

人工湿地日常管理关键问题与运维对策研究

邵捷¹, 肖娴¹, 钱怡婷¹, 周书祥²

¹云南省生态环境工程评估中心, 云南 昆明

²云南省生态环境监测中心, 云南 昆明

收稿日期: 2026年4月16日; 录用日期: 2026年5月17日; 发布日期: 2026年5月26日

摘要

人工湿地是集水质净化、生态修复与景观效益于一体的生态型污水处理技术, 在污水处理厂尾水深度处理、农村分散式污水治理、面源污染控制等场景中应用广泛。随着我国水环境治理要求提升与“双碳”战略推进, 人工湿地建设规模持续扩大, 但长期运行普遍存在重建设、轻管理现象, 系统堵塞、植物退化、出水波动、功能衰减等问题突出。现有研究多集中于净化机理、材料改良与工艺强化, 对日常运维的系统性评述相对不足。本文系统梳理了人工湿地物理、化学、生物协同净化机制, 深度剖析了影响长效运行的关键因素与关键问题之间的内在关联, 揭示了基质堵塞、植物退化、水力学失效、溶解氧与碳源限制、微生物活性衰减等问题的耦合机理。在此基础上, 提出了运维对策体系, 并构建了基于湿地类型、处理目标、气候条件和经济水平的决策支持框架, 并展望未来研究方向, 为人工湿地标准化、长效化运维提供参考。

关键词

人工湿地, 日常管理, 基质堵塞, 植物调控, 运维对策, 决策框架

Key Issues and Operation-Maintenance Strategies in Daily Management of Constructed Wetlands

Jie Shao¹, Xian Xiao¹, Yiting Qian¹, Shuxiang Zhou²

¹Yunnan Appraisal Center for Ecological and Environmental Engineering, Kunming Yunnan

²Yunnan Ecological Environment Monitoring Center, Kunming Yunnan

Received: April 16, 2026; accepted: May 17, 2026; published: May 26, 2026

Abstract

Constructed wetlands are an ecological wastewater treatment technology integrating water purifi-

cation, ecological restoration, and landscape benefits. They are widely used in advanced treatment of tailwater from wastewater treatment plants, decentralized rural sewage treatment, and non-point source pollution control. With the improvement of China's water environment management requirements and the advancement of the "dual carbon" strategy, the construction scale of constructed wetlands has continued to expand. However, long-term operation commonly suffers from the phenomenon of "emphasis on construction but neglect on management," with prominent problems such as system clogging, plant degradation, effluent fluctuation, and functional attenuation. Existing research mostly focuses on purification mechanisms, material improvement, and process enhancement, while systematic reviews on daily operation and maintenance are relatively insufficient. This paper systematically reviews the physical, chemical, and biological synergistic purification mechanisms of constructed wetlands, deeply analyzes the internal relationships between key factors affecting long-term operation and critical management issues, and reveals the coupling mechanisms of substrate clogging, plant degradation, hydraulic failure, dissolved oxygen and carbon source limitation, and microbial activity attenuation. On this basis, an operation and maintenance strategy system is proposed, and a decision support framework based on wetland type, treatment target, climatic conditions, and economic level is constructed. Future research directions are also discussed, aiming to provide a reference for standardized and long-term operation and maintenance of constructed wetlands.

Keywords

Constructed Wetlands, Daily Management, Substrate Clogging, Plant Regulation, Operation and Maintenance Strategies, Decision Framework

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人工湿地因投资低、能耗小、生态友好等优势,已成为城乡水环境治理的重要技术选择[1]。近年来,我国人工湿地工程数量快速增长,在尾水提标、河道修复、农村治污等领域发挥重要作用[2]。但在实际运行中,大量工程呈现“初期效果好、长期衰减快”的特征,基质堵塞、植物衰败、出水超标、系统失效等现象普遍,核心原因在于日常管理缺失、运维方式粗放、预警与应急机制不健全[3]。当前研究多关注前端工艺优化,对建成后的巡检、维护、调控、修复等系统性研究不足,管理标准缺位、专业能力不足、资金保障薄弱等问题,已成为制约人工湿地长效稳定运行的主要瓶颈[4]。

人工湿地是由基质、植物、微生物及水动力条件构成的复合生态系统,其净化能力依赖多过程协同平衡,日常运维直接决定系统寿命与处理效能[5]。基于此,本文以文献梳理为基础,从净化机理、运行影响因素、关键管理问题、运维对策等方面进行系统性评述,明晰研究脉络与现存短板,为人工湿地全生命周期管理提供理论支撑。

2. 人工湿地净化机理与长效运行影响因素

2.1. 人工湿地污染物净化机理

人工湿地对污染物的去除机理涉及物理、化学、生物作用过程。三者相互补充、不可替代,共同决定系统净化效果[6]。

物理作用主要通过过滤、截留、沉淀与吸附实现污染物的去处[7]。污水流经基质层时,悬浮固体被

孔隙拦截并快速沉降，可显著降低出水浊度；沸石、生物炭等多孔材料还能对部分溶解性污染物产生物理吸附，提升初期净化效果。物理作用反应迅速、无需能耗、稳定性强，是去除悬浮物的核心途径，但也存在孔隙堵塞、物理吸附容量有限等缺陷，仅依靠物理作用难以实现低浓度废水的稳定达标，须与化学、生物作用协同才能维持长效运行[8]。

在物理截留与吸附的基础上，化学作用进一步强化难降解污染物的稳定去除，是除磷与重金属控制的关键机制[9]。化学作用主要包括沉淀、络合、离子交换与氧化还原反应，铁基基质、石灰石、钢渣等材料可通过表面配位或化学沉淀将磷酸盐固定为稳定物质，实现持久滞留；部分基质还可通过离子交换与氧化还原参与氮素转化，提升脱氮稳定性[10]。化学作用具有去除效率高、产物稳定、不易造成二次污染等优点，尤其对磷的去除具有不可替代性。但基质化学活性位点会随运行逐渐钝化，吸附与沉淀容量饱和后难以自然恢复；部分化学材料长期浸泡存在劣化风险，且化学过程难以独立完成有机物与氮素的完整转化，必须依赖生物作用实现系统功能闭环[11]。

生物作用是人工湿地污染物降解的核心与驱动，决定系统长期净化能力，主要包括微生物代谢、植物吸收与根际效应[12]。微生物是碳、氮、磷循环的主要推动者，硝化菌与反硝化菌协同完成脱氮，多种功能菌群共同降解有机物；湿地植物通过根系泌氧改善根际微环境，直接吸收氮磷用于生长，并为微生物提供附着载体；底栖生物与藻类也可辅助提升净化效果。生物作用具有可持续性、功能全面、生态兼容性好等优势，是人工湿地低耗长效的关键[13]。但生物过程对环境敏感，温度、溶解氧、碳源、pH等条件波动都会显著影响活性；植物与微生物群落结构不合理，易出现过度生长、衰败死亡、功能退化等问题，若缺乏科学管理，不仅无法发挥净化作用，还可能释放污染物造成二次污染[14]。

综上，人工湿地对污染物的去除机理是物理、化学和生物作用额度共同结果，日常管理的核心任务就是维持物理、化学、生物过程的动态平衡，避免单一环节失效引发系统整体衰退。

2.2. 人工湿地长效运行关键影响因素

人工湿地长期稳定运行受多重因素交互影响，这些因素既是设计关键参数，也是日常运维必须持续调控的对象。

水力负荷与水力停留时间直接决定污染物与基质、微生物的接触效率，负荷过高易引发短流、净化不充分，过低则可能导致系统干涸、生物膜失活，是日常流量调控的核心依据[15]。基质作为系统骨架与微生物载体，其孔隙结构、吸附能力与化学稳定性直接影响截留与去除效果，但长期运行易出现堵塞、吸附饱和、塌陷与流失，成为最常见的衰减诱因。植物群落的季节性生长、密度与物种配置，对水力条件、复氧效率、根际微生态影响显著，过度繁殖或枯死未收割会破坏水力通畅性，单一物种则降低系统抗逆性[16]。

溶解氧与碳氮比是脱氮过程的两大限制因子，硝化作用需充足溶解氧，反硝化作用依赖有机碳源，低碳氮比进水与复氧不足是导致脱氮效率偏低的主要原因[17]。温度与气候条件对系统影响显著，低温抑制微生物活性与植物生长，暴雨、干旱、冰冻等极端天气易造成水力冲击、基质开裂、设施损坏。进水水质波动与有毒物质冲击会快速抑制微生物活性，长期微污染水则会导致沉积物营养盐累积，逐步降低系统性能。

这些因素相互耦合、连锁影响，单一参数失控都可能引发系统性衰退。因此，人工湿地日常管理必须以关键影响因素为抓手，实施动态监测与协同调控。

2.3. 日常管理在系统生命周期中的定位

人工湿地生命周期包括设计、建设、调试、运行、衰退修复五个阶段，日常管理贯穿运行全过程，是保障设计效能落地的核心环节[18]。设计阶段若未考虑运维便利性，会导致后期检修、基质更换、植物收

割困难；启动调试期管理不当，会延长微生物与植物群落稳定周期；正常运行期的巡检、维护、监测决定系统使用寿命；性能衰退期的及时干预，可延缓失效、降低重建成本。

长期以来，人工湿地常被误认为免维护的生态设施，管理投入不足、责任不清、规程缺失，最终导致建得起、管不好、用不久。事实上，日常管理是人工湿地的守门人与调节器科学运维可有效预防堵塞、延长基质寿命、稳定植物群落、维持微生物活性，显著降低全生命周期成本。因此，必须将日常管理提升至全生命周期核心地位，纳入工程设计、建设与运维全过程。

3. 人工湿地日常管理关键问题

人工湿地在长期运行中，管理缺失会造成基质系统堵塞、生态系统和营养失衡等。具体主要包括以下几个方面。

3.1. 基质系统堵塞与吸附饱和

人工湿地基质系统堵塞是最常见的问题之一[19]。基质堵塞由悬浮物累积、生物膜过度生长与化学沉淀共同导致，表现为表面积水、溢流、水力传导率下降；吸附饱和和使除磷等功能快速衰退；局部塌陷与根系穿孔形成短路流，导致污水未经充分处理即排出；基质劣化流失与生物膜老化进一步降低传质效率。多数工程缺乏预警与预防性维护，并且在日常过程中也不能按照设计要求开展反冲洗，往往在严重堵塞后才被动修复，造成不可逆损伤。

3.2. 植物群落退化与生态失衡

植物物种养护问题突出。其内在机理在于植物生长 - 收割 - 再生平衡被打破。夏季植物过度繁殖导致密度过高，阻碍水流、加剧堵塞；秋冬季枯死植物未及时收割，分解释放氮磷造成二次污染；物种单一降低系统抗逆性，入侵植物扩散破坏生态平衡；强穿透性根系破坏基质与防渗层，水位与水质胁迫则导致植物生长不良甚至大面积死亡；收割物随意堆放易产生渗滤液回流，造成二次污染。

3.3. 水力学失效与运行条件失控

水力学与运行条件问题深刻制约去除效率[18]。布水管道堵塞、地形沉降导致布水不均，形成沟道流与死水区；水力停留时间与水位控制不当，降低净化效率并损伤植物与生物膜；潮汐流等间歇运行模式依赖自动化设备，维护缺失会使复氧效果大幅衰减；雨季流量冲击、有毒进水冲击、进出水管道堵塞等，易导致系统短期崩溃。

3.4. 溶解氧与碳源调控不足

溶解氧与碳源调控不足是脱氮效率低下的核心瓶颈。潜流湿地自然复氧能力有限，曝气与潮汐设备维护缺失使溶解氧长期不足；尾水低碳氮比导致反硝化受限，外加碳源投加粗放易造成二次污染；溶解氧与碳源时空匹配不合理，好氧与缺氧区功能错位，进一步限制脱氮效果[20]。

3.5. 微生物系统退化

微生物系统退化造成性能衰减。溶解氧、碳源、温度不适会导致硝化、反硝化功能菌群丰度下降；长期连续运行使生物膜老化增厚、活性降低；有毒物质冲击造成微生物急性失活；低温季节活性大幅下降；而日常管理中几乎不开展微生物活性监测，系统衰退后难以精准干预[21]。

3.6. 管理机制问题

总体而言，管理机制问题是所有技术问题的根源性症结[22]。责任主体不明确导致有人建、无人管；

运维资金未纳入预算，日常维护难以开展；运维人员缺乏专业培训，无法标准化操作；无统一操作规程与预警体系，只能被动应对；缺乏考核激励机制，管理积极性不足。

4. 人工湿地日常管理运维对策

针对上述问题，现有研究已形成以预防性维护、动态调控、应急保障为核心的运维对策体系，强调技术调控与管理机制双轮驱动[23]。

基质维护以“预防堵塞、动态监测、分级修复”为原则。通过进出水流量差预警堵塞，定期实施反冲洗与间歇排空；建立基质吸附容量台账，饱和后及时局部更换或再生；采用示踪试验识别短路流，对塌陷区进行补填与压实；定期检查基质厚度，及时补充流失部分，延缓基质老化。

植物管理遵循“合理配置、适时收割、密度可控、防控入侵”理念。每年春秋两季规范收割，及时清运并资源化利用；控制适宜覆盖度，采用多物种混种提升稳定性；建立入侵植物早期清除机制；根据季节调控水位，及时补种复壮，冬季做好保温防护。

水力运行管理以“均匀布水、精准控位、灵活调流、应急缓冲”为目标。定期清理布水与出水系统，消除死水区；动态调控水力停留时间，精准控制水位；潮汐流等间歇模式规范设备运维，配备手动备用；设置调节池与应急旁路，应对雨季与冲击负荷。

溶解氧与碳源实施协同精细化调控[24]。采用间歇运行、潮汐流或适度曝气提升溶解氧水平；低碳氮比进水按合理比例定量投加碳源，利用植物秸秆作为缓释碳源；分区调控好氧与缺氧环境，优化碳源投加点位与时序，提升脱氮效率。

微生物维持采用“简易监测、定期强化、适时更新”策略。通过硝化反硝化强度、生物膜外观评估活性；定期投加功能菌剂，低温与冲击后强化接种；采用间歇排空、水力反冲洗促进生物膜更新，维持适宜 pH 与环境条件。

管理体系构建“责任明确、资金保障、人员专业、规程标准、监测预警、考核激励”六位一体机制。明确运维责任主体，将运维费用纳入财政预算；开展专业培训，推广第三方专业化运维；编制标准化操作规程，搭建低成本监测平台；将运行效果纳入考核，强化激励与监督。

人工湿地运维对策应根据湿地类型、处理目标、气候条件和经济水平，参照表 1 选择执行。

Table 1. Decision support matrix for constructed wetland operation and maintenance strategies

表 1. 人工湿地运维对策决策支持矩阵

影响因素	选项/权重	推荐运维对策重点
湿地类型	表面流	植物收割、入侵防控；堵塞风险低，可简化反冲洗
	潜流水平	中等堵塞风险→重点：基质反冲洗、布水均匀性检查；辅助曝气
	潜流垂直	高堵塞风险，但复氧好→重点：强力反冲洗、间歇排空；优先潮汐流运行
处理目标	脱氮优先	重点：DO 与碳源调控(曝气 + 外加碳源)；定期强化微生物；调控 HRT
	除磷优先	重点：基质吸附容量台账、及时更换或再生(铁/钙基质)；化学沉淀维护
	去除 SS 优先	重点：过滤/沉淀维护、增加反冲洗频率、定期清理布水系统
气候条件	寒冷(冬季 < 5°C)	重点：保温措施(覆膜/雪层)、低温菌剂、冬季收割后覆盖、减少水力负荷
	温暖湿润	重点：植物生长旺盛→增加收割频率；生物膜更新快→缩短反冲洗周期
	干旱少雨	重点：水位维持、防基质干裂、减少曝气(防止蒸发)、利用回用水补水

续表

经济水平	高投入	优先: 传感器网络 + 物联网预警、自动化反冲洗、无人机遥感; 第三方专业化运维
	中等投入	重点: 便携式检测仪、定期人工监测、半机械化收割; 培训内部技术人员
	低投入	重点: 低成本示踪试验(食盐)、手动反冲洗、植物收割资源化(堆肥/饲料); 社区共管

5. 结论

人工湿地长效运行的核心瓶颈并非技术缺陷, 而是日常管理的系统性缺失。物理、化学、生物协同净化机制决定了系统必须维持动态平衡, 基质堵塞、植物管理失当、溶解氧与碳源不足、微生物退化、应急能力薄弱等技术问题, 本质是责任不明、资金不足、人员不专业、规程缺失等管理机制问题的外在表现。

人工湿地日常管理应坚持预防为主、动态调控、标准化运维, 从基质、植物、水力、溶解氧碳源、微生物等技术层面实施精准调控, 同时从责任、资金、人员、规程、监测、考核等方面完善保障体系。未来需进一步推动运维管理标准化、智能化、市场化, 真正破解“重建设、轻管理”困境, 充分发挥人工湿地在水环境治理与“双碳”战略中的生态与工程价值。

参考文献

- [1] 吴马翼, 黄福杨, 王彬, 等. 人工湿地净化污染物的应用及机制研究进展[J]. 岩矿测试, 2025, 44(5): 978-1000.
- [2] 蔡家珍. 净水、景观、生态融合的人工湿地公园构建——以漳州市平和工业园污水厂尾水处理为例[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2024, 47(6): 537-542.
- [3] 朱良升, 罗焕, 马泽宇, 等. AO-MBR + 人工湿地用于村镇分散式污水处理[J]. 中国给水排水, 2026, 42(6): 121-128.
- [4] 董聿森, 王涛. 农村生活污水近自然人工湿地深度处理系统构建模式[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(23): 106-109.
- [5] 喻银凤, 陈超, 王廷旺. 无动力人工湿地分散式处理农村生活污水研析[J]. 生态环境保护与修复, 2026, 39(2): 122-124.
- [6] 刘泽娟, 杨子超, 吉利娜. 北美人工湿地运行效果分析[J]. 水资源开发与管理, 2021, 12(12): 59-62.
- [7] 孙志强, 蒋梦婷, 罗宇峰, 等. 人工湿地及联合修复技术对景观水体修复的研究[J]. 当代化工研究, 2021, 12(24): 180-182.
- [8] 肖海文, 刘馨瞳, 翟俊, 等. 人工湿地类型的选择及案例分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(22): 11-17.
- [9] 王静, 何岩. 富铁基质人工湿地在低碳氮比废水处理中的应用研究进展[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2026(1): 66-77.
- [10] 陈建彬. 表面流人工湿地底泥释放特征及水环境数值模拟研究[J]. 吉林水利, 2025(8): 19-23.
- [11] 吕倩, 方宏萍, 李桂贤, 等. 人工湿地处理农村生活污水的调查研究[J]. 贵州农机化, 2023, 1(4): 23-26.
- [12] 张娟, 王尘辰, 毕茹, 等. 人工湿地中微生物强化污染物去除的研究进展[J/OL]. 湿地科学, 2026. <http://wetlands.neigae.ac.cn/article/doi/10.13248/j.cnki.wetlandsci.20240200>, 2026-02-10.
- [13] 程子君. 人工湿地在污水处理厂尾水水质净化应用[J]. 山东化工, 2024, 53(20): 235-237.
- [14] 张灵, 席文昌, 徐漫漫, 等. 人工湿地脱氮的影响因素及其协同机制[J]. 河南工学院学报, 2026, 34(1): 30-36.
- [15] 董大坤, 徐霖, 刘德东. 表面流人工湿地建设及湿地中水补给方案探讨[J]. 山东水利, 2025(8): 18-20.
- [16] 何凡, 许超, 刘军, 等. 三级稳定塘 + 人工湿地组合工艺在城镇污水处理厂尾水深度处理中的应用[J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(11): 173-178.
- [17] 谭颖, 贾晓凤, 孙玉, 等. 人工湿地净化污水动力学特性及经验模型[J]. 应用化工, 2025, 54(12): 3182-3188.
- [18] 何秋玫, 冯民权. 进水特征对垂直潜流人工湿地温室效应的影响[J]. 环境科学学报, 2024(30): 1-12.

- [19] 曾琳, 袁悦, 王盼, 等. 人工湿地堵塞机制与防治措施研究进展[J]. 净水技术, 2023, 42(11): 18-26.
- [20] 王建军, 宋乐元, 宋子明. 复合人工湿地在低污染水处理中的应用及案例研究[J]. 清洗世界, 2023, 39(11): 133-135.
- [21] 周旭东, 李其林, 罗俊, 等. 人工湿地净化技术在微污染河流生态修复中的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2024, 49(9): 78-82.
- [22] 张升. 人工湿地在平遥县惠济河水质净化工程中的应用[J]. 陕西水利, 2025, 12(9): 70-72.
- [23] 尹铭乾, 王子千, 李琳琳, 等. 强化型人工湿地污水处理研究进展: 脱氮机理与温室气体排放[J]. 环境工程技术学报, 2025(9): 1-23.
- [24] 叶昌树, 肖川, 余贵英. 人工湿地在污水处理厂尾水处理中的应用实践[J]. 环境保护与循环经济, 2024, 44(12): 19-22.