

乡村小微湿地水环境治理的创新模式与应用研究

左 旭

(天津市政工程设计研究总院有限公司, 天津市 300051)

摘要: 针对我国农村水环境治理面临的面源污染控制难、生态系统退化、治理成本高等问题, 基于生态系统服务理论构建“小微湿地+”多元融合治理框架, 提出生态拦截沟渠、梯级净化塘、生物浮岛耦合系统等技术集成方案, 同时建立生态系统服务价值量化评估方法并揭示小微湿地碳汇机制。研究表明, 小微湿地系统对氮、磷去除率分别达45%~85%和40%~80%, 单位面积净化效率显著高于传统大型湿地; 通过“小微湿地+有机产业”“生态旅游”“尾水治理”模式创新, 实现了生态与经济效益的协同提升。为农村水环境综合治理提供了可推广、可复制的技术路径和模式参考。

关键词: 乡村小微湿地; 水环境治理; 面源污染控制; 碳汇功能; 生态产品价值实现

中图分类号: X52

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)09-0257-05

Study on Innovative Modes and Applications of Rural Micro-Wetlands in Water Environment Governance

ZUO Xu

(Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300051, China)

Abstract: Aiming at the prominent problems of difficult non-point source pollution control, ecosystem degradation and high governance cost in the rural water environment governance of China, a “micro-wetland +” multi-integration governance framework is constructed according to the ecosystem service theory. The technical integration schemes such as ecological interception ditches, stepwise purification ponds and biological floating island coupling systems are proposed. And at the same time, a quantitative evaluation method for ecosystem service value is established to reveal the carbon sink mechanism of micro-wetlands. The research result shows that the removal rates of nitrogen and phosphorus by the micro-wetland system reach 45%~85% and 40%~80% respectively, and the purification efficiency per unit area is significantly higher than that of traditional large-scale wetlands. Through the innovation of modes such as “micro-wetland + organic industry”, “ecologic tourism” and “tailwater treatment”, the coordinated improvement of ecological and economic benefits is realized, which provides a promotable and replicable technical path and model reference for the comprehensive governance of rural water environments.

Keywords: rural micro-wetland; water environment governance; non-point source pollution control; carbon sink function; ecological product value realization

0 引言

随着乡村振兴战略的深入实施, 农村水环境治理成为生态文明建设和人居环境改善的核心任务^[1]。据统计, 我国现有农村黑臭水体约1.2万条, 涉及面积超3亿m², 60%以上分布于南方水网密集区和北方季节性河流区域, 面源污染成为农村水环境恶化的主要诱因。传统治理模式侧重工程化硬

化处理和集中式污水处理设施建设, 存在投资高、运维难、生态功能弱化等问题, 难以适配农村地区分散性、季节性、经济性的治理需求^[8]。

小微湿地作为湿地生态系统的重要组成, 指面积在8hm²以下、具有周期性积水和生态功能的小型湿地单元, 涵盖沟渠、堰塘、坑塘等形态, 其分布广、水土接触面大、建设运维成本低的特点, 与农村水环境治理需求高度契合^[14]。重庆市梁平区、浙江省天台县等地的“小微湿地+”实践已验证其在水质净化与乡村产业融合中的价值^[14-15], 但目前小微湿地的理论研究、技术体系仍不完善, 缺乏系统的设计规范

收稿日期: 2026-03-18

作者简介: 左旭(1983—), 男, 学士, 高级工程师, 从事生态湿地、生态修复设计工作。

和模式总结^[2]。

本文基于生态系统服务理论,遵循“机制解析—技术构建—价值核算—模式创新—工程验证”的逻辑主线展开研究。首先解析小微湿地的生态功能机制,明确其在水环境治理中的核心优势;进而构建涵盖源头拦截、过程净化与末端修复的全链条技术体系;在此基础上,建立服务价值量化评估方法,揭示其碳汇贡献;最后提炼“小微湿地+”多元融合模式,并结合工程案例验证其综合效益,以期在农村水环境综合治理提供科学支撑和实践参考^[3]。

1 小微湿地生态系统功能机制与特征分析

1.1 小微湿地的生态服务功能

小微湿地具备供给、调节、支持和文化四大生态服务功能,在水环境治理中核心体现为水质净化、洪水调蓄、生物多样性维持和气候调节。其中,水质净化为最核心功能,通过基质-植物-微生物的协同作用,实现氮、磷、有机物等污染物的去除,其净化机理包含物理沉降、化学吸附和生物降解。因小微湿地周长-面积比显著高于大型湿地,生态边缘效应更突出,10个1 hm²的小微湿地水质净化效果优于1个10 hm²的大型湿地^[12]。

在洪水调蓄方面,小微湿地通过地形集水和多层级滞蓄削减洪峰、延缓径流;气候调节层面,通过水汽蒸发、植被蒸腾增加大气湿度、调节局部温度,缓解农村干热环境。生物多样性维持则为水质净化提供稳定的生态基础,各类生物相互作用提升系统的抗干扰能力^[4]。

1.2 小微湿地的系统特征与优势

小微湿地的独特特征决定了其在农村水环境治理的适配性,核心优势体现在4方面:一是斑块化分布与网络连通性,可嵌入农田、村落实现源头污染控制;二是高边缘效应与生态活性,水陆交错带发育充分,生物多样性显著高于单个大型湿地^[14];三是低成本建设与易维护管理,可利用乡村现有水利设施生态化改造,运维可结合农业生产由农户完成;四是多功能融合与产业协同,可与农业、旅游等功能结合,在治污的同时创造经济价值,破解传统治污“只投入、无产出”困境。

上述功能机制与系统特征的分析表明,小微湿地在农村水环境治理中具备独特的生态适配性与经济可行性。基于此,如何将上述理论优势转化为可落地、可操作的技术方案,构建一套适用于不同污染

场景的系统化治理体系,成为本文接下来要探讨的核心问题。

2 小微湿地水环境治理技术体系构建

针对农村水环境污染来源复杂、时空分布不均的特点,单一技术难以实现长效治理目标。为此,本文遵循“源头削减、过程拦截、末端净化、生态修复”的系统治理思路,将生态拦截沟渠、梯级净化塘-湿地耦合系统及生物浮岛-固定化微生物技术进行有机整合,形成全链条技术体系。各技术单元在空间上相互衔接,在功能上分级互补,共同实现对农村面源与点源污染物的协同削减。

2.1 生态拦截沟渠系统

生态拦截沟渠是农田面源污染控制的第一道防线,在技术体系中承担源头控制与初级拦截功能,通过恢复自然生态结构实现污染物拦截净化,相较于传统“三面光”硬化沟渠具备显著净化优势。其结构设计包括基底与边坡生态化改造、水生植物立体配置、净化节点设置三部分,沟底种植空心菜等挺水植物、沟壁种植狗牙根等护坡植物,同时设置生态浮床、火山石填料强化净化。

浙江省天台县实践表明,该系统对农田排水总氮、总磷拦截率分别达50%、60%以上,悬浮物拦截率超95%。其水力停留时间与污染物去除效率可通过公式计算:

$$t = \frac{L \cdot A}{Q} = \frac{L}{v} / \lg 1 \quad (1)$$

式中: t 为水力停留时间,d; L 为沟渠长度,m; A 为断面面积,m²; Q 为流量,m³/s; v 为流速,m/s。

$$\eta = 1 - e^{-k \cdot t \cdot \rho \cdot \alpha / \lg 2} \quad (2)$$

式中: η 为污染物去除效率,%; k 为降解速率常数(典型值0.08~0.25 d⁻¹); ρ 为植物覆盖度,%; α 为基质修正系数(透水基质取1.0~1.2,硬化基质取0.6~0.8)。

2.2 梯级净化塘-湿地耦合系统

梯级净化塘-湿地耦合系统适用于农村生活污水和养殖尾水处理,作为过程拦截与深度净化的核心环节,通过串联厌氧塘、兼性塘、好氧塘和人工湿地实现污染物分级降解^[15]。系统设计核心参数为:水力停留时间厌氧塘2~5 d、兼性塘5~15 d、好氧塘3~5 d、人工湿地不小于3 d;塘深随塘体类型逐步降低,植物配置按塘体类型差异化选择。

重庆市梁平区2023年实施的“梯塘小微湿地”模式是该技术的典型应用,通过修复废弃堰塘构建梯

级跌落式系统,利用地形高差实现自然复氧,监测数据显示,系统对 COD、氨氮、总氮、总磷去除率分别达 70%、80%、75% 和 70% 以上^[3]。

2.3 生物浮岛-固定化微生物耦合技术

生物浮岛-固定化微生物耦合技术针对水体氮、磷深度净化设计,作为末端水质强化与生态修复措施,相较传统生物浮岛,通过固定化微生物技术显著提升净化效率^[4]。固定化微生物采用活性炭、碳纤维等多孔载体负载功能菌剂,其中碳纤维生态草比表面积达 800 m²/g,挂膜性能优异,可富集土著微生物增强水体自净能力^[5]。

该系统通过植物-微生物协同的硝化-反硝化过程去除氮,通过化学沉淀和生物同化固定磷,其氮去除动力学符合 Monod 方程:

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{\mu_{\max} \cdot N}{K_s + N} \cdot X/\text{tag3} \tag{3}$$

式中: N 为氮浓度, mg/L; $\mu_{\max}$ 为最大比降解速率

(典型值 0.3~0.8 d⁻¹); K_s 为半饱和常数(典型值 1.0~3.5 mg/L); X 为生物量, mg/L^[4]。

2.4 技术集成与参数优化

针对农村水环境治理的复杂需求,整合上述技术形成“源头控制—过程拦截—末端净化—生态修复”全链条技术体系,集成原则为因地制宜、分级处理、生态优先、经济可行。上述技术的集成是依据污染物迁移路径进行逻辑串联:生态沟渠首先对农田排水中的悬浮物和部分氮磷进行拦截削减;梯级塘-湿地系统进一步对汇集的生活或养殖废水进行多级生化降解;生物浮岛-固定化微生物技术则用于应对水体黑臭应急或深度脱氮除磷需求。各技术单元既可独立运行,又能通过串联或并联方式协同增效。不同技术组合的适用条件和性能参数见表 1,可根据污染类型、水质目标针对性选择,建设成本差异主要由地形复杂度、材料选型、建设规模决定,山地丘陵区较平原区成本高 30%~50%。

表 1 小微湿地技术集成方案性能参数

技术组合	适用场景	水力停留时间/d	TN 去除率/%	TP 去除率/%	建设成本/(元·m ⁻³)	运维成本/(元·m ⁻³)
生态沟渠-净化塘	农田面源污染	1~3	45~60	50~65	150~300	0.05~0.10
厌氧塘-兼性塘-表流湿地	农村生活污水	10~20	60~75	55~70	800~1 500	0.15~0.25
生态沟渠-梯级塘-潜流湿地	养殖尾水	5~15	70~85	65~80	500~1 000	0.10~0.20
生物浮岛-固定化微生物-曝气	黑臭水体应急	3~7	50~70	40~60	300~600	0.20~0.40

由表 1 可见,技术组合方案的性能参数与适用场景紧密关联:从农田面源的轻度污染拦截,到生活污水的集中生化处理,再到养殖尾水的高浓度降解及黑臭水体的应急修复,技术强度与成本投入呈递进关系。这种差异化的集成配置策略,保障了技术选型的科学性与经济性。

3 小微湿地生态系统服务价值量化评估

上述技术体系的构建与集成解决了小微湿地“如何治水”的工程问题。然而,要推动其在乡村地区的规模化应用,还必须回答“治水后带来了多少生态红利与经济回报”这一价值命题。为此,本节从水质净化与碳汇功能两个维度,建立生态系统服务价值的量化评估方法。

3.1 水质净化服务价值核算

水质净化是小微湿地最核心的调节服务,采用替代成本法核算,以同等处理能力污水处理厂的投资和运行费用为替代成本^[3],核算公式为:

$$V_{\text{wp}} = Q \cdot (C_{\text{in}} - C_{\text{out}}) \cdot P_t \cdot T + C_{\text{om}} \cdot A \cdot T/\text{tag4} \tag{4}$$

式中: V_{wp} 为水质净化服务价值,元; Q 为处理水量,

m³/d; C_{in} 、 C_{out} 为进出水污染物浓度, mg/L^[10]; P_t 为单位污染物处理成本,元/kg^[7]; T 为服务年限,年; C_{om} 为单位面积运维成本,元/(m²·年); A 为湿地面积, m²^[6]。

以北方平原区乳制品工厂周边水系治理工程为例,梯级净化塘-湿地系统面积 2 500 m²,日处理水量 500 m³,COD 去除量 150 kg/d,参照当地 COD 处理成本 2.5 元/kg^[9],服务年限 20 年,计算得水质净化服务价值 547.5 万元,单位面积年净化价值约 1 095 元/(m²·年),显著高于传统表流湿地 600~800 元/(m²·年)的水平。

3.2 碳汇功能与碳中和贡献

小微湿地作为“蓝色碳汇”重要载体,碳储量为同等面积森林的 3~5 倍^[4],其碳汇机制包括植物光合作用固碳、植物残体沉积形成泥炭层、微生物介导的碳酸盐沉淀无机固碳,年碳汇量计算公式为:

$$C_{\text{seq}} = C_{\text{plant}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{sed}}/\text{tag5} \tag{5}$$

式中: C_{seq} 为年碳汇量, kg C/(m²·年); C_{plant} 为植物生物量碳增量, kg C/(m²·年); C_{soil} 为土壤有机碳增量, kg C/(m²·年); C_{sed} 为沉积物碳埋藏量, kg C/(m²·年)。

梁平区双桂湖小微湿地群 2023 年监测显示,梯级塘-湿地系统综合碳汇量 2.8~4.5 kg C/(m²·年)^[15],

按全国碳市场平均价格50元/t CO₂计,单位面积碳汇价值0.51~0.82元/(m²·年)。同时,“小微湿地+有机产业”模式可实现间接减排,梁平区稻-渔、稻-虾模式单位面积年净碳汇达2.0~3.5 t CO₂/hm²,为农村碳中和提供可行路径。

4 “小微湿地+”模式创新与价值实现

技术体系的应用效果验证与生态服务价值的量化评估,共同揭示了小微湿地蕴含的巨大生态经济潜力。如何将这种潜力转化为驱动乡村发展的内生动力,是实现长效治理的关键。基于生态系统服务价值的实现路径,本章提炼出3种“小微湿地+”产业融合创新模式,旨在打通“两山”转化通道。

4.1 “小微湿地+有机产业”模式

该模式将小微湿地建设与有机农业、生态渔业融合,通过“稻田+湿地”“池塘+湿地”组合实现生产与净化功能协同^[15]。重庆市梁平区2023年通过在水田周边构建生态沟渠和净化塘,种植莼菜、水芹等水生经济植物,养殖稻鱼、稻虾等物种,实现“肥药双减、一田双收”,湿地建设单户平均投资约8.5万元,投资回收期约1.6年,带动农户均增收5.2万元,农田退水氮、磷排放降低40%以上。

模式技术要点为:控制湿地-农田面积配比5%~15%;选择兼顾净化功能和经济效益的湿地物种;建立生态补偿机制,对生态种植农户给予补贴。

4.2 “小微湿地+生态旅游”模式

“小微湿地+生态旅游”模式将湿地修复与乡村旅游、自然教育结合,通过景观营造和文化挖掘实现生态产品价值转化^[14]。梁平区双桂湖湿地公园2023年构建多类型小微湿地景观,实施水系连通、生态移民等措施,当年接待游客1 502.3万人次,旅游收入近97.6亿元,其旅游线路入围全国精品主题旅游线路。

模式关键要素为:保持湿地自然性和原真性,避免过度人工化;挖掘地域水文化特色,提炼“乡愁”文化内涵;完善生态解说和自然教育设施,提升游客体验。

4.3 “小微湿地+尾水治理”模式

该模式针对农村污水处理厂尾水、养殖尾水等低污染水,通过小微湿地深度净化并实现资源化利用^[1]。浙江省黄湖镇青山村在污水处理厂尾水排放口建设表流-潜流湿地组合系统,种植矮生美人蕉、菖蒲等水生植物,出水达到地表水Ⅳ类标准,可直接用于农田灌溉。其经济效益可通过处理水量、氮磷

去除量及化肥价格等参数核算,实现治污与农业节水的双重效益。

5 工程应用与效果验证

5.1 北方平原区案例:乳制品工厂周边水系治理

某乳制品工厂位于北方沿海地区,周边养殖废水和农田退水导致1.2 km排干渠形成劣Ⅴ类黑臭水体,严重影响周边生态和农业生产。治理采用“控源截污+清淤疏浚+梯级湿地+生态修复”技术路线,总投资约220万元,日处理水量500 m³,单位建设成本440元/m³。

工程运行6个月后监测显示:水体透明度由0.15 m提升至1.2 m,溶解氧由0.8 mg/L提升至6.5 mg/L,氨氮由18.5 mg/L降至1.2 mg/L,总磷由2.8 mg/L降至0.3 mg/L,水质达地表水Ⅳ类标准^[11];通过湿地植物收割饲料化利用,年收获15 t水生植物,替代饲料价值约3万元,年运维成本约3.2万元,运维成本0.018元/m³,实现了生态效益与经济收益的平衡。

5.2 长效管理机制与数字化运维

针对小微湿地分布分散、运维薄弱问题,构建基于物联网的智慧监测与预警系统,分为感知层、传输层、平台层和应用层。感知层部署水质在线监测仪、水位传感器,采集溶解氧、pH、氨氮等关键指标;传输层采用4G/5G无线通信实现远程传输;平台层建立云计算数据中心进行数据处理;应用层开发移动端APP和Web界面支持远程管控。

系统预警模型基于随机森林算法构建,训练数据量超5万组,当溶解氧预测值低于3 mg/L阈值时,系统自动推送预警,提示采取增氧、调水等措施。该系统在浙江黄湖镇青山村应用后,实现无人值守和远程管控,运维成本降低60%以上。同时建立“谁受益、谁付费”的生态补偿机制,构建政府主导、企业参与、村民自治的多元共治机制,为小微湿地长效运维提供管理保障。

6 结 论

本文通过乡村小微湿地生态系统在水环境治理中的应用研究,得出以下结论。

(1)小微湿地具有水质净化、洪水调蓄等多重生态服务功能,单位面积净化效率优于传统大型湿地,且建设运维成本低、适配农村分散式治污需求,是农村水环境治理的优选模式。

(2)构建的“源头控制-过程拦截-末端净化-生

态修复”全链条技术体系^[13],对氮、磷去除率分别达 45%~85% 和 40%~80%,可根据污染类型差异化集成应用,地形和材料选型是建设成本差异的核心因素^[4]。

(3)建立的生态系统服务价值量化评估方法,可实现水质净化、碳汇等功能的价值核算^[3],小微湿地梯级塘-湿地系统碳汇量 2.8~4.5 kg C/(m²·年),“小微湿地+有机产业”模式具备显著碳中和贡献。

(4)“小微湿地+有机产业”“生态旅游”“尾水治理”3 大创新模式,破解了农村治污“只投入、无产出”的困境,其中有机产业模式投资回收期约 1.6 年,经济收益显著。

(5)基于随机森林算法的智慧监测预警系统和“政府—企业—村民”多元共治机制,为小微湿地长效运维提供了技术和管理保障,可有效降低运维成本 60% 以上。

为推动小微湿地在农村水环境治理中的规模化应用,建议:将小微湿地保护修复纳入国土空间规划和乡村振兴战略,制定专项技术规范;建立多元化投入机制,探索碳汇、水权交易等融资渠道;加强科技支撑和基层技术人才培养;推动公众参与,将湿地管护纳入村规民约。后续研究可进一步深入小微湿地微生物—植物—基质协同作用微观机理,开发新型功能材料和智能装备,完善生态产品价值核算体系和数字孪生管理平台。

参考文献:

[1] 王舜和,王红莉,平惠.不同碱度对 SBR 法短程硝化过程的影响[J].山西建筑,2011(33):130-132.

[2] 李伟,崔丽娟,赵欣胜,等.中国滨海湿地及其生态系统服务功能研究概述[J].林业调查规划,2014,39(6):1-7.

[3] 中国环境保护产业协会.2010 年度国家鼓励发展的环境保护技术目录[J].中国环保产业,2011(4):1-10.

[4] 杜宪,岳秀萍,王孝维,等.厌氧复合床处理模拟焦化废水的反硝化动力学[J].化工学报,2013,64(12):4567-4574.

[5] 赵茜.挂膜启动与脱氮除磷效率研究[D].武汉:华中科技大学,2011.

[6] 王龙剑.九龙江流域水生态系统服务价值评估[D].厦门:厦门大学,2013.

[7] 吴雨晴.广东省城镇污水处理服务费定价模型与拨付机制研究[D].长沙:湖南大学,2017.

[8] 马东春,董正举,黄金,等.基于永定河生态修复工程的河流生态服务价值增量评估[J].生态经济,2017,33(11):145-149.

[9] 郑伟.海洋生态系统服务及其价值评估应用研究[D].青岛:中国海洋大学,2008.

[10] 周振江.基于 HYDRUS 模型的生物滞留带对道路雨水径流调控及水质净化模拟研究[D].西安:长安大学,2021.

[11] 孙锐.基于梯级沟渠系统的农业非点源污染控制研究[D].淮南:安徽理工大学,2021.

[12] 朱颖珊.节能减排政策下污水处理后的出路[J].房地产导刊,2016(11):89-90.

[13] 张明,李丽,王静.小微湿地:家门口的生态“百宝箱”[J].自然资源科普与文化,2024(1):42-48.

[14] 陈维灯.“臭水塘”变身湿地公园[N].重庆日报,2024-12-24(008).

[15] 郭佳雯,蒲迅赤,黄瑞仙.渠道走向及几何尺寸对灌溉水增温的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(11):25-31.

(上接第 256 页)

[13] 陈静茹,张沐川,薛瑶.长江干流江苏段崩岸应急治理工程经济效益综合评价[J].水利规划与设计,2018(4):18-21.

[14] 吴玉明,王献辉,花剑岚.南京城市防洪规划(2013~2030)编制

与思考[J].水利规划与设计,2017(1):7-10.

[15] 胡锦,张颖,黄天增,等.基于 GIS 的长江南京段河势演变及预警机制研究[J].水利规划与设计,2024(9):44-49.