污物种成为优势物种,群落结构单一。年龄结构与性别比例变化主要体现在鱼类种群中,污染会导致鱼类繁殖能力下降,幼鱼比例降低、年龄结构老化,甚至出现性别比例失衡,影响种群的可持续发展。通过分析种群结构变化,可明确水体污染的类型、程度及对生态系统的连锁影响。

三、技术应用：评价水体污染程度与生态系统健康状况

水体生物监测技术的核心应用在于科学评价水体污染程度与生态系统健康状况，为水体污染治理、生态修复及环境管理决策提供核心依据，同时延伸应用于污染溯源、应急监测等场景，推动水生态环境保护工作向精细化、生态化发展。

（一）评价水体污染程度与污染类型

通过分析水生生物群落的监测指标变化，可精准评价水体污染程度，划分污染等级，同时判断污染类型，为污染源头管控提供靶向依据。根据生物多样性指数、生物量及种群结构变化，可将水体污染程度划分为清洁、轻度污染、中度污染、重度污染四级：清洁水体中，生物多样性指数高、生物量稳定、敏感物种占比高；轻度污染水体中，生物多样性指数略有下降、耐污物种开始出现、生物量波动较小；中度污染水体中，生物多样性指数显著下降、敏感物种减少、耐污物种成为优势物种、生物量变化明显；重度污染水体中，生物多样性指数极低、敏感物种消失、仅少数耐污物种存活、生物量大幅下降。

结合不同生物类群的特异性响应，可判断污染类型：浮游植物生物量激增、水华现象明显，多为富营养化或有机污染；底栖生物中耐重金属物种富集、体内重金属含量较高，多为重金属污染；鱼类出现形态畸变、生理指标异常，多为持久性有机污染或复合污染。通过精准判断污染程度与类型，可为污染治理方案制定提供科学支撑。

（二）评估水体生态系统健康状况

水体生态系统健康的核心是维持结构完整性与功能稳定性，水体生物监测通过分析水生生物群落的整体变化，结合物理化学监测数据，构建综合评估体系，全面评估水体生态系统的健康状况。

生态系统健康的评估需兼顾群落结构与生态功能：群落结构层面，重点关注生物多样性、物种组成、种群结构的稳定性，结构复杂、物种丰富、种群稳定的群落，对应健康的生态系统；生态功能层面，重点关注浮游生物的初级生产力、底栖生物的物质循环功能、鱼类的食物链调控功能，功能完善的生态系统可实现物质循环与能量流动的平衡。若水生生物群落结构稳定、功能完善，且物理化学指标达标，判定为生态系统健康；若群落结构受损、功能下降，即使物理化学指标达标，也判定为生态系统亚健康或受损，需开展生态修复。通过评估生态系统

健康状况，可明确生态修复的重点与方向，推动水体生态系统的稳定恢复。

（三）延伸应用于水生态环境管理与应急监测

水体生物监测技术的应用价值可延伸至水生态环境管理的全流程，为污染溯源、生态修复效果评估、环境管理决策提供数据支撑。污染溯源方面，通过分析不同区域水生生物群落的监测指标差异，结合污染源分布特征，可精准定位污染源头，明确污染扩散路径，为源头管控提供依据；在生态修复效果评估方面，通过对比修复前后水生生物群落的变化，如生物多样性指数提升、敏感物种回归、生物量稳定、种群结构优化等，可量化修复工程的实际成效，为修复方案优化提供参考。

该技术可应用于水体污染应急监测，在突发水污染事件中，通过快速调查浮游生物、底栖生物的群落变化，可初步判断污染范围、严重程度及污染类型，为应急处置提供快速参考；在常态化环境管理中，长期监测数据可构建水生态环境质量数据库，分析水质与生态变化趋势，为水生态环境保护规划制定、环境标准优化提供科学依据，推动水生态环境管理从“水质管控”向“生态管控”转变。

水体生物监测方法以浮游生物、底栖生物、鱼类等水生生物群落为核心，通过生物多样性指数、生物量、种群结构变化三大关键指标，实现对水体污染程度与生态系统健康状况的精准评估。该技术弥补了传统水体物理化学监测的局限性，能够捕捉污染物长期累积的生态效应，为水生态污染治理、生态修复及环境管理提供有力支撑。

第四节 土壤生物监测体系

土壤生物监测体系是依托土壤生物与土壤环境的相互作用机制，通过系统监测土壤生物类群的组成、活性及功能变化，评估土壤污染程度、生物活性受损状况及土壤质量演变趋势的综合技术体系。土壤作为生态系统的核心载体，其质量直接影响植物生长、农产品安全及生态系统稳定性，而土壤生物是土壤物质循环、养分转化、污染物降解的核心驱动力，对土壤环境变化具有极高的敏感性。相较于土壤物理化学监测仅能反映土壤理化性质的局限，土壤生物监测可精准捕捉污染物对土壤生态功能的潜在影响，直观呈现土壤生态系统的健康状况。

一、监测对象：土壤微生物（细菌、真菌）、蚯蚓等土壤动物

土壤生物监测以土壤生态系统中的核心生物类群为监测对象，重点覆盖土壤微生物与土壤动物两大类，其中土壤微生物（细菌、真菌）与蚯蚓等代表性土壤动物，因在土壤生态功能中发挥关键作用且对污染敏感，成为监测体系的核心对象。两类生物分别从微观与宏观层面反映土壤环境变化，协同构建全方位的土壤生物监测网络，确保监测结果能全面表征土壤质量与生态功能状况。

（一）土壤微生物：细菌与真菌

土壤微生物是土壤中个体微小、数量庞大的生物类群，涵盖细菌、真菌、放线菌、原生动物等，其中细菌与真菌凭借极高的数量占比、活跃的代谢能力及广泛的功能覆盖，成为土壤微生物监测的核心对象，其群落结构与活性直接决定土壤生态功能的完整性。

细菌是土壤中数量最多的微生物类群，广泛分布于土壤表层及根际区域，具有繁殖速度快、代谢类型多样的特点，在土壤碳、氮、磷等养分的转化循环及简单有机物、部分污染物的降解中发挥核心作用。细菌对土壤重金属、农药、石油类污染物等具有高度敏感性，污染物浓度的轻微变化即可引发其种群数量、群落组成及代谢活性的显著改变，如重金属污染会抑制有益细菌生长，导致土壤养分转化效率下降；有机污染则会诱导降解性细菌富集，推动污染物分解转化。

真菌在土壤中的数量仅次于细菌，多以菌丝体形式分布于土壤中，对土壤环境适应性较强，在复杂有机物（如纤维素、木质素）的降解及土壤团粒结构形成中具有不可替代的作用。真菌对土壤酸碱度、重金属及持久性有机污染物的敏感性与细菌存在差异，部分真菌种类具有较强的重金属富集能力与耐污性，其群落结构变化可反映土壤长期污染状况，补充细菌监测的局限性，提升微生物监测的全面性。

（二）土壤动物：以蚯蚓为核心代表

土壤动物是土壤生态系统的重要组成部分，按体型可分为大型土壤动物（蚯蚓、蜈蚣、甲虫等）、中型土壤动物（螨类、跳虫等）及小型土壤动物（线虫等），其中蚯蚓因分布广泛、易获取、对土壤环境变化敏感且生态功能重要，成为土壤动物监测的核心指示生物，同时可结合螨类、跳虫等补充监测，全面反映土壤生态系统的健康状况。

蚯蚓作为土壤生态系统的“工程师”，通过松土、排泄物分泌等活动改善土壤结构，促进土壤通气透水与养分循环，其生理代谢活动与土壤质量密切相关。蚯蚓对土壤重金属、农药、石油烃等污染物具有较强的富集能力，且无完善的排泄机制，污染物在体内持续累积会引发生长迟缓、繁殖能力下降、体重减轻、死亡率升高甚至形态畸变等反应。同时，蚯蚓的活动范围与迁移能力适中，可反映局部土壤的污染状况，其种群数量、存活率及体内污染物富集量，均是评估土壤污染程度与土壤生态功能受损状况的重要依据。此外，螨类、跳虫等小型土壤动物对土壤有机污染、重金属污染的敏感性也较强，可作为辅助监测对象，进一步完善土壤动物监测体系。

二、监测指标：微生物群落多样性、酶活性、生物量碳氮

土壤生物监测指标体系以微生物与土壤动物的核心特征为核心，聚焦微生物群落多样性、酶活性、生物量碳氮三大关键指标，兼顾量化分析与功能评估，从群落结构、生理功能、物质累积三个维度精准捕捉土壤生物对环境变化的响应，结合土壤动物相关辅助指标，构建科学完善的监测指标体系。为清晰呈现各类指标的监测内容、适配对象及意义，如下表所示：

监测指标类别	具体指标	核心监测内容	适配监测对象	指标意义
核心指标	微生物群落多样性	物种丰富度、均匀度、优势度及群落组成变化	土壤细菌、真菌	反映土壤微生物群落结构稳定性，间接表征土壤污染程度
	土壤酶活性	脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶等活性变化	土壤微生物、土壤环境	表征土壤微生物代谢活性及土壤养分转化、污染物降解能力
	生物量碳氮	土壤微生物体内碳、氮元素的累积总量	土壤细菌、真菌	反映土壤微生物群落生物量规模，关联土壤物质循环能力
辅助指标	土壤动物相关指标	蚯蚓存活率、种群密度、体内污染物富集量；螨类、跳虫群落多样性	蚯蚓、螨类、跳虫等土壤动物	补充验证土壤污染状况，反映土壤生态系统宏观功能变化

（一）微生物群落多样性

微生物群落多样性是衡量土壤微生物群落结构复杂程度与稳定性的核心指

标,通过监测土壤细菌、真菌的物种丰富度、均匀度、优势度及群落组成变化,量化土壤微生物对污染的响应。常用的多样性指数包括香浓-维纳指数、辛普森指数、均匀度指数,与水体生物多样性指数监测逻辑一致,但适配土壤微生物的群落特征。

清洁土壤中,微生物群落多样性高、物种丰富、分布均匀,无明显优势物种,群落结构稳定,能高效发挥生态功能;当土壤受到污染时,敏感微生物种类减少甚至消失,耐污微生物逐渐成为优势物种,导致群落多样性指数下降、均匀度降低,群落结构趋于单一。通过对比监测区域与清洁对照区域的多样性指数,可精准评估土壤污染对微生物群落结构的破坏程度,同时结合群落组成分析,可判断污染类型,为污染溯源提供依据。

（二）土壤酶活性

土壤酶主要来源于土壤微生物的代谢分泌、植物根系分泌及土壤动物排泄物,参与土壤养分转化、有机物降解、污染物转化等关键过程,其活性变化直接反映土壤微生物代谢活性与土壤生态功能状况,是土壤生物监测的核心功能指标。常用的监测酶类包括脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶等,不同酶类对应不同的生态功能。

脲酶参与土壤氮素转化,其活性与土壤微生物数量、土壤氮含量密切相关,重金属、农药等污染物会抑制脲酶活性,导致土壤氮素转化效率下降;磷酸酶参与土壤磷素转化,其活性变化反映土壤磷的有效性及微生物活性;过氧化氢酶可分解土壤中的过氧化氢,减轻氧化胁迫对生物的损伤,其活性与土壤污染程度呈负相关,污染越严重,过氧化氢酶活性越低。通过监测土壤酶活性,可量化土壤微生物代谢能力与土壤生态功能受损程度,提前预警土壤质量恶化趋势。

（三）生物量碳氮

土壤生物量碳氮是指土壤中所有活体微生物体内碳、氮元素的总含量,反映土壤微生物群落的生物量规模与物质累积状况,与土壤微生物数量、活性及土壤养分状况密切相关,是评估土壤微生物群落稳定性与土壤肥力的重要指标。生物量碳氮的含量变化直接响应土壤污染与环境胁迫,是土壤质量演变的敏感表征因子。

清洁土壤中,微生物活性强、繁殖旺盛,生物量碳氮含量稳定且处于较高水平,土壤物质循环与养分供应能力强;当土壤受到污染时,污染物会抑制微生物

生长繁殖，导致微生物数量减少、生物量下降，生物量碳氮含量随之降低，且降低幅度与污染程度呈正相关。通过监测生物量碳氮的时空变化，可追踪土壤微生物群落对污染的适应与恢复过程，评估土壤污染治理与生态修复效果，同时为土壤肥力评估提供科学依据。

三、监测意义：反映土壤污染对生物活性的影响与土壤质量演变

土壤生物监测体系的核心意义在于通过精准捕捉土壤生物类群与指标的变化，全面反映土壤污染对生物活性的影响，追踪土壤质量演变趋势，为土壤污染治理、生态修复、质量管控及环境管理决策提供核心依据，弥补传统土壤监测的局限性，推动土壤环境保护向“生态导向”转变。

（一）精准反映土壤污染对生物活性的影响

土壤污染对生物活性的影响具有隐蔽性、累积性特征，传统物理化学监测仅能检测污染物浓度，无法评估污染物对土壤生物的毒性效应及对生态功能的潜在影响，而土壤生物监测可通过微生物群落、酶活性、生物量碳氮及土壤动物指标的变化，直观呈现污染对生物活性的抑制或损伤程度，量化污染的生态效应。

污染物进入土壤后，会通过抑制微生物生长繁殖、破坏酶结构、干扰代谢过程等途径，降低生物活性，导致土壤微生物群落多样性下降、酶活性降低、生物量碳氮减少，蚯蚓等土壤动物存活率下降。通过土壤生物监测，可明确污染对生物活性的影响机制、影响范围及程度，区分单一污染与复合污染的毒性效应，为污染风险评估提供生态层面的依据，同时精准识别对生物活性影响显著的关键污染物，为污染源头管控提供靶向支撑。

（二）全程追踪土壤质量演变趋势

土壤质量演变是土壤理化性质、生物特性、生态功能协同变化的过程，其核心驱动因素包括土壤污染、施肥管理、生态修复等，土壤生物指标对这些因素的响应更为敏感，可作为追踪土壤质量演变的核心“指示器”，实现对土壤质量变化的全程监测与预警。

在土壤污染累积阶段，生物指标会先于理化指标发生变化，如微生物群落多样性下降、酶活性降低，可提前预警土壤质量恶化；在污染治理与生态修复阶段，随着污染物浓度降低，土壤生物活性逐渐恢复，微生物群落多样性提升、酶活性升高、生物量碳氮含量回升，蚯蚓种群数量恢复，这些变化可量化修复工程对土

壤质量的改善效果，追踪土壤生态功能的恢复进程；在常态化管控阶段，长期监测生物指标可构建土壤质量演变数据库，分析土壤质量的年度、季度变化趋势，识别影响土壤质量的关键因素，为土壤质量持续改善提供科学依据。

（三）支撑土壤生态保护与环境管理决策

土壤生物监测结果的实践价值不仅体现在污染评估与质量追踪，更延伸至土壤生态保护与环境管理的全流程，为污染治理方案制定、生态修复效果评估、土壤环境标准优化及耕地保护提供核心数据支撑。在污染治理中，基于监测结果可明确污染类型、程度及生物活性受损状况，针对性制定治理方案，如对微生物活性抑制严重的土壤，可采用生物强化技术引入降解性微生物，提升污染治理效率；在生态修复中，通过对比修复前后生物指标的变化，可量化修复成效，优化修复方案，确保土壤生态功能稳定恢复。

监测结果可完善土壤环境质量评价体系，推动评价工作从“浓度导向”向“生态导向”转变，为制定更贴合生态保护需求的土壤环境标准提供依据；在耕地保护中，通过监测农田土壤生物指标，可评估施肥、农药使用对土壤生物活性的影响，指导绿色农业生产，保障农产品安全与土壤生态健康；在工业场地、矿区土壤修复验收中，生物指标可作为核心验收依据，确保修复后的土壤满足生态功能要求。

土壤生物监测体系以土壤微生物、蚯蚓等土壤动物为核心监测对象，通过微生物群落多样性、酶活性、生物量碳氮三大关键指标，实现对土壤污染生物效应与土壤质量演变的精准监测，在土壤生态保护、污染治理及环境管理中具有不可替代的意义。该体系弥补了传统土壤监测的局限性，构建了“生物类群－监测指标－生态意义”的完整逻辑链条，为土壤质量管控提供了生态层面的技术支撑。随着分子生物学、微生物组学等技术的融合应用，土壤生物监测的精准度、效率与智能化水平将持续提升，监测范围将进一步拓展。

第五节 生物标志物在环境监测中的应用

生物标志物是指生物体内受环境污染物胁迫后，产生的能够特异性反映污染物暴露水平、损伤程度及代谢过程的生化指标、分子特征或生理响应信号，是连接污染物暴露与生态效应的核心纽带。相较于传统生物监测依赖群落或个体层面的宏观反应，基于生物标志物的监测技术具有灵敏度高、特异性强、可早期预警

的优势，能在污染物浓度低于理化检测检出限、生物未表现出明显形态异常时，精准捕捉污染胁迫信号。随着环境监测向精准化、早期化、生态化发展，生物标志物已广泛应用于大气、水体、土壤等多介质环境监测，在污染物早期暴露预警、生物有效性评估及污染生态风险管控中发挥着不可替代的作用。

一、生物标志物选择：针对特定污染物的特异性生物标志物

生物标志物的科学选择是保障监测准确性与针对性的核心前提，需围绕监测目标污染物，遵循特异性、敏感性、稳定性、易检测性原则，筛选能精准响应特定污染物暴露的生物标志物。不同类型污染物（重金属、有机污染物等）对生物机体的作用机制不同，对应的特异性生物标志物也存在差异，同时需结合监测介质、生物类群及监测需求优化选择，确保标志物能真实反映污染物暴露水平与生态效应。

（一）核心选择原则

特异性是生物标志物选择的首要原则，需确保所选标志物仅对目标污染物或某类污染物产生特异性响应，避免受其他环境因子（温度、湿度、pH 值）或共存污染物的干扰，确保监测结果的靶向性。敏感性要求标志物在污染物低浓度暴露、短时间胁迫下即可产生显著可检测的变化，实现污染早期预警，弥补传统监测对低剂量污染响应滞后的局限。

稳定性要求标志物在生物体内能维持一定的存在时间，便于样品采集、运输与检测，避免因标志物降解或转化导致检测结果偏差。易检测性需考虑检测技术的实操性与成本，优先选择能通过常规或精准检测技术快速定量分析的标志物，适配大规模监测与应急监测需求。此外，还需兼顾生物标志物与污染物暴露剂量、损伤程度的剂量-效应关系，确保能通过标志物量化污染影响，为风险评估提供数据支撑。

（二）针对特定污染物的特异性生物标志物

针对不同类型污染物的作用机制，可筛选对应的特异性生物标志物，覆盖重金属、有机污染物等典型污染物，适配多介质环境监测需求。为清晰呈现各类污染物对应的生物标志物、适配生物及核心响应机制，如下表所示：

污染物类型	特异性生物标志物	适配生物类群	核心响应机制	应用场景
重金属	金属硫蛋白(MT)	鱼类、贝类、哺乳动物、植物	重金属诱导合成，结合体内游离重金属，发挥解毒作用，含量与重金属暴露量正相关	水体、土壤重金属暴露监测
	超氧化物歧化酶(SOD)	浮游生物、鱼类、植物、微生物	重金属引发氧化应激，诱导酶活性变化，反映机体抗氧化系统损伤程度	多介质重金属生态效应监测
	类金属硫蛋白	土壤微生物、植物根系	微生物应对重金属胁迫的特异性蛋白，含量反映土壤重金属污染水平	土壤重金属污染监测
有机污染物	胆碱酯酶(ChE)	鱼类、鸟类、无脊椎动物	有机磷、氨基甲酸酯类农药抑制酶活性，活性下降幅度与农药暴露量正相关	水体、农田有机农药暴露监测
	细胞色素 P450(CYP450)	鱼类、哺乳动物、植物	多环芳烃、石油烃等诱导酶系表达，酶活性反映有机污染物代谢水平	水体、大气有机污染物监测
	DNA 加合物	各类生物机体细胞	持久性有机污染物与DNA 结合形成加合物，反映遗传损伤程度	有机污染物长期暴露风险监测

除上述核心标志物外，针对复合污染场景，可选择多标志物组合体系，通过互补验证提升监测准确性。例如，监测土壤重金属与有机农药复合污染时，可联合检测金属硫蛋白、胆碱酯酶及 SOD 活性，全面反映复合污染的协同毒性效应。同时，需结合监测生物的生态习性选择标志物，如水生环境优先选择鱼类、浮游生物对应的标志物，土壤环境优先选择微生物、植物及蚯蚓对应的标志物。

二、检测技术：免疫分析、分子生物学技术等精准检测方法

生物标志物的精准检测是实现其监测价值的关键,随着分析技术的不断升级，已形成以免疫分析、分子生物学技术为核心，辅以生化分析、仪器分析的多元化检测技术体系。

(一) 免疫分析技术

免疫分析技术基于抗原与抗体的特异性结合反应，实现对生物标志物的定性与定量检测，具有特异性强、操作简便、检测快速、成本适中的优势，适用于大规模样品筛查与现场快速监测，广泛应用于蛋白质类、抗原类生物标志物检测。

常用的免疫分析技术包括酶联免疫吸附试验（ELISA）、免疫荧光技术、免疫层析技术等。ELISA 技术通过酶标记抗体，将抗原 - 抗体结合反应转化为可量化的酶促反应信号，灵敏度可达纳克至皮克级，适用于金属硫蛋白、胆碱酯酶等蛋白质类标志物的定量检测；免疫荧光技术利用荧光标记抗体，通过荧光信号强度量化标志物含量，检测速度快，可实现单细胞水平的标志物定位与检测；免疫层析技术（如试纸条检测）操作简单、无需复杂仪器，可实现现场快速定性或半定量检测，适应应急监测场景，如水体有机农药污染的现场快速筛查。

（二）分子生物学技术

分子生物学技术针对核酸类、基因表达类生物标志物，通过检测基因序列、基因表达量及核酸修饰变化，精准反映污染物对生物机体的分子水平损伤，具有灵敏度极高、特异性强、可检测早期分子响应的优势，是生物标志物检测向分子化、精准化发展的核心方向。

常用技术包括聚合酶链式反应（PCR）、实时荧光定量 PCR（qPCR）、基因芯片技术等。PCR 技术通过扩增目标基因片段，实现低丰度核酸标志物的富集与检测，适用于 DNA 加合物、特异性基因表达产物的检测；qPCR 技术可实时监测 PCR 扩增过程，精准量化目标基因的表达量，反映污染物胁迫下基因表达的变化趋势，如重金属暴露下金属硫蛋白基因的表达量分析；基因芯片技术可同时检测多个基因的表达变化，实现多标志物的高通量同步检测，适用于复合污染场景下的分子机制研究与多标志物组合监测。

三、应用场景：污染物早期暴露预警与生物有效性评估

生物标志物凭借其高灵敏度、特异性的优势，在环境监测中主要应用于污染物早期暴露预警与生物有效性评估两大核心场景，同时延伸应用于污染溯源、生态风险评估及修复效果监测，为环境管理决策提供精准的分子水平数据支撑，推动环境监测从“浓度监测”向“效应监测”转变。

（一）污染物早期暴露预警

传统环境监测难以捕捉低浓度、短期污染暴露的影响，而生物标志物可在污染物暴露初期、生物机体未出现宏观形态损伤时，通过分子、生化层面的特异性变化发出预警信号，实现污染的早期识别与风险防控，为污染治理争取时间。

在水体环境中，通过监测鱼类、浮游生物体内的金属硫蛋白、胆碱酯酶活性

等标志物，可早期预警重金属与有机农药污染，即使水体中污染物浓度低于理化检测检出限，标志物仍可产生显著响应；在大气环境中，通过监测植物叶片中的SOD活性、CYP450酶系表达量，可早期预警大气重金属与多环芳烃污染；在土壤环境中，通过检测土壤微生物的特异性基因表达、植物根系的金属硫蛋白含量，可早期发现土壤重金属与农药的累积污染。早期预警结果可指导污染源头排查，及时管控污染扩散，降低污染对生态系统的破坏程度。

（二）污染物生物有效性评估

污染物生物有效性是指环境中污染物能被生物吸收、代谢并产生毒性效应的比例，直接决定污染的生态风险程度，传统理化监测仅能检测污染物总浓度，无法反映生物有效性，而生物标志物可通过量化污染物在生物体内的代谢响应，精准评估污染物生物有效性，为生态风险评估提供科学依据。

同一浓度的污染物在不同环境介质、不同理化条件下，生物有效性存在显著差异，如土壤中重金属的生物有效性受土壤pH值、有机质含量影响较大，通过监测生物体内金属硫蛋白含量、酶活性变化，可量化实际被生物吸收利用的重金属比例，真实反映污染风险；对于水体中的有机污染物，通过检测CYP450酶活性、DNA加合物含量，可评估污染物的生物转化效率与毒性效应强度，明确其对水生生物的实际危害程度。生物有效性评估结果可优化污染物控制限值，使环境标准更贴合实际生态风险管控需求。

（三）延伸应用场景

生物标志物的应用价值可延伸至污染溯源、生态风险评估及修复效果评估等场景。污染溯源方面，不同污染物对应的特异性生物标志物可作为“指纹信号”，结合标志物的分布特征与含量变化，可精准识别污染类型与来源，如通过胆碱酯酶活性抑制可锁定有机磷农药污染，通过金属硫蛋白含量变化可追溯重金属污染源头；生态风险评估方面，通过分析生物标志物的剂量-效应关系，可量化污染对生物个体、种群及群落的潜在风险，结合群落监测数据，构建“分子-个体-群落”的多层次风险评估体系。

在生态修复效果评估中，通过对比修复前后生物标志物的变化，如金属硫蛋白含量下降、酶活性恢复正常、基因表达量趋于稳定等，可量化修复工程对污染物的去除效果及生物活性的恢复程度，为修复方案优化提供依据。此外，生物标志物还可应用于环境监测标准制定，为污染物控制限值的设定提供生态效应层面

的支撑，推动环境管理向精准化、生态化升级。

生物标志物在环境监测中的应用，突破了传统监测依赖宏观反应、响应滞后的局限，通过特异性标志物的筛选与精准检测，实现了污染物早期暴露预警与生物有效性的精准评估，为环境监测与生态风险管控提供了分子水平的技术支撑。免疫分析、分子生物学技术等检测方法的迭代升级，进一步提升了标志物检测的灵敏度与效率，拓展了其应用场景。

第七章 现代环境监测新技术

第一节 遥感监测技术应用

遥感监测技术是现代环境监测体系的核心新技术之一，依托航空航天平台、传感器及数据处理技术，通过捕捉目标物的电磁辐射信号，实现对大气、水体、土壤等多介质环境的非接触式、大范围、实时动态监测。相较于传统地面监测存在的覆盖范围有限、采样点稀疏、耗时耗力等局限，遥感监测技术具有宏观性、时效性、连续性及多维度监测优势，可快速获取区域尺度环境质量数据，精准捕捉污染物分布、扩散及生态环境变化规律。

一、大气遥感：卫星与无人机遥感监测大气污染物大范围分布与扩散

大气遥感以卫星与无人机为核心监测平台，结合不同波段的传感器，捕捉大气中污染物的电磁辐射特征，实现对颗粒物（PM_{2.5}、PM₁₀）、气态污染物（SO₂、NO₂、O₃、VOCs）等的大范围分布、浓度反演及扩散趋势模拟。该技术可突破地面监测站点的空间限制，快速覆盖城市、流域、区域乃至全球尺度，为大气污染溯源、区域联防联控及重污染天气预警提供核心数据支撑。

（一）核心监测平台与技术原理

大气遥感监测平台分为卫星遥感与无人机遥感两类，二者协同互补，适配不同尺度监测需求。卫星遥感依托极轨卫星、静止卫星等航天平台，搭载高光谱传感器、热红外传感器等设备，通过接收大气污染物对太阳辐射的吸收、散射及自身发射的红外辐射信号，结合辐射传输模型反演污染物浓度，实现大范围、长期连续监测；无人机遥感依托小型、中型无人机平台，搭载高分辨率成像仪、气体传感器等设备，可灵活穿梭于复杂地形，实现对城市街区、工业园区、污染源头等小范围区域的精准监测，弥补卫星遥感空间分辨率不足的局限。

技术核心在于通过传感器捕捉污染物的特异性光谱特征，不同污染物对不同波长电磁波的吸收、散射能力存在差异，如NO₂在可见光-近红外波段存在特

征吸收峰，PM_{2.5} 会导致可见光波段辐射散射增强，基于这些特异性特征，结合定量反演模型，可精准计算污染物浓度分布。同时，通过多时段遥感数据叠加分析，可模拟污染物扩散路径与演变趋势，为污染溯源与管控提供科学依据。

（二）主要应用内容与实践价值

大气遥感的核心应用包括污染物浓度反演、分布制图、扩散模拟及重污染天气预警。通过卫星遥感可快速生成区域大气污染物浓度空间分布图，明确污染高值区、影响范围及空间梯度变化，为识别污染热点区域提供靶向指引；无人机遥感可聚焦工业园区、交通干线等重点区域，精准监测污染源排放强度、污染物扩散范围，为点源污染管控提供精准数据。

在重污染天气应对中，通过实时遥感监测结合气象数据，可模拟污染物扩散趋势，提前预警重污染天气影响范围与强度，为应急管控措施制定、区域联防联控调度提供支撑；在长期环境管理中，通过连续多年遥感数据积累，可分析区域大气环境质量演变趋势，评估污染治理成效，为大气污染防治规划制定提供科学依据。此外，大气遥感还可监测大气气溶胶光学厚度、云图等气象-环境协同因子，为综合分析大气污染成因提供补充数据。

二、水环境遥感：监测水体叶绿素 a、浊度、水体面积变化等

水环境遥感依托遥感技术的宏观性与时效性，针对河流、湖泊、水库、海洋等各类水体，监测水体叶绿素 a 浓度、浊度、水体面积、富营养化程度、黑臭水体分布等核心指标，实现对水环境质量的快速评估与动态监管。该技术可避免传统水体监测需大量现场采样、耗时耗力且难以覆盖大范围水体的局限，为水环境治理与生态保护提供高效、精准的技术支撑。

（一）核心监测指标与技术方法

水环境遥感的核心监测指标均具有特异性光谱响应特征，基于这些特征结合反演模型可实现精准量化监测。为清晰呈现各类核心指标的监测技术、光谱特征及应用场景，如下表所示：

监测指标	核心光谱特征	主要监测技术	应用场景	监测意义
叶绿素 a 浓度	蓝波段吸收强、红波段反射强，存在荧光峰	高光谱遥感、多光谱遥感，定量反演模型	湖泊、水库、近海海域	评估水体富营养化程度，预警水华爆发
水体浊度	可见光波段散射增强，反射率随浊度升高而上升	多光谱遥感，比值法、回归模型	河流、湖泊、近岸水体	反映水体悬浮物含量，评估水体清澈度
水体面积变化	水体与陆地光谱差异显著，水体反射率低	高分辨率遥感，图像分类、阈值分割	湖泊、水库、湿地	监测水体萎缩、扩张，评估湿地生态状况
黑臭水体	可见光波段反射率低，红外波段特征明显	多光谱遥感，指数法、目视解译	城市河流、沟渠	识别黑臭水体分布范围，评估治理成效

（二）实践应用与生态价值

水环境遥感的实践应用贯穿于水污染治理、水生态保护及水资源管理全流程。在富营养化监测中，通过定期遥感监测叶绿素 a 浓度变化，可快速识别富营养化水体范围，预警蓝藻、绿藻水华爆发，为应急处置（如打捞、控源）提供时间窗口；在黑臭水体治理中，通过遥感技术可全面排查城市黑臭水体分布，对比治理前后水体光谱特征变化，量化治理成效，避免传统排查存在的遗漏、效率低下等问题。

在湿地与水资源保护中，通过长期遥感监测水体面积变化，可分析湖泊、水库萎缩扩张趋势，评估气候变化、人类活动对水资源的影响，为湿地生态修复、水资源调配提供依据；在近海海域监测中，可监测赤潮分布、石油污染范围，快速响应海洋污染事件，评估污染对海洋生态系统的影响。此外，水环境遥感还可结合地面监测数据，构建“空天地”一体化水环境监测网络，提升水环境管理的精准度与效率。

三、土壤遥感：识别土壤污染区域与土地利用变化对环境的影响

土壤遥感依托高光谱遥感、热红外遥感等技术，通过捕捉土壤的光谱特征、温度特征及纹理特征，实现对土壤污染区域识别、土壤类型划分、土地利用变化监测及土壤含水量评估等，为土壤污染防治、土地资源优化利用及生态保护提供宏观、快速的技术支撑。相较于传统土壤监测需野外采样、实验室分析的局限，土壤遥感可实现大范围土壤状况的快速筛查，大幅提升土壤环境监测效率。

（一）土壤污染区域识别技术与原理

土壤遥感识别污染区域的核心是利用污染物对土壤光谱特征的改变，土壤中

重金属、石油烃、农药残留等污染物会导致土壤反射光谱发生偏移、吸收峰强度变化或出现特异性吸收峰，基于高光谱遥感技术可捕捉这些细微变化，结合光谱解译模型，实现对污染区域的精准识别与范围圈定。

不同类型污染物对土壤光谱的影响存在差异，如重金属污染会导致土壤在可见光-近红外波段反射率降低，且随着污染浓度升高反射率下降越显著；石油烃污染会使土壤在红外波段出现特异性吸收峰。通过高光谱传感器获取土壤精细光谱数据，结合机器学习算法构建污染识别模型，可区分污染土壤与清洁土壤，圈定污染范围，甚至实现污染程度的半定量评估。同时，热红外遥感可通过监测土壤温度变化，辅助识别污染区域，因污染土壤的热传导性、比热容与清洁土壤存在差异，会表现出不同的温度特征。

（二）土地利用变化监测与环境影响评估

土地利用变化是影响土壤生态环境的核心因素，土壤遥感可通过多时段、高分辨率遥感数据对比分析，监测耕地、林地、草地、建设用地、工业用地等土地利用类型的转化，评估其对土壤生态环境的影响，为土地资源优化配置与生态保护提供依据。

通过遥感图像分类、变化检测算法，可精准识别土地利用变化的位置、范围及类型，如耕地转为建设用地会导致土壤压实、渗透性下降，工业用地扩张可能引发土壤污染，林地转为耕地可能导致水土流失、土壤肥力下降。基于这些变化，可评估土地利用转化对土壤结构、肥力、生态功能的影响，为制定土地利用规划、生态保护红线划定提供科学支撑。此外，土壤遥感还可监测土壤含水量、盐碱化程度，为农田土壤管理、盐碱地改良提供数据，助力农业生态可持续发展。

（三）实践应用局限与优化方向

土壤遥感受土壤表层覆盖物（植被、枯枝落叶、积雪）影响较大，若表层覆盖物密集，会遮挡土壤光谱信号，导致监测精度下降，因此实际应用中需结合植被覆盖度监测数据进行校正；同时，土壤遥感对深层土壤污染的识别能力有限，主要聚焦于表层土壤污染监测，需结合地面钻探采样补充验证。

未来优化方向可依托高光谱传感器分辨率提升、人工智能算法迭代，增强对低浓度污染、复合污染的识别能力；结合无人机遥感与卫星遥感协同监测，实现“宏观覆盖+微观精准”的土壤环境监测网络构建；融合土壤理化监测数据，优化光谱反演模型，提升监测结果的量化精度，进一步拓展土壤遥感在土壤污染治理

理、生态修复效果评估等场景的应用范围。

遥感监测技术凭借宏观性、时效性、连续性的独特优势，在大气、水环境、土壤环境监测中构建了多元化应用体系，突破了传统地面监测的空间与效率局限，为现代环境监测精准化、智能化发展提供了核心支撑。从大气污染物大范围分布监测到水环境富营养化预警，再到土壤污染区域识别与土地利用变化评估，遥感技术已成为环境管理全流程的重要工具。

第二节 物联网在环境监测中的应用

物联网技术作为新一代信息技术与环境监测领域深度融合的核心成果，通过构建“感知－传输－分析－应用”的全链条监测体系，实现对大气、水体、土壤、噪声等多环境要素的精准感知、实时传输与智能管控。相较于传统环境监测依赖人工采样、离线分析的模式，物联网环境监测体系打破了时空限制，凭借自动化、智能化、网络化的技术特性，大幅提升了监测数据的时效性、连续性与精准度，为环境管理从“被动应对”向“主动防控”、从“粗放管理”向“精准治理”转型提供了核心支撑。

一、系统架构：由传感器、传输网络、云平台组成的物联网监测体系

物联网环境监测体系以分层架构为核心，构建了从前端数据采集到后端智能应用的闭环系统，核心由传感器感知层、传输网络层、云平台应用层三部分组成。各层级协同联动，实现环境要素数据的采集、传输、存储、分析及应用全流程自动化处理，确保监测数据的实时性与可靠性，为环境管理决策提供数据支撑。

（一）传感器感知层：环境要素精准采集核心

传感器感知层是物联网监测体系的前端基础，承担着环境要素精准采集的核心功能，通过部署各类高精度传感器，实现对多环境指标的实时感知与数据捕获。感知层的核心在于传感器的多元化与精准化配置，需根据监测场景与目标，适配不同类型的传感器设备，覆盖物理、化学、生物等多类环境要素。

常用传感器包括大气类（PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、温湿度、气压传感器）、水体类（pH值、溶解氧、浊度、电导率、污染物浓度传感器）、土壤类（土壤含水量、温度、pH值、重金属传感器）及噪声、振动、光照等辅助传感器。这

些传感器具备小型化、低功耗、高精度的特性，可实现全天候不间断数据采集，部分传感器支持自动校准功能，有效降低数据误差。同时，感知层还包含数据采集终端（RTU），负责将传感器捕获的模拟信号转化为数字信号，为后续数据传输奠定基础。感知层的部署需结合场景特点，采用固定监测点、移动监测设备等多元模式，确保监测覆盖的全面性。

（二）传输网络层：数据实时传输的通信桥梁

传输网络层是连接传感器感知层与云平台应用层的核心桥梁，负责将感知层采集的海量环境数据实时、稳定地传输至后端云平台，同时实现前端设备与后端平台的双向通信与远程控制。传输网络层需兼顾数据传输的时效性、稳定性与安全性，适配不同监测场景的网络环境，采用多元化通信技术融合的模式。

针对不同应用场景，传输技术的选择各有侧重：在城市、园区等网络覆盖完善区域，可采用 4G/5G、以太网等技术，实现高速率、大容量数据传输，满足实时监控需求；在偏远流域、山区等网络覆盖薄弱区域，可采用 LoRa、NB-IoT 等低功耗广域网技术，凭借远距离、低功耗、抗干扰强的优势，保障数据稳定传输；对于移动监测设备（如监测无人机、水质监测船），可采用卫星通信技术，突破地域限制实现全域数据覆盖。此外，传输网络层还具备数据加密、断点续传功能，有效防止数据泄露与丢失，确保监测数据的安全性与完整性。

（三）云平台应用层：数据处理与智能应用核心

云平台应用层是物联网监测体系的核心中枢，承担着数据存储、分析、可视化及智能应用的核心功能，通过整合海量监测数据，为环境管理提供决策支撑。云平台依托大数据、人工智能、云计算等技术，实现对多源监测数据的深度挖掘与智能分析，打破数据孤岛，构建一体化监测管理平台。

其核心功能包括三方面：一是数据存储与管理，通过分布式存储技术，实现海量监测数据的安全存储与高效检索，支持历史数据追溯与对比分析；二是数据处理与分析，利用人工智能算法对数据进行清洗、降噪、建模，识别数据异常波动，自动预警环境风险，同时生成各类监测报表与分析报告；三是可视化与智能应用，通过可视化界面实时展示监测数据、设备运行状态、环境质量变化趋势，支持远程控制前端传感器、监测设备的运行参数，实现监测过程的自动化管控。此外，云平台还可与环境管理系统、应急指挥系统对接，实现数据共享与协同联动，提升环境管理的智能化水平。

二、技术优势：实现多要素、全天候、自动化数据采集与远程监控

物联网技术在环境监测中的应用，彻底改变了传统监测模式的局限，凭借多要素协同监测、全天候不间断运行、自动化智能采集、远程精准管控的核心优势，大幅提升了环境监测的效率与质量，为环境管理提供了更全面、更精准、更高效的技术支撑，这些优势相互叠加，构建了物联网监测体系的核心竞争力。

（一）多要素协同监测，覆盖更全面

传统环境监测多以单一要素、单一点位监测为主，难以全面反映区域环境质量的整体状况，而物联网监测体系通过多元化传感器的协同部署，可实现大气、水体、土壤、噪声、气象等多环境要素的同步监测，构建全方位、立体化的监测网络。

该体系可根据监测需求，灵活配置不同类型的传感器，实现物理指标（温湿度、气压、浊度）、化学指标（污染物浓度、pH值）、生物指标（溶解氧、微生物含量）的协同采集，同时通过多监测点位的网格化部署，打破空间限制，全面覆盖监测区域。多要素监测数据的整合分析，可更精准地揭示不同环境要素之间的关联关系，为综合评估区域环境质量、分析污染成因提供全面的数据支撑，避免传统单一监测导致的决策偏差。

（二）全天候不间断运行，时效性更强

环境质量变化具有实时性、动态性特征，传统人工采样监测受时间、人力限制，仅能获取瞬时数据，无法捕捉环境质量的动态变化过程，数据时效性差。物联网监测体系依托低功耗传感器与自动化采集设备，可实现24小时不间断运行，实时捕获每一刻的环境要素变化数据。

前端传感器自动采集数据后，通过传输网络实时上传至云平台，无需人工干预，有效避免了人工采样的滞后性与随机性。对于突发环境事件，该体系可快速捕捉污染指标的异常波动，第一时间发出预警信号，为应急处置争取时间；在长期监测中，可形成连续完整的环境质量变化曲线，精准反映环境质量演变趋势，为污染治理成效评估提供科学依据。

（三）自动化智能采集，精准度更高

传统环境监测依赖人工采样、实验室离线分析，不仅耗时耗力，还易受人为操作、样品运输存储等因素影响，导致数据误差较大。物联网监测体系实现了数

据采集、传输、处理全流程自动化，大幅降低了人为干扰，提升了监测数据的精准度。

前端传感器具备高精度、自动校准功能，可精准捕获环境要素细微变化，数据采集精度远超传统人工监测；数据传输过程采用数字化传输模式，避免了模拟信号传输的衰减与干扰；后端云平台通过智能算法对数据进行清洗、降噪，剔除异常数据，进一步提升数据可靠性。同时，自动化采集模式可大幅减少人力成本，提高监测效率，适合大规模、常态化监测需求。

（四）远程精准管控，运维更高效

物联网监测体系支持前端设备的远程监控与运维管理，通过云平台可实时查看各监测点位传感器、传输设备的运行状态，包括电量、信号强度、工作状态等，实现设备故障的实时预警与远程排查。

对于分布在偏远区域、复杂地形的监测设备，无需人工现场巡检，可通过远程控制调整设备运行参数、进行自动校准与维护，大幅降低运维成本与难度。同时，云平台支持多终端访问，管理人员可通过电脑、手机等设备随时随地查看监测数据、设备状态，实现环境监测的移动化、便捷化管理，提升运维效率与管理水平。

三、应用场景：智慧园区、流域生态环境综合监测

物联网环境监测技术凭借其独特的技术优势，已在多个场景得到广泛应用，其中智慧园区与流域生态环境综合监测是最具代表性的两大场景。该技术在场景中的应用，实现了环境监测的精准化、智能化与协同化，为场景化环境管理与污染防治提供了高效支撑，同时也为其他场景的应用提供了参考范式。

（一）智慧园区环境监测

智慧园区作为物联网技术的核心应用载体，其环境监测需求聚焦于工业污染防治、园区生态维护与人员健康保障，物联网监测体系可实现园区多要素、全流程的精准监测与智能管控，助力构建绿色、安全、高效的智慧园区。

在园区监测部署中，通过在生产车间、排污口、园区边界、绿化带等区域网格化部署各类传感器，实现对废气（VOCs、SO₂、NO₂）、废水（pH值、污染物浓度、溶解氧）、噪声、颗粒物、土壤质量及气象要素的实时监测。传输网络采用5G+LoRa融合模式，既保障了车间内高速率数据传输，又实现了园区全域覆盖。云平台整合监测数据，实时展示园区环境质量状况，当污染物浓度超标时，

自动发出预警信号，并联动园区环保设备（如废气处理装置、污水处理设备）启动应急处置，同时生成污染溯源分析报告，为园区污染管控提供靶向依据。此外，平台还可与园区生产管理系统对接，实现生产活动与环境监测的协同管控，推动园区绿色低碳发展。

（二）流域生态环境综合监测

流域生态环境具有范围广、要素复杂、动态变化快的特点，传统监测模式难以实现全域覆盖与动态管控，物联网监测体系可构建“空天地”一体化流域监测网络，实现对流域水质、水量、生态状况的综合监测，为流域生态保护与治理提供科学支撑。

在流域监测中，采用固定监测站、移动监测设备、遥感技术协同的模式：在流域干支流、排污口、饮用水源地等关键点位设置固定监测站，部署水质、水量传感器，实现全天候不间断监测；利用监测船、无人机等移动设备，对流域偏远区域、重点河段进行巡回监测，弥补固定监测站的覆盖局限；结合遥感技术获取流域水体面积、植被覆盖度等宏观数据，与物联网监测数据整合分析。传输网络针对流域偏远区域特点，采用 NB-IoT+ 卫星通信技术，保障数据稳定传输。云平台对流域监测数据进行整合处理，实时展示水质变化趋势、水量动态、生态状况，自动预警水污染事件，分析污染扩散路径，为流域污染防治、生态修复、水资源调配提供决策支撑，助力流域生态系统的良性循环。

物联网技术与环境监测领域的深度融合，构建了“感知－传输－应用”的智能化监测体系，凭借多要素协同、全天候运行、自动化采集、远程管控的核心优势，突破了传统监测模式的局限，为现代环境监测精准化、智能化发展注入了强劲动力。从智慧园区的精准污染管控到流域生态的综合监测，物联网技术已成为环境管理全流程的重要工具，为污染防治、生态保护、决策制定提供了科学依据。

第三节 大数据与环境监测

大数据技术与环境监测领域的深度融合，打破了传统监测数据碎片化、分析浅层化的局限，通过整合多源环境信息、运用智能化分析算法，构建了“数据整合－深度分析－精准应用”的全链条监测体系。相较于传统环境监测依赖单一数据、经验判断的模式，大数据技术凭借海量数据处理、多维度关联分析、精准趋

势预测的核心能力，实现了对环境质量变化规律的深度挖掘，为环境管理从“经验驱动”向“数据驱动”、从“粗放管控”向“精准治理”转型提供了核心支撑。

一、数据来源：整合监测数据、污染源数据、气象数据等多源信息

大数据环境监测体系的核心基础是多源数据的全面整合与高效汇聚，通过收集来自监测网络、污染源、气象系统、社会管理等多个渠道的信息，构建覆盖全要素、全场景的环境数据资源池。多源数据的协同融合打破了数据孤岛，弥补了单一数据维度有限、代表性不足的缺陷，为后续深度分析与精准应用提供了全面、可靠的数据支撑。数据整合过程需兼顾数据的完整性、时效性与标准化，确保各类数据可互通、可关联、可分析。

（一）核心监测数据

核心监测数据是环境大数据的基础来源，主要包括各类监测网络获取的实时环境要素数据，覆盖大气、水体、土壤、噪声等多介质监测场景。数据采集渠道涵盖地面监测站、遥感监测平台、物联网感知设备等多元监测载体，形成“空天地”一体化数据采集网络。

大气监测数据包括颗粒物（PM_{2.5}、PM₁₀）、气态污染物（SO₂、NO₂、O₃、VOCs）浓度、气溶胶光学厚度等指标；水体监测数据涵盖水质指标（pH值、溶解氧、浊度、污染物浓度）、水量变化、富营养化程度等内容；土壤监测数据包括土壤含水量、肥力、重金属含量、污染物残留等信息；同时还包括噪声、振动、光照等辅助监测数据。这类数据具备实时性强、精度高、连续性好的特点，是反映环境质量现状的核心依据。

（二）污染源数据

污染源数据是解析污染成因、追溯污染源头的关键数据来源，主要包括工业污染源、农业污染源、生活污染源及移动污染源等各类污染源的排放信息与管控数据。通过整合污染源数据，可明确各类污染物的排放强度、排放范围、排放规律，为精准管控污染源、降低污染负荷提供靶向数据。

工业污染源数据涵盖企业排污许可信息、废气废水排放浓度与总量、污染治理设施运行状态、在线监控数据等；农业污染源数据包括化肥农药使用量、畜禽养殖污染物排放量、农田面源污染分布等；生活污染源数据涉及城镇污水处理厂运行数据、生活垃圾产生量与处置情况等；移动污染源数据包括机动车保有量、

尾气排放检测数据、交通流量分布等。这类数据的整合可清晰勾勒区域污染排放格局，为污染溯源与管控提供核心支撑。

（三）气象与水文辅助数据

气象与水文数据是分析环境质量变化驱动因素、预测污染扩散趋势的重要辅助数据，环境质量与气象、水文条件密切相关，这类数据的融入可提升污染分析与预测的科学性、准确性。

气象数据包括气温、湿度、气压、风速、风向、降水、云量等指标，直接影响大气污染物的扩散、稀释、转化过程，是研判大气污染趋势的核心辅助因素；水文数据涵盖水位、流速、流量、水温、水体扩散系数等内容，影响水体污染物的迁移、扩散与降解，为水体污染分析与预警提供支撑。此外，还包括气候变化数据、极端天气事件记录等长期数据，用于分析气候变化对环境质量的潜在影响。

（四）其他补充数据

除核心数据外，还需整合社会管理、生态状况等补充数据，进一步丰富数据维度，提升分析的全面性。社会管理数据包括土地利用规划、城市建设数据、人口分布、产业布局等，可分析人类活动对环境质量的影响；生态状况数据涵盖植被覆盖度、生物多样性、湿地面积变化等，用于评估环境质量对生态系统的影响。还可整合环境监管执法数据、污染事件应急处置记录、环境治理工程成效数据等，形成全流程数据闭环，为环境管理决策、治理成效评估提供完整的数据支撑。数据整合过程中，需通过标准化处理、数据清洗等手段，剔除异常数据、统一数据格式，确保数据的可靠性与兼容性。

二、分析技术：数据挖掘、机器学习算法用于污染趋势预测与来源解析

大数据在环境监测中的核心价值通过深度分析技术实现，依托数据挖掘、机器学习等智能化算法，对整合后的海量多源数据进行关联分析、模式识别、趋势预测与源头解析，从复杂数据中挖掘环境质量变化规律、污染成因及潜在风险，突破了传统人工分析效率低、维度浅、精度有限的局限。各类分析技术协同运用，构建了智能化、高精度的环境数据分析体系，为环境监测与管理提供科学依据。

（一）数据挖掘技术

数据挖掘技术是从海量数据中提取隐藏规律、关联模式与有价值信息的核心

技术,通过聚类分析、关联规则挖掘、异常检测等方法,实现对环境数据的深度剖析,为污染分析与管控提供方向指引。

聚类分析通过将相似特征的数据归类,可识别环境质量的空间分布模式,划分污染高值区、低值区及过渡区域,明确污染空间梯度变化规律,为精准锁定污染热点区域提供依据;关联规则挖掘可分析不同环境要素、污染源与环境质量之间的内在关联,揭示污染成因,如识别特定气象条件与大气污染物浓度的关联关系、污染源排放与水质变化的对应规律;异常检测通过识别数据中的异常波动,可快速发现污染超标事件、监测设备故障等问题,为污染应急处置、设备运维提供预警信号。

(二) 机器学习算法

机器学习算法凭借强大的建模与预测能力,成为环境大数据分析的核心技术,通过训练数据构建预测模型,实现对污染趋势的精准预测、污染源的精准解析,大幅提升环境监测的前瞻性与精准性。

在污染趋势预测方面,通过整合历史监测数据、气象数据、污染源数据等,运用回归分析、神经网络、支持向量机等算法构建预测模型,可精准预测未来数小时、数天的环境质量变化趋势,为重污染天气预警、污染防控预案制定提供科学支撑。在污染源解析方面,通过机器学习算法对多源数据进行反演分析,可量化各类污染源对质量的贡献度,精准识别关键污染源,为污染源头管控提供靶向依据。此外,机器学习算法还可用于污染事件模拟,通过模拟不同污染场景下的扩散路径与影响范围,为应急处置方案优化提供支撑。

(三) 其他辅助分析技术

除核心技术外,还需结合大数据处理与可视化技术,提升数据分析的效率与实用性。大数据处理技术包括分布式计算、云计算等,可实现海量环境数据的快速处理与存储,解决传统计算模式难以应对的大规模数据处理难题,保障分析过程的高效性。

数据可视化技术通过图表、热力图、动态曲线等形式,将复杂的分析结果直观呈现,清晰地展示环境质量变化趋势、污染空间分布、污染源贡献度等信息,便于管理人员快速理解数据内涵、做出决策。同时,结合地理信息系统(GIS)技术,可将环境数据与空间位置关联,构建可视化的空间分析平台,实现污染范围、扩散路径的空间化展示,进一步提升分析结果的应用价值。

三、应用价值：支撑环境管理精细化与污染防治精准化

大数据分析技术在环境监测中的应用，核心价值在于为环境管理与污染防治提供精准、高效的决策支撑，通过深度挖掘数据价值，实现环境管理的精细化、污染防治的精准化、应急处置的高效化，推动环境治理能力全面提升。其应用价值贯穿于环境管理全流程，为各类环境问题的解决提供科学、系统的技术支撑。

（一）支撑环境管理精细化

大数据技术打破了传统环境管理依赖经验判断、粗放管控的模式，通过数据驱动实现管理流程的精细化优化，提升环境管理的科学性与高效性。依托海量多源数据的整合分析，可全面掌握区域环境质量现状、变化规律及驱动因素，为环境规划制定、管控措施优化提供精准依据。

在区域环境规划中，通过分析产业布局、污染源分布、环境承载力等数据，可科学划定生态保护红线、环境质量底线，优化产业结构与空间布局，实现经济发展与环境保护协同推进；在常态化环境管理中，通过实时监测数据与历史数据的对比分析，可评估管控措施成效，动态调整管理策略，提升管理的针对性；同时，通过构建智能化管理平台，实现环境数据的实时共享、协同分析与可视化展示，提升跨部门、跨区域环境管理的协同效率，推动形成一体化环境管理体系。

（二）推动污染防治精准化

精准化污染防治是当前环境治理的核心需求，大数据技术通过精准溯源、趋势预测、贡献度分析，为污染防治提供靶向支撑，大幅提升污染治理的效率与效果，降低治理成本。

在污染溯源方面，通过机器学习算法与数据挖掘技术，可精准识别各类污染源对环境质量的贡献度，锁定关键污染源与污染路径，为源头管控提供明确方向，避免盲目治理；在污染趋势研判方面，通过精准预测模型，可提前预判污染变化趋势，针对重污染天气、水体污染等问题提前制定防控预案，实现“早预警、早处置”；在治理成效评估方面，通过对比治理前后的多源数据，可量化治理成效，优化治理方案，确保污染治理措施落地见效。此外，针对面源污染、复合污染等复杂污染问题，通过多源数据的协同分析，可揭示污染形成机制，为制定针对性治理方案提供科学支撑。

（三）提升应急处置高效化

突发环境事件具有突发性、破坏性、扩散性的特点，高效的应急处置是降低污染损失的关键，大数据技术通过快速分析、模拟预测，为突发环境事件应急处置提供精准支撑，提升应急响应效率与决策科学性。

在事件预警阶段，通过异常检测技术可快速捕捉污染指标的异常波动，第一时间发出预警信号，为应急处置争取时间；在事件处置阶段，通过整合监测数据、气象水文数据、污染源数据等，运用模拟算法预测污染扩散路径、影响范围及潜在风险，为应急处置方案制定、应急资源调配提供精准依据；在事件后续评估阶段，通过分析应急处置数据、污染影响数据等，可评估处置成效，总结经验教训，优化应急处置预案，提升应对突发环境事件的能力。

（四）助力环境决策科学化

大数据技术为环境决策提供了全面、精准、系统的数据支撑，打破了传统决策依赖经验、数据不足的局限，推动环境决策从“经验驱动”向“数据驱动”转型。通过深度分析多源数据，可全面评估环境政策、治理措施的实施效果与潜在影响，为决策优化提供科学依据。

在环境政策制定中，通过分析区域环境现状、污染趋势、经济社会发展需求等数据，可评估政策的可行性与预期效果，优化政策条款，确保政策更贴合实际需求；在重大项目环境影响评价中，通过整合项目周边环境数据、气象水文数据、生态状况数据等，可精准预测项目对周边环境的潜在影响，为项目审批、环保措施制定提供支撑；同时，长期的大数据积累与分析，可揭示环境质量演变的长期规律，为应对气候变化、生态保护等长远环境问题提供决策参考。

大数据技术与环境监测的深度融合，构建了多源数据整合、智能化分析、精准化应用的现代化监测体系，突破了传统环境监测的局限，为环境管理精细化、污染防治精准化提供了核心支撑。从多源数据的全面汇聚到智能化算法的深度剖析，再到决策、治理、应急等场景的精准应用，大数据技术已贯穿环境监测与管理全流程，成为推动环境治理能力现代化的重要引擎。随着人工智能、云计算、物联网技术的持续迭代，大数据在环境监测中的应用将更加深入，分析精度与效率将进一步提升，应用场景将进一步拓展。深入掌握大数据环境监测技术的核心逻辑与应用方法，可为环境监测智能化升级、生态环境保护与可持续发展提供强有力的技术保障。

第五节 环境监测仪器的新进展

环境监测仪器是环境监测工作的核心载体，其技术迭代直接推动环境监测向精准化、高效化、智能化转型。随着环境治理需求的不断升级，传统监测仪器体积庞大、操作复杂、响应滞后等局限日益凸显，倒逼仪器技术向多维度创新发展。近年来，依托材料科学、电子技术、人工智能等领域的突破，环境监测仪器逐步形成小型化、便携化、智能化、高灵敏度的发展格局，新型检测设备不断涌现，有效弥补了传统仪器的短板，尤其在现场快速监测与应急监测场景中发挥着不可替代的作用。

一、仪器发展趋势：小型化、便携化、智能化、高灵敏度

环境监测仪器的发展趋势高度契合现代环境监测的实战需求，围绕“高效适配多场景、精准捕捉微变化、智能简化全流程”的核心目标，形成小型化、便携化、智能化、高灵敏度四大核心方向。四大趋势相互融合、协同升级，推动监测仪器从实验室固定设备向全场景适配设备转型，大幅拓展了环境监测的覆盖范围与应用能力。

（一）小型化与便携化

小型化与便携化是环境监测仪器突破场景限制的核心趋势，通过核心部件微型化、结构集成化设计，在保证监测精度的前提下，大幅缩减仪器体积与重量，实现多场景灵活部署。传统监测仪器多为集装箱或实验室级设备，依赖固定场地与稳定电源，仅能覆盖有限监测点位，而小型化便携仪器可实现“即开即用、随地监测”，适配野外、园区、应急现场等复杂场景。

核心技术支撑包括微型传感器、低热容组件、集成化电路等，如高精度微型金属氧化物半导体传感器可将颗粒物检测模块压缩至掌心大小，误差控制能力媲美传统大型设备；低热容气相色谱柱技术的应用，使气质联用仪体积大幅缩减，可实现单人肩背或车载转运。同时，便携化仪器普遍配备多模式供电系统，支持锂电池、车载电源、太阳能等多元供电，在无固定电源的野外或应急场景中可长时间稳定运行，彻底打破场地与电源限制。

（二）智能化

智能化是环境监测仪器提升操作效率与数据可靠性的核心方向，依托人工智

能、物联网、边缘计算等技术，实现仪器操作自动化、数据处理智能化、设备运维智能化，大幅降低人为干预成本，提升监测流程的标准化水平。智能化升级贯穿仪器全生命周期，从开机校准到数据输出形成闭环智能管控。

核心功能包括自动校准、智能数据清洗、远程操控与故障预警。仪器内置 AI 芯片与校准模块，可定期自动修正传感器漂移，延长维护周期，提升数据稳定性；边缘计算能力支持本地实时处理监测数据，剔除环境干扰导致的异常值，准确率较传统人工筛选大幅提升。同时，通过物联网技术实现仪器与云端平台的联动，管理人员可远程操控仪器运行、调取监测数据，实时掌握设备工作状态，出现故障时自动发出预警信号，降低运维难度与成本。

（三）高灵敏度

高灵敏度是环境监测仪器捕捉低浓度污染信号、实现早期预警的关键趋势，通过传感器材料革新、检测原理优化、信号放大技术升级，不断降低仪器检出限，提升对微量、痕量污染物的识别能力。随着环境治理向精细化推进，对低浓度污染物、复合污染物的监测需求日益迫切，高灵敏度仪器成为精准研判污染趋势的核心支撑。

目前，主流监测仪器对气态污染物的检出限已达 ppb 级，部分高端设备可实现 ppt 级检测；颗粒物检测可精准捕捉粒径小于 $0.1\mu\text{m}$ 的超细颗粒，误差控制在 $\pm 5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以内。核心技术突破包括高选择性敏感材料研发、激光散射技术优化、离子传输路径改良等，这些技术的应用使仪器能够在复杂基质中精准识别目标污染物，有效规避共存物质干扰，为低浓度污染监测、污染溯源提供可靠数据支撑。

二、新型仪器：快速检测试剂盒、便携式气质联用仪、在线多参数分析仪

顺应四大发展趋势，快速检测试剂盒、便携式气质联用仪、在线多参数分析仪成为环境监测领域的代表性新型仪器。三类仪器分别适配快速筛查、现场精准分析、连续在线监测等不同需求，凭借独特的技术优势覆盖多场景监测需求，形成互补协同的新型仪器体系。为清晰呈现各类仪器的核心特性与应用适配性，如下表所示：

仪器类型	核心技术特点	检出能力	适配场景	核心优势
快速检测试剂盒	基于免疫反应、显色反应原理，结构简单，无需复杂操作	ppm 级，适用于半定量快速筛查	现场初步筛查、应急污染定性、大规模样品初筛	成本低廉、操作便捷、检测快速（数分钟出结果）、携带方便
便携式气质联用仪	融合气相色谱分离与质谱鉴定技术，低热容组件+模块化设计	ppb-ppt 级，定性准确率达 95% 以上	突发污染应急、现场精准定性定量、车载走航监测	便携性强、分析高效、定性精准、支持多元进样模式
在线多参数分析仪	集成多类传感器，实时数据采集+自动传输+智能分析	ppb 级，多参数同步检测	水源地监测、工业废水在线管控、流域连续监测	24 小时不间断运行、多参数协同监测、数据实时上传、自动化程度高

（一）快速检测试剂盒

快速检测试剂盒是基于化学显色、免疫结合等原理研发的简易检测工具，凭借低成本、快响应、易操作的优势，成为现场快速筛查与应急定性的核心工具。该类仪器无需专业操作人员与复杂设备，通过直观的颜色变化或数值显示，可在数分钟内完成对目标污染物的半定量检测，大幅提升污染初筛效率。

其核心优势在于场景适配性极强，可广泛应用于水体、土壤、大气中重金属、有机农药、挥发性有机物等污染物的快速筛查，尤其适合突发污染事件的现场初步研判，为应急处置方案制定提供即时参考。同时，试剂盒体积小巧、便于批量携带，可实现大规模样品快速初筛，筛选出阳性样品后再通过精密仪器进一步检测，大幅降低监测成本与时间成本。但需注意，该类仪器检出精度有限，仅适用于初筛与定性，精准定量需依托其他精密仪器。

（二）便携式气质联用仪

便携式气质联用仪融合了气相色谱的高效分离能力与质谱的精准鉴定能力，通过模块化、微型化设计，在保持实验室级检测性能的同时，实现了现场便携应用，是复杂污染物现场精准定性定量的核心仪器。该类仪器突破了传统台式气质联用仪对场地、电源的限制，可在应急现场、野外、工业园区等场景即开即用。

核心技术亮点包括低热容气相色谱柱、小型化真空系统与高灵敏度质量分析器，可快速实现复杂基质中目标物的分离与鉴定，匹配内置千余种目标物谱库，定性准确率高，且支持液体、气体、顶空等多元进样模式，适配不同类型样品检测。其重量普遍控制在 20kg 以内，配备大容量锂电池与便携载气瓶，单次充电

可满足长时间连续检测需求，广泛应用于 VOCs、半挥发性有机物、危化品等污染物的现场应急检测与走航监测，为污染溯源与浓度研判提供精准数据。

（三）在线多参数分析仪

在线多参数分析仪是集成多类传感器与智能分析模块的连续监测设备，可同时对多种环境指标进行实时在线监测、数据自动传输与异常预警，核心适配水体、大气等介质的常态化连续监测需求。该类仪器彻底改变了传统人工采样、离线分析的模式，实现监测数据的实时化、连续化。

针对水体监测，可同步检测 pH 值、溶解氧、浊度、重金属、污染物浓度等多项指标；针对大气监测，可实现颗粒物、气态污染物、噪声等参数的协同监测。仪器具备 24 小时不间断运行能力，支持数据实时上传至云端平台，结合智能算法自动识别异常数据并发出预警，同时具备自动校准功能，确保长期监测的数据可靠性。其广泛应用于饮用水源地、工业排污口、流域、工业园区等关键点位的常态化监测，为环境管理与污染管控提供连续稳定的数据支撑。

三、应用优势：满足现场快速监测与应急监测的实战需求

新型环境监测仪器的技术创新，核心价值在于精准匹配现代环境监测的实战需求，尤其在现场快速监测与应急监测中展现出显著优势，同时为常态化监测、大规模筛查提供高效支撑，推动环境监测从“实验室滞后分析”向“现场实时研判”转型，大幅提升环境治理的响应效率与精准度。

（一）适配现场快速监测，提升监测覆盖面与效率

现场快速监测是突破传统监测时空限制的关键需求，新型仪器凭借小型化、便携化、操作简易的优势，可实现监测点位的灵活布设，覆盖传统仪器难以触及的偏远区域、复杂地形，大幅提升监测网络的覆盖面与数据分辨率。相较于传统监测需数天甚至数周才能获取数据的模式，新型仪器可在现场即时获取监测结果，显著提升监测效率。

在城市环境监测中，小型化监测设备可实现街道级、社区级高密度布点，将监测精度从“城市级”推进至“微观区域级”，精准锁定污染热点；在农田、山区等偏远区域，便携式仪器可实现野外现场检测，避免样品运输过程中的组分损失与变质，确保数据真实性；在大规模筛查场景中，快速检测试剂盒与便携式仪器协同应用，可在短时间内完成海量样品初筛与精准检测，大幅提升监测工作

效率。

（二）支撑应急监测实战，强化突发污染处置能力

突发环境事件具有突发性、扩散性、破坏性的特点，应急监测的快速响应与精准研判直接决定处置效果，新型仪器为应急监测提供了核心技术支撑，实现“快速抵达、即时检测、精准研判”的应急监测闭环。

在应急响应阶段，快速检测试剂盒可在第一时间完成污染定性与范围初步锁定，为应急处置方案制定争取时间；便携式气质联用仪可现场精准定量污染物浓度，分析污染组分，为溯源污染源头、判断扩散趋势提供数据支撑；在线多参数分析仪可在污染区域周边布设，实现污染物浓度变化的实时跟踪，评估处置效果。同时，新型仪器的便携性与多模式供电能力，可适配火灾、泄漏、暴雨等复杂应急场景，在极端环境下稳定运行，大幅提升应急监测的实战能力。

（三）优化监测成本结构，推动监测常态化普及

新型环境监测仪器在提升监测效率与精度的同时，有效优化了监测成本结构，为监测工作的常态化、规模化普及提供了可能。传统大型监测设备成本高昂、运维复杂，难以实现高密度布点与大范围覆盖，而新型仪器在成本与运维方面展现出显著优势。

快速检测试剂盒成本低廉，可批量应用于大规模初筛；小型化、便携式仪器部署成本仅为传统大型设备的十分之一甚至更低，且运维简单、校准周期长，大幅降低长期运维成本；在线多参数分析仪可替代多台单一参数监测设备，减少设备投入与场地占用，同时避免人工采样与离线分析的人力、时间成本。成本结构的优化，使环境监测能够从关键点位监测向全域覆盖监测延伸，从阶段性监测向常态化监测转型，为环境管理精细化提供数据支撑。

（四）助力数据协同联动，支撑精准治理决策

新型仪器的智能化与网络化特性，使监测数据能够实现实时传输、协同联动，为环境治理决策提供精准、及时的数据支撑。在线多参数分析仪、便携式智能仪器可与云端监测平台、环境管理系统对接，实现监测数据的实时共享与深度分析，打破数据孤岛。

通过整合新型仪器获取的实时监测数据、历史数据、气象数据等多源信息，可精准研判污染变化趋势、识别污染成因、评估治理成效，为环境规划制定、污染源管控、应急处置优化等决策提供科学依据。同时，实时监测数据的公开与共

享，可推动公众参与环境监督，形成“监测－决策－治理－反馈”的闭环管理体系，提升环境治理的协同性与精准性。

环境监测仪器的新进展为现代环境监测体系注入了强劲动力，小型化、便携化、智能化、高灵敏度的发展趋势，推动仪器从实验室走向全场景，快速检测试剂盒、便携式气质联用仪、在线多参数分析仪等新型仪器的应用，有效满足了现场快速监测与应急监测的实战需求，大幅提升了环境监测的效率、精度与覆盖面。随着材料科学、人工智能、物联网技术的持续迭代，环境监测仪器将朝着更低检出限、更高智能化、更强场景适配性方向发展，实现“精准监测、快速响应、智能管控”的核心目标。深入掌握新型环境监测仪器的技术特性与应用优势，合理选型与部署，可为环境治理精细化、科学化提供强有力的技术支撑，助力生态环境保护与可持续发展。

第八章 大气污染防治策略

第一节 大气污染源解析技术

大气污染源解析技术是精准开展大气污染防治工作的核心支撑，通过科学方法识别区域大气污染物的来源类型、贡献强度及空间分布特征，构建“污染源－污染物－环境质量”的关联逻辑，为污染防治策略制定提供数据支撑与靶向指引。传统大气污染治理多依赖粗放式管控，易出现“盲目治污、低效施策”问题，而污染源解析技术凭借定量化、精准化的优势，可明确各类污染源对大气环境质量的影响权重，推动治理工作从“全面覆盖”向“精准突破”转型。

一、解析方法：化学质量平衡法、正定矩阵因子分析法等源解析技术

大气污染源解析方法以定量化分析为核心，通过结合污染物化学组分特征、扩散规律及数学模型，实现对污染源类型与贡献度的精准研判。目前，行业内形成了以化学质量平衡法、正定矩阵因子分析法为核心的主流技术体系，同时辅以富集因子法、同位素示踪法等辅助方法，各类方法基于不同原理适配不同监测场景，相互补充验证以提升解析结果的可靠性。

（一）核心解析方法

化学质量平衡法是应用最广泛的源解析方法之一，其核心原理基于“受体污染物的化学组分含量等于各污染源贡献组分含量之和”，通过建立化学组分质量平衡方程，求解各类污染源的贡献比例。该方法需提前明确各类污染源的特征组分谱，即不同污染源排放污染物的化学组分构成，再通过受体样品的组分检测数据，结合最小二乘法等数学手段反演污染源贡献度。其优势在于原理直观、计算简便，适用于颗粒物及气态污染物的源解析，尤其对固定源、移动源等典型污染源的识别精度较高，可满足城市、区域尺度的常规解析需求。

正定矩阵因子分析法属于受体模型法的一种，无需提前确定污染源特征组分谱，通过对受体样品的化学组分数据进行因子分析，基于数学约束条件（因子载

荷与得分非负)提取潜在污染源类型,并计算各类污染源的贡献占比。该方法的核心优势在于适用性强,可应对污染源类型复杂、特征谱不明确的场景,能有效识别复合污染场景下的潜在污染源,同时对数据完整性要求相对较低,在区域复合污染解析中应用广泛。但该方法对数据质量敏感,需通过严格的数据预处理剔除异常值,确保解析结果的可靠性。

(二) 辅助解析方法

富集因子法主要用于识别大气颗粒物中元素的自然来源与人为来源,通过对比颗粒物中目标元素与地壳元素的相对含量,计算富集因子值,判断元素是否受人为活动影响及富集程度。该方法操作简便、成本较低,可快速初步筛查人为污染源的贡献特征,常作为核心解析方法的前置预处理手段,为后续精准解析缩小范围。

同位素示踪法基于不同污染源排放污染物的同位素组成存在特异性差异,通过检测受体样品中污染物的同位素比值,结合各类污染源的同位素特征库,实现污染源的精准溯源。该方法特异性强,可有效区分同源不同类型污染源的贡献,尤其适用于复杂污染源场景下的精准识别,但受限于检测技术与成本,应用范围相对较窄,多作为核心方法的补充验证手段。

(三) 方法应用要点

各类解析方法的应用需结合监测场景与数据条件合理选择,避免单一方法导致的解析偏差。化学质量平衡法依赖精准的污染源特征谱,若特征谱更新不及时或与实际污染源差异较大,会影响解析结果精度,因此需定期开展污染源排放监测,更新特征谱数据库;正定矩阵因子分析法需保证受体样品数据的充足性与代表性,采样点位、时间需覆盖不同污染时段与区域,确保数据能反映整体污染特征。实际应用中,通常采用两种及以上方法联合解析,通过结果对比验证,提升解析结果的可靠性与准确性。

二、重点污染源识别:工业源、移动源、扬尘源等污染贡献占比分析

重点污染源识别是大气污染源解析的核心目标,通过量化分析工业源、移动源、扬尘源等典型污染源的贡献占比,明确区域大气污染的核心驱动因素,为靶向治污提供明确方向。不同区域因产业结构、地理环境、交通状况差异,各类污染源的贡献占比存在显著不同,需结合解析结果与区域实际情况,精准锁定重

点污染源及关键污染环节。

（一）典型污染源贡献特征

工业源是大气污染的核心污染源之一，其贡献占比通常在各类污染源中位居前列，尤其在工业密集型区域更为突出。工业源排放的污染物种类复杂，涵盖颗粒物、气态污染物及挥发性有机物等，排放强度与产业类型、生产工艺、污染治理设施运行状况密切相关。通过源解析可明确不同工业行业的污染贡献权重，识别污染贡献度较高的重点行业与企业，为行业性污染管控提供依据。

移动源主要包括机动车、非道路移动机械等，其污染贡献具有流动性、分散性特征，是城市及交通干线周边大气污染的重要来源。移动源排放的核心污染物包括颗粒物、氮氧化物、挥发性有机物等，贡献占比受交通流量、车型结构、燃油质量等因素影响。源解析可精准量化移动源的整体贡献占比，同时区分柴油车、汽油车、非道路移动机械等细分来源的贡献差异，为交通污染管控策略制定提供支撑。

扬尘源属于无组织排放源，主要包括建筑施工扬尘、道路扬尘、裸地扬尘等，其污染贡献受气象条件、管控措施影响较大，具有显著的时空波动性。扬尘源排放的核心污染物为颗粒物，贡献占比在干旱、大风天气及施工高峰期会明显上升。通过源解析可明确各类扬尘源的贡献占比，识别扬尘污染的重点区域与关键环节，为扬尘管控措施优化提供靶向指引。

（二）贡献占比分析逻辑

重点污染源贡献占比分析需基于源解析结果，结合区域污染特征与社会经济状况，构建多维度分析框架。首先，通过定量化数据明确各类污染源的整体贡献排序，锁定区域污染的核心污染源；其次，结合时间维度分析，识别不同时段（如季节、昼夜、重污染时段与清洁时段）污染源贡献占比的变化规律，明确污染时段的核心驱动因素；最后，结合空间维度分析，识别不同区域（如工业区、交通区、居民区）污染源的分布特征，精准定位污染热点区域。需关注复合污染场景下各类污染源的协同贡献效应，部分区域大气污染并非单一污染源驱动，而是工业源与移动源、扬尘源等协同作用的结果，需通过综合分析，明确各类污染源的协同影响机制，为综合性污染管控策略制定提供依据。此外，贡献占比分析需定期更新，结合产业结构调整、管控措施落地等情况，动态追踪污染源贡献变化，确保管控策略的针对性与时效性。

三、解析应用：为精准施策提供污染源优先级排序依据

大气污染源解析技术的核心应用价值在于为大气污染防治精准施策提供科学依据，通过明确污染源优先级排序，优化治理资源配置，提升污染治理效率与效果。解析结果贯穿于污染防治规划制定、日常管控、应急处置及成效评估全流程，推动大气污染治理从“经验驱动”向“数据驱动”转型，实现治理效益最大化。

（一）优化污染防治规划与管控策略

基于源解析结果的污染源优先级排序，可明确区域污染治理的重点方向，优化污染防治规划的内容与布局。对于贡献占比最高的核心污染源，优先制定针对性管控措施，集中治理资源开展重点攻坚；对于贡献占比次之的次要污染源，结合区域实际情况制定阶段性管控目标，逐步降低其污染贡献。同时，可结合污染源的空间分布特征，优化管控区域布局，在污染热点区域强化管控力度，实现精准布控。例如，若解析结果显示工业源为区域核心污染源，可针对性制定工业行业污染治理方案，推进重点行业清洁生产改造、污染治理设施升级，强化工业企业排污许可管理；若移动源贡献占比突出，则聚焦机动车管控，推进新能源汽车替代、燃油质量升级，优化交通管控措施，缓解交通污染压力。通过优先级排序，避免治理资源分散，提升污染防治规划的落地成效。

（二）支撑重污染天气精准应急处置

重污染天气应对的核心是快速锁定污染来源，采取针对性应急管控措施，缩短重污染持续时间、降低污染强度。源解析技术可在重污染天气期间，快速分析污染成因及核心驱动污染源，为应急管控措施的制定与调整提供即时支撑。通过对比重污染时段与清洁时段的污染源贡献变化，明确重污染天气的核心触发源，针对性采取应急减排措施，实现“精准减排、科学应急”。基于优先级排序，对重污染天气贡献度高的污染源实施严格应急管控，如工业源暂停部分生产工序、移动源限制通行、扬尘源停止施工作业等；对贡献度较低的污染源，可采取适度管控措施，在保障污染减排效果的同时，最大限度降低对经济社会正常运行的影响。同时，可通过源解析结果评估应急管控措施的成效，动态调整管控方案，提升重污染天气应对的科学性与高效性。

（三）评估污染治理成效与动态优化策略

污染源解析结果可作为评估污染治理成效的核心指标，通过对比治理前后各

类污染源的贡献占比变化，量化治理措施的实施效果。若核心污染源的贡献占比显著下降，说明对应管控措施成效明显；若某类污染源贡献占比上升，则需分析原因，优化调整管控策略。通过动态监测与评估，形成“解析-施策-评估-优化”的闭环管理体系，确保污染治理措施持续有效。随着区域产业结构调整、能源结构优化及管控措施升级，各类污染源的贡献占比会发生动态变化，需定期开展源解析工作，更新污染源优先级排序，及时调整污染防治策略。例如，随着工业污染治理成效凸显，工业源贡献占比下降，移动源、扬尘源可能成为新的核心污染源，需及时将治理重点转向此类污染源，确保污染治理工作紧跟污染特征变化。

（四）推动区域协同污染治理

大气污染具有显著的区域性、流动性特征，单一区域的污染治理难以从根本上解决问题，需开展区域协同治理。污染源解析技术可明确区域间污染传输路径及跨界污染源的贡献占比，为区域协同治理提供数据支撑。通过跨区域联合源解析，识别跨界污染的核心来源与传输通道，基于优先级排序，制定区域协同管控措施，推动上下游、左右岸协同治污，形成区域污染治理合力。例如，针对流域性、区域性大气污染问题，通过联合源解析明确各区域污染源对跨界污染的贡献权重，优先管控贡献度高的跨界污染源，建立区域污染联防联控机制，实现区域环境质量协同改善。同时，基于解析结果的优先级排序，可优化区域治理责任划分，确保治理任务精准落地，提升区域协同治理的效率与效果。

大气污染源解析技术作为大气污染防治的“精准导航仪”，通过科学的解析方法、精准的污染源识别及高效的实践应用，为污染防治精准施策提供了核心支撑，有效破解了传统治污“盲目性、低效性”的难题。从核心解析方法的灵活运用，到重点污染源的精准识别，再到基于优先级排序的靶向施策，该技术贯穿于大气污染治理全流程，推动治理工作向精细化、科学化转型。随着解析技术的不断迭代与完善，其在区域协同治理、复合污染解析、动态监测评估等方面的应用将更加深入，为大气环境质量持续改善提供更加强有力的技术保障，助力实现蓝天保卫战的核心目标。

第二节 工业大气污染控制技术

工业大气污染是区域大气环境质量改善的核心制约因素，其排放具有污染物种类多、排放强度大、成分复杂等特征，涵盖颗粒物、气态污染物及挥发性有机物等多元污染物，对生态环境与人体健康构成严重威胁。工业大气污染控制技术作为破解该问题的核心手段，已形成“源头防控－末端治理－技术升级”的全链条防控体系，通过从污染产生源头削减排放、末端高效净化处理、技术融合升级提升治理效能，实现工业污染的精准管控与协同治理。

一、源头控制：清洁生产工艺改造与能源结构优化

源头控制是工业大气污染防治的根本性措施，核心在于通过清洁生产工艺改造削减污染物产生量，依托能源结构优化降低化石能源消耗带来的污染排放，从源头阻断污染路径，实现“减排优先、预防为主”的治理目标。转型，是工业污染治理的核心发展方向。

（一）清洁生产工艺改造

清洁生产工艺改造以“减量化、无害化、资源化”为核心，通过优化生产流程、替代原料、升级设备等手段，减少生产过程中污染物的产生与排放，从根本上提升生产环节的环保水平。改造重点聚焦高污染、高耗能行业，针对生产过程中的污染关键节点，实施针对性技术改造，实现污染物源头减量。

核心改造路径包括原料替代、流程优化与设备升级。原料替代通过采用环保型、低污染原料替代传统高污染原料，削减污染物生成基础，如采用低硫煤、无硫原料替代高硫原料，减少二氧化硫排放；流程优化通过重构生产工艺、缩短生产链路，减少中间环节污染物排放，同时提升生产效率，如采用连续化生产工艺替代间歇式生产，降低无组织排放；设备升级通过更换高效、环保型生产设备，替代老旧高耗能设备，减少生产过程中的泄漏与排放，如采用密闭式设备替代开放式设备，控制挥发性有机物无组织排放。此外，通过引入智能化管控系统，实时监控生产环节的污染产生情况，动态调整生产参数，实现生产过程的精准调控与污染源头管控。

（二）能源结构优化与清洁能源替代

能源消耗是工业大气污染的主要来源之一，化石能源燃烧过程中会产生大量

颗粒物、氮氧化物、二氧化硫等污染物，能源结构优化的核心在于逐步降低化石能源占比，推广清洁能源替代，构建绿色低碳的工业能源体系。

清洁能源替代路径包括可再生能源替代、洁净化石能源利用及能源梯级利用。可再生能源替代通过推广太阳能、风能、生物质能等可再生能源，替代传统煤炭、重油等化石能源，从根本上消除化石能源燃烧带来的污染；洁净化石能源利用通过采用天然气、煤层气等清洁化石能源，替代高污染煤炭资源，同时配套高效燃烧设备，提升能源利用效率，减少污染物排放；能源梯级利用通过优化能源分配与利用流程，实现余热、余压回收利用，降低单位产品能耗，间接减少污染排放。此外，工业企业可通过分布式能源系统建设，整合可再生能源与洁净能源，实现能源的高效供给与污染物减排协同，推动能源结构向绿色化、多元化转型。

二、末端治理：废气脱硫、脱硝、除尘、VOCs 治理等技术

末端治理是工业大气污染控制的关键保障手段，针对源头控制后仍排放的污染物，通过高效净化技术进行处理，确保废气达标排放，是工业企业实现环保合规的基础。随着环保标准不断提高，末端治理技术正朝着高效化、智能化、协同化方向发展，形成了针对不同污染物的专项治理技术体系，可实现多污染物的精准净化处理。

（一）常规污染物治理技术

常规污染物治理聚焦工业废气中的颗粒物、二氧化硫、氮氧化物等主要污染物，形成了脱硫、脱硝、除尘三大核心技术方向，各类技术基于不同净化原理，适配不同行业、不同排放强度的治理需求。

除尘技术核心在于去除废气中的颗粒物，通过物理拦截、惯性碰撞、静电吸附等原理，实现颗粒物与废气的分离，主流技术包括布袋除尘、静电除尘、旋风除尘等。其中，布袋除尘与静电除尘效率较高，可去除细颗粒物，适用于高浓度、细颗粒污染物治理；旋风除尘结构简单、成本较低，适用于粗颗粒污染物预处理。脱硫技术通过化学吸收、物理吸附等方式去除废气中的二氧化硫，主流技术包括湿法脱硫、半干法脱硫、干法脱硫等，湿法脱硫效率高、技术成熟，应用最为广泛，半干法与干法脱硫无需废水处理，适用于水资源短缺区域。脱硝技术聚焦氮氧化物去除，主流技术为选择性催化还原脱硝、选择性非催化还原脱硝，通过还原反应将氮氧化物转化为无害的氮气与水，可实现高效脱硝，适配火电、钢铁等

行业的治理需求。

（二）VOCs 及特征污染物治理技术

挥发性有机物（VOCs）作为工业大气中的特征污染物，具有毒性、挥发性、易燃易爆等特点，且易形成臭氧与二次颗粒物，其治理已成为工业污染控制的重点与难点。针对 VOCs 的治理，形成了回收法与销毁法两大技术路径，适配不同浓度、不同组分的 VOCs 治理需求。

回收法适用于高浓度、有回收价值的 VOCs，通过吸附、冷凝、膜分离等技术，实现 VOCs 的回收再利用，既减少污染排放，又提升资源利用率，主流技术包括活性炭吸附回收、冷凝回收、膜分离回收等。销毁法适用于低浓度、无回收价值的 VOCs，通过氧化、光催化等方式将 VOCs 分解为无害的二氧化碳与水，主流技术包括催化燃烧、热力燃烧、光催化氧化等。此外，针对无组织排放 VOCs，采用密闭收集 + 集中处理的组合方式，通过强化废气收集效率，配套高效治理设备，实现无组织排放的精准管控。对于其他特征污染物，需结合污染物性质与排放特征，采用针对性治理技术，实现达标排放。

三、技术升级：高效协同治理技术与资源化利用技术融合

随着工业污染呈现复合化、协同化特征，单一治理技术已难以满足多污染物协同控制与环保标准升级需求，技术升级成为提升工业污染治理效能的核心路径。通过高效协同治理技术突破单一污染物治理局限，融合资源化利用技术实现污染物变废为宝，构建“协同治理 + 资源循环”的一体化技术体系，推动工业污染治理从“达标排放”向“高效减排、资源循环”转型。

（一）高效协同治理技术

高效协同治理技术核心在于突破传统单一污染物治理模式，通过技术融合实现多污染物协同去除，提升治理效率与稳定性，同时降低治理成本，适配复合污染场景的治理需求。当前，协同治理技术已成为工业污染治理的主流发展方向，尤其在火电、钢铁、化工等复杂污染行业应用广泛。

核心协同路径包括多污染物一体化治理与工艺协同优化。多污染物一体化治理通过整合脱硫、脱硝、除尘、VOCs 治理等技术，构建一体化处理装置，实现多种污染物同步去除，如脱硫脱硝除尘一体化设备，可同时去除废气中的二氧化硫、氮氧化物与颗粒物，治理效率高、占地面积小；工艺协同优化通过调整治理

工艺参数，实现不同治理环节的协同适配，提升整体治理效能，如优化脱硝催化剂活性与脱硫吸收剂配比，减少不同工艺间的相互干扰，提升协同治理效果。此外，依托智能化技术与大数据分析，构建治理设备智能管控系统，实时监测治理过程中的污染物浓度、设备运行状态，动态调整工艺参数，实现协同治理的精准调控与高效运行。

（二）资源化利用技术融合

资源化利用技术融合核心在于将工业废气治理与资源回收利用相结合，通过技术创新实现污染物的资源化转化，变废为宝，既减少污染排放，又创造经济价值，实现环保效益与经济效益的双赢，是工业污染治理的高级形态。

主流资源化利用路径涵盖脱硫副产物回收、VOCs 回收再利用及余热资源回收。脱硫副产物回收通过对脱硫过程中产生的石膏、硫酸铵等副产物进行提纯处理，用于建筑材料、化肥等领域，实现硫资源的循环利用；VOCs 回收再利用通过吸附、冷凝等回收技术，将废气中的 VOCs 提纯后重新用于生产环节，提升资源利用率，降低原料消耗；余热资源回收通过回收工业废气中的余热，用于供暖、发电或生产工艺加热，提升能源利用效率，减少化石能源消耗。此外，部分行业通过技术创新，实现污染物的高价值转化，如将氮氧化物转化为硝酸、将二氧化碳转化为化工原料，进一步提升资源化利用水平。资源化利用技术的融合应用，推动工业污染治理从“被动处理”向“主动资源化”转型，为工业绿色低碳发展提供重要支撑。

（三）技术升级保障与发展方向

工业大气污染控制技术的升级迭代，需依托政策引导、技术研发与企业实践的协同发力。政策层面通过严格环保标准、加大绿色技术扶持力度，倒逼企业开展技术升级；技术层面加强产学研协同创新，聚焦关键核心技术攻关，突破协同治理、资源化利用等技术瓶颈；企业层面结合自身行业特征与污染排放情况，针对性采用先进适用技术，推动技术落地应用。

技术升级将朝着更高效、更低碳、更智能的方向发展：一方面，强化多污染物协同治理技术研发，提升低浓度、复合污染的治理能力；另一方面，深化资源化利用技术与主业的融合，构建“治理—回收—再利用”的闭环体系；同时，推动智能化技术与治理设备深度融合，实现治理过程的全流程智能管控，进一步提升治理效能与稳定性。

工业大气污染控制技术的不断迭代与完善，为工业污染治理与产业绿色转型提供了核心支撑，“源头控制－末端治理－技术升级”的全链条体系，实现了从污染预防到高效治理、资源循环的全方位管控。从清洁生产工艺改造与能源结构优化削减源头排放，到末端专项治理技术保障达标排放，再到协同治理与资源化利用技术融合升级，工业污染控制正朝着精准化、高效化、资源化的方向发展。

第三节 移动源污染控制策略

移动源污染是区域大气污染的重要来源之一，具有流动性、分散性、时空波动性强等特征，主要包括道路车辆、非道路移动机械等排放的颗粒物、氮氧化物、挥发性有机物等污染物，对城市及交通干线周边大气环境质量影响显著，且易与其他污染源叠加形成复合污染，加剧重污染天气发生频次。随着交通运输业与工程建设行业的快速发展，移动源污染排放量持续攀升，已成为大气污染防治的重点与难点领域。当前，移动源污染控制已形成“车辆管控－非道路机械治理－油品优化”的全方位策略体系，通过技术升级、监管强化、源头优化多维度发力，实现移动源污染的精准管控与协同减排。

一、车辆污染控制：新能源汽车推广与燃油车尾气净化技术升级

道路车辆作为移动污染的核心载体，其污染控制是移动源治理的重中之重。策略核心围绕“增量替代、存量优化”展开，通过大力推广新能源汽车削减新增污染排放，依托燃油车尾气净化技术升级降低存量车辆污染强度，双管齐下实现道路车辆污染总量减排，推动道路交通领域绿色低碳转型。

（一）新能源汽车推广

新能源汽车推广是从源头削减车辆污染的根本性措施，通过以电动汽车、氢燃料电池汽车等零排放或低排放车辆替代传统燃油车，彻底消除或大幅减少尾气污染物排放，是道路交通污染控制的核心发展方向。推广工作需依托政策引导、基础设施配套与市场机制完善，构建全链条推广体系，提升新能源汽车渗透率。

推广重点聚焦公共交通、物流配送、公务用车等重点领域，优先实现新增及更新车辆的新能源替代，逐步扩大推广范围至私人乘用车领域。政策层面通过购车补贴、税费减免、路权优先等激励措施，降低用户购车与使用成本；基础设施

层面加快充电桩、加氢站等配套设施布局，解决新能源汽车续航与补能难题，提升使用便利性；技术层面推动新能源汽车电池、电机、电控等核心部件升级，提升车辆续航里程、安全性与性价比，增强市场竞争力。同时，建立新能源汽车全生命周期管理体系，规范电池回收利用，实现环境效益与资源效益协同。

（二）燃油车尾气净化技术升级

针对存量燃油车，通过尾气净化技术升级、排放管控强化等措施，降低单车污染排放强度，确保车辆达标排放，是车辆污染控制的重要补充。技术升级聚焦尾气净化装置优化与整车排放控制技术改良，同时严格落实车辆年检与维修制度，保障净化设备高效稳定运行。

核心技术升级方向包括尾气净化装置迭代与发动机技术优化。尾气净化装置方面，推广高效催化转化器、颗粒捕集器等先进设备，提升氮氧化物、颗粒物等污染物的净化效率，适配国六及以上严格排放标准；针对老旧燃油车，推动污染治理设施升级改造，或通过淘汰补贴政策引导提前报废，减少高污染车辆存量。发动机技术方面，通过优化燃烧效率、提升燃油雾化效果等技术改良，降低污染物生成量，从源头减少尾气排放。此外，强化车辆全生命周期排放管控，严格执行机动车排放检验制度，严厉打击排放造假行为，建立车辆排放异常预警机制，确保净化技术与设备发挥实效。

二、非道路移动机械：农机、工程机械的排放控制与监管

非道路移动机械涵盖农机、工程机械、船舶、机场地勤设备等，其排放具有功率大、污染强度高、管控难度大等特点，且多在露天作业，污染物易直接扩散，已成为移动源污染治理的薄弱环节。非道路移动机械污染控制需坚持“技术管控与监管强化并重”，通过排放限值升级、污染治理技术应用、全流程监管完善，实现污染排放有效管控。

（一）排放控制技术应用

排放控制技术应用聚焦农机与工程机械两大核心领域，结合设备作业特征与排放需求，推广适配的污染治理技术，同时推动老旧设备升级改造与淘汰更新，降低整体污染排放强度。技术应用需兼顾治理效果与作业实用性，适配不同设备的工况需求。

工程机械方面，针对挖掘机、装载机、起重机等设备，推广高效尾气净化技

术，配套安装催化转化器、颗粒捕集器等装置，提升污染物净化效率；推动新能源工程机械研发与应用，在港口、园区等封闭场景优先推广电动、氢能工程机械，实现零排放作业。农机方面，针对拖拉机、联合收割机等设备，优化发动机燃烧系统与尾气净化装置，提升低负荷工况下的排放控制效果；推广节能环保型农机，结合农业生产需求，研发适配不同作业场景的新能源农机，同时加强农机维修保养指导，确保设备处于最佳排放状态。此外，建立非道路移动机械排放技术标准体系，推动技术升级与设备更新迭代。

（二）全流程监管体系完善

非道路移动机械管控难度大的核心原因在于流动性强、作业分散、监管覆盖不足，完善全流程监管体系是提升管控效能的关键。通过备案管理、排放检测、执法监管、信用约束等多手段协同，构建“源头管控－过程监管－末端执法”的全链条监管机制。

源头管控方面，建立非道路移动机械备案管理制度，对设备型号、排放等级、使用单位、作业区域等信息进行统一登记，实现设备精准管控；严格执行新生产设备排放标准，禁止生产、销售不符合排放要求的设备。过程监管方面，加强作业现场排放监测，推广便携式排放检测设备，对重点区域、重点时段作业的设备开展常态化抽检；建立排放异常设备预警机制，督促使用单位及时维修整改。末端执法方面，严厉打击超标排放、擅自拆除污染治理设施等违法行为，强化违法惩戒力度；建立信用评价体系，将排放合规情况与设备使用、招投标等挂钩，形成监管合力。同时，加强跨部门协同监管，整合环保、交通、农业、住建等部门监管资源，实现监管全覆盖。

三、油品质量：提升燃油标准与清净剂添加，减少燃烧污染

油品质量直接影响车辆与非道路移动机械的燃烧效率与污染物排放，劣质燃油会加剧发动机磨损，降低尾气净化装置效果，导致污染物排放大幅增加。油品质量提升作为移动源污染控制的源头基础性措施，核心在于通过燃油标准升级、清净剂添加、质量监管强化，从源头减少燃烧过程中的污染物生成，为尾气净化技术发挥实效提供保障。

（一）燃油标准提升

燃油标准提升通过降低燃油中的硫、烯烃、芳烃等有害物质含量，优化燃油

理化性质，提升燃烧效率，减少燃烧过程中颗粒物、氮氧化物、挥发性有机物等污染物的生成，是油品质量提升的核心路径。需结合环保需求与技术水平，逐步迭代升级燃油标准，缩小与国际先进标准的差距。

核心提升方向包括降低有害物质含量与优化燃油组分。硫含量是燃油污染控制的关键指标，通过深度脱硫技术应用，大幅降低汽油、柴油中的硫含量，减少燃烧过程中二氧化硫排放及对尾气净化装置的腐蚀与毒害；同时，降低燃油中的烯烃、芳烃含量，减少燃烧过程中颗粒物与挥发性有机物的生成。针对非道路移动机械专用燃油，制定专项标准，提升燃油质量适配性，确保与排放控制技术协同发挥效果。此外，推动替代燃料研发与应用，推广乙醇汽油、生物柴油等清洁替代燃料，丰富燃油供给体系，进一步减少污染排放。

（二）清净剂添加与质量监管

燃油清净剂添加作为油品质量提升的辅助手段，可有效清除发动机内部积碳，优化燃烧工况，提升燃烧效率，减少污染物排放，同时保护发动机部件，延长设备使用寿命。清净剂添加需遵循科学适配原则，确保与燃油组分、发动机类型相匹配，避免产生二次污染。

质量监管强化是保障油品质量的关键，需构建“生产－流通－使用”全链条监管体系，严厉打击生产、销售、使用劣质燃油行为。生产环节加强对炼油企业的监管，确保燃油生产符合标准要求，严格控制有害物质含量；流通环节强化加油站、油库等场所的油品质量抽检，建立抽检结果公示与溯源机制，杜绝劣质燃油流入市场；使用环节加强对车辆、非道路移动机械燃油使用情况的监管，严厉打击添加非标油行为。同时，完善油品质量标准体系与检测技术方法，提升监管精准度与效率，保障油品质量提升措施落地见效。

移动源污染控制是大气污染防治的关键环节，“车辆污染控制－非道路移动机械管控－油品质量提升”的全方位策略体系，实现了从设备、技术到源头供给的全维度管控，为移动源污染减排提供了核心支撑。从新能源汽车推广与燃油车技术升级削减道路车辆污染，到非道路移动机械排放控制与监管强化补齐治理短板，再到燃油标准提升与质量监管筑牢源头基础，移动源污染控制正朝着精准化、系统化、绿色化方向发展。

第四节 区域大气污染联防联控

大气污染具有显著的区域性、流动性特征，单一区域的独立治理难以从根本上解决跨区域污染传输问题，重污染天气往往呈现“区域性爆发、跨区域蔓延”的态势。区域大气污染联防联控作为破解该难题的核心策略，通过打破行政区域壁垒，整合跨区域治理资源，构建“统一规划、协同管控、联合应急”的治理体系，实现区域内污染协同减排与风险共防共治。随着大气污染治理向精细化、系统化推进，联防联控已成为改善区域大气环境质量、提升重污染天气应对能力的关键路径，尤其在污染传输通道密集区域发挥着不可替代的作用。

一、联防联控机制：建立跨区域环境监管与应急联动体系

联防联控机制是区域协同治污的核心保障，核心在于打破行政分割，通过建立跨区域、跨部门的协调联动机制，实现监管协同、应急同步、信息共享，确保区域治理形成合力，避免“各自为战、重复治理”的低效局面。机制构建需兼顾常态化管控与应急响应，形成全流程、多层次的联动格局。

（一）跨区域协调与监管联动

跨区域协调机制是联防联控的基础，需建立多层次的协调组织体系，明确各区域、各部门的职责分工，实现治理目标、管控措施的协同统一。通过成立区域联防联控领导小组，定期召开协调会议，统筹推进区域污染治理规划制定、重大政策出台、重点问题攻坚等工作，破解跨区域治理矛盾。

监管联动聚焦跨区域污染源的协同管控，建立统一的监管执法机制，开展联合执法、交叉检查行动，严厉打击跨区域偷排漏排、超标排放等违法行为。针对流动性强、跨区域传输的污染源，建立跨区域溯源追踪机制，明确污染责任划分，实现“源头管控、过程拦截、末端共治”。同时，建立区域环境监管信息共享平台，整合跨区域监测数据、执法记录、污染源信息等，实现数据实时互通、资源共享，为协同监管提供数据支撑。

（二）跨区域应急联动响应

跨区域应急联动是应对区域性重污染天气的关键，需建立统一的应急响应机制，实现预警信息同步、应急措施协同、资源调配联动，缩短应急响应时间，降低重污染天气影响范围与强度。核心在于构建“统一预警、分级响应、协同处置”

的应急体系。

建立区域统一的重污染天气预警标准与发布机制，实现预警信息跨区域同步推送，确保各区域应急响应步调一致。针对区域性重污染天气，启动联合应急响应，统一制定应急减排清单，明确各区域、各行业的应急减排措施与责任，避免部分区域管控缺位导致污染跨区域蔓延。同时，建立跨区域应急资源调配机制，整合区域内应急监测设备、治理物资、专业队伍等资源，实现应急资源高效共享，提升区域整体应急处置能力。应急响应结束后，开展跨区域应急评估，总结经验教训，优化应急联动机制。

二、协同治理：统一区域排放标准与污染防治技术路线

协同治理是区域联防联控的核心内容，通过统一区域环境标准、整合污染防治技术路线、同步推进重点治理任务，实现区域内污染治理的同质化、高效化，避免因标准不一、技术差异导致的污染转移与治理失衡。协同治理需兼顾区域发展差异，在统一核心要求的基础上，实现差异化推进。

（一）统一区域环境标准与管控要求

统一环境标准是避免污染转移、实现公平治理的前提，需结合区域大气环境质量目标，制定统一的区域污染物排放标准、行业管控要求、环保准入条件，缩小区域间标准差异，倒逼区域内企业提升污染治理水平。针对火电、钢铁、化工、建材等重点行业，制定统一的排放限值与治理技术规范，确保区域内同类企业公平竞争、同等管控。

统一区域内环境监测技术标准与评价体系，规范监测点位布设、数据采集、分析方法等，确保跨区域监测数据的可比性、准确性，为区域污染协同治理与成效评估提供统一依据。针对重污染天气应对，统一区域应急减排比例、管控行业范围、减排措施要求，实现应急管控的协同一致，提升区域整体减排效果。

（二）整合污染防治技术路线与资源

整合污染防治技术路线是提升区域治理效能的关键，通过推广先进适用的共性治理技术，搭建区域技术交流合作平台，实现技术资源共享，破解区域内技术壁垒与治理瓶颈。针对区域内突出污染问题，联合开展关键技术攻关，研发适配区域污染特征的协同治理技术，提升区域整体治理技术水平。

建立区域污染治理技术推广机制，优先推广高效协同治理技术、资源化利用

技术、低碳环保技术，引导企业统一采用先进技术路线，提升污染治理效率与稳定性。同时，整合区域内环保企业、科研机构、专业人才等资源，建立技术服务平台，为区域内企业提供技术咨询、改造指导、运维服务等一体化支撑，尤其助力中小企业解决技术难题。此外，推动区域内环保产业协同发展，形成技术研发、设备制造、运维服务一体化产业链，提升区域污染治理产业竞争力。

（三）同步推进重点治理任务

协同治理需聚焦区域内共性污染问题与重点治理任务，同步推进能源结构优化、产业转型升级、移动源污染管控、扬尘治理等工作，实现区域污染总量协同减排。针对区域内高耗能、高污染行业，同步推进产业结构调整与清洁生产改造，淘汰落后产能，优化产业布局，减少区域污染排放总量。

同步推进区域能源结构优化，统一规划可再生能源布局与清洁能源替代方案，协同推进化石能源洁净化利用与余热余压回收，构建区域绿色低碳能源体系。针对移动源、扬尘等跨区域污染源，同步实施管控措施，统一推进新能源替代、尾气净化技术升级、扬尘综合治理等，形成区域管控合力，从源头削减跨区域污染传输风险。

三、重点区域：京津冀、长三角等大气污染传输通道区域协同治理

大气污染传输通道区域因地形地貌、产业布局、交通流量等因素，成为区域性污染高发、跨区域传输显著的重点区域，京津冀、长三角、汾渭平原等区域是我国大气污染联防联控的核心管控区域。重点区域协同治理需结合区域污染特征与传输规律，实施针对性管控措施，打造区域协同治污示范标杆。

（一）重点区域污染特征与传输规律

京津冀及周边区域地形复杂，冬季逆温、静稳天气多发，不利于污染物扩散，且区域内工业密集、能源结构以煤炭为主、交通流量大，颗粒物、氮氧化物、挥发性有机物等污染物排放强度高，跨区域传输特征显著，重污染天气频发且影响范围广。长三角区域产业密集、人口集中、交通发达，挥发性有机物与氮氧化物协同污染突出，易形成臭氧与二次颗粒物复合污染，污染传输呈现“区域内循环、跨区域蔓延”的特征。

汾渭平原等区域受地形限制，污染物扩散条件差，且能源消耗强度大，工业与燃煤污染叠加，冬季重污染天气问题突出。掌握重点区域污染传输规律，需依

托跨区域监测网络与大数据分析,明确污染传输路径、关键节点与贡献来源,为针对性协同管控措施制定提供依据。

（二）重点区域协同治理关键措施

重点区域协同治理需聚焦核心污染问题,实施“精准溯源、靶向管控、协同减排”的治理策略,强化区域联动与源头管控。在产业管控方面,联合开展重点行业专项整治,推进钢铁、焦化、化工等行业超低排放改造,同步淘汰落后产能,优化区域产业布局,减少污染排放总量。

在能源管控方面,加速推进煤炭消费减量替代,统一推广清洁能源,协同推进散煤治理与燃煤锅炉淘汰,优化区域能源供给结构。在移动源管控方面,统一实施严格的机动车排放标准,同步推进新能源汽车推广、燃油质量升级、非道路移动机械管控,减少移动源污染排放。在重污染天气应对方面,建立区域统一的预警响应机制,实施更严格的应急减排措施,强化区域协同管控,缩短重污染天气持续时间。

（三）重点区域治理示范与经验推广

重点区域作为联防联控的核心载体,需率先探索形成可复制、可推广的协同治理模式,为全国其他区域提供经验借鉴。通过建立区域协同治理示范园区、示范城市,探索跨区域规划协同、监管协同、技术协同、应急协同的有效路径,破解区域治理难题。

总结重点区域在机制构建、技术应用、资源整合等方面的成功经验,梳理形成标准化的协同治理流程与方法,向全国其他区域推广。同时,加强重点区域与其他区域的交流合作,建立区域间帮扶机制,助力欠发达区域提升协同治理能力,推动全国大气污染联防联控水平整体提升。

区域大气污染联防联控是破解跨区域污染传输、改善区域大气环境质量的必由之路,通过构建跨区域联动机制、实施协同治理策略、强化重点区域管控,实现了从“各自为战”向“协同共治”的转型。从跨区域监管与应急联动机制的建立,到区域标准统一与技术路线整合,再到重点传输通道区域的靶向治理,联防联控体系不断完善,为区域大气污染协同减排提供了核心支撑。随着治理机制的持续优化、技术水平的不断提升,区域协同治污能力将进一步增强,逐步实现区域大气环境质量协同改善,为全国大气污染防治工作提供坚实保障,助力蓝天保卫战取得更大成效。

第五节 大气污染防治政策与法规

大气污染防治政策与法规是规范污染行为、保障治理成效、推动绿色转型的核心制度支撑，构建了“法律约束、政策引导、监管保障”的全方位治理体系。作为生态文明制度体系的重要组成部分，大气污染防治政策与法规始终紧跟污染治理需求迭代升级，从粗放式管控向精细化治理转变，从单一约束向“约束+激励”并重转型，为大气污染防治工作提供坚实的制度遵循与执行依据。当前，我国已形成以专门法律为核心、配套法规为支撑、政策工具为抓手、保障机制为依托的完整制度框架，有效推动了大气环境质量持续改善，为深入打好蓝天保卫战、实现“双碳”目标提供了重要保障。

一、法规体系：以《中华人民共和国大气污染防治法》为核心的法律法规框架

我国大气污染防治法规体系以《中华人民共和国大气污染防治法》为核心，层层递进构建了“法律-行政法规-地方性法规-部门规章与标准”的四级制度框架，同时衔接宪法、环境保护法等上位法及相关专项法规，形成覆盖全领域、全流程、多层次的法治保障体系。

（一）核心法律引领

《中华人民共和国大气污染防治法》作为大气污染防治领域的基本法律，确立了污染防治的核心原则、制度框架与责任体系，是整个法规体系的基石。该法律历经多次修订完善，逐步实现了从“末端治理”向“全流程管控”、从“单一污染物治理”向“多污染物协同控制”的转变，内容涵盖大气污染防治的监督管理、大气污染防治措施、重点区域大气污染联合防治、重污染天气应对及法律责任等关键环节。

其核心作用体现在三个方面：一是确立核心治理原则，明确预防为主、防治结合、综合治理的方针，强调源头管控与协同治理，为政策制定与执法实践提供根本遵循；二是界定各主体责任，明确各级政府、企业、公民的权利与义务，强化企业污染治理主体责任与政府监管责任；三是设定刚性制度要求，建立排污许可、总量控制、监测预警、应急响应等核心制度，同时细化法律责任，加大对违法行为的惩戒力度，提升法律的威慑力。作为上位法，其条款为配套法规与政策

的制定提供依据，确保整个体系的统一性与权威性。

（二）配套法规支撑

行政法规与地方性法规作为核心法律的延伸与补充，结合行业特征与区域实际，细化污染防治要求，增强法律的可操作性。行政法规层面，围绕重点领域与关键环节制定专项法规，聚焦燃煤污染、移动源污染、挥发性有机物污染等突出问题，明确具体治理措施与监管标准，形成对核心法律的精准补充。同时，针对重污染天气应对、区域联防联控等系统性工作，出台专门行政法规，规范跨区域、跨部门协同治理的流程与责任划分。

地方性法规层面，各地区结合地形地貌、产业结构、污染特征等实际情况，制定符合本地需求的实施细则与专项法规，实现差异化治理。例如，大气污染传输通道区域可制定更严格的地方性管控法规，强化重点行业、重点时段污染管控；生态敏感区域可针对性出台法规，加强大气污染对生态系统影响的防控。地方性法规既严格遵循国家核心法律要求，又充分适配区域治理需求，形成“全国统一要求 + 区域精准施策”的法规格局。

（三）部门规章与标准细化

部门规章与环境标准作为法规体系的执行层面，进一步细化治理要求与技术规范，为执法监管与企业治理提供具体依据。部门规章由生态环境等相关主管部门制定，聚焦监管流程、技术方法、责任落实等具体环节，规范排污许可管理、环境监测、执法检查等工作的操作流程，明确监管权限与工作标准，确保执法工作规范化、标准化推进。

环境标准是法规体系的核心技术支撑，涵盖污染物排放标准、监测技术标准、治理技术规范等类别。污染物排放标准明确各类污染源的排放限值，根据环保需求不断收紧，倒逼企业提升治理水平；监测技术标准规范监测点位布设、数据采集、分析方法等，确保监测数据的准确性与可比性；治理技术规范推广先进适用的污染治理技术，为企业提供技术指引。同时，标准体系动态更新，结合污染治理成效与技术发展水平，适时调整标准要求，确保与污染防治目标相适配，为法规的落地实施提供技术保障。

（四）跨领域法规衔接

大气污染防治法规体系并非孤立存在，而是与生态文明领域其他法规有机衔接，形成协同发力的制度体系。向上衔接《中华人民共和国宪法》《中华人民共

《中华人民共和国环境保护法》等上位法，遵循生态文明建设的总体要求与核心原则，确保制度方向一致；横向衔接《中华人民共和国水污染防治法》《中华人民共和国土壤污染防治法》等专项法规，实现多介质污染协同治理；同时衔接能源、产业、交通等领域相关法规，将大气污染防治要求融入产业升级、能源结构优化、交通管控等工作，形成“多领域协同、全链条管控”的制度合力。此外，衔接气候变化相关法规与政策，将减污降碳协同要求纳入大气污染防治法规体系，推动大气污染治理与碳达峰碳中和目标协同推进。

二、政策工具：排污许可、环境税、环保督察等监管与激励政策

大气污染防治政策工具以“监管约束 + 激励引导”为核心，构建了多元化政策组合体系，涵盖排污许可、环境税、环保督察等核心监管政策，以及绿色金融、财政补贴、信用评价等激励政策，通过刚柔并济的方式引导企业主动减排、规范排污，推动污染治理从“被动合规”向“主动转型”转变。各类政策工具协同发力，既强化对违法行为的约束惩戒，又为绿色转型提供支撑保障，提升政策实施的整体效能。

（一）核心监管政策工具

核心监管政策工具以刚性约束为核心，通过明确管控要求、强化执法监督，规范企业排污行为，确保污染防治法规与标准落地见效。排污许可制度作为固定污染源监管的核心制度，实行“一证式”管理，明确企业排污种类、浓度、总量、治理措施等要求，将企业排污行为纳入全流程管控。企业需依法申请排污许可证，严格按照许可证要求排污，环保部门基于许可证开展监管执法，实现“持证排污、按证监管”，从源头规范排污行为。该制度整合了总量控制、排污申报、环保审批等多项制度，简化监管流程，提升监管精准度。

环境税政策通过税收杠杆调节企业排污行为，将排污成本内部化，倒逼企业减少污染排放。环境税根据污染物排放量与危害程度设定税额，排放量越大、危害越高，税额越高，同时设置减免优惠政策，对达标排放且积极减排的企业给予税收减免，形成“多排多缴、少排少缴、不排不缴”的激励约束机制。该政策既增加了企业违法排污的成本，又引导企业主动投入污染治理、优化生产工艺，实现环境效益与经济效益的协同。同时，环境税收入专项用于生态环境保护，为污染治理提供资金支撑。

环保督察政策作为强化政府监管责任的核心手段,通过自上而下的监督检查,推动地方政府与相关部门落实大气污染防治责任,解决突出污染问题。环保督察实行中央与省级两级督察体制,聚焦重点区域、重点领域、重点行业,开展例行督察、专项督察与“回头看”,重点检查法规政策落实情况、突出污染问题整改情况、责任落实情况等。对督察发现的问题,明确整改要求与时限,强化整改问责,对不作为、慢作为、乱作为的单位与个人严肃追责问责,确保各项治理任务落地见效。

（二）辅助激励政策工具

辅助激励政策工具以正向引导为核心,通过政策扶持、资金支持、信用激励等方式,鼓励企业主动开展污染治理与绿色转型,弥补刚性监管的不足,形成“约束+激励”的双重机制。绿色金融政策为企业绿色转型提供资金保障,包括绿色信贷、绿色债券、绿色基金等,通过差异化信贷政策、利率优惠等方式,支持企业开展污染治理、清洁能源替代、清洁生产改造等项目,同时限制对高耗能、高污染项目的资金支持,引导资金流向绿色产业。

财政补贴政策针对重点领域与关键环节,给予资金支持,降低企业治理成本。对新能源汽车推广、超低排放改造、清洁能源替代等符合政策导向的项目,给予专项财政补贴,鼓励企业加快技术升级与设备改造;对中小企业污染治理给予倾斜支持,帮助其解决资金短缺、技术薄弱等难题。同时,扩大环境保护、节能环保等企业所得税优惠目录范围,进一步降低绿色企业的经营成本。

环保信用评价政策通过建立企业环保信用档案,根据企业排污合规情况、治理成效、违法行为等,划分信用等级,实施差异化监管与激励。对信用等级高的企业,给予减少执法检查频次、优先享受政策扶持等激励;对信用等级低的企业,加大监管力度,限制其市场准入、招投标等活动,将环保信用与企业经营发展挂钩,引导企业树立诚信排污、主动治污的意识。

（三）政策工具协同应用

单一政策工具的治理效能有限,需通过多元政策工具协同应用,形成治理合力,提升政策实施效果。各类政策工具围绕同一治理目标,相互补充、相互支撑,构建闭环治理体系。例如,排污许可制度明确企业排污边界,环境税政策倒逼企业在边界内减少排放,环保督察确保两项政策落地执行,绿色金融与财政补贴为企业减排提供支撑,环保信用评价则强化对企业行为的长效约束。

政策协同需注重横向与纵向联动，横向统筹生态环境、税务、金融、产业等部门政策，避免政策冲突与重复管控，形成部门协同合力；纵向衔接国家、省、市、县四级政策，确保政策要求层层传导、落地见效。同时，结合污染治理阶段特征与区域实际，动态调整政策组合，针对重污染天气等紧急情况，强化监管政策的刚性约束；针对绿色转型初期，加大激励政策的扶持力度，实现政策效能最大化。

三、政策保障：强化执法监管与政策执行效果评估

政策法规的生命力在于执行，完善的政策保障体系是确保大气污染防治政策法规落地见效的关键。政策保障聚焦执法监管强化与执行效果评估两大核心，通过提升执法能力、规范执法流程、完善评估机制、强化结果运用，解决“执行难、监管弱、评估缺”等问题，构建“执法严、评估准、整改实”的长效保障机制，确保政策法规从“纸上”落到“地上”，切实转化为大气环境质量改善的实际成效。

（一）强化执法监管能力建设

执法监管能力是政策执行的基础，需从队伍建设、技术支撑、执法规范化三个方面发力，提升执法精准度与效能。队伍建设方面，加强环保执法人员专业培训，提升其对法规政策、监测技术、治理工艺的掌握能力，培养复合型执法人才；优化执法队伍结构，充实基层执法力量，解决基层执法人员不足、能力薄弱等问题；建立执法人员考核评价机制，将执法成效与绩效考核挂钩，提升执法人员的责任心与执行力。

技术支撑方面，依托大数据、物联网、遥感等先进技术，构建智能化执法监管体系。推广便携式监测设备、无人机、在线监控系统等技术装备，实现对污染源的实时监测、精准溯源与非现场执法，提升执法效率，减少人为干扰；建立执法监管信息平台，整合监测数据、执法记录、企业信用信息等，实现执法数据实时共享、智能分析与预警，为执法决策提供数据支撑。同时，完善执法技术规范，统一执法标准与流程，确保执法工作科学、公正、规范。

执法规范化方面，严格落实执法程序，规范立案、调查、处罚、执行等各环节流程，确保执法行为合法合规；推行执法公示、执法全过程记录、重大执法决定法制审核“三项制度”，增强执法透明度与公信力；强化执法监督，建立执法纠错机制，对执法不公、执法不严、徇私舞弊等行为严肃追责问责，确保执法权依法规范行使。同时，加大对违法行为的惩戒力度，提高违法成本，形成强大执

法威慑力，倒逼企业主动合规。

（二）完善政策执行效果评估机制

政策执行效果评估是优化政策、提升治理效能的重要手段，通过科学评估政策实施成效、存在问题及改进方向，形成“制定－实施－评估－优化”的闭环管理。评估机制需明确评估主体、评估内容、评估方法，确保评估工作客观、公正、科学。评估主体实行多元化，由政府部门、科研机构、第三方机构共同参与，政府部门负责组织协调与数据提供，科研机构与第三方机构负责专业评估，避免单一主体评估的片面性。

评估内容聚焦政策目标达成度、实施过程规范性、社会经济环境效益、存在问题及原因等方面。政策目标达成度评估重点核查大气环境质量改善情况、污染物减排任务完成情况等；实施过程规范性评估检查政策执行流程、责任落实、执法监管等是否符合要求；效益评估综合分析政策实施带来的环境效益、经济效益与社会效益，评估政策的合理性与可行性；问题分析聚焦政策执行中的堵点、难点，剖析政策设计与实施过程中存在的不足。

评估方法采用定量与定性相结合的方式，定量评估通过监测数据、统计数据等量化指标，客观反映政策成效；定性评估通过调研访谈、专家论证等方式，分析政策实施中的主观因素与复杂问题。同时，建立动态评估机制，结合污染治理阶段目标与实际情况，定期开展评估，对阶段性政策实行专项评估，确保评估结果及时反映政策执行情况。

（三）强化评估结果运用与政策优化

评估结果的有效运用是评估工作的核心价值所在，需建立评估结果与政策优化、责任追究的联动机制，将评估结果转化为政策完善与工作改进的具体措施。对评估中发现的政策执行不到位、责任落实不力等问题，明确整改责任主体与时限，督促相关单位限期整改，把整改情况纳入绩效考核与问责体系，确保问题整改到位。

对政策设计不合理、针对性不强、可操作性不足等问题，结合评估结果与实际需求，及时修订完善政策法规，优化政策条款与实施路径，增强政策的科学性与可操作性。例如，针对评估中发现的政策覆盖不全、激励力度不足等问题，扩大政策覆盖范围、调整激励标准；针对区域差异导致的政策适配性不足问题，细化区域差异化政策要求。同时，建立评估结果公开机制，主动向社会公开评估结

果与整改情况，接受社会监督，提升政策执行的透明度与公信力。

（四）构建社会协同监督体系

社会协同监督是政策保障的重要补充，通过引导公众、媒体、行业协会等参与监督，形成“政府监管+社会监督”的多元共治格局，提升政策执行效果。完善公众参与机制，畅通举报投诉渠道，建立举报奖励制度，鼓励公众举报违法排污行为；加强环境信息公开，及时向社会公开企业排污信息、政策执行情况、环境质量状况等，保障公众的知情权与监督权。

发挥媒体监督作用，鼓励媒体曝光违法排污行为与政策执行不力问题，宣传先进典型与成功经验，引导企业树立环保意识，推动形成全社会共同关注、支持大气污染防治的良好氛围。支持行业协会发挥自律作用，制定行业环保规范，引导企业加强自我约束、主动开展污染治理，协助政府部门推动政策落实。通过社会协同监督，弥补政府监管的不足，形成监管合力，确保政策法规全面落地见效。

大气污染防治政策与法规体系作为污染治理的制度基石，历经多年发展已形成全方位、多层次、协同化的制度框架，从法规引领、政策驱动到保障执行，构建了完整的治理闭环。以《中华人民共和国大气污染防治法》为核心的法规体系提供刚性约束，排污许可、环境税、环保督察等多元政策工具形成刚柔并济的治理合力，强化执法监管与效果评估的保障机制确保政策落地见效，三者协同发力推动大气污染防治工作从粗放式治理向精细化、科学化治理转型。

第九章 水污染防治策略

第一节 水污染源解析与评估

水污染源解析与评估是精准开展水污染防治工作的前提与核心，通过科学划分污染源类型、运用专业溯源技术定位污染源头、量化污染负荷并确定管控优先级，构建“分类识别-精准溯源-科学评估”的全流程技术体系，为水污染防治策略制定提供数据支撑与靶向指引。水体污染具有隐蔽性、流动性、累积性特征，单一污染源排放易扩散形成跨区域、复合型污染，传统粗放式治理因缺乏系统解析与评估，常陷入“盲目治污、低效施策”困境。

一、污染源分类：点源污染与面源污染

水污染源分类是解析与评估工作的基础，依据排放形式、来源特征及分布范围，可划分为点源污染与面源污染两大类。两类污染源在排放特征、污染范围、管控难度上差异显著，明确其核心属性，可为溯源解析、负荷核算及管控策略制定提供针对性指引，实现差异化精准管控。

（一）点源污染

点源污染指通过固定排放口集中排放污染物的污染源，具有排放位置明确、污染负荷集中、可控性较强的特征，是水体污染的主要来源之一，在工业密集区、城镇区域影响尤为突出，核心来源为工业废水与生活污水。

工业废水源于各类生产过程，污染物组成复杂、浓度高、毒性强，成分与产业类型、生产工艺直接相关，部分废水含重金属、持久性有机污染物等难降解物质，对水体生态系统易造成不可逆损害，处理难度与成本较高。工业废水排放需遵循排污许可要求，经处理达标后通过固定排放口排放，管控难点在于部分企业为压缩成本，存在偷排漏排、超标排放、治理设施停运等违法违规行为，需强化全流程监管。

生活污水来自城镇居民生活、商业活动及公共服务设施，核心污染物为化学

需氧量、氨氮、悬浮物、病原体等，具有排放量大、组分相对稳定的特征。随着城镇化推进，生活污水排放量持续增长，若未经处理直排，会导致水体富营养化、溶解氧下降，引发水华、赤潮等生态问题。目前城镇生活污水以污水处理厂集中处理为主，达标后排放或再生利用，但偏远乡镇因设施不完善，仍存在直排、散排现象，成为区域性污染薄弱环节。

（二）面源污染

面源污染指通过分散路径排放、无固定排放口的污染源，具有来源广泛、排放分散、时空波动大的特征，其污染负荷占比逐步提升，已成为流域水污染治理的重点与难点。核心来源为农业径流与城市径流，辅以农村生活污水散排、水土流失等，污染范围覆盖农田、城市、农村等多区域。

农业径流是面源污染的主要来源，通过农田灌溉、降雨冲刷，将氮磷营养盐、农药残留、土壤颗粒等带入水体。化肥、农药过量施用是核心诱因，氮磷营养盐易引发水体富营养化，农药残留则危害水体生物与人体健康。其管控难点在于污染源分散、涉及范围广，与农业生产深度绑定，受降雨、地形、种植结构等因素影响大，时空波动性强，需结合农业生产规律开展源头减量与过程拦截。

城市径流源于城市区域降雨冲刷，涵盖屋面、路面、绿地径流等，会携带地表悬浮物、重金属、石油类、病原体等污染物入体。地表污染物积累与交通流量、垃圾清运、地表清扫等管理水平密切相关，暴雨期间易形成短时高浓度污染峰值，对水体水质造成冲击，管控需结合城市排水系统建设、海绵城市改造等工作推进。

二、解析方法：同位素示踪、水质指纹识别等污染源溯源技术

水污染源解析方法以精准定位源头、量化污染源贡献度为核心，融合化学、环境地球化学、分子生物学等多学科技术，构建“定性溯源+定量解析”体系。同位素示踪、水质指纹识别为当前主流技术，辅以多元统计分析、模型模拟等方法，协同应用提升解析结果的准确性与可靠性，为污染管控提供科学支撑。

（一）核心解析技术

同位素示踪技术基于不同污染源污染物的同位素组成特异性差异，通过检测水体目标污染物同位素比值，结合污染源同位素特征库，实现源头精准溯源与贡献度量化。该技术特异性强、准确性高，可穿透复合污染干扰，有效区分不同类型污染源及同源不同来源的贡献，适用于复杂水体污染场景。其核心是利用稳定

或放射性同位素组成差异作为溯源“指纹”，污染物同位素比值在水体迁移转化中基本稳定，通过与特征库比对锁定源头，可应用于氮磷、重金属、有机物等污染物溯源，但受检测技术与成本限制，需结合场景合理选用。

水质指纹识别技术通过分析污染物化学组成、含量及比例特征，构建“水质指纹图谱”，结合污染源指纹库比对实现定性溯源。该技术涵盖有机、无机、微生物指纹三个维度，可全面捕捉污染物特征，适配多元污染溯源需求。有机指纹聚焦挥发性、半挥发性有机物组分及比例，无机指纹基于重金属、常量与微量元素含量比值，微生物指纹则依托特征微生物群落结构差异，适用性广、解析效率高。其短板在于需构建完善指纹库，且受污染物降解、吸附等迁移转化过程影响，需进行校正优化。

（二）辅助解析方法

多元统计分析作为补充手段，通过挖掘水质监测数据中污染物关联关系、空间分布规律，为溯源提供方向指引。常用聚类分析、主成分分析、判别分析等方法，可快速筛查污染热点区域、核心污染物类型及不同时空的污染来源差异，操作简便、成本较低，为核心技术应用奠定基础。

模型模拟方法通过构建水污染迁移转化模型，融合水质、水文、污染源排放数据，模拟污染物迁移路径、扩散范围及浓度变化，反演源头与贡献度。常用流域尺度、水质响应等模型，可实现溯源量化、可视化，还能预测不同场景水质变化趋势，为管控方案制定提供支撑。其解析效果依赖数据质量与参数校准，需结合实地监测数据持续优化模型精度。

（三）技术应用要点

污染源解析需结合污染场景、数据条件及技术特性合理选型，避免单一技术导致偏差。同位素示踪与水质指纹识别需依托完善的污染源特征库，定期更新监测数据；多元统计分析与模型模拟需保障监测数据充足且具代表性，覆盖全污染区域与核心指标。实际应用中多采用“核心技术+辅助方法”联合模式，通过协同验证提升结果可靠性，形成“初步筛查-精准溯源-定量解析”完整流程。

三、污染评估：污染负荷核算与重点污染源优先级确定

水污染评估是在解析基础上，通过量化污染负荷、评估污染影响、确定管控优先级，为防治策略制定、治理资源配置提供依据的核心环节。评估聚焦“负荷

量化－影响评估－优先级排序”，兼顾污染程度、生态影响、治理难度等因素，实现评估结果与治污实践精准对接，推动治理从“全面覆盖”向“重点突破”转型。

（一）污染负荷核算

污染负荷核算是评估基础，核心是量化各类污染源、污染物的排放总量与入河（湖、海）量，明确区域污染整体状况、污染物构成及主要贡献来源，遵循“全覆盖、精准化、标准化”原则，兼顾点源与面源、不同时空排放差异。

点源负荷核算以排污许可、在线监测、执法监测数据为核心，结合企业台账、污水处理厂运行记录，量化排放量与污染物浓度。重点排污单位采用实时监测数据，小型单位结合实测数据与产排污系数核算，同时考虑治理设施处理效率，精准核算污染物削减量与实际入河量，避免负荷高估或低估。

面源负荷核算难度更高，需融合监测数据、产排污系数、模型模拟等方法。农业面源基于农田面积、种植结构、农资施用量、降雨数据，量化污染物流失量；城市径流面源结合建成区面积、不透水面比例、降雨强度等，核算不同降雨场景负荷，分季节、分区域开展以适配时空差异。同时需分析各类污染物负荷占比，识别核心污染物，为流域协同治理提供依据。

（二）污染影响评估

污染影响评估需兼顾短期与长期、直接与间接影响，构建多维度体系，量化危害程度为优先级排序提供支撑。生态环境影响评估聚焦水体生态系统破坏，通过监测理化指标、分析水生生物多样性与种群结构，评估富营养化程度、生态完整性及恢复能力，重点关注重金属、持久性有机物的生物累积效应与生态毒性。

人体健康影响评估针对饮用水源地、养殖水域等与人类活动密切相关的水体，分析污染物通过饮水、食用水生生物、皮肤接触等途径的健康威胁，量化风险等级，为水源地保护、水产养殖管控提供依据。经济社会影响评估则核算污染造成的产业损失、治理与修复成本，分析对居民生活质量、城市形象的影响，为平衡发展与环保提供支撑。

（三）重点污染源优先级确定

优先级确定核心是综合污染负荷贡献、影响程度、治理难度、效益等因素排序，明确重点管控对象与顺序，优化资源配置，实现“先重后轻、先易后难”精准治理。需构建科学评价体系，核心指标包括污染负荷贡献度、污染影响等级、治理技术成熟度、成本及时效，其中负荷贡献度权重最高。

排序需结合区域治理目标与实际差异化推进：污染严重、生态敏感区域优先管控高负荷、高风险污染源；资源有限区域优先选择“低成本、高效益”污染源治理；流域治理需兼顾上下游协同，优先管控对下游影响大的上游污染源。同时优先级需动态更新，结合负荷变化、治理成效、政策调整优化，确保策略针对性与时效性。基于排序结果，对高优先级污染源制定专项方案，中优先级设定阶段性目标，低优先级实施常态化监管，提升治理整体效能。

水污染源解析与评估作为水污染防治的“精准导航仪”，通过科学分类、精准溯源、量化评估，构建完整技术体系，推动治理从“经验驱动”向“数据驱动”“粗放管控”向“精准治理”转型。随着流域性、复合型污染凸显，解析与评估技术需持续迭代，强化多技术协同、多维度评估，提升精度与科学性。

第二节 工业废水治理技术

工业废水治理是水污染防治体系的核心组成部分，也是推进工业绿色转型、守护水生态安全的关键举措。工业废水具有污染物种类多、浓度高、毒性强、成分复杂且波动大等特征，不同行业废水的水质差异显著，若未经有效治理直接排放，会严重污染水体、土壤环境，危害人体健康，制约工业可持续发展。当前，工业废水治理已形成“预处理－深度处理－资源化回用”的全流程技术体系，通过分级处理实现污染物高效去除，同步推动废水资源化利用，达成“减污降碳、资源循环”的双重目标。

一、预处理技术：格栅、沉淀、调节池等去除悬浮物与均衡水质

预处理技术是工业废水治理的前置环节，核心目标是去除废水中的悬浮颗粒物、漂浮物，调节水质水量，降低后续深度处理单元的负荷，保障后续处理工艺稳定运行。预处理技术以物理处理为主，辅以简单化学调理，具有处理成本低、操作简便、见效快等优势，是工业废水治理不可或缺的基础环节，适配各类行业废水治理场景。

（一）核心预处理单元

格栅与筛网是预处理的第一道防线，主要用于去除废水中的漂浮物、悬浮杂物及较大粒径固体颗粒，防止后续处理设备堵塞、磨损，保障处理系统正常运行。

格栅按栅条间距可分为粗格栅、中格栅与细格栅，根据废水水质特征选型，粗格栅去除大粒径杂物，细格栅进一步截留细小悬浮颗粒，筛网则适用于截留更细微的纤维、碎屑等杂质。运行过程中需定期清理栅渣，避免堆积影响处理效果，清理的栅渣需单独处置，防止二次污染。

沉淀技术通过重力作用分离废水中密度大于水的悬浮颗粒物，降低废水浊度，减少后续处理单元的污染物负荷。根据废水停留时间与流态，可分为平流式沉淀池、竖流式沉淀池与辐流式沉淀池，适配不同处理规模与场地条件。平流式沉淀池处理效果稳定、抗冲击负荷能力强，适用于大中型工业废水处理工程；竖流式沉淀池占地面积小，适用于小型处理设施。部分含细小悬浮颗粒的废水，需添加絮凝剂辅助沉淀，提升颗粒凝聚效果，强化沉淀分离效率。

调节池用于均衡工业废水的水质与水量，缓解废水水质波动对后续处理工艺的冲击。工业生产过程中，废水排放量与污染物浓度易随生产工况变化而波动，调节池通过储存废水、均质均量，使出水水质水量保持稳定，为后续深度处理工艺提供稳定的进水条件。调节池内可设置搅拌装置，促进水质混合均匀，部分场景还可通过投加酸碱药剂调节废水 pH 值，使其适配后续处理工艺的水质要求，同时可预处理部分易降解有机物，提升整体治理效果。

（二）辅助预处理技术

对于含油浓度较高的工业废水，需增设隔油池进行除油预处理，通过重力分离或气浮法去除废水中的浮油与乳化油，避免油脂附着在后续处理设备表面，影响处理效率。常用隔油池包括平流式隔油池、斜板隔油池，气浮法则通过产生微小气泡吸附油滴，提升除油效果，适用于乳化油含量较高的废水。

针对含重金属、难降解有机物的工业废水，预处理阶段可采用化学中和、氧化还原等简单化学技术，调节废水 pH 值，转化部分污染物形态，降低其毒性与稳定性，为后续深度处理创造条件。例如，通过中和反应去除废水酸性或碱性物质，通过氧化还原反应将重金属离子转化为沉淀形态，便于后续分离去除。辅助预处理技术需结合废水水质特征针对性选用，确保与后续处理工艺协同适配。

二、深度处理技术：生物处理、高级氧化技术

深度处理技术是工业废水污染物高效去除的核心环节，旨在去除预处理后废水中的有机物、氮磷营养盐、重金属、难降解污染物等，使出水达到排放标准或

回用要求。深度处理技术涵盖生物处理、高级氧化等多元化技术类型，可根据废水水质、处理目标及成本预算组合应用，实现精准治污。

（一）生物处理技术

生物处理技术利用微生物的代谢作用降解废水中的有机污染物，将其转化为无害的二氧化碳、水及微生物菌体，具有处理成本低、环境友好、无二次污染等优势，是工业废水有机污染物去除的主流技术。核心技术包括活性污泥法与膜生物反应器，同时可根据废水特性选用其他衍生技术。

活性污泥法通过曝气装置向反应池内充氧，培养大量活性污泥微生物，微生物吸附、降解废水中的有机物，随后通过沉淀分离污泥与处理后出水，实现污染物去除。该技术处理效果稳定、适配性强，可通过优化曝气方式、反应参数，适配不同浓度有机废水治理需求，广泛应用于化工、纺织、食品等行业废水处理。运行过程中需控制溶解氧浓度、污泥浓度、水力停留时间等参数，防止污泥膨胀、曝气不足等问题影响处理效果。

膜生物反应器（MBR）是生物处理与膜分离技术的结合体，在生物反应池后增设膜组件，替代传统沉淀池实现固液分离，具有处理效率高、出水水质好、占地面积小等优势。膜组件可高效截留微生物与悬浮颗粒，使出水浊度极低，同时延长微生物停留时间，提升难降解有机物降解效率，处理后出水可直接满足回用要求。该技术适用于水质要求高、场地受限的工业废水处理场景，但运行过程中需定期清洗膜组件，防止膜污染，维持处理效率。

（二）高级氧化技术

高级氧化技术通过产生具有强氧化性的羟基自由基等活性物质，快速降解废水中的难降解有机物、重金属及有毒有害物质，具有氧化能力强、处理效率高、反应速度快等特点，适用于预处理后仍含有难降解污染物的工业废水深度处理，是生物处理技术的有效补充。

常用高级氧化技术包括芬顿氧化法、臭氧氧化法、紫外光催化氧化法等。芬顿氧化法通过亚铁离子与过氧化氢反应产生羟基自由基，氧化降解有机物，操作简便、成本较低，适用于处理含酚、苯系物等难降解有机物的废水，但需控制反应 pH 值与药剂投加量，避免产生二次污染。臭氧氧化法利用臭氧的强氧化性破坏有机物分子结构，实现污染物降解与脱色、除臭，处理效果稳定，无二次污泥产生，适用于水质复杂的工业废水深度处理，但臭氧制备成本较高，需做好尾气

处理。

紫外光催化氧化法结合紫外光与催化剂产生活性自由基,强化氧化降解效果,可处理低浓度难降解有机物废水,且运行条件温和,适配范围广。实际应用中,常采用多种高级氧化技术组合或与生物处理技术联用,形成“高级氧化预处理+生物处理”的组合工艺,提升难降解废水治理效果,降低处理成本。

三、回用技术：工业废水资源化利用技术

工业废水资源化回用是工业绿色发展的重要方向,通过针对性回用技术将深度处理后的废水转化为可用资源,替代新鲜水资源用于工业生产,既减少工业废水排放量,又缓解工业用水短缺压力,实现“治污”与“节水”协同,提升工业水资源循环利用率。回用技术需遵循“分质回用、梯级利用”原则,根据出水水质适配不同回用场景,确保回用安全性与稳定性。

(一) 中水回用技术

中水回用指将工业废水经深度处理后,达到相应水质标准,用于工业生产辅助用水或其他非饮用水场景,是工业废水资源化的基础方向。中水回用需结合原废水水质与回用需求,优化深度处理工艺,确保出水水质满足适配场景要求,同时构建独立的回用管网,避免与饮用水混流。

工业领域中水回用场景广泛,可用于车间地面冲洗、设备冷却补充水、绿化用水、厕所冲洗等辅助用水场景,对水质要求相对较低,处理成本可控。对于水质要求较高的回用场景,需在常规深度处理基础上增设精密过滤、消毒等工艺,进一步提升出水水质。中水回用技术的核心是保障水质稳定,需建立全流程水质监测机制,定期监测回用水质,防止污染物累积对生产设备或环境造成影响,同时优化回用系统运行参数,降低回用成本。

(二) 循环冷却水回用技术

循环冷却水回用是工业废水资源化的核心场景之一,工业生产中冷却用水占比极高,对水质要求以控制硬度、浊度、腐蚀性物质及微生物含量为主,经深度处理后的工业废水可完全适配循环冷却水需求,替代新鲜水资源,大幅降低工业新鲜水消耗量。

循环冷却水回用需针对性优化处理工艺,通过软化处理降低废水硬度,防止冷却系统结垢;通过过滤、消毒去除悬浮颗粒与微生物,防止设备腐蚀与生物黏

泥滋生；部分场景需添加缓蚀剂、阻垢剂等药剂，提升冷却系统稳定性。回用过程中需定期监测循环冷却水水质，动态调整处理药剂投加量与换水频率，维持冷却系统正常运行，避免因水质问题影响生产效率。

（三）回用技术优化与保障

工业废水回用技术正朝着高效化、低成本、智能化方向优化，通过研发高效深度处理技术，提升出水水质，拓展回用场景；通过工艺组合优化，降低处理与回用成本；通过引入智能化管控系统，实时监测水质与回用过程参数，动态调整运行策略，确保回用安全稳定。

回用保障需构建完善的技术标准与管理体系，制定不同回用场景的水质标准，明确水质控制指标与检测方法；加强回用设施运维管理，定期检修处理设备与回用管网，防止泄漏与污染；出台政策支持与激励措施，鼓励企业加大废水回用设施投入，推动工业废水资源化利用规模化、常态化。同时，结合企业生产工艺特点，优化回用方案，实现回用技术与生产需求精准适配，提升水资源循环利用效率。

工业废水治理技术的迭代升级是工业绿色转型与水污染防治的核心支撑，通过“预处理－深度处理－资源化回用”的全流程技术体系，实现了工业废水污染物高效去除与资源循环利用的双重目标。从格栅、沉淀等预处理技术筑牢治理基础，到生物处理、高级氧化等深度处理技术精准降解污染物，再到中水回用、循环冷却水回用等技术推动资源转化，工业废水治理已从“末端治理”向“源头减量、过程控制、末端回用”的全链条模式转型。

第三节 城市污水处理与回用

城市污水处理与回用是水污染防治体系的关键环节，也是实现水资源循环利用、缓解城市水资源短缺压力的核心路径。随着城镇化进程加快，城市生活污水与工业废水排放量持续增长，若未经有效处理直接排放，会加剧水体富营养化、破坏水生生态平衡，威胁饮用水安全与人居环境。城市污水处理与回用通过“处理减污－污泥处置－再生利用”的全链条模式，既能降低污水对水体的污染负荷，又能将处理后的再生水转化为可用资源，实现“污染治理”与“资源循环”的双重目标。当前，我国城市污水处理能力逐步提升，处理工艺不断优化，再生水利用场景持续拓展，已成为推进海绵城市建设、践行绿色低碳发展理念的重要支撑。

一、处理工艺：市政污水处理厂主流工艺

市政污水处理工艺以去除污水中污染物、实现达标排放为核心，结合污水水质特征、处理目标及成本预算，形成了多元化工艺体系。其中，厌氧-缺氧-好氧（ A^2/O ）工艺因处理效果稳定、适配性强，成为我国市政污水处理厂的主流工艺，同时辅以其他工艺满足不同场景需求，通过物理、化学、生物协同作用，实现对污水中有机物、氮磷营养盐等核心污染物的高效去除。

（一）核心主流工艺： A^2/O 工艺

A^2/O 工艺是一种同步脱氮除磷的生物处理工艺，通过串联厌氧池、缺氧池、好氧池三个功能单元，利用不同微生物的代谢作用，实现对污水中有机物、氮、磷的协同去除，处理流程紧凑、能耗相对较低，适配城市生活污水及低浓度工业废水的处理需求。

该工艺的核心原理是利用微生物群落的协同代谢：厌氧池内，在无氧环境下，聚磷菌释放体内储存的磷，同时降解部分有机物，为后续除磷奠定基础；缺氧池内，反硝化细菌利用污水中的有机碳源，将好氧池回流的硝酸盐氮转化为氮气，实现脱氮效果；好氧池内，硝化细菌将氨氮转化为硝酸盐氮，同时聚磷菌过量吸收磷，有机物被好氧微生物彻底降解，最后通过沉淀分离污泥与处理后出水，完成整个处理过程。 A^2/O 工艺可有效去除化学需氧量、氨氮、总磷等核心污染物，处理后出水可达到相应排放标准，部分经深度处理后可满足再生水利用要求。其运行过程需精准控制各池体的溶解氧浓度、水力停留时间、污泥回流比等参数，确保脱氮除磷效果稳定。

（二）其他辅助工艺

除 A^2/O 工艺外，市政污水处理厂还会根据污水水质、处理目标及场地条件，采用其他辅助工艺，形成差异化处理方案。序批式活性污泥法（SBR）及改良工艺，通过周期性进水、反应、沉淀、排水的操作模式，无需单独设置沉淀池，占地面积小、灵活性强，适用于中小型污水处理厂及水质波动较大的污水处理场景，可实现脱氮除磷与有机物去除的同步进行。

氧化沟工艺以连续流活性污泥法为基础，通过环形沟渠内的循环流动，延长污水与微生物的接触时间，处理效果稳定、抗冲击负荷能力强，运行管理简便，适用于大中型污水处理厂。对于高浓度有机废水或含有难降解污染物的污水，需

在生物处理前增设预处理工艺，如格栅、沉砂池、初沉池等物理处理单元，去除悬浮颗粒物、砂石等杂质，减轻后续生物处理单元的负荷；部分场景还需增设深度处理工艺，如过滤、消毒、高级氧化等，进一步提升出水水质，为再生水回用提供保障。

（三）工艺优化方向

随着环保标准不断提高及“双碳”目标推进，城市污水处理工艺正朝着高效化、低碳化、智能化方向优化。通过优化工艺参数、改良微生物群落结构，提升脱氮除磷效率，降低能耗与药耗；推广低碳处理技术，如厌氧氨氧化、短程硝化反硝化等，减少曝气能耗与二氧化碳排放；引入智能化管控系统，实时监测进水水质、处理过程参数及出水水质，动态调整运行参数，实现工艺运行的精准调控，提升处理效率与稳定性，降低运行成本。

二、污泥处理：脱水、稳定化、无害化处理与资源化利用

污泥是城市污水处理过程中产生的副产物，富含有机物、氮磷营养盐、重金属及病原体等，若处理不当随意堆放或填埋，会造成二次污染，威胁土壤、水体与大气环境。污泥处理以“减量化、稳定化、无害化、资源化”为核心原则，通过脱水、稳定化、无害化处理降低污泥体积与环境风险，再通过资源化利用实现污泥的价值转化，构建闭环处理体系。

（一）污泥脱水处理

污泥脱水是污泥处理的前置环节，核心是去除污泥中的游离水与间隙水，降低污泥含水率，减少污泥体积，为后续稳定化、无害化处理及资源化利用创造条件。污泥脱水分为机械脱水与自然脱水两类，市政污水处理厂以机械脱水为主，自然脱水仅适用于小型处理设施或特定场景。

机械脱水常用设备包括板框压滤机、带式压滤机、离心脱水机等，脱水前需对污泥进行调理，通过添加絮凝剂、助凝剂等化学药剂，破坏污泥胶体结构，使污泥颗粒凝聚成团，提升脱水效果。经机械脱水后，污泥含水率可从95%—99%降至60%—80%，污泥体积大幅缩减，便于运输与后续处理。脱水过程中产生的滤液需回流至污水处理系统重新处理，避免污染物排放造成二次污染。

（二）污泥稳定化与无害化处理

污泥稳定化处理旨在降低污泥中有机物的生物活性，减少污泥在储存、运输

及处置过程中产生的异味、腐败现象，同时抑制病原体繁殖，提升污泥稳定性。常用稳定化技术包括厌氧消化、好氧堆肥、化学稳定化等，厌氧消化通过厌氧菌代谢分解污泥中的有机物，产生沼气可回收利用，处理后污泥稳定性显著提升；好氧堆肥利用好氧微生物将有机物分解为腐殖质，适用于有机物含量高的污泥，处理后可作为土壤改良剂原料。

污泥无害化处理核心是去除或钝化污泥中的重金属、杀灭病原体，降低环境风险。重金属处理可通过化学淋洗、固化/稳定化等技术，将重金属转化为稳定形态，减少其迁移扩散能力；病原体杀灭可通过高温处理、消毒等方式，如热干化、焚烧、石灰稳定等，确保污泥满足后续处置与利用的卫生标准。无害化处理是污泥资源化利用的前提，需严格遵循相关标准，确保处理后污泥不对环境与人体健康造成威胁。

（三）污泥资源化利用

污泥资源化利用是污泥处理的高级形态，通过技术手段将无害化处理后的污泥转化为能源、肥料、建筑材料等资源，实现“变废为宝”，提升污泥处理的环境效益与经济效益。能源化利用是重要方向之一，厌氧消化产生的沼气可作为清洁能源用于发电、供热；污泥热干化后可与煤炭混合焚烧，回收热能用于发电或工业生产。

农用资源化需严格把控污泥质量，经好氧堆肥等无害化处理后，污泥中的腐殖质可作为土壤改良剂，用于园林绿化、贫瘠土壤改良等，补充土壤养分，提升土壤肥力，但禁止用于食用农作物种植区域。建材化利用通过将污泥固化后制成砖块、陶粒、水泥原料等，实现污泥的资源化回收，适用于重金属含量较高、不宜农用的污泥。污泥资源化利用需结合污泥性质、处理技术水平及区域需求，选择适宜的利用路径，确保资源利用的安全性与可持续性。

三、再生水利用：绿化、灌溉、工业冷却等途径

再生水是城市污水处理厂经处理后达到一定水质标准，可再次利用的水资源，是缓解城市水资源短缺、优化水资源配置的重要手段。再生水利用需遵循“分质供水、梯级利用”原则，根据出水水质等级，适配不同利用场景，实现水资源的高效循环利用，同时减少新鲜水资源开采与污水排放量，推动节水型城市建设。

利用途径	水质要求	核心优势	注意事项
城市绿化用水	满足景观环境用水水质标准，无异味、无明显悬浮物，对植物无损害	用量大、需求稳定，替代自来水可大幅节约新鲜水资源	定期监测水质，避免重金属累积对植物及土壤造成影响
农业灌溉用水	符合农田灌溉水质标准，控制病原体、重金属及盐分含量	适配农业用水需求，补充灌溉水源，污泥中的养分可辅助作物生长	禁止用于蔬菜、瓜果等生食农作物灌溉，采用合理灌溉方式减少土壤污染
工业冷却用水	控制硬度、浊度、腐蚀性物质含量，满足工业冷却水质要求	工业用水量巨大，再生水适配性强，降低企业新鲜水消耗与用水成本	定期清理冷却系统，防止结垢、腐蚀及微生物滋生
城市杂用水	符合城市杂用水标准，适用于道路清扫、厕所冲洗等	场景广泛、易推广，替代自来水可提升水资源循环利用率	单独设置供水管道，做好标识，避免与饮用水混流

（一）核心利用途径

城市绿化与道路杂用水是再生水最基础、最易推广的利用途径，对水质要求相对较低，处理成本可控。再生水用于公园、绿地、行道树灌溉，道路清扫、垃圾清运、厕所冲洗等城市杂用，可替代大量自来水，尤其适用于水资源短缺的北方城市，有效缓解城市供水压力。此类场景用水量大、需求稳定，且无需与人体直接接触，安全性较高，是再生水利用的优先推广方向。

农业灌溉用水是再生水利用的重要场景，尤其在城郊农业区域，再生水可作为农田灌溉的补充水源，其含有的氮磷营养盐可减少化肥施用，降低农业生产成本。但需严格控制水质，禁止用于生食农作物灌溉，采用滴灌、喷灌等高效灌溉方式，减少再生水与作物、土壤的直接接触时间，防止病原体传播与重金属累积。

工业冷却用水是再生水工业利用的主流方向，工业生产中冷却用水占比极高，对水质要求以控制硬度、浊度、腐蚀性为主，再生水经深度处理后可完全满足需求。再生水用于工业冷却，可大幅降低企业新鲜水采购成本，同时减少污水排放量，实现节水与减污协同。部分水质条件较好的再生水，还可用于工业工艺用水、锅炉补给水等，但需经更高标准的深度处理，确保满足生产工艺要求。

（二）利用保障措施

再生水利用需构建完善的保障体系，确保利用过程的安全性与可持续性。首先，完善再生水水质标准体系，根据不同利用场景制定差异化水质标准，明确水质控制指标与检测方法，为再生水处理与利用提供依据；加强水质监测能力建设，建立全流程水质监测机制，定期对再生水处理过程及用水终端进行监测，确保水

质达标。

其次，完善再生水输配管网建设，单独建设再生水供水管道，与自来水管网严格区分，做好标识标注，避免混流与误饮；优化管网布局，覆盖主要用水场景，提升再生水输送效率与利用便利性。同时，出台政策支持与激励措施，通过财政补贴、税费减免等方式，鼓励企业、单位优先使用再生水，降低再生水利用成本，引导全社会形成再生水利用的良好氛围。

（三）发展趋势

未来，再生水利用将朝着规模化、多元化、高品质方向发展。随着城市水资源短缺问题加剧，再生水利用规模将持续扩大，逐步实现从“补充水源”向“替代水源”的转变；利用场景将不断拓展，从传统的绿化、灌溉、冷却用水，向地下水回补、景观用水、应急供水等领域延伸；处理技术将持续升级，通过高效深度处理技术，提升再生水水质，满足更高标准的用水需求。同时，结合海绵城市建设，推动再生水与雨水、中水等水资源的协同利用，构建多源互补的城市水资源循环体系，助力城市绿色低碳发展。

城市污水处理与回用作为水污染防治与水资源循环利用的核心载体，通过优化处理工艺、规范污泥处置、拓展再生水利用场景，构建了“污染治理－资源回收－循环利用”的闭环体系，实现了环境效益、经济效益与社会效益的协同统一。从 A²/O 等主流工艺的高效处理，到污泥“减量化、稳定化、无害化、资源化”的全流程处置，再到再生水多场景梯级利用，城市污水处理与回用技术不断迭代升级，为城市水污染防治、水资源短缺问题破解提供了坚实支撑。

第四节 流域水污染综合治理

流域水污染综合治理是破解水体跨区域污染、修复水生态系统、保障流域水安全的核心路径。流域作为一个完整的水文生态单元，水体流动特性导致污染具有显著的跨区域传导性，单一区域、单一污染源的分散治理难以从根本上解决问题，反而易出现“局部治理、整体失衡”的治理困境。当前，流域水污染治理已从传统的“点源治理、末端管控”模式，转向“流域统筹、系统治理、协同共治”的全新格局，通过整合治理理念、技术措施与管理机制，实现水量与水质协同管控、污染治理与生态修复同步推进，构建“源头防控－过程拦截－生态修复－长

效管控”的全链条治理体系。

一、治理理念：从“点源治理”转向“流域统筹”，兼顾水量与水质

流域水污染综合治理的理念升级，是应对复杂流域污染问题的必然选择。传统“点源治理”模式聚焦单一排污口、单一污染源的末端治理，缺乏对流域整体水文循环、生态关联及跨区域污染传导的系统考量，易导致治理碎片化、效果短暂化。“流域统筹”理念以流域为整体单元，打破行政区域壁垒与治理碎片化格局，实现治理目标、技术措施、管理机制的全域协同，同时兼顾水量调度与水质改善的协同适配，构建系统性治理框架。

（一）理念核心：流域系统统筹

流域系统统筹理念强调以流域水文生态系统完整性为核心，将流域内上下游、左右岸、干支流作为一个有机整体，统筹规划污染治理、生态保护、水资源利用等各项工作。摒弃“各自为战”的治理模式，建立全域统一的治理目标与规划体系，明确各区域、各部门的治理责任与分工，实现污染负荷总量管控与区域协同减排。

该理念注重源头防控与过程管控并重，既要强化工业、生活、农业等各类污染源的精准治理，从源头削减污染负荷；又要兼顾流域内水利工程调度、湿地保护、河道疏浚等生态修复措施，构建污染物拦截与净化的生态屏障。同时，充分考虑流域内经济社会发展与生态环境保护的平衡，避免过度治理影响区域发展，实现生态效益、经济效益与社会效益的协同统一。

（二）关键维度：水量与水质协同管控

水量与水质是流域水生态系统的核心要素，二者相互影响、相互制约，单一维度的管控难以实现流域水生态安全目标。流域统筹治理理念强调水量调度与水质改善的协同适配，通过科学调控流域水量，提升水体自净能力，为水质改善创造有利条件；同时通过严格的水质管控，倒逼水资源高效利用，实现“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”。

在水量调度方面，结合流域水文特征与用水需求，科学制定枯水期、丰水期水量调度方案，保障河道生态基流，避免因水量不足导致水质恶化、生态退化；通过跨区域调水、水利工程联合调度等方式，优化水资源配置，提升流域水体流动性，增强水体自净能力。在水质管控方面，建立流域统一的水质标准与监测体系，实现全域水质实时监控与动态预警，确保各区域水质达标，同时强化水质与

水量监测数据的融合分析，为流域治理决策提供科学支撑。

二、关键措施：控源截污、河道生态修复、湿地净化等综合技术

流域水污染综合治理需依托多元化技术措施的组合应用，构建“控源截污－生态修复－净化缓冲”的立体治理体系。控源截污作为核心基础，从源头削减污染负荷；河道生态修复与湿地净化作为辅助支撑，提升水体自净能力与生态功能，通过各项技术协同发力，实现流域水质改善与生态系统修复的双重目标。

（一）核心基础：控源截污技术

控源截污是流域水污染治理的根本举措，核心是针对工业、生活、农业等各类污染源，采取精准治理措施，削减污染排放总量，阻断污染物入河（湖、库）路径。通过“分类管控、精准治污”，实现各类污染源排放的规范化、达标化。

工业污染源管控聚焦重点行业、重点企业，强化排污许可管理与全流程监管，推动企业实施清洁生产改造与废水深度处理，确保废水达标排放，鼓励企业开展废水资源化回用，从源头减少废水排放量。生活污染源管控以城镇污水处理设施建设与改造为核心，提升污水处理能力与处理标准，完善污水收集管网，实现雨污分流，杜绝生活污水直排、散排；针对农村生活污水，推广低成本、易运维的处理技术，实现农村污水就近治理、达标排放。农业面源污染管控聚焦化肥农药减量、畜禽养殖污染治理、农田径流拦截，推广生态种植、绿色养殖模式，建设农田径流拦截设施，减少氮磷营养盐入河量。

（二）生态修复：河道生态修复技术

河道生态修复技术旨在修复受损的河道生态系统，提升河道水体自净能力、生态承载力与景观功能，为流域水生态系统恢复奠定基础。通过重构河道生态结构，改善水体流动条件，促进水生生物群落恢复，实现“清水绿岸、鱼翔浅底”的生态目标。

核心修复技术包括河道形态修复、水生植被重建、底质改良等。河道形态修复通过疏浚河道、恢复河道自然弯曲形态、拓宽河道断面等方式，改善水体流动特性，提升河道行洪能力与水体自净能力，避免因河道硬化、拉直导致生态功能退化。水生植被重建通过种植沉水植物、浮水植物、挺水植物等，构建复合型水生植被群落，利用植物吸附、吸收作用去除水体中氮磷营养盐与悬浮物，同时为水生生物提供栖息环境，促进水生生态系统平衡。底质改良针对污染底泥，采用

清淤、钝化、生物修复等技术，去除或稳定底泥中的污染物，避免底泥污染物释放导致水体二次污染。

（三）净化缓冲：湿地净化技术

湿地作为流域生态系统的“净化器”与“调节器”，具有强大的水质净化、蓄水调洪、生物栖息地功能，是流域水污染综合治理的重要生态屏障。湿地净化技术通过利用湿地生态系统的物理、化学、生物协同作用，拦截、吸附、降解入河污染物，提升水体水质，同时增强流域生态韧性。

湿地净化系统包括天然湿地保护与修复、人工湿地建设两类。天然湿地保护与修复聚焦流域内河流、湖泊、沼泽等天然湿地，通过退塘还湿、退耕还湿、生态补水等措施，恢复湿地面积与生态功能，提升天然湿地的净化能力与蓄水能力。人工湿地建设针对流域内污染负荷较高的河段、支流，建设表面流人工湿地、潜流人工湿地等，利用湿地基质、水生植物、微生物的协同作用，对达标排放的废水、农田径流等进行深度净化，进一步削减污染负荷，再排入主干流。湿地净化技术具有处理成本低、环境友好、生态效益显著等优势，可有效弥补人工治理技术的不足，实现污染治理与生态保护的协同。

三、管理机制：流域生态补偿机制与跨区域协同治理

完善的管理机制是流域水污染综合治理落地见效的核心保障。流域污染的跨区域传导性与生态系统的整体性，决定了必须建立跨区域协同治理机制，打破行政壁垒；同时通过流域生态补偿机制，平衡上下游区域的治理责任与利益分配，形成“谁受益、谁补偿，谁污染、谁担责”的长效治理格局，确保流域治理工作持续推进。

（一）流域生态补偿机制

流域生态补偿机制是平衡流域内上下游、左右岸区域利益关系，激励生态保护行为的重要制度安排。核心是通过经济补偿、政策倾斜等方式，对为流域生态保护作出贡献的区域给予合理补偿，对造成流域污染的区域进行约束惩戒，协调区域间生态保护与经济发展的矛盾，实现流域协同发展。

生态补偿的核心内容包括补偿主体、补偿对象、补偿方式与补偿标准。补偿主体主要为流域下游受益区域政府、受益企业及社会主体；补偿对象为上游生态保护区域政府、因生态保护限制发展的区域及相关群体。补偿方式以资金补偿为

主, 辅以政策补偿、项目补偿、技术支持等, 资金来源可包括财政转移支付、受益区域缴费、生态保护基金等。补偿标准需结合流域生态保护成本、生态服务价值、污染治理成本等因素科学核算, 确保补偿公平合理, 同时建立动态调整机制, 根据流域生态环境质量变化与经济社会发展水平适时优化补偿标准。

（二）跨区域协同治理机制

跨区域协同治理机制旨在打破行政区域壁垒, 构建“统一规划、统一标准、统一监测、统一执法、统一调度”的流域治理格局, 实现流域内各区域、各部门的协同发力, 破解跨区域污染治理难题。该机制需依托多层次的协调组织体系与规范化的运行流程, 确保治理工作高效推进。

建立多层次协调组织体系, 成立流域级联防联控领导小组, 统筹协调流域治理规划制定、重大政策出台、重点问题攻坚等工作, 定期召开协调会议, 解决跨区域治理矛盾; 明确各区域、各部门的职责分工, 建立权责清晰、分工协作的工作机制, 避免推诿扯皮。构建统一的流域监测与执法体系, 建立全域覆盖的水质监测网络, 实现监测数据实时共享、统一预警; 开展跨区域联合执法、交叉检查行动, 严厉打击跨区域偷排漏排、超标排放等违法行为, 确保执法监管无死角。建立跨区域应急联动机制, 针对流域性突发水污染事件, 实现预警信息同步、应急措施协同、资源调配联动, 提升流域整体应急处置能力, 最大限度降低污染影响。

（三）机制保障与优化

流域水污染综合治理机制的落地, 需强化制度保障与动态优化。完善流域治理法律法规体系, 出台针对性的流域保护条例, 明确流域生态补偿、跨区域协同治理的法律依据与操作规范, 为机制运行提供刚性约束。建立科学的考核评价体系, 将流域生态环境质量改善情况、跨区域协同治理成效、生态补偿落实情况等纳入地方政府绩效考核, 强化考核结果与问责、奖惩的挂钩, 倒逼责任落实。

鼓励社会参与, 构建“政府主导、企业主体、社会参与”的多元治理格局, 通过宣传引导提升公众生态保护意识, 鼓励公众参与流域治理监督、举报违法行为; 引导企业履行生态环保责任, 主动开展污染治理与资源化利用; 引入第三方治理机构, 为流域治理提供技术服务、设施运维等专业化支撑, 提升治理效率与水平。结合流域治理实践, 定期评估机制运行效果, 针对存在的问题及时优化调整, 确保机制适配流域生态环境变化与经济社会发展需求。

流域水污染综合治理是一项系统性、长期性、复杂性工程, 需以“流域统筹”

理念为引领，依托控源截污、生态修复、湿地净化等综合技术，健全流域生态补偿与跨区域协同治理机制，构建“理念引领－技术支撑－机制保障”的全链条治理体系。从传统“点源治理”到“流域统筹”的理念转型，体现了水污染治理从碎片化到系统化、从末端管控到源头防控的深刻变革。

第五节 水污染防治政策与法规

水污染防治政策与法规是守护水生态安全、规范涉水行为、推进水污染系统治理的核心制度支撑，构建了“法律约束、制度管控、政策引导”的全方位治理体系。随着水污染治理向流域化、精细化、系统化推进，政策法规体系不断迭代升级，从单一污染物管控向“水资源、水环境、水生态”三水统筹治理转型，从分散化治理向全流域协同治理延伸，为深入打好碧水保卫战、实现人水和谐共生提供坚实保障。

一、核心法规：《中华人民共和国水污染防治法》《中华人民共和国长江保护法》等专项法律法规

我国水污染防治法规体系以《中华人民共和国水污染防治法》为基础，以流域性、专项性法律法规为补充，构建了“基础法律－专项法规－配套规章”的层级化框架，同时衔接国土空间、生态保护、水资源利用等领域法规，形成覆盖全领域、全流程、跨区域的法治保障体系。该体系既明确了水污染防治的核心原则与刚性要求，又结合流域特征、生态需求细化治理措施，实现“全国统一规范＋区域精准施策”的法治格局。

（一）基础核心法律：《中华人民共和国水污染防治法》

《中华人民共和国水污染防治法》作为水污染防治领域的基础性法律，确立了水污染治理的核心原则、制度框架与责任体系，是整个法规体系的基石。该法律历经多次修订完善，逐步实现从“末端治理”向“源头防控、过程管控、末端治理”全链条管控转型，从“单一水体治理”向“流域统筹、三水协同”治理升级，内容涵盖水污染防治的监督管理、水污染防治措施、饮用水水源保护、水污染事故处置及法律责任等关键环节。

其核心作用体现在三个维度：一是确立根本治理原则，明确预防为主、防治

结合、综合治理的方针，强调优先保护饮用水水源，统筹推进流域协同治理，为政策制定与执法实践提供根本遵循；二是界定多元主体责任，明确各级政府的监管责任、企业的污染治理主体责任及公众的监督权利，构建“政府主导、企业主体、社会参与”的治理责任体系；三是设定刚性制度约束，建立排污许可、总量控制、水质监测、应急处置等核心制度，细化违法行为的惩戒标准，加大对偷排漏排、超标排放等行为的处罚力度，强化法律威慑力。作为上位法，其条款为专项法规、配套规章的制定提供依据，确保整个法规体系的统一性与权威性。

（二）流域性与专项法律法规

流域性法律法规聚焦大江大河流域的生态保护与污染治理，结合流域水文特征、生态禀赋与治理需求，制定针对性治理规范，弥补基础法律的区域适配性不足。《中华人民共和国长江保护法》《中华人民共和国黄河保护法》作为典型的流域性法律，以流域生态系统完整性为核心，确立“重在保护、要在治理”的理念，统筹推进流域水资源利用、水生态保护、水污染治理与经济社会发展，建立流域统一规划、统一治理、统一调度的管理机制，明确流域上下游、左右岸的协同治理责任，强化对重要生态功能区、水源涵养区的保护。

针对湖泊、地下水、饮用水水源地等特定领域，出台专项法规与规章，细化治理要求。例如，湖泊保护相关法规聚焦湖泊萎缩、富营养化等问题，规范湖泊水域岸线管理、生态补水、污染防控等措施；地下水保护法规针对地下水超采、污染等问题，建立地下水监测、污染防治与生态修复制度；饮用水水源保护专项规章则细化水源地划定、规范化建设、风险防控等要求，筑牢饮用水安全防线。这些专项法规与流域性法律相互补充，形成覆盖不同水体、不同领域的精准法治保障。

（三）法规体系协同衔接

水污染防治法规体系并非孤立存在，而是与生态文明领域其他法规有机衔接，形成协同发力的制度合力。向上衔接《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国水法》等上位法，遵循生态文明建设的总体要求，确保制度方向一致；横向衔接《中华人民共和国土壤污染防治法》《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》等专项法规，实现水、土、固废等多介质污染协同治理；同时衔接国土空间规划、水资源调度、生态保护修复等领域法规，将水污染防治要求融入国土空间管控、水利工程调度、生态工程建设等工作，构建“多领域协同、全链条管控”

的制度体系。随着“减污降碳协同增效”目标推进，法规体系逐步衔接气候变化相关政策，将水资源节约、水生态保护与碳减排要求有机融合，推动水污染治理与“双碳”目标协同推进。同时，通过法规修订与配套制度完善，持续优化法规体系的适配性，确保与污染治理实践、技术发展水平、经济社会发展需求相匹配。

二、管理制度：河长制、湖长制、排污许可制度的全面实施

水污染防治管理制度是政策法规落地见效的核心载体，通过建立常态化、规范化、责任化的管理机制，将法治要求转化为具体治理行动。河长制、湖长制、排污许可制度作为三大核心管理制度，分别聚焦河湖生态保护、污染源管控两大维度，构建“责任全覆盖、管控全流程”的管理体系，推动水污染治理从“被动应对”向“主动防控”转型。

（一）河长制与湖长制

河长制、湖长制以压实各级责任为核心，建立“党政领导、部门协同、分级负责”的河湖管理保护机制，将河湖治理责任落实到具体责任人，实现河湖管理保护全覆盖。其核心目标是通过各级河长、湖长牵头抓总，统筹推进河湖污染治理、生态修复、岸线管控、执法监管等工作，破解河湖治理“九龙治水”“责任虚化”等问题，推动河湖生态环境持续改善。

河长制、湖长制的实施重点体现在三个方面：一是健全责任体系，明确省级、市级、县级、乡级、村级河长、湖长的职责分工，形成“一级抓一级、层层抓落实”的责任链条，省级总河长牵头统筹流域性河湖治理工作，村级河长、湖长负责日常巡查、问题上报等基础工作；二是完善工作机制，建立河长湖长巡河巡湖、联席会议、问题督办、考核评价等制度，定期开展河湖巡查，及时发现并解决乱占、乱采、乱堆、乱建等突出问题，将治理成效纳入地方政府绩效考核，强化责任倒逼；三是聚焦治理重点，统筹推进河湖生态修复、水污染防治、岸线整治、生态补水等工作，结合“一河一策”“一湖一策”制定差异化治理方案，北方地区重点解决河流断流、湖泊萎缩问题，南方地区重点改善水动力条件、实现水清河畅。

（二）排污许可制度

排污许可制度作为固定污染源管控的核心制度，实行“一证式”管理，通过明确企业排污边界、管控要求与责任，实现污染源全流程精准管控，是连接法规要求与企业治理行为的关键纽带。该制度整合了排污申报、总量控制、环保审批

等多项制度，简化监管流程，提升监管精准度，构建“持证排污、按证监管、违法必究”的管控格局。

其实施核心包括三个环节：一是精准核发许可证，根据企业行业类型、生产工艺、污染排放特征及环保标准，明确企业排污种类、浓度、总量、治理措施、监测要求等内容，确保许可证贴合企业实际，同时严格落实总量控制要求，将区域污染负荷总量分解至各排污单位；二是强化全流程监管，环保部门基于排污许可证开展常态化监管，结合在线监测、现场执法、台账核查等方式，核查企业排污行为是否符合许可证要求，对违法排污行为依法严肃处罚；三是完善闭环管理，建立排污许可证动态更新机制，根据环保标准提升、企业工艺改造、区域污染负荷变化等情况，及时调整许可证内容，同时将排污许可执行情况与企业环保信用、奖惩机制挂钩，引导企业主动合规、持续减排。

（三）管理制度协同发力

河长制、湖长制与排污许可制度并非孤立运行，而是相互衔接、协同发力，构建“源头管控－过程监管－成效保障”的闭环管理体系。河长制、湖长制聚焦河湖生态环境整体改善，明确区域治理目标与责任，为排污许可制度的实施提供区域管控导向；排污许可制度精准管控企业排污行为，从源头削减污染负荷，为河湖生态环境改善提供核心支撑。

通过建立制度协同机制，实现数据共享、责任联动、成效互认。例如，将排污许可执行情况纳入河长湖长考核评价内容，倒逼企业落实治理责任；河长湖长巡查发现的排污违法问题，及时移交环保部门查处，强化执法联动；通过整合排污许可监测数据与河湖水质监测数据，分析污染来源与治理成效，为优化治理方案提供依据。此外，结合环境监测、信用评价、应急处置等配套制度，进一步完善管理体系，提升整体管控效能。

三、政策导向：强化饮用水源地保护与水生态环境修复的政策支持

水污染防治政策导向聚焦治理重点与发展方向，通过强化政策支持、优化资源配置、明确工作要求，引导治理工作聚焦核心领域、破解突出问题，推动水污染治理从“达标排放”向“生态良好”升级。当前，强化饮用水源地保护与水生态环境修复是两大核心政策导向，同时配套多元化支持措施，为重点工作推进提供保障。

（一）强化饮用水源地保护政策

饮用水源地保护是保障公众健康与水安全的底线工程，政策导向聚焦“源头防控、全程管控、风险防范”，通过完善保护体系、强化管控措施、提升应急能力，筑牢饮用水安全防线。核心政策措施涵盖水源地划定、规范化建设、风险防控等关键环节。

在源头管控方面，严格饮用水源地划定与调整，科学划定集中式饮用水源地保护区，明确核心区、缓冲区管控要求，严禁在核心区内开展任何可能污染水源的活动，缓冲区内严格限制建设项目与生产经营活动。同时，推进水源地规范化建设，完善水源地隔离防护、监测预警、垃圾清理、污水处置等设施，提升水源地环境质量。在风险防控方面，建立饮用水源地风险隐患排查治理机制，定期排查水源地周边工业企业、化工园区、垃圾填埋场等风险源，建立隐患台账并限期整改；健全水源地突发水污染事件应急处置机制，制定应急预案，储备应急物资，开展应急演练，提升风险应对能力。

强化跨区域水源地保护协同，针对跨区域供水水源地，建立上下游协同治理机制，明确各方保护责任，同步推进污染治理与生态保护，确保供水安全。同时，加强南水北调等重大引调水工程水源区及输水沿线保护，完善监测监管体系，保障调水水质安全。

（二）推进水生态环境修复政策

水生态环境修复政策以“恢复水生态系统健康、提升生态韧性”为核心，遵循“系统治理、因地制宜”原则，聚焦江河湖泊、湿地、地下水等重点区域，推进山水林田湖草沙一体化保护和系统治理，提升水生态系统质量与稳定性。核心政策措施涵盖生态流量保障、生态修复工程、生物多样性保护等方面。

在生态流量保障方面，科学确定河湖生态流量目标，强化生态水量调度与监管，保障河湖基本生态用水，避免因水量不足导致生态退化。推进母亲河复苏行动，开展重点区域河湖生态补水，恢复河流连通性，巩固内陆河生态治理成果，改善通江湖泊江湖关系。在生态修复工程方面，推进河道生态修复、湿地保护修复、水土流失治理等工程，修复受损的河道形态、水生植被与底质环境，建设江河绿色生态廊道；加强重要江河源头、水源涵养区保护，实施重大生态保护修复工程，提升水源涵养能力；推进地下水超采综合治理，实施地下水保护治理行动，逐步恢复地下水水位。

在生物多样性保护方面，加强水产种质资源保护区保护修复，加大水生生物保护力度，维护水生态系统稳定性；严格管控外来物种入侵，防范生态风险。同时，推行“一河一策”“一湖一策”，结合区域生态特征与治理需求，制定差异化修复方案，提升修复成效。

（三）政策支持保障措施

为确保核心政策导向落地见效，配套出台资金、技术、考核等多元化支持保障措施，优化政策实施环境。在资金支持方面，加大中央与地方财政投入，设立水生态环境保护专项基金，重点支持饮用水源地保护、水生态修复、污染治理等重点项目；推广绿色金融政策，通过绿色信贷、绿色债券等方式，引导社会资本参与水污染治理与生态修复，同时对中小企业污染治理给予倾斜支持。

在技术支撑方面，加强水污染治理与生态修复关键技术攻关，推广先进适用技术，提升治理与修复的科学性、高效性；建立技术服务平台，为地方与企业提供技术咨询、工程指导、运维服务等支撑，助力破解技术瓶颈。在考核激励方面，将饮用水源地保护、水生态修复成效纳入地方政府绩效考核与生态环境保护督察内容，强化考核结果与问责、奖惩挂钩，对工作成效显著的地区给予表彰奖励，对落实不力的地区严肃追责问责。

鼓励社会参与，完善公众参与机制，畅通举报投诉渠道，鼓励公众参与水源地保护、河湖巡查、生态监督等工作；加强政策宣传引导，提升公众水生态环境保护意识，营造全社会共同参与的良好氛围。

水污染防治政策与法规体系作为水生态环境保护的制度基石，历经多年发展已形成“法规引领、制度管控、政策支撑”的完整框架，为水污染治理与水生态保护提供了全方位保障。从《中华人民共和国水污染防治法》为核心的法规体系构建，到河长制、湖长制、排污许可制度的全面实施，再到饮用水源地保护与水生态修复的政策引领，三者协同发力，推动水污染治理从碎片化、末端化向系统化、源头化转型。随着水生态环境治理进入深水区，面临的结构性、根源性问题日益突出，政策法规体系需持续优化完善，强化流域协同、科技赋能、社会共治，提升制度适配性与执行力。

第十章 固体废物污染防治策略

第一节 固体废物分类与管理

固体废物分类与管理是固体废物污染防治体系的基础环节，也是提升污染防治效能、推动资源循环利用的核心前提。固体废物来源广泛、成分复杂、形态多样，涵盖生产、生活及其他活动的全场景，若分类混乱、管理不当，易造成土壤、水体、大气多介质污染，威胁生态环境安全与人体健康。当前，我国固体废物污染防治已进入“分类精准化、管理全链条、治理系统化”的新阶段，通过构建科学分类体系、坚守核心管理原则、完善全流程管控机制，实现“污染防控与资源利用协同、源头减量与末端治理并重”的治理目标。

一、分类体系：生活垃圾、工业固体废物、危险废物的分类标准与识别

固体废物分类体系以来源特征、危害程度、利用价值为核心划分依据，形成“生活垃圾、工业固体废物、危险废物”三大核心类别，每类均有明确的分类标准与识别方法。科学分类是精准管控的基础，既能为差异化治理措施制定提供依据，又能提升资源化利用效率，避免混合处置导致的二次污染与资源浪费。分类标准严格遵循《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》及《固体废物鉴别导则》等相关规定，确保分类的合法性与规范性。

（一）生活垃圾

生活垃圾指在日常生活中或者为日常生活提供服务的活动中产生的固体废物，以及法律、行政法规规定视为生活垃圾的固体废物，具有来源分散、成分复杂、产生量大、易腐烂变质等特征。其分类标准以成分属性与处置需求为核心，逐步推行“可回收物、厨余垃圾、有害垃圾、其他垃圾”四分法分类模式，实现源头分类减量与资源回收。

识别要点主要基于产生场景与成分特征：从产生场景看，主要来源于城镇居

民家庭、商业场所、公共服务设施及市政维护等活动；从成分特征看，涵盖厨余废弃物、纸张、塑料、玻璃、金属、纺织品、废电池、废灯管等多种物质，其中厨余垃圾占比高，易滋生细菌、产生异味，需单独收集处置。识别过程中需注意区分生活垃圾与其他类别固体废物，排除工业生产过程中产生的相似废弃物，同时对混入生活垃圾的危险废物进行单独分拣，避免交叉污染。

（二）工业固体废物

工业固体废物指在工业生产活动中产生的固体废物，包括生产过程中产生的残余物、报废产品、污染控制设施产生的残渣污泥等，其产生量与成分特征与行业类型、生产工艺密切相关。分类标准主要依据产生行业、危害程度及利用价值，分为一般工业固体废物与工业危险废物，其中一般工业固体废物指未被列入危险废物名录且不具有危险特性的工业固体废物。

识别核心在于界定产生来源与危险特性：产生来源涵盖采矿、冶金、化工、建材、机械制造等各类工业行业，不同行业产生的工业固体废物成分差异显著，如采矿行业产生的尾矿、冶金行业产生的钢渣、化工行业产生的废催化剂等。识别过程中需结合《固体废物鉴别导则》，通过分析产生环节、物质成分及危害特性，判断是否属于工业固体废物范畴；对疑似具有危险特性的，需进一步依据危险废物鉴别标准开展检测，明确其类别归属，避免将危险废物纳入一般工业固体废物管理。

（三）危险废物

危险废物指列入国家危险废物名录或者根据国家规定的危险废物鉴别标准和鉴别方法认定的具有腐蚀性、毒性、易燃性、反应性或者感染性等一种或者几种危险特性的固体废物，对生态环境与人体健康具有较高危害风险，需实行严格的特殊管控。其分类标准以危险特性与名录管理为核心，依据《国家危险废物名录》进行精准归类。

识别方法主要包括名录对照法与特性鉴别法：名录对照法是首要识别方式，将固体废物与《国家危险废物名录》中的类别、代码及描述进行逐一对照，符合名录规定的直接判定为危险废物；特性鉴别法适用于未列入名录但疑似具有危险特性的固体废物，通过专业检测分析其腐蚀性、毒性、易燃性、反应性、感染性等指标，依据鉴别标准确定是否属于危险废物。识别过程中需严格遵循“先名录、后鉴别”的原则，同时注重源头追溯，明确危险废物的生产工艺与成分构成，为

后续安全处置与资源化利用提供依据。

二、管理原则：“减量化、资源化、无害化”三位一体管理原则

“减量化、资源化、无害化”（以下简称“三化”原则）是固体废物污染防治的核心指导原则，三者相互关联、协同发力，构成“源头管控－价值转化－风险防控”的完整治理逻辑。该原则贯穿固体废物产生、收集、运输、处置全流程，既明确了治理工作的优先级，又兼顾了环境效益、经济效益与社会效益，是推动固体废物治理体系现代化的根本遵循。

（一）减量化

减量化是指通过合理设计生产工艺、优化消费模式、强化源头管控等措施，减少固体废物的产生量与体积，从源头降低污染治理压力，是“三化”原则的首要目标。减量化核心在于“源头防控”，而非末端减量，需贯穿生产、流通、消费全环节，实现固体废物产生强度的持续下降。

实施路径涵盖多个维度：工业领域通过推行清洁生产、优化生产工艺、提高原材料利用率，减少生产过程中固体废物的产生；生活领域通过倡导绿色消费、推行垃圾分类、限制一次性用品使用，降低生活垃圾产生量；流通领域通过完善包装标准、推广绿色包装、推进包装废弃物回收，减少包装类固体废物产生。同时，通过强化源头管控责任，将固体废物减量化指标纳入企业绩效考核与地方环保评价体系，倒逼减量化措施落地见效，逐步实现固体废物产生量与消纳量的动态平衡。

（二）资源化

资源化是指将固体废物视为“放错地方的资源”，通过技术手段提取有用成分、转化为再生资源或能源，实现资源循环利用，既减少资源消耗，又降低固体废物处置压力，是实现“变废为宝”的核心路径。资源化需遵循“因地制宜、分类利用、安全可控”原则，根据固体废物的成分特征与利用价值，选择适宜的利用方式。

主要利用方向包括物质回收与能源利用：物质回收针对可回收成分，如生活垃圾中的纸张、塑料、金属，工业固体废物中的尾矿、钢渣等，通过分拣、加工、再生等工艺，转化为原材料重新投入生产；能源利用针对可燃成分，如生活垃圾、有机工业固体废物等，通过焚烧发电、厌氧发酵产沼气等方式，回收热能与电能。

资源化过程中需严格把控环境风险，确保利用过程符合环保标准，避免二次污染，同时完善资源回收利用产业链，提升资源化利用效率与附加值，推动资源循环利用规模化发展。

（三）无害化

无害化是指对无法减量化、资源化的固体废物，通过科学的处置技术，消除或降低其危险特性，避免对生态环境与人体健康造成危害，是固体废物治理的底线要求。无害化处置需针对不同类别固体废物的特性，选择适配的处置技术，确保处置过程安全可控、达标排放。

核心处置技术涵盖分类处置与风险管控：生活垃圾无害化处置以焚烧、卫生填埋为主，辅以生物处理等技术，焚烧需配备高效烟气净化设施，填埋需建设防渗、渗滤液处理等设施，防止污染土壤与地下水；一般工业固体废物可通过堆存、填埋、综合利用等方式无害化处置，堆存与填埋需选择适宜场地并采取防护措施；危险废物需采用焚烧、固化/稳定化、安全填埋等专用技术处置，全程严格遵循危险废物管理规定，确保处置过程可追溯、风险可控制。同时，通过加强处置设施规范化运行管理与环境监测，及时排查消除环境风险隐患，坚守无害化处置底线。

三、管理流程：从产生、收集、运输到处置的全链条管理体系

固体废物全链条管理体系以“闭环管控”为核心，覆盖产生、收集、运输、处置四大关键环节，通过建立规范化、标准化、信息化的管理机制，实现固体废物从源头到末端的全程可控，破解“流向追溯难、监管碎片化、风险防控弱”等治理难题。该体系需强化各环节协同衔接，明确多元主体责任，确保管理措施落地见效。

（一）产生环节管理

产生环节是全链条管理的源头，核心是强化源头管控、台账记录与申报登记，确保固体废物产生信息可追溯、责任可落实。管理重点包括三个方面：一是源头减量管控，督促产废单位落实减量化措施，优化生产工艺与消费模式，降低固体废物产生量；二是台账管理，产废单位需建立健全固体废物管理台账，详细记录固体废物的种类、产生量、成分、流向、处置方式等信息，确保台账真实、准确、完整；三是申报登记，产废单位需按照环保要求，定期向当地生态环境部门申报固体废物产生、处置及利用情况，危险废物产生单位还需额外履行危险废物申报

登记手续，接受监管部门核查。

（二）收集环节管理

收集环节管理核心是规范收集行为、分类收集存放、防止交叉污染，为后续运输与处置环节奠定基础。不同类别固体废物的收集管理要求存在差异：生活垃圾实行分类收集，配备专用收集容器与设施，明确收集时间与频次，推进“户分类、村收集、镇转运、县处置”的收集模式；工业固体废物按类别分开收集存放，一般工业固体废物与危险废物严禁混合收集，危险废物需使用专用密封容器收集，张贴危险废物标识；收集设施需设置在适宜位置，配备防渗漏、防流失、防扬散等防护措施，定期进行清洁与维护，避免收集过程中造成二次污染。

（三）运输环节管理

运输环节管理旨在规范运输行为、保障运输安全、实现流向可追溯，防止固体废物在运输过程中泄漏、遗撒、非法倾倒。管理重点包括运输单位资质、运输工具规范、运输路线管控与全过程追溯：运输单位需具备相应的环保资质，危险废物运输单位还需取得危险货物运输资质，配备专业运输人员与管理人员；运输工具需符合环保要求，生活垃圾与工业固体废物运输使用密闭式运输车辆，危险废物使用专用危险品运输车辆，张贴明显标识；运输路线需避开饮用水源地、生态敏感区、居民区等重点区域，合理规划运输时间；通过建立信息化追溯系统，对固体废物运输全过程进行跟踪记录，实现“来源可查、去向可追、责任可究”。强化运输过程监管，严厉打击非法转运、擅自倾倒、遗撒泄漏等违法行为，对危险废物跨省转移实行严格的审批制度，确保运输过程合规可控。运输过程中产生的泄漏物、污染物需及时进行无害化处理，避免污染周边环境。

（四）处置环节管理

处置环节是全链条管理的末端，核心是确保处置设施规范运行、处置过程达标排放、环境风险有效管控。需根据固体废物的类别与特性，选择适配的处置技术，实行分类处置：生活垃圾处置以焚烧发电、卫生填埋为主，辅以生物处理，处置设施需配备完善的污染治理设施，确保烟气、渗滤液、飞灰等污染物达标排放；一般工业固体废物可通过综合利用、安全堆存、卫生填埋等方式处置，综合利用需符合环保标准，堆存与填埋需采取防渗、防流失等防护措施；危险废物需交由具备相应资质的单位处置，采用专用处置技术，全程严格执行危险废物转移联单制度，确保处置过程可追溯、风险可控制。加强处置设施运行监管，建立常

态化监测与执法检查机制，督促处置单位规范运行设施、完善管理台账、落实环保责任；开展现有处置设施排查整治，补齐设施短板，提升设施规范化运行水平，逐步消除环境风险隐患，实现固体废物处置的无害化、资源化与减量化目标。

固体废物分类与管理作为污染防治的基础性工作，通过构建科学分类体系、坚守“三化”原则、完善全链条管控机制，为固体废物污染防治提供了系统性解决方案。从生活垃圾、工业固体废物、危险废物的精准分类识别，到“减量化、资源化、无害化”的协同推进，再到产生、收集、运输、处置的闭环管理，形成了全方位、多层次的管控体系，推动固体废物治理从“末端应对”向“源头防控、系统治理”转型。随着固体废物产生量持续增长、成分日益复杂，分类与管理工

作需进一步强化科技赋能、完善制度体系、压实主体责任，提升分类精准度与管理效能。

第二节 危险废物处理技术

危险废物处理技术是固体废物污染防治体系的核心组成部分，也是防范环境风险、保障生态安全与人体健康的关键举措。危险废物具有腐蚀性、毒性、易燃性、反应性、感染性等危险特性，若处理不当或管控失效，易造成土壤、水体、大气多介质污染，引发环境污染事件，甚至威胁公众健康。

一、预处理技术：危险废物的分类、破碎、稳定化 / 固化处理

预处理技术是危险废物处理的前置关键环节，核心目标是通过物理、化学手段优化危险废物形态、降低危险特性、提升后续处置效率，为无害化处置创造安全稳定的条件。预处理技术需结合危险废物的类别、危险特性及处置需求针对性选用，遵循“分类优先、按需处理、风险前置控制”原则，避免因预处理不到位导致处置过程风险加剧或二次污染。

（一）分类预处理

分类预处理是危险废物预处理的基础，旨在通过精准分类分离不同类别、不同危险特性的危险废物，避免混合处置引发化学反应、加剧危险程度，同时为后续针对性处理与资源化利用提供前提。分类需严格遵循《国家危险废物名录》及鉴别标准，结合危险特性、成分构成、处置方式适配性进行细化分类。

分类过程中需重点把控两点：一是按危险特性分区分类存放，将腐蚀性、毒性、易燃性、反应性危险废物分别置于专用密封容器与区域，设置明显标识，严禁混存混放；二是对混合性危险废物进行分拣，分离可回收利用成分与需无害化处置成分，剔除混入的非危险废物，同时对疑似危险废物进行鉴别确认，确保分类精准性。分类预处理需建立规范化操作流程，配备专业防护设施与人员，防范分类过程中发生泄漏、中毒等安全事故。

（二）破碎处理

破碎处理是通过机械手段将大块危险废物破碎为小块或粉末状，优化废物形态以提升后续处置效率的物理预处理技术。其核心作用在于减小危险废物体积、增加比表面积，便于后续稳定化/固化、焚烧、填埋等处置环节的均匀混合与反应，同时提升处置过程的安全性与彻底性。

破碎处理需根据危险废物的物理性质与危险特性选用适配设备，避免破碎过程中产生二次风险：对易燃、易爆类危险废物，需选用防爆型破碎设备，控制破碎过程温度与摩擦，防范燃烧爆炸风险；对腐蚀性、毒性危险废物，需选用耐腐蚀、密封性能良好的破碎设备，配备尾气收集与废液处理设施，防止泄漏污染与人员中毒。破碎后产物需及时转运至下一处理环节，避免长期堆放引发风险，同时做好破碎设备的清洁与维护，消除设备残留废物带来的二次污染隐患。

（三）稳定化/固化处理

稳定化/固化处理是通过添加化学药剂或惰性材料，改变危险废物中有害物质的形态与特性，降低其迁移扩散能力与毒性，实现危险特性弱化的核心预处理技术，适用于毒性、腐蚀性较强且难以直接处置的危险废物，是提升后续处置安全性的关键手段。

稳定化处理侧重于通过化学作用降低有害物质的活性，使其转化为稳定形态，减少在环境中的迁移与释放；固化处理则侧重于通过物理包裹或胶结作用，将危险废物固定在惰性基材中，形成结构稳定的固化体，阻断有害物质与外界环境接触。处理过程中需根据危险废物成分与特性精准选用药剂与基材，控制药剂投加量、反应温度、pH值等参数，确保处理效果达标。处理后需对固化体进行性能检测，确认其抗压强度、浸出毒性等指标符合处置标准，方可进入后续填埋或其他处置环节，避免因处理不达标导致有害物质泄漏。

二、处置技术：焚烧、填埋、化学处理等无害化处置技术

无害化处置技术是危险废物处理的核心环节，旨在通过高温、化学转化、安全隔离等手段，彻底消除或大幅降低危险废物的危险特性，实现其对环境与人体健康的风险可控，是危险废物处理的底线保障。需根据危险废物的类别、成分、危险特性及处理目标，选用适配的处置技术，确保处置过程合规、安全、高效。

（一）焚烧处置技术

焚烧处置技术是通过高温氧化作用分解危险废物中的有害物质，实现减量化、无害化的主流处置技术，适用于可燃、毒性较强且难以资源化利用的危险废物，具有处置效率高、减容效果显著等优势，可有效破坏危险废物中的有机毒性物质。

焚烧处置需依托专用危险废物焚烧设施，核心在于控制焚烧温度、停留时间、湍流度与过量空气系数，确保有害物质彻底分解，避免产生二噁英等二次污染物。焚烧设施需配备完善的烟气净化系统，对焚烧产生的烟气进行除尘、脱硫、脱硝、脱二噁英等处理，确保烟气达标排放；同时对焚烧灰渣与飞灰进行收集处理，飞灰因吸附大量有害物质需按危险废物进行后续固化/稳定化处理，灰渣经检测达标后可按规定处置。焚烧过程需建立实时监测体系，对焚烧参数、烟气排放指标进行全程监控，确保设施规范运行。

（二）填埋处置技术

填埋处置技术是通过将危险废物置于专用安全填埋场，利用防渗、隔离设施阻断其与土壤、水体接触，实现长期安全隔离的无害化处置技术，适用于无法焚烧、化学处理或处理后仍需最终隔离的危险废物，是危险废物最终处置的重要兜底手段。

危险废物填埋需严格遵循专用性、安全性原则，仅能在符合标准的危险废物安全填埋场进行。填埋场需建设多重防渗系统、渗滤液收集处理系统、气体收集处理系统等核心设施，防止有害物质渗漏污染土壤与地下水，控制填埋过程中产生的有害气体污染大气。填埋前需对危险废物进行预处理，确保其符合填埋入场标准，严禁将不相容危险废物混合填埋；填埋过程中需分层压实、覆盖，减少雨水渗入与有害气体逸散；填埋后需对填埋场进行长期监测与维护，定期排查防渗系统完整性、渗滤液水质与地下水水质，建立长效管控机制，确保填埋场安全稳定运行。

（三）化学处理技术

化学处理技术是通过化学反应改变危险废物中有害物质的化学结构与特性，使其转化为无害或低害物质的无害化处置技术，适用于具有特定化学性质的危险废物，如腐蚀性、毒性、反应性危险废物，具有针对性强、处理效果精准等优势。

常用化学处理方法包括中和、氧化还原、化学沉淀等：中和法用于处理酸性或碱性危险废物，通过投加酸碱药剂调节 pH 值至中性，降低腐蚀性；氧化还原法用于处理有毒有害有机物、重金属离子等，通过氧化或还原反应将其转化为无害物质；化学沉淀法用于处理含重金属离子的危险废物，通过投加沉淀剂生成难溶性沉淀物，便于分离去除。化学处理过程需精准控制药剂投加量、反应条件与反应时间，确保反应充分、处理达标；同时配备废液、废渣收集处理设施，对反应产物进行合规处置，避免产生二次污染。处理后需对产物进行检测，确认危险特性已消除或弱化，方可进入后续处置或排放环节。

三、安全管控：危险废物全过程追溯与环境风险防控

危险废物安全管控贯穿处理全流程，核心是通过建立全过程追溯体系、强化各环节风险防控措施，实现危险废物“来源可查、去向可追、风险可控、责任可究”，从制度与技术层面防范处理过程中的环境风险与安全事故，保障危险废物处理工作规范有序推进。

（一）全过程追溯体系

全过程追溯体系是危险废物安全管控的核心载体，通过信息化手段与规范化台账管理，对危险废物从产生、收集、运输、预处理、处置的全流程信息进行记录与跟踪，实现全链条可追溯，破解危险废物流向不明、监管缺位等难题。

追溯体系建设需聚焦信息记录与共享：一是建立标准化台账，详细记录危险废物的类别、产生量、成分、危险特性、预处理方式、处置单位、运输单位等关键信息，确保台账真实、准确、完整，留存期限符合法规要求；二是推行信息化追溯手段，依托危险废物管理信息系统，实现电子联单流转、数据实时上传与共享，打通产废、运废、处置单位及监管部门之间的信息壁垒；三是强化追溯信息核查，监管部门定期对追溯信息与实际流转情况进行核对，严厉打击篡改台账、虚假申报、非法转移等违法行为，确保追溯体系有效运行。

（二）环境风险防控措施

环境风险防控需覆盖危险废物处理各环节，针对预处理、处置过程中的潜在风险，建立“风险识别－隐患排查－应急处置”的全链条防控机制，提前防范、及时处置各类风险隐患，最大限度降低环境污染与安全事故影响。

各环节风险防控重点明确：预处理环节需针对破碎、稳定化/固化过程中的泄漏、中毒、燃烧爆炸风险，配备专业防护设备、应急救援物资，制定操作规范与应急预案；处置环节需强化焚烧设施、填埋场、化学处理设施的运行监管，定期开展设施检修与维护，排查防渗系统、烟气净化系统、应急处理系统等关键设施的安全隐患；运输环节需严格管控运输单位资质、运输工具规范与运输路线安全，防范泄漏、遗撒、非法倾倒风险。同时，建立常态化风险排查机制，定期开展风险评估，针对排查发现的隐患建立台账、限期整改，形成闭环管理。

（三）管控责任与保障

安全管控的落地需压实多元主体责任，构建“政府监管、企业主体、社会监督”的管控格局。产废单位、处理单位需履行主体责任，严格执行危险废物处理相关法规与标准，完善内部管控制度，配备专业人员与设施，确保处理过程合规、安全；监管部门需履行监管责任，强化全流程执法检查，严厉打击违法违规行为，加强对处理设施运行与追溯体系建设的监督指导；鼓励社会公众参与监督，畅通举报投诉渠道，形成管控合力。

强化技术支撑与应急保障，加强危险废物处理与管控技术研发，推广先进适用技术与信息化管控手段；完善应急预案体系，定期开展应急演练，提升突发环境污染事件的应急处置能力，确保风险发生时能够快速响应、有效处置，降低环境与社会影响。

危险废物处理技术与安全管控是固体废物污染防治的重中之重，通过预处理技术弱化危险特性、无害化处置技术消除环境风险、全过程管控体系防范安全隐患，构建了“技术处理＋制度管控”的双重保障体系。从分类、破碎、稳定化/固化的精准预处理，到焚烧、填埋、化学处理的无害化处置，再到全流程追溯与风险防控，形成了覆盖危险废物处理全链条的技术与管理体系，为防范危险废物污染、保障生态环境安全提供了坚实支撑。

第三节 生活垃圾资源化利用

生活垃圾资源化利用是践行“减量化、资源化、无害化”原则的核心路径，也是推动“无废城市”建设、实现资源循环利用与绿色低碳发展的关键举措。随着城镇化进程加快与居民生活水平提升，生活垃圾产生量持续增长，成分日益复杂，传统填埋、焚烧等末端处置方式不仅占用土地资源，还易引发二次污染，制约生态环境可持续发展。当前，生活垃圾资源化利用已从单一回收模式转向“多元途径协同、源头分类支撑、技术优化赋能”的综合体系，通过精准对接资源化途径、强化源头分类收集、升级核心技术，实现生活垃圾从“废物”到“资源”的转化，兼顾环境效益、经济效益与社会效益。本节将系统阐述生活垃圾资源化利用途径、分类收集制度与源头减量措施及技术优化方向，为生活垃圾资源化利用体系构建与效能提升提供科学指引。

一、资源化途径：垃圾焚烧发电、生物处理、回收再利用

生活垃圾资源化利用途径以成分特性与利用价值为核心，形成“能源回收、生物转化、物质再生”三大方向，不同途径适配不同类型生活垃圾，通过协同应用实现资源化利用率最大化。需结合生活垃圾成分构成、区域资源需求及技术水平，科学选择适配途径，确保利用过程合规、高效、环保，避免二次污染。

（一）垃圾焚烧发电

垃圾焚烧发电是生活垃圾能源化利用的主流途径，通过高温焚烧可燃生活垃圾产生热能，进而转化为电能或热能，实现“减量化+能源回收”双重目标，适用于可燃成分占比高、热值达标的生活垃圾，具有减容效果显著、处置效率高、能源转化稳定等优势。

该途径核心在于通过专业化焚烧设施实现能量转化与污染控制，焚烧过程中需精准控制焚烧温度、停留时间与湍流度，确保生活垃圾充分燃烧，提升能源转化效率。同时，配备完善的烟气净化系统，对焚烧产生的颗粒物、酸性气体、重金属、二噁英等污染物进行深度处理，确保烟气达标排放；对焚烧灰渣与飞灰进行分类处置，飞灰经固化/稳定化处理按危险废物规范处置，灰渣经检测达标后可用于建材加工等资源化途径。垃圾焚烧发电需依托规范化设施运行与全流程监测，平衡能源回收与环保达标，推动能源化利用高质量发展。

（二）生物处理

生物处理是针对生活垃圾中有机成分的资源化途径，利用微生物代谢作用将有机废物转化为有机肥、沼气等资源，适用于厨余垃圾、园林垃圾等有机成分占比高的生活垃圾，具有环境友好、资源附加值高、能实现有机物质循环利用等优势，是破解有机垃圾污染的核心手段。

核心技术包括堆肥与厌氧发酵两类：堆肥技术通过好氧微生物代谢分解有机废物，将其转化为腐殖质含量高的有机肥，可用于园林绿化、土壤改良等场景，实现有机物质还田循环；过程中需控制碳氮比、湿度、温度等参数，确保有机物充分降解，同时抑制异味与病原菌滋生。厌氧发酵技术在无氧环境下通过厌氧菌代谢分解有机废物，产生沼气（主要成分为甲烷），沼气可作为清洁能源用于发电、供热或民用燃气，发酵残留物经处理后可作为有机肥使用；需强化发酵系统密封与气体收集，防范沼气泄漏风险，同时对发酵废液、废渣进行合规处置，实现全流程污染控制。

（三）回收利用

回收利用是生活垃圾物质化利用的基础途径，通过分拣、加工、再生等工艺，提取生活垃圾中的可回收成分，转化为原材料重新投入生产，减少原生资源消耗，降低生产与处置成本，适用于纸张、塑料、玻璃、金属、纺织品等可回收成分。

回收利用需依托精准分拣体系，先通过人工或机械分拣分离可回收成分，剔除杂质与不可回收部分，再根据不同成分特性进行专业化处理：纸张经破碎、脱墨、制浆后再生为纸制品原料；塑料经清洗、破碎、熔融造粒后制成再生塑料；金属、玻璃经分拣、清洗、熔炼后可直接回收再加工。回收利用的核心是提升分拣精准度与再生加工技术水平，降低回收成本，同时建立完善的回收产业链，打通“回收－分拣－加工－再利用”闭环，提升可回收成分资源化利用率，推动物质循环利用常态化。

二、分类收集：生活垃圾分类制度实施与源头减量措施

分类收集是生活垃圾资源化利用的前提与基础，通过源头分类分离不同成分生活垃圾，避免混合收集导致的可回收成分污染、有机成分降解效率降低等问题，为精准对接资源化途径创造条件；源头减量则从根本上降低生活垃圾产生量，减轻资源化利用与末端处置压力，二者协同构建“源头管控－分类传导”的前置体系。

（一）生活垃圾分类制度实施

生活垃圾分类制度以“精准分类、规范投放、全程管控”为核心，通过建立标准化分类体系、完善投放设施、强化宣传引导与监督考核，推动分类行为常态化、规范化。当前，我国普遍推行“可回收物、厨余垃圾、有害垃圾、其他垃圾”四分法分类体系，明确各类垃圾的分类标准、投放要求与处置路径，确保分类精准可落地。

制度实施需强化多维度保障：在设施建设方面，配备分类投放容器、分类收集运输车辆与中转设施，实现“分类投放—分类收集—分类运输—分类处置”全链条衔接，避免“先分后混”；在宣传引导方面，通过多元渠道普及分类知识，提升居民分类意识与参与度，引导形成绿色生活习惯；在监督考核方面，将垃圾分类成效纳入地方政府绩效考核与社区管理评价体系，建立奖惩机制，倒逼责任落实。同时，针对不同区域（城镇、农村）、不同群体的特点，优化分类制度设计，提升制度适配性与可操作性。

（二）源头减量措施

源头减量是生活垃圾治理的优先目标，通过优化生产、流通、消费全环节行为，减少生活垃圾产生量与污染负荷，从根本上提升资源化利用效能，降低治理成本。源头减量需坚持“政府引导、企业主导、公众参与”原则，覆盖生产、消费、流通等多个维度，形成全方位减量体系。

核心措施包括三个方面：生产领域推行清洁生产与绿色包装，限制一次性塑料制品生产与使用，推广可降解包装材料与循环包装模式，减少包装类垃圾产生；流通领域加强商品过度包装管控，完善包装标准体系，引导企业简化包装设计，推动包装废弃物回收利用；消费领域倡导绿色低碳消费理念，鼓励居民减少一次性用品使用，践行“光盘行动”，减少厨余垃圾产生，同时引导公众优先选择可循环、可降解、易回收的商品。此外，通过政策激励与约束，推动企业与公众主动落实减量责任，实现生活垃圾产生量增速放缓甚至负增长。

三、技术优化：提升资源化利用率与二次污染控制技术

技术优化是提升生活垃圾资源化利用效能、防范二次污染的核心支撑，通过升级资源化利用核心技术、研发二次污染控制技术、推广智能化管控技术，破解资源化利用过程中的效率瓶颈与环境风险，推动生活垃圾资源化利用向高效化、

精细化、安全化方向发展。技术优化需结合现有技术水平与实际需求，聚焦关键环节精准发力，实现技术赋能与效能提升。

（一）提升资源化利用率技术

提升资源化利用率技术聚焦分类分拣、转化加工等关键环节，通过技术升级优化流程、提升效率，最大化挖掘生活垃圾的资源价值。在分类分拣环节，研发智能化分拣技术，结合人工智能、机器视觉、自动化分拣设备，提升可回收成分分拣精准度与效率，降低人工成本，减少可回收成分损耗与污染；针对混合垃圾，研发高效分选技术，分离不同成分，为后续资源化途径提供优质原料。

在转化加工环节，优化焚烧发电技术，通过改良焚烧炉结构、优化燃烧参数，提升热能转化效率，降低能耗；升级生物处理技术，研发高效微生物菌种，优化堆肥与厌氧发酵工艺，缩短处理周期，提升有机肥与沼气产量及品质；改进再生加工技术，提升可回收成分再生产品质量，拓宽再生原料应用场景，提升资源化附加值。同时，推动跨领域技术融合，构建“分选－转化－再生”一体化技术体系，提升整体资源化利用率。

（二）二次污染控制技术

二次污染控制技术是生活垃圾资源化利用的底线保障，针对资源化过程中可能产生的烟气、废液、废渣、异味等污染物，研发与应用精准防控技术，确保污染物达标排放，避免对生态环境与人体健康造成危害。不同资源化途径需针对性配备污染控制技术，形成全流程防控体系。

焚烧发电环节重点优化烟气净化技术，升级脱硝、脱硫、脱二噁英及重金属去除工艺，提升污染物去除效率，同时强化灰渣与渗滤液处理技术，确保各类污染物全面管控；生物处理环节研发高效除臭技术与废液处理技术，通过生物滤池、吸附等手段控制异味扩散，对发酵废液进行无害化处理后达标排放或循环利用；在回收再利用环节优化清洗、加工过程中的废水、废气处理技术，避免再生加工过程中产生二次污染。此外，建立常态化环境监测技术体系，实时监控污染物排放情况，及时排查风险隐患，确保污染控制措施落地见效。

（三）智能化管控技术应用

智能化管控技术为生活垃圾资源化利用提供高效管理支撑，通过信息化、数字化手段实现全流程精准管控，提升运行效率与管理水平，助力技术优化落地。构建生活垃圾资源化利用信息化管理平台，整合分类收集、运输、处理、资源化

利用等全环节数据，实现数据实时共享、全程追溯与动态监控，为管理决策提供数据支撑。

在设施运行方面，引入智能化管控系统，对焚烧炉、发酵罐、再生加工设备等核心设施的运行参数进行实时监测与自动调节，确保设施稳定运行与技术优化参数精准落地；在垃圾分类环节，推广智能分类投放设备，通过扫码、称重、积分等功能引导精准投放，同时实现投放数据实时统计与分析。智能化管控技术的应用，可有效提升资源化利用过程的精细化管理水平，降低人为干预风险，为技术优化与效能提升提供保障。

生活垃圾资源化利用是推动固体废物污染防治与生态文明建设的重要抓手，通过垃圾焚烧发电、生物处理、回收再利用等多元途径，结合分类收集与源头减量措施，辅以技术优化赋能，构建了“源头管控－多元利用－风险防控”的完整体系。从分类收集奠定基础，到多元资源化途径实现价值转化，再到技术优化提升效能与安全水平，生活垃圾资源化利用正逐步摆脱传统处置模式的局限，向绿色低碳、高效循环的方向转型。

第四节 工业固废综合利用

工业固废综合利用是践行“减量化、资源化、无害化”原则的重要载体，也是推动工业绿色转型、构建废弃物循环利用体系、实现“双碳”目标的关键路径。工业固废主要来源于采矿、冶金、电力、化工等行业，包括煤矸石、粉煤灰、冶炼废渣等大宗品类，产生量大、成分复杂，若处置不当易造成土壤占用、水体污染、大气扬尘等生态问题，制约工业可持续发展。当前，我国工业固废综合利用已从粗放式处置转向“规模化利用、高值化转化、政策化引导”的高质量发展阶段，通过明确利用方向、强化技术创新、完善政策激励，实现工业固废从“末端处置”到“资源循环”的转型，兼顾生态保护与产业升级。

一、利用方向：煤矸石、粉煤灰、冶炼废渣等工业固废的建材利用、土地复垦

工业固废综合利用方向以固废成分特性、区域需求及技术适配性为核心，形成“建材利用、土地复垦”两大主流路径，适配煤矸石、粉煤灰、冶炼废渣等大

宗工业固废的资源化转化。通过分类施策、因地制宜选择利用方向，既能实现固废减量化与无害化，又能替代原生资源、降低产业成本，构建“产废 - 利废”闭环生态。

（一）建材利用

建材利用是工业固废综合利用的核心方向，依托工业固废的物理化学特性，将其作为原材料或掺合料用于建材生产，实现“变废为料”，适配煤矸石、粉煤灰、冶炼废渣等多数大宗工业固废，具有利用规模大、技术成熟、产业链完善等优势，是当前工业固废消纳的主要途径。

不同类型工业固废的建材利用路径各有侧重：煤矸石可通过破碎、筛分后用于生产砖瓦、砌块、混凝土骨料等建材，热值较高的煤矸石还可作为燃料用于建材生产过程，实现能源与物质的双重利用；粉煤灰因具有活性效应、形态效应，可作为掺合料用于水泥、混凝土生产，既能降低水泥用量、节约资源，又能改善混凝土性能，同时可用于生产陶粒、加气混凝土等新型建材；冶炼废渣经无害化处理后，可用于生产道路基层材料、水泥原料、耐磨材料等，实现固废资源化与道路建设、建材生产的协同。建材利用需严格把控固废预处理环节，通过破碎、筛分、固化 / 稳定化等技术去除杂质、弱化有害特性，确保建材产品符合质量与环保标准，避免二次污染。

（二）土地复垦

土地复垦是针对采矿、冶炼等行业产生的工业固废，通过生态化处理后用于修复矿山、废弃厂区等破损土地的利用方向，核心是利用工业固废填充复垦区域、改良土壤质地，实现土地功能恢复与固废消纳的双重目标，适用于煤矸石、冶炼废渣等堆积量大、占地广的工业固废。

土地复垦需遵循“生态优先、因地制宜”原则，结合复垦土地的预期用途（耕地、林地、草地、工业用地等）制定差异化方案。复垦前需对工业固废进行无害化处理，去除重金属、有毒有害物质，或通过固化 / 稳定化技术降低其迁移风险，避免污染复垦区域土壤与地下水；复垦过程中，将处理后的工业固废按规范填充破损区域，分层压实、覆土改良，种植适配的植被或进行场地平整，恢复土地生态功能与利用价值。土地复垦不仅能有效消纳工业固废、减少土地占用，还能修复生态环境、提升区域生态韧性，是矿山生态治理与工业固废利用协同推进的重要路径。

二、技术创新：工业固废高值化利用技术

工业固废高值化利用技术是突破传统粗放式利用模式、提升固废资源附加值的核心支撑，通过技术研发与创新，从工业固废中提取有价成分、制备高附加值新型材料，推动工业固废利用从“低值消纳”向“高值转化”升级，破解固废资源化利用率低、附加值不高的瓶颈。

（一）有价金属提取技术

有价金属提取技术针对冶炼废渣、尾矿等富含贵金属、稀有金属的工业固废，通过湿法冶金、火法冶金、生物冶金等技术手段，提取其中的铜、铁、铝、稀土等有价金属，实现资源精准回收与高值利用，既提升固废资源化价值，又减少原生矿产资源开采压力。

不同提取技术适配不同类型工业固废与有价金属：湿法冶金通过溶剂浸出、分离提纯等工艺提取金属成分，具有选择性强、能耗较低、污染易控制等优势，适用于提取品位较低、成分复杂的工业固废中的有价金属；火法冶金通过高温熔炼、吹炼等工艺分离有价金属，适用于处理成分稳定、热值较高的工业固废，提取效率高、处理量大；生物冶金利用微生物代谢作用溶解工业固废中的有价金属，具有环境友好、成本低、能耗小等优势，适用于低品位、难处理工业固废的金属提取。提取过程中需强化废水、废渣处理，确保污染物达标排放，实现全流程清洁生产。

（二）新型材料制备技术

新型材料制备技术以工业固废为核心原料，通过改性、复合、合成等技术手段，制备高性能、高附加值的新型材料，拓宽工业固废利用场景，提升资源化附加值，是工业固废高值化利用的重要发展方向。

核心发展方向包括多个维度：利用粉煤灰、煤矸石等制备新型墙体材料、保温隔热材料，通过改性处理提升材料性能，替代传统建材；以冶炼废渣为原料制备微晶玻璃、陶瓷材料等，用于高端建筑、电子设备等领域，提升固废资源附加值；将工业固废与高分子材料、无机非金属材料复合，制备新型复合材料，用于交通、市政、环保等领域，实现固废资源的高端化利用。新型材料制备技术需依托材料科学与工业固废特性的深度融合，通过优化工艺参数、研发专用助剂，解决固废改性难、材料性能不稳定等问题，推动技术产业化应用。

三、政策激励：工业固废综合利用的税收优惠与补贴政策

政策激励是推动工业固废综合利用规模化、高质量发展的重要保障，通过税收优惠、财政补贴、绿色金融支持等政策手段，降低企业固废利用成本、提升企业参与积极性，引导社会资本投入固废综合利用产业，构建“政策引导、市场驱动、企业主导”的发展格局。

（一）税收优惠政策

税收优惠政策通过增值税、企业所得税、环境保护税等税种的减免、即征即退等措施，降低工业固废综合利用企业的税负压力，激励企业加大固废利用投入，是政策激励体系的核心内容，政策实施严格遵循国家资源综合利用相关目录与标准。

增值税方面，对利用废渣生产砖瓦、水泥等建材产品，提供垃圾处理、工业废气处理等劳务的企业，实行增值税即征即退政策，退税率根据固废利用类型与标准确定；对符合条件的生态保护和环境治理业企业，可按月全额退还增值税留抵税额。企业所得税方面，企业以《资源综合利用企业所得税优惠目录》规定的工业固废作为主要原材料，生产国家非限制和禁止且符合标准的产品取得的收入，减按 90% 计入收入总额；企业购置并实际使用符合条件的环境保护专用设备，其投资额的 10% 可抵免当年应纳税额，不足抵免部分可结转后续年度。环境保护税方面，对纳税人综合利用的工业固废，符合国家和地方环保标准的，免征环境保护税，引导企业主动开展固废资源化利用。

（二）补贴与金融支持政策

财政补贴与绿色金融支持政策通过资金扶持、信贷优惠等方式，为工业固废综合利用企业提供资金保障，破解企业融资难、融资贵问题，推动固废利用项目落地实施与技术创新。

财政补贴方面，中央与地方财政设立工业固废综合利用专项基金，对固废高值化利用技术研发、示范项目建设、产业链完善等给予资金支持；对开展工业固废源头减量、清洁生产、零填埋技术应用的企业，给予专项补贴，引导企业从源头减少固废产生。绿色金融方面，推动金融机构推出“无废贷”等专项绿色信贷产品，通过利率优惠、额度倾斜等方式支持固废综合利用企业发展；鼓励企业发行绿色债券，募集资金用于固废利用项目建设与技术研发；将工业固废处理处置

与资源化利用纳入绿色融资统计体系，引导银行保险机构加大支持力度，构建多元化金融支撑体系。

工业固废综合利用是工业绿色转型与生态文明建设的重要抓手，通过建材利用、土地复垦等规模化利用方向消纳固废，依托高值化技术创新提升资源附加值，借助税收优惠与补贴政策强化引导激励，构建了“利用有路径、技术有支撑、政策有保障”的完整体系。从传统粗放式利用到高值化精准转化，从企业自发探索到政策引导推动，工业固废综合利用正逐步成为推动资源循环利用、实现“双碳”目标的重要产业支撑。

第五节 固体废物污染防治政策与法规

固体废物污染防治政策与法规是构建全链条污染防控体系、推动固体废物治理规范化、绿色化发展的核心制度支撑，为践行“减量化、资源化、无害化”原则提供刚性约束与方向指引。随着固体废物治理进入“系统管控、精准治理、循环利用”的新阶段，我国已逐步构建起以核心法律为引领、专项法规为补充、关键制度为抓手、发展导向为目标的完整政策法规体系，有效破解固体废物产生量大、成分复杂、治理碎片化等难题。该体系既明确了各方主体治理责任，又规范了全流程管控要求，同时引导产业转型与生态保护协同推进，为深入打好污染防治攻坚战、建设“无废城市”提供坚实保障。

一、法规框架：《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》《危险废物经营许可证管理办法》

我国固体废物污染防治法规框架以《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》为基础性法律，以《危险废物经营许可证管理办法》等专项法规、规章为补充，构建“上位法统领、下位法细化、专项法聚焦”的层级化体系。该框架既覆盖各类固体废物治理的共性要求，又针对危险废物等重点品类强化特殊管控，同时衔接循环经济、生态保护等领域法规，形成全方位、多层次的法治保障网络。

（一）核心基础性法律：《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》

《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》作为固体废物污染防治领域的根本大法，自1996年施行以来历经多次修订完善，逐步实现从“末端处置”向

“源头减量、过程管控、末端利用”全链条治理转型，从“单一品类管控”向“全域协同治理”升级，确立了整个法规体系的核心原则、制度框架与责任体系。修订后的法律共6章91条，进一步强化了污染者责任，完善了重点领域治理要求，加大了违法行为惩戒力度，为固体废物治理提供了根本遵循。

其核心作用体现在三个维度：一是确立核心治理原则，明确“减量化、资源化、无害化”为根本方针，强化污染者依法负责原则，明确产品生产者、销售者、进口者、使用者对其产生的固体废物承担污染防治责任，同时将循环经济理念融入治理全过程，鼓励可再生产品与可重复利用产品的推广使用。二是构建全品类管控体系，覆盖工业固体废物、生活垃圾、危险废物、农业固体废物等各类品类，针对不同固体废物的特性与治理需求，细化污染防治措施，尤其强化危险废物的特殊管控要求，明确危险废物管理计划、申报登记、处置利用等全流程规范。三是强化刚性约束与惩戒，完善法律责任条款，对非法倾倒、擅自转移、违规处置固体废物等行为加大行政处罚力度，增加环境污染损害赔偿诉讼中举证责任倒置、法律援助等规定，提升法律威慑力，倒逼各方主体依法履行治理责任。

（二）专项法规与配套规章：《危险废物经营许可证管理办法》

《危险废物经营许可证管理办法》作为危险废物治理领域的核心专项法规，是《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》在危险废物经营管控环节的细化延伸，聚焦危险废物收集、贮存、利用、处置等经营活动的规范化管理，通过经营许可制度筑牢危险废物治理的安全防线，防范危险废物污染风险。该办法与《国家危险废物名录》《危险废物鉴别标准》等配套文件衔接，形成危险废物经营管控的完整制度闭环。

其核心内容包括三个方面：一是明确许可管理范围与权限，规定从事危险废物收集、贮存、处置经营活动的单位，需向县级以上人民政府生态环境主管部门申请领取经营许可证；从事危险废物利用经营活动的单位，需向国务院生态环境主管部门或省级人民政府生态环境主管部门申请许可，严禁无许可或超许可范围从事危险废物经营活动。二是规范经营活动要求，明确危险废物经营单位需具备相应的设施、设备、专业技术人员与环境应急预案，严格按照危险废物特性分类收集、贮存、运输、处置，禁止混合处置性质不相容且未经安全性处置的危险废物，贮存危险废物不得超过规定期限，确需延期的需报经原批准部门批准。三是强化许可监管与问责，明确生态环境主管部门对危险废物经营许可证的发放、使

用、变更等环节的监管职责，对违规发放许可、未履行监管职责的行为依法追究，对无证经营、超范围经营等违法行为严厉查处，确保危险废物经营活动全程合规。

二、监管制度：固体废物申报登记、转移联单、经营许可制度

固体废物监管制度是政策法规落地见效的核心载体，通过建立规范化、常态化、全链条的管控机制，将法律要求转化为具体治理行动。申报登记、转移联单、经营许可三大制度相互衔接、协同发力，分别聚焦固体废物产生、流转、经营三大关键环节，构建“源头可查、流向可追、经营可控”的闭环监管体系，有效防范固体废物污染风险。

（一）申报登记制度

申报登记制度是固体废物源头管控的核心制度，通过要求产废单位如实申报固体废物产生、贮存、流向、处置等信息，实现固体废物源头信息可追溯、污染负荷可管控，为后续监管与治理决策提供数据支撑。该制度覆盖工业固体废物、危险废物等重点品类，实行“如实申报、动态更新、监管核查”的运行机制。

制度实施重点包括两个方面：一是明确申报主体与内容，产生工业固体废物的单位，需按照规定向所在地县级以上生态环境主管部门提供工业固体废物的种类、产生量、流向、贮存、处置等有关资料；产生危险废物的单位，需制定危险废物管理计划，详细申报危险废物的种类、产生量、流向、贮存、处置等信息，确保申报内容真实、准确、完整。二是强化申报监管与应用，生态环境主管部门对产废单位的申报信息进行核查，对瞒报、谎报、漏报、拒报等行为依法查处，同时将申报信息作为污染负荷管控、环境执法、政策扶持的重要依据，实现源头管控与精准监管的协同。

（二）转移联单制度

转移联单制度是固体废物流转环节管控的关键制度，旨在通过标准化联单记录固体废物转移全过程信息，实现固体废物跨区域、跨环节流转的可追溯，破解固体废物非法转移、擅自倾倒等治理难题，尤其适用于危险废物等风险较高的固体废物转移管控。该制度与固体废物跨省转移审批制度衔接，形成流转环节的全流程管控。

核心实施要求包括三个维度：一是规范联单使用流程，转移危险废物的单位

必须按照国家规定填写危险废物转移联单，详细记录危险废物的种类、数量、产生单位、接收单位、运输单位、处置方式等信息，联单随固体废物同步流转，实现“一物一单、全程跟踪”。二是严格转移审批程序，转移固体废物出省、自治区、直辖市行政区域贮存、处置的，需向移出地省级生态环境主管部门提出申请，经接收地省级生态环境主管部门同意后方可批准转移；危险废物转移需向移出地设区的市级以上生态环境主管部门申请，途经其他行政区域的，需及时通知沿途相关生态环境主管部门。三是强化联单监管核查，生态环境主管部门对转移联单的使用、流转情况进行常态化核查，严厉打击不按照规定填写联单、未经批准擅自转移固体废物等违法行为，确保流转环节合规可控。

（三）经营许可制度

经营许可制度是固体废物处置利用环节管控的底线制度，通过对固体废物经营单位的资质审核与许可管理，确保经营单位具备相应的技术能力、设施条件与环保水平，防范经营过程中产生二次污染，是衔接固体废物产生与末端处置的关键管控节点，对危险废物经营活动的管控尤为严格。

制度核心包括两个方面：一是严格资质审核标准，申请固体废物经营许可的单位，需具备符合国家环保标准的经营设施、设备与场所，配备专业技术人员，制定完善的环境应急预案与污染防治措施，危险废物经营单位还需具备相应的安全防护设施与废物分类贮存条件，确保经营活动安全环保。二是强化许可后监管，生态环境主管部门对经营单位的许可执行情况进行常态化监管，核查其经营活动是否符合许可规定、污染防治措施是否落实到位，对违规经营、超标排放等行为依法查处，情节严重的吊销经营许可证；同时要求经营单位将收集、贮存、处置危险废物的场所、设施、设备等转作他用时，必须经过消除污染的处理方可使用，严防二次污染。

三、发展导向：推动“无废城市”建设与固体废物循环利用体系构建

固体废物污染防治政策法规的发展导向聚焦高质量发展目标，通过政策引导与制度设计，推动固体废物治理从“污染防控”向“循环利用、生态协同”升级，核心聚焦“无废城市”建设与固体废物循环利用体系构建两大方向，兼顾短期治理成效与长期生态价值，推动形成绿色生产生活方式与产业发展模式。

（一）推动“无废城市”建设

“无废城市”建设是固体废物污染防治的重要发展目标，旨在通过系统性谋划与全链条治理，推动城市固体废物产生量最小化、资源化利用最大化、无害化处置最优化，构建“源头减量、过程管控、末端利用”的城市固体废物治理体系，实现城市发展与生态保护的协同。相关政策通过试点示范、制度创新、要素保障等措施，引导“无废城市”建设有序推进。

建设重点包括三个维度：一是强化源头减量管控，严格落实产业、环保、节能政策，依法淘汰落后产能，推动工业企业推行清洁生产与绿色设计，降低工业固体废物产生强度；推进建筑垃圾分类处理，推广绿色施工与装配式建筑，强化建筑工地固体废物源头管控；严格落实塑料制品规范使用和减量要求，加快快递包装绿色转型，治理商品过度包装问题。二是完善分类处置体系，深化生活垃圾分类与废旧物资回收网点“两网融合”，发展“互联网+回收”模式，提升再生资源回收效率；因地制宜配置固体废物分类收集、转运、处置设施，优化处置结构，压减填埋规模，提升无害化处置水平。三是开展重点领域整治，深入开展非法倾倒处置固体废物专项整治，排查整治生活垃圾填埋场、历史遗留固体废物堆存场所等环境隐患，“一场一策”推进问题整改，遏制环境污染风险。

（二）构建固体废物循环利用体系

构建固体废物循环利用体系是推动“减量化、资源化、无害化”原则落地的核心路径，旨在通过技术创新、产业链完善、政策激励等手段，打通固体废物“产生—回收—利用—再生”闭环，提升固体废物资源化利用水平，减少原生资源消耗，推动形成循环经济发展模式。相关政策聚焦大宗固体废弃物、再生资源等重点领域，强化系统谋划与协同推进。

体系构建重点包括三个方面：一是提升大宗固体废弃物综合利用能力，聚焦冶炼渣、尾矿、煤矸石、建筑垃圾等大宗品类，推动有价值组分高效提取及整体利用，因地制宜拓展多元化利用途径，促进尾矿就近充填回填，推动重点行业固体废物产生量与综合消纳量动态平衡。二是完善再生资源循环利用体系，强化再生资源综合利用行业规范管理，开展“城市矿产”示范基地升级行动，深入实施生产者责任延伸制度，引导电器电子产品、汽车、动力电池等生产企业参与回收利用，鼓励“互联网+二手”模式发展与再制造产业升级。三是强化再生材料应用推广，建立完善再生材料标准和认证制度，研究实施再生材料碳足迹认证，引导

生产企业提高再生材料应用比例，将符合条件的再生材料和产品纳入政府绿色采购范围，推动再生材料规模化、规范化应用。

固体废物污染防治政策与法规体系作为生态环境保护制度的重要组成部分，历经多年发展已形成“法规引领、制度管控、导向明确”的完整框架，为固体废物全链条治理提供了坚实保障。从《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》奠定法治基础，到申报登记、转移联单、经营许可制度筑牢监管防线，再到“无废城市”建设与循环利用体系构建指引发展方向，三者协同发力，推动固体废物治理从传统末端处置向绿色循环治理转型。随着固体废物治理需求的不断升级，政策法规体系需进一步强化协同衔接、优化制度设计、提升执行效能，结合技术创新与产业发展需求持续完善。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 信息与文献 参考文献著录规则:GB/T 7714-2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [2] 国家环境保护总局. 环境监测技术规范 第一册 总则[S]. 北京:中国环境科学出版社,2003.
- [3] 中国环境监测总站. 环境空气质量自动监测技术规范:HJ/T 193-2005[S]. 北京:中国环境科学出版社,2005.
- [4] 中国环境监测总站. 地表水和污水监测技术规范:HJ/T 91-2002[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [5] 中国环境监测总站. 土壤环境监测技术规范:HJ/T 166-2004[S]. 北京:中国环境科学出版社,2004.
- [6] 国家环境保护总局. 声环境质量标准:GB 3096-2008[S]. 北京:中国环境科学出版社,2008.
- [7] 国家环境保护总局. 电磁辐射防护规定:GB 8702-2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.
- [8] 国家环境保护总局. 电离辐射防护与辐射源安全基本标准:GB 18871-2002[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [9] 王英健. 环境监测技术与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2021.
- [10] 刘凤枝. 土壤监测技术规范解读[M]. 北京:中国农业出版社,2020.
- [11] 张远航. 大气污染控制工程[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2021.
- [12] 高廷耀,顾国维,周琪. 水污染控制工程[M]. 5版. 北京:高等教育出版社,2020.
- [13] 王琪. 固体废物处理与处置[M]. 北京:高等教育出版社,2022.
- [14] 中国环境监测总站. 环境监测质量保证手册[M]. 3版. 北京:中国环境科学出版社,2019.
- [15] 刘文清,陈臻懿,刘建国,等. 大气环境监测技术研究进展[J]. 环境科学学报,2022,42(5):1-12.

- [16] 赵文涛,王业耀,吴丰昌,等. 水环境监测技术现状与发展趋势[J]. 中国环境监测,2022,38(2):1-10.
- [17] 李发生,谷庆宝,周友亚,等. 土壤污染监测与风险评估技术研究[J]. 环境科学研究,2021,34(8):1853-1862.
- [18] 王格慧,张军,王体健,等. 大气污染源解析技术研究进展[J]. 环境科学学报,2020,40(10):3407-3420.
- [19] 王洪臣. 城市污水处理厂运行控制与优化[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2022.
- [20] 周启星,宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2021.
- [21] 中华人民共和国生态环境部. 生态环境监测规划纲要(2020-2035年) [Z]. 2020-01-06.
- [22] 中华人民共和国生态环境部. 国家大气污染防治行动计划[Z]. 2013-09-10.
- [23] 中华人民共和国生态环境部. 水污染防治行动计划[Z]. 2015-04-16.
- [24] 中华人民共和国生态环境部. 土壤污染防治行动计划[Z]. 2016-05-28.
- [25] 中国环境科学学会. 中国环境监测发展报告(2024)[R]. 北京:中国环境科学出版社,2024.
- [26] 中国环境科学研究院. 中国污染防治技术政策汇编(2024)[R]. 北京:中国环境科学出版社,2024.
- [27] 环境保护部环境规划院. 全国生态环境保护“十四五”规划纲要解读[R]. 北京:中国环境科学出版社,2021.
- [28] GITZEN R A, MILLSPAUGH J J, COOPER A B, et al. Design and analysis of long-term ecological monitoring studies[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2012.
- [29] TAO F, ZHANG M, LIU A. Digital Twin-Driven Smart Environmental Monitoring: A Review[J]. Journal of Environmental Management,2022,310:114768.