

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.10.017

山地农村污水治理改良模式的工程实践与效果分析

郭小龙¹, 冉晓频², 李惠平³, 庞维海³

(1. 招商局生态环保科技有限公司, 重庆 400000; 2. 重庆市北碚区生态环境监测站, 重庆 400000; 3. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 山地地区农村居住分散,地形高差较大,采用传统的管网+处理站模式解决农村污水问题存在很多不合理性。选取重庆某典型山地区域行政村进行实际工程试验研究,对传统治理模式进行优化改良。该区域排水体制采用截流式合流制,收集系统采用生态渠收水;创新改良截流设施,通过新型截流井使雨污混流水达到处理量与直接排放量之间的最佳平衡。污水处理站采用改良后的多模式处理工艺(包含资源化利用),将生物滤池与改良垂直潜流人工湿地集成于一体,不同运行模式下出水水质均能稳定达到重庆市《农村生活污水集中处理设施水污染物排放标准》(DB 50/848—2021)的一级标准,工程造价和碳排放量均低于传统治理方式。

关键词: 山地农村地区; 农村污水; 资源化利用; 截流设施; 多模式处理工艺

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)10-0104-09

Engineering Practice and Effect Analysis of an Improved Sewage Treatment Model in Mountainous Rural Areas

GUO Xiao-long¹, RAN Xiao-pin², LI Hui-ping³, PANG Wei-hai³

(1. China Merchants Eco-Environmental Technology Co. Ltd., Chongqing 400000, China;
2. Chongqing Beibei District Ecological Environment Monitoring Station, Chongqing 400000, China;
3. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Mountainous rural areas often feature dispersed residential layouts and significant elevation differences, posing challenges for traditional sewage treatment approaches that rely on centralized pipe networks and treatment stations. To address these challenges, this study examines a typical mountainous village in Chongqing, implementing an optimized sewage treatment model through practical engineering experiments. The study introduces an improved drainage system that employs a combined intercepting approach and utilizes ecological channels for water collection. Innovations include the development of new interception facilities, such as novel interception wells, which balance treatment capacity with the direct discharge of rainwater and mixed sewage. The treatment station integrates an enhanced multi-mode process, combining a biological filter with an improved vertical subsurface flow artificial wetland, and incorporates resource recovery. Under various operational modes, the effluent quality consistently meets class I standards of the *Discharge Standards for Rural Domestic Sewage Treatment Facilities* (DB 50/848—2021) in Chongqing. Compared to traditional methods, the project reduces both engineering costs and carbon emissions.

Key words: mountainous rural areas; rural sewage; resource utilization; interception

facilities; multi-mode process

农村污水是造成农村水体黑臭的主要原因^[1],黑臭水体在发展中国家和发达国家均很常见^[2-3],尤其是在农村地区污水直排现象频繁发生^[4],严重影响居民的正常生活和健康,对当地生态系统构成威胁,引发广泛关注^[5-6]。山地地区地形复杂,导致污水收集与处理难度大,大多污水直接排放,严重污染水体^[7]。采用传统管网+处理站模式处理山地污水,施工难度大,建设成本高,治理效果往往达不到预期^[8];受降雨和季节性水流影响,水质指标波动明显,旱季时水体流动性差,污染物易积累在管道;雨季时大量雨水涌入污水收集系统,对处理站运行造成冲击。

结合山地农村的特点^[9],采用雨污混流收集方式,通过改良的新型截流井收集旱季污水和截流雨季混流水,再经过多模式处理工艺处理,实践表明,治理效果和投资成本均优于传统治理模式。

1 改良治理模式

1.1 研究区域

研究区域行政村面积约12 hm²,共70户,常住人口120人,村户居住比较分散且地形高差较大。对2023年6月1日—12月31日期间形成明显径流的降雨量(翻斗式雨量计)进行统计可知,月最大单场降雨量(277 mm)发生于7月,最小(121 mm)发生于11月,7个月最大降雨量平均为192 mm。同期每天对村户排污量进行统计(通过用水量折算得到),得到每月最高日排污量:7月最高日排污量最大(9.8 m³/d),12月最高日排污量最小(5.8 m³/d),7个月平均约7 m³/d,污水流量波动较大并且排污量从夏季至冬季呈下降趋势。

1.2 治理流程

污水收集处理流程的优化改良见图1。接户支管和雨季汇流雨水接至收集排水生态渠,通过生态渠将旱季污水或雨季混流水收集至截流设施,截流设施将旱季污水截流至污水处理站资源化利用蓄水池或旱季处理单元处理,将雨季混流下层污染浓度高的水截流至污水处理站雨季处理单元处理。处理站内设2座调节池,分别储存旱季污水和雨季截流混流水,收集总管进调节池前分为两个支管分别向不同调节池进水,支管安装电动阀,电动阀启

闭由安装在截流设施处的雨水传感器和液位计控制。

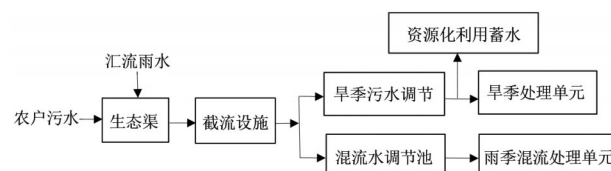


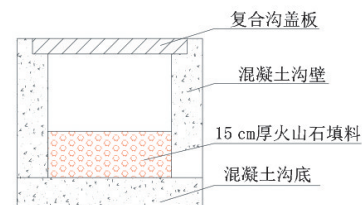
图1 改良优化后的污水收集处理流程

Fig.1 Improved and optimized sewage collection and treatment process

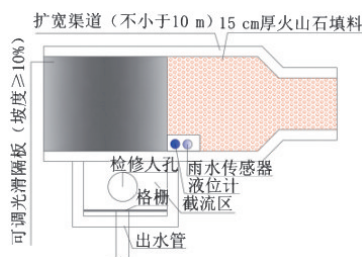
1.3 处理构筑物

1.3.1 收集系统

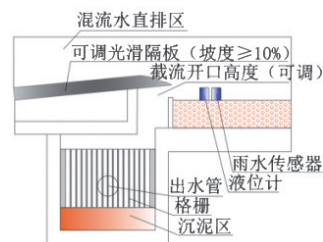
山地农村居住分散,村社面积较大,常住人口少,污水量小,降雨时雨污混流水的污染物浓度较低。试验收集系统采用雨污合流制,较管网单独收集污水解决了初雨污染、造价高和治理不彻底的问题。生态排水渠和截流设施做法见图2。



a. 生态排水渠



b. 截流设施平面



c. 截流设施剖面

图2 截流设施做法

Fig.2 Methods of interception facilities

图2(a)为生态排水渠,渠底部敷设15 cm火山石,既可净化水质又可减少旱季臭味逸出,上部加盖雨水算子,防止杂物进入。排水沟每隔一段距离设置沉泥池,可有效防止污泥在下游进入污水处理站造成管道堵塞。

采用常规截流井会造成截流量过大,处理站运行困难;根据山地农村特点,对截流设施进行了改良。如图2(b)、(c)所示,截流设施主要分上下两层,用表面光滑的隔板分隔,隔板顺水流方向坡度不小于10%,前段入水处为圆弧状,可根据雨污混流水污染程度调节开度。上层为雨季混流水直排区,下层为旱季污水和雨季混流截流区。截流设施前10 m处将排水渠扩大,根据前期探究试验并参考相关研究^[10-11],渠道扩大宽窄比为3:1时,污染物浓度较高的雨污混流水会在下层流行,且不会产生回流扰动。因此,根据水质合理确定截流设施隔板开口高度(确定合理的截流倍数),对于污水处理站建设和水体污染防治尤为重要。

定期对生态排水渠的沉泥池进行清理,确保其能有效沉积杂物。建议渠底火山岩半年水力冲洗一次、2年更换一次,以有效恢复火山石的孔隙结构和吸附能力;对截流设施入口处、格栅缝隙中的杂物和沉泥区沉积物定期进行清理。

1.3.2 处理设施

集成一体化处理站如图3所示,分上下两部分。

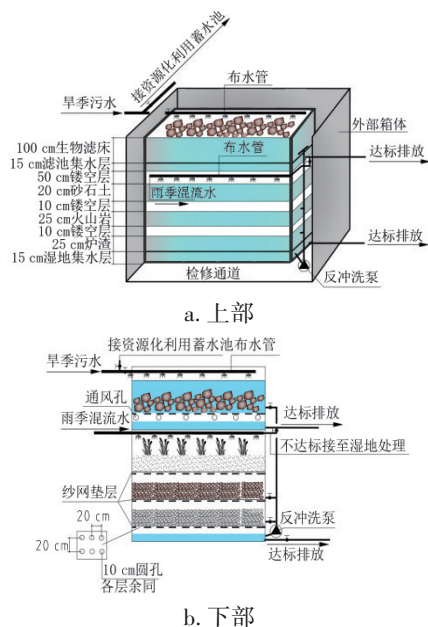


图3 集成一体化处理设施

Fig.3 Integrated processing facility

上部为模块化好氧生物滤池,尺寸(长×宽×高)为4 m×3 m×1 m,使用粒径为15~20 mm的火山岩作为滤料;池体下方设置15 cm滤池集水层,集水层上部开设 $\varnothing 8$ mm通气孔,确保滤池供氧充足;滤池顶部设置布水管道,采用布水均匀的喷头布水;滤池集水池出水若各项指标达标则直接排放,若部分指标不达标则接至下层湿地进行处理。

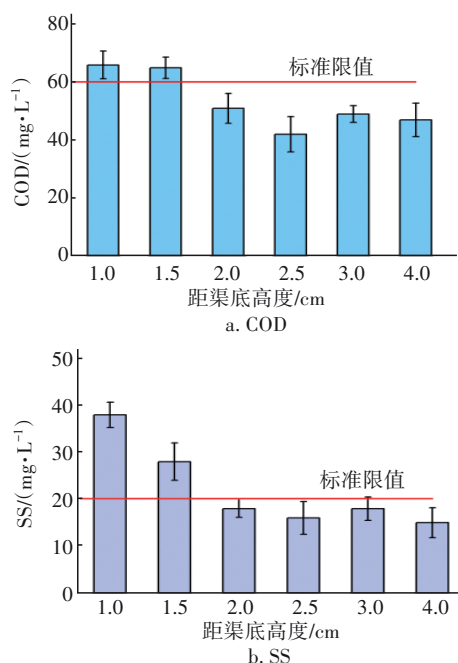
下部为模块化垂直潜流人工湿地,池体尺寸(长×宽×高)为4.00 m×3.00 m×1.05 m,共分3层,最上层为20 cm厚的砂土层,上部交叉种植除污效果好的菖蒲和西伯利亚鸢尾^[12];中层为25 cm厚、粒径5~10 mm火山岩和砾石复合基质层,下层为25 cm厚、粒径10~20 mm炉渣层,炉渣层下侧为15 cm湿地集水层,湿地各层之间设置10 cm镂空层,各层底板每隔20 cm设置 $\varnothing 8$ mm排水孔,可减轻湿地堵塞、实现均匀配水,处理后出水部分用于湿地和滤池反冲洗。

定期清理进水格栅截留的大颗粒杂物,以免影响后续处理流程;对生物滤池和湿地中间层、下层定期进行水力反冲洗(生物滤池30 d反冲洗一次,湿地6个月反冲洗一次),定期观察植物生长情况,及时清除杂草;对提升泵组进行定期保养维护。

2 运行结果及讨论

2.1 截流设施参数确定

截流设施下层断面不同深度水质见图4。



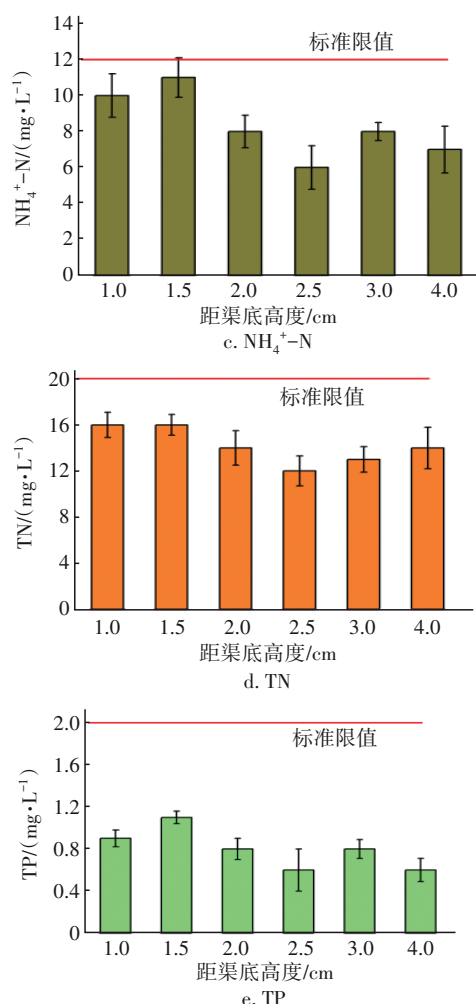


图4 截流设施下层断面不同深度水样水质

Fig.4 Water quality of water samples at different depths in the lower section of interception facilities

通过调节截流井不同开度,结合旱天污水在截流断面处的水深平均约为1 cm,分别选取距渠底1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、4.0 cm六种深度的水样,每种深度取3次不同降雨天水样分别检测,取平均值。结果表明,距渠底2.0、2.5、3.0、4.0 cm四个取样点的COD、SS、 NH_4^+-N 、TN、TP浓度均小于DB 50/848—2021一级标准,距渠底1 cm和1.5 cm的取样点COD、SS浓度超出标准限值。因此,截流设施下层高度距渠底2 cm最为合理,折算为截流倍数约1.1。

2.2 处理系统运行模式及分析

调研发现,现有农村污水处理站普遍存在旱天时污水量较少(根据旱天污水核算处理站规模严重偏大),处理设备长期处于停运状态,生物处理工艺中微生物成活率很低,雨天处理站大多超负荷运行,对污水处理站稳定运行造成极大的困难等问

题。基于此,该试验处理站采用旱天运行模式(资源化利用、资源化利用剩余污水处理)和雨天运行模式(截流混流水处理)。

2.2.1 旱天污水资源化利用

旱天污水优先资源化利用,因污水处理站附近有果园约6 000 m²,故首选农肥利用。根据《灌溉用水定额编制导则》(GB/T 29404—2012)、果园肥效需求^[12]及村民灌溉习惯调研结果,估算果园灌溉用水量为0.23 m³/(m²·a),旱天收集污水量为2 555 m³/a,需要消纳的田地为11 109 m²,因此,旱天污水只能部分资源化利用。

2.2.2 旱天资源化利用剩余污水处理

选取7月共25 d截流断面处旱天水样进行检测,COD、SS、 NH_4^+-N 、TN、TP平均值分别为134 mg/L(标准限值≤60 mg/L)、50 mg/L(标准限值≤20 mg/L)、25 mg/L(标准限值≤12 mg/L)、36 mg/L(标准限值≤20 mg/L)、1.8 mg/L(标准限值≤2 mg/L)。综合考虑进水水质、处理效果、运行技术和成本,旱天剩余污水处理采用集成一体化生物滤池+改良垂直潜流人工湿地工艺。该模式下最佳运行参数:生物滤池表面水力负荷1 m³/(m²·d);垂直潜流人工湿地表面水力负荷0.33 m³/(m²·d),水力停留时间36 h。

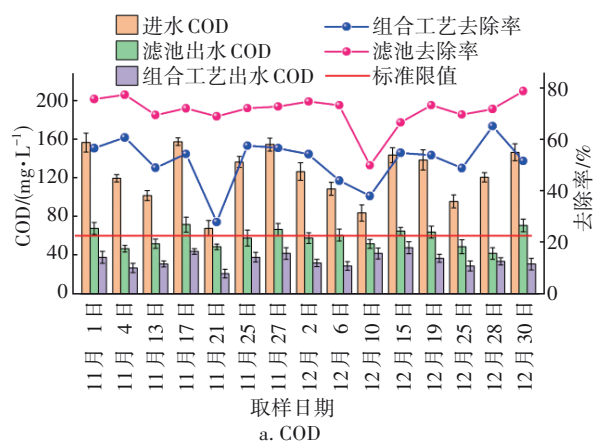
2.2.3 雨天截流混流水处理

选取7月6场降雨时的截流混流水样进行检测,截流断面处COD、SS、 NH_4^+-N 、TN和TP平均值分别为66、31、6.5、14.8和1.1 mg/L,只有COD和SS两项指标超出DB 50/848—2021的一级标准限值。通过分析进水水质发现,对于截流混流水,采用造价低、运行费用低、运营技术简单的改良垂直潜流人工湿地最为合理。该模式下最佳运行参数:表面水力负荷0.9 m³/(m²·d)、水力停留时间12 h。

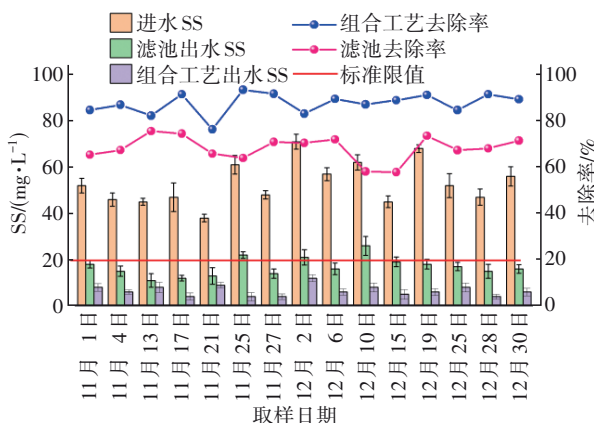
2.3 污水处理站运行效果及分析

2.3.1 旱天运行分析

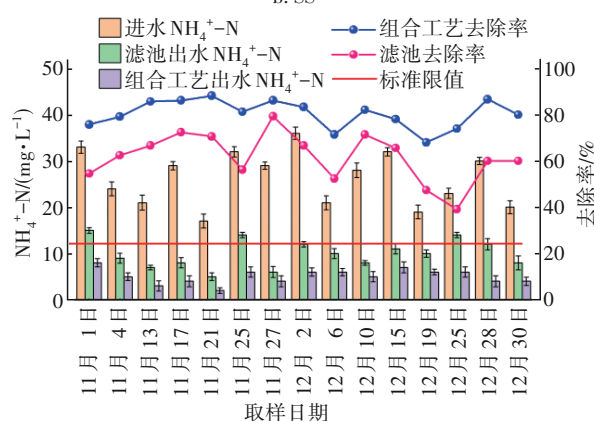
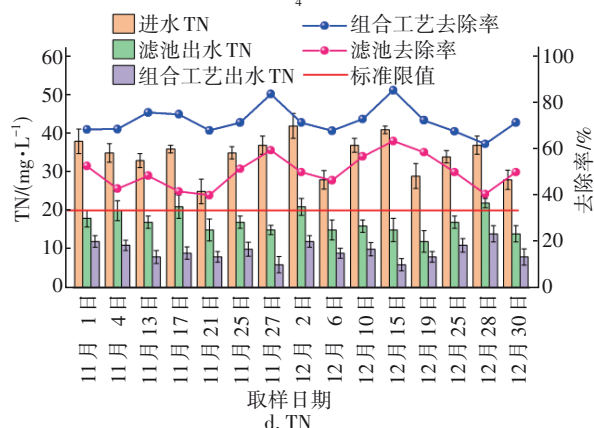
污水处理站11月—12月15 d的旱天运行数据见图5。日平均气温为12℃;进水COD为68~158 mg/L;进水SS为38~71 mg/L;进水 NH_4^+-N 最高为36 mg/L,最低为17 mg/L;进水TN最高为42 mg/L,最低为25 mg/L;进水TP最高为3.5 mg/L,最低为1.2 mg/L;进水流量为2.5~10.2 m³/d;11月21日进水COD仅为68 mg/L,进水水量提高至10.2 m³/d,原因是未形成明显径流降雨增加了处理站进水量,稀释了进水水质,但不影响处理站的正常稳定运行。



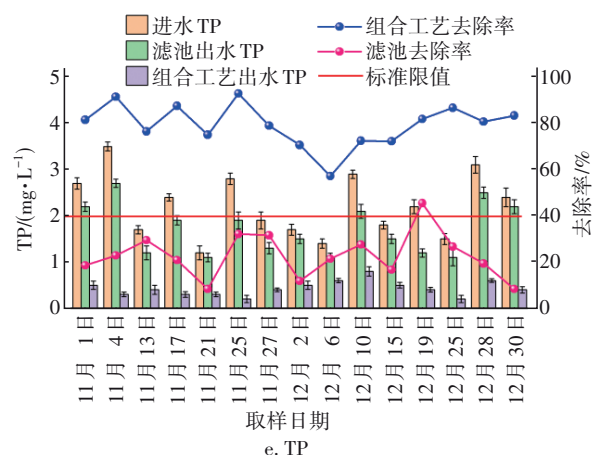
a. COD



b. SS

c. NH_4^+-N 

d. TN



e. TP

图5 旱天污水处理站运行数据

Fig.5 Operation data of sewage treatment station in dry days

生物滤池对COD、SS、 NH_4^+-N 、TN、TP的平均去除率分别为51.6%、68.1%、61.7%、50.2%、22.7%，可见对COD、SS、 NH_4^+-N 均有较高的去除能力，这与滤料自身的吸附性能及其表面附着的微生物代谢共同作用有关^[13]。在进水COD为68 mg/L时，生物滤池对COD的去除率仅为27.9%，可能原因是11月18日—21日进水COD持续偏低，滤池进水中微生物可利用碳源减少，降低了微生物总量，导致系统对COD去除率偏低^[14]；当进水COD≤120 mg/L、SS≤50 mg/L、 NH_4^+-N ≤30 mg/L、TN≤35 mg/L、TP≤2 mg/L时，生物滤池出水各项指标均小于DB 50/848—2021的一级标准限值，可不经湿地深度处理，直接排放。

该组合工艺对COD、SS、 NH_4^+-N 、TN、TP的平均去除率分别为71.2%、87.5%、80%、72.2%、79.2%，可见对各项污染物均有较高的去除能力；出水COD、SS、 NH_4^+-N 、TN、TP最大值分别为48、12、8、14、0.8 mg/L，各项指标均优于DB 50/848—2021的一级标准。

2.3.2 雨天运行分析

污水处理站11月—12月共13 d的雨天运行数据见图6。进水流量为12.5~16.7 m³/d；日平均气温为10℃；进水COD为47~82 mg/L；进水SS为17~42 mg/L；进水 NH_4^+-N 最高为10.5 mg/L，最低为4.3 mg/L；进水TN最高为17 mg/L，最低为8 mg/L；进水TP最高为1.4 mg/L，最低为0.7 mg/L，可知雨天截流混流水仅有COD和SS存在超标情况。模块化垂直潜流人工湿地对COD、SS、 NH_4^+-N 、TN和TP的平均去除率分别为48.4%、70.2%、57%、53%和59.7%；出水

COD 和 SS 最大值分别为 42、12 mg/L,各项指标均优于 DB 50/848—2021 的一级标准。

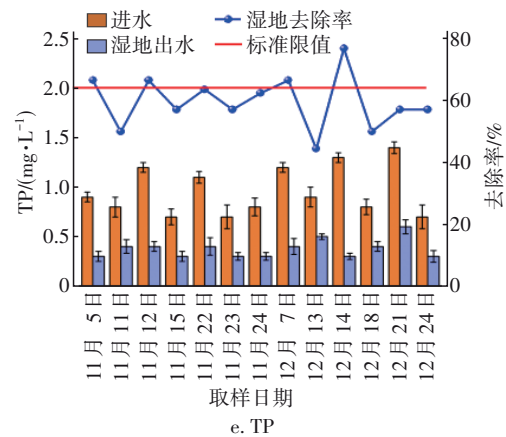
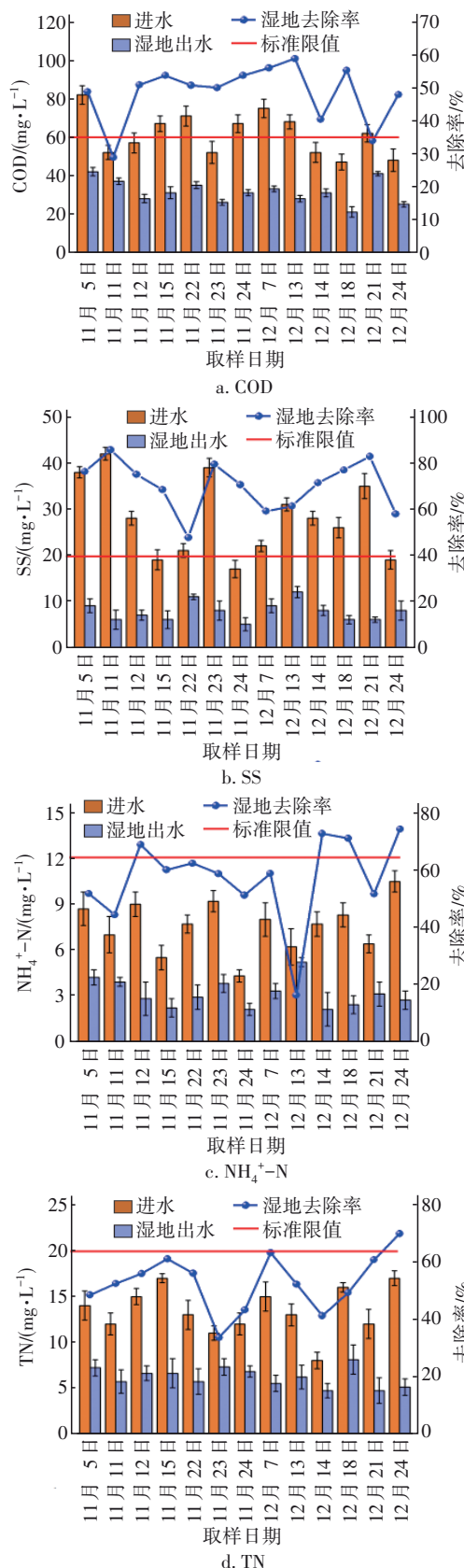


图6 污水处理站雨天运行数据

Fig.6 Operation data of sewage treatment station in rainy days

该模块化垂直潜流人工湿地在高表面水力负荷 $[0.9 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ 、低水力停留时间(12 h)下也能对各项指标有较高的去除率。可能原因是改良湿地各层之间设置 10 cm 镂空层,各层底板每隔 20 cm 设置 $\varnothing 8 \text{ mm}$ 排水孔,可减轻湿地堵塞、实现均匀配水,均匀布水使得水流能够均匀地在湿地表面和介质中流动,不会出现局部积水或者流速过快冲刷介质的情况。同时,减轻堵塞有利于植物和微生物的协同作用,植物根系向周围环境释放氧气,为微生物的生长代谢创造良好条件,微生物可以分解水中的有机物,使得湿地在高水力负荷运行时,依然能够保持对污染物的去除能力,避免水质恶化和系统故障。

2.4 成本和碳排放分析

2.4.1 成本分析

将试点行政村传统管网+处理站模式与试验模式从造价和运营费用方面进行对比,结果见表 1。

表 1 传统治理模式与试验模式经济对比

Tab.1 Economy comparison between traditional governance model and experimental mode 万元

项目	收集系统造价	处理设施造价	总造价	年运营费用
传统模式(管网+处理站)	120	45	165	8.0
试验模式	70	40	110	4.0

① 试验模式:采用截流式合流制、生态渠收水,生态渠主要包括混凝土沟渠、火山岩、复合材料雨水算子和入户支管道,综合单价约 325 元/m,渠总长度 2 km,截流设施造价 5 万元,收集系统造价共 70 万元。污水处理站土建部分包括格栅井、调节

池、资源化利用蓄水池、处理设施基础和出水渠等,费用共计30万元;处理设施和提升泵等设备费用10万元,则污水处理站造价共计40万元。试点行政村采用该试验模式治理污水总造价110万元。运营费用主要包括能耗费用和维护管理费用:动力设备仅为3台0.75 kW的小型提升泵,总能耗仅为6 500 kW·h/a(设备平均运行8 h/d),电价为1元/(kW·h),则能耗费用为0.65万元/a;该治理模式维护管理简单,收集系统仅需定期清理杂物和沉积物,污水处理站的生物滤池和人工湿地主要是植物收割与填料检查等,费用约3.35万元/a。运营总费用共计4.0万元/a。

② 传统模式:由于居住分散且地形高差大,需铺设距离长且承压较大的管网来收集污水,部分需要泵站输送至处理站。收集系统采用PE管道,管径为DN200~DN300,考虑地形因素,管网总长度约2.4 km,15 m³/d一体化泵站1座,管道、附件、检查井综合单价约437.5元/m,一体化泵站15万元,收集系统造价共计120万元。污水处理站土建部分包括格栅井、调节池、一体化处理站基础、干化池和出水渠等,费用共计25万元;一体化处理站和提升泵等设备费用20万元,污水处理站总造价为45万元。试点行政村采用传统模式治理污水,总造价165万元。运营费用主要包括能耗费用、药剂费用和维护管理费用:传统模式总能耗为21 000 kW·h/a(设备平均运行8 h/d),电价为1元/(kW·h),则能耗费用为2.1万元/a;药剂费用约为0.6万元/a,维护管理费用为5.3万元/a,则运营总费用共8.0万元/a。

综上所述,采用试验模式总造价为110万元,其中收集系统占63.6%、处理设施占36.4%;采用传统模式总造价为165万元,其中收集系统占72.7%、处理设施占27.3%,可见传统模式总造价高出试验模式50%,主要原因是山地农村采用传统污水治理模式,收集系统部分管道需深埋敷设,提升设施较多。试验模式运营费用仅为4万元/a,主要包含生态渠、截流设施和处理站维护人工费用,处理站提升泵用电费用;传统模式运营费用为8万元/a,高出试验模式运营费1倍,主要是管道、提升设施、处理站维护费用较高,提升设施、处理站用电量较高,以及处理站药剂等费用。

2.4.2 碳排放分析

污水处理中碳排放主要分为直接碳排放和间

接碳排放,直接碳排放包含厌氧阶段产生的CH₄和脱氮产生的N₂O,间接碳排放主要包含污水处理过程中电能和药剂的消耗等^[15-16]。产生CH₄造成的碳排放按式(1)计算,产生N₂O造成的碳排放按式(2)计算,间接碳排放按式(3)计算。试验模式资源化利用为农肥利用,对资源化利用部分按式(4)进行碳补偿量计算。以上计算公式和相关参数确定均来自参考文献^[15-17]。

$$W_{\text{CH}_4} = \text{COD}_{\text{去除}} \times B_1 \times 10^{-6} \times G_{\text{CH}_4} \quad (1)$$

$$W_{\text{N}_2\text{O}} = \text{TN}_{\text{去除}} \times B_2 \times 10^{-6} \times G_{\text{N}_2\text{O}} \quad (2)$$

$$W_{\text{CO}_2} = \sum_{i=0}^n A_i \times \text{EF}_i \quad (3)$$

$$W_{\text{资源化利用}} = \text{TN}_{\text{污水}} \times \text{EF}_\text{N} \times \eta_\text{N} \times 10^{-6} + \text{TP}_{\text{污水}} \times \text{EF}_\text{P} \times \eta_\text{P} \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中: W_{CH_4} 、 $W_{\text{N}_2\text{O}}$ 分别为污水处理去除COD、TN产生的直接碳排放量(以CO₂计),kg;COD_{去除}、TN_{去除}分别为污水处理COD、TN的去除量,mg; B_1 为COD转化为CH₄的系数(以CH₄/COD计); B_2 为TN转化为N₂O的系数(以N₂O/TN计); G_{CH_4} 为CH₄全球变暖潜能值; $G_{\text{N}_2\text{O}}$ 为N₂O全球变暖潜能值; W_{CO_2} 为CO₂排放量,kg; A_i 为污水处理中消耗的电能、自来水、药剂;EF_{*i*}为碳排放因子;*i*为电能、自来水、药剂; $W_{\text{资源化利用}}$ 为资源化利用代替肥料的碳补偿量(以CO₂计);TN_{污水}、TP_{污水}分别为资源化利用污水中TN、TP的质量,mg;EF_N为单位氮肥制造排放因子(以C计);EF_P为单位磷肥制造排放因子(以C计); η_N 为污水氮肥可利用率; η_P 为污水磷肥可利用率。

农村污水处理碳排放各参数取值见表2。

表2 农村污水处理碳排放各参数取值

Tab.2 Parameter values of carbon emissions for rural sewage treatment

参数	数值	参数	数值
$B_1/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.007 8	$\eta_\text{N}/\%$	13
$B_2/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.035	$\eta_\text{P}/\%$	13
G_{CH_4}	28	$\text{EF}_\text{N}/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	-2.041
$G_{\text{N}_2\text{O}}$	265	$\text{EF}_\text{P}/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	-0.636
$\text{EF}_{\text{营养液}}/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	1	$\text{EF}_{\text{电}}/[\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.581
$\text{EF}_{\text{混凝剂}}/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.4	$\text{EF}_{\text{水}}/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.93

选取附近行政村相同治理规模的传统治理模式3种不同工艺处理站(①管网收集+A²O-MBR处理,②管网收集+AO-MBBR处理,③管网收集+厌氧-人工湿地处理)与试验模式进行碳排放量对比,

结果见图7。

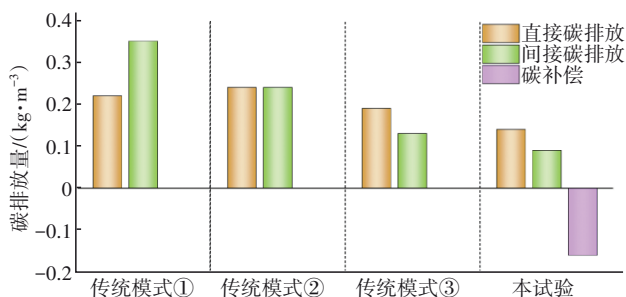


图7 传统治理模式与试验模式的碳排放量对比

Fig.7 Comparison of carbon emissions between traditional governance model and experimental model

由图7可见,传统治理模式①、②、③和试验模式的碳排放总量分别为0.57、0.48、0.32和0.07 kg/m³;传统治理模式①、②、③的直接碳排放量分别为0.22、0.24、0.19 kg/m³,较试验模式(0.14 kg/m³)高,主要是厌氧产甲烷阶段排放一定量的碳,因传统治理模式①、②的耗电量较高,且需使用药剂和自来水,间接碳排放量分别占总排放量的61.4%和50%(相应为0.35 kg/m³和0.24 kg/m³),而试验模式的间接碳排放量仅为0.09 kg/m³;试验模式采用资源化利用,碳补偿量为0.16 kg/m³,已基本实现农村生活污水处理的碳中和。

3 结论

① 山地农村排水体制采用截流式合流制,收集系统采用生态渠,通过创新改良截流设施,既合理减小了污水处理站规模,又最大程度降低了对自然水体的污染。截流设施的截流倍数可根据实际工程调节,试验模式的截流倍数约为1.1。整个收集系统从收集效果和经济方面均优于传统分流制管道收集系统。

② 采用创新改良后的多运行模式(旱天资源化利用、旱天资源化利用剩余污水处理和雨天截流混流水处理)、生物滤池+改良垂直潜流人工湿地工艺的集成一体化处理站,各项出水指标均优于重庆地标DB 50/848—2021的一级标准;改良垂直流人工湿地在高表面水力负荷[0.9 m³/(m²·d)]、低水力停留时间(12 h)下也能对各项污染指标有较高的去除率且能稳定运行。

③ 就试点行政村而言,试验模式在工程造价和运营费用方面均优于传统模式;试验模式的直接碳排放量为0.14 kg/m³,间接碳排放量为0.09 kg/m³,采用资源化利用的碳补偿量为0.16 kg/m³,已基本实现农村生活污水处理的碳中和。

m³,采用资源化利用的碳补偿量为0.16 kg/m³,已基本实现农村生活污水处理的碳中和。

参考文献:

- [1] 高生旺,黄治平,夏训峰,等. 农村生活污水治理调研及对策建议[J]. 农业资源与环境学报,2022,39(2): 276-282.
GAO Shengwang, HUANG Zhiping, XIA Xunfeng, et al. Investigation and countermeasures of rural domestic sewage treatment [J]. Journal of Agricultural Resource and Environment, 2022, 39(2): 276-282 (in Chinese).
- [2] CAO J X, SUN Q, ZHAO D H, et al. A critical review of the appearance of black-odorous waterbodies in China and treatment methods [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 385: 121511.
- [3] PIASECKI A. Water and sewage management issues in rural Poland [J]. Water, 2019, 11(3): 625.
- [4] LI L Y, ZHANG Z, SHEN Y, et al. Optimized design of modular constructed wetland for treating rural black-odorous water [J]. Water, 2024, 16(17): 2492.
- [5] YU S W, BAO J X, DING W, et al. Investigating the relationship between public satisfaction and public environmental participation during government treatment of urban malodorous black river in China [J]. Sustainability, 2021, 13(6): 3584.
- [6] XU W, LIU Z L. Evaluation on the current situation of integrated treatment of rural sewage in China: a case study of Anhui province [J]. Water, 2023, 15(3): 415.
- [7] WEI T, ZHAO Y Q, ZHOU M W, et al. Initial concept and embodiment to develop modular constructed wetland: a unique and promising solution to sustainability transitions in water management [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 450: 141912.
- [8] XU Y, LI H Y, LI Y, et al. Systematically assess the advancing and limiting factors of using the multi-soil-layering system for treating rural sewage in China: from the economic, social, and environmental perspectives [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 312: 114912.
- [9] JIANG J P, HU X, GU Y, et al. Suitability evaluation of rural sewage treatment facilities in China considering lifecycle environmental impacts and regional differences [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 344: 118516.

- [10] MISHRA S, JAYARAMAN K. Asymmetric flows in planar symmetric channels with large expansion ratio [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2002, 38(10): 945–962.
- [11] QIAN J A, MA L, ZHAN H B, *et al.* The effect of expansion ratio on the critical Reynolds number in single fracture flow with sudden expansion [J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(11): 1718–1726.
- [12] ZHAO W B, LIU Y Z, GUO D T, *et al.* Development application of rural domestic sewage treatment project in cold areas of Northeast China: opportunities and challenges [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 56: 104326.
- [13] YANG B, WANG W. Treatment and technology of domestic sewage for improvement of rural environment in China [J]. *Journal of King Saud University-Science*, 2022, 34(7): 102181.
- [14] HAN Y P, MA J W, XIAO B Y, *et al.* New integrated self-refluxing rotating biological contactor for rural sewage treatment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 217: 324–334.
- [15] 曹睿, 封莉, 杜子文, 等. 农村生活污水传统处理与源分离处理碳排放比较[J]. *环境科学*, 2024, 45(8): 4648–4655.
- CAO Rui, FENG Li, DU Ziwen, *et al.* Comparison of carbon emissions between traditional treatment and source separation treatment of rural domestic sewage [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(8): 4648–4655 (in Chinese).
- [16] 孟红旗, 李红霞, 赵爱平, 等. 市政污水厂典型A²O工艺低碳运行的系统性评估[J]. *环境科学*, 2023, 44(2): 1174–1180.
- MENG Hongqi, LI Hongxia, ZHAO Aiping, *et al.* Systematic evaluation of low-carbon operation of typical A²O processes in municipal sewage plant [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(2): 1174–1180 (in Chinese).
- [17] LI R S, ZHAO R Q, XIE Z X, *et al.* Water-energy-carbon nexus at campus scale: case of North China university of water resources and electric power [J]. *Energy Policy*, 2022, 166: 113001.
- 作者简介: 郭小龙(1988–), 男, 甘肃陇南人, 硕士, 工程师, 主要从事水处理及污水资源化研究工作。
E-mail: 1402280030@qq.com
收稿日期: 2024-11-24
修回日期: 2024-12-05

(编辑: 衣春敏)

加快推动发展方式绿色低碳转型,
因地制宜发展新质生产力,
积极稳妥推进碳达峰碳中和