

不同技术路径在生态环境工程中的协同应用分析

曾兆荷, 岳 林*

(海南省生态环境监测中心, 海南 海口 571126)

摘 要 生态环境工程治理需求日益系统化, 多种技术路径协同应用成为提升治理效能的关键方向。水处理、大气控制、固废资源化与土壤修复等路径在功能定位与运行机制上差异明显, 协同部署可强化污染削减与系统稳定性。本文聚焦典型技术路径的协同集成模式, 分析运行机制与接口逻辑, 识别协同过程中面临的技术兼容性、系统集成度、标准化和成本约束等关键问题, 并提出切实可行的系统化协同对策, 以期为推动生态环境工程向集约高效发展提供借鉴。

关键词 生态环境工程; 协同应用模式; 系统集成; 技术兼容性; 工程标准

中图分类号: X5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.28.005

0 引言

随着生态环境污染问题日趋复杂, 呈现出介质交错、因子叠加、源头分散的多元态势, 推动治理方式由单点控制向系统耦合转变尤为关键。生态环境治理中水、气、固、土各类污染物常伴发共存, 单一技术难以实现多维治理目标, 协同路径逐渐成为主流。尽管多项污染控制技术已工程化成熟, 但由于缺乏统一的调控逻辑与运行平台, 导致协同实施过程中的耦合效率低、参数匹配难、响应延迟等问题频发, 制约了整体治理能力的释放与长期运行的稳定性。

1 生态环境工程中的关键技术路径

生态环境工程中关键技术路径主要涵盖水体治理、大气污染控制、固体废物资源化和土壤地下水修复等多个领域。水环境治理以 A2/O、SBR、MBR 等生物与膜工艺为核心, 结合臭氧氧化、Fenton 反应等手段实现污染削减与再生水利用的统一。大气控制强调多污染物协同处理, 通过布袋除尘、SCR 脱硝、VOCs 催化燃烧等系统集成方式控制 PM、NO_x 与有机物排放, 部分项目已实现一体化塔式集成与自动化调控。固废处理侧重焚烧热能利用与协同处置, 构建生活垃圾、污泥、危废间的热值互补与能效最大化路径^[1]。土壤与地下水修复则依托原位化学反应、生物强化及物理阻隔手段实现多介质污染协同治理, 逐步形成适应复杂场地条件的多工艺组合响应体系。表 1 对比了不同路径在

适用对象、能耗与工艺特征方面的差异, 构成了生态环境治理多维系统集成的基础平台。

2 不同技术路径在生态环境工程中的协同应用模式

2.1 并联协同模式

并联协同是一种结构上相对独立、功能上互补的配置方式。各技术单元不在流程上前后依赖, 而是根据具体污染物浓度分布、空间布局和排放特征进行模块化配置, 在系统运行中互不干扰、协同补充。在水环境治理项目中, 该模式应用广泛。以典型城市黑臭水体整治为例, 系统中往往设置前端截污调蓄池, 中段布设高效沉淀单元及人工快速滤池, 末端配置生态浮床与湿地系统, 以应对水量波动、污染浓度变化和生态修复需求的复合目标。各单元可依据水质动态调配运行负荷, 提高系统适应性。

在大气污染治理中, 并联模式常用于 VOCs 分级控制。以工业涂装车间为例, 针对高浓度段采用蓄热式催化燃烧 (RCO), 中低浓度段配置活性炭吸附-脱附回收系统或低温等离子体氧化系统。通过风量、浓度、温度等在线监测数据分配废气流向, 实现源头分级治理与系统效率最优化^[2]。在实际项目中, 风量分配通常借助变频风机与智能阀门控制系统完成, 显著降低能耗, 提高处理灵活性。并联结构适用于负荷波动大、污染源复杂场景, 虽运行灵活、易维护, 但耦合度低, 资源协同能力受限, 依赖数字化调度。

*本文通信作者, E-mail: 13976992754@163.com。

表 1 生态环境工程不同技术路径对比

技术路径	典型工艺	处理对象	出水标准 / 排放限值	占地面积	能耗 (kW · h/m ³)	工艺特点
水环境治理	A2/O、MBR	COD、NH ₃ -N、SS	COD ≤ 50 mg/L	中	0.8 ~ 1.5	出水稳定，适用面广
大气污染控制	SCR、RCO、湿法脱硫	NO _x 、SO ₂ 、VOCs	NO _x ≤ 50 mg/Nm ³	较小	50 ~ 200 (工业源)	反应效率高，适应行业多样
固废处理与资源化	焚烧、热解、厌氧	生活垃圾、污泥等	烟气达标、残渣稳定	较大	高 (热处理为主)	协同处置能力强，能量回收效率高
土壤与地下水修复	原位氧化、PRB	重金属、有机污染	修复达《土十条》标准	高	较高	工艺组合复杂，依赖监测反馈

2.2 串联工艺集成模式

串联模式以“流程闭环、单向推进”为基本特征，强调各技术单元之间的前后逻辑关系与功能承接，通过精准衔接实现污染物的逐级削减与出水质量稳定控制。在典型工业废水处理系统中，预处理模块如混凝沉淀与格栅过滤用于去除大颗粒与油脂，再由生物处理系统进行有机负荷降解，最后配置臭氧氧化或膜处理单元完成深度净化，形成集成式处理链。此类路径广泛应用于要求出水稳定性高的项目，如工业园区集中污水处理厂、再生水厂及环境准Ⅲ类地表水回用项目。

串联系统可将各技术路径功能精细化解，显著提升整体工艺效率与水质安全冗余度。该模式也适用于大气治理系统，如烟气治理路径中“布袋除尘—脱硫塔—SCR脱硝—湿式电除雾”工艺链，可确保各环节在物理—化学性质变化基础上层层递进，形成高适应性的排放控制系统。但需注意的是，串联工艺的运行稳定性依赖于各单元之间的参数协调与负荷平衡，一旦前端处理单元发生异常，可能导致整个系统链条运行紊乱。

2.3 模块化耦合应用模式

模块化耦合是一种更为灵活且工程适应性强的协同应用结构，技术路径以标准化、可移动化、可插拔为核心设计理念，通过预设工艺接口实现多技术模块自由组合与快速部署。该模式多见于农村污水处理站、小流域治理单元及应急环境修复系统中，例如在某一地区部署集成式“一体化AO-MBR+紫外消毒+人工湿地”设备，根据进水水质、地形条件与出水要求调整模块配置比例，具备快速建设、运维简单、智能化控制便捷等优势。

模块化耦合不仅适用于中小规模工程，也在大型环境系统中展现出良好的拓展性。在固废资源化领域，部分城市生活垃圾焚烧厂引入污泥协同处置模块，与现有热力系统无缝对接，形成“垃圾焚烧+污泥干化+

烟气余热回收”的资源闭环系统，显著提升了能源利用率与污染物协同控制能力^[3]。随着数字化与工业控制技术的进步，模块化工艺系统已能实现远程监测、智能调度与参数联动，为区域化环境管理提供了高效支撑。

2.4 跨介质协同治理模式

污染物在水、气、土等介质之间迁移富集，需构建打破介质边界的协同治理机制。该模式以阻断污染链条、恢复生态功能为目标，整合界面反应、介质调度与通量调节技术，形成全过程联动系统。

在垃圾填埋场治理中，渗滤液经UASB-Fenton系统处理，尾水纳滤回用；填埋气导出后火炬燃烧或除硫处理，封场区同步叠加HDPE防渗层与生态复绿，实现气—水—土三相协同控制。

在化工场地修复实践中，通过地下水抽提、土壤稳定化与生物降解系统的耦合配置，结合地下水监测与大气走航系统，构建污染识别、控制与反馈响应闭环，提升复合污染场地治理完整性。

城市河道治理则通过岸带尾气过滤与绿植降尘、水体内微纳米曝气等手段，协同调控水质与大气，实现水—气介质联动调控的工程化落地。该模式强调系统集成与动态响应能力，是实现生态系统整体修复与污染路径全流程阻断的关键方向，对协同机制构建、监测调度水平提出更高要求。

3 不同技术路径协同应用中面临的挑战

3.1 技术兼容性与运行参数不协调

多路径协同对系统参数匹配性提出较高要求。不同工艺对温度、pH、反应时间等条件依赖显著差异，生物法对温度波动敏感，而热处理单元则需维持高强度才能稳定运行。运行中常见进水水质、水量或气体风量波动，若缺乏中间调节机制，易造成部分单元脱离最优区间，降低整体效率。跨介质系统中，气、液、

固耦合接口响应迟缓,若无统一调节逻辑和缓冲设计支撑,系统联动失稳风险明显上升。

3.2 系统集成度不高与智能调控能力弱

当前,协同系统多停留在工艺拼接阶段,控制层级尚未形成真正联动。传感器分布离散、数据系统独立,缺乏统一平台整合与反馈机制,导致运行状态难以闭环控制。运行依赖人工经验调节,难以适应负荷变化和突发扰动,系统调节滞后明显。缺乏基于数据驱动的预测算法和优化控制框架,也限制了协同系统的自动响应能力与运行安全性,削弱了工程智能化水平与长期韧性。

3.3 工程标准缺失与设备接口不统一

协同系统构成复杂,不同设备间在接口类型、控制逻辑、电气标准等方面兼容性差,缺乏跨技术模块的标准规范。工程设计中常出现设备适配难、通信协议不兼容等问题,增加施工改造与调试成本,影响系统部署效率。以污水处理项目为例,若曝气、监测和泵控系统接口不统一,容易出现信号失真或延迟,影响生化系统的实时调节能力^[4]。标准化程度低也使协同系统复制推广难度加大,制约产业化发展。

3.4 成本压力与经济性论证不足

协同系统设备集成多、运行结构复杂,投资成本普遍高于传统单路径项目,建设周期长、资金回收慢,特别在中小城市推广阻力较大。运行阶段因多模块能效协同未充分优化,存在电耗、药耗边际增长,提升了全生命周期成本。缺乏经济效益评估工具,资源回收与环境稳定等长期价值难量化,影响决策信心与政策支持。

4 促进不同技术路径协同应用的建议

4.1 构建系统化协同设计导则

协同治理需在项目初期建立统一的设计逻辑,明确各工艺单元的运行边界与负荷承接关系。依据污染因子特性、水量气量波动规律,设置中间调节池、缓冲单元和负载转换结构,保障参数过渡顺畅。针对多介质系统,应引入污染耦合行为评估,识别潜在的不兼容路径组合。协同设计导则应覆盖工艺组合、节点布局与调控逻辑,为工程方案论证与后续平台建设提供基础支撑。

4.2 推进工艺标准化与模块接口统一

标准化是协同系统规模化推广的前提。需加快建立流体接口、电控系统、数据通信等多维统一标准,规范模块间物理接驳与信号传输规则。在设备设计阶段应预设统一的结构模板与流程节点,减少后期改造

需求。信息系统应统一采集频率、协议格式与编码体系,提升模块间数据互通能力。标准化建设有助于提高设备兼容性与系统工程效率,降低运行过程中的接口风险与调试成本。

4.3 引入智能管控平台,提升系统响应能力

协同运行的本质在于多模块实时联动,需依托具备分析与预测能力的智能平台实现全过程调控。平台应集成传感网络、运行模型与策略调节逻辑,支持负荷变化下的自动调配与异常响应^[5]。通过构建边缘运算单元与中心控制系统联动架构,形成“感知—决策—执行”闭环,提升故障预警与调节精度。在复杂工况下,平台还可基于历史运行数据形成学习模型,逐步优化系统运行策略与能效表现。

4.4 强化财政引导与绩效考核机制

协同系统建设成本高、回报周期长,需以财政激励机制撬动其工程化落地。可依据污染削减效率、资源利用率、运行稳定性等指标建立财政补贴或专项资金支持机制,引导高水平协同系统优先推广。绩效考核应围绕协同程度、环境效益、能耗强度等多维指标,设定分级评价模型,匹配不同区域与工程类型的具体需求。通过财政导向与考核联动,引导项目实施主体提升集成水平与运维效能,推动协同治理模式持续优化。

5 结束语

不同技术路径的协同应用正推动生态环境工程由单一控制向系统化集成转型,其关键在于打通多技术间的功能边界,实现污染削减与资源利用的协同优化。实现这一目标需强化工艺融合深度、提升系统联动响应能力,并完善标准接口与管控机制。随着智能平台与跨介质治理理念的发展,协同应用模式将在提升治理效能、增强系统韧性方面发挥更大作用。

参考文献:

- [1] 么洪波. 大数据技术在生态环境监测中的应用价值与策略研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 06(06): 86-88.
- [2] 陈军, 尹芃. 数字技术赋能生态环境治理: 生成逻辑、运行机理与优化路径 [J]. 中南民族大学学报(人文社会科学版), 2025, 45(02): 123-135, 186.
- [3] 张维. 双碳目标背景下城市生态环境保护技术路径 [J]. 智慧中国, 2024(08): 78-79.
- [4] 文兰, 宫艳玲, 梁昊. 生态环境监管数字化转型研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 05(05): 167-169.
- [5] 张鹏. 探究新形势下生态环境保护与污染治理路径 [J]. 清洗世界, 2023, 39(09): 84-86.