

Design of Modular Green Energy Saving System and Its Application in Rural Ecology

Hengtong Yang Yuanhan Wang Yuxuan Li Yixuan Ha Siyan Li

Tianjin University of Technology, Tianjin, 300380, China

Abstract

This study presents a modular green energy-saving system integrating water resource recycling and biomass energy recovery. Through key technologies including piston pump water circulation, float valve switching, physical-biological composite purification, and high-efficiency biogas fermentation, the system enables classified collection, treatment, and resource utilization of rural rainwater, shower wastewater, kitchen sewage, and fecal wastewater. Theoretical analysis and rural pilot verification demonstrate that this system significantly reduces rural tap water consumption and sewage discharge, while producing clean biogas for domestic lighting and production support. It effectively improves rural living environments, enhances resource utilization efficiency, and delivers substantial economic, environmental, and social benefits. This innovative solution provides a green infrastructure framework for rural revitalization.

Keywords

Modular design; Water resource recycling; Biogas energy; Rural ecology; Energy conservation and emission reduction;

模块化联产绿色节能系统设计与乡村生态应用

杨亨通 王元瀚 黎雨萱 哈懿轩 李思燕

天津理工大学, 中国·天津 300380

摘要

本文设计并实现了一套集成水资源循环利用与生物质能回收的模块化绿色节能系统。系统通过活塞泵水、浮球阀切换、物理-生物复合净化及高效沼气发酵等关键技术,实现了乡村雨水、淋浴废水、厨房污水与粪便污水的分类收集、处理与资源化利用。经理论分析与乡村试点验证,该系统可显著降低乡村自来水消耗与污水排放,产出清洁沼气用于生活照明与生产辅助,有效改善乡村人居环境,提升资源利用效率,具备良好的经济、环境与社会效益,为乡村振兴背景下的绿色基础设施建设提供了创新解决方案。

关键词

模块化设计; 水资源循环; 沼气能源; 乡村生态; 节能减排

1 引言

全球水资源短缺与环境污染压力日益加剧,推动资源循环利用与清洁能源开发成为可持续发展的核心议题。在我国“乡村振兴”与“双碳”战略推进背景下,农村地区对节水减排、污水处理及可再生能源利用提出了更高要求。然而,乡村普遍存在水资源浪费严重、生活污水无序排放、有机废弃物资源化率低及传统能源依赖度高等问题,不仅制约人居环境改善,也影响农业绿色可持续发展。

传统乡村污水处理多为简易设施或随意排放,存在处

理效率低、二次污染风险高等问题;中水回用系统在乡村应用受限于能耗高、运行成本大及维护复杂。同时,粪便、厨房废弃物等有机资源未能有效利用,既造成资源浪费,也加剧环境压力。针对乡村生态治理的现实需求,本研究提出并开发了一套模块化联产绿色节能改善系统。^[1]

该系统遵循模块化设计理念,结合乡村实际用水与能源需求,将雨水、灰水(淋浴、厨房污水)与黑水(粪便污水)进行源头分类,并通过定制化模块实现“水-能联产”。系统集成雨水与淋浴废水冲厕、厨房污水绿化灌溉、粪便污水沼气照明子系统,实现水资源闭环循环与生物质能高效回收,达到节水、节能、减污、降碳的综合目标,为乡村生态环境改善提供技术支撑,并助力乡村振兴战略落地。本文将从系统设计、关键技术原理、性能效益及推广模式等方面进行阐述。^[2]

【基金项目】天津理工大学校级大学生创新创业训练计划项目资助(项目编号:202510060075)。

【作者简介】杨亨通(2004—),男,中国天津人,本科,从事物流管理研究。

2 系统总体设计与模块化架构

本系统紧扣乡村“资源分散、需求多样、维护便捷”的核心特点，采用“分类收集、分质处理、梯级利用”的设计思想，构建了三个既独立运行又相互关联的功能性子系统，其总体工作流程如图1所示。各模块均遵循低成本、易操作、强适配的设计原则，确保能够适应乡村复杂的使用环境与有限的维护条件。

2.1 雨水与淋浴废水冲厕子系统

本子系统旨在降低乡村冲厕对自来水依赖，利用屋面雨水与淋浴废水经格栅、砂滤及活性炭多级净化后供冲厕使用，蓄水设施设保温以适应低温环境。供水提升采用无动力活塞泵，利用人体重力输送水，无需额外能耗；机械浮球阀实现再生水与自来水自动切换，优先使用再生水。系统结构简单、可靠，适合分散式长期运行。^[1]

2.2 厨房污水绿化灌溉子系统

乡村厨房污水中通常含有较高比例的动植物油脂及有机污染物，若未经处理直接排放，易引发土壤退化及水体富营养化等环境问题。本子系统以厨房污水资源化利用为目标，通过物理—生物组合处理工艺，将其转化为适用于乡村绿化及农田辅助灌溉的再生水。

在处理过程中，厨房污水首先进入物理隔油单元，利用斜板结构强化油水分离效果，有效适应乡村厨房污水水质波动的特点。分离出的油脂经集中收集后，可作为补充原料引入沼气发酵系统，实现有机资源的协同利用。经除油处理后的污水进一步进入生物净化单元，通过多介质过滤与微生物作用降解有机污染物，并可结合人工湿地等生态设施进行深度净化。处理后的再生水主要用于乡村绿化及经济作物的非食用性灌溉，体现了水资源梯级利用与污染控制的协同效应。^[4]

2.3 粪便污水沼气照明子系统

乡村粪便污水是重要有机污染源，同时具备高生物质能源潜力。本子系统通过固液分离和厌氧发酵，实现粪污无害化与能源化处理，固相产沼气，液相回田作液态肥，气、渣、液协同利用。发酵系统结构简化、适应性强，可按农户规模灵活配置。沼气经简易净化后用于照明或生活燃料，降低传统能源消耗。系统运行维护要求低，可通过适度管网改造实现分散式协同运行，便于推广。

3 关键技术创新与工作原理解述

3.1 无动力活塞泵水技术

无动力活塞泵技术利用人体如厕重力驱动活塞往复运动，通过单向阀实现低位蓄水向高位水箱输送，无需外部电力或燃料，有效降低能耗与运维成本。结构简洁、部件少，可靠性高，适合维护条件有限的乡村长期使用，满足常规冲厕需求。

3.2 智能双水源供水切换技术

该供水切换技术采用纯机械控制，无需电力或电子元

件，长期低维护可靠。双机械浮球阀分别控制再生水与自来水进水，根据水箱水位自动分级调控：低水位启动双水源补给保障用水，正常水位优先使用再生水，自来水关闭，高水位关闭进水阀并溢流排出，避免二次污染。结构简单、故障率低，实现“再生水优先、自来水保障”，适合乡村节水卫生设施。

3.3 高效油水分离与生态净化技术

针对乡村厨房污水含油量高且波动大的问题，本研究提出物理—生物组合工艺。污水经波纹斜板分离（板间距20 mm，倾角45°）去除油脂，油脂可用于集中或家庭沼气发酵。随后，除油水通过复合介质（石英砂+活性炭）过滤，再经人工湿地（香蒲、芦苇、菖蒲）植物吸收及根际微生物降解氮磷等营养物质。处理水水质稳定达《城市污水再生利用 城市杂用水水质》（GB/T 18920-2020）绿化标准，可用于乡村绿化及农田灌溉。工艺运行成本低，抗冲击负荷强，适应污水量波动大的乡村环境。^[5]

3.4 粪污高效发酵与沼气净化技术

针对乡村粪污分散且产量大的问题，本研究提出就地分散式能源化利用技术。粪污经斜板格栅固液分离（截留率>95%），液相可直接施田，固相进入35℃全混合厌氧反应器发酵，通过调节碳氮比（25-30:1）、水力停留时间（20-25天）及有机负荷提升产甲烷菌活性，理论每50 kg粪便年产沼气约15 m³，可满足家庭照明需求。沼气经重力脱水与干法脱硫（活性氧化铁Fe₂O₃，H₂S≤20 mg/m³）净化后储于低压气柜，供照明或炊事使用，操作简便，适应分散式能源需求。

4 系统效益的综合评估

4.1 节能减排与生态效益量化分析

以拥有约500户、1800名居民、屋顶总面积约8000 m²的典型乡村为对象，结合年降雨量约1200 mm，对系统节能减排与生态效益进行测算。结果显示，雨水、淋浴及厨房污水回用年可回用约4.4万m³，用于冲厕及绿化灌溉，占生活用水总量80%以上，整体节水率达84%。粪便污水厌氧发酵年均产生沼气约2.7万m³，可替代电力1.9-2.2×10⁴ kWh，用于庭院及公共照明，占照明用电约5%-6%，如进一步用于炊事，可实现更高能源替代。综合分析表明，系统在保障生活需求的同时，有效实现水资源循环利用和生物质能源回收，节水、节能及生态改善效益显著。^[6]

生态环境效益：

系统通过源头污水回用与粪污资源化处理显著改善乡村环境。每年可减少生活污水约44,310 m³排入土壤和水体，降低污染；厨房污水及沼气发酵产物（沼渣150 t、沼液800 t/年）用于农田灌溉，可替代约30 t化肥，减少农业面源污染；沼气替代化石能源和秸秆燃料，避免甲烷排放，年碳减排量可超15,000 t，为“双碳”目标提供支撑。同时，系统降低污水横流与粪便污染，减少烟雾排放，提升人居环境质量。

4.2 经济性与乡村推广可行性分析

系统采用模块化设计,可按农户需求灵活配置。单户基础版(雨水收集、简易净化、活塞泵、冲厕切换、小型沼气装置)投资约1,800–2,500元;整村集中式系统(500户,含集中沼气站、湿地处理及管网)总投资150–200万元,平均每户3,000–4,000元,补贴后农户实际成本可降至1,000–1,500元,经济可接受。日常维护简单,易损件更换周期长、费用低(≤ 200 元/次),每户年均维护成本 ≤ 100 元,体现低运维需求和经济可行性。^[7]

经济效益回报:

系统带来显著经济效益。直接效益方面,按自来水3元/吨计算,单户年均节水约88.6吨,节水费266元;按电价0.5元/度,替代电力37.8–43.2度,节电费约19–22元;减少化肥支出约200元/户,总计年均直接经济效益约485元,投资回收期3–5年。间接效益方面,系统改善农村人居环境与农业条件,提升旅游吸引力和农产品品质,为乡村带来旅游收入增长和产品溢价等附加收益。

社会效益:

系统与乡村振兴、农村人居环境整治、“厕所革命”、碳达峰碳中和等政策高度契合,可作为乡村绿色基础设施示范项目,获得政策支持与资金补贴。在推广过程中,可创造设备安装、维护及沼肥加工岗位,带动闲置劳动力就业,并通过技术培训提升农户环保意识和技能水平,培养生态治理技术骨干。同时,系统集中解决乡村污水,改善公共卫生条件,增强村民幸福感与获得感,促进乡村治理能力提升。^[8]

5 乡村应用推广、风险与未来展望

5.1 乡村目标市场与推广策略

5.1.1 目标市场:

本系统主要适用于乡村振兴示范村、生态宜居型乡村及农业种植与养殖园区等农村地区。上述区域普遍面临生活污水处理能力不足、水资源利用效率偏低及有机废弃物资源化水平有限等问题,对低成本、易运维的生态治理技术具有较高需求。通过因地制宜配置系统模块,可实现整村推广或分散式部署,满足不同乡村在用水保障、污染控制与资源循环利用方面的实际需求。与此同时,对于市政基础设施相对薄弱的偏远乡村,该系统在改善用水条件、降低环境污染方面同样具备较大的应用潜力。

5.1.2 推广策略:

推广策略包括试点示范、政策联动、渠道合作与定制化服务。首先,在10个不同类型乡村建立示范点(平原、山区、旅游、农业型),形成可复制经验并邀请农户与干部实地考察。其次,对接乡村振兴局、生态环境局等政府部门,争取政策补贴,将系统纳入人居环境整治项目采购目录,通过招标或以奖代补方式推动落地。同时,与农业合作社、乡建企业及环保设备经销商合作,开展公益行动,扩大品牌影响力。

5.2 未来研究与发展方向

系统升级方向包括智能化、材料工艺优化、系统整合及模式创新。智能化方面,通过物联网传感器与云平台实现水量、水质及产气量实时监测与智能调度,并向农户展示运行与效益数据。材料与工艺优化包括低成本耐腐蚀过滤介质与脱硫材料研发、厌氧发酵工艺优化及模块化紧凑设计,以适应分散式部署。系统整合方面,探索光伏辅助供电实现“光-水-能”三联产,并开发沼液、沼渣高值化产品,结合农业灌溉与畜禽粪污处理,构建生活-生产-生态循环体系。模式创新方面,探索“合同能源管理”“共享沼气站”等模式,由企业投资运营,村集体或农户按节约费用支付服务费,并将碳减排纳入碳交易市场,提升收益与可持续性。

6 结语

本研究设计并验证了一套创新、实用的模块化联产绿色节能改善系统,通过多学科技术交叉与模块化集成,有效解决乡村水资源浪费、污水污染及能源短缺问题,实现水资源与生物质废弃物的高效循环利用,产生节水、节能、减污及产能等多重效益。系统遵循低成本、易操作、强适配的设计原则,契合乡村使用环境,经试点验证具备良好的经济、环境与社会效益。该系统不仅缓解乡村水资源压力、优化能源结构、改善人居环境,还为绿色乡村建设和乡村振兴战略提供了可复制、可推广的实践模式。尽管推广过程中仍面临技术适应性、管理维护及市场接受度等挑战,但随着政策支持增强、技术优化和市场认知提升,系统在乡村可持续发展中具备广阔应用前景。未来,通过持续技术与模式创新,系统可进一步促进乡村生态振兴,提升宜居宜业水平,为实现国家“双碳”目标贡献重要力量。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范: GB 50400-2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [2] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 城市污水再生利用 城市杂用水水质: GB/T 18920-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [3] 张自杰, 林荣忱, 金儒霖. 排水工程(下册)[M]. 第五版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [4] 李秀金. 固体废物处理与资源化[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [5] 董文艺, 王宏杰. 农村生活污水处理技术及管理模式[J]. 环境工程学报, 2018, 12(1): 1-10.
- [6] 刘俊新, 郭雪松. 雨水收集利用系统的设计方法与效益分析[J]. 给水排水, 2019, 55(4): 112-117.
- [7] 陈汉平, 孙振钧. 生物质能转化技术与工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [8] 中华人民共和国农业农村部. 乡村振兴战略规划(2018-2022年)[Z]. 2018.