

助我们更好地识别污染源，还能为制定污染控制策略提供科学依据。在农业活动较为集中的地区，尤其需要在春夏季节加强污染监测和治理力度，确保水质的稳定 [4]。

4 农业面源污染治理对策分析

4.1 提升农业生产方式，减少污染源排放

减少农业面源污染的核心在于改进农业生产方式，推动农业绿色发展。现代农业的快速发展带来了化肥和农药的大量使用，这些化学物质的过度使用不仅影响土壤质量，还通过面源污染流入水体，造成严重的水污染问题。因此，提升农业生产方式，减少化肥、农药的使用，成为减少农业面源污染的关键途径。

首先，推广精准施肥技术，结合土壤养分状况、气候特点和作物需求，科学合理地施用肥料，可以有效减少过量施肥带来的氮、磷污染物排放。精准施肥不仅能够提高肥料利用效率，还能够减少施肥过程中对水体的污染风险。

其次，发展有机农业，推广绿色种植技术。通过减少化肥和农药的使用，有机农业能够有效降低面源污染的排放。此外，发展农业生态种植系统，利用生物防治和农业废弃物的循环利用，也能有效减少农业面源污染的来源。

再者，实施农田水利和环境保护技术，通过优化灌溉系统和改良农田排水设施，可以减少农田径流中污染物的排放。对水资源的合理利用，不仅能够提高农业生产效率，还能减少污染物进入水体的途径。

4.2 加强农业面源污染监测与预警

农业面源污染的监测和预警系统是有效治理农业面源污染的基础。随着遥感技术和地理信息系统（GIS）的发展，建立农业面源污染监测与预警体系变得更加可行和精准。通过这些技术手段，可以实时监测流域内农业面源污染的变化趋势，及时发现污染源和污染物的积累情况 [5]。

首先，建立流域农业面源污染的长期监测网络，定期收集污染物数据，并进行时空分析，能够帮助管理者识别污染物的来源和变化规律，采取科学合理的防控措施。通过遥感数据，可以获取大范围的土壤质量、施肥量等农业活动信息，为污染源的溯源提供数据支持。

其次，建立实时的污染负荷预警系统，根据水质监测数据，预测可能发生的污染风险，并及时向有关部门发出预警信号。结合气象、农业生产等因素，预警系统能够提前预测农业面源污染的高发时期，指导相关部门在关键时段采取应急措施，避免污染事件的发生。

通过监测和预警系统的建设，可以加强对农业面源污染的控制和管理，减少污染物进入水体的风险，提高流域水环境质量的保护效果。

5 结语

农业面源污染是导致流域水环境质量下降的重要因素之一，尤其在农业生产较为集中的区域，农业活动对水质的影响尤为显著。面源污染的负荷估算和对水环境的驱动效应分析为流域水环境的保护提供了科学依据。这些研究为各类政策制定者和管理者提供了重要的决策支持，帮助他们识别污染源、预测污染趋势，并为区域性水质改善措施的实施提供依据。通过科学的负荷估算模型和对污染源的详细分析，能够更准确地评估农业活动对流域水环境的贡献，进而为制定具有针对性的水质治理和农业面源污染防控方案提供数据支撑。

在实际治理中，除了依赖技术手段进行污染负荷的估算，必须采取更加综合性的治理措施。例如，推广生态农业和绿色种植技术，提升农业生产方式的可持续性，减少化肥和农药的过度使用，是解决农业面源污染的根本路径。与此同时，加强对农业活动的监管，合理规划农业排水和灌溉系统，减少污染物的直接流入水体，也是治理工作的重要组成部分。

此外，加强污染监测与预警系统的建设至关重要。通过建立完善的监测网络，及时收集水体污染数据，结合先进的遥感技术和地理信息系统（GIS），能够实现精准的污染源追踪和污染趋势预测，为污染防控提供早期预警。只有通过这些综合措施的共同作用，才能有效减少农业面源污染，提高流域水环境质量，确保农业生产与水环境保护的和谐共生，为生态文明建设作出积极贡献。

参考文献

- [1] 曹文杰.县域农业面源污染影响因素与规制研究[D].山东农业大学,2021.
- [2] 蒙小俊,庞嘉慧.汉江流域安康段农业面源污染负荷预测及时空演变分析[J].环境保护科学,2024,50(04):138-144.
- [3] 杨书涵.河南省农业面源污染控制分区及农户治理行为影响因素分析[D].河南农业大学,2024.
- [4] 张桐.坪山河流域农业面源污染分析及关键污染物控制技术研究[D].哈尔滨工业大学,2023.
- [5] 唐烁.农业面源污染多维度影响及其治理机制优化研究[D].东北林业大学,2023.

Study on nitrogen and phosphorus removal technology of low energy consumption constructed wetland system in water source area

Yong Jin Kailai Wu

1. Shaoxing Ecological environment Pollution Prevention and Control Center, Shaoxing, Zhejiang, 312000, China
2. Shaoxing, Zhejiang 312000 Shaoxing Ecological Environment Protection and Development Center, Shaoxing, Zhejiang, 312000, China

Abstract

The threat of nitrogen and phosphorus pollution in water source areas to drinking water safety and eutrophication has made the development of low-energy treatment technologies imperative. Artificial wetlands, with their advantages of low energy consumption and ecological friendliness, have become a research hotspot. This paper first elaborates on the mechanisms of nitrogen and phosphorus removal technologies, then analyzes key low-energy artificial wetland technologies from multiple perspectives. It subsequently discusses the selection of low-energy artificial wetland types, case studies, and operation strategies. Finally, it provides a comprehensive summary of the application effects and economic analysis of low-energy artificial wetland systems in nitrogen and phosphorus removal for water source areas, aiming to offer valuable references for related research.

Keywords

low energy consumption; constructed wetland system; nitrogen and phosphorus removal technology

低能耗人工湿地系统对水源地氮磷去除技术研究

金涌 吴凯来

1. 绍兴市生态环境污染防治中心, 中国·浙江 绍兴 312000
2. 绍兴市生态环境保护发展中心, 中国·浙江 绍兴 312000

摘 要

水源地氮磷污染威胁饮用水安全与水体富营养化, 开发低能耗治理技术迫在眉睫。人工湿地凭借低能耗、生态友好等优势成为研究热点。本文先是详细论述了氮磷污染去除技术的相关机制, 随后从多个角度具体分析了低能耗人工湿地的关键技术, 紧接着具体讲述了低能耗人工湿地类型选择、典型案例以及运维策略, 最后详细总结了低能耗人工湿地系统对水源地氮磷去除技术的应用效果与其经济性分析, 以期对相关研究提供有益参考与借鉴。

关键词

低能耗; 人工湿地系统; 水源地氮磷; 去除技术

1 引言

在当下, 水源地氮磷污染问题严峻, 其来源广泛, 农业面源污染、生活污水排放等是主要因素, 这易引发水体富营养化, 威胁饮用水安全。传统治理技术如化学沉淀法等, 存在高能耗、成本高昂且易产生二次污染等局限性, 难以满足长期治理需求。而人工湿地技术凭借低能耗、生态友好以及兼具水质净化、景观营造等多功能性优势脱颖而出。基于此背景, 本研究旨在开发一套适用于水源地的低能耗人工湿

地技术体系, 通过优化相关要素提升氮磷去除效率, 切实保障水质安全, 并推动该技术在中小型水源地进行规模化应用, 为水源地保护提供有效解决方案。

2 氮磷污染去除技术

2.1 氮的去除机制

氮在水体中以溶解态和颗粒态存在, 其去除依赖物理截留、化学吸附与生物转化。物理上, 基质过滤通过多孔介质筛分截留含氮颗粒物, 如人工湿地砾石层拦截粒径 $>0.1\text{mm}$ 颗粒; 沉淀截留则利用重力使密度大颗粒沉降到底部, 通过定期排泥去除, 沉淀池需优化设计提升截留效率。化学上, 特定基质如沸石通过离子交换选择性吸附溶解态氮, 其阳离子交换容量高, 但水中阳离子会竞争吸附位点,

【作者简介】金涌 (1990-), 男, 中国浙江诸暨人, 本科, 助理工程师, 从事水源地保护区划分、规范化建设、污染防治研究。

需预处理或改性提升选择性^[1]。生物上,好氧时硝化作用将氨氮转化为硝酸盐,需控制溶解氧、温度和pH;缺氧时反硝化作用将硝酸盐还原为氮气,碳氮比是关键;水生植物吸收氮合成有机物,根系分泌物促进微生物同化氮。

2.2 磷的去除机制

磷在水体中以溶解态和颗粒态形式存在,其去除依赖物理化学吸附、化学沉淀与生物富集。物理化学上,钢渣等含Fe、Al氧化物的基质对磷酸盐有强吸附力,如钢渣磷吸附容量达10-50mg/g,吸附符合准二级动力学模型,基质粒径和比表面积影响吸附速率。化学沉淀方面,投加铁盐、铝盐时,Fe³⁺、Al³⁺与PO₄³⁻生成难溶物,需控制pH;碱性条件下Ca²⁺与PO₄³⁻形成羟基磷灰石,沉淀效率受Ca/P摩尔比等影响。生物上,挺水植物通过根系吸收并转运PO₄³⁻至茎叶,需定期收割;活性污泥或生物膜中的EPS含官能团,可吸附PO₄³⁻,PS/PN比例影响吸附效果。

2.3 低能耗技术的核心逻辑

传统氮磷去除技术能耗高,而低能耗技术借助强化自然过程、利用自然能源和优化系统结构实现可持续运行。强化自然过程方面,构建人工湿地等系统,利用植物-微生物-基质协同作用,如表面流人工湿地靠植物光合作用产氧,促进硝化-反硝化;在缓流水体利用自然衰减固定磷^[2]。利用自然能源上,安装太阳能光伏板为设备供电,太阳能驱动的垂直流人工湿地可大幅节电;采用重力流设计,通过地形或水头差驱动水流,还能优化水力停留时间。结构优化上,防堵塞设计采用多级基质层或反冲洗装置,延长运行周期;模块化构造便于维修扩展,可降低不少维护成本。

3 低能耗人工湿地关键技术

3.1 基质选择与功能强化

基质作为人工湿地处理污染物的关键介质,作用至关重要。不同高吸附性基质各有所长,沸石擅长吸附氨氮,钢渣对磷酸盐吸附力强,生物炭因孔隙丰富,能为微生物提供优质附着地。为最大化发挥各类基质优势,可采用复合基质层设计,表层以粗砂或砾石过滤大颗粒悬浮物,中层用沸石或钢渣吸附特定污染物,底层借助石灰石调节系统pH。同时,基质再生技术必不可少,周期性排水晾晒能恢复部分吸附能力,微生物强化解吸可进一步提升基质使用效率与寿命。

3.2 植物配置与生态优化

科学合理的植物配置,可显著提升人工湿地的净化效果。在功能植物筛选方面,需综合多方面因素。耐污型植物,像香蒲、芦苇、菖蒲,能在恶劣水质中顽强生存,并吸收各类污染物;富集型植物,如美人蕉、水葱,对磷等营养物质有着较高的吸收富集本领^[3];透氧型植物,以水稻为代表,其根系可向周边环境输送氧气,推动硝化反应进行。植物群落设计时,将深根与浅根植物合理搭配,能充分利用垂直空间,增强净化效率。此外,还需做好植物收割管理,定期收

割地上部分,避免污染物二次释放。

3.3 微生物群落调控

在人工湿地污染物降解进程中,微生物起着不可替代的关键作用。激活土著微生物是首要基础,通过添加植物残体等碳源,能为反硝化细菌供给能量,助力其生长繁殖。投加功能菌剂则可定向强化特定功能,像硝化细菌(Nitrosomonas、Nitrobacter)与反硝化菌(Pseudomonas)协同配合,能有效实现氮元素的高效转化与去除。此外,优化生物膜载体也不容忽视,多孔陶粒、火山岩等材料比表面积大,能为微生物提供充裕的附着空间,利于形成稳定的生物膜,进而提升微生物群落的稳定性与活性。

3.4 低能耗水流组织设计

合理的水流组织设计能有效降低人工湿地的能耗。重力流驱动巧妙借助地形高差,让水体自然流动,达成水力循环,完全无需额外动力支持。潮汐流湿地则通过周期性地淹没与排水,改变湿地内部水位和氧环境,强化氧的传递过程,促进硝化和反硝化反应的进行,省去了传统曝气设备^[4]。而多级串联系统把吸附、硝化、反硝化等不同功能单元串联起来,让水体依次流经各单元并得到处理,充分释放各单元优势,在提升整体净化效果的同时,也实现了能耗的降低。

3.5 自然能源利用技术

自然能源利用堪称低能耗人工湿地的重要前进方向。太阳能水泵能够取代传统电力水泵,凭借太阳能达成间歇性布水,精准满足湿地在不同阶段的用水需要。风能复氧装置依靠小型风车带动水体翻滚,有效增大水体与空气的接触面积,进而提升溶解氧含量,推动好氧微生物的代谢活动。微生物燃料电池(MFC)作为一项创新技术,可利用湿地底泥里的有机物发电,为监测设备等供应电力,达成能源自给自足,切实降低人工湿地的能耗与运行成本。

4 技术集成与系统设计

4.1 低能耗人工湿地类型选择

低能耗人工湿地类型多样,各有独特优势与适用场景。垂直流湿地中,污水垂直流经基质层,与空气接触面积大,氧传输效率高,为硝化细菌提供充足氧气,能高效将氨氮转化为硝酸盐,适合处理高氨氮污水。水平潜流湿地里,污水水平流动,内部多呈厌氧环境,利于反硝化细菌生长,可实现反硝化过程去除氮,且基质对磷有吸附沉淀作用,适用于反硝化与磷的去除。复合流湿地则结合二者特点,通过合理设计,让污水先经垂直流部分硝化,再流入水平流部分反硝化,能兼顾硝化与反硝化,更高效除氮,也能提高磷去除效果。

4.2 典型系统设计案例

山区水源地重力流湿地是典型案例之一。山区自然坡度资源丰富,此湿地设计巧妙利用这一特性,采用重力流驱动,无需额外动力设备布水。污水借自然高差从高处流入,