

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铎, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期
Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析	刘春景, 吕建毅, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳 (3375)
基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟	庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏 (3386)
基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨	王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰 (3396)
厦门港大气 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平 (3404)
南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征	张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇 (3416)
晋中盆地主要城市冬季 PM _{2.5} 传输特征分析	王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣 (3423)
鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析	孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳峰 (3439)
济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP	王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋 (3451)
长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析	罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧 (3463)
2019 年 7 月石家庄市 O ₃ 生成敏感性控制策略解析	朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇 (3473)
华北平原 AOD 时空演化与影响因素	郭霖, 孟飞, 马明亮 (3483)
基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系	郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康 (3494)
基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征	王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威 (3508)
近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析	陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏 (3523)
高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素	杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强 (3532)
三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性	纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽 (3543)
典型喀斯特城市湖泊溶解性有机质成分特征及来源解析	倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康 (3552)
骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估	黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕 (3562)
千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素	王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军 (3575)
泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征	张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮 (3587)
降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响	周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕 (3597)
典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价	储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏 (3608)
筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响	王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜 (3623)
天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识	刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德 (3635)
地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制	彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪 (3645)
北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析	门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵 (3656)
微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响	胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明 (3664)
不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响	任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟 (3672)
微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd ²⁺ 吸附机制	马文艳, 裴鹏刚, 高歌, 孙约兵 (3682)
不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素	连宁海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水 (3692)
Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能	印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨根, 何世颖, 薛利红 (3699)
一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析	李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送 (3708)
丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性	高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程阳阳, 彭永臻 (3718)
2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测	徐勇, 郑志威, 郭振东, 宴世卿, 黄雯婷 (3730)
近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估	陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明 (3741)
土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响	何宇, 盛茂根, 王轲, 王霖娇 (3752)
长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价	张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁 (3763)
煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性	尚誉, 桑楠 (3773)
燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价	李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚 (3781)
广州市南沙区第四剖面镉富集特征及生物有效性	王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏 (3789)
黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准	徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀 (3799)
土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测	张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南 (3811)
添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响	鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利 (3825)
不同稻作系统土壤的 CH ₄ 产生潜力与产生途径	沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华 (3835)
东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程	马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮 (3844)
同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐潞, 马飞 (3854)
岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较	肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛 (3865)
紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异响应	王智慧, 蒋先军 (3876)
有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响	肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全 (3884)
《环境科学》征订启事 (3403) 《环境科学》征稿简则 (3462) 信息 (3493, 3655, 3834)	

近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析

陈天宇¹, 刘常清^{2,3}, 史小丽^{2,4*}, 李云¹, 范子武¹, 贾本有¹, 廖轶鹏¹

(1. 南京水利科学研究所, 南京 210029; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 淮阴师范学院江苏省区域现代农业与环境保护协同创新中心, 淮阴 223300)

摘要: 通过 2011~2020 年洪泽湖全湖逐月监测数据的分析,厘清了近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势、时空变化特征和驱动要素,为洪泽湖富营养化控制提供针对性建议。作为洪泽湖最主要的入湖河流,淮河近十年来高锰酸盐指数显著上升、TN 显著下降。洪泽湖近十年水体总体透明度、TP 浓度和高锰酸盐指数平均值显著上升, TN 和 Chl-a 浓度的平均值显著下降,富营养化状态指数(TLI)有下降趋势。洪泽湖富营养化状态的变化趋势在空间上存在差异:洪泽湖东区是淮河的过水通道,由于较短的水体停留时间,即使在营养盐浓度较高的情况下,藻类生物量仍显著低于其他区域,同时由于淮河水质的改善,TLI 显著下降;北区具有较高的水生植被覆盖度,不仅降低了水体营养盐浓度,并为浮游动物和鱼类提供了栖息地,有效地抑制了藻类的生长,富营养状态要明显低于其余湖区,近十年 TLI 呈现下降趋势;西区富营养化程度最高,由于内源释放的加剧,藻类生物量最高,富营养化程度并没有得到改善。洪泽湖富营养化状态也存在显著的季节差异,夏季富营养化指数最高,藻类生物量因温度升高而相对较高,同时夏季藻类生物量主要受营养盐浓度影响,其中 NO_3^- -N的影响最大。针对洪泽湖富营养化状态的分布特征和成因,对不同季节和湖区应当采取相应的富营养化控制措施。

关键词: 洪泽湖; 富营养化状态; 水质; 藻类生物量; 富营养化控制

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3523-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110006

Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze

CHEN Tian-yu¹, LIU Chang-qing^{2,3}, SHI Xiao-li^{2,4*}, LI Yun¹, FAN Zi-wu¹, JIA Ben-you¹, LIAO Yi-peng¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Regional Modern Agriculture & Environmental Protection, Huaiyin Normal University, Huaiyin 223300, China)

Abstract: In order to propose pertinent suggestions regarding eutrophication control for Lake Hongze, we used monthly monitoring data from 2011 to 2020 to elucidate the spatiotemporal changing characteristics of eutrophic status and the relevant driving factors. As the main river entering Lake Hongze, River Huaihe experienced an increase in permanganate index and a decrease in TN in the last 10 years. Meanwhile, Secchi depth, TP, and permanganate index increased, whereas TN and Chl-a concentration decreased significantly in Lake Hongze. As a result, the eutrophic status TLI index of Lake Hongze declined over the past 10 years. The change trend of TLI in Lake Hongze differed spatially. As the main water passage of River Huaihe, the algal biomass was lower in the eastern region than that in the other two lake regions, regardless of the relatively high nutrient concentration, due to the short water retention time. Furthermore, the water quality of River Huaihe improved; thus, the TLI index decreased significantly in the eastern lake region. The northern region had a high coverage of aquatic vegetation, which not only reduced the concentration of water nutrients but also provided a habitat for zooplankton and fish, effectively inhibiting algal growth. Thus, the TLI index was lowest among the three lake areas and showed a downward trend over the last 10 years. In the western region, the algal biomass was the highest due to the intensification of phosphorus release from sediment in summer. Thus, the TLI index was the highest and had not improved in the past 10 years. There were also significant seasonal differences in the TLI of Lake Hongze, which was highest in summer, due to the relatively high algal biomass. Moreover, the algal biomass in summer was mainly affected by the concentration of nitrate. According to the spatiotemporal distribution characteristics of eutrophic status and the impacting factors in Lake Hongze, corresponding measures for eutrophication control should be taken for different seasons and lake areas.

Key words: Lake Hongze; eutrophic status; water quality; algal biomass; eutrophication control

洪泽湖为我国第四大淡水湖泊,位于江苏淮安和宿迁境内(33°06'~33°40'N, 118°10'~118°52'E)。作为淮河流域的重要水源地以及南水北调东线工程的重要调蓄库,洪泽湖在气候调节、防洪抗旱、饮用水供给、农业灌溉、水产养殖、生态保护和文化旅游等方面都有着重要作用。自 20 世纪 70 年代,由于湖区围网圈圩面积增加以及生产生活等点源面源污染排入,加重了洪泽湖内源负荷和外源污染,导致湖泊水质下降^[1~3]。自 2013 年南水北调东线工程通水后,洪泽湖的水位、水量和水

体停留时间等波动较大。调蓄湖泊独特的水文条件与调水方式,使洪泽湖表现出与太湖、巢湖等湖泊不同的富营养化特征,湖泊水质变化趋势更加复杂。

湖泊富营养化往往会导致藻类大量生长,增加

收稿日期: 2021-10-02; 修订日期: 2021-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(32071573, 41877544); 江苏省水利科技项目(2021048); 南水北调东线江苏水源有限责任公司科技项目(JSNSBD202101)

作者简介: 陈天宇(1989~),男,博士,主要研究方向为湖泊流域环境治理, E-mail:chentianyu8968@outlook.com

* 通信作者, E-mail: xlshi@niglas.ac.cn

藻华暴发风险,进而破坏湖泊生态系统稳定,威胁人类生产生活安全^[4-6]. 目前普遍认为气候变暖与富营养化存在叠加效应,会导致湖泊藻华在时间与空间上的扩张^[7-9],这一扩张现象在太湖与巢湖等典型富营养湖泊也有相关报道^[10,11]. 虽然洪泽湖营养盐浓度与藻华盛行的太湖基本相当^[12],但良好的水动力条件,避免了藻华的大规模暴发. 然而在成子湖以及溧河洼湖区由于水力交换较慢,藻类生物量较高,在适合的条件下容易形成短期的区域藻华^[13,14]. 近些年来,淮河流域治理对淮河水水质造成重要影响,由于洪泽湖 90% 的入湖水来自于淮河,这势必对洪泽湖水质和富营养化状态产生影响. 但由于不同湖区的水动力和生态环境不同,淮河对其水质的影响也不尽相同. 此外南水北调工程引起湖泊水质与水动力条件的改变,与气候变暖一起共同影响洪泽湖藻类生长. 本文分析了 2011 ~ 2020 年洪泽湖 11 个点位和淮河入湖的逐月监测数据,有效评估了洪泽湖近十年来富营养化状态的总体变化趋势,藻类生长的控制因素等,以期对洪泽湖的富营养化防控、蓝藻预测和调水水质安全保障提供理论依据.

1 研究方法

1.1 野外调查

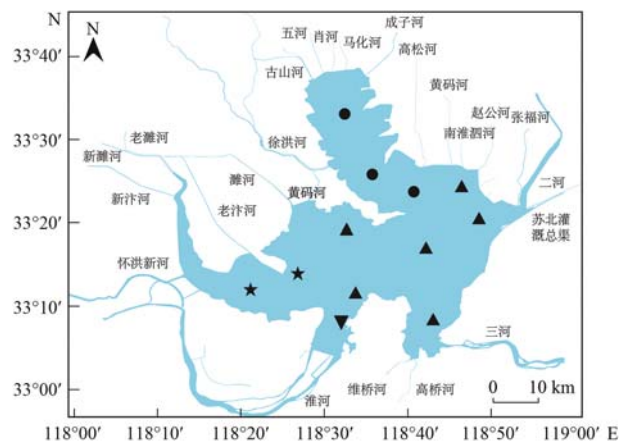
洪泽湖水质调查于 2011 ~ 2020 年进行,每月中旬进行采样,共布设湖区采样点 11 个以及淮河入湖口采样点 1 个(图 1). 根据地理位置以及水文要素等条件,将湖区采样点分为 3 个区:北区(成子湖、高湖、宿迁北、韩桥)、东区(宿迁南、淮安西、淮安北、西顺河 - +、蒋坝)、西区(临淮、溧河洼). 利用 2 L 有机玻璃采水器分别采集表层、中层和底层水样并充分混合,水深及透明度(SD)分别使用测深仪及塞氏盘现场测定,水温(WT)、pH 和溶解氧(DO)由 YSI 水质分析仪于水下 50 cm 处测得.

1.2 室内实验

水样运回实验室进行下一步分析. 水样利用 GF/C 玻璃纤维滤膜进行过滤,参照标准方法测定溶解性营养盐:硝态氮(NO_3^- -N)、亚硝态氮(NO_2^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)和磷酸盐(PO_4^{3-} -P)浓度^[15]. 采用 GF/C 滤膜和热乙醇萃取分光光度法测定叶绿素 a(Chl-a,表征总藻含量). 未过滤水样分别使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法和钼酸铵分光光度法测定总磷(TP)和总氮(TN)浓度,高锰酸盐指数采用高锰酸盐滴定法测定.

1.3 统计分析

利用综合营养状态指数公式对洪泽湖水质进行



圆形点位为北区,三角形点位为东区,
星形点位为西区,倒三角形为淮河入湖口

图 1 洪泽湖水质监测点位示意

Fig. 1 Sample sites of Lake Hongze

富营养状态评价,公式如下:

$$\text{TLI} \left(\sum \right) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot \text{TLI}(j)$$

式中, $\text{TLI} \left(\sum \right)$ 为综合营养状态指数, $\text{TLI}(j)$ 为第 j 种参数的营养状态指数, W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重. 本次富营养化状况评价指标选用: Chl-a 浓度、TP 浓度、TN 浓度、SD 和高锰酸盐指数,并结合其他指数与 Chl-a 浓度的相关关系,确定其相关权重 W_j 分别为: 0.266 3、0.187 9、0.179、0.183 4 和 0.183 4. 当 $\text{TLI} \left(\sum \right) < 30$ 时,为贫营养状态;当 $30 \leq \text{TLI} \left(\sum \right) \leq 50$ 时,为中营养状态;当 $\text{TLI} \left(\sum \right) > 50$ 时,为富营养状态,其中, $50 < \text{TLI} \left(\sum \right) \leq 60$ 时,为轻度富营养状态; $60 < \text{TLI} \left(\sum \right) \leq 70$ 时,为中度富营养状态; $\text{TLI} \left(\sum \right) > 70$ 时,为重度富营养状态^[16]. 在同一营养状态下,指数值越高,其营养状态越高.

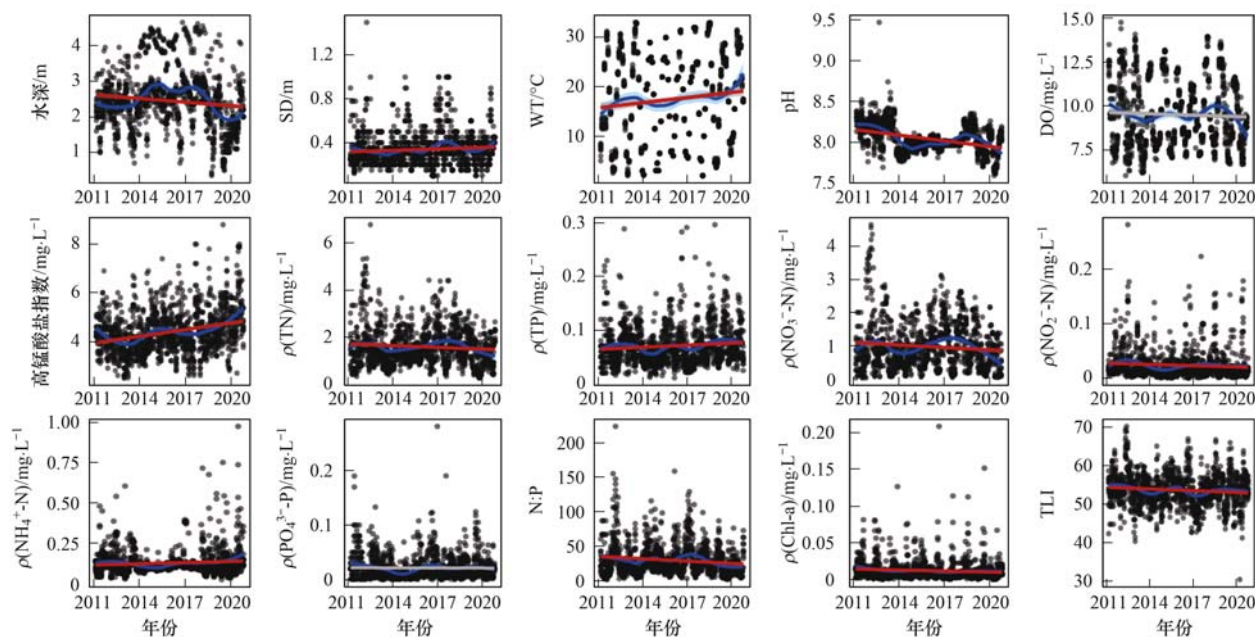
利用局部加权回归(LOESS)拟合洪泽湖各水质指标的历史演替趋势,相关分析利用 R 包 ggplot2 的 stat_smooth 函数;线性回归模型用于检验各变量变化趋势在整体时间上的显著性,当 $P < 0.05$ 时为显著变化. 利用判断双因素方差分析季节与区域对各水质指标的影响,相关分析在 R 包 stats 中完成;线性逐步回归模型用于分析洪泽湖各水质因子与藻类生物量相关性,相关分析在 R 包 stats 中完成. 文中相关制图则由 R 包 ggplot2 及 ArcGIS 10.2 完成.

2 结果与分析

2.1 洪泽湖与淮河总体水质特征

洪泽湖总体水质指标在过去十年间(2011 ~ 2020 年)发生了显著变化(图 2). 其中,洪泽湖水深与 pH 整体上呈现显著下降趋势($P < 0.05$),水深由

2.33 m 下降至 2.06 m, pH 由 8.20 下降至 7.93; 而 SD 和 WT 在过去十年呈现显著升高趋势($P < 0.05$), SD 由 0.32 m 上升至 0.37 m, WT 由 16.63℃ 上升至 19.63℃; 高锰酸盐指数在过去十年间显著上升,从 2011 年 4.31 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 2020 年 5.13 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($P < 0.05$).



蓝色实线为 LOESS 回归线,灰色区域为 95% 置信区间,红色实线表示线性回归显著上升或下降

图 2 2011 ~ 2020 年洪泽湖水质指标变化趋势

Fig. 2 Variation trend of water quality of Lake Hongze from 2011 to 2020

2011 ~ 2020 年间,洪泽湖多项营养盐浓度发生显著变化(图 2). 除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 外,洪泽湖其他氮营养盐(TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$) 在十年间显著下降($P < 0.05$). $\rho(\text{TN})$ 由 1.46 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降至 1.33 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 由 0.83 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降至 0.69 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 由 0.023 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降至 0.017 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 由 0.13 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 0.16 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 与 TN 浓度下降趋势不同,洪泽湖 $\rho(\text{TP})$ 呈现轻微上升趋势($P < 0.05$),由 0.074 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 0.076 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. TN 和 TP 浓度的不同变化趋势也导致了 N:P 由 26.29 显著下降至 21.13 ($P < 0.05$). 2011 ~ 2020 年间随着营养盐的下降,洪泽湖藻类生物量显著下降. 在十年间,洪泽湖藻类生物量保持显著地持续下降趋势,从 2011 年的 0.016 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降至 2020 年的 0.010 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 虽然洪泽湖 TLI 近十年在 50.70 ~ 55.80 之间波动,但整体上仍处于下降趋势($P < 0.05$).

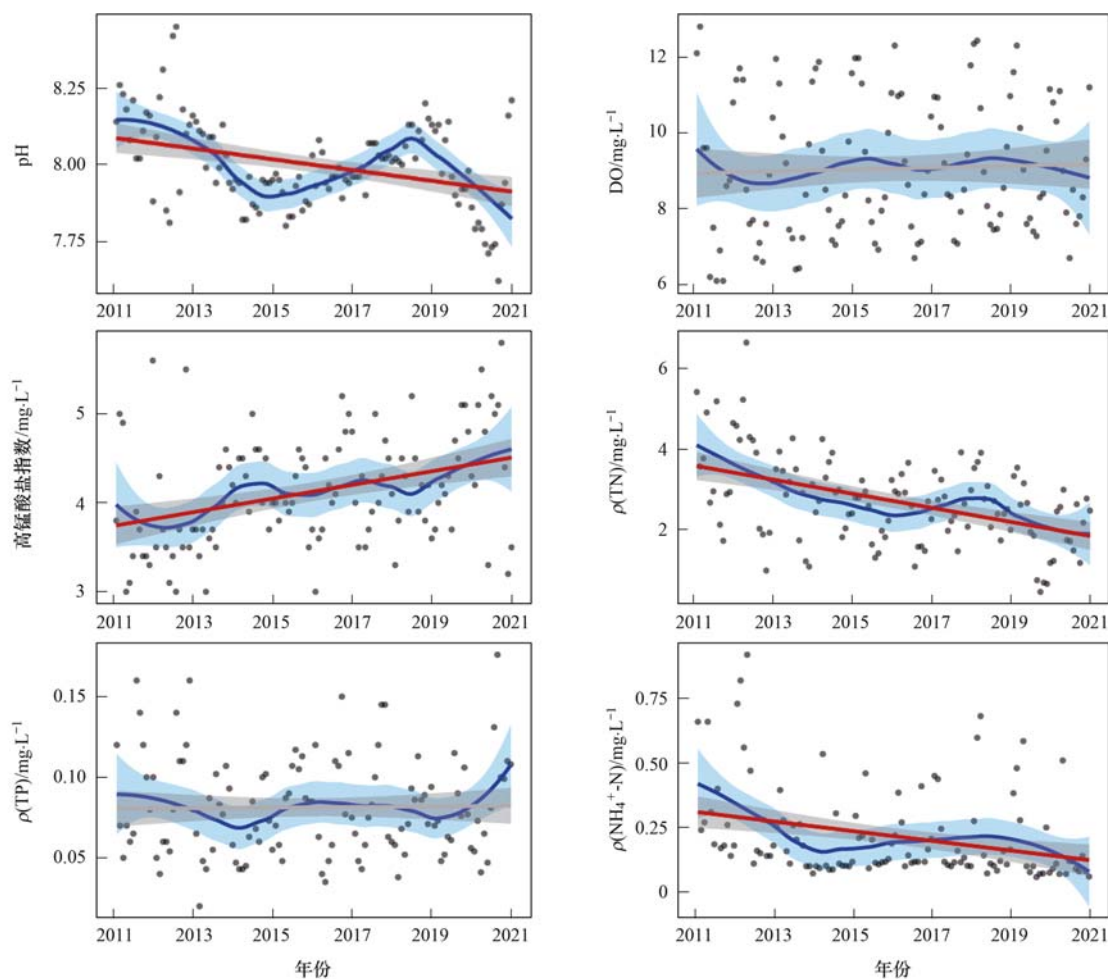
淮河作为洪泽湖最主要的入湖河流,其水质与洪泽湖水质紧密相关. 总体上,淮河 pH、DO、高锰酸盐指数和 TN 浓度与洪泽湖在十年间变化趋势一致,而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 变化趋势相反(图 3). 其中,高锰酸盐

指数由 3.85 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 显著上升至 4.59 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($P < 0.05$), $\rho(\text{TN})$ 由 3.56 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 显著下降至 2.10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($P < 0.05$), $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 由 0.30 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 显著下降至 0.13 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($P < 0.05$); 淮河 TP 没有显著变化,十年均值为 0.082 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 虽然淮河营养盐在过去十年间发生了变化,但其仍显著高于洪泽湖.

2.2 洪泽湖不同湖区富营养化状态特征

双因素方差分析结果表明,洪泽湖水质营养状态在季节与区域上有显著差异($P < 0.05$, 表 1). 在不同湖区之间,西区 TLI 最高(十年均值 54.89),东区次之(53.91),而北区最低(52.71). 北区和东区 TLI 在近十年来显著下降($P < 0.05$),而西区却没有显著改善. TLI 的季节分布特征表明,夏季 TLI 最高(55.20),秋季次之(54.23),而春(52.26)、冬(52.83)最低. 为分析洪泽湖不同湖区富营养化状态特征,笔者进一步探究了富营养化指数下的各个指标.

根据双因素方差分析结果,洪泽湖 SD、高锰酸盐指数、TN、TP 和 Chl-a 浓度受区域环境与季节条件的显著影响,有明显的区域与季节分布特征($P < 0.05$). 在区域分布上,东区水体的 TN 浓度要显著



蓝色实线为 LOESS 回归线,灰色区域为 95% 置信区间,红色实线表示线性回归显著上升或下降

图 3 2011~2020 年淮河水质变化趋势

Fig. 3 Variation trend of water quality of River Huaihe from 2011 to 2020

高于其他区域,但其 SD 要显著低于其余区域. 西区的高锰酸盐指数则显著高于东区与北区,而 TP 浓度在东区 and 西区要显著高于北区 ($P < 0.05$). 而对于 Chl-a 浓度而言,西区最高,北区次之,东区最低. 季节分布上,春冬季的 SD 和 TN 浓度要显著高于夏秋季 ($P < 0.05$). 高锰酸盐指数和 TP 浓度则在夏秋季较高 ($P < 0.05$). Chl-a 浓度则在夏季最高,而秋季次之,冬春季最低.

在此期间各湖区 SD 皆呈现下降趋势,而高锰酸盐指数皆呈现上升趋势,其上升趋势在西区更为

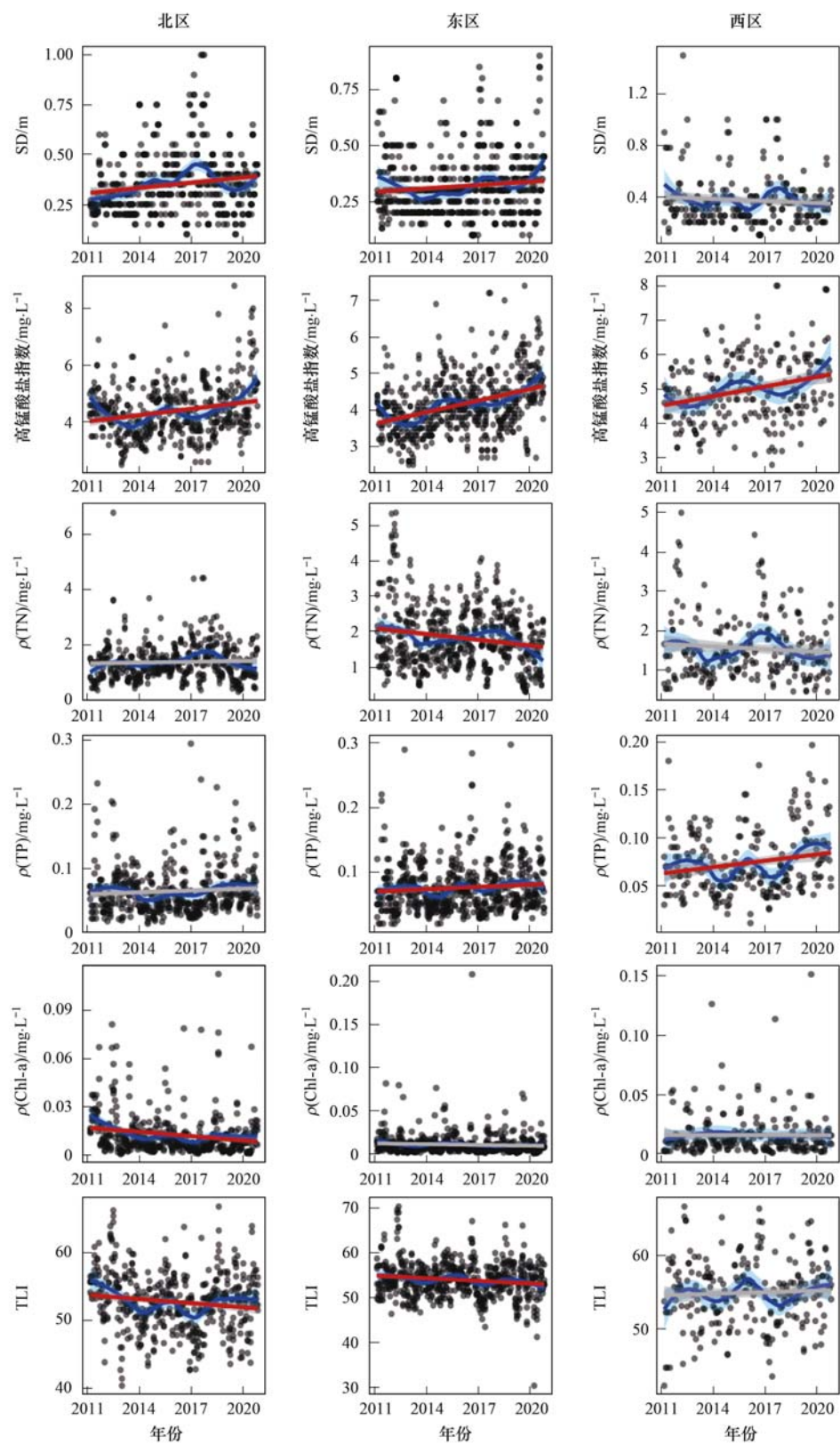
显著 ($P < 0.05$) (图 4). TN 浓度仅在东区有显著变化,在十年间持续显著下降 ($P < 0.05$),而淮河也有相同的下降趋势 ($P < 0.05$). 虽然淮河在过去十年间 TP 浓度没有显著变化,但其浓度仍高于洪泽湖各湖区. 因而,作为主要收纳湖区,TP 浓度在东区皆显著上升 ($P < 0.05$). 夏冬水体 TP 浓度差值常被用来衡量湖泊底泥内源释放能力,近十年来其在不同湖区呈现出不同的变化趋势(图 5). 过去十年间,夏冬 TP 浓度差值北区和东区没有显著变化,而西区由 2012 年的 $-2.79 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 2020 年的 59.16

表 1 洪泽湖各水质指标及时空分布双因素分析

Table 1 Water quality and two-way ANOVA results (area and season effect) in Lake Hongze

项目	总湖区	北区	东区	西区	区域 ($n = 3$)		季节 ($n = 4$)		区域 $\times$ 季节	
					F	$P^{1)}$	F	P	F	P
SD/m	0.338 8	0.348 9	0.318 2	0.370 2	11.584	0.000 0	14.805	0.000 0	2.368	0.028 0
高锰酸盐指数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	4.392 8	4.403 0	4.1499	4.979 8	82.052	0.000 0	37.145	0.000 0	1.944	0.070 7
$\rho(\text{TN})/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.601 5	1.361 7	1.812 7	1.553 2	47.684	0.000 0	41.518	0.000 0	8.299	0.000 0
$\rho(\text{TP})/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.070 6	0.062 7	0.075 6	0.073 8	20.086	0.000 0	68.635	0.000 0	3.049	0.0057 7
$\rho(\text{Chl-a})/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.012 1	0.012 5	0.010 3	0.015 6	13.079	0.000 0	32.292	0.000 0	3.433	0.002 3
TLI	53.664 1	52.752 4	53.908 6	54.876 2	24.106	0.000 0	34.376	0.000 0	3.399	0.002 5

1) 黑体字表示有显著差异 ($P < 0.05$)



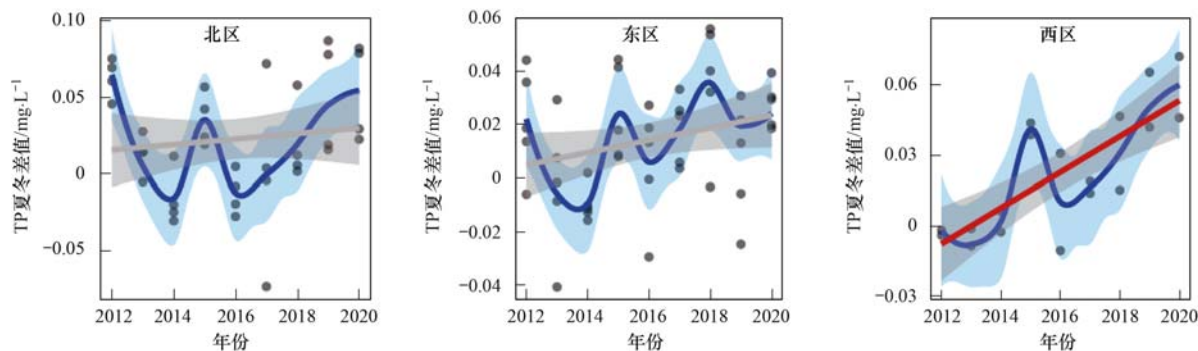
蓝色实线为 LOESS 回归线,灰色区域为 95% 置信区间,红色实线表示线性回归显著上升或下降

图 4 2011 ~ 2020 年洪泽湖不同湖区水质营养状态变化趋势

Fig. 4 Variation trend of water trophic level in the different areas of Lake Hongze from 2011 to 2020

$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,因而西区 TP 在过去十年间显著增加($P < 0.05$),并且增加幅度要高于东区.藻类生物量在不同湖区的演替趋势存在差异,其仅在北区有显著变化,并在十年间持续显著下降($P < 0.05$).

2.3 洪泽湖藻类生物量演替特征及其驱动因子
线性逐步回归模型表明,洪泽湖 Chl-a 与 WT、水深、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、DO、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、pH、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TP 显著相关($P < 0.05$,表 2).作为藻类生物量



蓝色实线为 LOESS 回归线,灰色区域为 95% 置信区间,红色实线表示线性回归显著上升或下降

图 5 2011 ~ 2020 年洪泽湖不同湖区夏季与冬季的 TP 差值变化趋势

Fig. 5 Variation trend of TP difference between summer and winter in the different areas of Lake Hongze from 2011 to 2020

演替的决定性因子,洪泽湖 WT 与藻类显著正相关 ($P < 0.05$),与藻类生物量季节变化有密切联系.而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 作为影响藻类生物量的重要水质因子,其在不同湖区的浓度存在差异,是影响藻类生物量区域分布的重要因素.

在温度的驱动下,洪泽湖藻类生物量整体上在夏季最高,但其变化趋势在不同湖区存在差异.除西区外,洪泽湖夏季藻类生物量在其他湖区显著下降.线性逐步回归模型表明,夏季藻类生物量与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、pH、TP、WT、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 显著相关 ($P < 0.05$),其中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 贡献度最大(表 2).

表 2 洪泽湖藻类生物量与各水质因子的逐步线性回归模型

Table 2 Stepwise multiple regression model of Chl-a and water quality in Lake Hongze

因变量	总解释度/%	环境变量	F	P
全年 Chl-a	14.40	WT	76.108	0.000 0
		水深	39.566 4	0.000 0
		$\text{NO}_3^- - \text{N}$	31.218 8	0.000 0
		$\text{NO}_2^- - \text{N}$	22.666 1	0.000 0
		DO	20.794 6	0.000 0
		$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	18.663 3	0.000 0
		pH	14.876 8	0.000 1
		$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	4.516 4	0.033 8
		TP	4.156 9	0.041 7
		$\text{NO}_3^- - \text{N}$	32.326	0.000 0
夏季 Chl-a	19.67	pH	17.681 9	0.000 0
		TP	13.282 6	0.000 3
		WT	12.201	0.000 5
		$\text{NO}_2^- - \text{N}$	6.121 4	0.013 8
		$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	4.044 7	0.045 0

3 讨论

3.1 洪泽湖不同区域富营养化状态的演变趋势和原因

2011 ~ 2020 年间,洪泽湖水质指标发生了显著变化,整体上水质状态得到改善.过去十年间,洪泽湖 TN 浓度呈现显著下降趋势,而 TP 浓度却在缓慢升高.洪泽湖营养盐除受点源污染(工业和生活废

水)影响外,还受面源污染(入湖河流输入)影响^[17].作为大型过水性湖泊,淮河是洪泽湖最主要的人湖河流^[3],其入湖水质与洪泽湖水质紧密相关^[18].由于湖区以三河入江为主流,东区与淮河水力交换更加频繁,其营养状态与淮河更加密切.近十年来淮河 TN 浓度的持续下降,驱动了东区 TN 浓度的下降.虽然近十年来淮河 TP 浓度没有显著变化,但其浓度仍显著高于洪泽湖,导致东区 TP 浓度的持续增加.然而不同湖区对淮河水质响应的程度不同,北区和西区 TN 浓度近十年无明显变化趋势,也进一步说明这两个湖区受淮河水质影响较小.此外,西区夏冬水体 TP 浓度差值在过去十年间显著增加,表明该区域内源释放加剧,内源污染是导致了西区 TP 浓度显著增加的主要原因^[19].东区 TP 浓度差值在过去十年间无显著变化,则进一步说明其 TP 浓度升高不是由内源释放导致的,而主要还是受淮河入湖水质的影响.北区因水草相对覆盖度高,是洪泽湖 TP 浓度最低区域,近十年也没明显变化^[20].洪泽湖 TN 和 TP 的不同变化趋势导致洪泽湖 N:P 在近十年来的显著下降.虽然低氮磷比是否会有利于蓝藻在水体中形成优势仍存在争议^[21 ~ 23],但氮磷比的变化对藻类生物量以及群落结构演替产生的影响是毋庸置疑的^[24,25].因此,在全湖氮磷比下降的情况下,洪泽湖藻类生物量及群落结构将进一步发生变化.

洪泽湖高锰酸盐指数在过去十年显著升高,表明洪泽湖有机物污染持续加重.通常而言,湖泊有机物污染来自外源输入与内源释放^[26,27].作为主要的外源输入河道,淮河近十年来高锰酸盐指数持续上升,与洪泽湖三个湖区的变化趋势相同.此外洪泽湖高锰酸盐指数的绝对浓度高于淮河,说明洪泽湖高锰酸盐指数的上升不仅受外源输入的影响,更受湖泊内源有机物的影响.西区作为湿地保护区,部分小区域水生植物茂密,大部分区域藻类生物量高.该湖

区高锰酸盐指数上升趋势更为显著,说明水生植物和浮游藻类的分解可能是高锰酸盐指数的重要来源。

总体而言,过去十年间洪泽湖富营养化(TLI)程度整体呈现下降趋势。其中,由于淮河水质的改善,洪泽湖东区 TLI 显著下降。而茂密的水生植被,也使得北区 TLI 呈现下降趋势。然而,由于内源释放的加剧,洪泽湖西区富营养程度并没有得到改善。

3.2 外源与内源要素驱动下的洪泽湖藻类时空格局

虽然 TP 和高锰酸盐指数仍在不断升高,洪泽湖藻类生物量在十年间却持续下降。藻类生长受内生因素(藻类自身生理结构)和外界环境(营养盐,气象条件和水动力条件等)的影响^[28,29]。线性逐步回归模型表明温度是洪泽湖藻类生物量的决定性因子,与太湖、巢湖等富营养化湖泊的规律一致^[10,11],夏季洪泽湖藻类生物量明显增加。然而不同于其他富营养化湖泊春季藻类生物量逐渐上升的趋势^[10,11],近些年来洪泽湖藻类生物量在秋季明显升高,甚至出现全年峰值。洪泽湖具有独特的水文条件特征。近年来,洪泽湖入湖水量持续增加^[18],水力停留时间缩短,营养盐浓度不断下降,导致洪泽湖藻类生物量的不断下降^[29]。此外,淮河水在夏季(7~9月)集中入湖,可能延迟了藻类生物量达到峰值的时间。

除季节分布特征外,洪泽湖藻类分布还存在显著的空间差异,这主要受到各湖区的生境特征与水文条件影响。由于围网养殖和换水较慢等原因^[30,31],西区高锰酸盐指数、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度显著高于其他湖区,导致藻类生物量高于其他区域。同时洪泽湖夏季盛行东南风,湖流和风流使藻华向西聚集,导致该湖区藻类生物量升高^[32,33]。北区密集的水草降低了该湖区营养盐浓度,并为浮游动物及鱼类提供了栖息地,有效抑制了藻类的生长^[34~36]。然而由于水动力条件较差^[31],该区域藻类生物量仍相对较高。东区作为淮河主要收纳湖区,较短的换水周期^[31],使得该区域即使在淮河较高营养盐的输入下仍保持较低的藻类生物量。藻类生物量的降低也会提升湖泊透明度^[37,38],虽然在过去十年间 TP 和高锰酸盐指数仍在升高,但洪泽湖的富营养化程度逐步下降。

3.3 洪泽湖富营养化的控制策略

洪泽湖 TLI 存在明显的时空分布特征。虽然过去十年洪泽湖富营养程度逐渐下降,然而显著下降仅在北区和东区出现,西区仍维持较高的富营养化水平。此外受藻类生长影响,洪泽湖夏秋季富营养化

程度较高。针对洪泽湖富营养化分布特征及成因,对不同季节和湖区应当采取相应的富营养化控制措施^[39~41]。

(1) 削减入湖污染,降低外源污染负荷。虽然近十年来洪泽湖 TN 显著下降,但 TP 持续升高,目前其浓度与蓝藻频频暴发的太湖基本相当^[12,42]。虽然洪泽湖良好的水动力条件,避免了蓝藻藻华的大规模暴发,但西区和北区的湾区,换水速率较慢,藻华暴发风险较高。为降低蓝藻暴发风险,需要对入湖河流(尤其是淮河)进行生态治理,进一步削减入湖氮磷。

(2) 控制内源污染,推进生态修复。湖区生产生活污染和底泥营养盐释放是洪泽湖内源污染的重要来源^[3,43,44]。通过推进退圩还湖工作,减少湖区围网和圈圩养殖面积,控制湖区生产生活污染。针对内源污染问题,应进一步对洪泽湖全湖底泥污染状态进行摸底调查。根据调查结果与其它富营养化湖泊底泥治理经验^[45],开展生态疏浚工作。此外笔者调查发现,北区茂密的水生植物减少了沉积物营养盐释放。因此需要根据洪泽湖的水深、透明度、湖流、沉积物理化性状等生境条件以及土著水生植物的群落特征,在部分湖区进行水生植物群落的重建^[34]。

4 结论

(1) 2011~2020 年间,洪泽湖富营养化程度整体呈现下降趋势。全湖 TN 和 Chl-a 浓度显著下降,而 TP 浓度、高锰酸盐指数和 SD 显著上升。此外洪泽湖富营养化状态的变化趋势呈现空间差异:东区是淮河入水的主要通道,TLI 因淮河水质的改善而显著下降;北区水生植被覆盖度较高,TLI 呈现下降趋势;西区内源释放强度增加,营养化程度并没有得到改善。

(2) 洪泽湖藻类生物量的时间差异主要受温度影响,夏季藻类生物量相对较高,而生物量的绝对值受营养盐浓度的影响,其中 NO_3^- -N 影响最大。由于良好的水动力条件,即使在营养浓度较高的情况下,东区藻类生物量仍低显著低于其他区域。北区密集的水草降低了湖区营养盐,并为浮游动物及鱼类提供了栖息地,有效地抑制了藻类生长。西区水质相对差,夏季内源释放强度增加,水动力条件差,藻类生物量最高。

参考文献:

- [1] Wu Y, Dai R, Xu Y F, *et al.* Statistical assessment of water quality issues in Hongze Lake, China, related to the operation of a water diversion project[J]. Sustainability, 2018, 10(6), doi: 10.3390/su10061885.
- [2] 陈立冬,何孝光,王阳,等. 江苏省洪泽湖退圩还湖的思考

- [J]. 江苏科技信息, 2019, **36**(12): 75-77.
- Chen L D, He X G, Wang Y, *et al.* Reflections on returning polder land to lake of the Hongze Lake in Jiangsu Province[J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2019, **36**(12): 75-77.
- [3] 蔡永久, 张祯, 唐荣桂, 等. 洪泽湖生态系统健康状况评价和保护[J]. 江苏水利, 2020, (7): 1-7, 13.
- Cai Y J, Zhang Z, Tang R G, *et al.* Evaluation and protection of ecosystem health in Hongze Lake[J]. Jiangsu Water Resources, 2020, (7): 1-7, 13.
- [4] 马健荣, 邓建明, 秦伯强, 等. 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展[J]. 生态学报, 2013, **33**(10): 3020-3030.
- Ma J R, Deng J M, Qin B Q, *et al.* Progress and prospects on cyanobacteria bloom-forming mechanism in lakes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(10): 3020-3030.
- [5] 秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1229-1243.
- Qin B Q. Shallow lake limnology and control of eutrophication in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, **32**(5): 1229-1243.
- [6] 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. 科学通报, 2006, **51**(16): 1857-1866.
- Qin B Q, Yang L Y, Chen F Z, *et al.* Mechanism and control of lake eutrophication [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, **51**(19): 2401-2412.
- [7] Jöhnk K D, Huisman J, Sharples J, *et al.* Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria[J]. Global Change Biology, 2008, **14**(3): 495-512.
- [8] Huber V, Wagner C, Gerten D, *et al.* To bloom or not to bloom: contrasting responses of cyanobacteria to recent heat waves explained by critical thresholds of abiotic drivers[J]. Oecologia, 2012, **169**(1): 245-256.
- [9] Rigosi A, Carey C C, Ibelings B W, *et al.* The interaction between climate warming and eutrophication to promote cyanobacteria is dependent on trophic state and varies among taxa [J]. Limnology and Oceanography, 2014, **59**(1): 99-114.
- [10] 张民, 史小丽, 阳振, 等. 2012-2018 年巢湖水质变化趋势分析和蓝藻防控建议[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 11-20.
- Zhang M, Shi X L, Yang Z, *et al.* The variation of water quality from 2012 to 2018 in Lake Chaohu and the mitigating strategy on cyanobacterial blooms[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, **32**(1): 11-20.
- [11] 张民, 阳振, 史小丽. 太湖蓝藻水华的扩张与驱动因素[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 336-344.
- Zhang M, Yang Z, Shi X L. Expansion and drivers of cyanobacterial blooms in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(2): 336-344.
- [12] 朱广伟, 秦伯强, 张运林, 等. 近 70 年来太湖水体磷浓度变化特征及未来控制策略[J]. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 957-973.
- Zhu G W, Qin B Q, Zhang Y L, *et al.* Fluctuation of phosphorus concentration in Lake Taihu in the past 70 years and future control strategy[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, **33**(4): 957-973.
- [13] 吴天浩, 刘劲松, 邓建明, 等. 大型过水性湖泊——洪泽湖浮游植物群落结构及其水质生物评价[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 440-448.
- Wu T H, Liu J S, Deng J M, *et al.* Community structure of phytoplankton and bioassessment of water quality in a large water-carrying lake, Lake Hongze [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(2): 440-448.
- [14] 齐凌艳, 黄佳聪, 高俊峰, 等. 洪泽湖叶绿素 a 浓度的时空变化特征[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(3): 583-591.
- Qi L Y, Huang J C, Gao J F, *et al.* Spatial-temporal variation characteristics of chlorophyll-a concentration in Lake Hongze[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(3): 583-591.
- [15] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [16] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002, **18**(5): 47-49.
- Wang M C, Liu X Q, Zhang J H. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication[J]. Environmental Monitoring in China, 2002, **18**(5): 47-49.
- [17] 韩年, 袁旭音, 周慧华, 等. 洪泽湖入湖河流沉积物有机磷分布特征及外源输入对其形态转化的影响[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(3): 665-675.
- Han N, Yuan X Y, Zhou H H, *et al.* Distribution characteristics of organic phosphorus in the sediments of rivers entering the Lake Hongze and the effects of exogenous substances on their fraction transformation[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, **32**(3): 665-675.
- [18] 李颖, 张祯, 程建华, 等. 2012-2018 年洪泽湖水水质时空变化与原因分析[J]. 湖泊科学, 2021, **33**(3): 715-726.
- Li Y, Zhang Z, Cheng J H, *et al.* Water quality change and driving forces of Lake Hongze from 2012 to 2018[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, **33**(3): 715-726.
- [19] 朱广伟, 李静, 朱梦圆, 等. 锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1451-1459.
- Zhu G W, Li J, Zhu M Y, *et al.* Efficacy of phoslock® on the reduction of sediment phosphorus release in West Lake, Hangzhou, China[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1451-1459.
- [20] 吴浩云, 贾更华, 徐彬, 等. 1980 年以来太湖总磷变化特征及其驱动因子分析[J]. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 974-991.
- Wu H Y, Jia G H, Xu B, *et al.* Analysis of variation and driving factors of total phosphorus in Lake Taihu, 1980-2020 [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, **33**(4): 974-991.
- [21] Smith V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in Lake phytoplankton[J]. Science, 1983, **221**(4611): 669-671.
- [22] Vrede T, Ballantyne A, Mille-Lindblom C, *et al.* Effects of N:P loading ratios on phytoplankton community composition, primary production and N fixation in a eutrophic lake [J]. Freshwater Biology, 2009, **54**(2): 331-344.
- [23] Xie L Q, Xie P, Li S X, *et al.* The low TN:TP ratio, a cause or a result of *Microcystis* blooms? [J]. Water Research, 2003, **37**(9): 2073-2080.
- [24] Liu C Q, Shi X L, Fan F, *et al.* N:P ratio influences the competition of *Microcystis* with its picophytoplankton counterparts, *Mychonastes* and *Synechococcus*, under nutrient enrichment conditions[J]. Journal of Freshwater Ecology, 2019, **34**(1): 445-454.
- [25] 宋玉芝, 秦伯强, 高光. 氮及氮磷比对附着藻类及浮游藻类的影响[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(2): 125-130.
- Song Y Z, Qin B Q, Gao G. Effect of nutrient on periphytic algae and phytoplankton[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, **19**(2): 125-130.
- [26] Park H K, Byeon M S, Shin Y N, *et al.* Sources and spatial and temporal characteristics of organic carbon in two large reservoirs with contrasting hydrologic characteristics[J]. Water Resources Research, 2009, **45**(11), doi: 10.1029/2009WR008043.

- [27] Zhang Y L, Yin Y, Feng L Q, *et al.* Characterizing chromophoric dissolved organic matter in Lake Tianmuhu and its catchment basin using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis [J]. *Water Research*, 2011, **45** (16): 5110-5122.
- [28] Reynolds C S. *Ecology of phytoplankton* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [29] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. *生态学报*, 2005, **25** (3): 589-595.
Kong F X, Gao G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25** (3): 589-595.
- [30] 叶春, 李春华, 王博, 等. 洪泽湖健康水生态系统构建方案探讨[J]. *湖泊科学*, 2011, **23** (5): 725-730.
Ye C, Li C H, Wang B, *et al.* Study on building scheme for a healthy aquatic ecosystem of Lake Hongze [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, **23** (5): 725-730.
- [31] 彭兆亮, 汪院生, 胡维平, 等. 洪泽湖风生流对风场和水位变化响应特征[J]. *湖泊科学*, 2021, **33** (6): 1925-1939.
Peng Z L, Wang Y S, Hu W P, *et al.* Responses of wind-driven circulation to wind field and water level variations in Lake Hongze [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33** (6): 1925-1939.
- [32] 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 等. 风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40** (8): 3519-3529.
Yu M L, Hong G X, Zhu G W, *et al.* Wind field influences on the spatial distribution of cyanobacterial blooms and nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (8): 3519-3529.
- [33] 李亚春, 谢小萍, 杭鑫, 等. 结合卫星遥感技术的太湖蓝藻水华形成风场特征[J]. *中国环境科学*, 2016, **36** (2): 525-533.
Li Y C, Xie X P, Hang X, *et al.* Analysis of wind field features causing cyanobacteria bloom in Taihu Lake combined with remote sensing methods [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36** (2): 525-533.
- [34] 高光, 张运林, 邵克强. 浅水湖泊生态修复与草型生态系统重构实践——以太湖蠡湖为例[J]. *科学*, 2021, **73** (3): 9-12.
Gao G, Zhang Y L, Shao K Q. Shallow lake ecological restoration and grass ecosystem reconstruction—a case study in Lihu of Taihu Lake [J]. *Science*, 2021, **73** (3): 9-12.
- [35] Wu D, Hua Z L. The effect of vegetation on sediment resuspension and phosphorus release under hydrodynamic disturbance in shallow lakes [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **69**: 55-62.
- [36] Ferreira T F, Crossetti L O, Marques D M L, *et al.* The structuring role of submerged macrophytes in a large subtropical shallow lake: clear effects on water chemistry and phytoplankton structure community along a vegetated-pelagic gradient [J]. *Limnologia*, 2018, **69**: 142-154.
- [37] 李一平, 逢勇, 徐秋霞. 动水条件下太湖水体透明度及其影响因子模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2009, **37** (6): 625-630.
Li Y P, Pang Y, Xu Q X, *et al.* Simulation of transparency and its factors in Taihu Lake under hydrodynamic conditions [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2009, **37** (6): 625-630.
- [38] 潘继征, 熊飞, 李文朝, 等. 云南抚仙湖透明度的时空变化及影响因子分析[J]. *湖泊科学*, 2008, **20** (5): 681-686.
Pan J Z, Xiong F, Li W C, *et al.* Spatial-temporal dynamic changes of the water transparency and their influencing factors in Lake Fuxian, Yunnan Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20** (5): 681-686.
- [39] 秦伯强, 朱广伟, 杨宏伟, 等. 新方法、新理论为太湖环境治理和生态修复提供科技支撑[J]. *中国科学院院刊*, 2017, **32** (6): 654-660.
Qin B Q, Zhu G W, Yang H W, *et al.* Support environmental management and ecological restoration in lake Taihu with new methods and new theories [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2017, **32** (6): 654-660.
- [40] 张民, 孔繁翔. 巢湖富营养化的历程、空间分布与治理策略(1984-2013年)[J]. *湖泊科学*, 2015, **27** (5): 791-798.
Zhang M, Kong F X. The process, spatial and temporal distributions and mitigation strategies of the eutrophication of Lake Chaohu (1984-2013) [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27** (5): 791-798.
- [41] 杨柳燕, 杨欣妍, 任丽曼, 等. 太湖蓝藻水华暴发机制与控制对策[J]. *湖泊科学*, 2019, **31** (1): 18-27.
Yang L Y, Yang X Y, Ren L M, *et al.* Mechanism and control strategy of cyanobacterial bloom in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31** (1): 18-27.
- [42] 蔡梅, 陆志华, 王元元, 等. 太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示[J]. *环境科学*, 2022, **43** (5): 2575-2585.
Cai M, Lu Z H, Wang Y Y, *et al.* Pollution characteristics of phosphorus in different media in Taihu Lake and its treatment enlightenment [J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (5): 2575-2585.
- [43] 范成新, 钟继承, 张路, 等. 湖泊底泥环保疏浚决策研究进展与展望[J]. *湖泊科学*, 2020, **32** (5): 1254-1277.
Fan C X, Zhong J C, Zhang L, *et al.* Research progress and prospect of environmental dredging decision-making of lake sediment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32** (5): 1254-1277.
- [44] 范成新, 张路, 秦伯强, 等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, **33** (8): 760-768.
Fan C X, Zhang L, Qin B Q, *et al.* Estimation on dynamic release of phosphorus from wind-induced suspended particulate matter in Lake Taihu [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, **47** (8): 710-719.
- [45] 范成新, 陈开宁, 张路, 等. 湖泊污染底泥治理修复实践——以太湖为例[J]. *科学*, 2021, **73** (3): 13-16.
Fan C X, Chen K N, Zhang L, *et al.* Treatment and remediation of polluted sediment in Taihu Lake [J]. *Science*, 2021, **73** (3): 13-16.

CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model	PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing	ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data	WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period	Ji Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths	WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst	HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province	XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil	XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)