

# 污水处理厂温室气体排放核算与减排路径研究

邱巨龙<sup>1</sup>, 刘树洋<sup>2</sup>, 王华<sup>3\*</sup>, 牛淮金<sup>1</sup>, 苏庆<sup>1</sup>, 张艳红<sup>2</sup>

(1. 江苏省工程咨询中心有限公司, 江苏 南京 210003; 2. 江苏省环境科学研究院, 江苏 南京 210036; 3. 江苏省生态环境厅, 江苏 南京 210036)

**摘要:**分析了污水处理厂温室气体排放源,以及现有核算方法的特点和不足,提出一种污水处理厂温室气体排放核算方法,核算范围包括污水处理系统废水处理环节的甲烷(CH<sub>4</sub>)和氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)直接排放,以及能耗、药耗隐含的间接排放。以江苏省某典型污水处理厂为例进行温室气体排放核算,结果表明,电力消耗是污水处理厂CO<sub>2</sub>排放的主要来源(占比53.85%),CH<sub>4</sub>排放占比为28.96%。基于此,从节能降碳、降耗增效和工艺优化3个方面提出污水处理厂温室气体减排路径,建议尽快组织制定统一的核算技术指南,开展重点污水处理厂温室气体排放监测试点。

**关键词:**温室气体;碳排放;核算方法;减排路径;污水处理厂

中图分类号:X322;X51 文献标志码:B 文章编号:1006-2009(2024)03-0083-05

## Study on Greenhouse Gas Emission Accounting and Emission Reduction Path in Wastewater Treatment Plants

QIU Julong<sup>1</sup>, LIU Shuyang<sup>2</sup>, WANG Hua<sup>3\*</sup>, NIU Huaijin<sup>1</sup>, SU Qing<sup>1</sup>, ZHANG Yanhong<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Engineering Consulting Center Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210003, China; 2. Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing, Jiangsu 210036, China; 3. Department of Ecology and Environment of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210036, China)

**Abstract:** This paper analyzed the sources of greenhouse gas (GHG) emissions from wastewater treatment plants (WWTPs), as well as the characteristics and shortcomings of existing accounting methods, and proposed an accounting method for GHG emissions from WWTPs. The accounting scope included the direct emissions of methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) in wastewater treatment process, and the indirect emissions of energy consumption and chemical consumption. Taking a typical WWTP in Jiangsu Province as a example, the accounting results showed that power consumption was the main source of CO<sub>2</sub> emissions from the WWTP (accounting for 53.85%), while CH<sub>4</sub> accounted for 28.96%. Therefore, it proposed to reduce GHG emissions from the aspects of energy saving, carbon reduction, consumption reduction, efficiency improvement and process optimization. It suggested to formulate unified accounting technical guidelines as soon as possible, and carry out pilot monitoring of GHGs emissions in key WWTPs.

**Key words:** Greenhouse gas; Carbon emission; Accounting method; Emission reduction path; Wastewater treatment plant

污染物和温室气体协同减排是推动“双碳”目标实现的重要抓手。污水处理厂是电能和化学品消耗大户,2008—2016年我国污水处理行业能源使用量年均增长6%<sup>[1]</sup>,在污染物降解转化过程中还大量产生和直接排放甲烷(CH<sub>4</sub>)、氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)等温室气体,是不可忽视的温室气体排放

收稿日期:2023-04-19;修订日期:2024-04-01

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(52200095);江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(重大科技示范)基金资助项目(BE2022861);江苏省生态环境政策引导类科研基金资助项目(2022031)

作者简介:邱巨龙(1988—),男,河南周口人,工程师,硕士,研究方向为应对气候变化和环境政策。

\*通信作者:王华 E-mail: 531281388@qq.com

源。当前,污水处理行业存在碳排放核算的边界和功能单元不统一,受地域、工艺、水质等因素影响较大等问题<sup>[2]</sup>,尚未建立统一精准的碳排放核算方法<sup>[3]</sup>,无法对污水处理厂碳排放开展科学评估,制约了国家和地方碳减排策略的制定与实施。今基于《省级温室气体清单编制指南(试行)》《城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体核算技术指南(试行)》《IPCC 2006年国家温室气体清单指南2019修订版》等,提出一种污水处理厂温室气体排放核算方法,为科学评估污水处理行业温室气体排放水平提供借鉴。

## 1 污水处理厂温室气体排放源与核算方法

### 1.1 污水处理厂温室气体排放源

污水处理厂的典型工艺为通过管网收集污水进行集中处理。污水进入处理后先经过一级处理,去除固体和悬浮物;再经过生物处理去除大部分有机物和氮磷,产生剩余污泥;为了达到出水标准,常常还采用三级处理进一步去除氮磷。其中污水处理的主体生物处理工艺除了传统的活性污泥法(CAS)外,还包括厌氧-好氧工艺(AO)、厌氧-缺氧-好氧活性污泥法(AAO)、氧化沟工艺、序批式活性污泥法(SBR)、膜生物反应器(MBR)、曝气生物滤池(BAF)、生物膜法等。

污水处理厂的温室气体排放包括直接排放和间接排放。直接排放主要是指污水经无氧处理或处置产生的CH<sub>4</sub>(有机物BOD或COD在厌氧环境去除过程中转化及脱水干污泥滞留厂界内产生的CH<sub>4</sub>)和N<sub>2</sub>O(含氮污染物TN经硝化或反硝化作用产生的N<sub>2</sub>O)排放;间接排放是指污水收集和4个处理阶段(预处理、生物处理、消毒和污泥处理)用电产生的内部二氧化碳(CO<sub>2</sub>)排放,以及生化反应过程中化学品使用、污水处理厂机械维修维护与管理产生的外部CO<sub>2</sub>排放<sup>[4]</sup>。

### 1.2 现有温室气体排放核算方法

(1)《省级温室气体清单编制指南(试行)》。该方法为区域内处理工业废水和生活污水产生的温室气体排放提供了核算依据,主要涉及CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放,废水处理的CO<sub>2</sub>排放是生物成因,未被纳入温室气体排放总量。该方法未核算污水处理过程中能源消耗和药剂使用产生的间接温室气体排放,且在核算N<sub>2</sub>O排放时通过人口、每人年均蛋白质的消费量(kg/a)和蛋白质中的氮含量

(kg/kg)进行估算,存在较大的不确定性。

(2)《工业其他行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》。该方法核算了工业企业采用厌氧工艺处理内部或外来工业废水产生的CH<sub>4</sub>排放,未考虑废水处理环节的N<sub>2</sub>O排放,以及能源消耗和药剂使用产生的间接温室气体排放。

(3)《城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体核算技术指南(试行)》。该方法核算了污水处理厂CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放。其中,CH<sub>4</sub>排放的核算范围包括污水处理系统去除COD的过程、污泥处理过程的排放量和污水处理厂CH<sub>4</sub>的回收量;N<sub>2</sub>O排放的核算范围包括污水处理系统去除TN产生的排放;间接排放虽然核算了污水处理环节电力消耗产生的CO<sub>2</sub>排放,但未考虑药剂消耗产生的间接温室气体排放。

(4)《污水处理厂低碳运行评价技术规范》(T/CAEPI 49—2022)。该方法以法人为边界核算了污水处理厂化石能源消耗产生的直接CO<sub>2</sub>排放,电力、热力和物料消耗产生的间接CO<sub>2</sub>排放,厌氧处理过程CH<sub>4</sub>的直接排放,以及生物处理过程N<sub>2</sub>O的排放。虽然核算范围比较全面,但化石燃料燃烧碳排放核算仅通过能源的标准煤量按统一排放因子计算,未考虑煤、油、气等碳排放因子的差异,电力和热力的碳排放因子也缺乏本地化。

### 1.3 污水处理厂温室气体排放核算方法

本研究确定的污水处理厂温室气体排放核算系统边界为污水处理自身,不考虑污水收集和污泥脱水后的处理与处置(此部分排放占比小)。核算范围包括污水处理厌氧过程产生的CH<sub>4</sub>排放、生物处理过程N<sub>2</sub>O的排放、运行过程中化石燃料燃烧产生的直接排放,以及电力、热力和药剂消耗产生的间接排放。在计算直接碳排放时,虽然《省级温室气体清单编制指南(试行)》《浙江省温室气体清单编制指南》(2022年修订版)和《广东省市县(区)级温室气体清单编制指南(试行)》均提出,污水中有机物总量包括通过污水处理厂处理系统的去除量和排入河湖水环境的有机物量两部分,但后者在本研究中不计入。

(1)污水处理厂温室气体排放量计算公式如下:

$$E_g = E_{N_2O} \times GWP_{N_2O} + E_{CH_4} \times GWP_{CH_4} + E_{化石燃料} + E_{电热} + E_{药剂} \quad (1)$$

式中: $E_g$ 为污水处理厂温室气体排放量,t; $E_{N_2O}$ 为

污水处理过程  $N_2O$  直接排放量,  $t$ ;  $E_{CH_4}$  为污水处理过程  $CH_4$  直接排放量,  $t$ ;  $E_{化石燃料}$  为化石燃料燃烧产生的  $CO_2$  排放量,  $t$ ;  $E_{电热}$  为外购电力热力消耗产生的  $CO_2$  排放量,  $t$ ;  $E_{药剂}$  为药剂消耗产生的  $CO_2$  排放量,  $t$ ;  $GWP_{N_2O}$  为  $N_2O$  全球增温潜势, 取值为 310;  $GWP_{CH_4}$  为  $CH_4$  全球增温潜势, 取值为 21。

(2)  $N_2O$  直接排放主要发生在污水生物处理单元, 计算公式如下:

$$E_{N_2O} = \frac{Q_{rb} \times (\rho_{rb} - \rho_{eb}) \times EF_{N_2O}}{1000} \times C_{N_2O/N_2} \quad (2)$$

式中:  $E_{N_2O}$  为全年  $N_2O$  直接排放量,  $kg$ ;  $Q_{rb}$  为污水生物处理单元全年进水量,  $m^3$ ;  $\rho_{rb}$  和  $\rho_{eb}$  分别为污水生物处理单元全年平均进水和出水 TN 质量浓度,  $mg/L$ ;  $EF_{N_2O}$  为废水中  $N_2O$  排放因子, 取值为  $0.005 \text{ kg/kg}^{[5]}$ ;  $C_{N_2O/N_2}$  为  $N_2O/N_2$  分子量之比, 取值为 44/28。

(3)  $CH_4$  直接排放主要发生在初沉池及生物处理等单元存在的厌氧过程, 计算公式如下:

$$E_{CH_4} = \left[ \frac{Q_{ra} \times (\rho_{ra} - \rho_{ea})}{1000} - m_{DS} \times P_v \times \rho_s \right] \times B_0 \times MCF - R_{CH_4} \times 0.717 \quad (3)$$

式中:  $E_{CH_4}$  为全年  $CH_4$  直接排放量,  $kg$ ;  $Q_{ra}$  为污水处理厂全年进水量,  $m^3$ ;  $\rho_{ra}$  和  $\rho_{ea}$  分别为污水处理厂全年平均进水和出水 COD 质量浓度,  $mg/L$ ;  $m_{DS}$  为污水处理厂全年产生的干污泥量,  $kg$ ;  $P_v$  为污水处理厂全年干污泥的有机分,  $\%$ ;  $\rho_s$  为污泥中有机物与 COD 的转化系数, 取值为  $1.42 \text{ kg/kg}^{[6]}$ ;  $B_0$  为厌氧过程降解单位 COD 时  $CH_4$  的产率系数, 取值为  $0.25 \text{ kg/kg}$ ;  $MCF$  为污水处理过程  $CH_4$  修正因子, 采用全国平均值 0.165;  $R_{CH_4}$  为污水处理厂全年  $CH_4$  回收量,  $m^3$ ; 0.717 为标准状况(1 个标准大气压和  $0^\circ C$ ) 下  $CH_4$  的密度,  $kg/m^3$ 。

(4) 化石燃料燃烧产生的  $CO_2$  排放量计算公式如下:

$$E_{化石燃料} = \sum AD_i \times CC_i \times OF_i \times \frac{44}{12} \quad (4)$$

式中:  $E_{化石燃料}$  为化石燃料燃烧产生的  $CO_2$  排放量,  $t$ ;  $AD_i$  为污水处理厂化石燃料  $i$  的年消耗量,  $GJ$ ;  $CC_i$  为化石燃料  $i$  的单位热值含碳量,  $t/GJ$ ;  $OF_i$  为化石燃料  $i$  的氧化率,  $\%$ 。化石燃料的特性参数以企业实测值为准, 若不具备实测条件, 则参考《工业其他行业企业温室气体排放核算方法与报告指南

(试行)》中的“常见化石燃料特性参数缺省值”。

(5) 污水处理净购入电量为污水处理厂生产运行过程中的外购电量, 不包括办公区和生活区的用电量。净购入电力隐含的  $CO_2$  排放量计算公式如下:

$$E_{电} = AD_{电} \times EF_{电} \quad (5)$$

式中:  $E_{电}$  为净购入电力隐含的  $CO_2$  排放量,  $kg$ ;  $AD_{电}$  为用于生产运行的外购电量,  $kW \cdot h$ ;  $EF_{电}$  为电力碳排放因子, 取值为  $0.5703 \text{ kg/(kW} \cdot h)$ 。

(6) 污水处理净购入热量为污水处理厂生产运行过程中的外购热量, 不包括办公区和生活区的用热量。净购入热力隐含的  $CO_2$  排放量计算公式如下:

$$E_{热} = AD_{热} \times EF_{热} \quad (6)$$

式中:  $E_{热}$  为净购入热力隐含的  $CO_2$  排放量,  $t$ ;  $AD_{热}$  为用于生产运行的外购热量,  $GJ$ ;  $EF_{热}$  为热力  $CO_2$  排放因子, 取值为  $0.11 \text{ t/GJ}$ 。

(7) 物耗为污水处理厂生产运行过程中消耗的混凝剂、絮凝剂、碳源、消毒剂、清洗剂等化学药剂。物耗碳排放量计算公式如下:

$$E_{药剂} = \sum AD_i \times EF_i \quad (7)$$

式中:  $E_{药剂}$  为全年化学药剂消耗产生的  $CO_2$  排放量,  $t$ ;  $AD_i$  为第  $i$  种化学药剂的消耗量,  $t$ ;  $EF_i$  为第  $i$  种化学药剂的  $CO_2$  排放因子,  $t/t$ 。碱、氢氧化钠(500 g/L 溶液)、甲醇、聚合氯化铝(PAC)、硫酸铝、聚丙烯酰胺(PAM)、六水三氯化铁、石灰、其他絮凝剂、次氯酸钠(15%溶液)、液氯、臭氧(液)、双氧水(50%溶液)、其他消毒剂、其他药剂的  $CO_2$  排放因子分别为 1.74 t/t、1.12 t/t、1.54 t/t、1.62 t/t、0.50 t/t、1.50 t/t、2.71 t/t、0.68 t/t、2.50 t/t、0.92 t/t、2.00 t/t、8.01 t/t、1.14 t/t、1.40 t/t、1.60 t/t。

## 2 污水处理厂温室气体排放核算案例

### 2.1 案例概况

以江苏省某典型集中式污水处理厂为例, 2021 年污水年处理量为 1435 万  $t$ , 生物处理单元全年平均进水和出水 TN 质量浓度分别为 24.2  $mg/L$  和 5.39  $mg/L$ , 全年平均进水和出水 COD 质量浓度分别为 183.2  $mg/L$  和 19  $mg/L$ , 年产生干污泥量为 1625.8  $t$ , 干污泥有机分含量约为 30%。污水处理厂各工艺设备运行稳定, 无



CH<sub>4</sub> 回收利用,污水处理过程不消耗化石燃料,各原辅材料和药剂的运输均由供应单位负责,污泥脱水后外运处置,不需要外购热力,污水处理工艺年净购入电力消耗为 470 万 kW·h,每年消耗醋酸钠 92 t、聚丙烯酰胺 34 t。

## 2.2 碳排放核算

按照上述核算方法,该污水处理厂运行过程中的温室气体排放情况见表 1。

表 1 污水处理厂温室气体排放情况 t/a  
Table 1 GHG emissions from the WWTP t/a

排放形式	排放类别	排放量	CO <sub>2</sub> 当量排放值
直接排放	CH <sub>4</sub> 排放	68.63	1 441.16
	N <sub>2</sub> O 排放	2.12	657.46
间接排放	电力隐含 CO <sub>2</sub> 排放	2 680.41	2 680.41
	药剂消耗 CO <sub>2</sub> 排放	198.2	198.2

根据核算结果,该污水处理厂 CO<sub>2</sub> 当量排放值为 4 977.23 t/a,其中,电力隐含 CO<sub>2</sub> 排放占比最高,为 53.85%,其余依次为 CH<sub>4</sub> 排放占比 28.96%,N<sub>2</sub>O 排放占比 13.21%,药剂消耗 CO<sub>2</sub> 排放占比 3.98%。由此可见,电力为该污水处理厂最主要的温室气体排放源,与蒋富海等<sup>[7]</sup>的研究结论基本一致。郭盛杰等<sup>[8]</sup>分析得出,我国城镇污水处理厂的 CO<sub>2</sub> 排放强度多分布在 0.3 kg/m<sup>3</sup> ~ 0.8 kg/m<sup>3</sup> 范围(均值为 0.612 kg/m<sup>3</sup>)。该污水处理厂处理单位污水的碳排放强度为 0.35 kg/m<sup>3</sup>,低于均值水平。其单位污水处理电耗为 0.33 kW·h/m<sup>3</sup>,略高于行业相近规模污水处理厂的平均水平(0.31 kW·h/m<sup>3</sup>)<sup>[9]</sup>,高于上海城镇污水处理厂平均单位污水处理电耗(0.22 kW·h/m<sup>3</sup>)<sup>[10]</sup>。

## 3 污水处理厂温室气体减排路径

根据《2021 年度江苏省环境统计数据》,该省共有污水处理厂 861 个,其中,城镇污水处理厂 688 个,工业废水集中处理厂 163 个,农村集中式污水处理设施 4 个,其他污水处理设施 6 个,污水实际处理量 64.56 亿 t。在污水处理过程中,去除 COD 155.41 万 t、TN 15.75 万 t。按照上述计算方法,暂不考虑处理过程中产生的干污泥量和甲烷回收量,江苏省集中式污水处理设施污水处理过程中 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量分别为 6.41 万 t 和 0.12 万 t。因无法获取电力和药剂使用量,按照单位污水处理电耗

0.33 kW·h/m<sup>3</sup>、药剂消耗 CO<sub>2</sub> 排放占比 4% 估算,2021 年污水处理厂累计排放温室气体约 307 万 t,占全省温室气体排放总量的 0.33% 左右。

从以上分析可知,购入电力是污水处理厂碳排放的主要来源,也是碳减排的核心环节。可以通过精密监控仪器、更新曝气系统和充氧方式等途径,提高单位碳排放的污水处理能力<sup>[11-12]</sup>。

(1) 节能降碳。污水处理厂的主要耗电大功率动力设备为风机、水泵、搅拌设备。保持水泵高液位运行,在满足生化工艺处理需求的基础上降低回流比、风机出口风压或供气量,搅拌设备安装变频器以优化运行功率,可以有效降低单位污水处理电耗<sup>[7]</sup>。此外,还可以通过增设光伏、风电等方式,提高污水处理厂清洁能源使用比例。

(2) 降耗增效。在生化反应单元统筹协调脱氮与除磷,开展碳源效能评估、质量控制与质量分析(QC/QA)及实验室与生产线的技术验证,提高内外碳源的利用效率,达到降耗的目的<sup>[13]</sup>。

(3) 工艺优化。CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放占温室气体排放总量的 40% 左右,在污水处理厂碳减排中至关重要。应解析 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 的源汇规律,以及关键控制参数对脱氮与去除 COD 效能、气态 N<sub>2</sub>O 逸散排放和溶解性 N<sub>2</sub>O 去除的影响,确定协同脱氮降碳控制策略<sup>[14]</sup>。钱晓雍等<sup>[10]</sup>研究表明,采用氧化沟工艺的污水处理厂,其处理单位污水的温室气体排放强度显著低于采用其他工艺的污水处理厂;采用 A<sup>2</sup>O、SBR、倒置 A<sup>2</sup>O 等工艺的污水处理厂,其处理单位污水的温室气体排放强度显著低于采用 AO 工艺的污水处理厂。肖飞等<sup>[15]</sup>研究表明,碳氮比(C/N)、有机负荷(F/M)、内回流比(R)对脱氮性能的影响逐渐减弱,当 C/N 为 7.45、R 为 52.61%、F/M 为 0.10 d<sup>-1</sup> 时,系统脱氮效果最佳。潘江等<sup>[16]</sup>研究表明,采用连续曝气 SBR 反应器可以实现污泥的快速颗粒化,具有良好的脱氮除碳性能,且其提供的环境有助于不同功能菌群的优势富集,实现反应器好氧同步脱氮除碳。

## 4 结语

污水处理厂温室气体排放核算是污水处理领域减污降碳协同增效的前提和基础。基于现有研究成果,提出一种污水处理厂温室气体排放核算方法,核算范围包括污水处理系统废水处理环节的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 直接排放,以及能耗、药耗隐含的间接

排放,暂不考虑污水收集和污泥脱水后的处理与处置单元的温室气体排放。通过实地调研,核算了江苏省某典型污水处理厂温室气体排放量,结果表明,电力消耗是污水处理厂 CO<sub>2</sub> 排放的主要来源(占比 53.85%),CH<sub>4</sub> 排放占比为 28.96%。建议重点关注污水处理厂的能耗和温室气体排放水平,持续推进节能减碳。

目前我国尚无统一的污水处理厂温室气体排放核算技术指南,不同核算方法中排放因子的取值存在较大的不确定性,个别关键排放因子甚至存在量级差异,不利于污水处理厂减污降碳工作的开展。建议国家和省级管理部门尽快组织制定统一的温室气体排放核算技术指南,指导污水处理厂将碳统计核算纳入环境统计,开展重点污水处理厂温室气体排放监测试点。

#### [参考文献]

- [1] NIU K Y, WU J, QI L, et al. Energy intensity of wastewater treatment plants and influencing factors in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 670: 961-970.
- [2] 杨庆,王亚鑫,曹效鑫,等. 污水处理碳中和运行技术研究进展[J]. *北京工业大学学报*, 2022, 48(3): 292-305.
- [3] CAI B M, LIU B B, ZHANG B. Evolution of Chinese urban household's water footprint[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 208: 1-10.
- [4] SU Q, DAI H C, XIE S Y, et al. Water-energy-carbon nexus: Greenhouse gas emissions from integrated urban drainage systems in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(5): 2093-2104.
- [5] 生态环境部办公厅. 关于征求《城镇污水处理厂污染物去除
- 协同控制温室气体核算技术指南(试行)(征求意见稿)》意见的函[EB/OL]. (2018-04-08)[2023-03-15]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/201804/t20180410\\_629682.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/201804/t20180410_629682.html).
- [6] 中国环境保护产业协会. 污水处理厂低碳运行评价技术规范: T/CAEPI 49—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [7] 蒋富海,王琴,张显忠,等. 城镇污水处理厂碳排放核算及减碳案例分析[J]. *给水排水*, 2023, 59(2): 42-49.
- [8] 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, 55(4): 56-62.
- [9] 胡洪营. 中国城镇污水处理与再生利用发展报告(1978—2020)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 63-69.
- [10] 钱晓雅,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.
- [11] CHOW C W K, LIU J X, LI L Y, et al. Development of smart data analytics tools to support wastewater treatment plant operation[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2018, 177: 140-150.
- [12] 马博雅,孙立坤,杨春维. 碳中和背景下我国污水处理技术思考[J]. *应用化工*, 2022, 51(10): 2997-3000.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 城乡排水工程项目规范: GB 55027—2022[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [14] 刘昊. 低碳绿色措施在污水处理技术中的应用[J]. *水电站设计*, 2022, 38(3): 87-91.
- [15] 肖飞,董文明,王维红. 响应面法用于优化污水厂脱氮工艺的研究[J]. *环境监测管理与技术*, 2021, 33(6): 52-55.
- [16] 潘江,肖芃颖,姚源,等. 连续曝气 SBR 快速培养 AGS 及同步脱氮除碳特性分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2021, 33(3): 60-63.
- 本栏目编辑 姚朝英 吴珊 刘罗
- [19] 苏胜齐,姚维志. 沉水植物与环境关系评述[J]. *农业环境科学学报*, 2002, 21(6): 570-573.
- [20] 张欣,卢学强,李玉鑫,等. 菹草对普通小球藻和铜绿微囊藻的化感作用[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(7): 68-73.
- [21] 曹响,王国祥. 冬季菹草对悬浮泥沙的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(1): 54-56.
- [22] 孙文祥,许飞,魏文志. 高邮湖生态修复区渔业资源恢复效果评价[J]. *水产养殖*, 2020, 41(1): 64-67.
- [23] 王妹,段登选,杜兴华,等. 草鱼放养密度对南四湖菹草的治理效果[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(16): 4234-4236.
- [24] 王晓平,王玉兵,杨桂军,等. 不同鱼类对沉水植物生长的影响[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(6): 1354-1360.
- [25] JONES R C, WALT K, ADAMS M S. Phytoplankton as a factor in the decline of the submersed macrophyte *Myriophyllum spicatum* L. in Lake Wingra, Wisconsin, U. S. A. [J]. *Hydrobiologia*, 1983, 107(3): 213-219.

(上接第 82 页)

- [13] FU C J, HE B Y, ZHOU Y D, et al. Remote sensing monitoring of changes in lake aquatic vegetation before and after the removal of the fence based on Sentinel-2: A case study in Lake Futou, Hubei Province[J]. *Sustainability*, 2022, 14(19): 12478.
- [14] 宋洁,梅肖乐,王鑫洋,等. 高邮湖鱼类群落结构特征[J]. *淡水渔业*, 2022, 52(1): 37-44.
- [15] 蔡平,刘荣坤,高鸣远,等. 2009—2021 年高邮湖水质时空变化与驱动因素[J]. *江苏水利*, 2023, 27(5): 4-9.
- [16] 田翠翠,郭传波,吴幸强. 高邮湖沉水植物分布格局及其与环境因子的关系[J]. *水生生物学报*, 2019, 43(2): 423-430.
- [17] 吴志杰,董世元,何炜琪,等. 基于特征选择和机器学习的阳澄湖叶绿素 a 遥感反演研究[J]. *环境监测管理与技术*, 2022, 34(1): 27-32.
- [18] 苏胜齐,沈益绿,唐洪玉,等. 温度光照和 pH 对菹草光合作用的影响[J]. *西南农业大学学报*, 2001, 23(6): 532-534.