

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.11.005

城市排水系统“碳中和”路径研究

王 峰^{1,5}, 谭学军^{1,2}, 吕永鹏^{1,3,4}

[1.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092; 2.上海市市政工程设计科学研究所有限公司,上海市 200092;
3.江苏申武先进技术研究院有限公司,江苏 常州 213168; 4.江苏无锡申汇工程技术研究院有限公司,江苏 无锡 214153;
5.上海城市排水系统工程技术研究中心,上海市 200092]

摘 要: 随着全球气候变化问题日益严峻,城市排水系统作为城市基础设施的重要组成部分,在实现碳中和目标中扮演着关键角色。本文分析了城市排水系统碳排放现状,识别和分析了城市排水系统中的主要碳排放过程,在此基础上,提出了包括能源优化与管理、温室气体减排技术与措施等可能的碳中和途径,并探讨了城市排水系统实现“碳中和”的综合策略。

关键词: 排水系统;碳排放;碳中和;能源回收

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)11-0016-06

0 引言

城市排水系统是现代城市基础设施中至关重要的一部分,其承担着收集、输送、处理及排放城市范围内生产生活污水和雨水的任务,在维护城市环境卫生、保障居民生活质量、促进水资源循环利用以及减轻自然灾害影响等方面均发挥着不可替代的作用。

城市排水系统的碳排放是当前环境科学和城市规划等领域关注的热点问题。城市排水系统在建设、运行、拆除的全生命周期,会产生相当量的碳排放。排水系统的碳排放存在排放源多、温室气体种类多的特点,同时排水系统在运行过程中又可以通过能源回收、资源利用等途径,实现对碳排放的部分抵消。排水系统通过技术路线和运行模式的优化、进行工艺低碳改造、提高能源回收和资源利用效率,即可减少碳排放,相比其他行业,减碳效益显著^[1]。

本文对城市排水系统碳排放现状进行了分析,从系统思维的角度出发,提出了减少碳排放的主要途径和实现碳中和的适用技术。

1 城市排水系统碳排放现状分析

1.1 城市排水系统的构成

城市排水工程包括雨水系统和污水系统,其中雨水系统包括源头减排、雨水管网和排涝除险设施等工程措施和应急管理等非工程性措施,实现内涝防治和径流污染控制的目标,并应保证系统的稳定运行;污水系统应包括污水管网、污水处理、再生水处理利用以及污泥处理处置,实现污水的有效收集、输送、处理、处置和资源化利用^[2]。城市排水系统构成和碳排放源如图 1 所示。

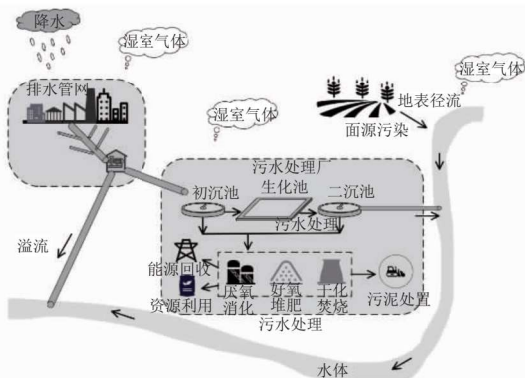


图 1 城市排水系统构成及碳排放源

1.2 城市排水系统碳排放活动类型

《温室气体核算体系》^[3]和《温室气体——第一部:企业层面上温室气体排放和去除量化报告指南》ISO14064-1:2018^[4]等方法对企业层面的碳排放类型进行了划分,参考这些方法对建造、运行和拆除的全

收稿日期: 2024-09-07

基金项目: 上海市科技创新行动计划(23DZ2200400)

作者简介: 王峰(1981—),男,博士,高级工程师,从事环境保护研究工作。

通信作者: 吕永鹏(1982—),男,博士,正高级工程师,从事城市排水系统优化与内涝防治研究工作。电子信箱:yongpenglv@foxmail.com

生命周期中,城市排水系统的碳排放活动类型进行了归纳(见表 1):

(1)建造阶段的物料生产、物料运输和建造施工过程中消耗的能源资源产生的碳排放;

(2)运行阶段的直接碳排放、项目运行消耗的能源资源产生的碳排放、项目回收能源和资源产生的碳抵消和碳汇;

(3)拆除阶段消耗的能源资源产生的碳排放和资源回收产生的碳抵消。

表 1 城市排水系统碳排放活动类型及产生环节

阶段	环节	直接排放活动	间接排放活动	温室气体种类	碳抵消
建造	建材生产和运输	燃油等能源消耗	生产机械电力消耗、自来水等消耗	二氧化碳	—
	施工	燃油等能源消耗	施工机械电力消耗、自来水等消耗	二氧化碳	—
运行	—	生化作用	设备运行电力、药剂、自来水等消耗	二氧化碳、甲烷、氧化亚氮	能源和资源回收
处置	—	燃油等能源消耗	拆除、回收设备运行电力、自来水等消耗	二氧化碳	建材利用

1.3 城市排水系统碳排放计算方法

城市排水系统碳排放的计算,可以对排水系统中的每个单元的碳排放进行计算,再进行累加得到整个系统的碳排放量。计算公式如下:

$$E_{total} = E_{direct} + E_{indirect} - E_{offset} \tag{1}$$

式中: E_{total} 为总碳排放量; E_{direct} 为直接碳排放量; $E_{indirect}$ 为间接碳排放量; E_{offset} 为碳抵消。

对于直接碳排放的计算,可以采用现场实测的方法,采集各类温室气体,测定浓度,计算排放速率,当缺乏现场实测的条件时,可以采用排放因子法,即结合水质指标和对应的温室气体产生系数,进行计算。甲烷排放量的计算可以依据 BOD 或者 COD 进行,氧化亚氮排放量的计算可以依据 TN 进行。

间接碳排放和碳抵消通常采用排放因子法:

$$E_{indirect} = \sum_i A_{indirect,i} \times EF_{indirect,i} \tag{2}$$

式中: $E_{indirect}$ 为间接碳排放量; $A_{indirect,i}$ 为第 i 项碳排放活动的量, $EF_{indirect,i}$ 第 i 项碳排放活动对应的排放因子。

$$E_{offset} = \sum_j A_{offset,j} \times EF_{offset,j} \tag{3}$$

式中: E_{offset} 为碳抵消量; $A_{offset,j}$ 为第 j 项碳排放活动的量, $EF_{offset,j}$ 第 j 项碳抵消活动对应的排放因子。

2 城市排水系统主要碳排放过程分析

城市范围内的雨水和污水经过排水管网的收

集,输送到污水和再生水处理厂进行处理达到排放标准后排入水体,同时处理过程中产生的污泥经过处理和处置,最终得到稳定。在这一系列过程中都会产生碳排放,对于每个过程中碳排放的机理和特点进行分析,有助于识别主要碳排放源,并为实现减排降碳提供数据支撑。

2.1 排水管网

作为污水处理过程的上游环节,城市排水管网每天输送大量的污水,污水含有大量的污染物,尤其是有机物。附着在管道上的生物膜中的微生物群落进行能量代谢,而排水管道沉积物中的厌氧环境为污染物的转化提供了适宜的条件^[5]。

2.1.1 化粪池

化粪池是城市排水系统的起点,作为简易污水处理单元,通过沉淀可以去除污水中 50%~60% 的 SS,也可以通过厌氧消化作用去除部分 COD^[6]。化粪池中的主要温室气体为甲烷,美国环保署(EPA)利用 IPCC 的方法学确认与废水相关的甲烷排放大多来自正在使用的大量的独立化粪池系统^[7]。厌氧环境下,沉积在化粪池底部的固体物质会附着气泡,并逐渐上浮到表面,成为浮渣的一部分,在此过程中甲烷随之生成。甲烷生成的速率和温度相关,化粪池中存在温度梯度,底部温度较高而顶部温度较低,这种温度的变化与居民房屋内热水的使用相关。在寒冷月份,固体分解速率降低,导致化粪池底部固体量增加;而在温暖月份,由于积累的固体温度升高,降解速率增加^[8]。对于化粪池中甲烷的产生量,可以采用经验公式计算,按照化粪池服务人口与进水 BOD 浓度来计算,也可以采用静态漂浮箱采集气体,检测甲烷浓度后进行计算^[7]。国外研究表明:包括化粪池和旱厕在内的分散式污水处理系统,其碳排放水平与集中式的污水处理厂相当,具体比较情况见表 2。国内研究也表明:化粪池甲烷排放量高于污水处理过程的直接碳排放量,与污水处理厂总碳排放量几乎处于同一水平^[9]。

表 2 分散式污水处理系统与污水厂碳排放对比

国家	分散式污水处理系统	污水处理厂	二者比例	数据来源
美国	1 290	1 340	96.3%	文献[10]
加拿大	110	70	157.1%	文献[11]
阿根廷	220	360	61.1%	文献[12]
越南	1 060	1 710	62.0%	文献[13]
尼日利亚	1 140	2 130	53.5%	文献[14]
波兰	250	360	69.4%	文献[15]

2.1.2 排水管道

化粪池污水进入排水管道后,依然会继续释放温室气体。温室气体的排放源于管道沉积物、大量水体以及管道壁上生长的生物膜中发生的厌氧、缺氧或好氧生物过程^[16]。甲烷主要在压力管道中生成,然后在重力管道、检查井、污水处理厂等各个节点释放到大气中。影响管道中甲烷生成的主要因素包括水力停留时间(HRT)、面积/体积(A/V)、温度和COD,延长HRT,增大A/V,提高温度和COD,都会导致管道中甲烷释放量的增加^[17]。对排水管道上部空气中的甲烷浓度,不同研究的结果波动范围较大,见表3。

表3 管道中甲烷浓度

管道类型	平均甲烷浓度(ppmv)	数据来源
重力管	7 000~12 000	文献[18]
重力管	13 500~23 000(旱季) 65~19 000(雨季)	文献[19]
重力管	1 500~50 000	文献[20]
压力管	15 000~29 000	文献[21]
压力管	500~900	文献[22]
压力管	2 500~45 000	文献[21]
泵站	65~275	文献[22]

排水管道中的生物膜还会释放氧化亚氮,其排放特征符合面源排放模式^[23]。管道中导致氧化亚氮生成的因素主要包括硝化过程溶解氧不足、反硝化过程溶解氧过高、高硝酸盐浓度、反硝化过程中低COD/N以及不同的碳源种类^[24]。

对于排水管道中温室气体排放的机理和量化评价还有待进一步深入研究。

2.2 污水和再生水处理

污水和再生水处理环节会产生大量的碳排放,主要包括直接碳排放如生化过程释放的甲烷和氧化亚氮、间接排放如设备运行的能耗和各类水处理药剂的消耗等。按照《中华人民共和国气候变化第三次两年更新报告》统计,2018年,全国废水处理产生的甲烷排放量为290.8万t,氧化亚氮11.3万t,分别占两种温室气体总排放量的比例为4.84%和5.90%;如果只考虑废弃物处理部门的碳排放,废水处理贡献了38.2%的甲烷排放量和95.1%的氧化亚氮排放量^[25]。

污水和再生水处理过程中的温室气体排放机理复杂,对于甲烷的排放,污水处理厂的各处理单元都存在形成厌氧环境的可能,因此在生化作用下会生成和释放甲烷^[26],同时由管网输送过来的进水中溶

解的甲烷也会在格栅、沉砂池等预处理单元释放^[27]。污水处理过程中,由于硝化和反硝化过程进行的不彻底,氧化亚氮作为中间产物被释放。对于污水处理过程中温室气体的直接排放,通常基于进水的有机物浓度总氮浓度和相应的碳排放因子进行计算。也可以采用直接采样测定温室气体浓度计算释放量,对于开放的反应池,可以采用静态漂浮箱采样,对于加盖反应池,可以直接抽取尾气进行采样^[28]。

甲烷和氧化亚氮两种温室气体的碳排放强度受到进水水质、处理工艺、排放标准等多种因素的影响。Haiyan Li等人对我国8 700余所污水处理厂进行了调研并归纳了不同污水处理工艺的碳排放因子,如表4所列。

表4 常见污水处理工艺温室气体排放因子^[29] 单位:kg

处理工艺	EFCH ₄ (CH ₄ /COD去除)	EFN ₂ O (N ₂ O/TN去除)
A ² O	0.009 1	0.008 1
AO	0.013 8	0.020 9
SBR	0.009 8	0.019 6
OD	0.009 4	0.011 1
MBR	0.002 7	0.014 1
活性污泥法	0.012 3	0.017 8
生物膜法	0.002 9	0.010 2
厌氧处理	0.2	0
稳定塘	0.057 1	0.006 5

污水和再生水处理过程除了生化作用产生的温室气体直接排放,曝气、搅拌等水处理设备会消耗大量的电力,同时还要投加碳源、聚合氯化铝(PAC)、聚丙烯酰胺(PAM)、次氯酸钠等药剂,电力和药剂的消耗都会带来相应的间接碳排放。

2.3 污泥处理处置

污泥作为污水处理的副产物,富集了污水中的众多有机物质、污染物和营养成分,它既具有潜在的环境风险,也蕴含着资源价值。在污泥处理过程中,需要投入大量能源和化学药剂,不同污泥的处理和处置方式还会产生不同种类的温室气体的直接排放^[30]。污泥处理处置存在多条工艺路线,且不同工艺路线之间差异较大。目前主要的工艺路线包括厌氧消化—土地利用、好氧发酵—土地利用、干化焚烧—建材利用和深度脱水—应急填埋。

厌氧消化—土地利用工艺路线,其直接排放来自厌氧消化过程甲烷逸散、土地利用过程甲烷和氧化亚氮的逸散;间接排放来自厌氧消化过程加热消

耗的能源、搅拌消耗的电力、污泥脱水药剂等,碳抵消来自厌氧消化回收的甲烷、污泥制成的有机肥料。

好氧发酵—土地利用工艺路线,其直接排放来自好氧发酵和土地利用两个过程释放的甲烷和氧化亚氮,间接排放来自物料运输、供氧、翻堆等环节的能耗和药剂的消耗,同时好氧发酵产物也可以作为有机肥料,产生碳抵消效应。

干化焚烧—建材利用工艺路线,其直接排放来自焚烧过程甲烷和氧化亚氮的逸散,间接排放来自污泥在脱水、干化和焚烧过程的能耗,碳抵消主要包括焚烧过程能量回收再利用。

深度脱水—应急填埋是污泥处理处置的过渡性工艺路线,2022 年国家发展改革委、住房城乡建设部、生态环境部联合印发了《污泥无害化处理和资源化利用实施方案》,明确了应合理压减填埋规模,因为脱水过程消耗大量能源和脱水药剂,带来间接排放,脱水污泥进入填埋场又会以无组织排放的方式释放大量的甲烷和氧化亚氮。

2.4 排放水体

经过污水处理后的出水,仍然含有少量的有机物,当排入受纳水体后,会产生甲烷和氧化亚氮,这两种温室气体的排放量可以采用排放因子法进行计算。

3 城市排水系统“碳中和”路径与综合策略

3.1 能源优化与管理

3.1.1 提高能源利用效率

城市排水系统的各个组成部分都消耗能源并产生间接碳排放。以污水处理为例,运行阶段电耗产生的碳排放占总排放量的 50% 左右^[1]。因此提高排水系统的能源效率,减少能耗强度,对于碳减排具有显著效应。

排水系统提高能源利用效率的主要途径包括:采用高效节能的设备,如更加节能的鼓风设备;利用变频调速技术、低阻力管道设计等节能技术,显著降低系统能耗;管网设计中减少弯头、降低摩擦阻力,选择能效比高、寿命长、维护量低的设备;结合人工智能技术对系统能耗进行监测、分析、评价和优化,提高能源利用率和节约效果。

3.1.2 可再生能源利用

城市排水系统中的污水处理、污泥处理处置过程都可以实现不同形式的能源回收。

目前污水处理过程已经采用的能源回收技术主要是污水源热泵。其原理是以污水为冷/热源,冬季

采集来自污水的低品位热能,借助热泵系统,通过消耗部分电能,将所取得的能量供给室内取暖;在夏季把室内的热量取出,释放到水中,以达到夏季空调的目的。污水源热泵系统获得的能量通常是输入能量 4.0~4.5 倍^[32],作为一种高新技术,具有显著的节能、环保及经济效益。

污泥中蕴含大量可以回收的能量,在碳中和的大背景下,应该加强污泥中能源的回收。从污泥中回收能源存在多种技术途径,如厌氧消化、焚烧发电、热解气化、固体燃料化、污泥制氢等。其中,污泥厌氧消化技术可以实现碳中和甚至是负碳排放^[30,33,34]。协同厌氧消化、热水解+高固体厌氧消化等先进的厌氧消化技术进一步提高了减碳效果。

3.2 温室气体减排技术与措施

3.2.1 排水管网维护与优化

排水管网中存在大量的温室气体排放,加强维护与优化,可以有效减少碳排放。

目前《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)已经明确分流制排水系统不应设置化粪池。逐步取消化粪池对减少排水系统碳排放会产生多种积极效应,一方面减少了甲烷在化粪池中的逸散而产生的直接排放;另一方面一定程度上缓解污水处理厂进水碳源缺失的问题,减少外加碳源的使用,从而减少相应的间接排放;此外取消化粪池能有效减少臭气的释放,对改善居住小区整体环境有积极效益^[35]。

对排水管道的优化也可以减少碳排放。如对破损的管道进行修复,减少漏接错接,可以减少管道内温室气体的无组织释放,也可以减少未经处理的污水排入水体后经过生化作用产生的排放。

3.2.2 污水处理工艺改进

厌氧氨氧化、厌氧膜生物反应器等新的低碳污水处理技术的发展,也为排水系统的碳中和提供了可能。厌氧氨氧化菌是化能自养菌,利用无机碳源,不需要曝气,因此,大大节省了能耗和药剂投加,且脱氮过程污泥产量少,脱氮效率高^[36]。厌氧膜生物反应器将厌氧消化和膜分离技术结合,实现了高能源回收、低污泥产量和低出水 COD^[37]。

3.3 规划设计统筹安排

在城市排水系统的建设和运行维护过程中,站在生态文明建设、城乡融合发展、环境友好等更多层面综合考量,从不同层次进行规划和设计。

加强区域整合与协同规划,在城市或区域规划初期,将排水系统纳入整体的基础设施规划体系,充

分考虑与能源、交通、绿地等系统的协同作用。

优化排水系统布局,避免过度依赖大规模集中式污水处理系统,适度发展分散式污水处理设施。这样既可以提升排水系统的韧性与可靠性,也减少了污水收集管网多次提升及截污干管的工程量,降低了再生水远距离泵送导致的高能耗。

促进排水系统与海绵城市建设融合,在规划设计中,将雨水花园、绿色屋顶、透水铺装等设施与排水系统有机结合,使雨水在源头得到有效收集、渗透和净化,减少雨水径流对排水管道的冲击,降低排水系统的运行压力和能耗^[38]。将海绵设施收集的雨水合理引导至排水系统或用于回用,实现雨水资源的高效利用,同时减少因雨水排放和处理产生的碳排放。

3.4 协同治理推进排水系统碳中和

排水系统的碳中和涉及多个部门的职能和职责,需要各部门之间加强协作和配合。各部门应建立定期沟通和协调机制,共同推进排水系统碳中和工作。

排水系统具有区域性的特点,不同地区的排水系统相互影响、相互制约。因此,需要加强区域之间的协同治理,共同推进排水系统碳中和工作。例如,建立区域性的排水系统监测和信息共享平台,实现区域间的信息互通和资源共享;加强区域间的应急联动和协同处置,提高排水系统的应急处置能力。

排水系统涉及多个行业的企业,包括污水处理设备制造商、能源技术企业、材料供应商等。企业通过建立产业联盟或合作研发机制,共同推动排水系统碳中和。

4 结 语

随着全球气候变化的严峻挑战以及对可持续发展的迫切需求,城市排水系统碳中和已经成为实现城市可持续发展、提升城市生态环境质量和居民生活品质的必然选择。实现城市排水系统碳中和需要综合考虑技术创新、规划设计优化、管理模式改进以及多方合作协同等多项措施。通过坚定不移地推进碳中和路径的实施,打造出更加绿色、低碳、环保的城市排水系统,有望为城市可持续发展做出积极贡献。

参考文献:

[1] 朱黔沫,陈浩,叶建锋.城市排水系统的碳排放特征与减排策略综

述[J].净水技术,2024,43(3):47-60.

[2] GB 55027—2022,城乡排水工程项目规范[S].

[3] 世界资源研究所.温室气体核算体系[M].北京:经济科学出版社,2012.

[4] ISO14064-1:2018,温室气体——第一部:企业层面上温室气体排放和去除量化报告指南[S].

[5] Pengkang Jin, Yonggang Gu, Xuan Shi, *et al.* Non-negligible greenhouse gases from urban sewer system [J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2019, 12(100):1-11.

[6] 郝晓地,杨振理,张益宁,等.排水管道中CH₄、H₂S与N₂O的产生机制及其控制策略[J].环境工程学报,2023,17(1):1-12.

[7] Water Environment Research Foundation. Evaluation of Greenhouse Gas Emissions from Septic Systems [R]. 2010.

[8] D'Amato, V.A., A.Bahe, T.R. Bounds, *et al.* Factors Affecting the Performance of Primary Treatment in Decentralized Wastewater Treatment Systems[R]. Alexandria: Water Environment Research Foundation, 2016.

[9] 郝晓地,杨文字,林甲.不可小觑的化粪池甲烷排放量[J].中国给水排水,2017,33(10):2833.

[10] USEPA. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks[R]. Washington. DC.: Agency, USEPA, 2020.

[11] Sahely H.R., MacLean H.L., Monteith H.D., *et al.* Comparison of on-site and upstream greenhouse gas emissions from Canadian municipal wastewater treatment facilities[J]. *Journal of Environmental Engineering Science*, 2006, 5(5):405-415.

[12] Santalla E., Cordoba V., Blanco G. Greenhouse gas emissions from the waste sector in Argentina in business-as-usual and mitigation scenarios[J]. *Journal of Air Waste Management Association*. 2013, 63(8):909-917.

[13] Hoa N.T., Matsuoka Y. The analysis of greenhouse gas emissions/reductions in waste sector in Vietnam[J]. *Mitigation and adaption strategies for global change*, 2015, 22(3):427-446.

[14] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). First national inventory report (NIR1) of the federal republic of Nigeria. 2021.

[15] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Poland's national inventory report. 2021.

[16] Giorgio Mannina, David Butler, Lorenzo Benedetti, *et al.* Greenhouse gas emissions from integrated urban drainage systems: Where do we stand[J]. *Journal of Hydrology*, 2018(559):307-314.

[17] Yiwen Liu, Bing-Jie Ni, Keshab R.Sharma, *et al.* Methane emission from sewers. *Science of the Total Environment*, 2015(524-525):40-51.

[18] Yiwen Liu, Keshab R. Sharma, Sudhir Murthy, *et al.* On-line monitoring of methane in sewer air[J]. *Scientific reports*, 2014(4):1-8.

[19] Chaosakul T., Koottatep T., Polprasert C. A model for methane production in sewers. *Journal of Environmental Science Health*, 2014, 49(11):1316-1321.

[20] GWRC. Global Water Research Coalition Report, N₂O and CH₄ emission From Wastewater Collection and Treatment Systems: State

of the Art Report. 2011.

[21] Yiwen Liu, Keshab R. Sharma Markus Fluggen, *et al.* Online dissolved methane and total dissolved sulfide measurement in sewers. *Water Research*, 2015(68): 109–118.

[22] Anup Shah, John Willis, Lauren Fillmore. Quantifying Methane Evolution From Sewers: Results from WERF/Dekalb Phase 2 Continuous Monitoring at Honey Creek Pumping Station and Force Main [C]//*Proceedings of the Water Environment Federation*, 2011(6): 475–485.

[23] Fries A.E., Schiffman L.A., Shuster W.D., *et al.* Street-level emissions of methane and nitrous oxide from the wastewater collection system in Cincinnati, Ohio[J].*Environmental Pollution*, 2018, 236: 247–256.

[24] Wang S.Y. Control of nitrous oxide emissions in biological wastewater treatment process[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014(9): 1–10.

[25] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国气候变化第三次两年更新报告[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2023.

[26] 中国城镇给排水协会. 城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.

[27] T/CUWA 50055—2023, 城镇污水处理厂碳减排评估标准[S].

[28] International Water Association. Quantification and Modelling of Fugitive Greenhouse Gas Emissions from Urban Water Systems[R]. London: International Water Association, 2022.

[29] Haiyan Li, Liangfang You, He Du, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions from municipal wastewater treatment plants in China: A plant-level and technology-specific study[J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2024(20): 100345.

[30] 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. *给水排水*, 2021, 47(3): 1–5.

[31] 张海亚, 李思琦, 黎明月等. 城镇污水处理厂碳排放现状及减污降碳协同增效路径探讨. *环境工程技术学报*, 2023, 13(6): 2053–2062.

[32] 徐猛, 徐莹, 孙德兴. 原生污水源热泵的关键技术与工程实践[J]. *节能技术*, 2009, 27(1): 1181–1190.

[33] 下水污泥エネルギー化技術 (市政污泥资源化技术指南)[R]. Tokyo: 日本国土交通省水管理与国土保全局下水道部, 2018.

[34] 李哲坤, 张立秋, 杜子文, 等. 城市污泥不同处理处置工艺路线碳排放比较[J]. *环境科学*, 2023, 44(2): 1181–1190.

[35] 湛宇辰. 取消化粪池对排水系统的影响研究——以重庆为例[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.

[36] 杜睿, 彭永臻. 城市污水生物脱氮技术变革: 厌氧氨氧化的研究与实践新进展[J]. *中国科学·技术科学*, 2022, 52(3): 389–402.

[37] 温汉泉, 潘元, 俞汉青. 低碳水处理与资源化技术: 厌氧膜生物反应器(AnMBR)的特性、应用与新技术简介[J]. *能源环境保护*, 2024, 38(1): 1–11.

[38] 张辰. 基于海绵城市建设理念的排水工程设计. *给水排水*, 2019, 55(6): 1–5.

(上接第 15 页)

低位拼装支架卧拼成型, 两侧靠近拱脚 65.5 m 处采用满堂支架架设, 吊装高度由 82 m 降低至 40 m。

7 结 论

本文系统地介绍了西中环跨海河桥工程的项目背景、建设条件、总体方案、桥型比选等内容, 推荐采用下承式系杆拱桥方案, 并介绍了主桥结构设计, 结合项目的技术特点及难点, 提出了相应的解决措施, 对完善同类型桥梁的设计理论, 解决关键技术问题和确保桥梁施工和运营的安全性和耐久性具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 天津市政工程设计研究总院有限公司. 西中环快速路跨海河桥工程可行性研究报告[R]. 天津: 天津市政工程设计研究总院有限公司, 2022.

[2] 天津水运工程科学研究所. 滨海新区西中环快速路跨海河桥梁工程航道通航条件影响评价报告[R]. 天津: 天津水运工程科学研究所, 2021.

[3] 天津市地震灾害防御中心. 西中环海河南岸小梁子地区综合开发基础设施建设项目工程场地地震安全性评价报告[R]. 天津: 天津市地震灾害防御中心, 2021.

[4] 阮欣, 李建中. 大跨径超宽拱桥静动力性能分析与设计优化[R]. 上海: 同济大学, 2023.