

水环境治理中人工湿地系统脱氮除磷效能提升技术路径探究

唐 欢

中电建生态环境集团有限公司 广东 深圳 518133

摘 要：人工湿地系统在水环境治理中发挥重要作用，其脱氮除磷效能受植物配置、基质类型、水力条件、微生物活性及环境因子等多重影响。通过优化植物种类与群落结构，选用高效吸附基质，调控水力停留时间与水流路径，强化功能微生物作用，并结合溶解氧、温度、pH值等环境调控手段，可显著提升系统净化能力。本文系统探讨了多种技术路径的协同应用，为人工湿地系统的效能提升提供科学依据和技术支持。

关键词：人工湿地系统；脱氮除磷；效能提升；技术路径；水环境治理

引言：随着水体富营养化问题日益突出，人工湿地作为生态友好型水处理技术被广泛应用。其脱氮除磷机制涉及复杂的生物、化学和物理过程，受植物、基质、微生物及运行条件等多因素影响。如何通过技术手段提升系统处理效能，成为当前研究的重点。本文围绕人工湿地脱氮除磷的关键影响因素，深入分析多种优化技术路径，为工程实践提供系统性指导。

1 人工湿地系统脱氮除磷原理及影响因素

1.1 脱氮原理

人工湿地脱氮由氨化、硝化与反硝化三个紧密关联的过程构成。氨化作用开启氮循环第一步，环境中蛋白质、尿素等有机氮化合物，在微生物胞外蛋白酶、脲酶作用下，逐步分解为氨态氮。生成的氨态氮以游离氨或铵离子形式存在，为后续转化提供物质基础。硝化过程分两阶段进行。氨氧化细菌先将氨态氮氧化为亚硝酸盐，亚硝酸盐氧化细菌接力将亚硝酸盐转化为硝酸盐。这两个反应均为好氧过程，依赖充足溶解氧维持菌群活性，最终生成的硝酸盐成为反硝化反应的底物。反硝化过程由反硝化细菌主导，在缺氧或厌氧环境下，该菌群利用污水中有机碳源作为电子供体，将硝酸盐逐步还原为氮气或一氧化二氮，使氮素从水体转入大气，完成脱氮流程。微生物是脱氮过程的核心驱动力。氨氧化细菌和亚硝酸盐氧化细菌作为化能自养菌，通过氧化含氮化合物获取能量合成细胞物质；反硝化细菌作为异养菌，借助分解有机物获取能量，同时将硝酸盐转化为气态氮。不同菌群对环境要求差异显著，氨氧化与亚硝酸盐氧化细菌偏好弱碱性、高溶解氧环境，反硝化细菌则在缺氧条件下代谢效率更高。

1.2 除磷原理

人工湿地除磷依赖植物吸收、微生物同化与基质吸附协同作用。湿地植物生长过程中，根系主动摄取水体和基质中的磷酸盐，用于合成核酸、磷脂等重要细胞成分^[1]。植物除磷效果与生长周期相关，旺盛生长期的吸收速率远高于休眠期，定期收割可移除植物体内积累的磷。微生物同化除磷以聚磷菌代谢为核心。好氧环境下，聚磷菌过量摄取磷酸盐并以聚磷酸盐颗粒形式储存于细胞内；厌氧环境中，聚磷菌分解胞内聚磷酸盐释放能量，用于摄取挥发性脂肪酸等有机底物。待环境转回好氧，聚磷菌进一步过量吸磷，最终通过剩余污泥排放实现除磷。基质吸附是除磷的重要物理化学途径。沸石、火山岩、钢渣等湿地基质，凭借特殊表面结构与化学性质吸附磷酸盐。沸石中的铝硅酸盐可与磷酸根发生离子交换，钢渣中的铁、钙氧化物能与磷酸盐生成难溶性沉淀。但吸附态磷在特定条件下可能重新释放，影响除磷稳定性。

1.3 影响因素分析

湿地植物种类与配置直接影响净化效果。根系发达的芦苇、菖蒲等植物，通过根系泌氧改善根际微环境，为硝化-反硝化菌群创造生存空间；水生美人蕉、香根草对磷富集能力突出，适用于富磷水体处理。不同植物分层配置可优化空间利用，挺水植物抑制藻类生长，浮水植物减少水体蒸发，沉水植物提升溶氧水平。基质类型与粒径决定吸附性能和水力特性。细粒径基质比表面积大，吸附能力强但易堵塞孔隙；粗粒径基质透水好却降低接触面积。采用分层级配设计，上层铺设细粒径基质强化吸附，下层用粗粒径基质保障水流，可平衡二者关系。基质厚度与结构依处理需求调整，高浓度污染治理需增加基基层厚度延长水流路径。水力停留时间与水

力负荷影响污染物去除效率。低浓度污水净化所需停留时间较短,高浓度或难降解污染物则需更长反应时间,动态调整可提升系统适应性。水力负荷过高导致水流短路,过低则浪费资源,分区调控可均衡各区域处理压力。溶解氧与温度显著影响微生物活性和植物生长。硝化需好氧环境,反硝化需缺氧条件,通过曝气装置与植物泌氧协同调控溶解氧。低温下微生物活性下降,可通过覆盖保温或引入嗜冷菌群维持效能;高温时需降低水温,避免酶活性受抑制。

2 人工湿地系统脱氮除磷效能提升技术路径

2.1 植物优化配置技术

筛选高效脱氮除磷植物需考量其吸收能力与环境适应性。具备发达根系的植物,如芦苇、菖蒲,能通过根系泌氧改善根际微环境,为硝化-反硝化菌群提供生存空间,其生物量较大,可积累更多氮磷污染物。水生美人蕉、香根草等植物对磷元素具有较强富集能力,在富磷水体净化中表现突出。耐污能力强、抗逆性好的物种,可适应不同水质条件,保障系统稳定运行。植物组合与群落构建策略强调功能互补与生态平衡。挺水植物、浮水植物与沉水植物分层配置,可充分利用水体空间。挺水植物位于表层,遮挡光照抑制藻类生长;浮水植物通过覆盖水面减少蒸发与复氧;沉水植物在底层净化水质并释放氧气。豆科植物与禾本科植物搭配,前者固氮改善土壤肥力,后者高效吸收氮磷,形成物质循环。根据季节更替选择耐寒与耐热植物交替种植,维持全年净化能力^[2]。植物收割与管理直接影响脱氮除磷效果。定期收割成熟植物,可及时移除体内积累的氮磷污染物,避免植物腐烂导致污染物二次释放。收割频率需综合植物生长周期与污染物积累量确定,过度收割可能削弱植物根系对基质的固持作用,影响系统稳定性。收割后的植物可进行资源化利用,如堆肥处理,实现污染物的再利用。

2.2 基质改良与优化技术

新型基质材料的研发与应用聚焦提升吸附性能与长效性。铁基材料如铁氧化物、铁碳复合材料,通过化学沉淀与吸附作用高效去除磷,且在厌氧条件下可释放铁离子强化除磷。生物炭作为改性基质,具有丰富孔隙结构与表面官能团,既能吸附污染物,又可为微生物提供附着载体。复合基质将多种材料按比例混合,如将钢渣与火山岩结合,兼顾吸附容量与透水性能。基质粒径与级配优化需平衡吸附与水力性能。细粒径基质比表面积大,吸附能力强,但易堵塞孔隙,导致水力阻力增加。粗粒径基质虽透水性能良好,却降低污染物与基质的接触面积。采用分层级配设计,上层铺设细粒径基质强化

吸附,下层采用粗粒径基质保障水流畅通,可实现二者兼顾。粒径分布范围窄的基质,孔隙结构更均匀,利于稳定的水流分布。基质层厚度与结构调整根据处理目标与水力负荷确定。处理高浓度污染物时,增加基质层厚度可延长水流路径,提高污染物去除效率。阶梯式或波浪形结构设计,能增加水流在湿地中的停留时间与接触面积。底部铺设砾石层作为排水层,顶部覆盖细沙层防止植物根系穿透,中间填充功能性基质,形成稳定的多层结构。

2.3 水力条件调控技术

水力停留时间的合理确定需综合水质与处理目标。处理低浓度污染物时,较短停留时间即可满足要求;处理高浓度污水或难降解污染物,需延长停留时间以确保充分反应。动态调整停留时间,根据进水水质波动实时优化,可提高系统适应性。采用多格室串联设计,使污水在不同格室中实现分级处理,优化各阶段停留时间分配。水力负荷的优化分配需匹配系统承载能力。过高的表面水力负荷导致水流短路,污染物未充分接触净化单元即流出系统;过低的负荷则造成资源浪费。分区调控水力负荷,在湿地前端处理高浓度污水时降低负荷,后端处理低浓度尾水时适当提高,可均衡系统各区域的处理压力。结合地形设计,利用重力流实现自然配水,减少能耗。水流方式与路径的改进旨在避免死区与短流。采用折流式、推流式或螺旋流等水流路径设计,增加水流在湿地中的迂回程度^[3]。设置导流墙、隔板等设施,引导水流均匀分布。表面流与潜流湿地结合的复合系统,通过不同水流方式的互补,提高污染物去除效率。利用地形高差形成跌水,增加水体复氧,促进硝化反应。

2.4 微生物强化技术

高效脱氮除磷微生物的筛选与富集需模拟湿地环境。从污水处理厂活性污泥、天然湿地底泥中分离筛选耐污能力强、代谢活性高的菌株,如氨氧化古菌、聚磷菌。通过控制溶解氧、碳氮比等培养条件,定向富集目标菌群。构建微生物菌群组合,将硝化菌、反硝化菌与聚磷菌协同培养,形成功能互补的微生物群落。微生物菌剂的制备与应用需保证菌剂活性与稳定性。采用包埋固定化技术,将微生物包裹在海藻酸钠、聚乙烯醇等载体中,提高菌剂对环境变化的耐受性。菌剂投加时机与剂量需根据湿地运行状态调整,在系统启动初期、水质恶化时适量投加,可快速恢复处理效能。与植物根系分泌物协同作用,促进微生物在根际定殖。微生物与植物、基质的协同作用机制基于物质循环与空间互补。植物根系分泌的有机物为微生物提供碳源,微生物代谢产

物促进植物生长。基质为微生物提供附着表面,其孔隙结构影响微生物分布与活性。根际微环境中,植物泌氧形成的好氧-缺氧梯度,为硝化-反硝化菌群创造适宜生存条件,实现污染物的高效去除。

2.5 环境因子调控技术

溶解氧的调控策略需匹配微生物代谢需求。通过曝气装置向湿地系统补充氧气,维持硝化反应所需的好氧环境;在反硝化区域,控制溶解氧浓度在较低水平,促进反硝化细菌代谢。利用植物根系泌氧特性,优化植物配置增强根际供氧。采用间歇曝气、脉冲曝气等方式,减少能耗的同时实现溶解氧的精准调控。温度对脱氮除磷的影响及调控措施需考虑微生物活性与植物生长。低温环境下,增加保温设施如覆盖地膜、搭建温室,或引入嗜冷微生物维持处理效能。高温季节通过增加水体流动性、种植遮荫植物降低温度,避免微生物酶活性受抑制。选择耐寒耐热植物品种,拓宽系统温度适应范围。pH值与其他环境因子的优化需维持系统酸碱平衡。添加石灰、碳酸氢钠等碱性物质调节酸性水体pH值,促进磷酸盐沉淀。控制氧化还原电位,在厌氧区维持较低电位利于反硝化与释磷,好氧区保持高电位促进硝化与吸磷。微量元素如铁、镁等的适量添加,可作为微生物代谢的辅酶因子,提高污染物去除效率。

3 人工湿地系统脱氮除磷效能综合提升策略

3.1 多技术集成与协同

植物、基质、水力与微生物技术的综合应用需围绕污染物去除这一核心目标展开。在植物优化配置方面,选择根系泌氧能力强的物种,此类植物能够为微生物创造好氧-缺氧微环境;基质改良采用铁碳复合材料,不仅能提升磷吸附性能,还可为微生物附着提供载体。水力条件调控通过设计折流式水流路径,有效延长污染物与植物根系、基质表面及微生物群落的接触时间。微生物强化技术引入高效硝化-反硝化菌群,该菌群与植物根系分泌物、基质孔隙结构形成空间互补,进而构建立体净化网络。不同技术之间的协同作用机制基于物质循环与生态位互补。植物通过光合作用产生氧气,为硝化细菌提供适宜的生存环境,其根系分泌物作为碳源支持反硝化过程^[4]。改良基质的孔隙结构可优化水流分布,一方面促进污染物与微生物之间的传质效率,另一方面基质表面能吸附水体中的污染物,降低水体污染物浓度,从而

减轻微生物代谢压力。水力条件调控形成的水流扰动,既能避免基质堵塞,又可增强植物根系与水体的物质交换。植物、基质与水力条件三者的协同作用,共同为微生物创造了稳定的代谢环境,最终实现污染物去除效率的指数级提升。

3.2 系统运行管理与维护

日常运行监测与评估需覆盖关键指标。实时监测溶解氧、pH值、氧化还原电位等环境参数,判断微生物活性状态;通过定期采集进出水样本,分析氮磷浓度变化评估处理效果。建立数据模型模拟系统运行趋势,预测潜在风险。设置监测点位时,兼顾湿地前端、中段与末端,捕捉污染物浓度梯度变化,为优化运行参数提供依据。故障诊断与应急处理需建立分级响应机制。针对水力堵塞、植物枯萎、微生物活性下降等常见故障,制定标准化排查流程。发现水流异常时,优先检查基质层孔隙状态与导流设施;植物出现病害立即隔离病株并补充备用物种。应急处理中,快速投加微生物菌剂恢复处理效能,启用备用曝气设备调节溶解氧。长期维护与性能优化着眼系统可持续性。定期收割成熟植物防止污染物二次释放,同步补充新苗维持生态平衡;根据基质吸附饱和度进行局部更换或再生处理。每季度评估系统运行数据,对比设计指标调整运行参数,通过调整水力停留时间、优化植物群落结构等措施,持续提升脱氮除磷效能。

结束语

人工湿地系统脱氮除磷效能的提升依赖于植物、基质、水力调控与微生物技术的综合应用。通过多技术集成与精细化运行管理,能够有效应对不同水质与环境条件带来的挑战。未来应进一步完善系统监测与维护机制,推动人工湿地在水环境治理中的长效稳定运行与广泛应用。

参考文献

- [1]张雪飞.污水处理生物脱氮除磷工艺的分析[J].清洗世界,2023,39(03):93-95.
- [2]陈志刚,城市污水处理中脱氮除磷技术的应用与优化[J].环境工程,2022,40(3):45-50.
- [3]周海燕,城市污水处理厂脱氮除磷工艺的改进与实践[J].给水排水,2023,59(1):72-77.
- [4]刘晓峰,城市污水生物脱氮除磷技术研究进展[J].水处理技术,2021,37(4):98-103.