

基于多光谱遥感技术的高邮湖茳草时空演变及原因分析

王厚俊¹, 戴源^{1,2}, 陈宇洁¹, 张开源¹, 高乾³, 白爽³

(1. 江苏省扬州环境监测中心, 江苏 扬州 225000; 2. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210044; 3. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094)

摘要: 为了解高邮湖优势沉水植物茳草剧烈变化的原因及其时空演变对区域水环境的影响, 利用2019—2023年长时序多光谱卫星遥感影像, 结合现场和水质自动站监测, 对高邮湖茳草与水质开展长期观测。结果显示, 茳草的生长与水温、浊度等环境因子密切相关, 其在生长期对水质具有净化作用, 而在衰退期则会产生大量污染物; 高邮湖的茳草盖度由2020年的65.5%下降至2023年的5.9%, 对区域水质、生物多样性和生态质量指数产生不利影响; 茳草的消失与水位变化、藻类影响、鱼类数量及其优势种变化密切相关, 高邮湖存在由草型湖泊向藻型湖泊转化的趋势。

关键词: 茳草; 时空演变; 多光谱遥感; 环境因子; 浅水湖泊

中图分类号: X524; X87

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2024)03-0078-05

Spatiotemporal Evolution and Cause Analysis of *Potamogeton crispus* L. in Gaoyou Lake Based on Multispectral Remote Sensing Technology

WANG Houjun¹, DAI Yuan^{1,2}, CHEN Yujie¹, ZHANG Kaiyuan¹, GAO Qian³, BAI Shuang³

(1. Jiangsu Yangzhou Environmental Monitoring Center, Yangzhou, Jiangsu 225000, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China; 3. Satellite Application Center for Ecology and Environment, MEE, Beijing 100094, China)

Abstract: Long time series multi-spectral satellite remote sensing, field monitoring and automatic water quality monitoring were used to carry out long-term observation of *Potamogeton crispus* L. and water quality in Gaoyou Lake from 2019 to 2023 to understand the causes of drastic changes of *Potamogeton crispus* L., the dominant submerged plant in the lake, and the impact of its spatiotemporal evolution on regional water environment. The results indicated that the growth of *Potamogeton crispus* L. was closely related to water temperature, turbidity and other environmental factors. *Potamogeton crispus* L. could purify water quality during its growing period, while it would produce a large amount of pollutants during its declining period. The coverage of *Potamogeton crispus* L. in Gaoyou Lake decreased from 65.5% in 2020 to 5.9% in 2023, adversely affecting regional water quality, biodiversity, and ecological quality index. The disappearance of *Potamogeton crispus* L. was closely related to the changes in water level, the impact of algae, the number of fish and the changes in dominant fish species. Gaoyou Lake had a tendency of transforming from macrophytic lake to algal lake.

Key words: *Potamogeton crispus* L.; Spatial-temporal evolution; Multispectral remote sensing; Environmental factors; Shallow lake

内陆湖泊水生植被常被分为挺水植物、漂浮植物、浮叶植物和沉水植物, 其中沉水植物 (Submerged Aquatic Vegetation, SAV) 与水体透明度、水深和富营养化紧密相关, 其生物量通常被认为是评

收稿日期: 2024-01-02; 修订日期: 2024-04-10

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (2021YFB390110503); 扬州市科学技术局基金资助项目 (YZ2022073)

作者简介: 王厚俊 (1965—), 男, 江苏泰州人, 高级工程师, 硕士, 主要从事生态环境监测工作。

价内陆浅水湖生态系统质量的关键性指标^[1-6]。菹草(*Potamogeton crispus* L.)是一种多年生沉水植物,属于眼子菜科眼子菜属^[7-9]。适量的菹草对水质有一定的净化作用,而大范围和高密度的菹草则会降低水体流动性^[8],其快速衰退和腐烂还会释放氮、磷等营养物质,消耗水中大量氧气,对水生态环境造成不利影响。因此,识别和监测菹草的时空变化对于湖泊生态系统保护和管理具有重要意义。传统的监测手段主要依赖人工实地调查,样本采集效率低、成本高,监测范围小、代表性差^[4-5]。多光谱卫星遥感技术具有效率高、覆盖广和成本低等特点,能够通过不同波段的组合精确提取信息^[5,10-13]。

高邮湖地处江淮生态大走廊核心区^[14],近年来,受周边渔业开发和生产生活废水影响,水体呈轻度富营养化^[15],沉水植物群落结构日趋简单化,菹草逐渐成为单优种群^[16]。然而,2021年以来高邮湖中的菹草突然大面积消失,在部分湖区几乎绝迹。为了解高邮湖菹草剧烈变化原因及其时空演变对区域水环境的影响,利用2019—2023年长时序多光谱卫星遥感影像,结合现场和水质自动站监测,对高邮湖菹草与水质开展长期观测,以期降低中小型浅水湖泊生态环境风险与保障区域生态系统健康发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

高邮湖(E119°06′~E119°25′, N32°42′~N33°41′)位于江苏省中部、安徽省东部,是江苏省第三大、全国第六大淡水湖,总面积760.67 km²,正常蓄水位5.7 m~5.9 m,水深1.2 m~1.8 m,属浅水型湖泊,具有渔业生产、供水、蓄水、泄洪排涝等功能。高邮湖南北连接宝应湖和邵伯湖,淮河入江水道贯穿而过,其来水量占总入湖水量的95%,是典型的过水性湖泊。频繁的水体交换虽然限制了藻类生长,但较适宜水草生存,使高邮湖具有草型湖泊属性。

1.2 现场监测

研究期间每年4—8月利用水质监测船在高邮湖开展现场巡查,巡查点位共34个(见图1)。在每个巡查点使用手持GPS设备记录位置和观测点的菹草生长状况,在船只无法到达的围网养殖区通过无人机现场观测,同时利用高邮湖湖心水质自动站开展长期水质监测。现场巡查发现,2019年和2020年高邮湖全湖除固定航道外几乎都有菹草分

布,超过28个巡查点观测到菹草;2021年菹草大面积减少,仅有7个巡查点观测到菹草;2022年菹草分布面积略有增加,能观测到菹草的巡查点有16个;2023年全湖能观测到菹草的点位下降至6个。

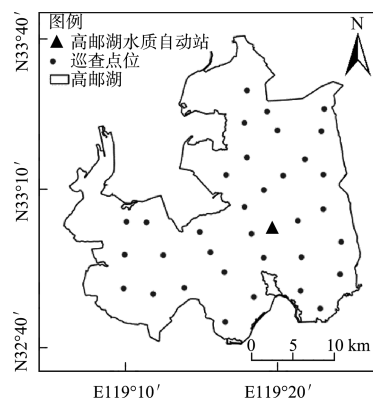


图1 高邮湖观测点位

Fig. 1 Observation sites in Gaoyou Lake

1.3 遥感影像获取与处理

哨兵2号(Sentinel-2)卫星覆盖近红外到短波红外光谱波段,幅宽达290 km,空间分辨率为10 m~60 m^[17]。通过Google Earth Engine(GEE)平台收集并处理2019—2023年覆盖高邮湖地区的Sentinel-2 MSI影像372景。利用影像QA60波段中的Bit10和Bit11对云层进行掩膜处理,筛选受到云层影响的像元,并对获得的影像进行辐射校正、正射校正和大气校正等一系列预处理,建立以5 d为间隔的时间序列遥感影像集合。

1.4 菹草群落遥感提取方法

利用归一化植被指数(NDVI)和改进归一化水体指数(MNDWI)提取沉水植物(菹草)。通常健康植被的光谱特征是在红色波段具有较高吸收和较低反射,在近红外波段反射率急剧上升,形成“红边”现象。NDVI可将植被像元从水和土像元中分离,反映植被生长状态与覆盖度变化;MNDWI可以较好地地区分水体与建筑等地物,常被用来提取遥感影像中的水体信息。其计算公式分别为:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (1)$$

$$MNDWI = \frac{\rho_{green} - \rho_{swir}}{\rho_{green} + \rho_{swir}} \quad (2)$$

式中: ρ_{nir} 、 ρ_{red} 、 ρ_{green} 和 ρ_{swir} 分别为近红外、红色、绿色和短波红外波段的反射率。

沉水植物像元提取分为两个步骤:第一步,利用 $MNDWI > 0.2$ 提取沉水植物与水体区域;第二步,利用 $NDVI > 0$ 将沉水植物区域与一般水体加以区分,最终得到沉水植物像元的分布情况^[5]。对每景菹草像元的分布情况叠加统计,得到2019—2023年高邮湖菹草生长分布图。为表征高邮湖菹草生长和分布状况,将 SAV 指数定义为菹草像元数量与第一步获取的水体像元数的比值,该值等效于区域菹草覆盖面积占比(盖度)。

2 结果与讨论

2.1 高邮湖菹草时空演变特征

2.1.1 高邮湖菹草分布状况

高邮湖菹草分布状况分别见图2(a)—(e)。2019年和2020年高邮湖菹草最大覆盖面积分别为451 km²和498 km²(占比分别为59.3%和65.5%),占据了全湖50%以上的水域;2021年菹草覆盖面积急剧下降至84 km²(占比为11.0%),仅分布在湖区周边围网区域;2022年菹草覆盖面积上升至210 km²(占比为27.6%),主要集中在湖区东侧;2023年菹草覆盖面积再次大幅下降至45 km²(占比为5.9%),仅零星分布在湖区北部围网养殖区附近。高邮湖菹草遥感提取结果与现场同步观测结果基本一致,直观反映了2021年以来高邮湖沉水植物大面积减少。

2.1.2 高邮湖菹草生长特征

为厘清高邮湖菹草生长周期及其制约因素,利用菹草长势较好年份(2019—2020年)遥感影像,计算并分析 SAV 指数月度变化趋势。结果表明,与苏胜齐等^[18]在实验室开展的温度对菹草生长影响的研究结论基本一致,每年3月(水温约10℃)高邮湖平均 SAV 指数迅速增加,5月(水温约22℃)达到峰值,之后随着水温升高 SAV 指数

迅速衰减,7月(水温约28℃)到达低值拐点。说明菹草的耐高温能力较弱,适宜生长水温为10℃~22℃,水温超过22℃会停止生长,水温达到28℃即开始衰败死亡。在菹草减少年份(2021—2023年),虽然 SVA 指数变化趋势与长势较好年份相似,但其数值显著降低。

2.1.3 菹草盖度与环境因子的关系

利用高邮湖湖心水质自动站监测数据,分析菹草长势较好年份(2019—2020年)和菹草减少年份(2021—2023年)环境因子月度变化趋势,分别见图3(a)—(f)(图中灰色区域为菹草生命周期)。由图3可见,在长势较好年份,从菹草生长初期至旺发期(3—5月),水中 TN、TP、浊度及藻密度基本呈下降趋势,并在5月达到较低水平。表明菹草在生长期能通过根系和枝叶吸收底质和水体中的氮、磷元素,降低水体浊度,抑制藻类生长,发挥净化作用^[19]。在菹草衰退期(5—7月),上述水质指标均明显上升,并在7月达到峰值,说明菹草的大规模植株死亡和分解会释放大量的氮、磷、有机物等营养物质,导致水中 TN、TP、I_{Mn}、浊度及藻密度显著上升,湖泊富营养化程度加剧^[9]。8—9月为高邮湖丰水期,大量外水汇入导致上述指标在此期间有所下降。在随后的冬春控制蓄水期,湖中污染物积累,浓度逐渐升高。值得注意的是,各项环境因子数值在菹草减少年份多高于长势较好年份,且变化趋势不同,凸显了菹草在不同生长阶段对水生态环境的影响及其对水体污染的净化作用。

对2019—2023年高邮湖约1700组水环境因子监测结果进行相关性分析,结果表明,藻密度与 TP、浊度、I_{Mn} 呈显著正相关,SAV 指数与藻密度、浊度、TN、TP、DO、电导率呈负相关,与田翠翠等^[16]的研究结论一致。由此表明,沉水植物丰茂的湖泊(草型湖泊)比藻类丰度较大的湖泊(藻型

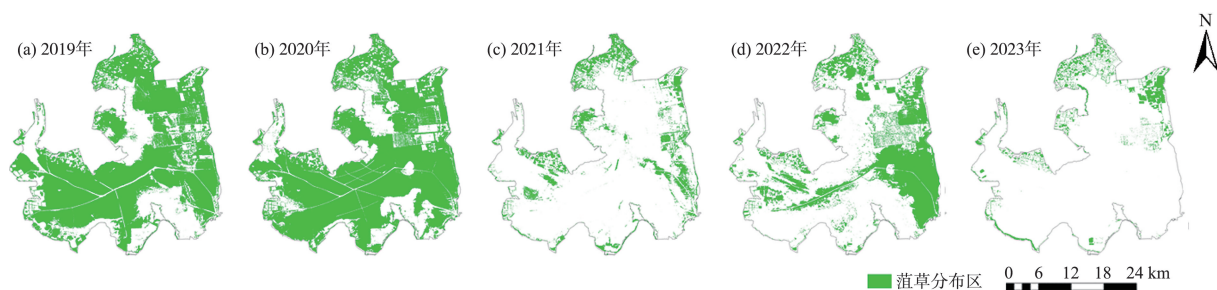


图2 2019—2023年高邮湖菹草分布状况

Fig. 2 Distribution of *Potamogeton crispus* L. in Gaoyou Lake from 2019 to 2023

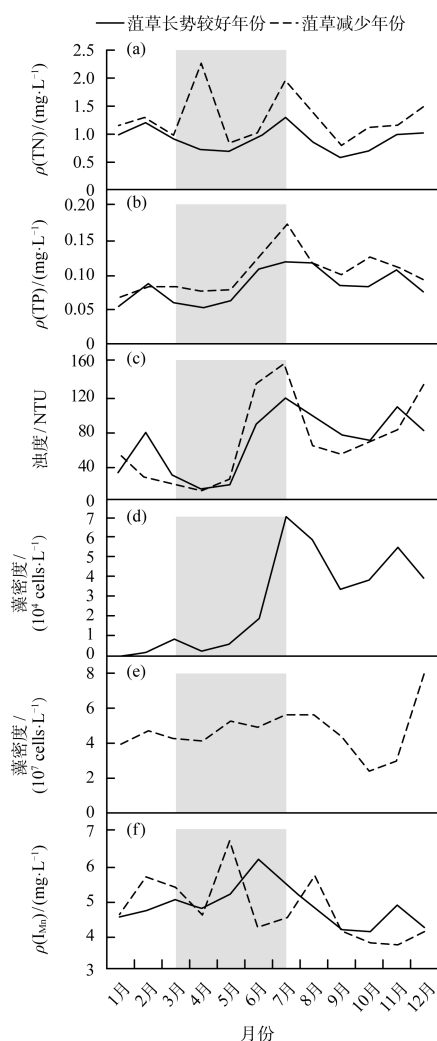


图 3 高邮湖水环境因子月度变化趋势

Fig. 3 Monthly variation of water environmental factors in Gaoyou Lake

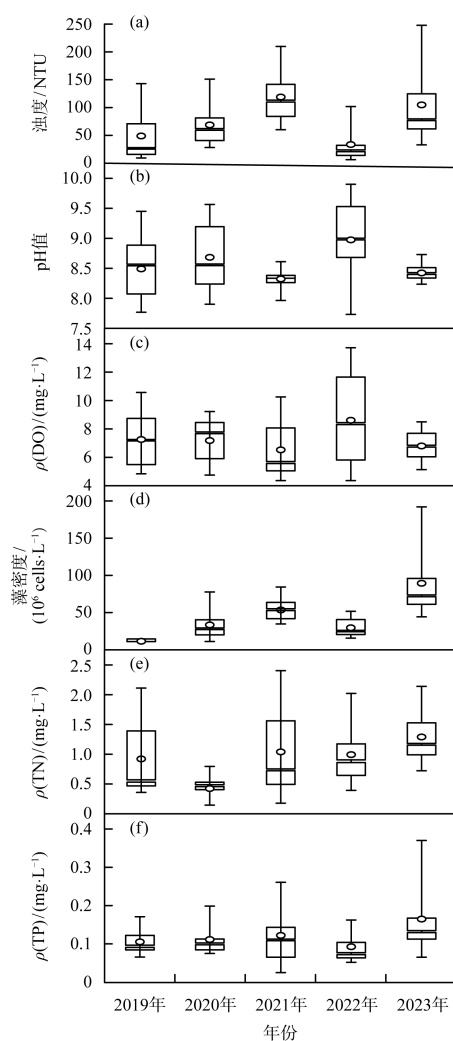


图 4 高邮湖水环境因子年度变化趋势

Fig. 4 Annual variation of water environmental factors in Gaoyou Lake

湖泊)具有更好的水质环境。SAV 指数与藻密度呈负相关揭示了茳草与藻类之间存在竞争关系,可能是因为茳草会占据光照和营养并产生化感物质,在一定程度上抑制了浮游藻类的生长^[20]。

2.1.4 茳草消失与区域水质变化

利用 2019—2023 年高邮湖湖心水质自动站监测数据,分析水环境因子年度变化趋势,分别见图 4(a)—(f)。由图 4 可见,与有茳草年份(2019 年、2020 年、2022 年)相比,茳草消失年份(2021 年和 2023 年)水体具有较高的 TN、TP、浊度和藻密度,以及较低的 DO 和 pH 值。由此说明,茳草大量减少会导致水体中氮、磷营养盐浓度上升,加快湖体富营养化进程^[9];茳草在生长期的光合作用会大量消耗水中 CO₂,导致水体 pH 值升高^[18];茳草具

有一定的消浪作用,有利于保持小颗粒底质稳定性,增加碎屑沉积量,减少底质扰动,从而降低水体浊度^[21];茳草在生长期具有较高的光合产氧速率,其大量消失会导致水中 DO 浓度下降^[19]。

2.2 茳草消失的驱动因素分析

根据江苏省长江流域禁捕退捕工作实施方案,自 2020 年 10 月 10 日起高邮湖停止所有捕捞作业行为,禁渔期为 10 a。近期调查结果表明,禁渔措施使高邮湖渔业潜力及鱼类数量呈显著上升趋势,鲫和鲤等成为鱼类优势种群^[14,22]。相关研究表明,富营养湖泊中鱼类群落结构的改变对湖泊生态系统的相对稳定具有决定性作用,草鱼等草食性鱼类可通过摄食作用破坏茳草殖芽和幼苗^[23];鲤、鲫等底层生活鱼类会扰动底质,不利于沉水植物的定

植^[24]。基于以上分析,推测2021—2023年高邮湖菹草大面积消失可能与湖区鱼类尤其是鲤、鲫等鱼类数量上涨引发的底层水体强烈干扰相关。

沉水植物通常生长在水深约2 m~3 m的浅水水域,水位过高会造成水下光照不足,不但抑制水生植物种子的萌发,还导致幼苗无法正常生长和发育^[18]。2020年夏秋季,受淮河北游持续性降雨和洪水影响,高邮湖水位持续超过8.0 m,为治淮工程竣工以来的最高水位,导致秋冬季高邮湖水位和浊度均高于往年,阻碍了底层水体的自然光照,降低了殖芽发芽率和成活率。此外,较大的过水量使高邮湖短时间内流量剧烈波动,形成湖流,造成大量菹草殖芽脱离底质并被冲刷至下游,导致2021年菹草大面积消失。

湖泊内沉水植物与浮游藻类之间存在争夺营养、光照的竞争关系。由图4可知,2021年和2023年的藻密度是2020年和2022年的两到三倍。一方面高邮湖菹草的消失为浮游藻类提供了大量的营养物质,导致湖体藻类密度大幅提高;另一方面,大量的藻类会降低水体透明度,附着在植物叶片上的藻类会削弱到达植物表面的光照和营养物浓度,藻类代谢产物还会抑制沉水植物的光合作用,进一步破坏其生存条件^[25]。受上述两个方面因素的共同影响,高邮湖由草型湖泊向藻型湖泊转化的风险日益升高。

3 结论与建议

菹草的生长与水温、浊度等环境因子密切相关,其在生长期对水质具有净化作用,而在衰退期则会产生大量污染物。自2021年起,高邮湖的菹草盖度呈大幅下降趋势,对区域水质、生物多样性和生态质量指数产生不利影响。菹草的消失与水位变化、藻类影响、鱼类数量及其优势种变化密切相关,高邮湖存在由草型湖泊向藻型湖泊转化的趋势。综上所述,提出以下建议:①既防外源输入,又控内源增长,提升湖体自净能力。基于高邮湖自然生态空间本底和过水湖泊特性构建生态缓冲区,以生态岛和人工湿地的形式,利用各类水生植物吸收氮、磷等污染物,减轻污染负荷;降低湖区围网养殖强度,规范畜禽养殖等废水及残渣处理,严格控制周边内源污染排放强度。②既防藻型化,又防沼泽化,构建“水清草绿、鱼翔浅底”的草型湖泊。科学规划水生植被分布,通过水位调节、人工种植、适时修剪等手段恢复

水生植物群落,并控制其生长范围;优化不同鱼类种群占比,避免食草性鱼类对水生植被的破坏,逐步打造草藻平衡、以草(藻)控水、以鱼控藻(草)的湖泊生态系统。③推进省际、市际间生态协同修复与水质污染联防联控。高邮湖位于多个省市交界处,入湖河流众多,按归属被划分为多个区域,需要立足全湖明确湖区及河道管理责任,多方配合开展生态协同修复,切实保障水生态安全。

[参考文献]

- [1] ZHANG Y L, LIU X H, QIN B Q, et al. Aquatic vegetation in response to increased eutrophication and degraded light climate in Eastern Lake Taihu: Implications for lake ecological restoration [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1-12.
- [2] GUO K, CHEN Y Y, CHEN M, et al. Causal analysis of ecological impairment in land ecosystem on a regional scale: Applied to a mining city Daye, China [J]. Land, 2021, 10(5): 530.
- [3] 罗丛强, 曾龙科, 石彭灵, 等. 大通湖生态修复前后水体浮游植物调查及富营养化评价 [J]. 环境监测管理与技术, 2023, 35(1): 38-42.
- [4] XU X, ZHANG Y B, CHEN Q, et al. Regime shifts in shallow lakes observed by remote sensing and the implications for management [J]. Ecological Indicators, 2020, 113: 106285.
- [5] LIANG S, GONG Z N, WANG Y C, et al. Accurate monitoring of submerged aquatic vegetation in a macrophytic lake using time-series Sentinel-2 images [J]. Remote Sensing, 2022, 14(3): 640.
- [6] 宋碧玉, 王建, 曹明, 等. 利用人工围隔研究沉水植被恢复的生态效应 [J]. 生态学杂志, 1999, 18(5): 21-24.
- [7] BOLDUAN B R, VAN ECKHOUT G C, QUADE H W, et al. *Potamogeton crispus*—The other invader [J]. Lake and Reservoir Management, 1994, 10(2): 113-125.
- [8] 任久长, 乔建荣, 董巍, 等. 菹草 (*Potamogeton crispus*) 的生态习性和在京密引水渠的发生规律研究 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 1997(6): 72-78.
- [9] 刘孟梅, 乔瑞婷, 刘佳豪, 等. 保安湖菹草种群的时空分布特征及环境效应分析 [J]. 水生生物学报, 2022, 46(11): 1730-1740.
- [10] ESPEL D, COURTY S, AUDA Y, et al. Submerged macrophyte assessment in rivers: An automatic mapping method using Pléiades imagery [J]. Water Research, 2020, 186: 116353.
- [11] 曹毅, 王辉. 基于 Landsat 7 影像的骆马湖菹草时空分布研究 [J]. 环境监控与预警, 2014, 6(4): 46-47.
- [12] DAI Y H, FENG L, HOU X J, et al. An automatic classification algorithm for submerged aquatic vegetation in shallow lakes using Landsat imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 260: 112459.

(下转第87页)

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 CO₂ 排放的主要来源(占比 53.85%),CH₄ 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/xxgk/2018/xxgk/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] 钱晓璇, 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 曹昀, 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] JONES R C, WALTI 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.

本栏目编辑 姚朝英 吴珊 刘罗

(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水环境因子的关系[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.