

长三角典型城镇灰色雨水排水系统运维期碳排放影响因素研究

魏源源¹, 丁超¹, 冯 骞^{2,3}

(1. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125; 2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:梳理了长三角典型城镇南京居民区和商业区的灰色雨水排水系统的碳排放边界,采用现场监测与数值模拟相结合的方法,核算了灰色雨水排水系统运维期的碳排放量,探讨了不同降雨重现期下功能区类型、排放模式、调蓄模式等要素对运维期碳排放特征的影响规律,并计算了全生命周期中运维期碳排放的占比。结果表明:初雨径流产生的碳排放是灰色雨水排水系统运维期碳排放的主要来源,商业区灰色雨水排水系统初雨径流平均碳排放量为 3.76 t/hm²(以二氧化碳当量计),为居民区(1.93 t/hm²)的 1.95 倍;强排模式下运维期碳排放量为自排模式的 2.27~3.47 倍,调蓄模式可通过控制初雨径流降低 28.76% 的运维期碳排放;灰色雨水排水系统全生命周期中,不同功能区类型、排放模式、调蓄模式下,运维期的碳排放占比为 15.98%~31.87%。

关键词:灰色雨水排水系统;碳排放;全生命周期;运维期;初雨径流;南京

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2025)03-0153-08

Research on influencing factors of carbon emissions during operational phase of grey rainwater drainage system in typical town in the Yangtze River Delta//WEI Yuanyuan¹, DING Chao¹, FENG Qian^{2,3} (1. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The carbon emission boundaries of the gray rainwater drainage system of residential and commercial areas of Nanjing, a typical city in the Yangtze River Delta were defined, and a combination of field monitoring and numerical simulation was employed to quantify the operational phase carbon emissions. The influence of factors such as functional zone type, drainage mode, and storage mode on operational carbon emissions under different rainfall return periods was investigated. Additionally, the proportion of operational phase emissions in the full life cycle was calculated. The results indicate that carbon emissions from initial rainfall runoff are the primary source of operational phase carbon emissions in gray rainwater drainage systems. The average carbon emission from initial runoff in commercial areas was 3.76 t/hm² (in CO₂ equivalent), 1.95 times that of residential areas (1.93 t/hm²). Under forced drainage mode, operational phase carbon emissions were 2.27-3.47 times higher than those under gravity drainage mode, while storage mode reduced operational phase carbon emissions by 28.76% by controlling initial rainfall runoff. Across the full life cycle of gray rainwater drainage systems, operational phase carbon emissions accounted for 15.98%-31.87%, depending on functional zone type, drainage mode, and storage mode.

Key words: gray rainwater drainage system; carbon emission; full life cycle; operational phase; initial rainfall runoff; Nanjing

随着城市化的快速推进,能源、材料消耗与温室气体产生带来的碳排放不断增加,不仅加剧了全球气候的变化,也给全球环境的可持续发展带来了巨大的挑战^[1-2]。城镇雨水排水系统由灰色雨水排水

系统和绿色雨水排水系统共同构成,其中灰色雨水排水系统主要包括雨水收集设施、雨水管渠、雨水泵站、调蓄池等,绿色雨水排水系统主要包括雨水渗透设施、雨水塘、生物生态净化设施等^[3-4]。与采用生

基金项目:上海市水务局科研项目(沪水科 2022-27)

作者简介:魏源源(1981—),女,高级工程师,博士,主要从事城市雨洪管理研究。E-mail:weiyuanyuan@sudri.com

通信作者:冯骞(1977—),男,教授,博士,主要从事绿色低碳水系统研究。E-mail:xiaofq@hhu.edu.cn

态工程为主、模拟自然水循环过程的绿色雨水排水系统相比,采用传统雨水收集、输送、调蓄设施的灰色雨水排水系统在建设、运维和拆除的全生命周期中会产生大量的碳排放^[5-7]。其建设过程消耗的材料、能源,运维期间降雨径流输送排放时消耗的电^[8],以及雨水径流中的碳氮源污染物在管道内微生物作用下发生生化反应产生的温室气体^[9],都是灰色雨水排水系统碳排放的主要来源。由于雨水径流的水质比污水好,且输送距离较短,自流排放比例总体较高^[10-11],因此现有研究中多以建设期和拆除期作为灰色雨水排水系统的碳排放研究与核算的重点,对运维期的研究仅局限于雨水输送和排放过程的化石燃料和电力消耗,围绕初雨径流排放产生的碳排放考虑的不多,相关研究也十分有限。

长三角地区是我国经济发展最活跃、开放程度最高、创新能力最强的区域之一,在生态文明建设和绿色低碳可持续发展方面也走在全国前列^[12]。围绕雨水排水系统的海绵化建设、改造与运维,长三角地区的上海、南京、镇江、昆山等城市都开展了大量的实践,取得了良好的成效^[13-14]。许多城镇在雨水系统的低碳建设和运维方面也开展了一些有益的尝试和探索^[15]。但受雨水排水系统碳排放核算边界不清晰、核算体系不健全等因素的影响,对不同要素下雨水排水系统碳排放的特征规律也缺乏明确认识,影响了城镇雨水排水系统减污降碳协同增效工作的有效推进。现有的研究已经证实雨水排水系统在建设和拆除期消耗材料、能源会产生碳排放,是典型的碳源^[4]。而雨水排水系统中的各类绿化都可以吸收二氧化碳,产生一定的碳汇,且绿色屋顶、下凹绿地等绿色雨水设施中植被面积越大,碳汇潜能也越大^[5,8]。在灰色雨水排水系统运行的过程中,由于雨水径流对下垫面和管道沉积物的冲刷,会形成污染物浓度较高的初雨径流进入受纳水体^[16-17],在微生物的作用下产生温室气体^[18-19]。考虑到运维期的碳排放在城镇灰色雨水排水系统全生命周期中的重要意义,本文在梳理长三角典型城市南京两处灰色雨水排水系统碳排放边界的基础上,通过现场监测与数值模拟相结合的方式,对灰色雨水排水系统运维期的碳排放进行核算,探究不同要素影响下灰色雨水排水系统运维期的碳排放特征与规律,以期城镇雨水排水系统的绿色低碳评价和管理提供参考。

1 研究区概况

南京是长三角地区的核心城市之一,地处亚热

带季风气候区,四季分明,年降水量约为1 100 mm^[20],夏季降雨集中且强度较大,具有显著的季节性特点,其气候特征在长三角城镇中具有广泛的代表性。本文选取南京市建邺区内秦淮河中段的两处灰色雨水排水系统开展研究,位置如图1所示。雨水排水系统A为居民区,集水区面积6.60 hm²,不透水下垫面约86%;雨水排水系统B为商业区,集水区面积7.16 hm²,不透水下垫面约88%。

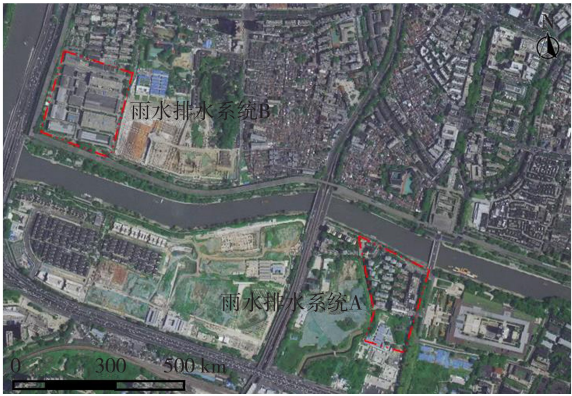


图1 研究区位置
Fig. 1 Location of study area

2 研究方法

2.1 现场采样

在居住区和商业区共采集了2014年7—8月的4场典型降雨事件进行监测分析。其中,居住区监测的两场降雨事件发生时间为2014年7月12日和2014年8月3日,商业区监测的两场降雨事件发生时间为2014年8月8日和2014年9月2日。自降雨径流开始时,每隔一定时间在雨水系统排水口采集3份平行水样,监测COD和TN的质量浓度。降雨开始0~30 min,每隔5 min采样1次;30~60 min,每隔10 min采样1次,并根据降雨状况适当调整。图2为4场降雨事件中COD和TN质量浓度的变化。由图2可见,居民区降雨径流中COD、TN质量浓度变化范围分别为7.35~41.19 mg/L、5.13~30.94 mg/L,商业区降雨径流中COD、TN质量浓度变化范围分别为17.34~88.99 mg/L、4.76~40.84 mg/L。不同降雨事件中污染物质量浓度相差很大,4场降雨事件中污染物质量浓度都是在初期径流刚产生就接近峰值,随着降雨历时的增加污染物质量浓度逐步降低,降雨中期污染物质量浓度随着降雨冲刷有小幅波动,最后达到稳定。

2.2 模型选择与率定

数值模拟选用暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM),其适应性强且已被广泛

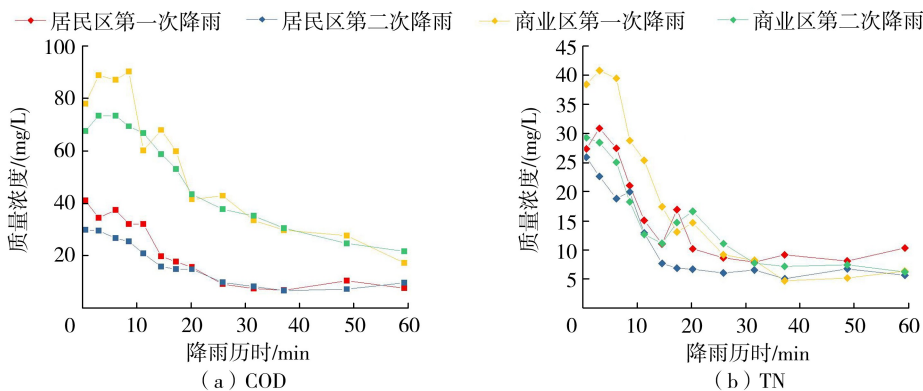


图 2 4 场降雨事件中 COD 和 TN 质量浓度的变化

Fig. 2 Changes in COD and TN mass concentrations during 4 rainfall events

应用^[21]。产流模型选用霍顿模型,其能够动态描述地表入渗速率随时间的变化过程,在初始入渗速率快速衰减后,逐渐达到稳定入渗速率的长期平衡状态,与实际降雨条件下的地表产流物理过程吻合。研究区主要为城市化地表,包含一定的渗透性区域和大量的不透水区域,霍顿模型在处理这类复杂地表条件时具有较高的适应性^[22]。此外,霍顿模型的关键参数(初始入渗速率、稳定入渗速率、衰减系数等)可以通过实测数据或相关文献^[23-24]得到,操作简便且易于实际应用。降雨雨型采用芝加哥雨型,其基于区域降雨强度-历时-频率曲线构建,可有效模拟短历时强降雨事件对排水系统的影响,符合长三角典型城镇暴雨高峰集中、强度大的特点^[25-26]。

利用实测降雨径流的污染物质量浓度对 SWMM 的关键参数进行率定和验证,包括地表污染物累积与冲刷参数、污染物传输与衰减参数等^[27-29]。2014 年 7 月 12 日和 2014 年 8 月 8 日的降雨过程用于模型率定,2014 年 8 月 3 日和 2014 年 9 月 2 日的降雨过程用于模型验证。图 3 为居民区和商业区 SWMM 验证结果,模拟值与实测值相对误差小于 20%,表明模型模拟精度能够满足研究要求。得到 SWMM 地表产流参数:最大入渗率为 76.2 mm/h、最小入渗率为

3.81 mm/h、入渗衰减系数为 0.0006 h⁻¹、完全饱和土壤恢复到干旱状态时间为 3 d;污染物冲刷参数:COD 冲刷系数为 0.007、COD 冲刷指数为 1.8、TN 冲刷系数为 0.004、TN 冲刷指数为 1.7。

设定降雨重现期 P 分别为 0.5、1、2、3、4、5 a,利用 SWMM 对不同降雨强度下居民区和商业区的初雨径流中的径流和污染物质量浓度进行模拟和预测,得到居民区和商业区初雨径流量及 COD、TN 质量浓度,按照初雨径流过程对应的间隔时间进行加权平均,获得居民区和商业区相应降雨重现期下初雨径流污染物的事件平均浓度和污染负荷。

2.3 灰色雨水排水系统碳排放核算边界与核算方法

灰色雨水排水系统主要包括雨水收集设施、雨水管渠、雨水泵站、调蓄池等。传统观点认为,雨水较为清洁,加之核算边界中不包含受纳水体,因此在灰色雨水排水系统的运行维护过程中并不产生直接碳排放。然而,初雨污染物的处理依赖于排水系统的运作,包括泵送、处理设施的运行等,这些过程都会直接或间接地产生碳排放。考虑到雨水系统在收集、输送这些污染物的过程中,对污染物具有显著的聚集效应,使得初雨径流中污染物浓度远高于常规

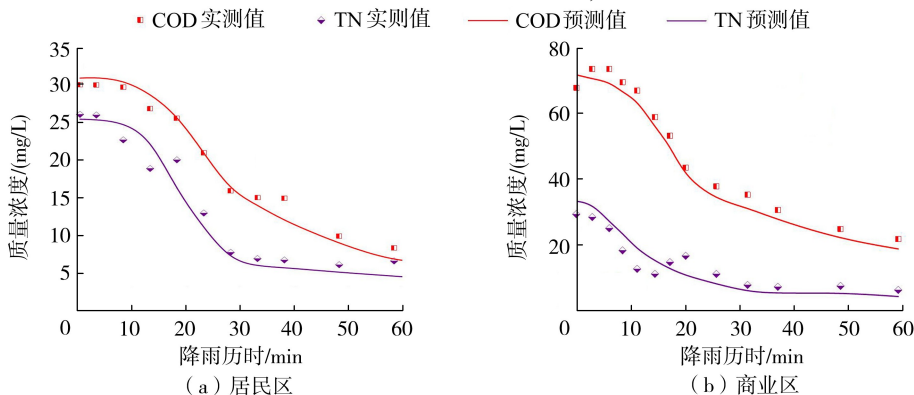


图 3 居民区和商业区 SWMM 验证结果

Fig. 3 Validation results of SWMM in residential and commercial areas

排水,直接增加受纳水体的碳排放,并且南京作为长三角典型城镇,经济高度发达,人员车辆较为密集,加剧了初雨径流进入受纳水体的污染和碳排放。为了确保碳排放边界的完整性和一致性,本文在划定排水系统的碳排放边界时,参考《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》中污水排水系统溢流污染的核算过程,将初雨过程纳入排水系统的碳排放,完善了灰色雨水排水系统的碳排放核算边界,如图4所示。

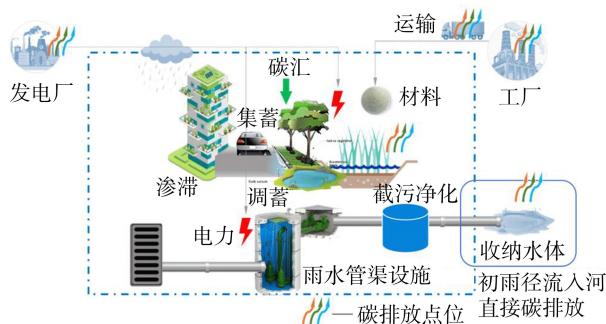


图 4 灰色雨水排水系统碳排放核算边界

Fig. 4 Carbon emission accounting boundary of gray rainwater drainage system

雨水排水系统全生命周期为 30 a, 选取 2014 年作为核算研究区灰色雨水排水系统的典型年。典型年选取主要根据降水量、降雨事件频次分布、降雨季节性分布 3 方面的相似性。2014 年南京市的年降水量为 1091.1 mm, 与多年平均降水量相近; 在降雨事件的频次分布方面, 根据降水量进行分级, 2014 年发生小雨 (降水量为 0.1~<10 mm) 49 次、中雨 (降水量为 10~<25 mm) 41 次、大雨 (降水量为 25~<50 mm) 15 次、暴雨 (降水量大于或等于 50 mm) 3 次, 与南京长期趋势一致; 在降雨季节性分布方面, 南京的降雨具有显著的季节性特征, 主要集中于夏季 (梅雨期), 夏季降水量约占全年总降雨量的 45%, 2014 年也呈现出这一典型特点。此外, 在降雨日数指标上, 以日降水量大于或等于 0.1 mm 作为标准, 2014 年的年降雨日数为 118 天, 与南京降雨日数平均值 (177 天) 也十分接近。因此, 本文以 2014 年的降雨情况为背景, 根据雨水排水系统碳排放的核算边界与核算方法, 核算了不同功能区雨水排水系统运维期的碳排放量。综合考虑雨水排水系统建设、拆除环节的一次性碳排放, 计入雨水排水系统全生命周期中运维期的碳排放总量, 从而获得以管渠为代表的灰色雨水排水系统全生命周期的碳排放量。当雨水可自流排放至接纳水体时, 灰色雨水排水系统产生的碳排放主要包括 CH_4 碳排放和 N_2O 碳排放两种形式, 其碳排放量计算公式见式 (1) 和式 (2)。当雨水需通过泵站提升排放至受

纳水体时,灰色雨水排水系统产生的碳排放需在前两项的基础上增加泵站电耗产生的间接碳排放以及调蓄池运行维护产生的碳排放,其碳排放量计算公式见式(3)和式(4)。

$$C_{\text{CH}_4} = \alpha M_{\text{COD}} E_{\text{CH}_4} \quad (1)$$

$$C_{N_2O} = \beta M_N E_{N_2O} \quad (2)$$

$$C_d = F_d E_d \quad (3)$$

$$C_{\text{ly}} = \gamma V E_{\text{ly}} \quad (4)$$

式中: C_{CH_4} 为初雨中 CH_4 碳排放量; E_{CH_4} 为初雨径流排放至水体后的 CH_4 排放因子, 根据 IPCC 推荐, 取 $0.048^{[30]}$; α 为 CH_4 的全球变暖潜能值, 取 28; C_{N_2O} 为雨水管网的 N_2O 碳排放量; M_N 为雨水系统中含氮量; E_{N_2O} 为雨水管网的 N_2O 排放因子, 按照排入自然水体的 N_2O 排放因子计算, 取 $0.0005^{[30]}$; β 为换算系数, 取 $265 \times 22 / 14$; C_d 为雨水泵站电耗间接碳排放量; F_d 为雨水泵站运行耗电量; E_d 为电力排放因子, 根据《中国区域电网二氧化碳排放因子研究》, 取 $0.695 \text{ kg} / (\text{kW} \cdot \text{h})$; C_{ix} 为调蓄池碳排放量; E_{ix} 为调蓄池维护阶段排放因子, 取 $0.54 \text{ kg} / (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{[4]}$; V 为调蓄池体积; γ 为换算系数, 取 30。

3 结果与分析

3.1 不同功能区灰色雨水排水系统初雨径流碳排放特征

3.1.1 初雨径流量与水质

表 1 为不同降雨重现期下居民区和商业区灰色雨水排水系统产生的初雨径流量和污染物事件平均质量浓度。由表 1 可见,随着降雨重现期的增大,COD 和 TN 两种典型污染物的事件平均质量浓度均呈现上升趋势,但增幅逐渐降低。降雨重现期从 0.5 a 增加到 1 a,商业区 COD 事件平均质量浓度从 66.06 mg/L 增加至 80.58 mg/L,增幅达到 22.0%。降雨重现期从 1 a 增加到 2 a,COD 事件平均质量浓度继续增加至 94.41 mg/L,增幅降低到 17.2%。当降雨重现期增加到 5 a 时,尽管 COD 事件平均质量浓度持续增长到 114.52 mg/L,但与 4 a 相比,增幅仅为 1.9%。更大降雨重现期的降雨会带来更高浓度的污染物,这可能与降雨强度增加带来地表冲刷效果的提升有关,而典型污染物事件平均质量浓度增幅的降低,则可归因于地表污染物被高强度径流持续冲刷输运。

进一步比较居民区与商业区的初雨径流量和典型污染物的事件平均质量浓度,还可以发现商业区单位面积的初雨径流量略高于居民区,且典型污染

表 1 不同降雨重现期下居民区和商业区灰色雨水排水系统产生的初雨径流量和污染物事件平均质量浓度
Table 1 Initial runoff and event average mass concentration of pollutants generated by grey rainwater drainage systems in residential and commercial areas under different rainfall return periods

降雨重现期/a	居民区			商业区		
	初雨径流量(m ³ /hm ²)	ρ _{COD} /(mg/L)	ρ _{TN} /(mg/L)	初雨径流量(m ³ /hm ²)	ρ _{COD} /(mg/L)	ρ _{TN} /(mg/L)
0.5	138.64	33.44	11.19	140.37	66.06	15.17
1	173.73	41.34	11.21	175.91	80.58	19.80
2	208.83	48.96	16.28	211.44	94.41	27.41
3	229.35	53.87	17.91	232.22	103.28	21.91
4	243.92	57.36	19.07	246.97	112.34	23.85
5	255.22	60.04	19.96	258.41	114.52	25.93

物事件平均质量浓度明显高于居民区。例如,在降雨重现期为 0.5 a 时,商业区初雨径流中 COD 事件平均质量浓度为 66.06 mg/L,而居民区仅为 33.44 mg/L;同期的商业区和居民区 TN 事件平均质量浓度分别为 15.17 mg/L 和 11.19 mg/L。究其原因,商业区的绿化面积低于居民区,由此产生的径流系数高于居民区,而且商业区具有更高的人流车流密度,也会产生较高的污染负荷。

3.1.2 初雨径流碳排放特征

利用灰色雨水排水系统碳排放核算边界和核算方法,得到不同降雨重现期下居民区和商业区的初雨径流碳排放量如表 2 所示(碳排放量以二氧化碳当量计,下同)。由表 2 可见,随着降雨重现期的增大,不同功能区灰色雨水排水系统的服务面积平均碳排放量不断增加,但增幅逐渐降低,商业区碳排放量明显高于居民区。不同降雨重现期下,商业区的碳排放量可达到居民区的 1.90~1.97 倍。由于灰色雨水系统的碳排放主要来自初雨径流,因此碳排放随降雨重现期增长与初雨径流污染负荷增长呈现类似的规律。需要指出的是,因受纳水体的环境制约,CH₄ 的碳排放量仍远高于 N₂O。

表 2 不同降雨重现期下居民区和商业区的初雨径流碳排放量
Table 2 Carbon emissions from initial rainfall runoff in residential and commercial areas under different rainfall return periods

降雨重现期/a	居民区碳排放量/(kg/hm ²)			商业区碳排放量/(kg/hm ²)		
	CH ₄	N ₂ O	合计	CH ₄	N ₂ O	合计
0.5	6.23	0.32	6.55	12.46	0.44	12.91
1	9.65	0.41	10.06	19.05	0.73	19.78
2	13.74	0.71	14.45	26.83	1.21	28.04
3	16.61	0.86	17.46	32.24	1.06	33.29
4	18.80	0.97	19.77	37.29	1.23	38.52
5	20.59	1.06	21.65	39.77	1.40	41.17

3.2 自排模式和强排模式下运维期碳排放特征

由于研究区河网特性复杂,河道水位变化频繁,当河道水位高于地面或雨水排口低于河道水位时,自排模式难以实现有效排水,可能导致雨水倒灌和

积水问题,此时需采用强排模式通过水泵强制将雨水排入河道,避免积淹水^[31],因此本文分析了自排模式和强排模式下灰色雨水排水系统运维期的碳排放特征。自排模式和强排模式的排水能力按照统一的设计标准进行设定,以保证得到的碳排放量的可比性。表 3 为不同降雨重现期下自排模式和强排模式的碳排放量。由表 3 可见,强排模式下灰色雨水排水系统的碳排放量普遍高于自排模式。以居民区为例,降雨重现期为 0.5 a 时,自排模式的碳排放量为 6.55 kg/hm²,而强排模式为 27.55 kg/hm²,是自排模式的 4.21 倍;降雨重现期为 5 a 时,自排模式的碳排放量为 43.73 kg/hm²,而强排模式为 84.75 kg/hm²,是自排模式的 1.94 倍。随降雨重现期增大,强排模式与自排模式的碳排放量之比逐渐降低,可归功于较大降雨重现期下灰色雨水排水系统碳排放量增速的变缓,这也说明降雨重现期增大会降低强排模式对雨水排水系统碳排放总量的影响。

表 3 不同降雨重现期下自排模式和强排模式的碳排放量
Table 3 Carbon emissions of gravity drainage mode and forced drainage mode under different rainfall return periods

降雨重现期/a	居民区碳排放量/(kg/hm ²)		商业区碳排放量/(kg/hm ²)	
	自排模式	强排模式	自排模式	强排模式
0.5	6.55	27.55	12.91	33.95
1	10.06	36.82	19.78	46.58
2	14.45	46.71	28.36	60.52
3	17.66	52.95	33.68	68.66
4	19.09	54.71	37.19	72.89
5	23.00	63.50	43.73	84.75

在强排模式下,居民区的初雨径流碳排放量占比为 28.76%,调蓄池运维碳排放和泵站碳排放分别占比 21.31%和 49.93%;商业区初雨径流碳排放量占比为 44.03%,调蓄池运维碳排放和泵站碳排放分别占比 16.74%和 39.23%。由此可见,虽然初雨径流碳排放量的占比低于泵站碳排放量,但其在整体碳排放构成中仍不可忽视,说明其在雨水管理和碳排放控制中具有一定的影响力。

3.3 常规模式与调蓄模式运维期碳排放特征

在雨水排水系统中,调蓄池通过临时储存雨水以调节排放量,缓解洪峰压力和减少内涝风险^[32]。一方面,调蓄池能收集初期污染物浓度高的初雨径流,并将其输送至污水处理厂^[33-34],减少初雨径流入河引起的碳排放;另一方面,调蓄池在运维期又存在压力输送产生的碳排放。常规模式的灰色雨水排水系统是指重力自流排放雨水,不设置调蓄池的雨水排水系统;调蓄模式的灰色雨水排水系统是指设置调蓄池截纳初雨径流,将初雨径流输送至污水处理厂,后期径流经重力自流排出的雨水排水系统。两种模式的排水能力均按照同一设计标准进行设定,在模拟中使用了相同的流量和雨水处理能力,以保证得到的碳排放量的可比性。调蓄模式中按初雨径流截纳确定调蓄池的容积,认为后期的径流水质已优于或接近环境水体。表4为不同降雨重现期下常规模式和调蓄模式的碳排放量。由表4可见,虽然居民区与商业区的初雨径流系数不同,但调蓄模式下居民区和商业区灰色雨水排水系统运维期的碳排放量基本相当,单次降雨事件其差值不超过0.1 kg/hm²,随降雨重现期的变化其差异性不明显。与常规模式相比,调蓄模式由于大幅度削减了产生直接碳排放的初雨径流,实现了雨水排水系统运维期碳排放的有效削减,因此在较大降雨重现期的情况下也增大了与常规模式的差距,凸显了调蓄模式的减排绩效。

表4 不同降雨重现期下常规模式和调蓄模式的碳排放量
Table 4 Carbon emissions of conventional mode and storage mode under different rainfall return periods

降雨重现期/a	居民区碳排放量/(kg/hm ²)		商业区碳排放量/(kg/hm ²)	
	常规模式	调蓄模式	常规模式	调蓄模式
0.5	27.55	20.96	33.95	21.00
1	36.82	26.58	46.58	26.64
2	46.71	31.95	60.52	32.02
3	52.95	35.09	68.66	35.16
4	54.71	35.62	72.89	35.70
5	63.50	41.00	84.75	41.08

3.4 运维期碳排放在全生命周期中的占比

参考 CUWA3003—2022《城镇水务系统碳排放核算指南》,对居民区和商业区灰色雨水系统建设期和拆除期的碳排放进行了核算。在此基础上,对不同功能区、不同排放模式下灰色雨水排水系统运维期碳排放在全生命周期中的占比进行了分析。其中,雨水管道的规格和长度以功能区实际数据为准,管道采用 HDPE 管,生产建设过程的排放因子依据管径参考 CUWA3003—2022《城镇水务系统碳排放核算指南》进行取值。根据雨水系统全生命周期碳排放相关研究^[8,35],拆除期碳排放按建设期的 90%

计算。在全生命周期视域下,建设期与拆除期仍然是灰色雨水排水系统碳排放的主体,运维期碳排放占比为 15.98%~31.87%。郑涛^[4]对雨水系统全生命周期碳排放的研究结果为运维期碳排放约占全生命周期的 17%,差异的主要原因在于本文特别考虑了初雨径流的直接碳排放。初雨径流中含有大量污染物,其处理过程中的能耗和碳排放相对较高,这部分碳排放传统的碳排放分析中未被充分纳入。因此,本文认为尽管对单个场次降雨而言,灰色雨水排水系统运维期产生的碳排放并不高,但在排水系统建设的全生命周期中,总量和占比仍然相当可观。以强排模式下商业区为例,30 a 生命周期的灰色雨水排水系统运维期的碳排放量达到 200 t/hm²,与水务系统中生产建设 11 km DN400 排水管产生的二氧化碳当量大致相当,可见设计与管理者必须重视运维期产生的碳排放。

不同排放模式下的碳排放量对比研究表明,由于需要采用水泵抽排雨水,强排模式下运维期碳排放占比高于自排模式。但在调蓄模式下,居民区和商业区的运维期碳排放占比显著低于常规模式,其中居民区从 21.09% 降至 15.98%,商业区从 25.38%降至 15.98%。这也表明从功能区特性出发,充分利用地形排放雨水,科学设置雨水调蓄设施在排水系统碳减排中的重要价值。不同功能区的碳排放特征研究表明,商业区灰色雨水排水系统运维期碳排放总量较居民区大、全生命周期占比也更高。采取有效的减排措施,如增强地面清洁、设置调蓄池对初雨径流进行收集处理,可以显著降低这些区域的碳排放。这种服务功能区上呈现出的差异也表明在商业区进行雨水管理可能拥有更好的减污降碳绩效。不同降雨重现期对碳排放的影响也应引起足够重视,在降雨重现期小的降雨事件中,初雨径流碳排放对环境的影响更为显著。因此,城市雨水排水系统的设计应充分考虑要素的差异和影响程度,优化雨水收集和处理设施来,以应对减污降碳协同增效的挑战。

4 结 论

a. 对于长三角典型城镇,初期径流产生的碳排放是运维期碳排放的重要来源。研究区的商业区灰色雨水排水系统的碳排放量为 3.76 t/hm²,可达到居民区 (1.93 t/hm²) 的 1.95 倍。强排模式下运维期碳排放为自排模式的 2.27~3.47 倍。调蓄模式因实现初期径流的有效削减,相比于常规模式,可降低运维期碳排放 28.76%以上。

b. 灰色雨水排水系统运维期的碳排放应该得

到充分的重视。尽管单个场次降雨下,运维期产生的碳排放不高,但全生命周期视域下,不同功能区、不同模式下灰色雨水排水系统运维期的碳排放可占全生命周期的 15.98%~31.87%。

c. 推广使用调蓄池等低影响开发技术,优化雨水收集和处理设施,综合考虑功能区特性和排放模式,实施有针对性的碳排放管理策略可以有效降低雨水排水系统的碳排放水平,促进绿色低碳可持续城市排水系统的建设。

参考文献:

[1] DU W C, XIA X H. How does urbanization affect GHG emissions?: a cross-country panel threshold data analysis [J]. Applied Energy, 2018, 229: 872-883.

[2] MARCOTULLIO P J. Urbanization, energy use and greenhouse gas emissions [M] // SETO K, SOLECKI W, GRIFFITH C. The Routledge Handbook of Urbanization and Global Environmental Change. London: Routledge, 2015: 30-148.

[3] 李俊奇, 张希, 李惠民. 北京某片区海绵城市建设和运行中的碳排放核算研究 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (4): 86-93. (LI Junqi, ZHANG Xi, LI Huimin. Study on carbon emission accounting in construction and operation of a sponge city in Beijing [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (4): 86-93. (in Chinese))

[4] 郑涛. 居住社区海绵改造过程的碳排放核算研究 [J]. 中国给水排水, 2021, 37 (19): 112-119. (ZHENG Tao. Estimation of carbon emission during sponge city reconstruction of residential community [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37 (19): 112-119. (in Chinese))

[5] 李晨璐, 郑涛, 彭开铭, 等. 基于全生命周期法的海绵城市雨水系统碳排放研究 [J]. 环境与可持续发展, 2019, 44 (1): 132-137. (LI Chenlu, ZHENG Tao, PENG Kaiming, et al. Study on carbon emission of sponge city stormwater system based on life cycle assessment [J]. Environment and Sustainable Development, 2019, 44 (1): 132-137. (in Chinese))

[6] XU Changqing, LIU Zijiang, CHEN Zhengxia, et al. Environmental and economic benefit comparison between coupled grey-green infrastructure system and traditional grey one through a life cycle perspective [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 174: 105804.

[7] YANG Wenyu, ZHANG Jin. Assessing the performance of gray and green strategies for sustainable urban drainage system development: a multi-criteria decision-making analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 293: 126191.

[8] 朱雨, 邵薇薇, 杨志勇. 海绵设施全生命周期碳排放核算方法研究 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (6): 32-38. (ZHU Yu, SHAO Weiwei, YANG Zhiyong. Carbon emission accounting for whole life cycle of sponge facilities

[J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (6): 32-38. (in Chinese))

[9] PAYNE E G I, PHAM T, COOK P L M, et al. Inside story of gas processes within stormwater biofilters: does greenhouse gas production tarnish the benefits of nitrogen removal? [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51 (7): 3703-3713.

[10] PIENIASZEK A, WOJCIECHOWSKA E, KULBAT E, et al. Stormwater as an alternative water source: quality changes with rainfall duration and implications for treatment approaches [J]. International Journal of Conservation Science, 2021, 12 (Sup1): 713-730.

[11] PIPIL H, HARITASH A K, REDDY K R. Spatio-temporal variations of quality of rainwater and stormwater and treatment of stormwater runoff using sand-gravel filters: case study of Delhi, India [J]. Rendiconti Lincei Scienze Fisiche e Naturali, 2022, 33 (1): 135-142.

[12] 王济干, 杨亚平. 区域一体化背景下长三角城市群绿色发展效率评价及驱动因素研究 [J]. 水利经济, 2023, 41 (3): 1-7. (WANG Jigan, YANG Yaping. Research on evaluation and driving factors of green development efficiency of urban agglomeration in Yangtze River Delta under the background of regional integration [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41 (3): 1-7. (in Chinese))

[13] LI Qiongfang, ZHOU Zhengmo, DONG Jinbo, et al. Comparison of runoff control performance by five permeable pavement systems in Zhenjiang, Yangtze River Delta of China [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2022, 27 (10): 05022011.

[14] CAO Qian, CAO Jiashun, XU Runze. Optimizing low impact development for stormwater runoff treatment: a case study in Yixing, China [J]. Water, 2023, 15 (5): 989.

[15] 黄欣. 低碳背景下的海绵场地雨水控制技术 [J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22 (增刊 2): 55-61. (HUANG Xin. Rainwater control technology of sponge site under the background of low carbon [J]. China Construction Metal Structure, 2023, 22 (Sup2): 55-61. (in Chinese))

[16] 钟登杰, 张湖川, 李林澄, 等. 城市初期雨水污染及处理措施综述 [J]. 环境污染与防治, 2019, 41 (2): 224-230. (ZHONG Dengjie, ZHANG Huchuan, LI Lincheng, et al. Pollution and treatment measures of urban initial rainwater: a review [J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41 (2): 224-230. (in Chinese))

[17] 刘月雷, 张俊杰, 郑小林, 等. 城市初期雨水控制技术研究进展 [J]. 环境污染与防治, 2023, 45 (7): 1007-1012. (LIU Yuelei, ZHANG Junjie, ZHENG Xiaolin, et al. Research progress of urban initial rainwater control technology [J]. Environmental Pollution and Control, 2023, 45 (7): 1007-1012. (in Chinese))

[18] 高雅弘, 林炳权, 刘宇轩, 等. 城镇分流制排水系统初期雨水污染特征与控制对策 [J]. 环境工程技术学报,

- 2024, 14(3):973-985. (GAO Yahong, LIN Bingquan, LIU Yuxuan, et al. Characteristics and control measures of rainwater pollution in urban separate drainage system[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(3):973-985. (in Chinese))
- [19] 何琨,姜应和,周龙,等.铁改性生物炭吸附初雨中氮磷的试验研究[J].环境科学与技术,2022,45(7):78-86. (HE Kun, JIANG Yinghe, ZHOU Long, et al. Study on adsorption of nitrogen and phosphorus from initial rain by iron-modified biochar [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(7):78-86. (in Chinese))
- [20] 杜尧,陈启慧,和鹏飞,等.南京地区暴雨变化特性分析[J].水资源保护,2019,35(6):89-94. (DU Yao, CHEN Qihui, HE Pengfei, et al. Analysis of rainstorm variation characteristics in Nanjing region [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6):89-94. (in Chinese))
- [21] 黄雅丽,朱一松,徐浩,等.调蓄池综合环境效益评估指标体系构建与应用[J].环境污染与防治,2024,46(2):279-282. (HUANG Yali, ZHU Yisong, XU Hao, et al. Construction and application of comprehensive environmental benefit assessment index system for detention tank [J]. Environmental Pollution & Control, 2024, 46(2):279-282. (in Chinese))
- [22] 栾广学,侯精明,马鑫,等.建筑小区尺度下径流控制率与非点源污染负荷削减率协同关系研究[J].水资源保护,2023,39(1):208-215. (LUAN Guangxue, HOU Jingming, MA Xin, et al. Research on synergistic relationship between runoff control rate and non-point source pollution load reduction rate at residential community scale [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1):208-215. (in Chinese))
- [23] 舒心怡,徐宗学,叶陈雷,等.海绵措施空间布局优化下的晋城市洪涝水深流速联合分布特征[J].水资源保护,2025,41(1):76-84. (SHU Xinyi, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Flood depth-flow velocity joint distribution characteristics of Jincheng City under spatial layout optimization of sponge facilities [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1):76-84. (in Chinese))
- [24] 卢兴超,徐宗学,李永坤,等.基于SWMM与LISFLOOD-FP耦合模型的城市街区内涝模拟研究[J].水资源保护,2024,40(3):98-105. (LU Xingchao, XU Zongxue, LI Yongkun, et al. Research on urban block waterlogging simulation based on coupling model of SWMM and LISFLOOD-FP [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3):98-105. (in Chinese))
- [25] 孙周亮,鲍振鑫,舒章康,等.南京市近25年短历时暴雨雨型特性[J].水文,2019,39(5):78-83. (SUN Zhouliang, BAO Zhenxin, SHU Zhangkang, et al. Pattern characteristics of short duration rainstorms in Nanjing City over recent 25 years [J]. Journal of China Hydrology, 2019, 39(5):78-83. (in Chinese))
- [26] 刘成帅,韩臻悦,李想,等.基于BIC-KMeans和SWMM的城市雨洪快速模拟方法[J].水资源保护,2023,39(5):79-87. (LIU Chengshuai, HAN Zhenyue, LI Xiang, et al. Urban rainstorm flood rapid simulation method based on BIC-KMeans and SWMM [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5):79-87. (in Chinese))
- [27] 王鹏,董国庆,阴祖荣,等.面向复杂情景的SWMM水质参数敏感性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):31-37. (WANG Peng, DONG Guoqing, YIN Zurong, et al. Sensitivity analysis of water quality parameters in SWMM for complex scenarios [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5):31-37. (in Chinese))
- [28] 雷向东,赖成光,王兆礼,等.LID改造对城市内涝与面源污染的影响[J].水资源保护,2021,37(5):131-139. (LEI Xiangdong, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Influence of LID adaptation on urban flooding and non-point source pollution [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5):131-139. (in Chinese))
- [29] 胡云进,包家豪,郜会彩.基于SWMM的老旧小区海绵化改造适用技术研究[J].水电能源科学,2024,42(1):27-31. (HU Yunjin, BAO Jiahao, GAO Huicai. Research on applicable technology of sponge transformation of old residential quarters based on SWMM [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(1):27-31. (in Chinese))
- [30] MARSCHER W D. An end-user's guide to centrifugal pump rotordynamics [C]//Proceedings of the 37th International Pump Users Symposium. Bryan:Texas A&M Engineering Experiment Station, 2021.
- [31] 朋四海,徐连军,胡昊.自排雨水排水系统强排改造技术研究[J].中国市政工程,2021(2):42-45. (PENG Sihai, XU Lianjun, HU Hao. Research on forced drainage reform technology of self-draining rainwater drainage system [J]. China Municipal Engineering, 2021(2):42-45. (in Chinese))
- [32] 邱超.分流制排水系统中初雨调蓄池的方案研究[J].城市道桥与防洪,2022(8):99-101. (QIU Chao. Study on scheme of initial rainwater storage tank in separated sewage drainage system [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2022(8):99-101. (in Chinese))
- [33] 张志谦.城中村初雨调蓄池的设计与应用[J].给水排水,2024,50(2):52-56. (ZHANG Zhiqian. Urban village initial rainwater storage tank design and application [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(2):52-56. (in Chinese))
- [34] 李明远,魏杰,张武强,等.深圳市初期雨水特征分析及控制对策研究[J].广东化工,2017,44(10):43-46. (LI Mingyuan, WEI Jie, ZHANG Wuqiang, et al. First-flush rainfall in Shenzhen City [J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(10):43-46. (in Chinese))
- [35] 张希.城市雨水系统全生命周期碳排放核算方法及应用研究[D].北京:北京建筑大学,2023.

(收稿日期:2024-09-02 编辑:王芳)