

农村分散式给排水系统中生活污水处理工艺优化与应用

李玉堂

广东邦普循环科技有限公司 广东佛山 528100

摘要：农村地区的分散式生活污水处理是改善农村人居环境、推进乡村振兴的重要环节。本文针对农村分散式给排水系统的特点与生活污水处理现状，深入探讨了现有处理工艺在应用中存在的问题与挑战。通过对工艺原理、运行条件、处理效果及经济成本等多方面的分析，提出了基于因地制宜原则的工艺优化思路与方向，包括预处理强化、核心处理单元改良、深度处理与资源回收结合以及智能化运维管理等。旨在为提升农村分散式生活污水处理效率、降低运行成本、促进处理出水的资源化利用提供理论参考与技术路径，以期在农村水环境治理和可持续发展贡献力量。

关键词：农村；分散式给排水；生活污水；污水处理工艺

引言

随着我国城镇化加快和乡村振兴战略推进，农村基础设施建设和生态环境保护受重视。农村生活污水治理对改善水环境、保障居民健康、提升人居环境品质意义重大。与城市不同，农村人口居住分散、布局凌乱、经济和基建水平不一、缺专业运维人员，集中式污水处理系统在建设成本、管网铺设和运行维护方面受限。因此，分散式给排水系统及配套生活污水处理工艺因投资小、建设周期短、易管理、适应分散布局，在农村广泛应用。但当前农村分散式生活污水处理工艺存在处理效果不稳定、运行成本高、抗冲击负荷弱、脱氮除磷效率低、污泥处置难、与当地条件和管理水平适应性不强等问题，制约了治理成效和可持续性。所以，针对农村分散式给排水系统特性，优化现有生活污水处理工艺、探索高效经济适用的应用模式，是农村水环境治理亟待解决的关键课题。

一、农村分散式污水处理现状与工艺特性分析

（一）农村生活污水的水质水量特征

农村生活污水的水质水量特征是确定处理工艺路线的根本依据，表现为不均衡性与特定污染物构成。水量排放有强烈的时段性与季节性波动，日内高峰在早、午、晚，与村民作息同步，日变化系数高于城市污水系统；季节性上，农忙、春节等时期水量增加，外出务工集中期减少，对处理工艺抗冲击负荷能力要求高。水质方面，污染物浓度普遍偏高，有机物、氮、磷等营养物质浓度比值稳定，源于单一污水来源，化学需氧量等有一定浓

度范围，还含少量微量有机污染物。与城市污水相比，工业有毒有害物质少，可生化性高，利于生物处理技术。理解这些规律是工艺选型等的基础，关系处理系统稳定性与经济性。

（二）现有主流分散式处理工艺及其适用性评述

当前农村分散式污水处理主流工艺分生态处理与生物处理技术。生态处理技术以人工湿地等为代表，利用复合生态系统净化污水，建设成本低、能耗小、易维护且有景观价值，但净化效能受气候影响大，占地面积大。生物处理技术包括厌氧与好氧生物处理，厌氧工艺能耗低但除氮磷效果有限，常作预处理；好氧工艺出水水质稳定优良，生物接触氧化抗冲击负荷强、操作简便，膜生物反应器出水水质高、占地小，但投资与运行成本高、对人员专业要求高。工艺适用性需结合农村具体条件，不存在普适最优工艺，要实现技术、经济与环境效益平衡^[1]。

（三）当前工艺应用中存在的主要问题与挑战

现有分散式处理工艺在农村应用存在诸多问题。一是工艺选型与实际需求脱节，部分地区“一刀切”，所选工艺不适应本地情况。二是重建设、轻管理普遍，处理设施建成后因缺乏运维资金、专业人员与管护责任主体而闲置废弃。三是处理效能稳定性不足，因水质水量波动大，基于理想工况的工艺难应对冲击负荷，出水水质难达标。四是污泥处理处置常被忽视，随意堆放填埋会造成二次污染。五是技术集成与智能化水平低，多为单一工艺应用，缺乏集成化方案与智能化运维手段，增加管理难度与成本，制约工程效益发挥，是亟待突破的瓶颈。

二、分散式生活污水处理工艺的优化思路

(一) 工艺优化的基本原则与目标导向

分散式生活污水处理工艺的优化,其核心在于从单纯的工程技术思维转向系统性的综合解决方案思维,这一过程必须遵循若干基本原则并确立清晰的目标导向。首要原则是“因地制宜”原则,它要求工艺选择与设计必须建立在对特定区域自然条件、社会经济状况及污水特征进行精确评估的基础之上,摒弃任何形式的标准化模板。其次是“资源化、能源化”原则,即视污水为可利用的资源,而非单纯的废弃物,优化过程应最大限度地回收水、氮、磷等资源,并探索生物质能的转化途径。第三是“运维简便化”原则,鉴于农村地区技术力量薄弱的现实,优化后的工艺必须具备操作简单、维护需求低、故障率低的特性。基于这些原则,优化的目标导向呈现出多维度的特征。技术目标上,追求在保证出水水质稳定达标的前提下,提升系统对水质水量波动的耐受能力与恢复能力。经济目标上,旨在实现全生命周期成本的最小化,不仅关注初始建设投资,更将长期运行维护费用、设备更换周期及潜在的资源回收效益纳入综合考量。环境目标上,则要求工艺本身具有较低的生态足迹,减少化学品投加、降低能耗与二次污染风险。社会目标上,则强调技术方案的可接受性与社区参与度,确保处理设施能够融入乡村景观,并与村民的生活习惯相协调。这些原则与目标共同构成了工艺优化的顶层设计框架,其价值在于为后续具体的技术路径选择与系统集成提供了明确的评判标准和决策依据^[2]。

(二) 生物处理与生态处理技术的协同优化

生物处理与生态处理技术的协同优化,是提升分散式污水处理系统效能与韧性的关键路径。传统工艺往往将二者割裂,或单纯依赖高能耗的活性污泥法,或仅采用占地大且易受气候影响的生态塘。协同优化的核心在于构建一个多级串联、功能互补的复合处理系统,充分发挥各自技术优势。具体而言,可利用生物处理单元,如厌氧生物滤池或改良型人工湿地,作为前处理核心,高效去除有机物并进行部分脱氮。这一阶段的优势在于负荷高、占地相对紧凑,能够有效削减污染主体。随后,将生物处理单元的出水引入生态处理单元,如复合垂直流人工湿地或稳定塘系统。生态单元在此阶段的功能并非简单的“深度处理”,而是利用基质-微生物-植物复合生态系统的物理过滤、化学沉淀与生物吸收作用,进一步精洗水质,特别是对氮、磷等营养物质的去除具有显著效果。这种协同优化的价值在于,通过功能分区,

避免了单一技术的短板。生物单元的稳定运行保障了后续生态单元的进水负荷在其承受范围之内,防止了生态系统的超载崩溃;而生态单元的低能耗、景观化特性,则弥补了生物处理单元的运行成本与环境融合度不足的问题。此外,二者协同形成的缓冲体系,极大地增强了整个系统对进水水质水量波动的抵御能力,实现了处理效能与运行稳定性的双重提升。

(三) 运行管理与成本控制的综合考量

工艺优化的最终成效,必须通过可持续的运行管理与有效的成本控制来体现。在运行管理层面,优化的思路应从依赖专业人员定期巡检的传统模式,向智能化、少人化的现代模式转变。这要求在工艺设计阶段就预埋自动化控制与远程监控的接口,例如,在线监测水质关键参数(如溶解氧、pH、水位),并根据预设逻辑自动调节曝气机、水泵的运行状态,实现精准曝气与按需供水,从而避免不必要的能源浪费。建立标准化的操作规程(SOP)与故障诊断手册,使非专业人员经过简单培训即可处理常见问题,是降低管理门槛的核心措施。在成本控制层面,必须采用全生命周期成本(LCC)的分析视角。优化决策不能仅被低廉的初始建设成本所吸引,而应系统评估包括电费、药剂费、维修费、人工费以及设备折旧在内的长期运行成本。例如,选择能效等级更高的水泵与风机,虽然初期投资可能略有增加,但其长期节省的电费将远超差价。同样,设计易于清掏和维护的构筑物形式,可以降低未来的人工与机械维护费用。此外,成本控制还应积极探索潜在的收入来源,如将处理达标的尾水用于农田灌溉或绿化,将产生的污泥进行堆肥化处理转化为有机肥料,通过资源循环利用来抵消部分运行开支。这种将运行管理与成本控制深度融合入工艺优化的思路,其根本价值在于确保了技术方案不仅在理论上先进,更在实践中具有可持续的生命力,能够真正在农村地区落地生根并长期稳定运行^[3]。

三、优化工艺在农村地区的应用与推广

(一) 优化工艺的技术适用性与地域适应性

优化工艺需兼顾农村污水水质特征(如COD浓度波动大、含少量农业面源污染)与地域条件(气候、地形、经济水平),确保技术易落地、效果稳定,某市A县农村生活污水处理项目(覆盖8个行政村,共560户居民,当地为北方半干旱地区,冬季最低温-15℃,地形以缓坡为主,原采用简易化粪池工艺,出水COD超标率达45%)。项目选用改良型人工湿地工艺,针对地域特点优化设计:填料采用“砾石(下层,粒径50-80mm)

+沸石（中层，粒径20–30mm）+石英砂（上层，粒径5–10mm）”组合，沸石可强化氮去除，适配农村污水氨氮偏高（进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 40–60mg/L）的特征；池体外侧包裹50mm厚聚苯板保温层，池底铺设电热丝（冬季低温时通电，维持池内温度 $\geq 5^\circ\text{C}$ ），解决北方冬季冻融问题；工艺处理规模按“每户0.8吨/天”设计，单村建设2–3个分散处理单元，适配缓坡地形，避免大规模管网铺设。应用后，8个村污水处理单元出水COD稳定在50–60mg/L（符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级B标）， $\text{NH}_3\text{-N}$ 降至8–10mg/L，冬季工艺运行稳定率从优化前的60%提升至95%，未出现冻裂或处理效率骤降问题，充分体现技术对地域条件的适应性^[4]。

（二）智能化与简易化运维模式的结合

农村地区运维人员专业水平有限，需构建“智能监控减压力、简易操作降门槛”的运维模式。项目为每个处理单元配备简易智能化设备：安装超声波液位计（监测湿地进水流量，超1.2倍设计流量时触发声光报警）、COD快速检测仪（每周自动采样检测1次，数据实时上传至县级运维平台），平台可远程查看各单元运行状态（如流量、COD值、保温层温度）；同时简化本地操作流程，制作图文版《运维手册》，明确“每日查看报警灯（绿灯正常、红灯故障）、每周清理进水格栅（去除杂物）、每月添加1次微生物菌剂（每单元每次添加5kg）”3项核心操作，无需专业技能即可完成。县级层面组建3人运维小组（覆盖8个村），通过平台预警信息精准上门维修，无需每日巡检。优化前，单村运维需1名专职人员，每月耗时15小时，运维成本约800元/月；优化后，8个村仅需3人兼职运维，单村月均运维耗时降至3小时，成本降至350元/月，故障响应时间从原24小时缩短至8小时，22年全年设备故障率从18%降至5%，兼顾运维效率与农村实际条件。

（三）政策引导与社区参与在推广应用中的作用

农村污水治理需政策提供资金与制度支持，同时调动村民参与积极性，避免“政府干、村民看”的困境。政策引导方面，某市出台《农村污水治理三年行动计划（2020–2022）》，明确项目建设成本由市级财政补贴60%、县级财政补贴20%、村民自筹20%（每户自筹2000元，分2年缴纳），同时将污水治理纳入村集体考核，考核合格的村给予每年5000元运维补贴；社区参

与方面，每个村通过村民代表大会选举5人组成“污水治理监督小组”，负责监督处理单元运行（如查看出水是否清澈）、收集村民意见（如是否有异味）、协助运维人员清理格栅，同时每季度召开1次村民宣讲会，讲解工艺原理与环保意义。政策支持下，8个村村民自筹资金收缴率达95%，无1个村因资金问题搁置项目；社区参与后，村民主动反馈故障线索的次数从20年的每年8次增至22年的每年32次，处理单元周边乱倒垃圾现象从每月5起降至0起，项目运行稳定率从20年的70%提升至22年的90%，形成“政府引导、村民参与”的良性推广机制^[5]。

结语

农村分散式生活污水处理工艺的优化与应用是一项复杂而系统的工程，需要综合考虑技术、经济、环境和社会等多方面因素。通过因地制宜的原则，结合生物处理与生态处理技术的优势，可以有效提升污水处理效率并降低成本。智能化与简易化运维模式的结合，不仅解决了农村地区专业技术人员匮乏的问题，还显著提高了设施运行的稳定性和经济性。同时，政策引导和社区参与在项目推广中发挥了重要作用，确保了项目的可持续性与社会接受度。未来，应进一步加强技术创新与集成，探索更加高效、低耗、适应性强的技术方案，为农村污水治理提供更全面的支持。这不仅是改善农村人居环境的重要举措，也是实现乡村振兴战略的关键环节。

参考文献

- [1] 谭春宇. 建筑给排水系统节能优化设计在智能住宅小区的应用[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2021.
- [2] 刘义祥. 低碳源市政污水处理优化运行的研究与工程应用[J]. 区域治理, 2020.
- [3] 李厚禹, 徐艳, 谭璐, 等. 多介质土壤渗滤系统去除农村污水中典型污染物的研究进展[J]. Water Resources Protection, 2022, 000(4): 10.
- [4] 屈昊. 电气工程自控系统在污水处理工艺中的运用探索[J]. 市场周刊·理论版, 2020(42): 0193–0193.
- [5] 黄江乐. 新疆沙漠边缘某小城镇污水处理工艺设计与优化研究[D]. 新疆大学, 2020.