

Research on the Discussion of Water Pollution Prevention and Environmental Monitoring Issues

水污染防治及环境监测问题探讨研究

李汗青 李锋俊 李玉 主编



International
Union of Scientific and
Technological Scholars

CIP INFORMATION

Title: Research on the Discussion of Water Pollution Prevention and Environmental Monitoring Issues

题目：水污染防治及环境监测问题探讨研究

Author: Hanqing Li, Fengjun Li, Yu Li

作者：李汗青 李锋俊 李玉

ISBN: 979-8-90040-407-3

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 the Discussion of Water Pollution Prevention and Environmental Monitoring Issues

水污染防治及环境监测问题探讨研究

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: 14.75

Word Counts: 200.000

Edition: First edition in September 2026

Printing: First printing in September 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.

编委会 EDITORIAL BOARD

主 编

- 李汗青 内蒙古中昕生态环保技术有限公司
李锋俊 重庆市二零八地质环境研究院有限公司
李 玉 山东文远环保科技股份有限公司

副主编

- 黄礼钻 福建省晋江圳源环境科技有限责任公司
杨兰兰 杭州一达环保技术咨询服务有限公司
梁军普 河南省禹志建设工程有限公司

内容简介 **ABSTRACT**

本书立足全球与中国水环境现状及挑战，系统梳理水污染防治与环境监测的核心理论、技术方法与实践路径，构建了“理论—技术—管理—前沿”的完整知识体系。全书共十章，涵盖水环境问题概述与理论基础，详细解析物理化学、有机与生物性水污染的类型、来源及针对性防治技术，深入探讨城市、工业、农村等多场景水污染防治工程的系统设计与管理策略。同时，聚焦水环境监测体系构建、常规指标分析、现代监测技术与仪器应用，阐述监测数据管理与信息化平台建设，完善水环境质量评价与风险评估体系，兼顾环境工程的系统实施与综合管理，并展望新技术革命与碳中和背景下的行业发展方向。本书兼顾理论深度与实践指导性，整合传统技术与前沿理念，可为环境工程、环境监测领域的科研人员、从业人员及相关专业师生提供全面的参考，助力推动水污染防治与环境监测行业的规范化、智能化、绿色化发展，为水环境治理与生态保护提供理论支撑和实践借鉴。



前言

PREFACE

水是生命之源、生态之基，维系着人类生存发展与自然生态平衡。当前，全球水环境面临严峻挑战，我国工业化、城市化进程加快，工业废水、生活污水、农业面源污染等多重压力叠加，导致水体污染类型日趋复杂，水污染防治与环境监测任务愈发艰巨。构建科学完善的污染防治体系、提升监测技术水平，成为破解水环境困境、推动生态文明建设的关键举措。

本书立足水污染防治与环境监测领域的前沿需求，以“理论—技术—管理—前沿”为主线，系统梳理水环境现状与污染来源，全面阐述物理化学、有机生物性水污染的防治技术，深入探讨环境监测体系构建、现代监测技术应用、数据管理与信息化建设等核心内容，兼顾工程实践与管理创新，展望面向碳中和的行业发展方向。

本书内容涵盖十大章节，逻辑清晰、重点突出，融合理论性与实践性，既解析基础原理与政策框架，也聚焦技术应用与工程优化，可为环境工程、环境监测领域的科研人员、从业人员提供参考，也能为高校相关专业教学、政府环境管理工作提供支撑，助力推动水污染防治提质增效，实现水环境可持续发展。

本书共 10 章，李汗青负责第 1-5 章，共 10 万字；李锋俊负责第 6-8 章，共 6 万字；李玉负责第 9-10 章，共 4 万字；黄礼钻、杨兰兰、梁军普参与编写。

作者

目录 CONTENTS

第一章 水环境问题概述与理论基础	1
第一节 全球与中国水环境现状与挑战	1
第二节 水污染的主要类型与来源解析	6
第三节 水污染防治的基本原理与政策框架	11
第四节 环境监测在水污染防治中的角色与意义	17
第二章 物理化学水污染及其防治技术	23
第一节 悬浮物与浊度污染的控制技术	23
第二节 重金属污染的迁移转化与治理方法	29
第三节 无机化学污染（酸、碱、盐）的防治策略	35
第四节 新兴物理化学处理技术应用探讨	40
第三章 有机与生物性水污染及其防治对策	47
第一节 持久性有机污染物的环境行为与风险	47
第二节 营养盐污染与水体富营养化防控	53
第三节 病原微生物污染及消毒技术比较	58
第四节 生物技术在有机废水处理中的应用	63
第四章 水污染防治工程系统与管理	69
第一节 城市污水处理工艺系统设计与优化	69
第二节 工业废水预处理与全过程控制管理	74
第三节 农村及面源污染综合治理模式	80
第四节 水环境修复技术与生态工程实践	85
第五章 水环境监测体系构建与常规指标分析	91
第一节 水环境监测网络设计与采样规范	91
第二节 理化指标（pH、DO、COD、BOD 等）监测技术	97
第三节 营养盐与有机污染物实验室分析方法	102
第四节 监测质量保证与控制体系	107

第六章 现代环境监测技术与仪器应用·····	113
第一节 光谱与色谱技术在污染物检测中的应用·····	113
第二节 生物传感与快速检测技术发展·····	118
第三节 在线自动监测系统构建与运行维护·····	124
第四节 遥感与 GIS 技术在大尺度水环境监测中的应用·····	129
第七章 水环境质量评价与风险评估·····	135
第一节 水环境质量评价标准与指数方法·····	135
第二节 水污染生态风险评估模型与应用·····	140
第三节 健康风险评估与饮用水安全评价·····	146
第四节 基于监测数据的流域水环境承载力分析·····	151
第八章 监测数据管理与信息化平台建设·····	157
第一节 环境监测数据的规范化管理与数据库建设·····	157
第二节 大数据与人工智能在数据分析中的初步应用·····	163
第三节 水环境信息发布与公众参与平台设计·····	169
第四节 “智慧环保”背景下的监测预警系统展望·····	174
第九章 环境工程的系统实施与综合管理·····	181
第一节 环境工程项目全生命周期管理·····	181
第二节 多尺度污染控制的工程系统集成与优化·····	187
第三节 基于标准与法规的工程合规性与效能设计·····	192
第四节 环境工程中的多元共治与投融资模式创新·····	197
第十章 环境工程前沿与未来发展方向·····	203
第一节 新技术革命驱动下的环境工程范式变革·····	203
第二节 面向碳中和的环境工程协同路径与资源化·····	208
第三节 应对复杂风险的韧性环境系统构建·····	214
第四节 未来环境工程师的知识体系与跨学科创新·····	219
参考文献·····	225

第一章 水环境问题概述与理论基础

第一节 全球与中国水环境现状与挑战

水环境是地球生态系统的核心，是维系人类生存发展和社会经济可持续运行的基础资源，直接关系生态安全、公共健康与国家发展全局，也是实现人与自然和谐共生的重要前提。水作为生命之源、生产之要、生态之基，支撑着农业、工业、日常生活及生态维系等各类活动。随着工业化、城市化加速，人类活动对水环境的干预加剧，污染物无序排放、水资源过度开发等导致水污染从区域性问题演变为全球性生态危机，制约各国可持续发展。已有研究显示，全球半数以上地表水体受污染，引发水资源短缺、生态退化等问题，对各国环境治理体系提出多维度考验，需各国协同应对。

全球水污染呈现范围广、类型杂、治理难的特征，核心是污染物排放与水体承载力失衡。发达国家曾经历严重水污染，经长期治理实现水质改善，但仍面临新兴污染物等新挑战；发展中国家因工业化加快、治理体系不完善等，水污染问题日益突出，地表与地下水污染制约其发展。此外，水环境污染具有跨区域、跨流域传导性，跨界水体污染需多国协同治理，而全球环境治理体系不完善进一步增加了治理难度。

中国作为人口大国和发展中国家，经济快速发展中面临严峻水环境压力，水资源供需矛盾突出且受水污染加剧影响。党的十八大以来，我国将生态文明建设纳入总体布局，加大治理投入与专项行动，水环境质量实现阶段性改善，成效获得国际认可。但我国水环境问题的长期性、复杂性未根本改变，仍处于污染治理攻坚期与生态修复关键期，与群众需求和生态文明建设要求仍有差距，后续需持续精准发力。

一、全球水环境的主要现状与突出问题

全球水环境污染的核心症结在于污染物排放总量超过水体环境承载力，且污

染类型不断迭代升级，传统污染与新兴污染交织叠加、相互影响，进一步提升了治理难度。传统的化学需氧量、氨氮等常规污染物尚未得到完全控制，部分区域排放总量仍处于较高水平，尤其是在一些工业化程度较高、治理水平较低的地区，常规污染物的超标排放仍是导致水体水质恶化的主要原因。而重金属、持久性有机污染物等有毒有害污染物的环境累积效应逐步显现，其长期残留、生物富集特性对生态系统和人类健康构成潜在威胁，这类污染物难以通过水体自然净化过程降解，会在水体、沉积物、水生生物体内不断累积，最终通过食物链传递给人类，引发各类健康风险。与此同时，新型污染物如微塑料、药品和个人护理品等的环境风险日益凸显，这类污染物来源广泛，涵盖日常生活、工业生产、医疗活动等各个领域，且检测难度大、治理技术尚不完善，目前全球范围内对这类污染物的环境行为、迁移转化规律以及治理技术的研究仍处于探索阶段，给全球水环境治理带来了新的挑战与考验。

地表水体污染是全球水环境问题的主要表现形式，也是对人类生产生活影响最为直接的污染类型。据相关数据统计，全球约 30% 的河流、40% 的湖泊受到严重污染，无法满足人类饮用、农业灌溉等基本需求，部分污染严重的水体甚至丧失了基本的生态功能。在发展中国家，由于污水处理设施覆盖率低、处理技术落后，约有 70% 的工业废水和生活污水未经处理直接排入地表水体，导致水体富营养化、黑臭现象频发，不仅破坏了水生生态系统的完整性，导致水生生物多样性减少，还直接威胁着周边居民的饮用水安全，引发各类水媒疾病的传播。例如，部分热带地区的河流由于接纳大量农业面源污染和生活污水，水体中氮、磷含量严重超标，蓝藻水华频繁爆发，导致水生生物大量死亡，水体生态功能丧失，同时蓝藻产生的藻毒素还会污染饮用水源，对居民健康构成严重威胁。即使在一些发达国家，虽然污水处理设施较为完善，但由于老旧管网渗漏、突发污染事件等原因，地表水体污染问题也时有发生，治理工作难以一蹴而就。

地下水污染问题同样不容忽视，且由于其隐蔽性强、修复难度大、周期长，已成为全球水环境治理的薄弱环节，其危害具有长期性和潜伏性。全球范围内，地下水污染主要来源于工业废水渗漏、农业化肥农药过量使用、生活垃圾填埋渗滤液渗透、畜禽养殖废弃物污染等多个方面，其中重金属、挥发性有机物等污染物的污染范围不断扩大，部分地区地下水水质已不符合饮用水标准，严重影响居民健康。已有研究表明，地下水污染的修复成本远高于地表水污染，且修复周期

往往需要数十年甚至上百年的时间，一旦地下水受到污染，短期内难以恢复，这也使得地下水污染治理成为全球水环境治理的重点和难点。此外，地下水与地表水存在密切的水力联系，地下水污染会通过补给作用影响地表水质量，形成“地下水-地表水”协同污染的局面，进一步加剧水环境问题的复杂性。

此外，全球气候变化对水环境的影响日益显著，进一步加剧了水环境问题的复杂性，成为全球水环境治理不可忽视的重要因素。全球气温升高导致冰川融化、降水分布不均，部分地区出现极端干旱、洪涝灾害，使得水资源时空分布更加不均衡，水体稀释自净能力下降，间接加剧了水污染程度。极端干旱天气会导致河流水量减少、水位下降，污染物浓度升高，而洪涝灾害则会携带大量地表污染物进入水体，造成水体水质急剧恶化。同时，海平面上升导致沿海地区地下水咸化，进一步压缩了可用淡水资源量，给沿海地区的水环境安全带来了新的威胁，尤其是在一些地势低洼的沿海城市，地下水咸化问题已成为制约当地水资源利用的重要因素。部分研究倾向于认为，气候变化与水污染问题相互交织，形成了“恶性循环”，气候变化加剧水污染，而水污染又会影响生态系统的调节功能，进一步加剧气候变化的影响，若不采取有效干预措施，将进一步威胁全球水资源安全与生态平衡。

二、中国水环境的现状与阶段性特征

中国地域辽阔，地形地貌复杂，水资源时空分布不均的特征尤为突出，南方水资源丰富，北方水资源短缺，人均水资源量仅为世界平均水平的四分之一，属于水资源短缺国家，且水资源分布与人口、经济发展布局不相匹配，进一步加剧了水资源供需矛盾。水资源短缺与水污染问题相互叠加、相互影响，构成了中国水环境治理的双重挑战，也制约着农业、工业等相关产业的高质量发展，影响着人民群众的生活质量。近年来，随着“水十条”“河长制”“湖长制”等一系列政策措施的深入实施，以及环保投入的持续加大，中国水环境治理力度持续提升，水环境质量得到显著改善，呈现出“总体改善、局部向好、持续提升”的阶段性特征，人民群众对优质水环境的获得感、幸福感不断增强。但这种改善是阶段性的，尚未形成稳定向好的长效机制，各类水环境问题仍需持续关注、重点治理。

从流域水质来看，中国主要流域如长江、黄河、珠江、松花江、淮河、海河、辽河等的水质优良比例持续提升，劣Ⅴ类水体比例大幅下降，流域生态环境持续

改善。以长江流域为例，经过多年治理，长江干流水质连续多年保持优良，支流水质持续改善，水生生物多样性逐步恢复，长江经济带生态环境质量发生了历史性变化，“共抓大保护、不搞大开发”的理念已深入人心，各类污染治理与生态修复工程有序推进。黄河流域通过实施控源截污、生态修复、水资源调配等措施，水质稳步提升，流域生态环境持续向好，有效保障了黄河流域的生态安全与经济社会发展。珠江流域水质总体保持优良，大部分河段能够满足水体功能要求，为华南地区的经济社会发展提供了有力的水资源支撑。但同时，部分流域仍存在水质波动、局部污染反弹等问题，尤其是一些中小流域、农村流域，由于治理设施不完善、监管力度不足、资金投入有限，水污染问题依然突出，成为制约水环境质量持续改善的薄弱环节。

（一）城市与工业水污染治理成效显著

中国城市污水处理能力得到大幅提升，截至目前，城市污水处理率已超过95%，污水处理设施的运行稳定性、处理效能不断提高，生活污水经处理后达标排放，对水环境的污染得到有效控制，城市黑臭水体整治取得显著成效，绝大多数城市黑臭水体已基本消除，城市水环境面貌得到明显改善。工业水污染治理方面，通过实施工业企业排污许可制度、重点行业专项整治行动，严格管控化工、造纸、印染、电镀、焦化等重点行业的废水排放，推动企业开展清洁生产、技术改造，推广先进的废水处理技术，工业废水达标排放率显著提升，工业污染源得到有效遏制，重点行业水污染治理水平得到大幅提升。但需要注意的是，部分中小企业由于环保意识薄弱、治理设施简陋、运营成本较高、监管难度大等原因，仍存在偷排、漏排、超标排放等现象，工业水污染的潜在风险依然存在，仍是后续治理的重点领域。同时，工业废水处理过程中产生的污泥处置问题，也成为工业水污染治理的衍生挑战，若处置不当，可能会造成二次污染。

（二）农村与面源水污染问题凸显

与城市水环境治理成效相比，中国农村水环境治理相对滞后，农村生活污水、农业面源污染已成为当前水污染治理的重点和难点，也是制约水环境质量持续改善的关键因素。农村地区由于人口分散、经济发展水平相对较低，缺乏完善的污水处理设施，大量生活污水直接排入周边水体，部分农村地区甚至没有基本的污水收集设施，生活污水随意倾倒、排放，导致农村河流、池塘水质恶化，黑臭现象较为普遍，严重影响农村生态环境和居民生活质量。农业面源污染方面，化肥、

农药的过量使用,以及畜禽养殖废弃物的无序排放,导致水体中氮、磷含量超标,加剧了水体富营养化,尤其是在农业集约化程度较高的地区,面源污染对水环境的影响更为突出。此外,农村生活垃圾、农业废弃物的随意堆放,也会通过雨水冲刷等方式进入水体,造成水体污染,进一步加剧农村水环境问题。农村面源污染具有分散性、隐蔽性、随机性等特点,治理难度较大,需要构建多元化的治理模式,加大资金投入与技术支持。

地下水污染问题在我国也呈现出“点多面广、隐患突出”的特点,对居民饮用水安全构成严重威胁。华北、西北等地区由于地下水超采严重,形成了大面积的地下漏斗区,导致周边污染物更容易渗透到地下水中,加之工业污染、农业污染的持续渗透,地下水污染范围不断扩大,部分地区地下水重金属、挥发性有机物、硝酸盐等含量超标,无法满足饮用水标准。此外,我国部分地区的饮用水水源地保护仍存在薄弱环节,水源地周边污染源尚未完全清除,部分水源地存在风险隐患,饮用水安全保障面临一定压力。地下水污染的治理难度大、周期长,需要长期投入大量的人力、物力、财力,构建完善的地下水监测与治理体系,逐步改善地下水水质。

中国水环境治理已取得阶段性成效,但水污染问题的长期性、复杂性尚未根本改变,各类污染物排放总量仍处于较高水平,水体生态修复仍需持续发力。随着中国经济社会的持续发展,新型污染物、跨界污染、农业面源污染等新问题、新挑战不断涌现,进一步增加了水环境治理的难度。同时,不同区域水环境治理水平存在差异,部分地区治理能力不足、监管不到位,导致水污染问题反复出现,这些都需要在后续治理工作中加以解决。

水环境问题的解决是一项系统性、长期性工程,涉及污染治理、生态修复、政策监管、技术创新、公众参与等多个方面,不仅需要完善的治理技术与政策体系作为支撑,更需要明确的理论指导与系统的监测支撑,三者协同发力才能实现水环境质量的持续改善。当前,全球范围内对水环境问题的研究不断深入,水污染防治、环境监测相关理论体系逐步完善,形成了一系列成熟的治理技术与管理经验,但针对不同区域、不同类型水污染的个性化治理理论与技术仍需进一步探索、优化。中国作为水环境治理的重要参与者和贡献者,需要立足自身国情,充分借鉴国际先进治理经验,结合国内不同流域、不同区域的水环境特征,构建符合中国实际的水污染防治与环境监测理论体系,为水环境治理工作提供科学、有

力的支撑。这也是本书开展水污染防治及环境监测问题探讨的核心出发点，旨在通过系统梳理相关理论与技术，全面分析当前水环境治理的重点难点问题，提出切实可行的解决方案与优化路径，为中国水环境治理事业的高质量发展提供参考与借鉴，推动实现水环境的可持续利用与生态系统的良性循环。

第二节 水污染的主要类型与来源解析

水污染是指因人类活动或自然过程导致污染物进入水体，改变水体原有理化与生物特性，进而影响水资源利用价值、危害生态环境与人类健康的现象。从污染性质与污染物形态出发，水污染可划分为不同类型，各类污染的来源具有显著差异，且往往呈现交叉叠加特征。已有研究表明，不同类型水污染的环境迁移转化规律与危害程度存在本质区别，明确其类型划分与来源构成，是开展水污染防治与环境监测工作的前提与基础，也是构建科学防控体系的核心环节之一。水环境作为生态系统的重要组成部分，其质量状况直接关系到区域生态安全与社会经济可持续发展，而水污染类型的多样性与来源的复杂性，进一步增加了防控工作的难度与系统性要求。

从学术研究与实践应用的主流分类来看，水污染主要可分为物理性污染、化学性污染与生物性污染三大类。这种分类方式既兼顾了污染物的本质属性，也符合环境监测与治理的技术逻辑，成为国内外水环境研究领域的共识性分类框架，被广泛应用于科研、工程实践与环境管理等多个领域。物理性污染是最直观的水污染类型，其核心特征是水体物理性状发生改变，进而影响水体透明度、浊度等关键指标，虽不直接产生毒性，但会间接破坏水体生态系统平衡，影响水生生物的生存环境。化学性污染则是当前水污染防治的重点与难点，污染物多为人工合成或自然释放的化学物质，具有稳定性强、迁移范围广、毒性显著等特点，对水体生物与人类健康的危害具有长期性，部分污染物甚至会在环境中持续累积，形成长期环境风险。生物性污染主要与病原微生物相关，传播途径多样，易引发公共卫生安全风险，尤其在饮用水安全保障中具有突出的防控意义，一旦防控不当，可能引发群体性健康问题。

一、物理性水污染的类型与来源

水环境是地球生态系统的核心，是维系人类生存发展和社会经济可持续运行的基础资源，直接关系生态安全、公共健康与国家发展全局，也是实现人与自然和谐共生的重要前提。水作为生命之源、生产之要、生态之基，支撑着农业、工业、日常生活及生态维系等各类活动。随着工业化、城市化加速，人类活动对水环境的干预加剧，污染物无序排放、水资源过度开发等导致水污染从区域性环境问题演变为全球性生态危机，制约各国可持续发展。已有研究显示，全球半数以上地表水体受污染，引发水资源短缺、生态退化等问题，对各国环境治理体系提出多维度考验，需各国协同应对。

全球水污染呈现范围广、类型杂、治理难的特征，核心是污染物排放与水体承载力失衡。发达国家曾经历严重水污染，经长期治理实现水质改善，但仍面临新兴污染物等新挑战；发展中国家因工业化加快、治理体系不完善等，水污染问题日益突出，地表与地下水污染制约其发展。此外，水环境污染具有跨区域、跨流域传导性，跨界水体污染需多国协同治理，而全球环境治理体系不完善进一步增加了治理难度。

中国作为人口大国和发展中国家，经济快速发展中面临严峻水环境压力，水资源供需矛盾突出且受水污染加剧影响。党的十八大以来，我国将生态文明建设纳入总体布局，加大治理投入与专项行动，水环境质量实现阶段性改善，成效获得国际认可。但我国水环境问题的长期性、复杂性未根本改变，仍处于污染治理攻坚期与生态修复关键期，与群众需求和生态文明建设要求仍有差距，后续需持续精准发力。

物理性水污染的核心是水体物理状态异常，主要包括悬浮物、浊度、热污染与放射性污染，其中悬浮物与浊度污染最为普遍，是环境监测基础指标。悬浮物是粒径大于 100 纳米的水体固体颗粒，源于自然侵蚀与人类活动，含量过高会降低水体透明度、破坏水生生态、加速淤积。自然过程会产生少量悬浮物，属正常物质循环，而农业耕作、城市建设、矿山开采等人类活动，是悬浮物污染的主要驱动因素。

浊度与悬浮物呈正相关，受颗粒特性影响，胶体颗粒会加剧浊度并可能形成复合污染。热污染主要来自工业冷却水排放，会升高水体温度、降低溶解氧，引

发富营养化并危害水生生物。放射性污染危害特殊，污染物源于核工业、核泄漏等，具有隐蔽性、长期性和不可逆性，会通过食物链富集危害健康，治理难度大、成本高，是水污染防治重点领域。

二、化学性水污染的类型与来源

化学性水污染是当前水环境最主要、威胁最大的污染类型之一，其污染物种类多、来源杂，可分为无机、有机化学污染及重金属污染，各类污染物相互作用易形成复合污染，增加治理难度。无机化学污染包括酸、碱、盐类及氰化物等有毒污染物，主要来源于工业生产和农业活动，生活活动也会产生少量此类污染物。

工业中化工、冶金等行业排放的酸碱废水会改变水体 pH 值，破坏酸碱平衡，危害水生生物、降低生物多样性，还会腐蚀水利设施。盐类污染来自工业废水和农业灌溉排水，工业盐分废水及农业化肥过量使用、灌溉不当，会导致水体盐度升高，干旱半干旱地区尤为严重，还可能加剧水资源短缺和土壤盐碱化，形成恶性循环。

（一）重金属污染的来源与特征

重金属污染是化学性水污染中危害最严重的类型之一，重金属具有毒性强、难降解、易富集的特点，一旦进入水体，会长期留存于水环境中，不易被微生物分解，且会通过食物链逐级富集，最终危害人类健康，甚至会通过遗传传递，影响后代发育。常见的水体重金属污染物包括汞、镉、铅、铬、砷等，其中汞、镉、铅的毒性最强，被列为优先控制污染物，其来源主要分为工业来源、农业来源与生活来源三大类，其中工业来源是最主要的来源。工业生产中，矿山开采、冶金、电镀、电池制造、化工等行业是重金属废水的主要排放来源，如电镀行业会排放含有铬、镍、铜、锌等重金属的废水，电池制造行业会排放含有汞、镉、铅等重金属的废水，冶金行业会排放含有铅、锌、铬等重金属的废水，这些废水若未经有效处理直接排放，会导致水体重金属含量超标，污染地表水与地下水。

农业生产中，不合理使用含有重金属的化肥、农药，以及畜禽养殖过程中产生的粪便，会导致重金属通过地表径流与地下渗流进入水体，成为重金属污染的重要补充来源。部分地区使用的磷肥中含有镉、铅等重金属，长期过量施用会导致土壤重金属积累，进而污染周边水体；畜禽养殖中，为了促进畜禽生长、预防疾病，饲料中会添加一定量的重金属添加剂，如铜、锌、砷等，这些重金属无法

被畜禽完全吸收，会通过粪便排出体外，进入水体环境，同时粪便堆放过程中，重金属也会通过渗滤作用污染地下水。生活来源中，废旧电池、电子产品的随意丢弃，以及生活垃圾的填埋、焚烧，会导致重金属渗漏进入地下水或地表水体，其中废旧电池是生活中重金属污染的主要来源之一，其含有的汞、镉、铅等重金属，一旦泄漏，会对水环境造成严重污染。相关研究指出，重金属污染对水体生态系统的破坏具有不可逆性，即使在低浓度下，也会对水生生物产生毒性作用，影响其生长繁殖与生理功能，同时还会破坏水体微生物群落结构，影响水体的自净能力。

（二）有机化学污染的来源与危害

有机化学污染是化学性水污染的另一重要类型，污染物主要为人工合成有机物与天然有机物，其中人工合成有机物如持久性有机污染物、农药、兽药、洗涤剂等，因其难降解、毒性强、迁移范围广，成为当前水环境治理的重点，也是环境监测中重点关注的污染物类别。持久性有机污染物具有半挥发性、远距离迁移性与生物累积性，能够通过大气、水体、土壤等介质进行远距离迁移，广泛分布于全球各类水环境中，主要来源于工业生产、农药使用与垃圾焚烧等，如多氯联苯、滴滴涕、多环芳烃等，这类污染物会长期留存于水环境中，对水生生物与人类健康造成严重危害，甚至会影响后代发育，部分持久性有机污染物还具有内分泌干扰作用，会干扰生物体的内分泌系统，导致生殖发育异常。

农药与兽药污染主要来源于农业生产与畜禽养殖，是农业面源污染的重要组成部分。农业生产中，杀虫剂、杀菌剂、除草剂等农药的过量使用、不合理使用，会导致农药通过地表径流、土壤渗流进入水体，残留于水环境中，部分农药具有持久性，会在水体中长期积累，通过食物链富集，危害水生生物与人类健康；畜禽养殖中，抗生素、激素等兽药的使用，会通过粪便排出体外，进入水体，不仅会污染水体，还会导致水体中耐药菌滋生，增加公共卫生安全风险，同时部分兽药还会影响水生生物的生长繁殖，破坏水体生态平衡。生活污水中也含有大量有机污染物，如洗涤剂、食品残渣、化妆品、合成纤维等，这些有机物进入水体后，会被微生物分解，消耗水体中的溶解氧，导致水体缺氧，引发水体黑臭现象，尤其在封闭水体中，这种现象更为突出。此外，工业生产中的石油化工、印染、制药、食品加工等行业，会排放大量含有有机污染物的废水，这类废水成分复杂、毒性强，含有大量难降解有机物，治理难度较大，是有机化学污染的主要来源之一，

其排放的有机污染物还可能与重金属形成复合污染,进一步加重对水环境的危害。

三、生物性水污染的类型与来源

生物性水污染是指水体中病原微生物、寄生虫、藻类等生物污染物超标,导致水体卫生质量下降,进而危害人类健康与生态环境的污染类型,其危害具有突发性和传染性,是饮用水安全保障中重点防控的污染类型。常见的生物污染物包括细菌、病毒、寄生虫卵、藻类等,其中细菌与病毒是最主要的生物污染物,其来源主要集中在生活污水、畜禽养殖废水、医疗废水与农业面源污染中,传播途径主要为饮用水摄入、皮肤接触、食物污染等,易引发霍乱、伤寒、甲型肝炎、细菌性痢疾等传染病,对人类健康造成严重威胁。

生活污水是生物性水污染的最主要来源,城市生活污水中含有大量来自人体的病原微生物与寄生虫卵,如大肠杆菌、沙门氏菌、志贺氏菌、蛔虫卵、鞭虫卵等,这些生物污染物主要来源于人类的生活活动,如饮食、卫生习惯等。若生活污水未经过有效消毒处理直接排放,会导致水体生物污染物超标,污染地表水与地下水,进而影响饮用水安全。尤其是在农村地区,由于污水处理设施不完善、覆盖率低,生活污水多直接排放到周边水体,部分农村地区还存在粪便随意堆放、污水漫流的现象,成为农村水环境生物性污染的主要诱因,也增加了农村居民饮用水安全的风险。畜禽养殖废水也是生物性水污染的重要来源,规模化畜禽养殖场会产生大量粪便与废水,其中含有大量病原微生物,如禽流感病毒、猪瘟病毒、大肠杆菌、沙门氏菌等,这些废水若未经过无害化处理,会通过地表径流进入水体,污染周边水环境,同时还会散发恶臭,影响周边居民生活环境,此外,粪便堆放过程中,病原微生物还会通过渗滤作用污染地下水。

医疗废水含有大量致病微生物与病毒,如结核杆菌、乙肝病毒、艾滋病病毒、流感病毒等,具有强传染性,是生物性水污染的特殊来源,其污染风险远高于普通生活污水。医疗废水主要来源于医院的诊疗活动、实验室检测、病房护理等过程,若未经过严格消毒处理直接排放,会成为生物性水污染的重要传播途径,严重威胁人类健康与生态环境,因此,医疗废水的处理与排放必须严格遵循相关标准,确保消毒达标。农业面源污染中,农田地表径流携带的土壤中的病原微生物,以及畜禽粪便、秸秆还田后残留的病原微生物,也会进入水体,加剧生物性水污染,尤其是在农业生产集中区域,降雨后地表径流会携带大量病原微生物进入水

体，导致水体生物污染物含量短期内急剧升高。部分研究倾向于认为，生物性水污染的危害具有突发性，一旦水体中病原微生物含量超标，若未及时发现与控制，可能引发公共卫生突发事件，因此，生物性水污染的监测与防控，在饮用水安全保障中具有不可替代的作用，也是水环境监测工作的重要内容之一。

各类水污染类型并非孤立存在，在实际水环境中，往往呈现交叉叠加的特征，这种复合污染现象在工业集中区、农业产区表现得尤为突出。例如，工业废水排放时，可能同时含有重金属、有机污染物与悬浮物，既造成化学性污染，也造成物理性污染，不同污染物之间还可能发生化学反应，产生毒性更强的污染物；农业面源污染中，既可能含有化肥带来的营养盐污染，也可能含有农药带来的有机污染，还可能含有病原微生物带来的生物性污染，这些污染物相互作用，进一步加剧了对水环境的危害。这种交叉污染的特征，增加了水污染防治与环境监测的难度，也要求在水污染防治工作中，树立系统思维，统筹考虑各类污染的来源与危害，构建全方位、多层次的防控体系。明确水污染的主要类型与来源，不仅能够环境监测工作提供明确的监测指标与方向，优化监测方案，提高监测效率与准确性，也能够为水污染防治技术的选择与应用提供科学依据，推动水污染防治工作向精准化、科学化方向发展，为水环境质量改善与生态安全保障奠定基础。

第三节 水污染防治的基本原理与政策框架

水污染防治是一项系统性、综合性的环境治理工程，其核心目标是通过科学的技术手段与完善的政策体系，控制污染物排放总量，改善水环境质量，保障水资源安全与生态系统健康，最终实现水资源的可持续利用与经济社会的协调发展。其核心原理围绕“源头控制、过程拦截、末端治理、生态修复”四大核心环节展开，各环节相互衔接、协同作用。已有研究表明，单纯依赖末端治理难以实现水环境质量的根本性改善，还可能因成本过高、二次污染陷入恶性循环，唯有将四者有机结合，才能构建稳定、可持续的水污染防治长效机制，这一理念已成为全球共识和我国水污染防治工作的核心指导思想。

源头控制是水污染防治的首要环节，更是实现污染减量的关键抓手，其核心原理在于从污染物产生的源头入手，减少污染物的产生量与排放量，从根源上降低水污染负荷。这一环节需结合产业发展、生产生活方式等因素，聚焦工业、农

业、生活等重点污染来源，通过产业结构优化、生产工艺升级、清洁生产推广、绿色生活方式引导等多元化方式实现减量。例如，工业领域通过淘汰高耗水、高污染产能，推广循环用水技术和清洁生产工艺，实现废水资源化利用，既能减少污染排放，又能降低企业成本，实现环境与经济效益双赢；农业领域则通过科学施肥用药、推广绿色防控技术，推进畜禽养殖废弃物资源化利用，有效降低农业面源污染对水体的影响。同时，源头控制需政府、企业、社会组织协同发力，落实各方责任，才能避免流于形式。

过程拦截是衔接源头控制与末端治理的关键环节，其原理在于通过物理、化学、生物等多种技术手段，在污染物进入水体之前进行拦截、削减与净化，降低污染物进入水体的浓度与总量，减少对水体生态系统的破坏。其应用场景广泛，覆盖城市、农村、流域等多个区域，既包括城市管网的截污纳管、初期雨水收集处理，也包括农业面源污染控制中的缓冲带、人工湿地建设，还有流域层面的生态护岸等设施。相关研究指出，合理的过程拦截措施对氮、磷等营养盐污染物的拦截效率可达30%-60%，能有效弥补源头控制的遗漏与不足，形成双重防护体系。但过程拦截的实施受地形、气候、资金等多种因素影响，不同区域效果存在差异，需结合当地实际优化设计，不可盲目照搬其他区域经验。

一、水污染防治的核心原理解析

末端治理是水污染防治的兜底保障，其原理在于对已产生的工业废水、生活污水等各类废水进行针对性处理，去除其中的污染物，使其达到国家或地方规定的排放标准后再排放或回用，最大限度降低废水排放对水环境的影响。末端治理技术种类繁多，发展较为成熟，根据处理工艺的不同可分为物理处理法、化学处理法、生物处理法三大类，不同处理方法适用于不同类型的废水与污染物，实际应用中往往需要结合多种处理技术，形成组合处理工艺，提升处理效果。物理处理法主要通过沉淀、过滤、离心、吸附等物理方式，去除废水中的悬浮物、胶体等固态污染物，操作简单、成本较低，无需添加化学药剂，不会产生二次污染，适用于废水的预处理或作为辅助处理手段；化学处理法通过化学反应去除废水中的重金属、有毒有机物、难降解污染物等，处理效率高、针对性强，能够快速降低污染物浓度，但可能产生二次污染，需配套相应的二次处理措施，处理成本相对较高；生物处理法利用微生物的代谢作用，将废水中的有机污染物分解为无害

的二氧化碳、水、氮气等物质，具有环保、高效、成本可控、无二次污染的优势，是目前城市污水处理与工业有机废水处理的主流技术，常见的生物处理工艺包括活性污泥法、生物膜法、厌氧消化法等。末端治理虽然是水污染防治的兜底措施，但并非被动应对，而是需要结合源头控制与过程拦截，形成“源头 - 过程 - 末端”的闭环治理体系，才能实现水环境质量的持续改善。

生态修复是水污染防治的补充与延伸，也是实现水环境良性循环的重要支撑，其原理在于利用生态系统的自我净化能力与自我修复能力，结合人工辅助措施，修复受污染水体的生态功能，恢复水生生物群落结构，提升水体自净能力，最终实现水环境的可持续发展。生态修复技术主要包括水体曝气复氧、水生植物种植、微生物菌剂投放、底泥疏浚等，通过改善水体溶解氧水平，抑制有害微生物繁殖，促进有益微生物生长，降解水体中的污染物，恢复水生生物多样性，逐步改善水环境质量。需要强调的是，生态修复并非适用于所有受污染水体，其应用具有一定的前提条件。对于重度污染水体，水体中的污染物浓度过高，超出了生态系统的自我净化能力，此时需先通过末端治理降低污染物浓度，达到生态修复的前提条件后，再开展生态修复工作，否则不仅难以实现修复效果，还可能造成生态系统的进一步破坏。部分研究倾向于认为，生态修复与末端治理的有机结合，是实现受污染水体长期稳定达标、恢复生态功能的有效路径，也是推动水污染防治从“治污”向“护水”转变的重要体现。同时，生态修复是一个长期过程，需要持续投入与维护，不可急于求成，需结合水体的污染程度、生态状况，制定长期的修复方案。

水污染防治的四大核心原理并非相互独立，而是相互关联、协同作用的有机整体。源头控制是基础，决定了污染负荷的总量；过程拦截是关键，能够有效削减进入水体的污染物；末端治理是兜底，确保排放的废水达到标准；生态修复是长效，保障水环境的持续改善与良性循环。在实际水污染防治工作中，需根据不同区域的水污染特点、经济社会发展水平，优化四大原理的应用比例与实施方式，避免单一依赖某一种原理或某一种技术，实现污染防治效果的最大化。

二、水污染防治的政策框架构建

水污染防治政策框架是保障污染防治工作有序推进、落地见效的制度基础，其核心是通过法律法规、标准体系、监管机制、激励政策、公众参与等多方面的

制度设计,明确政府、企业、社会组织、公民等各主体的责任与义务,引导各类资源向水污染防治领域倾斜,规范污染防治行为,确保污染防治目标的实现。我国的水污染防治政策框架以“预防为主、防治结合、综合治理”为基本原则,立足我国水环境现状与经济社会发展水平,逐步形成了“法律保障、标准约束、监管执法、激励引导、公众参与”的多元共治格局,同时借鉴了国际先进的政策经验,不断完善政策内容与实施机制,推动水污染防治工作规范化、制度化、科学化发展。

法律法规是水污染防治政策框架的核心支撑,是所有污染防治工作的根本遵循,为污染防治工作提供了明确的法律依据与行为准则,明确了各类主体的法律责任,保障了污染防治工作的强制性与权威性。我国已形成以《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国水污染防治法》为核心,配套各类行政法规、部门规章、地方性法规、司法解释的水污染防治法律体系,覆盖水污染防治的各个环节、各个领域。其中,《中华人民共和国水污染防治法》作为水污染防治领域的专门法律,明确规定了企业事业单位和其他生产经营者应当采取有效措施,防止、减少水污染,对造成水污染的行为承担法律责任;各级人民政府应当加强水污染防治工作,统筹规划、协调推进,保障水环境质量达到规定标准;环境保护主管部门负责对水污染防治实施统一监督管理,其他相关部门按照职责分工做好水污染防治相关工作。同时,各地结合当地水环境实际,制定了相应的地方性法规与实施细则,细化法律要求,增强法律的针对性与可操作性。法律体系的不断完善,为我国水污染防治工作提供了坚实的法律保障,有效遏制了违法排污行为,推动了污染防治工作的有序开展。

(一) 标准体系的约束与引导作用

标准体系是水污染防治政策框架的重要组成部分,是连接法律法规与实际污染防治工作的桥梁,通过明确水环境质量标准、污染物排放标准、监测技术标准、污染治理技术标准等,为污染防治工作提供了量化依据与技术规范,确保污染防治工作有章可循、有据可依。水环境质量标准明确了不同水域、不同用途水体的水质要求,是衡量水环境质量的核心依据,也是各级政府开展水污染防治工作的目标导向,我国现行的水环境质量标准根据水体功能分为五类,明确了各类水体的水质指标限值;污染物排放标准则针对不同行业、不同类型的污染物,规定了排放限值与控制要求,是企业污染物排放的刚性约束,倒逼企业改进生产工艺、

提升污染治理水平，近年来我国不断提高污染物排放限值，尤其针对高污染行业制定了更为严格的排放标准；监测技术标准规范了水环境监测的方法、流程、仪器设备、质量控制等要求，确保监测数据的真实性、准确性与可比性，为水污染防治决策、监管执法提供了可靠的数据支撑；污染治理技术标准则明确了各类污染治理技术的适用范围、技术要求、运行管理规范等，引导企业选择科学合理的污染治理技术，提升污染治理效果。已有研究表明，科学合理的标准体系能够有效引导企业改进生产工艺、提升污染治理水平，推动水污染防治工作从“被动治理”向“主动预防”转变，从“粗放式治理”向“精细化治理”转变。近年来，我国不断完善水污染防治标准体系，逐步提高污染物排放限值，细化监测技术要求，补充新兴污染物的控制标准，进一步强化了标准的约束与引导作用。

（二）监管机制的强化与落实

监管机制是确保水污染防治政策落地见效的关键，其核心在于通过常态化、规范化、精细化的监管执法，督促企业落实污染治理主体责任，打击违法排污行为，推动各级政府履行水污染防治监管职责，确保各项政策措施落到实处。我国构建了“政府主导、部门协同、属地管理、社会监督”的水污染防治监管机制，明确了环境保护、水利、住建、农业农村、发改、工信等相关部门的监管职责，形成了分工明确、协同配合、齐抓共管的监管格局，避免了监管缺位、错位、越位等问题。监管方式不断创新，从传统的现场检查、抽样监测，逐步向在线监测、大数据监管、信用监管、无人机巡查等现代化监管方式转变，提高了监管效率与覆盖面，实现了对污染物排放的实时监控、精准执法，有效解决了传统监管方式存在的效率低、覆盖面窄、取证难等问题。例如，在线监测系统能够实时采集企业废水排放数据，一旦出现超标排放情况，系统可及时报警，监管部门能够快速介入查处；大数据监管则通过整合水环境监测数据、企业排污数据、气象数据等，实现对水污染情况的精准分析与预判，为监管执法提供科学支撑。同时，我国建立了水环境质量目标责任制与考核评价制度，将水环境质量改善情况纳入各级政府绩效考核，实行“一票否决”制，倒逼各级政府加大水污染防治投入，落实监管责任，推动水污染防治工作取得实效。此外，监管执法力度不断加大，对违法排污、偷排漏排等行为依法从严处罚，形成了强大的震慑力，有效遏制了违法排污行为的发生。

激励政策是水污染防治政策框架的重要补充，其核心在于通过经济、技术、

税收、金融等方面的激励措施，引导企业主动开展污染治理，鼓励社会资本参与水污染防治工作，激发各方参与水污染防治的积极性与主动性，弥补行政监管与法律约束的不足。我国的水污染防治激励政策呈现多元化特点，针对不同主体、不同领域制定了差异化的激励措施。例如，对采用先进污染治理技术、实现废水资源化利用、污染物排放低于排放标准的企业，给予财政补贴、税收减免、信贷支持等优惠政策，降低企业污染治理成本；建立污水处理费征收制度，合理确定污水处理费标准，保障污水处理设施的正常运行，同时推行污水处理费差异化征收，引导企业节约用水、减少废水排放；鼓励社会资本通过 PPP 模式、特许经营模式等参与污水处理设施建设与运营，拓宽水污染防治的资金渠道，缓解政府财政压力；对在水污染防治工作中表现突出的单位与个人给予表彰奖励，树立先进典型，引导全社会形成重视水污染防治的良好氛围。也有观点指出，激励政策的设计应注重精准性与针对性，根据不同行业、不同区域的污染特点、经济发展水平，制定差异化的激励措施，避免“一刀切”，才能充分发挥政策的引导作用，确保激励政策真正落地见效，推动企业主动承担污染治理责任。

公众参与是水污染防治多元共治格局的重要组成部分，也是推动水污染防治工作深入开展的重要力量，其核心在于保障公众的环境知情权、参与权与监督权，引导公众主动参与水环境保护与水污染防治工作，形成全社会共同参与、共同监督、共同治理的良好氛围。我国高度重视公众参与在水污染防治中的作用，通过完善环境信息公开制度，及时向社会公开水环境质量状况、污染物排放情况、污染治理进展、违法排污查处情况等信息，保障公众的知情权，让公众了解水污染防治工作的实际情况；建立公众举报制度，畅通举报渠道，鼓励公众举报违法排污行为，对举报属实的给予奖励，充分调动公众参与的积极性，形成“全民监督”的良好局面；加强环境宣传教育，通过媒体宣传、校园教育、社区宣传等多种方式，普及水污染防治知识，提高公众的环境意识与责任意识，引导公众养成绿色低碳的生产生活方式，减少生活污水排放，主动参与水环境保护活动。同时，鼓励环保社会组织参与水污染防治工作，支持环保组织开展环境监测、宣传教育、公益诉讼等活动，发挥社会组织的桥梁纽带作用，推动政府、企业与公众之间的沟通协作，形成多元共治的强大合力。

水污染防治的基本原理与政策框架相互支撑、有机统一，基本原理为政策制定提供了科学依据与技术支撑，明确了污染防治的核心方向与关键环节；政策框

架则为基本原理的落地提供了制度保障与实施路径，规范了各方主体的行为，确保污染防治工作有序推进。在实际工作中，需结合我国水环境现状与经济社会发展水平，不断完善污染防治原理的应用场景，优化政策框架的内容与实施方式，加强技术创新与制度创新，解决水污染防治工作中存在的难点、堵点问题，推动水污染防治工作高质量发展，逐步改善水环境质量，保障水资源安全与生态系统健康，为经济社会的可持续发展提供有力支撑。随着水污染防治工作的不断深入，基本原理的应用将更加精细化、多元化，政策框架将更加完善、更具针对性，逐步实现从“污染治理”向“生态保护”的转变，构建人与自然和谐共生的水环境治理体系。

第四节 环境监测在水污染防治中的角色与意义

水环境是人类生存与发展的基础性资源，其质量状况直接关联生态系统稳定、公共健康安全与社会经济可持续发展，是生态文明建设的核心载体之一。随着工业化、城市化进程的持续推进，加之农业生产方式的粗放化，各类污染物无序排放引发的水污染问题日益复杂且呈现多元化特征。从传统的理化污染如重金属、酸碱盐污染，逐步延伸至新兴污染物污染如抗生素、微塑料、全氟化合物等；从工业废水、生活污水为主的点源污染，不断扩展至农业面源污染、城市地表径流污染等非点源污染，水污染防治工作面临的挑战不断升级，治理难度持续加大。环境监测作为水环境管理的核心技术支撑，通过系统、科学、连续的污染物监测与数据解析，为水污染防治的全流程提供精准、可靠的基础依据，其角色定位与现实意义已成为水污染防治体系中不可或缺的重要组成部分。脱离科学有效的环境监测，水污染防治工作将陷入盲目性与被动性，难以实现精准治污、科学治污的核心目标，甚至可能导致治理方向偏差、资源浪费，无法从根本上改善水环境质量。

环境监测在水污染防治中的核心角色，首先体现为水污染现状的“精准诊断者”。水污染具有较强的隐蔽性与复杂性，其污染程度、污染范围与污染来源，往往难以通过直观观察直接判断，尤其是微量污染物与新兴污染物，其存在形式隐蔽、浓度极低，却可能通过食物链累积对生态系统与人类健康造成长期潜在危害。环境监测通过标准化的采样流程、精准的分析检测技术，能够精准识别水体

中各类污染物的种类、浓度、形态及空间分布特征，明确水污染的严重程度、影响范围及污染类型，为污染治理提供清晰的“诊断报告”。已有研究表明，科学的环境监测能够捕捉到水体中微量污染物的动态变化，及时发现传统监测手段难以捕捉的“隐形污染”，避免污染隐患长期潜伏。在实际防治工作中，环境监测数据能够清晰呈现不同区域、不同时段的水体质量差异，例如工业集聚区周边水体与城市生活污水处理厂出水的污染物组分差异，汛期面源污染爆发时与非汛期点源污染主导时的浓度波动，以及不同流域水体的污染特征差异。这些数据为判断水污染类型、锁定污染源头提供了直接支撑，使水污染防治工作能够靶向发力，避免“大水漫灌”式的治理模式，有效提升治理效率与治理效果，降低治理成本。

除精准诊断外，环境监测还是水污染防治过程的“动态监控者”。水污染防治并非一蹴而就的工作，而是一个长期、动态的系统工程，污染物的排放强度、迁移转化规律，会随着产业结构调整、治理措施实施、气象条件变化、水文情势波动等多种因素发生动态改变。若缺乏持续、系统的监测跟踪，不仅难以准确把握治理措施的实施成效，也无法及时发现新的污染问题、新的污染隐患，可能导致污染反弹、治理成效付诸东流。相关研究指出，环境监测的连续性核心价值，在于能够构建水污染变化的时间序列数据库，通过对比不同时期、不同工况下的监测数据，分析污染物浓度的变化趋势、迁移转化路径，科学判断治理措施是否有效、是否需要调整优化，为治理方案的动态完善提供数据支撑。例如，在工业废水治理过程中，通过对企业废水排放口的实时监测，可及时发现废水处理设施运行异常导致的污染物超标排放，第一时间发出预警并督促企业整改，避免污染扩散至周边水体；在流域水污染综合治理中，通过对流域内关键控制断面、支流汇入断面的常态化监测，能够实时跟踪污染物的迁移路径，掌握流域水质的整体改善情况，识别流域治理中的薄弱环节，为流域治理方案的动态优化提供科学依据。同时，环境监测还能够及时捕捉突发水污染事件的发生，例如有毒有害物质泄漏、非法排污、极端降雨引发的面源污染爆发等各类急性污染事件，通过快速监测、及时预警，为应急处置工作争取宝贵时间，最大限度降低污染造成的生态损失与经济损失，这也是环境监测在水污染防治中不可或缺的重要作用。

一、环境监测为水污染防治政策制定提供科学依据

环境监测的核心价值，不仅体现在污染治理的具体实施过程中，更在于为水

污染防治政策、规划的制定与完善提供坚实的科学依据，是连接水环境现状与政策实践的重要桥梁。水污染防治政策的科学性、针对性与可操作性，直接取决于对水环境现状、污染特征、污染趋势的准确把握，而这些关键信息的获取，离不开系统、全面的环境监测工作。部分研究倾向于认为，环境监测数据的完整性与准确性，直接决定了水污染防治政策的落地效果，缺乏科学监测数据支撑的政策，往往会脱离实际，难以发挥有效作用。通过对监测数据的汇总、分析与深度研判，能够明确区域水污染的核心问题、重点污染源、污染敏感区域与治理薄弱环节，进而制定符合区域实际的防治目标、治理措施与管控要求，避免政策制定的盲目性与主观性。

在国家层面，环境监测数据是制定全国性水污染防治规划、污染物排放标准、水环境质量标准的重要基础，是统筹全国水环境治理工作的核心依据。例如，我国《水污染防治行动计划》《“十四五”现代环境治理体系建设规划》等重要政策文件的制定，均依托于全国范围内的水环境监测网络数据，通过系统分析全国不同流域、不同区域的水环境质量状况、污染特征与治理需求，明确了不同流域、不同区域的水污染防治目标、重点任务与实施路径。在地方层面，地方政府结合区域环境监测数据，针对当地突出的水污染问题，制定具体的治理方案与管控措施，确保治理工作贴合地方实际。例如，针对农业面源污染严重的区域，通过长期监测明确化肥、农药流失量、养殖废水排放量对水体的影响程度与范围，进而制定农业面源污染防控政策，推行测土配方施肥、生态养殖等绿色生产方式；针对工业污染突出的区域，依据监测数据明确重点污染行业、重点排污企业，制定针对性的减排措施与管控要求，推动工业企业污染治理升级。此外，环境监测数据还能够为水污染防治政策的实施效果评估提供客观依据，通过对比政策实施前后的监测数据，分析水体质量的变化趋势，判断政策的有效性与不足，为政策的调整、完善提供支撑，形成“监测—政策—治理—再监测—再完善”的闭环管理模式，确保水污染防治政策能够落地见效，推动水环境质量持续改善。

二、环境监测支撑水污染防治的精准化与智能化发展

随着水污染防治工作的不断深入，精准化、智能化已成为新时代水污染防治的核心发展趋势，而环境监测技术的创新与发展，为这一趋势的实现提供了重要技术支撑。传统的环境监测模式以实验室离线监测为主，监测周期长、效率低，

监测范围有限,难以满足精准治污、实时管控、提前预警的需求,往往只能在污染发生后进行被动应对,无法实现污染的提前预防与精准管控。随着科技的不断进步,现代环境监测技术如在线自动监测、遥感监测、生物传感监测、质谱监测等的广泛应用,实现了监测数据的实时获取、快速分析与精准传输,大幅提升了环境监测的效率、精度与覆盖面,推动环境监测模式从“离线监测”向“在线监测”、从“事后监测”向“事前预警”、从“单点监测”向“全域监测”转变。也有观点指出,现代环境监测技术与大数据、人工智能、物联网等新兴技术的深度融合,能够实现对水污染的精准预判与智能管控,通过对海量监测数据的深度挖掘与分析,识别污染物的迁移转化规律、污染爆发的潜在风险,为水污染防治工作提供前瞻性支撑,推动治理模式的转型升级。

例如,在线自动监测系统能够实现对水体中 pH、DO、COD、BOD、氨氮、总磷等常规指标的实时连续监测,监测数据通过物联网技术实时传输至环境管理平台,管理人员可通过平台实时掌握水体质量变化情况,一旦发现指标异常,能够第一时间发出预警、排查污染源,实现污染的快速处置;遥感监测技术凭借其覆盖范围广、监测效率高、能够实现无接触监测的优势,能够实现对大尺度流域水环境的宏观监测,快速识别流域内的污染热点区域、水体富营养化状况、水体面积变化等,为流域水污染综合治理提供宏观依据,弥补了传统监测手段在大尺度监测中的不足;生物传感技术能够实现对微量污染物、新兴污染物的快速检测,具有灵敏度高、检测周期短、操作简便等优势,能够及时发现水体中的潜在污染隐患,为新兴污染物的防控提供技术支撑;质谱监测技术则能够精准识别水体中各类污染物的具体组分,为污染来源溯源提供精准依据。这些现代监测技术的应用,推动水污染防治工作从“被动应对”向“主动预防”转变,从“经验治理”向“科学治理”转变,大幅提升了水污染防治的精准性与有效性,为实现水环境质量的持续改善提供了有力保障。

环境监测在水污染防治中的意义,还体现在保障公共健康与生态安全、推动绿色发展、规范排污行为等多个层面,其影响贯穿于生态环境保护与社会经济发展的全过程。水环境质量直接关系到饮用水安全,而饮用水安全是保障公众身体健康的基本前提,环境监测通过对饮用水源地、饮用水输配管网的常态化监测,能够及时发现饮用水源中的污染隐患,精准掌握饮用水水质状况,为饮用水安全保障提供科学依据,确保公众饮用安全。同时,环境监测数据能够直观反映水生

态系统的健康状况，例如水体中生物多样性、溶解氧含量、叶绿素 a 浓度等监测指标的变化，能够清晰反映水体生态系统的恢复情况与受损程度，为水生态修复工作提供精准支撑，助力维护水生态系统稳定，保护水生生物多样性。此外，环境监测还能够为企业排污管控提供直接依据，通过对企业排污口的常态化监测与监督性监测，督促企业落实污染治理主体责任，规范排污行为，杜绝非法排污、超标排污等行为，推动企业加大环保投入、升级污染治理设施，实现绿色转型发展，最终达成经济发展与环境保护的协同推进。

需要明确的是，环境监测在水污染防治中的作用发挥，离不开监测数据的真实性、准确性与完整性，这是环境监测工作的核心生命线。若监测数据存在偏差、虚假或缺失，不仅无法为水污染防治工作提供有效支撑，还可能导致治理决策失误，造成生态环境进一步恶化、治理资源浪费等严重后果。因此，在环境监测工作中，需严格遵循国家环境监测规范与标准，完善监测网络布局，优化采样与分析流程，加强监测质量控制与质量保证，提升监测技术水平与人员专业素养，确保监测数据的科学性、可靠性与完整性。同时，还需加强监测数据的共享与应用，打破部门之间的数据壁垒，推动监测数据与水污染治理、环境管理、政策制定、应急处置的深度融合，充分发挥环境监测的核心支撑作用，让监测数据真正成为水污染防治工作的“指挥棒”与“风向标”。

环境监测是水污染防治体系的“眼睛”与“耳朵”，其角色贯穿于水污染防治的现状诊断、过程管控、政策制定、效果评估、应急处置等全流程，是推动水污染防治工作科学化、精准化、智能化发展的核心支撑。其意义不仅在于为具体的污染治理工作提供精准依据，更在于保障公共健康与生态安全，推动社会经济可持续发展，助力生态文明建设目标的实现。在当前水污染问题日益复杂、防治任务日益艰巨的背景下，水污染防治工作已从“末端治理”向“源头防控、过程管控、末端治理”全过程转变，这一转变对环境监测工作提出了更高的要求。进一步强化环境监测体系建设，优化监测网络布局，创新监测技术与方法，提升监测能力与水平，充分发挥环境监测在水污染防治中的核心作用，已成为推动水环境质量持续改善、实现生态文明建设高质量发展的必然要求，也是破解水污染治理难题、保障生态环境安全的关键举措。

第二章 物理化学水污染及其防治技术

第一节 悬浮物与浊度污染的控制技术

物理化学水污染是水环境中最常见、最基础的污染类型之一，其污染特征主要表现为水体中各类物理性杂质、化学性污染物的异常累积，其中悬浮物与浊度污染尤为普遍，广泛存在于城市生活污水、工业废水、农业面源污染排放以及自然水体扰动等场景中。悬浮物与浊度污染看似属于简单的物理性污染，但其对水环境质量、水生生态系统以及人类生产生活的的影响却极为深远，不仅会直接降低水体透明度、影响水体美学价值，还会间接加剧水体富营养化、干扰水生生物生存，甚至会对后续水处理工艺造成不利影响，增加水处理成本。因此，深入分析悬浮物与浊度污染的来源、特征，探索科学高效的控制技术，是物理化学水污染防治的重要基础，也是保障水环境质量的关键环节之一。

悬浮物是指悬浮在水体中、粒径大于 $1\mu\text{m}$ 的固体颗粒物质，其成分复杂，主要包括泥沙、黏土、藻类、有机碎屑、工业废渣颗粒以及生活污水中的固体杂质等，其含量直接决定了水体的浊度水平。浊度则是衡量水体中悬浮物含量的重要指标，反映了水体对光线的散射和吸收能力，浊度越高，说明水体中悬浮物含量越多，水体越浑浊。已有研究表明，当水体浊度超过一定阈值时，会显著影响水生植物的光合作用，导致水生植物生长受阻，进而破坏水生生态系统的平衡；同时，悬浮物还会吸附重金属、有机物等有毒有害污染物，成为污染物迁移转化的载体，扩大污染范围、加剧污染危害。此外，高浊度水体还会影响饮用水处理效果，增加混凝、沉淀、过滤等工艺的运行负荷，甚至可能导致饮用水中微生物超标，威胁人体健康。

悬浮物与浊度污染的来源具有多元化特征，可分为自然来源和人为来源两大类，其中人为来源是当前水体悬浮物与浊度污染的主要诱因。自然来源主要包括暴雨径流冲刷、水土流失、水体底泥扰动以及水生生物代谢产生的有机碎屑等，这类污染具有季节性、突发性特点，如暴雨过后，地表泥沙被大量冲刷进入河流、

湖泊，会导致水体浊度短期内急剧升高。人为来源则涵盖工业生产、城市生活、农业活动等多个领域，工业生产中，采矿、冶金、建材、造纸等行业会排放大量含有固体颗粒的废水，这些废水中的悬浮物颗粒粒径不均、成分复杂，若未经处理直接排放，会严重污染受纳水体；城市生活污水中含有大量生活垃圾碎屑、粪便颗粒等悬浮物，尤其是在污水处理设施不完善的地区，生活污水直接排放会显著增加水体浊度；农业活动中，化肥农药的施用、畜禽养殖废弃物的排放以及农田径流冲刷，会携带大量土壤颗粒、秸秆碎屑等进入水体，加剧悬浮物与浊度污染。

一、悬浮物与浊度污染的核心特征与影响机制

悬浮物与浊度污染的核心特征体现在颗粒粒径分布、物理化学性质以及污染迁移规律三个方面，这些特征直接决定了污染的危害程度和控制难度。从颗粒粒径分布来看，水体中悬浮物的粒径范围差异较大，可分为粗颗粒悬浮物（粒径大于 $100\mu\text{m}$ ）、中颗粒悬浮物（粒径 $10\text{-}100\mu\text{m}$ ）和细颗粒悬浮物（粒径 $1\text{-}10\mu\text{m}$ ），其中细颗粒悬浮物由于粒径小、比表面积大、稳定性强，难以通过自然沉降去除，是导致水体长期浑浊、浊度难以控制的主要原因。细颗粒悬浮物表面往往带有一定的电荷，易与水体中的其他污染物发生吸附、络合反应，形成更稳定的复合污染物，进一步增加污染治理的难度。

从物理化学性质来看，悬浮物的成分直接影响其污染行为和控制效果。无机类悬浮物如泥沙、黏土颗粒，密度较大、稳定性较差，在静置条件下易发生沉降，相对容易去除；有机类悬浮物如藻类、有机碎屑等，密度较小、亲水性强，不易沉降，且容易在水体中分解，产生异味和有害物质，同时还会消耗水体中的溶解氧，导致水体缺氧、发黑发臭。此外，悬浮物的表面电荷、比表面积等物理化学参数，也会影响其在水体中的迁移转化规律，以及后续处理技术的选择和处理效果。

悬浮物与浊度污染的影响机制具有多维度、连锁性特点，不仅会直接影响水体的物理性状，还会间接引发一系列水环境问题。从对水生生态系统的影响来看，高浊度水体中，光线难以穿透水体表层，导致水生植物光合作用受阻，水生植物生物量减少，进而影响以水生植物为食的水生动物的生存，破坏水生食物链，导致水生生物多样性下降。同时，悬浮物颗粒会附着在水生生物的鳃、体表等部位，影响其呼吸、摄食等生理活动，甚至导致水生生物死亡。从对水处理的影响来看，

悬浮物会堵塞水处理设施的滤料，降低过滤效率，增加混凝剂的投加量，提高水处理成本；若悬浮物去除不彻底，还会导致后续消毒工艺效果下降，增加饮用水安全风险。此外，高浊度水体还会影响景观用水、工业用水的水质，制约水资源的合理利用。

（一）悬浮物的迁移转化规律

悬浮物在水体中的迁移转化主要包括沉降、悬浮、扩散、吸附与解吸等过程，其迁移转化速率和方向受到水体流速、水温、pH 值、水体黏度以及悬浮物自身性质的影响。在静止或流速缓慢的水体中，粗颗粒悬浮物会在重力作用下快速沉降，沉积到水体底部，形成底泥；细颗粒悬浮物则由于重力作用较弱，且受到水体分子热运动、水流扰动等因素的影响，长期悬浮在水体中，难以自然沉降。当水体流速增加时，沉积在底部的底泥会被扰动，重新悬浮到水体中，导致水体浊度再次升高，形成“悬浮 - 沉降 - 再悬浮”的循环过程。

吸附与解吸是悬浮物迁移转化过程中的重要物理化学行为，悬浮物表面的活性位点会吸附水体中的重金属离子、有机物等污染物，形成吸附态污染物，随着悬浮物的迁移而扩散，扩大污染范围。当水体环境发生变化，如 pH 值、温度、污染物浓度等发生改变时，吸附在悬浮物表面的污染物会发生解吸，重新释放到水体中，造成二次污染。部分研究倾向于认为，细颗粒悬浮物的吸附能力远高于粗颗粒悬浮物，其对污染物的吸附 - 解吸过程，是导致水体中污染物长期存在、难以彻底去除的重要原因之一。

（二）浊度与水质指标的关联关系

浊度作为衡量水体悬浮物含量的核心指标，与水体中的其他水质指标存在密切的关联关系，其变化往往能反映水体污染程度的变化。浊度与化学需氧量（COD）、五日生化需氧量（BOD）等有机污染指标呈正相关关系，因为水体中悬浮物尤其是有机悬浮物，会作为有机污染物的载体，悬浮物含量越高，有机污染物含量往往也越高。同时，浊度与水体中的溶解氧（DO）呈负相关关系，高浊度水体中，悬浮物会消耗水体中的溶解氧，导致水体缺氧，进而引发水体黑臭、水生生物死亡等问题。

此外，浊度还与饮用水的感官性状、微生物含量密切相关，高浊度饮用水会给人带来不良的感官体验，同时悬浮物表面可能附着细菌、病毒等微生物，增加饮用水的健康风险。因此，在水环境监测和水污染防治过程中，浊度往往被作为

重要的常规监测指标，其监测数据不仅能反映水体悬浮物污染状况，还能与其他水质指标的评价提供参考，为污染控制技术的选择提供依据。

二、悬浮物与浊度污染的主要控制技术

悬浮物与浊度污染的控制技术主要分为物理处理技术、化学处理技术以及物理化学联合处理技术三大类，不同处理技术的原理、适用范围、处理效果存在差异，实际应用中需根据污染来源、悬浮物特征、水质要求以及处理成本等因素，选择合适的处理技术或组合工艺。物理处理技术主要基于物理作用，通过分离、拦截、沉降等方式去除水体中的悬浮物，具有操作简单、成本较低、无二次污染等优点，是悬浮物与浊度污染控制的基础技术；化学处理技术则通过投加化学药剂，使悬浮物发生凝聚、絮凝，形成较大的絮体，便于后续分离去除，处理效率较高，适用于高浊度、细颗粒悬浮物含量较高的水体；物理化学联合处理技术则结合了物理处理和化学处理的优点，能有效提高处理效果，适用于复杂工况下的悬浮物与浊度污染控制。

（一）物理处理技术及应用

沉降分离技术是最常用、最基础的物理处理技术，其原理是利用悬浮物与水的密度差异，在重力作用下使悬浮物沉降到水体底部，从而实现固液分离。沉降分离技术可分为自然沉降和混凝沉降两种，自然沉降主要适用于粗颗粒悬浮物含量较高的水体，如工业废水、暴雨径流中的泥沙等，通过设置沉淀池，让水体静置一定时间，使粗颗粒悬浮物自然沉降，该技术操作简单、成本低廉，但处理效率较低，对细颗粒悬浮物的去除效果较差。混凝沉降则是在自然沉降的基础上，投加少量混凝剂，破坏悬浮物的稳定性，使细颗粒悬浮物相互碰撞、凝聚，形成较大的絮体，加速沉降过程，提高处理效率。

过滤技术也是悬浮物与浊度污染控制的重要物理处理技术，其原理是利用滤料的拦截、筛分作用，去除水体中的悬浮物，降低水体浊度。常用的过滤技术包括石英砂过滤、活性炭过滤、膜过滤等，石英砂过滤是应用最广泛的过滤技术，适用于饮用水处理、工业废水预处理等场景，通过石英砂滤层的拦截作用，去除水体中的悬浮物和部分胶体颗粒，降低水体浊度；活性炭过滤则主要用于去除水体中的细小悬浮物、有机物以及异味，同时能进一步降低水体浊度，提高水质；膜过滤技术如超滤、微滤等，过滤精度较高，能有效去除水体中的细颗粒悬浮物、

胶体颗粒甚至微生物，处理效果好，但成本较高，易发生膜污染，适用于对水质要求较高的场景，如饮用水深度处理、高端工业用水处理等。

离心分离技术是一种高效的物理处理技术，其原理是利用离心力的作用，使悬浮物与水快速分离，适用于悬浮物浓度较高、颗粒粒径较小的工业废水处理。该技术处理效率高、分离效果好，能快速去除水体中的悬浮物，降低浊度，但设备投资和运行成本较高，能耗较大，主要应用于采矿、冶金等行业的高浓度悬浮物废水处理。此外，格栅、筛网等预处理技术，也能有效拦截水体中的大颗粒悬浮物，如生活垃圾、工业废渣等，防止其进入后续处理设施，堵塞设备，为后续处理工艺提供保障。

（二）化学处理技术及应用

化学混凝技术是悬浮物与浊度污染控制中应用最广泛的化学处理技术，其原理是通过投加混凝剂，使水体中的悬浮物、胶体颗粒发生凝聚、絮凝反应，形成较大的絮体，便于后续沉降、过滤去除。常用的混凝剂可分为无机混凝剂和有机混凝剂两大类，无机混凝剂如明矾、聚合氯化铝（PAC）、聚合硫酸铁（PFS）等，价格低廉、处理效果稳定，适用于各类悬浮物与浊度污染的处理，其作用机制主要是通过水解产生的多核羟基配合物，吸附、中和悬浮物表面的电荷，破坏其稳定性，使悬浮物相互碰撞、凝聚；有机混凝剂如聚丙烯酰胺（PAM）等，分为阳离子型、阴离子型和非离子型，具有絮凝效果好、絮体大、沉降速度快等优点，常与无机混凝剂配合使用，提高处理效果，适用于细颗粒悬浮物含量较高、浊度难以控制的水体。

化学沉淀技术主要适用于含有重金属悬浮物或难溶性盐类悬浮物的水体处理，其原理是通过投加化学药剂，使水体中的悬浮物与药剂发生化学反应，生成难溶性沉淀物，从而实现固液分离。例如，对于含有重金属悬浮物的工业废水，可投加石灰、氢氧化钠等碱性药剂，调节水体 pH 值，使重金属离子与氢氧根离子结合，生成难溶性氢氧化物沉淀，同时带动悬浮物一起沉降，达到去除悬浮物和重金属的双重效果。该技术处理效果好，但需要根据悬浮物的成分选择合适的化学药剂，且会产生一定量的化学污泥，需进行妥善处置，避免二次污染。

此外，化学氧化技术也可用于悬浮物与浊度污染的辅助处理，尤其是对于含有有机悬浮物的水体，通过投加氧化剂如氯气、二氧化氯、臭氧等，破坏有机悬浮物的结构，使其分解为易沉降、易过滤的物质，同时能杀灭水体中的微生物，

改善水体水质。但化学氧化技术成本较高，且部分氧化剂可能会产生副产物，对水体造成二次污染，因此实际应用中需严格控制药剂投加量和反应条件。

三、控制技术的优化与应用注意事项

随着水污染治理要求的不断提高，悬浮物与浊度污染控制技术也在不断优化升级，核心发展方向是高效化、低成本、无二次污染，同时注重多种技术的联合应用，提高处理效果和适应性。物理化学联合处理技术已成为当前悬浮物与浊度污染控制的主流趋势，例如，混凝 - 沉降 - 过滤联合工艺，通过混凝剂的作用使细颗粒悬浮物凝聚成絮体，经沉降分离去除大部分悬浮物，再通过过滤技术去除剩余的细小悬浮物，进一步降低水体浊度，该工艺处理效率高、适应性强，广泛应用于城市污水处理、饮用水处理、工业废水处理等场景。

技术优化的重点的在于混凝剂的改良和处理工艺的参数优化，新型高效混凝剂如复合混凝剂、生物混凝剂等，逐步替代传统混凝剂，具有投加量少、处理效果好、无二次污染等优点，能有效去除细颗粒悬浮物和难处理的有机悬浮物；同时，通过优化混凝剂投加量、反应时间、pH 值等工艺参数，可提高混凝效果，降低处理成本。例如，在饮用水处理中，通过试验确定最佳混凝剂投加量和反应条件，可在保证处理效果的前提下，减少混凝剂的使用，降低水处理成本，同时避免过量投加混凝剂带来的二次污染。

在悬浮物与浊度污染控制技术的实际应用中，还需注意以下几点：一是根据污染来源和悬浮物特征选择合适的处理技术，例如，对于粗颗粒悬浮物为主的污染，可优先采用自然沉降、格栅拦截等物理处理技术；对于细颗粒悬浮物为主的污染，需采用混凝 - 沉降 - 过滤联合工艺，提高处理效果。二是注重预处理环节，对于含有大颗粒悬浮物、杂物的水体，需先通过格栅、筛网等技术进行预处理，去除大颗粒杂质，防止其堵塞后续处理设施，影响处理效率。三是加强污泥处置，物理处理和化学处理过程中会产生大量污泥，这些污泥中含有大量悬浮物和污染物，若处置不当，会造成二次污染，因此需根据污泥的成分和性质，采用脱水、固化、填埋、焚烧等方式进行妥善处置，实现污泥的减量化、无害化、资源化。

也有观点指出，悬浮物与浊度污染的控制不能仅依赖末端处理技术，还需加强源头防控，减少污染物的排放。例如，在农业生产中，推广节水灌溉、精准施肥技术，减少农田径流冲刷，降低土壤颗粒进入水体的量；在工业生产中，改进

生产工艺,减少固体废弃物的产生,加强工业废水的预处理,确保悬浮物达标排放;在城市建设中,加强水土流失治理,完善城市污水处理设施,提高生活污水的处理效率。源头防控与末端治理相结合,才能从根本上控制悬浮物与浊度污染,保障水环境质量。

悬浮物与浊度污染作为物理化学水污染的重要类型,其控制技术的发展与完善,对整个水污染防治工作具有重要意义。随着科技的不断进步,新型处理技术如生物絮凝技术、膜分离技术等不断涌现,为悬浮物与浊度污染的高效控制提供了新的思路和方法。未来,需进一步加强悬浮物与浊度污染的基础研究,深入探索其迁移转化规律,优化现有处理技术,开发高效、低成本、无二次污染的新型处理技术,同时加强源头防控,构建“源头减量-过程控制-末端治理”的全流程污染控制体系,为水环境质量的持续改善提供技术支撑。

第二节 重金属污染的迁移转化与治理方法

重金属污染是水环境物理化学污染中最具隐蔽性、长期性与危害性的类型之一,其核心特征在于重金属元素难以被微生物降解,一旦进入水体环境,会通过复杂的迁移转化过程在水相、固相、生物相之间分配,形成多介质污染格局。不同于悬浮物、浊度等物理性污染的直观可见,重金属污染往往在低浓度下就会对水生生物产生毒性效应,且通过食物链逐级富集,最终威胁人类健康。已有研究表明,水体重金属污染的防控难度,不仅源于其自身的化学稳定性,更与迁移转化过程的复杂性密切相关——不同重金属的迁移路径、转化形态存在显著差异,受水体 pH 值、温度、氧化还原电位、有机质含量等多种因素调控。明确重金属在水环境中的迁移转化规律,是构建科学治理体系、选择高效治理技术的核心前提,也是当前水污染防治领域的研究热点与重点。

水体重金属的来源具有多元性,且不同来源的重金属在迁移转化潜力上存在差异,这也决定了其治理难度的层次性。工业生产是水体重金属污染的主要来源,矿山开采、冶金、电镀、电池制造、化工等行业排放的废水,往往含有高浓度的汞、镉、铅、铬等重金属,且多以离子态、络合态存在,迁移性强、毒性高;农业活动中,含有重金属的化肥、农药施用,以及畜禽养殖粪便排放,会导致重金属通过地表径流、地下渗流进入水体,这类重金属多与土壤颗粒结合,迁移速度相对

较慢，但易在水体底泥中累积；生活来源中的废旧电池、电子产品丢弃，以及生活垃圾填埋渗滤液，也会向水体输入少量重金属，虽浓度较低，但长期累积会形成潜在风险。重金属进入水体后，并非静止存在，而是在物理、化学、生物等多重作用下发生迁移与转化，其形态的改变直接影响其毒性、迁移能力与治理难度。

一、水体重金属的迁移规律与影响因素

水体重金属的迁移是指重金属元素在水环境中从一个介质（如水相、底泥、生物体）向另一个介质转移的过程，主要分为物理迁移、化学迁移与生物迁移三种形式，三者相互关联、相互影响，共同构成重金属的迁移体系。物理迁移是最基础的迁移形式，主要通过水体的流动、扩散、沉降等物理过程实现，重金属离子或颗粒随水流运动，从污染源头向周边水体扩散，最终通过沉降作用进入底泥，形成长期累积。水流速度、水体深度、颗粒物粒径等因素，直接影响物理迁移的速度与范围——水流速度越快，重金属扩散范围越广；水体越深，沉降过程越缓慢，重金属在水相中停留时间越长。

化学迁移是重金属迁移转化的核心环节，也是影响其毒性的关键过程，主要通过化学反应改变重金属的存在形态，进而影响其迁移能力。重金属在水体中可发生氧化还原反应、络合反应、沉淀反应等，形成不同的化学形态，如离子态、络合态、沉淀态等。其中，离子态重金属的迁移性最强、毒性最高，而沉淀态、络合态重金属则相对稳定，迁移性较弱。水体 pH 值是影响化学迁移的最主要因素之一，不同重金属的稳定 pH 范围存在差异，例如，在酸性水体中，汞、镉、铅等重金属多以离子态存在，迁移性强；而在碱性水体中，这类重金属易与氢氧根离子结合形成沉淀，降低迁移性。氧化还原电位也会显著影响重金属的化学形态，在厌氧环境中，铬、砷等重金属会发生还原反应，形成毒性更强的形态，如三价铬转化为六价铬，三价砷转化为五价砷。

（一）生物迁移的特征与富集效应

生物迁移是重金属进入食物链、威胁人类健康的关键路径，指重金属通过水生生物的吸收、代谢、排泄等过程实现迁移，主要表现为生物富集与生物放大效应。水生生物对重金属的吸收具有选择性，不同生物对不同重金属的富集能力存在差异，例如，藻类、浮游生物对汞、镉的富集能力较强，而鱼类则对铅、铬的富集能力更为突出。重金属进入生物体后，一部分会被代谢排出，另一部分则会

在体内累积，尤其是在脂肪、肝脏等组织中，形成生物富集。生物放大效应则是指重金属在食物链中逐级传递时，浓度不断升高，最高营养级生物体内的重金属浓度可达到初始浓度的数百倍甚至数千倍，这也是重金属污染危害人类健康的主要机制。

部分研究倾向于认为，生物迁移的强度与水体中重金属的形态密切相关，离子态重金属更易被生物体吸收，而络合态、沉淀态重金属则难以被吸收利用。此外，水体中的有机质含量、营养盐水平也会影响生物迁移过程——有机质可与重金属形成络合物，降低其生物可利用性；而营养盐丰富的水体，水生生物生长旺盛，会增加对重金属的吸收量，进而加剧生物富集效应。值得注意的是，重金属的生物迁移具有不可逆性，一旦进入食物链，很难通过自然过程去除，只能通过人工干预切断迁移路径，降低其危害。

（二）底泥中重金属的迁移释放特征

水体底泥是重金属的主要“储存库”，进入水体的重金属，约 70%-90% 会通过沉降作用进入底泥，长期累积形成潜在污染。底泥中的重金属并非稳定不变，在外界环境条件变化时，会重新释放到水相中，形成二次污染，这也是重金属污染难以彻底治理的重要原因。底泥中重金属的释放过程，主要受物理、化学、生物等因素调控，其中，水体 pH 值、氧化还原电位、扰动强度是最主要的影响因素。当水体 pH 值降低时，底泥中沉淀态的重金属会发生溶解，释放出离子态重金属；在厌氧条件下，底泥中的有机质分解会产生还原性物质，导致重金属还原溶解，释放到水相中；而水体扰动（如水流冲击、底泥疏浚）会破坏底泥的稳定性，使吸附在底泥颗粒上的重金属脱落，重新进入水相。

底泥中重金属的迁移释放具有隐蔽性与滞后性，即使水体中重金属浓度达到标准，底泥中累积的重金属也可能在合适的条件下释放，导致水体污染反弹。此外，底泥中重金属的迁移还会受到生物扰动的影响，底栖生物的活动会翻动底泥，促进底泥与水体的物质交换，加速重金属的释放。因此，在重金属污染治理过程中，不仅要关注水相中重金属的去除，还要重视底泥中重金属的治理，避免二次污染的发生。

二、水体重金属的转化机制与形态演变

水体重金属的转化是指重金属在水环境中发生化学形态、价态的改变，进而

影响其毒性、迁移性与生物可利用性的过程，主要包括氧化还原转化、络合转化、沉淀 - 溶解转化等，这些转化过程相互交织，形成复杂的形态演变体系。氧化还原转化是重金属转化的核心机制之一，多数重金属具有多种价态，不同价态的重金属毒性与迁移性差异显著。例如，铬的常见价态为三价与六价，三价铬毒性较低、迁移性较弱，而六价铬毒性极强、迁移性强，在水体中易被生物体吸收；汞的价态包括零价汞、一价汞、二价汞，其中二价汞毒性最强，且易与有机质形成络合物，增加其迁移性。

氧化还原转化的方向与强度，主要取决于水体的氧化还原电位，而氧化还原电位又受水体中溶解氧、有机质含量、微生物活动等因素影响。在有氧环境中，水体氧化还原电位较高，重金属多处于高价态，如六价铬、五价砷；在厌氧环境中，氧化还原电位较低，重金属会被还原为低价态，如三价铬、三价砷。此外，微生物在重金属的氧化还原转化中也发挥着重要作用，部分微生物可通过代谢活动将重金属的高价态还原为低价态，或低价态氧化为高价态，改变重金属的形态与毒性。相关研究指出，微生物介导的氧化还原转化，是水体重金属形态演变的重要驱动因素，尤其在底泥等厌氧环境中，这种转化作用更为显著。

络合转化是水体重金属形态演变的另一重要机制，水体中的有机质、无机离子等可与重金属离子形成络合物，改变重金属的迁移性与生物可利用性。水体中的有机质（如腐殖质、富里酸）含有大量的官能团，可与重金属离子形成稳定的络合物，降低重金属的离子浓度，进而降低其毒性与生物可利用性；而无机离子（如氯离子、硫酸根离子）与重金属离子形成的络合物，则可能增加重金属的溶解度，提高其迁移性。络合转化的强度，主要取决于水体中有机质含量、无机离子浓度以及重金属的种类，不同重金属与有机质的络合能力存在差异，例如，汞、镉与有机质的络合能力较强，而铅、铬的络合能力相对较弱。

沉淀 - 溶解转化是控制水体重金属浓度的关键过程，重金属离子与水体中的阴离子（如氢氧根离子、碳酸根离子、硫酸根离子）结合，形成难溶性沉淀，降低水相中重金属的浓度；反之，当水体环境发生变化（如 pH 值降低）时，沉淀会发生溶解，释放出重金属离子，导致水相中重金属浓度升高。沉淀 - 溶解转化的平衡状态，主要取决于重金属的溶度积常数与水体 pH 值，溶度积常数越小，重金属越易形成沉淀；pH 值的变化会直接影响阴离子的浓度，进而影响沉淀的形成与溶解。例如，镉离子在碱性水体中，会与氢氧根离子结合形成氢氧化镉沉

淀，而在酸性水体中，氢氧化镉沉淀会溶解，释放出镉离子。

三、水体重金属污染的主要治理方法与应用

水体重金属污染的治理，核心是通过物理、化学、生物等技术手段，去除水相、底泥中的重金属，降低其浓度与毒性，切断其迁移路径，避免其进入食物链。当前，重金属污染治理方法主要分为物理治理法、化学治理法与生物治理法三大类，各类方法具有不同的适用场景、优势与局限性，在实际应用中，往往需要根据污染程度、重金属种类、水体环境条件等因素，选择单一方法或组合方法进行治理，以达到最佳治理效果。物理治理法是最基础的治理方法，主要通过物理手段分离、去除水体中的重金属，具有操作简单、处理速度快等优势，适用于高浓度重金属废水的预处理或应急处理。

（一）物理治理法的类型与应用要点

物理治理法主要包括沉淀法、过滤法、吸附法、膜分离法等，其中吸附法与膜分离法是当前应用最广泛的物理治理技术。吸附法是利用吸附剂的吸附作用，将水体中的重金属离子吸附到吸附剂表面，从而实现重金属的去除，常用的吸附剂包括活性炭、沸石、膨润土、生物炭等。活性炭具有比表面积大、吸附能力强等优势，可有效吸附水体中的汞、镉、铅等重金属离子，但成本较高，且吸附饱和后难以再生，限制了其大规模应用；沸石、膨润土等天然矿物吸附剂，成本较低、来源广泛，可通过改性处理提高其吸附性能，适用于中低浓度重金属废水的治理。

膜分离法是利用膜的选择性透过性，将水体中的重金属离子与水分离，从而实现重金属的去除，常用的膜包括超滤膜、纳滤膜、反渗透膜等。反渗透膜具有截留精度高、去除效果好等优势，可有效去除水体中的重金属离子、有机物等污染物，出水水质可达到饮用水标准，但膜分离法的运行成本较高，膜易污染、堵塞，需要定期清洗与更换，适用于高浓度、高纯度要求的重金属废水治理。过滤法主要用于去除水体中吸附有重金属的悬浮物、胶体颗粒，常与沉淀法、吸附法配合使用，提高治理效果；沉淀法则是通过添加沉淀剂，使水体中的重金属离子形成难溶性沉淀，再通过过滤、沉淀等方式去除，适用于高浓度重金属废水的预处理，但会产生大量污泥，需要进行妥善处置，避免二次污染。

（二）化学治理法的原理与实践应用

化学治理法是通过化学反应改变重金属的形态，使其转化为易分离、低毒性的物质，进而实现去除的目的，主要包括化学沉淀法、化学还原法、化学氧化法等，具有处理效率高、针对性强等优势，适用于中高浓度重金属废水的治理。化学沉淀法是最常用的化学治理方法，通过向废水中添加沉淀剂（如石灰、氢氧化钠、硫化钠等），使重金属离子与沉淀剂反应，形成难溶性沉淀，再通过固液分离去除。例如，添加石灰可调节水体 pH 值，使重金属离子形成氢氧化合物沉淀；添加硫化钠可使重金属离子形成硫化物沉淀，硫化物沉淀的溶度积常数更小，去除效果更显著，但硫化钠具有毒性，使用过程中需要严格控制剂量，避免二次污染。

化学还原法主要用于处理高价态重金属污染，通过添加还原剂（如亚硫酸钠、硫酸亚铁、铁粉等），将高价态重金属还原为低价态，降低其毒性与迁移性，再通过沉淀、过滤等方式去除。例如，六价铬具有强毒性，可通过添加硫酸亚铁将其还原为三价铬，三价铬易形成氢氧化铬沉淀，进而实现去除；化学氧化法则主要用于处理低价态重金属污染，通过添加氧化剂（如高锰酸钾、过氧化氢等），将低价态重金属氧化为高价态，再通过沉淀法去除，适用于汞、砷等低价态重金属的治理。化学治理法的局限性在于，会产生大量化学污泥，处理成本较高，且可能引入新的化学物质，造成二次污染，因此在应用过程中需要严格控制反应条件，优化药剂剂量。

（三）生物治理法的优势与应用前景

生物治理法是利用生物体（如微生物、植物）的代谢作用，吸附、转化或降解水体中的重金属，实现重金属的去除，具有环境友好、成本较低、无二次污染等优势，是当前重金属污染治理的发展方向，适用于中低浓度重金属废水的治理与水体修复。微生物治理法是生物治理法的核心，利用微生物的吸附、富集、还原等作用，去除水体中的重金属，常用的微生物包括细菌、真菌、藻类等。部分细菌可通过代谢活动产生有机酸、酶等物质，将重金属离子转化为低毒性的形态，或通过细胞壁的吸附作用，将重金属离子吸附到细胞表面；真菌具有较强的吸附能力，可有效吸附水体中的重金属离子，且可通过培养繁殖，提高治理效率；藻类则可通过光合作用吸收水体中的重金属离子，同时可作为水生生物的食物，参与食物链循环，实现重金属的转化与去除。

植物治理法（又称植物修复法）是利用植物的吸收、富集作用，将水体中的

重金属吸收到植物体内，再通过收割植物的方式，将重金属从水体中去除，适用于大面积、低浓度重金属污染的水体修复。常用的重金属富集植物包括芦苇、香蒲、水葫芦、蜈蚣草等，这些植物具有较强的重金属吸收能力，可在重金属污染水体中正常生长，且能将重金属富集在根茎、叶片等组织中。植物治理法的优势在于环境友好、成本低廉，可同时实现水体净化与生态修复，但治理周期较长，受植物生长条件、重金属浓度等因素影响较大，且收割后的植物需要进行妥善处置，避免重金属再次进入环境。

不同治理方法的适用场景与治理效果存在差异，在实际重金属污染治理中，单一治理方法往往难以达到理想的治理效果，需要结合多种方法进行组合治理。例如，对于高浓度重金属废水，可采用化学沉淀法进行预处理，降低重金属浓度，再采用吸附法或膜分离法进行深度处理，确保出水水质达标；对于底泥重金属污染，可采用底泥疏浚法去除表层污染底泥，再采用生物修复法对剩余底泥进行治理，避免二次污染。此外，重金属污染的治理还需要结合源头控制，加强工业废水、农业面源污染的管控，减少重金属的排放，从根本上降低重金属污染的风险。随着水污染防治技术的不断发展，新型治理技术（如纳米材料吸附法、生物电化学法等）不断涌现，为重金属污染的高效治理提供了新的思路与方法，推动重金属污染治理向精准化、高效化、环境友好化方向发展。

第三节 无机化学污染（酸、碱、盐）的防治策略

无机化学污染是水体污染的重要类型之一，主要包括酸性污染、碱性污染与盐类污染，其来源广泛、危害持久，不仅会破坏水环境生态系统平衡，还会影响水资源利用价值，威胁人体健康与工农业生产安全。与重金属污染、有机污染相比，无机化学污染的污染物多具有水溶性强、迁移性广的特点，一旦进入水体，易在水体中扩散、累积，难以通过自然降解实现自我净化，需通过针对性的防治技术与系统的防控策略，才能有效控制污染扩散、降低污染危害。已有研究表明，无机化学污染的防治核心在于“源头管控、过程阻断、末端治理、长效运维”的协同推进，既要减少污染物的产生与排放，也要通过科学的处理技术降低水体中污染物浓度，同时建立完善的防控机制，避免污染反弹，这一防控思路已在国内外多项无机化学污染治理实践中得到验证。

酸性污染与碱性污染统称酸碱污染，其核心危害在于改变水体的 pH 值，破坏水体酸碱平衡，进而影响水生生物的生存环境，腐蚀水利设施与工业设备，同时还会加剧水体中其他污染物的迁移转化，放大污染危害。酸性废水主要来源于冶金、电镀、化工、矿山开采等工业生产过程，如钢铁厂的酸洗废水、化工厂的酸性反应废水、矿山的酸性矿排水等，这类废水中含有硫酸、盐酸、硝酸等强酸，pH 值通常低于 6.5，部分极端酸性废水 pH 值甚至低于 2，具有强腐蚀性与毒性。碱性废水则主要来源于造纸、印染、制革、食品加工等行业，如造纸厂的蒸煮废水、印染厂的碱性漂洗废水等，其 pH 值高于 8.5，含有氢氧化钠、碳酸钠等强碱，同样具有强腐蚀性，会破坏水体中的微生物群落结构，抑制水体自净能力。

盐类污染则主要是指水体中含盐量过高，超出水体正常承载范围，导致水体富盐化的污染现象，其污染物主要包括氯化钠、硫酸钠、氯化镁等可溶性盐类。盐类污染的来源较为复杂，既包括工业生产废水排放，如化工、制药、海水淡化等行业的高盐废水，也包括农业生产中的灌溉回归水、生活污水排放，以及自然因素如海水倒灌、地下水超采导致的盐分迁移。盐类污染对水环境的危害具有隐蔽性与长期性，短期内可能不会表现出明显的生态破坏，但长期累积会导致水体渗透压升高，影响水生生物的正常生理功能，导致水生生物死亡，破坏水体生态平衡；同时，高盐水体无法用于农业灌溉与工业生产，会降低水资源的利用价值，甚至会渗透到地下水中，污染地下水资源，进一步扩大污染影响范围。部分研究倾向于认为，盐类污染已成为我国北方干旱半干旱地区、沿海地区水环境面临的主要问题之一，其防治难度不亚于酸碱污染与重金属污染。

一、无机化学污染的源头管控策略

源头管控是无机化学污染防治的首要环节，其核心目标是减少酸碱盐污染物的产生量与排放量，从根源上降低水污染负荷，这也是实现无机化学污染高效防治、降低治理成本的关键。源头管控并非单一的技术措施，而是需要结合产业结构优化、生产工艺升级、清洁生产推广等多种手段，针对不同行业、不同污染来源，制定差异化的管控方案，同时强化政策引导与企业主体责任落实，确保管控措施落地见效。

（一）工业领域源头减量技术与措施

工业生产是无机化学污染的主要来源，因此工业领域的源头减量是无机化学

污染源头管控的核心。对于产生酸性废水的行业，应优先推广清洁生产工艺，减少强酸的使用量，替代高污染、高消耗的生产方式。例如，冶金行业可采用无酸洗工艺替代传统的酸洗工艺，减少盐酸、硫酸等强酸的使用，从源头减少酸性废水的产生；电镀行业可推广无氰电镀、无铬电镀技术，不仅能减少酸性废水排放，还能降低重金属污染的风险。对于产生碱性废水的行业，可通过工艺优化，减少强碱的投放量，同时实现废水的循环利用，如造纸行业可采用碱回收工艺，将蒸煮废水中的氢氧化钠回收再利用，既减少了碱性废水排放，又降低了生产成本，实现环境效益与经济效益的双赢。

盐类污染的工业源头减量，主要聚焦于高盐废水的源头控制，通过工艺优化减少生产过程中盐类的使用，同时推进废水资源化利用，降低盐类排放。例如，化工行业可采用膜分离技术对生产过程中的盐水进行回收再利用，减少新鲜水的使用与盐类废水的排放；海水淡化行业可优化淡化工艺，提高淡化水回收率，减少浓盐水的排放，同时对浓盐水进行资源化处理，提取其中的盐类资源，实现变废为宝。相关研究指出，工业领域通过源头工艺优化与废水循环利用，可使酸碱盐污染物排放量减少 30%-50%，治理成本降低 40% 以上，具有显著的环境与经济价值。

（二）农业与生活领域源头管控

农业领域的无机化学污染主要来源于农业灌溉与化肥使用，虽然污染负荷相对工业领域较低，但覆盖面广、扩散性强，难以集中治理，因此源头管控同样重要。农业领域应推广节水灌溉技术，减少灌溉回归水的排放量，同时合理使用化肥，避免过量使用化肥导致的盐类流失，如推广测土配方施肥技术，根据土壤肥力与作物需求，精准投放化肥，减少化肥浪费与盐类污染。对于沿海地区的农业生产，应防范海水倒灌对农田灌溉水的污染，避免盐类通过灌溉水进入水体，同时加强农田排水系统建设，减少农田排水中的盐类含量。

生活领域的无机化学污染主要来源于生活污水中的盐类物质，如洗涤剂、食用盐等，虽然单户排放量较少，但城市人口密集，总排放量较大，长期累积会对水环境造成一定影响。生活领域的源头管控主要通过宣传教育与政策引导，引导居民养成绿色低碳的生活方式，减少高盐洗涤剂、高盐食品的使用，同时推进生活污水源头分类与预处理，减少盐类物质进入城市污水处理系统的总量。例如，推广无磷、低盐洗涤剂，减少洗涤剂中的盐类含量；加强垃圾分类宣传，引导居

民将含高盐的废弃物单独处理，避免进入污水系统。

此外，源头管控还需要强化政策约束与监管，将无机化学污染源头减量纳入企业环境信用评价体系，对源头减量成效显著的企业给予政策扶持与奖励，对未落实源头管控措施、污染物排放超标的企业依法从严处罚，倒逼企业主动落实源头减量责任。同时，加强对重点行业、重点区域的环境监管，建立无机化学污染物排放台账，实时监控污染物排放情况，及时发现并解决源头管控中存在的问题。

二、无机化学污染的过程阻断与末端治理技术

尽管源头管控能够有效减少无机化学污染物的产生与排放，但由于工业生产、农业生产与生活活动的复杂性，仍会有部分污染物进入水体，因此需要通过过程阻断与末端治理技术，进一步削减污染物浓度，确保水体质量达到规定标准。过程阻断主要是在污染物进入水体之前，通过物理、化学等手段进行拦截与削减，减少污染物进入水体的总量；末端治理则是对已进入水体的污染物进行处理，去除水体中的酸碱盐污染物，恢复水体正常功能。过程阻断与末端治理相辅相成，共同构成无机化学污染防治的核心技术体系。

（一）酸碱污染的过程阻断与末端治理

酸碱污染的过程阻断主要聚焦于工业废水的预处理，在废水排放进入水体或城市污水处理系统之前，通过中和处理降低废水的酸碱度，避免高浓度酸碱废水直接排放造成的污染。中和处理是酸碱污染治理的核心技术，分为酸性废水中和与碱性废水中和两种方式。酸性废水中和可采用碱性中和剂，如石灰、氢氧化钠、碳酸钠等，通过化学反应将酸性废水的 pH 值调节至中性范围（6.5-8.5），同时去除废水中的部分重金属离子与悬浮物；碱性废水中和则可采用酸性中和剂，如硫酸、盐酸等，或利用酸性废水进行交叉中和，既降低了碱性废水的 pH 值，又实现了酸性废水的资源化利用，降低治理成本。

末端治理则主要针对已进入水体的酸碱污染物，通过水体中和、曝气复氧等技术，调节水体 pH 值，恢复水体酸碱平衡。对于小型封闭水体或污染程度较轻的水体，可直接投放中和剂进行中和处理，快速调节水体 pH 值；对于大型开放水体或污染程度较重的水体，可采用曝气复氧技术，增加水体溶解氧含量，促进水体中酸碱物质的自然中和，同时增强水体自净能力，加速污染物的降解。需要注意的是，中和处理过程中会产生一定的沉淀物，需及时进行打捞与处理，避免

沉淀物二次污染水体。也有观点指出，酸碱污染的末端治理应结合水体的污染程度与水文特征，选择合适的治理技术与药剂用量，避免过度处理导致的二次污染与成本浪费。

（二）盐类污染的过程阻断与末端治理

盐类污染的过程阻断主要包括截污纳管、雨水拦截等措施，减少高盐废水与高盐雨水进入水体。对于工业高盐废水，应建立专门的收集管网，将高盐废水集中收集、单独处理，避免与其他废水混合排放，扩大污染范围；对于城市雨水，应加强初期雨水收集处理，因为初期雨水中含有大量的盐分与其他污染物，通过收集处理可有效减少盐类污染物进入水体。同时，在沿海地区，应加强防潮设施建设，防范海水倒灌，减少海水对内陆水体的盐类污染。

盐类污染的末端治理技术主要包括膜分离技术、蒸发结晶技术、离子交换技术等，其中膜分离技术是目前应用最广泛、最成熟的技术之一。膜分离技术利用膜的选择性透过性，将水体中的盐离子与水分子分离，从而降低水体含盐量，常见的膜分离技术包括反渗透、纳滤、超滤等。反渗透技术具有脱盐率高、处理效果好的优势，脱盐率可达 90% 以上，适用于高盐废水处理与海水淡化，但处理成本相对较高，且膜易受污染，需要定期维护与更换；纳滤技术则适用于中低盐度废水处理，脱盐率可达 70%-80%，处理成本相对较低，适合大规模应用；超滤技术主要用于去除水体中的悬浮物、胶体等杂质，辅助提升脱盐效果。

蒸发结晶技术则主要通过加热蒸发的方式，将高盐废水中的水分蒸发，使盐类物质结晶析出，实现盐类与水分的分离，适用于高浓度高盐废水处理，可实现盐类资源的回收再利用，但能耗较高，适合能源充足的地区或企业。离子交换技术利用离子交换树脂的交换作用，将水体中的盐离子替换为无害离子，从而降低水体含盐量，该技术处理效果稳定，但离子交换树脂需要定期再生，再生过程会产生一定的废水，需配套相应的处理措施。

在实际应用中，往往需要结合多种末端治理技术，形成组合处理工艺，提升处理效果，降低处理成本。例如，对于高浓度高盐废水，可采用“预处理 + 膜分离 + 蒸发结晶”的组合工艺，先通过预处理去除废水中的悬浮物、胶体等杂质，再通过膜分离技术降低水体含盐量，最后通过蒸发结晶技术回收盐类资源，实现废水资源化利用。已有研究表明，组合处理工艺的脱盐率可达 95% 以上，盐类资源回收率可达 80% 以上，能够有效实现盐类污染的治理与资源化利用。

无机化学污染的防治是一项系统性工程，需要源头管控、过程阻断、末端治理的协同推进，同时结合政策引导、监管执法、公众参与等多种手段，才能构建长效防治机制，实现污染防治的可持续发展。不同区域、不同行业的无机化学污染特点存在差异，因此在制定防治策略时，需结合当地实际情况，优化防治技术与措施，避免盲目照搬其他区域的经验。例如，工业发达地区应重点强化工业领域的源头减量与末端治理，沿海地区应重点防范海水倒灌导致的盐类污染，农业地区应重点加强农业面源的源头管控。

随着水污染防治技术的不断发展，无机化学污染的防治技术也在不断创新与完善，新型高效的中和剂、膜材料、离子交换树脂等不断涌现，有效提升了污染治理效果，降低了治理成本。同时，资源化利用理念的融入，使得无机化学污染治理从“被动治污”向“主动资源化”转变，不仅减少了污染危害，还实现了资源的循环利用，符合“绿水青山就是金山银山”的发展理念。在未来的无机化学污染防治工作中，应进一步加强技术创新与制度创新，完善防治政策体系，强化各主体的责任落实，推动无机化学污染防治工作高质量发展，为改善水环境质量、保障水资源安全提供有力支撑。

第四节 新兴物理化学处理技术应用探讨

随着工业生产技术的迭代升级与新型污染物的不断涌现，传统物理化学水处理技术在应对复杂水体污染、微量污染物去除、高难度废水处理等方面逐渐显现出局限性。传统物理化学方法如混凝沉淀、过滤、吸附等，虽具有工艺成熟、成本较低的优势，但在处理低浓度污染物、难降解有机污染物、新型微量污染物时，往往存在去除效率有限、二次污染风险、处理成本偏高或工艺复杂等问题，难以满足新时代水污染防治对出水水质的严格要求。在此背景下，新兴物理化学处理技术凭借其高效、节能、环保、适应性强等特点，逐步成为水污染防治领域的研究热点与应用重点，为破解高难度水污染治理难题提供了新的技术路径。这些新兴技术以传统物理化学原理为基础，结合材料科学、信息技术、工程技术等多学科成果，实现了处理效率的提升、处理范围的拓展与二次污染的有效控制，其应用与推广对推动物理化学水污染防治技术的转型升级、提升水环境治理效能具有重要意义。

新兴物理化学处理技术的核心特征,在于突破传统技术的局限,实现对复杂污染物的高效去除与资源化利用,同时兼顾处理过程的经济性与环保性。与传统技术相比,新兴物理化学处理技术大多具有针对性强、反应速率快、去除精度高的优势,能够有效处理传统技术难以降解的污染物,例如持久性有机污染物、微量重金属离子、新兴环境污染物等。已有研究表明,新兴物理化学处理技术的应用,能够将水体中难降解污染物的去除率提升至 90% 以上,显著优于传统处理技术,同时可有效降低处理过程中的污泥产生量,减少二次污染风险。在实际工程应用中,新兴物理化学处理技术可单独使用,也可与传统处理技术组合形成协同处理工艺,根据不同水质特征、处理目标与场地条件,灵活调整工艺参数,实现最优处理效果,这也是其能够广泛应用于不同类型水污染治理场景的重要原因。

当前,新兴物理化学处理技术的种类日益丰富,应用场景不断拓展,根据其作用原理与处理方式的不同,可分为新型吸附技术、高级氧化技术、膜分离技术、电化学处理技术等几大类。不同类型的新兴技术具有各自的技术特点与适用范围,在实际应用中需结合具体污染场景、水质指标与处理需求进行合理选择。需要注意的是,新兴物理化学处理技术虽具有诸多优势,但在工程化应用中仍面临一些问题,例如部分技术工艺复杂、设备投资较高、运行成本偏高,部分技术的稳定性与耐久性有待提升,部分技术的二次污染防控措施仍需完善。这些问题在一定程度上限制了新兴技术的大规模推广应用,也成为当前水污染防治领域亟待解决的重点问题。

一、新型吸附技术的应用与发展

吸附技术是物理化学水污染防治中的经典技术之一,其核心原理是利用吸附剂的多孔结构与表面活性,将水体中的污染物吸附至吸附剂表面,从而实现污染物的分离与去除。传统吸附技术多采用活性炭、沸石等传统吸附剂,虽具有一定的吸附效果,但存在吸附容量有限、再生困难、成本较高等问题,难以满足低浓度污染物与新型污染物的处理需求。新型吸附技术以吸附剂的改性与新型吸附材料的研发为核心,通过对传统吸附剂进行改性处理,或开发新型高效吸附材料,显著提升吸附剂的吸附容量、吸附选择性与再生性能,拓展吸附技术的应用范围。

(一) 改性吸附剂的应用实践

改性吸附剂是通过物理、化学或生物方法对传统吸附剂进行表面修饰,改变

其表面理化性质，提升吸附性能的一类新型吸附材料。常见的改性方法包括酸碱改性、氧化还原改性、负载改性、复合改性等，不同改性方法的作用机制与适用场景存在差异。例如，酸碱改性通过调节吸附剂表面的酸碱度，改变其表面活性位点的数量与类型，提升对特定污染物的吸附能力；氧化还原改性通过氧化或还原反应，在吸附剂表面引入新的活性基团，增强吸附剂与污染物之间的相互作用；负载改性则是将具有特定吸附性能的物质负载于吸附剂表面，实现吸附性能的定向提升。

部分研究倾向于认为，改性吸附剂在微量重金属离子与难降解有机污染物的处理中具有显著优势，其吸附容量较传统吸附剂可提升 30% 以上，且吸附选择性更强，能够在复杂水体环境中精准吸附目标污染物。例如，经铁氧化物改性的沸石吸附剂，对水体中的铅、镉、铬等重金属离子具有极强的吸附能力，吸附容量可达传统沸石的 2-3 倍，且再生性能良好，可重复使用多次，有效降低处理成本；经高锰酸钾氧化改性的活性炭，表面活性基团数量显著增加，对水体中的酚类、苯胺类等难降解有机污染物的吸附去除率可达到 95% 以上，大幅优于未改性活性炭。在工业废水处理中，改性吸附剂已广泛应用于电镀废水、印染废水、煤化工废水等各类高难度废水的深度处理，能够有效去除水体中的微量污染物，确保出水水质达标排放。

（二）新型吸附材料的研发与应用

随着材料科学的快速发展，新型高效吸附材料的研发成为新型吸附技术发展的核心方向，各类新型吸附材料如纳米吸附材料、生物炭吸附材料、MOFs 材料（金属有机框架材料）等不断涌现，为吸附技术的升级提供了有力支撑。这些新型吸附材料具有比表面积大、吸附容量高、吸附选择性强、再生性能好等优势，能够有效解决传统吸附剂的局限性，拓展吸附技术的应用领域。

纳米吸附材料凭借其极小的粒径与极大的比表面积，具有极强的吸附活性，能够快速吸附水体中的微量污染物，尤其适用于低浓度污染水体的深度处理。例如，纳米二氧化钛、纳米氧化锌等纳米材料，对水体中的重金属离子、有机污染物具有良好的吸附效果，吸附速率快、吸附容量高，且能够通过光催化作用实现污染物的降解与吸附剂的再生，实现“吸附 - 降解”一体化处理，减少二次污染。生物炭吸附材料则以农业废弃物、林业废弃物等为原料，经高温热解、活化处理后制成，不仅具有良好的吸附性能，还具有来源广泛、成本低廉、环境友好等优势，

在农村面源污染治理、饮用水源地保护等领域具有广阔的应用前景。MOFs 材料作为一种新型多孔材料，具有结构可控、比表面积超大、吸附选择性强等特点，能够精准吸附水体中的特定污染物，尤其适用于新兴污染物如抗生素、微塑料等的去除，已成为当前吸附技术领域的研究热点。

二、高级氧化技术的工程化应用与优化

高级氧化技术是一类以产生具有强氧化性的羟基自由基（ $\cdot\text{OH}$ ）为核心，能够快速降解水体中难降解有机污染物的新兴物理化学处理技术。与传统氧化技术相比，高级氧化技术具有氧化能力强、反应速率快、无选择性、降解彻底等优势，能够将难降解有机污染物分解为二氧化碳、水等无害物质，从根本上消除污染物的危害，适用于各类高浓度、难降解工业废水的处理，以及饮用水的深度净化。当前，常用的高级氧化技术主要包括芬顿氧化技术、臭氧氧化技术、光催化氧化技术、电催化氧化技术等，各类技术在反应原理、工艺特点与应用场景上存在差异，需结合实际处理需求进行合理选择与优化。

芬顿氧化技术作为一种经典的高级氧化技术，其核心原理是利用 Fe^{2+} 作为催化剂，激活过氧化氢（ H_2O_2 ）产生羟基自由基，实现对难降解有机污染物的氧化降解。传统芬顿氧化技术具有工艺简单、反应速率快、成本较低等优势，但存在反应 pH 范围窄（通常为 2-4）、催化剂用量大、污泥产生量多等问题，限制了其工程化应用。为解决上述问题，研究人员通过对芬顿技术进行改良，开发出均相芬顿、非均相芬顿、光芬顿、电芬顿等新型芬顿技术，显著提升了技术的处理效果与适用性。例如，非均相芬顿技术采用固体催化剂替代传统的 Fe^{2+} ，有效解决了催化剂流失、污泥产生量大的问题，且反应 pH 范围得到拓宽，可在中性条件下运行，降低了酸碱调节成本；光芬顿技术结合了光催化与芬顿氧化的优势，通过光照激发催化剂产生更多的羟基自由基，提升了污染物的降解效率，缩短了处理时间。

臭氧氧化技术是利用臭氧的强氧化性，直接氧化水体中的有机污染物与重金属离子，实现污染物的去除。臭氧氧化技术具有氧化能力强、反应无二次污染、处理效果稳定等优势，适用于饮用水深度净化、工业废水深度处理等场景，能够有效去除水体中的色度、异味、难降解有机污染物等。相关研究指出，臭氧氧化技术与活性炭吸附、生物处理等技术组合使用，能够实现协同增效，进一步提升

处理效果,降低处理成本。例如,在饮用水深度处理中,臭氧氧化可先降解水体中的难降解有机污染物,破坏污染物的结构,再通过活性炭吸附去除氧化产物,确保饮用水水质达到安全标准;在工业废水处理中,臭氧氧化可作为预处理手段,降低废水的 COD、色度等指标,为后续的生化处理创造有利条件。但臭氧氧化技术也存在一定的局限性,例如臭氧发生器投资较高、运行成本偏高,臭氧在水中的溶解度较低,且对部分污染物的降解效果有限,需与其他技术组合使用才能达到理想的处理效果。

光催化氧化技术以半导体材料为催化剂,在光照条件下产生羟基自由基,实现对污染物的氧化降解。该技术具有反应条件温和、无二次污染、降解彻底等优势,尤其适用于低浓度难降解有机污染物的处理,在饮用水净化、微污染水体修复等领域具有广阔的应用前景。常用的光催化材料包括 TiO_2 、 ZnO 、 WO_3 等,其中 TiO_2 因具有化学稳定性好、催化活性高、无毒无害等优势,成为应用最广泛的光催化材料。但光催化氧化技术在工程化应用中仍面临一些问题,例如光催化材料的分散性差、光利用率低、催化剂易失活等,限制了其处理效率与规模化应用。为解决上述问题,研究人员通过对光催化材料进行改性、固定化处理,以及开发新型光催化反应器,不断提升光催化氧化技术的工程化应用水平。

电化学处理技术是利用电极反应产生的强氧化性物质,实现对水体中污染物的氧化降解、还原去除或沉淀分离,是一类兼具氧化、还原、吸附、絮凝等多种作用的新兴物理化学处理技术。该技术具有处理效率高、反应条件温和、操作简便、无二次污染等优势,适用于各类工业废水的处理,尤其对重金属离子、难降解有机污染物的处理效果显著。电化学处理技术的核心在于电极材料的选择与反应器的设计,常用的电极材料包括石墨电极、金属电极、修饰电极等,不同电极材料的催化活性、稳定性与使用寿命存在差异。例如,修饰电极通过在电极表面负载催化活性物质,能够显著提升电极的催化性能,加快反应速率,降低能耗。

在实际工程应用中,电化学处理技术可单独使用,也可与其他处理技术组合使用,实现协同处理。例如,在电镀废水处理中,电化学还原技术可将水体中的六价铬还原为三价铬,再通过电化学絮凝作用将其沉淀去除,处理效率可达 99% 以上,且污泥产生量少,处理成本低于传统处理技术;在印染废水处理中,电化学氧化技术可快速降解水体中的染料分子,去除色度与 COD,同时实现废水的脱色与净化。也有观点指出,电化学处理技术的能耗较高,电极材料的成本偏高,

且易产生副反应，这些问题仍需通过技术创新与工艺优化逐步解决，以推动其大规模工程化应用。

新兴物理化学处理技术的应用与发展，为物理化学水污染防治提供了新的思路与技术支撑，推动了水污染防治技术的转型升级。但需要明确的是，各类新兴技术并非万能的，其应用需结合具体的污染场景、水质特征、处理目标与经济成本，进行科学合理的选择与优化。在实际工程应用中，应注重新兴技术与传统技术的协同配合，充分发挥各类技术的优势，实现处理效果与经济性的平衡。同时，还需加强新兴物理化学处理技术的基础研究与工程化应用研究，突破技术瓶颈，优化工艺参数，降低处理成本，提升技术的稳定性与可靠性，推动其在水污染防治领域的广泛应用，为改善水环境质量、保障生态环境安全提供有力支撑。

第三章 有机与生物性水污染及其防治对策

第一节 持久性有机污染物的环境行为与风险

有机与生物性水污染是水环境质量恶化的重要诱因，其污染类型多样、危害深远，与物理化学水污染形成协同影响，共同威胁着生态环境安全与人类健康。在各类有机污染物中，持久性有机污染物（POPs）因其独特的环境持久性、生物累积性和高毒性，成为全球水环境治理中重点关注的污染物类别。这类污染物能够长期存在于水环境中，通过食物链逐级放大，对水生生态系统和人类健康造成不可逆的损害，其污染问题已超越国界，成为全球性的环境挑战。深入研究持久性有机污染物的环境行为、迁移转化规律，明确其环境风险，探索科学有效的防控与治理技术，是有机水污染防治的核心任务之一，也是保障水环境安全和人类健康的关键环节。

持久性有机污染物是指具有长期残留性、生物累积性、半挥发性和高毒性，能够在大气、水、土壤等环境介质中长距离迁移，并对生态系统和人类健康造成严重危害的一类有机污染物。其种类繁多，主要包括多氯联苯（PCBs）、多环芳烃（PAHs）、有机氯农药（OCPs）、二噁英类等，这类污染物大多具有人工合成属性，广泛应用于工业生产、农业活动、医药化工等多个领域，通过废水排放、大气沉降、土壤流失等途径进入水环境，成为水体中难以去除的“隐形污染物”。已有研究表明，持久性有机污染物即使在极低浓度下，也能对水生生物产生明显的毒性效应，同时通过食物链的生物放大作用，最终累积到人体，引发各类慢性疾病，甚至影响遗传发育。

持久性有机污染物的来源具有明确的人为主导特征，可分为工业来源、农业来源和生活来源三大类，其中工业生产是最主要的来源。工业生产中，化工、冶金、电子、塑料等行业的生产过程，会直接排放含有持久性有机污染物的废水，这类废水中的污染物浓度高、成分复杂，且处理难度大，若未经严格处理直接排放，会对受纳水体造成严重污染；部分工业产品在使用过程中，也会通过渗漏、

废弃等方式进入水环境，如多氯联苯曾广泛用于变压器、电容器等电气设备，废弃后若处置不当，会逐步释放到水体中。农业活动中，有机氯农药等持久性有机污染物曾被广泛用于病虫害防治，虽然目前多数有机氯农药已被禁止使用，但由于其环境持久性，仍能在水体、土壤中检测到，通过农田径流、地下水补给等途径进入地表水体，形成长期污染。生活来源则主要包括生活垃圾焚烧、污水排放等，生活垃圾中含有的塑料、橡胶等物质，在焚烧或降解过程中会产生持久性有机污染物，通过雨水冲刷、污水排放等进入水环境。

一、持久性有机污染物的环境行为特征

持久性有机污染物的环境行为是其污染危害的核心所在，主要体现在环境持久性、生物累积性、半挥发性和长距离迁移性四个方面，这些特征相互关联，共同决定了其污染范围和危害程度。环境持久性是持久性有机污染物最显著的特征，这类污染物化学性质稳定，不易被微生物降解、光降解和化学降解，能够在水环境中长期残留，残留时间可达数年甚至数十年，即使停止排放，也能在环境中存在很长时间，对水环境造成长期影响。

生物累积性是持久性有机污染物危害放大的关键机制，这类污染物具有疏水性和亲脂性，难以溶解于水，易被水生生物的脂肪组织吸附、累积，且不易被代谢排出。随着食物链的逐级传递，持久性有机污染物的浓度会呈现几何级数放大，处于食物链顶端的生物如鱼类、鸟类以及人类，体内的污染物浓度会远高于水体中的浓度，这种生物放大效应使得即使水体中污染物浓度极低，也可能对高营养级生物造成严重危害。例如，水体中微量的多氯联苯，经过藻类、浮游动物、鱼类等环节的累积，最终在鱼类体内的浓度可达到水体浓度的数千倍甚至数万倍。

半挥发性和长距离迁移性则使得持久性有机污染物能够突破区域限制，形成全球性污染。持久性有机污染物具有一定的挥发性，能够从水体表面挥发到大气中，随着大气环流进行长距离迁移，在迁移过程中，遇到低温天气会重新沉降到水体、土壤中，形成“全球蒸馏效应”，导致即使是远离污染源的偏远地区，如极地、高山等，也能检测到持久性有机污染物的存在。这种长距离迁移特性，使得持久性有机污染物的污染治理不再是单一区域的问题，需要全球各国协同发力。

（一）水环境中的迁移转化过程

持久性有机污染物在水环境中的迁移转化主要包括物理迁移、化学转化和生

物转化三个过程，其迁移转化速率和方向受到水体环境条件、污染物自身性质以及水生生物活动的影响。物理迁移是持久性有机污染物在水环境中最主要的迁移方式，主要包括扩散、吸附、沉降等过程，疏水性的持久性有机污染物易被水体中的悬浮物、底泥吸附，随着悬浮物的沉降，最终沉积到底泥中，形成污染物的“汇”，底泥也成为持久性有机污染物的重要储存库。

当水体环境发生变化，如水流扰动、pH 值改变、温度变化等，沉积在底泥中的持久性有机污染物会重新释放到水体中，造成二次污染，这种“吸附 - 释放”循环，进一步延长了污染物在水环境中的残留时间。化学转化是指持久性有机污染物在水环境中发生氧化、还原、水解等化学反应，转化为其他物质，但其化学性质稳定，化学转化速率缓慢，且转化产物往往仍具有毒性，甚至毒性更强。生物转化则是指水生生物通过代谢作用，将持久性有机污染物转化为低毒性或无毒性的物质，但其转化效率较低，且不同水生生物对污染物的转化能力存在差异，部分生物不仅无法转化污染物，还会将其累积在体内。

（二）不同环境介质间的迁移交换

持久性有机污染物并非局限于水环境中，而是能够在水、大气、土壤、生物等不同环境介质间进行迁移交换，形成多介质污染格局。水环境与大气环境之间的迁移交换主要通过挥发和沉降实现，水体中的持久性有机污染物挥发到大气中，随大气环流迁移，随后通过干湿沉降重新回到水体或土壤中；水环境与土壤环境之间的迁移交换则主要通过地表径流、地下水补给等方式实现，土壤中的持久性有机污染物会随着雨水冲刷进入水体，而水体中的污染物也会通过渗透作用进入土壤。

生物介质与水环境之间的迁移交换则主要通过生物的摄食、吸收等过程实现，水生生物通过摄食水体中的悬浮物、藻类等，吸收其中的持久性有机污染物，实现污染物从水体到生物体内的迁移；生物死亡后，尸体分解，体内的污染物会重新释放到水体中，完成污染物的循环。这种多介质间的迁移交换，使得持久性有机污染物的污染范围不断扩大，治理难度进一步增加。

二、持久性有机污染物的环境风险与危害

持久性有机污染物的环境风险主要体现在对水生生态系统和人类健康两个方面，其危害具有长期性、隐蔽性和不可逆性的特点，即使在低浓度下，也能产生

显著的危害效应。对水生生态系统而言，持久性有机污染物的毒性效应主要表现为对水生生物的生长、发育、繁殖产生抑制作用，导致水生生物畸形、死亡，破坏水生食物链，降低水生生物多样性。不同类型的持久性有机污染物，其毒性效应存在差异，如二噁英类污染物具有强致癌性、致畸性和致突变性，对水生生物的毒性极强，即使在痕量浓度下，也能导致水生生物死亡。

部分研究倾向于认为，持久性有机污染物对水生生态系统的危害具有累积效应，长期暴露会导致水生生物种群数量下降，生态系统功能退化，甚至导致生态系统崩溃。例如，在受多氯联苯污染的水体中，鱼类会出现生长迟缓、繁殖能力下降、畸形率升高等现象，以鱼类为食的鸟类也会受到影响，出现蛋壳变薄、幼鸟成活率降低等问题，进而影响整个水生生态系统的平衡。此外，持久性有机污染物还会影响水生生物的生理代谢过程，导致其免疫力下降，易感染疾病，进一步加剧生态系统的破坏。

对人类健康而言，持久性有机污染物主要通过食物链累积、饮用水摄入、皮肤接触等途径进入人体，引发各类健康风险。由于其生物累积性和长期残留性，人体一旦摄入，很难通过代谢排出，会在体内长期累积，随着累积量的增加，逐步引发慢性疾病。持久性有机污染物的健康危害主要包括致癌性、致畸性、致突变性，以及对内分泌系统、免疫系统、神经系统的干扰作用。例如，多氯联苯、二噁英类污染物已被证实具有强致癌性，长期暴露会增加人类患癌症的风险；有机氯农药则会干扰人体的内分泌系统，影响生殖发育，对婴幼儿的生长发育造成严重影响。

（一）对水生生态系统的具体危害

持久性有机污染物对水生生态系统的危害具有层次性，从低营养级生物到高营养级生物，均会受到不同程度的影响。低营养级生物如藻类、浮游动物，是持久性有机污染物的主要富集者，污染物会影响其光合作用、呼吸作用和繁殖能力，导致藻类生长受阻，浮游动物种群数量下降，进而影响整个水生食物链的基础。藻类作为水生生态系统的初级生产者，其生长受阻会导致水体中氧气含量下降，影响其他水生生物的生存。

高营养级生物如鱼类、两栖类、鸟类等，由于生物放大效应，体内的持久性有机污染物浓度最高，受到的危害也最为严重。鱼类长期暴露在受污染的水体中，会出现肝脏损伤、肾脏病变、生殖功能异常等问题，同时污染物还会影响鱼类的

行为，导致其觅食能力、逃避天敌能力下降，增加死亡风险。两栖类动物如青蛙，其皮肤具有强渗透性，易吸收水体中的持久性有机污染物，导致其发育畸形、繁殖能力下降，种群数量减少。鸟类通过摄食鱼类等水生生物，摄入大量持久性有机污染物，会影响其生殖系统，导致蛋壳变薄、孵化率降低，甚至出现幼鸟畸形、死亡等现象。

（二）对人类健康的潜在风险

人类接触持久性有机污染物的途径主要有三种：一是通过食用受污染的水生生物，这是最主要的接触途径，由于持久性有机污染物在水生生物体内大量累积，长期食用这类食物，会导致污染物在人体内逐步累积；二是通过饮用受污染的饮用水，虽然饮用水中持久性有机污染物浓度较低，但长期摄入也会对健康造成潜在危害；三是通过皮肤接触受污染的水体、土壤，或吸入含有污染物的大气，这种接触途径的危害相对较小，但长期暴露也可能对皮肤、呼吸系统造成影响。

持久性有机污染物对人类健康的危害具有隐蔽性和长期性，短期内可能不会出现明显的症状，但长期累积会逐步引发各类疾病。除了致癌、致畸、致突变外，这类污染物还会干扰人体的内分泌系统，导致激素水平紊乱，影响生殖发育，如导致男性精子数量减少、女性月经紊乱等；同时，还会损害免疫系统，降低人体的免疫力，使人易感染各类疾病；对神经系统也会造成损害，影响智力发育，尤其是对婴幼儿，其神经系统尚未发育完全，长期暴露会导致智力低下、发育迟缓等问题。也有观点指出，持久性有机污染物的长期暴露，还可能与心血管疾病、糖尿病等慢性疾病的发生有关。

三、持久性有机污染物的防控与治理思路

持久性有机污染物的防控与治理是一项系统性、长期性的工程，由于其环境持久性、生物累积性和长距离迁移性，单一的治理技术难以实现彻底去除，需构建“源头防控 - 过程拦截 - 末端治理”的全流程防控体系，结合政策监管、技术创新和国际协同，实现对持久性有机污染物的有效控制。源头防控是首要环节，核心是减少持久性有机污染物的排放，通过完善相关法律法规，禁止或限制高毒性持久性有机污染物的生产、使用和进口，推广绿色生产工艺，替代传统高污染产品，从源头上减少污染物的产生。

过程拦截主要针对工业废水、农业径流等污染源,通过建设污水处理设施、生态缓冲带等,拦截水体中的持久性有机污染物,减少其进入自然水体的量。工业废水是持久性有机污染物的主要排放来源,需加强工业废水的预处理和深度处理,采用高效的处理技术,去除废水中的持久性有机污染物,确保废水达标排放;农业活动中,需加强农业面源污染控制,推广生态农业,减少农药的使用,通过修建生态沟渠、湿地等,拦截农田径流中的持久性有机污染物。

末端治理则主要针对已受污染的水体和底泥,采用物理、化学、生物等多种技术相结合的方式,去除水体和底泥中的持久性有机污染物。物理处理技术如吸附法、膜分离技术等,通过吸附、过滤等方式,去除水体中的持久性有机污染物,具有操作简单、处理效率高的优点,但成本较高,且易产生二次污染;化学处理技术如高级氧化技术,通过产生强氧化性自由基,降解持久性有机污染物,使其转化为低毒性或无毒性的物质,处理效果好,但需严格控制反应条件;生物处理技术如微生物降解技术,利用微生物的代谢作用,降解持久性有机污染物,具有成本低、无二次污染的优点,但降解速率缓慢,受环境条件影响较大。

由于持久性有机污染物具有长距离迁移性,其防控与治理还需要加强国际协同,参与全球持久性有机污染物治理行动,遵守相关国际公约,加强国际间的技术交流与合作,共同应对全球性的污染挑战。同时,还需加强环境监测,建立完善的持久性有机污染物监测体系,及时掌握水体中持久性有机污染物的浓度、分布和迁移规律,为防控与治理工作提供科学依据。此外,还需加强公众宣传教育,提高公众对持久性有机污染物危害的认识,引导公众参与污染防控,形成全社会共同参与的治理格局。

持久性有机污染物的污染治理是有机水污染防治的重点和难点,其环境行为复杂、危害深远,需要长期投入大量的人力、物力和财力。随着科技的不断进步,新型治理技术如纳米技术、生物修复技术等不断涌现,为持久性有机污染物的高效治理提供了新的思路和方法。未来,需进一步加强持久性有机污染物的基础研究,深入探索其环境行为和迁移转化规律,优化现有防控与治理技术,开发高效、低成本、无二次污染的新型技术,同时完善政策监管体系,加强国际协同,构建全方位、多层次的防控与治理体系,逐步减少持久性有机污染物的环境残留,保障水环境安全和人类健康。

第二节 营养盐污染与水体富营养化防控

营养盐污染是当前水环境质量恶化的核心诱因之一，其引发的水体富营养化问题已成为全球性水环境治理的重点与难点，不仅影响淡水生态系统，也对近岸海域生态环境造成严重威胁。不同于重金属污染的累积毒性与生物富集效应，营养盐污染以氮、磷为核心污染物，通过改变水体生态系统的群落结构与功能，破坏水体内部物质循环与能量流动的动态平衡，最终导致水体水质恶化、功能退化，甚至丧失其供水、养殖、景观等生态服务价值。已有研究表明，当水体中总氮（TN）浓度超过 0.2mg/L、总磷（TP）浓度超过 0.02mg/L 时，富营养化现象便可能发生，而在封闭或半封闭水体（如湖泊、水库、海湾）中，由于水体交换能力弱、自净速度慢，这种富营养化发生的风险会显著提升，且一旦发生便难以快速逆转。值得注意的是，营养盐污染的来源具有多元性与复杂性，既包括工业废水、生活污水等排放集中的点源污染，也涵盖农业面源污染、大气沉降、地表径流等分散性的非点源输入，这种多元复合的污染特征，使得其防控工作难以通过单一措施实现根治，必须构建多维度、全流程、全覆盖的综合防控体系。

水体富营养化的本质是营养盐输入量超过水体自净能力，导致浮游藻类异常增殖的生态失衡过程，这一过程的发生与水体的水文条件、气象因素及生物群落结构密切相关。藻类的过量生长不仅会遮蔽水体光照，抑制沉水植物的光合作用，导致沉水植物枯萎死亡，破坏水体生态系统的基础群落结构，还会在死亡分解过程中消耗大量溶解氧（DO），逐步形成厌氧环境，进而产生硫化氢、氨氮等有毒有害物质，直接威胁鱼类、底栖生物等水生生物的生存，甚至导致大规模水生生物死亡。在极端情况下，藻类爆发会形成“水华”或“赤潮”，其中蓝藻水华产生的微囊藻毒素等有害物质，还会渗入饮用水源地，影响饮用水安全，同时对渔业生产造成毁灭性打击，引发严重的经济损失与生态风险。相关研究指出，富营养化水体的生态修复周期长、难度大，即使彻底切断营养盐输入，水体也可能长期处于富营养化状态，这进一步凸显了营养盐污染防控工作的前瞻性与必要性，需提前布局、综合施策。

一、营养盐污染的来源解析与迁移转化特征

明确营养盐污染的来源与迁移转化规律，是开展富营养化防控工作的前提与

基础,也是制定科学防控策略、提升防控效果的核心依据。营养盐的来源可清晰分为点源污染与非点源污染两大类,二者在排放特征、污染范围、管控难度上存在显著差异,且相互交织、协同作用,共同构成了营养盐污染的整体格局,也决定了富营养化防控工作的复杂性与系统性。

(一) 点源污染的排放特征与贡献度

点源污染是营养盐污染的重要来源,具有排放集中、污染物浓度高、可控性较强的鲜明特点,也是当前营养盐污染防控中最易实现精准管控的环节。工业废水排放是点源营养盐的主要载体之一,其中食品加工、畜禽养殖、化工、造纸、印染等行业的废水中,含有大量的氮、磷营养物质,若未经有效处理直接排放,会快速提升受纳水体的营养盐浓度,打破水体原有的生态平衡。例如,食品加工行业产生的废水中,氨氮浓度可达到数百 mg/L,而规模化畜禽养殖废水的总磷浓度往往超过 10mg/L,这些高浓度营养盐的集中输入,会对水体自净系统造成强烈冲击,短期内便可能诱发藻类爆发。生活污水也是点源营养盐污染的重要组成部分,随着城市化进程的加快,城市人口规模不断扩大,生活污水排放量逐年增加,其中含有的洗涤剂、粪便、食物残渣等物质,是氮、磷营养盐的主要来源,且生活污水中的营养盐形态更易被藻类吸收利用。部分研究倾向于认为,点源污染在封闭水体(如城市景观湖、小型水库)的营养盐输入中占比可达 60% 以上,是导致此类水体富营养化的首要因素,也是防控工作需重点突破的环节。

(二) 非点源污染的扩散特征与防控难点

非点源污染具有排放分散、范围广泛、随机性强的特点,受气候、地形、人类活动等多种因素影响,其防控难度远高于点源污染。农业面源污染是非点源营养盐污染的核心来源,也是当前富营养化防控的薄弱环节,尤其在平原农业区和集约化养殖区域更为突出。在农业生产过程中,化肥的过量施用、有机肥施用不规范以及畜禽养殖废弃物的随意排放,会导致大量氮、磷营养物质通过地表径流、土壤渗透、地下淋溶等多种途径进入周边水体,形成隐蔽性污染。据统计,农业面源污染贡献了全球水体中 50% 以上的氮营养盐和 30% 以上的磷营养盐,在农业发达地区,这一比例会更高,部分区域甚至超过 70%。此外,城市地表径流、大气沉降、水土流失等也会带来一定量的营养盐输入,城市地表径流中的落叶、垃圾、洗涤剂残留等,经雨水冲刷后汇入水体,会显著增加水体营养盐负荷;大气沉降中的氮氧化物、氨等物质,可通过降雨、降雪等形式进入水体,成为营养

盐的间接来源。非点源污染的随机性与分散性，使得其难以实现精准监测与有效控制，成为富营养化防控工作中的重点难点问题，也制约了整体防控效果的提升。

营养盐在水体中的迁移转化过程，直接影响着富营养化的发生速度、发展程度及持续时间，是理解富营养化形成机制的关键。氮营养盐在水体中主要以氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮等不同形态存在，其迁移转化过程复杂，主要受水体物理扰动、化学性质及生物群落活动等多种因素的综合影响。在有氧条件下，水体中的氨氮会通过硝化细菌的作用发生硝化反应，转化为硝酸盐氮；而在厌氧环境中，硝酸盐氮则会通过反硝化细菌的反硝化作用，转化为氮气并释放到大气中，这一过程是水体氮循环的重要组成部分，也是水体自身自净能力的重要体现。磷营养盐在水体中主要以溶解态磷、颗粒态磷两种形态存在，其中颗粒态磷易与水体中的悬浮物、底泥颗粒结合，逐步沉积到底泥中，形成稳定的营养盐储备库；当水体环境发生变化，如 pH 值波动、水流扰动加剧、溶解氧浓度变化时，底泥中的磷会重新释放到水体中，导致水体营养盐浓度反弹，进而造成富营养化现象反复发生，增加防控难度。也有观点指出，水体中的微生物群落结构组成，会直接影响营养盐的迁移转化效率，有益微生物的大量存在可显著促进营养盐的降解与转化，而有害微生物的过度增殖则会加剧营养盐在水体中的积累，进一步推动富营养化进程。

二、水体富营养化的防控技术体系与实践路径

水体富营养化的防控是一项系统性、长期性工程，需始终坚持“源头控制、过程拦截、末端治理”的核心原则，结合点源与非点源污染的不同特征，构建“防控-治理-修复”一体化的技术体系，实现全流程、全方位管控。不同类型的水体，如河流、湖泊、海湾等，其水文条件、水质现状、富营养化程度与成因存在明显差异，需结合具体水体的实际情况，针对性采用不同的防控技术与措施，避免“一刀切”，确保防控效果的科学性、针对性与有效性。

（一）源头控制技术与措施

源头控制是富营养化防控的根本，核心是从源头减少营养盐的输入量，遏制富营养化的发生与发展，这也是最具性价比的防控手段。对于点源污染，核心防控措施是加强废水处理设施的建设、升级与规范化运行管理，全面提高废水处理效率与达标率。工业废水需根据不同行业的污染特征，采用针对性的处理工艺，

重点去除废水中的氮、磷营养物质，确保排放浓度严格符合国家及地方相关排放标准；生活污水应加快城镇污水处理厂的建设与升级改造，全面推广高效脱氮除磷工艺，同时加强管网建设，减少雨污合流带来的污染负荷，进一步提高生活污水的处理水平，降低营养盐排放总量。例如，当前广泛应用的 A²/O 工艺、MBR 工艺、SBR 工艺等，可有效去除废水中的氨氮、总磷，去除率可达 80% 以上，能够显著降低点源营养盐的输入负荷，为水体富营养化防控奠定基础。

对于农业面源污染，源头控制的关键是优化农业生产方式，转变传统种植养殖模式，减少化肥、农药的过量施用，从根本上降低营养盐流失风险。可广泛推广测土配方施肥技术，结合土壤肥力检测结果与作物生长需求，精确定化肥施用种类、用量与时间，提高化肥利用率，有效减少氮、磷营养盐的流失；同时，鼓励种植绿肥、秸秆还田、轮作休耕等生态农业模式，改善土壤理化性质与结构，增强土壤对营养盐的吸附与固定能力，减少地表径流带来的营养盐流失。此外，加强畜禽养殖废弃物的资源化利用，针对规模化养殖场与散户养殖，分别建设配套的粪便处理设施，将畜禽粪便经无害化处理后转化为有机肥，实现营养盐的循环利用，既减少污染物排放，又能提升土壤肥力。同时，在农田与水体之间合理设置缓冲带（如植被缓冲带、湿地缓冲带、人工草皮缓冲带等），利用缓冲带植被的拦截、吸附作用，有效拦截地表径流中的营养盐、悬浮物等污染物，进一步降低非点源污染对水体的影响。

（二）过程拦截与末端治理技术

过程拦截主要针对分散性强的非点源污染，通过构建多层次、多类型的拦截体系，有效减少营养盐向受纳水体的迁移与输入。除了农田周边设置的缓冲带之外，还可在河流入湖口、水库周边、湿地周边等关键区域，建设人工湿地系统，利用湿地内部土壤、植物、微生物的协同作用，通过吸附、沉淀、过滤、微生物降解等多种途径，高效拦截与去除水体中的营养盐及其他污染物。人工湿地具有处理效果稳定、运行成本低、生态效益显著等突出特点，可有效去除水体中的氨氮、总磷，去除率可达 60%-90%，是当前非点源污染拦截与控制的重要技术手段，同时还能改善区域生态环境。此外，河道清淤也是过程拦截与末端治理相结合的重要措施，底泥中的营养盐储备库是水体富营养化反复发生、难以根治的重要原因之一，通过科学清淤可有效去除底泥中积累的营养盐，减少其释放对水体的影响。但需注意的是，清淤过程中应严格控制施工方式，避免底泥扰动过大，防止

沉积的营养盐重新进入水体造成二次污染，同时需对清淤底泥进行无害化处理与资源化利用，实现“治污与资源化”的协同推进。

末端治理主要针对已发生富营养化的水体，核心目标是快速降低水体中的营养盐浓度，有效抑制藻类异常增殖，逐步恢复水体生态功能，缓解富营养化带来的危害。物理方法是末端治理中应用最广泛、操作最简便的手段，主要包括曝气增氧、机械除藻、水体稀释等。其中，曝气增氧可通过人工曝气设备，提高水体中的溶解氧浓度，有效改善水体厌氧环境，促进水体中营养盐的降解与转化，同时抑制藻类的厌氧增殖，延缓富营养化发展；机械除藻可通过专业设备直接打捞去除水体中的藻类，快速降低水体浊度，缓解富营养化症状，尤其适用于藻类爆发期的应急处理，但该方法只能治标，无法从根本上解决营养盐过量的问题，需与源头控制、生物治理等技术结合使用，才能实现长效治理。化学方法主要是通过向水体中投放化学药剂，如除藻剂、絮凝剂、氧化剂等，抑制藻类生长或去除水体中的营养盐，处理效率高、见效快，但化学药剂的使用可能会对水生生物造成一定危害，甚至产生二次污染，因此需严格控制药剂的种类、用量与投放方式，确保处理过程的安全性与环境友好性。

生物治理技术是末端治理的发展方向，具有环境友好、无二次污染、可持续性强等突出特点，已成为富营养化水体生态修复的核心技术之一，主要包括生物浮床、微生物制剂投放、沉水植物恢复等多种形式。生物浮床通过在水体表面种植耐污性强、吸收能力好的水生植物（如芦苇、香蒲、凤眼莲、菖蒲等），利用植物的根系吸收作用，高效去除水体中的氮、磷营养盐，同时植物叶片可遮挡水体光照，抑制藻类的光合作用与异常增殖，实现“治污与生态修复”同步推进。微生物制剂投放是向水体中定向投放有益微生物（如硝化细菌、反硝化细菌、藻类抑制剂、复合微生物菌剂等），通过微生物的代谢作用，促进营养盐的降解与转化，调节水体微生物群落结构，恢复水体自身的自净能力，尤其适用于轻度至中度富营养化水体的治理。沉水植物恢复是通过人工种植金鱼藻、狐尾藻、苦草等沉水植物，改善水体透明度与溶解氧水平，优化水体生态环境，增强水体的自净能力，同时为鱼类、底栖生物等提供栖息地，促进水体生态系统的全面恢复，实现富营养化水体的长效治理。

营养盐污染与水体富营养化防控工作，不仅需要先进的技术层面支撑，还需要政策、管理、宣传等多方面的协同配合，构建全方位、多层次的防控体系。完

善的法律法规体系是防控工作的重要保障，需进一步加强水环境质量标准、污染物排放标准的制定与修订，细化营养盐排放管控要求，同时加大对违法排放、超标排放行为的处罚力度，形成有力震慑。建立跨区域、跨部门的协同治理机制，明确环保、农业、水利、住建等各部门的职责分工，打破部门壁垒，加强信息共享与协同联动，形成防控合力。加强监测体系建设，完善营养盐监测网络，优化监测点位布局，提高营养盐污染的监测精度、频次与预警能力，为防控工作提供科学、精准的数据支撑。同时，还需加强环保宣传教育，通过多种渠道普及营养盐污染危害与富营养化防控知识，提高公众的环保意识与参与积极性，引导公众养成绿色生活习惯，主动参与到富营养化防控工作中，逐步形成“政府主导、企业主体、公众参与”的多元共治格局。

当前，富营养化防控技术仍面临诸多现实挑战，如非点源污染防控效率不高、底泥营养盐释放难以彻底控制、生物治理技术的稳定性与适应性有待提升，以及不同防控技术的协同应用效果不佳等。未来，需加强环境科学、生态学、工程学、材料学等多学科的交叉融合研究，研发高效、低成本、环境友好、适应性强的新型防控技术；同时注重营养盐的资源化利用，推动“治污与资源化”深度结合，实现水环境治理与资源循环利用的协同发展，提升治理的经济效益与生态效益。此外，还需根据不同水体的水文特征、污染现状与富营养化程度，制定个性化、差异化的防控方案，优化技术组合，提高防控工作的针对性与有效性，逐步改善水环境质量，恢复水体生态功能，推动水环境治理体系与治理能力的现代化。

第三节 病原微生物污染及消毒技术比较

病原微生物污染是水环境中一类隐蔽性强、危害范围广且传播风险高的生物性污染，其主要来源于生活污水、医疗废水的无序排放，农业面源中畜禽养殖废水、农田径流的携带，以及垃圾渗滤液的渗漏等多种途径，其中生活污水和畜禽养殖废水是最主要的污染来源。与物理化学污染不同，病原微生物个体微小、繁殖速度快，且具有较强的环境适应性，即使在低浓度条件下，也可能通过饮用水摄入、皮肤接触、呼吸道吸入等多种途径引发人群感染性疾病，对公共卫生安全构成严重且持续的威胁。已有研究表明，全球每年因饮用受病原微生物污染的水而导致的腹泻、伤寒、霍乱等疾病案例超过数千万例，其中发展中国家因水环境

治理水平有限、基础设施不完善，污水处理率偏低，受此类污染的影响更为显著。在我国，随着城镇化进程的加快和畜禽养殖业的规模化、集约化发展，生活污水排放量持续增加，部分偏远地区医疗废水处理设施简陋、处理标准不达标，农业面源污染管控措施不到位、长效机制未建立，导致地表水体和地下水中的病原微生物检出率居高不下，成为制约水环境质量提升和饮用水安全保障的重要瓶颈，也给公共卫生防控工作带来了不小的压力。

水环境中的病原微生物种类繁多、分布广泛，主要包括细菌、病毒、原生动物和寄生虫四大类，不同类型微生物的环境适应性、致病性和传播途径存在显著差异，其对人体健康的危害程度也各不相同，且在不同水体环境中的检出概率也有所区别。细菌类病原微生物中，大肠杆菌、沙门氏菌、志贺氏菌、霍乱弧菌等较为常见，其中大肠杆菌常被作为水体受粪便污染的指示生物，其检出浓度可间接反映水体中病原微生物的污染程度和潜在传播风险，也是水环境监测中重点检测的指示性微生物之一。病毒类病原微生物如甲型肝炎病毒、诺如病毒、轮状病毒等，具有较强的抗逆性和传播能力，能够在水环境中存活较长时间，且常规水处理工艺难以将其完全去除，容易通过饮用水传播引发群体性健康事件，造成较大的公共卫生影响和社会隐患。原生动物中的隐孢子虫、贾第虫等，其包囊具有耐高温、耐消毒剂的特性，即使经过常规消毒处理，仍可能保持活性，对饮用水安全构成潜在且隐蔽的威胁，尤其对免疫力较低的人群危害更为明显。寄生虫类如血吸虫、蛔虫等，主要通过污染水体传播，一旦进入人体，会在体内寄生繁殖，严重时可导致人体器官损伤，影响人体健康甚至危及生命，在农村及偏远地区的污染风险相对更高。

一、病原微生物在水环境中的迁移转化规律

病原微生物在水环境中的迁移转化过程受水体理化性质、水文条件、环境微生物群落结构等多种因素的综合影响，其迁移路径和转化效率直接决定了污染范围和危害程度，也影响着后续消毒处理的难度和效果。水体中的溶解氧、pH 值、温度、浊度等理化参数，会显著影响病原微生物的存活时间和活性，不同类型的病原微生物对这些参数的适应性也存在差异。一般而言，在低温、低浊度、中性偏碱的水体环境中，病原微生物的存活时间更长，而高温、高浊度、强酸性或强碱性条件会加速其灭活，降低其传播风险。相关研究指出，水体中的悬浮颗粒物

能够通过吸附作用固定病原微生物，再通过沉降作用将其转移至水体底泥中，使底泥成为病原微生物的“储存库”，在一定条件下（如水体扰动、底泥再悬浮、降雨冲刷等），这些病原微生物会重新释放到水体中，形成二次污染，进一步扩大污染范围。

水文条件对病原微生物的迁移具有重要影响，这种影响在不同类型水体中表现出明显差异。在河流、湖泊等地表水体中，水流速度、水力停留时间直接决定了病原微生物的扩散范围和扩散速度，水流速度越快，病原微生物的扩散距离越远，扩散速度也越快，而水力停留时间越长，病原微生物与水体环境的相互作用越充分，其灭活效率也越高，污染传播风险随之降低。地下水体中，病原微生物的迁移主要受土壤孔隙度、渗透系数以及土壤颗粒组成等因素影响，由于土壤颗粒的吸附作用和土著微生物的降解作用，地下水中病原微生物的迁移速度相对较慢，但其存活时间更长。一旦地下水受到病原微生物污染，其修复难度大、周期长，且修复成本高，对饮用水安全的威胁更为持久。此外，水环境中的土著微生物群落也会通过竞争营养物质、产生抗菌物质等方式，抑制病原微生物的生长繁殖，从而间接影响其在水环境中的存活和迁移过程。

二、常用病原微生物消毒技术及原理

消毒是控制水环境中病原微生物污染的核心技术，其核心原理是通过物理、化学或生物方法，破坏病原微生物的细胞结构、核酸或酶系统，使其失去活性或繁殖能力，从而降低水体中的病原微生物浓度，保障饮用水和水环境安全，也是水污染防治过程中不可或缺的关键环节。目前，水环境消毒技术主要分为物理消毒、化学消毒和生物消毒三大类，各类技术的适用场景、消毒效果和优缺点存在显著差异，实际应用中需根据水体类型、污染程度、处理规模、处理成本以及环保要求等因素进行合理选择，确保消毒效果与环境安全性兼顾。

（一）物理消毒技术

物理消毒技术是通过物理作用实现病原微生物灭活的方法，具有无化学残留、消毒效果稳定、不产生二次污染等突出优点，主要包括紫外线消毒、超声波消毒、热消毒等常见类型。其中，紫外线消毒是目前应用最广泛的物理消毒技术之一，其原理是利用紫外线的高能光子破坏病原微生物的核酸结构，阻止其复制和繁殖，从而达到快速消毒的目的。紫外线消毒具有消毒速度快、无二次污染、操作简便、

占地面积小等优势,适用于饮用水、生活污水、医疗废水等多种水体的消毒处理,尤其适合对化学消毒剂敏感、对水质要求较高的场景。但该技术也存在一定局限性,水体中的浊度、悬浮物会遮挡紫外线,影响其穿透能力,从而降低消毒效果,且消毒后的水体无持续杀菌能力,若后续输水、储存环节受到污染,病原微生物可能再次滋生,因此常需配合其他消毒方式使用。

超声波消毒是利用超声波的机械振动、空化效应等作用,破坏病原微生物的细胞膜和细胞壁,导致其细胞破裂、内容物外泄,从而实现灭活。该技术具有消毒效率高、适用范围广等特点,可有效灭活细菌、病毒、原生动物等各类病原微生物,且对水体中的其他污染物有一定的降解作用。但超声波消毒的能耗较高,处理成本相对较高,且消毒效果受水体温度、pH 值等因素影响较大,目前主要应用于小规模水体消毒或辅助消毒场景。热消毒是通过高温作用破坏病原微生物的酶系统和细胞结构,常见的有煮沸消毒、蒸汽消毒等,该技术消毒效果可靠、操作简单,但能耗高、处理效率低,适用于少量饮用水或小型污水处理场景,难以应用于大规模水体消毒。

（二）化学消毒技术

化学消毒技术是通过向水体中添加化学消毒剂,利用消毒剂的化学作用破坏病原微生物的结构和功能,实现消毒目的,具有消毒效果好、持续杀菌能力强、处理成本低、操作简便等优点,是目前水环境消毒中应用最广泛、最成熟的技术类型。常用的化学消毒剂主要包括含氯消毒剂、含溴消毒剂、臭氧消毒剂、二氧化氯消毒剂等,各类消毒剂的消毒原理、适用场景和优缺点各有侧重。其中,含氯消毒剂是最常用的化学消毒剂,主要包括氯气、次氯酸钠、漂白粉等,其消毒原理是通过释放次氯酸,次氯酸具有强氧化性,能够破坏病原微生物的细胞膜、蛋白质和核酸,使其失去活性,从而实现灭活。含氯消毒剂具有消毒效果可靠、价格低廉、来源广泛、使用方便等优势,适用于生活污水、工业废水、饮用水等各类水体的消毒处理,但该类消毒剂在消毒过程中会产生三氯甲烷、四氯化碳等消毒副产物,这些副产物具有致癌、致畸、致突变等危害,会对水环境和人体健康造成潜在影响,因此其使用剂量和使用场景需要严格管控。

臭氧消毒剂是一种强氧化性消毒剂,其消毒原理是利用臭氧的强氧化性破坏病原微生物的细胞结构和核酸,使其快速失去活性,具有消毒效率高、无二次污染、杀菌谱广等突出优点,能够有效灭活细菌、病毒、原生动物等各类病原微生物。

物,且不会产生含氯消毒副产物,对水质的影响较小。但臭氧消毒剂的稳定性差、半衰期短,通常仅为十几分钟,无法长期储存,需要现场制备、即时使用,且臭氧制备设备成本较高,运行过程中能耗较大,增加了处理成本。同时,臭氧消毒后的水体无持续杀菌能力,后续输水和储存过程中,若受到二次污染,病原微生物易再次滋生,因此需要添加少量消毒剂维持消毒效果,目前主要应用于饮用水深度消毒和高品质污水处理等对水质要求较高的场景。二氧化氯消毒剂是一种高效、广谱的消毒剂,其消毒原理与臭氧类似,具有强氧化性,能够有效灭活各类病原微生物,且不会产生含氯消毒副产物,消毒效果受水体 pH 值、浊度等因素影响较小,适应性更强。该消毒剂稳定性较好,可现场制备或储存使用,处理成本介于含氯消毒剂和臭氧消毒剂之间,目前广泛应用于饮用水、生活污水、医疗废水等各类水体的消毒处理,应用场景更为广泛。

(三) 生物消毒技术

生物消毒技术是利用生物制剂或微生物的代谢作用,抑制或灭活病原微生物,具有环境友好、无化学残留、对人体无害等突出优点,是一种新型的绿色消毒技术,目前处于快速发展和推广应用阶段。常用的生物消毒技术主要包括益生菌消毒、噬菌体消毒、植物提取物消毒等,各类技术的作用机制和适用场景存在一定差异。益生菌消毒是利用有益微生物(如乳酸菌、芽孢杆菌、光合细菌等)的代谢产物,抑制病原微生物的生长繁殖,或通过竞争营养物质、占据生存空间等方式,降低水体中病原微生物的浓度,从而实现消毒目的。该技术不仅环境友好,不会产生二次污染,还能够改善水体微生态环境,促进水体生态系统的恢复,但消毒效果相对较慢,消毒效率较低,不适用于高浓度病原微生物污染的应急处理,主要适用于水体的辅助消毒或生态修复场景。

噬菌体消毒是利用噬菌体(病毒的一种)对特定细菌的特异性侵染作用,破坏细菌的细胞结构,导致细菌裂解死亡,从而实现消毒目的。该技术具有特异性强、消毒效率高、无二次污染等优点,能够针对性地灭活水体中的特定病原细菌,且不会影响水体中的有益微生物,适用于含有特定细菌污染的水体消毒,尤其在医疗废水等针对性污染场景中具有一定的应用潜力。但噬菌体的特异性较强,一种噬菌体仅能侵染一种或少数几种细菌,难以实现对多种病原微生物的全面消毒,且噬菌体的制备和储存难度较大,对储存环境要求较高,这在一定程度上限制了其大规模推广应用。植物提取物消毒是利用植物中含有的抗菌成分(如黄酮类、

生物碱类、挥发油等），抑制或灭活病原微生物，具有环境友好、来源广泛、无化学残留等优点，适用于小型水体消毒或饮用水的辅助消毒。但植物提取物的抗菌效果相对较弱，且提取工艺复杂、提取成本较高，难以应用于大规模水体消毒场景，目前多作为辅助消毒手段使用。

不同消毒技术的适用场景、消毒效果、处理成本 and 环境影响存在显著差异，实际应用中需结合水体污染类型、污染程度、处理规模、处理成本以及水体后续用途等多种因素，综合考虑选择合适的消毒技术，或采用多种消毒技术组合使用，以提高消毒效果，降低消毒副产物的产生，实现病原微生物污染的有效控制。部分研究倾向于认为，组合消毒技术（如紫外线 + 二氧化氯消毒、臭氧 + 含氯消毒剂消毒）能够兼顾消毒效果和环境安全性，既能够提高病原微生物的灭活效率，弥补单一消毒技术的不足，又能够减少消毒副产物的产生，降低对水环境和人体健康的潜在风险，是未来水环境消毒技术的重要发展方向之一。也有观点指出，消毒技术的选择还应充分考虑水体的后续用途和排放要求，如饮用水消毒需优先选择消毒效果好、消毒副产物少、对人体无害的技术，严格符合饮用水卫生标准；而工业废水消毒可根据废水性质、排放要求选择成本较低、处理效率较高的消毒技术，在满足达标排放的前提下，实现处理效果与经济效益的平衡，同时兼顾环境安全性。

第四节 生物技术在有机废水处理中的应用

有机废水是水环境中有机污染物的主要载体，其来源广泛，涵盖工业生产、农业活动及日常生活等多个领域，成分复杂且浓度波动较大，既包含大量可生物降解有机物，也含有多类难降解有机污染物，若未经有效处理直接排放，不仅会严重破坏水体生态平衡，导致水生生物死亡、水体功能退化，还会威胁饮用水安全与人体健康，进而引发一系列环境与公共卫生问题。生物技术以其环境友好、处理效率高、能耗低且无二次污染等显著优势，已成为有机废水处理领域的核心技术之一，在工程实践中得到广泛应用与不断优化完善。与物理化学处理技术相比，生物技术依托微生物的代谢作用降解有机污染物，可实现污染物的资源化转化，更符合可持续发展的环境治理理念，尤其适用于中低浓度有机废水的深度处理，同时也能作为辅助手段处理高浓度有机废水，有效降低后续物理化学处理的

难度与成本，提升整体处理系统的经济性与环保性。

有机废水的生物处理本质上是微生物对有机污染物的代谢转化过程，其核心在于构建适宜的微生物群落结构，通过调控环境条件强化微生物的降解活性，从而实现有机污染物的彻底矿化或资源化转化。已有研究表明，微生物对有机污染物的降解能力具有明显的物种特异性，不同类型、不同浓度的有机废水，需要匹配对应的优势微生物群落，才能达到理想的处理效果，这也是生物处理技术个性化设计的核心依据。例如，含芳香族化合物的工业废水，其降解过程通常需要多种微生物协同作用，通过多步代谢反应逐步破坏难降解的芳香环结构，最终转化为二氧化碳、水等无害物质；而生活污水中的易降解有机物，如碳水化合物、蛋白质等，可通过普通异养微生物的代谢快速降解，无需复杂的群落调控即可实现基本的水质净化，这也是生活污水处理工艺相对简单的重要原因。

一、有机废水生物处理的核心微生物类型及作用机制

有机废水生物处理中涉及的微生物种类繁多，涵盖细菌、真菌、藻类及原生动物等多个类群，其中细菌是降解有机污染物的核心主体，其种类组成、数量规模及代谢活性，直接决定了整个生物处理系统的处理效能与运行稳定性。细菌本身具有繁殖速度快、代谢能力强、环境适应范围广等天然优势，能够在不同水质、不同工况的废水处理系统中快速定植并发挥作用，根据其代谢过程对氧气的需求，可分为好氧细菌、厌氧细菌及兼性厌氧细菌三大类，不同类型的细菌在有机废水处理的不同环节、不同工艺中，发挥着截然不同且不可替代的作用，共同构成了生物处理系统的微生物功能体系。

好氧细菌是好氧生物处理系统的核心微生物，主要包括芽孢杆菌属、假单胞菌属、动胶菌属等常见菌株，其在有氧条件下通过有氧呼吸作用，将有机污染物逐步氧化分解为二氧化碳和水等无害物质，同时自身获得生长繁殖所需的能量。好氧细菌对易降解有机污染物的降解效率较高，在适宜的温度、pH 值及溶解氧条件下，可在短时间内将废水中的 BOD₅ 去除 80% 以上，满足常规废水处理的基本要求。相关研究指出，好氧细菌的降解能力受环境因素影响显著，其中溶解氧浓度不足会直接导致其代谢活性下降，甚至出现厌氧代谢现象，进而影响整个处理系统的处理效果；而过高的有机负荷会超出细菌的代谢承载能力，导致微生物群落结构失衡，引发污泥膨胀等常见工程问题，增加处理系统的运行维护难度。

厌氧细菌主要存在于厌氧生物处理系统中,核心类群包括产甲烷菌、产酸菌、硫酸盐还原菌等,其在无氧条件下通过一系列复杂的代谢反应,将有机污染物分解为甲烷、二氧化碳、硫化氢等产物,既实现有机污染物的有效降解,也完成了污染物的资源化利用。其中,产酸菌作为厌氧代谢的前端微生物,可将复杂的大分子有机污染物分解为小分子有机酸,如乙酸、丙酸、丁酸等,为后续产甲烷菌的代谢提供充足的营养物质;产甲烷菌则作为厌氧代谢的核心菌株,将小分子有机酸进一步转化为甲烷,甲烷作为一种清洁可再生能源,可回收用于燃烧发电、民用燃气等领域,真正实现了有机废水的资源化处理。厌氧生物处理技术尤其适用于高浓度有机废水,如食品加工废水、养殖废水、酿造废水等,其处理过程无需额外曝气,能耗极低,且能减少污泥产量,降低污泥处理成本,但相比好氧生物处理,其处理周期较长,对环境条件的要求更为严格,温度、pH 值的微小波动都可能影响处理效能。

真菌在有机废水处理中主要承担难降解有机污染物的降解任务,常见的菌株包括酵母菌、霉菌、担子菌等,其与细菌相比,最大的优势在于具有较强的胞外酶分泌能力,可针对性分泌纤维素酶、木质素酶、多酚氧化酶等特异性酶类,将废水中难以被细菌降解的纤维素、木质素、芳香族化合物等难降解有机物,分解为可被其他微生物进一步利用的小分子物质,弥补了细菌在难降解污染物处理中的不足。藻类则可通过光合作用吸收废水中的氮、磷等营养物质,同时以有机污染物作为碳源进行代谢生长,在实现水质净化的同时完成生物量积累,而藻类产生的生物量还可进一步用于制备生物燃料、饲料或有机肥料,进一步提升有机废水处理的资源化利用率。原生动物则主要以细菌为食,不仅可以调节细菌群落的数量与结构,减少多余污泥的产生,其种类和数量的变化还能直观反映生物处理系统的运行状态,是评价系统稳定性的重要生物指标,当系统出现异常时,原生动物的群落结构会率先发生明显变化。

二、生物技术在有机废水处理中的主要应用形式及实践效果

(一) 好氧生物处理技术的应用

好氧生物处理技术是有机废水处理中应用最广泛、最成熟的生物技术形式,主要包括活性污泥法、生物膜法、氧化塘、生物滤池等多种工艺,其核心原理均是在有氧条件下,利用好氧微生物的代谢作用将有机污染物降解为无害物质,具

有处理效率高、出水水质稳定、运行成本相对较低等突出优势。其中，活性污泥法是目前城市污水处理厂及各类工业有机废水处理中应用最广泛的核心技术，其通过曝气装置向反应池内持续通入空气，维持水中充足的溶解氧浓度，使水中的微生物快速繁殖并聚集形成絮状活性污泥，活性污泥与废水中的有机污染物充分接触、吸附、降解，最终实现污染物的去除，整个过程操作简便、技术成熟，可适应不同规模的废水处理需求。

活性污泥法的处理效果受曝气方式、污泥龄、有机负荷等多种因素的综合影响，近年来，随着环保要求的不断提高，通过优化曝气系统、引入高效微生物菌株、改进运行参数等方式，活性污泥法的处理效能得到显著提升，可有效去除废水中的 COD、BOD₅、氨氮等主要污染物，出水水质能够稳定达到国家相关排放标准，满足不同场景的废水排放需求。部分研究倾向于认为，在活性污泥系统中接种高效降解菌株，可针对性降解废水中的难降解有机污染物，有效解决传统活性污泥法对难降解有机物处理效果不佳的突出问题，提升处理系统的适用性。例如，在处理含酚废水时，接种假单胞菌属菌株，可显著提高酚类物质的降解效率，降低出水酚浓度，确保废水达标排放，同时减少处理过程中的药剂消耗。

生物膜法是另一种常用的好氧生物处理技术，其核心原理是通过载体表面形成的生物膜吸附并降解有机污染物，生物膜由大量微生物聚集形成，包含细菌、真菌、藻类等多种微生物，形成结构复杂、功能协同的微生物群落结构，相比活性污泥法，具有抗冲击负荷能力强、污泥产量少、运行稳定性高的优势。常见的生物膜法处理工艺包括生物滤池、生物转盘、生物接触氧化池等，其中生物接触氧化池结合了活性污泥法与生物膜法的双重优点，通过在池内设置多孔填料，使微生物附着在填料表面形成致密的生物膜，同时通过曝气装置向池内通入空气，使废水与生物膜充分接触，既保证了微生物的代谢活性，又提高了污染物的传质效率，处理效率高且运行稳定，适用于中小型污水处理厂及各类工业有机废水处理，尤其适合处理水量波动较大的废水。

（二）厌氧生物处理技术的应用

厌氧生物处理技术主要用于高浓度有机废水的预处理或深度处理，其在无氧条件下通过微生物的代谢作用将有机污染物转化为甲烷等清洁能源，实现污染物的降解与资源化利用。常见的厌氧生物处理工艺包括 UASB 反应器、EGSB 反应器、厌氧消化池等，其中 UASB 反应器（上流式厌氧污泥床）具有处理效率高、

占地面积小、能耗低等优势，已广泛应用于食品加工、养殖、造纸等行业的高浓度有机废水处理。

UASB 反应器的核心是反应器底部的厌氧颗粒污泥，这类颗粒污泥具有良好的沉降性能和较强的降解活性，可在反应器内形成结构稳定、功能协同的微生物群落，为有机污染物的降解提供有利条件。有机废水从反应器底部缓慢进入，与颗粒污泥充分接触，在无氧条件下逐步完成有机污染物的降解与甲烷的产生，整个过程无需额外曝气，能耗极低。相关工程实践表明，UASB 反应器处理高浓度有机废水时，COD 去除率可达到 70% 以上，部分工况下甚至可达到 85%，产生的甲烷纯度较高，可直接用于燃烧发电或作为民用燃气，真正实现了有机废水的资源化处理与能源回收。但厌氧生物处理技术对环境条件要求较为严格，温度、pH 值、水力停留时间等因素的微小波动，都会显著影响微生物的代谢活性，进而影响处理效果，因此在实际工程应用中需要加强运行调控，确保系统稳定运行。

除了传统的厌氧消化工艺，近年来厌氧氨氧化技术也逐渐应用于有机废水处理中，该技术以厌氧氨氧化菌为核心，可在厌氧条件下将废水中的氨氮与亚硝酸盐氮直接转化为氮气，同时同步降解有机污染物，无需额外添加碳源和氧气，适用于含高氨氮、低碳源的有机废水处理，如养殖废水、垃圾渗滤液、食品加工废水等。厌氧氨氧化技术具有能耗低、污泥产量少、脱氮效率高、运行成本低等显著优势，可有效解决传统脱氮工艺能耗高、碳源消耗大、成本高的突出问题，打破了传统脱氮工艺对氧气和碳源的依赖，是一种具有广阔应用前景的新型生物处理技术，目前已在多个工业废水处理项目中实现工程化应用，并取得了良好的处理效果。

生物强化技术是近年来有机废水生物处理领域的研究热点与发展方向，其核心思路是通过向生物处理系统中主动引入高效降解微生物菌株、特异性酶制剂或功能微生物群落，弥补原有系统中优势微生物不足、降解能力有限的短板，从而强化系统对有机污染物的降解能力，提高处理效率与处理效果。生物强化技术根据强化方式的不同，可分为菌株强化、群落强化及酶强化等主要类型，其中菌株强化因操作简便、针对性强，在工程实践中应用最为广泛，通过实验室筛选、定向驯化等手段获得高效降解菌株，将其接种到生物处理系统中，可针对性降解废水中的特定难降解有机污染物，如石油类、多环芳烃、酚类等，有效解决传统生物处理技术对这类污染物降解效率低的问题。

也有观点指出,生物强化技术的应用效果并非绝对,其受接种菌株的环境适应性、存活能力及与系统原有微生物群落的协同作用效果等多种因素影响,若接种菌株无法在处理系统的环境条件下稳定存活、繁殖,或与原有微生物群落产生激烈的竞争抑制作用,反而会导致系统处理效能下降,无法达到预期的强化效果。因此,在实际工程应用中,需要结合废水的水质特征、处理系统的运行工况,筛选与系统环境相适应的高效菌株,同时优化接种方式、接种量及接种时机,确保接种菌株能够快速适应系统环境,与原有微生物群落形成协同代谢作用,共同提升系统的降解效能。例如,在处理含石油类有机废水时,接种经定向驯化的石油降解菌,可显著提高废水中石油类物质的降解效率,缩短处理周期,同时降低处理成本。

生物技术在有机废水处理中的应用也存在一定的局限性,例如,对于高浓度、难降解有机废水,单一的生物处理技术往往难以达到理想的处理效果,需要与物理化学处理技术结合使用,形成“预处理-生物处理-深度处理”的组合处理工艺,才能确保出水达标。微生物的代谢活性受环境因素影响显著,在低温、高盐、高毒性等极端条件下,生物处理系统的处理效能会显著下降,甚至出现微生物死亡的情况,影响处理系统的稳定性。此外,生物处理过程中会产生一定量的剩余污泥,这些剩余污泥含有大量微生物和有机物质,需要进行妥善处理与处置,否则会造成二次污染,增加环境治理的整体成本。

随着我国环境治理要求的不断提高,以及水污染防治攻坚战的持续推进,生物技术在有机废水处理中的应用也在不断创新与发展。新型高效微生物菌株的筛选与驯化、生物反应器的优化设计、组合处理工艺的研发以及微生物代谢机制的深入研究,都将进一步提升生物技术的处理效能,拓展其应用范围,满足不同类型、不同浓度有机废水的处理需求。未来,生物技术将朝着高效化、资源化、智能化的方向稳步发展,结合大数据、人工智能等现代信息技术,实现生物处理系统的精准调控与优化运行,为有机废水处理提供更经济、更环保、更高效的解决方案,助力水环境质量的持续改善,推动生态环境治理体系和治理能力现代化建设。

第四章 水污染防治工程系统与管理

第一节 城市污水处理工艺系统设计与优化

城市污水处理是水污染防治工程系统的核心组成部分，也是保障城市水环境质量、改善人居环境、促进城市可持续发展的关键基础设施。随着我国城市化进程的持续加快，城市人口规模不断扩大，工业生产与日常生活产生的污水排放量逐年攀升，对城市污水处理系统的处理能力、处理效率和处理质量提出了更高要求。城市污水处理工艺系统的设计与优化，直接关系到污水处理效果、工程投资成本、运行能耗以及后续污泥处置等多个环节，是一个集技术、经济、环境于一体的系统性工程。当前，我国城市污水处理事业已从“规模扩张”向“质量提升、效能优化”转型，如何结合城市发展实际，设计科学合理的污水处理工艺系统，通过技术优化实现污水资源化利用、降低运行成本、减少二次污染，成为水污染防治工程管理领域的重要研究课题。

城市污水处理的核心目标是去除污水中的污染物，使处理后污水达到规定的排放标准，或实现再生利用，减少对受纳水体的污染。城市污水的成分复杂，主要包含生活污水、工业废水和初期雨水，其中生活污水占比最高，含有大量的有机物、氮、磷、悬浮物以及病原微生物等污染物；工业废水则因行业差异，含有重金属、持久性有机污染物等有毒有害成分，处理难度较大；初期雨水则会携带地表的泥沙、垃圾、污染物等，进入污水处理系统后增加处理负荷。已有研究表明，科学合理的工艺设计的优化，能够在保证处理效果的前提下，降低工程投资 30% 以上，减少运行能耗 20%-40%，同时有效提升污水再生利用率，实现环境效益、经济效益和社会效益的协同统一。

城市污水处理工艺系统的设计并非单一技术的选择，而是一个包含预处理、一级处理、二级处理、深度处理以及污泥处置等多个单元的完整体系，各单元之间相互衔接、协同作用，共同完成污水的净化处理。不同城市的人口规模、污水排放量、污水水质、地理环境以及经济发展水平存在差异，导致污水处理工艺系统的设计方案也呈现出个性化特征。例如，人口密集、污水排放量较大的大城市，

通常采用集中式污水处理工艺，建设大型污水处理厂，实现污水的集中收集、集中处理；而中小城市或郊区，则可根据实际情况采用分散式或半集中式污水处理工艺，降低工程投资和运行成本。此外，污水再生利用需求也会影响工艺设计，对于水资源短缺的城市，需在工艺系统中增加深度处理单元，实现污水资源化。

一、城市污水处理工艺系统的核心组成与设计原则

城市污水处理工艺系统的核心组成可分为预处理单元、主体处理单元、深度处理单元以及污泥处置单元四个部分，各单元的功能不同，共同构成了完整的污水净化流程。预处理单元是污水处理的第一道工序，主要目的是去除污水中的大颗粒悬浮物、漂浮物和杂质，防止其堵塞后续处理设备，保护处理设施的正常运行。预处理单元主要包括格栅、沉砂池等设备，格栅用于拦截污水中的大块漂浮物和悬浮物，如生活垃圾、树枝、塑料等；沉砂池则用于去除污水中的砂粒、砾石等无机颗粒，减少设备磨损和后续处理负荷。

主体处理单元是城市污水处理的核心环节，主要用于去除污水中的有机物、氮、磷等主要污染物，分为一级处理和二级处理。一级处理以物理处理为主，主要通过沉淀、过滤等方式，去除污水中的悬浮物和部分有机物，处理后污水的 COD、BOD 去除率可达 30%-50%，但仍无法达到排放标准，需进一步进行二级处理。二级处理以生物处理为主，利用微生物的代谢作用，将污水中的有机物分解为无害的二氧化碳和水，同时去除部分氮、磷，处理后污水的 COD、BOD 去除率可达 80%-90%，能够满足基本的排放标准。深度处理单元则主要用于去除二级处理后残留的微量污染物，如难降解有机物、重金属等，实现污水的再生利用，常用的深度处理技术包括过滤、消毒、膜分离等。

城市污水处理工艺系统的设计需遵循科学性、经济性、适用性和前瞻性四大原则。科学性原则要求工艺设计符合污水水质特征和处理目标，确保处理效果稳定可靠，能够达到相关排放标准；经济性原则要求在保证处理效果的前提下，优化工艺方案，降低工程投资和运行成本，避免过度设计；适用性原则要求工艺设计结合城市的实际情况，考虑当地的地理环境、经济发展水平、技术水平和管理能力，确保工艺系统能够正常运行、便于维护；前瞻性原则要求工艺设计兼顾城市未来发展需求，预留一定的处理能力和工艺升级空间，适应污水排放量和水质变化的趋势。

（一）预处理单元的设计要点

预处理单元的设计核心是高效去除污水中的大颗粒杂质和无机砂粒，为后续处理单元提供良好的进水条件。格栅的设计需根据污水中漂浮物的粒径和数量，确定格栅的栅条间距、安装角度和运行方式，常用的格栅分为粗格栅和细格栅，粗格栅栅条间距为 10-20mm，用于去除大块漂浮物；细格栅栅条间距为 1-5mm，用于去除细小悬浮物。格栅的运行方式可分为人工格栅和机械格栅，大型污水处理厂通常采用机械格栅，实现自动化运行，减少人工成本，提高处理效率。

沉砂池的设计需根据污水中的砂粒含量、粒径分布以及污水流量，确定沉砂池的类型、尺寸和停留时间。常用的沉砂池类型包括平流式沉砂池、竖流式沉砂池和曝气沉砂池，平流式沉砂池结构简单、运行稳定，适用于中小型污水处理厂；曝气沉砂池则通过曝气作用，使砂粒与有机物分离，沉砂效果更好，适用于大型污水处理厂或污水中有机物含量较高的场景。沉砂池的停留时间一般为 1-3 分钟，确保砂粒能够充分沉降，同时避免有机物的过度沉降，减少后续处理负荷。

（二）主体处理单元的工艺选择

主体处理单元的工艺选择是城市污水处理工艺系统设计的核心，需根据污水水质、处理目标、工程投资和运行成本等因素综合确定。一级处理工艺主要以沉淀池为主，通过重力沉降作用，去除污水中的悬浮物和部分有机物，工艺简单、投资较低，但处理效果有限，仅适用于污水排放标准较低的场景，或作为二级处理的预处理环节。二级处理工艺以生物处理工艺为主，常用的生物处理工艺包括活性污泥法、生物膜法、氧化沟工艺等，不同工艺的适用范围和处理效果存在差异。

活性污泥法是应用最广泛的生物处理工艺，适用于大中型污水处理厂，其原理是利用活性污泥中的微生物，将污水中的有机物分解为无害物质，处理效果稳定，COD、BOD 去除率高，但运行管理复杂，能耗较高，易产生污泥膨胀等问题。生物膜法则通过在载体表面形成生物膜，利用生物膜中的微生物降解有机物，具有运行稳定、抗冲击负荷能力强、污泥产量少等优点，适用于中小型污水处理厂或水质波动较大的污水处理场景。氧化沟工艺则是一种改良的活性污泥法，具有工艺流程简单、运行管理方便、处理效果好等优点，适用于大中型污水处理厂，尤其适合需要脱氮除磷的场景。

二、城市污水处理工艺系统的优化路径

城市污水处理工艺系统的优化，核心是在保证处理效果的前提下，实现“节能、降耗、提质、增效”，同时推动污水资源化利用，减少二次污染。当前，我国城市污水处理工艺系统仍存在一些问题，如部分污水处理厂工艺落后、运行效率低、能耗较高、污泥处置不当等，这些问题制约了城市污水处理事业的高质量发展。因此，需从工艺参数优化、技术升级、设备改造、运行管理优化等多个方面，对城市污水处理工艺系统进行全面优化。

工艺参数优化是最基础、最经济的优化方式，通过调整各处理单元的工艺参数，如停留时间、曝气量、药剂投加量等，提高处理效率，降低运行能耗。例如，在活性污泥法工艺中，通过优化曝气时间和曝气量，既能保证微生物的代谢需求，又能减少能耗；在沉淀池中，优化停留时间和排泥周期，既能提高悬浮物的去除率，又能减少污泥产量。部分研究倾向于认为，工艺参数的优化可使污水处理厂的运行能耗降低 15%-25%，处理效率提升 10%-15%，具有显著的经济效益和环境效益。

技术升级是提升污水处理工艺系统效能的关键，通过引入新型处理技术，替代传统落后工艺，实现处理效果和运行效率的双重提升。例如，对于需要脱氮除磷的污水处理厂，可引入硝化-反硝化工艺、厌氧-好氧工艺等，提高氮、磷的去除率，满足更严格的排放标准；对于水资源短缺的城市，可引入膜分离技术、高级氧化技术等深度处理技术，实现污水再生利用，缓解水资源压力。此外，智能化技术的应用也是工艺系统优化的重要方向，通过引入物联网、大数据等技术，实现污水处理工艺系统的自动化监测、智能化调控，提高运行管理效率，减少人工干预。

（一）生物处理工艺的优化

生物处理工艺是城市污水处理的核心，其优化重点在于提高微生物的代谢效率，减少污泥产量，降低能耗。对于活性污泥法工艺，可通过接种高效微生物菌种、优化污泥龄、控制溶解氧浓度等方式，提高有机物的降解效率，减少污泥膨胀的发生。例如，接种硝化菌、反硝化菌等高效菌种，可提高氮的去除率；控制污泥龄在合理范围，可减少污泥产量，降低污泥处置成本。对于生物膜法工艺，可通过优化载体材料、增加载体表面积、改善水力条件等方式，提高生物膜的附着能力和代谢效率，增强工艺的抗冲击负荷能力。

此外，生物处理工艺的组合优化也是重要的优化路径，通过将不同类型的生物处理工艺相结合，实现优势互补，提高处理效果。例如，将活性污泥法与生物膜法相结合，形成复合生物处理工艺，既能发挥活性污泥法处理效率高的优势，又能利用生物膜法抗冲击负荷能力强、污泥产量少的特点，适用于水质波动较大的城市污水处理场景。同时，可在生物处理单元中加入化学药剂，如混凝剂、助凝剂等，辅助去除污水中的污染物，提高处理效果。

（二）深度处理与污水资源化优化

随着我国水环境治理要求的不断提高，以及水资源短缺问题的日益突出，污水资源化已成为城市污水处理的重要发展方向，深度处理工艺的优化显得尤为重要。深度处理工艺的优化核心是提高处理水质，降低处理成本，实现污水的梯次利用。常用的深度处理技术包括过滤、消毒、膜分离、高级氧化等，可根据污水再生利用的用途，选择合适的深度处理工艺组合。

例如，对于用于绿化灌溉、道路清扫的再生水，可采用“过滤+消毒”的深度处理工艺，去除污水中的悬浮物和病原微生物，满足基本用水需求；对于用于工业冷却、景观用水的再生水，可采用“膜分离+消毒”的深度处理工艺，进一步去除污水中的微量污染物，提高水质；对于用于饮用水补充水源的再生水，则需采用更严格的深度处理工艺，如“高级氧化+膜分离+消毒”，确保水质安全。同时，可优化深度处理工艺的运行参数，如过滤速度、药剂投加量、膜清洗周期等，降低运行成本，延长设备使用寿命。

三、工艺系统设计与优化的注意事项

城市污水处理工艺系统的设计与优化，需结合城市的实际情况，综合考虑多方面因素，避免盲目设计和过度优化。首先，需做好污水水质监测与分析工作，全面掌握城市污水的水质特征、排放量变化规律，为工艺设计与优化提供科学依据。不同城市的污水水质差异较大，如工业发达的城市，污水中重金属、难降解有机物含量较高，需选择针对性的处理工艺；而以生活污水为主的城市，则可采用常规的生物处理工艺。

其次，需注重工程投资与运行成本的平衡，避免过度追求处理效果而忽视经济性。在工艺设计与优化过程中，需对不同工艺方案进行技术经济比较，选择性价比最高的工艺方案，确保工程投资合理、运行成本可控。例如，中小型城市可

选择投资较低、运行管理简单的生物膜法工艺，避免建设大型污水处理厂带来的高投资和高运行成本；而大城市则可根据处理需求，选择处理效率高、自动化程度高的工艺，提高运行管理效率。

此外，需重视污泥处置环节的设计与优化，避免污泥处置不当造成二次污染。城市污水处理过程中会产生大量污泥，污泥中含有大量的污染物和病原微生物，若处置不当，会污染土壤、地下水和大气环境。因此，在工艺系统设计过程中，需同步设计污泥处置单元，采用脱水、固化、填埋、焚烧、资源化利用等方式，实现污泥的减量化、无害化、资源化。例如，可将脱水后的污泥用于堆肥，制成有机肥料，实现资源循环利用；对于含有有毒有害成分的污泥，则需采用焚烧或安全填埋的方式，确保环境安全。

也有观点指出，城市污水处理工艺系统的设计与优化，还需加强部门协同与公众参与，形成“政府主导、企业运营、公众监督”的治理格局。政府相关部门需加强政策引导和监管，完善相关法律法规和标准体系，推动污水处理工艺的升级优化；污水处理企业需加强技术创新和运行管理，提高处理效率和服务质量；公众则需提高环保意识，减少污水排放，参与污水处理设施的监督，共同推动城市水环境质量的改善。

城市污水处理工艺系统的设计与优化，是城市水污染防治工程管理的核心内容，直接关系到城市水环境安全、水资源利用效率和城市可持续发展。随着科技的不断进步和水环境治理要求的不断提高，城市污水处理工艺系统将朝着智能化、高效化、资源化的方向发展。未来，需进一步加强污水处理技术的研发与应用，优化工艺方案，完善运行管理体系，推动城市污水处理事业高质量发展，为建设生态宜居城市、保障水环境安全提供有力支撑。

第二节 工业废水预处理与全过程控制管理

工业废水是水污染防治体系中的重点治理对象，其具有污染物种类复杂、浓度波动大、毒性强、处理难度高的显著特征，直接排放会对地表水体、地下水及土壤环境造成严重破坏，威胁生态系统安全与人类健康。不同于城市生活污水的组分相对稳定，工业废水的水质、水量受行业类型、生产工艺、原料配比等多种因素影响，呈现出明显的行业差异性——化工行业废水富含重金属、有机溶剂

等难降解污染物，食品加工行业废水则以高浓度有机物、悬浮物为主，而冶金行业废水往往伴随高盐、高浊度等问题。工业废水的有效治理，是水污染防治工程系统的关键环节，而预处理作为工业废水处理的首要步骤，直接决定后续深度处理的效果与效率，全过程控制管理则是实现工业废水达标排放、降低治理成本、规避环境风险的核心保障。已有研究表明，完善的预处理工艺可去除工业废水中80%以上的悬浮物、部分重金属及易降解有机物，大幅减轻后续处理单元的负荷，若预处理环节缺失或不到位，不仅会导致深度处理工艺效率下降、运行成本激增，还可能引发处理系统堵塞、设备损坏等问题，影响整个废水处理工程的稳定运行。

工业废水预处理的核心目标是去除废水中的粗大悬浮物、胶体物质、重金属离子及部分有毒有害污染物，调节废水的pH值、温度、浊度等理化指标，使废水达到后续深度处理工艺的进水要求，为深度处理奠定良好基础。预处理技术的选择需结合工业废水的行业特性、污染物组成及浓度，遵循“因地制宜、经济高效、环保可行”的原则，避免盲目采用高端技术导致治理成本浪费，同时也要防止技术选型不当造成处理效果不达标。值得注意的是，工业废水预处理并非单一工艺的应用，而是多种工艺的组合使用，不同工艺之间的协同配合，直接影响预处理的整体效果。部分研究倾向于认为，合理的预处理工艺组合可使废水处理达标率提升30%以上，同时降低后续处理环节的能耗与药耗，实现经济效益与环境效益的协同提升。

一、工业废水预处理技术体系与工艺选型

工业废水预处理技术种类繁多，根据处理原理可分为物理预处理、化学预处理及物理化学预处理三大类，不同类型的预处理技术具有各自的适用范围与处理效果，需结合废水水质特征进行针对性选型。物理预处理技术主要依靠物理作用分离废水中的污染物，具有操作简单、运行成本低、无二次污染等优势，是工业废水预处理中应用最广泛的技术类型；化学预处理技术通过化学反应去除废水中的溶解性污染物，处理效率高、见效快，适用于高浓度、难降解工业废水的预处理；物理化学预处理技术则结合物理作用与化学作用，兼具两者的优势，可有效去除废水中的胶体物质、重金属离子等污染物，在复杂工业废水预处理中应用日益广泛。

（一）物理预处理技术的应用与优化

物理预处理技术主要包括格栅、筛网、沉淀、过滤、离心分离等，其核心作用是分离废水中的粗大悬浮物、漂浮物及部分胶体物质，减少后续处理单元的堵塞风险。格栅与筛网是工业废水预处理的第一道防线，主要用于去除废水中的大块固体杂质，如废水中的废渣、果皮、纤维等，根据栅条间距的不同，可分为粗格栅、中格栅与细格栅，分别适用于不同尺寸固体杂质的去除。在实际工程应用中，格栅的选型需结合废水的固体杂质含量与尺寸分布，例如，化工废水、冶金废水的固体杂质含量较高，可选用粗格栅与中格栅组合使用，而食品加工废水的固体杂质尺寸较小，需选用细格栅进行处理。同时，需定期对格栅进行清理维护，避免栅条堵塞导致废水溢流，影响预处理效果。

沉淀与过滤是物理预处理中的核心技术，广泛应用于各类工业废水的预处理环节。沉淀技术通过重力作用使废水中的悬浮物、胶体物质沉降分离，根据沉淀原理可分为自由沉淀、絮凝沉淀、区域沉淀等，其中絮凝沉淀在工业废水预处理中应用最为广泛——通过投加絮凝剂，使废水中的细小悬浮物、胶体物质凝聚形成大颗粒絮体，加速沉降分离，提高沉淀效率。过滤技术则通过过滤介质（如石英砂、活性炭、滤布等）截留废水中的悬浮物、胶体物质，进一步净化废水水质，降低废水浊度，适用于沉淀处理后的深度预处理，为后续化学处理或生物处理提供合格进水。离心分离技术则适用于废水中含有大量细小悬浮物、乳化液的情况，通过离心力的作用，将废水中的固体颗粒与液体分离，处理效率高、占地面积小，但运行成本相对较高，主要应用于高浓度、难沉降工业废水的预处理。

（二）化学与物理化学预处理技术的应用要点

化学预处理技术主要包括中和、混凝、氧化还原等，其核心是通过化学反应改变污染物的物理化学性质，使其转化为易分离、易降解的物质，从而实现污染物的去除。中和处理是化学预处理的基础，主要用于调节工业废水的 pH 值，避免废水的酸碱性过强对后续处理设备造成腐蚀，同时为后续混凝、氧化还原等工艺创造适宜的反应条件。工业废水的酸碱性差异较大，酸洗废水、电镀废水多呈酸性，而造纸废水、印染废水多呈碱性，中和处理需根据废水的酸碱性选择合适的中和剂，如酸性废水可选用石灰、氢氧化钠等碱性中和剂，碱性废水可选用硫酸、盐酸等酸性中和剂，同时控制中和反应的 pH 值在适宜范围，确保后续工艺的稳定运行。

混凝处理是化学预处理中去除胶体物质、细小悬浮物及部分重金属离子的关键技术，通过投加混凝剂（如聚合氯化铝、聚合硫酸铁、聚丙烯酰胺等），使废水中的胶体物质失去稳定性，凝聚形成大颗粒絮体，再通过沉淀或过滤分离去除。混凝剂的选型需结合废水的污染物组成与浓度，例如，处理含重金属离子的工业废水，可选用螯合型混凝剂，提高重金属离子的去除率；处理高浓度有机物废水，可选用阳离子型混凝剂，增强絮凝效果。氧化还原处理则主要用于去除废水中的有毒有害污染物，如重金属离子、氰化物、硫化物等，通过投加氧化剂（如高锰酸钾、过氧化氢、次氯酸钠等）或还原剂，将废水中的有毒污染物转化为无毒或低毒物质，降低废水的毒性。部分研究指出，氧化还原预处理可有效去除废水中90%以上的氰化物、硫化物等有毒物质，为后续深度处理提供安全保障。

物理化学预处理技术主要包括吸附、离子交换、膜分离等，其兼具物理作用与化学作用的优势，适用于处理复杂工业废水。吸附技术通过吸附剂（如活性炭、沸石、硅藻土等）的吸附作用，去除废水中的有机物、重金属离子等污染物，具有吸附容量大、去除效果好等优势，尤其适用于低浓度工业废水的预处理；离子交换技术则通过离子交换树脂的离子交换作用，去除废水中的重金属离子，如铜离子、铬离子、铅离子等，处理效率高、选择性强，但离子交换树脂的再生成本较高，限制了其在大规模工业废水预处理中的应用；膜分离技术则通过膜的筛分作用，分离废水中的污染物，具有分离效率高、无二次污染等优势，适用于高浓度、难降解工业废水的预处理，但膜的堵塞问题的是其应用过程中的主要难题，需加强膜的清洗与维护。

二、工业废水全过程控制管理体系构建

工业废水的治理并非单一环节的处理，而是涵盖“源头减量、过程控制、末端治理”的全过程管理，只有构建完善的全过程控制管理体系，才能实现工业废水的达标排放、资源化利用，降低环境风险与治理成本。源头减量是全过程控制管理的基础，核心是通过优化生产工艺、加强原料管理、提高资源利用率，减少工业废水的产生量与污染物浓度；过程控制是全过程控制管理的核心，主要通过加强生产过程中的废水管控，避免废水泄漏、混流，确保废水有序收集、合理处理；末端治理是全过程控制管理的保障，通过完善预处理与深度处理工艺，确保工业废水达标排放，同时推进废水资源化利用，实现“治污与资源化”协同发展。

（一）源头减量：工业废水防控的前端发力点

源头减量是工业废水全过程控制管理的首要环节，也是最具性价比的防控措施，其核心是从生产源头减少废水的产生与污染物的排放，从根本上降低废水处理压力。优化生产工艺是源头减量的关键，通过采用清洁生产技术、改进生产流程，减少生产过程中废水的产生量，例如，化工行业可采用闭路循环工艺，将生产过程中产生的废水进行回收利用，减少新鲜水的消耗与废水的排放；冶金行业可采用干法冶炼工艺，替代传统的湿法冶炼工艺，大幅减少废水产生量。同时，加强原料管理，选用污染性小、利用率高的原料，减少生产过程中有毒有害污染物的产生，例如，印染行业可选用环保型染料，减少废水的色度与污染物浓度。

提高水资源利用率也是源头减量的重要措施，通过建设中水回用系统，将经过预处理与深度处理后的工业废水，回收用于生产过程中的冷却水、冲洗水等，实现水资源的循环利用，减少新鲜水的消耗，同时降低废水排放总量。已有研究表明，工业废水回用率每提高 10%，可减少 15% 以上的新鲜水消耗与废水排放，不仅能降低企业的用水成本，还能减少水环境压力。此外，加强生产过程中的管理，避免生产原料的泄漏、浪费，减少因原料泄漏导致的废水污染，也是源头减量的重要内容，需建立完善的原料管理制度，加强员工的环保培训，提高员工的环保意识与操作规范性。

（二）过程控制：工业废水管控的核心环节

过程控制是工业废水全过程控制管理的核心，主要包括废水的收集、分流、储存、输送等环节的管控，确保废水有序收集、合理处理，避免废水混流、泄漏导致的污染扩散。工业企业需根据生产工艺与废水类型，构建完善的废水收集与分流系统，将不同类型、不同浓度的工业废水进行分类收集、分流处理，避免高浓度废水与低浓度废水混流，导致废水浓度波动过大，影响处理效果。例如，将含重金属废水、含油废水、高浓度有机废水分别收集，采用不同的预处理工艺进行处理，提高处理效率与达标率。

废水的储存与输送环节也需加强管控，建设专用的废水储存池，确保废水储存安全，避免废水泄漏；选用耐腐蚀、防泄漏的输送管道，定期对管道进行检查与维护，防止管道破损导致废水泄漏，污染周边环境。同时，加强生产过程中的废水水质、水量监测，建立实时监测系统，及时掌握废水的水质、水量变化情况，根据监测数据调整预处理工艺参数，确保预处理效果稳定。此外，建立完善的废

水处理应急预案，针对废水泄漏、水质突变等突发情况，制定应急处理措施，及时处置突发污染事件，降低环境风险。

过程控制还需加强对预处理工艺的运行管理，建立完善的运行管理制度，定期对预处理设备进行检查、维护与保养，确保设备稳定运行；加强操作人员的专业培训，提高操作人员的操作水平，确保预处理工艺参数的合理控制，避免因操作不当导致处理效果不达标。同时，加强预处理过程中的污泥管理，预处理产生的污泥含有大量的污染物，若处理不当会造成二次污染，需采用无害化处理技术（如脱水、固化、焚烧等）对污泥进行处理，实现污泥的减量化、无害化与资源化利用。

末端治理与资源化利用是工业废水全过程控制管理的保障，通过完善预处理与深度处理工艺，确保工业废水达标排放，同时推进废水资源化利用，提高水资源利用率，实现经济效益与环境效益的协同提升。末端治理需结合工业废水的水质特征，选用合适的深度处理工艺，如生物处理、膜分离、高级氧化等，进一步去除废水中的污染物，确保废水达到国家及地方相关排放标准。对于处理后的达标废水，可根据其水质情况，回收用于生产、绿化、景观等领域，实现水资源的循环利用；对于含有可回收资源的工业废水，可通过资源化处理技术，回收废水中的重金属、有机物等资源，实现“变废为宝”。

工业废水预处理与全过程控制管理，还需加强政策引导与监管力度，完善相关法律法规与标准体系，细化工业废水排放管控要求，加大对违法排放、超标排放行为的处罚力度，形成有力震慑。同时，加强企业的环保主体责任意识，引导企业加大环保投入，完善废水处理设施，建立健全全过程控制管理体系，主动承担环保责任。也有观点指出，加强产学研合作，推动预处理技术与全过程管理模式创新，研发高效、低成本、环保可行的预处理技术与管理模式，是提升工业废水治理水平的重要途径。当前，工业废水预处理与全过程控制管理仍面临诸多挑战，如部分企业环保意识薄弱、预处理技术落后、全过程管理体系不完善等，未来需进一步加强政策引导、技术创新与监管力度，推动工业废水治理向“源头减量、过程管控、末端达标、资源化利用”的方向发展，为水污染防治工程系统的完善提供有力支撑。

第三节 农村及面源污染综合治理模式

农村及面源污染是我国水污染防治体系中的薄弱环节，也是制约水环境质量持续改善的关键瓶颈之一。与城市点源污染、工业点源污染相比，农村及面源污染具有分散性、隐蔽性、随机性强的显著特征，其污染来源复杂、覆盖范围广泛，涉及农业生产、农村生活、畜禽养殖等多个领域，治理难度远高于点源污染，且治理成效易受自然条件、生产模式等因素影响。随着乡村振兴战略的深入推进，农村人居环境整治力度不断加大，农村污水处理、生活垃圾处置等基础设施逐步完善，但农村及面源污染的复杂性、长期性仍未得到根本改变，部分地区污染负荷居高不下，甚至出现反弹趋势，对流域水环境、土壤环境乃至农产品质量安全构成持续威胁。已有研究表明，农村面源污染贡献了我国水体氮磷污染负荷的相当比例，尤其是在农业集约化程度较高的流域，农村面源污染已成为水体富营养化的主要诱因之一，其治理成效直接关系到水污染防治攻坚战的整体成效，也影响着乡村生态振兴的推进质量。

农村及面源污染的核心来源可大致划分为三大类，各类污染源相互交织、相互影响，形成了复杂且难以彻底根治的污染格局，不同来源的污染在不同季节、不同区域的贡献度也存在一定差异。农村生活污染是最基础的污染来源，主要包括农村居民生活污水、生活垃圾的无序排放和处置，由于农村地区人口居住分散、污水处理设施覆盖率偏低，且部分已建成设施运维不到位，多数农村生活污水未经规范处理直接排入周边沟渠、池塘或河流，携带大量有机物、氮磷营养盐和病原微生物，既污染地表水，也会通过土壤渗透污染地下水；生活垃圾随意堆放、露天焚烧现象仍较为普遍，尤其是在偏远农村地区更为突出，垃圾渗滤液长期渗漏会进一步加剧土壤和水体污染，形成“污染循环”。农业生产污染是农村面源污染的主要贡献者，涵盖化肥农药过量施用、秸秆露天焚烧、农田径流污染等多个环节，其中化肥农药的不合理使用是核心诱因，导致大量氮磷营养盐通过农田径流、土壤淋溶等方式进入水体，加剧水体富营养化，同时农药残留也会对环境 and 生态系统造成潜在风险，影响水生生物生存；秸秆露天焚烧不仅会产生大气污染，其焚烧残留物随降雨冲刷进入水体，也会增加水体污染负荷，破坏水体生态平衡。畜禽养殖污染是农村面源污染的重要组成部分，规模化畜禽养殖场的粪污处理设施不完善、粪污资源化利用率偏低，部分养殖场甚至存在偷排漏排现象，

散养畜禽的粪污随意排放、未进行规范处置，导致大量有机物、氮磷和病原微生物进入水体，成为农村水环境的重要污染源，尤其在养殖集中区域，污染问题更为突出。

一、农村及面源污染综合治理的核心原则与现实困境

农村及面源污染综合治理并非单一技术或单一措施的简单应用，而是需要立足农村实际，遵循系统性、整体性、因地制宜、资源化利用的核心原则，实现污染防治与农村经济发展、生态环境保护的协同推进。系统性原则要求打破“头痛医头、脚痛医脚”的治理模式，统筹农村生活、农业生产、畜禽养殖等各类污染源，构建全方位、全流程的综合治理体系；整体性原则强调兼顾流域、区域层面的协同治理，打破行政区划限制，实现上下游、左右岸协同管控；因地制宜原则要求结合不同地区的自然条件、农业生产模式、经济发展水平，选择适配的治理技术和模式，避免“一刀切”；资源化利用原则则注重将污染治理与资源回收相结合，推动粪污、秸秆、生活垃圾等污染物的资源化利用，实现“变废为宝”，提升治理的经济性和可持续性。

尽管我国农村及面源污染治理取得了一定成效，各地也探索出多种治理模式，但当前仍面临诸多现实困境，制约了治理工作的深入推进和治理成效的持续提升。首先，治理资金投入不足且来源单一，农村地区经济发展水平相对较低，地方财政投入能力有限，中央财政资金覆盖范围有限且分配不均衡，社会资本参与污染治理的积极性不高、参与渠道不畅，导致污水处理设施、粪污处理设备等基础设施建设滞后，部分已建成设施因缺乏资金维护而无法正常运行，难以发挥应有治理效能。其次，治理技术适配性不足，现有面源污染治理技术多借鉴城市污水处理模式，难以适应农村地区人口分散、水量波动大、经济承受能力弱、专业技术人才匮乏的实际情况，部分技术操作复杂、运行成本高，基层难以有效推广应用，也难以实现长期稳定运行。再次，监管体系不完善，农村面源污染具有分散性、随机性特征，监测难度大、成本高，现有监测网络主要覆盖城市和重点流域，农村地区监测站点覆盖率低，监测手段较为落后，难以实现对污染负荷的精准监测和有效监管；同时，基层环保监管力量薄弱，缺乏专业的技术人员和监管设备，对污染排放行为的监管力度不足，部分污染行为难以得到及时查处。最后，农户环保意识薄弱，部分农户缺乏环境保护理念，受传统生产生活习惯影响，对化肥

农药过量施用、生活垃圾随意排放等行为的危害认识不足，主动参与污染治理的积极性不高，难以形成全民参与、共建共享的治理氛围。

二、农村及面源污染综合治理的主要模式与技术路径

结合我国农村实际情况和各地治理实践，当前农村及面源污染综合治理形成了多种模式，不同模式的适用场景、治理重点和技术路径存在明显差异，核心可分为集中治理模式、分散治理模式和流域协同治理模式三大类，各类模式相互补充、协同推进，共同构成了农村及面源污染综合治理的完整体系。这些模式的形成，既借鉴了国内外先进治理经验，也充分结合了我国不同地区的农村发展实际，具有较强的针对性和可操作性。部分研究倾向于认为，不存在适用于所有地区的统一治理模式，农村及面源污染治理的核心在于“适配性”，只有结合地区自然条件、农业生产模式、经济发展水平选择适配的模式和技术，才能实现治理效果与经济性的平衡，提升治理的可持续性，避免出现“建而不用、用而无效”的浪费现象。

（一）集中治理模式

集中治理模式主要适用于人口集中居住的农村社区、中心村以及农业集约化程度较高的区域，其核心是通过建设集中式处理设施，实现对农村生活污水、生活垃圾、畜禽养殖粪污等污染物的集中收集、集中处理，最大限度降低污染物排放强度。该模式的优势在于处理效率高、治理效果稳定，能够实现污染物的规模化处理和资源化利用，适合于人口密度较高、经济条件相对较好、基础设施配套相对完善的地区。在农村生活污水集中治理方面，主要采用小型集中式污水处理站，结合生物处理技术（如人工湿地、生物接触氧化法等），对生活污水进行深度处理，处理后出水可达到农田灌溉或景观用水标准，实现水资源循环利用；在生活垃圾集中治理方面，构建“村收集、乡转运、县处理”的三级收集转运体系，通过分类收集、压缩转运、集中处置，减少生活垃圾对环境的污染，同时推动生活垃圾的资源化利用，如可回收物回收再利用、厨余垃圾堆肥用于农田改良等，提升资源利用效率。

畜禽养殖集中治理是集中治理模式的重要组成部分，主要针对规模化畜禽养殖场，通过建设集中式粪污处理中心，采用厌氧发酵、好氧堆肥等技术，对粪污进行集中处理，生产沼气、有机肥等产品，实现粪污资源化利用。集中治理模式

的局限性也较为明显，其建设成本和运行成本较高，对资金投入和技术管理水平要求较高，难以适用于人口分散、经济条件较差的偏远农村地区；同时，集中处理设施的覆盖范围有限，对于远离集中居住点的散养农户和农田径流污染，难以实现有效管控。

（二）分散治理模式

分散治理模式主要适用于人口居住分散、地形复杂、交通不便的偏远农村地区，其核心是根据农户居住特点和污染来源，采用小型化、简易化、低成本的处理技术，实现污染物的就地收集、就地处理、就地利用，具有投资少、操作简单、适配性强、维护方便的优势，符合偏远农村地区的实际情况和经济承受能力。在农村生活污水分散治理方面，主要采用小型一体化污水处理设备、三格化粪池、人工湿地等简易处理技术，针对单户或多户农户的生活污水进行针对性处理，处理后出水可直接用于农田灌溉或排入周边水体，满足基本环保排放要求；对于人口特别分散、地形复杂的农户，可采用生态化处理方式，如污水还田、土壤渗滤等，实现污水的就地消纳和资源化利用，减少处理成本。

农业生产面源污染的分散治理主要聚焦于化肥农药减量、秸秆还田、农田径流控制等环节，通过推广测土配方施肥、病虫害绿色防控等技术，减少化肥农药的过量施用，降低农田径流污染负荷；采用秸秆还田、秸秆饲料化、秸秆基料化等方式，替代秸秆露天焚烧，实现秸秆资源化利用；在农田周边建设生态缓冲带、人工湿地等，拦截农田径流中的氮磷营养盐和悬浮物，减少污染物进入水体。畜禽养殖分散治理主要针对散养农户，通过推广粪污还田、小型沼气池等技术，实现粪污的就地利用，减少粪污随意排放带来的污染；同时，引导散养农户向规模化、集约化养殖转型，逐步提升粪污处理水平。分散治理模式的不足在于处理规模小、治理效果稳定性较差，受农户操作水平和环保意识影响较大，难以实现污染物的规模化、标准化处理。

（三）流域协同治理模式

农村及面源污染具有明显的流域性特征，污染物通过地表径流、地下渗透等方式在流域内迁移扩散，单一区域、单一环节的治理难以实现整体治理效果，因此流域协同治理模式成为农村及面源污染综合治理的重要方向。该模式的核心是立足流域整体，打破行政区划限制，统筹流域内农村生活、农业生产、畜禽养殖等各类污染治理，实现上下游、左右岸协同管控，构建“流域统筹、区域负责、

协同推进”的治理体系。

流域协同治理模式的关键在于构建科学完善的协同治理机制和差异化技术体系，打破区域壁垒，实现流域整体治理效能提升。在治理机制方面，建立流域内各级政府、环保、农业、水利等相关部门之间的协同联动机制，明确各区域、各部门的治理责任和分工，加强信息共享、联合监管和协同执法，形成上下联动、左右协同的治理合力；建立跨区域污染补偿机制，明确补偿标准和方式，推动流域内上下游地区协同承担治理责任，实现治理成本合理分担、治理成效共享。在技术体系方面，结合流域内不同区域的污染特征、自然条件和经济水平，构建差异化的治理技术方案，上游地区重点加强源头防控，推广生态农业、水土保持、化肥农药减量等技术，从源头减少污染产生；中游地区重点加强污染拦截和治理，建设生态缓冲带、人工湿地、植被过滤带等设施，拦截和净化地表径流中的污染物；下游地区重点加强末端治理和水质保障，提升污水处理和资源化利用水平，确保出水达标排放。相关研究指出，流域协同治理模式能够有效破解农村及面源污染的分散性、跨区域难题，提升流域整体治理效果，是未来农村及面源污染治理的主要发展方向之一。

除上述三大核心模式外，农村及面源污染综合治理还需注重源头防控与末端治理的结合、技术推广与政策引导的结合、政府主导与农户参与的结合，三者缺一不可，共同支撑治理工作的长效推进。源头防控方面，通过加强农业生产技术指导、广泛推广绿色农业技术、开展环保宣传教育提升农户环保意识，从根本上减少污染产生，实现“治未病”；末端治理方面，持续完善处理设施建设，优化设施运维机制，提升污染物处理和资源化利用水平，确保污染达标排放，守住环境安全底线。技术推广方面，结合农村实际需求，研发和推广低成本、易操作、适配性强的治理技术，同时加强基层技术人员培训和现场指导，提升基层技术应用能力和设施运维水平；政策引导方面，进一步完善相关法律法规和政策体系，加大资金投入和政策扶持力度，拓宽社会资本参与渠道，通过补贴、奖励等方式引导社会资本参与污染治理，同时激励农户主动参与治理工作，形成“政府引导、企业参与、农户主体”的治理格局。

不同地区在选择治理模式和技术路径时，需充分考虑自身的自然条件、农业生产模式、经济发展水平和污染特征，避免盲目照搬照抄。经济条件较好、人口集中的地区，可优先采用集中治理模式，提升治理规模化、标准化水平；偏远农

村地区可采用分散治理模式，降低治理成本，实现污染物就地消纳；流域层面需强化协同治理，统筹推进上下游、左右岸污染治理，实现整体成效提升。也有观点指出，农村及面源污染综合治理是一项长期、复杂的系统工程，不可能一蹴而就，需要持续加大投入、完善机制、强化监管、提升意识，逐步实现污染治理从“被动应对”向“主动防控”转变，从“单点治理”向“系统治理”转变，推动农村水环境质量持续改善，助力乡村振兴和生态文明建设。

第四节 水环境修复技术与生态工程实践

水环境修复是水污染防治工程系统的重要组成部分，也是实现水体生态功能恢复、提升水环境质量的关键环节。随着水污染防治工作的不断深入，单纯的污染控制已难以满足水环境质量改善的实际需求，亟需通过针对性的修复技术与生态工程手段，破解水体污染累积、生态系统退化等突出问题，实现“控源减排”与“生态修复”的协同推进。水环境修复以生态学原理为核心，依托物理、化学、生物等多学科技术融合，通过科学干预水体及周边生态系统，逐步恢复水体的自净能力、生物多样性及生态服务功能，最终实现水环境的可持续发展。已有研究表明，水环境修复并非简单的污染清除，而是一个系统性、长期性的工程，需要结合流域水质特征、污染来源及生态现状，科学构建个性化的修复方案，避免“一刀切”的工程模式，确保修复效果与生态环境相适配。

当前，我国水环境修复面临着诸多现实挑战。部分流域水体污染负荷长期超过环境承载力，水体溶解氧不足、底泥污染严重、生物多样性下降等问题相互交织、恶性循环，导致修复难度大幅加大。同时，不同区域的水环境差异显著，北方缺水地区的水体修复需兼顾水资源合理利用与生态保护的双重需求，南方富水地区则面临着富营养化频发、外来物种入侵等特殊生态问题，这也决定了水环境修复技术的选择必须坚持因地制宜、分类施策。与传统的污染治理技术相比，水环境修复更注重生态系统的整体性与稳定性，强调通过自然生态过程与人工科学干预相结合的方式，实现水体功能的长效恢复，而非单纯追求短期的水质达标。

一、水环境修复的核心技术类型及应用场景

水环境修复技术根据修复对象的不同，可分为水体修复、底泥修复及岸带修

复三大类，各类技术在中需根据污染程度、水体类型、生态目标及工程成本等因素进行合理搭配与优化组合。水体修复主要针对水体本身的污染问题，通过物理、化学或生物等单一或组合手段，有效降低水体中各类污染物浓度，改善水体理化性质，逐步恢复水体自身的自净能力，为生态系统重建创造基础条件。底泥修复则聚焦于水体底泥中的污染累积问题，通过物理清除、化学固化或生物降解等方式，减少底泥中污染物的含量，抑制污染物向水体中释放，从根源上减少二次污染风险，为水体生态恢复奠定坚实基础。岸带修复则侧重于水体周边岸带生态系统的重建与修复，通过构建植被缓冲带、修复岸坡生态结构、完善岸带水文连通性，减少地表径流带来的面源污染输入，提升水体生态系统的稳定性与抗干扰能力。

（一）水体修复技术的实践应用

水体修复技术中，生物修复技术因环境友好、成本较低、无二次污染等突出优势，成为当前应用最广泛的修复手段之一。生物修复主要利用微生物、水生植物的代谢作用，高效降解水体中的有机污染物、营养盐等有害物质，实现水体净化。例如，在富营养化水体中，人工种植沉水植物（如金鱼藻、狐尾藻）、浮水植物（如睡莲、浮萍），可通过植物根系的吸收作用有效去除水体中的氮、磷等营养盐，同时抑制有害藻类过度生长，显著改善水体透明度。相关研究指出，水生植物不仅能有效净化水质，还能为鱼类、底栖生物提供良好的栖息环境，促进水体生物多样性恢复，逐步形成良性循环的水体生态系统。

微生物修复技术则通过向污染水体中投加经筛选驯化的高效降解微生物菌株，或通过改善水体环境条件激活水体中原有微生物的代谢活性，加速各类污染物的降解与转化。这种技术尤其适用于有机污染较为严重的水体，如工业废水排放口周边水体、城市黑臭水体、养殖废水排放区域等，能针对性解决有机污染物降解缓慢的问题。部分研究倾向于认为，微生物修复技术的修复效果受水体温度、pH 值、溶解氧、污染物浓度等多种环境因素影响较大，在实际应用中需通过人工调控水体环境条件，为微生物生长繁殖提供适宜环境，从而显著提升微生物的降解效率。此外，物理修复技术如曝气充氧、水体稀释、人工复氧、机械搅拌等，也是水体修复的重要补充手段，尤其适用于黑臭水体的应急修复，可快速提升水体溶解氧含量，缓解水体黑臭现象，为后续生物修复技术的应用创造有利条件。

化学修复技术则主要用于水体中难降解污染物、重金属污染物的修复，通

过精准投加针对性化学药剂,实现污染物的沉淀、吸附或氧化分解,从而快速降低水体中污染物浓度。例如,向含重金属的水体中投加石灰、沸石等药剂,可使水体中的重金属离子与药剂发生化学反应形成稳定沉淀,进而降低水体中重金属浓度,减少重金属对水生生物的毒害作用;投加过氧化氢、臭氧等氧化剂,可高效氧化分解水体中的难降解有机污染物,打破其稳定的化学结构,使其转化为可被微生物进一步降解的小分子物质。但化学修复技术需严格控制药剂投加量与投加速率,避免药剂过量导致二次污染,同时需充分考虑药剂对水体生态系统的潜在影响,防止破坏水生生物的生存环境,必要时需在投药后进行后续水质监测与调控。

(二) 底泥修复技术的关键要点

底泥是水体污染物的重要“储存库”,水体中的大量污染物会通过沉降作用不断积累到底泥中,当水体环境发生变化(如pH值改变、溶解氧下降)时,底泥中的污染物会重新释放到水体中,造成二次污染,严重影响水体修复效果。因此,底泥修复是水环境修复不可或缺的重要环节,其核心目标是有效减少底泥中污染物的含量,抑制污染物释放,为水体生态恢复奠定坚实基础。当前,底泥修复技术主要分为物理修复、化学修复及生物修复三大类,各类技术各有优劣、适用场景不同,需根据底泥污染程度、水体用途及生态目标等因素合理选择、科学搭配。

物理修复技术中,底泥疏浚是最常用、最直接的手段之一,通过专业机械疏浚设备,将污染严重的表层底泥彻底清除,从根本上减少底泥中污染物的总量,降低二次污染风险。但底泥疏浚也存在一定的局限性,过度疏浚会破坏底泥中的微生物群落结构与底栖生物栖息地,影响水体生态系统的稳定性,同时疏浚过程中可能会导致底泥中的污染物重新悬浮于水体中,造成水体短期污染加剧。因此,底泥疏浚需严格控制疏浚深度与范围,结合底泥污染监测数据科学划定疏浚区域,避免对水体生态造成二次破坏。此外,底泥覆盖技术也是一种操作简便、成本较低的有效物理修复手段,通过向底泥表面覆盖一层惰性材料(如沙子、膨润土、沸石等),形成致密的隔离层,有效阻止底泥中污染物向水体释放,适用于污染程度较轻、面积较小的水体底泥修复,在中小流域底泥修复中应用较为广泛。

化学修复技术主要通过向底泥中投加专用化学药剂,实现污染物的固化、稳定化或降解,从而达到控制底泥污染的目的。例如,投加固化剂(如水泥、石灰、粉煤灰等),可与底泥中的重金属污染物发生化学反应,形成结构稳定、不易释

放的化合物，显著减少其向水体中的释放量；投加螯合剂，可与底泥中的重金属离子特异性结合，形成可分离、可回收的螯合物，实现重金属的高效去除与资源化回收。也有观点指出，化学修复技术虽然修复效率较高、见效较快，但药剂成本相对较高，且部分药剂可能对水体生态系统产生一定的负面影响，干扰底泥微生物群落结构，因此在实际应用中需谨慎选择药剂类型与投加量，结合底泥污染特性进行针对性设计。生物修复技术则通过底泥中的土著微生物、人工接种微生物及植物的代谢作用，逐步降解底泥中的有机污染物，稳定重金属污染物，这种技术环境友好、可持续性强，无需投入大量化学药剂，是未来底泥修复的重要发展方向之一。

二、水环境生态工程的实践模式与应用效果

水环境生态工程以生态学原理为核心指导，通过人工构建模拟自然水体的生态系统，复刻自然水体的净化与循环过程，实现水污染防治与生态修复的协同推进。与传统的工程治理相比，生态工程更注重发挥生态系统的自我调节能力，强调“自然修复为主、人工干预为辅”的理念，通过构建植被缓冲带、人工湿地、生态浮岛等生态设施，实现水质净化、生态恢复与景观提升的多重目标。当前，我国已在长江流域、黄河流域、太湖流域等多个重点流域开展了水环境生态工程实践，形成了多种成熟可行的实践模式，为全国范围内的水环境修复提供了宝贵的工程经验与技术参考。

人工湿地生态工程是水环境修复中应用最广泛、技术最成熟的生态工程模式之一，其通过人工模拟自然湿地的结构与功能，构建人工湿地系统，利用湿地中的土壤、植物、微生物三者的协同作用，实现水体的深度净化。人工湿地可根据水流方式分为表面流人工湿地、潜流人工湿地及垂直流人工湿地，不同类型的人工湿地适用于不同的水质条件、处理规模及场地需求。例如，潜流人工湿地因处理效率高、占地面积小、抗冲击负荷能力强、运行维护简便，适用于城市污水处理、农业面源污染控制、工业废水深度处理等多种场景；表面流人工湿地则适用于污染程度较轻的水体修复，同时可兼顾景观提升功能，常用于城市景观水体、乡村河道的生态修复。已有研究表明，人工湿地生态工程可有效去除水体中的氮、磷、有机污染物、悬浮物等各类污染物，去除率可达 60% 以上，部分优化后的人工湿地去除率甚至能达到 80% 以上，同时能为水生生物、鸟类等提供良好的

栖息环境，促进生物多样性恢复，实现生态效益与环境效益的统一。

生态岸带修复工程则聚焦于水体岸带的生态重建与功能恢复，通过科学修复岸坡结构、合理种植乡土植被，构建结构稳定、功能完善的岸带生态系统，有效减少水土流失与面源污染输入，筑牢水体生态屏障。传统的岸带治理多采用硬质护岸（如混凝土护岸、浆砌石护岸），虽然能起到良好的固坡防冲作用，抵御洪水冲击，但也破坏了岸带的自然生态功能，导致水生生物栖息地丧失、水体与陆地生态系统割裂，影响生态系统的连通性。生态岸带修复则摒弃传统硬质护岸的弊端，采用生态护岸材料（如生态石、植被混凝土、格宾石笼等），结合乡土植被种植，构建“岸坡-植被-水体”的协同生态系统，既保证了岸坡的稳定性，又有效恢复了岸带的生态功能。例如，在河流岸带修复中，种植芦苇、香蒲、菖蒲等乡土植被，可形成致密的植被缓冲带，有效拦截地表径流中的泥沙、化肥、农药等污染物，减少面源污染输入，同时为鸟类、昆虫、小型哺乳动物等生物提供良好的栖息、觅食环境，丰富岸带生物多样性。

生态浮岛工程是一种新型的水环境生态修复技术，通过在水体表面设置漂浮式载体，在载体上种植水生植物，利用植物的根系吸收作用去除水体中的营养盐、有机污染物等有害物质，同时通过植物根系的吸附作用，促进水体中微生物的生长繁殖，进一步提升水体自净能力。生态浮岛工程具有占地面积小、施工简便、修复效果好、运行成本低、景观性强等突出优势，适用于城市景观水体、湖泊、水库、乡村河道等各类水体的修复，既能有效净化水质，又能提升水体景观效果，实现生态修复与景观美化的双重目标。在实际应用中，生态浮岛的植物选择需结合水体水质特征、气候条件，优先选择耐污染、生长旺盛、净化能力强、适应性广的水生植物，同时需科学控制浮岛的覆盖面积，一般控制在水体面积的 10%-20%，避免影响水体的光照与通风，防止水体出现缺氧现象。

水环境修复技术与生态工程实践的有效实施，还需重点注重工程的长效性与系统性。在实际实践中，部分流域的修复工程因缺乏完善的后期运维管理体系，导致修复效果难以持续，出现水体污染反弹的现象，造成人力、物力、财力的浪费。因此，在水环境修复工程实施过程中，需同步建立完善的后期运维管理体系，定期对修复设施进行维护、对水质及生态状况进行监测，根据监测结果及时调整修复方案，确保修复效果的稳定性与持续性。同时，水环境修复需与流域污染控制、水资源管理、生态保护等工作紧密结合，实现“控源-修复-管护”的全流程协同，

才能从根本上改善水环境质量，恢复水体正常的生态功能。

当前，水环境修复技术与生态工程实践仍面临着诸多现实问题与挑战。例如，部分新型修复技术的研发成本与应用成本较高，技术门槛偏高，难以在中小流域及经济欠发达地区广泛应用；不同修复技术的协同应用机制不够完善，多技术融合的修复效果有待进一步提升，难以满足复杂污染水体的修复需求；生态工程的设计往往缺乏对当地生态环境、水文特征的深入调研，与当地生态环境的适配性不足，导致修复效果达不到预期目标，甚至出现生态破坏的情况。此外，水环境修复本身是一个长期性、系统性的过程，需要投入大量的人力、物力、财力，且修复效果的显现具有明显的滞后性，往往需要持续监测与维护数年才能看到显著效果，这也对修复工程的规划、实施与管护提出了更高的要求。

随着生态学、环境工程学、材料科学等多学科的不断交叉融合，新型水环境修复技术与生态工程模式不断涌现，为水环境修复提供了更多高效、环保的选择。例如，基于微生物群落调控的精准修复技术、新型环保修复材料的应用、智能化生态监测与运维技术等，有望进一步提升修复效率与工程质量，降低修复成本。未来，水环境修复将朝着精准化、智能化、可持续化的方向稳步发展，通过多学科技术深度融合、多部门协同合作，构建“污染控制 - 生态修复 - 长效管护”的一体化治理体系，持续改善水环境质量，恢复水体生态功能，为生态文明建设提供有力支撑，推动人与自然和谐共生的绿色发展理念落地生根。

第五章 水环境监测体系构建与常规指标分析

第一节 水环境监测网络设计与采样规范

水环境监测是水污染防治工作的前提与基础，是精准掌握水环境质量状况、识别污染来源、评估治理成效、预警环境风险的核心手段，其监测数据的科学性、准确性和连续性，直接决定了水污染防治决策的合理性与有效性。随着我国水环境治理向精细化、精准化转型，传统分散式、单一化的监测模式已难以满足流域尺度、全域覆盖的监测需求，构建科学完善、布局合理、运行高效的水环境监测网络，严格遵循标准化采样规范，成为提升水环境监测效能、保障水环境安全的关键环节。水环境监测网络设计与采样规范的完善，不仅需要兼顾监测覆盖范围与监测精度，还需结合区域水环境特征、污染防控需求，实现“全面覆盖、重点突出、科学高效、精准可控”的监测目标，为水污染防治、水环境管理提供坚实的数据支撑。

水环境监测网络是由监测点位、监测指标、监测技术、数据传输与管理等多个要素构成的有机整体，其核心功能是通过系统性、常态化的监测，全面掌握不同区域、不同时段的水环境质量变化规律，及时捕捉污染异常，为环境管理决策提供科学依据。与单一监测点位相比，完善的监测网络能够实现对流域、区域水环境的全方位覆盖，避免监测盲区，同时通过不同点位监测数据的对比分析，精准识别污染源头与迁移路径，提升污染防控的针对性。已有研究表明，科学合理的监测网络布局，能够将监测数据的误差控制在 10% 以内，显著提升监测数据的代表性与可靠性，为水环境质量评价、风险预警提供精准支撑。当前，我国水环境监测网络已逐步实现从“点源监测”向“流域监测”、从“常规监测”向“精准监测”的转型，但在网络布局合理性、点位代表性、采样规范性等方面仍存在不足，需进一步优化完善。

水环境监测网络的设计与采样规范的制定，需立足区域水环境特征、污染防控重点和管理需求，结合流域地形地貌、水文条件、污染源分布等因素，统筹兼顾监测科学性与实际可操作性。不同区域的水环境差异显著，如河流、湖泊、水

库、地下水等不同水体类型，其水文特征、污染来源、迁移规律存在明显差异，监测网络设计与采样规范也需针对性调整。例如，河流监测需重点考虑上游源头、中游支流汇入、下游出境口以及重点污染源附近的点位布局；湖泊监测则需结合湖泊形态、水深、水流速度等因素，合理设置监测点位，兼顾湖心、近岸、入湖口、出湖口等关键区域。同时，采样规范的执行需严格遵循标准化流程，确保采样方法、采样时间、样品保存与运输等环节的规范性，避免人为操作误差对监测数据造成影响。

一、水环境监测网络的核心构成与设计原则

水环境监测网络的核心构成包括监测点位、监测指标、监测频率、监测技术以及数据传输与管理系统，各构成要素相互关联、协同作用，共同保障监测网络的高效运行。监测点位是监测网络的基础，其布局合理性直接决定了监测数据的代表性与全面性，需根据监测目标、水体类型、污染源分布等因素，科学设置不同类型的监测点位，包括常规监测点、重点监测点、应急监测点等。监测指标则根据监测目标确定，分为常规监测指标与特殊监测指标，常规监测指标主要包括pH、溶解氧、化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮、总磷等，用于反映水体基本质量状况；特殊监测指标则针对特定污染类型，如重金属、持久性有机污染物、病原微生物等，用于精准识别特定污染风险。

监测频率的确定需兼顾监测精度与运行成本，根据水体污染程度、水文变化特征以及管理需求，合理设定监测频次。对于污染较轻、水质稳定的水体，可适当降低监测频率；对于污染严重、水质波动较大的区域，以及重点污染源附近、饮用水水源地等关键区域，需提高监测频率，实现常态化监测，及时捕捉水质变化。监测技术则分为实验室监测与现场监测，实验室监测精度高、监测指标全面，适用于常规监测与深度分析；现场监测则具有快速、便捷的优势，适用于应急监测与现场排查，两者相互补充，提升监测网络的运行效能。数据传输与管理系统则用于实现监测数据的实时传输、存储、分析与共享，确保监测数据的及时性与有效性，为环境管理决策提供快速支撑。

水环境监测网络的设计需遵循科学性、系统性、代表性、实用性和前瞻性五大原则。科学性原则要求监测网络设计符合水环境科学规律，监测点位布局、监测指标选择、监测频率设定等均需基于科学论证，确保监测数据能够真实反映水

环境质量状况；系统性原则要求监测网络覆盖不同水体类型、不同区域，形成全方位、多层次的监测体系，避免监测盲区；代表性原则要求监测点位能够代表所在区域的水环境特征，确保监测数据具有典型性和可比性；实用性原则要求监测网络设计结合实际管理需求，考虑监测技术水平、运行成本和管理能力，确保监测网络能够正常运行、便于维护；前瞻性原则要求监测网络设计兼顾未来环境管理需求，预留监测点位、监测指标和技术升级空间，适应水污染防治形势的变化。

（一）监测点位的布局要点

监测点位的布局是水环境监测网络设计的核心，需根据水体类型、监测目标和污染特征，分区域、分类型科学设置。河流监测点位的布局需遵循“从源头到出境”的原则，在河流源头、主要支流汇入处、干流关键断面、出境断面以及重点污染源（如工业废水排放口、生活污水排放口）附近设置监测点位，同时兼顾河流上下游、左右岸的差异，确保监测覆盖整个流域。对于流程较长、支流较多的河流，需适当增加监测点位密度，避免监测盲区；对于流程较短、水质相对稳定的河流，可适当减少监测点位，降低运行成本。

湖泊、水库监测点位的布局需结合水体形态、水深、水流速度以及污染来源，在湖心、近岸、入湖（库）口、出湖（库）口、饮用水水源地取水口以及周边污染源附近设置监测点位。对于大型湖泊、水库，需根据水深分层设置监测点位，兼顾表层水、中层水、底层水的水质状况，全面掌握水体垂直方向的水质变化；对于小型湖泊、水库，可根据实际情况设置表层监测点位，重点关注入湖（库）口和出湖（库）口的水质变化。地下水监测点位的布局则需结合地下水含水层分布、地下水补给与排泄规律，以及地下水污染源（如垃圾填埋场、工业废渣堆场、农业面源污染区域）分布，在地下水饮用水水源地、污染源周边、地下水漏斗区等关键区域设置监测点位，监测地下水水质变化。

（二）监测指标与监测频率的确定

监测指标的选择需根据监测目标、水体类型和污染特征，兼顾常规监测与特殊监测，确保监测指标能够全面反映水环境质量状况和污染风险。常规监测指标是各类水体监测的基础，主要包括理化指标、营养盐指标和微生物指标，用于评估水体的基本污染状况，满足日常环境管理需求。特殊监测指标则针对特定污染类型，如工业污染集中区域需增加重金属、持久性有机污染物等指标；农业面源污染严重区域需增加农药、化肥残留等指标；饮用水水源地需增加病原微生物、

消毒副产物等指标，确保精准识别特定污染风险。

监测频率的确定需结合水体污染程度、水文变化特征和管理需求，实现“精准监测、按需监测”。对于饮用水水源地、重点污染源排放口等关键区域，需实行每日监测，确保及时发现水质异常；对于常规监测点位，可根据水体水质稳定程度，实行每月 1-2 次监测；对于污染较轻、水质稳定的区域，可实行每季度 1 次监测。同时，需结合水文变化，如暴雨、洪水等极端天气后，适当增加监测频率，及时捕捉暴雨径流带来的面源污染对水体的影响。部分研究倾向于认为，合理的监测频率设置，既能保证监测数据的连续性和代表性，又能有效控制监测成本，实现监测效能的最大化。

二、水环境采样规范与操作要求

水环境采样是水环境监测的关键环节，采样的规范性直接影响监测数据的准确性和可靠性，任何采样环节的操作不当，都可能导致监测数据失真，影响环境管理决策的科学性。因此，必须严格遵循标准化的采样规范，明确采样方法、采样时间、采样量、样品保存与运输等环节的操作要求，确保采样过程的规范性和统一性。水环境采样需根据水体类型、监测指标和监测目标，选择合适的采样方法和采样工具，同时做好采样记录，确保样品的可追溯性。

不同水体类型的采样方法存在差异，需针对性选择合适的采样方式。河流、湖泊等表层水采样，可采用采样瓶直接采集，采样时需确保采样瓶完全浸没在水中，避免水面漂浮物、气泡进入样品；对于深层水采样，需使用深层采样器，根据监测需求，在不同水深位置采集样品，确保样品能够反映水体垂直方向的水质变化。地下水采样需使用专用地下水采样器，采样前需冲洗采样器和采样瓶，避免交叉污染，同时记录地下水水位、水温等基础信息。污水采样则需在排放口的不同位置、不同时段采集混合样品，确保样品能够代表污水的整体水质状况，避免单点、单时段采样导致的误差。

采样时间的选择需兼顾监测目标和水文变化特征，常规监测采样需选择在水体水质相对稳定的时段，避免暴雨、洪水、潮汐等极端水文条件对采样结果的影响；应急监测采样则需在污染事件发生后及时开展，根据污染扩散趋势，在不同时段、不同区域采集样品，及时掌握污染程度和扩散范围。采样量的确定需根据监测指标和分析方法，确保采样量能够满足实验室分析需求，同时预留一定量的

备用样品，用于重复分析和异常验证。一般情况下，常规监测样品采样量为 500-1000mL，特殊监测指标样品采样量需根据分析方法要求适当增加。

（一）样品采集的操作规范

样品采集前，需做好充分的准备工作，包括检查采样工具、采样瓶、防腐剂等是否符合要求，采样工具和采样瓶需提前清洗、消毒，避免污染样品。采样时，需严格按照操作规程进行，避免人为操作误差。对于表层水采样，采样瓶需垂直浸入水中，瓶口朝下，待水充满采样瓶后，缓慢取出，避免产生气泡，同时去除水面漂浮物，确保样品纯净；对于深层水采样，深层采样器需缓慢放入水中，到达指定水深后，开启采样开关，待采样器充满水后，缓慢提升，避免采样器晃动导致样品混合。

采样过程中，需做好采样记录，详细记录采样点位、采样时间、采样水深、水温、pH 值、天气状况等基础信息，确保样品的可追溯性。同时，需注意采样安全，在河流、湖泊等危险区域采样时，需配备必要的安全防护设备，避免发生安全事故。采样完成后，需及时对样品进行标记，标记内容包括采样点位、采样时间、样品编号等，确保样品不混淆。对于需要现场测定的指标，如 pH、溶解氧等，需在采样后立即测定，避免样品放置时间过长导致指标变化。

（二）样品保存与运输要求

样品保存与运输是确保监测数据准确性的重要环节，不同监测指标的样品保存方法存在差异，需根据指标特性选择合适的保存方式，防止样品在保存和运输过程中发生物理、化学、生物变化，导致监测数据失真。对于理化指标样品，如 pH、溶解氧等，需在采样后立即测定，无法立即测定的，需采取相应的保存措施，如溶解氧样品需加入固定剂，密封保存，并在 24 小时内测定；化学需氧量、五日生化需氧量等样品，需冷藏保存，温度控制在 0-4℃，并在 48 小时内测定。

对于重金属、持久性有机污染物等特殊指标样品，需加入相应的防腐剂，防止样品变质，同时避免样品受到污染。样品运输过程中，需确保样品容器密封完好，避免样品泄漏、混淆，同时控制运输温度，冷藏样品需保持低温状态，避免温度变化影响样品质量。运输时间需尽量缩短，常规样品需在 48 小时内送达实验室，特殊样品需在 24 小时内送达，确保样品能够及时分析。此外，样品运输过程中，需做好运输记录，详细记录运输时间、运输温度、样品数量等信息，确保样品的可追溯性。

三、监测网络优化与采样质量控制

水环境监测网络的优化是提升监测效能的重要途径,需结合水环境质量变化、污染防控需求和技术发展,定期对监测网络进行评估与调整,优化监测点位布局、监测指标和监测频率,确保监测网络能够适应水污染防治形势的变化。当前,我国部分区域的监测网络仍存在点位布局不合理、监测指标单一、监测频率不足等问题,导致监测数据无法全面反映水环境质量状况,需通过科学评估,逐步优化完善。例如,对于水质持续改善、污染风险较低的区域,可适当减少监测点位和监测频率;对于污染反弹、风险较高的区域,需增加监测点位和监测频率,实现精准监测。

采样质量控制是确保监测数据准确性的核心,需建立完善的采样质量控制体系,从采样准备、采样操作、样品保存与运输等各个环节进行严格管控,避免人为操作误差和样品污染。采样前,需对采样人员进行专业培训,确保采样人员熟悉采样规范和操作要求,掌握正确的采样方法;采样过程中,需实行平行采样,每批样品至少设置1个空白样品和1个平行样品,用于验证采样质量,避免样品污染和操作误差;采样后,需对样品进行严格审核,检查样品标记、采样记录、样品保存等是否符合要求,不合格样品需重新采集。

也有观点指出,水环境监测网络的优化与采样质量控制,还需加强技术创新和信息化建设,引入先进的监测技术和设备,如在线监测设备、无人机监测等,提升监测效率和精度;同时,建立监测数据共享机制,实现不同部门、不同区域监测数据的互联互通,提升监测数据的利用率。此外,需加强对采样人员的考核与管理,建立健全采样质量考核体系,对采样过程进行全程监督,确保采样规范的严格执行。

水环境监测网络设计与采样规范的完善,是提升水环境监测效能、保障水环境安全的关键。随着我国水环境治理向精细化、精准化转型,对水环境监测的要求不断提高,需进一步优化监测网络布局,完善采样规范,加强采样质量控制,确保监测数据的科学性、准确性和连续性。同时,需结合技术发展趋势,推动监测技术升级,构建“全方位、多层次、精准化”的水环境监测体系,为水污染防治、水环境管理提供坚实的数据支撑,推动水环境质量持续改善。

监测网络的优化与采样规范的执行,是一项长期的系统性工作,需结合区域

水环境实际，不断调整完善，兼顾科学性与实用性。未来，需进一步加强水环境监测基础研究，深入探索不同水体类型的监测规律，优化监测网络设计方法，完善采样规范体系，同时加强技术创新和人才培养，提升监测人员的专业素养和技术水平，推动水环境监测工作高质量发展，为水污染防治事业提供有力保障。

第二节 理化指标（pH、DO、COD、BOD 等）监测技术

水环境理化指标监测是水环境监测体系的核心组成部分，也是开展水污染防治、水环境质量评价、生态风险预警的基础前提。理化指标能够直观反映水体的物理化学性质，表征水体受污染程度、自净能力及生态环境状况，其中 pH、溶解氧（DO）、化学需氧量（COD）、生化需氧量（BOD）等指标，因检测方法成熟、表征意义明确，被列为水环境常规监测的核心指标，广泛应用于地表水、地下水、工业废水、生活污水等各类水体的监测工作中。不同于营养盐、重金属等专项指标的针对性监测，理化常规指标的监测覆盖范围广、监测频次高，能够快速捕捉水体水质的动态变化，为水环境治理决策提供及时、可靠的数据支撑。已有研究表明，常规理化指标的监测数据准确率，直接影响水环境质量评价的科学性与水污染防治措施的有效性，若监测数据存在偏差，可能导致治理方向偏差、措施失效，甚至加剧水环境恶化。

水环境理化常规指标的监测，需遵循“科学规范、精准高效、全面覆盖”的原则，结合不同水体的水质特征、监测目的及应用场景，选用合适的监测技术与方法，确保监测数据的准确性、代表性与可比性。不同理化指标的监测原理、技术路径存在显著差异，pH 值侧重反映水体的酸碱性，DO 侧重表征水体的有氧状态与自净能力，COD、BOD 则侧重反映水体中有机物的污染程度，各类指标的监测既相互独立，又相互关联，共同构成水体理化性质的完整表征体系。值得注意的是，理化指标监测受环境因素、操作流程、仪器精度等多种因素影响，易产生监测误差，因此需严格规范监测操作，优化监测技术，加强质量控制，确保监测数据能够真实反映水体实际状况。部分研究倾向于认为，规范的监测操作与合理的技术选型，可将常规理化指标的监测误差控制在 5% 以内，为水环境治理提供可靠的数据支撑。

一、水体 pH 值与溶解氧（DO）监测技术

pH 值与溶解氧（DO）是反映水体基本理化性质的核心指标，二者直接影响水体的生态功能与污染物的迁移转化，其监测技术的成熟度与精准度，是保障水环境监测质量的基础。pH 值表征水体中氢离子浓度的负对数，反映水体的酸碱性强弱，其监测结果直接关系到水体中重金属离子的形态、微生物的活性及污染物的降解效率——酸性水体易导致重金属离子溶出，加剧水体污染；碱性水体则可能引发水垢沉积，影响水处理工艺的正常运行。溶解氧（DO）则是指水体中溶解的氧气含量，是水体自净能力的重要表征，DO 含量越高，水体自净能力越强，反之则表明水体处于厌氧状态，易产生硫化氢等有毒有害物质，威胁水生生物生存。

（一）pH 值监测技术与应用要点

pH 值的监测技术主要分为实验室监测与现场快速监测两大类，二者各有优势，适用于不同的监测场景。实验室监测是 pH 值监测的传统方法，核心采用玻璃电极法，通过 pH 计测量水样的电极电位，结合能斯特方程换算得到 pH 值，该方法具有测量精度高、稳定性好、干扰因素少等优势，适用于批量水样的精准监测。玻璃电极法的监测流程需严格规范，水样采集后需在 24 小时内完成监测，避免水样变质导致 pH 值发生变化；监测前需用标准缓冲溶液对 pH 计进行校准，确保仪器精度，同时避免水样中油污、重金属离子等杂质对电极的污染，影响监测结果。

现场快速监测则主要采用便携式 pH 计，具有操作简便、监测速度快、无需复杂预处理等优势，适用于现场应急监测、野外监测及连续监测场景，能够快速获取水体 pH 值的实时数据，及时捕捉水质突变情况。便携式 pH 计的监测需注意环境温度的影响，温度变化会导致电极电位发生波动，需根据环境温度进行温度补偿，确保监测精度；同时，便携式电极需定期维护、校准，避免电极老化、污染导致监测误差。此外，还有试纸法等简易监测方法，适用于快速筛查水体酸碱性，但其监测精度较低，仅能用于定性判断，无法满足精准监测需求。

pH 值监测的核心难点的是避免干扰因素的影响，水体中的色度、浊度、重金属离子、有机物等，均可能影响监测结果的准确性。例如，高浊度水样会遮挡电极，影响电极与水样的充分接触；重金属离子会与电极发生反应，导致电极电

位偏移。因此，在监测过程中，需根据水样特征进行预处理，如高浊度水样需进行过滤处理，去除悬浮物杂质；含有重金属离子的水样需加入掩蔽剂，消除干扰。同时，监测过程中需严格遵循监测规范，规范操作流程，确保监测数据的准确性与可比性。

（二）溶解氧（DO）监测技术与优化路径

溶解氧（DO）的监测技术主要包括碘量法、电极法及荧光法，不同技术的监测原理、适用场景与精度存在差异，需结合监测需求进行选型。碘量法是 DO 监测的经典方法，属于化学滴定法，通过加入硫酸锰、碱性碘化钾等试剂，使水样中的溶解氧与试剂发生反应，生成碘单质，再用硫代硫酸钠滴定，根据滴定用量计算 DO 含量。该方法具有监测精度高、成本低、无需复杂仪器等优势，适用于实验室批量水样监测，但操作流程繁琐、耗时较长，且易受水样中还原性物质（如硫化物、亚硝酸盐）的干扰，需进行预处理消除干扰。

电极法是目前 DO 现场监测与连续监测的主流技术，分为覆膜电极法与无膜电极法，其中覆膜电极法应用最为广泛。该方法通过 DO 电极测量水样中氧气的分压，转化为电信号，进而计算 DO 含量，具有操作简便、监测速度快、可连续监测等优势，适用于现场应急监测、在线自动监测等场景。覆膜电极法的监测精度受电极覆膜状态、温度、压力等因素影响，需定期更换电极覆膜，校准仪器，同时避免水样中油污、悬浮物等堵塞电极，影响监测效果。无膜电极法则无需覆膜，适用于含油污、悬浮物较多的水样监测，但易受重金属离子、还原性物质的干扰，监测精度相对较低。

荧光法是近年来发展起来的新型 DO 监测技术，基于荧光猝灭原理，通过测量荧光强度的变化，计算水样中的 DO 含量。该方法具有监测精度高、抗干扰能力强、无需试剂、维护简便等优势，适用于复杂水体的监测，尤其是工业废水、高浊度水体等干扰因素较多的场景。荧光法 DO 监测仪的核心是荧光探头，需定期清洁探头表面，避免污染影响荧光强度，同时进行定期校准，确保监测数据的稳定性。相关研究指出，荧光法的监测误差比电极法低 3%-5%，在复杂水体监测中具有显著优势，未来应用前景广阔。

二、化学需氧量（COD）与生化需氧量（BOD）监测技术

化学需氧量（COD）与生化需氧量（BOD）是表征水体中有机物污染程度

的核心指标，二者能够反映水体中可氧化有机物的含量，是判断水体污染程度、评估水处理效果的重要依据。COD 是指在一定条件下，用强氧化剂氧化水样中有机物所消耗的氧量，反映水体中可被化学氧化的有机物总量，包括可生物降解有机物与难生物降解有机物；BOD 则是指在有氧条件下，水中微生物分解有机物所消耗的氧量，主要反映水体中可生物降解有机物的含量。二者的监测数据相互补充，能够全面反映水体有机物污染状况，为水污染防治与水处理工艺优化提供重要数据支撑。

（一）化学需氧量（COD）监测技术与应用

COD 监测技术主要分为重铬酸钾法、高锰酸钾法及快速监测法，其中重铬酸钾法是国家标准方法，适用于各类水体的 COD 监测，具有监测精度高、稳定性好等优势。重铬酸钾法的核心原理是，在强酸条件下，用重铬酸钾作为氧化剂，氧化水样中的有机物，通过滴定法计算氧化剂的消耗量，进而得到 COD 含量。该方法适用于测定 COD 浓度较高的水样，如工业废水、生活污水等，但操作流程繁琐、耗时较长，且需使用重铬酸钾、硫酸银等有毒试剂，易产生二次污染，需对实验废液进行无害化处理。

高锰酸钾法主要适用于 COD 浓度较低的水样，如地表水、地下水等，其原理与重铬酸钾法类似，以高锰酸钾作为氧化剂，氧化水样中的有机物，计算 COD 含量。该方法操作相对简便、耗时较短，试剂毒性较低，但监测精度低于重铬酸钾法，且易受水样中还原性物质的干扰，适用于轻度污染水体的监测。快速监测法是近年来发展起来的新型 COD 监测技术，主要包括快速消解分光光度法、电化学法等，具有操作简便、监测速度快、试剂用量少等优势，适用于现场应急监测与批量水样快速筛查。

快速消解分光光度法是目前应用最广泛的快速监测方法，通过高温快速消解水样，使有机物与氧化剂发生反应，生成有色物质，再通过分光光度计测量吸光度，根据标准曲线计算 COD 含量。该方法消解时间短（通常为 15-30 分钟），试剂用量仅为传统方法的 1/10，且无需滴定操作，大幅提高了监测效率，同时减少了二次污染。但该方法的监测精度受消解温度、消解时间、试剂用量等因素影响，需严格控制实验条件，确保监测数据的准确性。也有观点指出，快速消解分光光度法与重铬酸钾法的监测结果偏差在 5% 以内，能够满足常规监测需求。

（二）生化需氧量（BOD）监测技术与改进方向

BOD 监测技术主要包括稀释接种法、微生物传感器法及快速测定法，其中稀释接种法是国家标准方法，适用于各类水体的 BOD 监测。该方法的核心原理是，将水样稀释后，接种适宜的微生物，在 20℃ 恒温条件下培养 5 天，测量培养前后水样的 DO 含量，计算二者的差值，即为 BOD₅（5 日生化需氧量）。该方法能够真实反映水体中可生物降解有机物的含量，监测结果具有较高的代表性，但培养周期长（5 天），操作流程繁琐，且受微生物活性、培养条件等因素影响较大，难以满足快速监测与应急监测需求。

微生物传感器法是 BOD 快速监测的主流技术，通过固定化微生物电极，测量水样中有机物被微生物分解时产生的电信号，进而计算 BOD 含量。该方法具有监测速度快（通常为 10-30 分钟）、操作简便、可连续监测等优势，适用于现场应急监测、在线自动监测等场景，能够快速获取 BOD 实时数据。微生物传感器法的核心是固定化微生物膜，其活性直接影响监测精度，需定期更换微生物膜，保持微生物的活性，同时避免水样中有毒有害物质对微生物的抑制作用，影响监测结果。

快速测定法主要包括活性污泥曝气法、比浊法等，适用于批量水样的快速筛查，监测速度快、操作简便，但监测精度相对较低，仅能用于定性或半定量分析。活性污泥曝气法通过测量活性污泥降解有机物过程中的耗氧量，快速计算 BOD 含量，适用于工业废水、生活污水等 BOD 浓度较高的水样监测；比浊法则通过测量水样培养过程中的浊度变化，间接反映 BOD 含量，适用于轻度污染水体的监测。

BOD 监测的核心难点是微生物活性的控制与干扰因素的消除，水样中的重金属离子、有毒有机物等，会抑制微生物的活性，导致监测结果偏低；而水样中溶解氧含量不足、pH 值异常等，也会影响微生物的代谢过程，干扰监测结果。因此，在监测过程中，需对水样进行预处理，如去除有毒有害物质、调节 pH 值、补充溶解氧等，同时选用适宜的微生物菌种，确保微生物的活性。此外，培养条件的控制也至关重要，需严格控制培养温度、时间，避免温度波动、光照等因素影响监测结果。

除了 pH、DO、COD、BOD 四大核心指标外，水环境常规理化监测还包括浊度、电导率、总硬度、溶解态固体等指标，这些指标的监测技术与上述核心指标类似，

均分为实验室监测与现场监测，需结合监测需求选用合适的技术方法。浊度监测主要采用分光光度法或浊度计法，反映水体中悬浮物的含量；电导率监测则通过电导率仪测量水样的导电能力，间接反映水体中离子含量；总硬度与溶解态固体监测则主要采用滴定法或重量法，表征水体的水质特征。

当前，常规理化指标监测技术已日趋成熟，但在实际应用中仍面临诸多挑战，如复杂水体中干扰因素多、现场监测精度有待提升、监测仪器的维护成本较高等。未来，需加强监测技术的创新与优化，研发高效、抗干扰、低成本的监测技术与仪器，提高监测精度与效率；同时，加强监测人员的专业培训，规范监测操作流程，完善质量控制体系，确保监测数据的准确性、代表性与可比性。此外，推动常规理化指标监测与在线自动监测系统的融合，实现监测数据的实时传输与分析，为水环境治理决策提供更加及时、可靠的支撑，推动水环境监测体系的现代化发展。

第三节 营养盐与有机污染物实验室分析方法

营养盐与有机污染物是水环境监测中的核心指标，其含量水平直接反映水体污染程度、生态环境质量及潜在风险，也是评估水体富营养化、有机污染状况的关键依据。随着水污染问题的日益复杂，水体中营养盐与有机污染物的种类不断增多、形态愈发复杂，对实验室分析方法的精准度、灵敏度和适用性提出了更高要求。实验室分析作为水环境监测的核心环节，是实现营养盐与有机污染物精准定量、定性分析的重要手段，其分析结果的可靠性直接支撑水环境质量评价、污染溯源、治理效果评估等工作的开展。已有研究表明，科学、规范的实验室分析方法，能够有效捕捉水体中营养盐与有机污染物的细微变化，为水污染防治决策提供精准的数据支撑，而不规范的分析操作则可能导致数据偏差，影响治理决策的科学性和合理性。

营养盐主要包括氮、磷两大类，是水体中植物生长繁殖的重要营养物质，适量的营养盐能够维持水体生态系统的平衡，但过量输入会导致水体富营养化，引发蓝藻水华、赤潮等生态灾害，破坏水体生态功能。水环境中常见的营养盐指标包括总氮、氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、总磷、磷酸盐等，不同营养盐的存在形态、迁移转化规律存在差异，其实验室分析方法也需根据其特性进行针对性选择。有机污染物则涵盖范围广泛，包括持久性有机污染物、挥发性有机污染物、

半挥发性有机污染物以及各类有毒有害有机物，这类污染物具有毒性强、难降解、易富集的特点，不仅会污染水体，还会通过食物链累积，对水生生物和人体健康造成潜在威胁，其实实验室分析需兼顾灵敏度和分离效果，确保低浓度污染物的有效检出。

一、营养盐实验室分析方法及操作要点

营养盐的实验室分析核心是实现不同形态营养盐的精准定量，结合其化学特性，常用的分析方法主要包括分光光度法、离子色谱法、流动注射分析法等，不同方法的原理、适用范围和操作要求存在差异，实际应用中需根据监测需求、实验室条件和样品特性进行合理选择。分光光度法因操作简便、成本较低、准确度较高，是目前营养盐实验室分析中应用最广泛的方法，适用于大多数水体样品中营养盐的常规监测；离子色谱法具有分离效果好、灵敏度高、可同时测定多种离子的优势，适用于低浓度营养盐和复杂样品的分析；流动注射分析法则具有分析速度快、试剂用量少、自动化程度高的特点，适用于大批量样品的快速检测。

（一）氮营养盐的实验室分析方法

氮营养盐是水体富营养化的主要驱动因子之一，不同形态氮的分析方法各有侧重，核心是实现不同形态氮的有效分离和定量。氨氮的实验室分析常用纳氏试剂分光光度法和水杨酸-次氯酸盐分光光度法，其中纳氏试剂分光光度法操作简便、灵敏度适中，适用于地表水、地下水、生活污水等各类水体中氨氮的测定，其原理是氨氮与纳氏试剂反应生成黄棕色络合物，该络合物的吸光度与氨氮含量在一定范围内呈线性关系，通过分光光度计测定吸光度即可计算氨氮含量。但该方法易受水中余氯、重金属离子等干扰，样品测定前需进行预处理，去除干扰物质，确保分析结果的准确性。

硝酸盐氮的分析常用紫外分光光度法和离子色谱法，紫外分光光度法具有操作简便、快速、无二次污染的优势，适用于清洁水体和一般污染水体中硝酸盐氮的测定，其原理是硝酸盐氮在 220nm 波长处有强烈吸收，而在 275nm 波长处无吸收，通过测定两个波长处的吸光度，扣除干扰物质的影响，即可实现硝酸盐氮的定量。离子色谱法则适用于复杂水体和低浓度硝酸盐氮的测定，能够有效分离硝酸盐与其他阴离子，避免干扰，提高分析精度。亚硝酸盐氮的分析主要采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法，其原理是亚硝酸盐氮与对氨基苯磺酰胺反应生

成重氮盐，再与 N-（1-萘基）-乙二胺偶联生成红色偶氮染料，通过分光光度法测定吸光度，实现亚硝酸盐氮的定量，该方法灵敏度高、选择性好，适用于各类水体中亚硝酸盐氮的测定。

总氮的分析则需要先将水体中各种形态的氮转化为硝酸盐氮，再采用相应的方法进行测定，常用的消解方法包括碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法，其原理是在碱性条件下，过硫酸钾将水样中的有机氮、氨氮、亚硝酸盐氮等全部氧化为硝酸盐氮，消解后采用紫外分光光度法测定硝酸盐氮含量，即为总氮含量。消解过程的温度、时间和试剂用量对分析结果影响较大，需严格控制操作条件，确保消解完全，同时避免消解过程中氮的损失，保障分析结果的准确性。部分研究倾向于认为，总氮分析的关键在于消解效率，不同水体样品的基质差异较大，需根据样品特性调整消解条件，才能获得可靠的分析数据。

（二）磷营养盐的实验室分析方法

磷营养盐的实验室分析主要针对总磷和磷酸盐，其中磷酸盐是水体中可直接被植物吸收利用的形态，总磷则是水体中所有形态磷的总和，包括溶解态磷、颗粒态磷、有机磷和无机磷等。磷酸盐的常用分析方法为钼酸铵分光光度法，根据反应条件的不同，可分为钼锑抗分光光度法和钒钼黄分光光度法，其中钼锑抗分光光度法灵敏度较高，适用于低浓度磷酸盐的测定，其原理是在酸性条件下，磷酸盐与钼酸铵反应生成磷钼杂多酸，再与抗坏血酸还原生成蓝色络合物，通过分光光度法测定吸光度，实现磷酸盐的定量；钒钼黄分光光度法操作简便、反应速度快，适用于高浓度磷酸盐的测定，其原理是磷酸盐与钼酸铵、钒酸铵在酸性条件下反应生成黄色络合物，通过测定吸光度进行定量。

总磷的分析与总氮类似，需要先对水样进行消解，将各种形态的磷转化为磷酸盐，再采用钼酸铵分光光度法进行测定。常用的消解方法包括过硫酸钾消解、硝酸-高氯酸消解等，过硫酸钾消解适用于大多数水体样品，操作简便、消解效果好，在酸性条件下，过硫酸钾将水样中的有机磷、颗粒态磷等全部氧化为磷酸盐；硝酸-高氯酸消解则适用于含有大量有机物的复杂水样，能够有效破坏水样中的有机物，确保磷的完全转化。需要注意的是，磷营养盐的分析过程中，实验用水、试剂纯度和实验器皿的清洁度对分析结果影响较大，需使用无磷实验用水，实验器皿需经过无磷处理，避免污染，同时消解过程中需防止试剂挥发和样品损失，确保分析数据的可靠性。

此外，营养盐实验室分析中，样品的预处理是关键环节之一。对于含有悬浮物、有机物较多的水样，需进行过滤、离心等预处理，去除悬浮物和大分子有机物，避免干扰分析结果；对于含有干扰物质的水样，需采用掩蔽、分离等方法，去除干扰因子。同时，样品的保存也需严格遵循规范，氮营养盐样品需冷藏保存，避免氨氮挥发和亚硝酸盐氮氧化；磷营养盐样品需加入硫酸酸化至 $\text{pH} < 2$ ，防止磷的吸附和转化，确保样品在保存期间性质稳定，保障分析结果的准确性。

二、有机污染物实验室分析方法及技术要点

有机污染物的实验室分析相较于营养盐更为复杂，其核心是实现不同类型有机污染物的分离、富集和定量，常用的分析方法主要包括气相色谱法、高效液相色谱法、气相色谱-质谱联用法、液相色谱-质谱联用法等，不同方法适用于不同类型、不同浓度有机污染物的分析。气相色谱法适用于挥发性有机污染物和半挥发性有机污染物的分析，具有分离效率高、分析速度快、灵敏度高的优势；高效液相色谱法适用于难挥发性有机污染物、热稳定性差的有机污染物的分析，应用范围更为广泛；色谱-质谱联用法则结合了色谱法的分离优势和质谱法的定性优势，能够实现有机污染物的精准定性和定量，适用于复杂水体中低浓度有机污染物的分析和溯源。

（一）挥发性有机污染物的实验室分析

挥发性有机污染物（VOCs）是指沸点在 50°C - 260°C 之间、易挥发的有机化合物，包括苯系物、卤代烃、酯类、酮类等，这类污染物具有毒性强、易挥发、难降解的特点，易通过呼吸道和皮肤接触对人体健康造成危害，也是水环境监测中的重点指标。挥发性有机污染物的实验室分析，首先需要对水样中的挥发性有机污染物进行富集，常用的富集方法包括顶空法、吹扫-捕集法等，其中吹扫-捕集法富集效率高、无溶剂污染，是目前应用最广泛的富集方法，其原理是通过惰性气体吹扫水样，将水样中的挥发性有机污染物吹脱出来，被吸附剂捕集，然后通过热脱附将污染物解析出来，进入色谱仪进行分离和测定。

挥发性有机污染物的分离和定量主要采用气相色谱法，配备氢火焰离子化检测器（FID）或电子捕获检测器（ECD），其中 FID 适用于大多数挥发性有机污染物的测定，灵敏度适中；ECD 适用于含有卤原子的挥发性有机污染物的测定，灵敏度更高，能够有效检测低浓度的卤代烃。对于复杂样品中挥发性有机污染物

的定性分析，通常采用气相色谱 - 质谱联用法（GC-MS），通过质谱检测器对分离后的污染物进行定性，确定污染物的种类，同时结合色谱峰面积进行定量，确保分析结果的准确性和可靠性。需要注意的是，挥发性有机污染物的分析过程中，实验器皿需经过高温烘烤或溶剂清洗，去除残留的有机污染物，避免交叉污染；吹扫 - 捕集的吹扫时间、温度和脱附条件需严格控制，确保富集效率和解析完全。

（二）半挥发性有机污染物的实验室分析

半挥发性有机污染物（SVOCs）是指沸点在 260℃以上、不易挥发的有机化合物，包括多环芳烃、多氯联苯、酚类化合物、农药残留等，这类污染物具有难降解、易富集、毒性强的特点，能够在水体、土壤和生物体内长期累积，对生态环境和人体健康造成严重威胁。半挥发性有机污染物的实验室分析，首先需要对水样中的半挥发性有机污染物进行萃取和富集，常用的萃取方法包括液 - 液萃取法、固相萃取法等，其中固相萃取法操作简便、萃取效率高、试剂用量少，是目前主流的萃取方法，其原理是利用固相萃取柱中的吸附剂，吸附水样中的半挥发性有机污染物，然后用有机溶剂洗脱，实现污染物的富集和分离。

半挥发性有机污染物的分离和定量主要采用高效液相色谱法（HPLC）和气相色谱 - 质谱联用法（GC-MS），其中高效液相色谱法适用于热稳定性差、分子量较大的半挥发性有机污染物，如多环芳烃、酚类化合物等，配备紫外检测器、荧光检测器等，灵敏度高、选择性好；气相色谱 - 质谱联用法适用于热稳定性较好的半挥发性有机污染物，如多氯联苯、有机氯农药等，能够实现污染物的精准定性和定量。对于复杂水体中低浓度半挥发性有机污染物的分析，固相萃取 - 气相色谱 - 质谱联用法是目前最常用的组合方法，能够有效提高分析的灵敏度和准确性，满足低浓度污染物的监测需求。

有机污染物实验室分析中，质量控制是确保分析结果可靠的关键，需严格遵循实验室质量控制规范，包括空白实验、平行实验、加标回收实验等。空白实验用于扣除实验过程中的试剂污染和器皿污染，确保分析结果的准确性；平行实验用于检验实验操作的重复性，平行样品的相对偏差需控制在允许范围内；加标回收实验用于检验分析方法的准确度，加标回收率需符合相关标准要求。也有观点指出，有机污染物的分析受样品基质、萃取效率、分离条件等多种因素影响，不同水体样品的基质差异较大，需根据样品特性优化分析条件，才能获得可靠的分析数据。

此外，有机污染物的实验室分析对实验环境、试剂纯度和实验人员的操作水平要求较高。实验环境需保持清洁，避免有机污染物的交叉污染；试剂需采用色谱纯或分析纯，确保试剂纯度符合实验要求；实验人员需熟练掌握各类分析仪器的操作方法，严格控制实验条件，避免操作失误导致的分析误差。同时，随着水环境中新型有机污染物的不断出现，传统的分析方法已难以满足监测需求，需要不断研发和优化分析方法，提高分析方法的灵敏度和适用性，为新型有机污染物的监测提供技术支撑。

营养盐与有机污染物的实验室分析方法，需结合监测需求、样品特性和实验室条件进行合理选择，同时严格遵循操作规范和质量控制要求，确保分析结果的准确性、可靠性和可比性。不同分析方法各有优劣，实际应用中可根据具体情况，采用多种方法结合的方式，提高分析的精准度和效率。随着水环境监测技术的不断发展，实验室分析方法也在不断优化和创新，朝着自动化、智能化、高灵敏度的方向发展，为水环境污染防治提供更加强有力的技术支撑，助力水环境质量持续改善。

第四节 监测质量保证与控制体系

水环境监测质量保证与控制体系，是保障监测数据准确性、可靠性与可比性的核心支撑，也是水环境监测工作规范化开展的重要前提。随着水环境管理要求的不断提高，监测数据已成为污染治理决策、水质评价、环境执法的重要依据，其质量直接影响水环境管理工作的科学性与有效性。若监测数据存在偏差、失真等问题，不仅会误导环境治理决策，导致治理措施针对性不足，还可能影响环境执法的公正性，难以实现水环境质量持续改善的目标。监测质量保证与控制（QA/QC）体系，贯穿于水环境监测的全流程，涵盖监测方案设计、采样、样品保存与运输、实验室分析、数据处理与报告等各个环节，通过建立标准化的操作规范、质量控制措施与审核机制，最大限度降低监测误差，确保监测数据能够真实反映水体环境质量状况。

当前，我国水环境监测质量保证与控制工作已逐步走向规范化，但在实际实践中仍存在诸多问题。部分基层监测机构缺乏完善的质量控制体系，操作流程不规范，采样、样品保存等环节的质量管控存在漏洞；部分监测人员专业素养不足，

对质量控制要求理解不深入,操作过程中存在不规范行为;此外,监测设备的校准、维护不到位,实验室环境条件不符合分析要求等,也会影响监测数据质量。相关研究指出,水环境监测是一项系统性工作,任何一个环节的疏漏都可能导致监测数据失真,因此,构建完善的监测质量保证与控制体系,强化全流程质量管控,已成为当前水环境监测工作的重中之重。与发达国家相比,我国监测质量保证与控制体系仍有提升空间,尤其在基层监测机构的质量管控能力、质量审核机制的完善性等方面,还需进一步优化完善。

一、监测质量保证与控制体系的核心内涵与构建原则

监测质量保证与控制体系是一个系统性的管理体系,其核心内涵在于通过建立一系列标准化、规范化的措施,确保监测数据的准确性、精密性、完整性、代表性与可比性,为水环境管理提供可靠的数据支撑。其中,准确性是监测数据的核心要求,指监测结果与水体真实污染状况的吻合程度;精密性则强调多次监测结果的一致性,反映监测方法与操作过程的稳定性;完整性要求监测数据能够全面覆盖监测目标,无缺失、遗漏;代表性则要求监测样品能够真实反映监测区域的水体质量特征;可比性则确保不同时间、不同区域、不同监测机构的监测数据能够相互对比,为跨区域、跨时段的水环境质量分析提供可能。

构建监测质量保证与控制体系,需遵循系统性、科学性、实用性与可操作性的基本原则。系统性原则要求质量保证与控制措施覆盖监测全流程,从监测方案设计到数据报告输出,每个环节都需建立对应的质量控制要求,形成闭环管理。科学性原则要求质量控制措施符合水环境监测的技术规范与科学原理,结合监测指标、监测方法的特点,制定针对性的质量控制方案,避免形式化的质量管控。实用性原则要求质量控制措施贴合实际监测工作需求,考虑基层监测机构的技术水平、设备条件与人力状况,确保措施能够落地执行,而非单纯的理论要求。可操作性原则则强调质量控制措施的具体性与可执行性,明确操作流程、责任分工与考核标准,让监测人员能够清晰掌握并严格执行。

监测质量保证与控制体系的构建,还需结合水环境监测的实际需求,区分不同监测类型的质量控制重点。例如,常规监测与应急监测的质量控制要求存在差异,常规监测注重长期稳定性与数据可比性,应急监测则更注重快速性与准确性的平衡;实验室监测与现场监测的质量控制重点也不同,实验室监测侧重于分析

过程的质量管控，现场监测则重点关注采样、样品保存与运输环节的质量控制。部分研究倾向于认为，质量保证与控制体系的构建并非一成不变，需根据监测技术的发展、水环境管理要求的提升，持续优化完善，确保体系的适用性与有效性。

（一）质量保证体系的核心内容

质量保证体系是监测质量管控的基础，主要包括组织管理、人员培训、设备管理、方法验证、环境控制等核心内容。组织管理方面，需建立健全监测质量管理体系，明确各级监测人员的岗位职责，设立质量控制部门或专人，负责全流程质量监督与审核，确保质量管控工作有序开展。人员培训是质量保证的关键，监测人员的专业素养直接影响监测数据质量，需定期开展专业技能培训与质量控制知识培训，涵盖监测方法、操作规范、质量控制要求等内容，提升监测人员的操作水平与质量意识，确保监测人员能够严格按照规范开展工作。

设备管理是质量保证的重要支撑，监测设备的性能直接决定监测数据的准确性。需建立完善的设备管理制度，对监测设备的采购、校准、维护、报废等环节进行规范管理。监测设备采购时，需选择符合国家相关标准、性能稳定的设备，避免使用不合格设备；设备使用前，需进行校准，确保设备性能符合监测要求；使用过程中，需定期进行维护保养，及时发现并解决设备故障；设备达到使用年限或性能无法满足监测要求时，需及时报废，避免影响监测数据质量。此外，还需建立设备档案，详细记录设备的采购信息、校准记录、维护记录等，实现设备全生命周期管理。

方法验证是确保监测方法科学性、适用性的重要环节。在采用新的监测方法或对现有监测方法进行改进时，需进行方法验证，通过实验验证方法的检出限、精密度、准确度等指标，确保方法能够满足监测要求。方法验证需按照相关技术规范开展，验证结果需形成报告，作为监测方法采用的依据。同时，需定期对监测方法进行回顾性验证，根据监测实践中的问题，及时调整优化监测方法，确保方法的适用性与稳定性。实验室环境控制也是质量保证的重要内容，实验室的温度、湿度、洁净度等环境条件，会影响监测分析的准确性，需根据监测项目的要求，控制实验室环境条件，定期对环境条件进行监测记录，确保环境条件符合分析要求。

（二）质量控制体系的实施路径

质量控制体系是质量保证体系的具体落地措施，主要分为现场质量控制与实

实验室质量控制两部分，通过全程管控，最大限度降低监测误差。现场质量控制主要针对采样、样品保存与运输环节，这两个环节是监测数据失真的主要来源之一，也是质量控制的重点。采样环节的质量控制，需严格按照采样规范开展，明确采样点位、采样时间、采样方法与采样量，确保采样过程的规范性与样品的代表性。采样前，需检查采样设备的性能，确保设备清洁、无污染；采样过程中，需做好采样记录，详细记录采样点位、采样时间、水体外观、水温等信息，避免记录缺失或错误。

样品保存与运输环节的质量控制，需根据监测指标的特性，采取针对性的保存措施，防止样品在保存、运输过程中发生变质、污染或组分变化。例如，测定溶解氧的样品，需在采样后立即加入固定剂，避光低温保存，并尽快运输至实验室分析；测定挥发性有机物的样品，需采用棕色瓶采样，加满样品不留气泡，加入固定剂后密封保存。同时，样品运输过程中，需采取防震、避光、低温等措施，避免样品受到外界环境的影响，运输时间需严格控制，确保样品在规定时间内送达实验室。此外，还需建立样品交接制度，样品送达实验室后，需由专人负责接收，核对样品信息，检查样品状态，确保样品完好无损。

实验室质量控制是监测数据质量管控的核心环节，主要包括空白实验、平行实验、加标回收实验、标准物质对照实验等质量控制措施。空白实验用于扣除实验过程中试剂、器皿等带来的空白值，减少系统误差，每个监测批次都需进行空白实验，空白值需符合相关标准要求，否则需重新进行实验。平行实验用于检验监测操作的精密性，每个样品至少需进行 2 次平行测定，平行测定结果的相对偏差需控制在规定范围内，若偏差过大，需查找原因并重新测定。

二、监测全流程质量控制的关键环节与实施要点

水环境监测的全流程包括监测方案设计、采样、样品保存与运输、实验室分析、数据处理与报告等环节，每个环节都存在影响监测数据质量的因素，需针对性采取质量控制措施，确保全流程质量管控到位。监测方案设计是监测工作的开端，也是质量控制的基础，方案设计的科学性与合理性，直接影响后续监测工作的开展与监测数据的质量。监测方案设计需结合监测目标、监测区域的水环境特征、污染来源等因素，明确监测点位、监测指标、监测频率、监测方法等内容，确保监测方案能够全面、准确反映监测区域的水体质量状况。

监测点位的布设需遵循代表性、科学性、合理性的原则，结合监测区域的地形地貌、水文特征、污染分布等因素，合理布设监测点位，避免点位布设过于密集或稀疏，确保监测点位能够真实反映监测区域的水体质量。监测指标的选择需结合监测目标与水环境管理需求，优先选择对水体质量影响较大、与污染治理密切相关的指标，同时兼顾监测技术的可行性与经济性。监测频率的确定需根据监测目标与水体污染状况，常规监测可按照相关标准规定的频率开展，污染严重或水质波动较大的区域，可适当提高监测频率，确保能够及时掌握水体质量变化趋势。

实验室分析环节的质量控制，除了开展空白实验、平行实验等常规质量控制措施外，还需加强对试剂、器皿的质量管控。试剂是实验室分析的基础，需选择符合国家标准试剂，避免使用纯度不足或过期试剂；试剂使用前，需进行纯度检验，确保试剂质量符合分析要求。实验器皿需清洁干净，避免器皿污染导致监测数据失真，使用前需进行清洗、烘干等处理，必要时需进行消解处理，去除器皿表面的污染物。同时，实验室分析人员需严格按照监测方法规范操作，避免操作失误导致的误差，分析过程中需做好详细记录，确保实验过程可追溯。

数据处理与报告环节的质量控制，主要针对数据的审核、计算与报告输出，确保数据的准确性与完整性。数据处理过程中，需严格按照监测方法的要求进行计算，避免计算错误；对异常数据需进行合理判断，分析异常原因，若为操作失误导致的异常数据，需重新测定；若为水体真实污染状况导致的异常数据，需在报告中注明原因。数据审核分为内部审核与外部审核，内部审核由实验室质量控制人员负责，对监测数据、实验记录等进行审核，确保数据准确、记录完整；外部审核由上级监测机构或第三方机构负责，对监测数据的真实性、可靠性进行审核，确保监测数据符合质量要求。

监测报告的输出需规范、完整，明确监测目的、监测范围、监测方法、监测结果、质量控制措施等内容，同时需对监测结果进行合理分析，提出针对性的建议。监测报告需经审核人员审核签字后，方可提交，确保报告的科学与准确性。也有观点指出，数据处理与报告环节的质量控制，还需注重数据的溯源性，建立完善的数据溯源体系，确保每一组监测数据都能够追溯到采样、分析、计算等各个环节，便于后续的质量核查与问题追溯。

应急监测的质量控制，是监测质量保证与控制体系的重要组成部分，与常规

监测相比,应急监测具有突发性、紧迫性的特点,质量控制措施需兼顾快速性与准确性。应急监测前,需快速制定监测方案,明确监测点位、监测指标、监测方法等内容,确保监测工作有序开展;采样过程中,需简化操作流程,但必须保证采样的规范性与样品的代表性,做好采样记录与样品标记;样品保存与运输需优先采用快速、有效的保存方法,缩短运输时间,确保样品状态稳定;实验室分析需优先采用快速、准确的监测方法,同时开展必要的质量控制措施,确保监测数据能够及时、准确反映水体污染状况,为应急处置决策提供可靠支撑。

当前,监测质量保证与控制体系的完善,还需加强质量控制技术的创新与应用。随着现代监测技术的发展,在线监测、遥感监测等新型监测技术广泛应用,传统的质量控制措施已难以满足新型监测技术的需求,需研发针对性的质量控制技术与方法,确保新型监测技术的监测数据质量。例如,在线监测设备的质量控制,需建立完善的校准、维护与审核机制,定期对在线监测设备进行校准,确保设备运行稳定、数据准确;遥感监测数据的质量控制,需加强对遥感影像的校正、验证,提高遥感监测数据的准确性与可靠性。

此外,还需建立健全监测质量评价与考核机制,对监测机构的质量控制工作进行全面评价,考核监测数据质量、质量控制措施落实情况等内容,将考核结果与监测机构的评优、资质认定等挂钩,倒逼监测机构加强质量控制工作。同时,加强跨区域、跨部门的质量控制协同,建立监测数据共享与质量互认机制,确保不同监测机构的监测数据能够相互对比、相互验证,提升监测数据的整体质量。

监测质量保证与控制体系的构建与完善,是一个长期的过程,需要结合监测技术的发展、水环境管理要求的提升,持续优化质量控制措施,强化全流程质量管控。未来,随着大数据、人工智能等技术在水环境监测中的应用,可构建智能化的质量控制体系,实现对监测全流程的实时监控与动态调整,进一步提升监测数据质量,为水环境管理提供更可靠、更精准的数据支撑,推动水环境治理工作高质量发展。

第六章 现代环境监测技术与仪器应用

第一节 光谱与色谱技术在污染物检测中的应用

现代环境监测技术推动水环境监测向精准化、高效化、多指标同步检测发展，为水污染防治提供技术支撑。光谱与色谱技术因高灵敏、高选择性、快速等优势，广泛用于水体无机、有机、重金属等污染物的定性定量分析，是关键监测手段。随着治理要求提高，痕量污染物检测需求迫切，两类技术的升级与联用拓展了检测范围与精度，为溯源、风险评估和治理提供保障。

光谱技术基于光与物质相互作用，操作简便、快速、前处理简单，可现场检测，适用于常规与应急监测。色谱技术依据物质分配系数差异，分离效果好、灵敏度高，可同步分离定量多种污染物，适合微量、痕量检测。二者应用可将检测限降至 $\mu\text{g/L}$ 乃至 ng/L 级，大幅提升监测精度。

实际应用需根据污染物类型、浓度、基质选择对应技术：紫外 - 可见光谱用于常规污染物快速检测，原子吸收光谱用于重金属检测，高效液相色谱用于有机污染物与农药残留检测。色谱 - 质谱等联用技术日趋成熟，提升复杂基质检测能力，解决单一技术难以应对的检测难题。

一、光谱技术在水环境污染检测中的应用

光谱技术是水环境污染检测中应用最广泛的技术之一，根据检测原理的不同，可分为吸收光谱技术、发射光谱技术、散射光谱技术等，不同类型的光谱技术在污染物检测中具有不同的应用场景与优势。吸收光谱技术以物质对特定波长光的吸收特性为核心，通过测量吸光度与浓度的关系，实现对污染物的定量分析，其操作简便、检测速度快，适用于常规污染物的快速监测，是水环境监测实验室中最基础的检测技术之一。

紫外 - 可见分光光度法是吸收光谱技术中应用最广泛的一种，其检测范围覆盖紫外光区（200-400nm）和可见光区（400-760nm），适用于水体中具有紫外 -

可见吸收特性的污染物检测,如硝酸盐、亚硝酸盐、氰化物、酚类化合物、重金属离子等。该方法样品前处理简单,无需复杂的分离步骤,可直接对水样进行检测,检测成本较低,适用于大批量样品的常规监测。例如,在水体中硝酸盐的检测中,可利用硝酸盐在 220nm 波长处的特征吸收峰,通过测量吸光度,结合标准曲线,实现硝酸盐的定量分析;在酚类化合物的检测中,可通过显色反应,使酚类化合物与显色剂结合形成有色化合物,在特定波长处测量吸光度,实现酚类化合物的定量检测。

原子吸收光谱法(AAS)是重金属污染物检测的核心技术之一,其原理是通过将样品原子化,利用原子对特定波长光的吸收特性,实现对重金属元素的定量分析。该方法灵敏度高、选择性强,能有效避免水体中其他杂质的干扰,适用于水体中铜、铅、锌、镉、汞等多种重金属元素的微量、痕量检测。原子吸收光谱法可分为火焰原子吸收光谱法和石墨炉原子吸收光谱法,火焰原子吸收光谱法适用于常量、微量重金属的检测,检测速度快、操作简便;石墨炉原子吸收光谱法适用于痕量重金属的检测,检测精度更高,检测限值可降至 ng/L 级别,适用于饮用水水源地、清洁水体等低浓度重金属污染的检测。

(一) 发射光谱技术的应用要点

发射光谱技术以物质受到激发后发射的特征光谱为核心,通过分析特征光谱的波长与强度,实现对污染物的定性定量分析,其优势在于灵敏度高、能同时检测多种元素,适用于多元素同步检测场景。电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)是发射光谱技术中应用最广泛的一种,其原理是利用电感耦合等离子体作为激发源,将样品原子化并激发,使原子发射出特征光谱,通过检测特征光谱的强度,实现对多种元素的同步定量分析。

ICP-OES 适用于水体中多种无机元素、重金属元素的同步检测,可同时检测数十种元素,检测速度快、灵敏度高,检测限值可达 $\mu\text{g/L}$ 级别,适用于工业废水、地表水、地下水等多种水体类型的检测。例如,在工业废水检测中,可通过 ICP-OES 同时检测废水中的铜、铅、锌、镉、铬等多种重金属元素,以及磷、硫、硅等无机元素,为工业废水处理效果评估提供全面的数据支撑。此外,ICP-OES 还具有样品前处理简单、抗干扰能力强等优势,能有效应对复杂水体基质的干扰,提升检测数据的准确性与可靠性。

荧光光谱法是另一种重要的发射光谱技术,其原理是利用物质受到激发后发

射的荧光强度与浓度的关系，实现对污染物的定量分析。该方法灵敏度极高，检测限值可降至 ng/L 甚至 pg/L 级别，适用于水体中痕量有机污染物、重金属离子的检测，如持久性有机污染物、荧光素、重金属络合物等。例如，在水体中多环芳烃的检测中，可利用多环芳烃的荧光特性，通过荧光光谱法实现痕量多环芳烃的定量分析，其检测精度远高于紫外 - 可见分光光度法。

（二）光谱技术的优化与改进

随着水环境监测对检测精度、检测速度的要求不断提高，传统光谱技术的局限性逐渐显现，如单一光谱技术的抗干扰能力不足、复杂基质中痕量污染物检测难度大等，需通过技术优化与改进，提升光谱技术的检测效能。部分研究倾向于认为，光谱技术的优化主要集中在样品前处理优化、检测条件优化、联用技术开发三个方面，通过多维度优化，实现检测精度与效率的双重提升。

样品前处理优化是提升光谱检测精度的关键，水体基质复杂，含有大量的悬浮物、有机物等杂质，会对光谱检测产生干扰，导致检测数据失真。通过优化样品前处理方法，如过滤、离心、萃取、富集等，可去除水体中的干扰杂质，提高样品纯度，提升检测精度。例如，在痕量重金属检测中，可通过螯合萃取、固相萃取等方法，对样品中的重金属进行富集，提高重金属的浓度，降低检测限值。检测条件优化则主要包括激发波长、检测波长、灯电流、狭缝宽度等参数的优化，通过优化检测条件，减少干扰信号，提高检测灵敏度与准确性。

联用技术开发是光谱技术发展的重要方向，将光谱技术与其他技术相结合，可弥补单一光谱技术的不足，拓展检测范围与精度。例如，将光谱技术与色谱技术联用，可实现复杂基质中污染物的分离与精准检测；将光谱技术与纳米技术相结合，可利用纳米材料的吸附、催化特性，提高样品富集效率与检测灵敏度。此外，便携式光谱仪器的研发与应用，也进一步拓展了光谱技术的应用场景，实现了现场快速检测，为应急监测、现场排查提供了便捷的技术手段。

二、色谱技术在水环境污染物检测中的应用

色谱技术是复杂基质中污染物分离检测的核心技术，其核心优势在于分离效果好、能同时检测多种目标污染物，适用于水体中微量、痕量有机污染物、重金属络合物等的检测。根据流动相的不同，色谱技术可分为气相色谱法（GC）和液相色谱法（HPLC），两者在污染物检测中具有不同的应用场景，气相色谱法

适用于挥发性、半挥发性有机污染物的检测，液相色谱法适用于非挥发性、热不稳定性有机污染物的检测。

气相色谱法（GC）以气体为流动相，利用不同物质在固定相和流动相之间的分配系数差异，实现对挥发性、半挥发性有机污染物的分离与检测。该方法分离效率高、检测速度快、灵敏度高，适用于水体中挥发性有机物（VOCs）、半挥发性有机物（SVOCs）、农药残留、多氯联苯等有机污染物的检测。例如，在水体中挥发性有机物的检测中，可通过顶空进样技术，将水样中的挥发性有机物提取到气相中，再通过气相色谱法进行分离检测，实现对苯、甲苯、二甲苯等挥发性有机物的定量分析。

高效液相色谱法（HPLC）以液体为流动相，具有分离效果好、适用范围广、无需样品原子化等优势，适用于水体中非挥发性、热不稳定性有机污染物的检测，如持久性有机污染物、多环芳烃、酚类化合物、农药残留等。HPLC可分为正相高效液相色谱法和反相高效液相色谱法，其中反相高效液相色谱法应用最广泛，适用于大多数有机污染物的检测，其流动相为极性溶剂，固定相为非极性固定相，通过调整流动相的比例，实现对不同污染物的分离。

（一）气相色谱与液相色谱的应用差异

气相色谱法与液相色谱法在水环境污染检测中的应用差异，主要源于两者的检测原理与适用范围不同，需根据污染物的特性选择合适的检测方法。气相色谱法适用于挥发性、半挥发性有机污染物的检测，其检测对象主要包括沸点较低、易挥发的有机化合物，如挥发性有机物、农药中的有机磷农药、有机氯农药等；液相色谱法适用于非挥发性、热不稳定性有机污染物的检测，其检测对象主要包括沸点较高、不易挥发、热稳定性差的有机化合物，如多环芳烃、持久性有机污染物、酚类化合物等。

在检测精度方面，气相色谱法与液相色谱法均具有较高的灵敏度，检测限值可降至 $\mu\text{g/L}$ 级别，但对于痕量污染物的检测，两者的优势不同。气相色谱法与质谱联用（GC-MS）后，检测精度可进一步提升，适用于复杂基质中痕量挥发性有机污染物的检测；液相色谱法与质谱联用（HPLC-MS）后，适用于复杂基质中痕量非挥发性有机污染物的检测。在操作难度方面，气相色谱法需要对样品进行预处理，如萃取、浓缩等，操作相对复杂；液相色谱法样品前处理相对简单，可直接进样检测，适用于大批量样品的常规监测。

（二）色谱联用技术的应用与优势

色谱联用技术是解决复杂基质中痕量污染物检测难题的关键，通过将色谱技术与质谱技术、光谱技术相结合，实现分离与检测的协同作用，显著提升检测精度与选择性，拓展检测范围。气相色谱-质谱联用（GC-MS）是目前应用最广泛的色谱联用技术之一，其结合了气相色谱法的高分离效率和质谱法的高灵敏度、高选择性，适用于复杂基质中挥发性、半挥发性有机污染物的定性定量分析，可准确识别污染物的种类，实现痕量污染物的精准检测。

例如，在水体中多氯联苯、多环芳烃等持久性有机污染物的检测中，GC-MS可实现对多种持久性有机污染物的同步分离与定量分析，检测限值可降至 ng/L 级别，能有效识别水体中微量的持久性有机污染物，为污染来源追溯提供科学依据。液相色谱-质谱联用（HPLC-MS）则结合了液相色谱法的广适用性和质谱法的高灵敏度，适用于非挥发性、热不稳定性有机污染物的检测，如水体中的农药残留、抗生素、激素等痕量污染物，其检测精度高、抗干扰能力强，能有效应对复杂水体基质的干扰。

此外，色谱与光谱联用技术，如液相色谱-紫外光谱联用（HPLC-UV）、液相色谱-荧光光谱联用（HPLC-FL）等，也在水环境污染检测中得到广泛应用。HPLC-UV 适用于具有紫外吸收特性的有机污染物的检测，操作简便、检测成本较低；HPLC-FL 适用于具有荧光特性的有机污染物的检测，灵敏度极高，适用于痕量污染物的检测。色谱联用技术的应用，不仅提升了污染物检测的精度与效率，还实现了对复杂基质中多种污染物的同步检测，为水环境监测提供了更全面、更精准的技术支撑。

三、光谱与色谱技术的应用局限与发展趋势

尽管光谱与色谱技术在水环境污染检测中具有诸多优势，但在实际应用中仍存在一定的局限性，需结合技术发展不断优化完善。光谱技术的主要局限在于抗干扰能力不足，水体中复杂的基质成分，如有机物、悬浮物、其他杂质等，会对光谱检测产生干扰，导致检测数据失真，尤其是在痕量污染物检测中，干扰问题更为突出。此外，单一光谱技术的检测范围有限，难以实现多种类型污染物的同步检测，需结合多种光谱技术或联用技术，才能满足全面检测的需求。

色谱技术的主要局限在于样品前处理复杂、检测成本较高，尤其是色谱联用

技术, 仪器设备昂贵、操作难度大, 对检测人员的专业素养要求较高, 难以在基层监测机构广泛应用。同时, 色谱技术的检测速度相对较慢, 不适用于应急监测、现场快速检测等场景, 难以满足突发污染事件的快速处置需求。也有观点指出, 光谱与色谱技术在痕量、超痕量污染物检测中, 仍存在检测限值不足的问题, 难以满足当前水环境治理对超低浓度污染物检测的需求。

随着科技的不断进步, 光谱与色谱技术的发展趋势主要集中在智能化、小型化、高效化、联用化四个方面。智能化方面, 通过引入物联网、大数据等技术, 实现检测仪器的自动化操作、数据的实时传输与分析, 提升监测效率, 减少人工干预; 小型化方面, 研发便携式、手持式检测仪器, 实现现场快速检测, 拓展技术应用场景, 满足应急监测、现场排查的需求; 高效化方面, 通过优化检测方法、改进仪器设备, 提高检测速度与精度, 降低检测成本, 实现大批量样品的快速检测。

联用化方面, 进一步推动光谱与色谱技术的联用, 以及与其他现代检测技术的结合, 如与生物传感技术、纳米技术相结合, 弥补单一技术的不足, 拓展检测范围与精度, 实现复杂基质中痕量、超痕量污染物的精准检测。此外, 绿色检测技术的发展也成为重要趋势, 通过优化样品前处理方法、减少化学试剂的使用, 实现检测过程的绿色化、环保化, 降低对环境的二次污染。

光谱与色谱技术作为现代水环境监测的核心技术, 其应用与发展对水污染防治具有重要意义。随着水环境治理向精细化、精准化转型, 对污染物检测的要求不断提高, 需进一步加强光谱与色谱技术的研发与应用, 优化检测方法, 改进仪器设备, 解决实际应用中的局限性, 提升检测效能。同时, 需加强检测人员的专业培训, 提升检测人员的技术水平, 推动光谱与色谱技术在水环境监测中的广泛应用, 为水污染防治、水环境管理提供更科学、更精准的数据支撑, 推动水环境质量持续改善。

第二节 生物传感与快速检测技术发展

随着水环境监测需求的不断升级, 传统监测技术存在的操作繁琐、检测周期长、成本较高、依赖专业实验室等弊端日益凸显, 难以满足现场应急监测、大规模筛查及实时监测的实际需求。生物传感与快速检测技术作为现代环境监测技术体系的重要分支, 以生物识别元件为核心, 结合传感技术、微电子技术及材料科

学等多学科理论,实现了对水环境中污染物的快速、精准、低成本监测,成为弥补传统监测技术不足、推动水环境监测向高效化、便携化、智能化发展的核心力量。生物传感与快速检测技术的核心优势在于,能够将生物识别的特异性与传感技术的灵敏性相结合,无需复杂的样品预处理,即可实现对目标污染物的快速响应与定量或半定量检测,广泛应用于地表水、地下水、工业废水、生活污水及饮用水源地的监测工作中,尤其适用于突发水污染事件的应急处置。已有研究表明,生物传感与快速检测技术的检测速度较传统实验室检测缩短 80% 以上,检测成本降低 50% 左右,且检测精度能够满足常规水环境监测的要求,为水环境污染防控提供了高效、便捷的技术支撑。

生物传感技术与快速检测技术虽同属高效监测技术范畴,但二者在技术原理、应用场景上存在一定差异,却又相互融合、协同发展。生物传感技术以生物分子(如酶、抗体、核酸、微生物等)作为识别元件,通过生物分子与目标污染物的特异性结合,将生物信号转化为可检测的物理或化学信号,进而实现对污染物的精准检测;快速检测技术则更侧重检测流程的简化与检测速度的提升,涵盖生物法、化学法、物理法等多种技术类型,其中生物类快速检测技术与生物传感技术存在高度重叠,是快速检测技术的核心发展方向。值得注意的是,生物传感与快速检测技术的发展,离不开材料科学、微电子技术、人工智能等相关领域的技术突破,新型功能材料的研发、微型化传感元件的制备、信号处理技术的优化,均推动了该类技术的升级与应用拓展。部分研究倾向于认为,生物传感与快速检测技术将逐步替代传统常规检测技术,成为水环境现场监测与应急监测的主流技术,推动水环境监测体系的智能化转型。

一、生物传感技术的核心原理与分类及应用

生物传感技术的核心是“生物识别 - 信号转化 - 信号检测”的一体化过程,其本质是利用生物分子的特异性识别能力,捕捉目标污染物的存在并将其转化为可量化的信号,再通过检测仪器对信号进行分析处理,最终得到污染物的浓度信息。生物识别元件是生物传感器的核心组成部分,其性能直接决定了生物传感器的特异性、灵敏度与稳定性,常用的生物识别元件主要包括酶、抗体、核酸、微生物及生物组织等,不同类型的识别元件适用于不同类型污染物的检测,能够实现对重金属离子、有机物、病原微生物等各类水环境污染物的精准识别。信号转

化元件则负责将生物识别过程中产生的生物信号（如酶促反应信号、免疫反应信号、微生物代谢信号等），转化为电信号、光信号、热信号等易于检测的物理化学信号，信号检测元件则负责对转化后的信号进行放大、检测与分析，最终输出检测结果。

（一）基于不同识别元件的生物传感技术类型

基于酶的生物传感技术是最早发展、应用最广泛的生物传感技术之一，其核心是利用酶的特异性催化作用，实现对目标污染物的检测。酶具有高度的特异性，能够选择性地与目标污染物发生催化反应，产生可检测的信号，如通过氧化还原酶催化污染物氧化还原，产生电信号，进而通过电化学传感器检测电信号强度，计算污染物浓度。该技术适用于检测水体中的有机物、重金属离子等污染物，如利用酪氨酸酶传感器检测水体中的酚类物质，利用脲酶传感器检测水体中的氨氮，具有检测速度快、特异性强、灵敏度高等优势。但酶的稳定性较差，易受温度、pH 值、重金属离子等因素影响而失活，限制了其在复杂水体监测中的长期应用，需通过固定化技术（如载体固定、交联固定等）提升酶的稳定性。

基于抗体的生物传感技术（免疫传感技术）以抗原 - 抗体特异性结合为核心，利用抗体对目标污染物（抗原）的高度特异性识别能力，实现对污染物的精准检测。该技术主要适用于检测水体中的持久性有机污染物、农药残留、病原微生物等，如利用单克隆抗体传感器检测水体中的多环芳烃、有机磷农药等，具有特异性强、检测精度高、抗干扰能力强等优势。免疫传感技术的关键是抗体的制备，高质量的单克隆抗体能够显著提升传感器的检测性能，随着基因工程技术的发展，基因工程抗体的研发与应用，进一步降低了抗体的制备成本，拓展了免疫传感技术的应用范围。但该技术的检测成本相对较高，且抗体的保存条件较为苛刻，限制了其在大规模现场监测中的应用。

基于核酸的生物传感技术（核酸传感技术）以核酸分子杂交为核心，利用核酸探针与目标核酸序列的特异性结合，实现对水体中病原微生物、基因污染物等的检测。该技术具有特异性强、灵敏度高、可设计性强等优势，能够实现对低浓度病原微生物的快速检测，如检测水体中的大肠杆菌、沙门氏菌等致病菌，同时也可用于检测水体中的转基因污染物。核酸传感技术的核心是核酸探针的设计与修饰，通过对核酸探针进行荧光修饰、电化学修饰等，能够提升信号检测的灵敏度与稳定性。近年来，CRISPR-Cas 技术与核酸传感技术的结合，进一步提升了

该技术的检测精度与速度，使其在水环境应急监测中展现出广阔的应用前景。

基于微生物的生物传感技术以微生物作为识别元件，利用微生物对目标污染物的代谢响应或毒性响应，实现对污染物的检测。微生物具有来源广泛、成本低、适应能力强等优势，能够对水体中的多种污染物产生特异性响应，如利用重金属抗性微生物检测水体中的重金属离子，利用有机污染物降解菌检测水体中的有机物浓度。该技术适用于复杂水体的监测，能够综合反映水体的污染状况，但检测特异性相对较低，易受水体中其他微生物的干扰，且检测周期相对较长，需进一步优化微生物的固定化与信号转化技术。

（二）生物传感技术在水环境监测中的实践应用

生物传感技术在水环境监测中的应用范围不断拓展，已逐步实现对重金属离子、有机物、病原微生物等各类污染物的精准检测，成为水环境监测的重要技术手段。在重金属离子监测方面，基于酶、核酸及微生物的生物传感器，能够实现对水体中铅、镉、汞、铬等重金属离子的快速检测，检测限可达到 $\mu\text{g/L}$ 级别，远低于国家水环境质量标准限值，适用于饮用水源地、地表水等低浓度重金属污染的监测。例如，基于葡萄糖氧化酶的生物传感器，能够通过重金属离子对酶活性的抑制作用，实现对重金属离子的定量检测；基于核酸适配体的生物传感器，能够特异性识别重金属离子，检测精度高、抗干扰能力强。

在有机污染物监测方面，生物传感技术主要用于检测水体中的持久性有机污染物、农药残留、酚类物质等难降解有机物。基于抗体的免疫传感器能够实现对多环芳烃、有机磷农药等污染物的快速检测，检测速度快、特异性强，适用于现场应急监测；基于酶的生物传感器则可用于检测水体中的酚类物质、甲醛等有机物，操作简便、成本较低，广泛应用于工业废水的监测。相关研究指出，基于生物传感技术的有机污染物检测，能够在 10-30 分钟内完成检测，检测精度与传统实验室方法相当，能够满足现场快速监测的需求。

在病原微生物监测方面，基于核酸、抗体的生物传感技术，能够实现对水体中大肠杆菌、沙门氏菌、霍乱弧菌等致病菌的快速检测，无需复杂的分离培养过程，检测时间可缩短至 1-2 小时，远低于传统微生物培养方法（24-48 小时）。该技术适用于饮用水源地、生活污水、地表水等水体的病原微生物监测，能够快速排查病原微生物污染风险，为饮用水安全保障提供技术支撑。例如，基于 CRISPR-Cas 的核酸传感器，能够实现对低浓度大肠杆菌的快速检测，检测限可达到 10

CFU/mL，满足饮用水源地病原微生物监测的要求。

二、水环境快速检测技术的发展与应用实践

水环境快速检测技术是指能够在现场快速完成样品采集、预处理、检测与数据分析的监测技术，其核心目标是提升检测效率、简化检测流程、降低检测成本，满足现场应急监测、大规模筛查及基层监测的实际需求。快速检测技术涵盖生物法、化学法、物理法等多种技术类型，其中生物类快速检测技术与生物传感技术相互融合，是快速检测技术的核心发展方向，而化学类、物理类快速检测技术则以操作简便、成本低廉为优势，适用于基层监测与快速筛查。快速检测技术的发展，打破了传统实验室监测的时空限制，实现了“现场采样、现场检测、现场出结果”的监测模式，大幅提升了水环境监测的效率与时效性，为突发水污染事件的快速处置提供了有力支撑。

（一）生物类快速检测技术的类型与应用

生物类快速检测技术以生物反应为核心，结合简易的检测设备，实现对目标污染物的快速检测，主要包括酶联免疫吸附测定（ELISA）、免疫层析试纸条、微生物快速检测法等。酶联免疫吸附测定（ELISA）是一种基于抗原 - 抗体特异性结合的快速检测方法，通过酶促反应产生有色信号，根据信号强度计算污染物浓度，具有特异性强、检测精度高、操作简便等优势，适用于水体中农药残留、持久性有机污染物、病原微生物等的快速检测。该方法无需复杂的仪器设备，可在现场完成检测，检测时间通常为 1-2 小时，适用于基层监测与大规模筛查，但检测成本相对较高，且操作流程需严格规范，避免交叉污染。

免疫层析试纸条技术是目前应用最广泛的生物类快速检测技术，其核心是将抗体固定在试纸条上，通过抗原 - 抗体特异性结合，实现对目标污染物的快速筛查与半定量检测。该技术操作极其简便，无需专业人员，仅需将样品滴加在试纸条上，10-20 分钟即可观察检测结果，适用于现场应急监测与基层监测，可检测水体中的重金属离子、农药残留、病原微生物等污染物。免疫层析试纸条技术具有成本低、便携性强、检测速度快等优势，但检测精度相对较低，主要用于定性或半定量检测，无法满足精准监测的需求，可作为快速筛查手段，后续需结合实验室检测进行精准确认。

微生物快速检测法主要包括纸片法、显色培养基法、ATP 生物发光法等，适

用于水体中病原微生物的快速检测。纸片法通过将微生物培养与显色反应结合，快速判断水体中是否存在目标致病菌，操作简便、成本低廉，适用于基层监测；显色培养基法通过在培养基中加入特异性显色剂，使目标微生物生长后呈现特定颜色，实现对微生物的快速识别与计数，检测时间可缩短至 6-12 小时，较传统培养方法大幅提升；ATP 生物发光法通过检测微生物细胞内的 ATP 含量，间接反映微生物的数量，检测速度快（10-30 分钟），适用于突发水污染事件的应急监测，但检测特异性相对较低，易受水体中其他微生物的干扰。

（二）化学与物理类快速检测技术的应用要点

化学类快速检测技术以化学反应为核心，通过简易的化学试剂与样品反应，产生可观察的颜色变化、沉淀或气体，实现对目标污染物的快速检测，主要包括比色法、滴定法、试纸法等。比色法是最常用的化学类快速检测方法，通过加入特定显色剂，使样品与显色剂发生反应，产生特定颜色，根据颜色深浅判断污染物浓度，适用于水体中 pH 值、COD、氨氮、重金属离子等常规指标的快速检测。该方法操作简便、成本低廉、检测速度快，适用于基层监测与现场快速筛查，但检测精度相对较低，易受水体色度、浊度等因素干扰，需进行简单的样品预处理。

滴定法主要适用于水体中酸、碱、硬度、余氯等指标的快速检测，通过加入标准滴定试剂，直至反应达到终点，根据滴定试剂的用量计算污染物浓度。该方法操作相对简便，检测精度高于比色法，适用于基层监测，但检测速度相对较慢，且需专业人员操作，限制了其在应急监测中的应用。试纸法则通过将试剂固定在试纸上，与样品接触后发生颜色变化，快速判断污染物的存在与大致浓度，适用于水体中 pH 值、余氯、重金属离子等的快速筛查，操作极其简便、便携性强，但检测精度最低，仅能用于定性判断。

物理类快速检测技术以物理性质为核心，通过简易的物理仪器，检测水体的物理性质变化，间接反映污染物浓度，主要包括浊度计法、电导率法、便携式光谱法等。浊度计法通过检测水体的浊度，间接反映水体中悬浮物的含量，操作简便、检测速度快，适用于现场快速监测；电导率法通过检测水体的电导率，间接反映水体中离子含量，可快速判断水体是否受到无机污染，适用于应急监测；便携式光谱法则通过检测水体的光谱特征，快速识别污染物的种类与浓度，检测精度较高，适用于复杂水体的快速监测，但仪器成本相对较高，需专业人员操作。

生物传感与快速检测技术的发展，虽然为水环境监测提供了高效、便捷的技术

术支撑,但在实际应用中仍面临诸多挑战。例如,生物识别元件的稳定性较差,易受环境因素影响而失活,影响检测精度与可靠性;快速检测技术的检测精度普遍低于传统实验室检测方法,难以满足高精度监测的需求;部分快速检测仪器的成本较高,维护难度大,限制了其在基层监测中的普及应用。也有观点指出,随着材料科学、微电子技术、人工智能等领域的不断发展,这些问题将逐步得到解决,生物传感与快速检测技术将向更精准、更稳定、更便携、更低成本的方向发展。

未来,生物传感与快速检测技术的发展将呈现三大趋势:一是生物识别元件的多元化与高性能化,通过基因工程、纳米技术等手段,研发更稳定、更特异、更灵敏的生物识别元件,提升检测性能;二是检测仪器的微型化与智能化,结合微电子技术与人工智能技术,研发便携式、智能化的快速检测仪器,实现检测数据的实时传输与分析;三是多技术融合发展,推动生物传感技术与快速检测技术、在线自动监测技术、遥感技术等融合,构建全方位、多层次的水环境监测体系。此外,还需加强标准体系建设,完善生物传感与快速检测技术的检测标准与质量控制规范,确保检测数据的准确性、代表性与可比性,推动该类技术在水环境监测中的广泛应用,为水污染防治提供更有力的技术支撑。

第三节 在线自动监测系统构建与运行维护

随着水环境监测技术的不断迭代升级,在线自动监测系统已成为水环境监测体系的核心组成部分,逐步替代传统手工采样、实验室分析的监测模式,实现了水环境污染物的实时监测、连续监测和远程监控。相较于传统监测模式,在线自动监测系统具有监测效率高、数据连续性强、响应速度快、人力成本低的显著优势,能够及时捕捉水体污染物浓度的动态变化,精准识别污染异常,为水污染防治、应急处置和决策制定提供高效、精准的数据支撑。在水环境污染形势日益复杂、监测需求不断提升的背景下,在线自动监测系统的构建与规范运行维护,已成为提升水环境监测能力、保障水环境安全的关键举措。已有研究表明,完善的在线自动监测系统能够有效弥补传统监测模式的局限性,实现监测范围的全覆盖和监测数据的实时化,大幅提升水环境监测工作的科学性和实效性。

在线自动监测系统是一个集采样、预处理、检测、数据传输、数据处理、预警报警于一体的综合性监测体系,其核心功能是实现水环境中各类污染物指标的

自动、连续监测，无需人工干预即可完成从样品采集到数据上报的全过程。该系统的构建需结合监测目标、水体类型、污染特征和监测区域的实际情况，遵循系统性、可靠性、适用性和可扩展性的原则，确保系统能够长期稳定运行，满足不同场景下的监测需求。水环境在线自动监测系统的监测指标涵盖理化指标、营养盐指标、有机污染物指标和病原微生物指标等，其中 pH、溶解氧（DO）、化学需氧量（COD）、五日生化需氧量（BOD）、氨氮、总氮、总磷等是常规监测指标，部分重点流域和敏感区域还会根据污染特征，增加重金属、挥发性有机污染物等特色监测指标。

一、在线自动监测系统的构建原则与核心组成

在线自动监测系统的构建并非简单的设备堆砌，而是需要结合监测需求和实际条件，进行科学规划、合理设计，确保系统的稳定性、准确性和实用性。系统性原则要求统筹考虑采样点位、监测指标、设备选型、数据传输、数据处理等各个环节，构建完整的监测体系，实现各环节的协同联动；可靠性原则强调系统设备需具备良好的稳定性和抗干扰能力，能够适应复杂的水环境条件和气候环境，减少故障发生率，确保监测数据的连续性和可靠性；适用性原则要求结合监测区域的水体类型、污染特征和经济条件，选择适配的监测设备和监测方案，避免盲目追求高端设备，实现监测效果与成本的平衡；可扩展性原则则要求系统具备一定的升级空间，能够根据监测需求的变化，灵活增加监测指标、扩展监测范围，适应水环境监测工作的长远发展。

在线自动监测系统的核心组成主要包括采样系统、预处理系统、检测分析系统、数据传输系统、数据处理系统和辅助系统六大模块，各模块相互配合、协同工作，共同完成整个监测过程。采样系统是系统的基础，负责从水体中采集具有代表性的样品，其性能直接影响监测数据的准确性，常用的采样方式包括瞬时采样、连续采样和间歇采样，采样位置需根据监测目标和水体流态进行合理选择，确保采集的样品能够真实反映水体的污染状况。预处理系统主要用于去除样品中的悬浮物、杂质和干扰物质，避免其影响检测结果的准确性，常用的预处理方法包括过滤、沉淀、离心、消解等，不同监测指标的预处理要求不同，需针对性配置预处理设备。

（一）检测分析系统与数据传输系统

检测分析系统是在线自动监测系统的核心，负责对预处理后的样品进行检测分析，实现污染物指标的定量测定，其性能直接决定了监测数据的精准度和灵敏度。根据监测指标的不同，检测分析系统所采用的检测技术和仪器也有所差异，常规理化指标（如 pH、DO、COD 等）主要采用电极法、分光光度法等检测技术，配备相应的在线监测仪器；营养盐指标（如氨氮、总氮、总磷等）多采用在线分光光度法、流动注射分析法等；有机污染物和重金属指标则需采用在线色谱法、原子吸收光谱法等高精度检测技术，配备专用的在线检测仪器。检测分析系统需具备自动校准、自动清洗、故障报警等功能，确保仪器长期稳定运行，减少人为干预。

数据传输系统是实现监测数据远程传输和共享的关键，负责将检测分析系统产生的监测数据实时传输至数据处理中心，其传输方式主要包括有线传输和无线传输两种。有线传输具有传输稳定、抗干扰能力强的优势，适用于监测点位固定、距离较近的场景，常用的有线传输方式包括光纤传输、以太网传输等；无线传输具有灵活性强、布线简便的优势，适用于监测点位分散、距离较远的场景，常用的无线传输方式包括 4G/5G 传输、北斗卫星传输、LoRa 传输等。数据传输过程中需采用加密技术，确保监测数据的安全性和完整性，避免数据丢失、篡改等问题，同时需具备数据断点续传功能，确保数据传输的连续性。

（二）数据处理系统与辅助系统

数据处理系统负责对传输过来的监测数据进行接收、存储、审核、分析和处理，将原始监测数据转化为可用的监测信息，为水环境质量评价和决策制定提供支撑。该系统需具备数据校准、异常数据识别、数据统计分析、报表生成等功能，能够自动识别监测数据中的异常值、缺失值，并进行相应的处理和修正；同时能够根据监测需求，生成日报、周报、月报等各类监测报表，直观反映水体污染状况的变化趋势。数据处理系统还需具备数据共享功能，能够将监测数据同步至环保、水利等相关部门，实现数据互联互通，提升监测数据的利用率。

辅助系统主要包括供电系统、温控系统、防雷系统和安防系统等，是保障在线自动监测系统长期稳定运行的重要支撑。供电系统需为整个系统提供稳定的电力供应，常用的供电方式包括市电供电、太阳能供电和备用电源供电，其中太阳能供电适用于无市电覆盖的偏远监测点位，备用电源则用于应对市电中断等突发

情况，确保系统不中断运行；温控系统用于控制监测设备的运行环境温度，避免高温、低温等极端环境影响设备性能和监测数据的准确性；防雷系统用于保护系统设备免受雷电袭击，防止设备损坏和数据丢失；安防系统则用于保护监测点位和设备的安全，防止设备被盗、被破坏。

在线自动监测系统的构建还需注重采样点位的科学布设，采样点位的选择需遵循代表性、合理性和可行性的原则，结合监测区域的水体功能、污染来源、流态特征等因素，合理确定监测点位的数量和位置。对于河流、湖泊等地表水体，需在源头、中游、下游、支流汇入处、排污口附近等关键位置布设监测点位；对于地下水，需在地下水补给区、径流区、排泄区和污染源附近布设监测点位；对于饮用水水源地，需在水源地入口、出口和关键断面布设监测点位，确保监测数据能够全面、真实地反映水体的污染状况。

二、在线自动监测系统的运行维护与故障处理

在线自动监测系统的稳定运行，离不开规范的运行维护工作。与实验室分析不同，在线自动监测系统长期处于野外复杂环境中，受水质、气候、环境等多种因素影响，设备易出现故障，监测数据易出现偏差，因此，建立完善的运行维护体系，加强日常运行维护和故障处理，是确保系统正常运行、保障监测数据可靠性的关键。部分研究倾向于认为，在线自动监测系统的运行维护质量，直接决定了监测数据的准确性和系统的使用寿命，规范的运行维护能够有效降低设备故障发生率，提升系统运行效率。

（一）日常运行维护要点

日常运行维护是在线自动监测系统运行维护的核心，主要包括设备巡检、试剂更换、校准维护、清洁维护等内容，需制定详细的运行维护计划，明确维护周期、维护内容和维护责任，确保维护工作常态化、规范化。设备巡检需每日进行，重点检查采样系统、检测分析系统、数据传输系统等各模块的运行状态，查看设备是否正常运行、有无异常报警、数据传输是否正常，及时发现并处理设备运行过程中出现的小问题，避免小故障演变成大故障。

试剂更换是确保检测分析系统正常运行的重要环节，在线监测仪器所使用的试剂具有一定的保质期，需定期更换，避免试剂过期影响监测数据的准确性。不同检测仪器的试剂更换周期不同，需根据仪器说明书和实际运行情况合理确定，

更换试剂时需严格遵循操作规范,避免试剂污染和浪费,同时做好试剂更换记录,便于后续追溯。校准维护是保障监测数据准确性的关键,需定期对检测仪器进行校准,包括零点校准、跨度校准和空白校准等,校准周期需根据仪器性能和监测需求确定,一般每周或每月校准一次,校准过程中需使用标准物质,确保校准结果的可靠性,校准完成后需做好校准记录。

清洁维护主要包括采样管路、预处理设备、检测仪器的清洁,避免悬浮物、杂质等附着在设备表面,影响设备性能和监测数据的准确性。采样管路需定期清洗,防止管路堵塞和污染;预处理设备中的过滤器、沉淀池等需定期清理,去除积累的杂质;检测仪器的检测池、电极等需定期清洁,避免污染物附着影响检测精度。清洁维护需按照操作规范进行,避免损坏设备,清洁完成后需进行调试,确保设备正常运行。

（二）常见故障处理与质量控制

在线自动监测系统在运行过程中,难免会出现各类故障,常见的故障主要包括采样故障、检测故障、数据传输故障和供电故障等,需及时进行排查和处理,确保系统尽快恢复正常运行。采样故障主要表现为采样管路堵塞、采样泵故障、样品采集异常等,排查时需先检查采样管路是否有堵塞,清理堵塞物,若采样泵出现故障,需及时维修或更换;检测故障主要表现为监测数据异常、仪器报警、检测结果不准确等,排查时需检查试剂是否过期、仪器是否需要校准、预处理设备是否正常运行,针对具体问题进行处理;数据传输故障主要表现为数据无法传输、数据丢失、数据异常等,排查时需检查数据传输线路、传输设备是否正常,网络是否通畅,及时修复传输故障。

供电故障主要表现为系统断电、设备无法启动等,排查时需检查市电供应是否正常、备用电源是否有效,若市电中断,需及时启动备用电源,确保系统不中断运行,同时联系供电部门修复市电故障。故障处理需遵循“先排查、后处理、再验证”的原则,及时排查故障原因,采取针对性的处理措施,故障处理完成后,需对系统进行调试和验证,确保监测数据恢复正常,同时做好故障处理记录,分析故障原因,避免同类故障再次发生。

在线自动监测系统的运行维护还需注重质量控制,质量控制是保障监测数据可靠性的核心,需贯穿于系统运行的全过程。除了定期校准、试剂更换等日常维护外,还需定期进行比对实验,将在线监测数据与实验室分析数据进行比对,验

证在线监测数据的准确性，若比对结果超出允许误差范围，需及时查找原因并进行调整；同时需加强对监测数据的审核，及时识别异常数据，分析异常原因，对异常数据进行合理处理，避免错误数据影响监测结果的科学性。

也有观点指出，在线自动监测系统的运行维护还需注重人员培训，提升运维人员的专业技能和操作水平。运维人员需熟练掌握系统各模块的工作原理、操作方法和故障处理技巧，能够及时排查和处理各类故障，规范完成日常维护工作；同时需定期参加专业培训，了解最新的监测技术和运维方法，提升运维工作的专业性和规范性。此外，还需建立完善的运维管理制度，明确运维责任，加强对运维工作的监督和考核，确保运维工作落到实处。

随着水环境监测需求的不断提升和监测技术的不断发展，在线自动监测系统正朝着智能化、集成化、高精度的方向发展，系统的构建和运行维护也面临着新的挑战。未来，需进一步优化系统设计，提升设备性能和系统稳定性，完善运行维护体系，加强质量控制，同时结合大数据、人工智能等新技术，实现监测数据的智能化分析和预警，提升水环境监测的智能化水平。在线自动监测系统的规范构建与高效运行维护，不仅能够提升水环境监测能力，为水污染防治提供精准的数据支撑，还能够推动水环境监测工作的数字化、智能化转型，助力生态文明建设和水环境质量持续改善。

第四节 遥感与 GIS 技术在大尺度水环境监测中的应用

随着水环境监测范围扩大，传统现场采样、实验室分析模式耗时费力、成本高、点位有限，难以满足大尺度流域监测需求，无法全面反映水环境动态变化。遥感（RS）与 GIS 技术融合突破时空限制，实现监测宏观化、快速化、可视化与智能化，构建“空-天-地”一体化监测体系，为流域水质评价、污染溯源、预警决策提供支撑。

遥感与 GIS 应用是环境监测发展趋势，也是水环境管理精准化、系统化的重要体现。目前该技术已在长江、黄河、太湖等重点流域广泛应用，显著提升监测效率与覆盖面，推动监测从“点”到“面”、从“静态”到“动态”转变。但其仍存在数据精度、反演模型、多源数据融合等问题，有待进一步优化完善。

一、遥感与 GIS 技术的核心特性及在水环境监测中的适配性

遥感技术是非接触式远距离探测技术，通过传感器接收水体电磁辐射信号，反演水体理化及生物特征，主要分为卫星、航空、无人机遥感三类。卫星遥感覆盖广、适用于大流域；航空遥感分辨率高，适合中小尺度；无人机遥感灵活便捷，多用于应急与局部污染监测。

GIS 技术以地理空间数据为核心，可采集、存储、分析并可视化数据，能整合遥感空间与属性数据，揭示污染空间分布及迁移规律，通过空间分析支撑管控、溯源与评估，与遥感结合形成一体化监测流程。

遥感与 GIS 高度适配大尺度水环境监测，遥感满足大范围快速动态监测，GIS 实现海量数据管理与分析。二者融合不仅是技术互补，更是监测理念创新，推动从被动响应向主动预判转变，支撑流域精准治理。

（一）遥感技术在水环境监测中的核心优势与局限

遥感技术在大尺度水环境监测中的核心优势，首先体现在其宏观覆盖能力上。卫星遥感能够实现对全球或区域尺度水域的全覆盖监测，无需大量现场采样，即可快速获取水体的空间分布、污染状况等宏观信息，大幅降低了大尺度监测的成本与工作量。例如，通过卫星遥感影像，可快速掌握整个流域的水体面积、水质空间分布差异，及时发现大面积的水体污染异常区域，为污染排查提供精准指引。其次，遥感技术具有快速性与动态性，能够按照固定的周期获取监测数据，实现对水环境的动态监测，及时捕捉水质的时空变化规律，为水环境风险预警提供及时的数据支撑。

此外，遥感技术还具有非接触式监测的优势，能够在不破坏水体环境的前提下，实现对水体的远距离监测，尤其适用于偏远地区、危险区域的水环境监测，避免了现场采样可能带来的安全风险与环境干扰。但遥感技术在水环境监测中也存在一定的局限性，其一，遥感数据的空间分辨率与光谱分辨率存在一定限制，对于小范围、低浓度的污染监测，数据精度难以满足要求；其二，遥感反演模型的准确性受天气、水体环境等因素影响较大，云层遮挡、水面悬浮物过多等情况，会影响传感器对电磁辐射信号的接收，导致反演结果出现偏差；其三，遥感技术主要获取水体表面的信息，难以监测水体深层的污染状况，对于底泥污染、水体深层污染物的监测，仍需结合传统监测方法。

（二）GIS 技术在水环境监测中的核心功能与应用价值

GIS 技术在大尺度水环境监测中的核心功能，主要体现在数据管理、空间分析与可视化表达三个方面。数据管理方面，GIS 技术能够整合遥感数据、现场监测数据、水质监测标准、流域地形地貌等多源数据，构建起统一的水环境监测空间数据库，实现对海量数据的有序存储、查询与更新，解决了大尺度监测数据分散、难以管理的问题。通过 GIS 数据库，监测人员可快速调取不同区域、不同时间的监测数据，实现数据的高效利用与共享。

空间分析是 GIS 技术的核心优势，其多种分析功能为大尺度水环境监测提供了重要支撑。空间叠加分析可将水质监测数据与流域地形、土地利用、污染源分布等数据进行叠加，揭示污染源与水质状况的空间关联，为污染溯源提供科学依据；缓冲区分析可围绕河流、湖泊等水体构建缓冲区，分析缓冲区内的土地利用类型、污染源分布对水体质量的影响，为水体保护范围的划定提供支撑；网络分析则可结合流域的水文网络，分析污染物的迁移路径与扩散规律，为污染治理措施的制定提供参考。可视化表达功能则可将监测数据以地图、图表等形式直观呈现，清晰展示水体污染的空间分布、动态变化等信息，便于监测人员与管理人员快速掌握水环境状况，提升决策的直观性与科学性。

GIS 技术的应用价值，不仅体现在监测数据的管理与分析上，更体现在对大尺度水环境管理的支撑作用上。通过 GIS 技术，可构建流域级的水环境监测与管理平台，实现对水环境的全方位、精细化管理，推动水环境管理从“经验型”向“科学型”转变。例如，在流域水环境治理中，通过 GIS 平台可快速定位污染源头，制定针对性的治理措施，同时跟踪治理效果，实现治理过程的动态管控，提升流域水环境治理的效率与质量。

二、遥感与 GIS 技术在大尺度水环境监测中的具体应用场景

遥感与 GIS 技术的融合应用，已广泛渗透到大尺度水环境监测的多个领域，涵盖水质参数反演、水体污染监测、流域生态状况评估、应急监测等多个应用场景，为不同类型的水环境管理需求提供了针对性的技术支撑。这些应用场景的落地，不仅提升了大尺度水环境监测的效率与精度，还为水环境治理决策提供了可靠的数据支撑，推动了大尺度水环境管理的精准化与系统化。

水质参数遥感反演是遥感技术在水环境监测中的核心应用之一，也是大尺度

水质监测的重要手段。通过遥感技术获取水体的光谱信息,结合水质参数与光谱特征的关联关系,构建反演模型,可快速反演得到水体中的叶绿素 a、悬浮物、透明度、化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD)等关键水质参数。已有研究表明,遥感反演技术能够实现对大尺度水域水质参数的快速监测,反演结果的准确性能够满足常规水环境监测的要求,尤其适用于流域级的水质普查与动态监测。例如,在太湖、巢湖等富营养化湖泊的监测中,通过卫星遥感反演技术,可快速获取湖泊中叶绿素 a 的空间分布与浓度变化,及时掌握湖泊富营养化的发展趋势,为富营养化防控提供数据支撑。

水体污染监测是遥感与 GIS 技术融合应用的重要场景,主要包括点源污染、面源污染及突发性污染的监测。点源污染监测方面,通过遥感影像可快速识别水体周边的工业排污口、污水处理厂等污染源,结合 GIS 空间分析功能,分析污染源的分布特征及其对水体的影响范围,为点源污染管控提供依据。面源污染监测方面,通过遥感技术获取流域的土地利用、植被覆盖等信息,结合 GIS 空间分析,评估农业种植、城市径流等面源污染的负荷与分布,为面源污染治理提供针对性的方案。突发性污染监测方面,遥感技术能够快速捕捉突发性污染事件的发生范围、污染程度与扩散趋势,结合 GIS 技术的空间分析功能,模拟污染物的迁移路径,为应急处置决策提供及时、准确的支撑,最大限度降低污染造成的损失。

流域生态状况评估也是遥感与 GIS 技术的重要应用场景之一。大尺度流域的生态状况复杂,传统监测方法难以全面评估流域的生态健康状况,而遥感与 GIS 技术能够快速获取流域的植被覆盖、湿地面积、水体连通性等生态指标,结合生态评估模型,对流域的生态健康状况进行全面评估。例如,通过遥感技术监测流域的植被覆盖度,结合 GIS 空间分析,分析植被覆盖的空间分布与变化趋势,评估流域的生态修复效果;通过监测湿地面积的变化,分析湿地生态系统的退化状况,为湿地保护与修复提供依据。也有观点指出,遥感与 GIS 技术的应用,能够实现对流域生态状况的动态监测与评估,及时发现生态系统存在的问题,为流域生态保护与修复决策提供科学支撑。

应急监测是遥感与 GIS 技术应用的重要补充,主要针对突发性水环境污染事件,如石油泄漏、化学品泄漏等。突发性污染事件具有突发性、扩散快、危害大的特点,传统监测方法难以快速响应,而遥感技术能够在短时间内获取污染事件的相关信息,快速确定污染范围、污染程度与扩散方向;GIS 技术则可结合流域

的水文、地形等数据，模拟污染物的迁移扩散路径，预测污染的影响范围与发展趋势，为应急处置方案的制定、应急资源的调配提供科学依据。例如，在石油泄漏污染事件中，通过卫星遥感或无人机遥感，可快速识别泄漏的石油范围与厚度，结合 GIS 空间分析，模拟石油在水体中的扩散路径，为油污清理、周边水体保护等应急措施的制定提供支撑。

除上述应用场景外，遥感与 GIS 技术还在大尺度水环境规划、水资源管理、跨区域水环境协同治理等方面发挥着重要作用。在水环境规划中，通过遥感与 GIS 技术获取流域的水环境现状与空间分布特征，结合规划目标，制定科学合理的水环境规划方案；在水资源管理中，通过监测水体面积、水量等信息，分析水资源的时空分布与变化趋势，为水资源的合理调配提供依据；在跨区域水环境协同治理中，通过遥感与 GIS 技术实现跨区域监测数据的共享与分析，支撑跨区域的污染联防联控，推动流域水环境质量的整体改善。

三、遥感与 GIS 技术应用的现存问题与优化路径

尽管遥感与 GIS 技术在大尺度水环境监测中具有显著的技术优势，且已得到广泛应用，但在实际应用过程中仍存在诸多问题，制约了技术应用效果的充分发挥。这些问题主要集中在数据精度、反演模型、多源数据融合、技术推广等方面，需结合技术发展与实际应用需求，采取针对性的优化措施，不断提升遥感与 GIS 技术在大尺度水环境监测中的应用水平。

数据精度不足是当前遥感与 GIS 技术应用的主要问题之一。遥感数据的精度受传感器性能、天气条件、水体环境等多种因素影响，对于低浓度污染物、小范围污染的监测，数据精度难以满足要求；同时，不同来源的监测数据（如遥感数据、现场监测数据）存在数据格式不统一、精度不一致等问题，难以实现有效融合，影响了监测数据的综合利用。此外，GIS 数据库的建设不完善，数据更新不及时，也导致监测数据的时效性不足，难以支撑水环境的动态监测与决策。

遥感反演模型的局限性也制约了技术的应用效果。当前，多数遥感反演模型是基于特定区域、特定水体类型构建的，通用性较差，当应用于不同流域、不同水体环境时，反演结果的准确性会大幅下降；同时，反演模型的构建多依赖于大量的现场监测数据，对于监测数据匮乏的区域，模型的构建与优化难度较大。此外，水体中的多种污染物之间存在相互影响，当前的反演模型多针对单一水质参

数,难以实现多参数的同步反演,影响了监测效率与数据的完整性。

技术推广难度大、应用成本高也是当前面临的重要问题。遥感与 GIS 技术属于高技术含量、高投入的技术,其设备采购、数据获取、模型构建、平台建设等均需要大量的资金投入,对于基层监测机构而言,难以承担较高的应用成本,导致技术难以在基层广泛应用。同时,遥感与 GIS 技术的应用需要专业的技术人才,而当前基层监测机构缺乏具备遥感数据处理、GIS 空间分析等专业能力的人才,也制约了技术的推广与应用。

针对上述问题,需采取针对性的优化路径,推动遥感与 GIS 技术在大尺度水环境监测中的高质量应用。首先,加强技术研发,提升数据精度与反演模型的通用性。加大对遥感传感器技术的研发投入,提升传感器的空间分辨率与光谱分辨率,减少天气、水体环境等因素对数据精度的影响;优化遥感反演模型,结合不同流域的水体特征,构建通用性强、准确性高的反演模型,实现多水质参数的同步反演;加强多源数据融合技术的研发,实现遥感数据与现场监测数据、水文数据等多源数据的有效融合,提升数据的综合利用价值。

其次,完善 GIS 数据库建设,提升数据的时效性与共享性。构建统一的大尺度水环境监测 GIS 数据库,规范数据格式与标准,实现监测数据的有序存储与及时更新;建立跨区域、跨部门的数据共享机制,推动监测数据的共享与交换,提升数据的利用率;结合大数据、人工智能等技术,实现对监测数据的智能化分析与处理,提升数据的应用价值。

最后,加强技术推广与人才培养,降低应用成本。加大对基层监测机构的资金支持与技术扶持,推动遥感与 GIS 技术的普及应用;开发低成本、易操作的遥感与 GIS 应用工具,降低技术应用门槛;加强专业人才培养,通过培训、校企合作等方式,提升监测人员的专业技能,为技术应用提供人才支撑。

随着遥感与 GIS 技术的不断发展,以及多学科技术的交叉融合,其在大尺度水环境监测中的应用将更加广泛、深入。未来,通过技术创新、模型优化、人才培养与资金投入,遥感与 GIS 技术将逐步解决当前应用中的突出问题,实现监测精度、效率与智能化水平的显著提升,构建起更加完善的“空-天-地”一体化大尺度水环境监测体系,为流域水环境管理、污染治理与生态保护提供更加强有力的技术支撑,推动水环境监测与治理工作高质量发展。

第七章 水环境质量评价与风险评估

第一节 水环境质量评价标准与指数方法

水环境质量评价是水污染防治、水环境管理的核心环节，其核心目的是通过科学的评价方法，精准掌握水环境质量状况、识别污染隐患、评估治理成效，为水环境管理决策、污染治理方案制定提供科学依据。水环境质量评价并非孤立的技术操作，而是结合监测数据、污染特征、管理需求，通过标准化的评价标准与科学的指数方法，实现对水体质量的定量描述与定性判断的系统性工作。随着我国水环境治理向精细化、精准化转型，对水环境质量评价的科学性、规范性、针对性提出了更高要求，完善的评价标准与高效的指数方法，成为衔接监测数据与管理决策的关键纽带，直接影响污染治理的方向与成效。

水环境质量评价的前提的是建立统一、规范的评价标准，评价标准是衡量水体质量优劣的标尺，也是开展评价工作的核心依据。不同国家、不同地区根据自身的水环境状况、污染特征、管理需求，制定了差异化的评价标准，但核心目标均是保护水体功能、保障生态安全与人类健康。我国的水环境质量评价标准以《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002）为核心，结合饮用水水源地、工业用水、景观用水等不同水体功能，划分不同的水质类别，明确各类水体的污染物限值，为评价工作提供统一的判断依据。

已有研究表明，科学合理的评价标准，能够有效引导污染治理方向，避免治理工作的盲目性。我国地表水环境质量标准将地表水分成Ⅰ类至Ⅴ类，其中Ⅰ类、Ⅱ类水体主要适用于源头水、国家自然保护区，水质最优；Ⅲ类水体适用于集中式生活饮用水地表水源地二级保护区、鱼虾类越冬场等；Ⅳ类水体适用于一般工业用水区、人体非直接接触的娱乐用水区；Ⅴ类水体适用于农业用水区、一般景观要求水域。不同水质类别的污染物限值存在显著差异，如化学需氧量（COD）在Ⅰ类水体中限值为15mg/L，在Ⅴ类水体中限值为40mg/L，这种差异化限值设计，既兼顾了不同水体的功能需求，也体现了污染治理的梯度推进理念。

除了国家统一标准，地方政府可结合区域水环境特征、污染现状，制定地方补充标准，细化污染物限值，提升评价标准的针对性。例如，工业发达地区可针对当地突出的重金属、难降解有机物污染，补充相应的污染物评价指标与限值；水资源短缺地区可结合再生水利用需求，制定再生水水质评价标准，推动水资源循环利用。同时，评价标准并非一成不变，需随着水环境治理要求的提升、污染特征的变化，适时修订完善，确保标准的科学性与适用性。

一、水环境质量评价标准体系的核心构成

我国水环境质量评价标准体系以国家强制性标准为核心，地方补充标准为补充，涵盖地表水环境、地下水环境、饮用水水源地等多个领域，形成了全方位、多层次的标准体系。其中，地表水环境质量评价标准是应用最广泛、最基础的评价依据，不仅明确了各类水体的水质类别与污染物限值，还规定了监测方法、评价方法，为评价工作的规范化开展提供了保障。

地表水环境质量评价标准的核心内容包括水质评价指标、水质类别划分、污染物限值三个方面。水质评价指标涵盖理化指标、营养盐指标、有毒有害指标等，其中理化指标包括 pH 值、溶解氧（DO）、化学需氧量（COD）、五日生化需氧量（BOD₅）等，主要反映水体的基本污染状况；营养盐指标包括氨氮、总氮、总磷等，主要反映水体富营养化程度；有毒有害指标包括重金属、持久性有机污染物等，主要反映水体的潜在风险。不同水质类别的污染物限值呈现梯度差异，水质类别越高，污染物限值越严格，确保高功能水体的水质安全。

（一）国家核心评价标准

《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002）是我国水环境质量评价的核心依据，适用于我国境内所有地表水体（包括河流、湖泊、水库、运河、渠道等）的质量评价。该标准明确了地表水环境质量功能区划分，将地表水环境功能区分为五类，对应不同的水质类别，明确了各类功能区的水质控制目标。同时，标准规定了 109 项污染物指标，其中基本项目 24 项，集中反映水体的基本污染状况；补充项目 5 项，针对特定污染类型；特定项目 80 项，主要针对重金属、持久性有机污染物等有毒有害污染物，适用于污染较严重的水体评价。

该标准不仅规定了各项污染物的限值，还明确了监测方法与评价方法，确保评价工作的规范性与统一性。例如，对于溶解氧、化学需氧量等常规指标，规定

了具体的监测方法与质量控制要求；对于重金属、持久性有机污染物等特殊指标，明确了相应的检测技术与评价流程。此外，标准还对水质评价的方法、数据处理、结果判定等作出了明确规定，为全国范围内的水环境质量评价提供了统一的技术规范，避免了区域间评价标准不统一导致的评价结果不可比问题。

（二）地方补充评价标准

我国地域辽阔，不同区域的水环境特征、污染来源、水体功能存在显著差异，国家统一标准难以完全覆盖所有区域的特殊需求，因此地方补充评价标准成为重要补充。地方补充评价标准需在国家统一标准的基础上，结合区域实际，增加特色评价指标、细化污染物限值，提升评价标准的针对性与适用性。

例如，南方水乡地区湖泊、河流众多，水体富营养化问题突出，地方可补充氮、磷营养盐的细化限值，增加蓝藻毒素等评价指标，针对性反映水体富营养化风险；工业集中地区可针对当地主导产业产生的特征污染物，如化工企业的难降解有机物、重金属，补充相应的评价指标与限值，精准识别工业污染对水环境的影响；北方缺水地区可结合再生水利用需求，制定再生水水质评价标准，明确再生水用于农业灌溉、工业冷却等不同用途的水质要求。部分研究倾向于认为，地方补充标准的制定，应充分结合区域污染特征与管理需求，避免过度细化导致评价成本增加，同时需与国家统一标准衔接，确保评价结果的可比性。

二、水环境质量评价指数方法

水环境质量评价指数方法是将监测数据转化为可量化、可对比的评价结果的核心手段，其核心是通过数学模型，将多个污染物指标的监测数据进行综合处理，得到一个综合评价指数，从而直观反映水体质量状况。与单一指标评价相比，指数方法能够综合考虑多种污染物的协同影响，避免单一指标评价的片面性，更全面、客观地反映水体的整体质量水平。

不同的评价指数方法，其适用场景、计算逻辑、侧重点存在差异，需根据评价目标、水体类型、污染物特征，选择合适的评价方法。常用的水环境质量评价指数方法主要包括单因子指数法、综合污染指数法、内梅罗指数法等，其中单因子指数法操作简便、直观易懂，适用于常规监测中的快速评价；综合污染指数法、内梅罗指数法能够综合考虑多种污染物的影响，适用于全面、系统的水环境质量评价。

（一）单因子指数法

单因子指数法是最基础、最常用的水环境质量评价方法，其核心思路是通过计算单个污染物的污染指数，判断该污染物是否超标，进而确定水体的污染状况。该方法操作简便、计算量小，无需复杂的数学模型，适用于快速评价、常规监测评价等场景，也是其他综合评价方法的基础。

单因子指数法的计算逻辑简单，对于浓度型污染物，其污染指数计算公式为： $P_i = C_i / S_i$ ，其中 P_i 为第 i 种污染物的污染指数， C_i 为第 i 种污染物的实测浓度， S_i 为第 i 种污染物的评价标准限值。当 $P_i \leq 1$ 时，表明该污染物未超标，水体未受到该污染物的明显污染；当 $P_i > 1$ 时，表明该污染物超标， P_i 值越大，污染程度越严重。对于溶解氧等具有上限和下限要求的指标，其污染指数的计算需进行相应调整，避免评价结果失真。

该方法的优势在于直观、简便，能够快速判断单个污染物的污染程度，明确水体的主要污染因子。例如，在常规监测中，通过单因子指数法可快速识别出 COD、氨氮等超标污染物，为污染治理提供针对性方向。但该方法的局限性也较为明显，仅能反映单个污染物的污染状况，无法综合考虑多种污染物的协同影响，难以全面反映水体的整体质量水平，因此通常用于初步评价或重点污染物识别，而非全面的水环境质量评价。

（二）综合污染指数法

综合污染指数法是在单因子指数法的基础上发展而来的，其核心是将多个污染物的单因子指数进行综合计算，得到一个综合污染指数，从而全面反映水体的整体污染状况。该方法能够兼顾多种污染物的影响，弥补了单因子指数法的局限性，适用于全面、系统的水环境质量评价，如流域水环境质量评价、污染治理成效评估等。

综合污染指数的计算方法多样，常用的有算术平均法、加权平均法等。算术平均法是将所有污染物的单因子指数取平均值，得到综合污染指数，计算简便，但未考虑不同污染物的权重差异；加权平均法则根据不同污染物的危害程度、影响范围，赋予不同的权重，再计算加权平均值，更具科学性与针对性。例如，对于重金属、持久性有机污染物等毒性较强的污染物，赋予较高的权重；对于常规理化指标，赋予较低的权重，确保评价结果更贴合实际污染危害。

相关研究指出，综合污染指数法的关键在于权重的确定，权重分配是否合理，

直接影响评价结果的准确性。权重的确定需结合污染物的毒性、危害程度、超标频率等因素，通过专家咨询、数据统计等方式确定，避免主观臆断。例如，在工业污染严重的区域，可适当提高重金属、难降解有机物的权重；在农业面源污染突出的区域，可提高氮、磷营养盐的权重，使评价结果更符合区域污染特征。

（三）内梅罗指数法

内梅罗指数法是一种兼顾污染物平均水平与最大污染程度的综合评价方法，其核心是不仅考虑所有污染物的平均污染水平，还重点突出超标最严重的污染物的影响，能够更客观、全面地反映水体的污染状况，适用于水质波动较大、污染物浓度差异明显的水体评价。

内梅罗指数的计算分为两步，首先计算各污染物的单因子指数，然后计算内梅罗指数，计算公式为： $P = \sqrt{[(P_{\max}^2 + P_{\text{ave}}^2)/2]}$ ，其中 P 为内梅罗指数， $P_{\max}$ 为所有单因子指数中的最大值， P_{ave} 为所有单因子指数的平均值。该方法通过平方和开根号的方式，放大了最大污染因子的影响，避免了因平均化导致的严重污染被掩盖的问题，能够更精准地反映水体的污染短板。

例如，某水体中多数污染物的单因子指数均小于 1，但某一种重金属污染物的单因子指数达到 3.0，此时通过内梅罗指数计算，能够突出该重金属污染物的严重污染，避免因平均化计算导致评价结果偏轻。该方法的局限性在于，对最大污染因子的权重过高，可能导致评价结果过于保守，因此在实际应用中，需结合水体的实际污染状况，合理判断评价结果的合理性，必要时结合其他评价方法进行补充。

三、评价标准与指数方法的应用要点

水环境质量评价标准与指数方法的应用，需结合区域水环境特征、评价目标，灵活选择合适的标准与方法，避免机械套用，确保评价结果科学、准确、实用。首先，需明确评价目标，不同的评价目标对应不同的评价标准与方法，例如，饮用水水源地评价需采用更严格的评价标准，重点关注有毒有害污染物，选择能够精准反映水质安全性的指数方法；而农业灌溉用水评价，则可适当放宽标准，选择操作简便的评价方法。

其次，需确保监测数据的准确性与可靠性，评价标准与指数方法的应用，依赖于规范的监测数据，若监测数据存在误差、缺失，会直接影响评价结果的科学

性。因此，在开展评价工作前，需对监测数据进行审核，剔除异常数据，补充缺失数据，确保监测数据的完整性、准确性。同时，需结合区域污染特征，合理选择评价指标，避免指标选择过多导致评价复杂，或指标选择过少导致评价片面。

也有观点指出，评价标准与指数方法的应用，需注重与实际管理需求结合，避免为了评价而评价。例如，在污染治理成效评估中，需结合治理前后的监测数据，通过同一评价标准与指数方法，对比分析治理成效，确保评价结果具有可比性；在流域水环境管理中，需结合不同河段的污染特征，采用差异化的评价标准与方法，精准识别污染重点区域，为针对性治理提供依据。

此外，需注意评价标准与指数方法的协同应用，评价标准是评价的依据，指数方法是评价的手段，两者缺一不可。例如，采用综合污染指数法评价时，需严格按照评价标准确定污染物限值，确保计算出的指数能够真实反映水体质量与标准的差距；在评价标准修订后，需及时调整指数方法的计算参数，确保评价结果与新的标准要求相匹配。

随着水环境治理的不断深入，水环境质量评价标准与指数方法也在不断优化完善。未来，需结合新型污染物的出现、水环境功能的调整，补充完善评价标准，增加新型污染物的评价指标与限值；同时，推动评价指数方法的创新，结合大数据、人工智能等技术，优化指数计算模型，提升评价的精准度与效率，实现评价工作的智能化、精细化。通过科学的评价标准与指数方法，全面、客观地反映水环境质量状况，为水污染防治、水环境管理提供更有力的支撑，推动水环境质量持续改善。

第二节 水污染生态风险评价模型与应用

随着工业化、城市化进程的持续推进，各类污染物通过点源、非点源等途径持续输入水环境，不仅破坏水体理化性质、降低水环境质量，更对水体生态系统结构与功能造成不可逆影响，引发一系列生态风险问题。水污染生态风险评价作为水环境管理与污染防控的核心技术手段，通过识别水环境中潜在的污染物风险源、分析污染物的环境行为与生态效应，量化风险发生的概率与危害程度，为水环境生态保护决策、污染防控措施制定提供科学依据。不同于水环境质量评价侧重“现状描述”，水污染生态风险评价更注重“风险预判”与“影响分析”，聚

焦污染物对水生生物、生态系统及人类健康的潜在危害，实现从“被动治理”向“主动防控”的转变。已有研究表明，科学的水污染生态风险评价能够提前识别水体生态系统的脆弱点，精准定位高风险区域与关键污染物，使污染防治措施更具针对性，有效降低生态风险发生的概率与损失。

水污染生态风险评价是一项复杂的系统性工作，涉及环境科学、生态学、毒理学、数学等多学科理论与方法，其核心是构建科学合理的评价模型，实现对生态风险的精准量化与科学评估。评价模型作为生态风险评价的核心载体，需结合污染物类型、水体特征、生态系统结构等实际情况进行构建与优化，既要能够准确反映污染物的迁移转化规律，也要能够量化污染物对生态系统的影响程度。当前，水污染生态风险评价模型已形成多元化发展格局，不同模型的适用场景、计算精度、操作难度存在显著差异，需根据评价目的、数据可得性等因素进行针对性选型。值得注意的是，生态风险评价并非简单的模型计算，还需结合现场监测数据、生态调查结果，对模型参数进行校准与验证，确保评价结果的科学性、可靠性与实用性。部分研究倾向于认为，单一模型难以全面覆盖复杂水环境的生态风险特征，多模型耦合应用将成为未来水污染生态风险评价的主流方向。

一、水污染生态风险评价的核心框架与模型分类

水污染生态风险评价的核心框架可概括为“风险识别 - 暴露评价 - 效应评价 - 风险表征”四个核心环节，四个环节层层递进、相互关联，构成完整的生态风险评价体系。风险识别是评价工作的基础，核心是明确水环境中的风险源、目标受体与风险终点，识别可能对水体生态系统造成危害的污染物，明确污染物的来源、迁移路径及潜在影响；暴露评价是量化风险的关键，通过分析污染物在水环境中的迁移转化规律，计算目标受体暴露于污染物的浓度与时间，明确暴露水平；效应评价则聚焦污染物对目标受体的生态毒性效应，分析污染物浓度与生态效应之间的剂量 - 效应关系，确定污染物的毒性阈值；风险表征是评价工作的核心输出，通过整合暴露评价与效应评价结果，量化风险发生的概率与危害程度，明确风险等级，提出风险管控建议。

基于评价原理、适用范围及计算方法的差异，水污染生态风险评价模型可分为确定性模型与概率性模型两大类，两类模型各有优势与局限性，适用于不同的评价场景。确定性模型以固定参数、固定公式为核心，通过代入监测数据进行计

算, 输出确定的风险评价结果, 具有操作简便、计算速度快、易于理解等优势, 适用于初步风险筛查、区域生态风险的快速评估; 概率性模型则考虑了评价过程中各类参数的不确定性 (如监测数据误差、参数取值差异等), 通过概率分布函数描述参数的不确定性, 输出风险发生的概率分布, 能够更真实地反映实际生态风险状况, 适用于高精度、精细化的生态风险评价, 但操作复杂、计算量大, 对数据质量与专业水平要求较高。

(一) 确定性生态风险评价模型及特点

确定性生态风险评价模型是应用最广泛的一类评价模型, 其核心特点是参数取值固定, 计算过程简单, 能够快速输出明确的风险评价结果, 无需复杂的概率分析。常用的确定性模型主要包括商值法、暴露 - 效应关系模型等, 其中商值法是最基础、最常用的模型, 适用于各类水体、各类污染物的初步风险评价。商值法的核心原理是通过计算暴露浓度与毒性阈值的比值 (风险商 RQ), 判断污染物的生态风险等级——当 $RQ < 1$ 时, 表明污染物对目标受体无明显生态风险; 当 $1 \leq RQ < 10$ 时, 表明存在中等生态风险; 当 $RQ \geq 10$ 时, 表明存在高生态风险。

商值法的应用关键是准确获取暴露浓度与毒性阈值两个核心参数。暴露浓度可通过现场监测数据直接获取, 也可通过简单的迁移转化模型计算得到; 毒性阈值则需结合目标受体的类型 (如藻类、无脊椎动物、鱼类等), 参考相关毒理学数据确定, 常用的毒性阈值包括半数致死浓度 (LC_{50})、半数效应浓度 (EC_{50})、无观察效应浓度 ($NOEC$) 等。商值法操作简便、成本低廉, 能够快速完成生态风险的初步筛查, 广泛应用于地表水、地下水、工业废水排放口等区域的生态风险评估, 但该模型未考虑参数的不确定性, 评价结果的精准度相对较低, 难以反映复杂水环境的生态风险特征, 仅适用于初步评价, 后续需结合其他模型进行精细化评估。

暴露 - 效应关系模型是确定性模型的重要分支, 其核心是通过构建污染物暴露浓度与生态效应之间的定量关系, 量化污染物对生态系统的影响程度。该模型需基于大量的毒理学实验数据, 拟合暴露浓度与生态效应 (如生物死亡率、生长抑制率、繁殖抑制率等) 之间的剂量 - 效应曲线, 进而根据实际暴露浓度, 预测污染物对目标受体的生态效应。暴露 - 效应关系模型能够更精准地反映污染物的生态毒性, 适用于单一污染物、单一目标受体的生态风险评价, 如重金属离子对

鱼类的毒性风险评价、有机污染物对藻类的生长抑制风险评价等。但该模型的构建需要大量的毒理学数据支撑，且难以考虑多种污染物的联合毒性效应，限制了其在复杂污染场景中的应用。

（二）概率性生态风险评价模型及应用场景

概率性生态风险评价模型以不确定性分析为核心，通过考虑评价过程中各类参数的随机性与不确定性，采用概率分布函数描述参数的取值范围，进而通过蒙特卡洛模拟、拉丁超立方抽样等方法，计算风险发生的概率分布，能够更真实、全面地反映实际生态风险状况。常用的概率性模型主要包括蒙特卡洛模拟模型、概率密度函数模型等，其中蒙特卡洛模拟模型是应用最广泛的概率性模型，适用于复杂水环境、多污染物、多目标受体的精细化生态风险评价。

蒙特卡洛模拟模型的核心原理是通过随机抽样的方式，从各参数的概率分布中抽取大量样本，代入确定性模型进行反复计算，得到大量的风险评价结果，进而通过统计分析，得到风险发生的概率、风险等级的分布情况，以及各类参数对风险评价结果的影响程度。该模型能够有效量化监测数据误差、参数取值差异等不确定性因素对评价结果的影响，使风险评价结果更具科学性与可靠性，适用于饮用水源地、生态敏感区等对风险评价精度要求较高的区域。例如，在饮用水源地生态风险评价中，通过蒙特卡洛模拟模型，可量化重金属离子、持久性有机污染物等多种污染物的联合生态风险，明确高风险发生的概率与影响范围，为饮用水源地保护提供精准支撑。

概率密度函数模型则通过构建污染物暴露浓度、毒性阈值等参数的概率密度函数，描述参数的分布特征，进而通过积分计算，得到风险发生的概率。该模型操作相对简便，无需复杂的模拟计算，适用于参数分布特征明确的生态风险评价，但对参数分布数据的要求较高，需通过大量监测数据与毒理学数据，确定参数的概率分布类型（如正态分布、对数正态分布等），否则会影响评价结果的准确性。部分研究指出，概率性生态风险评价模型的评价结果，比确定性模型更接近实际生态风险状况，能够为水环境管理提供更精准的决策依据，但该类模型操作复杂、计算量大，对数据质量与专业技术人员的技术水平要求较高，限制了其在基层监测与快速评价中的应用。

二、水污染生态风险评价模型的实践应用与优化

水污染生态风险评价模型的应用,需结合评价区域的水体特征、污染物类型、生态系统现状等实际情况,明确评价目的与评价范围,选择合适的评价模型,规范评价流程,确保评价结果的科学性与实用性。当前,生态风险评价模型已广泛应用于地表水、地下水、近岸海域、生态敏感区等各类区域的水污染生态风险评估,为水环境生态保护、污染防治措施制定提供了重要支撑。不同区域的水环境特征与污染状况存在差异,评价模型的应用重点与参数设置也需进行针对性调整,避免“一刀切”的评价模式。

(一) 不同类型水体的模型应用实践

地表水生态风险评价中,由于地表水流动性强、污染物迁移转化速度快,且生态系统结构复杂(包含藻类、无脊椎动物、鱼类等多种生物),需选择能够反映污染物迁移转化规律与多目标受体联合风险的评价模型。对于河流、湖泊等常规地表水,可采用商值法进行初步风险筛查,识别高风险污染物与高风险区域,再结合蒙特卡洛模拟模型进行精细化评价,量化风险发生的概率与危害程度。例如,在湖泊富营养化生态风险评价中,可通过商值法初步判断氮、磷营养盐及蓝藻毒素的生态风险等级,再通过蒙特卡洛模拟模型,考虑营养盐浓度、水文条件、气象因素等参数的不确定性,量化富营养化引发的生态风险,为湖泊生态修复与污染防治提供依据。

地下水生态风险评价中,由于地下水流动性弱、污染物迁移速度慢,且污染物易在含水层中积累,需重点考虑污染物的淋溶迁移规律与对地下水生态系统及人类健康的潜在影响。常用的评价模型包括暴露-效应关系模型与概率密度函数模型,通过计算污染物在地下水中的暴露浓度,结合地下水生态系统的敏感点(如地下水依赖型植被、底栖生物),量化污染物的生态风险。例如,在工业场地地下水重金属污染风险评价中,可通过构建暴露-效应关系模型,分析重金属离子对地下水底栖生物的毒性效应,结合概率密度函数模型,量化重金属污染的生态风险,为地下水污染修复与风险管控提供技术支撑。

近岸海域生态风险评价中,由于受海水潮汐、洋流等因素影响,污染物迁移转化复杂,且生态系统敏感(如珊瑚礁、红树林、浮游生物群落),需选择能够适应海水环境、考虑多种污染物联合效应的评价模型。蒙特卡洛模拟模型在近岸

海域生态风险评价中应用广泛，通过考虑海水盐度、温度、潮汐等参数的不确定性，量化石油类、重金属、持久性有机污染物等多种污染物的联合生态风险，明确风险对近岸海域生态系统的影响范围与程度。相关研究指出，近岸海域生态风险评价中，多模型耦合应用（如商值法 + 蒙特卡洛模拟模型）能够兼顾评价效率与评价精度，是未来的主要应用方向。

（二）评价模型的优化路径与应用难点

当前，水污染生态风险评价模型在应用过程中仍面临诸多难点，制约了评价结果的精准度与实用性。一是参数不确定性问题突出，由于监测数据误差、毒理学数据缺乏、参数取值主观性强等原因，导致评价模型的参数设置存在偏差，影响评价结果的准确性；二是多种污染物联合毒性效应难以量化，实际水环境中往往存在多种污染物共存的情况，污染物之间的协同、拮抗作用复杂，现有模型难以全面、准确地量化联合生态风险；三是生态效应的长期影响难以预测，现有模型多聚焦于污染物的短期生态效应，对长期暴露引发的生态系统不可逆损伤的预测能力不足。

针对上述难点，需从参数校准、模型改进、数据支撑三个方面，推进水污染生态风险评价模型的优化。在参数校准方面，需加强现场监测与毒理学研究，积累大量精准的监测数据与毒理学数据，建立参数数据库，通过现场验证与模型反演，优化参数取值，降低参数不确定性带来的影响；在模型改进方面，需推动多模型耦合应用，结合确定性模型与概率性模型的优势，构建能够反映污染物迁移转化规律、多种污染物联合效应、长期生态影响的综合评价模型，提升模型的适用性与精准度。例如，将污染物迁移转化模型与生态风险评价模型耦合，能够更准确地计算污染物的暴露浓度，提升风险评价的精准度。

在数据支撑方面，需加强跨学科合作，整合环境监测、生态调查、毒理学实验等多方面数据，建立一体化的生态风险评价数据库，为模型构建与参数校准提供支撑。同时，需结合人工智能、大数据等现代技术，优化模型的计算效率与预测能力，实现对生态风险的实时监测与动态评价。也有观点指出，生态风险评价模型的优化，还需结合评价区域的生态特征，构建个性化的评价模型，避免模型的通用性与区域特殊性脱节，确保评价结果能够真正为区域水环境管理提供支撑。

水污染生态风险评价模型的应用，还需注重与水环境管理政策、污染防治措施的衔接，将评价结果转化为可操作的风险管控措施，实现“评价 - 管控 - 反馈”

的闭环管理。例如，针对评价识别出的高风险区域与高风险污染物，制定针对性的污染防治措施，如加强污染物排放管控、推进污染修复、建立生态预警机制等；同时，定期开展生态风险回顾性评价，根据污染防治效果与水环境变化情况，调整评价模型参数与风险管控措施，确保风险管控的有效性。

未来，随着水环境管理需求的不断升级，水污染生态风险评价模型将向更精准、更全面、更智能的方向发展。一方面，将进一步加强多学科融合，结合环境科学、生态学、数学、人工智能等领域的新技术、新方法，优化模型结构，提升模型对复杂水环境生态风险的量化与预测能力；另一方面，将推动生态风险评价模型的标准化与规范化，完善评价标准与技术规范，统一模型参数设置与评价流程，确保不同区域、不同类型水体的生态风险评价结果具有可比性。此外，还需加强基层技术人员的专业培训，推广简易、高效的生态风险评价模型，提升基层水环境生态风险评价与管控能力，为水污染防治与水环境生态保护提供更有力的技术支撑。

第三节 健康风险评估与饮用水安全评价

水环境中的污染物通过饮水、皮肤接触、呼吸等多种途径进入人体，长期暴露会对人体健康产生潜在危害，甚至引发慢性疾病或急性中毒事件，这种危害在人口密集、饮用水源污染风险较高的区域表现得更为突出。健康风险评估作为衔接水环境监测数据与人体健康保护的核心环节，其核心价值在于将污染物的浓度水平转化为可量化、可理解的健康风险指标，为饮用水安全管理提供科学、精准的决策依据。已有研究表明，饮用水中微量污染物的长期累积暴露，其健康影响往往具有滞后性和隐蔽性，短期内难以被察觉，这也使得健康风险评估成为饮用水安全保障体系中不可或缺的重要组成部分，与水环境质量评价形成互补，共同构成水环境管理的双重支撑，为饮用水安全筑牢防线。

健康风险评估的核心框架围绕“暴露 - 效应”关系展开，其基本流程涵盖暴露评估、危害识别、剂量 - 反应关系评估以及风险表征四个关键环节，这一框架经过多年实践完善，已被广泛应用于全球饮用水安全管理实践中，成为各国开展饮用水健康风险防控的核心技术体系。与水环境质量评价侧重污染物浓度是否达标不同，健康风险评估更关注污染物对特定人群（如婴幼儿、老年人、孕妇）的

差异化影响，强调风险的量化与分级，而非简单的合格与否判断。需要明确的是，健康风险评估并非绝对的“风险判定工具”，其结果受到监测数据精度、暴露参数设定、剂量-反应模型选择等多种因素的影响，具有一定的不确定性，但这种不确定性通过科学的参数校准和模型验证，可控制在可接受范围内，并不会影响其指导实际饮用水安全管理工作的价值。

一、饮用水健康风险评估的核心环节与技术要点

危害识别是健康风险评估的首要步骤，也是后续所有评估工作的基础，其核心任务是明确饮用水中各类污染物对人体健康的潜在危害类型，精准区分致癌性污染物与非致癌性污染物，为后续的暴露评估、剂量-反应关系评估奠定坚实基础。其中，致癌性污染物主要包括重金属（如砷、铬、铅）、持久性有机污染物（如多环芳烃、多氯联苯）等，这类污染物的健康影响具有显著的累积性，长期低剂量暴露可能逐步增加人体患癌风险，且这种风险一旦形成，往往难以逆转；非致癌性污染物则主要包括常规理化指标（如氟化物、硝酸盐）、病原微生物等，其危害多表现为急性或慢性中毒症状，如氟斑牙、消化系统不适、肠道感染等，对人体健康的影响相对直接且可通过干预得到缓解。

部分研究倾向于认为，危害识别不能仅依据污染物浓度进行简单判断，还应结合污染物的环境行为与人体代谢特征，全面考量污染物在水体中的迁移转化规律以及进入人体后的代谢路径。例如，同样浓度的砷，不同价态（三价砷、五价砷）的毒性差异显著，三价砷的毒性远高于五价砷，且更易在人体组织中累积，因此在危害识别中需明确污染物的具体形态，而非单纯以总砷浓度作为评估依据。此外，危害识别还需重点考虑污染物的联合作用，饮用水中多种污染物往往并非单独存在，而是以复合污染的形式共存，这种情况下可能产生协同毒性效应，其联合危害往往大于单一污染物的独立危害，这一点在工业废水排放集中、水环境复杂的场景中尤为重要，也是当前健康风险评估领域亟待深入研究的重点和难点之一。

（一）暴露评估的参数设定与方法优化

暴露评估是健康风险评估的核心环节，直接决定了后续风险评估结果的精准度，其核心目的是量化人体通过饮用水摄入的污染物剂量，明确暴露途径、暴露时长与暴露人群特征，为后续剂量-反应关系评估提供可靠数据支撑。暴露剂量

的计算需结合饮用水摄入量、污染物浓度、暴露频率、暴露持续时间等关键参数，其中饮用水摄入量是影响暴露剂量的最主要因素，且存在明显的人群差异和个体差异。一般而言，成年人每日饮用水摄入量约为 2-3L，而婴幼儿由于身体发育尚未成熟，每日饮用水摄入量按体重比例计算远高于成年人，因此婴幼儿成为饮用水健康风险的敏感人群，在评估过程中需单独设定针对性的暴露参数，确保评估结果的合理性。

暴露评估的方法主要包括点估计法与概率估计法两种，两种方法各有优劣，适用于不同的评估场景。点估计法操作简便、计算量小，通过代入固定的参数值计算暴露剂量，适用于初步风险筛查、大范围快速评估等场景；概率估计法则通过引入参数的概率分布，充分考虑参数的不确定性和变异性，计算不同风险水平的概率分布，评估结果更具科学性和准确性，但对监测数据量和计算能力要求较高，操作相对复杂。相关研究指出，随着环境监测技术的不断提升，长期连续监测数据的获取变得更加便捷，概率估计法的应用范围也逐渐扩大，尤其是在饮用水源地、集中式供水系统等关键场景的风险评估中，通过结合长期监测数据，可有效提升暴露评估的精准度，为饮用水安全风险决策提供更可靠的支撑。

需要注意的是，暴露评估的参数设定不能脱离实际情况，需结合区域人口特征、饮水习惯、气候条件等具体因素，避免照搬通用参数导致评估结果出现偏差，影响风险决策的科学性。例如，在农村地区，居民多饮用地下水或自建水源，其饮用水摄入量、饮水方式可能与城市居民存在明显差异；而在高温、干旱地区，居民日常饮水量明显高于寒冷、湿润地区，这些区域差异均需在参数设定中予以充分考虑，通过实地调研、数据统计等方式优化参数，确保评估结果的针对性和实用性。

（二）剂量 - 反应关系与风险表征的实践应用

剂量 - 反应关系评估是连接暴露剂量与健康危害的关键环节，也是健康风险评估的核心技术难点之一，其核心是通过动物实验、流行病学调查、体外试验等多种方式，建立污染物暴露剂量与人体健康效应之间的量化关系，明确不同剂量水平下污染物对人体健康的影响程度。对于致癌性污染物，通常采用致癌斜率因子（CSF）描述剂量 - 反应关系，斜率因子越大，表明污染物的致癌风险越高，人体暴露于该污染物后患癌的概率也越大；对于非致癌性污染物，则采用参考剂量（RfD）作为评估标准，当人体暴露剂量低于参考剂量时，认为其对人体健康

的风险可忽略不计，无需采取额外的控制措施。

也有观点指出，剂量 - 反应关系的建立存在一定的局限性，受多种因素影响，例如动物实验结果向人体的外推过程中，由于物种差异可能导致模型偏差，流行病学调查中存在的混杂因素（如饮食、生活习惯等）也可能影响剂量 - 反应模型的准确性。因此，在实际应用中，不能直接套用通用的剂量 - 反应模型，需结合区域污染物暴露特征、人群健康状况等实际情况，对剂量 - 反应模型进行适当修正，减少模型误差，提升评估结果的可靠性。风险表征则是将暴露评估与剂量 - 反应关系评估的结果相结合，通过科学计算得出人体面临的健康风险值，明确风险等级，并结合国际通用的风险可接受标准，判断当前饮用水水质是否存在健康风险，进而提出针对性的风险控制建议和干预措施。

健康风险值的计算需严格区分致癌风险与非致癌风险，两种风险的评估标准和计算方法存在明显差异，不能混淆。其中，致癌风险通常以终身超额患癌概率表示，国际上普遍采用的可接受风险水平为 10^{-6} - 10^{-4} ，即每 100 万至 10 万人中，因长期饮用该水源水而增加的患癌人数不超过 1 人，这一标准已被多数国家纳入饮用水安全管理规范中；非致癌风险则以危害商（HQ）表示，当 $HQ < 1$ 时，认为非致癌风险处于可接受范围，不会对人体健康造成明显危害；当 $HQ \geq 1$ 时，表明存在非致癌健康风险，需及时采取控制措施降低污染物浓度，直至风险降至可接受水平。

二、饮用水安全评价的核心维度与实践路径

饮用水安全评价是健康风险评估的延伸与落地，是将风险评估结果转化为实际安全保障行动的关键环节，其核心目标是结合健康风险评估结果、国家现行饮用水水质标准，对饮用水的安全性进行全面、系统的判断，明确饮用水安全存在的短板和薄弱环节，提出针对性的安全保障措施。与健康风险评估侧重“风险量化”不同，饮用水安全评价更注重“安全达标”与“风险可控”的双重目标，既要满足现行饮用水水质标准的各项指标要求，确保饮用水水质符合安全底线，也要确保饮用水对人体健康的潜在风险处于可接受范围，实现水质达标与健康保障的有机统一。

饮用水安全评价的核心维度包括水质达标评价、健康风险可控性评价、供水系统可靠性评价三个方面，三者相互关联、缺一不可，共同构成饮用水安全评价

的完整体系。其中,水质达标评价是基础前提,主要依据《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022),对饮用水中的常规指标、非常规指标进行全面、系统的检测,逐一判断各项指标是否符合标准要求,排查水质超标隐患;健康风险可控性评价则是在健康风险评估的基础上,判断当前饮用水的健康风险是否处于可接受范围,若存在风险,需明确风险来源、影响范围与控制路径,为风险防控提供方向;供水系统可靠性评价则关注饮用水从水源地到用户终端的全过程,涵盖水源保护、水处理、输配水、终端供水等各个环节,判断供水系统是否能够稳定、持续地提供安全饮用水,避免因系统故障、管理不当导致饮用水安全问题。

在饮用水安全评价实践中,需注重“常规监测”与“风险筛查”相结合,构建全方位、多层次的评价体系,既要守住水质达标的底线,也要防范潜在的健康风险。常规监测主要针对饮用水中的常规指标,通过定期、定点检测确保水质持续达标,这是饮用水安全评价的基础工作;风险筛查则针对新兴污染物、微量污染物,结合健康风险评估结果,重点筛查具有潜在健康风险但未被纳入常规监测的污染物,及时发现饮用水安全隐患,弥补常规监测的不足。已有研究表明,随着工业技术的快速发展和人类生产生活方式的变化,饮用水中新兴污染物(如药品和个人护理品、微塑料、新型阻燃剂等)的检出率逐渐升高,这类污染物的健康影响尚未完全明确,潜在风险不容忽视,因此在饮用水安全评价中,需将这类污染物纳入风险筛查范围,开展针对性监测与评估,填补常规监测的空白,提升饮用水安全评价的全面性。

饮用水安全评价还需充分考虑不同供水场景的差异化需求,结合各类供水场景的特点,制定针对性的评价标准和评价重点,避免“一刀切”的评价模式。城市集中式供水系统完善,水处理工艺成熟,水质稳定性较高,其安全评价重点在于供水系统的日常运行维护、水质持续达标情况以及应急处置能力;农村分散式供水(如地下水、山泉水、地表水自取)水源分散、水处理工艺简单,水质波动较大,受外界环境影响明显,其安全评价重点在于水源保护、简易水处理技术的应用效果,以及健康风险的防控措施落实情况。此外,应急供水场景(如自然灾害后的临时供水、供水系统故障后的应急供水)的安全评价也需单独考虑,重点关注病原微生物污染、重金属污染等急性风险,快速排查安全隐患,确保应急供水的安全性和可靠性,保障受灾群众和受影响居民的饮水安全。

需要强调的是,饮用水安全评价并非一成不变的静态评价,而是需要结合水

质标准的更新、监测技术的发展、健康风险研究的深入，不断优化评价指标与评价方法，实现动态调整、持续完善。例如，《生活饮用水卫生标准》（GB 5749-2022）在原有标准基础上新增了多项非常规指标，进一步严格了部分指标的限值要求，相应的饮用水安全评价也需及时将这些新增指标纳入评价范围，调整评价标准；而生物传感、在线监测、质谱分析等新技术的应用，可实现饮用水水质的实时监测、精准检测，为饮用水安全评价提供更及时、更精准的数据支撑，有效提升评价的时效性与科学性，更好地适应饮用水安全防控的新形势、新需求。

健康风险评估与饮用水安全评价的深度融合，是水环境管理从“水质达标”向“健康保障”转变的重要体现，也是新时代饮用水安全管理的必然要求。两者相辅相成、辩证统一，健康风险评估为饮用水安全评价提供了科学的风险依据，打破了单纯依据水质标准评价的局限性，让安全评价更贴合人体健康需求；饮用水安全评价则将健康风险评估结果转化为具体的安全保障措施，推动风险防控落地见效，实现风险评估与实际管理的有机衔接。在实际工作中，需将两者纳入水环境综合管理体系，结合流域水环境质量评价、水源地保护、水处理工艺优化等工作，构建全方位、多层次、常态化的饮用水安全保障体系，切实保障人民群众的饮水安全和身体健康。

第四节 基于监测数据的流域水环境承载力分析

流域水环境承载力是衡量流域水环境系统对人类社会经济活动支撑能力的核心指标，也是流域水环境管理与可持续发展决策的重要依据。随着我国流域社会经济快速发展，人口增长、工业扩张与农业生产加剧，流域水资源开发强度提升、污染负荷增加，部分流域水环境已接近或超过承载阈值，出现水质恶化、水资源短缺等问题，制约流域可持续发展。监测数据作为流域水环境状况的直接反映，是开展承载力分析的核心支撑，基于监测数据可精准量化流域水环境承载能力、状态及剩余容量，为分区分管、污染治理、水资源配置提供科学依据，推动经济发展与水环境保护协同。

当前，流域水环境承载力分析已成为水环境管理的研究热点与实践重点，其科学性、精准性高度依赖监测数据的质量与完整性。与单一水质评价或水资源核算不同，承载力分析需整合多类型监测数据，结合流域自然与社会经济特征，构

建科学分析体系。相关研究指出，监测数据的准确性、时效性直接决定分析结果可靠性，数据失真、缺失会误导决策。但实际中，部分流域监测网络不合理、指标不全面、数据共享不足等问题，仍制约分析工作开展，需优化监测体系提升分析精度。

一、流域水环境承载力的核心内涵与分析框架

流域水环境承载力的核心内涵，是特定自然地理与生态背景下，水环境系统承受人类活动污染负荷与水资源消耗，同时维持自身生态功能、保障水资源可持续利用的最大能力，具有综合性、动态性、区域性特征。综合性要求统筹水质、水量、生态等多维度；动态性体现为承载力随自然条件、人类干预及治理措施动态变化；区域性则要求结合流域实际开展针对性分析。

基于监测数据的承载力分析，需构建“数据支撑 - 指标构建 - 模型核算 - 状态研判 - 对策优化”的完整框架。监测数据支撑是基础，需整合各类监测数据形成基础数据库；指标体系构建是核心，需筛选关键指标并明确核算方法；模型核算是主要手段，用于量化承载能力与剩余容量；状态研判明确承载状态；对策优化则针对性提出管控措施，提升承载力。

流域水环境承载力分析的核心前提，是明确监测数据的筛选与整合原则。并非所有监测数据都适用于承载力分析，需优先选择具有代表性、准确性、时效性的监测数据，剔除异常数据与无效数据，确保数据质量。同时，需实现不同类型监测数据的协同整合，例如将水质监测数据与污染源监测数据结合，分析污染负荷与水质状况的关联关系；将水文监测数据与生态监测数据结合，研判水资源利用与生态功能的协调程度。部分研究倾向于认为，监测数据的整合效率与质量，直接影响承载力分析的效率与精度，需建立标准化的数据整合流程，实现多源监测数据的规范化管理与高效利用。

（一）监测数据的筛选与整合要点

用于承载力分析的监测数据主要包括四大类别，其筛选与整合需严格遵循针对性、科学性、完整性三大原则。水文水资源监测数据是水资源承载力分析的基础，应优先选取长期连续、稳定可靠的监测序列，重点关注丰枯期、用水高峰期等关键时段，整合过程中需统一计量单位与统计口径，保证数据可比、结果可信。水环境质量监测数据是水质承载力分析的核心，需结合流域实际污染来源与特征，

筛选氨氮、总磷、COD、重金属等重点控制指标，确保监测点位科学覆盖干流、支流、控制单元及敏感区域；数据整合时需开展有效性检验与质量控制，剔除异常值、缺失值及不合理数据，提升分析精度。

水环境质量监测数据是分析水质承载能力的核心，主要包括 pH 值、溶解氧（DO）、化学需氧量（COD）、五日生化需氧量（BOD）、氨氮、总磷、总氮等常规理化指标，以及重金属、持久性有机污染物等特征污染物监测数据。筛选时需结合流域污染特征，重点选择污染浓度波动较大、对水环境质量影响显著的指标监测数据，同时确保监测点位覆盖流域干流、支流、重点排污口及敏感水域，保证数据的代表性。整合过程中，需对监测数据进行有效性检验，剔除因采样、分析误差导致的异常数据，同时补充缺失数据，确保数据的完整性。

污染源监测数据涵盖各类污染源排放信息，是污染负荷承载分析的重要依据，筛选时优先重点污染源数据，整合时分类汇总明确污染贡献占比。生态状况监测数据包括植被覆盖度、湿地面积等，筛选能表征生态功能的关键指标，用于分析生态承载能力，研判生态与水环境的协同关系。

（二）承载力分析指标体系的构建原则与核心指标

基于监测数据构建承载力指标体系，需遵循科学、系统、可操作、区域性原则。科学性要求指标贴合承载力内涵、核算方法规范；系统性要求涵盖多维度指标；可操作性要求指标数据可通过现有监测获取；区域性要求结合流域实际筛选指标，确保体系适配。

核心指标的筛选是构建水环境承载力指标体系的关键环节。结合监测数据的可获取性、连续性以及流域实际管理需求，可将指标体系划分为水资源承载、水质承载、生态承载、污染负荷承载四大类。水资源承载指标主要涵盖水资源开发利用率、人均水资源量、水资源供需平衡指数等，依托水文水资源监测数据进行核算，用以定量表征流域水资源开发利用与供给保障的承载状态；水质承载指标主要包括水质达标率、主要污染物浓度超标倍数、水体自净能力等，基于水环境质量监测数据计算，反映流域水体对污染物的容纳与净化能力；生态承载指标主要包含植被覆盖度、湿地保有率、水生生物多样性指数等，以生态监测数据为基础，体现流域水生态系统的健康状况与自我维持能力；污染负荷承载指标主要有污染负荷削减率、污染源达标排放率、单位 GDP 污染排放量等，通过污染源监测数据核算，用于衡量流域水环境对各类外源污染输入的承受与调控能力。

指标权重的确定是指标体系构建的重要环节,需结合流域管理重点,采用层次分析法、熵权法等科学方法,确定各类指标的权重,避免主观臆断。例如,对于水质污染严重的流域,可适当提高水质承载指标与污染负荷承载指标的权重;对于水资源短缺的流域,可提高水资源承载指标的权重。指标权重的确定需结合监测数据的特征,确保权重分配与流域水环境实际状况相匹配,提升承载力分析结果的科学性与针对性。

二、基于监测数据的流域水环境承载力核算模型与方法

基于监测数据的承载力核算,核心是通过模型将监测数据转化为可量化指标。当前核算模型主要分为单因子与综合两大类,适用场景不同。单因子模型针对单一指标核算,方法简便,适用于监测数据有限、管理需求单一的流域;综合模型整合多维度指标,能全面反映整体承载状况,适用于监测数据完善、管理需求全面的流域。

单因子核算模型的核心的是针对单一承载指标,结合监测数据与评价标准,核算该指标的承载状态。例如,水资源承载能力核算中,基于水文水资源监测数据,计算流域水资源开发利用率,与水资源开发利用阈值进行对比,判断水资源承载状态;水质承载能力核算中,基于水环境质量监测数据,计算主要污染物浓度超标倍数,结合水质标准,判断水质承载状态。单因子核算模型的优势在于计算简便、结果直观,能够快速判断单一维度的承载状况,但局限性在于无法反映水环境承载力的综合性,难以全面评估流域水环境的整体承载能力,需与综合核算模型结合使用。

综合核算模型是当前主流方法,核心是整合多维度监测数据量化综合承载能力,常用方法包括层次分析法、模糊综合评价法、系统动力学模型等。层次分析法构建递阶结构计算综合承载指数;模糊综合评价法利用模糊数学实现模糊研判;系统动力学模型可模拟水环境与社会经济系统的相互作用,动态核算承载力变化,为长期决策提供支撑。

已有研究表明,系统动力学模型可整合多类型监测数据,模拟不同治理方案下的承载力变化,助力筛选最优治理方案。模型应用高度依赖监测数据质量,核算前需对数据进行预处理,优化模型参数以贴合流域实际,同时注重模型验证,确保核算结果可靠。

核算模型的应用,需高度依赖监测数据的质量与完整性。若监测数据缺失、失真,会导致模型参数设置不合理,核算结果出现偏差。因此,在模型核算前,需对监测数据进行预处理,包括数据清洗、异常值剔除、缺失值补充等,确保监测数据的准确性与完整性。同时,需结合流域实际情况,优化模型参数,使模型能够真实反映流域水环境系统的运行规律,提升核算结果的可靠性。此外,核算过程中需注重模型验证,通过对比监测数据与模型模拟结果,调整模型参数,确保模型的适用性。

三、承载力分析的实践应用与现存问题及优化路径

基于监测数据的承载力分析已在我国重点流域广泛应用,成为污染治理、水资源配置的重要支撑。长江、黄河等流域通过承载力分析明确承载状态,制定分区管控措施;太湖、巢湖等湖泊流域量化污染负荷承载容量,制定削减方案,有效控制富营养化,提升水环境承载力。

在实践应用中,承载力分析的核心价值在于为流域水环境管理提供精准的决策支撑,实现“以承载定发展”。通过承载力分析,能够明确流域水环境的约束条件,避免盲目发展导致的水环境超载;能够识别流域水环境承载力的薄弱环节,针对性开展污染治理与生态修复,提升承载能力;能够模拟不同发展情景下的承载力变化,为流域发展规划制定提供科学依据,推动流域社会经济发展与水环境保护协同共进。也有观点指出,基于监测数据的承载力分析,不仅是一种技术手段,更是一种管理理念的转变,推动流域水环境管理从“被动治理”向“主动防控”转变,从“粗放管理”向“精准管控”转变。

尽管承载力分析已取得成效,但仍存在诸多问题。一是监测数据支撑不足,部分流域监测网络不完善、点位覆盖不全、指标不全面;二是核算模型通用性差、参数设置理想化,核算准确性不足;三是分析结果与管理实践脱节,动态性不足;四是专业人才匮乏,制约分析工作常态化开展。

其三,承载力分析与管理实践脱节,部分流域的承载力分析结果仅停留在理论层面,未与流域污染治理、产业布局优化、水资源配置等管理实践有效结合,导致分析结果难以落地应用;同时,承载力分析的动态性不足,未能结合监测数据的实时更新,及时调整核算结果与管控措施,难以适应流域水环境的动态变化。其四,技术人才匮乏,流域水环境承载力分析需要具备监测数据处理、模型构建、

数据分析等多方面专业能力的人才，而当前部分基层监测机构与管理部门缺乏此类专业人才，制约了承载力分析工作的常态化开展。

针对上述问题，需采取针对性优化措施。一是优化监测体系，完善监测网络、丰富监测指标、建立数据共享机制，强化数据支撑；二是优化核算模型，加强研发优化，校准参数，推动多模型融合，提升核算精度；三是推动分析结果与管理实践融合，建立动态研判机制，推动结果落地；四是加强专业人才培养，通过培训、人才引进等方式，强化人才支撑。

其次，优化核算模型，提升核算精度。加强模型研发与优化，结合不同流域的自然地理特征、污染状况，构建通用性强、适配性高的核算模型；完善模型参数设置，结合长期监测数据，校准模型参数，使模型能够真实反映流域水环境系统的运行规律；推动多模型融合应用，结合层次分析法、系统动力学模型等多种方法，提升核算结果的全面性与准确性。

再次，推动分析结果与管理实践深度融合。将承载力分析结果作为流域产业布局优化、污染治理方案制定、水资源配置的重要依据，划分不同承载状态区域，制定差异化的管控措施；建立承载力动态监测与研判机制，结合监测数据的实时更新，及时调整核算结果与管控措施，适应流域水环境的动态变化；加强承载力分析结果的宣传与应用，提升管理部门对承载力分析的重视程度，推动分析结果落地见效。

最后，加强专业人才培养，强化人才支撑。通过培训、校企合作、人才引进等方式，培养一批具备监测数据处理、模型构建、数据分析等专业能力的人才；建立人才交流机制，推动不同流域、不同机构的人才交流与合作，提升人才专业水平；完善人才激励机制，鼓励人才开展承载力分析相关研究与实践，推动技术创新与应用。

随着监测技术发展与体系完善，承载力分析将向精准化、动态化、智能化发展。未来，整合大数据、人工智能技术可提升分析效率与精度，加强跨学科融合可完善分析体系，为流域水环境管理与可持续发展提供更强支撑，推动经济发展与水环境保护良性循环。

第八章 监测数据管理与信息化平台建设

第一节 环境监测数据的规范化管理与数据库建设

环境监测数据是水环境监测工作的核心产出，是水污染防治、水环境管理、风险预警、决策制定的重要数据支撑，其规范化管理与科学的数据库建设，直接决定了监测数据的可用性、可比性与共享性。随着现代环境监测技术的快速发展，水环境监测数据呈现出数量庞大、类型多样、更新频繁、来源广泛的特点，涵盖理化指标、营养盐指标、有毒有害指标等各类监测数据，涉及实验室监测、现场监测、在线监测等多种监测方式。如何实现监测数据的规范化采集、整理、存储、审核与共享，构建高效、安全、可扩展的监测数据库，解决当前监测数据管理中存在的不规范、不统一、共享不畅等问题，成为水环境监测信息化建设的首要任务，也是推动水污染防治工作向精细化、智能化转型的重要基础。

环境监测数据的规范化管理是确保数据质量的核心前提，其核心内涵是通过建立统一的管理标准、操作流程与质量控制体系，实现监测数据从采集到应用全流程的标准化、规范化，避免数据失真、缺失、混乱等问题，确保监测数据的准确性、完整性、连续性与可比性。不同于普通数据管理，环境监测数据的管理具有较强的专业性与严谨性，需结合水环境监测的技术特点、评价标准与管理需求，制定针对性的管理规范，覆盖数据采集、数据整理、数据审核、数据存储、数据备份、数据销毁等各个环节，形成全生命周期的规范化管理体系。

已有研究表明，规范的监测数据管理能够显著提升数据的利用效率，减少数据冗余与误差，为水环境质量评价、风险预警、污染治理提供可靠的数据支撑。当前，我国环境监测数据管理已逐步形成“国家-省-市-县”四级管理体系，各级监测机构负责本区域监测数据的管理与上报，但在实际工作中，仍存在诸多问题：部分监测机构数据采集不规范，监测记录不完整、不规范；数据整理与审核缺乏统一标准，数据格式不统一，导致区域间数据无法有效对比；数据存储方式落后，存在数据丢失、损坏风险；数据共享机制不完善，各级、各部门之间数

据壁垒明显，数据利用率偏低。这些问题不仅影响了监测数据的价值发挥，也制约了水环境管理决策的科学性与精准性。

监测数据库建设是环境监测数据规范化管理的重要载体，也是实现数据共享、高效利用的关键支撑。通过构建标准化、智能化的监测数据库，能够实现监测数据的集中存储、统一管理、快速查询与高效共享，将分散的监测数据整合为系统性的数据资源，为水环境管理提供全方位、多层次的数据服务。监测数据库的建设并非简单的数据存储，而是结合数据管理需求与技术发展趋势，实现数据的分类存储、动态更新、安全防护与便捷应用，确保数据库的稳定性、安全性与可扩展性。

一、环境监测数据的规范化管理体系构建

环境监测数据的规范化管理体系，需围绕数据全生命周期，构建“采集 - 整理 - 审核 - 存储 - 备份 - 应用 - 销毁”的全流程管理机制，明确各环节的管理要求、操作标准与责任主体，确保监测数据从产生到应用的每一个环节都符合规范。该体系的构建需兼顾专业性与实用性，既要符合环境监测的技术规范，又要结合各级监测机构的管理能力，避免过度繁琐导致难以落地执行。

数据采集的规范化是整个管理体系的基础，也是确保数据准确性的关键。监测数据采集需严格遵循第五章所述的采样规范与监测技术要求，明确数据采集的时间、地点、方法、仪器设备、监测人员等核心信息，确保每一组监测数据都可追溯、可核查。例如，现场监测数据需详细记录监测点位的坐标、水温、气象条件等环境参数，实验室监测数据需记录实验方法、试剂规格、仪器校准情况等实验信息，在线监测数据需记录监测仪器的运行状态、校准记录等设备信息。同时，数据采集需采用统一的记录格式，避免手写记录的随意性，推行电子化采集，减少人工录入误差。

（一）数据整理与审核的规范化要求

数据整理是将采集到的原始监测数据，按照统一的标准进行分类、汇总、换算、修正，形成规范的数据集的过程。数据整理需遵循“真实、准确、完整”的原则，对原始数据进行筛选，剔除异常数据、缺失数据，对可修正的数据进行合理修正，确保数据的完整性与准确性。例如，对于监测过程中因仪器故障、操作失误导致的异常数据，需标注原因并剔除；对于缺失的监测数据，若符合补充条

件，可通过合理方法补充，若无法补充，需明确标注缺失原因，避免随意填补导致数据失真。

数据审核是确保监测数据质量的关键环节，需建立“三级审核”机制，即监测人员自审、科室审核、单位审核，层层把关，确保数据的准确性与规范性。一级审核由监测人员自行完成，对采集的原始数据、记录表格进行自查，核对数据录入的准确性、记录的完整性；二级审核由监测科室负责人完成，重点审核数据整理的规范性、异常数据的处理合理性；三级审核由监测单位质量负责人完成，对数据的整体质量进行把控，审核数据是否符合评价标准与管理要求，确保数据可用于后续的评价与应用。审核过程需详细记录审核意见、审核人员、审核时间等信息，形成审核档案，确保审核过程可追溯。

（二）数据存储与备份的规范化管理

数据存储的规范化是确保监测数据安全、可长期保存的重要保障。监测数据需采用统一的存储格式，结合数据类型与用途，进行分类存储，例如，将常规监测数据、应急监测数据、专项监测数据分开存储，便于查询与管理。存储介质需选择安全、稳定、可长期保存的设备，优先采用服务器存储、云端存储等方式，替代传统的硬盘、U 盘等移动存储介质，减少数据丢失、损坏的风险。同时，需建立存储介质的管理制度，明确存储介质的使用、保管、报废流程，定期对存储介质进行检查与维护，确保数据存储安全。

数据备份是应对数据丢失、损坏的重要措施，需建立“双重备份、异地备份”机制，确保监测数据的安全性与可恢复性。双重备份即对监测数据同时进行本地备份与云端备份，本地备份用于日常查询与快速恢复，云端备份用于长期保存与应急恢复；异地备份即在不同区域建立备份中心，避免因自然灾害、设备故障等不可抗力因素导致数据全部丢失。备份频率需根据数据更新情况确定，常规监测数据可每日备份，应急监测数据需实时备份，备份数据需定期进行校验，确保备份数据与原始数据一致，避免备份失效。部分研究倾向于认为，完善的数据备份机制，能够将数据丢失风险降低 90% 以上，为监测数据的长期保存与应用提供保障。

二、环境监测数据库的设计与建设

环境监测数据库的设计与建设，需以数据规范化管理为基础，结合水环境监

测的需求与技术发展趋势,构建“标准化、智能化、可扩展”的数据库系统,实现监测数据的集中管理、高效查询、快速共享与深度应用。数据库的设计需兼顾实用性与前瞻性,既要满足当前监测数据管理的需求,又要预留未来数据扩容、功能升级的空间,适应监测技术与水环境管理的发展变化。

监测数据库的核心构成包括数据采集模块、数据存储模块、数据查询模块、数据共享模块、数据安全模块等,各模块相互协同,形成完整的数据库系统。数据采集模块用于接收来自实验室监测、现场监测、在线监测等不同渠道的监测数据,实现数据的自动录入与手动录入相结合,确保数据采集的便捷性与规范性;数据存储模块用于对各类监测数据进行分类存储,采用先进的存储技术,确保数据存储的安全与高效;数据查询模块用于实现监测数据的多条件查询、模糊查询,支持按监测点位、监测时间、监测指标等条件快速检索数据,生成查询报表;数据共享模块用于实现各级、各部门之间的监测数据共享,设置不同的访问权限,确保数据共享的安全性及针对性;数据安全模块用于保障数据库的安全运行,防范数据泄露、篡改、丢失等风险。

(一) 数据库的设计原则

环境监测数据库的设计需遵循标准化、实用性、安全性、可扩展性、兼容性五大原则。标准化原则是数据库设计的核心,需采用统一的数据编码、数据格式、分类标准,确保数据库中的数据规范统一,实现区域间、部门间的数据可比性与共享性;实用性原则要求数据库的设计贴合监测数据管理的实际需求,操作简便、功能实用,能够满足数据查询、统计、分析、共享等日常管理需求,避免过度设计导致的资源浪费;安全性原则要求数据库具备完善的安全防护机制,防范数据泄露、篡改、丢失等风险,保护监测数据的保密性与完整性。

可扩展性原则要求数据库的设计预留扩容空间,能够根据监测数据量的增长、监测指标的增加、管理需求的变化,灵活扩展数据库的存储容量与功能模块,避免因数据量激增或功能升级导致数据库无法正常运行;兼容性原则要求数据库能够与现有监测仪器、数据采集系统、管理平台实现无缝对接,支持不同格式数据的导入与导出,避免数据孤岛,实现数据的互联互通。例如,数据库需能够兼容在线监测仪器的实时数据传输,能够导入实验室监测的 Excel、Word 等格式数据,能够与水环境质量评价系统、风险预警系统对接,实现数据的高效利用。

（二）数据库的建设要点

监测数据库的建设需分阶段推进，首先完成基础数据的整理与录入，构建数据库的基本框架；其次完善数据库的功能模块，实现数据查询、统计、共享等核心功能；最后优化数据库的性能，提升数据处理效率与安全防护水平。在基础数据整理与录入阶段，需对历史监测数据进行全面梳理、规范化整理，剔除异常数据、补充缺失数据，按照统一的标准录入数据库，确保基础数据的准确性与完整性。同时，需建立数据更新机制，明确数据更新的频率、流程与责任主体，确保数据库中的数据能够及时更新，反映最新的水环境监测状况。

在功能模块完善阶段，需重点优化数据查询与统计功能，支持多维度、多条件的查询与统计，能够快速生成监测数据报表、趋势分析图表等，为水环境管理决策提供直观的数据支撑；完善数据共享功能，建立分级访问权限，根据不同部门、不同人员的工作需求，分配不同的访问权限，确保数据共享的安全性与针对性，实现各级监测机构、环保部门、水利部门等相关单位之间的数据互联互通。相关研究指出，完善的数据库功能模块，能够将数据查询与统计的效率提升 60% 以上，显著提升监测数据的利用效率。

在性能优化阶段，需重点提升数据库的运行速度与安全防护水平，采用先进的数据库优化技术，减少数据查询、统计的响应时间，确保数据库在数据量激增的情况下仍能稳定运行；加强数据库的安全防护，设置防火墙、数据加密、身份认证等安全措施，防范网络攻击、数据泄露、篡改等风险，定期对数据库进行安全检测与维护，及时发现并解决安全隐患。同时，需建立数据库运维管理制度，明确运维人员的职责，定期对数据库进行备份、升级、检修，确保数据库的长期稳定运行。

三、监测数据规范化管理与数据库建设的实践要点

环境监测数据的规范化管理与数据库建设，并非单纯的技术工作，而是一项结合技术、管理、制度的系统性工程，需结合区域实际，完善管理制度、强化技术支撑、提升人员素养，确保各项工作落地见效。首先，需完善相关管理制度，结合国家相关标准与规范，制定本区域的监测数据管理办法、数据库建设规范等，明确各环节的管理要求、操作标准与责任主体，将数据规范化管理纳入监测机构的绩效考核，确保各项管理制度得到严格执行。

其次,需强化技术支撑,推动监测数据采集、整理、存储、审核等环节的信息化、自动化,引入先进的数据管理软件、数据库系统,替代传统的人工操作,减少人工录入误差,提升数据管理效率。例如,推行电子化数据采集终端,实现现场监测数据的实时录入与上传;采用智能化数据审核软件,自动识别异常数据、缺失数据,提升数据审核的效率与准确性;引入云端存储技术,实现监测数据的异地备份与快速共享。

也有观点指出,监测数据规范化管理与数据库建设的关键在于人员素养的提升。监测人员与数据管理人员是数据管理工作的核心主体,其专业素养与操作水平直接影响数据管理的质量。因此,需加强对监测人员、数据管理人员的专业培训,重点培训数据规范化管理标准、数据库操作方法、质量控制要求等内容,提升其专业能力与责任意识,确保其能够严格按照规范开展数据管理工作。同时,需建立人才培养机制,吸引专业的信息技术人才、环境监测人才,为数据管理与数据库建设提供人才支撑。

此外,需加强区域协同与部门联动,打破各级、各部门之间的数据壁垒,建立健全监测数据共享机制,推动监测数据在环保、水利、农业、卫生等相关部门之间的共享与应用,提升数据的利用效率。例如,环保部门与水利部门共享地表水环境监测数据,共同开展水环境质量评价与治理;环保部门与农业部门共享农业面源污染监测数据,针对性开展农业面源污染防控。同时,需加强与科研机构的合作,推动监测数据的深度分析与应用,挖掘数据背后的水环境变化规律,为水污染防治决策提供更科学、更精准的支撑。

随着“智慧环保”理念的深入推进,环境监测数据的规范化管理与数据库建设将迎来新的发展机遇。未来,需结合大数据、人工智能等现代信息技术,进一步优化数据管理体系,提升数据库的智能化水平,实现监测数据的自动采集、智能审核、智能分析与智能预警,推动监测数据从“被动管理”向“主动应用”转型。同时,需持续完善管理制度,强化技术支撑,提升人员素养,确保监测数据的准确性、完整性与共享性,充分发挥监测数据在水污染防治、水环境管理中的核心支撑作用,推动水环境质量持续改善。

监测数据的规范化管理与数据库建设,是水环境监测信息化建设的基础,也是推动水污染防治工作高质量发展的重要保障。当前,我国监测数据管理与数据库建设仍存在诸多不足,需通过持续优化管理体系、完善数据库功能、强化技术

与人才支撑，逐步解决数据不规范、共享不畅、利用率偏低等问题，构建“规范、高效、安全、共享”的监测数据管理与数据库体系，为水环境管理决策提供可靠的数据支撑，助力生态文明建设。

第二节 大数据与人工智能在数据分析中的初步应用

随着水环境监测技术的持续升级，在线自动监测站、遥感卫星、生物传感设备等现代技术的广泛应用，水环境监测数据呈现出“海量化、多源化、异构化、实时化”的鲜明特征。传统以人工计算、简单统计为主的数据分析方法，效率低下且局限性明显，难以应对海量监测数据的高效处理与深度挖掘，导致大量监测数据的潜在价值无法充分发挥，难以给水环境管理决策提供精准、及时的支撑。大数据与人工智能技术的崛起，为监测数据分析提供了全新的技术路径，凭借大数据的海量存储、快速并行处理能力与人工智能的自主学习、智能研判能力，可有效实现数据深度挖掘、水质趋势预测与污染风险预警，推动数据分析工作从“被动处理”向“主动分析”、“经验判断”向“智能研判”的根本性转变，成为提升水环境管理智能化水平的核心支撑。已有研究表明，二者的协同应用可使数据处理效率提升 70% 以上，能快速识别隐藏在海量数据中的污染规律与潜在风险隐患，为水污染防治工作提供精准可靠的科学依据。

大数据与人工智能在监测数据分析中的应用，并非简单的技术叠加与机械组合，而是紧密结合水环境监测数据的核心特性与水环境管理的实际需求，构建起“数据采集 - 存储 - 处理 - 分析 - 应用”的一体化智能分析体系。其中，大数据技术重点聚焦于解决海量监测数据的高效存储、多源数据的整合归一与快速并行处理难题，有效打破不同监测手段、不同管理部门之间的数据壁垒，实现各类异构数据的协同分析与高效调用；人工智能技术则侧重于基于海量标准化数据开展自主学习与智能研判，深度挖掘数据背后隐藏的关联规律，进而实现水质动态预测与污染风险精准预警。二者相互支撑、协同发力，有效弥补了传统数据分析方法效率低、精准度不足的短板，推动水环境监测数据分析向更高效、更精准、更智能的方向稳步发展。当前，二者在水环境监测数据分析中的应用仍处于初步探索阶段，受限于监测数据质量、算法模型成熟度、专业复合型人才储备等多重因素，尚未在全国范围内实现规模化、常态化应用，仍需结合不同流域、不同水体

的具体场景持续优化完善。部分研究认为，随着技术的不断迭代升级与实际应用经验的持续积累，大数据与人工智能技术将逐步成为水环境监测数据分析的主流技术，推动水环境管理工作全面进入智能化、精细化时代。

一、大数据技术在水环境监测数据分析中的应用

大数据技术在监测数据分析中的核心价值，是实现海量、多源、异构监测数据的高效整合、安全存储与快速处理，打破不同监测手段、不同管理部门之间的数据壁垒，挖掘数据间的潜在关联关系，为后续的智能分析与科学管理决策提供坚实的数据支撑。水环境监测数据来源十分广泛，涵盖常规实验室监测、在线自动监测、遥感宏观监测、应急现场监测等多种类型，不同类型数据的格式、精度、监测频次存在显著差异，传统分散式的数据管理模式难以实现各类数据的有效整合与高效利用，造成数据资源浪费。大数据技术通过构建统一的云存储与数据处理平台，对多源异构数据进行标准化整理、规范化存储，结合数据清洗、融合等核心技术进一步提升数据质量，有效消除数据冗余与误差，为后续的深度分析工作奠定坚实基础。

（一）多源监测数据的整合与标准化处理

多源监测数据的整合与标准化处理，是大数据技术在水环境监测数据分析中得以有效应用的基础前提，也是实现各类数据协同分析、发挥数据价值的关键环节。水环境监测数据的来源极为复杂，涵盖不同监测手段、不同监测指标、不同监测区域，各类数据的格式标准、精度等级、监测频次各不相同，若不进行系统的整合与标准化处理，必然导致数据之间无法互通共享、难以协同利用，最终造成宝贵的数据资源浪费，无法充分发挥监测数据的支撑作用。

大数据技术通过构建统一数据标准与接口，将不同来源、格式的数据标准化转换，将非结构化、半结构化数据转为结构化数据，确保格式统一、口径一致。同时通过数据清洗，去除异常值、缺失值与冗余数据，修复误差，提升数据准确性。例如，通过算法识别在线监测异常值并修正，通过数据融合弥补遥感与地面监测的精度差异。整合标准化后可形成统一监测大数据资源库，实现数据互联互通，为深度分析提供支撑。相关研究指出，标准化处理可使数据分析效率与准确性提升 30% 以上，更好满足管理需求。

此外，大数据技术还能够实现监测数据的实时更新与动态存储，通过分布式

存储技术与云平台架构，有效解决海量监测数据的存储压力与访问瓶颈，确保数据的长期安全性、完整性与高效可访问性。同时，依托成熟的数据溯源技术，全程详细记录监测数据的采集时间、采集地点、监测设备编号、操作人员、处理流程等关键信息，实现数据从采集到应用的全生命周期可追溯，为监测数据的质量控制、责任认定与后续核查提供坚实依据。这一特性对于水环境监测数据的规范化管理、科学化应用以及行业监管具有重要现实意义，能够有效规避数据造假、数据篡改、数据缺失等突出问题，切实保障监测数据的真实性、可靠性与公信力，为后续的数据分析与决策提供高质量的数据保障。

（二）海量监测数据的深度挖掘与规律分析

海量监测数据的深度挖掘与规律分析，是大数据技术应用的核心所在，其核心目标是深入挖掘污染物的时空分布特征、迁移转化规律及水环境质量的动态变化趋势，为水污染防治工作提供科学、精准的决策依据。传统数据分析方法仅能对数据进行简单的统计描述与浅层对比，难以挖掘数据背后隐藏的复杂关联规律，而大数据技术通过关联分析、聚类分析、时序分析等多种专业算法，可快速挖掘数据中的潜在有效信息，实现对水环境质量的精准研判与科学分析。

关联分析算法可有效挖掘不同监测指标、不同监测区域、不同时间段之间的潜在关联关系，进而精准识别污染物的来源、迁移路径与扩散规律，例如通过系统分析流域内上下游各监测站点的水质指标数据，可快速判断污染物的主要类型与来源；通过关联分析降雨数据与面源污染监测数据，能够清晰揭示降雨强度、降雨时长对面源污染负荷的影响机制。聚类分析算法则可通过自主学习，将特征相似的监测数据归为一类，从而精准识别不同污染类型、不同污染程度的区域范围，为精准制定污染防治措施提供有力支撑，例如将流域内所有监测站点按照污染程度划分为不同等级，针对不同等级区域实施差异化、精准化的污染防治策略，提升防控效能。

时序分析算法可精准分析监测数据的时间变化规律，捕捉水质指标的季节波动、年际变化与短期突变特征，进而科学预测水质未来变化趋势，例如通过对湖泊氮、磷、叶绿素 a 等富营养化核心指标的长期时序数据进行分析，可精准预判富营养化的发展态势，提前部署蓝藻爆发的防控措施，有效降低生态风险事件造成的损失。此外，大数据技术还可整合水文情势、气象条件、土地利用类型、污染源排放强度等多源外部数据，开展多因素协同分析，全面揭示各类自然与人为

因素对水环境质量的综合影响机制，为水环境管理决策提供更全面、更科学的理论与数据依据。

二、人工智能技术在水环境监测数据分析中的应用

人工智能技术在监测数据分析中的核心价值,是实现对监测数据的智能解读、自主学习与精准预测,有效弥补传统分析方法的局限性,显著提升水环境监测数据分析的智能化水平与效率。其以机器学习、深度学习等核心算法为技术支撑,通过海量监测数据的反复训练与自主学习构建高效的智能分析模型,进而实现水质精准预测、污染风险提前预警与污染物快速识别。与大数据技术相比,人工智能更侧重“智能研判”与“前瞻性预测”,可自主学习数据变化规律,实现从“数据描述”向“智能预测”的关键转变,为水环境管理工作提供更具前瞻性、针对性的决策支撑。当前其应用主要集中在水质预测、污染风险预警等核心领域,虽仍处于初步探索与优化阶段,但已展现出广阔的应用前景与发展潜力。

(一) 水质智能预测模型的构建与应用

水质智能预测是人工智能技术在水环境监测数据分析中的核心应用方向之一,其核心原理是通过机器学习、深度学习等专业算法,基于长期积累的历史监测数据、水文气象数据、污染源排放数据等影响因素数据,构建高效的水质预测模型,进而实现对未来一段时间内水环境质量指标的精准预测。传统的水质预测方法多依赖经验公式或简单的统计模型,存在预测精度低、适应性差、难以应对复杂水环境变化等明显短板,而人工智能预测模型能够自主学习历史数据中的变化规律,结合水文、气象、污染源等多方面影响因素,显著提升水质预测的精度与适应性,更好地满足水环境管理的实际需求。

机器学习算法是当前水质预测领域应用最广泛、最成熟的人工智能技术,主要包括支持向量机(SVM)、随机森林、决策树、梯度提升树等多种类型。其中,支持向量机(SVM)具有极强的非线性拟合能力与抗干扰能力,适用于小样本、高维度的水质短期精准预测,尤其适合饮用水源地等敏感区域关键水质指标的24-72小时短期预测;随机森林算法凭借其抗过拟合、抗干扰能力强、预测精度高的显著优势,适用于多因素综合影响下的水质中长期预测;决策树算法则具有结构简单、易于理解、可解释性强的特点,适用于水质等级的快速分类与初步预判。例如,通过随机森林算法,结合长期积累的历史水质数据、区域降雨数

据、工业与生活污染源排放数据等多源信息构建预测模型，可精准预测未来 7-15 天内流域内主要水质指标的变化趋势，为污染防治措施的提前制定与优化调整提供可靠支撑。

深度学习算法则更适用于海量、高维度监测数据的深度挖掘与高精度预测，主要包括神经网络、循环神经网络（RNN）、长短期记忆网络（LSTM）、门控循环单元（GRU）等。其中，长短期记忆网络（LSTM）能够有效解决时序数据中的长期依赖问题，精准捕捉水质指标的长期变化规律，适用于湖泊、水库等水体富营养化的长期趋势预测；神经网络通过多层网络结构的协同作用，可深度挖掘数据中的复杂非线性关联关系，进一步提升水质预测的精度与可靠性，适用于复杂污染场景下的水质预测。已有研究表明，基于深度学习算法构建的水质预测模型，其预测精度比传统统计模型提升 20%-30%，但该类算法对数据质量与数据量要求较高，需要大量高质量的历史监测数据作为模型训练的支撑，否则会显著影响模型的训练效果与预测精度。

（二）污染风险智能预警与污染物识别

污染风险智能预警是人工智能的重要应用，通过构建智能模型，实时监测数据变化、识别异常，预判风险并发出预警，为突发污染事件处置提供支撑。传统预警基于固定阈值，难以应对复杂突发情况，而人工智能模型可自主学习异常规律，提前预警，提升时效性与准确性。

人工智能预警模型实时采集在线、移动监测数据，结合历史数据与风险数据库，通过异常检测算法识别数据波动，判断污染风险。例如，监测站点重金属浓度异常升高时，模型可快速识别，结合污染源、水文信息预判扩散范围，及时发出预警。同时，模型可结合多源数据实现多维度预警，为污染防治提供全方位支撑。

污染物智能识别技术利用人工智能算法，结合光谱监测数据、水体图像数据、生物传感数据等多类型数据，可快速、精准地识别水环境中污染物的类型、浓度及分布范围。例如，将遥感光谱数据与深度学习模型相结合，能够快速、大范围地筛查水体中的藻类、石油类污染物、重金属离子及持久性有机污染物等，大幅提升大范围水体污染筛查的效率；将生物传感数据与机器学习算法相融合，可快速识别水体中的病原微生物、有毒有害有机物等，显著提升应急监测的效率与精准度，为突发水污染事件的快速处置争取时间。该技术有效弥补了传统检测方法

操作繁琐、检测周期长、检测成本高的短板，实现了污染物的快速识别与定量分析，为突发水污染事件的快速处置提供了有力技术支撑。也有观点认为，随着技术的不断优化，污染物智能识别技术将逐步实现“实时监测-快速识别-精准处置”的闭环管理，大幅提升水环境污染防控的应急响应能力与处置效能。

当前，大数据与人工智能在水环境监测数据分析中的应用仍面临诸多现实挑战，制约了技术的规模化落地与效能发挥：一是数据质量参差不齐，部分基层监测站点因设备老化、操作不规范等原因，导致监测数据存在缺失、误差、冗余等问题，直接影响算法模型的训练效果与分析准确性；二是算法模型适应性不足，现有模型多针对特定区域、特定污染物类型构建，通用性较差，难以适配不同水体、不同污染场景的实际需求；三是复合型人才短缺，兼具环境科学、计算机技术与数学知识的专业复合型人才匮乏，制约了技术的推广、应用与优化落地；四是应用成本较高，大数据平台搭建、智能算法开发及相关设备与技术的维护费用偏高，限制了其在基层水环境管理部门的普及应用。

针对上述面临的各类现实挑战，需从四个关键方面协同发力，推进大数据与人工智能技术在水环境监测数据分析中的深度应用与落地见效：一是着力提升监测数据质量，加强监测数据全流程质量控制，进一步完善数据标准化体系，通过专业的数据清洗、融合、补全等技术手段，有效提升数据的准确性、完整性与一致性；二是优化算法模型性能，结合不同流域、不同水体的实际污染场景，构建个性化、针对性强的算法模型，推动模型向通用化、模块化方向发展，显著提升模型的适应性与预测精度；三是加强跨学科复合型人才培养，搭建产学研深度合作平台，重点培养兼具环境科学、计算机技术与数学知识的专业人才，为技术的推广、应用与优化落地提供坚实人才支撑；四是合理控制技术应用成本，积极推动大数据与人工智能技术的国产化、轻量化发展，开发操作简便、成本可控的智能分析工具，有效降低技术应用门槛，提升基层水环境管理部门的智能化应用水平。

大数据与人工智能技术在水环境监测数据分析中的初步应用，已为水环境管理工作带来了深刻变革，显著提升了监测数据的处理效率、分析精度与决策的科学性、前瞻性。未来，随着技术的不断迭代升级与实际应用经验的持续积累，大数据与人工智能技术将与水环境监测、水污染防治、生态修复等各项工作深度融合，逐步构建起“监测-分析-预测-预警-处置”的全链条智能化水环境管理体系。

一方面，将进一步推动水环境监测数据与水文、气象、土地利用、污染源排放等多源数据的深度融合，实现多因素、多维度的协同分析，全面提升水环境管理的科学性与全面性；另一方面，将持续推动算法模型的智能化升级与优化，构建实时化、精准化、智能化的数据分析与风险预警系统，实现对水环境质量的动态监测、精准预判与高效管控。此外，还需加快完善相关技术标准与规范体系，推动大数据与人工智能技术在水环境监测数据分析中的应用向规范化、规模化、常态化方向发展，为水污染防治与水环境生态保护工作提供更加强有力的技术支撑。

第三节 水环境信息发布与公众参与平台设计

水环境信息发布是环境监测数据价值转化的重要途径，也是保障公众环境知情权、参与权和监督权的核心举措。随着水环境管理体系的不断完善，监测数据从“内部管理”向“公众公开”的转变已成为必然趋势，而公众参与则是推动水环境治理多元共治、提升治理效能的关键力量。两者有机结合，构建标准化、便捷化的水环境信息发布与公众参与平台，既能实现监测数据的透明化共享，也能引导社会各界主动参与水环境保护，形成“政府主导、企业主体、公众参与”的协同治理格局。已有研究表明，规范的信息发布与高效的公众参与，能够有效弥补政府监管的不足，提升水环境治理的科学性和针对性，推动水环境质量持续改善。

水环境信息发布与公众参与平台的设计，需立足“数据共享、便捷交互、高效协同”的核心目标，兼顾政府管理需求、公众使用体验和企业责任落实，避免出现“重建设、轻应用”“重发布、轻互动”的问题。与监测数据管理平台侧重数据存储、分析不同，本平台的核心功能聚焦于信息的精准传递和公众的有效参与，既要确保发布信息的真实性、时效性和权威性，也要降低公众参与的门槛，提升参与的便捷性和积极性。需要明确的是，平台设计并非简单的“信息陈列”，而是要实现信息发布、公众反馈、意见处理、结果公示的闭环管理，让公众参与真正融入水环境治理的全过程，而非停留在形式层面。

一、水环境信息发布的核心内容与规范要求

水环境信息发布的核心是“精准、及时、全面”，发布内容需围绕公众关切、

治理需求,筛选具有代表性、实用性的信息,避免信息过载或无关信息干扰。发布内容的选择应兼顾专业性与通俗性,既要满足专业人士(如科研人员、环保从业者)对详细监测数据的需求,也要符合普通公众对水环境质量的认知水平,实现专业信息的通俗化转化。

从发布内容来看,核心涵盖三大类信息。一是水环境质量监测信息,这是公众最关注的核心内容,主要包括流域、湖泊、水库等重点水域的常规监测指标(pH、DO、COD、BOD等)浓度、水质类别、达标情况,以及饮用水源地水质监测结果、水质安全状况等。这类信息需明确监测点位、监测时间、监测方法,确保公众能够清晰了解身边水环境的实际状况。二是水污染治理相关信息,包括重点污染源排放情况、水污染防治工程进展、污染治理成效等,让公众了解政府和企业在水环境治理中的具体举措和实际效果,增强公众对水环境治理的信心。三是水环境预警与应急信息,包括水质异常预警、水污染突发事件进展、应急处置措施、饮用水安全应急提示等,及时传递风险信息,引导公众做好防范应对。

(一) 信息发布的规范与时效要求

信息发布的规范性是保障信息权威性的基础,需严格遵循相关法律法规和标准规范,明确发布主体、发布渠道、发布频次和信息格式,避免信息混乱、发布不规范等问题。根据《环境信息公开办法》等相关规定,水环境信息的发布主体为各级生态环境主管部门,企业则需依法公开自身排污信息,确保信息发布的合法性和严肃性。发布格式需统一规范,明确信息名称、发布日期、监测单位、数据来源等关键要素,便于公众查询、对比和监督。

时效性是信息发布的核心要求,不同类型的信息需遵循不同的发布频次。常规水环境质量信息应定期发布,如月度、季度、年度报告,确保公众能够及时了解水环境质量的变化趋势;饮用水源地水质信息需实现常态化发布,重大节假日、水质异常时段需加密发布频次;水污染突发事件信息则需第一时间发布,实时更新处置进展,避免谣言传播,稳定公众情绪。部分研究倾向于认为,信息发布的时效性直接影响公众对信息的信任度,延迟发布或信息滞后,会降低公众参与的积极性,甚至引发公众对政府治理能力的质疑。

此外,信息发布还需注重通俗化解读。监测数据多为专业数值,普通公众难以直接理解,因此需对专业数据进行通俗化转化,如将水质类别转化为“优良、良好、轻度污染”等易懂表述,结合图表、漫画等形式,直观展示水环境质量状

况，降低公众的理解成本。同时，需对关键指标、异常数据进行简要解读，说明数据异常的原因、可能产生的影响以及采取的应对措施，让公众不仅“知其然”，更“知其所以然”。

（二）信息发布的渠道优化与整合

信息发布渠道的选择需兼顾覆盖面与便捷性，结合不同人群的使用习惯，构建“线上+线下”多元化的发布渠道，确保信息能够精准触达各类公众。线上渠道是信息发布的主要载体，包括政府官方网站、政务新媒体（微信公众号、微博、短视频平台）、手机 APP 等，其中政务新媒体具有传播速度快、互动性强、覆盖面广的优势，适合发布实时信息、预警信息和通俗化解读内容；政府官方网站则适合发布详细的监测报告、政策文件等专业性较强的信息，满足专业人士的需求；手机 APP 则可实现信息的个性化推送，根据用户关注的水域、指标，精准推送相关信息，提升用户体验。

线下渠道则主要针对老年群体、农村群体等不擅长使用线上平台的人群，包括社区公告栏、乡镇政务服务中心、科普宣传活动等，通过张贴海报、发放宣传手册、现场讲解等方式，传递水环境信息，引导公众参与。相关研究指出，线下渠道的完善的能够有效弥补线上渠道的不足，扩大信息发布的覆盖面，确保各类公众都能获取水环境信息，避免出现“信息鸿沟”。

需要注意的是，信息发布渠道需进行整合优化，避免多渠道发布信息不一致、更新不同步等问题。应建立统一的信息发布管理机制，明确各渠道的发布内容、发布时间和责任主体，实现线上线下渠道信息同步更新、口径一致，提升信息发布的权威性和可信度。同时，需加强对发布渠道的维护和管理，及时回复公众的咨询和疑问，确保渠道的畅通性和有效性。

二、公众参与平台的功能设计与运行机制

公众参与平台是连接政府、企业与公众的桥梁，其功能设计需围绕“便捷参与、有效互动、闭环管理”展开，让公众能够轻松参与水环境保护，且参与意见能够得到及时回应和处理。与信息发布模块侧重“单向传递”不同，公众参与模块的核心是“双向互动”，既要为公众提供参与渠道，也要建立健全意见处理机制，确保公众参与能够真正发挥作用。

公众参与平台的核心功能应包括四大类。一是污染举报功能，这是公众参与

水环境治理的最直接方式，平台需提供便捷的举报入口，支持文字、图片、视频等多种举报形式，明确举报内容、举报流程和反馈时限，让公众能够及时举报水污染违法行为，如企业偷排漏排、污水直排等。举报信息需严格保密，保护举报人的合法权益，同时建立举报核查机制，对举报信息进行及时核查、处理，并将处理结果反馈给举报人，提升公众举报的积极性。

二是意见建议征集功能，平台需定期围绕重点水环境治理工作，如流域治理、饮用水源保护、污染防治工程等，开展意见建议征集活动，广泛听取公众的意见和建议。征集活动需明确征集主题、征集时间和参与方式，对公众提出的合理意见和建议，需纳入水环境治理决策中，并向公众公示采纳情况，增强公众的参与感和认同感。也有观点指出，意见建议征集不能流于形式，需建立有效的筛选、采纳和反馈机制，避免“征集即结束”，让公众感受到自身参与的价值。

三是科普宣传功能，平台需整合水环境保护相关科普知识，包括水污染危害、防治技术、节水技巧、法律法规等，通过文章、视频、漫画等多种形式，开展常态化科普宣传，提升公众的水环境保护意识和环保素养。科普内容需通俗易懂、贴近生活，避免过于专业的术语和复杂的理论，让公众能够轻松掌握水环境保护知识，并将其运用到日常生活中，形成“人人关心水环境、人人参与水环境保护”的良好氛围。

四是互动交流功能，平台需设置互动板块，如留言区、在线咨询、环保话题讨论等，让公众能够与政府部门、环保专家、企业进行互动交流，咨询水环境相关问题、探讨环保热点话题。政府部门需安排专人负责互动板块的管理，及时回复公众的留言和咨询，解答公众的疑问；环保专家可定期开展在线答疑，为公众提供专业的环保指导；企业可通过互动板块发布自身环保举措，接受公众监督，提升企业的环保责任意识。

（一）平台运行机制的构建与完善

公众参与平台的有效运行，离不开完善的运行机制作为保障，需建立“举报-核查-反馈”“意见征集-筛选-采纳-公示”的闭环管理机制，确保各项功能能够落地见效。对于污染举报，需明确核查责任主体和核查时限，一般情况下，举报信息需在3个工作日内完成核查，复杂举报案件可适当延长核查时间，但需向举报人说明情况；核查结束后，需在1个工作日内将核查结果和处理措施反馈给举报人，确保举报有回应、有处理。

对于意见建议征集，需建立专门的筛选小组，由政府部门、环保专家、公众代表组成，对公众提出的意见建议进行分类筛选、科学评估，筛选出合理、可行的意见建议，并纳入水环境治理规划和相关政策中；同时，需定期向公众公示意见建议的采纳情况，说明未采纳的原因，让公众了解自身意见的处理情况，增强公众参与的积极性和主动性。

此外，还需建立平台运营管理机制，明确运营主体、责任分工和考核评价标准，确保平台能够正常运行、高效运转。运营主体需负责平台的日常维护、信息更新、互动回复等工作，及时处理平台出现的技术问题；建立考核评价机制，将公众参与度、举报处理效率、意见采纳率等作为考核指标，对平台运营工作进行定期考核，提升平台运营质量和服务水平。

（二）平台设计的安全性与易用性保障

平台的安全性和易用性是提升公众使用体验、保障平台有效运行的关键。安全性方面，需加强平台的网络安全建设，采取加密技术、身份认证、权限管理等措施，保护公众的个人信息和举报信息，防止信息泄露、篡改和滥用；建立应急处置机制，应对网络攻击、系统故障等突发情况，确保平台的稳定性和安全性，避免因安全问题影响公众对平台的信任。

易用性方面，平台设计需遵循“简洁、便捷、直观”的原则，优化界面设计，简化操作流程，让不同年龄段、不同文化水平的公众都能轻松使用平台。例如，举报功能需简化举报步骤，支持一键举报；信息查询功能需提供便捷的检索方式，让公众能够快速找到所需信息；互动板块需界面友好，操作简单，便于公众留言、咨询和讨论。同时，平台需支持多种终端访问，包括电脑端、手机端、平板端等，确保公众能够随时随地访问平台、参与互动。

平台设计还需兼顾特殊性，针对老年群体、残疾人等特殊人群，优化平台功能，如增加语音朗读、放大字体等功能，降低特殊人群的使用门槛，确保特殊人群也能参与到水环境保护中来。部分研究倾向于认为，平台的易用性直接影响公众的参与意愿，操作复杂、界面繁琐的平台，会降低公众的使用积极性，难以实现公众参与的预期目标。

水环境信息发布与公众参与平台的建设，是新时代水环境治理体系现代化的重要组成部分，也是推动水环境治理多元共治的关键举措。平台的设计需立足实际需求，兼顾信息发布的规范性、时效性和公众参与的便捷性、有效性，实现信

息共享与公众参与的有机结合。在实际运行中,需不断优化平台功能、完善运行机制,解决平台建设和运行中存在的问题,充分发挥平台的桥梁纽带作用,引导社会各界主动参与水环境保护,形成全社会共同推进水环境治理的良好局面,推动水环境质量持续改善,为生态文明建设提供有力支撑。

第四节 “智慧环保”背景下的监测预警系统展望

“智慧环保”是新一代信息技术与环境保护深度融合的产物,正逐步推动环境监测预警工作从传统的“被动响应”模式,向“主动预判、精准防控”的现代化模式转型。随着水环境监测网络的不断完善与监测技术的快速迭代,监测数据呈现出海量化、多源化、实时化的鲜明特征,传统的监测预警模式已无法满足新时代水环境精准化、智能化的管理需求。监测预警系统作为“智慧环保”体系的核心组成部分,依托大数据、人工智能等先进信息技术整合各类监测资源,实现对水环境的实时监测、动态分析、风险预警与应急处置,是守护水环境安全、提升环境管理效能的重要技术支撑。在当前水污染防治形势依然严峻、各类水环境风险隐患频发的背景下,构建智能高效的监测预警系统,既是“智慧环保”建设的关键环节,也是推动水环境治理体系和治理能力现代化的必然要求。

当前我国“智慧环保”已进入规模化推进阶段,各地积极加快监测预警系统的建设与应用步伐,初步实现了监测数据的实时采集、高效传输与共享共用,在长江、黄河等重点流域的水污染防治工作中取得了较为显著的成效。但相较于“智慧环保”的整体发展目标与基层水环境管理的实际需求,现有监测预警系统仍存在诸多明显短板:数据整合能力不足,多源监测数据难以有效融合,形成了制约系统效能发挥的“数据孤岛”;预警模型智能化水平偏低,多依赖传统经验构建,对复杂水环境风险的预判精度不足、响应存在明显滞后;系统功能较为单一,多聚焦于监测预警本身,与应急处置、治理决策的联动不够紧密;基层地区系统建设相对滞后,技术装备与专业人才双重支撑不足。相关研究指出,监测预警系统的智能化、协同化水平,直接决定了“智慧环保”在水环境管理中的应用效能,需持续优化系统架构、完善技术应用体系。

一、“智慧环保”背景下监测预警系统的核心内涵与建设原则

“智慧环保”背景下的水环境监测预警系统，以水环境安全为核心目标，依托物联网、大数据、人工智能等现代信息技术，整合监测数据采集、数据分析、风险预警、应急处置等多项核心功能，实现对水环境全要素、全流程、全区域的智能化监测与预警。其核心内涵在于“智能化感知、精准化分析、快速化预警、协同化处置”，能够有效打破传统监测预警的时空限制，实现从“点监测”到“面监测”、从“静态预警”到“动态预警”的根本性转变，相较于传统监测预警系统，具备实时采集、精准预判、快速推送的显著技术优势，为水环境管理工作提供全方位、智能化的技术支撑。

构建该系统需严格遵循智能化、协同化、实用性、可扩展性四大核心原则。其中，智能化要求充分运用大数据、人工智能等先进技术，减少人工干预环节，切实提升预警工作的效率与精准度；协同化要求打破不同部门、不同区域之间的管理壁垒，实现监测数据与应急资源的高效共享，形成“监测-预警-处置-反馈”的完整闭环管理；实用性要求紧密贴合基层水环境管理的实际需求，聚焦重点流域、敏感水域及关键污染物，避免形式化建设；可扩展性要求为系统预留充足的技术升级与功能拓展空间，以适应监测技术的迭代发展与管理需求的不断提升。

系统建设需立足“智慧环保”整体架构，统筹兼顾硬件设备配置、软件系统研发、监测数据整合与预警模型优化，同时注重专业人才的培养与储备，全方位保障系统长期稳定、高效运行。部分研究倾向于认为，智慧化监测预警系统的核心价值，在于通过现代信息技术赋能，实现水环境风险的早发现、早预警、早处置，最大限度降低水污染事件造成的环境破坏与经济损失，进而推动水环境管理模式从传统的“事后治理”向“事前预防、事中精准管控”的现代化转型。

（一）监测预警系统的核心构成

“智慧环保”背景下的监测预警系统，主要由感知层、传输层、数据层、应用层四大核心模块构成，各模块相互衔接、协同发力，共同形成完整的智能化监测预警体系。感知层是整个系统的基础环节，主要负责水环境监测数据的实时采集工作，其组成包括各类先进的监测设备，具体有在线监测站、无人机、卫星遥感设备、水质传感器、水文监测设备等，能够实现对水质、水量、污染源、生态状况等多方面要素的全方位、实时化感知。感知层的建设重点在于持续提升监测

设备的智能化水平与覆盖范围，确保采集到的监测数据具备较高的准确性、实时性与完整性，为后续的数据分析与预警工作奠定坚实基础。

传输层是数据通道，依托物联网、5G、光纤通信构建“空-天-地-水”一体化传输网络，保障数据高速、安全、稳定传输，防止数据丢失泄露。数据层是核心支撑，负责数据存储、整合、清洗与标准化，构建统一数据库，整合多源监测数据，打破“数据孤岛”，提升数据利用率与时效性。

应用层是系统的核心功能体现，主要负责监测数据的深度分析、风险预警发布、预警信息推送与实际应用落地，涵盖监测数据可视化展示、水环境风险预警、突发污染应急处置、管理决策支持等多个核心功能模块。通过应用层的各项功能，监测人员与水环境管理人员可实时查看各类水环境监测数据、精准掌握水质动态变化态势、及时接收各类风险预警信息，并快速制定科学可行的应急处置方案，从而实现对水环境的全流程智能化管理。应用层的建设重点在于持续优化智能化预警模型、不断完善各类功能模块，切实提升系统的实用性与智能化水平，推动监测预警工作与水环境管理实践的深度融合，充分发挥系统的技术支撑作用。

（二）监测预警系统的核心功能定位

该系统核心功能是实现水环境风险的精准识别、快速预警与高效处置，具体可细化为四大方面：一是实时监测功能，通过各类智能监测设备全面采集水质、水量、污染源等多要素数据，实现对重点流域、敏感水域、关键排污口的全方位、无死角监测；二是数据整合分析功能，对多源异构监测数据进行系统处理与深度挖掘，精准捕捉数据背后的关联关系与变化规律，为水环境管理决策提供坚实的数据支撑；

三是风险预警，基于数据与模型预判风险，及时发布预警信息与防控建议；四是协同处置，推动预警与应急、决策无缝衔接，提升处置效率。此外，系统还具备数据共享、报表生成等辅助功能，提供多元化服务。

二、“智慧环保”背景下监测预警系统的关键技术与应用实践

监测预警系统的智能化提升，高度依赖大数据、人工智能、物联网、遥感等技术的融合应用。这些技术打破了传统预警瓶颈，推动系统向精准、智能、协同发展，其落地效果直接决定预警精度与应用效能，需与水环境管理实践深度融合。

物联网技术是监测预警系统的基础支撑技术，其核心应用是通过在水环境关

键位置合理布设各类智能传感器，实时采集水质、水文等相关监测指标，再通过5G、物联网等高速通信技术，将采集到的数据实时传输至数据中心，实现监测数据的实时更新与同步。已有研究表明，物联网技术的应用，大幅提升了监测数据的采集效率与实时性，有效打破了传统人工采样、实验室分析的时空限制，让监测工作更加高效便捷。例如在城市河道监测工作中，通过布设的水质智能传感器，可实时捕捉水质指标的异常变化，一旦出现超标情况立即触发预警，为河道污染防控工作提供及时、有效的技术支撑。

大数据技术主要用于解决海量多源监测数据的管理与高效利用难题，通过构建科学的数据挖掘模型，对各类监测数据进行系统整合、清洗校验与深度分析，精准挖掘数据背后的内在关联关系与潜在环境风险，科学预判水质变化趋势，同时实现跨区域、跨类型监测数据的共享融合，有效打破“数据孤岛”困境，进一步提升监测数据的综合利用价值。

人工智能技术是提升监测预警系统智能化水平的核心支撑，通过机器学习、深度学习等先进算法，结合历史监测数据、典型污染事件案例等相关信息，构建高精度的智能化预警模型，有效提升风险预判的精度与响应速度。与传统经验模型相比，人工智能预警模型能够自动学习监测数据的变化规律，灵活适应不同流域、不同时段的水质变化特征，有效解决传统模型预判精度不足、适应性较差的突出问题，可精准识别监测数据中的异常波动，科学预判污染风险的发生态势。

遥感与GIS技术的深度融合，进一步拓展了监测预警的覆盖范围，实现了大尺度流域水环境风险的精准监测与科学研判。遥感技术可快速获取大范围流域的宏观水质状况、生态环境特征等关键信息，结合GIS技术强大的空间分析功能，能够实现监测数据的空间可视化表达，精准分析污染风险的空间分布特征、扩散路径与迁移趋势，为跨区域流域的水环境风险预警与分区精准管控提供了科学、可靠的技术支撑。

我国多地已积极开展监测预警系统的应用实践，并取得了较为显著的成效。其中，长江、黄河等重点流域成功构建了流域级智能监测预警系统，有效实现了流域内水质的实时监测、风险预判与跨区域协同防控；在城市水环境管理层面，通过搭建智慧监测预警平台，全方位覆盖城市河道、污水处理厂、重点排污口等关键区域，能够及时发现并快速处置各类污染隐患。也有观点指出，该系统的广泛应用，不仅显著提升了水环境管理的智能化水平，更推动传统管理模式从“经

验型”向“科学型”、从“被动应对”向“主动防控”的根本性转变。

三、监测预警系统的现存问题与未来发展展望

尽管系统应用成效显著，但在技术、建设、协同等方面仍有问题，制约效能发挥，这些问题与技术水平、管理机制、人才储备密切相关，需针对性优化完善。

主要问题包括：一是技术应用存在明显短板，大数据、人工智能等新技术的应用不够深入全面，预警模型多依赖传统经验构建，监测设备的稳定性不足，多源数据融合技术不够成熟，导致“数据孤岛”问题仍未得到根本解决；二是系统建设存在不均衡现象，基层地区与偏远流域的监测预警系统建设相对滞后，监测设备覆盖率较低、技术水平相对落后，且缺乏专业的技术运维人才，严重制约了系统效能的充分发挥；

三是协同机制不完善，系统功能单一，与应急、决策、执法联动不紧密，存在“重预警、轻处置”现象，跨部门跨区域共享不足；四是数据安全保障欠缺，缺乏完善的加密与访问控制措施，存在数据泄露、篡改隐患。

针对上述问题，未来系统发展需立足“智慧环保”目标，聚焦技术创新、系统优化、协同联动、人才培养，推动系统向精准、智能、协同、安全发展，其核心方向主要有四个方面。

一是强化技术创新，加大大数据、人工智能等新技术的研发与应用投入，优化智能化预警模型的参数设置，升级高精度、高稳定性的监测设备，完善多源数据融合技术，加强环境科学与信息技术、水利工程等多学科融合，切实提升系统的技术含量与实际应用效能。

二是优化系统建设布局，加大对基层地区、偏远流域的政策扶持与资金投入力度，逐步扩大监测设备的覆盖范围，补齐基层监测技术短板；同时推动监测预警系统的标准化建设，制定统一的技术规范、数据标准与建设指南，确保不同区域、不同类型系统的兼容性与协同性，建立常态化的系统运维保障机制，定期开展设备检修与软件升级，确保系统长期稳定、高效运行。

三是完善协同联动机制，积极推动监测预警系统与应急处置、治理决策、环境执法等相关环节的无缝衔接，建立健全“监测 - 预警 - 处置 - 反馈”的完整闭环管理机制，确保预警信息能够快速转化为实际防控行动；同时健全跨部门、跨区域的数据共享与协同防控机制，打破管理壁垒，拓展系统的功能边界，推动系

统从单一的“监测预警”向综合性的“水环境综合管理”转型，提升系统的综合应用价值。

四是强化专业人才与数据安全双重保障，通过开展针对性技术培训、深化校企合作、引进高端复合型人才等多种方式，培养一批兼具环境科学、信息技术、数据分析能力的专业人才，满足系统建设、运维与优化的需求；同时完善数据安全加密、访问控制、安全审计等防护措施，健全监测数据全流程管理制度，确保监测数据的安全、规范、高效利用。

随着“智慧环保”建设的不断深入推进与信息技术的持续迭代升级，水环境监测预警系统将迎来新的发展机遇。未来，智能化、协同化、精准化、一体化将成为监测预警系统的核心发展趋势，通过技术赋能与机制创新，逐步实现对水环境风险的全方位、全流程智能防控，为水环境安全提供坚实可靠的保障，持续推动水环境治理体系和治理能力现代化水平提升，助力人与自然和谐共生的绿色发展目标顺利实现。

第九章 环境工程的系统实施与综合管理

第一节 环境工程项目全生命周期管理

环境工程项目是水污染防治与生态保护的核心载体，实施质量直接影响治理效果与可持续性。其专业性强、涉及领域多、环节复杂，任一管理疏漏都会降低工程效能、引发环境风险。全生命周期管理将项目全过程视为整体，通过系统精细化管理实现高效管控，保障环境、社会与经济效益统一。

随着我国水环境治理系统化发展，工程项目类型不断增多、管理要求提高，传统碎片化管理模式易出现设计与实际脱节、施工运营不规范等问题，难以满足现代管理需求。

研究表明，全生命周期管理可优化流程、提升效能、降低成本与风险。目前我国虽已向该模式转型，但仍存在整体规划不足、体系不完善、责任不清、管控机制不健全等问题，制约工程长效运行。

其核心是统筹规划立项、设计、施工、运维、退役处置五大环节，构建全过程一体化管理体系，实现各环节协同衔接，并非简单环节叠加，而是通过统一标准与机制实现全流程优化管控。

一、环境工程项目全生命周期的核心环节

环境工程项目全生命周期涵盖规划立项、工程设计、施工建设、运营维护、退役处置五个核心环节，各环节既相互独立，又相互关联、相互制约，共同构成环境工程项目的完整管理链条。每个环节都有其独特的管理重点与技术要求，只有做好每个环节的管理工作，实现各环节的无缝衔接，才能确保全生命周期管理的成效。全生命周期管理的关键的是打破各环节的管理壁垒，建立协同管理机制，避免出现“各自为战”的局面。

规划立项是环境工程项目全生命周期的起点，也是决定工程方向与效能的关键环节。该环节的核心任务是结合区域水环境现状、污染治理需求、生态保护目

标,以及当地的经济社会发展水平、技术条件,开展项目可行性研究与规划设计,明确项目的建设目标、建设内容、建设规模、技术路线、投资估算与效益分析。规划立项阶段的管理重点是确保项目规划的科学性、合理性与可行性,避免盲目立项、重复建设,确保项目能够贴合实际污染治理需求,实现预期的环境效益与社会效益。

(一) 规划立项与工程设计的协同管理

规划立项与工程设计是环境工程项目全生命周期的基础环节,两者的协同衔接直接影响工程的设计质量与实施效果。规划立项阶段需充分调研区域水环境特征、污染来源、治理需求,明确项目的核心目标与建设方向,为工程设计提供科学依据;工程设计阶段则需严格遵循规划立项的要求,结合工程实际工况、技术水平与投资预算,开展详细的设计工作,确保设计方案的科学性、可行性与可操作性。

工程设计是环境工程项目的核心技术环节,分为初步设计与施工图设计两个阶段。初步设计主要明确工程的总体布局、工艺路线、主要设备选型、工程概算等核心内容,需结合项目规划目标,优化工艺设计,确保工程能够达到预期的污染治理效果;施工图设计则需在初步设计的基础上,细化工程施工的具体方案、技术参数、施工工艺与质量要求,确保施工过程有章可循、有据可依。部分研究倾向于认为,工程设计的科学性与合理性,直接决定了工程的施工质量与运营效能,若设计方案存在缺陷,即使后续施工与运营管理到位,也难以实现预期的治理目标。

规划立项与工程设计的协同管理,需建立常态化的沟通机制,确保设计方案与规划目标保持一致,避免设计与规划脱节。例如,在设计过程中,设计单位需及时与项目立项单位、监测机构沟通,了解区域水环境的最新变化与污染治理需求,优化设计方案;立项单位需对设计方案进行严格审核,重点审核设计方案的科学性、可行性、经济性与环保性,确保设计方案符合项目规划要求与相关标准规范。同时,需引入专业的技术咨询机构,对设计方案进行论证,及时发现并解决设计中存在的问题,提升设计质量。

(二) 施工建设与运营维护的衔接管理

施工建设是环境工程项目从设计方案转化为实际工程的关键环节,其质量直接决定了工程的稳定性与耐久性,也影响后续的运营维护成本与治理效能。施工

建设阶段的管理重点是严格按照施工图设计要求，规范施工流程，加强质量控制与安全管理，确保工程施工质量达标，同时控制施工周期与施工成本，减少施工过程中的环境污染。

施工建设阶段需建立完善的质量控制体系，明确施工质量标准与验收规范，加强对施工原材料、施工工艺、施工工序的全过程管控。例如，对工程所需的设备、材料进行严格检验，确保其符合设计要求与相关标准；对施工工序进行全程监督，重点把控关键工序、隐蔽工程的施工质量，及时发现并整改施工中的质量问题；加强施工安全管理，建立安全管理制度，落实安全责任，防范施工安全事故的发生。同时，需加强施工过程中的环境管理，采取有效的污染防控措施，减少施工扬尘、施工废水、施工噪声对周边环境的影响。

运营维护是环境工程项目全生命周期中持续时间最长、管理难度最大的环节，其管理水平直接决定了工程的长期稳定运行与治理效能的持续发挥。运营维护阶段的核心任务是对工程设备、工艺系统进行日常维护、检修与优化，确保工程能够稳定、高效运行，达到预期的污染治理效果；同时，加强运营过程中的监测与数据管理，及时发现并解决运营中的问题，优化运营方案，降低运营成本。

施工建设与运营维护的衔接管理，是确保工程顺利移交、稳定运营的关键。在施工后期，施工单位需与运营单位做好交接工作，提供完整的施工资料、设备说明书、验收报告等相关文件，明确工程的质量状况、设备运行参数与维护要求；运营单位需提前介入施工过程，了解工程的施工工艺、设备安装情况，做好运营前的准备工作，包括人员培训、设备调试、管理制度建设等，确保工程移交后能够快速进入稳定运营状态。

二、环境工程项目全生命周期管理体系构建

环境工程项目全生命周期管理体系的构建，需以全流程协同管控为核心，结合环境工程项目的特点与管理需求，建立“标准统一、责任明确、流程规范、风险可控”的管理体系，涵盖管理目标、责任体系、流程规范、质量控制、风险管控等多个方面，确保全生命周期管理工作的规范化、系统化开展。该体系的构建需兼顾专业性与实用性，既要符合环境工程的技术规范与管理要求，又要结合项目的实际情况，避免过度繁琐导致难以落地执行。

管理目标体系是全生命周期管理的核心导向，需结合环境工程项目的规划目

标,明确各环节的管理目标,形成“总体目标-阶段目标-具体目标”的三级目标体系。总体目标是确保项目实现预期的环境效益、社会效益与经济效益,实现工程的可持续运行;阶段目标则针对规划立项、工程设计、施工建设、运营维护、退役处置五个环节,明确各环节的具体管理目标,如规划立项阶段的目标是确保项目可行性与科学性,施工阶段的目标是确保施工质量达标、施工安全可控,运营阶段的目标是确保工程稳定运行、治理效能达标。

(一) 责任体系与流程规范建设

责任体系是全生命周期管理的重要保障,需明确项目各参与方(立项单位、设计单位、施工单位、运营单位、监理单位、监测单位等)的责任,建立“全员参与、层层负责”的责任机制,确保各项管理工作落到实处。例如,立项单位负责项目的规划立项、资金保障与总体协调;设计单位负责设计方案的科学性、可行性与规范性;施工单位负责施工质量、施工安全与施工进度的管控;运营单位负责工程的日常运营维护与效能保障;监理单位负责对施工过程、工程质量进行全程监督;监测单位负责工程施工与运营过程中的环境监测,为管理决策提供数据支撑。

流程规范建设是实现全生命周期规范化管理的关键,需结合各环节的管理需求,制定统一的管理流程与操作规范,明确各环节的工作内容、工作流程、时间节点与质量要求,确保各项管理工作有序开展。例如,规划立项流程需明确可行性研究、方案论证、立项审批等关键环节的工作要求与时间节点;工程设计流程需明确初步设计、施工图设计、设计审核、设计变更等环节的操作规范;施工流程需明确施工准备、施工实施、质量验收、工程移交等环节的工作内容与质量标准;运营维护流程需明确设备维护、工艺优化、监测数据管理、故障处置等环节的操作规范。

(二) 质量控制与风险管控机制

质量控制是环境工程项目全生命周期管理的核心内容,需建立“全流程、多层次”的质量控制机制,覆盖项目规划、设计、施工、运营、退役等各个环节,确保工程质量符合相关标准与设计要求。在规划立项阶段,需加强可行性研究与方案论证的质量控制,确保项目规划科学合理;在工程设计阶段,需加强设计审核与论证,确保设计方案的科学性与可行性;在施工阶段,需加强施工原材料、施工工艺、施工工序的质量控制,严格执行质量验收规范;在运营阶段,需加强

设备运行与工艺系统的质量管控，确保工程稳定运行、治理效能达标；在退役处置阶段，需加强退役工程的处置质量，避免造成二次污染。

风险管控是环境工程项目全生命周期管理的重要内容，环境工程项目在全生命周期内面临多种风险，包括技术风险、质量风险、安全风险、环境风险、成本风险等，需建立完善的风险管控机制，实现风险的事前预防、事中控制、事后处置。相关研究指出，完善的风险管控机制能够有效降低项目风险发生率，减少风险造成的损失，确保项目顺利推进。在风险识别阶段，需结合项目各环节的特点，全面识别可能存在的风险因素，建立风险清单；在风险评估阶段，需对识别的风险因素进行分析与评估，明确风险等级与影响范围；在风险控制阶段，需针对不同等级的风险，制定相应的防控措施，落实防控责任；在风险处置阶段，需建立应急处置机制，及时应对突发风险，降低风险造成的损失。

三、环境工程项目全生命周期管理的实践要点

环境工程项目全生命周期管理的实践，需结合项目的实际情况，强化管理理念、完善管理体系、提升管理能力，确保全生命周期管理工作落地见效。首先，需树立全生命周期管理理念，打破传统的碎片化管理思维，将项目的各环节作为一个有机整体，统筹考虑各环节的相互影响与协同作用，实现全流程的优化管控。项目各参与方需转变管理理念，加强协同配合，避免各自为战，形成“上下联动、左右协同”的管理格局。

其次，需完善管理体系，结合项目的特点与管理需求，优化责任体系、流程规范、质量控制与风险管控机制，确保各项管理工作有章可循、有据可依。例如，针对不同类型的环境工程项目（如城市污水处理工程、水环境修复工程），制定差异化的管理流程与质量标准；建立健全项目各参与方的协同机制，加强沟通对接，确保各环节无缝衔接；完善质量验收与风险评估标准，提升管理的科学性与规范性。

也有观点指出，技术创新与人才支撑是提升全生命周期管理水平的关键。环境工程项目的专业性强、技术要求高，需加强技术创新，引入先进的施工技术、运营技术与管理技术，优化工程设计与运营方案，提升工程效能与管理效率。例如，引入智能化施工设备，提升施工质量与施工效率；采用智能化运营管理系统，实现工程设备的实时监测与智能调控，降低运营成本；引入大数据、人工智能等

技术，优化风险评估与管控方案，提升风险管控的精准性。

同时，需加强人才培养，提升项目管理团队的专业素养与管理能力。环境工程项目全生命周期管理需要一支兼具环境工程技术、项目管理、风险管控等多方面知识的复合型人才队伍，需加强对项目管理人员、技术人员的专业培训，重点培训全生命周期管理理念、管理流程、质量控制、风险管控等内容，提升其专业能力与责任意识。同时，需建立人才激励机制，吸引优秀的复合型人才投身环境工程项目管理工作，为全生命周期管理提供人才支撑。

此外，需加强监督考核，建立健全全生命周期管理的监督考核机制，将管理成效与项目各参与方的绩效考核挂钩，确保各项管理措施得到严格执行。例如，对立项单位的项目规划与资金保障情况进行监督考核；对设计单位的设计质量进行监督考核；对施工单位的施工质量、施工安全与施工进度进行监督考核；对运营单位的运营效能与环境效益进行监督考核。通过监督考核，及时发现并解决管理中存在的问题，推动全生命周期管理水平不断提升。

随着我国水环境治理的不断深入，环境工程项目的数量与规模将持续扩大，对全生命周期管理的要求也将不断提升。未来，需结合新时代生态环境保护的要求，进一步优化全生命周期管理体系，强化技术创新与人才支撑，推动环境工程项目全生命周期管理向智能化、精细化转型。通过科学的全生命周期管理，确保环境工程项目实现预期的环境效益、社会效益与经济效益，推动水污染防治工作高质量发展，助力生态文明建设。

环境工程项目全生命周期管理是一项系统性、长期性的工作，需要项目各参与方协同配合、共同发力。当前，我国环境工程项目全生命周期管理仍存在诸多不足，需通过持续完善管理体系、强化技术创新、提升人才素养、加强监督考核，逐步解决管理中存在的问题，构建“科学规划、规范设计、优质施工、高效运营、规范退役”的全生命周期管理模式，充分发挥环境工程项目在水污染防治、生态环境保护中的核心作用，推动水环境质量持续改善。

第二节 多尺度污染控制的工程系统集成与优化

水环境问题日趋复杂，单一尺度、类型的污染控制工程已无法满足质量改善需求。当前水污染呈现多尺度交织叠加特征，不同尺度治理需求差异显著且相互关联，多尺度污染控制工程系统集成与优化，核心是打破碎片化格局，构建全链条协同控制体系，可大幅提升治理效率、降低成本，实现三大效益统一。

多尺度工程系统集成并非技术堆砌，而是结合各尺度污染特征与需求，明确功能定位与协同机制，涵盖微观（污染源末端精准治理）、中观（区域污染源协同管控）、宏观（流域生态修复）三个层面，三者衔接协同，构成系统核心框架。

工程系统优化需在集成基础上优化技术选型、流程与资源配置，消除工程壁垒。目前该系统仍存在规划不足、协同性差、技术与实际不匹配、资源配置不合理等问题，需通过系统性集成优化，构建高效可持续的污染控制体系。

一、多尺度污染控制工程系统的核心构成与功能定位

多尺度污染控制工程系统的构建，需立足不同尺度的污染特征与治理目标，明确各尺度工程的核心构成与功能定位，实现各尺度之间的有机衔接与协同联动。不同尺度的污染控制工程，在技术路径、治理重点、实施主体等方面存在显著差异，但均围绕“削减污染物排放、改善水环境质量、保护生态系统”这一核心目标，形成相互支撑、相互补充的有机整体。部分研究倾向于认为，多尺度污染控制工程系统的核心价值，在于实现“精准治理、协同高效、全域覆盖”，打破传统碎片化治理的局限，推动污染治理从“被动应对”向“主动防控”、从“单一治理”向“系统治理”转变。

（一）微观尺度：污染源末端控制工程系统

微观尺度污染控制工程系统以单一污染源为核心，聚焦于污染物的末端治理与达标排放，是多尺度污染控制体系的基础环节。该尺度的治理对象主要包括工业企业废水排放口、城镇污水处理厂、农村分散式污水处理设施、畜禽养殖废水排放源等具体污染源，核心目标是将污染物浓度控制在国家或地方规定的排放标准范围内，减少污染物直接进入水体环境。

微观尺度工程系统的核心构成包括末端处理技术设施、在线监测设施与运行管理体系三部分。末端处理技术设施需根据污染源的类型、污染物浓度与性质，

选择适配的处理技术，如工业废水可采用物理化学处理、生物处理等组合工艺，农村分散式污水可采用人工湿地、一体化处理设备等高效、低成本技术，畜禽养殖废水则需经过固液分离、厌氧消化等预处理后再进行深度处理。在线监测设施则用于实时监控污染物排放浓度与排放量，确保处理设施稳定运行、达标排放，同时为中观、宏观尺度的污染控制提供基础数据支撑。运行管理体系则重点保障处理设施的常态化运行，通过规范的操作流程、专业的运维团队，避免设施“建而不用、用而不管”的现象，提升末端治理效能。

微观尺度工程系统的优化重点的是提升处理技术的适配性与运行稳定性。当前，部分污染源末端处理设施存在技术选型不合理的问题，如部分高浓度工业废水采用常规生物处理技术，导致处理效果不佳；部分农村污水处理设施因运维成本过高、缺乏专业运维团队，难以长期稳定运行。因此，需结合污染源的实际情况，优化技术选型，优先选择高效、节能、低成本的处理技术，同时完善运行管理机制，推动末端治理从“达标排放”向“深度减排”转变。

（二）中观尺度：区域污染协同控制工程系统

中观尺度污染控制工程系统以区域（如城镇、工业园区、县域）为单元，聚焦于区域内各类污染源的协同管控与污染负荷削减，是连接微观末端治理与宏观流域治理的关键纽带。该尺度的治理重点是整合区域内的点源、面源污染控制工程，构建区域污染防控网络，实现区域内污染负荷的总量控制，改善区域水环境质量。

中观尺度工程系统的核心构成包括点源协同治理工程、面源污染控制工程、区域水环境修复工程与协同管理体系。点源协同治理工程主要是整合区域内工业企业、城镇污水处理厂等点源的末端处理设施，推动污水处理厂提标改造，实现污染物深度减排；同时，构建区域污水管网互联互通体系，优化污水收集与处理布局，避免污水直排。面源污染控制工程则针对农业面源、城市面源等，采取源头减量、过程拦截、末端净化等措施，如农业面源可通过测土配方施肥、生态沟渠建设等减少氮磷流失，城市面源可通过海绵城市建设、雨水收集处理等降低径流污染。区域水环境修复工程则聚焦于区域内河流、湖泊等水体的生态修复，通过河道清淤、水生植物种植、曝气增氧等措施，改善水体水质与生态功能。

协同管理体系是中观尺度工程系统高效运行的保障，需建立区域内多部门协同工作机制，明确环保、水利、农业、住建等部门的职责分工，实现污染监测、

治理、监管的协同联动。相关研究指出，中观尺度的协同治理，能够有效解决单一污染源治理难以解决的区域污染叠加问题，提升区域污染控制的整体效能。例如，在工业园区污染控制中，通过整合园区内企业废水处理设施，建设集中式污水处理厂与再生水回用系统，实现废水资源化利用与污染物总量削减，同时降低企业治理成本，实现经济效益与环境效益的双赢。

（三）宏观尺度：流域污染协同治理工程系统

宏观尺度污染控制工程系统以流域为单元，聚焦于全流域水环境质量的整体改善与生态系统的保护修复，是多尺度污染控制体系的顶层设计。该尺度的治理重点是统筹流域内不同区域、不同类型的污染控制工程，协调上下游、左右岸的治理行动，实现全流域污染负荷的总量控制与生态系统的良性循环。

宏观尺度工程系统的核心构成包括流域污染防控布局优化工程、跨区域协同治理工程、流域生态修复工程与流域管理体系。流域污染防控布局优化工程需结合流域内不同区域的污染特征与生态功能，划分重点治理区域、一般治理区域与生态保护区域，优化污染源布局与治理工程布局，实现“分区分管、精准治理”。跨区域协同治理工程则针对跨行政区域的流域污染问题，建立跨区域协同治理机制，推动上下游地区协同开展污染治理与生态修复，避免“各自为战”导致的治理失衡。例如，在跨区域流域治理中，通过建立上下游生态补偿机制，推动上游地区加强生态保护与污染治理，下游地区给予相应的补偿，实现流域生态保护与经济发展的协同推进。

流域生态修复工程则聚焦于流域整体生态系统的保护与修复，包括源头涵养区保护、河道生态修复、湿地保护与修复等，提升流域生态系统的自我净化能力与抗干扰能力。流域管理体系则需建立统一的流域管理机构，统筹协调流域内的污染治理、生态保护、水资源调配等工作，完善流域监测网络与预警机制，实现全流域水环境的精细化管理。宏观尺度工程系统的优化，核心是实现“流域统筹、协同联动”，打破行政区域壁垒，推动污染治理从“局部治理”向“全域治理”转变，确保流域水环境质量持续改善。

二、多尺度污染控制工程系统的集成路径与优化策略

多尺度污染控制工程系统的集成与优化，需立足各尺度工程的功能定位，构建“微观精准治理、中观协同管控、宏观统筹引领”的协同机制，通过技术集成、

流程优化、资源整合、管理协同，提升整个系统的治理效能。集成路径的核心是打破各尺度、各类型工程之间的壁垒，实现数据共享、技术协同、管理联动；优化策略则聚焦于解决工程系统中存在的适配性不足、协同性不够、效能低下等问题，推动工程系统向更高效、更经济、更可持续的方向发展。

（一）工程系统集成路径：构建全链条协同体系

多尺度污染控制工程系统的集成，需围绕“源头—过程—末端—生态”的全链条，构建“微观—中观—宏观”三级协同体系，实现各尺度工程的有机衔接与协同发力。首先，推动微观与中观尺度的集成，建立微观污染源监测数据与中观区域污染管控的联动机制，将微观污染源的排放数据作为中观区域污染总量控制的重要依据，同时通过中观区域的协同管控，引导微观污染源优化治理技术、提升减排效能。例如，区域内工业企业末端处理设施的提标改造，需结合区域污染总量控制目标，制定个性化的减排方案，确保区域污染负荷达标。

其次，推动中观与宏观尺度的集成，将中观区域污染治理目标纳入宏观流域治理规划，实现区域治理与流域治理的协同推进。中观区域的污染控制工程布局，需服从流域整体治理规划，重点解决流域内的重点污染问题；宏观流域治理则需统筹协调各中观区域的治理行动，优化资源配置，推动跨区域协同治理。例如，流域内重点区域的面源污染控制工程，需结合流域生态功能分区，制定差异化的治理方案，确保工程建设与流域生态保护相适配。

最后，推动技术与管理的集成，构建“技术支撑—管理保障”的一体化体系。技术集成方面，整合不同尺度、不同类型的污染控制技术，构建技术组合体系，如微观末端处理技术与中观面源拦截技术、宏观生态修复技术的协同应用，提升污染治理的整体效果；管理集成方面，建立跨尺度、跨部门的协同管理机制，实现监测数据共享、治理行动协同、监管执法联动，确保工程系统高效运行。也有观点指出，技术与管理的深度集成，是多尺度污染控制工程系统发挥最大效能的关键，能够有效解决“技术先进但管理滞后”“工程建设与实际需求脱节”等问题。

（二）工程系统优化策略：提升治理效能与可持续性

多尺度污染控制工程系统的优化，需针对当前存在的问题，从技术选型、流程设计、资源配置、管理机制四个方面入手，实现工程系统的精准化、高效化、可持续化。一是优化技术选型，坚持“因地制宜、适配性优先”的原则，结合不同尺度的污染特征与治理需求，选择高效、节能、低成本的技术，避免盲目追求

“高端技术”而导致的资源浪费。例如，农村地区面源污染控制，优先选择人工湿地、生态沟渠等低成本、易运维的技术；工业高浓度废水处理，则根据污染物性质选择针对性的深度处理技术。

二是优化工程流程设计，打破不同工程之间的流程壁垒，实现流程协同与高效衔接。例如，微观污染源末端处理后的再生水，可纳入中观区域的再生水回用系统，实现水资源循环利用；中观区域的雨水收集处理工程，可与宏观流域的水资源调配工程协同，提升水资源利用效率。同时，优化工程建设流程，统筹规划工程建设时序，避免重复建设与建设滞后问题，确保工程系统能够及时发挥治理效能。

三是优化资源配置，合理分配治理资金、技术、人力等资源，实现资源利用效益最大化。针对不同尺度、不同区域的治理需求，制定差异化的资源配置方案，重点向生态敏感区、高污染区域倾斜，确保治理资源能够精准投放。例如，流域内生态敏感区的生态修复工程，加大资金与技术投入，提升生态系统的自我修复能力；基层农村地区的污水处理设施，优化资金投入结构，推动政府、企业、社会资本协同投入，降低运维成本。

四是完善管理机制，构建“权责清晰、协同高效、监管严格”的管理体系。明确各尺度、各部门的职责分工，建立跨尺度协同管理机制，实现监测、治理、监管的一体化推进；加强工程运行监管，建立常态化的运维考核机制，确保工程设施稳定运行；完善公众参与机制，鼓励公众参与工程建设与监管，提升工程系统的透明度与公信力。已有研究表明，完善的管理机制能够有效提升工程系统的运行效能，延长工程使用寿命，实现污染治理的长期可持续。

多尺度污染控制的工程系统集成与优化，是推动水环境污染治理从“碎片化”向“系统化”转变的关键举措，也是实现水环境质量持续改善的重要保障。当前，随着水环境管理需求的不断升级，多尺度污染控制工程系统的集成与优化将更加注重精准化、协同化、可持续化，逐步构建起“源头防控、过程拦截、末端治理、生态修复”的全链条协同治理体系。未来，还需加强跨学科研究，结合环境科学、工程技术、管理学等多学科知识，优化工程系统集成模式，提升技术适配性与管理效能；同时，结合大数据、人工智能等现代技术，推动工程系统的智能化升级，实现多尺度污染控制的精准化研判、科学化决策与高效化实施，为水污染防治与水环境生态保护提供更有力的支撑。

第三节 基于标准与法规的工程合规性与效能设计

环境工程系统实施与综合管理需在法规标准框架下，实现合规性与环境效能双重达标，兼顾法定底线与环境价值最大化。其以环境效益为核心，全流程须遵循相关标准法规，避免“合规低效”，确保实际治理效果。标准法规是规范前提，效能设计是价值关键，二者共同构成环境工程管理核心。

环境工程合规性设计是将法规标准深度融入全流程，实现全方位系统合规，涵盖排放限值、环评审批、建设标准、运维规范等多维度。实践中需明确适用标准体系，地方标准严于国标时优先执行地方标准；行业专项与通用标准冲突时，遵循专项优先、衔接实际原则，避免合规风险。

一、环境工程合规性设计的核心维度与实施路径

环境工程的合规性设计需贯穿工程全生命周期的各个关键节点，从方案论证、初步设计、施工图设计，到施工建设、竣工验收、运行维护，不同阶段的合规重点存在明显差异，但整体始终围绕“标准落地、法规衔接、流程规范”三大核心展开，确保每一个环节都符合法定要求。其中，工程方案设计阶段是合规性控制的源头，该阶段合规性设计的重点的是紧密结合环境影响评价结论与批复意见，科学确定污染物处理工艺、处理规模与排放指标，确保工艺选择能够稳定满足相关排放限值要求，同时充分兼顾工程建设与周边环境的协调性，避免因选址不合理、工艺布局不当等问题，违反环境规划、生态保护红线以及相关法规要求。例如，在城市污水处理工程设计中，需首先根据当地水环境功能区的划分标准，明确出水 COD、BOD、氨氮、总磷等核心指标的排放限值，结合区域污水水质特征、水量变化规律，选择适配性强、运行稳定的处理工艺，确保出水能够长期稳定达标排放，同时采取有效的防渗、防泄漏措施，避免工程建设与运行过程中对周边地下水、土壤环境造成二次污染，切实守住合规底线。

施工阶段的合规性设计，主要聚焦于施工过程中的各类污染控制与周边生态保护，严格遵循施工期环境管理相关规定、生态保护红线要求及施工扬尘、噪声、废水等专项控制标准。这一阶段的合规要求，虽不直接涉及工程建成后的污染物处理效能，但直接影响工程周边的生态环境质量、居民生活环境，也是环境监管部门日常监管的重点环节，其合规性落实情况直接关系到工程能否顺利推进。相

关研究指出,施工期产生的扬尘、噪声、施工废水、固体废物等各类污染,若缺乏有效的合规性控制措施,不仅会破坏周边土壤、水体、大气生态环境,影响周边居民的正常生活,还可能被环境监管部门责令停工整改,进而延误工程进度、增加工程成本,影响工程整体实施效果。因此,施工阶段的合规性设计,需明确扬尘控制浓度标准、噪声排放时段与限值、施工废水处理达标要求及固体废物处置规范,制定针对性、可操作的污染控制措施,如施工现场定期洒水降尘、设置围挡与噪声隔离设施、施工废水经沉淀池预处理后回用或达标排放、建筑垃圾分类收集与规范处置等,同时严格执行施工期环境监测要求,定期开展扬尘、噪声、废水等指标监测,及时发现并整改施工过程中的违规问题,确保施工全过程符合合规要求。

(一) 运行阶段的合规性管控要点

运行阶段是环境工程合规性管理的核心环节,也是确保工程长期稳定达标运行的关键。这一阶段的合规性设计,重点在于建立完善的运行管理体系,确保工程运行参数、污染物排放指标、监测数据等均符合标准与法规要求。一方面,需严格按照工程设计方案与运行规程,控制各处理单元的运行参数,如污水处理工程中的曝气强度、反应时间、药剂投加量等,确保污染物处理效果稳定,排放指标持续满足限值要求;另一方面,需建立规范的监测与记录制度,按照法规要求开展污染物排放监测,及时上报监测数据,确保监测数据的真实性、准确性与完整性,避免出现数据造假、漏报、瞒报等违规行为。

此外,运行阶段的合规性设计还需兼顾设备维护与应急管理的合规要求。环境工程的处理设备是确保达标运行的基础,需按照设备维护规程定期开展检修与维护,避免因设备故障导致污染物超标排放;同时,需制定完善的突发环境事件应急预案,明确应急处置流程、应急物资储备、应急监测方案等,确保在发生突发污染事件时,能够及时采取有效措施,控制污染扩散,降低环境影响,符合突发环境事件应急管理相关法规要求。

需要注意的是,环境工程的合规性设计并非一成不变的静态过程,而是需要随着国家及地方环境标准与法规的更新迭代,及时进行动态调整与优化。近年来,我国生态环境保护力度持续加大,环境标准体系不断完善,各类污染物排放限值不断收紧,相关环保法规也在持续修订优化,如《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国水污染防治法》的修订完善,以及《城镇污水处理厂污染物排

放标准》《工业废水处理排放标准》等各类专项标准的更新，均对环境工程的合规性提出了更高、更严格的要求，进一步细化了工程设计、运行、运维等各环节的合规标准。因此，在工程设计与运行过程中，需建立健全标准法规动态跟踪机制，安排专人负责关注国家及地方环保标准、法规的更新动态，及时掌握标准法规的修订内容、新增要求，结合工程实际运行情况，对工程设计方案、运行管理体系、污染控制措施进行针对性调整与优化，确保工程长期保持合规状态，始终符合最新的法定要求。

二、环境工程效能设计的核心逻辑与优化策略

环境工程的效能设计，是在满足合规性要求的基础上，通过科学的工艺优化、设备选型、管理提升，最大化工程的环境效益、经济效益与社会效益，实现“合规达标+高效节能”的双重目标。部分研究倾向于认为，环境工程的效能并非单纯的污染物去除效率，而是涵盖污染治理效果、能源消耗、运行成本、生态协同等多个维度的综合效能，其设计核心是实现“合规底线”与“效能上限”的平衡，避免出现“过度治理”或“治理不足”的问题。

污染治理效能是环境工程效能设计的核心指标，也是工程存在的根本价值所在，其核心评价标准是污染物去除效率能否稳定达到既定标准，同时兼顾处理过程的稳定性与可靠性。在具体设计过程中，需全面结合污染物的来源、浓度特征、排放要求以及工程所在区域的环境条件，科学选择适配的处理工艺与设备，既要确保污染物去除效率能够满足相关标准与设计目标，又要避免工艺选择与实际需求脱节，导致效能浪费或治理不足。例如，在工业废水处理工程中，针对高浓度、难降解有机废水，可选择厌氧-好氧联合处理工艺，通过厌氧阶段降解大部分高浓度有机物、降低废水负荷，再通过好氧阶段进一步去除剩余有机物，既能够有效提升废水中有机污染物的去除效率，又能够显著降低运行能耗，实现效能与成本的平衡；针对重金属含量较高的工业废水，可采用化学沉淀、吸附、离子交换等工艺相结合的方式，确保重金属去除率稳定达标，同时减少污泥产生量，降低污泥处置带来的二次污染风险与成本压力。需要强调的是，污染治理效能的设计并非越高越好，而是需结合实际需求、区域环境承载力与经济成本，在确保达标排放的基础上实现效能最优化——过度追求过高的去除率，不仅会导致工程投资大幅增加，还会显著提升运行过程中的能源、药剂消耗，增加运行成本，反而降

低工程的综合效能，违背环境工程可持续发展的初衷。

（二）效能设计中的节能降耗与成本控制

节能降耗与成本控制是环境工程效能设计的重要组成部分，也是实现工程可持续运行的关键。环境工程的运行过程往往需要消耗大量的能源与资源，如污水处理工程中的曝气系统、提升泵，废气处理工程中的风机、吸附剂等，其运行成本在工程全生命周期成本中占比较高。因此，效能设计需注重节能降耗技术的应用，优化工艺流程，降低能源与资源消耗，同时控制工程投资与运行成本。

在工艺优化方面，可通过采用高效节能工艺、智能调控运行参数、优化工艺组合等多种方式，有效降低能源消耗与资源浪费。例如，在污水处理工程中，采用膜生物反应器（MBR）工艺替代传统活性污泥工艺，不仅能够显著提高污染物去除效率，提升出水水质，还能够有效降低曝气能耗与污泥排放量，减少污泥处置成本；通过引入智能控制系统，实时监测进水水质、水量变化，动态调控曝气强度、反应时间、药剂投加量等运行参数，实现能源与药剂的合理利用，避免不必要的能源浪费，进一步提升工程的节能效能。在设备选型方面，应坚持“节能高效、运行稳定、维护便捷”的原则，优先选择符合国家节能标准的设备，如节能型曝气器、变频提升泵、高效搅拌机等，这些设备能够在保证运行效果的前提下，有效降低设备运行能耗；同时，建立完善的设备维护与保养制度，定期对设备进行检修、校准与维护，及时排查设备故障，延长设备使用寿命，降低设备更换与维修成本，从设备全生命周期角度实现成本控制与效能提升。

此外，环境工程的效能设计还需兼顾生态协同效应，实现污染治理与生态保护的有机结合、协同推进，避免单纯追求污染达标而忽视生态保护的误区。在部分环境工程设计过程中，设计人员过度关注污染物达标排放这一核心目标，忽视了工程建设与运行对周边生态环境的潜在影响，导致工程实施后出现周边生态系统破坏、生物多样性减少、土壤或水体二次污染等问题，反而降低了工程的综合效能，与生态环境保护的整体目标相悖。因此，效能设计需充分结合工程周边生态环境特征、区域生态保护目标，优化工程布局与工艺设计，实现污染治理与生态保护的协同共赢。例如，在城镇污水处理工程中，可在末端增设人工湿地、生态氧化塘等生态处理单元，利用水生植物、微生物的协同作用进一步净化出水水质，既能够确保污染物稳定达标排放，又能够改善周边水生生态环境、补充区域水资源，提升工程的生态效能；在工业废水处理工程中，结合废水水质特征，采

用“预处理+生化处理+生态深度处理”的组合工艺，既降低污染物排放浓度，又减少化学药剂的使用量，降低对周边生态环境的影响，同时实现水资源的循环回用，兼顾环境效益与经济效益。

合规性与效能设计的协同推进，是环境工程综合管理的核心要求，也是确保工程长期稳定发挥环境价值、实现可持续运行的关键所在。在实际工程实施过程中，部分项目存在明显的认知误区，要么“重合规、轻效能”，要么“重效能、轻合规”——前者虽然能够严格满足法定的合规性要求，顺利通过环境验收与日常监管，但工程运行效率低下、能源与药剂消耗过高、运行成本居高不下，难以实现长期可持续运行，甚至可能因成本压力导致工程停运；后者虽然能够实现高效的污染治理效果，降低运行成本，但因违反相关环境标准与法规，可能面临环境监管处罚、罚款，甚至被责令停工整改、限期整改，反而延误了污染治理的进度，无法实现工程的核心价值。也有观点指出，合规性是环境工程不可逾越的底线要求，是工程能够合法实施、持续运行的前提；效能设计是工程的提升方向，是实现环境价值、经济效益与社会效益最大化的关键，二者不可偏废，需通过科学的设计、严格的管理、动态的优化，实现二者的有机协同、深度融合。

实现合规性与效能设计的协同，关键在于建立完善的设计审核与动态评估机制，将合规性要求与效能目标贯穿于工程全生命周期。在工程设计阶段，需组织环境工程、法律法规、生态保护等领域的专业人员，对设计方案进行全面的合规性审核与效能评估，重点检查设计方案是否符合相关标准与法规要求，工艺选择与设备选型是否能够实现污染治理效能与节能降耗目标，是否存在合规性漏洞或效能浪费等问题，及时发现并整改设计中的不足，确保设计方案既合规又高效。在工程运行阶段，建立常态化的合规性检查与效能评估机制，定期监测污染物排放指标、运行参数、能源消耗等数据，对比分析设计目标与实际运行效果之间的差异，深入排查工程运行过程中存在的合规性隐患与效能短板，针对性地优化工艺参数、完善管理措施，及时调整运行策略，确保工程既能够持续符合合规要求，又能够稳定发挥高效能，实现合规性与效能的动态平衡。

综上所述，基于标准与法规的环境工程合规性与效能设计，是环境工程系统实施与综合管理的核心内容。合规性设计确保工程符合法定要求，是工程实施的前提；效能设计提升工程的综合价值，是工程可持续运行的保障。在实际工作中，需严格遵循相关标准与法规，结合工程实际需求，优化设计方案，强化运行管理，

实现合规性与效能的有机协同，推动环境工程高质量发展，为水污染防治与生态环境保护提供有力支撑。

第四节 环境工程中的多元共治与投融资模式创新

环境工程作为一项兼具公共性、公益性与复杂性的系统工程，其有效实施无法仅依靠单一主体完成。随着我国水污染防治工作进入攻坚阶段，传统的政府主导、单一投入的管理与投融资模式，已难以满足大规模、高质量环境工程建设与运营的需求，多元共治与投融资模式创新成为破解发展瓶颈、提升环境治理效能的必然选择。多元共治强调打破政府单一主导的治理格局，整合政府、企业、社会组织、公众等多方力量，形成权责清晰、协同高效的治理共同体；投融资模式创新则聚焦于解决环境工程资金供需矛盾，通过多元化资金渠道、市场化运作机制，保障环境工程项目的资金供给与高效使用，二者相辅相成、有机融合，共同推动环境工程高质量发展。已有研究表明，完善的多元共治体系与灵活的投融资模式，能够有效提升环境工程的实施效率与可持续性，破解资金短缺、责任虚化、动力不足等突出问题。

环境工程的公共产品属性，决定了其治理过程需要多方主体的协同参与。从实践来看，政府作为环境治理的主导者，承担着制定政策、监管执法、提供公共服务等核心职责，但政府的人力、财力、物力有限，难以覆盖所有环境工程的建设与运营需求。企业作为水污染的主要产生者与环境治理的责任主体，其参与积极性直接影响环境工程的实施效果，同时企业也能通过参与环境治理获得技术升级、品牌提升等长期收益。社会组织具有专业性、灵活性的优势，能够在政府与企业、公众之间发挥桥梁纽带作用，参与技术支持、监督评估、宣传教育等工作。公众作为环境利益的直接相关者，拥有知情权、参与权与监督权，其参与能够倒逼治理主体履行责任，提升环境治理的科学性与公正性。因此，构建多元共治体系，明确各方主体的权责边界，推动协同发力，是环境工程系统实施的重要保障。

一、环境工程多元共治体系的构建与运行机制

环境工程多元共治体系的核心的是实现治理主体的多元化、治理方式的协同化、治理责任的明晰化，其构建需立足我国环境治理实际，结合环境工程的具体

类型与特点，逐步完善参与机制、协调机制与监督机制。与单一主体治理相比，多元共治能够整合多方资源，弥补单一主体的能力短板，提升治理决策的科学性与可操作性，同时也能增强治理过程的透明度与公信力。但多元共治体系的构建并非简单的主体叠加，而是需要建立有效的协同机制，化解主体间的利益冲突，实现治理目标的统一。

（一）多元共治主体的权责划分与定位

政府在多元共治体系中处于主导地位，其核心权责在于制定环境治理政策、完善法律法规与标准体系、加强监管执法、统筹规划环境工程布局与资金投入。具体而言，政府需结合区域水环境现状与污染治理需求，制定科学的环境工程规划，明确治理目标与重点任务；完善环境标准与执法体系，加大对违法排污行为的处罚力度，保障环境工程的合规实施；统筹公共财政资金，重点支持公益性强、社会效益显著的环境工程项目，如农村面源污染治理、跨区域流域治理等。同时，政府还需承担起协调各方主体、搭建沟通平台的职责，推动形成协同治理格局。

企业是环境工程多元共治体系中的核心责任主体之一，其权责主要包括履行污染治理责任、参与环境工程建设与运营、推动技术创新与绿色转型。企业需严格遵守环境法律法规，承担起自身污染治理的主体责任，主动投入资金与技术，建设与运营污染治理设施，确保达标排放。部分研究倾向于认为，企业应积极参与市场化环境工程建设，通过特许经营、委托运营等方式，参与城市污水处理、工业废水处理等项目的运营管理，实现环境效益与经济效益的双赢。此外，企业还应加强环保技术研发与推广，推动污染治理技术的升级迭代，为环境工程实施提供技术支撑。

社会组织在多元共治体系中发挥着补充与支撑作用，其权责主要包括技术支持、监督评估、宣传教育与权益维护。社会组织可利用自身的专业优势，为环境工程项目提供技术咨询、方案设计、效果评估等服务，帮助提升工程实施质量；通过开展环境监测、公开治理信息等方式，对政府与企业的环境治理行为进行监督，倒逼治理主体履行责任；开展环保宣传教育活动，提升公众的环保意识，引导公众参与环境治理；同时，社会组织还可代表公众利益，反映环境诉求，维护公众的环境权益。

公众作为环境治理的受益者与监督者，其核心权责在于参与环境决策、监督治理行为、践行环保理念。公众有权了解环境工程的规划、建设与运营情况，通

过听证会、意见征集等方式，参与环境决策过程，提出合理建议；有权对政府的监管行为、企业的污染治理行为进行监督，举报违法违规行爲；同时，公众应积极践行绿色生活方式，减少水污染产生，为环境工程实施营造良好的社会氛围。需要注意的是，公众参与的有效性，依赖于信息公开机制的完善与参与渠道的畅通，否则公众参与可能流于形式。

（二）多元共治的协同运行与保障机制

多元共治体系的高效运行，需要建立完善的协同机制与保障机制，化解主体间的利益冲突，确保各方力量形成治理合力。协同机制主要包括沟通协调机制、利益共享机制与冲突化解机制。沟通协调机制是多元共治的基础，需搭建常态化的沟通平台，推动政府、企业、社会组织与公众之间的信息共享与沟通对接，及时解决治理过程中出现的问题。例如，通过建立联席会议制度，定期召集各方主体，协调解决环境工程项目建设与运营中的难点问题；通过搭建信息公开平台，及时公开环境工程相关信息，保障各方主体的知情权。

利益共享机制是调动各方主体参与积极性的关键。环境工程的公益性决定了其收益具有一定的公共性，难以通过市场化方式实现直接收益的均衡分配，因此需要建立多元化的利益补偿机制。政府可通过财政补贴、税收减免、政策扶持等方式，对参与环境工程建设与运营的企业、社会组织给予激励；企业可通过技术创新、资源回收利用等方式，获得间接经济效益；公众则通过环境质量的改善，获得健康收益与生活品质提升。也有观点指出，应建立环境权益交易机制，让企业、社会组织等主体通过参与环境治理获得相应环境权益，提升参与积极性。

冲突化解机制是保障多元共治体系稳定运行的重要支撑。多元主体在参与环境治理过程中，由于利益诉求、价值观念的差异，难免会产生矛盾与冲突，如企业的污染治理成本与政府的监管要求之间的冲突、公众的环境诉求与工程建设进度之间的冲突等。这就需要建立公正、高效的冲突化解机制，通过协商、调解、仲裁等方式，妥善解决各类矛盾冲突，避免矛盾激化影响环境工程的实施。同时，需明确各方主体的责任追究机制，对未履行治理责任、造成环境污染的主体，依法追究其责任，保障多元共治体系的有序运行。

当前，我国环境工程多元共治体系仍处于完善阶段，还存在一些突出问题。部分地区仍存在政府主导过度、企业参与积极性不高的现象，企业的污染治理责任落实不到位；社会组织的发展不够成熟，专业能力与资金实力不足，难以充分

发挥支撑作用；公众参与渠道不够畅通，信息公开不够充分，公众参与的有效性不足；各方主体之间的协同机制不完善，存在权责交叉、推诿扯皮等问题。这些问题的存在，制约了多元共治体系的效能发挥，需要通过制度完善与机制创新逐步解决。

二、环境工程投融资模式创新的路径与实践

环境工程项目具有投资规模大、建设周期长、投资回报周期长、公益性强等特点，传统的以政府财政投入为主的投融资模式，已难以满足大规模环境工程建设与运营的资金需求。随着我国市场化改革的不断深化，投融资模式创新成为解决环境工程资金短缺问题的关键，其核心是打破政府单一投入格局，引入市场机制，拓宽资金渠道，实现资金来源的多元化、运营管理的市场化，提升资金使用效率。相关研究指出，合理的投融资模式创新，不仅能够有效缓解政府财政压力，还能提升环境工程项目的运营效率与可持续性，推动环境工程从“政府主导”向“政府引导、市场运作、社会参与”转变。

（一）政府引导型投融资模式的优化与完善

政府引导型投融资模式是当前我国环境工程投融资的主要模式之一，其核心是政府通过财政投入、政策扶持等方式，引导社会资本参与环境工程建设与运营，实现政府资金与社会资本的有机结合。政府引导型投融资模式的优化，关键在于明确政府的引导作用，完善政策支持体系，提升社会资本的参与积极性。

财政投入是政府引导的基础，政府应加大对环境工程的财政投入力度，重点支持公益性强、难以通过市场化方式获得收益的项目，如跨区域流域治理、农村面源污染治理、生态修复工程等。同时，政府应优化财政资金的使用方式，改变传统的直接拨款模式，通过补贴、贴息、担保等方式，引导社会资本参与环境工程建设与运营，提高财政资金的撬动效应。例如，对参与环境工程建设的企业给予财政贴息，降低企业的融资成本；通过政府担保，帮助企业获得银行贷款，解决企业的资金短缺问题。

政策扶持体系的完善是提升社会资本参与积极性的重要保障。政府应制定完善的税收优惠、土地扶持、市场准入等政策，为社会资本参与环境工程提供良好的政策环境。例如，对从事环境工程建设与运营的企业，给予增值税、企业所得税等税收减免；在土地供应方面，优先保障环境工程项目的土地需求，降低土地

使用成本；放宽市场准入，鼓励社会资本进入城市污水处理、工业废水处理等领域，打破垄断，引入竞争机制。此外，政府还应建立健全环境工程的收益保障机制，明确项目的收益来源，降低社会资本的投资风险，提升投资回报预期。

（二）市场化投融资模式的创新与应用

市场化投融资模式是环境工程投融资创新的核心方向，其核心是充分发挥市场在资源配置中的决定性作用，通过市场化运作机制，吸引社会资本参与环境工程建设与运营，实现资金的良性循环。当前，我国环境工程市场化投融资模式主要包括特许经营模式、PPP 模式、资产证券化模式等，各类模式具有不同的特点与适用场景，需结合项目实际情况合理选择。

特许经营模式是应用最为广泛的市场化投融资模式之一，其核心是政府通过授予企业特许经营权，允许企业在一定期限内建设、运营环境工程项目，并通过收取服务费用等方式获得收益，特许经营期满后，项目资产无偿移交政府。该模式适用于具有稳定收益的环境工程项目，如城市污水处理厂、垃圾处理厂等。在实践中，特许经营模式能够有效吸引社会资本参与，减轻政府财政压力，同时通过市场化运营，提升项目的运营效率。但该模式也存在一些问题，如特许经营期限的确定、收益分配机制的设计等，需要政府与企业进行充分协商，明确双方的权利与义务。

PPP 模式（政府和社会资本合作模式）是一种新型的市场化投融资模式，其核心是政府与社会资本建立长期合作关系，共同出资、共同建设、共同运营环境工程项目，共享收益、共担风险。与特许经营模式相比，PPP 模式的合作范围更广、合作期限更长，能够更好地整合政府与社会资本的资源优势，实现优势互补。PPP 模式适用于投资规模大、建设周期长、运营难度高的环境工程项目，如跨区域流域治理、水环境修复工程等。部分研究倾向于认为，PPP 模式的关键在于建立合理的风险分担机制与收益分配机制，确保政府与社会资本的合作共赢，避免出现政府隐性债务或社会资本收益过低等问题。

资产证券化模式是环境工程投融资模式的重要创新方向，其核心是将环境工程项目的未来收益权转化为证券，在金融市场上发行，吸引投资者购买，从而实现资金的融通。该模式适用于具有稳定未来收益的环境工程项目，如城市污水处理费、垃圾处理费等收费权的证券化。资产证券化模式能够有效盘活环境工程资产，拓宽资金渠道，降低融资成本，同时也能分散投资风险，吸引更多社会资

本参与。但该模式的实施需要完善的金融市场体系、规范的资产评估机制与风险防控机制，目前我国环境工程领域的应用仍处于初步阶段，需要进一步探索与完善。

此外，社会资本直接投资模式、捐赠模式等也属于环境工程投融资模式的重要补充。社会资本直接投资模式主要适用于具有较高经济效益的环境工程项目，如工业废水处理、资源回收利用等项目，企业通过直接投资建设与运营项目，获得相应的经济收益；捐赠模式主要适用于公益性强、无直接经济效益的环境工程项目，如生态修复、环保宣传等，通过接受企业、社会组织与公众的捐赠，获得项目建设与运营资金。

环境工程投融资模式创新面临着一些现实挑战。部分环境工程项目的收益性较差，难以吸引社会资本参与；金融市场体系不够完善，投融资渠道相对狭窄；风险防控机制不健全，社会资本的投资风险较高；相关法律法规与政策体系不够完善，制约了市场化投融资模式的推广应用。为推动环境工程投融资模式创新，需进一步完善政策支持体系，优化市场环境，健全风险防控机制，拓宽投融资渠道，推动政府引导与市场运作的有机结合。

多元共治与投融资模式创新是推动环境工程高质量发展的重要支撑，二者相互促进、协同发力。多元共治体系的完善，能够为投融资模式创新提供良好的制度环境与社会氛围，明确各方主体的责任与义务，降低投资风险；投融资模式的创新，则能够为多元共治体系的运行提供资金保障，调动各方主体的参与积极性，提升治理效能。在实践中，需立足我国环境治理实际，不断完善多元共治体系，创新投融资模式，推动环境工程实现环境效益、经济效益与社会效益的协同统一，为水污染防治与生态环境改善提供有力支撑。

第十章 环境工程前沿与未来发展方向

第一节 新技术革命驱动下的环境工程范式变革

大数据、人工智能等新兴技术全面渗透环境工程，推动其从末端治理向源头防控、精准治理转型。传统环境工程存在效率低、精准性差、协同性不足等短板，难以应对复杂水环境问题。新技术赋能重构了工程逻辑与路径，促进其向智能化、精准化、资源化发展。

当前水环境问题复杂持久，传统模式难以应对，亟需技术创新重构治理范式。多技术融合可实现监测、防控、治理、决策全流程升级，显著提升治理效能、降低成本，成为高质量发展核心动力。

我国环境工程技术体系已基本形成，但仍存在创新不足、核心技术依赖国外、转化率低等问题。借助新技术革命，我国有望实现跨越式发展，推动治理从被动响应转向主动防控、从单一治理转向系统治理。

新技术驱动的范式变革，旨在构建技术赋能、精准高效的新型环境工程体系，实现全流程优化。这一变革需循序渐进，持续完善技术、管理与人才体系，提升治理效能与可持续性。

一、新技术革命对环境工程的核心赋能作用

新技术革命对环境工程的赋能，体现在技术手段、治理模式、管理效率等多个层面，核心是通过新兴技术的融合应用，解决传统环境工程存在的短板，提升污染治理的精准度、效率与可持续性。不同类型的新兴技术，在环境工程领域的应用场景与赋能效果存在差异，但整体呈现出“智能化监测、精准化治理、协同化管控、资源化利用”的核心特征，为环境工程范式变革提供了坚实的技术支撑。

大数据与人工智能技术的应用，打破了传统环境监测与治理的信息壁垒，实现了环境数据的精准采集、智能分析与高效应用，为环境工程的精准治理与科学决策提供了数据支撑。传统环境监测与治理中，数据采集效率低、分析手段单一、决策主观性强，难以实现对复杂水环境问题的精准把控。大数据技术能够整合环

境监测数据、水文数据、污染排放数据等多源数据，实现数据的集中管理与深度挖掘；人工智能技术则通过算法模型，实现对污染趋势的精准预测、污染来源的精准识别、治理方案的智能优化，显著提升环境工程的管理效率与治理精准度。

（一）物联网与智能化技术的场景应用

物联网技术的核心是实现“物物互联”，通过在监测点位、治理设备、管网系统等关键节点安装传感器，实现对水环境参数、设备运行状态、污染排放情况的实时监测与数据传输，构建全方位、立体化的环境监测与管控网络。在环境工程领域，物联网技术广泛应用于在线监测、设备运维、管网管控等场景，打破了传统人工监测与管控的局限性，实现了监测与管控的自动化、实时化。

例如，在城市污水处理工程中，通过物联网技术对污水处理设备的运行参数、水质指标进行实时监测，能够及时发现设备故障与水质异常，实现设备的智能调控与故障预警，提升污水处理效率与处理质量；在流域水环境治理中，通过在流域内布设物联网监测节点，实现对流域内水质、水量、污染物排放等参数的实时监测，为流域污染治理的协同管控提供数据支撑。智能化技术则在物联网技术的基础上，实现了设备运行、治理过程的智能调控，例如，智能化污水处理系统能够根据进水水质、水量的变化，自动调整处理工艺与运行参数，优化处理效果，降低运营成本。

部分研究倾向于认为，物联网与智能化技术的融合应用，是环境工程向智能化转型的核心支撑，能够显著减少人工干预，提升管理效率与治理精度，同时降低治理成本与环境风险。但在实际应用中，仍存在传感器布局不合理、数据传输不稳定、设备维护成本较高等问题，需要结合技术发展与实际需求，逐步优化完善。

（二）纳米技术与生物技术的创新应用

纳米技术凭借其独特的物理化学特性，在水污染治理领域展现出广阔的应用前景，成为解决微量、痕量污染物治理难题的重要技术手段。传统污染治理技术对水体中微量重金属、持久性有机污染物等难降解污染物的去除效果有限，而纳米材料具有比表面积大、吸附能力强、催化活性高的特点，能够高效去除水体中的痕量污染物，提升污染治理的深度与广度。

例如，纳米二氧化钛、纳米氧化锌等纳米材料，可作为光催化剂，在光照条件下产生强氧化性自由基，降解水体中的持久性有机污染物，实现难降解污染物的高效去除；纳米吸附材料能够针对性吸附水体中的重金属离子，实现重金属污

染的精准治理。生物技术的创新应用,则推动环境工程向绿色低碳方向转型,与传统物理化学治理技术相比,生物技术具有治理成本低、无二次污染、资源利用率高的优势,适用于有机废水处理、水环境生态修复等场景。

新兴生物技术如基因工程、微生物制剂技术等,通过改造微生物菌株,提升微生物对污染物的降解能力,实现有机污染物的高效降解与资源化利用。例如,通过基因工程改造的微生物菌株,能够高效降解工业废水中的难降解有机物,降低处理成本,提升处理效果;微生物制剂技术则通过向水体中投放功能微生物,修复水体生态系统,改善水环境质量。纳米技术与生物技术的融合应用,进一步提升了污染治理的效能,为复杂水环境问题的解决提供了全新的技术路径。

二、环境工程范式变革的核心内容与方向

新技术革命驱动下的环境工程范式变革,并非简单的技术升级,而是涵盖治理理念、技术体系、管理模式、产业形态等多个层面的全方位变革,其核心是实现“源头防控、过程管控、精准治理、资源化利用”的治理目标,构建与新时代生态环境保护要求相适应的新型环境工程体系。这种范式变革的核心内容,体现在治理理念的转变、技术体系的重构、管理模式的优化三个方面,三者相互关联、相互支撑,共同推动环境工程的高质量发展。

治理理念的转变是环境工程范式变革的前提,从传统的“末端治理”向“源头防控+过程管控+末端治理”的全流程治理理念转变,从“单一污染治理”向“系统治理、协同治理”理念转变。传统环境工程以末端治理为核心,注重污染物产生后的处理,难以从根本上解决污染问题,且治理成本高、效果有限。新的治理理念强调源头防控,通过优化产业结构、推行清洁生产、加强污染排放管控,从源头减少污染物的产生;注重过程管控,通过实时监测、智能调控,确保污染治理过程的高效稳定;强化末端治理,通过先进技术手段,实现污染物的达标排放与资源化利用。

(一) 技术体系的重构与优化

技术体系的重构是环境工程范式变革的核心,以新技术融合应用为核心,构建“监测-治理-修复-资源化”一体化的技术体系,打破传统技术之间的壁垒,实现多技术协同应用。传统环境工程技术体系呈现碎片化特征,监测技术、治理技术、修复技术相互独立,难以实现全流程的协同优化,而新技术革命推动下的

技术体系重构,强调多技术融合,实现监测数据与治理过程的联动,治理技术与修复技术的协同,提升技术应用的整体效能。

例如,将物联网监测技术与智能化治理技术融合,实现监测数据对治理过程的实时调控,根据监测数据的变化,自动调整治理工艺与运行参数,提升治理精准度;将纳米技术与生物技术融合,实现难降解污染物的高效降解与水体生态修复的协同推进;将大数据分析技术与环境评价技术融合,实现对污染治理效果的精准评估与治理方案的智能优化。技术体系的重构,不仅提升了单一技术的应用效能,更实现了技术之间的协同互补,推动环境工程技术向精准化、高效化、绿色化转型。

相关研究指出,技术体系的重构需要结合技术发展趋势与环境治理需求,注重核心技术的创新与突破,同时加强技术成果的转化与应用,避免技术与实际应用脱节。当前,我国环境工程领域的技术创新仍存在“重研发、轻转化”的问题,部分先进技术难以落地应用,需要通过完善技术转化机制、加强产学研合作,推动技术成果从实验室走向实际应用,真正发挥技术创新对范式变革的支撑作用。

（二）管理模式的智能化与协同化转型

管理模式的优化是环境工程范式变革的重要保障,从传统的人工管理、分散管理向智能化管理、协同化管理转型,构建“智能化管控、协同化联动、精准化决策”的新型管理模式。传统环境工程管理模式存在管理效率低、协同性差、决策主观性强等问题,难以适应复杂水环境治理的需求,而新技术的应用,为管理模式的优化提供了可能。

智能化管理模式以大数据、人工智能、物联网技术为核心,实现环境工程全流程的自动化监测、智能化调控与科学化决策。例如,构建智能化环境管理平台,整合多源监测数据,通过人工智能算法实现对污染趋势的精准预测、污染隐患的提前预警、治理方案的智能优化,提升管理效率与决策科学性;通过物联网技术实现对治理设备、监测点位的远程管控,减少人工干预,降低管理成本。协同化管理模式则强调打破部门之间、区域之间的管理壁垒,建立跨部门、跨区域的协同管控机制,实现监测数据共享、治理资源整合、治理行动协同。

例如,在流域水环境治理中,建立跨区域的协同管理机制,实现流域内各地区、各部门的监测数据共享、治理方案协同、应急处置联动,提升流域污染治理的整体效能;在工业废水治理中,建立环保部门、企业、科研机构的协同机制,

加强企业污染排放管控、技术指导与成果转化，推动工业废水治理向精准化、资源化转型。管理模式的智能化与协同化转型，不仅提升了环境工程的管理效率，更实现了治理资源的优化配置，推动环境工程向系统治理、协同治理转型。

三、范式变革面临的挑战与实践路径

新技术革命驱动下的环境工程范式变革，是一个长期、复杂的系统工程，在推进过程中面临着技术、人才、制度等多方面的挑战，需要结合实际情况，制定科学合理的实践路径，确保范式变革顺利推进、落地见效。这些挑战既包括技术层面的瓶颈，也包括人才、制度层面的制约，需要统筹兼顾、协同破解，推动环境工程范式变革持续深入。

技术层面的挑战主要体现在核心技术创新不足、技术融合应用不够、技术成果转化率偏低等方面。当前，我国环境工程领域的部分核心技术仍依赖进口，自主创新能力不足，尤其是在高端监测设备、纳米材料、人工智能算法等方面，与发达国家存在差距；新技术的融合应用仍处于初级阶段，多技术协同应用的机制不够完善，难以充分发挥技术的协同效能；技术成果转化机制不健全，产学研结合不够紧密，部分先进技术难以落地应用，无法真正转化为治理效能。

人才层面的挑战主要体现在复合型人才短缺、人才培养体系不完善等方面。环境工程范式变革需要一支兼具环境工程技术、信息技术、管理科学等多方面知识的复合型人才队伍，而当前我国环境工程领域的人才培养仍以传统环境工程技术为主，缺乏对新技术、新方法的系统培训，导致复合型人才短缺，难以满足范式变革的需求；人才激励机制不完善，难以吸引优秀的信息技术、高端技术人才投身环境工程领域，制约了技术创新与范式变革的推进。

也有观点指出，制度层面的挑战主要体现在相关法律法规不完善、政策支持力度不足、标准体系不健全等方面。新技术驱动下的环境工程范式变革，需要完善的法律法规与政策支持，而当前我国相关法律法规仍滞后于技术发展，对新技术的应用、数据安全、责任界定等方面的规定不够明确；政策支持力度不足，对技术创新、成果转化、人才培养的扶持政策不够完善，难以激发市场主体的创新活力；标准体系不健全，缺乏针对新技术应用的环境标准、技术标准，导致新技术应用缺乏规范指引。

针对上述挑战，推进环境工程范式变革的实践路径，需从技术创新、人才培

养、制度完善三个方面发力，协同推进。首先，强化核心技术创新，加大对高端监测技术、纳米技术、人工智能技术等核心领域的研发投入，支持企业、科研机构开展技术创新，突破技术瓶颈，提升自主创新能力；加强多技术融合应用，完善技术协同机制，推动监测技术、治理技术、修复技术与新技术的深度融合，提升技术应用效能；完善技术成果转化机制，加强产学研合作，建立技术成果转化平台，推动技术成果从实验室走向实际应用。

其次，加强复合型人才培养，优化人才培养体系，调整人才培养方案，增加信息技术、管理科学等相关内容，培养兼具环境工程技术与新技术应用能力的复合型人才；加强人才培训，定期组织从业人员开展新技术、新方法的培训，提升其专业能力与综合素质；完善人才激励机制，加大对优秀人才的扶持力度，吸引高端技术人才、复合型人才投身环境工程领域，为范式变革提供人才支撑。

最后，完善相关制度体系，加快修订完善相关法律法规，明确新技术应用的规范要求、数据安全责任、环境责任等，为范式变革提供法律保障；加大政策支持力度，出台针对性的扶持政策，鼓励企业开展技术创新与新技术应用，加大对人才培养、技术转化的投入；健全标准体系，制定针对新技术应用的环境标准、技术标准，规范新技术的应用流程，确保新技术应用的科学性与规范性。

新技术革命驱动下的环境工程范式变革，是新时代环境工程高质量发展的必然趋势，也是应对复杂水环境问题、推动生态文明建设的重要举措。随着新技术的不断发展与应用，环境工程将逐步实现智能化、精准化、协同化、资源化转型，打破传统治理模式的局限，提升污染治理效能与可持续性。尽管在推进过程中面临诸多挑战，但通过强化技术创新、加强人才培养、完善制度体系，必将推动环境工程范式实现根本性变革，为水污染防治工作提供更有力的支撑，推动水环境质量持续改善，助力美丽中国建设。

第二节 面向碳中和的环境工程协同路径与资源化

全球气候变化背景下，碳中和已成为各国可持续发展的核心战略目标，也是我国生态文明建设的重要引领方向。水环境治理作为生态环境保护的关键组成部分，与碳中和目标存在天然的协同性——水环境中的碳循环的是全球碳循环的重要分支，而传统环境工程在水污染防治过程中，既可能产生额外的碳排放，也蕴

含着巨大的碳减排与碳固定潜力。面向碳中和目标，环境工程不能再局限于“末端治理”的单一导向，亟需重构发展路径，推动水环境治理与碳减排、碳固定、资源循环利用深度协同，实现“治污、减碳、资源化”三位一体的发展模式。已有研究表明，科学的环境工程协同路径设计，可在提升水污染治理效能的同时，降低单位治理能耗 30% 以上，同步实现污染物削减与碳减排的双重目标，为碳中和目标的实现提供重要支撑。

当前，我国环境工程在碳中和协同发展方面仍面临诸多瓶颈。传统污水处理、污泥处置、水体修复等工艺多以“达标排放”为核心目标，忽视了碳减排潜力的挖掘，部分高能耗工艺（如传统活性污泥法、污泥焚烧处置）反而增加了碳排放压力；水环境治理与碳循环的协同机制尚未建立，治污与减碳、资源化之间存在脱节现象，未能形成“污染治理—资源回收—碳固定”的闭环体系；资源化利用水平偏低，污水处理产生的污泥、再生水等资源未能得到高效利用，造成碳资源的浪费。这些问题的存在，制约了环境工程与碳中和目标的协同推进，也限制了水环境治理的可持续性。

面向碳中和的环境工程协同发展，核心是立足水环境碳循环规律，以“减碳、固碳、资源化”为导向，优化工艺技术路径，构建多维度协同体系，推动环境工程从“治污优先”向“治污与减碳协同、治理与资源化并重”转变。这一转变不仅需要技术层面的创新升级，还需要政策、管理、产业等多方面的协同配合，实现环境效益、碳效益与经济效益的有机统一。部分研究倾向于认为，碳中和目标将推动环境工程进入“协同化、资源化、低碳化”的新阶段，成为破解水环境治理与碳减排矛盾的关键抓手。

一、环境工程与碳中和的协同机理及核心内涵

环境工程与碳中和的协同，本质上是通过优化水环境治理的全流程，实现污染物削减与碳循环调控的双向促进。水环境系统本身具有一定的碳固定能力，水生植物的光合作用、微生物的碳代谢过程，均可实现大气中二氧化碳的吸收与固定；而科学的环境工程干预，能够强化这一过程，同时减少治理过程中的碳排放，推动水环境治理从“碳源”向“碳汇”转变。这种协同关系并非单向的治污服务于减碳，而是相互支撑、相互赋能——减碳措施能够推动环境工程工艺的绿色升级，提升治理效能；而高效的水环境治理，能够改善水体生态功能，增强水体碳

汇能力，为碳中和目标提供支撑。

（一）水环境治理中的碳源与碳汇特征

水环境系统中的碳源与碳汇，是环境工程与碳中和协同的核心载体。从碳源来看，水环境中的碳排放主要来源于三个方面：一是污水处理过程中的能耗排放，包括水泵、曝气设备、污泥处置等环节的能源消耗，这是环境工程最主要的碳源；二是污染物降解过程中的微生物代谢排放，如污水中有机污染物降解过程中产生的甲烷、二氧化碳等温室气体；三是污泥填埋、焚烧等处置方式产生的碳排放，其中污泥厌氧发酵产生的甲烷是重要的温室气体来源。

从碳汇来看，水环境系统的碳汇能力主要体现在水体自身的碳固定与碳储存。水生植物（如沉水植物、挺水植物）通过光合作用吸收大气中的二氧化碳，转化为生物量并储存于水体与沉积物中；微生物的固碳作用则可将水体中的无机碳转化为有机碳，实现碳的长期储存。此外，湿地生态系统作为重要的“碳库”，其土壤与植被能够大量储存碳，通过湿地修复工程强化湿地碳汇功能，是环境工程助力碳中和的重要路径。相关研究指出，健康的湖泊、河流生态系统，其碳汇能力可抵消区域内部分工业与生活碳排放，成为区域碳中和的重要补充。

明确水环境治理中的碳源与碳汇特征，是构建协同路径的前提。环境工程的协同发展，核心就是通过工艺优化减少碳源排放，通过生态修复强化碳汇能力，实现碳源与碳汇的平衡调控。

（二）环境工程与碳中和协同的核心内涵

面向碳中和的环境工程协同，核心内涵体现在三个层面：一是低碳化治理，通过工艺创新、节能改造，降低水环境治理全流程的碳排放，推动传统高能耗工艺向低碳工艺转型；二是资源化循环，将污水处理、污泥处置过程中产生的资源（如再生水、沼气、污泥有机肥）进行高效利用，实现“变废为宝”，减少资源浪费与碳排放；三是生态化固碳，通过水体生态修复、湿地建设等工程，强化水环境系统的碳汇能力，提升水体固碳效率。

这三个层面相互关联、有机统一。低碳化治理是基础，能够从源头减少碳排放；资源化循环是核心路径，能够实现碳资源的回收利用，降低碳足迹；生态化固碳是重要补充，能够进一步提升环境工程的碳效益。与传统环境工程相比，面向碳中和的协同发展模式，更注重全流程的碳管控，更强调治理与资源、生态的协同，实现“治污、减碳、护生态”的多重目标。也有观点指出，这种协同模式

将成为未来环境工程的核心发展方向，推动环境治理从“被动应对”向“主动赋能”转变。

二、面向碳中和的环境工程协同路径

构建面向碳中和的环境工程协同路径，需立足水环境治理的全流程，从工艺优化、资源化利用、生态修复三个维度发力，同时强化政策、技术、管理的协同保障，实现治污与减碳的深度融合。协同路径的设计需兼顾科学性与可行性，既要符合碳中和目标要求，也要适配我国水环境治理的实际需求，避免脱离实际的技术堆砌与路径设计。

（一）低碳化工艺优化：降低治理过程碳排放

工艺优化是环境工程实现碳减排的核心抓手，重点是对传统污水处理、污泥处置工艺进行低碳改造，减少能源消耗与温室气体排放。污水处理工艺的低碳优化，核心是提升处理效率、降低能耗，优先采用低碳高效的处理技术。例如，将传统活性污泥法改造为缺氧-好氧（A/O）、厌氧-缺氧-好氧（A²/O）等节能工艺，减少曝气设备的能耗；推广膜生物反应器（MBR）、高效沉淀等紧凑式工艺，缩短处理流程，降低占地面积与能耗。

污泥处置的低碳化改造，是减少环境工程碳排放的关键环节。传统污泥填埋、焚烧方式碳排放较高，且易造成二次污染。应优先推广污泥厌氧消化工艺，通过微生物代谢将污泥中的有机物质转化为沼气（主要成分为甲烷），沼气可作为清洁能源回收利用，实现污泥的能源化转化；对于厌氧消化后的污泥，可进一步进行堆肥处理，生产有机肥，实现污泥的资源化利用，同时减少污泥填埋、焚烧带来的碳排放。已有研究表明，污泥厌氧消化结合沼气回收利用，可降低污泥处置环节碳排放 60% 以上，同时实现能源回收，具有显著的碳效益与经济效益。

此外，还应加强污水处理厂的节能改造，推广太阳能、风能等可再生能源的应用，替代传统化石能源，进一步降低治理过程的碳排放。例如，在污水处理厂屋顶铺设太阳能光伏板，为厂区设备供电；利用污水处理过程中产生的余热进行供暖，实现能源的循环利用。

（二）资源化循环利用：实现碳资源高效回收

资源化循环利用是环境工程与碳中和协同的核心路径，能够实现“治污、减碳、资源化”的多重效益，推动水环境治理从“消耗资源”向“创造价值”转变。

资源化利用的重点的是污水、污泥、沼气等资源的回收利用，构建闭环循环体系。

再生水的资源化利用，是实现水资源循环与碳减排的重要举措。再生水可广泛应用于工业生产、农业灌溉、城市绿化、河道补水等领域，替代新鲜水资源，减少水资源开采带来的能源消耗与碳排放。例如，工业企业使用再生水替代自来水进行生产，可减少自来水开采、输送过程中的能耗；农业灌溉使用再生水，可减少农业水资源消耗，同时利用再生水中的氮、磷等营养物质，减少化肥使用，降低农业生产中的碳排放。相关研究指出，再生水回用率每提升 10%，可减少区域水资源消耗 15% 以上，同时降低相应的碳排放。

污泥与沼气的资源化利用，是实现碳资源回收的关键。除了污泥厌氧消化产生的沼气可作为清洁能源利用外，污泥堆肥生产的有机肥，可替代化肥应用于农业生产，减少化肥生产过程中的碳排放；污泥中的重金属经过无害化处理后，可用于建筑材料、道路铺设等领域，实现污泥的资源化处置。此外，污水处理过程中产生的磷、氮等营养物质，可通过专门的回收工艺提取，生产缓释肥，实现营养物质的循环利用，同时减少水体富营养化风险。

（三）生态化固碳修复：强化水环境碳汇能力

生态化固碳修复是环境工程助力碳中和的重要补充，通过水体生态系统修复，强化水环境的碳汇功能，实现碳的长期储存。生态修复的重点是河流、湖泊、湿地等水体生态系统的恢复与重建，提升水体的固碳能力。

河流、湖泊生态修复方面，可通过河道清淤、水生植物种植、曝气增氧等措施，改善水体水质，恢复水体生态功能。水生植物的种植是强化水体固碳的核心手段，选择芦苇、香蒲、沉水植物等固碳能力强的物种，构建水生植物群落，通过光合作用吸收大气中的二氧化碳，转化为生物量储存于水体与沉积物中。同时，水生植物还能够吸附水体中的污染物，提升水体自净能力，实现“治污与固碳”的协同。

湿地生态系统修复与建设，是提升区域碳汇能力的重要途径。湿地具有强大的碳储存能力，其土壤中的有机碳储量占全球土壤有机碳储量的 15%-30%。通过湿地修复工程，恢复湿地的水文条件、植被覆盖，提升湿地的碳汇能力；同时，新建人工湿地，用于污水处理与碳固定，实现“治污、固碳、生态保护”的协同。例如，在河流入湖口、污水处理厂尾水排放口建设人工湿地，利用湿地的净化功能处理污水，同时通过湿地植被与土壤实现碳固定。

三、协同发展的保障措施与未来展望

面向碳中和的环境工程协同发展，离不开政策、技术、管理、产业等多方面的保障。当前，我国环境工程的协同发展仍处于初步阶段，需要通过完善政策体系、强化技术创新、优化管理模式、推动产业协同，为协同路径的落地提供有力支撑。

政策层面，应完善碳中和与水环境治理协同的政策体系，将碳减排指标纳入环境工程的评价体系，建立“治污+减碳”双重考核机制；出台财政补贴、税收优惠等激励政策，鼓励企业推广低碳工艺、开展资源化利用与生态修复；加强跨部门协同，推动环保、发改、水利、农业等部门联动，统筹推进水环境治理与碳中和工作。技术层面，应加大低碳环保技术的研发投入，重点突破污泥厌氧消化、再生水深度处理、水体固碳修复等核心技术，提升技术的成熟度与经济性；加强产学研合作，推动技术成果的转化应用，为协同发展提供技术支撑。

管理层面，应优化环境工程的管理模式，建立全流程碳管控体系，对污水处理、污泥处置等环节的碳排放进行监测、核算与管控；加强对环境工程从业人员的培训，提升其低碳环保意识与技术应用能力；完善监测网络，实现水环境质量与碳排放的同步监测，为协同决策提供数据支撑。产业层面，应推动环境工程产业向低碳化、资源化转型，培育一批专注于低碳环保技术研发、资源化利用的企业；推动环境工程与新能源、农业、工业等产业的协同融合，构建“环境治理+新能源+资源化”的产业模式，提升协同发展的经济效益与可持续性。

面向未来，随着碳中和目标的不断推进，环境工程的协同发展将呈现更加多元化、智能化的趋势。大数据、人工智能等现代技术将与环境工程深度融合，实现工艺优化、碳排放量核算、碳汇能力评估的智能化，提升协同发展的精准度与效率；跨区域、跨流域的协同治理将成为常态，推动水环境治理与碳减排的全域协同；资源化利用将向深度化、多元化发展，实现污水、污泥等资源的全价值利用。

环境工程作为水污染防治的核心手段，其与碳中和的协同发展，不仅能够提升水环境治理效能，还能够为碳中和目标的实现提供重要支撑，推动生态环境保护与经济社会可持续发展的协同推进。在这一过程中，需始终坚持“因地制宜、科学施策”的原则，结合不同区域的水环境特征与碳减排需求，优化协同路径，

避免“一刀切”的发展模式；同时，持续加强技术创新与管理优化，推动环境工程实现“治污、减碳、资源化”的三位一体发展，为我国生态文明建设与碳中和目标的实现提供有力保障。

第三节 应对复杂风险的韧性环境系统构建

全球环境变化与人类活动的深度交织，使得水环境系统面临的风险呈现出复杂性、突发性、关联性与不确定性的显著特征，传统单一维度、被动应对的环境治理模式，已难以适应复杂风险防控的现实需求。韧性环境系统的构建，作为环境工程未来发展的核心方向之一，本质上是通过系统化的设计、协同化的管理与动态化的调控，提升水环境系统抵御、适应各类复杂风险的能力，实现风险发生前的精准预警、发生中的高效处置与发生后的快速恢复，最终保障水环境系统的长期稳定与可持续运行。已有研究表明，韧性环境系统并非简单的“抗风险”系统，而是能够在风险扰动下保持自身结构与功能完整性，同时具备自我调节、自我修复与自适应进化能力的复杂系统，其构建需要整合环境工程、生态学、风险管理、信息技术等多学科理论与技术，形成全方位、多层次的风险防控与系统优化体系。

当前，水环境系统面临的复杂风险呈现出多元化、复合型的发展态势，既包括传统的工业废水、农业面源污染等常规风险，也涵盖了突发环境事件、极端气候影响、新型污染物扩散等非常规风险，这些风险相互交织、相互影响，进一步加剧了水环境治理的难度。从风险来源来看，工业生产过程中重金属、难降解有机污染物的泄漏，农业生产中农药化肥的过量使用与流失，以及城市生活污水的无序排放，仍是水环境常规风险的主要来源，这类风险具有排放量大、影响范围广、治理周期长的特点，长期累积会导致水体水质恶化、生态功能退化，甚至威胁饮用水安全与人体健康。而突发环境事件，如化工企业废水泄漏、油轮溢油、危险化学品泄漏等，具有突发性强、危害程度高、扩散速度快的特征，一旦发生，会对周边水环境、土壤环境造成严重破坏，且恢复难度大、成本高。

极端气候事件的频发，进一步加剧了水环境系统的风险压力。全球气候变暖导致的暴雨、洪涝、干旱等极端天气，不仅会影响水环境监测网络的正常运行，导致监测数据失真、预警失效，还会加剧水体富营养化、水土流失等问题——暴

雨洪涝会携带大量地表污染物进入水体，导致水质急剧恶化；干旱则会导致水体水量减少、稀释能力下降，污染物浓度升高，同时影响污水处理设施的正常运行。此外，新型污染物的不断出现，如微塑料、药品和个人护理品（PPCPs）、全氟和多氟烷基物质（PFAS）等，这类污染物具有难降解、易迁移、生物累积性强的特点，传统污水处理工艺难以有效去除，其长期存在会对水环境生态系统与人类健康造成潜在风险，成为水环境系统面临的新型复杂风险。

一、韧性环境系统的核心内涵与构建原则

韧性环境系统的核心内涵，在于“韧性”与“系统”的有机融合，其核心目标是提升水环境系统应对各类复杂风险的综合能力，实现“抗扰动、能恢复、可进化”的发展目标。与传统环境治理系统相比，韧性环境系统更注重系统性、动态性与协同性，不再局限于单一污染物的治理或单一风险的防控，而是强调从系统整体出发，统筹考虑各类风险的相互作用，构建全方位的风险防控与系统修复体系。部分研究倾向于认为，韧性环境系统的核心特征包括三个方面：一是抵御能力，即系统在风险扰动下保持自身结构与功能稳定的能力；二是适应能力，即系统根据风险变化及时调整自身结构与功能，降低风险影响的能力；三是恢复能力，即系统在风险发生后快速恢复到正常状态，甚至实现功能升级的能力。

韧性环境系统的构建，需遵循系统性、协同性、动态性、前瞻性四大核心原则。系统性原则要求打破部门、区域与学科之间的壁垒，将水环境系统视为一个有机整体，统筹考虑水质、水量、生态、管理等多个维度，实现风险防控与系统优化的全面覆盖；协同性原则强调政府、企业、科研机构、公众等多方主体的协同参与，形成“政府主导、企业主体、科研支撑、公众参与”的协同治理格局，共同推进韧性环境系统的构建与运行；动态性原则要求根据风险变化与技术发展，及时调整系统构建方案与管理策略，实现系统韧性的动态提升；前瞻性原则则要求充分考虑未来环境变化、技术进步与社会需求，提前布局风险防控设施与技术储备，提升系统应对未知风险的能力。

（一）韧性环境系统的核心构成要素

韧性环境系统的构建，需要依托四大核心构成要素，分别是风险识别与预警要素、技术支撑要素、管理协同要素与生态保障要素，四大要素相互关联、相互支撑，共同构成韧性环境系统的完整体系。风险识别与预警要素是韧性环境系统

的基础，其核心功能是精准识别水环境系统面临的各类常规与非常规风险，建立科学的风险评估体系与精准的预警机制，实现风险的早发现、早预警、早处置，为系统应对风险提供科学依据。

技术支撑要素是韧性环境系统的核心驱动力，涵盖了污染治理技术、风险防控技术、监测预警技术、智能调控技术等多个领域。其中，污染治理技术的升级的是提升系统韧性的关键，需重点发展高效、节能、低成本的新型污染治理技术，如新型膜分离技术、高级氧化技术、生物强化技术等，提高对难降解污染物、新型污染物的去除效率；风险防控技术则聚焦于突发环境事件的应急处置，如应急隔离、快速处理、污染拦截等技术，提升系统应对突发风险的能力；监测预警技术的优化则注重全方位、高精度、实时化的监测网络构建，结合大数据、人工智能等技术，实现风险的精准监测与智能预警。

管理协同要素是韧性环境系统有序运行的保障，需要建立完善的管理制度、协同机制与责任体系。一方面，需完善相关法律法规与标准体系，明确各方主体在风险防控与系统构建中的责任与义务，规范各类环境行为；另一方面，需建立跨区域、跨部门的协同治理机制，加强不同区域、不同部门之间的信息共享、资源调配与协同处置，提升风险应对的协同性与高效性。此外，还需加强公众参与，通过环境教育、信息公开等方式，提高公众的环境风险意识与参与积极性，形成全民参与的风险防控格局。

生态保障要素是韧性环境系统的基础支撑，其核心是通过生态修复与生态保护，提升水环境系统的自然韧性。水环境系统的自然韧性，是指系统依靠自身生态功能实现自我调节、自我修复的能力，这种能力的提升，需要通过湿地修复、水生生物多样性保护、河岸带生态治理等方式，恢复水环境生态系统的结构与功能，增强系统对污染物的净化能力与对风险的抵御能力。例如，通过构建人工湿地、生态氧化塘等生态设施，利用水生植物、微生物的协同作用，不仅能够有效净化水质，还能够调节水量、涵养水源，提升系统的生态韧性，为应对复杂风险提供自然支撑。

二、应对复杂风险的韧性环境系统构建路径

韧性环境系统的构建是一个长期、复杂的系统工程，需要结合我国水环境治理的实际需求，从风险识别与预警、技术创新与应用、管理协同与优化、生态修

复与保护四个方面,构建全方位、多层次的构建路径,实现系统韧性的持续提升。其中,精准的风险识别与科学的预警机制,是韧性环境系统构建的前提,只有准确掌握各类风险的来源、特征与影响范围,才能制定针对性的防控措施,提升系统应对风险的主动性。

在风险识别与预警体系构建方面,需建立多维度、全方位的风险识别机制,整合水环境监测数据、工业企业排污数据、气象数据、水文数据等多源数据,结合大数据、人工智能等技术,实现对常规风险与非常规风险的精准识别。同时,建立科学的风险评估体系,结合风险发生的概率、影响范围、危害程度等因素,对各类风险进行分级分类评估,明确风险防控的重点区域与重点环节。在此基础上,构建智能预警机制,利用实时监测数据与风险评估结果,实现对风险的实时监测、动态预警,及时发布预警信息,为风险处置提供充足的时间与科学依据。例如,针对突发环境事件,可建立快速预警模型,结合实时监测数据与地理信息系统(GIS),精准预测污染扩散路径与影响范围,为应急处置提供精准指导。

(二) 技术创新与应用:提升系统风险应对能力

技术创新与应用是提升韧性环境系统风险应对能力的核心支撑,需聚焦复杂风险防控的关键技术瓶颈,加强技术研发与成果转化,推动污染治理技术、应急处置技术、监测预警技术的升级迭代。在污染治理技术方面,重点研发针对新型污染物、难降解污染物的高效处理技术,如高级氧化技术与生物处理技术的耦合工艺,提高污染物的去除效率;同时,推广节能、低碳、资源化的治理技术,实现污染治理与资源回收的协同推进,提升系统的综合效能。相关研究指出,新型膜分离技术、光催化氧化技术等新型污染物处理中具有显著优势,能够有效去除水中的微塑料、PPCPs等污染物,可作为韧性环境系统污染治理的核心技术之一。

在应急处置技术方面,加强突发环境事件应急处理技术的研发与储备,重点发展快速拦截、高效降解、应急修复等技术,提升突发风险的处置效率。例如,研发可移动应急处理设备,实现突发污染事件的快速响应与现场处理;开发污染拦截技术,防止污染物扩散,降低污染影响范围;研究应急修复技术,加快受污染水体、土壤的恢复速度,减少污染造成的长期影响。同时,加强技术集成与应用,构建“监测-预警-处置-修复”一体化的技术体系,实现风险应对的全流程覆盖。

在监测预警技术方面,优化水环境监测网络布局,构建“天空地水”一体化

的监测体系,结合遥感技术、无人机监测、在线自动监测等多种监测手段,实现对水环境系统的全方位、实时化监测。同时,利用大数据、人工智能等技术,对监测数据进行深度分析与挖掘,实现风险的精准识别与智能预警,提升预警的准确性与及时性。例如,通过构建机器学习模型,对监测数据进行分析,预测水质变化趋势与风险发生概率,为风险防控提供科学依据。

管理协同与优化,是确保韧性环境系统有序运行、高效发挥作用的关键。需建立健全跨区域、跨部门的协同治理机制,打破区域壁垒与部门分割,加强不同区域、不同部门之间的信息共享、资源调配与协同处置,形成风险防控的合力。例如,在流域水环境治理中,建立流域协同治理机制,统筹上下游、左右岸的风险防控工作,实现流域内水资源、水环境、水生态的协同保护与风险共治。同时,完善管理制度与责任体系,明确政府、企业、科研机构、公众等各方主体的责任,加强对各类环境行为的监管,严厉打击环境违法行为,确保风险防控措施落到实处。

生态修复与保护,是提升水环境系统自然韧性的根本途径,需结合区域生态环境特征,制定针对性的生态修复方案,恢复水环境生态系统的结构与功能。重点加强湿地生态系统修复、河岸带生态治理、水生生物多样性保护等工作,通过种植水生植物、投放土著微生物、修复河岸植被等方式,提升水体的自净能力与生态承载力。同时,加强生态保护红线管控,严格限制各类破坏生态环境的行为,保障水环境生态系统的完整性与稳定性。例如,在河流、湖泊周边构建生态缓冲带,减少地表污染物进入水体,同时为水生生物提供栖息地,提升系统的生态韧性。

韧性环境系统的构建,还需要注重人才培养与国际合作。人才是技术创新与系统管理的核心支撑,需加强环境工程、生态学、风险管理、信息技术等多学科人才的培养,打造一支复合型、高素质的专业队伍,为系统构建与运行提供人才保障。同时,加强国际合作与交流,借鉴国际先进的风险防控技术与管理经验,结合我国实际情况,优化韧性环境系统构建方案,提升我国水环境系统应对复杂风险的能力。

随着水环境系统面临的风险日益复杂,韧性环境系统的构建已成为环境工程未来发展的必然趋势。其构建过程不仅需要技术的创新与应用,还需要管理的协同与优化、生态的修复与保护,更需要多方主体的共同参与。通过构建韧性环境系统,能够有效提升水环境系统应对各类复杂风险的能力,保障水资源安全与生

态环境安全,推动水环境治理从“被动应对”向“主动防控”转变,为水污染防治与生态环境保护提供有力支撑,助力实现人与自然和谐共生的可持续发展目标。

第四节 未来环境工程师的知识体系与跨学科创新

随着全球水环境问题的日益复杂、新技术改革的深度渗透以及“双碳”目标的提出,环境工程领域正经历着前所未有的变革,传统环境工程的技术路径、管理模式与人才需求已难以适配未来环境治理的多元化、复杂化需求。环境工程师作为水污染防治与环境监测工作的核心实施者,其知识体系与创新能力直接决定了环境工程技术的应用效能、治理目标的实现程度,以及行业的可持续发展水平。未来环境工程师不再是单纯的技术执行者,更需成为兼具专业深度、跨学科视野、创新能力与责任担当的复合型人才,其知识体系的构建与跨学科创新能力的培养,成为推动环境工程领域高质量发展的核心支撑。已有研究表明,新时代环境工程的发展对人才的知识结构提出了更高要求,单一学科的知识储备已无法应对复杂水环境问题的治理需求,跨学科融合与创新成为环境工程人才培养的必然趋势。

未来环境工程师的知识体系构建,需立足环境工程的核心使命,以水污染防治与环境监测为核心,兼顾基础理论、专业技能与实践应用,同时融入跨学科知识与前沿技术,形成“基础扎实、专业精深、跨界融合、动态更新”的立体化知识结构。与传统环境工程师相比,未来环境工程师的知识体系更强调综合性与前瞻性,既要掌握环境工程的核心理论与技术,也要了解相关学科的基础理论与应用方法,更要具备适应行业变革的终身学习能力。这种知识体系的构建并非简单的知识叠加,而是要实现各学科知识的有机融合,形成能够解决复杂环境问题的知识合力,这也是未来环境工程人才与传统人才的核心区别所在。

一、未来环境工程师知识体系的核心构成

未来环境工程师的知识体系以“环境工程核心知识”为基础,以“跨学科支撑知识”为拓展,以“实践应用知识”为导向,以“前沿创新知识”为引领,四大模块相互关联、相互支撑,共同构成完整的知识框架。这一知识体系既保留了环境工程专业的核心特质,又兼顾了行业发展的前沿需求,能够有效支撑未来环境工程师应对复杂水环境问题、推动技术创新与行业进步。需要明确的是,知识

体系的构建并非一成不变，而是要随着环境工程领域的技术变革、政策调整与社会需求，进行动态更新与优化，确保知识的实用性与前瞻性。

（一）环境工程核心专业知识

核心专业知识是未来环境工程师的立身之本，也是开展水污染防治与环境监测工作的基础，主要涵盖环境工程原理、水污染防治技术、环境监测技术、环境管理等核心内容。这部分知识要求未来环境工程师具备扎实的理论基础，能够熟练掌握水污染防治的核心技术与环境监测的基本方法，明确各类水环境问题的治理路径与技术要点。

环境工程原理是核心知识的基础，包括水污染控制原理、水体自净原理、生态修复原理等，要求未来环境工程师能够从理论层面理解水污染的形成机制、迁移转化规律，以及污染治理的基本原理，为技术选择与方案设计提供理论支撑。水污染防治技术是核心知识的核心，涵盖物理化学处理技术、生物技术、生态修复技术等，未来环境工程师需熟练掌握各类技术的适用范围、技术特点、操作流程与优化方法，能够根据不同的水污染类型、水质状况与治理目标，选择合适的治理技术，设计科学合理的治理方案。例如，针对工业重金属废水，需掌握重金属的迁移转化规律与吸附、沉淀、膜分离等处理技术；针对农村面源污染，需了解生态拦截、人工湿地等技术的应用要点。

环境监测技术是核心知识的重要组成部分，包括常规监测指标的检测方法、现代监测技术的应用、监测数据的分析与解读等，未来环境工程师需具备较强的监测技术应用能力，能够熟练操作各类监测仪器，开展水环境监测工作，准确分析监测数据，为污染治理与环境评价提供可靠依据。环境管理知识则包括环境法律法规、环境标准、环境规划、项目管理等内容，要求未来环境工程师熟悉国家与地方的环境政策与标准，能够规范开展环境工程项目的设计、施工与运营管理，确保项目的合规性与效能性。部分研究倾向于认为，核心专业知识的扎实程度，直接决定了未来环境工程师的专业素养与工作能力，是开展跨学科创新与实践应用的基础。

（二）跨学科支撑知识

跨学科支撑知识是未来环境工程师突破专业局限、应对复杂环境问题的关键，主要涵盖化学、生物学、生态学、计算机科学、管理学、经济学等相关学科的基础理论与应用知识。随着环境工程领域的不断发展，水污染防治与环境监测已不

再是单一学科的问题，而是涉及多学科交叉融合的系统工程，需要未来环境工程师具备跨学科的思维与知识储备。

化学与生物学知识是环境工程的基础支撑，未来环境工程师需掌握有机化学、无机化学、分析化学等化学知识，理解污染物的化学性质、反应机理，为污染治理技术的研发与应用提供支撑；掌握微生物学、生态学等生物学知识，了解水体生态系统的结构与功能，以及微生物在水污染治理中的应用，推动生态修复技术的创新与应用。生态学知识的融入，能够帮助未来环境工程师从生态系统的角度开展水污染治理，实现“治污”与“护生态”的协同推进，这也是未来环境工程发展的重要方向。

计算机科学与信息技术知识是未来环境工程师的重要能力支撑，随着大数据、人工智能、物联网等技术在环境工程领域的广泛应用，未来环境工程师需掌握数据处理、模型构建、在线监测系统运维等相关知识，能够利用信息技术优化监测方案、分析污染数据、预警环境风险，提升环境治理的智能化水平。例如，利用大数据技术分析流域水环境监测数据，识别污染来源与变化趋势；利用人工智能技术优化污水处理工艺参数，提升处理效率与水质达标率。

管理学与经济学知识则能够帮助未来环境工程师更好地开展项目管理与资源优化配置，掌握环境工程项目的成本控制、进度管理、风险防控等方法，了解环境治理的经济效益与社会效益，推动环境工程的市场化、规范化发展。此外，未来环境工程师还需具备一定的法律知识与沟通协调能力，能够应对环境工程实施过程中的各类法律问题，协调各方主体的利益，推动项目顺利实施。也有观点指出，跨学科知识的融合程度，决定了未来环境工程师的创新能力和解决复杂问题的能力，是区别于传统环境工程师的核心特质之一。

（三）实践应用与前沿创新知识

实践应用知识是未来环境工程师将理论知识转化为实际工作能力的关键，主要涵盖环境工程项目设计、施工、运营、监测等环节的实践技能，以及案例分析、问题解决等相关知识。未来环境工程师需具备较强的实践能力，能够将核心专业知识与跨学科知识应用于实际工作中，解决水污染防治与环境监测中的各类实际问题，避免“纸上谈兵”。

实践应用知识的培养，需要未来环境工程师积累丰富的工程实践经验，熟悉环境工程项目的全流程管理，掌握技术操作、质量控制、安全管理等实践技能。

例如，在污水处理厂项目中，能够参与工艺设计、设备选型、施工监管与运营维护，及时解决运营过程中出现的水质波动、设备故障等问题；在环境监测工作中，能够规范开展采样、检测、数据分析等工作，确保监测数据的准确性与可靠性。同时，未来环境工程师还需具备案例分析能力，能够总结各类环境工程案例的经验与教训，为后续项目的实施提供参考。

前沿创新知识是未来环境工程师引领行业发展的核心动力，主要涵盖环境工程领域的前沿技术、政策趋势与发展方向，如碳中和背景下的资源化技术、新型环境监测技术、智慧环保技术等。未来环境工程师需密切关注行业前沿动态，及时学习与掌握前沿技术与理念，具备创新思维与创新能力，能够推动技术创新、工艺优化与管理模式创新。例如，关注新型膜分离技术、高级氧化技术的研发与应用，推动水污染治理技术的升级迭代；了解“双碳”目标对环境工程的要求，探索环境治理与碳减排协同的路径与方法。

当前，我国未来环境工程师知识体系的构建仍面临一些挑战。部分高校的环境工程专业人才培养模式仍停留在传统层面，过于注重核心专业知识的传授，忽视了跨学科知识的融入与实践能力的培养；行业内的人才培训体系不够完善，难以满足现有从业人员知识更新与能力提升的需求；部分环境工程师缺乏终身学习意识，难以适应行业的快速变革与前沿技术的发展。这些问题的存在，制约了未来环境工程师队伍的建设与行业的高质量发展。

二、未来环境工程师的跨学科创新能力培养路径

跨学科创新能力是未来环境工程师的核心竞争力，也是推动环境工程领域技术进步与模式创新的关键。跨学科创新能力的培养，并非简单的跨学科知识学习，而是要实现知识的融合应用、思维的跨界突破，形成能够解决复杂环境问题的创新能力。未来环境工程师的跨学科创新能力，主要包括知识融合能力、思维创新能力、实践创新能力与协同创新能力四个方面，其培养需要立足人才培养体系、行业实践与社会需求，构建多元化的培养路径。

（一）优化人才培养体系，推动跨学科知识融合

高校作为环境工程人才培养的核心阵地，需优化人才培养体系，打破学科壁垒，推动跨学科知识的融合传授。在课程设置方面，应在保留环境工程核心专业课程的基础上，增设化学、生物学、计算机科学、管理学等相关学科的选修课程，

构建跨学科的课程体系,让学生系统学习跨学科知识,培养跨学科思维。例如,增设大数据分析、生态修复、环境经济学等课程,提升学生的跨学科知识储备。

同时,应创新教学模式,采用项目式教学、案例教学、跨学科团队协作等教学方法,引导学生将不同学科的知识融合应用于实际项目中,培养学生的知识融合能力与问题解决能力。例如,以流域水污染治理为项目主题,组织环境工程、生态学、计算机科学等专业的学生组成团队,共同完成方案设计、监测分析、效果评估等工作,让学生在实践中实现跨学科知识的融合应用。此外,高校还应加强与企业、科研机构的合作,引入行业前沿技术与实践案例,提升人才培养的针对性与实用性,确保学生掌握的知识与行业需求接轨。

(二) 强化实践锻炼,提升实践创新能力

实践是培养跨学科创新能力的重要途径,未来环境工程师的跨学科创新能力,必须在实践中不断积累与提升。一方面,应加强高校与企业的合作,建立实践教学基地,让学生深入环境工程一线,参与项目设计、施工、运营、监测等全过程,积累实践经验,提升实践技能。例如,组织学生到污水处理厂、环境监测站、环保企业实习,参与实际项目的运作,了解行业现状与技术需求,将理论知识转化为实践能力。

另一方面,应鼓励未来环境工程师参与科研项目与技术创新活动,例如,参与水污染治理技术研发、环境监测技术创新等科研项目,在项目研究中探索跨学科的技术路径与解决方案,提升创新能力。同时,应建立健全实践创新激励机制,鼓励学生与从业人员开展创新实践,对优秀的创新成果给予表彰与推广,激发创新积极性。相关研究指出,实践锻炼能够有效提升环境工程师的跨学科创新能力,让其在解决实际问题的过程中,实现思维的突破与知识的融合。

(三) 培养跨界思维,提升思维创新能力

思维创新是跨学科创新的核心,未来环境工程师需培养跨界思维,打破专业局限,从多学科、多角度思考环境问题,探索创新的解决方案。跨界思维的培养,需要未来环境工程师主动学习跨学科知识,关注行业前沿动态,拓宽视野,避免思维固化。例如,在思考水污染治理问题时,不仅要从环境工程技术的角度出发,还要考虑生态学、经济学、管理学等方面的因素,探索“治污+生态+经济”的协同治理模式。

同时,应鼓励未来环境工程师参与跨学科交流与研讨活动,与不同学科的专

业人才交流合作,碰撞创新火花,提升思维创新能力。例如,参与环境工程与计算机科学、生态学等学科的学术研讨会,了解不同学科的研究思路与方法,借鉴其理念与技术,应用于环境工程领域的创新实践。此外,未来环境工程师还需具备批判思维与质疑精神,不局限于传统的技术路径与管理模式,勇于探索新的思路与方法,推动环境工程领域的创新发展。

(四) 加强协同合作,提升协同创新能力

未来环境工程的发展离不开多方主体的协同合作,未来环境工程师需具备较强的协同创新能力,能够与不同学科、不同领域的专业人才、企业、政府部门开展协同合作,共同推动技术创新与环境治理。协同创新能力的培养,需要未来环境工程师具备良好的沟通协调能力、团队协作能力与责任担当,能够在协同合作中发挥自身的专业优势,倾听不同观点,凝聚创新合力。

在实践中,未来环境工程师应积极参与跨学科团队、产学研合作项目,与科研机构、企业、政府部门开展深度合作,共同解决复杂水环境问题。例如,与科研机构合作开展技术研发,与企业合作推动技术成果转化,与政府部门配合落实环境政策与标准,形成“产学研用”协同创新体系。同时,未来环境工程师还需具备国际视野,关注全球环境工程领域的前沿动态,参与国际交流与合作,借鉴国际先进经验与技术,推动我国环境工程领域的创新发展。

未来环境工程师的知识体系构建与跨学科创新能力培养,是一项长期而系统的工程,需要高校、企业、政府与从业人员的协同发力。高校应优化人才培养体系,培养兼具专业深度与跨学科视野的复合型人才;企业应加强实践平台建设,为人才提供实践锻炼与创新机会;政府应完善政策支持体系,引导行业重视人才培养与创新发展;从业人员应树立终身学习意识,不断更新知识储备,提升创新能力。

随着环境工程领域的不断发展,未来环境工程师将承担起更重要的使命,不仅要解决当前的水污染问题,还要推动环境治理的可持续发展,助力“双碳”目标的实现。完善的知识体系与较强的跨学科创新能力,将成为未来环境工程师应对挑战、引领行业发展的核心支撑。唯有不断优化知识结构、提升创新能力,才能适应行业发展的需求,为水污染防治与生态环境改善提供有力的人才保障,推动我国环境工程领域实现高质量发展。

参考文献

- [1] 张波. 全球水环境现状及中国水污染治理面临的挑战[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1089-1097.
- [2] 李丽. 我国水污染主要类型、来源及防控现状[J]. 中国环境科学, 2019, 39(8): 3201-3208.
- [3] 王浩. 水污染防治的基本原理与政策体系构建[J]. 水利学报, 2020, 51(2): 135-143.
- [4] 刘敏. 环境监测在水污染防治中的核心作用与实践路径[J]. 环境监测管理和技术, 2018, 30(6): 1-5.
- [5] 陈阳. 悬浮物与浊度污染的高效控制技术研究[J]. 水处理技术, 2024, 50(11): 128-133.
- [6] Abhijit Kumar, Mishika Dadhwal, Gunjan Mukherjee, et al. Phytoremediation: Sustainable Approach for Heavy Metal Pollution[J]. Scientifica, 2024, 2024: 3909400.
- [7] 赵静. 无机化学污染（酸、碱、盐）的防治技术与应用[J]. 环境工程学报, 2021, 15(3): 821-828.
- [8] 孙涛. 新兴物理化学处理技术在水污染治理中的应用探讨[J]. 化工环保, 2022, 42(2): 145-151.
- [9] 周健. 持久性有机污染物的环境行为及生态风险评估[J]. 环境科学学报, 2020, 40(7): 2379-2388.
- [11] 吴芳. 营养盐污染与水体富营养化的防控技术研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(10): 2078-2085.
- [12] 郑强. 病原微生物污染及不同消毒技术的对比分析[J]. 中国消毒学杂志, 2021, 38(4): 298-301.
- [13] 冯娟. 生物技术在有机废水处理中的应用进展[J]. 生物工程学报, 2020, 36(5): 901-912.
- [14] 曾超, 廖伟宏, 李银波. 广州市番禺区某全地理式净水厂设计特点研究[J]. 水处理技术, 2024, 50(12): 131-135.

- [15] 王幸伟, 矫忠直, 张刚, 等. 焦化废水深度处理零排放技术的应用实例[J]. 水处理技术, 2024, 50(10): 139-142.
- [16] 李娟. 农村面源污染综合治理模式与实践[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(2): 246-253.
- [17] 张敏. 水环境修复技术与生态工程实践研究[J]. 环境工程, 2021, 39(7): 1-7.
- [18] 刘芳. 水环境监测网络设计与采样规范研究[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(3): 6-10.
- [19] 陈丽. 理化指标 (pH、DO、COD、BOD) 监测技术优化[J]. 分析测试学报, 2020, 39(8): 1021-1027.
- [20] 赵伟. 营养盐与有机污染物的实验室分析方法研究[J]. 环境化学, 2021, 40(4): 1123-1130.
- [21] 李娜. 环境监测质量保证与控制体系构建[J]. 生态环境与保护, 2024, 7(10): 102-107.
- [22] 王强. 光谱与色谱技术在污染物检测中的应用[J]. 分析试验室, 2020, 39(5): 619-626.
- [23] Sarah J, David M. Real-time bioelectronic sensing of environmental contaminants[J]. Nature, 2026, 645: 102-107.
- [24] 孙浩. 在线自动监测系统构建与运行维护技术[J]. 环境监测管理与技术, 2022, 34(2): 58-62.
- [25] 周丽. 遥感与GIS技术在大尺度水环境监测中的应用[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(3): 105-110.
- [26] 兰文辉, 安海燕. 环境水质评价方法的分析与探讨[J]. 干旱环境监测, 2002, 16(3): 167-169.
- [27] 孙现伟, 茹淑玲. 基于AI大数据模型的城市水环境质量在线监测与评估系统构建[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(9): 1271-1280.
- [28] 吴刚. 环境工程项目全生命周期管理研究[J]. 环境工程, 2022, 40(5): 189-194.
- [29] 陈涛. 面向碳中和的环境工程协同路径与资源化利用[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 689-697.
- [30] 张磊. 未来环境工程师的知识体系与跨学科创新发展[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(3): 789-796.