

目次

基于机器学习方法研究气象及排放变化对长三角地区主要城市大气污染物的影响	付文星, 黄琳, 丁嘉豪, 秦墨梅, 于兴娜, 谢放尖, 胡建林 (5879)
不同行业减排对我国东部地区空气质量及大气温度的影响	龙籽谕, 朱佳, 李柯, 陈磊, 杜楠, 廖宏 (5889)
冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量时空特征、气象影响和减排效果评估	侯露, 朱媛媛, 刘冰, 李健军 (5899)
中国印刷业 VOCs 排放趋势及未来减排潜力	梁小明, 吴彭珍, 陈来国, 刘明, 卢清, 朱李华, 孙西勃, 叶代启 (5915)
济南市典型行业 VOCs 排放特征及减排潜力分析	吴文璐, 单春艳, 赵菁林, 崔羽浓 (5924)
南京市溧水区大气挥发性有机物污染特征及来源解析	阮兆元, 燕鸥, 王体健, 王勤耕, 罗干, 文金科 (5933)
我国近 10 年城市生活垃圾处置单元温室气体排放时空变化及减排潜能分析	张昕雪, 高淑丹, 滕晓, 蒋旭彤, 陈纪宏, 高晨琦, 卞荣星, 孙英杰, 李卫华, 王亚楠, 王华伟 (5946)
中国重点城市大气污染与健康风险的时空分布特征	涂佩玥, 杨欢, 陈兰洲, 牛笑笑, 杨璐, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 叶志祥, 梅新, 洪松, 何超 (5954)
中国 PM ₁ 浓度时空特征及其与 AOD 的相关性分析(2014~2017 年)	袁丽梅, 马芳芳, 卞泽, 秦凯 (5964)
长株潭城市群 PM _{2.5} 中二次无机离子特征及生成机制	马杰利, 罗达通, 刘欣, 王蕾, 李幸, 刘湛, 沈健, 张俊丰, 李晟 (5975)
周口市 2022 年冬季重污染过程中细颗粒物污染特征及成因分析	马英歌, 杨露, 狄睿苗, 马南, 乔利平, 吴宇航, 周文鑫, 赵新华, 张越, 孙志华, 陈长虹, 陈学军, 楼晟荣, 黄成 (5986)
兰州市 PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征和来源解析	马可婧, 孙丽娟 (5997)
北京市门头沟区大气降尘污染特征及其化学组分特征与质量重构	王志焱, 姚琦, 吕富, 王雨薇, 王珊, 王铮, 胡月琪 (6007)
典型热带海滨城市臭氧污染特征与成因分析	韩淑艳, 张鑫, 谢荣富, 霍思思, 高利澳, 吴泓锦, 党娟, 徐文帅, 邢巧, 张庆竹, 王文兴 (6015)
珠江源块泽河流域地表水水化学特征及控制因素	陶兰初, 寸得欣, 涂春霖, 马一奇, 刘振南, 尹林虎, 和成忠, 庞龙, 张七道 (6025)
淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素	刘海, 康博, 管政亭, 宋阳, 柴义伦 (6038)
巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别	姜凤, 周金龙, 周殷竹, 孙英, 韩双宝, 鲁涵 (6050)
滇池周边浅层地下水硝酸盐来源及转化过程识别	陈清飞, 陈安强, 崔荣阳, 叶远行, 闵金恒, 付斌, 闫辉, 张丹 (6062)
典型铅锌矿流域土壤重金属累积与分布的影响因素分析	潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (6071)
铅锌矿周边岩溶流域重金属污染及健康风险评价	廖红为, 蒋忠诚, 周宏, 覃小群, 黄奇波, 吴华英 (6085)
开封市主要河道沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价	丁亚鹏, 卢希昊, 王晓婧, 武鲲鹏, 张浩杰, 李欢, 付贤志, 王洪涛 (6095)
霍邱县城湖泊沉积物重金属环境容量评价与预测	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨 (6106)
基于宏条形码技术的白洋淀水华藻类识别及其驱动因子分析	陈婷, 杜珣, 陈义永, 郭道宇, 熊薇 (6116)
基于种群、功能群对比分析洞庭湖浮游植物群落驱动因素及水质评价	严广寒, 殷雪妍, 汪星, 黄民生, 黄代中, 王思瑞, 张韵宇 (6125)
南水北调东线山东境内调蓄湖库蓝藻种群分布特征及环境驱动因子	韦洁琳, 崔玉静, 李亦真, 张莎莎, 徐杭州, 庞一鸣, 裴海燕 (6137)
广东省药物活性化合物的污染特征及生态风险评价	罗嘉豪, 王煜凯, 原珂, 卢耀斌, 罗丽娟, 栾天罡 (6149)
紫外老化微塑料衍生 DOM 理化特性及其与磺胺嘧啶、铜的络合机制	王筱, 晏彩霞, 聂明华, 莫茜婷, 丁明军, 徐鳌雪, 邓思维 (6159)
共混塑料在海水中的光降解及海洋环境风险	张洪瑜, 高嘉蔚, 陈思宝, 林千惠, 葛安琪, 赵莎莎, 郑浩, 李锋民 (6172)
铁改型蓝藻生物炭的制备及对地表水中磷的协同吸附机制	韩杰, 黄鑫, 杨昆仑, 宋超凡, 缪恒锋 (6181)
基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别: 以北运河上游流域为例	李华林, 张守红, 于佩丹, 宋卓远, 谢晨新, 张建军 (6194)
农村黑臭水体沉积物细菌群落结构特征	任宏伟, 田彦芳, 路金霞, 石雅君, 王进, 岳正波, 刘晓玲 (6205)
气候变化背景下人类活动对承德坝区植被净初级生产力的影响	单振东, 刘顿, 骆汉, 刘建伟, 张丽梅, 魏宇航 (6215)
氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析	杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 郭鹏 (6226)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮的影响	曹杨, 沈育伊, 陈运霜, 王紫卉, 牟芝熠, 徐广平, 张德楠, 孙英杰, 毛馨月 (6235)
稻田微氧层和还原层土壤有机碳矿化对氮素添加的响应	毛婉琼, 夏银行, 马冲, 朱光旭, 王忠诚, 涂强, 陈香碧, 吴金水, 苏以荣 (6248)
保护性耕作对玉米田土壤中除草剂残留的影响	刘沅, 汪祖丞, 刘美华, 张天宇, 王健 (6257)
土壤中微塑料对陆生植物的毒性及其降解机制研究进展	刘微, 李宇欣, 荣飒爽, 汪晚晴, 王鑫鑫, 郭嘉朋, 韩冰, 王树涛 (6267)
南水北调丹江口库区土壤中微塑料分布特征及风险评估	王峰, 公玮, 刘哲, 朱重宁, 张润琴, 李志国, 刘毅 (6279)
北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险	安江梅朵, 张瑞卿, 郭广慧, 王云涛 (6287)
锌冶炼废渣重金属在地块土壤中的垂向迁移特征及归趋	杨爱萍, 王小燕, 肖细元, 王倩如, 胡建华, 郭朝晖, 彭驰 (6297)
典型硫铁矿农区土壤-作物系统重金属生态风险及迁移富集特征	成晓梦, 赵辰, 吴超, 孙彬彬, 曾道明, 贺灵 (6309)
不同土壤-小麦体系中铅镉交互作用与转运特征	寇萌, 樊宇, 苏梦贤, 熊娟, 汪明霞, 谭文峰 (6319)
开花后小麦地上部镉、砷分布及其转运特征	王秋实, 华桂丽, 李翔宇, 冯柳旭, 唯康鑫, 耿丽平, 薛培英, 刘文菊 (6328)
黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态	王竹, 刘扬, 王芳, 王义成 (6339)
典型煤炭产业园区土壤重金属污染对细菌群落结构的影响	郑丹凤, 刘娣, 苏超, 张红 (6354)
增氧模式对水稻根际微生物多样性和群落结构的影响	肖德顺, 徐春梅, 王丹英, 陈松, 褚光, 刘元辉 (6362)
紫色土硝化势和氨氧化微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应	李越, 王子芳, 贾丽娟, 谢军, 熊子怡, 高明 (6377)
连作对参根际土壤理化性质、微生物活性及群落特征的影响	杨阳, 李海亮, 马凯丽, 虞凡枫, 牛世全 (6387)
粪肥施用对抗生素在土壤上吸附的影响	罗珊, 胡锦昇, 唐翔宇, 耿春文, 程建华 (6399)
基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济发展关系	陈四瑜, 刘晶茹, 孙光明 (6412)
近 5 年我国部分城市人群生活垃圾特性	王小波, 刘安琪, 钟慧琼, 赵增立 (6421)
《环境科学》征订启事(5963) 《环境科学》征稿简则(6193) 信息(5923, 6024, 6037)	

基于种群、功能群对比分析洞庭湖浮游植物群落驱动因素及水质评价

严广寒^{1,2,3,4}, 殷雪妍^{1,2,3}, 汪星^{1,2,3*}, 黄民生^{4*}, 黄代中⁵, 王恩瑞^{1,2}, 张韵宇⁴

(1. 中国环境科学研究院湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院国家环境保护饮用水水源地保护重点实验室, 北京 100012; 3. 中国环境科学研究院国家环境保护洞庭湖科学观测研究站, 岳阳 414000; 4. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241; 5. 湖南省洞庭湖生态环境监测中心, 岳阳 414000)

摘要: 浮游植物是水生态系统中最重要组成部分, 因其对水环境变化敏感而常被用于指示水环境状态, 但其对环境的响应受分类方法的影响. 为了解洞庭湖浮游植物种群(门、属)和功能群(FG)两种分类法对环境的驱动响应特征和适用性, 于2019年3~12月分水期对该湖共进行了4次采样, 比较分析了浮游植物种群和功能群的分布特征及其与环境因子的响应关系, 并对TLI指数、Shannon-Wiener指数、Q指数等评价方法在洞庭湖的适用性. 结果表明, 洞庭湖共检出浮游植物61门61属, 可划分为23个功能群和9个优势功能群, 功能群演替趋势为P/MP/D(3月)→MP/P/J(6月)→MP/H1(9月)→Y/P/MP(12月). 层次分割结果表明, 洞庭湖浮游植物的种群分布与变化受环境因子的驱动大于空间驱动; 影响浮游植物种群和功能群的主要环境因子为水温(WT)、高锰酸盐指数、溶解氧(DO)、电导率(Cond)、水位(WL)和总磷(TP), 环境因子对两者的独立解释性排序相差不大. RDA分析表明, 浮游植物功能群对环境因子的响应要优于浮游植物种群. 综合对比分析发现, 利用Q指数进行水质评价在洞庭湖水体有较好的适用性.

关键词: 洞庭湖; 浮游植物种群; 功能群; 环境因子; Q指数

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)11-6125-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202212107

Driving Factors Analyze of Phytoplankton Community by Comparison of Population and Functional Groups and Water Quality Evaluation in Dongting Lake

YAN Guang-han^{1,2,3,4}, YIN Xue-yan^{1,2,3}, WANG Xing^{1,2,3*}, HUANG Min-sheng^{4*}, HUANG Dai-zhong⁵, WANG En-rui^{1,2}, ZHANG Yun-yu⁴

(1. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Drinking Water Source Protection, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. State Environmental Protection Scientific Observation and Research Station for Lake Dongting, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Yueyang 414000, China; 4. School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 5. Ecological and Environmental Monitoring Center of Dongting Lake of Hunan, Yueyang 414000, China)

Abstract: Phytoplankton is the most important component of water ecosystems, which could indicate the state of the water environment owing to its sensitivity to water environment variation. However, its response to the environment is influenced by classification methods. To understand the phytoplankton population (phyla and genera) and functional groups (FG) for driving response characteristics and applicability to the environment in Dongting Lake, a total of four samples were collected from the lake from March to December 2019, and the distribution characteristics of the phytoplankton population and functional groups and their responses to environmental factors were compared and analyzed. Meanwhile, the applicability of the TLI index, Shannon-Wiener index, and Q index was compared in Dongting Lake. The results showed that a total of 61 genera belonging to six phyla of phytoplankton were detected in Dongting Lake, which could be divided into 23 functional groups and nine dominant functional groups. The succession trend of functional groups was P/MP/D (March) → MP/P/J (June) → MP/H1 (September) → Y/P/MP (December). The results of hierarchical segmentation showed that the population distribution and change in phytoplankton were driven by environmental factors more than the area in Dongting Lake. The main environmental factors affecting phytoplankton population and functional groups were water temperature (WT), permanganate index, dissolved oxygen (DO), conductivity (Cond), water level (WL), and total phosphorus (TP). RDA analysis showed that phytoplankton functional groups identified phytoplankton response to environmental factors better than phytoplankton population. It was shown that using the Q index to evaluate water quality had better applicability in Dongting Lake.

Key words: Dongting Lake; phytoplankton population; functional groups; environmental factors; Q index

浮游植物是水生态系统中最重要初级生产者, 具有细胞个体小、结构简单且对环境的敏感性高, 变化较快等特点^[1], 在河流湖泊等水体中与非生物因素, 如氮磷营养盐、高锰酸盐指数、溶解氧和温度等具有相互影响, 同步变化的效应^[2,3]. 因此, 被作为一种有效的水体生态环境评价方法来分析水质状况^[4,5].

目前, 常用于浮游植物评价水环境的方法主要

有两种: 基于亲缘关系的系统分类法和基于生境特征划分功能群的方法 (FG)^[6,7]. 如系统分类法是以浮游植物指示种、属和门来归类数据, 各指示种代

收稿日期: 2022-12-12; 修订日期: 2023-01-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC3203605-03); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (2020-JY-009); 洞庭湖江湖生态监测重点站项目 (2022 年)

作者简介: 严广寒 (1992~), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为水生生物评价, E-mail: yangh012@163.com

* 通信作者, E-mail: wangxing@craes.org.cn; mshuang@des.ecnu.edu.cn

表水体环境状态,或借助多样性指数法来进行评价,如 Shannon-Wiener 多样性指数可以反映浮游植物群落特征^[8],进而推断出水质情况.而功能群则是以浮游植物的生理特征和适应环境的机制,将生境相同或相似的种类归为同一功能群,目前已划分出 39 个功能类群^[9,10].功能群可以综合反映水深、水力冲刷、水体混合状态、透明度、营养程度、酸碱性和牧食作用等生境^[11].在实际应用中,通过优势功能群所适应的生境类型来判断水体理化和生物环境特征^[9,10].同时,由于功能群与环境特征相互响应,Padisák 等^[12]提出了一种基于功能群的集合指数(Q 指数)评价法, Q 指数对物种的出现、生物量变化和栖息地类型的偏好非常敏感,其应用不受地域限制.两种方法在水环境质量评价中都有广泛应用,但不同的水环境类型对评价方法的适用性却有明显差异. Salmaso 等^[13]研究表明,功能群对生态属性,环境耐受性和营养状态的解释度优于浮游植物群落分类单元;而郭芳等^[11]对南亚热带 8 座水库的浮游植物研究表明,群落划分法对环境识别的灵敏度高于 FG 功能群分类法.根据以上分析,水环境评价中功能群分类法优势要优于群落划分法,但这两种评价方法却得到不同的结果.因此,对于方法的适用性及合理性需要针对具体的水环境特征进行对应分析.

有研究表明,浮游植物的生长和分布受生物因素^[14,15](浮游动物捕食)和非生物因素^[16~19](光照、温度、营养盐和水文连通性等)的影响.洞庭湖作为长江中下游距离三峡大坝最近的典型通江湖泊^[20],水系分布较为复杂,湖区水质及水文状况受长江三口、四水及区间季节性来水携带大量营养物质影响较大^[21].且洞庭湖流域以农业为主,农业面源污染较为严重,水位波动及降雨径流冲刷改变了湖区污染物浓度^[22].这种季节性的水文水质变化对洞庭湖浮游植物生长和分布造成了一定的影响.以往对洞庭湖浮游植物的研究多集中于浮游植物群落时空分布及功能群与理化因子的响应关系^[23~26],关于水文条件对洞庭湖浮游植物影响的报道较少.此外,对浮游植物群落和功能群仅是单独分析其与环境因子的响应关系,并未分析两种方法的适用性.

本研究首次将浮游植物种群与 FG 功能群划分法对洞庭湖浮游植物进行比较分析,并探究浮游植物群落与功能群的变化特征、优势功能群与适应生境之间的相互关系以及两种方法的适用性,最后通过 Q 指数评价法和其他水质评价法进行比较,以期对洞庭湖水生态管理及水质评价提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

洞庭湖($110^{\circ}40' \sim 113^{\circ}40'E$, $28^{\circ}30' \sim 30^{\circ}20'N$)位于湖南省北部,长江中游南岸,流域面积 2 625 km^2 ,容积 $1.78 \times 10^{10} m^3$,平均水深 6.39 m,丰水期水位和蓄水量分别是枯水期的 1.14 ~ 1.64 倍和 17 ~ 31 倍^[27].由西洞庭湖(284 km^2)、南洞庭湖(897 km^2)和东洞庭湖(1 217 km^2)组成,北部接长江荆江段松滋、太平和藕池三口分流,南部接纳湘江、资水、沅江和澧水,东部主要由新墙河、华容河和汨罗江等河流汇入,经洞庭湖调蓄后由城陵矶汇入长江,构成一个复杂的吞吐型通江湖泊.

1.2 监测点位布设与采样时间

本研究根据洞庭湖实际水文特征、各湖区面积大小和地理位置特征,全湖共设置 11 个监测点位($S1 \sim S11$).涵盖西洞庭湖区($S1 \sim S3$)、南洞庭湖区($S4 \sim S6$)和东洞庭湖区($S7 \sim S11$),共计 3 个区域,各采样点分布如图 1 所示.分别于 2019 年 3 月(春季)、6 月(夏季)、9 月(秋季)和 12 月(冬季)进行调查采样.

1.3 样品采集与处理

用 YSI-EXO 多参数水质分析仪(美国维赛 YSI professional plus)现场测定水温(WT)、溶解氧(DO)、电导率(Cond)和 pH 值等参数,透明度(SD)用塞氏圆盘法测定.总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH_4^+-N)、高锰酸盐指数和叶绿素 a(Chl-a)取表层 0.5 m 的 1 L 水样带回实验室测定,各指标参照《水和废水监测分析方法(第四版)》^[25]测定,其中,TN 采用碱性过硫酸钾-紫外分光光度计法;TP 采用钼酸铵分光光度法; NH_4^+-N 采用纳氏试剂光度法;高锰酸盐指数采用酸性高锰酸钾法;Chl-a 采用丙酮萃取分光光度法.浮游植物取样品取表层 0.5 m 的 1 L,现场加入鲁哥试剂固定,实验室静置 48 h 后,浓缩至 30 mL 保存;在奥林巴斯 CX31 型显微镜(10×40 倍)下进行计数,参照《中国淡水藻类》^[28]进行鉴定.水位和流量数据来源于湖南水文水资源勘测中心(<http://slt.hunan.gov.cn/>).

1.4 数据处理

浮游植物的优势度 Y ,采用 $Y > 0.02$ 作为优势的判别标准. Shannon-Wiener 多样性指数(H),可以反映水体浮游植物群落结构的复杂性,数值越高,其群落结构越复杂,水质越好^[8],计算公式如下.

优势种分析(Y):

$$Y = (n_i/N) \cdot f_i$$

Shannon-Wiener 指数(H):

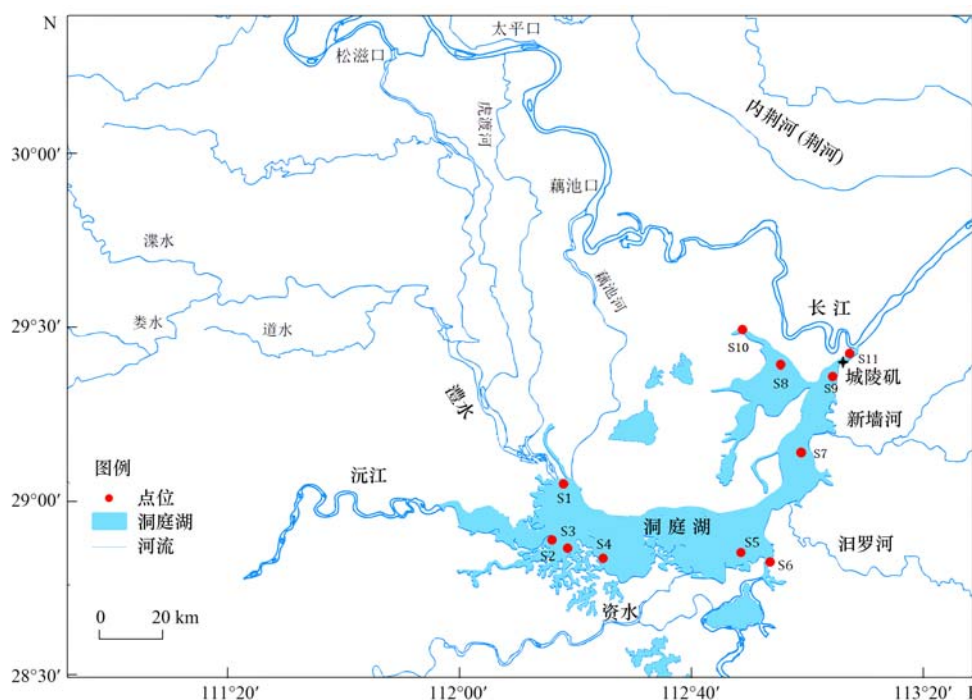


图1 洞庭湖监测点位示意

Fig. 1 Sampling sites in Dongting Lake

$$H = - \sum P_i \log_2 P_i$$

式中, $P_i = N_i/N$; N_i 为第 i 种藻的个数, N 为观察到的总个数, n_i 为第 i 种的总个体数, f_i 为该样品中出现的频率. H 指数值分别表示: 0~1 重污染, 1~2 α 重污染, 2~3 β 中污染, >3 轻或无污染.

Q 指数是一种通过浮游植物功能群和其生物量对湖泊、水库营养状况进行评价的生态健康指数^[12], 计算公式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n \left(\frac{n_i}{N} \cdot F_i \right)$$

式中, n 为浮游植物功能群的数量, N 为浮游植物的总生物量, n_i 为第 i 个功能群的生物量, F_i 为第 i 个功能群的赋值, 范围为 0~5, 其中储层更原始的功能群赋值较高, 而原始条件的功能群赋值较低^[29]. Q 指数 0~5 分别表示: 0~1 差, 1~2 耐受, 2~3 中等, 3~4 好, 4~5 极好.

综合营养状态指数 (TLI) 是评价湖泊富营养化程度的指标, 参照《湖泊 (水库) 富营养化评价方法及分级技术规定》^[30] 中进行计算. TLI 指数 0~100 分别表示: 0~30 贫营养, 30~50 中营养, 50~60 轻度富营养, 60~70 中度富营养, 70~100 重度富营养.

1.5 数据分析

洞庭湖不同季节和湖区环境因子的显著性差异采用单因素方差分析 (one-way ANOVA), 借助 SPSS 21.0 统计软件处理. 首先, 基于 DCA 的分析结果,

当 DCA 第 1 轴的特征向量 (DCA1) 小于 3 时, 选择 RDA 分析; 当 DCA1 介于 3~4 之间时, 选择 RDA 和 CCA 均可; 当 DCA1 大于 4 时, 选择 CCA 分析.

基于浮游植物密度和生物量数据以及 VIF (variance inflation factor) 小于 20 的环境因子进行冗余分析 (redundancy, RDA), 用来评估环境因子对浮游植物群落和浮游植物功能群的影响, RDA 分析及层次分割分析使用 rdacca.hp 包^[31] 完成; 使用 vegan 包中的 “envfit” 函数对影响浮游植物群落和功能群的环境因子进行显著性检验. 最后, 使用 corplot 包进行环境因子与 TLI 指数、Shannon-Wiener 指数和 Q 指数的相关性分析. 上述分析过程及可视化均在 R (v. 4.0.3) 中完成.

2 结果与分析

2.1 洞庭湖环境因子变化规律

洞庭湖城陵矶水文站显示, 其 2019 年水位和流量变化趋势基本一致 (图 2), 4~6 月为涨水期, 7~8 月为丰水期, 9~11 月为退水期, 12 月至次年 3 月为枯水期. 其中, 3 月、6 月、9 月和 12 月水位分别为 24.60、29.57、24.52 和 20.17 m; 流量分别为 10 566、17 641、3 885 和 2 158 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

洞庭湖不同月份及湖区水体环境因子变化如图 3 所示, 单因素方差分析结果表明, 洞庭湖不同月份的水温、DO、Cond、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 TN/TP 具有显著的时间差异 ($P < 0.05$); Cond、高锰酸盐指数、TN 和 TP 具有显著的空间差异 ($P < 0.05$). 水温变

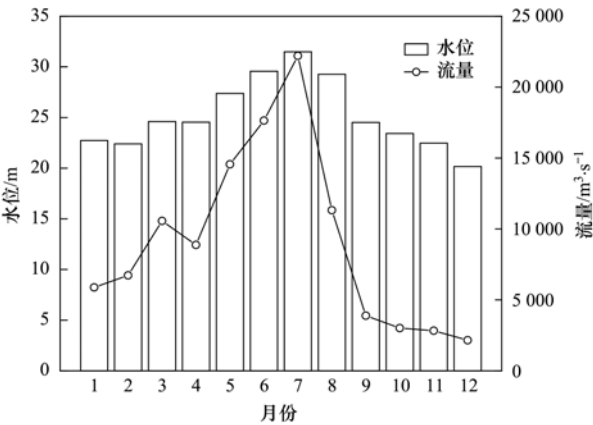


图2 洞庭湖城陵矶水文站 2019 年水位和流量月均值变化

Fig. 2 Monthly mean changes in water level and flow at Dongting Lake Chenglingji hydrological station in 2019

化范围为 9.2 ~ 30.7℃, 6 月 (24℃) 和 9 月 (27.8℃) 明显高于 3 月 (10.5℃) 和 12 月 (12.6℃). DO 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与水温变化趋势相反, 6 月和 9 月明显低于 3 月和 12 月, 变化范围分别为 6.44 ~ 11.59 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.02 ~ 0.36 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Cond 变化范围为 12.8 ~ 46 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 12 月最高, 6 月最低. $\rho(\text{TN})$ 和 TN/TP 变化范围分别为 1.04 ~ 2.36 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 11 ~ 57.5, 其中 3 月均值最高, 6 月均值最低. 对于空间分布, 东洞庭湖 Cond、高锰酸盐指数、TN 和 TP 明显高于西、南洞庭湖.

2.2 浮游植物种群结构和功能群特征

2.2.1 浮游植物种群结构特征和优势种

调查期间, 共鉴定出浮游植物 6 门 61 属. 浮游

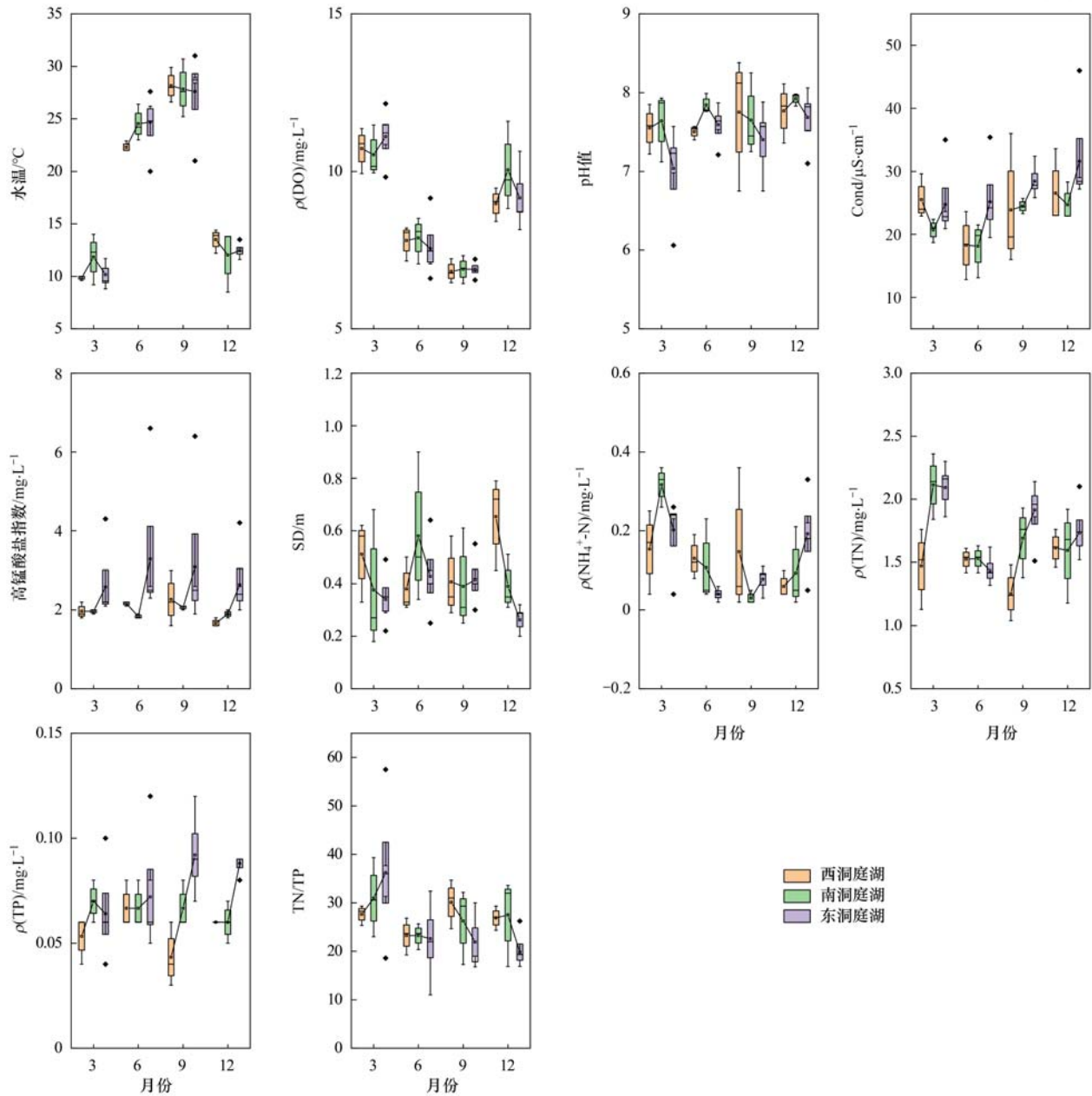


图3 洞庭湖不同季节和湖区水体理化性质

Fig. 3 Physicochemical properties in different seasons and lakes of Dongting Lake

植物群落密度变化范围为 $(5.29 \sim 66.51) \times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中, 9 月最高 $(31.10 \times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1})$, 6 月次之 $(31.03 \times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1})$, 3 月为 $28.86 \times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$, 12 月最低 $(21.46 \times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1})$ [图 4 (a)]. 东洞庭湖显著高于西、南洞庭湖 ($P < 0.05$); 其中, 西、南洞庭湖在 3 月、6 月和 12 月均以硅藻

为主, 9 月以蓝藻为主; 而东洞庭湖 3 月以硅藻为主, 6 月以蓝-绿-硅藻为主, 9 月以蓝藻为主. 此外, 3 个湖区在 12 月隐藻占比均有所升高. 从不同时期浮游植物的优势种 (表 1) 看, 3 月和 6 月直链藻优势度最高, 9 月颤藻优势度最高, 12 月隐藻优势度最高.

表 1 洞庭湖浮游植物优势种分布¹⁾
Table 1 Distribution of dominant species of phytoplankton in Dongting Lake

门	属	优势度 (Y)			
		3 月	6 月	9 月	12 月
硅藻	直链藻 (<i>Melosira</i> sp.)	0.251	0.135	0.062	0.162
	舟形藻 (<i>Navicula</i> sp.)	0.045	0.061	—	0.022
	针杆藻 (<i>Synedra</i> sp.)	0.114	0.114	0.036	0.034
	小环藻 (<i>Cyclotella</i> sp.)	0.061	0.023	—	—
	菱形藻 (<i>Nitzschia</i> sp.)	0.055	—	—	—
	羽纹藻 (<i>Pinnularia</i> sp.)	—	0.021	—	—
绿藻	栅藻 (<i>Scenedesmus</i> sp.)	—	—	0.026	—
蓝藻	鱼腥藻 (<i>Anabeana</i> sp.)	—	—	0.029	—
	伪鱼腥藻 (<i>Pseudanabaena</i> sp.)	—	—	0.057	0.020
	颤藻 (<i>Oscillatoria</i> sp.)	—	—	0.203	—
隐藻	隐藻 (<i>Cryptomonas</i> sp.)	—	0.026	—	0.176

1) 优势种均为 $Y > 0.02$ 的种类; “—”表示优势度小于 0.02

2.2.2 浮游植物功能群划分和特征

根据功能群分类方法^[10], 共划分 23 个功能群, 分别为 B、C、D、F、G、H1、J、Lo、LM、M、MP、N、P、S1、S2、SN、T、W1、W2、X1、X2、X3 和 Y, 各功能群代表性种属及生境特征等见表 2. 将每个样本中相对生物量 $> 5\%$ 的功能群定义为优势功能群, 得到 9 组优势功能群, 分别是 B、D、H1、J、Lo、MP、P、X1 和 Y.

洞庭湖浮游植物功能群在时空分布上的差异主要表现在功能群生物量大小和各功能组组成比例的变化 [图 4 (b)], 浮游植物总生物量变化范围为 $0.41 \sim 7.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 其中, 时间分布上, 以 6 月最高 $(3.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$, 9 月次之 $(3.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$, 12 月为 $2.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 3 月最低 $(1.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$. 空间分布上, 东洞庭湖浮游植物生物量最高, 西、南洞庭湖差异性不大 ($P > 0.05$), 且生物量均较低. 3 月以功能群 P、MP 和 D 占优, 占比分别为 24.95%、19.92% 和 17.22%. 6 月以功能群 MP、P 和 J 占优, 占比分别为 18.04%、13.05% 和 11.62%. 9 月以功能群 MP 和 H1 占优, 占比分别为 48.42% 和 20.54%. 12 月以功能群 Y、P 和 MP 占优, 占比分别为 20.90%、18.26% 和 18.20%. 相对西洞庭湖和南洞庭湖, 功能群 H1 和 Y 分别在东洞庭湖的 9 月和 12 月占比较高; 功能群 P 和 D 在西、南洞庭湖 3 月、6 月和 12 月占比较高. 浮游植物功能群总体演替趋势为:

P/MP/D (3 月) $\rightarrow$ MP/P/J (6 月) $\rightarrow$ MP/H1 (9 月) $\rightarrow$ Y/P/MP (12 月).

2.3 浮游植物种群结构与功能群的驱动因子

DCA 结果 (种群 DCA1 = 1.92, 功能群 DCA1 = 1.55) 表明, RDA 分析可以合理解释浮游植物种群和功能群驱动因子. RDA 分析结果显示 (图 5), 环境因子对浮游植物种群和功能群的前两轴解释率分别为 71.97% 和 74.24%. 其中, 直链藻 (*Mel.*) 和舟形藻 (*Nav.*) 与 DO 呈显著正相关, 与 Cond、TP、高锰酸盐指数和 WT 呈显著负相关; 颤藻 (*Osc.*)、伪鱼腥藻 (*Pse.*) 和栅藻 (*Sce.*) 均与 Cond、TP、高锰酸盐指数和 WT 呈显著正相关性, 与 DO 呈显著负相关; 隐藻 (*Cry.*) 与 WL、WT 呈显著负相关. 功能群 MP、H1 和 J 均与 WT、高锰酸盐指数及 TP 呈显著正相关, 与 DO 显著负相关, 而功能群 P、B 和 D 与之相反; 功能群 Y 与 WL、WT 呈显著负相关; 功能群 Lo 与 WL 呈显著正相关.

为识别各环境因子对浮游植物种群和功能群重要性影响作用, 通过层次分割结果显示 (图 6), 浮游植物种群和功能群受季节性变化的影响显著高于空间性, 浮游植物种群受空间性的影响要高于功能群. 显著影响浮游植物种群的环境因子分别为: $\text{WT} > \text{高锰酸盐指数} > \text{DO} > \text{Cond} > \text{WL} > \text{TP}$, 显著影响浮游植物功能群的环境因子分别为: $\text{WT} > \text{DO} > \text{Cond} > \text{高锰酸盐指数} > \text{WL} > \text{TP}$, 主要环境因

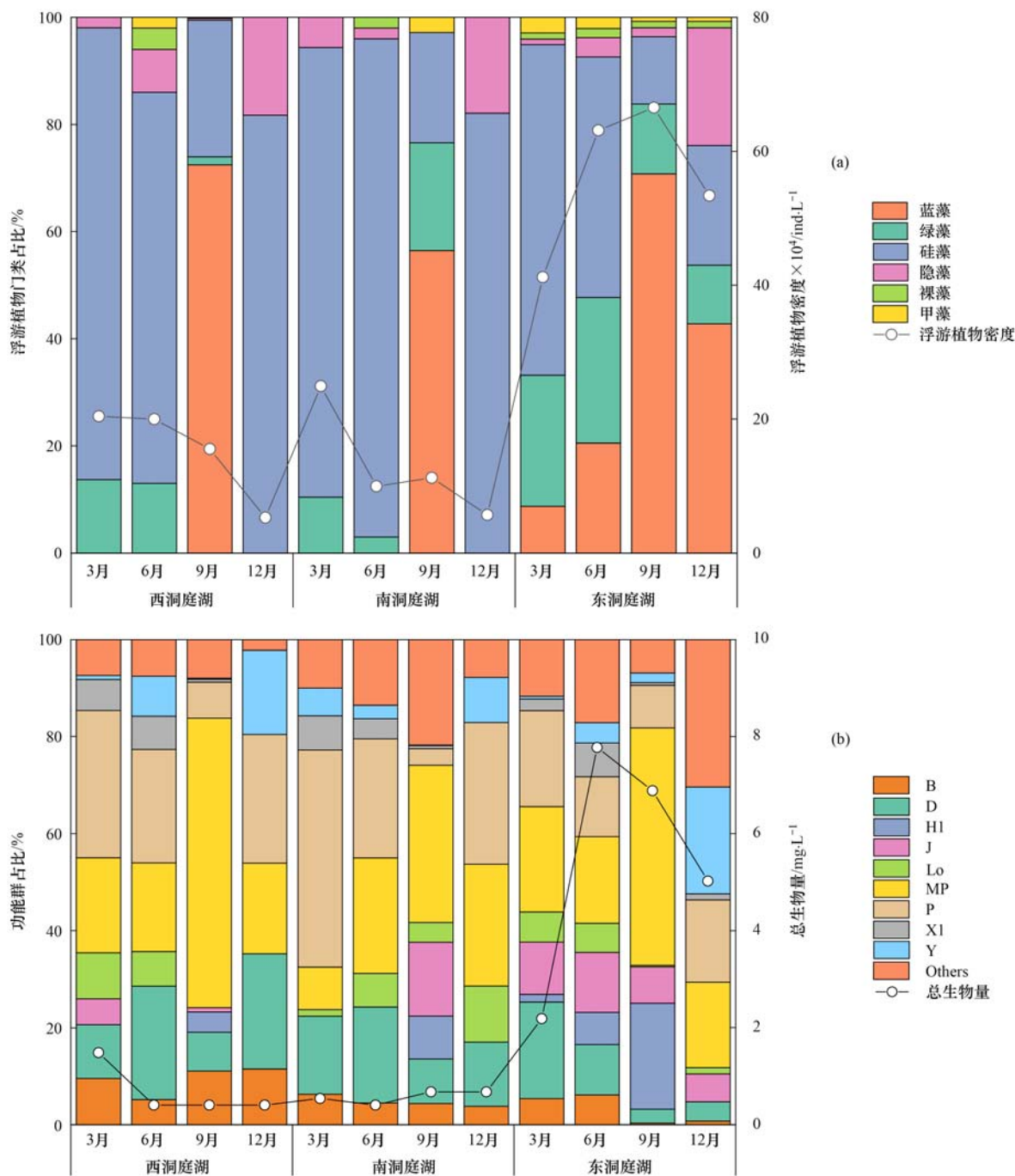


图4 洞庭湖不同季节和湖区浮游植物种群和功能群分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of phytoplankton population and functional groups in different seasons and lakes in Dongting Lake

子对浮游植物种群和功能群的独立解释性排序相差不大。

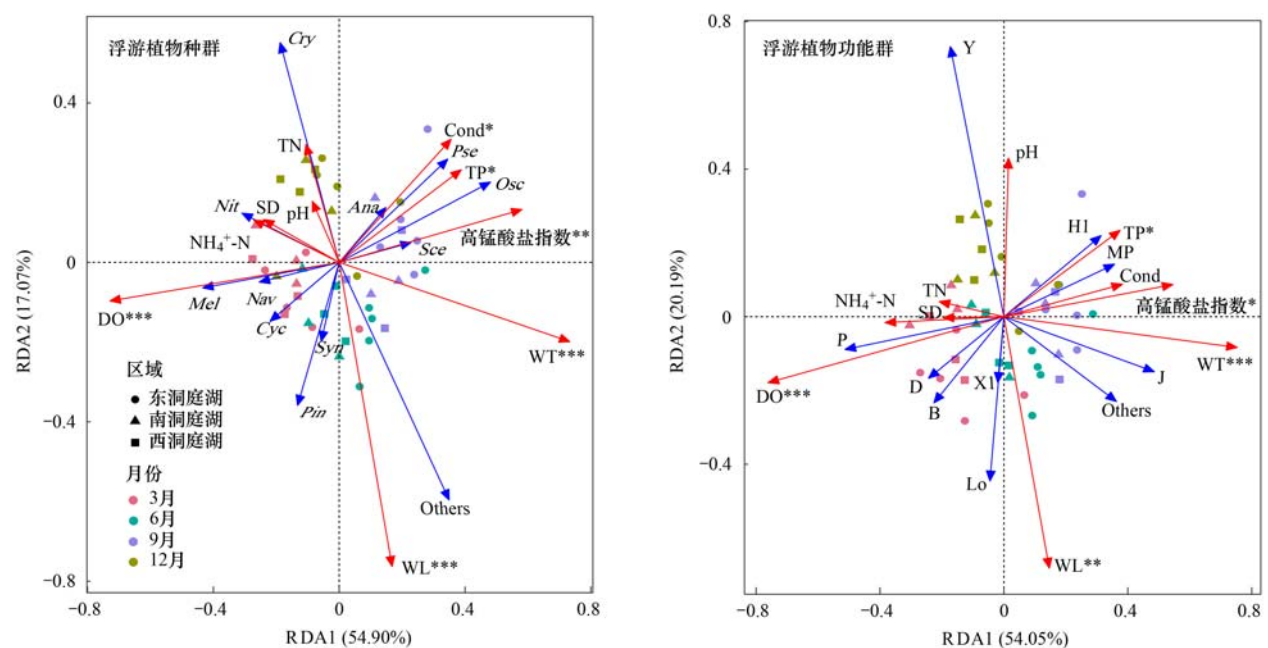
2.4 水质评价

根据 TLI 指数评价标准,洞庭湖总体处于中营养状态[图 7(a)].各月份 TLI 指数差异不大:6 月(46.95) > 12 月(46.80) > 3 月(46.52) > 9 月(46.48);空间上,东洞庭湖(50.55) > 南洞庭湖(44.19) > 西洞庭湖(42.74).此外,东洞庭湖在 6 月、9 月和 12 月达到轻度富营养状态,而西、南洞庭湖在 4 个月份均处于中营养状态。

Shannon-Wiener 指数显示[图 7(b)],洞庭湖总

体呈中污染状态.其中 6 月(3.13) > 9 月(2.81) > 3 月(2.73) > 12 月(2.59),6 月处于轻或无污染状态;东洞庭湖(2.99) > 西洞庭湖(2.73) > 南洞庭湖(2.60),均处于中污染状态.此外,东洞庭湖在 6 月处于轻或无污染状态。

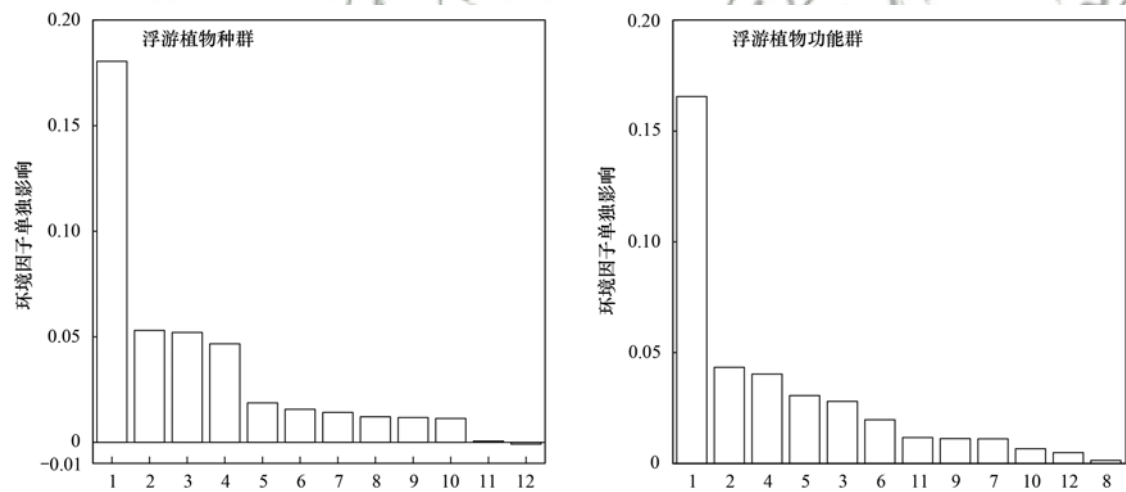
根据 Q 指数应用的建议,洞庭湖水体识别的各功能群的 F 值权重如表 2 所示,洞庭湖总体处于好状态[图 7(c)].其中 3 月(3.87) > 6 月(3.72) > 12 月(3.61) > 9 月(3.51),均处于好状态;空间上,西洞庭湖(3.91) > 南洞庭湖(3.63) > 东洞庭湖(3.56),南洞庭湖在 9 月处于中等状态。



带 * 的环境因子表示“envfit”函数检验 $P < 0.05$ ；红色箭头表示环境因子，蓝色箭头分别表示物种和功能群

图 5 洞庭湖不同季节和湖区浮游植物种群和功能群 RDA 分析

Fig. 5 RDA analysis of phytoplankton population and functional groups in different seasons and lakes in Dongting Lake



1. 季节, 2. WT, 3. 高锰酸盐指数, 4. DO, 5. Cond, 6. WL, 7. TP, 8. 区域, 9. SD, 10. TN, 11. pH 值, 12. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

图 6 洞庭湖不同季节和湖区环境因子对浮游植物种群和功能群的独立影响

Fig. 6 Independent effects of different seasons and environmental factors on phytoplankton population and functional groups in Dongting Lake

通过对各月份的环境因子之间及与 TL_I 指数、Shannon-Wiener 指数和 Q 指数之间进行相关性分析表明(图 8), WL 与 Flow、WT 呈显著正相关,与 Cond 呈显著负相关,水温与 DO、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 呈显著负相关; Cond 与高锰酸盐指数、TP 呈显著正相关; DO 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 及 TP 呈显著正相关;高锰酸盐指数与 TP 显著正相关. 环境因子与指数之间, TL_I 指数与 Cond、高锰酸盐指数及 TP 呈显著正相关,与 SD、TN/TP 呈显著负相关; Shannon-Wiener 指数与 WL、Flow、Cond、高锰酸盐指数及 TL_I 指数呈显著正相关; Q 指数与 Cond、高锰酸盐指数及 TL_I 指数呈显著负相关.

3 讨论

3.1 洞庭湖浮游植物种群和功能群变化特征

从浮游植物时间分布来看,洞庭湖浮游植物种群密度和功能群生物量变化趋势一致,3 月和 12 月浮游植物密度和生物量较低,而在 6 月和 9 月整体呈上升趋势. 温度的变化对浮游植物密度和生物量有着明显的影响,是影响浮游植物季节变化的重要因子^[32]. 此外,东洞庭湖浮游植物密度、生物量和蓝绿藻在各月份显著高于西、南洞庭湖,究其原因,一方面是由于东洞庭湖位于回水区,受西、南洞庭湖、区间来水以及岳阳市主城区城市、船舶生活污

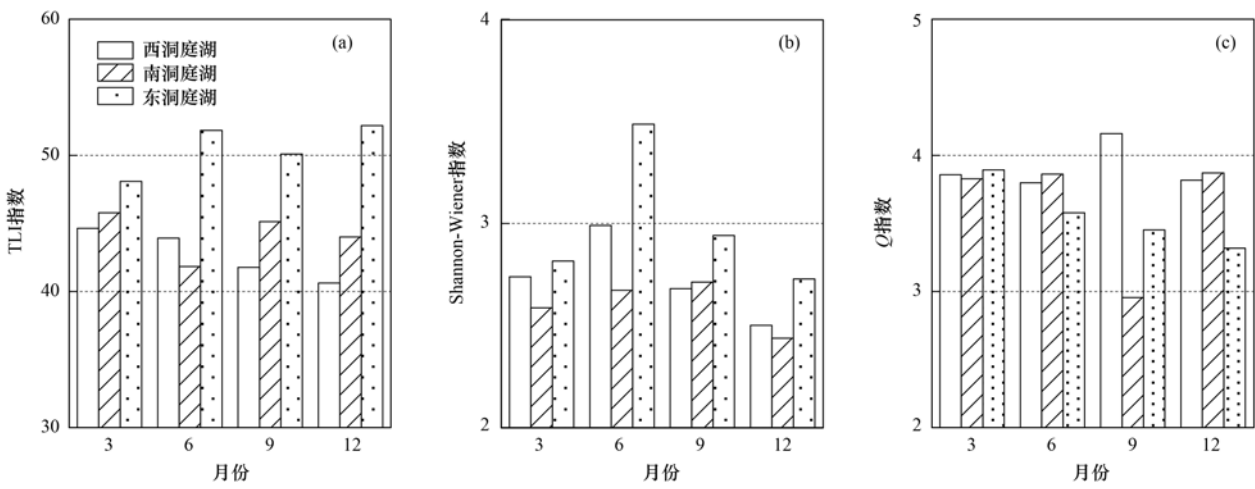


图 7 洞庭湖各湖区 TLI 指数、Shannon-Wiener 指数和 Q 指数季节变化

Fig. 7 Seasonal variations in TLI index, Shannon-Wiener index, and Q index in Dongting Lake

表 2 洞庭湖浮游植物功能群划分

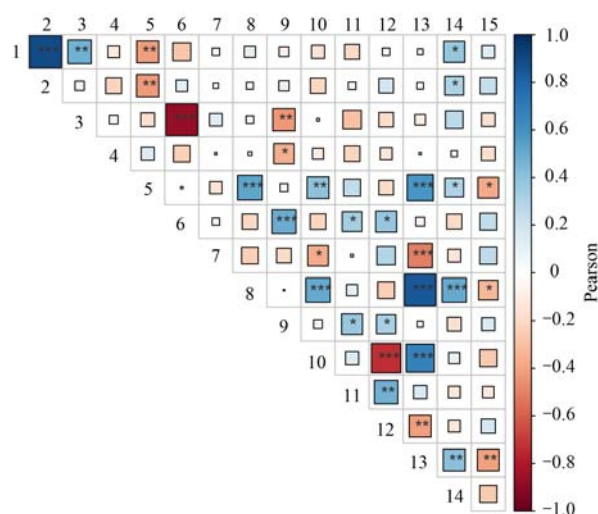
Table 2 Functional groups division of phytoplankton in Dongting Lake

功能群	代表性属	适应环境	F 值
B	小环藻(<i>Cyclotella</i> sp.)	中营养水体,对分层敏感	4
C	星杆藻(<i>Asterionella</i> sp.)	富营养水体,对分层敏感	2
D	针杆藻(<i>Synedra</i> sp.)和菱形藻(<i>Nitzschia</i> sp.)	较浑浊的浅水水体	4
E	卵囊藻(<i>Oocystis</i> sp.)	中富营养型湖泊变温层	3
G	实球藻(<i>Pandorina</i> sp.)	富营养型小型湖泊或池塘	0
H1	鱼腥藻(<i>Anabaena</i> sp.)和束丝藻(<i>Aphanizomenon</i> sp.)	富营养分层水体,浅水湖泊	1
J	栅藻(<i>Scenedesmus</i> sp.)、十字藻(<i>Crucigenia</i> sp.)和集星藻(<i>Actinastrum</i> sp.)	混合的高富营养浅水水体	2
Lo	羽纹藻(<i>Pinnularia</i> sp.)和多甲藻(<i>Peridinium</i> sp.)	贫到富营养、中到大型水体	4
LM	蓝纤维藻(<i>Dactyloocopsis</i> sp.)	富营养湖泊变温层	0
M	微囊藻(<i>Microcystis</i> sp.)	较稳定的中富营养水体,透明度不宜太低	0
MP	颤藻(<i>Oscillatoria</i> sp.)、舟形藻(<i>Navicula</i> sp.)和伪鱼腥藻(<i>Pseudanabaena</i> sp.)	频繁扰动的浑浊型浅水湖泊	5
N	鼓藻(<i>Cosmarium</i> sp.)	中营养型水体混合层	5
P	直链藻(<i>Melosira</i> sp.)	混合程度较高中富营养浅水水体	3
S1	泽丝藻(<i>Limnithrix</i> sp.)	透明度较低的混合水体,多为丝状蓝藻,对冲刷敏感	0
S2	螺旋藻(<i>Spirulina</i> sp.)	温暖、高碱性的浅水、对冲刷作用敏感	3
SN	尖头藻(<i>Merismopedia</i> sp.)	温度较高混合水体,对冲刷敏感	0
T	并联藻(<i>Quadrigula</i> sp.)	具有光限制,持续表层混合的水体	5
W1	裸藻(<i>Euglena</i> sp.)	富含有机质,或农业废水和生活污水的水体	2
W2	囊裸藻(<i>Trachelomonas</i> sp.)	浅水型中营养湖泊	4
X1	小球藻(<i>Chlorella</i> sp.)	混合程度较高的富营养型浅水水体	2
X2	蓝隐藻(<i>Chroomonas</i> sp.)	混合程度较高的中富营养浅水水体	3
X3	布纹藻(<i>Gyrosigma</i> sp.)	浅水、清水、混合层	3
Y	隐藻(<i>Cryptomonas</i> sp.)和裸甲藻(<i>Gymnodinium</i> sp.)	广适性(多反映了牧食压力低的静水环境)	2

水汇集影响,导致 Cond、高锰酸盐指数、TN 和 TP 明显高于西、南洞庭湖,促进了浮游植物的生长繁殖;另一方面由于西、南洞庭湖水文连通性较好,在 6 月和 9 月水位较高,湖区面积增大,快速交换的水体对营养盐及浮游植物密度和生物量有一定的稀释作用^[33],水体的稀释超过了浮游植物的生长速度,导致其密度和生物量下降^[34].

从空间分布来看,西、南洞庭湖浮游植物种群在 3 月、6 月和 12 月均以硅藻为主,9 月以蓝藻为

主;而东洞庭湖 3 月以硅藻为主,6 月以蓝-绿-硅藻为主,9 月以蓝藻为主;3 个湖区在 12 月隐藻占比均有所升高.这些种群在分类学上,生态特征各异,与栖息的环境紧密相关.李哲等^[35]研究表明,适宜的流速有助于浮游植物生长,高营养盐浓度不是浮游植物生长的限制因素,但水体流速却是主要限制因子.蓝绿藻较适宜在稳定的水体中生长,而硅藻由于个体比重大,需要水体的扰动以增加其浮力对抗^[36].洞庭湖是典型的通江湖泊,受水位波动影响



1. WL, 2. Flow, 3. WT, 4. pH 值, 5. Cond, 6. DO, 7. SD, 8. 高锰酸盐指数, 9. NH_4^+-N , 10. TP, 11. TN, 12. TN/TP, 13. TLI 指数, 14. Shannon-Wiener 指数, 15. Q 指数; * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$

图 8 洞庭湖环境因子与 TLI 指数、Shannon-Wiener 指数和 Q 指数的 Pearson 相关性

Fig. 8 Pearson correlation of environmental factors with TLI index, Shannon-Wiener index and Q index in Dongting Lake

明显。6 月三口、四水来水明显增多,导致西、南洞庭湖水体流速较快^[37],虽然水温较高,但仍以硅藻占优。反观东洞庭湖由于处在回水区,水体扰动较小,在 6 月蓝绿藻占比已明显增加。

本次调查洞庭湖浮游植物优势种为直链藻、舟形藻、针杆藻、小环藻、菱形藻、羽纹藻、栅藻、鱼腥藻、伪鱼腥藻、颤藻和隐藻,这些种类在形态上的共同特征是细胞体积大或形态拉长成长条状,在生理上这些种群对中低营养环境有较好的适应能力^[10,38]。优势功能群为 B、D、H1、J、Lo、MP、P、X1 和 Y,所有功能群均对混合程度较高、浑浊水体或中低营养环境有较好的适应能力,证实了洞庭湖的典型环境,这与汪星等^[25]对洞庭湖浮游植物功能群的研究一致。

3.2 洞庭湖浮游植物种群、功能群驱动因素及适用性分析

自然水体中影响浮游植物的因素主要有环境选择和迁移扩散两个方面^[39,40]。在水力滞留时间(大于 40 d)较长的湖库中,浮游植物主要受环境选择作用^[40]。与上述研究所不同的是,虽然在三峡大坝运行后,洞庭湖水力停留时间从 18 d 增加到 29 d^[20](小于 40 d),但浮游植物种群和功能群的季节性变化驱动大于空间扩散(图 6)。可能是由于东洞庭湖与西、南洞庭湖的地理环境差异造成的,西、南洞庭湖水文连通性较好,更多的是空间扩散;而东洞庭湖处于回水区,水力停留时间的增加进一步

促进了环境选择的作用。

有研究结果表明浮游植物种群和功能群演替的主要驱动因子是 WT、高锰酸盐指数、DO、Cond、WL 和 TP。在另一通江湖泊的鄱阳湖中也发现了相似的规律^[41],水位变化、水温、透明度、电导率和氮营养盐是影响浮游植物的主要因素。略有不同的是,磷营养盐成为本研究的主要驱动因子。前期研究表明,洞庭湖氮磷浓度均高于富营养化阈值,磷是浮游植物生长的潜在限制因子^[42]。水位波动可以直接影响浮游植物生长,也可以通过影响理化参数间接影响浮游植物生长^[43]。本研究中,水位与电导率呈显著负相关(图 8),说明水位的上升对营养盐有一定的稀释作用,但由于水温较高、光照较强,营养盐浓度仍大于浮游植物生长阈值,有利于浮游植物生长繁殖,浮游植物密度和生物量在 6 月和 9 月整体呈上升趋势。DO 也是浮游植物生长必不可少的条件,孙来康等^[44]研究表明,由于蓝藻的光合作用,使得丰水期 DO 升高,与之呈正相关。本研究却发现蓝绿藻与 DO 呈负相关性,硅藻与 DO 呈正相关,这可能是由于 DO 与水温呈极显著负相关(图 8),温度越低升温后 DO 浓度下降越明显^[45]。在水温和 DO 对浮游植物生产效率的耦合作用中,水温的驱动性要更高。在适当的范围内,有机物能够促进浮游植物的生长和代谢,同时浮游植物的光合作用也会产生大量有机物,导致水体高锰酸盐指数增加,同时有机污染物被分解会产生大量含有氮磷等的营养物质,可进一步促进浮游植物的生长^[46]。

功能群对环境的反映比个体及种群更为重要、综合性更强^[41]。RDA 分析显示,环境因子对功能群的解释率高于种群,表明功能群对环境因子的响应比种群更敏感^[47],这与 Liu 等^[48]对鄱阳湖浮游植物的研究结果一致。功能群是将某一特定生境且具有相似敏感性的浮游植物归为同一类群,通过优势功能群对应的生境类型来说明水体情况,有利于敏感地反映环境变化^[9]。功能群 MP 在各水期均占有优势,主要是由于洞庭湖为频繁扰动的浑浊型浅水湖泊,适宜其生长^[25]。功能群 P/MP/D 在 3 月占优,此时水温较低,功能群 P、D 与 WT 呈负相关,同时为混合程度较高的中富营养浑浊浅水水体。6 月(涨水期)水位抬升,水体混合程度加剧,功能群 MP 占比升高;同时由于水温的升高,功能群 J 生物量升高,功能群 P 占比略有下降。9 月功能群 MP/H1 占优,适合富营养化、分层和低氮条件的功能群 H1 主要出现在东洞庭湖,不仅由于 9 月较高的水温为蓝藻提供了有利条件,同时该功能群与 TN、 NH_4^+-N 呈负相关,是由于涨水期和丰水期的稀释作用,导致洞庭

湖氮营养盐浓度降低,其在低氮条件下的固氮优势得以显现^[41]. 12 月(枯水期)功能群 Y/P/MP 占优,功能群 Y 与 WL 显著负相关,上游来水的减小,适宜广适性中营养静水环境的功能群 Y 生长.

此外,对于水体中大量的浮游植物群落种类,只有少数物种占主要优势,稀有物种可能会增加浮游植物群落的冗余.在数据处理过程中,优势种的划分依据与每个物种出现的频率及物种所占该样本的比例有关,常常把小于 0.02 的种类都去除.但在 6 月和 9 月水体中,种类多样性较高,各个种类相对优势度并不是很高(表 1),这种去除可能会造成信息损失的风险.采用优势功能群代替优势种,则是将属于同一功能群的种类加和,如果该功能群的相对丰度超过 5%,就应该考虑其反映的水生态特征,避免了一些信息的损失^[49].因此,功能群识别洞庭湖浮游植物对环境因子的响应要优于浮游植物种群.

3.3 水质评价指标适用性分析

汪星等^[50]采用 Shannon-Wiener 指数对洞庭湖水质评价表明,水质状况良好.熊剑等^[51]运用 TLI 指数对洞庭湖近 30 年水质评价结果表明,各湖区基本均处于中营养状态,东洞庭湖在 2008~2010 年和 2015 年达到轻度富营养水平.但一般对湖泊水质进行单一的评价往往不能客观反映水体真实营养状态.因此,本研究采用基于功能群的 Q 指数、Shannon-Wiener 指数和 TLI 指数对洞庭湖水质进行综合评价,结果显示 TLI 指数与 Shannon-Wiener 指数显著正相关,与 Q 指数显著负相关,即当富营养化程度高时,Shannon-Wiener 指数表征的水体结果呈向好趋势, Q 指数表征的水体是向差趋势.TLI 指数与 Q 指数所表征的结果一致,但 Shannon-Wiener 指数存在一定差异.例如,TLI 指数显示洞庭湖水质处于中营养状态, Q 指数显示洞庭湖总体处于好状态,而 Shannon-Wiener 指数显示洞庭湖处于中等污染状态,东洞庭湖 Shannon-Wiener 指数水质优于西、南洞庭湖.这可能是由于 Shannon-Wiener 指数与 WL、Flow 正相关,西、南洞庭湖水文连通性较好,水体对营养盐和浮游植物稀释作用较为明显,导致水体营养盐较低,但浮游植物种类和数量少,导致得出污染程度高的结论,而出现偏差^[52].

Q 指数计算结果显示,洞庭湖为好的状态. Q 指数较高的可能原因是洞庭湖功能群 MP、P 和 D 占比较高,其他赋值低的功能群 H1 和 J 等比例虽有所增加,但在整体比例中仍未完全占据优势.东洞庭湖 TLI 指数在 6 月、9 月和 12 月达到轻度富营养状态,随着 6 月和 9 月温度的升高,功能群 H1 和 J 开始占优,导致 Q 指数在该区域相应地降低,说明东

洞庭湖水体污染较严重,该区域水流较缓的湖湾区面临蓝藻生长聚集甚至暴发水华风险^[53].南洞庭湖 Q 指数在 9 月处于中等状态,是由于功能群 J 生物量上升所致,这比较接近实际水体环境特征.

整体看来, Q 指数在洞庭湖水体有较好的适用性,不仅能直接利用水体中浮游植物功能组对环境作出反应,甚至还有预测功能,例如在夏季的蓝绿藻水华暴发前, Q 指数会发生突然降低的情况^[54].

4 结 论

(1)调查期间,洞庭湖浮游植物共鉴定出 6 门 61 属,主要以硅藻、蓝藻、绿藻和隐藻为主,优势种群为直链藻、舟形藻、针杆藻、小环藻、菱形藻、羽纹藻、栅藻、鱼腥藻、伪鱼腥藻、颤藻和隐藻.洞庭湖浮游植物共划分 23 个功能群,得到 9 个优势功能群,分别是 B、D、H1、J、Lo、MP、P、X1 和 Y,浮游植物功能群总体演替趋势为 P/MP/D(3 月)→MP/P/J(6 月)→MP/H1(9 月)→Y/P/MP(12 月).

(2)RDA 分析表明,浮游植物功能群识别洞庭湖浮游植物对环境因子的响应要优于浮游植物群落.层次分割结果表明,洞庭湖环境因子对浮游植物的驱动大于空间驱动.影响浮游植物群落的环境因子重要性排序为:WT > 高锰酸盐指数 > DO > Cond > WL > TP,影响浮游植物功能群的环境因子重要性排序为:WT > DO > Cond > 高锰酸盐指数 > WL > TP.

(3)采用基于功能群的 Q 指数、Shannon-Wiener 指数和 TLI 指数对洞庭湖水质进行综合评价,对比分析发现利用 Q 指数进行水质评价在洞庭湖水体有较好的适用性,洞庭湖水质总体处于好状态.

参考文献:

- [1] 王爱爱,冯佳,谢树莲.汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析[J].环境科学,2014,35(3):915-923.
Wang A A, Feng J, Xie S L. Phytoplankton community structure and assessment of water quality in the middle and lower reaches of Fenhe River[J]. Environmental Science, 2014, 35(3): 915-923.
- [2] Chalar G. The use of phytoplankton patterns of diversity for algal bloom management[J]. Limnologia, 2009, 39(3): 200-208.
- [3] Whitton B A. Changing approaches to monitoring during the period of the 'Use of Algae for Monitoring Rivers' symposia[J]. Hydrobiologia, 2012, 695(1): 7-16.
- [4] Xu Y Y, Cai Q H, Ye L, et al. Asynchrony of spring phytoplankton response to temperature driver within a spatial heterogeneity bay of Three-Gorges Reservoir, China [J]. Limnologia, 2011, 41(3): 174-180.
- [5] 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.
- [6] Komárek J. Review of the cyanobacterial genera implying planktic species after recent taxonomic revisions according to polyphasic methods: state as of 2014[J]. *Hydrobiologia*, 2016, **764**(1): 259-270.
- [7] Salmaso N, Padisák J. Morpho-functional groups and phytoplankton development in two deep lakes (Lake Garda, Italy and Lake Stechlin, Germany) [J]. *Hydrobiologia*, 2007, **578**(1): 97-112.
- [8] Shannon C E. The mathematical theory of communication [J]. *Bell Labs Technical Journal*, 1950, **3**(9): 31-32.
- [9] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton [J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428.
- [10] Padisák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates [J]. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1): 1-19.
- [11] 郭芳, 顾继光, 赵剑, 等. 类群划分方法对南亚热带水库夏季浮游植物群落与环境响应关系的影响 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 5050-5059.
- Guo F, Gu J G, Zhao J, *et al.* Effects of phytoplankton classifications on the relationship between phytoplankton community and environment in Summer subtropical reservoirs, southern China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 5050-5059.
- [12] Padisák J, Borics G, Grigorczyk I, *et al.* Use of phytoplankton assemblages for monitoring ecological status of lakes within the Water Framework Directive: the assemblage index [J]. *Hydrobiologia*, 2006, **553**(1): 1-14.
- [13] Salmaso N, Naselli-Flores L, Padisák J. Functional classifications and their application in phytoplankton ecology [J]. *Freshwater Biology*, 2015, **60**(4): 603-619.
- [14] Anderson S R, Harvey E L. Seasonal variability and drivers of microzooplankton grazing and phytoplankton growth in a subtropical estuary [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, **6**, doi: 10.3389/fmars.2019.00174.
- [15] Kruk C, Mazzeo N, Lacerot G, *et al.* Classification schemes for phytoplankton: a local validation of a functional approach to the analysis of species temporal replacement [J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(9): 901-912.
- [16] Bovo-Scomparin V M, Train S. Long-term variability of the phytoplankton community in an isolated floodplain lake of the Ivinhema River State Park, Brazil [J]. *Hydrobiologia*, 2008, **610**(1): 331-344.
- [17] Lv H, Yang J, Liu L M, *et al.* Temperature and nutrients are significant drivers of seasonal shift in phytoplankton community from a drinking water reservoir, subtropical China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(9): 5917-5928.
- [18] Yuan Y X, Jiang M, Liu X T, *et al.* Environmental variables influencing phytoplankton communities in hydrologically connected aquatic habitats in the Lake Xingkai basin [J]. *Ecological Indicators*, 2018, **91**: 1-12.
- [19] Zhang M, Shi X L, Yang Z, *et al.* Long-term dynamics and drivers of phytoplankton biomass in eutrophic Lake Taihu [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **645**: 876-886.
- [20] Yu Y W, Mei X F, Dai Z J, *et al.* Hydromorphological processes of Dongting Lake in China between 1951 and 2014 [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, **562**: 254-266.
- [21] Geng M M, Wang K L, Yang N, *et al.* Spatiotemporal water quality variations and their relationship with hydrological conditions in Dongting Lake after the operation of the Three Gorges Dam, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **283**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124644.
- [22] Feng Y, Zheng B H, Jia H F, *et al.* Influence of social and economic development on water quality in Dongting Lake [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **131**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108220.
- [23] Yin X Y, Yan G H, Wang X, *et al.* Spatiotemporal distribution pattern of phytoplankton community and its main driving factors in Dongting Lake, China-A seasonal study from 2017 to 2019 [J]. *Water*, 2022, **14**(11), doi: 10.3390/w14111674.
- [24] 汪梦琪, 汪金成, 王琪, 等. 洞庭湖区平水期浮游生物群落结构特征及富营养化现状 [J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(8): 2418-2429.
- Wang M Q, Wang J C, Wang Q, *et al.* Characteristics of plankton community structure and eutrophication status in Dongting Lake in the season with normal water level [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(8): 2418-2429.
- [25] 汪星, 李利强, 郑丙辉, 等. 洞庭湖浮游藻类功能群的组成特征及其影响因素研究 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(12): 3766-3776.
- Wang X, Li L Q, Zheng B H, *et al.* Composition and influential factors of algal function groups in Dongting Lake [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(12): 3766-3776.
- [26] 王丑明, 吴可方, 张屹, 等. 洞庭湖浮游植物时空变化特征及影响因素分析 [J]. *淡水渔业*, 2018, **48**(4): 52-57.
- Wang C M, Wu K F, Zhang Y, *et al.* The analysis of spatial and temporal variations characteristics and driving factors of phytoplankton in Dongting Lake [J]. *Freshwater Fisheries*, 2018, **48**(4): 52-57.
- [27] Tian Z B, Zheng B H, Wang L J, *et al.* Long term (1997-2014) spatial and temporal variations in nitrogen in Dongting Lake, China [J]. *PLoS One*, 2017, **12**(2), doi: 10.1371/journal.pone.0170993.
- [28] 胡鸿钧, 李尧英, 魏印心, 等. 中国淡水藻类 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- Hu H J, Li Y Y, Wei Y X, *et al.* *Freshwater algae in China* [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1980.
- [29] Becker V, Caputo L, Ordóñez J, *et al.* Driving factors of the phytoplankton functional groups in a deep Mediterranean reservoir [J]. *Water Research*, 2010, **44**(11): 3345-3354.
- [30] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准 [J]. *中国环境监测*, 2002, **18**(5): 47-49.
- Wang M C, Liu X Q, Zhang J H. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2002, **18**(5): 47-49.
- [31] Lai J S, Zou Y, Zhang J L, *et al.* Generalizing hierarchical and variation partitioning in multiple regression and canonical analyses using the rdacca. hp R package [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2022, **13**(4): 782-788.
- [32] Temponeras M, Kristiansen J, Moustaka-Gouni M. Seasonal variation in phytoplankton composition and physical-chemical features of the shallow Lake Doirani, Macedonia, Greece [J]. *Hydrobiologia*, 2000, **424**(1): 109-122.
- [33] Ibañez M D S R. Phytoplankton composition and abundance of a central Amazonian floodplain lake [J]. *Hydrobiologia*, 1997, **362**(1-3): 79-83.

- [34] Salmaso N, Braioni M G. Factors controlling the seasonal development and distribution of the phytoplankton community in the lowland course of a large river in Northern Italy (River Adige) [J]. *Aquatic Ecology*, 2008, **42**(4): 533-545.
- [35] 李哲, 张曾宇, 杨中华, 等. 三峡澎溪河回水区流速对藻类原位生长速率的影响[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(5): 880-886.
- Li Z, Zhang Z Y, Yang Z H, *et al.* Effects of flow speed on the change of *in situ* growth rates of algae in Pengxi River backwater zone, Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(5): 880-886.
- [36] 郑丙辉, 张佳磊, 王丽婧, 等. 大宁河水华敏感期浮游植物与环境因子关系[J]. *环境科学*, 2011, **32**(3): 641-648.
- Zheng B H, Zhang J L, Wang L J, *et al.* Exploration of relationships between phytoplankton and related environmental factors in the Daning River during sensitive period of algal blooms [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(3): 641-648.
- [37] 王婷, 王坤, 王丽婧, 等. 三峡工程运行对洞庭湖水环境及富营养化风险影响评述[J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(1): 15-24.
- Wang T, Wang K, Wang L J, *et al.* Impacts of the Three Gorges Dam operation on water environment and eutrophication of Dongting Lake: a review [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(1): 15-24.
- [38] 林秋奇, 胡韧, 段舜山, 等. 广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物响应[J]. *生态学报*, 2003, **23**(6): 1101-1108.
- Lin Q Q, Hu R, Duan S S, *et al.* Reservoir trophic states and the response of plankton in Guangdong Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(6): 1101-1108.
- [39] Xiao L J, Hu R, Peng L, *et al.* Dissimilarity of phytoplankton assemblages in two connected tropical reservoirs: effects of water transportation and environmental filtering [J]. *Hydrobiologia*, 2016, **764**(1): 127-138.
- [40] Padisák J, Vasas G, Borics G. Phycogeography of freshwater phytoplankton: traditional knowledge and new molecular tools [J]. *Hydrobiologia*, 2016, **764**(1): 3-27.
- [41] 钱奎梅, 刘宝贵, 陈宇炜. 鄱阳湖浮游植物功能群的长期变化特征(2009-2016年)[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(4): 1035-1044.
- Qian K M, Liu B G, Chen Y Y. Long term dynamics of phytoplankton functional groups in Lake Poyang during 2009-2016 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(4): 1035-1044.
- [42] 严广寒, 殷雪妍, 汪星, 等. 基于 GAM 模型的洞庭湖叶绿素 a 浓度与环境因子相关性分析[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(1): 313-322.
- Yan G H, Yin X Y, Wang X, *et al.* Analysis based on GAM model for the relationship between chlorophyll a concentration and environmental factors in Dongting Lake [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(1): 313-322.
- [43] Wu Z S, Liu J T, Huang J C, *et al.* Do the key factors determining phytoplankton growth change with water level in China's largest freshwater lake? [J]. *Ecological Indicators*, 2019, **107**, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105675.
- [44] 孙来康, 杨涛, 万旭昊, 等. 西安城市河流浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *水生生物学报*, 2023, **47**(4): 543-555.
- Sun L K, Yang T, Wan X H, *et al.* Phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in Xi'an urban rivers system [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(4): 543-555.
- [45] Kalf J. *Limnology. Inland water ecosystems* [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [46] 毕京博, 郑俊, 沈玉凤, 等. 南太湖入湖口叶绿素 a 时空变化及其与环境因子的关系[J]. *水生生态学杂志*, 2012, **33**(6): 7-13.
- Bi J B, Zheng J, Shen Y F, *et al.* Spatial-temporal characteristics of chlorophyll-a concentration and its relationship with environmental factors in the inlets of South Taihu Lake [J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, **33**(6): 7-13.
- [47] Abonyi A, Leitão M, Lançon A M, *et al.* Phytoplankton functional groups as indicators of human impacts along the River Loire (France) [J]. *Hydrobiologia*, 2012, **698**(1): 233-249.
- [48] Liu J F, Chen Y W, Li M J, *et al.* Water-level fluctuations are key for phytoplankton taxonomic communities and functional groups in Poyang Lake [J]. *Ecological Indicators*, 2019, **104**: 470-478.
- [49] 胡韧, 蓝于倩, 肖利娟, 等. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(1): 11-23.
- Hu R, Lan Y Q, Xiao L J, *et al.* The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(1): 11-23.
- [50] 汪星, 郑丙辉, 刘录三, 等. 洞庭湖典型断面藻类组成及其与环境因子典范对应分析[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(5): 995-1002.
- Wang X, Zheng B H, Liu L S, *et al.* Canonical correspondence analysis of algae composition and its environmental factors of typical sections in Dongting Lake, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(5): 995-1002.
- [51] 熊剑, 喻方琴, 田琪, 等. 近 30 年来洞庭湖水质营养状况演变特征分析[J]. *湖泊科学*, 2016, **28**(6): 1217-1225.
- Xiong J, Yu F Q, Tian Q, *et al.* The evolution of water quality and nutrient condition in Lake Dongting in recent 30 years [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(6): 1217-1225.
- [52] 杜红春, 王晓宁, 吴虎, 等. 汉江中下游浮游植物群落结构、功能群特征及水质评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, **30**(8): 1839-1847.
- Du H C, Wang X N, Wu H, *et al.* Community structure and functional groups of phytoplankton and water quality evaluation in the middle and lower Hanjiang River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(8): 1839-1847.
- [53] 王琦, 欧伏平, 张雷, 等. 三峡工程运行后洞庭湖水环境变化及影响分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, **24**(11): 1843-1849.
- Wang Q, Ou F P, Zhang L, *et al.* Changes of water environment in Dongting Lake and its impact analysis after the Three Gorges Project operation [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(11): 1843-1849.
- [54] Istvánovics V, Clement A, Somlyódy L, *et al.* Updating water quality targets for shallow Lake Balaton (Hungary), recovering from eutrophication [J]. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 305-318.

CONTENTS

Elucidating the Impacts of Meteorology and Emission Changes on Concentrations of Major Air Pollutants in Major Cities in the Yangtze River Delta Region Using a Machine Learning De-weather Method	FU Wen-xing, HUANG Lin, DING Jia-hao, <i>et al.</i> (5879)
Impact of Emission Reduction in Different Sectors on Air Quality and Atmospheric Temperature in Eastern China	LONG Zi-yu, ZHU Jia, LI Ke, <i>et al.</i> (5889)
Analysis of Spatio-temporal Characteristics of Air Quality, Meteorological Impact, and Emission Reduction Effect During the Winter Olympics in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas	HOU Lu, ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, <i>et al.</i> (5899)
Emission Trends and Reduction Potential of VOCs from Printing Industry in China	LIANG Xiao-ming, WU Peng-zhen, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (5915)
Analysis of VOCs Emission Characteristics and Emission Reduction Potential of Typical Industries in Jinan, China	WU Wen-lu, SHAN Chun-yan, ZHAO Jing-lin, <i>et al.</i> (5924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lishui Area of Nanjing	RUAN Zhao-yuan, YAN Ou, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (5933)
Spatio-temporal Change in City-level Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Sector in China During the Last Decade and Its Potential Mitigation	ZHANG Ting-xue, GAO Shu-dan, TENG Xiao, <i>et al.</i> (5946)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Air Pollution and Health Risks in Key Cities of China	TU Pei-yue, YANG Huan, CHEN Lan-zhou, <i>et al.</i> (5954)
Spatial and Temporal Variations in PM ₁ Concentration and its Correlation with AOD in China from 2014 to 2017	YUAN Li-mei, MA Fang-fang, BIAN Ze, <i>et al.</i> (5964)
Characteristics and Generation Mechanism of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan City Group	MA Jie-li, LUO Da-tong, LIU Xin, <i>et al.</i> (5975)
Characteristics and Cause of PM _{2.5} During Haze Pollution in Winter 2022 in Zhoukou, China	MA Ying-ge, YANG Lu, DI Rui-miao, <i>et al.</i> (5986)
Characterization and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Lanzhou	MA Ke-jing, SUN Li-juan (5997)
Characteristics of Atmospheric Dust Fall Pollution and Its Chemical Composition and Mass Reconstruction in Mentougou District of Beijing	WANG Zhi-yao, YAO Qi, LÜ Fu, <i>et al.</i> (6007)
Ozone Pollution Characteristics and Formation Mechanism in a Typical Tropical Seaside City	HAN Shu-yan, ZHANG Xin, XIE Rong-fu, <i>et al.</i> (6015)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water in Kuaize River Basin at the Upper Pearl River	TAO Lan-chu, CUN De-xin, TU Chun-lin, <i>et al.</i> (6025)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water and Groundwater in Huainan Coal Mine Area	LIU Hai, KANG Bo, GUAN Zheng-ting, <i>et al.</i> (6038)
Hydrochemical Characteristics and Pollution Source Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	JIANG Feng, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (6050)
Identification of Nitrate Source and Transformation Process in Shallow Groundwater Around Dianchi Lake	CHEN Qing-fei, CHEN An-qiang, CUI Rong-yang, <i>et al.</i> (6062)
Analysis of Influencing Factors on the Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-zinc Mine Watershed	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (6071)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment in Karst Basin Around a Lead-Zinc Mine	LIAO Hong-wei, JIANG Zhong-cheng, ZHOU Hong, <i>et al.</i> (6085)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Heavy Metals in Main Rivers Sediments and Ecological Risk Assessment in Kaifeng City	DING Ya-peng, LU Xi-hao, WANG Xiao-jing, <i>et al.</i> (6095)
Evaluation and Prediction of Environmental Capacities of Heavy Metals in the Surface Sediments of Lakes in Huoqiu County	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (6106)
Metabarcoding Profiling of Phytoplankton Communities Associated with Algal Blooms and Determining Related Drivers in Baiyangdian Lake ...	CHEN Ting, DU Xun, CHEN Yi-yong, <i>et al.</i> (6116)
Driving Factors Analyze of Phytoplankton Community by Comparison of Population and Functional Groups and Water Quality Evaluation in Dongting Lake	YAN Guang-han, YIN Xue-yan, WANG Xing, <i>et al.</i> (6125)
Distribution Characteristics and Environmental Driving Factors of Cyanobacteria Community in Impounded Lakes and Reservoirs in Shandong on the East Route of South-to-North Water Diversion Project	WEI Jie-lin, CUI Yu-jing, LI Yi-zhen, <i>et al.</i> (6137)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical Active Compounds in Guangdong Province	LUO Jia-hao, WANG Yu-kai, YUAN Ke, <i>et al.</i> (6149)
Characteristics of Microplastic-derived Dissolved Organic Matter(MPDOM) and the Complexation Between MPDOM and Sulfadiazine/Cu ²⁺	WANG Xiao, YAN Cai-xia, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (6159)
Photodegradation of Plastic Blends in Seawater and Its Risk to the Marine Environment	ZHANG Hong-yu, GAO Jia-wei, CHEN Si-bao, <i>et al.</i> (6172)
Preparation of Iron-improved Blue Algae Biochar and Its Co-adsorption Mechanism for Phosphorus in Surface Water	HAN Jie, HUANG Xin, YANG Kun-lun, <i>et al.</i> (6181)
Estimation and Critical Source Area Identification of Non-point Source Pollution Based on Improved Export Coefficient Models; A Case Study of the Upper Beiyun River Basin	LI Hua-lin, ZHANG Shou-hong, YU Pei-dan, <i>et al.</i> (6194)
Characteristics of Bacterial Community Structure in the Sediment of Rural Black and Odorous Water Bodies	REN Hong-wei, TIAN Yan-fang, LU Jin-xia, <i>et al.</i> (6205)
Impacts of Human Activities on the Net Primary Productivity of Vegetation in Chengde's Transitional Region from Plateau to Plain in the Context of Climate Change	SHAN Zhen-dong, LIU Dun, LUO Han, <i>et al.</i> (6215)
Meta-analysis on the Effects of Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Content in Terrestrial Ecosystems	YANG Ling-fang, KONG Dong-yan, DIAO Jing-wen, <i>et al.</i> (6226)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Nitrogen Component and Active Nitrogen in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	CAO Yang, SHEN Yu-yi, CHEN Yun-shuang, <i>et al.</i> (6235)
Response of Organic Carbon Mineralization to Nitrogen Addition in Micro-aerobic and Anaerobic Layers of Paddy Soil	MAO Wan-qiong, XIA Yin-hang, MA Chong, <i>et al.</i> (6248)
Effects of Conservation Tillage on Herbicide Residues in Maize Field Soil	LIU Yuan, WANG Zu-cheng, LIU Mei-hua, <i>et al.</i> (6257)
Research Progress on Toxicity of Microplastics in Soil to Terrestrial Plants and Their Degradation Mechanism	LIU Wei, LI Yu-xin, RONG Sa-shuang, <i>et al.</i> (6267)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Soil in Danjiangkou Reservoir Area of South-to-North Water Diversion Project	WANG Feng, GONG Wei, LIU Zhe, <i>et al.</i> (6279)
Accumulation Characteristics, Sources, and Health Risks of Soil Lead of Urban Parks in Beijing	AN Jiang-mei-duo, ZHANG Rui-qing, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (6287)
Vertical Migration Characteristics and Fate of Heavy Metals from Zinc Smelting Slag in Soil Profile	YANG Ai-ping, WANG Xiao-yan, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (6297)
Ecological Risk Assessment and Migration and Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soil-crop System from Typical Pyrite Mining Area	CHENG Xiao-meng, ZHAO Chen, WU Chao, <i>et al.</i> (6309)
Interaction and Transport Characteristics of Lead and Cadmium in Different Soil-wheat Systems	KOU Meng, FAN Yu, SU Meng-xian, <i>et al.</i> (6319)
Distribution and Transport of Cadmium and Arsenic in Different Aboveground Parts of Wheat After Flowering	WANG Qiu-shi, HUA Gui-li, LI Xiang-yu, <i>et al.</i> (6328)
Effects of Vegetation Types and Seasonal Dynamics on the Diversity and Function of Soil Bacterial Communities in the Upper Reaches of the Heihe River	WANG Zhu, LIU Yang, WANG Fang, <i>et al.</i> (6339)
Ecological Responses of Soil Bacterial Communities to Heavy Metal Contamination Surrounding a Typical Coal-based Industrial Region	ZHENG Dan-feng, LIU Di, SU Chao, <i>et al.</i> (6354)
Effects of Aeration Methods on Microbial Diversity and Community Structure in Rice Rhizosphere	XIAO De-shun, XU Chun-mei, WANG Dan-ying, <i>et al.</i> (6362)
Response of Nitrification Potential and Ammonia Oxidation Microbial Community in Purple Soils to the Application of Biochar Combined with Chemical Fertilizer and Manure	LI Yue, WANG Zi-fang, JIA Li-juan, <i>et al.</i> (6377)
Effect of Continuous Cropping on the Physicochemical Properties, Microbial Activity, and Community Characteristics of the Rhizosphere Soil of <i>Codonopsis pilosula</i>	YANG Yang, LI Hai-liang, MA Kai-li, <i>et al.</i> (6387)
Effect of Manure Application on the Adsorption of Antibiotics to Soil	LUO Shan, HU Jin-sheng, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (6399)
Relationship Between Carbon Emissions and Economic Development of Industrial Parks Based on Decoupling Index	CHEN Si-yu, LIU Jing-ru, SUN Guang-ming (6412)
Characteristics of Municipal Solid Waste in Some Urban Agglomeration in the Past Five Years	WANG Xiao-bo, LIU An-qi, ZHONG Hui-qiong, <i>et al.</i> (6421)