

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM_{2.5} 浓度遥感反演 刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一(1513)

秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响
..... 李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉(1520)

基于 GAM 模型的西安市 O₃ 浓度影响因素解析 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎(1535)

北京及周边 6 个城市大气 PM_{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征 朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕(1544)

典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析 李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤(1550)

成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析 王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛(1561)

天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响 姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖(1573)

涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响 吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正(1582)

典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤(1589)

中国地表水硝酸盐分布及其来源分析 张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦(1594)

中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险 杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇(1607)

小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析 范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟(1619)

浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征 马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖(1629)

三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系 米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴(1636)

骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子 张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军(1648)

拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系 王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁(1657)

基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素
..... 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升(1666)

岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析 赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航(1676)

巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应 李如忠, 王莉, 刘超(1684)

镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复 丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇(1692)

氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用 杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君(1700)

北京市道路雨水径流溶解性有机化学组分特性 陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡(1709)

新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用 黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵娴, 冯华军(1716)

Ni 掺杂 Sb-SnO₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶 石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠(1725)

磁性 Fe₃O₄-CuO 非均相活化过碳酸钠降解 A07 徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅(1734)

赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星, 性能和机制 史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟(1743)

工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响 张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜(1752)

污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性 陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇(1761)

改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性 毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆(1770)

A²/O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性 刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康(1779)

基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制 杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮(1787)

HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响 王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪(1794)

低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征 朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(1801)

不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征 程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良(1808)

投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响 杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪(1816)

中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险
..... 李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新(1825)

基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染 胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜(1838)

扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险 姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然(1847)

桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估 陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波(1855)

重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素 王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜(1864)

棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用 刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛(1871)

连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量 薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠(1880)

纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响 邓继宝, 张春来, 徐卫红(1888)

矿业废弃地复垦土壤-作物晒吸收特征及其对重金属拮抗效应 尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文(1904)

不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高(1914)

化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响 朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳(1921)

紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应 熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明(1930)

浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径 吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰(1941)

极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素 孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国(1950)

红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应 吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽(1960)

稻田土壤 N₂O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制 郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅(1968)

京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估 陈盼, 施晓清(1976)

中国城市工业化发展与 PM_{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制 李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波(1987)

《环境科学》征订启事(1618) 《环境科学》征稿简则(1635) 信息(1724, 1769, 1800)

骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子

张庆吉^{1,2}, 王业宇³, 王金东³, 王日昕^{1*}, 邓建明^{2*}, 蔡永久², 彭凯², 陈业², 龚志军²

(1. 宁波大学海洋学院, 宁波 315832; 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. 江苏省骆运水利工程管理处, 宿迁 223800)

摘要: 江苏骆马湖作为南水北调工程的重要调蓄湖泊, 水生态系统结构变化不容忽视. 为研究骆马湖浮游植物群落结构演替规律及其与环境因子的关系, 于2014~2018年进行了逐月监测. 研究期间骆马湖总氮、高锰酸盐指数、电导率等参数呈逐年升高趋势, 氟离子浓度呈逐年下降趋势. 共鉴定有浮游植物7门71属, 月均生物量变化范围0.16~5.51 mg·L⁻¹. 硅藻和绿藻为绝对优势门类, 其次为甲藻及隐藻; 主要优势属为针杆藻(*Synedra* sp.)、隐藻(*Chroomonas* spp.)、直链硅藻(*Aulacoseira* spp.)、锥囊藻(*Dinobryon* sp.)、栅藻(*Scenedesmus* spp.)、脆杆藻(*Fragilaria* spp.)、转板藻(*Mougeotia* sp.)、纤维藻(*Ankistrodesmus* sp.)和裸藻(*Euglena* spp.). 2014~2018年骆马湖浮游植物群落结构年际差异较大, 其变化主要体现在浮游植物生物量的再分配, 硅藻和绿藻继续保持优势外甲藻和蓝藻的优势度增加. 非度量多维尺度分析显示, 骆马湖浮游植物群落变化与总氮、氟离子、水温、总磷、溶解氧、pH、电导率和高锰酸盐指数等因素有关, 广义可加模型同样显示总氮、氟离子浓度和水温是主导骆马湖浮游植物群落结构变化的主要因素. 总氮、氟离子浓度是影响浮游植物群落年际变化的环境因子, 而水温是引起浮游植物群落季节变化的主要因子. 结合近几年管理部门采取的措施, 浮游植物群落年际变化可能与骆马湖实行禁止采砂和拆除围网等管理修复措施有关.

关键词: 浅水湖泊; 浮游植物; 群落结构; 营养盐; 非度量多维尺度分析; 广义可加模型

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1648-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201909146

Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province

ZHANG Qing-ji^{1,2}, WANG Ye-yu³, WANG Jin-dong³, WANG Ri-xin^{1*}, DENG Jian-ming^{2*}, CAI Yong-jiu², PENG Kai², CHEN Ye², GONG Zhi-jun²

(1. School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315832, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Jiangsu Luoyun Hydraulic Engineering Management Division, Suqian 223800, China)

Abstract: As a water storage lake for the South-to-North Water Diversion Project, it is crucial to examine changes in aquatic ecosystem structures in Lake Luoma, Jiangsu province. Field sampling was carried out in Lake Luoma monthly from 2014 to 2018 to study the relationship between the phytoplankton community structure and environmental factors. During the studied period, total nitrogen, permanganate index, and electrical conductivity in water column gradually increased, whereas fluoride content declined. The pattern of total phosphorus and dissolved oxygen was not distinct. A total of 71 genera of phytoplankton were identified from 2014 to 2018, and the average monthly biomass variation ranged from 0.16 to 5.51 mg·L⁻¹. Bacillariophyta and Chlorophyta were the dominant phyla in the four years, followed by Pyrrophyta and Cryptophyta. The dominant genera were *Synedra* sp., *Chroomonas* spp., *Aulacoseira* spp., *Dinobryon* sp., *Scenedesmus* spp., *Fragilaria* spp., *Mougeotia* sp., *Ankistrodesmus* sp., and *Euglena* spp. The results showed that the phytoplankton community structure significantly changed in the four years, which was mainly ascribed to the redistribution of biomass. Specifically, in addition to the dominance of Bacillariophyta and Chlorophyta, the dominance of Pyrrophyta and Cyanophyta increased during the last two years. Non-metric multidimensional scaling analysis showed that variation of the phytoplankton community in Lake Luoma was mainly related to total nitrogen, fluoride, water temperature, total phosphorus, dissolved oxygen, pH, conductivity, and permanganate index, among which the total nitrogen, water temperature, and fluoride concentration dominated the phytoplankton community change after the generalized additive model test. Water temperature is the driving factor affecting seasonal changes of the phytoplankton community. Total nitrogen and fluoride concentrations are the driving factors affecting the interannual variation in the phytoplankton community. Our study indicated that in recent years, the implementation of the ban on sand mining and demolition of the enclosed aquaculture in Lake Luoma has affected the water environment, resulting in a significant succession of the phytoplankton community.

Key words: shallow lake; phytoplankton; community structure; nutrient; non-metric multidimensional scaling; generalized additive models

收稿日期: 2019-09-16; 修订日期: 2019-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671110, 31670466); 中国科学院南京地理与湖泊研究所一三五项目(NIGLAS2017GH05); 江苏省自然科学基金项目(BK20171517)

作者简介: 张庆吉(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为渔业生态环境及渔业资源, E-mail: 1174229093@qq.com

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

浮游植物是水生态系统的重要组成部分和食物网的关键环节,在物质循环和能量流动中起着非常重要的作用^[1]. 不同水生态系统中浮游植物群落组成存在较大的差异^[2,3]. 环境条件的变化,例如水体透明度、水深和营养盐浓度等变化,会引起水体中浮游植物的群落组成、优势种以及生物量等群落特征的改变^[4],因此浮游植物数量分布在一定程度上也反映着生态系统的状态. 在富营养化水体中,浮游植物过度繁殖会导致湖泊发生水华现象,从而给该水域水生生物带来影响与危害^[5,6]. 因此了解湖泊浮游植物群落结构组成及其长期变化是研究湖泊生态系统结构变化的基础^[7].

骆马湖是淮河流域第三大湖泊、江苏省第四大湖泊^[8],不仅是沂河、中运河洪水的主要调蓄湖泊,也是宿迁、新沂两市的重要水源地;同时还是国家南水北调东线输水工程的主要调节湖泊之一,具有重要作用^[9]. 对骆马湖进行的浮游植物历史研究表明,20 世纪以来浮游植物群落变化较为明显^[10],但其演替规律与环境因子的关系尚不明确. 2014 年以来,由于骆马湖经历调水、禁止采砂和拆除围网养殖等人类活动的影响,湖泊生态系统演替可能出现更多的不确定性^[11-13]. 本文基于 2014~2018 年浮游植物和水质逐月监测数据,探讨近年来骆马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,以期为骆马湖生态环境保护与管理提供科学支撑.

1 材料与方法

1.1 采样点布设与样品采集

骆马湖北面通过运河与山东南四湖相连、南面与洪泽湖相连,继而与长江水系相通,是典型的过水性湖泊. 入湖河流主要有沂河水系、南四湖水系和邳苍地区等 40 多条支流. 出流处有 3 处,一经嶂山闸入新沂河,一经皂河闸入中运河,一经洋河滩闸入六塘. 骆马湖为宿迁、徐州两市共辖,地处徐州连云港经济带中部,交通便捷,区位优势明显,长 27.0 km,最大宽 20.0 km,平均宽度 9.63 km,平均水深 4.45 m,正常蓄水位 23.00 m,相应水面积 287 km²,库容 9.18 亿 m³,汇水面积约 1 300 km²^[14]. 根据骆马湖的形态、围网养殖、采砂和水生植被分布以及出湖入湖河流等情况设置 10 个监测点(图 1),并依据地理位置将 LM1、LM2、LM4、LM5 和 LM8 号点位作为北部湖区,LM3、LM6、LM7、LM9 和 LM10 号点位作为南部湖区,于 2014~2018 年(除 2015 年)逐月对水质和浮游植物采集样品.

浮游植物采样主要参考文献^[15]. 每个采样点

分表层和中层采样,混合后每个水样保留 1 000 mL,然后立即加入鲁哥试剂固定用以分析浮游植物样品. 在稳定的实验台上将浮游植物样品固定 48 h,用细小虹吸管移出上清液,最后定容到 30 mL. 取浓缩后的 0.1 mL 样品通过显微镜在 300 倍下鉴定浮游植物种类并计数. 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),单细胞的生物量主要根据浮游植物个体形状测量而得^[16].

水温(Temp)、pH、溶解氧(DO)和电导率(Cond)等水质指标由多参数水质监测仪(6600,美国 YSI 公司)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);氟离子(F⁻)用离子选择电极法测定(GB 7484-1987);水样的采集、保存与测定详细步骤参考文献^[17].

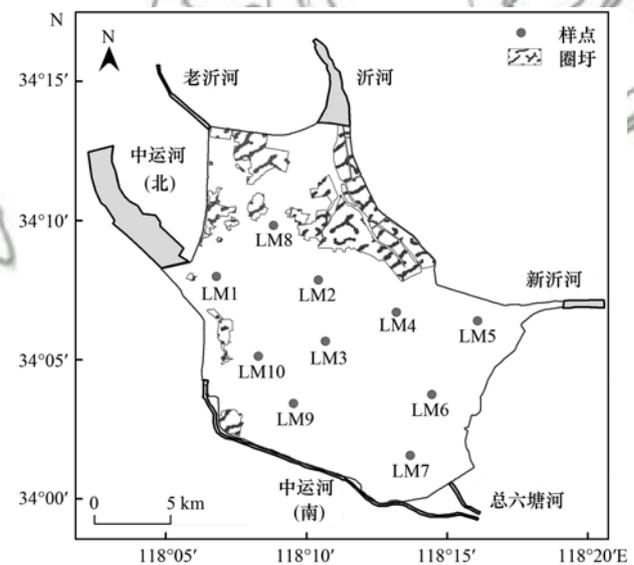


图 1 骆马湖采样点分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of sampling sites in Lake Luoma

1.2 数据分析方法

环境因子的年际差异采用单因素方差分析(ANOVA),多重比较采用 Dunnett's-*t* 检验. 浮游植物群落演替规律及主要驱动因素的分析采用非度量多维尺度分析(non-metric multidimensional scaling, NMDS),一般认为 NMDS 在分析群落数据时最有效^[18]. NMDS 的主要目的是使用尽可能少的排序轴充分展示主体间的相对位置^[19],为减少稀有种影响且更好地反映群落结构变化,在进行分析前剔除出现频次少于 4 的物种并将生物数据进行百分比转换. 分析由 vegan 软件包完成,其中 NMDS 由函数 metaMDS 实现,环境因子与排序轴的关系及显著性

(P 值) 由函数 `envfit` 计算获得. 广义可加模型 (generalized additive models, GAM) 适用于生态学中的非线性关系分析, 可以通过 GAM 模型准确检验环境因子与样本数据之间的非线性关系以此判断解释变量对响应变量的影响^[20]. GAM 分析由 `mgcv` 包中的 `gam` 函数实现. 本文统计学检验与作图使用软件 R-3.5.2.

2 结果与分析

2.1 骆马湖水体理化指标的变化

各年份环境因子全湖平均值及标准差如表 1 所示. TN 浓度月平均值波动范围为 $0.85 \sim 3.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 多年间存在显著差异 (ANOVA, $P > 0.05$), 并呈现逐年升高的趋势 (图 2). 与 TN 不同, TP 多年间差异不显著 (ANOVA, $P > 0.05$), 长期变化规律并不明显 (图 2). 其他水质指标如 Cond 和高

锰酸盐指数各年份全湖平均值差异显著 (ANOVA, $P < 0.05$), 二者在调查期间均有逐渐升高的趋势. Temp 与 DO 呈现明显的季节波动, 但各年份差异不显著 (ANOVA, $P > 0.05$). 骆马湖湖水 pH 多年平均值为 $8.6 (6.61 \sim 9.74)$, 高值一般出现在夏季; 全湖 pH 平均值在不同调查年份间存在显著差异 (ANOVA, $P < 0.05$), 且有逐渐下降的趋势, 2017 和 2018 年显著低于 2014 年 (Dunnett's- t , $P < 0.05$). 与 pH 表现相似, 自 2016 年始全湖 F^- 浓度呈现下降趋势, 年均值由 $0.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至 $0.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 经检验 2018 年 F^- 浓度显著低于 2014 年 (Dunnett's- t , $P < 0.05$). 与其他调查年份相比, 2017 年水体理化指标变化明显, 7 月 TN、TP 浓度相较于其他月份变化幅度较大, 同一时间内 DO 浓度与 2014 年和 2016 年相比表现出升高现象, 且 pH 值相比于其他年份也出现较大波动 ($6.6 \sim 8.9$).

表 1 骆马湖各年份水体理化因子

Table 1 Water physicochemical parameters of Lake Luoma in different years

年份	项目	TN / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TP / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	高锰酸盐指数 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Cond / $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	Temp / $^{\circ}\text{C}$	DO / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	pH	F^- / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
2014	平均值	1.20	0.05	3.32	541.01	17.29	10.00	9.21	0.88
	标准偏差	0.45	0.02	0.77	91.39	8.99	2.64	0.32	0.07
2016	平均值	1.26	0.05	3.95	644.89	16.42	10.88	8.72	0.87
	标准偏差	0.36	0.01	0.48	126.65	10.07	2.57	0.42	0.06
2017	平均值	2.09	0.05	4.97	725.94	18.64	10.91	8.02	0.81
	标准偏差	0.62	0.02	0.73	119.19	9.66	2.05	0.74	0.07
2018	平均值	2.32	0.05	4.77	746.32	19.00	10.27	8.38	0.66
	标准偏差	0.90	0.03	0.52	122.99	9.25	1.94	0.71	0.06

2.2 浮游植物群落结构

2.2.1 浮游植物种类

研究期间共鉴定浮游植物 7 门 71 属. 其中绿藻门 (Chlorophyta) 30 属、硅藻门 (Bacillariophyta) 16 属、蓝藻门 (Cyanophyta) 13 属、甲藻门 (Pyrrophyta)、裸藻门 (Euglenophyta) 各 4 属、隐藻门 (Cryptophyta) 和金藻门 (Chrysophyta) 各 2 属. 浮游植物优势门类主要为硅藻和绿藻, 其次为隐藻和甲藻. 研究期间浮游植物种属数量变化较为明显, 2014 年绿藻门种属数量占比 49%, 硅藻门占 22.4%, 蓝藻门占 14.3%, 裸藻门占 6.1%, 隐藻门占 4.1%; 2016 年所有种属中绿藻门占比 46.4%, 硅藻门种属数占比下降到 16.1%, 蓝藻门略有升高 (19.6%), 裸藻门占 5.4%, 隐藻门占 3.6%; 相比于前一年 2017 年所有种属中绿藻门种属数占比下降到 35.7%, 硅藻门升高至 26.2%, 蓝藻门种属数增长到 31.0%, 而裸藻门和隐藻门当年内没有检出; 2018 年种属数占比水平与 2016 年相似, 所有种属中绿藻门占比 42.4%, 硅藻门占 26.2%, 蓝藻门 22%, 裸藻门占 5.1%, 隐藻门占

3.4%.

2.2.2 浮游植物生物量

调查期间各年份浮游植物生物量差异较大 (图 3). 2014 年浮游植物生物量以硅藻和绿藻为主 ($>61\%$), 其次是隐藻和裸藻 ($>25\%$), 金藻和蓝藻较少 ($<13\%$). 与 2014 年相比 2016 年绿藻门生物量占比增长到 36.5%, 硅藻门下降到 17.8%, 甲藻生物量占比升高到 5.1%, 其他门类没有明显变化. 2017 年浮游植物门类变化较大, 硅藻门生物量占比 42.1%, 甲藻门 22.3%, 蓝藻门生物量占比从 2016 年的 2.7% 升高至 12.6%, 绿藻门缩减到 18.3%. 2018 年绿藻和硅藻生物量占比大于 70%, 隐藻和甲藻约为 15%, 蓝藻门约占 4.2%.

同一门类中优势种属在不同时间内生物量存在差异, 2016 年和 2018 年转板藻 (*Mougeotia*) 和栅藻 (*Scenedesmus*) 在绿藻门中占据主要生物量, 2017 年内绿藻门中角星鼓藻 (*Staurastrum*) 逐渐占据优势, 最大生物量为 $0.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 4). 硅藻门中针杆藻 (*Synedra*) 在 2014 年占硅藻门中主要生物量, 2016

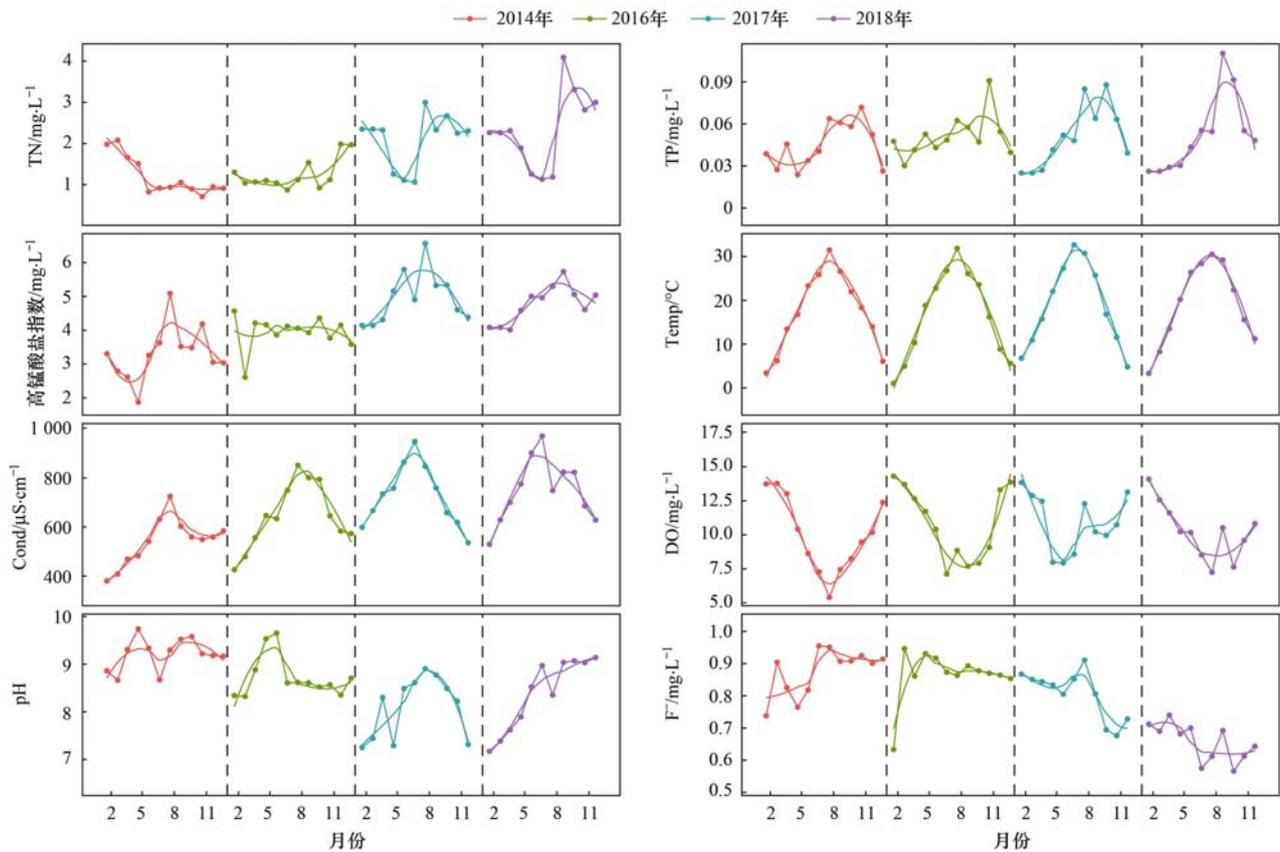


图2 2014~2018年骆马湖水体理化指标逐月均值变化

Fig. 2 Changes in the monthly averages of physical and chemical parameters in the water column in Lake Luoma from 2014 to 2018

年转变为针杆藻和直链硅藻 (*Aulacoseira*) 占优, 2017 年直链硅藻、脆杆藻 (*Fragilaria*) 和针杆藻这个 3 种藻类占据硅藻门中主要的生物量. 硅藻门、蓝藻门和甲藻门的浮游植物在 2017 年和 2018 年生长相对旺盛. 多年数据显示硅藻门主要在气温较低的月份生长, 绿藻门多在夏秋季节生物量达到最高值. 另外甲藻门 2014 年和 2016 年生物量较低, 而 2017 年所占比例较高.

成差异明显 [图 5(a)], 2017 年普遍位于第一轴正半轴, 2014 年和 2016 年多数位于第一轴负半轴, 且与 2017 年明显分开, 说明排序轴第一轴可代表骆马湖群落演替的年度变化, 其中 TN 与第一轴呈正相关, pH 与第一轴呈负相关. 夏秋季节样本基本落在第三、四象限 (第二轴负半轴), 而 Temp 与第二轴呈负相关, 说明第二轴可代表浮游植物群落季节演替. 排序结果显示直链硅藻、角星鼓藻及薄甲藻等与 TN 呈正相关 [图 5(b)], 纤维藻、多甲藻、隐藻等与 pH 呈正相关, 栅藻、转板藻与温度呈正相关, 四角藻与电导率及 TP 呈正相关.

NMDS 表明北部湖区 [图 5(c)] 与南部湖区 [图 5(d)] 分析结果相似, 但相同因子的影响程度有差异. 例如北部湖区 TN 是影响浮游植物群落组成的主要因素, 而 TN 在南部湖区的贡献有所下降. 全湖与北部湖区中 F^- 浓度是主要影响因素之一, 但在南部湖区中 F^- 浓度并未入选. 综合来看, NMDS 分析结果表明 TN、 F^- 、Temp、TP、pH、Cond、DO 和高锰酸盐指数等环境因子是浮游植物群落变化的主要因素, 但南北湖区中相同因子对于浮游植物群落演替的贡献程度不同.

为进一步区识别影响浮游植物群落结构的关键因子, 选取门类生物量数据作为响应变量, 环境因子

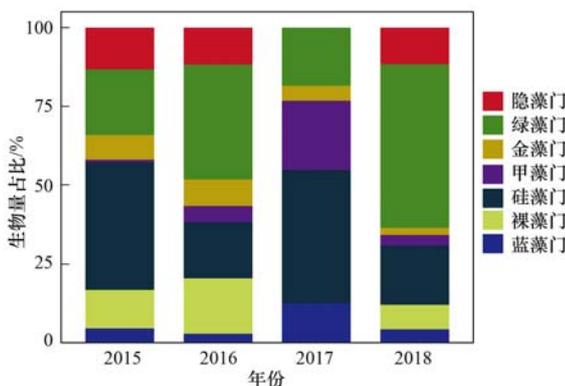


图3 骆马湖浮游植物年际生物量组成变化

Fig. 3 Variations in the phytoplankton biomass composition in different years in Lake Luoma

2.3 浮游植物群落演替与环境因子的关系

NMDS 分析结果显示不同年份浮游植物群落组

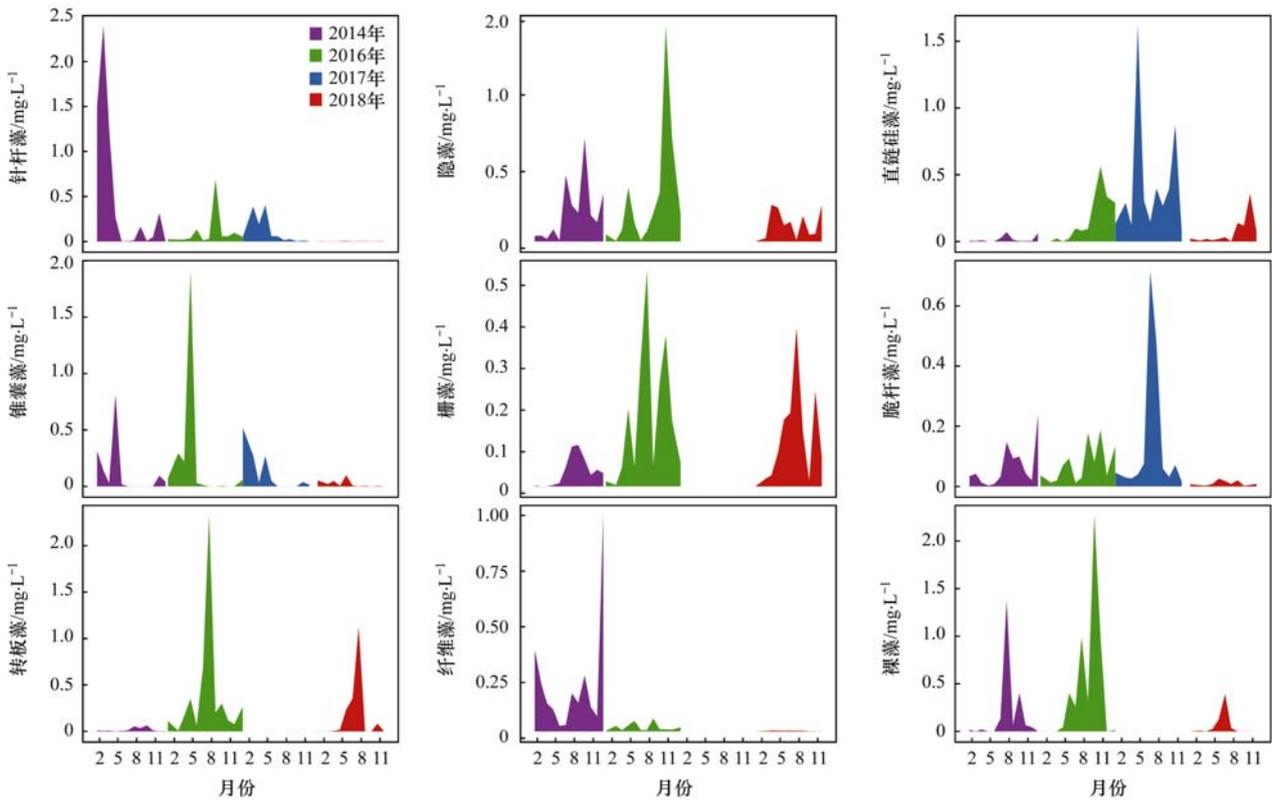


图 4 2014~2018 年骆马湖浮游植物优势属平均生物量变化

Fig. 4 Changes in the averages of biomass for dominant genera in Lake Luoma from 2014 to 2018

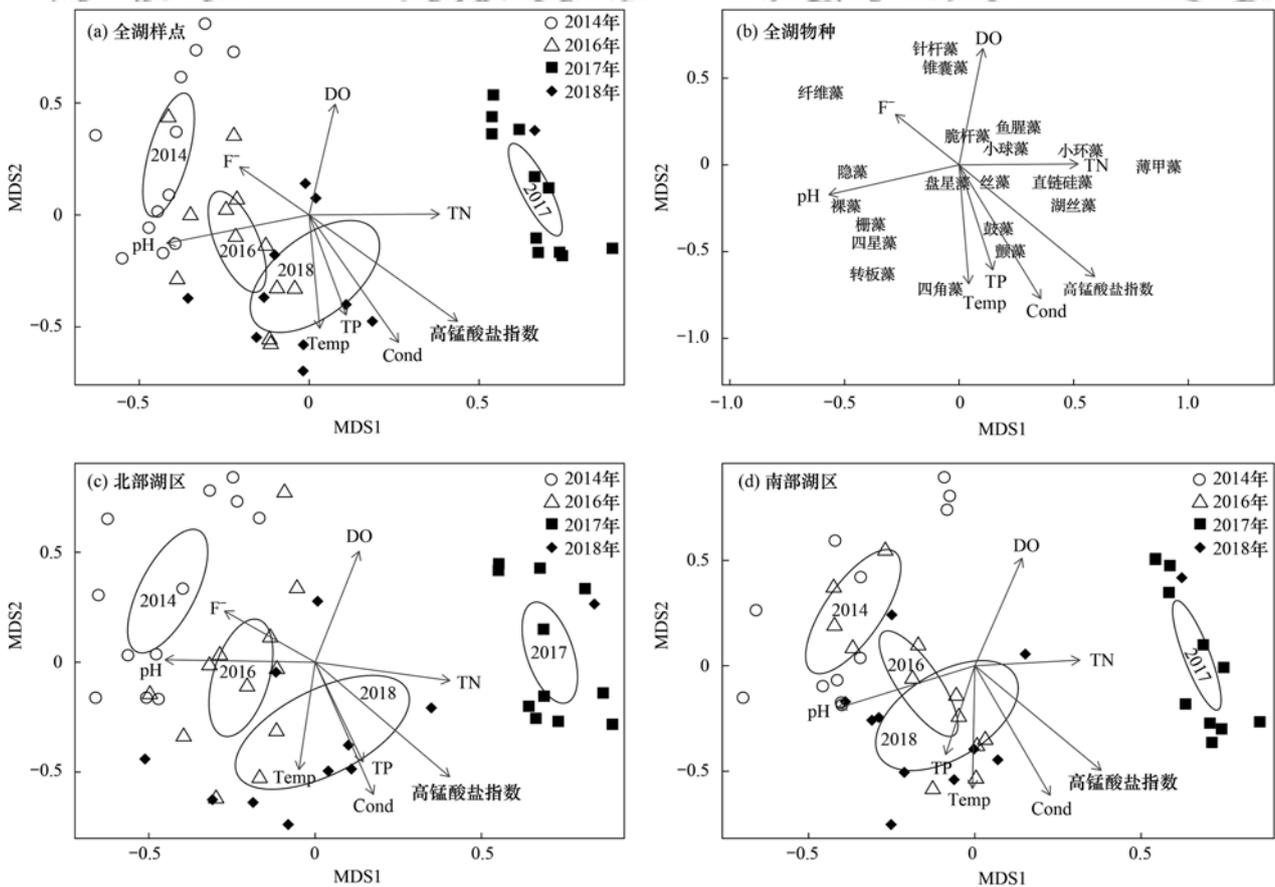


图 5 非度量多维尺度分析排序结果

Fig. 5 Results of non-metric multidimensional scaling

作为解释变量进行 GAM 模型检验, 剔除未通过检验的环境因子, 结果表明 TN、Temp 和 F^- 等环境因子与各门类生物量存在显著性相关(表 2)。其中 TN 与硅藻门、绿藻门和裸藻门呈显著性相关, 且对硅藻门和绿藻门的影响为非线性[edf(自由度) > 1]。

表 2 广义可加模型检验结果

Table 2 Results of generalized additive models

门类	项目	总氮(TN)	水温(Temp)	氟离子(F^-)	R^2
硅藻门	<i>P</i>	0.01	0.02	0.09	0.371
	edf	2.00	1.00	1.83	
绿藻门	<i>P</i>	0.04	0.34	0.01	0.398
	edf	2.03	1.00	1.70	
蓝藻门	<i>P</i>	0.10	0.001	0.24	0.462
	edf	3.46	1.00	2.16	
甲藻门	<i>P</i>	0.61	0.01	0.03	0.622
	edf	1.00	7.37	6.02	
隐藻门	<i>P</i>	0.19	0.03	0.13	0.394
	edf	4.35	2.18	2.70	
裸藻门	<i>P</i>	0.01	0.09	0.34	0.422
	edf	1.00	1.00	1.996	
金藻门	<i>P</i>	0.13	0.001	0.83	0.599
	edf	5.43	1.00	1.23	

3 讨论

3.1 骆马湖水体环境因子变化特征

骆马湖属于过水性湖泊, 是参与南水北调东线工程重要调蓄湖泊之一^[21,22], 水质变化受上游来水的影响较大。历史研究表明骆马湖水质数据可通过聚类划分为南北湖区, 北部湖区氮磷浓度高于南部湖区, 其原因与入湖污染物以及围网养殖等因素有关^[23]。本研究结果显示骆马湖水体富营养化程度逐渐加深。2017 年 6 月骆马湖开展围网拆除工作, 而后自 2017 年 7 月起 TN 和 TP 浓度变化幅度较大, 2017 年和 2018 年 7~9 月明显升高且北部围网养殖湖区浓度大于南部湖区。除了营养盐外, 高锰酸盐指数、pH 和 DO 也都在 2017 年 7 月后产生明显变化, 高锰酸盐指数浓度明显升高, 这可能是逐步拆除围网后网内大量养殖残渣及饵料释放导致的结果, 骆马湖营养盐在围网拆除后的变化与淀山湖围网拆除后出现的水体 TN 和 TP 浓度增加的现象一致^[24]。DO 在此期间存在短暂升高, 这可能由于短期内氮磷升高浮游植物大量繁殖, 光合作用增强的缘故^[25]。在不同季节上 Temp 和 Cond 呈相似的变化规律, 与 DO 呈现相反的趋势, 这是由于温度升高增加了水体离子浓度, 降低了氧气的溶解度导致的结果。 F^- 浓度与 pH 值在 2014 和 2016 年均下降趋势, 有研究证明骆马湖 pH 值变化与氟化物浓度呈正相

Temp 与硅藻门、蓝藻门、甲藻门、隐藻门和金藻门等多门类存在显著性相关, 但对于蓝藻门和金藻门影响极为显著($P < 0.01$)。 F^- 与绿藻门和甲藻门呈显著性相关且均属于非线性影响(edf > 1, $P < 0.05$)。

关关系, 且采砂活动会大幅度增加水体 F^- 浓度, 2015 年骆马湖实行禁止湖区采砂政策后 F^- 浓度大幅度下降^[26], 本文监测结果与上述结果一致。 F^- 浓度呈现逐年下降趋势, 由 2014 年至 2016 年年均值 $0.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 显著下降到 $0.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随之 pH 呈现短暂下降趋势。

3.2 骆马湖浮游植物群落结构变化特征

研究期间骆马湖浮游植物群落组成由 2014 年和 2016 年的蓝藻、裸藻、硅藻、金藻、甲藻、绿藻和隐藻门转变为 2017 年的蓝藻、硅藻、甲藻、金藻和绿藻门, 最后在 2018 年又回到蓝藻、裸藻、硅藻、金藻、甲藻、绿藻和隐藻门的状态。从门类变化可以得知骆马湖浮游植物年际变化明显, 但从生物量角度来说仍然是硅藻门绿藻门交替占优的状态。除门类变化明显外, 各年份中同一门类的优势属同样存在差异。例如: 2014 年纤维藻在绿藻门中生物量最大而后 2016 年夏季时转板藻和栅藻占据优势类群, 2017 年夏季角星鼓藻和鼓藻是绿藻门中的优势属, 2018 年时绿藻门中转板藻和栅藻又回到优势地位。从同一门类的不同种属的变化可以看出多年间骆马湖浮游植物年际变化明显, 同时也反映着水体环境变化剧烈。与骆马湖位置相邻的东平湖在年际变化过程中也存在着相似的年际演替过程^[27]。

Sommer 等^[28]的研究表明淡水水域浮游植物在不同季节上呈现硅藻、绿藻交替占优的现象。作为同

属南水北调东线工程中的重要调蓄湖泊,南四湖在夏秋季节绿藻门、蓝藻门以及裸藻门种属数高于冬春季节,春夏季节检出的硅藻种属数高于秋冬季节^[29];洪泽湖浮游植物变化规律呈现出冬春季硅藻门生物量较高,夏季绿藻门生物量高于冬春季节,依旧为绿藻硅藻交替占优的状态^[30].本研究中骆马湖浮游植物变化多年间呈现出冬春季节硅藻门生物量较高,夏季绿藻门生物量高于冬春季节的规律与上述研究结果相似.

3.3 环境因子与浮游植物群落结构关系

NMDS 结果表明,骆马湖的浮游植物群落变化与 TN、F⁻、Temp、TP、DO、pH、Cond 和高锰酸盐指数等因素有关.由[图 5(a)]可知经历了 2017 年后,骆马湖浮游植物群落结构在 2018 年又回到了与 2014 和 2016 年相似的状态.硅藻门在 2017 年期间占据优势门类,这可能与 TN 浓度急剧增长促进浮游植物群落的生长繁殖有关,与其他水库型湖泊研究结果一致^[31].当 TN 达到合适浓度就会引起特定的藻类占据生长优势使群落结构趋于简单化、稳定程度降低^[32],较高的 TN 浓度在一定程度上促进硅藻生长占据优势门类^[3, 33].GAM 模型检验结果显示 TN 变化与硅藻门($R^2 = 0.371, P < 0.05$)、绿藻门($R^2 = 0.398, P < 0.05$)和裸藻门($R^2 = 0.422, P < 0.05$)之间存在显著相关性,这与上述研究结果一致.在[图 5(a)]中 Cond、DO 和高锰酸盐较高的区域点位较少,表明以上因子对骆马湖浮游植物种类数存在影响但影响较弱,且在 GAM 模型检验后并未发现以上因子与优势门类之间存在显著相关性.TP 作为浮游植物的必要营养物质也进入了 NMDS 分析中的主要影响因子,但未通过 GAM 模型检验.这可能是由于骆马湖当前总磷含量较高,浮游植物生长未受到明显的磷限制.

温度变化对于骆马湖浮游植物群落结构变化亦存在较大的影响,从[图 5(a)]中可以看到 Temp 与第二轴呈现负相关关系.图中同一年份的点位呈现纵向分布,因此温度变化在时间尺度上来看可表现为浮游植物的季节演替.经 GAM 模型检验 Temp 对于各门类均存在影响,其中影响最大的是蓝藻门($R^2 = 0.462, P < 0.05$)和金藻门($R^2 = 0.599, P < 0.05$),故水温的季节变化是驱动骆马湖浮游植物季节演替的主要因子.

从全湖物种[图 5(b)]和南北湖区[图 5(c)和 5(d)]的 NMDS 排序结果可以看出,北部湖区的 TN 升高主导了骆马湖浮游植物演替过程,促进了硅藻门和裸藻门生长繁殖占据优势地位.同时 F⁻ 浓度在南北湖区中贡献程度不同,主要影响北部湖区的群

落结构变化,这与北部强烈的采砂活动相吻合.经过 GAM 模型检验后,全湖区来看 F⁻ 浓度显著影响绿藻门($R^2 = 0.398, P < 0.05$)和甲藻门($R^2 = 0.622, P < 0.05$)的群落变化.而其浓度在禁止采砂活动后逐年下降,可认为 F⁻ 浓度变化亦是引起浮游植物群落结构年际变化的环境因子之一.

近年来骆马湖参与南水北调东线调水并且实行禁止采砂、拆除围网等恢复生态环境的举措,使得水体环境变化幅度较大,对于藻类来说存在比较大的影响.2015 年实施禁止采砂政策后水体 F⁻ 浓度逐年下降;2017 年 6 月骆马湖实施围网拆除政策在短期内 TN 浓度先升高后下降;这些变化使得甲藻门、蓝藻门等藻类在此期间优势度升高,引起浮游植物群落结构改变.本研究结果表明,近年来骆马湖实行恢复生态环境举措对水体环境产生一定的影响,使得浮游植物群落发生明显的演替现象.由此看来持续开展浮游植物群落结构调查,以此甄别和评估湖泊管理措施带来的生态效应,不仅为骆马湖生态环境保护提供数据支持,在湖泊管理上也具有一定指导意义.

4 结 论

(1) 2014 ~ 2018 年骆马湖总氮、高锰酸盐指数、电导率等参数呈逐渐升高趋势,氟离子浓度呈逐渐下降趋势.

(2) 多年间骆马湖浮游植物群落结构存在着绿藻门和硅藻门交替占优的演替规律,且在这一过程中甲藻门和蓝藻门的优势度逐渐增加.

(3) NMDS 分析及 GAM 模型检验得出骆马湖浮游植物群落变化与总氮、水温和氟离子浓度等因素有关,其中水温是影响浮游植物群落季节变化的环境因子,总氮和氟离子浓度是影响浮游植物群落年际变化的环境因子.

致谢:感谢江苏省骆运水利工程管理处及郭锐协助野外采样和薛静琛协助室内样品分析.

参考文献:

- [1] 张涛,蒋伊能,陈丽,等. 阳宗海浮游植物和浮游细菌群落的空间分布特征[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(4): 65-74. Zhang T, Jiang Y N, Chen L, et al. Spatial distribution and determinants of phytoplankton and bacterioplankton community structure in Yangzong Lake[J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(4): 65-74.
- [2] 胡俊,郑金秀,池仕运,等. 苏皖交界河网区浮游植物群落结构及其与环境因子关系的研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(2): 282-288. Hu J, Zheng J X, Chi S Y, et al. Study on phytoplankton community and its relations to the environmental factors in the Qingyi/Guxi River network[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(2): 282-288.

- [3] 任辉, 田恬, 杨宇峰, 等. 珠江口南沙河涌浮游植物群落结构时空变化及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2017, **37**(22): 7729-7740.
Ren H, Tian T, Yang Y F, *et al.* Spatial and temporal distribution of phytoplankton community and its relationship with environment factors in Nansha's Rivers, Pearl River estuary[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(22): 7729-7740.
- [4] 胡月敏, 李秋华, 朱冲冲, 等. 基于功能群对比分析黔中普定水库和桂家水库浮游植物群落结构特征[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 403-416.
Hu Y M, Li Q H, Zhu C C, *et al.* Contrasting phytoplankton structure based on functional groups of Puding Reservoir and Guijiahu Reservoir in the central of Guizhou Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(2): 403-416.
- [5] 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.
- [6] 严广寒, 殷雪妍, 汪星, 等. 长江三口-西洞庭湖环境因子对浮游植物群落组成的影响[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(6): 2532-2540.
Yan G H, Yin X Y, Wang X, *et al.* Effects of environmental factors on the composition of phytoplankton community in Sankou of the Yangtze River and the Western Dongting Lake[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(6): 2532-2540.
- [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.
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.
- [8] 刘涛, 揣小明, 陈小锋, 等. 江苏省西部湖泊水环境演变过程与成因分析[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(9): 995-1002.
Liu T, Chuai X M, Chen X F, *et al.* Evolution of lake water environment in West Jiangsu province and analysis of causes[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, **24**(9): 995-1002.
- [9] 申霞, 洪大林, 谈小锋, 等. 骆马湖生态环境现状及其保护措施[J]. 水资源保护, 2013, **29**(3): 39-43, 50.
Shen X, Hong D L, Tan Y F, *et al.* Ecological environment of Luoma Lake and protection measures [J]. *Water Resources Protection*, 2013, **29**(3): 39-43, 50.
- [10] 彭凯, 李太民, 刘利, 等. 苏北骆马湖浮游植物群落结构及其水质生物评价[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 183-191.
Peng K, Li T M, Liu L, *et al.* Community structure of phytoplankton and bio-assessment of water quality in Lake Luoma, northern Jiangsu Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(1): 183-191.
- [11] 任颖. 南水北调东线调蓄湖泊浮游藻类群落特征与环境驱动因子[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [12] 邹伟, 李太民, 刘利, 等. 苏北骆马湖大型底栖动物群落结构及水质评价[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(5): 1177-1187.
Zou W, Li T M, Liu L, *et al.* Macrozoobenthic community structure and water quality assessment of Lake Luoma, Jiangsu Province, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(5): 1177-1187.
- [13] 叶玲. 骆马湖面临的环境问题和保护对策[J]. 污染防治技术, 2015, **28**(6): 87-88, 96.
Ye L. The environmental problems and protection countermeasures of Luoma Lake [J]. *Pollution Control Technology*, 2015, **28**(6): 87-88, 96.
- [14] 薛迪, 解军, 周建仁, 等. 南水北调东线湖泊杆状藻属分布特征及其与环境因子的关系[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(11): 1600-1607.
Xue D, Xie J, Zhou J R, *et al.* Distribution characteristics of synedra and its relationship with environmental variables in storage lakes on the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(11): 1600-1607.
- [15] 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.
- [16] 孙军, 刘东艳, 钱树本. 一种海洋浮游植物定量研究分析方法—Utermöhl方法的介绍及其改进[J]. 黄渤海海洋, 2002, **20**(2): 105-112.
Sun J, Liu D Y, Qian S B. A quantitative research and analysis method for marine phytoplankton: an introduction to Utermöhl method and its modification [J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 2002, **20**(2): 105-112.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18] Borcard D, Gillet F, Legendre P. Numerical ecology with R [M]. New York: Springer, 2011. 332-334.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 冯亚威. 南水北调东线骆马湖和东平湖鼓藻种群变化与环境因子研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [22] 钱奎梅, 高明侠, 孙玲. 骆马湖浮游植物群落结构的区域差异研究[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2018, **33**(4): 45-48.
Qian K M, Gao M X, Sun L, *et al.* Regional differences of phytoplankton community structure in Luoma Lake[J]. *Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition)*, 2018, **33**(4): 45-48.
- [23] 胡婷婷, 刘劲松, 戴小琳, 等. 骆马湖水质时空变化特征[J]. 生态与农村环境学报, 2016, **32**(5): 794-801.
Hu T T, Liu J S, Dai X L, *et al.* Spatio-Temporal variation of water quality in Lake Luoma, Jiangsu Province, China [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, **32**(5): 794-801.
- [24] 薛俊增, 蔡楨, 方伟, 等. 淀山湖养殖围网拆除后昆山水域浮游生物生态现状初步研究[J]. 上海海洋大学学报, 2010, **19**(4): 514-520.
Xue J Z, Cai Z, Fang W, *et al.* Ecological status of plankton in Kunshan area of Dianshan Lake after aquaculture net dismantling [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2010, **19**(4): 514-520.
- [25] 张萍, 刘宪斌, 李宝华, 等. 海河干流浮游植物群落结构特征研究[J]. 淡水渔业, 2015, **45**(4): 41-48.

- Zhang P, Liu X B, Li B H, *et al.* The community structure of phytoplankton in mainstream of Haihe River [J]. *Freshwater Fisheries*, 2015, **45**(4): 41-48.
- [26] 王飞, 叶慎忠, 朱泉. 骆马湖采砂作业对水体影响分析及对策思考[J]. *江苏水利*, 2015, (7): 36-37.
- [27] 路学堂. 东平湖浮游植物群落结构与驱动因子及蓝藻水华可能性研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [28] Sommer U, Gliwicz Z M, Lampert W, *et al.* The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters [J]. *Archiv für Hydrobiologie*, 1986, **106**(4): 433-471.
- [29] 薛迪. 南四湖浮游植物群落结构时空变化特征[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 刘林峰, 周先华, 高健, 等. 神农架大九湖湿地浮游植物群落结构特征及营养状态评价[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(2): 417-430.
- Liu L F, Zhou X H, Gao J, *et al.* Phytoplankton community structure and trophic status evaluation in Dajiuhu wetland of Shennongjia Alpine [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(2): 417-430.
- [33] 孙翠翠. 舞阳河硅藻生物多样性及与水体重金属和总磷总氮关系的研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2015.



CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of AO7 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)