

源分离生活污水对污水处理厂碳排放的影响

李政伟^{1,2}, 张金良^{1,2}, 蔡 明^{1,2}, 付 健^{1,2}, 高小涛^{1,2}, 马 浩^{1,2}

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 郑州 450003; 2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 郑州 450003)

摘 要: 以已建成运行的半集中式分质供排水和资源化系统为研究对象, 研究分类排水系统对碳排放的影响, 以期为污水处理厂碳减排提供新的思路 and 参考。结果表明: 黑水和灰水处理系统碳排放量均以电类碳排放量为主, 分别占各自碳排放量的 47.9% 和 58.1%。黑水处理系统碳排放量比灰水处理系统高 40.8%, 在采用再生水回用及污泥厌氧回收 CH_4 等措施后, 可使得黑水处理系统碳排放总量比灰水处理系统低 12.5%。分质供排水系统污水吨水碳排放量为 $2.81 \text{ kgCO}_2\text{eq} \cdot \text{t}^{-1}$, 高于混合排放、统一处理模式下的吨水碳排放量。因此, 为提高源分离的效果和资源的利用效率, 降低污水处理碳排放量, 应进一步加强和完善设计、建设、管理和维护各环节的协调和监管。

关键词: 源分离; 碳排放; 黑水; 灰水

中图分类号: S216.4; X703 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2023)03-0065-07

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023030065

Influence of Source Separation Domestic Sewage on Carbon Emission of Sewage Treatment Plant / LI Zhengwei^{1,2}, ZHANG Jinliang^{1,2}, CAI Ming^{1,2}, FU Jian^{1,2}, GAO Xiaotao^{1,2}, MA Hao^{1,2} / (1. Yellow river engineering consulting company limited, Zhengzhou 450003, China; 2. Key laboratory of water management and water security for yellow river basin, Ministry of water resources (under construction), Zhengzhou 450003, China)

Abstract: A semi-centralized decentralized water supply and drainage and recycling system that had been built and operated as the research object was studied to analyze the impact of classified drainage system on carbon emissions. The results showed that the carbon emissions of black water and gray water treatment systems were mainly electrical carbon emissions, accounting for 47.9% and 58.1% of their carbon emissions, respectively. The carbon emission of black water treatment system was 40.8% higher than that of gray water. After several measurements such as recycle of reclaimed water and anaerobic recovery of CH_4 from sludge being taken, the total carbon emission of black water treatment system was 12.5% lower than that of gray water. The carbon emission per ton of sewage in this system was $2.81 \text{ kgCO}_2\text{eq} \cdot \text{t}^{-1}$, which was higher than that of sewage under the mixed discharge and unified treatment mode. In order to improve the effect of source separation, the utilization efficiency of resources, and reduce the carbon emissions of sewage treatment, the coordination, supervision, design, construction, management and maintenance all should be further strengthened and improved.

Key words: source separation; carbon emission; black water; grey water

生活污水多通过混合排放、统一收集然后由污水处理厂集中进行处理, 在去除污水中化学需氧量、总氮、总磷及浊度等污染物的同时, 产生大量的甲烷、一氧化二氮及二氧化碳等温室气体。因此, 污水处理也是城市主要碳排放源之一^[1], 具有碳排放量大、碳排放集中和范围广等特点, 其排放量占社会总碳排放量的 1% ~ 2%^[2], 其碳排放量不容忽视^[3-4]。我国污水处理系统存在工艺落后、能耗/药

耗过高、能源与资源回收率低、运行管理水平低等问题^[5], 随着我国污水处理排放标准的要求不断提高, 可能导致污水处理系统碳排放量不断增长^[6]。随着碳达峰、碳中和上升为国家战略, 污水处理行业需要改进现状降低碳排放。

污水处理中的碳排放与污水的处理量、进出水水质、能源及药剂消耗、资源利用等因素密切相关, 是一个复杂的系统过程。目前, 各国学者针对污水

收稿日期: 2022-10-19 修回日期: 2022-11-25

项目来源: 国家“十四五”重点研发计划课题(2021YFC3201302); 黄河勘测规划设计研究院有限公司博士后研究开发项目(2021BSHZL01)。

作者简介: 李政伟(1990-), 男, 博士, 主要研究方向为有机废弃物资源化利用, E-mail: mengdeerjiayou@163.com

处理厂碳排放进行了大量的研究。张岳^[7]等构建了污水处理系统全流程节能减排综合测算模型,并通过模型测算了3个实例污水处理厂提标前后的碳排放变化情况,结果表明,在一定范围内,适当提高污水排放标准,有助于降低污水处理厂碳排量。邱德志^[8]等基于污水处理量的排放因子法,建立了2015~2019年中国五大城市群城镇污水处理厂温室气体CO₂、CH₄和N₂O的排放清单,分析了温室气体排放的时空分布和影响因素。结果表明:五大城市群城镇污水处理厂温室气体排放量逐年升高,长江三角洲城市群排放量始终最高。郑思伟^[9]等核算了2006~2016年杭州市城镇污水处理厂污染物去除量和温室气体排放量,并对两者协同控制提出了建议,结果表明,2016年城镇污水处理厂温室气体主要来自去除COD产生的CH₄和消耗电力产生的CO₂,主要影响因素是COD年去除量和年耗电量。

根据污水来源及水质的不同,可将生活污水分为灰水(洗浴洗涤等废水)、黑水(粪尿及冲厕水)、黄水(尿液及冲厕水)与褐水(粪便及冲厕水)^[10]。由于不同类型的污水污染物浓度差异很大,采用源分离的方式对生活污水进行处理更有针对性,有助于改善我国现有的“以能消能,以物质换取水质”的污水“混合排放,集中处理”现状^[11]。然而,针对污水源分离碳排放的研究还鲜有报道。本研究基于以上污水处理厂碳排放核算方法,以已建成运行的半集中式分质供排水和资源化系统为研究对象,分析分类排水系统对碳排放的影响,以期为污水处理厂碳减排提供新的思路 and 参考。

1 计算方法

污水处理过程中的碳排放可分为直接排放和间接排放^[12]。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)所发布指南中的说明,生物降解排放的CO₂为生源性排放,而非化石能源转化的CO₂,对空气碳平衡的影响有限,不列入碳排放总量范畴,因此本研究中直接排放主要是污水在处理过程中有机污染物经微生物的分解作用产生的N₂O和CH₄^[13]。间接排放主要指污水处理过程中风机、水泵及曝气设备运行消耗的电能和葡萄糖、石灰、甲醇、絮凝剂、助凝剂、消毒剂等药剂生产所导致的碳排放^[7],是污水处理厂碳排放的重要来源。此外,在污水的处置末端,采用污

水达标排放再生水和污泥厌氧消化产生并回收CH₄可以降低碳排放量,减少污水处理厂总的碳排放量。各类碳排放计算方法如下:

1.1 直接排放

1.1.1 N₂O类碳排放

$$E_{N_2O} = Q \times (TN_{\text{进水}} - TN_{\text{出水}}) \times EF_{N_2O} \times GWP_{N_2O} \times 10^{-6}$$

式中: E_{N_2O} 为污水处理环节N₂O类碳排放量, t CO₂eq·a⁻¹; Q 为处理水量, m³·a⁻¹; $TN_{\text{进水}}$ 和 $TN_{\text{出水}}$ 分别为进、出水的TN浓度, mg·L⁻¹; EF_{N_2O} 为N₂O的排放因子, 取值0.04 kg N₂O·kg⁻¹ TN^[14]; GWP_{N_2O} 为N₂O全球增温潜势值, 取值298。

1.1.2 CH₄类碳排放

$$E_{CH_4} = Q \times (BOD_{\text{进水}} - BOD_{\text{出水}}) \times EF_{CH_4} \times GWP_{CH_4} \times 10^{-6}$$

式中: E_{CH_4} 为污水处理环节CH₄类碳排放量, t CO₂eq·a⁻¹; Q 为处理水量, m³·a⁻¹; $BOD_{\text{进水}}$ 和 $BOD_{\text{出水}}$ 分别为进、出水的BOD浓度, mg·L⁻¹, 其中BOD/COD平均值为0.45^[15]; EF_{CH_4} 为CH₄的排放因子, 取值0.086 kgCH₄·kg⁻¹ BOD^[16]; GWP_{CH_4} 为CH₄的全球增温潜势值, 取值21。

1.2 间接排放

1.2.1 药剂生产类碳排放

$$E_Y = \sum EF_{CO_2, Y_i} \times Y_i$$

式中: E_Y 为污水处理厂污水处理过程中的药剂耗CO₂排放当量, t CO₂eq·a⁻¹; EF_{CO_2, Y_i} 第*i*种物料的CO₂排放因子, tCO₂·t⁻¹, 其中FeCl₃、乙酸钠和PAM的CO₂排放因子取值2.7、1.3和1.5 t CO₂·t⁻¹^[6]; Y_i 为药剂的消耗量, t·a⁻¹。

1.2.2 电耗类碳排放

$$E_D = ED \times EF_{CO_2, D} \times GWP_{CO_2}$$

式中: E_D 为城镇污水处理厂污水处理设备运行年耗电力产生的CO₂排放当量, tCO₂eq·a⁻¹; ED 为城镇污水处理厂污水处理设备运行年耗电量, MWh·a⁻¹; $EF_{CO_2, D}$ 为电力CO₂排放因子, 根据生态环境部发布的2019年度减排项目电网基准线排放因子, 华北区域电网基准线排放因子为0.9419 tCO₂·MWh⁻¹; GWP_{CO_2} 为CO₂全球增温潜势值, 取值1。

1.3 碳减排

1.3.1 水质提升碳减排

$$E_S = [Q \times (BOD_{\text{进水}} - BOD_{\text{出水}})] \times GWP_{CH_4} \times EF_{CH_4, \text{地表水体}} + Q \times (TN_{\text{进水}} - TN_{\text{出水}}) \times G_{N_2O} \times EF_{N_2O, \text{地表水体}}] \times 10^{-6}$$

式中: E_s 为水质提升带来的水环境的碳减排, $\text{t CO}_2\text{eq}\cdot\text{a}^{-1}$; $EF_{\text{CH}_4, \text{地表水体}}$ 为地表水体 CH_4 的排放因子, 取值 $0.06 \text{ kgCH}_4\cdot\text{kg}^{-1}\text{BOD}$; $EF_{\text{N}_2\text{O}, \text{地表水体}}$ 为地表水体 N_2O 的排放因子, 取值 $0.008 \text{ kgN}_2\text{O}\cdot\text{kg}^{-1}\text{TN}$ 。

1.3.2 回收 CH_4 碳减排量

$$E_H = R_{\text{CH}_4} \times 0.717 \times 10^{-3} \times \text{GWP}_{\text{CH}_4}$$

式中: E_H 为污水处理过程中回收 CH_4 折算为 CO_2 当量的年减排量, $\text{t CO}_2\text{eq}\cdot\text{a}^{-1}$; R_{CH_4} 为污水处理过程总回收 CH_4 的体积, $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$; 0.717 为标准状况(1个标准大气压和温度 0°C) 下 CH_4 的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2 案例介绍

青岛世园“中德合作半集中式分质水处理及资源化利用示范工程”是青岛市政府于2012年引进, 由德国达姆斯塔特工业大学(Technische Universität Darmstadt)、同济大学和青岛理工大学联合研发的区域性分质供排水和废物资源化系统, 总建筑面积 4600 m^2 , 是世界上第一个在区域范围内将“半集中式供水和废物处理技术”付诸实践、实现区域性资源循环利用的示范项目。项目服务范围为青岛世

界园艺博览会世博村(世园寒轩、华通、假日等酒店) 和毕家安置工程的 A、C 片区, 近 70 万 m^2 , 以及2014年后周边新建的住宅区, 服务人口共计12740人。工程分别收集服务范围内的黑水、灰水及厨余垃圾进行处理处置, 产生的再生水用于世园村建筑冲厕、绿化景观用水、道路清洁和洗车等, 厨余垃圾处理与剩余污泥联合厌氧发酵产生的沼气用于沼气发电和锅炉加热^[17-18]。

杨本亮^[18]研究了该示范工程中分质污水处理系统的生产应用性能, 其中黑水(卫生间便器排水和厨房排水) 和灰水(洗浴洗涤等排水) 的设计处理能力分别为 $800 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $700 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, 设计出水水质标准为《城市污水再生利用·城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002) 和《城市污水厂污染物排放标准》(GB18918—2002) 中的一级 A 标准。工程中实际的处理水量、进出水水质见表1, 管道存在混接现象, 导致黑水和灰水水质与设计水质不同。由于项目所在区域再生水回用需提升高度较大, 超过回用水管道承载压力, 无法正常使用再生水, 因此项目实际灰水和黑水产生的再生水量较少。所研究的黑水处理系统和灰水处理系统的运行时间分别为640天和485天, 为便于计算, 本研究取365天。

表1 黑水和灰水进出水水质情况

类 别	进水量 ($\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$)	COD 进水 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TN 进水 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	COD 出水 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TN 出水 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	再生水回用量 ($\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$)
黑水处理系统	182500	726	104.8	20.5	17.0	10017
灰水处理系统	121180	580	50.5	20.0	5.5	6408

3 结果与讨论

3.1 分类排水处理系统对直接排放的影响

黑水处理系统和灰水处理系统直接碳排放共 $415 \text{ tCO}_2\text{eq}\cdot\text{a}^{-1}$, 其中黑水处理系统直接排放量为 $295 \text{ tCO}_2\text{eq}\cdot\text{a}^{-1}$, 占直接排放总量的71.1%, 比灰水处理系统直接排放量高145.8%; 而灰水处理系统直接排放量为 $120 \text{ tCO}_2\text{eq}\cdot\text{a}^{-1}$, 仅占直接排放总量的28.9%。黑水处理系统和灰水处理系统直接碳排放中 N_2O 类碳排放总量为 $256 \text{ tCO}_2\text{eq}\cdot\text{a}^{-1}$, 占直接排放总量的61.7%; 而 CH_4 类碳排放量为 $159 \text{ tCO}_2\text{eq}\cdot\text{a}^{-1}$, 占直接排放总量的38.3%。黑水处理系统直接排放中 N_2O 类碳排放量为 $191 \text{ tCO}_2\text{eq}\cdot\text{a}^{-1}$, 占黑水直接碳排放的64.5%, CH_4 类碳排放量为 $104 \text{ tCO}_2\text{eq}\cdot\text{a}^{-1}$, 占黑水直接碳排放的35.5%。灰水处理系统直接排放中 N_2O 类碳排放量为65

$\text{tCO}_2\text{eq}\cdot\text{a}^{-1}$, CH_4 类碳排放量为 $55 \text{ tCO}_2\text{eq}\cdot\text{a}^{-1}$, 分别占灰水直接碳排放的54.2%和45.8%(见图1)。

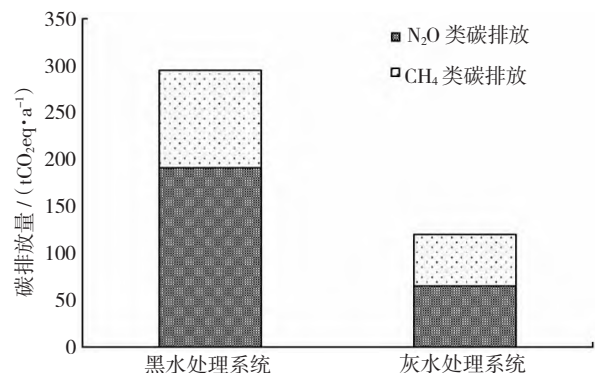


图1 黑水和灰水处理系统直接碳排放情况

3.2 分类排水处理系统对间接排放的影响

厂区年用电总量为 $604.9 \text{ MWh}\cdot\text{a}^{-1}$, 其中黑水处理系统和灰水处理系统用电量分别为324.8和

280.1 $\text{MWh} \cdot \text{a}^{-1}$, 分别占总用电量的 53.7% 和 14.3%。所添加药剂包括 FeCl_3 、乙酸钠和 PAM, 分别为 29.5、21.3 和 $0.32 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中黑水处理系统添加药剂为 FeCl_3 和乙酸钠, 年用量分别为 3.8 和 $21.3 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 灰水处理系统添加药剂为 FeCl_3 和 PAM, 年用量分别为 25.7 和 $0.32 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

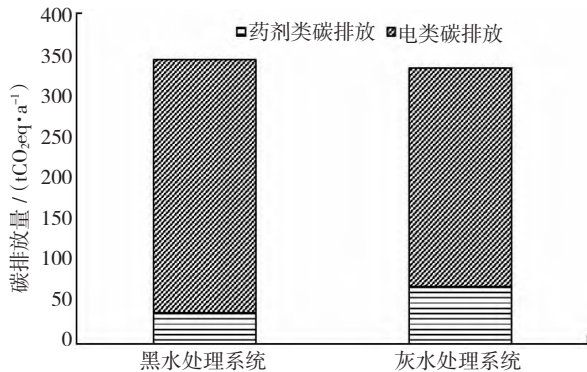


图2 黑水和灰水处理系统间接碳排放情况

黑水处理系统和灰水处理系统间接碳排放共 677.6 $\text{tCO}_2\text{eq} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中黑水处理系统和灰水间接排放量分别为 343.9 和 333.7 $\text{tCO}_2\text{eq} \cdot \text{a}^{-1}$, 分别占间接排放总量的 50.8% 和 49.2%, 黑水和灰水的间接排放量较为接近(见图2)。黑水处理系统和灰水处理系统间接碳排放中电类碳排放总量为 569.7 $\text{tCO}_2\text{eq} \cdot \text{a}^{-1}$, 占间接排放总量的 84.1%; 药剂类碳排放量为 107.9 $\text{tCO}_2\text{eq} \cdot \text{a}^{-1}$, 占间接排放总量的 15.9%。黑水处理系统间接排放中以电类碳排放量最多, 电类和药剂类碳排放量分别占其总排放量的 90.0% 和 10.0%。灰水处理系统间接排放同样以电类碳排放量最多, 电类、药剂类和水质提升类碳排放量分别占其总排放量的 79.1% 和 20.9%, 其中药剂类碳排放量为 69.9 $\text{tCO}_2\text{eq} \cdot \text{a}^{-1}$, 比黑水处理系统药剂类碳排放量高 83.9%。

3.3 分类排水处理系统对污水处理厂碳减排的影响

污水处理厂碳减排主要包括 CH_4 回收类碳减排和水质提升类碳减排。黑水处理系统和灰水处理系统碳减排量共 240.7 $\text{tCO}_2\text{eq} \cdot \text{a}^{-1}$, 以黑水污泥厌氧消化回收的 CH_4 类碳减排为主, 占碳减排总量的 96.3%。其中黑水处理系统碳减排以 CH_4 类碳减排为主, 灰水处理系统以水质提升类碳减排为主(见图3)。

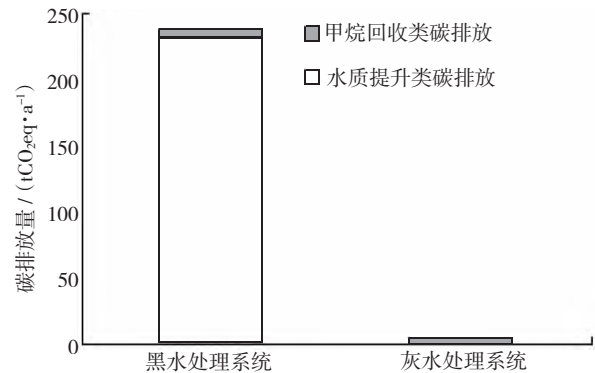


图3 黑水和灰水处理系统碳减排情况

3.4 分类排水处理系统对污水处理厂碳排放的影响

黑水处理系统碳排放量共 638.9 $\text{tCO}_2\text{eq} \cdot \text{a}^{-1}$, 比灰水处理系统碳排放量高 40.8%。然而, 黑水中营养物质丰富, 其中的有机物可以采用厌氧消化方式制取沼气, 以回收 CH_4 。黑水处理系统通过回收 CH_4 的碳减排量为 231.8 $\text{tCO}_2\text{eq} \cdot \text{a}^{-1}$, 而灰水的碳减排量主要以水质提升类碳减排为主, 仅有 2.7 $\text{tCO}_2\text{eq} \cdot \text{a}^{-1}$ 。使得最终灰水处理系统碳排放量比黑水处理系统高 12.5% (见表2)。

表2 黑水和灰水处理系统直接碳排放情况

排放类别	碳排放量 / (tCO ₂ eq·a ⁻¹)	
	黑水处理系统	灰水处理系统
直接排放		
N_2O 类碳排放	191.0	65.0
CH_4 类碳排放	104.0	55.0
间接排放		
药剂类碳排放	38.0	69.9
电类碳排放	305.9	263.8
减排		
CH_4 回收类碳减排	-231.8	0.0
水质提升类碳减排	-6.2	-2.7
合计	400.9	451.0

3.5 分类排水处理系统对吨水碳排放量的影响

吨水碳排放量处理单位水量污水产生的碳排放量, 用于评价污水处理达标后污水处理厂的表观碳排放水平, 是污水处理厂碳排放评价最常用的指标^[19]。通过文献调研, 对其他学者关于污水处理厂吨水碳排放情况进行计算对比, 见表3。从表3可以看出, 碳排放核算内容不同, 污水的吨水碳排放值不同, 最高为 2.15 $\text{kg CO}_2\text{eq} \cdot \text{t}^{-1}$, 最低为 0.32 $\text{kg CO}_2\text{eq} \cdot \text{t}^{-1}$ 。本研究中碳排放量除了计算 CH_4 类碳排放, N_2O 类碳排放, 电类碳排放以及药剂类碳排放外, 还计算了 CH_4 回收类碳减排和水质提升类碳减排, 总的吨水碳排放量为 2.81 $\text{CO}_2\text{eq} \cdot \text{t}^{-1}$, 与其他

文献中已有报道的相比, 本研究中吨水碳排放量较高。

表3 吨水碳排放量对比表

吨水碳排放量 ($\text{kgCO}_2 \text{eq} \cdot \text{t}^{-1}$)	碳排放核算内容	参考文献
1.06	CH_4 类碳排放, N_2O 类碳排放, 电类碳排放, 药剂类碳排放。	[20]
0.70	CH_4 类碳排放, N_2O 类碳排放, 电类碳排放。	[9]
0.32	CH_4 类碳排放, N_2O 类碳排放, 电类碳排放, 药剂类碳排放。	[21]
0.36	CH_4 类碳排放, N_2O 类碳排放, 电类碳排放, 药剂类碳排放。	[22]
2.15	外加碳源 CO_2 类碳排放, CH_4 类碳排放, N_2O 类碳排放, 电类碳排放, 药剂类碳排放, CH_4 回收类碳减排, 水质提升类碳减排, 土地利用碳减排, 好氧消化碳减排。	[7]
0.79	CH_4 类碳排放, N_2O 类碳排放, 电类碳排放, 药剂类碳排放。	[23]
2.81	CH_4 类碳排放, N_2O 类碳排放, 电类碳排放, 药剂类碳排放, CH_4 回收类碳减排, 水质提升类碳减排。	本研究

4 讨论

4.1 分类排水处理系统对各类碳排放的影响

黑水仅占生活污水总量的 1% ~ 2%, 但却贡献了生活污水中 60% 的有机物、91% 的氮和 78% 的磷, 是生活污水中的主要污染源^[24], 而灰水的污染程度较轻, 易于净化处理^[25]。因此, 采用源头分离将生活污水分离为黑水和灰水处理后, 黑水处理系统中 N_2O 类碳排放量和 CH_4 类碳排放量均比灰水处理系统碳排放量大。黑水中 TN 浓度较高, 是灰水中 TN 的 2 倍(见表 1)。为满足达标排水水质要求, 污水需要进行脱氮处理, 在一定程度上提高了污水碳排放量。实际上, 黑水是一种良好的资源, 其 BOD_5/COD 为 0.52, 具有较好的可生化性, 因此可以采用厌氧消化、好氧堆肥的方式进行资源化^[26], 其中的氮磷资源具有天然有机肥料的属性, 采用适当的措施减少氮的损失, 可有助于减少污水处理的碳排放。

此外, 黑水处理系统和灰水处理系统间接碳排放主要来自电类碳排放, 其中的电耗主要用于污水处理过程中风机、水泵及曝气设备运行消耗, 此外黑水处理系统电耗还包括厌氧消化系统和除臭系统等设备的电耗^[17], 进而导致黑水处理系统电类碳排放量高于灰水处理系统。灰水主要含有一定量的有机物、氮磷无机盐以及少量油脂、表面活性剂、微生物等, 由于灰水有机物浓度低, 可生化性不高, 且 C/N 偏低^[27], 在处理过程中需要投加大量的絮凝剂和外加碳源, 导致灰水处理系统药剂类碳排放量较高。由于在实际运行过程中, 存在灰水、黑水管道混接现象^[17], 未真正实现污水的分类排放, 导致灰水实际进水污染物浓度偏高, 提高了灰水的间接碳排放。

因此, 在以后的工程中, 采用严格的分类排放方式不仅可以降低灰水污染物浓度, 而且可以提高黑水中氮磷资源含量, 均可降低灰水和黑水的间接碳排放。

在碳减排方面, 黑水中有机物浓度较高, 可以采用厌氧消化的方式回收 CH_4 , 用于厌氧消化过程的热量维持或者他用, 从而实现污水处理厂碳减排。提高生物质能回收效率, 降低系统能耗, 沼渣脱水环节绿色药剂替代, 以及沼液氮磷资源高效回收将是污水厌氧消化工艺未来碳减排发展的重点方向^[2]。

4.2 分类排水处理系统对污水处理厂总碳排放的影响

污水处理是一个“以能耗能”、“以能耗换水质”的过程, 在当前污水收集处理率与污染物去除率双提升的要求下, 污水处理厂的能耗问题日益突出, 加大了污水处理厂碳排放^[28]。本研究发现, 在各类碳排放中, 无论黑水处理系统还是灰水处理系统, 电类的碳排放量均最大, 远超其他类型的碳排放。通过采用高效机电设备、加强负载管理和建立需求响应机制等路径, 可实现 20% ~ 40% 的碳减排潜力^[29]。因此可以选用高性能设备降低能耗, 从而降低碳排放量。

此外, 本研究中黑水处理系统碳排放中, N_2O 类碳排放和电类碳排放分别贡献了 29.9% 和 47.9%, 与周政^[30]等的研究结论一致, 在其研究中发现低 C/N 污水碳排放中, N_2O 类碳排放和电类碳排放是其主要的碳排放来源, 分别贡献了 25.8% 和 49.4% 的碳排放。因此, 针对低 C/N 类污水, 可以通过充分利用进水碳源, 多途径协同脱氮除磷, 精准曝气, 实现碳减排。对于本研究而言, 应当采取严格分类排水, 避免管道混接, 同时建议采用负压排水技术对黑水进行源头分离, 其冲刷用水量仅为传统便器的

3%^[24],可显著降低黑水含水率,提高黑水的资源化效率^[26]。

4.3 分类排水处理系统对吨水碳排放量的影响

我国污水处理发展较快,而污泥处理滞后,使得我国城市污水处理厂建设过程中存在严重的“重水轻泥”现象,污水处理厂仅对污水进行处理,对产生的污泥则外运处置^[31]。而污泥的处置多采用厌氧消化、填埋、焚烧等方式,处理过程中所需的能耗量、电耗量、药耗量等较大,导致碳排放量较高^[2]。使得污水的吨水排放量低。张岳^[7]等构建了污水处理系统全流程的碳排放测算模型,对包括外加碳源CO₂类碳排放,CH₄类碳排放,N₂O类碳排放,土地利用碳排放,电类碳排放,药剂类碳排放,厌氧消化碳减排,好氧消化碳减排,水质提升类碳减排,土地利用碳减排等污水污泥处理处置环节全流程的碳排放进行测算,测算结果与本研究相近。另一方面,本研究案例中黑水和灰水管道存在混接现象,并未进行严格地分类排水,从而导致黑水中污染物的实际进水浓度较设计进水浓度偏低,而灰水中污染物的实际进水浓度较设计进水浓度偏高,因此在处理过程中需要比设计方案更大的能耗、电耗和药耗^[17],加大了污水处理碳排放,加上大量的再生水无法利用,直接溢流进入市政管网^[32],减少了水质碳减排量,导致吨水排放量偏高。

5 结论

(1) 采用源分离方式将生活污水分为黑水和灰水进行分类排放处理,黑水和灰水处理系统碳排放量主要以电类的碳排放量为主,分别占各自碳排放量的47.9%和58.1%。

(2) 黑水处理系统碳排放量共638.9 tCO₂eq·a⁻¹,比灰水处理系统碳排放量高40.8%。在采用再生水回用及污泥厌氧消化回收CH₄等碳减排措施后,黑水处理系统碳排放总量为400.9 tCO₂eq·a⁻¹,比灰水处理系统碳排放总量低12.5%。

(3) 源分离污水分类处理的吨水碳排放量为2.81 kgCO₂eq·t⁻¹,高于其他混合排放、统一处理模式下的吨水碳排放量,主要是由于管道混接及再生水利用率低。

(4) 源分离分类排水理念已得到越来越多学者的认可,本研究所取案例一方面存在管道混接导致源分离效果不理想,另一方面再生水管道承载压力小,导致再生水无法正常回用。建议进一步加强和

完善设计、建设、管理和维护各环节的监管,提高源分离的效果和资源的利用效率,降低污水碳排放量。

参考文献:

- [1] Sweetapple C, Fu G, Butler D. Identifying sensitive sources and key control handles for the reduction of greenhouse gas emissions from wastewater treatment [J]. Water Research, 2014, 62: 249 – 259.
- [2] 戴晓虎, 张辰, 章林伟, 等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考 [J]. 给水排水, 2021, 57(03): 1 – 5.
- [3] He Y, Zhu Y, Chen J, et al. Assessment of energy consumption of municipal wastewater treatment plants in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 228: 399 – 404.
- [4] Yang J, Chen B. Energy efficiency evaluation of wastewater treatment plants (WWTPs) based on data envelopment analysis [J]. Applied Energy, 2021, 289: 116680.
- [5] Qu J, Wang H, Wang K, et al. Municipal wastewater treatment in China: Development history and future perspectives [J]. Frontiers of Environmental Science Engineering, 2019, 13(6).
- [6] Parravicini V, Svardal K, Krampe J. Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants [J]. Energy Procedia, 2016, 97: 246 – 253.
- [7] 张岳, 葛铜岗, 孙永利, 等. 基于城镇污水处理全流程环节的碳排放模型研究 [J]. 中国给水排水, 2021, 37(09): 65 – 74.
- [8] 邱德志, 陈纯, 郭丽, 等. 基于排放因子法的中国主要城市群城镇污水厂温室气体排放特征 [J]. 环境工程, 2022, 40(06): 116 – 122.
- [9] 郑思伟, 唐伟, 闫兰玲, 等. 城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体的核算及排放特征研究 [J]. 环境污染与防治, 2019, 41(05): 556 – 559.
- [10] Lam L, Kurisu K, Hanaki K. Comparative environmental impacts of source-separation systems for domestic wastewater management in rural China [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 104: 185 – 198.
- [11] Zhu J, Wagner M, Cornel P, et al. Feasibility of on-site grey-water reuse for toilet flushing in China [J]. Journal of Water Reuse and Desalination, 2016, 8.
- [12] 谢淘, 汪诚文. 污水处理厂温室气体排放评估 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(04): 473 – 477.
- [13] Paustian K, Ravindranath N H, Amstel A V. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [J]. International Panel on Climate Change, 2006.

- [14] 李 静, 刘华超, 王 龙, 等. 污水系统温室气体排放研究 [J]. 水科学与工程, 2013(02) : 35 – 37.
- [15] 宋丽丽, 罗 勇, 高庆先, 等. 生活污水中 BOD₅ 与 COD_(Cr) 关系的区域性差异分析 [J]. 环境科学研究, 2011, 24(10) : 1154 – 1160.
- [16] 夏天虹, 董桂君. 我国城镇污水处理厂生命周期的碳排放评估 [J]. 环境保护与循环经济, 2018, 38(09) : 13 – 17.
- [17] 唐贤春, 贺 艺, 宋 鹏, 等. 半集中式分质供排水和资源化系统的集成应用 [J]. 环境工程学报, 2019, 13(07) : 1612 – 1622.
- [18] 杨本亮. 半集中式分质污水处理系统生产性应用及优化研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2017.
- [19] Hua H, Jiang S, Yuan Z, et al. Advancing greenhouse gas emission factors for municipal wastewater treatment plants in China [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 295: 118648.
- [20] 余 娇, 赵荣钦, 肖连刚, 等. 基于“水—能—碳”关联的城市污水处理系统碳排放研究 [J]. 资源科学, 2020, 42(06) : 1052 – 1062.
- [21] 郝晓地, 赵梓丞, 李 季, 等. 污水处理厂的能源与资源回收方式及其碳排放核算: 以芬兰 Kakolanmäki 污水处理厂为例 [J]. 环境工程学报, 2021, 15(09) : 2849 – 2857.
- [22] 宋宝木, 秦华鹏, 马共强. 污水处理厂运行阶段碳排放动态变化分析: 以深圳某污水处理厂为例 [J]. 环境科学与技术, 2015, 38(10) : 204 – 209.
- [23] 张玲丽, 顾敦罡, 陆嘉麒, 等. MBBR 用于某 CAST 工艺污水处理厂提标改造的效能及碳排放分析 [J]. 环境工程技术学报, 2022: 1 – 12.
- [24] 郝晓地, 周 健, 张 健. 源分离生态效应及其资源化技术 [J]. 中国给水排水, 2016, 32(24) : 20 – 27.
- [25] 王红武, 张 健, 陈洪斌, 等. 城镇生活用水新型节水“5R”技术体系 [J]. 中国给水排水, 2019, 35(02) : 11 – 17.
- [26] 李政伟, 张金良, 马 军, 等. 人粪尿资源化技术研究进展 [C]. 中国环境科学学会 2021 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场, 中国天津, 2021.
- [27] 李 云, 何志琴, 夏训峰, 等. 国内外灰水处理技术研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(05) : 935 – 941.
- [28] Hao X, Liu R, Huang X. Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China [J]. *Water Research*, 2015, 87: 424 – 431.
- [29] 王洪臣. 我国城镇污水处理行业碳减排路径及潜力 [J]. 给水排水, 2017, 53(03) : 1 – 3.
- [30] 周 政, 李怀波, 王 燕, 等. 低碳氮比进水 AAO 污水处理厂碳排放特征及低碳运行研究 [J]. 中国环境科学, 2022: 1 – 14.
- [31] 胡维杰. 我国污水处理厂污泥处理处置需关注的若干内容 [J]. 给水排水, 2019, 55(03) : 35 – 41.
- [32] 贺 艺. 半集中式分质供排水和资源化系统的生产性应用研究 [D]. 上海: 同济大学, 2019.