

农村生活污水净化设备的设计研发与应用

宣明豪 王 磊

南源智慧水务有限公司 浙江 湖州 313219

摘要: 农村生活污水净化设备的设计研发聚焦于经济性、适用性与生态性原则,结合农村污水“分散性强、水量波动大、水质复杂”的特性,采用模块化结构、生物膜-生态耦合技术及智能化控制,集成厌氧发酵、好氧生物处理与人工湿地等工艺。设备通过优化材质、节能设计及资源化利用,降低运维成本,实现中水回用与有机肥转化,有效改善农村水环境,助力乡村振兴与生态可持续发展。

关键词: 农村生活污水;净化设备;设计研发;应用

引言: 随着我国乡村振兴战略的深入推进,农村生活污水治理成为改善人居环境、保护水生态的关键环节。然而,农村地区污水排放分散、水质波动大、处理资源有限,传统城市污水模式难以直接适用。因此,研发低成本、易维护、资源化的污水净化设备成为迫切需求。本文从农村污水特性出发,探讨经济适用、生态友好的设备设计原则与工艺优化路径,并结合实际案例分析其应用成效与推广策略。

1 农村生活污水特性分析

1.1 污水来源与成分

(1) 农村生活污水来源具有明显的家庭生活导向性,主要包括三大类:厨房污水,由日常烹饪、淘米、洗菜等产生,含有大量食物残渣、动植物油脂等有机物;洗涤污水,来源于衣物清洗、餐具洗刷及个人卫生清洁,会携带洗涤剂中的表面活性剂、磷化合物等;厕所污水,即粪尿污水,包含人体代谢废物,是病原体的主要载体。(2) 污水中主要污染物种类多样且成分复杂,化学需氧量(COD)和生化需氧量(BOD)含量较高,主要源于厨房污水中的有机物;氮、磷元素丰富,一方面来自洗涤剂,另一方面来自厕所污水中的粪尿,易引发水体富营养化;同时,污水中还含有大量病原体,如细菌、病毒、寄生虫卵等,主要存在于厕所污水中,若未经处理排放,会对周边水体和土壤造成污染,威胁人体健康。

1.2 水质水量特征

(1) 农村生活污水在水质水量上呈现显著特点:空间上具有分散性,因农村居民居住分散,污水排放点多且分散,难以集中收集;时间上具有波动性,水量会随季节、昼夜及节假日发生变化,如夏季用水量增加导致污水量上升,早晚用餐时段污水排放集中;水质上具有低浓度特点,相较于城市生活污水,农村生活污水中污染物浓度整体偏低,且水质波动较大。(2) 不同区域的

农村生活污水存在明显差异:南方地区气候湿润,降水量大,污水中雨水混入量较多,导致污染物浓度相对较低,且由于南方居民饮食中蔬菜、水产占比较高,厨房污水中有机物种类与北方有所不同;北方地区气候干燥,降水量少,污水中污染物浓度相对较高,同时北方冬季寒冷,污水易结冰,对污水收集和处理造成一定影响。

2 农村生活污水净化设备的设计研发

2.1 设计原则

(1) 经济性是农村污水净化设备设计的核心原则之一,需兼顾低成本与低能耗。在设备研发中,优先选用性价比高的本土材料,减少进口部件依赖,降低制造成本;同时优化能耗结构,采用自然通风、太阳能辅助供电等方式,减少电力消耗,例如设备曝气系统可搭配太阳能光伏板,满足日常低负荷运行需求,降低农村用户长期使用成本,契合农村经济发展水平^[1]。(2) 适用性设计需充分适配农村分散式处理需求。考虑到农村居民居住分散、污水排放点多的特点,设备需具备小型化特征,避免大规模管网建设;同时要适应农村多变的使用场景,比如可应对不同农户的污水排放量差异,支持单户或多户联合使用,且操作流程简单易懂,无需专业技术人员维护,方便农村居民日常管理。(3) 生态性设计聚焦无二次污染与资源化利用。设备处理过程中需避免产生污泥、废气等二次污染物,例如采用生物降解技术实现污染物无害化;同时注重污水资源回收,处理后的中水可用于农田灌溉、庭院绿化,粪污经处理后可转化为有机肥料,契合农村生态循环需求,减少资源浪费。

2.2 工艺选择与优化

(1) 主流工艺对比需结合农村实际筛选适配技术。生物处理工艺(如生物接触氧化法)处理效率高、运行稳定,但对操作管理要求稍高;生态处理工艺(如人工湿地、稳定塘)成本低、易维护,且与农村自然环境融合

度高,但占地面积较大、受气候影响明显;物化处理工艺(如混凝沉淀法)处理速度快,但药剂消耗量大、易产生二次污染,实际应用中需根据农村地形、气候、经济条件综合选择^[2]。(2)组合工艺设计可实现优势互补。例如“A²O+人工湿地”组合工艺,前端A²O工艺(厌氧-缺氧-好氧)高效去除氮、磷及有机物,后端人工湿地进一步净化水质,降低出水污染物浓度,同时减少A²O工艺的能耗与污泥产量;该组合既保证处理效果,又降低运行成本,适合农村分散式污水治理。(3)创新工艺开发需突破传统技术局限。生物膜-生态耦合技术通过在生态处理单元(如人工湿地填料)表面附着生物膜,强化微生物对污染物的降解作用,提升处理效率的同时缩小占地面积;此外,该技术可适应农村低浓度、高波动的污水水质,无需复杂的曝气系统,运行维护简便,符合农村污水治理需求。

2.3 设备结构设计

(1)模块化设计便于运输与安装。将设备拆解为预处理模块、核心处理模块、出水回用模块等独立单元,每个模块体积小、重量轻,可通过乡村道路运输至农户家中;安装时无需大型施工设备,仅需简单拼接与管道连接,1-2名工作人员即可完成安装,降低农村地区的施工难度与成本。(2)材质选择需兼顾防腐、耐用与环保。核心处理模块接触污水的部件选用304不锈钢或玻璃钢材质,具备良好的耐腐蚀性,延长设备使用寿命可达10-15年;设备外壳采用环保型工程塑料,无毒无害且可回收,避免材质老化后对土壤、水体造成污染,契合农村生态环境要求^[3]。(3)智能化控制提升设备管理效率。设备搭载液位传感器、COD传感器等监测元件,实时采集污水水量、水质数据;通过物联网技术将数据传输至远程监控平台,管理人员可在手机或电脑端查看设备运行状态,当设备出现故障,如曝气异常、液位过高时,系统自动报警并推送维修提示,减少人工巡检成本,保障设备稳定运行。

2.4 关键参数设计

(1)水力停留时间(HRT)需根据处理工艺与水质调整。对于生物处理模块,HRT设计为8-12小时,确保微生物有充足时间降解有机物与氮磷;生态处理模块(如人工湿地)HRT需延长至24-48小时,利用植物、微生物、填料的协同作用深度净化水质;同时需预留一定缓冲时间,应对农村污水水量波动,避免短流现象影响处理效果。(2)污泥负荷与曝气量设计需匹配农村污水特性。污泥负荷控制在0.1-0.3kgBOD₅/(kgMLSS·d),避免负荷过高导致微生物活性下降,或负荷过低造成资源浪费;

曝气量根据生物反应需求调整,通常为0.5-1.0m³/(m³·h),采用间歇曝气方式,在保证处理效率的同时降低能耗,适应农村低能耗需求^[4]。(3)填料类型与填充比例需优化净化效果。生物处理模块选用多孔陶粒或弹性填料,比表面积大(≥500m²/m³),利于微生物附着,填充比例为70%-80%,保证污水与生物膜充分接触;生态处理模块采用砾石、沸石、火山岩等混合填料,砾石(粒径20-30mm)作为底层支撑,沸石(粒径5-10mm)填充中层吸附氮磷,火山岩(粒径10-20mm)填充上层强化生物降解,混合比例为3:4:3,提升水质净化能力。

3 农村生活污水净化设备应用案例分析

3.1 案例选择

选取我国两大典型农村地区作为应用案例:一是南方水网区(以浙江省湖州市某村为代表),该区域河网密布、降水充沛,农户居住相对集中,污水易直排河道造成水体富营养化,主要采用“生物接触氧化+人工湿地”组合工艺设备;二是北方缺水地区(以陕西省咸阳市某村为代表),该区域气候干旱、水资源短缺,农户居住分散,污水回收利用需求高,主要采用“厌氧发酵+膜过滤”一体化净化设备,处理后中水用于农田灌溉。

3.2 实施效果

(1)水质改善情况显著:南方水网区案例中,设备运行1年后,出水COD、氨氮、总磷浓度分别降至50mg/L、5mg/L、0.5mg/L以下,符合《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(GB/T 18918-2002)一级B标准,周边河道透明度提升30%,藻类滋生量减少50%;北方缺水地区案例中,设备出水浊度低于5NTU,满足农田灌溉水质要求,水质达标率稳定在92%以上。(2)村民接受度与运维反馈良好:南方案例村通过入户宣传与示范讲解,90%以上村民认可设备处理效果,主动参与设备周边绿化维护;北方案例村因中水可直接用于灌溉,节省灌溉成本,村民运维积极性高,设备日常巡检响应时间缩短至2小时内,未出现因操作不当导致的设备故障。(3)经济效益可观:南方水网区单户设备投资约8000元,政府补贴60%后,农户实际承担3200元,结合运维费用(年均200元/户),预计投资回收期为6-7年;北方缺水地区设备因兼具粪污处理功能,可产生有机肥料(年均收益300元/户),投资回收期缩短至5年以内。

3.3 问题与改进建议

(1)运维管理存在不足:部分村庄缺乏专业运维人员,设备出现滤网堵塞、曝气不足等小故障时,维修不及时。建议由地方政府牵头,与设备企业签订长期运维协议,企业每月开展1次上门巡检,同时培养2-3名村民

作为“村级运维员”，负责日常简单维护。(2)季节性波动应对能力弱：南方雨季雨水混入导致污水浓度骤降，影响微生物活性；北方冬季低温使设备处理效率下降15%-20%。建议南方设备增设雨水分流装置，北方设备加装保温层与电加热辅助系统（采用太阳能供电），提升设备抗干扰能力。(3)政策支持与资金保障不足：北方案例村因地方财政有限，设备补贴比例仅为40%，部分低收入农户难以承担剩余费用。建议国家层面加大对北方缺水区的补贴力度，将补贴比例提高至50%-60%，同时设立“农村污水治理专项贷款”，为农户提供低息贷款支持。

4 农村生活污水净化设备的政策与推广策略

4.1 政策建议

(1)完善政府补贴与激励机制，针对不同经济水平地区制定差异化补贴政策，如对中西部农村地区，设备购置补贴比例提高至60%-70%，东部地区补贴40%-50%；同时设立激励奖项，对年度污水治理达标率超95%的村庄，给予5万-10万元运维资金奖励，激发地方政府与村民参与积极性。(2)加快技术标准与规范制定，明确农村生活污水净化设备的设计、生产、安装及运维标准，例如规定设备处理能力需适配5-50户农户需求，出水水质需符合对应区域排放标准；此外，制定设备报废与更新规范，要求设备使用满10-15年后进行检测评估，不达标者强制报废，保障设备运行效果。

4.2 推广模式

(1)推行政府-企业-农户(G-E-P)合作模式，政府负责政策引导与资金扶持，企业提供设备研发、生产及运维服务，农户承担部分设备费用与日常简单管理；例如政府与企业签订合作协议，企业以优惠价向农户提供设备，政府为企业提供税收减免，农户定期向企业支付少量运维费用，形成三方共赢格局。(2)强化技术培训与示范工程建设，在每个县打造1-2个设备应用示范村，组织周边村庄村干部、村民代表实地参观学习；同时联合企业开展技术培训，每月举办1次培训班，讲解设备操作、

故障排查等知识，发放通俗易懂的操作手册，确保农户能熟练管理设备^[5]。

4.3 市场前景分析

(1)农村污水处理市场需求旺盛，截至2024年，我国仍有超50%的农村地区未实现污水集中处理，随着乡村振兴战略推进，预计未来5年农村生活污水净化设备市场规模将年均增长15%-20%，尤其在南方水网区、北方缺水地区等重点区域，需求增长更为显著。(2)探索多元化商业化路径，一方面企业可推出设备租赁服务，降低农户一次性投入成本；另一方面开发“设备+运维+资源化”一体化服务，将处理后的污水转化为灌溉用水、有机肥料等产品，通过产品销售增加收益，提升商业模式可持续性，推动市场健康发展。

结束语

农村生活污水净化设备的研发与应用，是破解乡村水污染治理难题、推动生态振兴的重要实践。通过适配农村特性的模块化设计、低能耗工艺及资源化利用技术，设备在改善水质、降低运维成本的同时，实现了污水变废为宝。未来，需进一步强化政策支持、完善技术标准，并探索多元化推广模式，以激发市场活力、提升村民参与度。唯有技术、政策与市场协同发力，方能推动农村污水治理迈向长效化、可持续化发展新阶段。

参考文献

- [1]栾大鹏,谢晓东.农村生活污水处理技术及关键设备研发研究[J].科技经济市场,2021(10):82-83.
- [2]刘斌.农村生活污水常见处理技术及设备现状分析[J].城镇建设,2022,(06):52-53.
- [3]倪仕超.农村生活污水一体化处理设备控制系统设计与制作[J].基层建设,2020(27):77-78.
- [4]潘冠言.农村生活污水处理技术及相关设备研发研究[J].工程建设标准化,2023,(04):90-92.
- [5]莫成武,刘熹.农村生活污水净化设备的设计研发与应用[J].市政工程,2022,(02):67-69.