

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

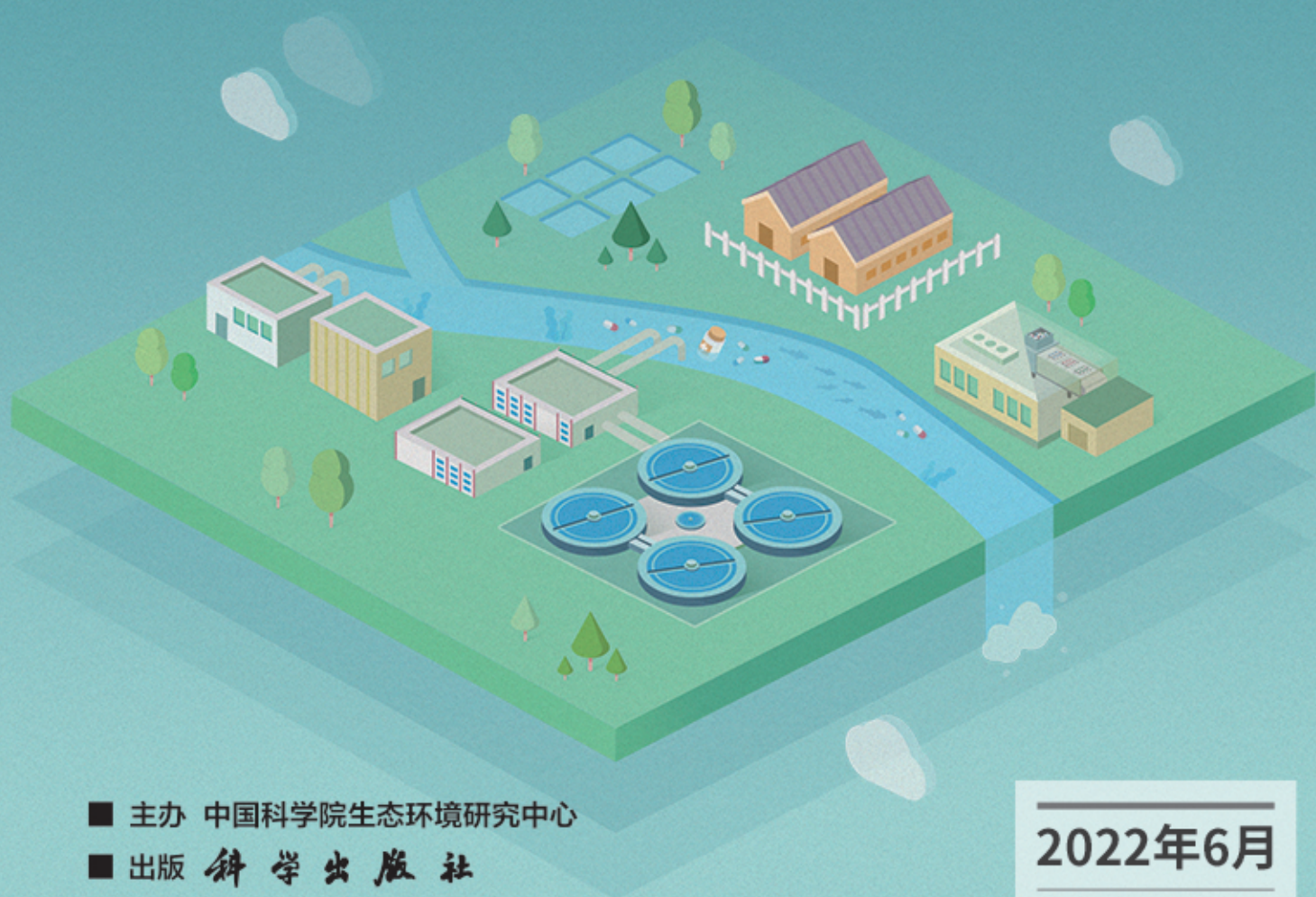
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁铨, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐露, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态学特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子

屈宁^{1,2}, 邓建明^{1*}, 张祯³, 蔡永久¹, 龚志军¹, 李明²

(1. 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; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 3. 江苏省洪泽湖水利工程管理处, 淮安 223100)

摘要: 洪泽湖是南水北调东线工程的重要调蓄湖泊, 在气候调节、防洪防汛等方面起着重要的作用. 为研究洪泽湖浮游植物群落结构演替及与环境因子的关系, 了解“十年禁渔”前洪泽湖生态系统状况, 于 2015 ~ 2020 年进行了逐月监测. 研究期间, 总氮 (TN) 年平均浓度从 2017 年之后呈显著下降趋势, 总磷 (TP) 和化学需氧量 (COD) 总体呈下降趋势, 水温无明显变化趋势, 水深和透明度从 2015 ~ 2018 年上升, 之后显著下降. 调查期间共鉴定有浮游植物 8 门 102 属 310 种, 浮游植物优势门类主要包括绿藻门和硅藻门, 其次为蓝藻门和甲藻门. 主要优势属为栅藻 (*Scenedesmus*)、直链藻 (*Aulacoseira*)、隐藻 (*Cryptomonas*)、小环藻 (*Cyclotella*)、四角藻 (*Tetraedron*)、微囊藻 (*Microcystis*) 和长孢藻 (*Dolichospermum*). 非度量多维尺度分析方法 (NMDS) 表明, 洪泽湖浮游植物群落结构组成在不同年份、不同季节和不同采样区域有显著差异, 其变化主要是浮游植物的优势种属间再分配. NMDS 分析结果显示, 洪泽湖浮游植物群落结构变化与水温、TN、TP、水深和透明度等因素有关, 其中 TN、水深和浮游植物群落结构年际演替显著相关, 而水温、TN 和浮游植物季节演替显著相关. 结合近几年相关部门采取的举措, 浮游植物群落结构变化可能和洪泽湖实行拆除围网等措施有关.

关键词: 浮游植物; 群落演替; 长期观测; 人类活动; 非度量多维尺度分析; 广义可加模型

中图分类号: X171 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2022)06-3097-09 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202109022

Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020

QU Ning^{1,2}, DENG Jian-ming^{1*}, ZHANG Zhen³, CAI Yong-jiu¹, GONG Zhi-jun¹, LI Ming²

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Hongze Lake Water Conservancy Project Management Office of Jiangsu Province, Huaian 223100, China)

Abstract: Lake Hongze is an essential storage lake for the “Eastern Route of the South-North Water Diversion Project” and plays an important role in climate adjustment and flood prevention and control. To study the structural evolution of phytoplankton communities in Lake Hongze and their relationship with environmental factors and to understand the status of the ecosystem of Lake Hongze before the “ten-year fishing ban,” monthly monitoring was carried out from 2015 to 2020. During the study period, total nitrogen showed a significant downward trend starting in 2017, the total phosphorus and chemical oxygen demand declined slightly, the water temperature had no obvious change trend, and the water depth and transparency increased from 2015 to 2018 and then declined significantly. A total of 102 genera of phytoplankton in eight phyla were identified, with a total of 310 species. The dominant phytoplankton phyla mainly included Chlorophyta and Bacillariophyta, followed by Cyanophyta and Pyrrophyta. The dominant genera were *Scenedesmus*, *Aulacoseira*, *Cryptomonas*, *Cyclotella*, *Tetraedron*, *Microcystis*, and *Dolichospermum*. The results of non-metric multidimensional scaling (NMDS) showed that the structural composition of the phytoplankton community differed significantly among years, seasons, and sampling areas, mainly due to the redistribution among dominant genera. NMDS analysis also indicated that variation in the phytoplankton community in Lake Hongze was mainly related to water temperature, total nitrogen, total phosphorus, water depth, and transparency. Total nitrogen, water depth, and phytoplankton community structure were significantly correlated with interannual succession, whereas water temperature, total nitrogen, and phytoplankton seasonal succession were also significantly correlated. Combined with the measures taken by the management department in recent years, the changes in the structure of the phytoplankton community may be related to the removal of the fence and other management and restoration measures in Lake Hongze.

Key words: phytoplankton; community succession; long-term observations; human activity; non-metric multidimensional scaling; generalized additive models

浮游植物是水生态系统中重要的初级生产力和食物网的基础^[1]. 相比其它水生生物而言, 浮游植物生长周期短, 对环境的变化较为敏感, 因此常用浮游植物生物量和群落结构反映湖泊现状和变化, 特别是营养盐水平的变化^[2]. 浮游植物群落组成可以用于指示湖泊的污染状态^[3], 如中营养湖泊中蓝藻、绿藻、硅藻和隐藻门都占有一定比例, 富营养型湖泊常以绿藻和蓝藻门占优势^[4]. 因此, 了解浮

游植物群落结构演替规律, 是探究湖泊生态系统结构变化的基础^[5].

近几年来, 研究者们对淡水湖泊浮游植物群落

收稿日期: 2021-09-02; 修订日期: 2021-11-03

基金项目: 江苏省水利科技项目 (2019005, 2019004); 国家自然科学基金项目 (41971146, 42171119); 中国科学院南京地理与湖泊研究所青年科学家小组项目 (E1SL002)

作者简介: 屈宁 (1997 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为浮游植物群落结构演替, E-mail: 1542634098@qq.com

* 通信作者, E-mail: jmdeng@niglas.ac.cn

进行了大量研究,包括浮游植物群落结构、物种多样性、群落演替规律和水环境理化指标的相应关系等.浮游植物群落结构特征及其动态变化是多个环境因子综合作用的结果^[6].吉正元等^[7]的研究表明,水温、溶解氧和高锰酸盐指数显著影响抚仙湖浮游植物群落结构.对于千岛湖这种大型贫-中营养水库,浮游植物群落结构不仅受来水营养盐负荷的影响,还在很大程度上受水文和气象条件的影响^[8].骆马湖浮游植物群落结构变化的主要影响因素是总氮、氟离子浓度和水温^[9].

洪泽湖作为“南水北调”东线工程的主要输水线路之一,是南水北调沿线居民潜在的饮用水源.在气候调节、防洪抗旱和渔业资源等方面有着重要的作用^[10].吴天浩等^[11]的研究利用 2015~2016 年浮游植物进行洪泽湖水水质生物评价,总体上处于 β -中污带.舒卫先等^[12]的研究表明浮游藻类组成的时间动态与温度、水位和营养盐的季节差异有关,而空间动态和水动力因素的空间差异有关.以上研究从不同角度揭示了影响洪泽湖浮游植物变化的因素,但主要分析短期的季节性变化,关于洪泽湖浮游植物长时间尺度变化趋势的研究还比较匮乏.2018 年以来,洪泽湖经历了较多人类活动的影响,如网圩拆除等,导致湖泊生态系统演替可能会出现更多的不确定性^[13,14].并且在 2021 年签署长江流域“十年禁渔”合作协议^[15],本文基于 2015~2020 年浮游植物群落结构和水质监测数据,探究近年来洪泽湖浮游植物群落结构变化规律及其与环境因子之间的关系,对于了解十年禁渔前的生态系统有所帮助,以期对洪泽湖环境保护工作与管理提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 采样点布设

洪泽湖(118°10'~118°52'E, 33°06'~33°40'N)是中国第四大淡水湖,主要由淮河供水、通过三河和高邮湖排入长江,换水周期短,约为 35 d.洪泽湖面积大约为 1 576.9 km²,平均水深 1.77 m^[16].成子湖区位于洪泽湖北部,水体流动性差,水草比较旺盛;溧河洼区被设为湿地保护区,水深较浅,有利于水生植物的生长,但有大量围网分布;湖心区属于过水区,水流从西部流入,东部入江河道排出,水流动性好,很少有水草,同时该区域接纳淮河供水,因此受淮河水水质影响较大^[17].

按照不同生境,洪泽湖共布设 10 个采样点(图 1),涵盖整个湖区各典型水域,包括成子湖(S3、S4)、溧河洼区(S7、S8、S9)和湖心过水区(S1、S2、S5、S6、S10),共 3 个区域(图 1).在各个采样

点于 2015~2020 年逐月采集水样测定其水质指标,采集浮游植物样品进行鉴定,确定浮游植物群落结构.

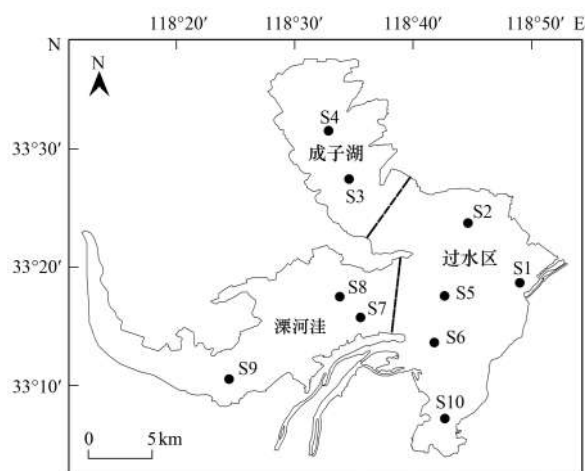


图 1 洪泽湖采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Lake Hongze

1.2 浮游植物采集与处理

2015~2020 年采集洪泽湖 10 个点的浮游植物.使用 2 L 有机玻璃采水器分别取表层、中层和下层水样,充分混合后收集 1 L 混合水样,用于浮游植物的鉴定和计数.浮游植物样品现场加入 10~15 mL 鲁哥试剂进行固定,沉淀 72 h 后采用虹吸法去除上清液并浓缩至 30 mL^[18].参照文献^[19]对浮游植物种类进行鉴定,浮游植物鉴定到种或属.计数时取 0.1 mL 在显微镜下放大 400 倍.由于浮游植物的比重接近 1,故可直接将浮游植物的体积换算成生物量(湿重,单位为 mg·L⁻¹)^[20].

1.3 环境因子测定

使用 YSI6600 多参数水质检测仪现场测定水温、溶解氧(DO)、电导率(Cond, $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)和 pH 等物理化学参数.总氮(TN)测定方法为碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-89);总磷(TP)测定方法为钼酸铵分光光度法(GB 11893-89);化学需氧量(COD)采用碱性高锰酸钾法测定(GB 11892-89);水深采用水深仪测定;透明度(SD)用赛氏透明度盘测定;叶绿素 a(Chla)采用热乙醇法测定.

1.4 数据分析方法

采用广义可加模型(generalized additive models, GAM)估计了洪泽湖 2015~2020 年水质长期变化趋势,GAM 使用 mgcv 软件包中的 gam 函数实现^[21].使用校正后的 r^2 和 P 值来评估模型的拟合度和显著性^[22].

采用非度量多维尺度分析(non-metric multidimensional scaling, NMDS)方法对浮游植物群

落演替规律及主要环境影响因素进行分析,一般认为 NMDS 分析浮游植物群落数据是最有效的方法^[23]. 用于 NMDS 分析的数据一般分为两个部分,环境数据和生物数据. 分析之前对环境数据进行中心标准化统一量纲^[24], 然后进行方差膨胀因子(VIF)检验,排除共线性因素^[25], 在分析之前剔除 VIF > 10 的因子. 同时为减少稀有物种的影响,在数据分析之前,将出现频次小于 4 的物种剔除. NMDS 分析由 vegan 软件包完成,其中 NMDS 由函数 metaMDS 完成,envfit 函数用来计算环境因子与排序轴的关系和显著性分析^[26].

2 结果与分析

2.1 水质长期变化趋势

如图 2 所示, 2015 ~ 2020 年间洪泽湖 $\rho(\text{TN})$ 平均值为 $(1.93 \pm 0.29) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 2016 ~ 2018 年 $\rho(\text{TN})$ 均大于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 并且从 2017 年以后显著下降(GAM, 下同; $r^2 = 0.83$, $P < 0.05$). $\rho(\text{TP})$ 平均值为 $(0.098 \pm 0.013) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 2015 ~ 2020 年总体呈下降趋势($r^2 = 0.51$). $\rho(\text{COD})$ 平均值为 $(4.93 \pm 0.23) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总体呈下降趋势($r^2 = 0.48$). $\rho(\text{Chla})$ 在 2015 ~ 2019 年呈显著上升趋势($r^2 = 0.87$, $P < 0.05$), 平均值为 $(14.79 \pm 2.79) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 在 2019 年出现最大值 $18.08 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 透明度平均值为

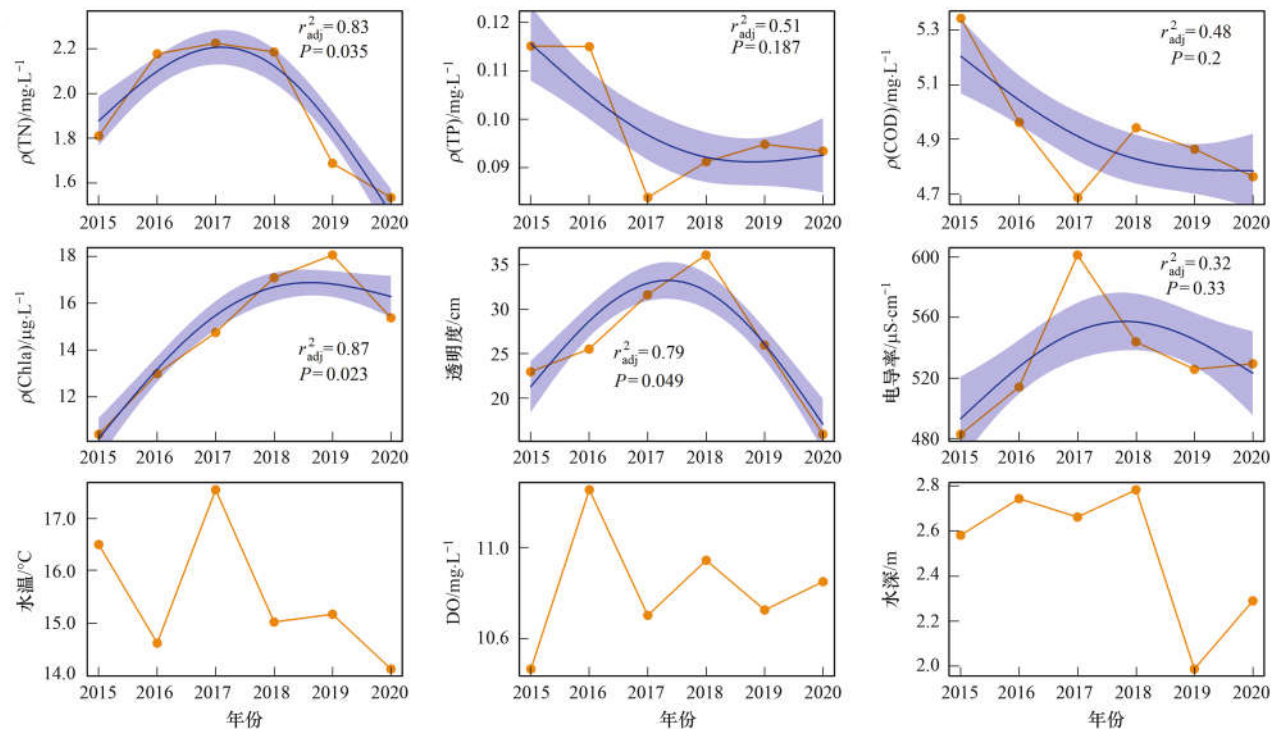
为 $(26.35 \pm 7.00) \text{ cm}$, 2015 ~ 2018 年水体透明度显著升高, 2018 年以后, 透明度显著下降. 电导率平均值为 $(532.95 \pm 39.41) \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, 在 2017 年达到最大值, 为 $601.67 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$. 2015 ~ 2020 年洪泽湖水温保持相对平稳, 水温年平均值为 $(15.50 \pm 1.28) ^\circ\text{C}$, 但从 2016 年后有上升的趋势. 洪泽湖 2015 ~ 2020 年 DO 平均值为 $(10.82 \pm 0.26) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 属于好氧型. 洪泽湖属于典型的大型浅水湖泊, 水深无明显变化规律, 水深平均值为 $(2.51 \pm 0.31) \text{ m}$, 2019 年水深平均值最低为 1.99 m .

2.2 浮游植物群落结构

2.2.1 浮游植物种类

本次调查的浮游植物样品中, 鉴定到包括绿藻门(Chlorophyta)、硅藻门(Bacillariophyta)、蓝藻门(Cyanophyta)、裸藻门(Euglenophyta)、甲藻门(Pyrrophyta)、黄藻门(Xanthophyta)、隐藻门(Cryptophyta)和金藻门(Chrysophyta) 共计 102 属 310 种. 其中绿藻门 39 属、硅藻门 26 属、蓝藻门 19 属、裸藻门 6 属、甲藻门 4 属、黄藻门 3 属、隐藻门 3 属和金藻门 2 属. 分别占总数的 38.24%、25.49%、18.63%、5.88%、3.92%、2.94%、2.94% 和 1.96% (图 3).

依据生物量, 浮游植物优势门类主要为绿藻门和硅藻门, 其次为蓝藻门和隐藻门. 绿藻门优势属有



蓝色实线表示广义可加模型(GAM)估计的长期趋势,阴影区域表示估计的标准误差;

r^2_{adj} 表示校正后的 r^2 ; ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$

图2 洪泽湖 2015 ~ 2020 年水体理化指标长期变化趋势

Fig. 2 Long-term physical and chemical trends in the water of Lake Hongze from 2015 to 2020

栅藻 (*Scenedesmus*)、四角藻 (*Tetraedron*) 和小球藻 (*Chlorella*)；硅藻门优势属有直链藻 (*Aulacoseira*) 和小环藻 (*Cyclotella*)；蓝藻门优势属有微囊藻 (*Microcystis*) 和长孢藻 (*Dolichospermum*)；隐藻门优势属有隐藻 (*Cryptomonas*)。

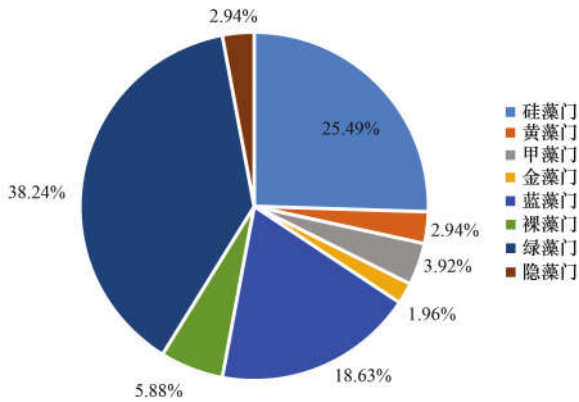


图3 浮游植物种类占比

Fig. 3 Proportion of phytoplankton species

2.2.2 浮游植物生物量和细胞丰度时间分布规律

2015年,藻类生物量主要由绿藻门 ($0.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 贡献 (图4), 占比 58.84%, 2016年藻类生物量 ($2.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 是 2015年藻类生物量 ($0.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的两倍多, 主要由硅藻门 ($0.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比 34.28%) 和绿藻门 ($0.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比 27.24%) 共同贡献。2017年藻类生物量 ($1.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 有下降, 主要由绿藻门 ($0.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比 38.68%) 和蓝藻门 ($0.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比 20.65%) 贡献, 蓝藻门的生物量增多, 硅藻门生物量减少。2018年总生物量 ($2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 最大, 硅藻门成为优势门 (生物量

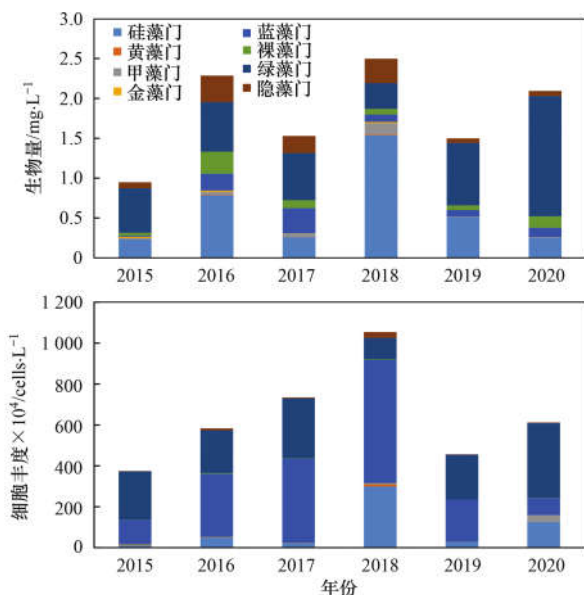


图4 洪泽湖浮游植物丰度和生物量分布及占比情况

Fig. 4 Distribution and proportion of phytoplankton abundance and biomass in Lake Hongze

$1.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 占比为 61.5%。2019~2020年硅藻门生物量逐渐减少, 绿藻门生物量逐步增多, 成为优势门。

2015~2020年浮游植物细胞丰度在 $370 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ ~ $1050 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $635 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 。2015~2018年细胞丰度持续增加, 2015年细胞丰度 ($370 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$) 主要由绿藻门和蓝藻门贡献, 分别占总丰度的 63.45% 和 32.16%, 之后蓝藻门丰度持续增加。在 2018年蓝藻门细胞丰度 ($6030 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比 57.21%) 达到最大值, 同时硅藻门细胞丰度 ($298 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 28.35%) 也显著增加, 成为第二大优势门类。2019年细胞丰度显著下降, 细胞丰度主要由蓝藻门和绿藻门贡献, 分别占总丰度的 45.19% 和 48.23%, 硅藻门细胞丰度 ($28 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 6.23%) 显著下降。2020年绿藻门成为优势门类, 占总丰度的 59.83%。

2.2.3 浮游植物空间差异

在空间分布上, 2015~2020年洪泽湖浮游植物空间分布差异明显 (图5)。从生物量上来看, 2015~2020年生物量均值从高到低的湖区依次为成子湖区、溧河洼区和过水区。成子湖区年均生物量为 $3.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 溧河洼区年均生物量为 $1.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值在 S9 点位为 $3.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最小值在 S7 点位为 $0.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 过水区分布不均匀, 年

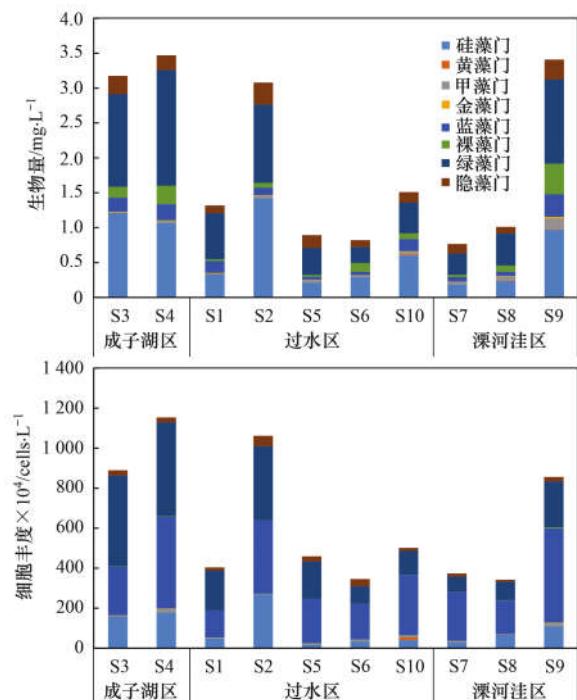


图5 洪泽湖不同站点浮游植物生物量和细胞丰度分布及占比情况

Fig. 5 Distribution and proportion of phytoplankton biomass and abundance in different sites of Lake Hongze

均值为 $1.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值在 S2 为 $3.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最小值在 S6 为 $0.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

从各湖区的细胞丰度来看, 所有湖区均值从高到低依次是成子湖区、过水区和溧河洼区. 其中成子湖区细胞丰度最高, 均值为 $1041.33 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 过水区各点分布不均, 细胞丰度均值为 $556.41 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 最高值在 S2 点位为 $1058.37 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 最低值在 S6 点位为 $350.54 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$; 溧河洼区细胞丰度均值为 $536.47 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中 S9 点位细胞丰度是其余两个采样点的两倍多. 所有湖区的细胞丰度主要由蓝藻门和绿藻门贡献.

基于各采样点的细胞丰度和生物量分布差异可以得知, 成子湖区细胞丰度主要由蓝藻门和绿藻门贡献, 硅藻门次之, 而生物量是由绿藻门和硅藻门主要贡献, 成子湖区总体生物量较高, 因为其群落主要由绿藻门和硅藻门构成, 这类细胞通常体积较大.

2.3 浮游植物群落演替规律和环境因子的关系

NMDS 分析结果表明, 不同年份、不同季节和不同采样区域浮游植物群落结构组成有明显差异 (图 6). 所有环境因素都包括在分析中, 但图 6 中呈现的是显著性的环境因素 ($P < 0.05$).

2015 ~ 2020 年浮游植物群落结构演替变化规律如图 6(a) 所示. 2016 ~ 2018 年浮游植物普遍位于第一轴正半轴, 2018 年明显分开, 而 2019 和 2020 年位于第一轴负半轴, 说明洪泽湖群落结构的年际变化在第一轴表示, 其中 TN 和第一轴呈正相关, TP、水温和第二轴呈正相关, 水深、透明度和第一轴呈正相关、第二轴呈负相关. 浮游植物群落从 2015 年的状态演替到 2018 年 TN 升高的方向, 2018 年后, 由于 TN 降低, 浮游植物群落在 2019 年存在与 2015 年类似的群落结构, 而后再朝着新的方向演替. TN、水深和浮游植物群落结构演替显著相关 ($P < 0.05$).

NMDS 结果表明, 洪泽湖春季、秋季和冬季浮游植物群落结构类似, 夏季由于温度升高和 TP 浓度增加, 浮游植物群落结构发生变化 [图 6(b)]. TN 是引起浮游植物群落组成变化的主要影响因素, TN、水深和浮游植物群落结构演替显著相关 ($P < 0.05$). 温度是引起浮游植物群落结构季节变化的主要因子.

对于洪泽湖不同湖区进行 NMDS 分析表明, 过水区浮游植物群落组成与溧河洼区类似, 而成子湖区表现出明显的区别 [图 6(c)]. 综合来看, NMDS 分析结果表明 TN、TP、水温、水深和透明度等环境因子是浮游植物群落变化的主要因素, 其中 TN 是

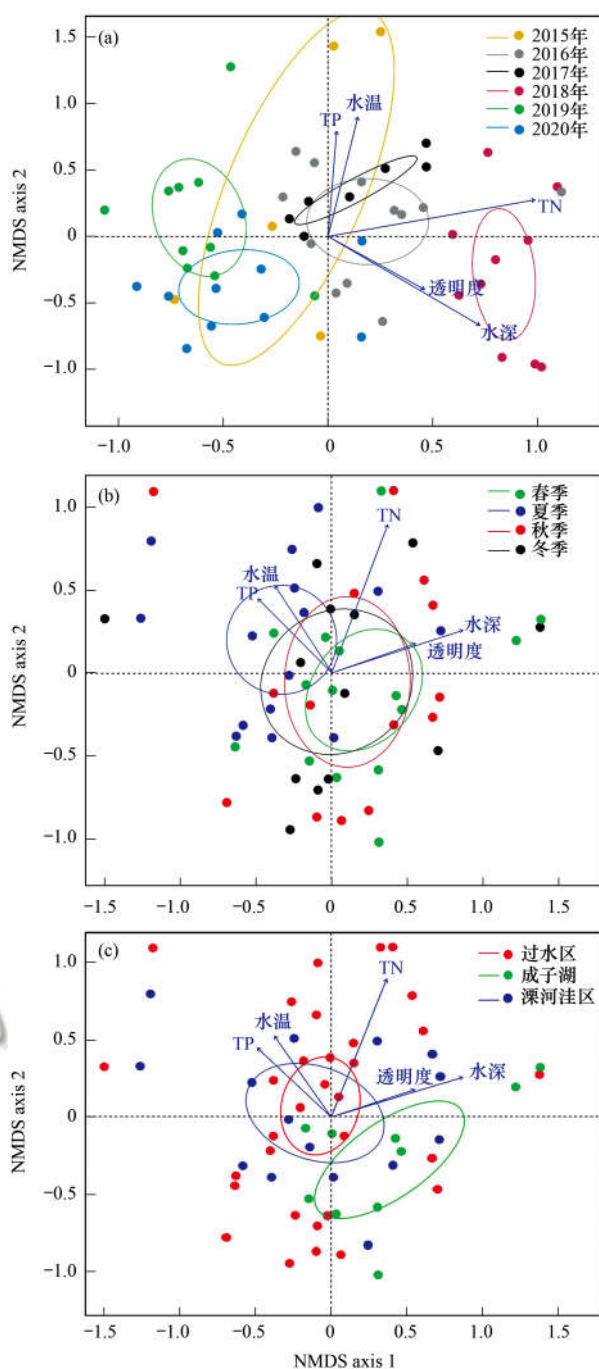


图 6 非度量多维尺度分析排序结果

Fig. 6 Results of non-metric multidimensional scaling

最显著的影响因素.

3 讨论

3.1 洪泽湖浮游植物群落结构的动态变化

自 20 世纪以来, 洪泽湖区域经济高速发展导致湖区水质和环湖土壤带受到不同程度的污染^[27], 浮游植物主要受到水产养殖和洪泽湖周边工业制造的负面影响^[28]. 洪泽湖浮游植物前几年有增加的趋势, 但在近几年浮游植物丰度明显下降. 2000 年韩爱民等^[29]在对洪泽湖生态特性和富营养状态进行

调查时发现,在洪泽湖设立的 10 个采样点中,平均藻细胞密度为 $4.62 \times 10^4 \sim 16.5 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,洪泽湖达到富营养化状态,绿藻门和黄藻门等藻类生长很快. 2002 年调查发现洪泽湖藻类共有 8 门 141 属 165 种,其中以绿藻门、硅藻门和蓝藻门的种类最多^[30]. 舒卫先等^[12]对洪泽湖浮游藻类变化动态及影响因素研究表明,2011 年比 2008 年细胞密度增长近 1 倍,2011 ~ 2013 年在两个监测周期中浮游藻类年平均细胞密度分别达到 $157 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $604 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,2013 年细胞密度明显超过湖泊水华阈值(大于 $100 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)^[31]. 洪泽湖富营养化状态和多数浅水湖泊一致,由于氮磷浓度较高,蓝藻为水华优势门类^[32]. 吴天浩等^[11]于 2015 ~ 2016 年对洪泽湖进行一年的浮游植物样品采集,鉴定共有浮游植物 8 门 147 种,其中绿藻门、硅藻门和蓝藻门物种最多,年平均细胞丰度为 $4\ 670 \times 10^4 \sim 5\ 350 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$. 此次调查 2015 ~ 2020 年浮游植物细胞丰度在 $370 \times 10^4 \sim 1\ 050 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $635 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$. 浮游植物细胞丰度在近几年有下降的趋势. 研究期间洪泽湖浮游植物群落组成由 2015 ~ 2017 年的绿藻和蓝藻门为主,转变到 2018 年的蓝藻和硅藻门为主,绿藻门和隐藻门为辅的浮游植物群落结构,在 2019 年又回到了以绿藻门和蓝藻门为主的浮游植物群落结构,而后朝着新的方向演替,2020 年浮游植物群落结构以绿藻门和硅藻门为主,蓝藻门和甲藻门为辅.

洪泽湖浮游植物群落组成和细胞密度在空间上也有明显差异. 在 2015 ~ 2020 年调查期间,生物量均值从高到低依次是成子湖区、溧河洼区和过水区. 成子湖区由于出入湖河流较少,水体流动性差,并且营养水平在洪泽湖整个湖区中最高^[33],因此浮游植物生物量较大. 而在过水区水流速度过快不利于藻类生物量累积^[34],浮游植物生物量较少. 细胞丰度的空间分布差异也跟水动力要素有关^[35]. 成子湖区的浮游植物细胞丰度最高,过水区靠近出湖口的几个采样点浮游植物细胞丰度较低. 因此不同采样点浮游植物细胞丰度差异可能和洪泽湖独特的过水性质有关,即换水周期越短,越不利于藻类生物量累积^[36].

3.2 环境因子对洪泽湖浮游植物群落结构的影响

浮游植物生长周期短,可以对环境变化做出快速响应. 有研究表明,温度、光照强度、营养盐和生物因素等对浮游植物丰度、群落结构及演替有着非常重要的影响^[37,38]. 本研究通过 NMDS 分析结果表明,水温、TN、TP、水深和透明度是影响洪泽湖浮

游植物群落变化的主要因素.

由图 6(a) 可知,浮游植物群落结构从 2015 年经过 2016 年演替到 2018 年新的群落结构,最后又回到与 2015 年浮游植物群落结构相似的状态,浮游植物群落结构年变化规律是沿着第一轴演替,所以这一演替过程与 TN 浓度、水深和透明度的变化有着很强的关系[图 6(a)]. 2015 ~ 2018 年蓝藻门细胞丰度持续增加(图 4),在 2018 年蓝藻门占据优势门类,这与已有研究的结论一致^[9],可能是由于 TN 浓度增加促进蓝藻门的生长繁殖. 有研究表明 2018 年以前,由于建设用地、围网和网圩养殖面积增加和景观破碎化增加,导致湖区内 TN 浓度上升^[14]. 较高的 TN 在一定程度上促进了蓝藻的生长^[39],当 TN 达到一定浓度时,会使特定的藻类细胞丰度增长,浮游植物群落结构趋于简单化、稳定性程度降低^[40,41]. 有研究表明,洪泽湖北部水流缓慢,水质主要受周围养殖污染的影响较为严重,湖区周围的畜禽养殖过程中养殖生物排放的 COD、氮和磷会对水质产生影响. 2017 年 COD 和总磷浓度降低可能是因为洪泽湖周围畜禽养殖的废水排放控制^[42]. 2017 年气温较高,导致水温出现极值^[43]. 内源污染是洪泽湖水质变化的重要影响因素,大面积圈圩、围网养殖降低自然水域面积,养殖污染则形成过高的营养负荷,2017 年电导率达到最大值,溶氧下降,因为过多的有机质会引起水体缺氧^[44]. 2018 年之后,由于洪泽湖拆除养殖网圩等人类活动的影响^[13],TN 浓度急剧下降,水深和透明度也显著下降,使得浮游植物群落结构回到了与 2015 年相似的状态. NMDS 结果表明,TN、水深和浮游植物群落结构演替显著相关[$P < 0.05$, 图 6(a)].

水温不仅是影响浮游植物生长中非常重要的环境因子,也是影响浮游植物群落结构动态变化的重要影响因素^[45]. 不同浮游植物的耐受温度范围不同,这些不同的耐受范围决定了不同季节的优势浮游植物种类不同. 水温变化对于洪泽湖浮游植物群落结构尤其是季节变化存在较大影响,从图 6 可以看出,水温与第二轴呈现正相关关系. 水温在时间尺度上可以表现为浮游植物的季节演替,如图 6(b) 所示,夏季浮游植物群落结构的变化主要是由于温度升高引起的,与其它研究的结果一致^[46]. 同时,夏季 TP 浓度相对较高,细胞密度增大,但冬季和春季 TP 浓度降低,蓝藻生长会受到一定限制,绿藻和硅藻逐渐取得竞争优势^[47]. 因此,水温和营养成分等是驱动洪泽湖浮游植物季节演替的主要因子.

透明度降低会影响水下光强,进而影响到浮游植物的生长和繁殖. 透明度的高低和浮游植物及其

分泌物质、水体中的有机、无机悬浮物浓度密切相关^[48]. 在对大型浅水湖泊浮游植物和环境因素相关研究中发现, 透明度在很大程度上决定了浮游植物能够利用的有效光源^[35]. 降雨和入湖水流会影响水深和水体透明度, 水深的变化直接通过“浓缩”或“稀释”作用影响浮游植物, 研究表明水位升高会促进蓝藻的生长^[36]. NMDS 排序结果(图 6)可以看出, 透明度和水深对浮游植物群落结构的影响在同一水平上, 但没有水深的影响大. 同时, 降雨和入湖水也是湖体营养盐的主要来源. 因此营养盐、透明度和水深对浮游植物群落结构的影响, 在一定程度上可归结为气候水文条件变化给浮游植物群落结构带来的影响.

对不同湖区的 NMDS 排序结果图 6(c)可以看出, 环境因子的变化尤其是 TP 和水温的降低主导了成子湖区浮游植物演替过程, 促进了绿藻门和绿藻门生长繁殖并占据了优势地位. 这与成子湖区水体流动性差也有关.

4 结论

(1) 2015~2020 年洪泽湖总氮从 2017 年之后呈显著下降趋势, TP、COD 呈总体下降趋势, 水温无明显变化趋势, 水深和透明度从 2015~2018 年上升, 之后显著下降.

(2) 研究期间洪泽湖浮游植物群落组成由 2015~2017 年的绿藻和蓝藻门为主, 转变到 2018 年的蓝藻和硅藻门为主, 绿藻门、隐藻门为辅的浮游植物群落结构, 在 2019 年又回到了以绿藻门和蓝藻门为主的浮游植物群落结构, 而后朝着新的方向演替, 2020 年浮游植物群落结构以绿藻门和硅藻门为主, 蓝藻门和甲藻门为辅.

(3) 洪泽湖浮游植物群落结构变化与水温、TN、TP、水深和透明度等因素有关, 其中 TN、水深和浮游植物群落结构年际演替显著相关, 而水温、TN 和浮游植物季节演替显著相关.

致谢: 感谢彭凯、张庆吉和陈业等协助野外采样.

参考文献:

- [1] Ren Y, Pei H Y, Hu W R, *et al.* Spatiotemporal distribution pattern of cyanobacteria community and its relationship with the environmental factors in Hongze Lake, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(10): 6919-6933.
- [2] Badruzzaman M, Pinzon J, Oppenheimer J, *et al.* Sources of nutrients impacting surface waters in Florida: a review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **109**: 80-92.
- [3] 路娜, 尹洪斌, 邓建才, 等. 巢湖流域春季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(6): 950-956.
- [4] Lu N, Yin H B, Deng J C, *et al.* Spring community structure of phytoplankton from Lake Chaohu and its relationship to environmental factors[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(6): 950-956.
- [5] 张民, 于洋, 钱善勤, 等. 云贵高原湖泊夏季浮游植物组成及多样性[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(6): 829-836.
- [6] Zhang M, Yu Y, Qian S Q, *et al.* Phytoplankton community structure and biodiversity in summer Yunnan-Guizhou Plateau lakes[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(6): 829-836.
- [7] 李蕊, 陈光杰, 康文刚, 等. 抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3168-3178.
- [8] Li R, Chen G J, Kang W G, *et al.* Spatio-temporal variations of diatom community and their relationship with water environment in Fuxian Lake[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3168-3178.
- [9] 柴毅, 彭婷, 郭坤, 等. 2012 年夏季长湖浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. *植物生态学报*, 2014, **38**(8): 857-867.
- [10] Chai Y, Peng T, Guo K, *et al.* Community characteristics of phytoplankton in Lake Changhu and relationships with environmental factors in the summer of 2012[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, **38**(8): 857-867.
- [11] 吉正元, 刘绍俊, 施艳峰, 等. 抚仙湖浮游植物群落结构周年变化及水质生物评价[J]. *海洋湖沼通报*, 2019, (3): 78-86.
- [12] Ji Z Y, Liu S J, Shi Y F, *et al.* Annual variation of phytoplankton community structure in Fuxian Lake and bioassessment of its water quality[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2019, (3): 78-86.
- [13] 笪文怡, 朱广伟, 吴志旭, 等. 2002—2017 年千岛湖浮游植物群落结构变化及其影响因素[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(5): 1320-1333.
- [14] Da W Y, Zhu G W, Wu Z X, *et al.* Long-term variation of phytoplankton community and driving factors in Qiandaohu reservoir, southeast China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(5): 1320-1333.
- [15] 张庆吉, 王业宇, 王金东, 等. 骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1648-1656.
- [16] Zhang Q J, Wang Y Y, Wang J D, *et al.* Succession pattern of phytoplankton and its drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1648-1656.
- [17] 陈业, 彭凯, 张庆吉, 等. 洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3753-3762.
- [18] Chen Y, Peng K, Zhang Q J, *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics and driving factors of zooplankton in Hongze Lake[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3753-3762.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 舒卫先, 张云舒, 韦翠珍. 洪泽湖浮游藻类变化动态及影响因素[J]. *水资源保护*, 2016, **32**(5): 115-122.
- [22] Shu W X, Zhang Y S, Wei C Z. Seasonal dynamics of and factors in phytoplankton in Hongze Lake[J]. *Water Resources Protection*, 2016, **32**(5): 115-122.
- [23] 段海昕, 毛志刚, 王国祥, 等. 洪泽湖养殖网围拆除生态效应[J]. *湖泊科学*, 2021, **33**(3): 706-714.

- Duan H X, Mao Z G, Wang G X, *et al.* Ecological effects on enclosure culture demolition of Lake Hongze[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(3): 706-714.
- [14] 刘超, 王智源, 张建华, 等. 景观类型与景观格局演变对洪泽湖水质的影响[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(8): 3302-3311.
- Liu C, Wang Z Y, Zhang J H, *et al.* Effects of landscape types and landscape pattern evolution on water quality of Hongze Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(8): 3302-3311.
- [15] 曹文宣. 十年禁渔是长江大保护的重要举措[J]. *水生生物学报*, 2022, **46**(1): 1.
- [16] 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.
- [17] 卞宇峥, 薛滨, 张凤菊. 近三百年来洪泽湖演变过程及其原因分析[J]. *湖泊科学*, 2021, **33**(6): 1844-1856.
- Bian Y Z, Xue B, Zhang F J. The changes of Lake Hongze and its driving forces over the past three hundred years[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(6): 1844-1856.
- [18] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [19] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [20] 钱奎梅, 刘霞, 陈宇炜. 淡水浮游植物计数与定量方法[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(5): 767-775.
- Qian K M, Liu X, Chen Y W. A review on methods of cell enumeration and quantification of freshwater phytoplankton[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(5): 767-775.
- [21] Sanchez G. PLS path modeling with R[M]. Berkeley: Trowchez Editions, 2013.
- [22] 邓建明, 秦伯强, 王博雯. 广义可加模型在 R 中的快捷实现及蓝藻水华预测分析中的应用[J]. *生态学杂志*, 2015, **34**(3): 835-842.
- Deng J M, Qin B Q, Wang B W. Quick implementing of generalized additive models using R and its application in blue-green algal bloom forecasting[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(3): 835-842.
- [23] Borcard D, Gillet F, Legendre P. Numerical ecology with R [M]. New York: Springer, 2011.
- [24] 邓建明, 汤祥明, 邵克强, 等. 非度量多维标度在亲水河浮游植物群落分析中的应用[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, **32**(1): 150-156.
- Deng J M, Tang X M, Shao K Q, *et al.* Application of NMDS to analysis of phytoplankton community: a case study of Qinshui River[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, **32**(1): 150-156.
- [25] Zuur A F, Ieno E N, Elphick C S. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2010, **1**(1): 3-14.
- [26] Deng J M, Salmaso N, Jeppesen E, *et al.* The relative importance of weather and nutrients determining phytoplankton assemblages differs between seasons in large Lake Taihu, China [J]. *Aquatic Sciences*, 2019, **81**(3), doi: 10.1007/s00027-019-0645-0.
- [27] 陆娟, 李萍萍. 环洪泽湖区域生态经济发展研究综述[J]. *经济研究导刊*, 2019, (23): 42-43.
- [28] 徐嘉兴, 李钢, 渠俊峰, 等. 洪泽湖地区土地利用与景观格局演变[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, **20**(10): 1211-1216.
- Xu J X, Li G, Qu J F, *et al.* Changes of land use and landscape pattern in Hongze Lake Basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(10): 1211-1216.
- [29] 韩爱民, 杨广利, 张书海, 等. 洪泽湖富营养化和生态状况调查与评价[J]. *环境监测管理与技术*, 2002, **14**(6): 18-20, 22.
- Han A M, Yang G L, Zhang S H, *et al.* Investigation and evaluation about the state of eutrophication and ecology of the Lake of Hongze [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2002, **14**(6): 18-20, 22.
- [30] 戴洪刚, 杨志军. 洪泽湖湿地生态调查研究与保护对策[J]. *环境科学与技术*, 2002, **25**(2): 37-39.
- Dai H G, Yang Z J. Investigation of wetland ecological condition in Hongze Lake [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **25**(2): 37-39.
- [31] 李原, 张梅, 王若南. 滇池的水华蓝藻的时空变化[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2005, **27**(3): 272-276.
- Li Y, Zhang M, Wang R N. The temporal and spation variation of the cyanobacteria which caused the water bloom in the Dianchi Lake, Kunming, China [J]. *Journal of Yunnan University*, 2005, **27**(3): 272-276.
- [32] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. *湖泊科学*, 2002, **14**(3): 193-202.
- Qin B Q. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangze River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, **14**(3): 193-202.
- [33] 王兆群, 张宁红, 张咏. 洪泽湖藻类与环境因子逐步回归统计和蓝藻水华初步预测[J]. *中国环境监测*, 2012, **28**(4): 17-20.
- Wang Z Q, Zhang N H, Zhang Y. Prediction of blue-green algae bloom using stepwise multiple regression between algae & related environmental factors in Hongze lake [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2012, **28**(4): 17-20.
- [34] 李亚军, 张海涛, 肖晶, 等. 筑坝河流水力条件对浮游植物动态变化的影响[J]. *地球与环境*, 2019, **47**(6): 857-863.
- Li Y J, Zhang H T, Xiao J, *et al.* Effects of river hydrology on phytoplankton dynamics in dammed rivers [J]. *Earth and Environment*, 2019, **47**(6): 857-863.
- [35] 何书晗, 欧阳添, 赵璐, 等. 三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3242-3252.
- He S H, Ouyang T, Zhao L, *et al.* Analysis of phytoplankton community stability and influencing factors in a tributary of the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3242-3252.
- [36] 郭赞, 潘越, 黄晓峰, 等. 水力方式对太湖蓝藻的抑制效果研究[J]. *环境科技*, 2021, **34**(2): 38-43.
- Guo Y, Pan Y, Huang X F, *et al.* Study on inhibition effect of hydrodynamic mode on cyanobacteria in Taihu Lake [J]. *Environmental Science and Technology*, 2021, **34**(2): 38-43.
- [37] 朱利英, 陈媛媛, 刘静, 等. 温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 702-712.
- Zhu L Y, Chen Y Y, Liu J, *et al.* Spatio-temporal evolution and relationship of water environment quality and phytoplankton community in Wenyu River[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 702-712.
- [38] Niu Y, Liu C L, Lu X L, *et al.* Phytoplankton blooms and its influencing environmental factors in the southern Yellow Sea[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2021, **47**, doi: 10.1016/J.

- RSMA. 2021. 101916.
- [39] 崔嘉宇, 郭蓉, 宋兴伟, 等. 洪泽湖出入河流及湖体氮、磷浓度时空变化(2010-2019 年)[J]. 湖泊科学, 2021, **33**(6): 1727-1741.
- Cui J Y, Guo R, Song X W, *et al.* Spatio-temporal variations of total nitrogen and total phosphorus in lake and inflow/outflow rivers of Lake Hongze, 2010- 2019 [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, **33**(6): 1727-1741.
- [40] 任杰, 周涛, 朱广伟, 等. 苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1742-1753.
- Ren J, Zhou T, Zhu G W, *et al.* Community structure characteristics of diatom in reservoirs located in the south of Jiangsu Province, China and its control factors [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1742-1753.
- [41] 曾茹, 李亚军, 何金曼, 等. 陵水湾春秋两季浮游植物群落结构及水质调查[J]. 热带生物学报, 2021, **12**(2): 167-175.
- Zeng R, Li Y J, He J M, *et al.* Investigation of phytoplankton community structure and seawater quality in Lingshui Bay in spring and autumn[J]. Journal of Tropical Biology, 2021, **12**(2): 167-175.
- [42] 王霞, 刘雷, 何跃, 等. 洪泽湖水体富营养化时空分布特征与影响因素分析[J]. 环境监测管理与技术, 2019, **31**(2): 58-61.
- Wang X, Liu L, He Y, *et al.* Temporal-spatial distribution characteristics and factor analysis of eutrophication in Hongze Lake[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2019, **31**(2): 58-61.
- [43] 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.
- [44] 杨井志成, 罗菊花, 陆莉蓉, 等. 东太湖围网拆除前后水生植被群落遥感监测及变化[J]. 湖泊科学, 2021, **33**(2): 507-517.
- Yang J Z C, Luo J H, Lu L R, *et al.* Changes in aquatic vegetation communities based on satellite images before and after pen aquaculture removal in East Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, **33**(2): 507-517.
- [45] Liu X, Lu X H, Chen Y W. The effects of temperature and nutrient ratios on *Microcystis* blooms in Lake Taihu, China: an 11-year investigation[J]. Harmful Algae, 2011, **10**(3): 337-343.
- [46] 董贯仓, 冷春梅, 丛旭日, 等. 南水北调东线工程运行 3 年后东平湖浮游植物群落特征及环境驱动因子[J]. 湖泊科学, 2022, **34**(1): 61-73.
- Dong G C, Leng C M, Cong X R, *et al.* Phytoplankton community and driving environmental factors in Lake Dongping after 3 years implementation of the east route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, **34**(1): 61-73.
- [47] 王远飞, 周存通, 赵增辉, 等. 亚热带水库浮游植物季节动态及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2021, **41**(10): 4010-4022.
- Wang Y F, Zhou C T, Zhao Z H, *et al.* Seasonal dynamics of phytoplankton and its relationship with the environmental factors in subtropical reservoirs[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(10): 4010-4022.
- [48] 陶敏, 熊钰, 李斌, 等. 嘉陵江四川段浮游植物群落时空分布及其环境影响因子[J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(7): 1680-1694.
- Tao M, Xiong Y, Li B, *et al.* Spatio-temporal distribution of phytoplankton and its environmental impact factors in Sichuan section of Jialing River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, **30**(7): 1680-1694.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)