

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.21.005

上海城镇污水处理厂温室气体排放核算及其特征

钱晓雍, 胡静, 李丹, 赵敏, 徐冰, 林卫青
(上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要: 基于城镇排水统计数据,核算了上海全市及各座城镇污水处理厂的温室气体排放量和排放强度,并分析了城镇污水处理厂温室气体排放强度的影响因素。结果表明,上海城镇污水处理厂的温室气体年排放总量约为 190×10^4 t(以 CO_2 当量计,下同),处理单位污水的温室气体排放强度为 0.75 kg/m^3 ;采用氧化沟工艺的污水处理厂温室气体排放强度平均为 0.71 kg/m^3 ,显著低于采用其他处理工艺的污水处理厂($P<0.05$);温室气体排放强度与单位污水处理电耗呈极显著正相关($P<0.01$)、与COD去除率呈显著正相关($P<0.05$)。从上海市各座城镇污水处理厂的温室气体排放强度来看,对照国际先进水平仍有温室气体减排潜力。

关键词: 城镇污水处理; 温室气体; 核算方法; 排放特征; 上海市

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)21-0039-06

Calculation and Characteristics of Greenhouse Gas Emission from Urban Wastewater Treatment Plants in Shanghai

QIAN Xiao-yong, HU Jing, LI Dan, ZHAO Min, XU Bing, LIN Wei-qing
(Shanghai Academy of Environmental Science, Shanghai 200233, China)

Abstract: Based on the statistical data of urban wastewater treatment, the greenhouse gas emission and its emission intensity of urban wastewater treatment plants in Shanghai were calculated, and the influencing factors of greenhouse gas emission intensity were analyzed. The annual total greenhouse gas emission of urban wastewater treatment plants in Shanghai was approximately 1.9 million tons (measured by CO_2 equivalent, the same below), and the greenhouse gas emission intensity per unit wastewater treatment was 0.75 kg/m^3 . The greenhouse gas emission intensity of wastewater treatment plants using oxidation ditch process was 0.71 kg/m^3 on average, which was significantly lower than that of other treatment processes ($P<0.05$). In addition, greenhouse gas emission intensity was significantly positively correlated with unit wastewater treatment power consumption ($P<0.01$), and positively correlated with COD removal rate ($P<0.05$). According to the greenhouse gas emission intensity of urban wastewater treatment plants in Shanghai, there is still potential to reduce greenhouse gas emission compared with the international advanced level.

Key words: urban wastewater treatment; greenhouse gas; calculation method; emission characteristics; Shanghai City

基金项目: 上海市科委技术标准项目(22DZ2200100); 上海城投污水处理有限公司科研计划项目(2022)

通信作者: 钱晓雍 E-mail: qianxy@saes.sh.cn

近年来,城镇污水处理行业快速发展,虽然污水处理是社会中较小的行业,但由于污水处理量的增加及其高能耗密度的特征,使其不仅是全球温室气体的一个重要排放源,也是增长较快的一个排放源。同时,随着燃煤量逐步减少、新能源广泛应用,包含污水处理在内的废弃物温室气体排放占比在不断攀升,已从2014年的1.74%上升到2020年的2.45%,并呈现出逐年上升的趋势^[1]。

污水处理行业的温室气体排放主要包括直接排放与间接排放两类。直接排放主要来自于污水处理过程中产生并逸散的大量CH₄和N₂O,处理过程中的CO₂排放由于属于生物成因一般不予考虑;间接排放主要来自于电力、药剂等能耗和物耗,分别表征能源及物质投入带来的温室气体排放^[2]。

目前我国从政府层面上主要根据《IPCC国家温室气体清单指南》制定的《省级温室气体清单编制指南》,按照不同行业及增补单开展温室气体排放量核算^[3];社会层面上包括研究机构、科研团体等“自下而上”通过完善活动数据和排放因子有针对性地进行温室气体排放量计算,计算方法包括采用IPCC和国家指南的排放因子法^[4]、模型模拟^[5]、实测法^[6]等,或采用多种技术结合的方法进行计算^[7]。但是,在碳达峰、碳中和的背景下,面对城镇污水处理厂减污降碳协同治理的要求,对各个城镇污水处理厂温室气体排放核算进行的针对性研究仍然较少。为此,笔者选取城镇排水统计年鉴中的上海城镇污水处理厂运行数据,采用IPCC温室气体排放清单及文献资料核算方法,核算了上海全市及各座城镇污水处理厂的温室气体排放量和排放强度,并分析了温室气体排放强度的影响因素,探讨了城镇污水处理厂温室气体排放核算方法本地化的可行性,以期上海城镇污水处理厂的温室气体排放核算与减污降碳协同治理提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

由于近年来城镇排水统计年鉴中上海各座城镇污水处理厂的运行数据不全,本研究涉及的上海城镇污水处理厂的处理水量、污泥产量、电力消耗以及COD、BOD₅、氨氮的进出水浓度等数据来源于《2016年城镇排水统计年鉴》,而总氮的进出水浓度则参考《2018年城镇排水统计年鉴》中部分污水处

理厂进出水总氮与氨氮浓度的比值进行换算。

1.2 核算系统边界

本研究确定的城镇污水处理厂温室气体排放核算系统边界仅为污水处理本身,不考虑污水收集及污泥脱水后的处理与处置。温室气体排放量分为直接排放和间接排放两类:直接排放包括污水处理过程中产生的CH₄和N₂O,不包括生物成因的CO₂排放;间接排放仅考虑能耗类间接排放,药耗类间接排放占比较小且无相关统计数据,予以忽略^[2]。

1.3 核算方法

本研究采用的城镇污水处理厂温室气体核算方法综合郭盛杰等^[2]、Dong等^[8]的研究方法,并结合上海城镇污水处理厂实际运行数据和本地电网及CH₄排放因子确定。

1.3.1 CH₄直接排放量核算方法

CH₄直接排放量的核算公式如下:

$$E_{\text{CH}_4} = (\text{TOM}_{\text{in}} - \text{TOM}_{\text{ef}} - S \times a) \times \text{EF}_{\text{CH}_4} + \text{TOM}_{\text{ef}} \times \text{EN}_{\text{CH}_4} - R \quad (1)$$

式中: E_{CH_4} 为城镇污水处理厂CH₄直接排放量,kg/a; TOM_{in} 和 TOM_{ef} 分别为城镇污水处理厂年度进、出水有机物总量,以COD计,利用城镇排水统计年鉴数据计算得到,kg/a; S 为城镇污水处理厂年度干污泥产生量,参考城镇排水统计年鉴数据,kg/a; a 为城镇污水处理厂干污泥的有机质含量,以COD计,参考文献资料取值0.1 kg/kg^[2]; EF_{CH_4} 为城镇污水处理厂去除COD的CH₄排放因子,参考文献资料取值0.013 7 kg/kg^[9]; EN_{CH_4} 为城镇污水处理厂尾水排放COD的CH₄排放因子,参照IPCC推荐取值0.025 kg/kg; R 为城镇污水处理厂厌氧处理产生并回收再利用的CH₄量,由于上海地区基本没有回收再利用厌氧处理产生CH₄的设施,取值为0。

1.3.2 N₂O直接排放量核算方法

N₂O直接排放量的核算公式如下:

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = [(\text{TN}_{\text{in}} - \text{TN}_{\text{ef}}) \times \text{EF}_{\text{N}_2\text{O}} + \text{TN}_{\text{ef}} \times \text{EN}_{\text{N}_2\text{O}}] \times 44/28 \quad (2)$$

式中: $E_{\text{N}_2\text{O}}$ 为城镇污水处理厂N₂O直接排放量,kg/a; TN_{in} 和 TN_{ef} 分别为城镇污水处理厂进、出水总氮量,利用城镇排水统计年鉴数据计算得到,kg/a; $\text{EF}_{\text{N}_2\text{O}}$ 为城镇污水处理厂去除总氮的N₂O排放因子,参考文献资料取值0.035 kg/kg^[8]; $\text{EN}_{\text{N}_2\text{O}}$ 为城镇污水

处理厂尾水排放总氮的 N_2O 排放因子,参考文献资料取值 $0.005 \text{ kg/kg}^{[9]}$ 。

1.3.3 能耗类间接排放量核算方法

能耗类间接排放量的核算公式如下:

$$E_{CO_2} = E_e \times EF_{CO_2} \quad (3)$$

式中: E_{CO_2} 为城镇污水处理厂电耗产生的 CO_2 间接排放量, kg/a ; E_e 为城镇污水处理厂年度电力消耗量,参考城镇排水统计年鉴数据, $\text{kW}\cdot\text{h/a}$; EF_{CO_2} 为城镇污水处理厂单位电耗的 CO_2 排放因子,参考文献资料取值 $0.7035 \text{ kg/kg}^{[2]}$ 。

1.3.4 温室气体排放量核算方法

利用上述得到的各类温室气体排放量,上海城镇污水处理厂温室气体排放量核算公式如下:

$$E_t = E_{CH_4} \times 25 + E_{N_2O} \times 310 + E_{CO_2} \quad (4)$$

式中: E_t 为城镇污水处理厂温室气体排放量,以 CO_2 当量计, kg/a 。

2 结果与分析

2.1 城镇污水处理厂进出水水质及能耗特征

根据城镇排水统计年鉴,2015年上海50座城镇污水处理厂的實際处理量约为 $25 \times 10^8 \text{ m}^3$,日均处理量约为 $690 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。如图1所示,进水COD浓度最高为 624.0 mg/L 、最低为 75.2 mg/L 、平均为 309.9 mg/L , BOD_5 浓度最高为 271.0 mg/L 、最低为 50.5 mg/L 、平均为 134.5 mg/L ,氨氮浓度最高为 39.4 mg/L 、最低为 9.1 mg/L 、平均为 22.9 mg/L ;出水COD浓度最高为 69.0 mg/L 、最低为 16.3 mg/L 、平均为 31.0 mg/L , BOD_5 浓度最高为 15.0 mg/L 、最低为 1.0 mg/L 、平均为 6.3 mg/L ,氨氮浓度最高为 9.1 mg/L 、最低为 0.2 mg/L 、平均为 2.5 mg/L 。全市城镇污水处理厂的COD、 BOD_5 、氨氮总去除率分别达到90.2%、95.0%、83.1%,年累计用电量达到 $5.5 \times 10^8 \text{ kW}\cdot\text{h}$,单位污水处理电耗约为 $0.22 \text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$ 。

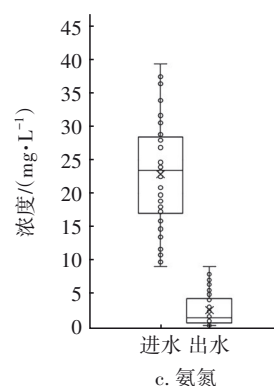
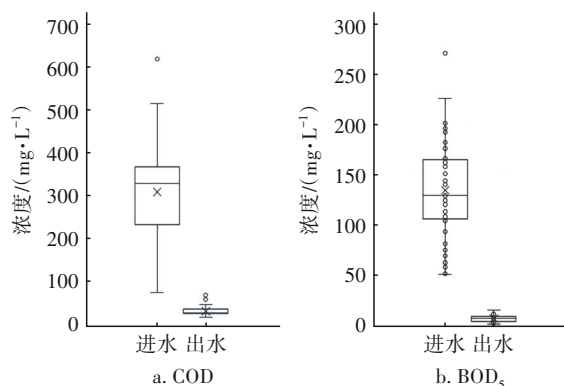
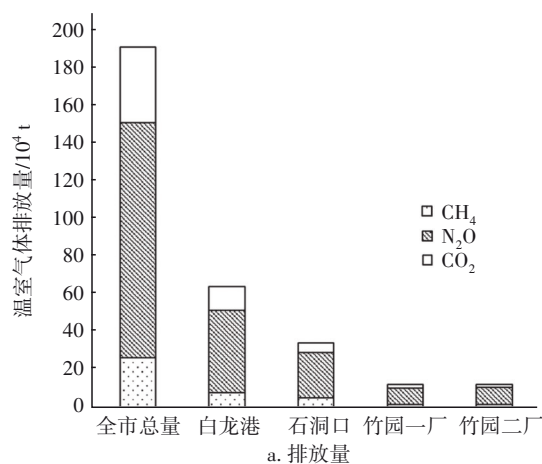


图1 上海城镇污水处理厂进、出水污染物浓度

Fig.1 Pollutants concentration in influent and effluent of urban wastewater treatment plants in Shanghai

2.2 城镇污水处理厂温室气体排放特征

上海城镇污水处理厂温室气体排放量核算结果见图2和图3。由图2(a)可知,全市污水处理厂温室气体年排放总量接近 $190 \times 10^4 \text{ t}$,其中 CH_4 直接排放、 N_2O 直接排放和能耗间接排放分别占14%、65%和21%, N_2O 的逸散是污水处理厂温室气体排放的最主要来源;白龙港、石洞口、竹园一厂和竹园二厂这4座污水厂的温室气体排放量相对较高,合计占全市污水处理厂温室气体排放总量的65%以上,其中白龙港污水厂的占比最高,达到1/3左右。由图2(b)可知,全市污水厂处理单位污水的温室气体排放强度为 0.75 kg/m^3 ,不同污水处理厂的温室气体排放强度差异较大,最高达到 1.54 kg/m^3 ,最低仅为 0.36 kg/m^3 ,算术平均值为 0.83 kg/m^3 ,中位值为 0.82 kg/m^3 。由图3可知,不同污水处理厂温室气体排放量中 CH_4 直接排放、 N_2O 直接排放和能耗间接排放的比例差异较大,其中能耗间接排放比例波动最大、变异系数达到45%以上, N_2O 直接排放比例波动最小、变异系数不到25%。



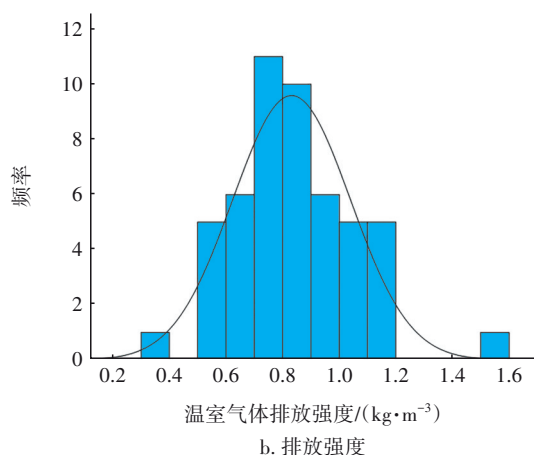


图2 上海城镇污水处理厂的温室气体排放量和排放强度
Fig.2 Greenhouse gas emission amounts and intensities of urban wastewater treatment plants in Shanghai

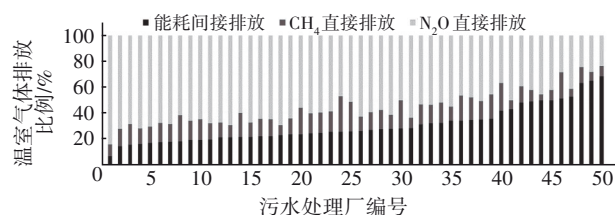


图3 上海城镇污水处理厂各类温室气体排放比例
Fig.3 Greenhouse gas emission proportions of urban wastewater treatment plants in Shanghai

2.3 城镇污水处理厂温室气体排放的影响因素

上海城镇污水处理厂各类处理工艺和执行排放标准的温室气体排放量比较如图4所示。

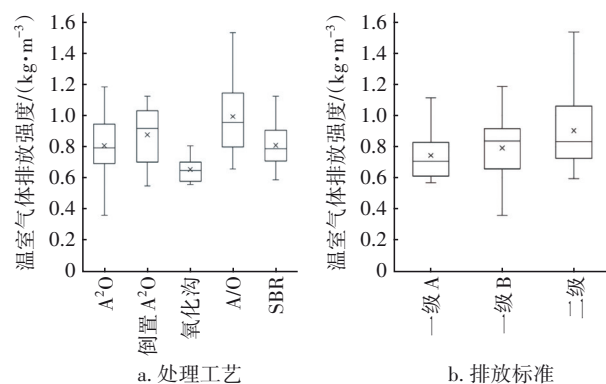


图4 上海城镇污水处理厂不同处理工艺和执行排放标准的温室气体排放强度

Fig.4 Greenhouse gas emission intensities of urban wastewater treatment plants in Shanghai with different treatment processes and pollutant discharge standards

由图4(a)可知,采用氧化沟工艺的污水厂处理单位污水的温室气体排放强度平均为 0.71 kg/m^3 ,显著低于采用其他工艺的污水处理厂($P < 0.05$),其

次是采用 A^2O 、SBR、倒置 A^2O 等工艺的污水处理厂,显著低于采用A/O工艺的污水处理厂($P < 0.05$)。由图4(b)可知,执行国家一级A排放标准的城镇污水厂处理单位污水的温室气体排放强度最低,其次是国家一级B排放标准,执行国家二级排放标准的最高,但三者无显著性差异($P > 0.05$)。此外,根据各城镇污水处理厂温室气体排放影响因素相关性分析结果(见表1),处理单位污水的温室气体排放强度与电耗呈极显著正相关($P < 0.01$)、与COD去除率呈显著正相关($P < 0.05$),而单位污水处理电耗与实际处理规模呈极显著负相关($P < 0.01$)。

表1 上海城镇污水处理厂温室气体排放影响因素相关性分析

Tab.1 Correlation analysis of impact factors for greenhouse gas emission of urban wastewater treatment plants in Shanghai

项 目	温室气体排放强度	实际处理规模	单位污水处理电耗	COD去除率	BOD ₅ 去除率	氨氮去除率
温室气体排放强度	1	-0.143	0.520**	0.268*	-0.207	-0.002
实际处理规模	-0.143	1	-0.260*	0.081	0.034	-0.276
单位污水处理电耗	0.520**	-0.260*	1	-0.069	-0.118	0.240
COD去除率	0.268*	0.081	-0.069	1	0.157	-0.185
BOD ₅ 去除率	-0.207	0.034	-0.118	0.157	1	0.029
氨氮去除率	-0.002	-0.276	0.240	-0.185	0.029	1

注: “*”表示在0.05水平上显著相关; “**”表示在0.01水平上显著相关。

3 讨论

3.1 城镇污水处理厂温室气体排放水平比较

国内外针对发达国家和我国其他地区城镇污水处理厂的温室气体排放情况已有较多研究。例如, Koutsou等^[10]在将污泥处置纳入核算范围但不包含尾水排放温室气体的情况下, 计算得到希腊城镇污水处理厂的温室气体排放强度高于 1 kg/m^3 ; Chang等^[11]研究了韩国废水回用系统的温室气体排放量, 带有废水回用的污水集中处理系统温室气体排放强度约为 $0.7 \sim 0.8 \text{ kg/m}^3$; Parravicini等^[12]核算得到奥地利典型污水厂处理单位污水的温室气体排放强度在 0.5 kg/m^3 左右; Hall等^[13]的研究结果显示, 澳大利亚部分地区集中污水处理厂的温室气体间接排放量就已达到 0.88 kg/m^3 。国内的郭盛杰等^[2]研究了全国及各省市城镇污水处理行业的温室

气体排放特征,在不考虑尾水排放的情况下,全国城镇污水处理厂的温室气体排放强度平均为 0.61 kg/m^3 ,一半的城镇污水处理厂温室气体排放强度分布在 $0.3\sim 0.8 \text{ kg/m}^3$;其中,上海城镇污水处理厂的温室气体排放量占全市排放总量的 $1\%\sim 1.5\%$ 左右,高于全国的平均比例和欧美发达国家的比例。

因此,上海全市城镇污水处理厂的温室气体排放强度总体水平接近发达国家水平,但从单座城镇污水处理厂的个体水平来看,大部分城镇污水处理厂的温室气体排放强度仍高于发达国家水平。究其原因,主要是上海白龙港、石洞口、竹园一厂和竹园二厂这4座处理规模较大的城镇污水处理厂,由于规模效应等因素导致温室气体排放强度相对较低,从而拉低了全市的总体水平;而且,由于目前上海所有城镇污水处理厂均已执行国家一级A排放标准,温室气体排放强度也有一定程度的降低。此外,上海全市城镇污水处理厂的温室气体排放量占比相对较高,这主要与上海市人口和产业密集导致污水处理量较大有关。

3.2 城镇污水处理厂温室气体核算方法探讨

除了《IPCC 国家温室气体清单指南》《省级温室气体清单编制指南》等行业清单方法以外,国内外在城镇污水处理厂温室气体排放核算方法方面也有一些研究,提出了基于不同核算系统边界、不同排放因子等影响因素的核算方法^[14-15]。但是,由于温室气体 CH_4 和 N_2O 的排放因子受气候、工艺、规模、管理等影响较大,本研究主要参考国内外区域性排放因子,核算方法和核算结果的局限性、差异性较大,而且由于上海很多城镇污水处理厂的污水池均已加盖并收集除臭,核算的 CH_4 和 N_2O 直接排放量有可能偏高。同时,受限于单座城镇污水处理厂运行参数、药剂消耗等统计数据的缺乏,对城镇污水处理厂厂级温室气体排放核算的完整性和准确性也受到影响,间接排放量的低估也是必然结果。

因此,在后续研究中,有必要针对区域、规模、工艺以及管理水平等多种影响因素,开展排放因子本地化研究,并结合精细化的厂级活动水平数据,形成城镇污水处理厂温室气体排放本地化核算方法,为城镇污水处理行业碳达峰、碳中和提供核算依据。

3.3 城镇污水处理厂温室气体减排路径浅析

在上海市力争2025年前实现碳达峰的背景下,上海城镇污水处理行业可通过提高污水处理综合能效、大力回收能源、全面推广清洁能源、优化污水处理工艺等措施,大幅降低能源消耗从而减少温室气体的间接排放,为全市 CO_2 排放达峰贡献力量;此外,作为 CH_4 和 N_2O 等非 CO_2 温室气体的重要释放源,上海城镇污水处理行业可进一步通过回收利用 CH_4 、改进生物脱氮工艺等措施,逐步降低非 CO_2 温室气体的直接排放,但目前针对污水处理过程中 CH_4 和 N_2O 逸散控制的研究仍较少,有待后续深入研究。而从远期来说,只有应用减污降碳协同增效的可持续污水处理新工艺,实现资源和能源的回收利用,使污水处理厂向资源、能源甚至水源工厂转变,污水处理行业才能为碳中和做出更大的贡献。

4 结论

① 在考虑城镇污水处理厂的污水处理本身(CH_4 和 N_2O 直接排放及能耗间接排放),不考虑污水收集及污泥脱水后处理与处置的情况下,上海城镇污水处理厂的温室气体排放总量约为 $190\times 10^4 \text{ t}$,处理单位污水的温室气体排放强度为 0.75 kg/m^3 。

② 采用氧化沟工艺的城镇污水处理厂的温室气体排放强度为 0.71 kg/m^3 ,显著低于采用其他工艺的污水处理厂($P<0.05$);温室气体排放强度与单位污水处理电耗呈极显著正相关($P<0.01$)、与COD去除率呈显著正相关($P<0.05$)。

③ 从上海全市城镇污水处理厂的总体水平来看,温室气体排放强度接近发达国家水平,但是从单座城镇污水处理厂的个体水平来看,大部分城镇污水处理厂的温室气体排放强度仍高于发达国家水平,在当前碳达峰、碳中和战略要求下,均有进一步减污降碳的空间。

参考文献:

- [1] United Nations Environment Programme. Emissions Gap Report 2020 [M]. Nairobi: UNEP, 2020.
- [2] 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 (in Chinese).
- [3] 蔡博峰, 朱松丽, 于胜民, 等. 《IPCC 2006年国家温室气体清单指南2019修订版》解读[J]. *环境工程*, 2019, 37(8): 1–11.
- CAI Bofeng, ZHU Songli, YU Shengmin, *et al.* The interpretation of 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(8): 1–11 (in Chinese).
- [4] 闫旭, 邱德志, 郭东丽, 等. 中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征[J]. *环境科学*, 2018, 39(3): 1256–1263.
- YAN Xu, QIU Dezhi, GUO Dongli, *et al.* Emission inventory of greenhouse gas from urban wastewater treatment plants and its temporal and spatial distribution in China [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(3): 1256–1263 (in Chinese).
- [5] 张程. 污水处理系统碳排放规律研究与量化评价[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- ZHANG Cheng. The Study on Quantitative Evaluation of Carbon Emission in Sewage Treatment System [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017 (in Chinese).
- [6] 鲍志远. 典型城市污水处理工艺温室气体排放特征及减排策略研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- BAO Zhiyuan. Study on Characteristics and Mitigation Strategies of Greenhouse Gas Emissions from Typical Domestic Wastewater Treatment Processes [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019 (in Chinese).
- [7] 王向阳. 污水处理碳足迹核算及环境综合影响评价研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
- WANG Xiangyang. Study on Calculation Carbon Footprint and Assessing the Total Environmental Impact of Wastewater Treatment [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019 (in Chinese).
- [8] 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.
- [9] 蔡博峰, 高庆先, 李中华, 等. 中国城市污水处理厂甲烷排放因子研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(4): 118–124.
- CAI Bofeng, GAO Qingxian, LI Zhonghua, *et al.* Study on the methane emission factors of wastewater treatment plants in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(4): 118–124 (in Chinese).
- [10] KOUTSOU O P, GATIDOU G, STASINAKIS A S. Domestic wastewater management in Greece: greenhouse gas emissions estimation at country scale [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 188: 851–859.
- [11] CHANG J, LEE W, YOON S. Energy consumptions and associated greenhouse gas emissions in operation phases of urban water reuse systems in Korea [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 141: 728–736.
- [12] PARRAVICINI V, SVARDAL K, KRAMPE J. Greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants [J]. *Energy Procedia*, 2016, 97: 246–253.
- [13] HALL M R, WEST J, SHERMAN B, *et al.* Long-term trends and opportunities for managing regional water supply and wastewater greenhouse gas emissions [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45: 5434–5440.
- [14] 马占云, 冯鹏, 高庆先, 等. 中国废水处理甲烷排放特征和减排潜力分析[J]. *气候变化研究进展*, 2015, 11(5): 343–352.
- MA Zhanyun, FENG Peng, GAO Qingxian, *et al.* CH₄ emissions and reduction potential in wastewater treatment of China [J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2015, 11(5): 343–352 (in Chinese).
- [15] 王亚宜, 周东, 赵伟, 等. 污水生物处理实际工艺中氧化亚氮的释放: 现状与挑战[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(5): 1079–1088.
- WANG Yayi, ZHOU Dong, ZHAO Wei, *et al.* Nitrous oxide emissions from biological wastewater treatment plants: current status and challenges [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(5): 1079–1088 (in Chinese).

作者简介: 钱晓雍(1981–), 男, 浙江湖州人, 博士, 高级工程师, 研究方向为水生态环境保护和污水资源化。

E-mail: qianxy@saes.sh.cn

收稿日期: 2021-10-03

修回日期: 2021-12-09

(编辑: 刘贵春)