

水环境保护工程中生态修复治理技术应用分析

王雅琴

乌兰察布市污染防治智能监管服务与技术支持中心 内蒙古 乌兰察布 012000

摘要：水资源污染不仅影响生物多样性、生态平衡与人类健康，还对经济发展有深远的负面影响。生态修复治理技术是利用自然生态系统的恢复力和自净能力，通过模拟或恢复自然生态过程改善水质、治理水环境，具有可持续性强、成本相对低廉以及生态效益显著等优点。随着科技的进步与相关领域对水资源污染问题研究的深入，多种生态修复治理技术已被开发并应用于实际的水环境治理中。

关键词：水环境保护工程；生态修复治理；湿地修复；生物滤池

全球环境变化，解决水资源污染问题已经成为生态环境保护的关键。为提高水体质量、恢复生物多样性、维护生态平衡，分析修复与保护水环境的重要性及影响水环境的主要因素，探讨水环境保护工程中湿地修复技术、生物滤池技术、生态浮岛技术的主要应用方法。

1 水环境生态修复治理定义

1.1 定义内涵。修复本质，针对退化或被破坏的水域生态系统，通过工程、生物、物理及管理技术进行恢复，重建其生态完整性（生物多样性、连续性）及自净功能。核心在于激发水体自我修复能力，而非简单恢复到原始状态。修复对象，涵盖水文情势、河湖地貌形态、水体理化特征及生物群落四大要素。

1.2 技术路径。核心原则，自然主导：以生态系统自我恢复为基础，人工措施为辅，减少过度干预；综合治理：统筹“水-土-气-生”系统，采用植物修复、生物调控、工程设施（如人工湿地）等组合技术。

1.3 目标与边界。核心目标：恢复水生态系统服务能力（如水质净化、碳汇、生物栖息），实现经济与生态协同发展。区别于水环境治理：后者侧重污染物清除（如清淤、截污），而生态修复更强调系统功能整体提升及长效稳定性。水环境生态修复治理是通过自然力主导、人工辅助的系统性干预，重建水体生态完整性并维持其可持续演替的过程。

2 生态修复在水环境保护中的作用

2.1 恢复水体自净能力：破解污染累积困局。物理-生物协同净化，通过增氧设备提升溶解氧（如曝气船）、底泥疏浚减少内源污染，结合微生物菌剂降解有机物，直接提升水体污染物分解效率。例如苏州黑臭河道治理中，溶解氧从不足2mg/L升至5mg/L，COD削减40%。植物与湿地的过滤作用，人工湿地和生态浮岛利用植物根系（如芦苇、香蒲）吸附氮磷，同时微生物膜降

解溶解性污染物。浙江农村面源污染治理中，复合湿地技术对氮磷去除率超75%。

2.2 重建生物多样性：激活生态链关键环节。栖息地修复与物种回归，改造硬化河岸为生态驳岸，恢复滨岸带植被（如石笼+乔灌草立体绿化），为鱼类、底栖动物提供产卵场和避难所。桑干河湿地通过岸坡修复，吸引数万候鸟形成“鸟浪”奇观。食物网结构优化，引入本地水生植物（如苦草、眼子菜）和滤食性鱼类（如鲢鳙），控制藻类过度繁殖。白洋淀通过沉水植物重建，发现中国新记录物种“五月四节蜉”，印证生态链恢复成效。

2.3 长效管理支撑：从工程干预到自主演化。动态监测体系，结合遥感与地面核查，跟踪溶解氧、底栖生物多样性等指标，防止物种失衡。政策与制度保障，推行《生态保护修复成效评估技术指南》（HJ 1272—2022），将碳汇能力、生态连通性纳入考核。挑战与优化方向，技术适配性：低温地区需结合光量子催化技术，避免植物修复季节性失效。资金机制：探索绿色金融支持，如海洋生态修复项目通过碳交易补偿30%运营成本。

3 水环境生态修复治理技术应用

3.1 河流生态修复技术应用。国内创新实践，黄河上游干旱区边坡修复，技术组合：乔灌草立体绿化+土壤微生物激活剂，成效：破解高寒干旱区裸露边坡植被存活难题，入选自然资源部创新技术名录。城镇河道富营养化治理，技术路径：食藻虫控藻+沉水植物重建（苦草、眼子菜），作用：打通“藻类-食藻虫-鱼类”食物链，实现氮磷资源化利用，杭州拱墅区河道消除黑臭。桑干河湿地鸟类栖息地重建，核心措施：生态驳岸改造（石笼+本土植被）+水文连通性恢复，生态回报：吸引数万候鸟栖息，带动乡村旅游收入超百万/年。挑战与创新方向。极端环境适配：干旱区需结合保水材料，低温水域采用

光量子催化提升微生物活性。长效运维瓶颈：推行“修复-监测”联动（如云南赤水河鱼类多样性跟踪），探索碳交易补偿机制。当前河流生态修复已从单一技术向“地貌-水文-生物-社会”四维协同演进，其核心是通过仿自然设计（如人工泄洪）激活生态系统自主演化能力。

3.2 湿地生态修复技术应用方法。退化诊断与修复目标设定，退化程度评估，基于《湿地退化评估技术规范》（GB/T 42532-2023），通过植被覆盖率、水质指标（COD、TP）、底栖动物密度等判定退化等级：轻度退化（自然修复）：植被覆盖率 $> 50\%$ ，水质达Ⅲ类标准，采用封育保护；中度退化（人工辅助）：植被覆盖率30%-50%，叠加微地形改造+乡土植物补植；重度退化（生态重建）：植被覆盖率 $< 30\%$ ，需全面重构基质与水文。修复目标量化，结构完整性：挺水/沉水植物比例达自然湿地标准（挺水植物覆盖度30%-60%）；功能稳定性：氮磷去除率 $> 75\%$ ，碳汇能力提升20%以上。关键技术方法与应用场景，水文与基质修复，水文连通性重建，缺水型湿地：通过生态补水与水系连通工程恢复水流，如青藏高原植被缓冲带截污；洪泛区湿地：模拟自然洪水周期。生物群落重建，植物恢复技术，乡土物种优选：沉水植物（苦草、眼子菜）、挺水植物（芦苇、香蒲），低温区搭配耐寒品种（如江苏光量子催化技术提升活性30%）；立体配置模式：乔灌草组合（山西桑干河）、生态浮岛+沉水植物（武汉湖泊）。动物链激活，关键物种引入：滤食性鱼类（鲢鳙）控藻，底栖动物（螺类）增强物质循环；栖息地优化：石笼驳岸+浅滩生境岛（桑干河吸引数万候鸟）。系统化工程实施流程，空间协同设计，纵向衔接：上游植被缓冲带截污（首都西部工程） \rightarrow 下游湿地碳汇提升；横向融合：城市湿地结合海绵设施（透水铺装+雨水花园）。长效运维机制，动态监测：遥感+地面核查，跟踪溶解氧、鸟类种类等指标（云南赤水河鱼类增长）；政策保障：执行《湿地生态修复技术规程》（LY/T 2898-2023），将碳汇纳入考核。

3.3 农村污水处理生态修复技术。主流技术分类与适用场景，自然生态处理系统，人工湿地技术，复合湿地组合：垂直流湿地（除磷）串联表面流湿地（脱氮），浙江项目氮磷去除率达75%。芦苇、香蒲等根系微生物协同降解污染物。低温适应性改造：东北高寒区采用深埋式管道防冻，搭配耐寒植物（水葱、菖蒲），冬季效率提升30%。生态塘处理系统，多功能塘体设计：山东济宁金乡县将黑臭坑塘改造为“污水处理+水产养殖”系统，中水养鱼年收益5万元，实现“以塘养站”。藻菌共生调控：添加光合菌剂促进藻类增殖，溶解氧升至

5mg/L以上，COD削减40%。生物强化技术，厌氧-好氧协同工艺，户用化粪池升级：三格化粪池+生物接触氧化（MBBR），适用于分散农户，无动力运行且污泥减量60%。模块化生物滤池：填充陶粒/火山岩滤料，西南山区TP去除率超85%。资源化利用创新模式，污水-农业循环，中水灌溉系统：鲁西南蒜黄基地利用处理水灌溉，节水同时降低化肥用量30%。污泥制有机肥：厌氧发酵后污泥农用，陕西项目替代化肥增产12%。生态经济融合，景观型湿地公园：济宁金乡县坑塘改造为休闲公园，带动乡村旅游收益。碳交易补偿机制：湿地修复项目通过碳汇交易覆盖20%运维成本。长效管理核心要点，低维护设计，智能监控：云南项目安装物联网传感器，实时预警pH/DO异常。农户参与机制：韩国推行“户主维护责任制”，运维成本降低40%。

3.4 农田生态系统生态修复技术。退化诊断与修复目标，退化等级判定，依据土壤理化性质及生物指标划分：轻度退化（有机质 $> 2\%$ ）：采用轮作休耕+绿肥种植自然恢复；中度退化（板结/土传病害）：需微生物菌剂+深翻晒塘；重度退化（重金属/垃圾污染）：换土法+化学固化，成本高达1000元/亩。核心修复目标，土壤结构：耕层厚度 $\geq 25\text{cm}$ ，团粒结构占比 $> 60\%$ ；生物活性：蚯蚓密度 $> 20\text{条}/\text{m}^2$ ，微生物多样性提升50%。关键技术方法与应用，生物修复技术，微生物激活，活菌站模式：微型生物工厂生产菌液，24小时/吨，服务3000-5000亩农田，降低化肥用量15%；复合菌剂应用：土肥伴侣（枯草芽孢杆菌+放线菌）分解固化养分，3年土壤蚯蚓量翻倍。植物修复，超富集植物：凤眼莲吸附重金属（南方高污染区）；耐寒品种：东北搭配水葱、菖蒲提升冬季修复效率。污染阻控，化学固化：石灰+硝酸盐固定重金属（热力学修复：高温降解有机污染物（化工遗留用地）。农艺系统重建，循环农业模式，水肥菌一体化：处理污水灌溉蒜田，减少化肥30%（鲁西南）；污泥制肥：厌氧发酵后农用，陕西小麦增产12%。生态景观融合，田湿地协同：上游植被缓冲带截污 \rightarrow 下游湿地碳汇提升；复合种养：稻田养鱼系统（原阳县稻渔共生，亩产增200斤）。长效管理创新，智慧运维，物联网监测：实时预警pH/重金属含量；碳汇交易：修复项目覆盖20%运维成本（湿地修复延伸）。

4 水环境生态修复技术效果评估

4.1 评估维度与技术指标。生态结构修复指标，水质改善，关键参数：溶解氧（DO） $> 5\text{mg/L}$ （鱼类生存阈值）、氨氮 $< 1.0\text{mg/L}$ 、总磷（TP） $< 0.2\text{mg/L}$ ，需对比修复前及地表水Ⅲ类标准，结构性指标：底质氧化

还原电位（反映底泥污染物释放风险）、滨岸带自然化率（生态驳岸占比 $>70\%$ ），生物多样性恢复，物种丰富度：鱼类/底栖动物种类数量恢复至本地参照区80%以上，关键种群：沉水植物覆盖率（ $>30\%$ ）、浮游动物群落均匀度指数 >0.6 ，食物链完整性：顶级捕食者（如肉食性鱼类）重现率。生态功能提升指标，净化能力，氮磷去除率 $>75\%$ （人工湿地）、重金属富集系数（超富集植物），水质净化贡献率：修复区较上游污染物削减量占比，水文调节，雨水截留率提升值（城市河流 $>30\%$ ）、地下水位回升幅度（湿地修复区），生态流量达标率（长江流域考核核心指标），碳汇与经济价值，植被年固碳量增幅 $>20\%$ （盐城案例碳汇交易覆盖20%成本），生态系统服务价值投入产出比（江苏盐城项目达1:3.5），

4.2 多尺度评估方法体系。实地监测技术，生物链协同监测，底栖动物BI指数（ >4.5 为健康）、鱼类保有指数，食藻虫控藻效率（上海黄浦江藻密度降60%），智能装备应用，物联网传感器（实时pH/DO预警），无人机遥感：红树林植株识别精度达97.5%。

4.3 挑战与优化方向。技术瓶颈，分散式修复区抗冲击负荷弱（需强化雨污调节设施），高原/高寒区监测数据连续性不足（无人机适用性待提升）。标准化推进，建立多维评估体系：香农指数（1.5-3.5）、鸟类栖息地占比 $>40\%$ ，衔接国际标准：欧盟生态质量比（EQR）、美国生物完整性指数，未来方向：从单一水质达标转向“结构-功能-服务”三维评估，通过无人机遥感+深度学习、碳汇交易机制等创新手段提升评估

精准性与可持续性。

4.4 如何持续改进生态修复技术。理论基础创新驱动，物质循环调控理论深化，量化干预物质积累与循环速率的关系。例如在矿山修复中，通过增加内部循环（如微生物-植物协同）将重金属存留周期缩短40%。突破重点：建立不同污染类型（重金属/有机毒物）的循环动力学模型，预测人工干预阈值。环境要素平衡关系重构，应用“非生物要素平衡理论”，动态调控水-土-温湿度关系：盐碱地修复通过量子水处理裂解大分子团，使水分渗透率提高50%；高原区采用保水材料维持干旱期土壤湿度 $>30\%$ 。区域适配案例：东北寒地深埋管道+耐寒植物组合，破解冻融循环破坏问题。技术集成与智能升级。复合工艺协同增效，矿山修复：采用“纳米羟基磷灰石钝化+蜈蚣草富集+菌根接种”技术链，使Cd/Pb生物有效性降低60%，植被覆盖周期缩短至6个月，水体净化：“食藻虫控藻（藻密度降60%）+沉水植物群落重建（覆盖率 $>40\%$ ）”技术在黄浦江实现食物链重建。

总之，从“单点修复”转向“空间连通-产业融合-智慧管控”三维升级，通过物质循环干预模型、三期目标管理3等系统化路径，实现生态系统自维持能力指数级提升。

参考文献

- [1]王丽，水环境质量影响因素及水生态环境保护措施分析.2022.
- [2]刘海华，水环境保护工程中生态修复治理技术应用探讨.2023.