

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型非邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐嵘, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651) 《环境科学》征稿简则 (3718) 信息 (3836, 3885, 3893)	

洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素

陈业^{1,2}, 彭凯², 张庆吉², 蔡永久², 张永志¹, 龚志军^{2*}, 项贤领^{1*}

(1. 安徽师范大学生态与环境学院, 芜湖 241002; 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)

摘要: 洪泽湖是我国第四大淡水湖, 承担着周边的工农业用水以及为人类提供渔业资源等重要功能. 研究洪泽湖浮游动物群落结构变化可为洪泽湖生态环境的科学管理提供理论依据. 通过 2017 年 3 月至 2018 年 2 月的逐月调查数据, 结合洪泽湖浮游动物的种类组成、密度和生物量的时空变化, 以及群落多样性和优势种的季节变化特征, 并运用典范对应分析等方法探讨了洪泽湖浮游动物的时空变化与环境因子的相互关系. 群落结构分析表明, 洪泽湖浮游动物年均密度为 $383.87 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$, 年均生物量为 $1.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 洪泽湖浮游动物群落结构时空变化较大, 时间上夏季浮游动物群落结构波动较大, 秋季浮游动物密度与生物量均达到最大值, 冬季浮游动物群落结构最为简单; 空间上成子湖和溧河洼浮游动物较为丰富, 差异较小, 过水区浮游动物较少且变化较大. 典范对应分析表明, 洪泽湖浮游动物群落结构的时空变化与水位、总磷、水温和总氮等因素显著相关. 不同时间浮游动物群落结构变化的主导因素不同, 夏季主导因素是水位与水温; 秋冬季主导因素是水温、营养盐及叶绿素等. 不同湖区点位集中程度不同, 过水区分布的更为分散, 浮游动物群落结构差异较大, 成子湖和溧河洼分布的相对集中, 浮游动物群落结构差异较小. 水位波动对浮游动物群落结构的变化影响最大, 表现在水位波动会直接影响浮游动物群落结构, 同时也会通过影响水质而间接影响浮游动物群落结构.

关键词: 浅水湖泊; 浮游动物; 群落结构; 时空分布; 水位

中图分类号: X174 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3753-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010195

Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake

CHEN Ye^{1,2}, PENG Kai², ZHANG Qing-ji², CAI Yong-jiu², ZHANG Yong-zhi¹, GONG Zhi-jun^{2*}, XIANG Xian-ling^{1*}

(1. School of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Hongze Lake is the fourth largest freshwater lake in China and is an important source of water for surrounding industrial and agricultural processes and fishery resources. Analyzing the changes in the zooplankton community structure in Hongze Lake can provide scientific support for the scientific management of its ecology and environment. A one-year monthly monitoring study was conducted from March 2017 to February 2018 to analyze the temporal and spatial changes in species composition, density, and biomass of zooplankton in Hongze Lake, as well as the seasonal changes in community diversity and dominant species. Canonical correspondence analysis was employed to explore the relationships between the temporal and spatial changes in zooplankton and the environmental factors of Hongze Lake. The results showed that the average annual density of zooplankton in Hongze Lake was $383.87 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$, and the average annual biomass was $1.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The community structure of zooplankton in Hongze Lake varied greatly across time and space. Community structure varied greatly in summer, and zooplankton density and biomass reached a maximum in autumn. The community structure of the zooplankton was the simplest in winter. Chengzi Bay and Lihewa Bay exhibited an abundance of many different zooplankton species with limited spatial differentiation, whereas the zooplankton in the overflow area comprised fewer species but exhibited greater spatial variation. In summer, water level and temperature are the dominant factors, whereas in autumn and winter, the dominant factors are water temperature, nutrients, and chlorophyll. Canonical correspondence analysis showed that the temporal and spatial changes in zooplankton community structure in Hongze Lake were mainly determined by water level, total phosphorus, water temperature, and total nitrogen content. Water level fluctuation has the greatest direct impact on zooplankton community structure, and water quality regulation has indirect impact.

Key words: shallow lake; zooplankton; community structure; temporal and spatial distribution; water level

洪泽湖是南水北调工程东线最大的调蓄型湖泊, 也是我国第四大淡水湖泊, 位于淮河中下游, 具有防洪、灌溉、调水、水产、水运和水电等多种功能^[1]. 洪泽湖水质的好坏直接影响着苏北地区的水质安全^[2]. 随着洪泽湖周边经济的快速发展, 人类活动强度加剧, 导致洪泽湖的生态环境不断恶化(如富营养化加剧和水质下降等)^[3]. 洪泽湖健

康状态面临的主要问题为: 蓄水范围内水域开发利用

收稿日期: 2020-10-21; 修订日期: 2021-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31872208); 江苏省水利科技项目(2019005); 安徽高校协同创新项目(GXNT-2020-075); 中国科学院青年创新促进会项目(2020316)

作者简介: 陈业(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为淡水生态学, E-mail: Ychen_niglas1020@163.com

* 通信作者, E-mail: zjgong@niglas.ac.cn; xiangxianling@163.com

用强度大,湖泊自由水面率低,水生植物覆盖度低;水质较差,总氮和总磷浓度偏高,水体处于轻度富营养状态^[4].

浮游动物是淡水生态系统中重要的生物类群,在维持水生态系统结构和功能的完整性(如:是食物网重要的一环,调节水体的自净能力等)等方面具有重要意义^[5].浮游动物对环境变化反应敏感,是水体中重要的指示类群^[6].目前国内外对淡水浮游动物进行了大量研究,表明不同水域浮游动物群落结构变化的主要影响因素不同,包括非生物因素(如:水温和富营养化等)和生物因素(如:竞争和捕食等)^[7~9].浮游动物作为介于高级消费者和初级生产者之间的中间营养层,受上行效应和下行效应两种机制的高度影响.因此理化因素以及鱼类和浮游植物生物量均会对浮游动物群落结构产生影响^[10~12],在分析浮游动物群落结构时,需要综合考虑各种因素对浮游动物的影响程度^[13].一般而言,浮游动物不同类群拥有不同的繁殖策略和扩散方式,例如枝角类和轮虫的休眠卵可以被不同媒介(如风、鱼和鸟等)携带,使浮游动物在不同的空间尺度上重新定殖^[14].此外,较小的浮游动物有更高的丰度,也更容易转移^[15,16].

通常情况下,受湖泊水温和浮游植物生物量的影响,浮游动物密度呈现典型的夏高冬低的特征.对于洪泽湖来说,虽然淮河流域降雨集中于夏季,但受水位调蓄影响,多年来洪泽湖水位变化均呈现出夏低冬高的特征,与江淮流域多数湖泊均有显著不同,同时洪泽湖也是典型的过水性湖泊,其水流的变化对洪泽湖浮游动物群落结构影响较大.在洪泽湖这种特殊的湖泊水文条件下,浮游动物的响应目前鲜有研究.因此洪泽湖可以作为一个很好的研究对象,来分析水位波动对浮游动物的影响.同时研究洪泽湖浮游动物群落结构的时空变化,对洪泽湖生态环境和水生资源的管理等也具有重要意义.因此本文通过对洪泽湖为期 1 a 的浮游动物野外调查,分析洪泽湖浮游动物群落结构的时空变化,并结合水环境因子数据,使用典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)对洪泽湖浮游动物群落结构与水环境因子的关系进行研究,探究洪泽湖浮游动物群落结构变化的主要影响因子,丰富洪泽湖的浮游动物研究,以期为洪泽湖的生态环境保护与治理提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 采样时间及采样点位

洪泽湖湖泊面积较大,平均水位在 12.5 m 时面

积大约为 1 576.9 km².属于淮河中下游段的大型过水性湖泊,换水周期较快,出入湖泊的水流在南面蒋坝形成流速较快的过水通道.成子湖区位于北部,多为中小入湖河流,水体流动性差,有水草分布,溧河洼区位于西部,该地区设为湿地保护区,水深较浅,同时设有大量围网,中南部湖心区,水流从西部淮河流入,从东部入江河道排出,水流较大,流动性好,难以见到水生植物,水质主要受入湖河流淮河影响.根据洪泽湖具体情况,考虑水质、围网养殖和水体流动性等情况,在洪泽湖湖区设置 10 个采样点,分成 3 个不同湖区(图 1),调查时间设置在 2017 年 3 月~2018 年 2 月,于每月月底进行采样.

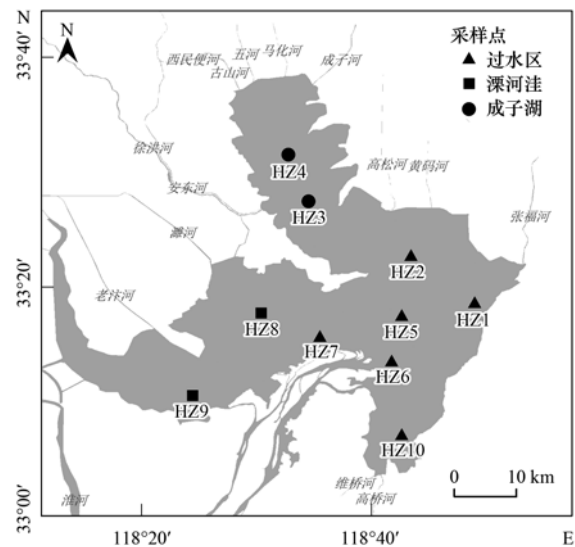


图 1 洪泽湖采样点分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites in Hongze Lake

1.2 样品采集

1.2.1 水质

水温(WT)、溶解氧(DO)和电导率(COND)等水质指标由 YSI6600 多参数水质监测仪现场测定;总氮(TN)用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定(GB 11894-89);总磷(TP)用钼酸铵分光光度法测定(GB 11893-89);高锰酸盐指数用碱性高锰酸钾法测定(GB 11892-89);透明度(SD)用塞式透明度盘测定;水深(WD)用水深仪测定;叶绿素 a(Chla)用热乙醇法测定;水位(WL)数据来自于蒋坝水文站.

1.2.2 浮游动物

浮游动物采样时,枝角类、桡足类使用 2.5 L 有机玻璃采水器采集表层 0.5 m 下,底层 0.5 m 以上水样各 5 L,经 25 号浮游生物网过滤浓缩,放入加 7% 甲醛的小方瓶中固定,回到实验室后定容到 30 mL.分层采集 1 L 混合水样,加入 10~15 mL 鲁哥氏液固定,回到实验室静置 48 h 后吸取上清液浓缩定容至 30 mL,用于轮虫样品的鉴定与计数.在鉴定

时,充分摇匀浓缩的样品,用移液器快速吸取 1 mL 样品置于 1 mL 计数板内,在光学显微镜下全片计数. 每个样品计数 3 片,求平均值. 浮游动物鉴定参照文献[17~19]. 陈非洲^[20]的研究建议在分析淡水浮游动物时一般不包括原生动.

1.3 数据分析

大型浮游动物生物量的计算中,枝角类的生物量根据体长-体重回归方程换算^[21],桡足类根据外形的几何形状换算为生物量^[22]; 轮虫生物量根据其平均湿重进行换算^[21]. 使用浮游动物优势度指数(Y)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数(D)和 Pielou 均匀度指数(J)对洪泽湖后生浮游动物群落结构进行分析评价. 计算公式如下:

$$Y = (N_i/N) \times f_i$$
$$H' = - \sum_{i=1}^S \left[\frac{N_i}{N} \times \log_2(N_i/N) \right]$$
$$D = (S - 1)/\ln(N)$$
$$J = H'/\ln S$$

式中, N_i 为样品中某种生物的总个体数; N 为样品中各生物的总个体数; f_i 为某物种出现的频率; S 为所有样品中的种属总数.

数据的前期处理在 Excel 中完成,浮游动物年

平均密度与生物量的空间分布图在 ArcGIS 10.7 中绘制,对物种数据进行 Hellinger 转换以及环境因子数据标准化之后再进行典范对应分析(CCA),使用 R 语言 vegan 包完成,在进行 CCA 分析之前,先对浮游动物密度数据进行去趋势对应分析(DCA),得到最大梯度长度 >4,故选用典范对应分析(CCA).

2 结果与分析

2.1 洪泽湖环境因子的变化

洪泽湖环境因子逐月变化如图 2 所示,水位逐月变化如图 3 所示. 各环境因子季节变化显著,其中高锰酸盐指数、TP、Chla、WT 和 COND 呈现出先上升后下降的变化趋势; TN、DO 和 WD 呈现出先下降后上升的变化趋势; SD 呈现波动变化,并且夏季最低. 受湖泊水位调蓄影响,水位呈现夏季较低,冬季较高的特征. TN 月平均值波动范围为 1.67 ~ 2.85 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,春冬季 TN 含量高于夏秋季. TP 月平均值波动范围为 0.06 ~ 0.12 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,夏秋季 TP 含量高于春冬季.

2.2 浮游动物各类群的时空分布

洪泽湖的逐月调查的定量样品中,共鉴定出浮游动物 63 种. 其中轮虫 8 科 12 属 24 种,枝角类 6

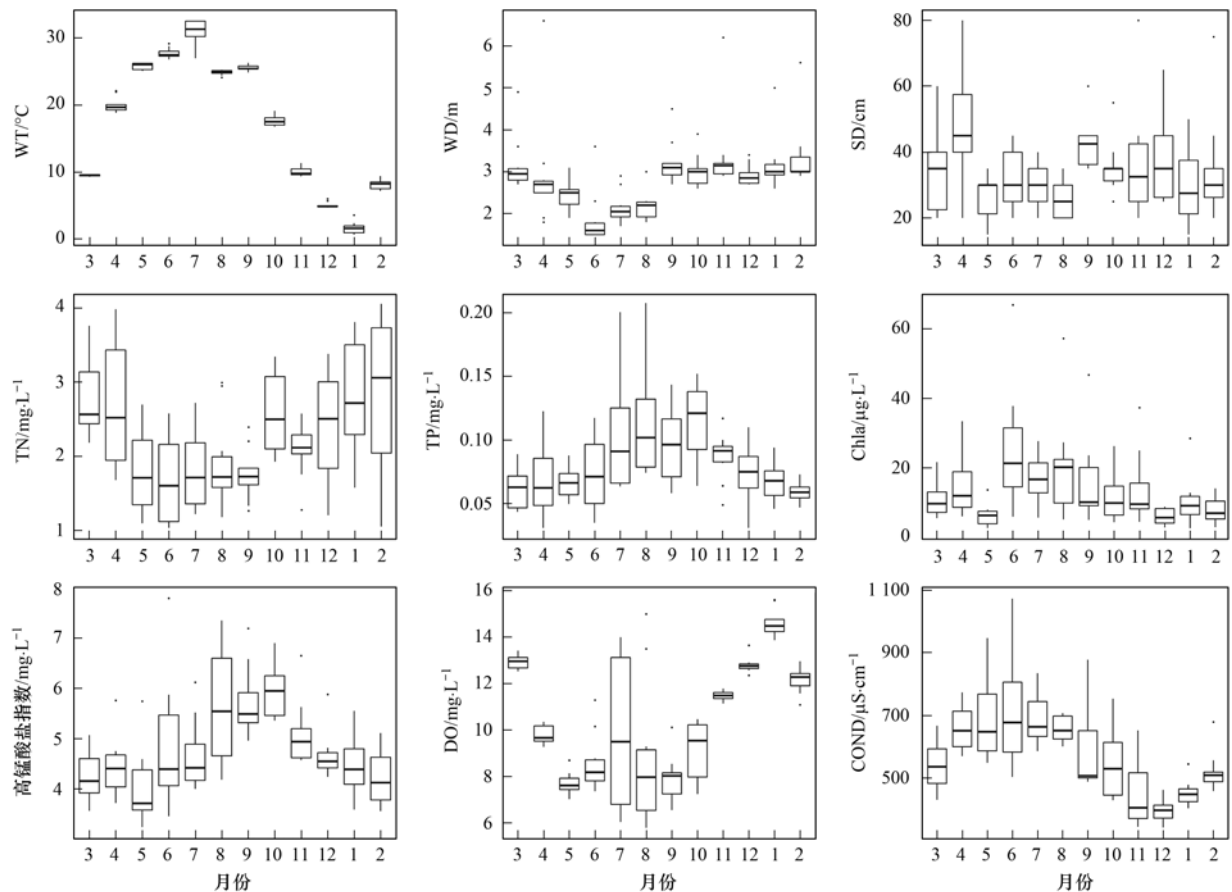


图2 洪泽湖环境因子的逐月变化

Fig. 2 Monthly changes in environmental factors of Hongze Lake

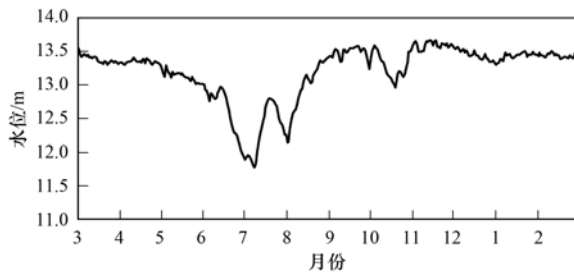


图3 2017年3月至2018年2月洪泽湖水位逐月变化

Fig. 3 Monthly changes in water level of Hongze Lake from March 2017 to February 2018

科13属19种,桡足类10科14属20种.夏季洪泽湖浮游动物种类最为丰富,共有44种,冬季最少,共有16种.夏季到冬季轮虫与枝角类具有明显的减少趋势.各季节均出现的轮虫种类有萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)、角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*)、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)和针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*),枝角类的简弧象鼻溞(*Bosmina coregoni*),桡足类的中华

窄腹剑水蚤(*Limnithona sinensis*)和无节幼体(Nauplii).就不同湖区而言,过水区平均种类数最少,成子湖与溧河洼平均种类数相近且较多.全年出现总种类数,过水区最高,成子湖次之,溧河洼最少.

2.3 浮游动物密度与生物量的时空分布

洪泽湖浮游动物年均密度为 $383.87 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$,以轮虫为主(占比88.5%),枝角类与桡足类的密度较低(占比11.5%).洪泽湖浮游动物年均生物量为 $1.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,以枝角类为主(占比72.5%),轮虫与桡足类生物量较低(占比27.5%).浮游动物生物量与密度的时间分布如图4所示,浮游动物生物量最高月份出现在9月,为 $7.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;生物量较低的为5、1和2月.5~9月生物量逐渐升高,9月至翌年2月逐渐降低.浮游动物密度最高月份出现在10月,为 $1736.9 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$,较低的为5、1和2月.3~5月和6~8月密度逐渐降低,8~10月密度逐渐升高,10月至翌年1月逐渐降到最低.浮游动物生物量与密度空间分布如图5所示,整体上成子湖与过

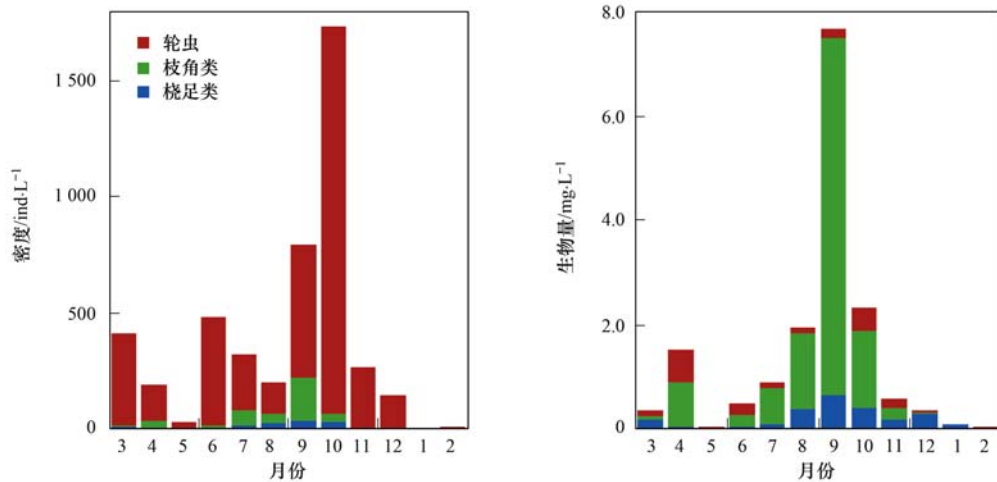


图4 洪泽湖浮游动物密度与生物量时间分布

Fig. 4 Temporal changes in zooplankton density and biomass in Hongze Lake

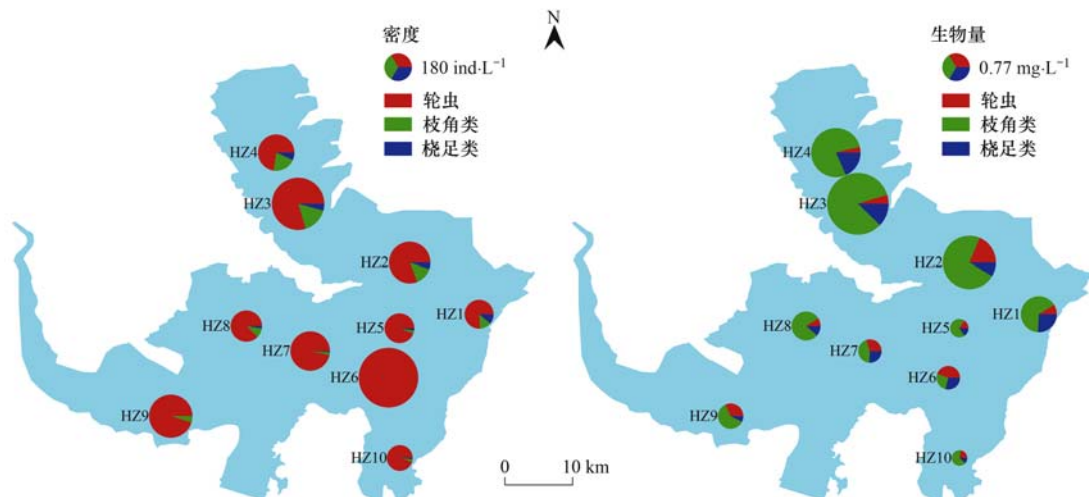


图5 洪泽湖浮游动物密度与生物量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of zooplankton density and biomass in Hongze Lake

水区东北部浮游动物生物量较高, 溧河洼与过水区生物量较低; 从浮游动物密度来看, 成子湖大于过水区、大于溧河洼。洪泽湖浮游动物生物量各类群中枝角类占据着绝对优势, 而轮虫占据着浮游动物密度的绝对优势, 桡足类的生物量与密度均较低。

2.4 浮游动物优势种

洪泽湖浮游动物优势种包括轮虫中的螺形龟甲轮虫与针簇多肢轮虫, 枝角类的简弧象鼻溞, 桡足类的中华窄腹剑水蚤与无节幼体。随着季节的变动, 优势种也发生着变化, 春季优势种有螺形龟甲轮虫、针簇多肢轮虫、梳状疣尾轮虫 (*Synchaeta pectinate*) 和简弧象鼻溞; 夏季优势种有矩形龟甲轮虫 (*Keratella quadrata*)、曲腿龟甲轮虫、针簇多肢轮虫、简弧象鼻溞和角突网纹溞 (*Ceriodaphnia cornuta*); 秋季优势种有螺形龟甲轮虫、针簇多肢轮虫和简弧象鼻溞; 冬季优势种有针簇多肢轮虫

和无节幼体。优势种主导着浮游动物群落结构, 优势度最高的螺形龟甲轮虫、针簇多肢轮虫和简弧象鼻溞生物量与密度的时空变化, 与浮游动物生物量与密度的时空变化一致。

2.5 多样性指数

洪泽湖 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Margalef 丰富度指数 (D) 和 Pielou 均匀度指数 (J) 时空变化如图 6 所示, 时间上 H' 、 D 与 J 存在波动, H' 表现出在 7、8 和 9 月出现峰值, 9 月之后 H' 逐渐降低。 D 整体上, 3~7 月逐渐上升, 7~12 月逐渐降低, 12 月至翌年 2 月逐渐升高。 5 月 D 较为特殊, 最大值达到 6.0。 J 整体上表现出 3~5 月逐渐升高, 5~6 月之间存在下降, 6~10 月呈上升趋势, 10 月到翌年 1 月呈降低趋势, 1~2 月有所上升。 空间上整体表现出, 成子湖 H' 、 D 和 J 相对较高, 溧河洼次之, 过水区最低。

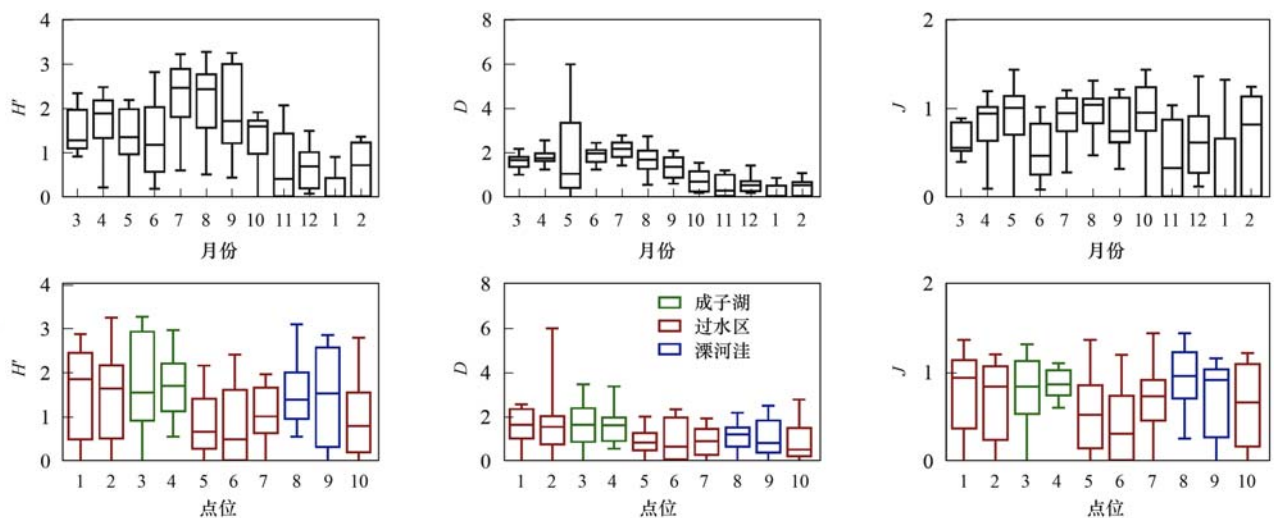


图 6 洪泽湖浮游动物多样性指数时空变化

Fig. 6 Spatio-temporal changes in zooplankton diversity indices in Hongze Lake

2.6 浮游动物与环境因子的典范对应分析

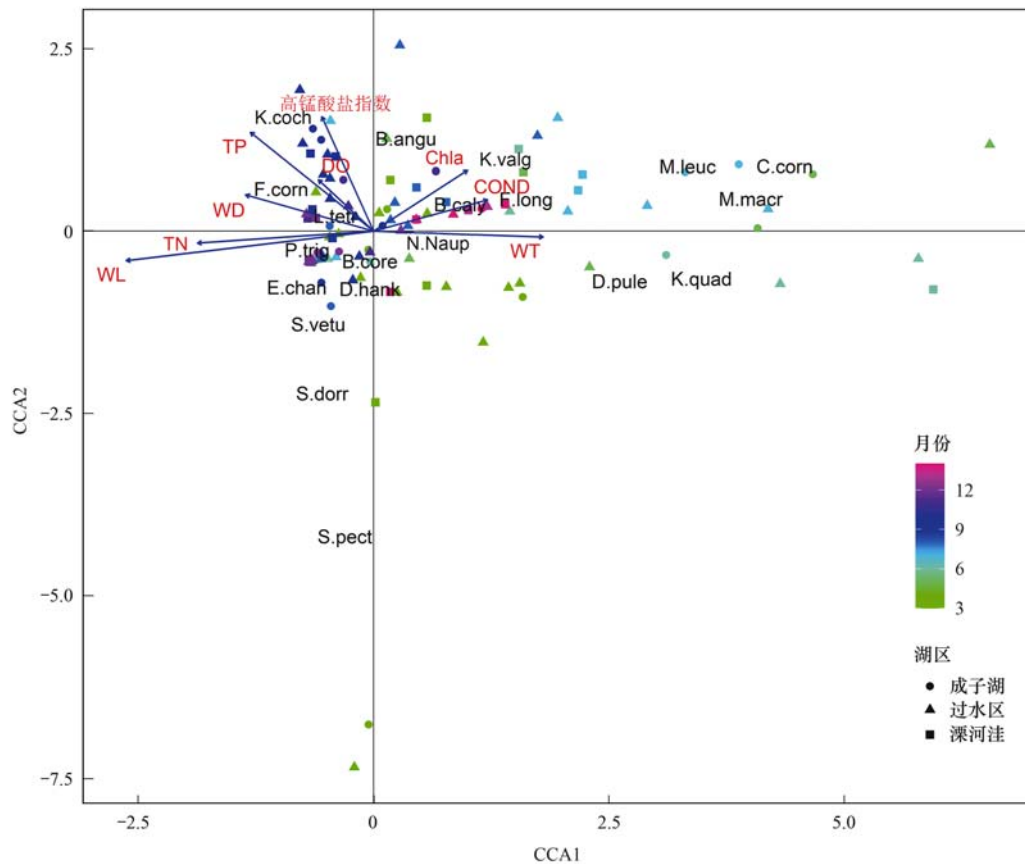
CCA 分析结果显示, 浮游动物群落结构的时空变化与 WL、TN、TP、高锰酸盐指数、Chla、COND、WT、WD 以及 DO 显著相关。前两轴分析结果共解释总方差的 23.2% ($P < 0.05$)。第一轴特征根为 0.34, 第二轴特征根为 0.29, 前两轴的解解释率占总解释率的 54.2%。根据排序结果, WL、TP 和 TN 与第一轴呈显著负相关, WT 和 COND 与第一轴呈显著正相关, 高锰酸盐指数和第二轴呈显著正相关, 其他环境因子呈显著负相关。环境因子中 WL 对浮游动物群落结构的影响最大, 其次是 TN、WT 和 TP 对浮游动物群落结构的影响也较大, WD、高锰酸盐指数、COND、Chla 和 DO 对浮游动物群落结构影响相对较小。从图 7 还可以看出浮游动物群落结构呈现出一定的季节变化, 其中秋、冬季的点位比较密集,

浮游动物群落结构较为稳定, 更多的受到水温、水质等的影响; 春、夏季的点位比较疏散, 浮游动物群落结构不稳定, 受多重因素影响。图 7 不同湖区点位集中程度不同, 过水区分布得更为分散, 浮游动物群落结构差异较大, 成子湖和溧河洼分布得相对集中, 浮游动物群落结构差异较小。就物种与环境因子的关系而言, 角突网纹溞、多刺裸腹溞 (*Moina macrocopa*)、广布中剑水蚤 (*Mesocyclops leuckarti*)、矩形龟甲轮虫和蚤状溞 (*Daphnia pulex*) 密度的变化与 WT、COND 和 Chla 呈正相关, 与其他环境因子呈负相关。

3 讨论

3.1 洪泽湖理化因子的变化

梅海鹏等^[23]对洪泽湖近 50 年的水位变化进行



P. trig 表示针簇多肢轮虫、K. coch 表示螺形龟甲轮虫、B. core 表示筒弧象鼻蚤、N. Naup 表示无节幼体、K. valg 表示曲腿龟甲轮虫、B. caly 表示蓼花臂尾轮虫、K. quad 表示矩形龟甲轮虫、B. angu 表示角突臂尾轮虫、F. long 表示长三肢轮虫、C. corn 表示角突网纹蚤、S. vetu 表示老年低额蚤、L. tetr 表示中华窄腹剑水蚤、D. pule 表示蚤状蚤、F. corn 表示角三肢轮虫、S. pect 表示梳状疣尾轮虫、M. leuc 表示广布中剑水蚤、S. dorr 表示汤匙华哲水蚤、E. chan 表示兴凯侧突水蚤、M. macr 表示多刺裸腹蚤、D. hank 表示兴凯秀体蚤

图 7 洪泽湖浮游动物与环境因子的典范对应分析

Fig. 7 Canonical correspondence analysis of zooplankton and environmental factors in Hongze Lake

了分析,根据洪泽湖水位特征值的年际变化规律,将其分为 5 个时期,分别分析各个时期年内变化过程。将洪泽湖水位特征值在年内变化分为 3 个阶段,蓄水期(10 月至翌年 4 月)、泄水期(5~6 月)和涨水期(7~9 月)。这与本次调查期间洪泽湖水位变化较为相似。在 7 月初至 8 月初涨水期存在较大的波动。湖泊透明度主要受水体中悬浮颗粒物和藻类浓度的影响,但洪泽湖作为大型浅水过水性湖泊,水体中悬浮颗粒物浓度较大,是影响透明度的主要因子。尤其在水位调控期间,水位较低,受风浪扰动作用更为强烈,水体透明度会显著下降。洪泽湖水体营养盐以及叶绿素呈现显著的季节变化,例如总氮夏低冬高、总磷夏高冬低和叶绿素夏高冬低等特征,这与多数长江中下游地区湖泊较为相似,季节效应明显。前人也对出现这种变化的原因开展了诸多研究,例如总氮夏季低可能是由于夏季温度较高,反硝化作用强烈导致水体氮的去除^[24],总磷夏季高可能是由于藻类的奢侈消费吸收过量的磷死亡后向水体中释放^[25, 26]以及夏季浮游植物光合作用导致 pH 增加

促进磷的释放^[27, 28],此外温度也是促进夏季磷内源释放加快的主要因子之一,同时雨季的充沛降雨也会导致流域面源磷的输入^[29]。对于洪泽湖而言,虽然其营养盐指标大体上也呈现这种变化特征,但与之不同的是洪泽湖营养盐及叶绿素各指标在 5~8 月常出现波动。由于 5~8 月是重点水位调控阶段,结合洪泽湖过水性湖泊的特征,这可能是由于上游来水水质不稳定,同时水位调控期间湖泊水容量较低,湖泊对上游污染物输入的缓冲能力下降,水质更容易受上游来水影响。因此洪泽湖水质的年内变化受季节变化和水位调控共同影响,其中水位调控容易造成湖泊水质波动变化。

3.2 洪泽湖浮游动物的演变

据文献[30], 1974~1975 年间洪泽湖有浮游动物 70 种,其中轮虫 37 种,枝角类 19 种,桡足类 14 种。优势种有轮虫中的蓼花臂尾轮虫、台式合甲轮虫(*Diplois daviesiae*)、螺形龟甲轮虫、矩形龟甲轮虫、曲腿龟甲轮虫、晶囊轮属(*Asplanchna* sp.)、盖刺异尾轮虫(*Trichocerca capucina*)、奇异巨腕轮虫

(*Pedalia mira*) 和独角聚花轮虫 (*Conochilus unicornis*); 枝角类的短尾秀体蚤 (*Diaphanosoma brachyurum*)、僧帽蚤 (*Daphnia cucullate*)、长刺蚤 (*Daphnia longispina*)、角突网纹蚤、棘体网纹蚤 (*Ceriodaphnia setosa*)、微型裸腹蚤 (*Moina micrura*)、长额象鼻蚤 (*Bosmina longirostris*)、筒弧象鼻蚤、颈沟基合蚤 (*Bosminopsis deitersi*) 和圆形盘肠蚤 (*Chydorus sphaericus*); 桡足类的汤匙华哲水蚤 (*Sinocalanus dorrii*)、指状许水蚤 (*Schmackeria inopinus*)、球状许水蚤 (*Schmackeria forbesi*)、中华窄腹剑水蚤、广布中剑水蚤和中国剑水蚤 (*Thermocyclops taihokuensis*) 等。轮虫密度为 $166.4 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$, 生物量为 $0.1994 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 枝角类密度为 $16.6 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$, 生物量为 $0.4015 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 桡足类密度为 $36.6 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$, 生物量为 $0.5814 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。都雪等^[31]在 2010 年 5 月至 2011 年 2 月对洪泽湖浮游动物进行季度采样, 共观察到浮游动物 53 种, 其中轮虫 34 种, 枝角类 9 种, 桡足类 10 种, 主要优势种为螺形龟甲轮虫、前节晶囊轮虫、长肢多肢轮虫、萼花臂尾轮虫和曲腿龟甲轮虫; 枝角类中的长额象鼻蚤、透明蚤 (*Daphnia hyaline*); 桡足类中的汤匙华哲水蚤和中华窄腹剑水蚤。轮虫年平均密度和生物量分别为 $323.6 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.388 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。刘孝珍^[32]在 2014 年的 5 月和 8 月的两次调查中共检出浮游动物 28 种, 常见种类有: 枝角类的长额象鼻蚤, 桡足类的汤匙华哲水蚤等。浮游动物密度在 $293 \sim 637 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$, 生物量在 $1.30 \sim 4.51 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。临淮、新开河和剪草沟的密度与生物量较大。本次调查共鉴定出浮游动物 63 种, 其中轮虫 24 种, 枝角类 19 种, 桡足类 20 种。优势种为螺形龟甲轮虫、针簇多肢轮虫和筒弧象鼻蚤。年均密度为 $383.87 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$, 年均生物量为 $1.36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。综上可知多年来洪泽湖浮游动物密度与生物量变化不大, 这可能是由于洪泽湖

是过水性湖泊, 流速较大, 导致浮游动物密度与生物量较低。多年来优势种变化明显, 优势种种类数大幅度减少, 清洁物种减少耐污种占据主导地位, 如独角聚花轮虫、异尾轮虫等是贫营养水体的指示物种^[33], 螺形龟甲轮虫、针簇多肢轮虫和筒弧象鼻蚤等为富营养水体的指示物种^[34]。因此富营养化导致的浮游动物群落结构趋于简单化是洪泽湖浮游动物群落结构演变的主要驱动因子。

3.3 与临近的大型淡水湖泊浮游动物群落结构的比较

东部平原大型淡水湖泊有巢湖、太湖和南四湖。南四湖与洪泽湖同属于南水北调东线工程的调蓄型湖泊, 巢湖、洪泽湖和太湖均属于江淮流域大型浅水湖泊, 其浮游动物群落结构如表 1 所示^[35~38]。优势种属方面, 4 个湖泊均以小型浮游动物为主; 浮游动物种类数、多样性指数、密度和生物量方面南四湖最高, 洪泽湖最低。洪泽湖浮游动物群落结构不如其他 3 个湖泊丰富。与南四湖相比, 总氮、水温、pH 和电导率是影响南四湖浮游动物群落结构的主要因素, 南四湖水生植被分布较多, 生境多样性较高, 能够容许更多的浮游动物生存^[37]。与太湖相比, 水温、营养盐和浮游植物等直接影响太湖浮游动物群落结构, 透明度和风力等间接影响着浮游动物群落结构^[39, 40]。一方面太湖水体处于富营养水平, 能为浮游动物提供充足的食物, 另一方面太湖换水周期长, 水体流动性差适宜浮游动物的生存。与巢湖相比, 水温和浮游植物等是影响巢湖浮游动物群落结构的主要因素^[36], 一方面巢湖水体处于富营养水平, 蓝藻的暴发导致小型枝角类与轮虫成为优势种^[41], 另一方面巢湖换水周期长, 水体流动性差适宜浮游动物的生存。洪泽湖是换水周期短的中度富营养化的湖泊, 对于洪泽湖来说, 富营养化水平和换水周期共同主导着洪泽湖的浮游动物群落结构和多样性水平。

表 1 洪泽湖及周边大型淡水湖泊的浮游动物群落结构

Table 1 Zooplankton community structure in Hongze Lake and other large freshwater lakes

湖泊	调查年份	各类群种类数/种	优势种属	密度 /ind·L ⁻¹	生物量 /mg·L ⁻¹	多样性 指数	文献
太湖	2017	轮虫 52、枝角类 10 和桡足类 5	多肢轮属、无节幼体、剑水蚤、热带龟甲轮虫、矩形龟甲轮虫和长额象鼻蚤	518.0	1.64	2.72	[35]
巢湖	2013	轮虫 32、枝角类 9 和桡足类 7	多肢轮属、龟甲轮属、臂尾轮属、中华窄腹剑水蚤、长额象鼻蚤和角突网纹蚤	560.8	1.84	2.83	[36, 37]
南四湖	2012	轮虫 78、枝角类 17 和桡足类 3	针簇多肢轮虫、角突臂尾轮虫、长三肢轮虫、曲腿龟甲轮虫、暗小异尾轮虫、裂痕龟纹轮虫和螺形龟甲轮虫	1 722.0	2.25	3.72	[38]
洪泽湖	2017	轮虫 23、枝角类 19 和桡足类 20	螺形龟甲轮虫、针簇多肢轮虫、筒弧象鼻蚤、中华窄腹剑水蚤和无节幼体	383.6	1.36	1.77	本研究

3.4 洪泽湖浮游动物群落动态与环境因子的关系
水温被认为是影响浮游动物生长、发育和物种

组成的重要因子, 也是影响浮游动物种类季节演替的主要驱动因子^[42]。浮游动物群落结构呈现显著的

季节变化,如多样性和种类数呈现明显的夏高冬低,密度与生物量呈现出秋高冬低的特征.洪泽湖的浮游动物多为广温性种,如臂尾轮属和龟甲轮属等^[43],较少地出现暖温性种,如异尾轮属和角突网纹溞等^[43].洪泽湖浮游动物年内变化显著,在春季与冬季浮游动物种类最少,群落结构最为简单.CCA 结果表明,春季与冬季浮游动物点位较为密集,且主要受到水温、水位、总氮、叶绿素和总磷等的主导.因此在冬季与春季浮游动物群落结构的变化,可能是因为水温较低,营养物质较少,鱼类的捕食,以及水流扰动等因素对浮游动物的生长、发育和繁殖不利造成的.

浮游动物不同类群对栖息地环境的变化表现出不同的响应.由于体型小,浮游动物往往受到栖息地水文条件的影响^[44].其中影响最为显著的是水流.刘翊竣等^[45]的研究指出,洪泽湖的溧河洼区和成子湖区流场结构主要由风场决定,而南部湖区和东部湖区流场结构由风场和吞吐流共同决定,且以吞吐流为主.因此,洪泽湖浮游动物空间分布不均匀的原因是浮游动物运动能力较弱,主要是被动转移.在过水区洪泽湖湖体流速较大不易于浮游动物的生长繁殖,密度与生物量较低,但是能带来更多的浮游动物类群.在相对静止的成子湖区与溧河洼湖区,浮游动物生物量与密度较高.CCA 结果显示浮游动物的季节变化显著,相对于空间变化来说,季节变化更大,导致空间变化不显著.

CCA 结果显示夏季点位最为分散,浮游动物群落结构变化最明显,并且这种差异主要受温度与水位驱动.一方面温度驱使的浮游动物季节变化导致夏季洪泽湖浮游动物群落发生演替,从而造成夏季点位与其他季节产生差异.另一方面,水位的波动意味着流速的不稳定,时快时慢,极不利于浮游动物生长繁殖,加上水质波动变化,因此造成夏季浮游动物群落结构变化较大,体现在 CCA 排序图上的就是点位分散.与非参数分析不同的是,CCA 分析属于参数分析,其浮游动物密度的数量差异就会体现在排序结果中.

秋冬季点位较为密集,水位相对稳定,调水对浮游动物的影响较小,此时水温,营养盐及叶绿素各指标对浮游动物的影响较大,这与其他湖泊较为相似^[35,46,47].笔者注意到 3~5 月浮游动物密度在逐渐降低,主要表现为轮虫的减少,这与很多湖泊不同^[7],而洪泽湖 3~5 月 Chla 浓度降低,此期间浮游动物密度降低可能主要是因为食物的匮乏.

4 结论

(1)本次调查共鉴定出浮游动物 63 种,其中轮

虫有 24 种,枝角类 19 种和桡足类 20 种.年均密度为 $383.87 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$,年均生物量为 $1.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.洪泽湖浮游动物群落结构时空变化较大,时间上夏季浮游动物波动较大,秋季浮游动物密度与生物量均达到最大值,冬季浮游动物群落结构最为简单;空间上成子湖和溧河洼浮游动物较为丰富,差异较小,过水区浮游动物较少且变化较大.

(2)洪泽湖浮游动物群落结构的时空变化主要由水位、总磷、水温和总氮等因素共同决定.不同时间浮游动物群落结构变化的主导因素不同,夏季主导因素是水位与水温;秋冬季主导因素是水温、营养盐及叶绿素等.空间上不同湖区点位集中程度不同,过水区分布得更为分散,浮游动物群落结构差异较大主要由水位变化主导,成子湖和溧河洼分布得相对集中,浮游动物群落结构差异较小.

(3)水位波动对浮游动物群落结构的变化影响最大,表现在水位波动会直接影响浮游动物群落结构,也可能通过影响水质,进而间接影响浮游动物群落结构.

参考文献:

- [1] 杨广利,韩爱民,刘铁琨,等.洪泽湖富营养化与环境理化因子间的关系[J].环境监测管理与技术,2003,15(2):17-20.
Yang G L, Han A M, Liu Y K, et al. The relationship of eutrophication of the lake of Hongze and environmental physical-chemical factors [J]. Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2003, 15(2): 17-20.
- [2] 李为,都雪,林明利,等.基于 PCA 和 SOM 网络的洪泽湖水水质时空变化特征分析[J].长江流域资源与环境,2013,22(12):1593-1601.
Li W, Du X, Lin M L, et al. Spatial-temporal variation characteristics of water quality in Hongze Lake based on PCA and SOM [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(12): 1593-1601.
- [3] 张超文,张堂林,朱挺兵,等.洪泽湖大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J].水生生态学杂志,2012,33(3):27-33.
Zhang C W, Zhang T L, Zhu T B, et al. Community structure of macrozoobenthos and its relationship with environmental factors in Lake Hongze [J]. Journal of Hydroecology, 2012, 33(3): 27-33.
- [4] 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.
- [5] 胡梦红,杨丽丽,刘其根.竞争捕食作用对千岛湖浮游动物群落结构的影响[J].湖泊科学,2014,26(5):751-758.
Hu M H, Yang L L, Liu Q G. Effects of predation and competition on zooplankton community structure in Lake Qiandao [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(5): 751-758.
- [6] Duggan I C, Green J D, Shiel R J. Distribution of rotifers in North Island, New Zealand, and their potential use as bioindicators of lake trophic state [J]. Hydrobiologia, 2001,

- 446-447(1): 155-164.
- [7] 杨佳, 周健, 秦伯强, 等. 太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征(1997~2017年)[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1246-1255.
- Yang J, Zhou J, Qin B Q, *et al.* Long-term variation characteristics of zooplankton community structure in Meiliang Bay, Lake Taihu[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1246-1255.
- [8] Ermolaeva N I, Zarubina E Y, Bazhenova O P, *et al.* Influence of abiotic and trophic factors on the daily horizontal migration of zooplankton in the littoral zone of the Novosibirsk Reservoir[J]. Inland Water Biology, 2019, **12**(4): 418-427.
- [9] 温超男, 黄蔚, 陈开宁, 等. 太湖滨岸带浮游动物群落结构特征与环境因子的典范对应分析[J]. 水生生态学杂志, 2020, **41**(2): 36-44.
- Wen C N, Huang W, Chen K N, *et al.* Canonical correspondence analysis between zooplankton community structure and environmental factors in the littoral zone of Taihu Lake[J]. Journal of Hydroecology, 2020, **41**(2): 36-44.
- [10] Havel J E, Shurin J B. Mechanisms, effects, and scales of dispersal in freshwater zooplankton [J]. Limnology and Oceanography, 2004, **49**(S4): 1229-1238.
- [11] Schamp B S, Arnott S E, Joslin K L. Dispersal strength influences zooplankton co-occurrence patterns in experimental mesocosms[J]. Ecology, 2015, **96**(4): 1074-1083.
- [12] Xiong W, Ni P, Chen Y Y, *et al.* Zooplankton community structure along a pollution gradient at fine geographical scales in river ecosystems: the importance of species sorting over dispersal [J]. Molecular Ecology, 2017, **26**(16): 4351-4360.
- [13] Zhang J, Xie P, Tao M, *et al.* The impact of fish predation and cyanobacteria on zooplankton size structure in 96 subtropical lakes [J]. PLoS One, 2018, **8**(10), doi: 10.1371/journal.pone.0076378.
- [14] Pinceel T, Vanschoenwinkel B, Brendonck L. Flexible dispersal dimorphism in zooplankton resting eggs: an example of repeated phenotypic coin flipping? [J]. Biological Journal of the Linnean Society, 2013, **110**(4): 749-756.
- [15] Jungblut A. Biogeography of microscopic organisms: is everything small everywhere? Edited by Diego Fontaneto. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 365 pp. Hardback. ISBN 9780521766708. £ 60.00/US\$99 [J]. Botanical Journal of the Linnean Society, 2014, **176**(4): 582-583.
- [16] Dias J D, Simões N R, Meerhoff M, *et al.* Hydrological dynamics drives zooplankton metacommunity structure in a Neotropical floodplain[J]. Hydrobiologia, 2016, **781**(1): 109-125.
- [17] 王家楫. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社, 1961.
- [18] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志—节肢动物门 甲壳纲 淡水枝角类[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [19] 中国科学院动物研究所甲壳动物研究组. 中国动物志—节肢动物门 甲壳纲 淡水桡足类[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [20] 陈非洲. [读者来信]关于淡水浮游动物和原生动物分开研究的建议[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(3): C3.
- Chen F Z. Suggestion on compositions of freshwater zooplankton vs protozoa[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(3): C3.
- [21] 赵文. 水生生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [22] 陈雪梅. 淡水桡足类生物量的测算[J]. 水生生物学集刊, 1981, **7**(3): 397-408.
- Chen X M. Biomass calculation of freshwater copepoda[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1981, **7**(3): 397-408.
- [23] 梅海鹏, 王振龙, 刘猛, 等. 洪泽湖近 50 a 特征水位变化规律及影响因素[J]. 长江科学院院报, 2021, **38**(1): 35-40.
- Mei H P, Wang Z L, Liu M, *et al.* Characteristic water levels of Hongze Lake in the Past Five Decades: variation rules and influencing factors [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, **38**(1): 35-40.
- [24] Paerl H W, Xu H, McCarthy M J, *et al.* Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): The need for a dual nutrient (N & P) management strategy[J]. Water Research, 2011, **45**(5): 1973-1983.
- [25] Elfrifi I R, Turpin D H. Steady-state luxury consumption and the concept of optimum nutrient ratios: a study with phosphate and nitrate limited *Selenastrum minutum* (Chlorophyta) [J]. Journal of Phycology, 1985, **21**(4): 592-602.
- [26] Ahn C Y, Chung A S, Oh H M. Rainfall, phycocyanin, and N: P ratios related to cyanobacterial blooms in a Korean large reservoir[J]. Hydrobiologia, 2002, **474**(1-3): 117-124.
- [27] Boers P C M. The influence of pH on phosphate release from lake sediments[J]. Water Research, 1991, **25**(3): 309-311.
- [28] Xie L Q, Xie P, Tang H J. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by *Microcystis* blooms—an enclosure experiment in a hyper-eutrophic, subtropical Chinese lake [J]. Environmental Pollution, 2003, **122**(3): 391-399.
- [29] Yang Z, Zhang M, Shi X L, *et al.* Nutrient reduction magnifies the impact of extreme weather on cyanobacterial bloom formation in large shallow Lake Taihu (China) [J]. Water Research, 2016, **103**: 302-310.
- [30] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 389-390.
- [31] 都雪, 王齐东, 张超文, 等. 洪泽湖轮虫群落结构及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 269-276.
- Du X, Wang Q D, Zhang C W, *et al.* Community structure of rotifers in relation to environmental factors in Lake Hongze[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(2): 269-276.
- [32] 刘孝珍. 洪泽湖渔业资源现状、问题及对策[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- Liu X Z. Current situation, problems and countermeasures of fishery resources in Hongze Lake [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [33] 吴利, 李源玲, 陈延松. 淮干支流浮游动物群落结构特征[J]. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 932-940.
- Wu L, Li Y L, Chen Y S. Characteristics of community structures of zooplankton in the mainstream of Huaihe River[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, **27**(5): 932-940.
- [34] 李强, 田华, 姜民, 等. 淀山湖浮游动物群落结构特征及其影响因子[J]. 水生生态学杂志, 2015, **36**(4): 69-77.
- Li Q, Tian H, Jiang M, *et al.* Community structure of zooplankton and influencing factors in Dianshan Lake of Shanghai [J]. Journal of Hydroecology, 2015, **36**(4): 69-77.
- [35] 周义道. 太湖浮游动物群落结构及环境相关性研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2019.
- Zhou Y D. Zooplankton community structure and its relation to environmental factors in Taihu Lake [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2019.
- [36] 李静, 崔凯, 卢文轩, 等. 春季和夏季巢湖浮游生物群落组成及其动态分析[J]. 水生生物学报, 2015, **39**(1): 185-192.
- Li J, Cui K, Lu W X, *et al.* Community dynamics of spring-summer plankton in Lake Chaohu [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2015, **39**(1): 185-192.
- [37] 李怀国, 杨长明, 王育来. 巢湖水质现状及浮游生物群落结

- 构特征[J]. 安徽农业科学, 2017, **45**(22): 13-16.
- Li H G, Yang C M, Wang Y L. Water quality and community structure characteristics of plankton in Chaohu Lake[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, **45**(22): 13-16.
- [38] 陈磊, 高东泉, 舒凤月, 等. 南四湖浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 动物学杂志, 2016, **51**(1): 113-120.
- Chen L, Gao D Q, Shu F Y, *et al.* Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Nasi Lake[J]. Chinese Journal of Zoology, 2016, **51**(1): 113-120.
- [39] Jeppesen E, Jensen J P, Søndergaard M, *et al.* Trophic structure, species richness and biodiversity in Danish lakes: changes along a phosphorus gradient[J]. Freshwater Biology, 2000, **45**(2): 201-218.
- [40] 李娟, 温周瑞, 李庚辰, 等. 太湖梅梁湾和贡湖湾浮游甲壳动物群落结构及其与环境因子的相互关系[J]. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(S1): 81-90.
- Li J, Wen Z R, Li G C, *et al.* Relationship between crustacean zooplankton community structure and aquatic environmental factors of Meiliang and Gonghu bay in Lake Taihu[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, **23**(S1): 81-90.
- [41] Geng H, Xie P, Deng D G. The rotifer assemblage in a shallow, eutrophic Chinese lake and its relationships with cyanobacterial blooms and crustacean zooplankton[J]. Journal of Freshwater Ecology, 2005, **20**(1): 93-100.
- [42] Marques S C, Azeiteiro U M, Marques J C, *et al.* Zooplankton and ichthyoplankton communities in a temperate estuary: spatial and temporal patterns[J]. Journal of Plankton Research, 2006, **28**(3): 297-312.
- [43] 陈立婧, 顾静, 彭自然, 等. 上海崇明岛明珠湖轮虫群落结构[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(12): 3057-3062.
- Chen L J, Gu J, Peng Z R, *et al.* Community structure of rotifer in Mingzhu Lake of Chongming Island, Shanghai[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, **20**(12): 3057-3062.
- [44] Brucet S, Boix D, Quintana X D, *et al.* Factors influencing zooplankton size structure at contrasting temperatures in coastal shallow lakes: Implications for effects of climate change [J]. Limnology and Oceanography, 2010, **55**(4): 1697-1711.
- [45] 刘翊竣, 徐国宾. 风场和吞吐流对洪泽湖流场的影响分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, **31**(2): 174-178, 184.
- Liu Y J, Xu G B. Effects of wind field and throughput flow on the flow field of Hongze Lake[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, **31**(2): 174-178, 184.
- [46] 杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 等. 淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4513-4522.
- Du C L, Yang L, Zhao Y, *et al.* Temporal and spatial variation of zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Dianshan Lake, Shanghai [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4513-4522.
- [47] 陈佳琪, 赵坤, 曹玥, 等. 鄱阳湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2020, **40**(18): 6644-6658.
- Chen J Q, Zhao K, Cao Y, *et al.* Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Poyang Lake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(18): 6644-6658.

CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-nui, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)