

水体污染物迁移转化调控与靶向治理技术应用探究

李 铭

(河南华顺水体环境治理有限公司, 河南 漯河 426000)

摘要: 水体污染物迁移转化与靶向治理是保障水环境质量的 core 环节, 对维护水生生态系统稳定具有重要地位。明确污染物在水体中的迁移扩散规律、转化影响因素及调控机制, 是提升治理效率、实现精准管控的关键。靶向治理技术凭借其针对性强、适配性广的优势, 在水体污染治理中展现出显著应用价值, 对推动水环境治理技术升级、实现生态良性循环意义重大。基于此, 文章系统分析了污染物水体迁移路径与扩散模式, 探究了物理、化学及生物过程对污染物转化的作用, 阐述了环境条件的调控效应, 梳理了迁移转化关键调控机制与靶向治理技术体系, 探讨了技术协同应用模式, 剖析了应用中的关键问题及解决路径, 提出了管理层面优化建议, 为水体污染治理技术的完善与规模化应用提供理论支撑和实践参考。

关键词: 水体污染物; 迁移转化; 治理技术

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 3106-2547 (2025) 11-0022-11

DOI: 10.62022/FHR.issn3106-2547.2025.11.003

Exploration of the Application of Targeted Treatment Technology for the Migration, Transformation and Regulation of Water Pollutants

Ming Li

(Henan Huashun Water Environment Treatment Co., Ltd., Luohe, Henan 426000)

Abstract: The migration, transformation, and targeted treatment of water pollutants are the core links in ensuring water environment quality and play an important role in maintaining the stability of aquatic ecosystems. Clarifying the migration and diffusion patterns, transformation influencing factors, and regulatory mechanisms of pollutants in water bodies is the key to improving governance efficiency and achieving precise control. Targeted governance technology, with its strong targeting and wide adaptability, has shown significant application value in water pollution control, and is of great significance in promoting the upgrading of water environment governance technology and achieving a virtuous ecological cycle. Based on this, the article systematically analyzes the migration paths and diffusion modes of pollutants in water bodies, explores the roles of physical, chemical, and biological processes in pollutant transformation, elucidates the regulatory effects of environmental conditions, sorts out the key regulatory mechanisms of migration and transformation and the targeted governance technology system, explores the collaborative application mode of technology, analyzes the key problems and solutions in application, proposes optimization suggestions at the management level, and provides theoretical support and practical reference for the improvement and large-scale application of water pollution control technology.

Keywords: water pollutants; migration and transformation; governance technology

一、污染物在水体中的迁移路径与扩散模式

(一) 纵向迁移路径与平流输移特征

污染物在水体中的纵向迁移是指污染物沿水流方向的输移过程, 平流输移作为纵向迁移的核心形式, 其强度直接受水流动力条件影响, 是污染物在流域尺度实现长距离扩散的主要驱动力。该迁移路径不仅决定了污染物的影响范围与传输速率, 还直接关联后续污染治理的范围界定与技术选型, 对流域污染管控的整体布局具有重要指导作用。不同类型水体的平流输移特性存在差异, 自然河流、人工渠道、湖泊等水体的水流动力条件不同, 导致污染物纵向

迁移的速率与扩散态势呈现显著区别。

污染物进入水体后, 会随主流水流进行整体性移动, 其迁移速率与水体流速呈正相关关系, 水流流速在0.1米/秒~1.5米/秒区间内时, 平流输移对污染物纵向扩散的主导作用更为明显, 此时污染物的扩散范围与流速呈同步递增趋势。对于溶解性污染物, 其分子扩散能力较弱, 纵向迁移过程基本与水流运动状态保持一致, 扩散轨迹主要受水流方向与流速变化影响, 在顺直水流段可实现均匀扩散, 在弯道处则会因离心力作用出现局部浓度波动。而悬浮态污染物的纵向迁移除受水流推动外, 还受自身沉降速度、颗粒形态及水体湍流强度的综合影响, 沉降速度较小的悬

作者简介: 李铭, 博士, 高级工程师, 研究方向为水体污染控制与生态修复技术。

浮颗粒（粒径小于10微米）可随水流实现长距离迁移，甚至能跨区域扩散；沉降速度较大的颗粒（粒径大于50微米）则易在水流减缓处逐步沉积，形成沿水流方向的梯度沉积格局。此外，水体中的湍流扰动会对悬浮态污染物的纵向迁移产生辅助作用，增强污染物与水体的混合程度，弱化沉降效应对迁移的制约。

明确纵向迁移路径与平流输移特征，能够为预判污染物扩散范围、制定源头拦截策略提供精准依据，帮助治理人员提前在污染物扩散路径上布设拦截设施、优化治理点位，从而提升流域尺度污染管控的前瞻性与主动性。同时，掌握平流输移规律可为动态调整治理参数提供支撑，根据水流流速变化优化治理技术的运行强度，实现治理效率与成本的平衡，对构建流域一体化污染治理体系具有重要意义。

（二）横向迁移路径与横向混合效应

横向迁移是污染物从水体主流区向岸边区域的扩散过程，是污染物在水体横断面实现均匀分布的核心环节，而横向混合效应则是推动污染物横向迁移的关键因素，其强弱主要取决于水体宽度、流速梯度、岸边地形条件及水体湍流强度。横向迁移直接决定了污染物在水体横断面的分布均匀性，影响近岸水域、岸边生态带的污染程度，对近岸水环境质量保护、岸边生态系统修复具有直接影响，同时也关系到取水口、滨水区域等敏感点位的污染风险防控。

水体横向混合过程中，污染物会在水流剪切力、湍流扰动及分子扩散的共同作用下向两侧扩散，混合速率受水体宽度影响显著，宽度在10米~1000米区间的水体，横向混合达到均匀状态的距离存在明显差异。窄幅水体（宽度10米~50米）的水流剪切力相对集中，横向混合速率较快，通常在较短距离内即可实现污染物均匀分布；宽幅水体（宽度500米~1000米）的水流动力分布不均，主流区与岸边区的流速差异较大，横向混合需要更长距离才能完成，易在岸边区域形成污染物富集带。岸边地形对横向混合进程的干扰作用显著，岸边植被、浅滩、礁石等地形会阻碍水流运动，削弱横向混合效应，导致污染物在局部区域堆积，形成点源性或面源性污染热点；而顺直岸边、缓坡地形则可减少水流阻力，促进污染物在主流区与岸边区的交换，有利于污染物的均匀扩散。此外，水体的湍流强度也会影响横向混合效果，湍流强度越大，污染物与水体的混合越充分，横向迁移的速率也会相应提升。

掌握横向迁移路径与混合效应，可精准识别近岸水域的污染风险点，明确污染物在岸边区域的富集范围与扩散规律，为优化岸边治理设施布局、提升近岸水环境质量提供针对性技术支撑。通过合理布设岸边拦截装置、生态净化

带等治理设施，可有效阻断污染物向岸边扩散，降低近岸生态系统的污染压力。同时，基于横向混合规律优化治理方案，能够提升近岸污染治理的精准度，避免治理资源浪费，对构建“主流区+近岸区”协同治理体系具有重要价值。

（三）垂向迁移路径与上下层交换规律

垂向迁移是污染物在水体上下层之间的交换过程，主要通过水体对流、颗粒沉降与上浮、分子扩散及生物迁移等作用实现，其过程直接影响污染物在水体垂向的分布格局，决定了水体表层、中层、底层及底泥中的污染物浓度分布，对底泥与水体间的物质交换、底泥二次污染防控具有重要影响。垂向迁移作为污染物迁移的重要维度，与纵向、横向迁移形成协同作用，共同构成污染物在水体中的三维扩散体系，对全面掌握污染态势具有关键意义。

溶解性污染物的垂向迁移主要依赖水体上下层对流运动，水温差、风力扰动、水体密度差是引发对流的核心因素。水温差在2℃~8℃区间时，水体易形成明显的分层现象，上层水体温度较高、密度较小，下层水体温度较低、密度较大，上下层水体之间形成温跃层，阻碍污染物的垂向混合与交换，导致污染物在不同水层富集；风力等级在3级~6级区间时，风力对水体表层的扰动作用可打破分层状态，促进上下层水体的对流交换，带动溶解性污染物在垂向均匀分布。悬浮态污染物的垂向迁移受重力作用、水流扰动及颗粒特性的综合主导，大颗粒污染物（粒径大于50微米）受重力影响显著，易快速沉降到底泥表层，成为底泥污染物的重要来源；小颗粒污染物（粒径小于10微米）则可在水体中长时间悬浮，受湍流扰动作用在垂向形成浓度梯度，表层浓度较低、中层浓度相对均匀、底层浓度略高。此外，底泥中的污染物也可通过底泥扰动、微生物转化、理化反应等方式重新释放至水体上层，形成“沉降—释放”的垂向迁移循环，其中底泥扰动既包括自然扰动（如水流冲击、生物活动），也包括人为扰动（如航运、工程作业），这些扰动都会加速底泥中污染物的释放，加剧水体垂向污染。

厘清垂向迁移路径与上下层交换规律，能够为破解水体分层污染、控制底泥二次污染提供科学依据，帮助治理人员针对性采取分层治理、底泥钝化、曝气混合等技术措施，打破水体分层、抑制底泥污染物释放。同时，掌握垂向迁移规律可优化治理技术的布设深度与运行参数，提升不同水层污染物的去除效率，实现水体三维空间的全面治理。这对构建全方位、立体化的污染治理体系具有重要价值，减少二次污染风险。

二、物理、化学及生物过程对污染物转化的影响

(一) 物理过程对污染物转化的作用

物理过程是污染物在水体中发生形态与位置转化的基础环节,主要通过稀释、吸附、沉淀、凝聚等作用实现,其转化效果受水体物理特性与污染物形态影响显著,不改变污染物的化学本质但可改变其迁移能力。

稀释作用通过水体水量与污染物的混合,降低污染物浓度,径污比在5:1~20:1区间时,稀释对污染物浓度的降低效果较为明显,水量越大、污染物初始浓度越低,稀释作用越显著。吸附作用主要通过水体中悬浮物、底泥等载体实现,泥沙颗粒、胶体物质对重金属、疏水性有机物具有较强吸附能力,吸附效果与载体比表面积正相关,比表面积在10平方米/克~100平方米/克区间的载体吸附效率更高。沉淀与凝聚作用针对悬浮态、胶体态污染物,在重力作用或凝聚剂作用下,污染物颗粒聚集形成大颗粒沉淀,降低水体中污染物含量,凝聚剂投加量在10毫克/升~50毫克/升区间时,可有效促进污染物凝聚沉淀。

深入认识物理过程对污染物转化的作用,能够为优化物理治理工艺、提升污染物分离效率提供支撑,是构建多级治理体系的重要基础。

(二) 化学过程对污染物转化的作用

化学过程通过污染物与水体组分的化学反应改变污染物化学性质,实现有毒有害污染物的无害化、稳定化转化,主要包括氧化、还原、分解、络合等反应,其转化效率受水体化学环境条件调控。

氧化还原反应是核心化学转化过程,水体中的溶解氧、氧化剂可将还原性污染物氧化为低毒或无毒物质,如亚硝酸盐可被氧化为硝酸盐;还原性物质则可将重金属离子还原为单质或低价态化合物,降低其毒性。分解反应针对复杂有机物,在水解、光解等作用下,复杂有机物分解为简单化合物,光解作用受光照强度影响显著,光照强度在1000勒克斯~5000勒克斯区间时,可加速有机物分解。络合反应主要发生在重金属与水体中配位体之间,形成稳定络合物,降低重金属离子活性,络合效果与水体中配位体浓度正相关,配位体浓度在0.1毫克/升~1毫克/升区间时,络合反应较为充分。

掌握化学过程对污染物转化的规律,可通过调控水体化学条件强化转化效果,为研发高效化学治理技术提供理论依据,对提升污染治理的深度与针对性具有重要意义。

(三) 生物过程对污染物转化的作用

生物过程是污染物转化的核心环节,通过微生物、水生植物等生物的代谢活动实现污染物的降解与转化,具有生态友好、无二次污染的优势,可实现污染物的资源化利用。

微生物代谢是生物转化的主要形式,好氧微生物在溶解氧含量大于2毫克/升的环境中,可将有机物分解为二氧化碳、水等无机物,将氨转化为硝酸盐;厌氧微生物在溶解氧含量小于0.5毫克/升的环境中,可分解有机物产生甲烷等物质,同时降解部分难降解污染物。水生植物通过根系吸收、叶片吸附等方式富集水体中的氮、磷等营养污染物,同时分泌化感物质抑制藻类生长,沉水植物、挺水植物对污染物的吸收能力较强,单株植物日吸收氮量在0.1克~0.5克区间,可有效降低水体营养盐浓度。微生物菌群的结构组成对转化效果影响显著,优化菌群结构可提升污染物降解效率。

明晰生物过程对污染物转化的机制,能够为培育高效功能生物、构建生物治理体系提供支撑,推动污染治理向生态化、可持续化方向发展。

三、环境条件的调控作用

(一) 温度对污染物迁移转化的调控作用

温度是调控污染物迁移转化速率的关键环境因子,通过同步影响物理扩散系数、化学反应速率及生物代谢活性,全方位改变污染物在水体中的迁移转化进程,其调控效果在一定温度区间内呈显著规律性变化,且这种规律在不同类型水体(自然河流、湖泊、人工湿地等)中均有明确体现,是污染治理过程中需重点考量的环境参数。温度的细微波动的会引发污染物迁移转化路径的调整,进而影响整体治理效果,因此精准把握温度调控规律对优化治理方案具有重要意义。

温度对物理扩散的影响具有明确的量化关联,温度在5℃~35℃区间时,污染物分子动能随温度升高而增强,扩散系数随之同步增大,温度每升高10℃,污染物扩散系数可提升一定幅度,这种提升效应在淡水水体中表现更为明显,能有效加快污染物与水体的混合扩散速度,缩短污染物在局部区域的富集时间。温度对化学反应的调控作用具有显著区间特性,氧化还原、水解、光解等核心化学反应速率均随温度升高而加快,温度在15℃~30℃区间时,化学反应速率处于较优水平,此时各类污染物的化学转化效率达到峰值;当温度低于5℃或高于40℃时,反应体系稳定性被破坏,反应速率会明显下降,部分化学反应甚至会停滞或产生副产物。温度对生物过程的调控集中体现在微生物

物活性与水生植物生长两大维度，微生物代谢活性在 $20^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 区间最强，此时微生物菌群的繁殖速度、酶活性均处于最佳状态，污染物降解速率达到最高；水生植物生长适宜温度在 $18^{\circ}\text{C} \sim 28^{\circ}\text{C}$ 区间，温度过高会导致植物根系缺氧坏死，温度过低则会抑制植物光合作用与养分吸收，二者均会显著削弱植物对污染物的吸收转化能力。

合理调控温度条件，可针对性提升不同类型污染物的迁移转化效率，为不同气候区域、不同季节的污染治理提供明确优化方向。例如，低温地区可通过人工增温措施强化生物降解与化学反应效果，高温季节则可借助水体散热调控维持适宜温度区间，这种针对性调控能有效增强治理技术的环境适配性，提升不同场景下的污染治理成效，为构建差异化治理方案提供核心支撑。

（二）pH值对污染物迁移转化的调控作用

pH值通过系统性改变水体化学环境、污染物存在形态及生物活性，间接调控污染物迁移转化全过程，不同类型污染物（重金属、有机物、营养盐等）的迁移转化对pH值均具有特定适配范围，适宜的pH值可显著强化转化效果，而pH值超出适配范围则会抑制转化进程，甚至引发污染物形态逆转，增加二次污染风险。pH值的调控作用贯穿于污染物迁移、转化、降解的全链条，是精准优化治理效果的关键化学参数。

pH值对重金属迁移转化的调控作用最为显著且具有特异性，不同重金属离子对pH值的响应存在差异，但整体规律一致：在pH值为 $6.0 \sim 8.5$ 的弱碱性环境中，大部分重金属离子（如铅、镉、铜等）易与水体中的氢氧根离子结合形成难溶性沉淀物，快速降低水体中游离态重金属离子浓度，实现重金属的稳定化；在pH值小于 5.0 的酸性环境中，沉淀态重金属会发生溶解反应，重新释放为游离态离子进入水体，加剧水体重金属污染。pH值还可通过改变配位体活性调控污染物络合能力，酸性条件下水体中配位体（如腐殖酸、氨基酸等）活性降低，与污染物的络合反应减弱，污染物更易以游离态存在；碱性条件下配位体活性显著增强，有利于与污染物形成稳定络合物，降低污染物迁移能力。此外，pH值对微生物活性的调控作用不可忽视，多数降解性微生物（如有机污染物降解菌、硝化菌等）适宜在pH值为 $6.5 \sim 7.5$ 的中性环境中生长繁殖，pH值超出该范围会破坏微生物细胞结构、抑制酶活性，进而降低污染物生物降解效率，极端酸碱环境甚至会导致微生物菌群死亡。

精准调控水体pH值，可根据污染物类型优化其存在形态与转化条件，针对性提升治理技术的靶向性与效率。通过投加酸碱调节剂、利用水体自身缓冲能力等方式，将pH

值控制在适宜区间，能为物理、化学、生物治理技术的协同发挥创造有利环境，有效破解复杂水体中多类型污染物共存的治理难题，为复杂水体污染治理提供关键调控手段。

（三）流速对污染物迁移转化的调控作用

流速通过改变水体水流动力条件，间接影响污染物的物理扩散、颗粒沉降及生物附着效果，进而系统性调控污染物迁移转化进程，流速的调控作用与污染物形态（溶解性、悬浮态、沉淀态）、水体环境（水深、底质类型、水生生物分布）密切相关，不同流速区间对污染物迁移转化的影响呈现显著差异化，是流域尺度污染治理中需动态调整的核心参数。

流速对物理迁移的影响具有明确的区间效应，流速在 $0.2\text{米/秒} \sim 1.0\text{米/秒}$ 区间时，水流动力可有效促进污染物的纵向与横向扩散，加快污染物与水体的充分混合，避免污染物在局部区域富集，同时能带动悬浮态污染物均匀分布，为后续治理技术的高效发挥创造条件。当流速过高（大于 1.5米/秒 ）时，强水流动力会剧烈扰动水体底泥，导致沉积于底泥表层的沉淀态污染物重新释放至水体中，显著增加水体污染负荷，同时会削弱污染物与治理材料的接触时间，降低物理拦截与吸附效果。当流速过低（小于 0.1米/秒 ）时，水流动力不足会大幅降低扩散效率，溶解性污染物扩散缓慢、悬浮态污染物易沉降，形成污染物局部富集区域，且水体复氧能力下降，为厌氧环境的形成创造条件。流速对生物过程的影响体现在多方面，适宜流速可促进水体溶氧交换，为好氧微生物提供充足氧气，同时能加快水生植物根系的物质交换，促进植物生长与污染物吸收；流速过高会冲击水生生物群落，破坏水生植物根系附着稳定性，影响微生物在载体表面的定植与生长，导致生物治理体系失效；流速过低则会导致水体溶氧不足，抑制好氧生物代谢，同时会加剧水体富营养化，引发藻类滋生，进一步干扰污染物的生物转化进程。

科学调控水体流速，可有效平衡污染物扩散与生物转化的关系，优化整体迁移转化进程。通过水利工程设施（如闸坝调控、导流装置）调整水流速度，将其控制在适宜区间，既能避免污染物过度富集或底泥扰动，又能为生物治理体系提供良好生长环境，实现物理扩散、化学转化与生物降解的协同增效，为构建高效协同治理体系提供重要支撑。

四、水体污染物迁移转化的关键调控机制

（一）自然衰减过程的强化与人工干预策略

自然衰减过程的强化可通过优化水体自身环境条件、修复受损生态系统实现，核心是提升水体自净能力。在溶

解氧不足的水体中,可通过曝气增氧技术提升水体溶解氧含量至2毫克/升~8毫克/升区间,为好氧微生物代谢提供充足氧气,强化有机物与氨氮等污染物的生物降解效果;在水生植物匮乏的水域,种植芦苇、菖蒲、金鱼藻等本土水生植物,构建立体植物群落,通过植物吸收、根系微生物附着等作用,加速营养盐与重金属污染物的自然转化。人工干预策略需结合自然衰减规律,针对性弥补自然过程的低效环节,避免过度干预破坏水体生态平衡。在污染物浓度较高区域,可投加高效复合微生物菌剂,补充降解性微生物菌群数量,加速难降解污染物的分解,菌剂投加量需控制在合理范围,避免外来菌群挤占本土微生物生存空间;在底泥污染严重区域,实施底泥钝化处理,投加钝化剂(如石灰、沸石等)将底泥中活性态重金属转化为稳定态,抑制污染物释放,钝化剂投加量在50克/平方米~200克/平方米区间时,可有效强化底泥污染物稳定化,同时不会对底栖生物造成显著影响。此外,还可通过生态导流、水量调控等方式,优化水流动力条件,促进污染物与水体的充分混合,提升自然衰减的均匀性与效率。

自然衰减是污染物在水体中通过物理稀释、化学转化、生物降解等天然作用自发降低浓度、转化形态的生态过程,其效率受水体自身环境条件与生态系统完整性影响显著。强化自然衰减效果并辅以科学合理的人工干预,是实现污染物迁移转化高效、低成本调控的核心机制之一,既能依托自然生态系统的自净能力减少治理投入,又能通过人工手段弥补自然过程的局限性,提升治理的生态性与可持续性。

(二) 多介质界面的交互作用

强化自然衰减与科学人工干预相结合的调控模式,可实现污染物迁移转化的低成本、长效管控,避免单一人工治理导致的二次污染与生态破坏。这种模式既尊重了水体生态系统的自然规律,又通过精准干预提升了治理效果,为生态友好型污染治理提供核心路径,推动水环境质量从被动改善向主动维持转变,助力构建稳定的水生态系统。

水—沉积物界面是污染物迁移转化最活跃的区域,界面间的吸附—解吸、沉淀—溶解、生物转化等交互作用,构成了污染物在水体与底泥间的循环迁移过程。沉积物作为污染物的“储存库”,可通过颗粒吸附、离子交换等作用捕获水体中的重金属、疏水性有机物等污染物,降低水体污染浓度;但在水温波动、pH值变化、水流扰动等条件下,沉积物吸附的污染物会重新释放至水体中,形成二次污染。通过调控界面pH值、氧化还原电位,可促进污染物在沉积物表面的稳定吸附,减少释放风险,如将界面pH值维持在6.5~8.0区间,可增强重金属离子与沉积物中羟基、碳酸盐等基团的结合能力,提升吸附稳定性;通过轻度扰

动沉积物表层,可促进界面物质交换与氧气传递,强化沉积物表层微生物的降解活性,加速污染物分解。水—生物膜界面的交互作用依赖生物膜的代谢活动,生物膜是由微生物、胞外聚合物及吸附的颗粒物组成的薄膜结构,可富集水体中污染物并通过微生物代谢将其降解转化。生物膜厚度在0.1毫米~1.0毫米区间时,界面污染物转化效率较高,过厚的生物膜会导致内部缺氧,抑制好氧降解过程。可通过优化水体营养条件、投加生物膜载体等方式,促进生物膜的形成与稳定生长,提升界面污染物降解能力,同时定期清理老化生物膜,避免其脱落造成二次污染。

水体环境中的水—沉积物、水—生物膜、水—大气等多介质界面,是污染物迁移转化的关键场所与核心载体,界面间的物质交换、能量传递与化学反应主导着污染物的形态转化、迁移方向与最终归趋。不同介质的物理化学性质差异显著,使得界面区域形成独特的微环境,污染物在界面处的迁移转化效率远高于水体本体。调控多介质界面的交互作用,优化界面微环境条件,可显著提升污染物转化效率,阻断污染物跨介质迁移路径,是复杂水体污染调控的重要技术方向。

(三) 生态修复技术对污染物迁移转化的阻断效应

深入挖掘多介质界面交互作用机制,针对性调控界面环境条件,可构建污染物迁移转化的高效调控体系,破解复杂介质污染治理难题。这种调控方式能够精准干预污染物在不同介质间的迁移路径,实现污染物的靶向转化与固定,减少跨介质污染风险,为水体—底泥协同治理、复合污染调控提供技术支撑,推动污染治理向精准化、深度化方向发展。

水生植物群落构建是发挥阻断效应的关键措施,通过种植挺水、浮水、沉水植物形成立体净化体系,从不同维度阻断污染物迁移转化。挺水植物(如芦苇、香蒲)根系发达,可深入土壤与底泥,阻截外源输入的悬浮态污染物,同时通过根系分泌物质抑制藻类生长;浮水植物(如浮萍、睡莲)可覆盖水面,减少水体表面积累的污染物挥发与扩散,同时吸收水体中的营养盐,降低富营养化风险;沉水植物(如金鱼藻、苦草)可扎根底泥,吸收底泥与水体中的重金属、氮磷等污染物,同时为微生物提供附着载体,强化生物降解效果。人工湿地技术是生态修复与阻断效应结合的典型应用,通过基质、植物、微生物的协同作用,阻断污染物迁移路径,湿地水力停留时间在2天~7天区间时,污染物去除率处于较优水平,可有效阻断氮、磷及有机物的迁移扩散。人工湿地的基质层(如土壤、砂石、沸石)可吸附截留悬浮态与溶解态污染物,植物群落吸收转化营养盐,微生物菌群降解有机物与重金属,三者协同形

成高效阻断与净化体系。生态浮床技术通过载体上的植物与微生物，吸附转化水体污染物，同时阻挡污染物向深层水体迁移，浮床覆盖率在30%~50%区间时，阻断与转化效果最佳，可有效减少污染物在水体垂向与横向的扩散，尤其适用于城市景观水体与中小河流的污染调控。

生态修复技术通过构建健康、稳定的水生生态系统，修复受损的水生植物群落、微生物群落与底栖生物群落，形成污染物迁移转化的天然屏障，发挥阻断、截留、降解等综合效应，减少污染物扩散范围与迁移能力，同时促进污染物高效转化，是生态化调控的核心手段。其核心优势在于不仅能阻断污染物迁移，还能同步修复水体生态功能，实现污染治理与生态保护的协同推进。

五、靶向治理技术的核心原理与分类体系

（一）基于污染物特性的靶向识别技术

完善基于污染物特性的靶向识别技术，可显著提升污染治理的精准度与针对性，为靶向治理技术的高效应用奠定基础。精准的污染物识别能够帮助治理人员明确污染范围、污染物类型与浓度分布，针对性选择治理技术与优化运行参数，避免盲目投加治理材料与过度治理，降低治理成本与生态风险。

针对不同类型污染物的特性，靶向识别技术形成了多样化的技术路径。对于水体中的痕量污染物，采用纳米复合材料增强传感技术，利用纳米材料的高比表面积、强吸附能力与分子识别功能，实现对痕量污染物的高效富集与信号放大，这类传感器的检测灵敏度可达到纳克/毫升级，响应时间缩短至1分钟以内，能够快速捕捉水体中痕量污染物的浓度变化，同时具备较强的抗干扰能力，可在复杂水体环境中精准识别目标污染物。对于重金属污染物（如铅、镉、汞、铬等），采用离子选择性电极技术与荧光探针技术相结合的方式，基于重金属离子与电极材料、荧光探针的特异性结合反应，实现对不同重金属离子的精准识别与定量检测，识别精度可达到微克/升级别，且能区分不同价态的重金属离子（如三价铬与六价铬），为针对性治理提供依据。对于成分复杂的复合污染物，结合人工智能算法与光谱分析技术，构建多维度识别模型，通过红外光谱、紫外光谱等多光谱数据融合，实现对多类多种污染物的同步识别与定量分析，可同时识别3类~5类污染物，且能快速判断污染物的形态与迁移趋势，为复合污染治理方案的制定提供精准数据支撑。目前，靶向识别技术在复杂水体环境中的稳定性、抗干扰能力及现场快速检测能力有待提高，需进一步优化识别体系与技术参数。

该技术体系主要包括吸附、络合、沉淀等技术类型，具有针对性强、去除效率高、操作简便等优势，可根据污染物特性选择适配技术，适配不同污染场景的治理需求，是靶向治理体系的核心环节之一。

（二）精准捕获与固定技术

优化精准捕获与固定技术，可实现目标污染物的高效去除与稳定化，减少污染物的迁移扩散与二次污染风险。该技术能够快速降低水体中污染物浓度，为后续降解处理或生态修复创造适宜环境，同时可针对性处理特定污染物，避免对水体中有益组分造成影响，保护水体生态系统，是复杂水体污染治理中不可或缺的关键技术。

吸附技术通过高效特异性吸附材料捕获目标污染物，核心是提升材料对污染物的选择性吸附能力与吸附容量。研发的新型纳米吸附材料（如纳米二氧化钛、石墨烯复合材料等）对重金属、疏水性有机物具有极强的特异性吸附能力，其吸附容量在100毫克/克~500毫克/克区间，远高于传统吸附材料，且对目标污染物的吸附选择性强，可在复杂水体环境中优先吸附目标污染物，同时具备良好的脱附性能，经处理后可重复利用，降低治理成本。针对挥发性有机物与异味污染物，采用活性炭纤维、沸石分子筛等多孔吸附材料，利用材料的多孔结构与表面活性基团，实现对污染物的高效捕获，吸附材料的比表面积需控制在合理范围，确保吸附容量与吸附速率。络合技术主要针对重金属污染物，通过投加特异性络合剂（如螯合剂、腐殖酸衍生物等），与水体中游离态重金属离子形成稳定的络合物，降低重金属离子的活性与迁移能力，络合剂与重金属离子的结合比例具有特异性，可在复杂水体环境中精准捕获目标重金属，且络合反应受水体pH值影响较小，适应范围较广。沉淀技术通过调控水体环境或投加沉淀剂，使目标污染物形成难溶性沉淀物，固定于底泥或载体中，针对磷污染物，投加钙盐、铝盐等沉淀剂，使磷转化为磷酸钙、磷酸铝等难溶性沉淀，投加量在50毫克/升~200毫克/升区间时，可实现磷的高效固定；针对重金属污染物，通过调控水体pH值结合投加沉淀剂，形成重金属氢氧化物、碳酸盐等沉淀，实现污染物固定。

精准捕获与固定技术的核心原理是利用特异性材料的吸附、络合作用或针对性化学反应，精准捕获水体中目标污染物并将其转化为稳定形态固定于载体或底泥中，降低污染物的迁移能力与生物毒性，从而实现污染物的高效去除与风险管控。

（三）原位/异位降解技术的靶向性优化

推进原位/异位降解技术的靶向性优化，可显著提升污染物降解效率，降低治理成本与生态影响，实现不同污染

场景的精准治理。原位与异位降解技术的协同应用,可兼顾大面积治理与深度净化需求,丰富靶向治理技术体系,为复杂污染水体的治理提供技术支撑,推动污染治理向高效化、无害化方向发展。

原位降解技术在污染水体原地开展降解处理,无需转移污染物,具有治理成本低、对生态系统扰动小等优势,适用于大面积、中低浓度污染水体治理。通过投加高效降解微生物菌剂或催化剂,强化污染物降解,针对难降解有机物(如多环芳烃、酚类化合物)研发的特异性菌剂,可在水体中快速定植并分泌降解酶,降解目标污染物,降解周期为3天~15天,且对本土微生物群落影响较小,不会破坏水体生态平衡。原位化学氧化技术通过投加靶向氧化剂(如过硫酸盐、臭氧等),仅对目标污染物发生氧化反应,避免对水体中有益组分的破坏,氧化剂投加量在10毫克/升~50毫克/升区间时,降解效果较优,同时可通过催化剂激活氧化剂,提升氧化效率,减少氧化剂用量。此外,原位生物修复技术通过培育本土降解性微生物菌群,强化污染物的生物降解效果,避免外来菌群的生态风险,适配生态敏感性较高的水域。异位降解技术将污染物转移至专门的处理设施中集中降解,具有处理效率高、易控制等优势,适用于高浓度、有毒有害污染水体治理。通过预处理技术(如过滤、离心、吸附)筛选分离目标污染物,提升污染物浓度,再采用生物反应器、高级氧化等技术强化降解,生物反应器可精准控制温度、pH值、溶解氧等条件,为微生物代谢提供最优环境,提升降解效率;高级氧化技术(如光催化氧化、电催化氧化)可直接分解难降解污染物,实现污染物的矿化。目前,原位降解技术的降解效率受水体环境条件影响较大,异位降解技术的能耗与成本控制能力有待提高。

原位/异位降解技术通过特异性降解剂、微生物菌群或高级氧化工艺,针对性分解目标污染物,将其转化为二氧化碳、水、无机盐等无害物质,实现污染物的去除。靶向性优化的核心是提升降解过程对目标污染物的选择性,减少对水体生态系统的干扰,同时优化降解条件,提升降解效率,适配不同污染场景的治理需求,分为原位降解与异位降解两大技术路径,各具优势与适用范围。

六、靶向治理技术的协同应用模式

(一) 多技术联用对复合污染的协同控制

针对重金属与有机物复合污染,采用“精准吸附+原位降解”联用模式,构建“先控后降”的协同治理体系。首先通过特异性吸附材料(如纳米螯合吸附剂)精准捕获水

体中的重金属污染物,将重金属离子固定于材料表面,降低其对微生物的抑制作用,同时吸附材料可为微生物提供附着载体,促进降解性微生物菌群的聚集;随后投加高效降解菌剂或激活本土微生物,降解水体中的有机物污染物,吸附材料与微生物形成协同作用,既解决了重金属对微生物的毒性抑制问题,又提升了有机物降解效率,实现两种类型污染物的同步去除。针对痕量复合污染物(如痕量抗生素与重金属共存体系),采用“靶向识别+富集分离+深度降解”联用模式,通过靶向识别技术精准定位污染物类型与浓度分布,借助富集分离技术(如固相萃取、膜分离)提升污染物浓度至可有效降解范围,再采用高级氧化技术(如光催化氧化、过硫酸盐氧化)实现污染物的深度降解,各环节协同配合,解决了痕量污染物浓度低、难以直接降解的问题,提升治理的精准度。针对水体与底泥复合污染,采用“水体靶向治理+底泥钝化修复”联用模式,同步治理水体与底泥中的污染物,通过水体中的精准捕获与降解技术降低水体污染物浓度,同时对底泥实施钝化处理,抑制底泥中污染物向水体释放,阻断污染物在水体与底泥间的迁移循环,实现“水体—底泥”协同治理。目前,多技术联用模式的适配性、协同效率及参数优化能力有待提高,需进一步研究不同技术的衔接机制。

复合污染水体中通常共存重金属、有机物、营养盐等多种类型污染物,各类污染物相互作用、相互影响,形成复杂的污染体系,单一靶向治理技术受自身功能限制,难以实现所有污染物的全面高效去除,甚至会因污染物间的拮抗作用降低治理效果。多技术联用形成协同控制模式,通过不同技术的优势互补、协同增效,针对性破解污染物间的拮抗问题,提升复合污染治理的全面性,是靶向治理技术的重要发展方向。

(二) 时空尺度上靶向治理的动态匹配策略

构建多技术联用协同控制模式,可有效破解复合污染治理难题,实现各类污染物的全方位、同步治理,弥补单一技术的局限性。这种模式通过优化技术组合与运行参数,最大化发挥不同技术的优势,提升治理技术的适用性与综合效果,为复杂污染水体治理提供高效、可行的技术路径,推动靶向治理技术从单一功能向复合功能转变。

时间尺度上的动态匹配需结合污染物浓度的季节变化、昼夜波动规律及环境条件变化,制定差异化治理方案。春季气温回升、降水增多,污染物浓度较低但扩散范围广,此时采用生态修复技术(如种植水生植物、曝气增氧)强化自然衰减,依托水体自净能力实现污染物调控,同时减少人工治理投入;夏季气温较高(20℃~30℃),微生物

活性较强,且污染物浓度因降水冲刷、面源污染输入而升高,此时采用生物降解技术(投加降解菌剂、强化微生物群落)提升治理效率,充分利用高温环境下的微生物代谢优势;秋季降水减少、水体流速减缓,污染物易富集,可采用精准捕获技术(吸附、络合)快速降低污染物浓度,同时配合生态修复技术巩固治理效果;冬季温度较低(低于10℃),微生物活性受到抑制,生物治理效果不佳,此时采用化学治理技术(如靶向氧化、沉淀)弥补生物活性不足的问题,同时通过保温、水量调控等方式,维持治理效果。昼夜尺度上,针对溶解氧、污染物浓度的昼夜波动,调整曝气强度、药剂投加量等参数,如夜间水体溶解氧含量低,可适当提升曝气强度,为好氧微生物代谢提供保障。空间尺度上的动态匹配需结合流域不同区域的污染特征,构建“分区治理、协同管控”体系。上游源头区域以点源污染、面源污染输入为主,采用拦截与吸附技术(如生态拦截坝、吸附滤池),减少污染物向下游扩散,从源头控制污染负荷;中游扩散区域污染物浓度适中、扩散范围广,采用稀释与降解技术(如生态导流、生物降解),降低污染物浓度,避免污染物富集;下游富集区域污染物浓度高、底泥污染严重,采用深度治理与生态修复技术(如深度氧化、底泥钝化、水生植物群落构建),修复受损水环境,同时阻断污染物向周边水域扩散。动态匹配需依托实时监测数据,目前监测数据的时效性、准确性及全覆盖能力有待提高,需进一步完善监测体系。

污染物迁移转化具有显著的时空异质性,时间上表现为污染物浓度的季节变化、昼夜波动,空间上表现为流域上下游、左右岸及水体不同水层的污染特征差异。在时空尺度上实现靶向治理技术的动态匹配,根据不同时间、不同区域的污染特征实时调整治理技术类型、运行参数与治理强度,可最大化提升治理效率,避免资源浪费,实现污染治理的精准适配与高效管控。

(三)与生态修复技术的耦合机制设计

实施时空尺度动态匹配策略,可实现靶向治理技术与污染特征的精准适配,避免“一刀切”治理导致的效率低下与资源浪费。这种策略通过实时调整治理方案,提升治理的针对性与高效性,推动污染治理从静态治理向动态调控转变,为流域尺度、大面积污染治理提供科学的管控模式,助力实现水环境质量的持续稳定改善。

耦合机制设计需遵循“先控后修、协同增效、生态优先”的原则,精准把控两种技术的衔接时机与运行参数,避免技术间相互干扰。首先采用靶向治理技术(如精准捕获、原位降解)快速降低污染物浓度,将水体污染物浓度

控制在生态修复可承受范围,如COD浓度低于50毫克/升、氨氮浓度低于5毫克/升、重金属浓度低于国家地表水Ⅲ类标准限值,消除污染物对水生植物、微生物的毒性抑制作用,为生态系统的恢复创造有利条件。靶向治理阶段需控制治理强度与材料投加量,避免化学药剂残留、外来菌群入侵等问题影响后续生态修复效果。随后开展生态修复工作,构建稳定的水生态系统:植物层面,种植芦苇、菖蒲、沉水植物等本土水生植物,构建挺水—浮水—沉水立体植物群落,通过植物吸收、根系分泌化感物质等作用,实现营养盐、重金属污染物的长效去除,同时为微生物提供附着载体;微生物层面,培育本土优势微生物菌群,优化微生物群落结构,提升水体自然降解能力;底栖生物层面,投放螺类、蚌类等底栖生物,改善底质环境,促进底泥污染物的转化。耦合过程中需优化技术衔接参数,明确靶向治理与生态修复的启动时机,通常在靶向治理使污染物浓度稳定达标后,逐步启动生态修复,同时根据生态系统恢复情况,调整靶向治理的运行强度,逐步减少人工干预,最终实现生态系统的自主稳定。目前,耦合体系的稳定性、长效性及复杂环境下的适配能力有待提高,需进一步优化耦合机制与技术参数。

靶向治理技术与生态修复技术的耦合,核心是实现人工精准治理与自然生态修复的协同增效,通过靶向治理技术快速降低污染物浓度,消除污染物对生态系统的抑制作用,为生态修复创造适宜环境;再通过生态修复技术构建长效净化体系,提升水体自净能力,巩固治理效果,形成“短期治理+长期稳定”的良性循环,推动污染治理向生态化、长效化方向发展。

七、技术应用中的关键问题与解决路径

(一)污染物迁移转化过程的动态监测难点

完善污染物迁移转化动态监测体系,可有效破解监测难点,为靶向治理技术的精准应用提供全面、及时、精准的数据支撑。精准动态监测能够帮助治理人员实时掌握污染物迁移转化规律,动态调整治理方案,提升治理决策的科学性与前瞻性,避免盲目治理,推动靶向治理技术从经验驱动向数据驱动转变。

监测难点主要体现在三个核心方面:一是污染物形态转化复杂,部分污染物在迁移过程中快速发生物理稀释、化学转化、生物降解等多重反应,形态不断变化,传统监测技术多针对单一形态污染物监测,难以捕捉动态变化过程,无法全面反映污染物的迁移转化规律;二是痕量污染物监测难度大,水体中痕量污染物(如环境激素、抗生素)

浓度低(纳克/毫升~微克/毫升级别),且水体中存在大量干扰物质(如腐殖酸、悬浮物),传统监测技术的精度与灵敏度不足,难以实现精准定量分析;三是大范围动态监测覆盖不足,传统监测依赖人工采样与实验室分析,耗时费力,监测周期长,难以实现流域尺度、水体三维空间的实时连续监测,数据时效性差,无法为动态治理提供及时支撑。解决路径需构建“立体监测网络+智能监测技术+数据整合平台”的一体化监测体系。在监测网络布局上,部署物联网监测设备,构建“流域—区域—点位”三级立体监测网络,覆盖流域上下游、左右岸及水体上下层,实现180天无人值守稳定运行,弥补偏远区域、深层水体的监测空白;在监测技术上,采用纳米传感、人工智能分析、多光谱检测等先进技术,提升痕量污染物监测精度与抗干扰能力,实现污染物形态变化的实时捕捉;在数据整合上,建立统一的监测数据共享平台,整合不同部门、不同类型的监测数据,实现数据实时传输、交叉验证、综合分析与可视化展示,提升数据利用效率。此外,还需优化监测参数与技术流程,提升现场快速监测能力,缩短监测周期。

靶向治理技术 in 应用过程中,可能因治理材料残留、反应产物毒性、生态系统扰动等引入新的环境风险,若风险管控不当,可能导致二次污染,影响水体生态系统安全。开展科学的环境风险评估与全流程管控,是保障靶向治理技术安全、可持续应用的关键,可有效识别、预判潜在风险,采取针对性防控措施,避免风险扩散。

(二) 靶向治理技术的环境风险评估与管控

强化靶向治理技术的环境风险评估与管控,可显著提升技术应用的安全性与生态友好性,降低二次污染风险,提升公众对治理技术的认可度。科学的风险管控能够实现治理效果与生态安全的统一,为靶向治理技术的规模化、工程化应用提供安全保障,推动污染治理向安全化、可持续化方向发展。

环境风险评估需聚焦治理材料、反应产物、生态系统三大核心环节,构建全面、系统的评估体系。一是治理材料的环境安全性评估,针对吸附剂、络合剂、微生物菌剂、氧化剂等治理材料,分析其在水体中的残留规律、降解路径及潜在毒性,明确材料使用的安全剂量与范围,评估材料残留对水生生物、微生物群落及水体理化性质的影响,避免材料残留导致的二次污染;对于可重复利用的材料,评估其再生过程中的环境风险,确保再生工艺的生态安全性。二是反应产物的风险评估,精准检测靶向治理过程中产生的中间产物、副产物,分析其毒性、环境稳定性及迁移能力,判断是否存在有毒有害产物,避免治理过程中产

生新的污染因子;针对高级氧化、化学降解等技术,重点评估氧化产物、降解中间产物的环境风险,确保其最终转化为无害物质。三是生态系统扰动评估,分析治理技术对本土水生生物(鱼类、底栖生物、水生植物)、微生物群落结构的影响,评估生态系统的恢复能力,避免外来菌群入侵、药剂毒性等导致的生态系统破坏,确保治理过程与生态系统的兼容性。风险管控需建立“事前评估、事中监测、事后跟踪”的全流程体系:事前制定治理材料使用标准、反应参数控制范围等安全应用规范,明确风险防控阈值;事中实时监测风险指标(如材料残留量、产物毒性、生物多样性),一旦超出阈值,及时调整治理参数;事后跟踪生态系统恢复情况,持续监测3个月~6个月,确保生态系统稳定,无潜在风险。目前,风险评估的全面性、精准性及快速评估能力有待提高,需进一步优化评估指标与方法。

靶向治理技术的经济性与规模化应用之间存在一定矛盾,部分核心技术(如纳米材料吸附、高级氧化、精准传感等)存在治理材料价格高、设备依赖度强、运维成本高、工艺复杂等问题,制约了其大规模推广应用;而低成本技术往往存在治理效率低、针对性差等不足,难以满足复杂污染治理需求。构建科学的平衡策略,在保障治理效果的前提下,提升技术的经济性与可推广性,是推动靶向治理技术从实验室走向工程化、规模化应用的关键。

(三) 技术经济性与规模化应用的平衡策略

实施技术经济性与规模化应用的平衡策略,可有效破解靶向治理技术的推广难题,推动技术从实验室走向工程化、规模化应用。这种策略既保障了污染治理效果,又通过成本优化与模式创新提升了技术的可推广性,实现治理效果、经济效益与社会效益的统一,让靶向治理技术能够广泛应用于不同类型、不同规模的污染水体治理,实现水环境治理的普惠性与可持续性。

平衡策略需从技术优化、模式创新、成本控制三个方面入手,构建全方位的成本优化与推广体系。技术优化方面,聚焦低成本化与高效化改进,研发低成本高效治理材料,采用本土原料、再生材料替代高价进口材料,降低材料采购成本;简化治理工艺,优化技术流程,减少设备投入与运维难度,如优化吸附材料的再生工艺,提升材料重复利用率至80%以上,延长设备使用寿命,降低单位治理成本;针对规模化应用需求,开发模块化、集成化治理设备,提升设备的适配性与可移动性,适应不同污染场景的应用需求。模式创新方面,推行多元化治理模式,降低单个项目的成本压力。推行第三方治理模式,由专业治理企

业负责技术研发、设备运维、效果保障,实现治理专业化与规模化,降低治理单位的前期投入;构建产学研合作模式,整合科研机构、企业、治理单位的资源力量,实现技术研发、中试、工程应用与市场推广的协同推进,缩短技术转化周期,降低研发成本;鼓励技术共享与推广,建立成熟技术数据库,推广成本低、效果好、易操作的靶向治理技术,提升技术的普及度。成本控制方面,优化治理方案与参数,避免过度治理,结合区域污染特征与经济水平,制定差异化治理方案,在污染严重区域采用高效治理技术,在污染较轻区域采用低成本生态治理技术;建立成本分摊机制,整合政府资金、社会资本、受益单位投入,平衡各方成本压力;加强运维管理,优化设备运行参数,减少能耗与材料消耗,降低长期运维成本。目前,技术的低成本化与规模化适配性有待提高,需进一步突破核心技术瓶颈,优化推广机制。

八、管理层面的优化建议

(一) 完善水体污染物迁移转化监测网络

网络布局方面,构建“流域—区域—点位”三级监测网络,实现监测范围全覆盖。以流域为单元,统筹规划监测点位,覆盖污染源头区、扩散区、富集区及饮用水水源地、敏感水域等关键区域,合理增设偏远区域、深层水体、底泥—水界面的监测点位,弥补监测空白,确保监测范围无死角。针对不同监测目标优化点位设置,污染物迁移路径监测点位沿水流方向均匀布设,间距根据流速、水体宽度调整;污染物形态转化监测点位重点布设于多介质界面区域;生态系统监测点位结合水生植物、底栖生物分布区域设置。设备升级方面,淘汰老旧、精度不足的监测设备,推广智能化、高精度、多参数监测设备,提升痕量污染物、复合污染物、污染物形态的监测能力,实现pH值、溶解氧、污染物浓度、微生物群落等多参数同步监测与实时传输。推广物联网监测设备、无人机遥感监测技术,实现流域尺度的快速巡查与大范围监测;应用纳米传感、人工智能分析等先进技术,提升监测数据的精准度与抗干扰能力,降低人工依赖。数据整合方面,建立统一的监测数据共享平台,整合环保、水利、市政等不同部门、不同类型的监测数据,消除数据壁垒,实现数据实时共享、交叉验证、综合分析可视化展示。制定统一的数据标准与规范,确保不同来源、不同设备监测数据的一致性与可比性;建立数据质量管控体系,对监测数据进行审核、校准,提升数据可靠性;开发数据智能分析模块,通过算法模型挖掘污染物迁移转化规律,为管理决策提供数据支撑。目前,监测

网络的协同性、智能化水平及数据利用效率有待提高,需进一步优化体系建设。

完善的水体污染物迁移转化监测网络是开展污染管控、优化靶向治理技术应用的基础保障,能够实现污染状况的全方位、实时化、精准化监测,为管理决策、方案制定、效果评估提供精准数据支撑。当前,监测网络存在布局不合理、设备精度不足、数据壁垒突出等问题,需从网络布局、设备升级、数据整合等方面系统优化,构建一体化监测体系。

(二) 建立靶向治理技术的标准化评价体系

完善水体污染物迁移转化监测网络,可显著提升污染管控的精准度与时效性,为靶向治理技术的科学应用提供全面数据支撑。一体化的监测体系能够帮助管理部门实时掌握污染动态,精准制定治理方案,有效评估治理效果,推动管理工作从经验型向数据型、精准型转变,为水环境质量持续改善提供管理保障。

评价体系需明确评价指标、评价流程、结果应用三大核心内容,构建全面、客观、可操作的评价框架。一是构建多维度评价指标体系,涵盖治理效果、环境安全性、经济性、生态影响、适用范围等核心维度。治理效果指标采用污染物去除率、形态转化效率、治理后浓度达标情况等量化指标,明确不同污染类型、不同浓度水平的达标要求;环境安全性指标包括治理材料残留量、反应产物毒性、二次污染风险等,确保技术应用的生态安全;经济性指标涵盖单位治理成本、设备投入、运维成本、材料重复利用率等,评估技术的经济性与可推广性;生态影响指标包括生物多样性变化、微生物群落稳定性、水生植物生长状况等,评估技术对生态系统的兼容性;适用范围指标明确技术适配的水体类型、污染浓度、环境条件等,为技术选型提供依据。二是规范评价流程标准,制定从技术筛选、参数优化、效果检测到风险评估的全流程操作规范,明确各环节的技术要求、检测方法、评价周期。技术筛选阶段需结合污染特征、环境条件筛选适配技术;在效果检测阶段采用统一的检测方法频率,确保检测数据的准确性;在风险评估阶段按照环境风险评估规范开展全面评估;最终形成综合评价报告,明确技术的优劣与适用场景。三是建立评价结果应用机制,将评价结果与技术推广、项目审批、资金支持挂钩,优先推广评价优良的技术,纳入重点推广技术目录;限制效果不佳、风险较高、经济性差的技术应用;对新研发的靶向治理技术,实行严格的评价准入制度,经评价合格后方可进入市场应用。评价体系需结合技术发展动态适时更新,新增新型技术的评价指标与标准,提升体

系的适配性与科学性。目前,评价指标的合理性、可操作性及评价流程的规范性有待提高,需进一步优化完善。

靶向治理技术种类繁多、应用场景复杂,不同技术的治理效果、适用范围、环境风险、经济性差异显著,缺乏统一的评价标准会导致技术应用混乱、效果参差不齐、市场准入无序等问题。建立科学、统一的标准化评价体系,规范技术应用流程,明确技术选型依据,保障治理效果,推动靶向治理技术规范化、产业化发展。

(三) 推动跨部门协同治理与长效管理机制

建立靶向治理技术的标准化评价体系,可有效规范技术应用与推广秩序,保障治理质量与生态安全,提升技术应用的公信力。标准化评价能够为管理部门、治理单位、技术研发企业提供统一的评价依据,引导技术研发向高效化、安全化、低成本化方向发展,为靶向治理技术的规模化、产业化发展提供制度支撑。

协同治理机制需以明确职责、强化联动为核心,构建高效协作体系。明确环保、水利、市政、科研等相关部门的职责分工,环保部门负责污染监测、风险评估、执法监管,水利部门负责水量调控、水流动力优化、水域生态保护,市政部门负责城镇污水治理、管网运维,科研部门负责技术研发、成果转化与技术支撑。建立常态化沟通协调机制,定期召开协同治理会议,通报污染动态、治理进展与存在问题,协商制定治理方案与调整措施;建立联合执法机制,针对违法排污、超标排放等行为开展联合执法,强化源头管控;建立资源共享机制,整合各部门的监测设备、技术资源、数据资源,实现优势互补,避免重复建设与资源浪费。长效管理机制需聚焦常态化管控、资金保障、技术推广三大方面,构建可持续管理体系。一是建立常态化监测与评估机制,定期监测水环境质量、污染物迁移转化规律与治理效果,每季度开展一次综合评估,动态调整治理策略与管理措施,避免短期治理效应;二是完善资金保障机制,设立水体污染治理专项资金,保障监测网络建设、技术研发、工程应用、运维管理的资金需求;鼓励社会资本参与污染治理,推行政府购买服务、特许经营等模

式,拓宽资金渠道;建立资金使用监管机制,确保资金专款专用、高效利用。三是建立技术推广与培训机制,搭建技术交流平台,普及成熟、低成本、易操作的靶向治理技术与管理经验;开展从业人员专业培训,提升监测、治理、运维人员的专业能力与技术水平,确保技术规范应用与管理措施有效落实。目前,协同治理的深度、联动效率及长效性有待提高,需进一步强化部门联动与机制保障。

水体污染物迁移转化与靶向治理是一项复杂的系统工程,涉及监测、研发、执法、运维、资金保障等多个领域,单一部门难以实现全链条、全方位管控,易出现职责交叉、管理缺位、资源分散等问题。推动跨部门协同治理,建立长效管理机制,整合各方资源,形成治理合力,实现从源头防控、过程治理到后期维护的全链条管控,保障治理效果的持续性与稳定性。

九、结束语

水体污染物迁移转化调控与靶向治理是守护水生态环境安全、推动生态良性循环的核心支撑,对提升水环境质量、保障生态系统稳定具有不可替代的地位。治理单位应强化污染物迁移转化规律研究,优化靶向治理技术协同应用模式,完善动态监测体系与标准化评价体系,推动跨部门协同治理与长效管理机制落地,全面提升治理技术的精准性、安全性与规模化应用水平,推动靶向治理技术与生态修复深度融合,从而实现污染治理与生态保护的协同推进,为构建健康稳定的水生态系统、实现可持续发展提供坚实保障,助力水环境治理体系与治理能力的持续提升。

参考文献:

- [1] 王鑫博.水环境中污染物质的迁移与转化治理研究[J].生态学可持续发展研究,2025,2(02):64-66.
- [2] 崔益千,林叶昂.生态环境治理视角下的水资源保护与合理利用[J].生态学可持续发展研究,2025,2(03):84-86.
- [3] 刘春英.鄱阳湖湿地植物对重金属的转运机制研究[M].北京:新华出版社:201706:161.
- [4] 王薇宇.复合污染条件下水环境中污染物质的迁移转化研究[D].北京:清华大学,2008.