

基于实测优化的超大城市城镇污水处理厂碳排放特征研究

方奕, 汤琳, 吴晓蔚

上海市环境监测中心, 上海 200235

摘要:近年来,中国不断加大城镇污水处理设施的建设力度,污水处理厂出水水质得到显著提升。与此同时,减污降碳的管理需求愈显迫切。基于实际监测数据和运行数据,优化了《2006年IPCC国家温室气体清单指南》中的城镇污水处理厂温室气体核算方法,分析了案例区城镇污水处理厂碳排放的时空分布和影响因素,以期为减污降碳协同增效提供支撑。结果表明:案例区城镇污水处理厂2021年碳排放总量较2011年上升了118.4%,其中直接碳排放中的甲烷和氧化亚氮排放量分别增加了90.3%和77.5%,间接碳排放量上升了157.9%。间接碳排放量在碳排放总量中的占比为55.2%,间接碳排放已成为城镇污水处理厂碳排放的主要方式。采用污水处理厂进出口污染物实际监测浓度和运行活动水平数据优化碳排放核算方法,优化后的案例区城镇污水处理厂碳排放系数为 0.346 kg/m^3 ,较优化前下降了 0.404 kg/m^3 。2022年,案例区城镇污水处理厂碳排放量达到了104.56万吨(二氧化碳排放当量, CO_2e)。在超大型城市城镇污水处理厂污水处理工艺中, A^2/O 污水处理工艺具有较好的碳污协同减排效应。

关键词:温室气体;碳排放;减污降碳;城镇污水处理厂;核算方法

中图分类号:X820 文献标志码:A 文章编号:1002-6002(2025)01-0010-10

DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2025.01.02

Carbon Emission Characteristics of Urban Sewage Treatment Plants in Super-Large Cities Based on Monitoring Measurement Optimization

FANG Yi, TANG Lin, WU Xiaowei

Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai 200235, China

Abstract: Over the past decade, China has continuously increased the construction of urban sewage treatment facilities, and the quality of sewage effluent has significantly improved. Meanwhile, the management needs of reducing pollution and carbon are becoming more and more urgent. Based on actual monitoring data and operational data, the study optimized the accounting method for greenhouse gas emissions from urban sewage treatment plants in IPCC2006, analyzed the spatial and temporal distribution and influencing factors of carbon emissions from urban sewage treatment plants in the case area, in order to provide support for the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction. The results showed that the total carbon emissions of urban sewage treatment plants in the case area increased by 118.4% in 2021 compared to 2011, with direct emissions of methane and nitrous oxide increasing by 90.3% and 77.5% respectively, and indirect carbon emissions increasing by 157.9%. The proportion of indirect carbon emissions in the total carbon emissions is 55.2%, and indirect carbon emissions have become the main part of carbon emissions from urban sewage treatment plants. The carbon emission accounting method was optimized based on the actual monitoring of pollutant import and export concentrations and operational activity levels in the urban sewage treatment plant. The optimized carbon emission coefficient of urban sewage treatment plants in the case area was 0.346 kg/m^3 , a decrease of 0.404 kg/m^3 compared to before optimization. In 2022, the carbon emissions of urban sewage treatment plants in the case area reached 1.0456 million tons (carbon dioxide emissions equivalent, CO_2e). Among the sewage treatment technologies used in super large urban sewage treatment plants, the A^2/O sewage treatment technology have a good synergistic carbon pollution reduction effect.

Keywords: greenhouse gas; carbon emission; pollution reduction and carbon emission mitigation; urban sewage treatment plants; accounting method

收稿日期:2023-07-25; 修订日期:2023-09-28

基金项目:2023年度上海市环境监测系统内设研究项目(2023-18)

第一作者简介:方奕(1982-),女,浙江诸暨人,硕士,工程师。

通讯作者:吴晓蔚

污水处理系统的碳排放量占全球碳排放总量的1%~3%,在各类城市碳排放源中排名第5位^[1]。截至2021年末,上海市行政区划面积为6 340.5 km²,下辖16个区,常住人口达2 428.14万人^[2]。统计数据显示,2020年,上海市城镇化率为89.3%^[3],是中国城镇化率最高的城市之一^[4]。随着污染治理进程的推进,经提标改造后的污水处理厂的出水水质得到明显提升,随之而来的是污水处理过程中的高能耗问题越来越受到重视^[5]。上海作为中国第一个提出碳达峰时间表的城市^[6],应加快形成节约资源和保护环境的产业结构、生产方式,以确保如期实现碳达峰碳中和目标。因此,深入研究分析上海市城镇污水处理厂碳排放的空间分布和时序特征,有助于评判不同处理工艺对碳排放的影响,为减污降碳协同增效提供最优技术方法支撑,从而推进现代化城市治理体系建设。

国外学者对城镇污水处理厂运行过程中的碳排放发生机理开展了大量研究^[7-9]。污水处理厂碳排放主要涉及二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)3种温室气体。其中,CH₄是在污水处理的厌氧过程中产生,N₂O产生自污泥硝化过程,CO₂产生自有机物降解过程。国内学者主要采用联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)发布的《2006年IPCC国家温室气体清单指南》(以下简称IPCC2006)中的排放系数法,进行污水处理系统温室气体排放研究^[10-16]。IPCC2006中的方法多采用系数、宏观数据进行估

算。XI等^[17]在2021年的研究显示,采用运行数据优化方法进行碳排放量核算,其结果较IPCC2006中的排放系数法低估了355%的间接碳排放,高估了87%的CH₄和N₂O排放,因此,IPCC2006中的排放系数在适用性和准确性方面有待优化。

本研究基于IPCC2006中的核算方法,建立上海市城镇污水处理厂温室气体排放清单,构建基于实测数据的城镇污水处理厂碳排放系数,并对超大型城市污水集中处理系统的碳排放特征、空间分布等进行深入分析,以期使污水处理行业更好地支撑绿色高质量发展。

1 材料与方法

1.1 研究对象

选择上海市44座城镇污水处理厂作为研究对象。44座城镇污水处理厂采用的处理工艺主要有厌氧-缺氧-好氧(Anaerobic Anoxic Oxidation, A²/O)工艺、膜生物反应器(Membrane Bio-Reactor, MBR)工艺、间歇曝气活性污泥(Sequencing Batch Reactor, SBR)工艺、电渗析(Electro Dialysis, ED)工艺、活性污泥(Activated Sludge, AS)工艺和氧化沟(Oxidation Ditch, OD)工艺6大类。同时,将污水处理量占比较小的其余处理工艺类型归类为其他。其中,A²/O处理工艺是上海市城镇污水处理厂普遍采用的处理工艺,其在2021年对应的处理能力为696.95万t/d,处理量占总处理量的比例为81.3%(表1)。

表1 上海市城镇污水处理厂各处理工艺类型情况汇总(2021年)

Table 1 Types of treatment processes for urban sewage treatment plants in Shanghai (2021)

污水处理工艺类型	污水处理能力/(万t/d)	污水处理量/万t	用电量/万kW·h	污泥产生量/万t
A ² /O	696.95	271 767	109 334	111.02
MBR	2.5	835	694	0.18
SBR	10	3 087	1 516	1.58
ED	4	1 411	802	0.80
AS	55	16 453	8 603	3.77
OD	15.9	3 450	1 418	1.24
其他	38.9	8 757	3 546	2.53
合计	823.25	305 760	125 913	121.12

月度分析选取上海市处理能力及处理量最大的B污水处理厂。B污水处理厂位于浦东新区,是目前亚洲最大的污水处理厂^[18]。其生活污水处理项目的服务人口达712万人,服务范围所属行政区域涵盖黄浦区、静安区、徐汇区、长宁区、闵

行区和浦东新区6个区,设计污水处理能力为280万t/d;工业废水处理项目服务于413家工业企业,合计进水量约19.29万t/d。2021年,B污水处理厂实际污水处理量为10.46亿t,占上海市污水处理厂污水处理总量的34.08%。

1.2 数据来源

城镇污水处理厂进出口生化需氧量(BOD)按照《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的规定进行手工采样监测,监测频次为每季度1次。采样时,在一天或一个生产周期内,等时间间隔采集4个样品,从而获得BOD日均浓度。BOD的测定方法采用《水质 五日生化需氧量(BOD₅)的测定 稀释与接种法》(HJ 505—2009)。

城镇污水处理厂进出口总氮(TN)按照《水污染源在线监测系统(COD_{Cr}、NH₃-N等)运行技术规范》(HJ 355—2019)的规定进行自动监测,采样点位均符合《水污染源在线监测系统(COD_{Cr}、NH₃-N等)安装技术规范》(HJ 353—2019)的规定。

污水处理厂运行活动水平数据主要来自实地调查资料。

1.3 核算方法

目前,废水处理系统温室气体排放量核算主要采用IPCC2006中的计算方法,并将温室气体排放分为直接排放和间接排放。直接排放核算主要针对污水处理过程中产生的CH₄和N₂O,间接排放核算主要针对污水处理过程中的能源消耗及药剂消耗所对应的CO₂排放。相关研究表明,药剂消耗造成的间接温室气体排放占比很小^[19],因而本研究予以忽略。

1.3.1 碳排放量核算

本研究利用实际监测数据和运行数据,结合IPCC2006方法,核算城镇污水处理厂CH₄、N₂O和CO₂排放量,具体计算公式如下。

CH₄直接排放量核算公式:

$$E(\text{CH}_4) = [C_{\text{in}}(\text{BOD}) - C_{\text{ef}}(\text{BOD})] \times T_w \times 10^{-6} \times B_0 \times P_{\text{ds}} \times \text{MCF} \quad (1)$$

式中: $E(\text{CH}_4)$ 为城镇污水处理厂CH₄直接排放量,t; $C_{\text{in}}(\text{BOD})$ 和 $C_{\text{ef}}(\text{BOD})$ 分别为城镇污水处理厂进口和出口BOD浓度,mg/L; T_w 为污水处理量,t; B_0 为CH₄最大生产能力,根据IPCC2006中的建议取0.6 t/t; P_{ds} 为生活污水处理比例,%; MCF为CH₄修正因子,根据IPCC2006中的建议取0.1。

N₂O直接排放量核算公式:

$$E(\text{N}_2\text{O}) = [C_{\text{in}}(\text{N}_2\text{O}) - C_{\text{ef}}(\text{N}_2\text{O})] \times T_w \times 10^{-6} \times \text{EF}(\text{N}_2\text{O}) \times 44/28 \quad (2)$$

式中: $E(\text{N}_2\text{O})$ 为城镇污水处理厂N₂O直接排放

量,t; $C_{\text{in}}(\text{N}_2\text{O})$ 和 $C_{\text{ef}}(\text{N}_2\text{O})$ 分别为城镇污水处理厂进口和出口TN浓度,mg/L; T_w 为污水处理量,t; $\text{EF}(\text{N}_2\text{O})$ 为废水处理系统N₂O排放系数(以N计),根据IPCC2006中的建议取0.005 t/t; 44/28为N₂O与N的相对分子质量之比。

CO₂间接排放量核算公式:

$$E(\text{CO}_2) = E_e \times \text{EF}(\text{CO}_2) \quad (3)$$

式中: $E(\text{CO}_2)$ 为城镇污水处理厂用电产生的CO₂排放量,t; E_e 为城镇污水处理厂用电量,kW·h/a; $\text{EF}(\text{CO}_2)$ 为城镇污水处理厂单位污水处理电耗的排放因子,参考统计数据取0.463 14 kg/(kW·h)。

1.3.2 碳排放强度核算

本研究以二氧化碳当量(Carbon Dioxide Equivalent, CO₂e)来归一化相关温室气体因子,从而进行综合分析。针对城镇污水处理厂,参考蒋富海等^[16]学者的研究成果,以单位污水处理碳排放量,即碳排放强度,作为量化评估指标。具体计算公式如下:

$$\text{EI}(\text{CO}_2) = E(\text{CO}_2)/T_w \quad (4)$$

式中: $\text{EI}(\text{CO}_2)$ 为城镇污水处理厂碳排放强度,kg/m³; $E(\text{CO}_2)$ 为城镇污水处理厂CO₂排放量,kg; T_w 为污水处理量,m³。

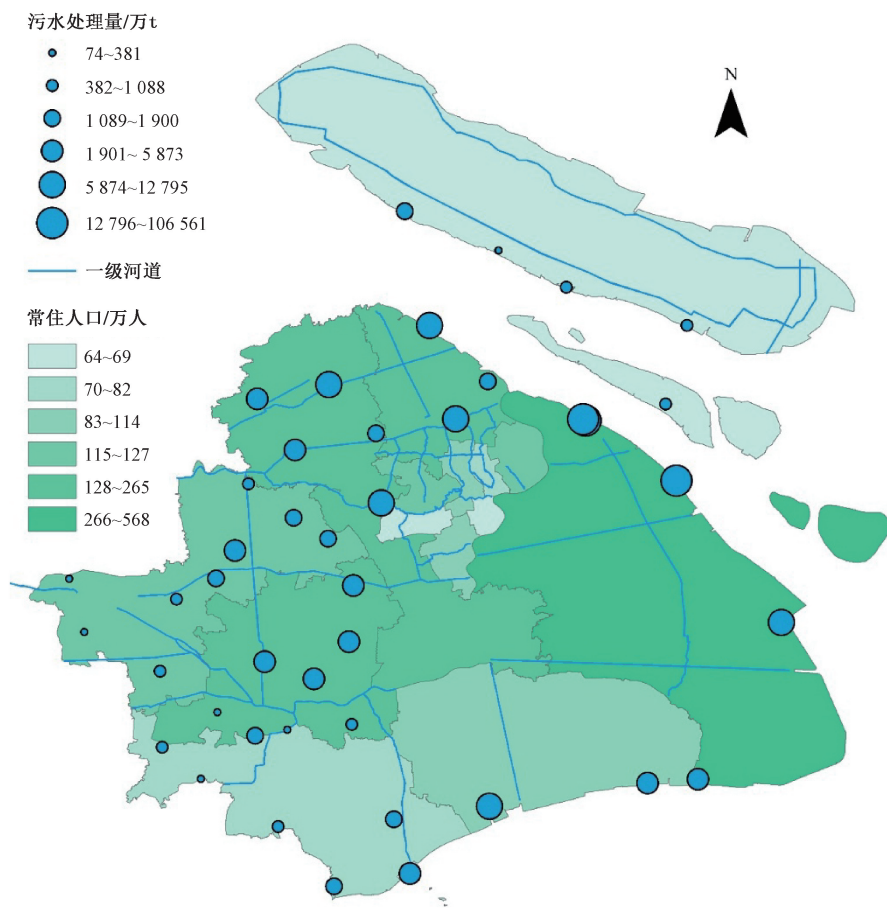
2 结果与分析

2.1 上海市城镇污水处理厂碳排放量空间分布特征

目前,上海市城镇污水处理厂均已完成提标改造,经处理后的出水污染物日均浓度执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A标准,即化学需氧量(COD)<50 mg/L、BOD<10 mg/L、TN<15 mg/L;厂界废气中,CH₄执行二级标准,即CH₄<1 mg/m³。图1所示为2021年上海市城镇污水处理厂污水处理量与人口分布情况。数据显示,上海市北部三岛(崇明岛、横沙岛、长兴岛)的常住人口较少,中部核心区域人口密集,南部区域人口相对较少。从污水处理量来分析,上海市城镇污水处理厂的污水处理模式为:在人口密集地区,采用集中式大型化的污水处理模式;在人口分散区域,采用分布式小型化的污水处理模式。上海市城镇污水处理厂的排水水域主要为“三江一湖”和东海,其中“三江一湖”即长江、黄浦江、

吴淞江和淀山湖。按排放水域划分,2021年上海市污水处理厂的外河流域碳排放量最大,达

70.39万t;内河流域碳排放强度最高,为 0.44 kg/m^3 (图2)。



注:底图下载自国家地理信息公共服务平台(<https://cloudcenter.tianditu.gov.cn/administrativeDivision>),审图号为GS(2024)0650号,下载日期为2024-10-21。

图1 2021年上海市城镇污水处理厂污水处理量与人口分布
Fig.1 Sewage treatment capacity of urban sewage treatment plants and population distribution in Shanghai in 2021

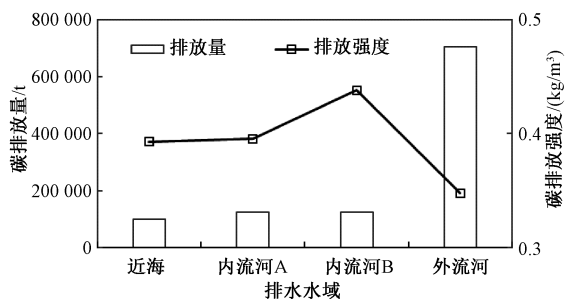


图2 2021年上海市城镇污水处理厂碳排放分布
Fig.2 Distribution of carbon emissions from urban sewage treatment plants in Shanghai in 2021

2.2 上海市城镇污水处理厂碳排放量时序变化特征

2011—2021年,上海市城镇污水处理厂的数量从50座减少至44座,污水处理能力从669万t/d增加到853万t/d,污水收集和污水处理的集

中度进一步提高。在污水收集处理能力显著提升的同时,碳排放量和碳排放强度也随之增加(图3)。2021年, CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放量相较于2011年分别增加了157.9%、90.3%、77.5%。2011年上海市城镇污水处理厂间接碳排放量占碳排放总量的45.8%,2021年则升高至55.2%。因此,在污水处理提质增效的同时,还应重视能源消耗所带来的温室气体排放。《“十二五”节能减排综合性工作方案》实施期间,我国对城镇污水处理厂的减排要求以减少COD为主,所采取的相关减排措施对碳排放量和碳排放强度影响不大。《“十三五”节能减排综合性工作方案》实施期间,我国对城镇污水处理厂的减排要求以脱氮除磷为主。由于脱氮除磷处理工艺需要较高的能耗,城镇污水处理厂的碳排放量和碳排放强度快速上升。

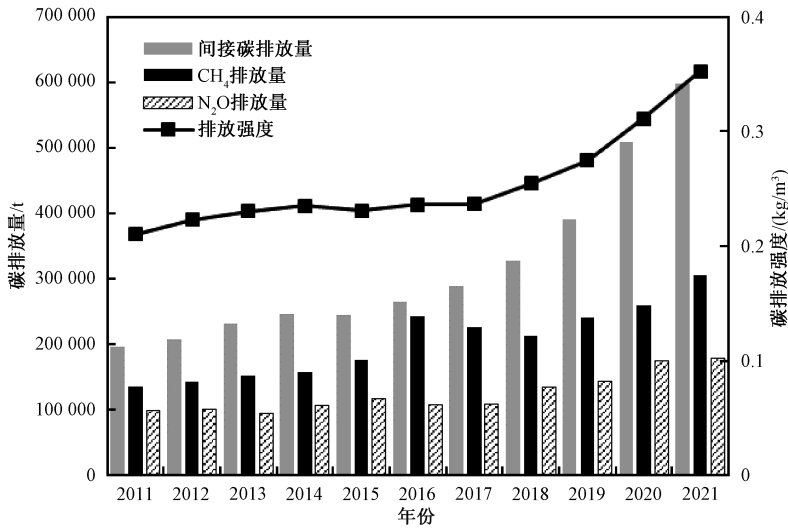


图3 2011—2021年上海市城镇污水处理厂碳排放量和碳排放强度
 Fig. 3 Carbon emissions and intensity of urban sewage treatment plants in Shanghai from 2011 to 2021

本研究以亚洲最大污水处理厂为例,其CH₄排放量最高的月份为11月,月排放量为309.37 t(CO₂e,下同);最低为8月,月排放量为196.37 t。N₂O排放量最高的月份是4月,月排放量为10 721.65 t;最低是9月,月排放量为7 057.58 t。由图4可见,温度对城镇污水处理厂直接碳排放量的影响较为明显,呈现夏季(高温)碳排放量较低、冬季(低温)碳排放量较高的特征;季节变化对直接碳排放中的N₂O排放量的影响较大,对CH₄排放量的影响次之。

2.3 上海市城镇污水处理厂碳排放强度分布特征

上海市城镇污水处理厂碳排放强度呈逐年增加趋势(图5)。2021年,间接碳排放强度达0.195 kg/m³;直接碳排放中,CH₄排放强度为0.099 6 kg/m³,N₂O排放强度为0.058 0 kg/m³。2011—2021年,年均间接碳排放强度为0.124 kg/m³;直接碳排放中,年均CH₄排放强度为0.080 8 kg/m³,年均N₂O排放强度为0.049 2 kg/m³。上海市城镇污水处理厂在水污染物排放减少的同时,碳排放强度却逐年增加,呈现较差的协同减排效应。

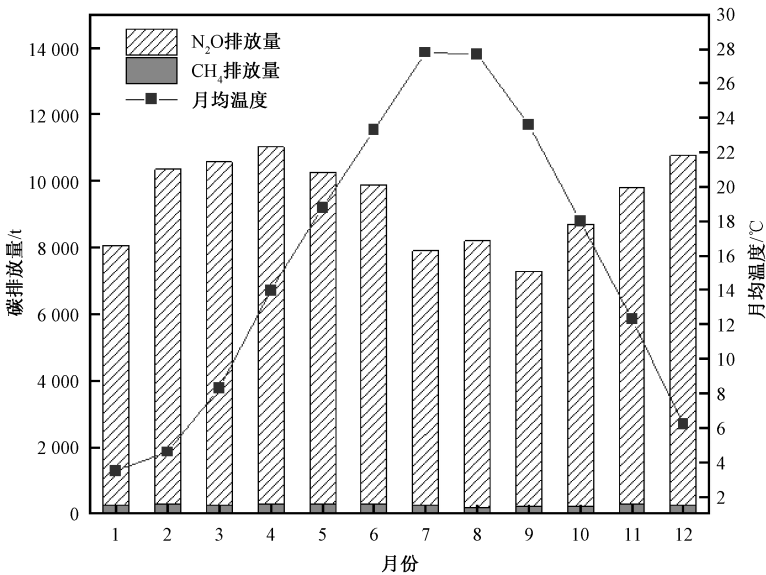


图4 某污水处理厂CH₄和N₂O排放量月度变化
 Fig. 4 Monthly changes in CH₄ and N₂O emission of a urban sewage treatment plant

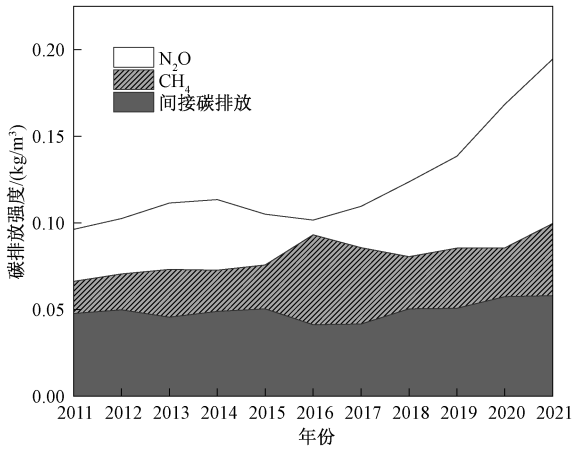


图 5 2011—2021 年上海市城镇
污水处理厂碳排放强度

Fig. 5 Carbon emission intensities of
urban sewage treatment plants in
Shanghai from 2011 to 2021

44 座城镇污水处理厂的 2021 年碳排放强度(图 6)差异较大,最大值为 0.68 kg/m^3 ,最小值为 0.23 kg/m^3 ,算术平均值为 0.39 kg/m^3 ,中位值为 0.38 kg/m^3 。碳排放强度最大的污水处理厂的规模为 $50\,000 \text{ t/d}$,年污水处理量为 $1\,300 \text{ 万 t}$ 。碳排放强度最小的污水处理厂的规模为 $1\,100\,000 \text{ t/d}$,年污水处理量为 $43\,000 \text{ 万 t}$ 。碳排放强度最大污水处理厂的规模仅为碳排放强度最小污水处理厂的 4.55% ,年污水处理量仅为碳排放强度最小污水处理厂的 3.02% ,反映出处理规模以及实际污水处理量对碳排放强度的影响较大。

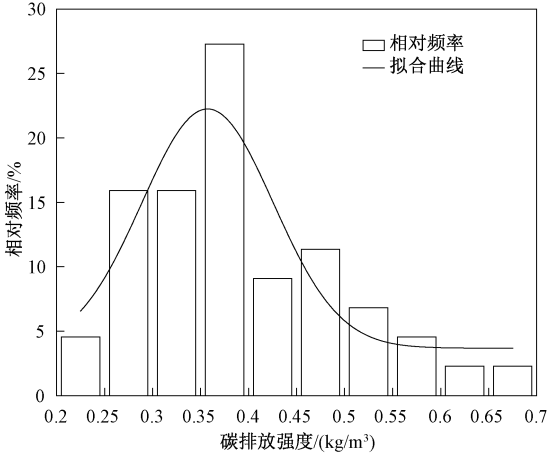


图 6 上海市城镇污水处理厂
碳排放强度频率分布

Fig. 6 Frequency distribution of carbon emission
intensities of urban sewage treatment
plants in Shanghai

采用不同污水处理工艺的城镇污水处理厂的碳排放强度有较为明显的差异(图 7)。其中,采用 AS、 A^2/O 和 OD 污水处理工艺的城镇污水处理厂的碳排放强度较低,采用 MBR 污水处理工艺的城镇污水处理厂的碳排放强度较高。从减污降碳协同增效的角度来看,在实现水污染物减排的同时, A^2/O 污水处理工艺的碳排放强度较低,是更为适宜的污水处理工艺。

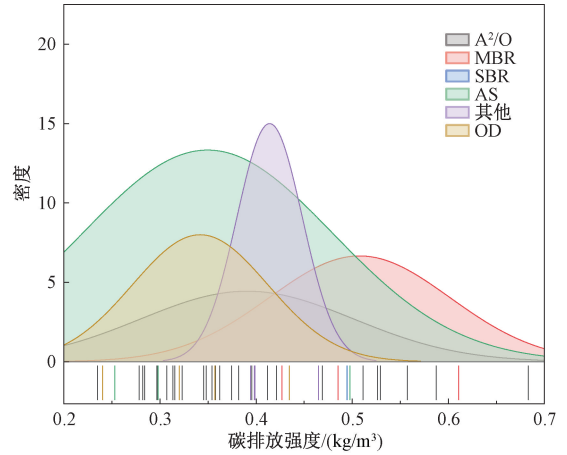


图 7 各污水处理工艺碳排放强度密度分布
Fig. 7 Density distribution of carbon emission
intensities of each wastewater treatment process

2.4 城镇污水处理厂碳排放影响因素分析

利用 SPSS 软件对 44 座污水处理厂 2021 年运行与监测指标进行相关性统计分析,结果见表 2。表 2 显示,污水处理厂的碳排放量与运行费用、用电量、污水处理能力、污水处理量和污泥(干质)产生量呈极显著正相关;碳排放强度与 COD 出口浓度呈显著正相关,与 BOD 进口浓度呈极显著正相关;运行费用与用电量、污水处理能力、污水处理量和污泥(干质)产生量呈极显著正相关。

对于采用不同污水处理工艺的城镇污水处理厂,其产生的不同温室气体的碳排放量占比具有明显差异(图 8)。间接碳排放量占碳排放总量的比例为 $47.3\% \sim 66.2\%$,均值为 55.8% 。其中,采用 MBR 污水处理工艺产生的间接碳排放量占比最高,达 66.2% 。 CH_4 排放量占碳排放总量的比例为 $19.4\% \sim 38.7\%$,均值为 28.0% 。其中,采用其他类型污水处理工艺产生的 CH_4 的碳排放量占比最高,达 38.3% 。 N_2O 排放量占碳排放总量的比例为 $13.0\% \sim 22.3\%$,均值为 16.2% 。其中,采用 SBR 污水处理工艺产生的 N_2O 的碳排放量占比最高,达 22.3% 。

表 2 44 座污水处理厂运行与监测指标相关性分析统计
Table 2 Correlation analysis and statistics of operation and monitoring indexes of 44 sewage plants

指标	碳排放量	碳排放强度	运行费用	用电量	污水处理能力	污水处理量	污泥(干质)产生量	COD 进口浓度	COD 出口浓度	BOD 进口浓度	BOD 出口浓度	TN 进口浓度	TN 出口浓度
碳排放量	1												
碳排放强度	-0.110	1											
运行费用	0.478	0.979**	1										
用电量	0.000	0.403	0.972**	1									
污水处理能力	0.995**	-0.088	0.974**	0.978**	1								
污水处理量	0.000	0.570	0.000	0.000	0.974**	1							
污泥(干质)产生量	0.987**	0.254	0.969**	0.974**	0.999**	0.906**	1						
COD 进口浓度	0.000	0.218	0.000	0.000	0.000	0.000	0.903**	1					
COD 出口浓度	0.942**	-0.081	0.907**	0.963**	0.906**	0.903**	0.903**	0.386**	1				
BOD 进口浓度	0.000	0.601	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.601**	1			
BOD 出口浓度	0.162	0.152	0.188	0.142	0.157	0.156	0.145	0.010	0.265	0.265	1		
TN 进口浓度	0.295	0.324	0.222	0.358	0.307	0.313	0.348	0.709	0.083	0.083	0.175	1	
TN 出口浓度	-0.053	0.310*	-0.030	-0.050	-0.055	-0.058	-0.011	0.521**	0.175	0.112	0.112	0.112	1
	0.733	0.040	0.846	0.749	0.723	0.709	0.945	0.010	0.256	0.471	0.471	0.471	0.471
	0.073	0.459**	0.105	0.052	0.031	0.017	0.010	0.601**	0.198	0.333*	0.333*	0.333*	0.333*
	0.638	0.002	0.496	0.737	0.841	0.914	0.951	0.000	0.000	0.027	0.027	0.027	0.027
	-0.106	-0.030	-0.074	-0.103	-0.112	-0.111	-0.015	0.521**	0.380*	0.083	0.083	0.083	0.083
	0.492	0.846	0.631	0.506	0.469	0.474	0.925	0.000	0.011	0.590	0.590	0.590	0.590
	0.021	0.053	0.051	0.009	0.013	0.008	0.060	0.604**	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
	0.893	0.735	0.743	0.952	0.935	0.961	0.699	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.085	-0.097	0.175	0.091	0.084	0.083	0.112	0.193	0.380*	0.083	0.083	0.083	0.083
	0.584	0.530	0.256	0.555	0.586	0.591	0.469	0.210	0.011	0.590	0.590	0.590	0.590

注：“*”表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著，“**”表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著。

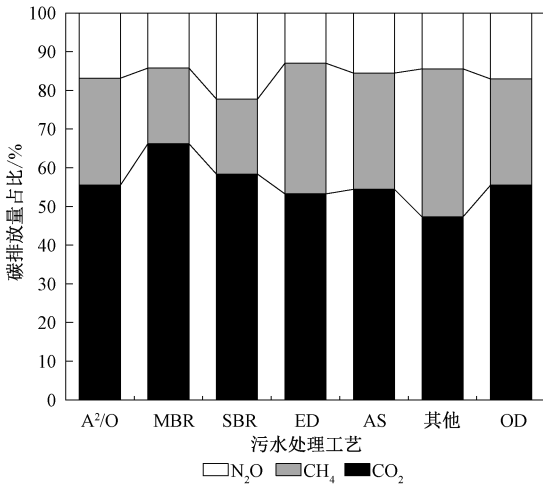


图 8 上海市城镇污水处理厂各处理工艺的温室气体碳排放量占比

Fig. 8 Greenhouse gas carbon emission proportions from various treatment processes of urban sewage treatment plants in Shanghai

3 上海市城镇污水处理厂碳排放系数优化

本研究结合 2010 年国家发展改革委印发的《省级温室气体清单编制指南(试行)》中的城镇污水处理厂温室气体排放系数,以及 IPCC2006 中的核算方法,基于实测数据和运行数据,建立本地化的污水处理厂温室气体排放清单,得到本地化的城镇污水处理厂碳排放系数。根据实测数据,通过对采用不同处理工艺的污水处理厂的污水处理量进行加权平均,得到的上海市城镇污水处理厂的碳排放系数为 0.346 kg/m^3 。该系数涵

盖了污水处理过程中的直接碳排放和能耗对应的间接碳排放,其中 CH_4 排放系数为 0.073 kg/m^3 , N_2O 排放系数为 0.054 kg/m^3 ,间接碳排放系数为 0.219 kg/m^3 。2022 年,上海市共有 44 座城镇污水处理厂,污水处理能力为 882 t/d,年污水实际处理量为 302 826 万 t^[20]。利用本研究建立的上海市城镇污水处理厂碳排放系数(0.346 kg/m^3)进行计算,2022 年上海市城镇污水处理厂碳排放量为 104.65 万 t。由于不同处理工艺的碳排放强度差异较大,该系数具有一定的不确定性。

由于早期针对城镇污水处理厂的监测工作尚未得到全面开展,缺少 TN 监测数据,学者们多采用 IPCC2006 中的核算方法,依据污水处理厂的服务人口数量来估算人均蛋白质消费量中的氮含量。该方法未考虑污水处理规模、污水处理工艺对碳排放的影响。经过多年的监测数据积累,本研究采用实际运行数据建立了本地化的排放清单,其对于当前的污水处理厂碳排放研究而言更具时效性和针对性。将本研究得到的城镇污水处理厂碳排放系数与其他学者研究结果进行比较(表 3),发现彼此之间差异巨大。从研究年份来看,随着研究时间的推移,城镇污水处理厂的碳排放系数整体不断降低。其他学者多采用 IPCC2006 中的方法进行碳排放量核算,因而其对城镇污水处理厂碳排放量可能有所高估。本研究基于实际运行数据和监测数据,结合不同的污水处理工艺,优化了碳排放量核算方法,核算得到的碳排放量更为贴近实际排放情况,有利于实现本地化精准减污降碳协同增效。

表 3 不同研究的城镇污水处理厂碳排放系数比较

Table 3 Comparison of carbon emission coefficients of urban sewage treatment plants in different studies

年份	碳排放系数/(kg/m^3)	研究范围	文献
2012	0.983	西安	[21]
2016	0.61 (0.3~0.8)	全国	[22]
2017—2020	0.290	上海	[10]
2016—2018	0.75	上海	[23]
2021	0.346	上海	本研究

4 主要结论

1) 2011—2021 年,上海市城镇污水处理厂碳排放量逐年升高,2021 年碳排放总量较 2011 年上升了 118.4%。其中,直接碳排放中的 CH_4 和 N_2O 排放量分别增加了 90.3% 和 77.5%,间接碳

排放量上升了 157.9%。间接碳排放量在碳排放总量中的占比从 2011 年的 45.8% 上升到 2021 年的 55.2%,上升了 9.4 个百分点。间接碳排放已成为上海市城镇污水处理厂碳排放的主要方式。

2) 2021 年,上海市城镇污水处理厂间接碳排放强度为 0.195 kg/m^3 , CH_4 排放强度为 0.0996 kg/m^3 , N_2O 排放强度为 0.0580 kg/m^3 。2011—

2021年,上海市城镇污水处理厂年均间接碳排放强度为 0.124 kg/m^3 , 年均 CH_4 排放强度为 0.0808 kg/m^3 , 年均 N_2O 排放强度为 0.0492 kg/m^3 。上海市城镇污水处理厂在水污染物排放量不断减少的同时,碳排放强度呈逐年增加趋势,反映出其污染物和温室气体协同减排效应较差。采用不同类型污水处理工艺的城镇污水处理厂的温室气体碳排放量占比具有明显差异。其中:采用 MBR 污水处理工艺的城镇污水处理厂的间接碳排放量占碳排放总量的比例最高,达 66.2%;采用 SBR 污水处理工艺的城镇污水处理厂的 N_2O 排放量占碳排放总量的比例最高,达 22.3%。

3)本研究核算得到的上海市城镇污水处理厂碳排放系数为 0.346 kg/m^3 ,由此计算得到的2022年上海市城镇污水处理厂碳排放量为 104.65 万 t。相较于其他学者多采用 IPCC2006 方法核算碳排放量,本研究基于实际运行数据和监测数据,结合不同的处理工艺,优化了碳排放量核算方法,核算得到的碳排放量更贴近实际排放情况,有利于实现本地化精准减污降碳协同增效。

5 展望与建议

近年来,我国不断加大城镇污水处理设施建设力度,污水处理厂出水水质得到显著提升,然而污水处理厂的碳排放量和碳排放强度却不断增加。上海市城镇污水处理厂已实现连续多年稳定达标排放水污染物,且运行情况良好。建议城镇污水处理厂在今后的升级改造设计阶段,聚焦不同污水处理工艺的优缺点,减少水污染物排放的同时,降低碳排放强度。行业主管部门应进一步统筹城镇污水处理厂减污与降碳的协同增效关系,提升城市治理能力现代化水平。

1)城镇污水处理厂减排要从“十二五”“十三五”时期的以单一因子减排为主的模式,过渡到碳污协同减排的模式,以更好地实现超大型城市“双碳”目标。

2)碳排放强度计算是城镇污水处理厂减污降碳协同增效工作的重要组成部分。各地应因地制宜开展本地化排放系数研究,进一步提高碳排放核算精度,以准确数据支撑国家减污降碳协同增效和绿色高质量发展。

3)污水处理工艺是影响城镇污水处理厂碳

污协同减排效果的关键因素之一,因此,在今后的城镇污水处理厂碳排放研究中,应导入分类分析理念,并将污水处理厂结构调整与提质增效相结合,以推动碳排放研究的深入发展。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 上海市统计局,国家统计局上海调查总队. 上海统计年鉴 2022 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [3] 国务院第七次全国人口普查领导小组办公室. 中国人口普查年鉴—2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [4] 国务院. 国务院关于调整城市规模划分标准的通知: 国发 [2014] 51 号 [EB/OL]. (2014-11-20) [2023-07-01]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/20/content_9225.htm.
- [5] MENESES M, PASQUALINO J C, CASTELLS F. Environmental Assessment of Urban Wastewater Reuse: Treatment Alternatives and Applications [J]. Chemosphere, 2010, 81 (2): 266-272.
- [6] 上海市人民政府. 上海市人民政府关于印发《上海市碳达峰实施方案》的通知: 沪府发 [2022] 7 号 [EB/OL]. (2022-07-28) [2023-07-01]. <https://www.shanghai.gov.cn/nw12344/20220728/75468067a4a848139d2a2eed16ce9e11.html>.
- [7] 周兴, 郑有飞, 吴荣军, 等. 2003—2009 年中国污水处理部门温室气体排放研究 [J]. 气候变化研究进展, 2012, 8 (2): 131-136.
ZHOU Xing, ZHENG Youfei, WU Rongjun, et al. Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment in China During 2003-2009 [J]. Climate Change Research, 2012, 8 (2): 131-136.
- [8] NAYEB H, MIRABI M, MOTIEE H, et al. Estimating Greenhouse Gas Emissions from Iran's Domestic Wastewater Sector and Modeling the Emission Scenarios by 2030 [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 236: 1-13.
- [9] YAN X, QIU D Z, ZHENG S K, et al. Spatial and Temporal Distribution of Greenhouse Gas Emissions from Municipal Wastewater Treatment Plants in China from 2005 to 2014 [J]. Earth's Future, 2019, 7 (4): 340-350.
- [10] DING T, NING Y D, ZHANG Y. Estimation of Greenhouse Gas Emissions in China 1990-2013 [J].

- Greenhouse Gases; Science & Technology, 2017, 7 (6):1 097-1 115.
- [11] DU M X, ZHU Q A, WANG X G, et al. Estimates and Predictions of Methane Emissions from Wastewater in China from 2000 to 2020 [J]. Earth's Future, 2018, 6 (2):252-263.
- [12] DONG X, ZHANG X Y, ZENG S Y. Measuring and Explaining Eco-Efficiencies of Wastewater Treatment Plants in China; An Uncertainty Analysis Perspective [J]. Water Research, 2017, 112:195-207.
- [13] 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(6):116-122.
- QIU Dezhi, CHEN Chun, GUO Li, et al. Characteristics of Greenhouse Gas Emissions from Municipal Wastewater Treatment Plants in Major Urban Groups of China Based on Emission Factor Method [J]. Environmental Engineering, 2022, 40 (6):116-122.
- [14] 裴冰, 刘通浩, 杨文雨, 等. 典型燃煤电厂机组二氧化碳排放测试及核算研究[J]. 中国环境监测, 2023, 39(2):225-231.
- PEI Bing, LIU Tonghao, YANG Wenyu, et al. Study on Determination and Accounting of CO₂ Emission from Typical Coal-Fired Power Plant [J]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39 (2):225-231.
- [15] 夏峥, 俞洁, 徐益杰, 等. 基于区域环境空气质量和碳排放数据的减污降碳协同效果评估[J]. 中国环境监测, 2023, 39(5):60-68.
- XIA Zheng, YU Jie, XU Yijie, et al. Evaluation of the Synergistic Reduction Effect of Pollution and Carbon Emissions Based on Data of Regional Ambient Air Quality and Carbon Emissions [J]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39(5):60-68.
- [16] 蒋富海, 王琴, 张显忠, 等. 城镇污水治理与温室气体的协同减排双控研究[J]. 中国市政工程, 2022 (5):42-47.
- JIANG Fuhai, WANG Qin, ZHANG Xianzhong, et al. Study on the Dual Control of Urban Sewage Treatment & Greenhouse Gas Collaborative Emission Reduction [J]. China Municipal Engineering, 2022(5):42-47.
- [17] XI J, GONG H, ZHANG Y, et al. The Evaluation of GHG Emissions from Shanghai Municipal Wastewater Treatment Plants Based on IPCC and Operational Data Integrated Methods (ODIM) [J]. Science of the Total Environment, 2021, 797:148967.
- [18] 《城乡建设》编辑部. 上海市白龙港城市污水处理厂污泥处理工程[J]. 城乡建设, 2019(21):62-63.
- Editorial Department of Urban and Rural Development. Shanghai Bailonggang Municipal Wastewater Treatment Plant Sludge Treatment Project [J]. Urban and Rural Development, 2019 (21):62-63.
- [19] 柴春燕. 城镇污水处理厂温室气体排放规律及热岛效应研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- [20] 上海市水务局. 2022年上海市水资源公报[R]. 上海:上海市水务局, 2023.
- [21] 翟萌, 邵越, 徐福军. 西安污水处理厂温室气体排放及减排对策研究[J]. 环境工程, 2016, 34(2):23-26.
- ZHAI Meng, SHAO Yue, XU Fujun. Countermeasures on Greenhouse Gas Emission Reduction for the Wastewater Treatment Plants of Xi'an [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(2):23-26.
- [22] 郭盛杰, 黄海伟, 董欣, 等. 中国城镇污水处理行业温室气体排放核算及其时空特征分析[J]. 给水排水, 2019, 45(4):56-62.
- GUO Shengjie, HUANG Haiwei, DONG Xin, et al. Calculation of Greenhouse Gas Emissions of Municipal Wastewater Treatment and Its Temporal and Spatial Trend in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(4):56-62.
- [23] 钱晓雍, 胡静, 李丹, 等. 上海城镇污水处理厂温室气体排放核算及其特征[J]. 中国给水排水, 2022, 38(21):39-44.
- QIAN Xiaoyong, HU Jing, LI Dan, et al. Calculation and Characteristics of Greenhouse Gas Emission from Urban Wastewater Treatment Plants in Shanghai [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(21):39-44.