

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铎, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期
Vol.43 No.7

目次

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

千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素

王吉毅¹, 霍翟¹, 国超旋², 朱广伟², 龚志军², 范亚文^{1*}, 王建军^{2*}

(1. 哈尔滨师范大学生命科学与技术学院, 哈尔滨 150025; 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: 深水湖库浮游植物群落结构具典型垂向分异特征, 是其水质和生态系统功能的考量要素之一; 但对深水湖库浮游植物垂向分异的季节变化规律及其成因仍认识不清. 以深水湖库千岛湖为例, 通过春、秋两季全湖 12 个点位浮游植物群落结构及同步水质指标剖面变化的调查, 揭示了典型深水湖库浮游植物群落结构的垂向分布特征及影响因素. 结果表明, 春季浮游植物丰度和叶绿素 *a* 最大值出现在次表层 (2~5 m), 而秋季浮游植物丰度和叶绿素 *a* 则在表层达到最大值, 然后均随水深增加而下降. 千岛湖浮游植物优势种属在垂向上呈现明显的分层特征, 具体而言, 春季表层和次表层主要以隐藻和假鱼腥藻为主, 中层隐藻占据优势, 而底层小环藻细胞丰度明显高于其他藻属; 秋季表层优势属为假鱼腥藻和束丝藻, 在次表层和中层, 细鞘丝藻和假鱼腥藻占据优势地位, 底层细鞘丝藻成为唯一优势属. 此外, 水体关键环境指标也存在明显的垂向变化, 春季水体氮和磷营养盐浓度与水深呈负相关, 而秋季则呈相反趋势; 统计分析表明春季浮游植物丰度垂向分布与磷酸盐浓度显著正相关, 秋季浮游植物丰度垂向分布则与光照强度呈现显著正相关, 而水温、硝态氮和总氮则是驱动两季浮游植物优势属垂向分布的主要因素. 综上所述, 水温、光照和营养盐等环境条件对浮游植物垂向分布具有明显的控制作用, 在深水湖库的生态调查与质量评估时, 应充分考虑浮游植物群落结构垂向分布特征及环境条件的影响.

关键词: 千岛湖; 深水湖泊; 浮游植物; 营养盐; 垂向分布

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3575-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110117

Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake

WANG Ji-yi¹, HUO Di¹, GUO Chao-xuan², ZHU Guang-wei², GONG Zhi-jun², FAN Ya-wen^{1*}, WANG Jian-jun^{2*}

(1. College of Life Science and Technology, Harbin Normal University, Harbin 150025, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Clear vertical variations in phytoplankton community structure are usually observed in deep-water lakes and reservoirs, which is one of the key components of water quality and ecosystem functioning. However, the vertical patterns and ecological drivers of phytoplankton communities in deep-water lakes and reservoirs are still understudied. In this study, we took Qiandao Lake, a deep-water reservoir, as an example to reveal the vertical distribution characteristics of phytoplankton communities and its influencing factors by investigating phytoplankton community structure and the associated water quality index at 12 sites across the whole lake in two seasons (spring and autumn). The results showed that the phytoplankton abundance and chlorophyll *a* were highest in the surface layer in autumn and then decreased toward deep water, whereas in spring, the maximum value occurred in the subsurface layer (2-5 m), and the dominant phytoplankton species showed obvious vertical stratification characteristics. Specifically, in spring, *Cryptomonas* and *Pseudanabaena* dominated the surface and subsurface layers, *Cryptomonas* dominated in the middle layer, and the abundance of *Cyclotella* at the bottom layer was significantly higher than that of the other algae genera. The dominant genera in autumn were *Pseudanabaena* and *Aphanizomenon*. In the subsurface and middle layers, *Leptolyngbya* and *Pseudanabaena* occupied the dominant position, and *Leptolyngbya* became the only dominant genus. In the bottom layer, *Leptolyngbya* was the only dominant genus. The key environmental indicators of the water also had obvious vertical changes. The contents of N and P nutrients had a negative correlation with the water depth in spring, whereas the reverse trend was observed in autumn. The correlation analysis showed that the vertical variation in phytoplankton abundance in spring was significantly positively correlated with phosphate concentration, whereas the vertical distribution of phytoplankton abundance in autumn was significantly positively correlated with intensity of light, and the water temperature, NH_4^+ -N, and total nitrogen were the main factors driving the vertical changes in the dominant genera of phytoplankton community in the two seasons. To summarize, environmental conditions such as water temperature, light, and nutrients had strong effects on the vertical distribution of phytoplankton. In the ecological investigation and quality assessment of deep-water lakes and reservoirs, the vertical distribution characteristics of the phytoplankton community structure and the influence of environmental conditions should be fully considered.

Key words: Qiandao Lake; deep-lake; phytoplankton; nutrients; vertical distribution

浮游植物是湖泊和水库中的主要初级生产者, 在物质循环以及能量流动中起着至关重要的作用^[1]. 不同环境条件会引起湖泊和水库中浮游植物群落结构的改变^[2~4], 而浮游植物群落结构垂向分布格局的改变不仅仅体现水体环境的变化, 而且更会对湖泊和水库等水生生态系统的结构和功能造成重要的影响^[5]. 因此, 研究浮游植物群落垂向分布

特征及其驱动因素对于加强湖泊和水库水生生态环

收稿日期: 2021-10-15; 修订日期: 2021-11-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41830757, 42007159, 42077161, 31870187); 中国科学院野外站联盟项目 (KFJ-SW-YW036); 生态环境部太湖流域东海海域生态项目

作者简介: 王吉毅 (1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为浮游植物多样性, E-mail: wjyhx@outlook.com

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

境的管理尤为重要。

水温、光照和营养盐是驱动深水湖泊和水库浮游植物群落结构垂向分布特征变化的主要因素^[6,7]。湖泊(尤其是深水湖泊)水体热分层现象明显^[8],而且水体理化性质均与水温相关^[9],因此水温对浮游植物群落垂向分布产生重要影响,例如水体温差是影响抚仙湖浮游植物群落垂向分布格局的重要因子^[10]。光照通过影响浮游植物光合作用强度和放氧速率等方面,进而影响浮游植物光合作用效率,光照过强或不足均会影响浮游植物的生长^[11],例如透光层深度是影响千岛湖浮游植物生物量垂向分布特征的主要因素^[12]。营养盐对浮游植物群落垂向分布的影响则主要体现在两方面,一方面是营养盐浓度,其主要是影响浮游植物光合作用、生长代谢等生命活动^[13],例如总氮和氨氮浓度是影响西藏巴松措湖浮游植物垂向分布格局的主要环境因子^[14],另一方面是营养盐比例与浮游植物吸收利用营养盐的比例是否相符合,当营养盐比例发生偏移时,一种或者多种营养盐将会限制浮游植物的生长以及繁殖,进而改变浮游植物群落结构^[15],例如氮、磷和硅营养盐比例是影响西班牙阿尔克瓦大坝前浮游植物群落结构垂向分布特征的主要因素^[16]。其他因子,如水体扰动方式也会影响浮游植物垂向分布,例如风浪、湍流强度和热分层等是影响三峡水库香溪河库湾浮游植物群落垂向分布格局的主要因素^[17,18]。

千岛湖是我国华东地区一座特大山谷型深水水库,兼顾发电、航运和蓄洪等重要功能,同时也是重要的饮用水供给地^[19]。近年来,关于千岛湖浮游植物群落垂向分布特征与环境因子的关系的研究众多。胡忠军等^[20]的研究发现水温、溶解氧、硝态氮和 pH 值是影响千岛湖上、中、下游浮游植物群落结构垂向分布的主要因子;吴志旭等^[21]的研究则发现水温分层是决定新安江水库大坝前浮游植物群落结构垂向分布的关键因素;笪文怡等^[22]的研究发现降雨是驱动千岛湖水尾河口区浮游植物群落垂向分布特征的主要因素。上述研究对浮游植物垂向分布特征的研究主要集中在单个点位的高频研究或者个别区域的简要研究,而未涵盖全湖各个区域的变化特征。为了全面了解千岛湖浮游植物群落垂向分布特征,本研究在全湖设置 12 个点位,均匀分布于千岛湖水域,对浮游植物丰度、叶绿素 a 和 Shannon-Wiener 多样性指数等浮游植物群落特征开展系统调查,探究浮游植物群落结构及多样性的垂向分布特征及其驱动因素,以期对千岛湖浮游植物群落垂向分布特征相关研究以及千岛湖水环境管理

提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与采样点设置

千岛湖(29°22'~29°50'N, 118°36'~119°14'E),位于浙江省杭州市淳安县,是一座大型人工水库^[23]。地处亚热带季风区,气候温暖湿润,降雨充沛,光照充足,年平均气温 17.1℃左右,年平均降雨量为 1 489.0 mm^[23],蓄水量达 $1.78 \times 10^{10} \text{ m}^3$,平均入湖年径流量为 $9.45 \times 10^9 \text{ m}^3$,平均水深 31 m,最大水深 100 m^[24],是长江中下游地区的重要水源地^[25]。

鉴于千岛湖是一座大型深水人工水库,水体热分层现象明显^[26,27]。为全面认识千岛湖浮游植物群落以及环境因子垂向分布特征,于千岛湖进行两个季节的样品采样,分别为秋季(2020 年 10 月)以及春季(2021 年 4 月)。全湖共布设 12 个点位(图 1);其中两个季节共同的采样点位 7 个:S2(坦山湾)、S4(猴岛)、S7(排岭水厂)、S8(三潭岛)、S9(姥山)、S10(茅头尖林场)和 S11(十八坞)。不同点位有 5 个,不同的采样点为:4 月的 S3、S5 和 10 月的 S1、S6、S11,但实际上 S1 和 S3 位于同一片区域(西北区域),浮游植物群落之间较为相似;S5 和 S6 点位之间地理位置相距较近,且均位于东北区域。虽然 4~10 月之间存在采样点的不同,但是同样具有代表性,可以体现浮游植物群落季节之间的差异。

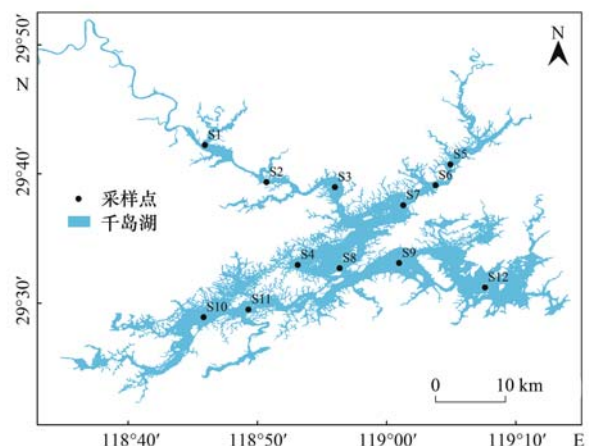


图 1 千岛湖采样点位示意

Fig. 1 Sketch of Qiandao Lake sampling sites

从上游新安江水库入口至下游新安江水库大坝前均匀设置点位。根据以往关于千岛湖水温分层的研究^[12,26-28],对水体分 4 层进行采样,分别标示为 A、B、C 和 D 层:表层设为 A 层,一般为水下 0~0.5 m;次表层(叶绿素最大层)设为 B 层,一般为 2~5 m;中层(温跃层)设为 C 层,水深为 20~40 m;

底层设定为 D 层,水深一般大于 40 m. 但由于千岛湖各点位水体深度有所不同,相对应的各分层样品数量也略有差异,秋季各水体分层(A、B、C 和 D)采集 9、9、8 和 6 个样品;春季各水体分层采集 10、10、10 和 3 个样品.

浮游植物以及水化学样品均使用有机玻璃采水器进行采集. 采集水体垂向理化数据时将 YSI 多参数水质分析仪垂直于水面并缓慢匀速放入湖中(采用自动记录数据方式,数据记录间隔约 2 s),待 YSI 水质分析仪触底后再将其提上水面. 用于室内理化指标分析的水化学样品在采集后 4 h 内送至实验室进行过滤、冷藏等预处理,一周内完成对总氮(TN)、溶解性总氮(DTN)、硝态氮(NO_3^- -N)、氨氮(NH_4^+ -N)、总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)、磷酸盐(PO_4^{3-} -P)和总悬浮物(SS)等指标的测定,理化指标测定方法参考文献[29].

浮游植物定量样品采集时,秋季在各分层采集 2 L 水样,春季各分层则采 1.5 L 水样,现场加入鲁哥试剂进行固定,带回实验室静置 48 h 后,虹吸法去除样品上清液,定容至 30 mL,取 0.1 mL 样品置于 10×40 倍显微镜下进行分类计数,浮游植物物种鉴定参考文献[30].

1.2 统计分析

(1)为多角度衡量浮游植物群落垂向分布特征,将浮游植物丰度、叶绿素 a (Chla) 和 Shannon-Wiener 多样性指数作为群落参数. 其中 Shannon-Wiener 多样性指数(H')^[31]计算公式如下:

$$H' = - \sum (n_i/N) \ln(n_i/N)$$

式中, n_i 为第 i 种浮游植物的个数; N 为样品中所有浮游植物总数.

(2)浮游植物群落参数与环境因子采取 Pearson 相关性分析,并根据相关性矩阵制作热图(heatmap)展示浮游植物参数与环境因子之间的相关性.

(3)使用回归分析中的多重普通最小二乘法(ordinary least squares, OLS)建立浮游植物群落参数与环境因子的模型,并采用赤池信息量准则(akaike's information criterion, AIC)^[32]筛选最优模型, AIC 值越小,则表示该模型越精确.

(4)采取主坐标分析(principal coordinates analysis, PCoA)研究浮游植物群落结构在不同水层的相异性以及浮游植物群落结构的空间分布特征,浮游植物群落结构相异性矩阵通过 Bray-Curtis 距离计算^[33].

(5)去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)^[34]结果表明,排序轴长度 < 3,符合

线性模型,故此采用冗余分析(redundancy analysis, RDA)进行后续分析,其中浮游植物群落丰度数据进行 Hellinger 转化,环境因子数据进行 lg 处理. 对 RDA 排序结果执行置换检验,因环境因子之间大多存在共线性问题,通过计算方差膨胀系数(variance inflation factor, VIF)检验共线性程度,剔除膨胀系数 > 20 的环境因子,对其余环境因子进行简约模型排序,得出环境因子对于浮游植物群落垂向结构的贡献率.

(6)利用标准化随机率(normalized stochasticity ratio, NST)^[35]量化浮游植物群落构建过程中确定性过程与随机过程的重要性,原则上 NST 取值范围在 0 ~ 1 之间,但在实际应用过程中会出现 > 1 的情况,故此采用校正随机率(modified stochasticity ratio, MST)方法解决, MST 值 < 0.5,则表明确定性过程占主导作用; MST 值 > 0.5,则表明随机过程占主导作用.

以上分析在 R 4.0.2 软件中处理, Pearson 相关性分析、OLS 回归分析、PCoA 分析和 RDA 分析均通过 R 软件中的 vegan 包进行分析, MST 指数使用 NST 包进行计算.

2 结果与分析

2.1 春、秋两季环境因子垂向变化特征

2021 年春季,水温变化如图 2 所示,水体水温波动范围在 12.12 ~ 20.55℃ 之间,从表层至中层呈现跃变趋势,温差在 7℃ 左右. 温跃层深度平均值为 8.5 m,温跃层强度为 0.30℃·m⁻¹; 15 m 以下水温变化较小,为均温层,水温平均值为 12.42℃. 2020 年秋季,水体水温波动范围在 12.39 ~ 22.17℃ 之间. A、B 层水温变化不明显, 0 ~ 30 m 为均温层,变化范围在 21.53 ~ 21.83℃ 之间,水温平均值为 21.68℃; 在 30 ~ 45 m 处形成温跃层,温跃层深度平均值为 35 m,温跃层强度为 0.47℃·m⁻¹; 45 m 以下水温变化不明显.

春季, ρ (SS) 变化范围在 0.72 ~ 2.62 mg·L⁻¹ 之间,浓度随水体深度增加而下降; ρ (OSS) 变化范围在 0.29 ~ 2.11 mg·L⁻¹ 之间,随水体深度增加而下降; ρ (ISS) 在 0.43 ~ 0.79 mg·L⁻¹ 之间变化,呈现先上升后下降的趋势. 秋季, ρ (SS) 随水体深度增加而上升,变动范围在 1.33 ~ 2.06 mg·L⁻¹ 之间; ρ (OSS) 变化范围在 0.61 ~ 0.86 mg·L⁻¹ 之间,随水体深度增加而下降; ρ (ISS) 在 0.46 ~ 1.45 mg·L⁻¹ 之间变化,随着水体深度的增加逐渐上升.

春季, ρ (TN) 变化范围在 0.74 ~ 1.12 mg·L⁻¹ 之间,随水体深度增加,浓度逐渐下降; ρ (DTN) 在

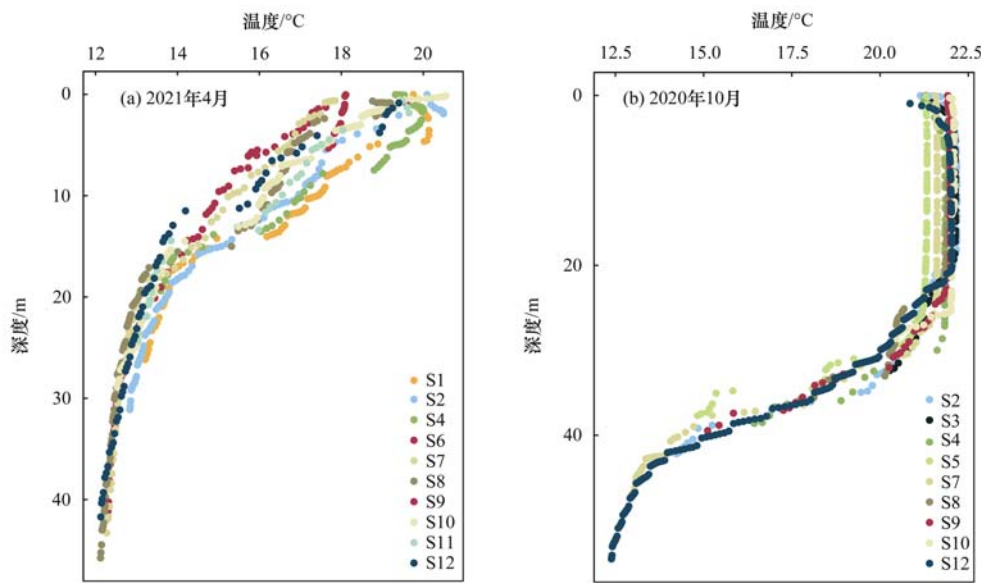


图2 千岛湖春、秋季水温变化

Fig. 2 Water temperature changes in Qiandao Lake in spring and autumn

0.77~0.91 mg·L⁻¹之间变化,浓度随水体深度增加而下降; $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 变化在 0.70~0.80 mg·L⁻¹ 之间,随水体深度增加而下降; $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 变化在 0.034~0.049 mg·L⁻¹ 之间,随水深的增加而下降. 秋季,随水体深度增加, $\rho(\text{TN})$ 逐渐上升,变化范围在 0.84~0.94 mg·L⁻¹ 之间; $\rho(\text{DTN})$ 变化在 0.57~0.61 mg·L⁻¹ 之间,随水体深度增加而下降; $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 变化在 0.30~0.32 mg·L⁻¹ 之间; $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 变化范围在 0.037~0.087 mg·L⁻¹ 之间,浓度变化明显,随水深的增加而增加.

春季: $\rho(\text{TP})$ 随水体深度的增加而下降,变化范围在 0.008~0.025 mg·L⁻¹ 之间; $\rho(\text{DTP})$ 在 0.006~0.011 mg·L⁻¹ 之间变化,随着水深的增加,浓度逐渐下降; $\rho(\text{PO}_4^{3-} \text{-P})$ 平均值较低, C 层平均值最低(0.0015 mg·L⁻¹), A 层平均值最

高(0.0023 mg·L⁻¹),浓度随水体深度增加而下降. 秋季: $\rho(\text{TP})$ 随水体深度的增加而上升,变化范围在 0.017~0.024 mg·L⁻¹ 之间; $\rho(\text{DTP})$ 在 0.004~0.008 mg·L⁻¹ 之间变化,随着水深的增加,浓度逐渐上升; $\rho(\text{PO}_4^{3-} \text{-P})$ 平均值相对较低, A 层平均值最低(0.0019 mg·L⁻¹), D 层平均值最高(0.0062 mg·L⁻¹),浓度随水体深度增加而上升.

总体而言(表1),春季水温、总悬浮物、有机悬浮物、总氮、溶解性总氮、硝态氮、总磷、溶解性总磷和磷酸盐浓度均随水深增加而减少. 秋季水温、有机悬浮物和溶解性总氮浓度随着水深的不断增加而减少; 总悬浮物、无机悬浮物、总氮、氨氮、总磷、溶解性总磷和磷酸盐浓度则随着水深增加而不断增加.

表1 春、秋季环境因子的垂向分布变化¹⁾

Table 1 Vertical distribution of environmental factors in spring and autumn

日期(年-月)	分层	水温	总悬浮物	有机悬浮物	无机悬浮物	总氮	溶解性总氮	硝态氮	氨氮	总磷	溶解性总磷	磷酸盐
2021-04	A	19.28±0.74	2.62±2.35	2.11±2.22	0.50±0.23	1.12±0.48	0.91±0.30	0.80±0.27	0.043±0.03	0.025±0.027	0.011±0.008	0.0023±0.002
	B	18.32±1.06	2.52±1.32	1.75±1.20	0.76±0.49	1.06±0.40	0.87±0.31	0.78±0.29	0.049±0.03	0.022±0.017	0.008±0.006	0.0016±0.001
	C	16.50±2.83	1.60±1.53	0.81±0.82	0.79±1.13	1.00±0.31	0.77±0.31	0.70±0.27	0.046±0.02	0.015±0.012	0.006±0.004	0.0015±0.001
	D	12.42±0.20	0.72±0.24	0.29±0.18	0.43±0.36	0.74±0.06	0.79±0.09	0.71±0.04	0.034±0.03	0.008±0.003	0.007±0.002	0.0020±0.002
2020-10	A	21.53±0.43	1.33±0.30	0.86±0.15	0.47±0.23	0.84±0.12	0.61±0.13	0.31±0.10	0.037±0.02	0.017±0.01	0.004±0.001	0.0019±0.0004
	B	21.83±0.25	1.34±0.30	0.88±0.14	0.46±0.20	0.86±0.16	0.60±0.14	0.30±0.11	0.042±0.02	0.018±0.01	0.005±0.005	0.0022±0.001
	C	19.60±2.10	1.50±0.60	0.67±0.14	0.83±0.65	0.88±0.18	0.58±0.27	0.32±0.25	0.051±0.04	0.021±0.01	0.008±0.006	0.0050±0.004
	D	14.76±1.86	2.06±0.80	0.61±0.10	1.45±0.77	0.94±0.12	0.57±0.18	0.30±0.14	0.087±0.09	0.024±0.02	0.007±0.005	0.0062±0.004

1) 数值为均值±标准差; 水温单位℃, 其余单位为mg·L⁻¹

2.2 春、秋两季浮游植物群落参数垂向变化

如图3所示,春季, A、B、C 和 D 层浮游植物细胞丰度平均值分别为 3.76×10^5 、 4.83×10^5 、 1.46×10^5 和 $9.88 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$; $\rho(\text{Chla})$ 平均值

依次为 16.37、12.96、5.71 和 1.61 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; Shannon-Wiener 多样性指数平均值分别为 1.75、1.77、1.48 和 2.23, Shannon-Wiener 多样性指数底层相对较高主要是由于春季采样较困难,导致底层

样品较少. Wilcoxon 秩和检验结果见表 2, 春季 A 和 B 层在浮游植物群落参数之间差异不显著 ($P > 0.05$), 仅与 C 层在浮游植物丰度上呈显著性差异 ($P < 0.05$); B 层与 C 和 D 层在丰度和 Shannon-Wiener 多样性指数表现出显著性差异 ($P < 0.05$).

秋季, A、B、C 和 D 层浮游植物细胞丰度平均

值分别为 5.91×10^6 、 5.17×10^6 、 1.70×10^6 和 6.04×10^5 cells·L⁻¹; ρ (Chla) 平均值依次为 3.86、3.79、1.40 和 0.53 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; Shannon-Wiener 多样性指数平均值分别为 1.71、1.66、1.41 和 1.33. 秋季 A 层与 B 层浮游植物群落参数差异不显著 ($P > 0.05$), 但与 C 和 D 层呈现显著性差异 ($P < 0.05$).

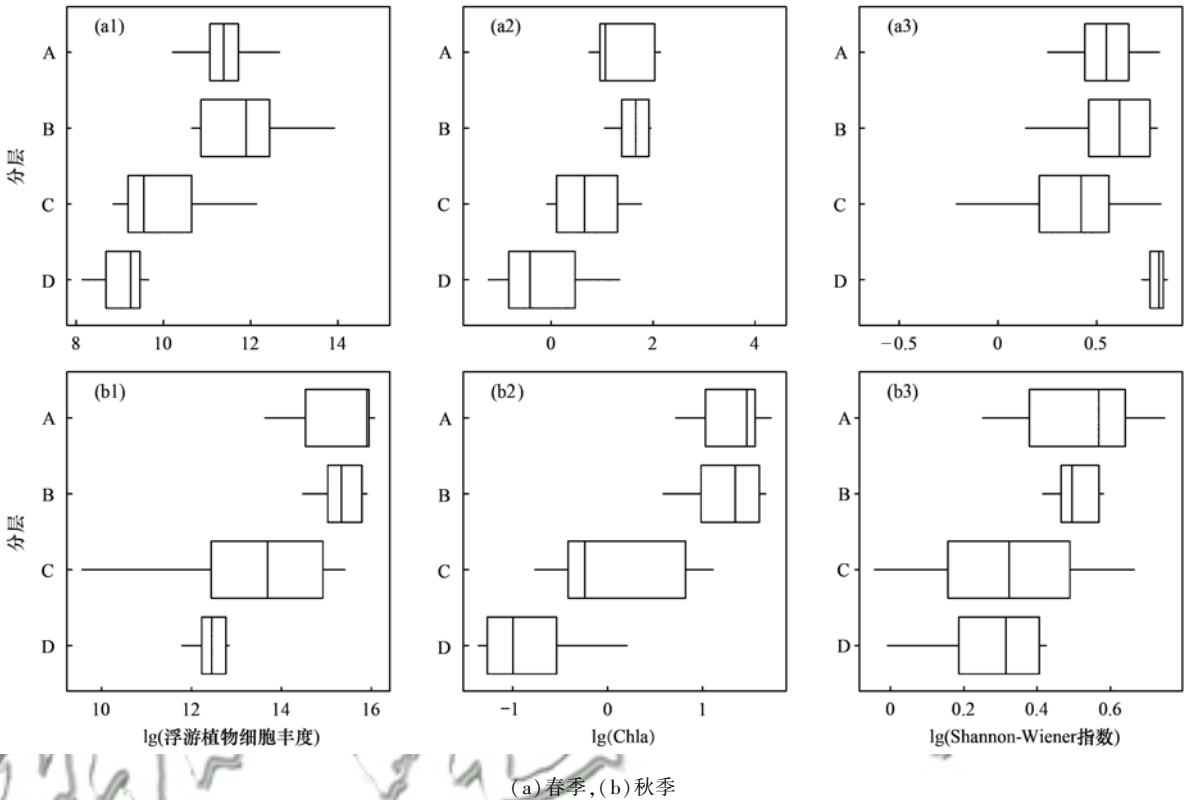


图3 春、秋季浮游植物丰度、叶绿素 a (Chla) 和 Shannon-Wiener 多样性指数垂向分布特征

Fig. 3 Vertical distribution characteristics of phytoplankton abundance, chlorophyll a, and Shannon-Wiener index in spring and autumn

表 2 春、秋季浮游植物群落参数垂向分层之间差异性检验

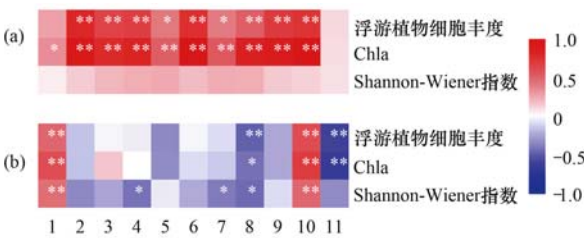
Table 2 Rank sum test between vertical stratification of phytoplankton community parameters in spring and autumn		分层间显著性水平					
日期 (年-月)	群落参数	A vs. B	A vs. C	A vs. D	B vs. C	B vs. D	C vs. D
2021-04	浮游植物细胞丰度		0.019	0.007	0.019	0.007	
	Chla				0.021	0.028	
	Shannon-Wiener 指数			0.028		0.049	0.028
2020-10	浮游植物细胞丰度		0.011	0.003	0.008	0.001	
	Chla		0.005	0.004	<0.001	<0.001	0.029
	Shannon-Wiener 指数				0.036	0.008	

2.3 春、秋两季浮游植物群落参数与环境因子间相关性

千岛湖浮游植物群落参数与环境因子的 Pearson 相关性分析结果如图 4 所示. 春季水温仅与 Chla 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 总悬浮物、有机悬浮物、总氮、溶解性总氮、硝态氮、总磷和磷酸盐与浮游植物丰度和 Chla 呈显著正相关; Shannon-Wiener 多样性指数与环境因子之间并无显著相关性. 秋季水温与浮游植物群落参数呈显著正相关 ($P < 0.05$); 硝态氮仅与 Shannon-Wiener 多样性指数

呈显著负相关 ($P < 0.05$); 磷酸盐与浮游植物群落参数均呈现显著负相关 ($P < 0.01$); 有机悬浮物与浮游植物群落参数均呈现显著正相关 ($P < 0.01$), 无机悬浮物与浮游植物丰度和 Chla 呈现显著负相关 ($P < 0.01$).

春季, 浮游植物丰度、Chla 以及 Shannon-Wiener 多样性指数与环境因子之间关系见表 3. 磷酸盐是影响浮游植物丰度垂向变化的主要环境因子, 与丰度显著正相关; 总悬浮物和无机悬浮物与 Chla 浓度呈显著正相关; Shannon-Wiener 多样性指



(a) 春季, (b) 秋季; 1. WT, 2. TN, 3. DTN, 4. $\text{NO}_3^- \text{-N}$, 5. $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, 6. TP, 7. DTP, 8. $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$, 9. SS, 10. OSS, 11. ISS; 不同星号表示 Pearson 相关系数的显著性水平, *** 表示 $P < 0.001$, ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$

图 4 春、秋季千岛湖浮游植物丰度、Chla 和 Shannon-Wiener 多样性指数与环境因子间相关性

Fig. 4 Correlation between phytoplankton abundance, chlorophyll a, and Shannon-Wiener index and environmental factors in Qiantao Lake in spring and autumn

表 3 浮游植物群落参数与环境因子之间关系¹⁾

Table 3 Relationship between phytoplankton abundance, chlorophyll a, Shannon-Wiener index, and environmental factors						
日期(年-月)	群落参数	Model r^2	AIC	解释变量和显著性水平		
2021-04	浮游植物细胞丰度	0.27	-7.47	$\text{PO}_4^{3-} \text{-P}^{**}$	0.52	
	Chla	0.94	-88.88	SS ^{***}	1.11	ISS ^{***} 9.19
	Shannon-Wiener 指数	—	—	—	—	—
2020-10	浮游植物细胞丰度	0.34	-8.53	ISS ^{***}	-1.67	SS ^{**} 1.25
	Chla	0.54	-19.81	ISS ^{***}	-2.26	SS ^{***} 1.83
	Shannon-Wiener 指数	0.34	-6.51	$\text{PO}_4^{3-} \text{-P}^*$	-0.52	

1) 不同星号表示 Pearson 相关系数的显著性水平, *** 表示 $P < 0.001$, ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$

为 $3.76 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中隐藻门丰度平均值最高, 细胞丰度平均值为 $1.40 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 占 A 层浮游植物丰度平均值的 37.2%, 其次是蓝藻门, 细胞丰度平均值为 $1.25 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比为 33.2%; A 层浮游植物优势属为隐藻属和假鱼腥藻属, 细胞丰度平均值分别为 $1.40 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.03 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$. B 层浮游植物丰度平均值略有下降, 细胞丰度平均值为 $4.83 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中蓝藻门丰度平均值最高, 细胞丰度平均值为 $1.54 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比为 31.9%, 其次是隐藻门, 细胞丰度平均值为 $1.35 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比 28.0%; B 层浮游植物优势属为隐藻属和假鱼腥藻属, 细胞丰度平均值分别为 $1.34 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.10 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$. C 层浮游植物丰度平均值略有下降, 细胞丰度平均值为 $1.46 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中蓝藻门丰度平均值最高, 细胞丰度平均值为 $5.64 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比为 38.4%, 其次是隐藻门, 细胞丰度平均值为 $5.09 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比 34.9%; C 层浮游植物优势属为隐藻属, 细胞丰度平均值为 $5.64 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$. D 层浮游植物丰度平均值略有下降, 细胞丰度平均值为 $9.88 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中硅藻门浮游植物丰度平均值最高, 细胞丰度平均值为

数并无显著相关环境因子, 与相关性分析结果相同.

秋季, 无机悬浮物和总悬浮物是解释浮游植物丰度垂向分布特征的重要环境因子. 无机悬浮物与丰度和 Chla 呈显著负相关, 究其原因是无机悬浮物浓度越高, 光照强度越弱, 当光照强度减弱时, 浮游植物光合作用效率也随之下下降, 导致浮游植物丰度下降和 Chla 浓度降低; 总悬浮物与浮游植物丰度和 Chla 则呈显著正相关, 主要是因为水体中的悬浮物主要以浮游植物残体为主; 磷酸盐与 Shannon-Wiener 多样性指数呈显著负相关.

2.4 春、秋两季浮游植物群落结构垂向分布格局

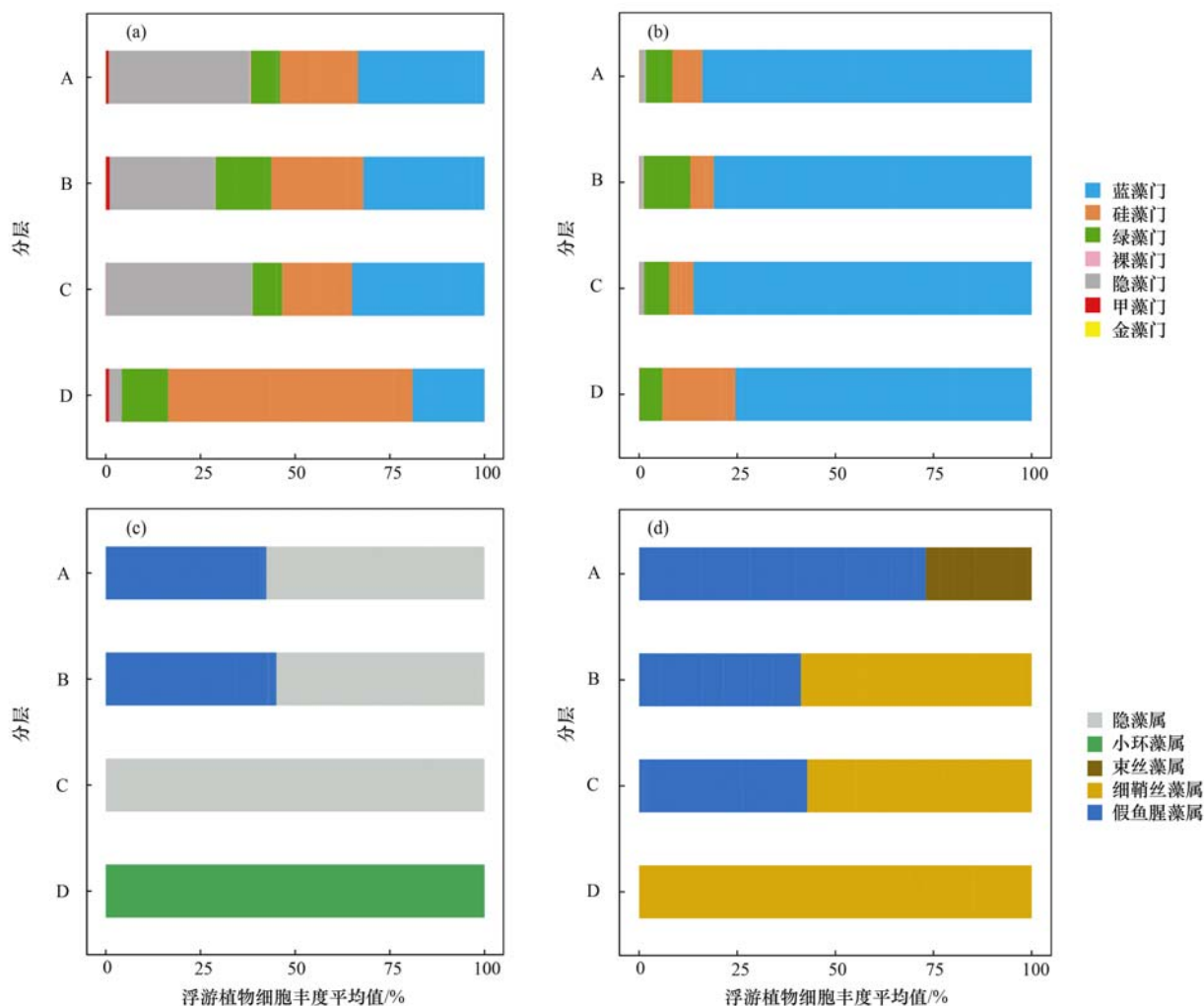
春季, 浮游植物群落结构如图 5(a) 和 5(c) 所示, 整体而言, 水体浮游植物垂向分布格局主要以隐藻门和蓝藻门为主. A 层浮游植物细胞丰度平均值

$6.38 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比为 64.6%; D 层浮游植物并无优势属出现, 小环藻属细胞丰度平均值最高, 为 $6.67 \times 10^2 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$.

秋季, 浮游植物群落结构如图 5(b) 和 5(d) 所示, 整体上, 水体垂向浮游植物主要门类为蓝藻门. A 层浮游植物细胞丰度平均值为 $5.91 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中蓝藻门丰度平均值最高, 细胞丰度平均值为 $4.95 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 占 A 层浮游植物平均丰度的 83.8%, 其次是硅藻门, 细胞丰度平均值为 $4.53 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比为 7.6%; A 层浮游植物优势属为假鱼腥藻属和束丝藻属, 细胞丰度平均值分别为 $3.06 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.13 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$. B 层浮游植物丰度平均值略有下降, 细胞丰度平均值为 $5.17 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中蓝藻门丰度平均值最高, 细胞丰度平均值为 $4.19 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比为 81.0%, 其次是绿藻门, 细胞丰度平均值为 $6.13 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比 11.8%; B 层浮游植物优势属为细鞘丝藻属和假鱼腥藻属, 细胞丰度平均值分别为 $2.24 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.57 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$. C 层浮游植物丰度平均值略有下降, 细胞丰度平均值为 $1.70 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中蓝藻门丰度平均值最高, 细胞丰度平均值为 $1.47 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比为

86.5%, 其次是绿藻门, 细胞丰度平均值为 $1.09 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比 6.5%; C 层浮游植物优势属为细鞘丝藻属和假鱼腥藻属, 细胞丰度平均值分别为 $5.93 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $7.90 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$. D 层浮游植物丰度平均值略有下降, 丰度平均值为 $6.04 \times$

$10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中蓝藻门丰度平均值最高, 细胞丰度平均值为 $4.55 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比为 75.3%, 其次是硅藻门, 细胞丰度平均值为 $1.13 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比 18.7%; D 层浮游植物优势属为细鞘丝藻属, 细胞丰度平均值为 $6.06 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$.



(a)和(c)表示2021年4月,(b)和(d)表示2020年10月

图5 春、秋季千岛湖浮游植物群落和优势属丰度垂向结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of vertical structure of phytoplankton community and dominant genera abundance in Qiandao Lake in spring and autumn

春季, 浮游植物群落 PCoA 分析如图 6(a) 所示; A 和 B 层在群落结构上较为相似, 但与 C 层在群落结构上表现出明显差异, C 层与 D 层在群落结构上差距较小. PCoA 第一轴贡献率为 26.46%, 第二轴贡献率为 25.24%, 两轴贡献率超过 50%, 两轴解释了大部分的浮游植物群落差异, 表明 PCoA 较好地解释不同水层之间浮游植物群落的 α -多样性.

RDA 分析结果见图 6(b), 水温和总氮与春季浮游植物群落结构显著相关 ($P < 0.05$), RDA 第一、二轴共解释 31.78% 的浮游植物群落结构变化, 水温和总氮是影响春季浮游植物群落结构垂向变化的主要环境因子, 二者与水体深度呈现负相关.

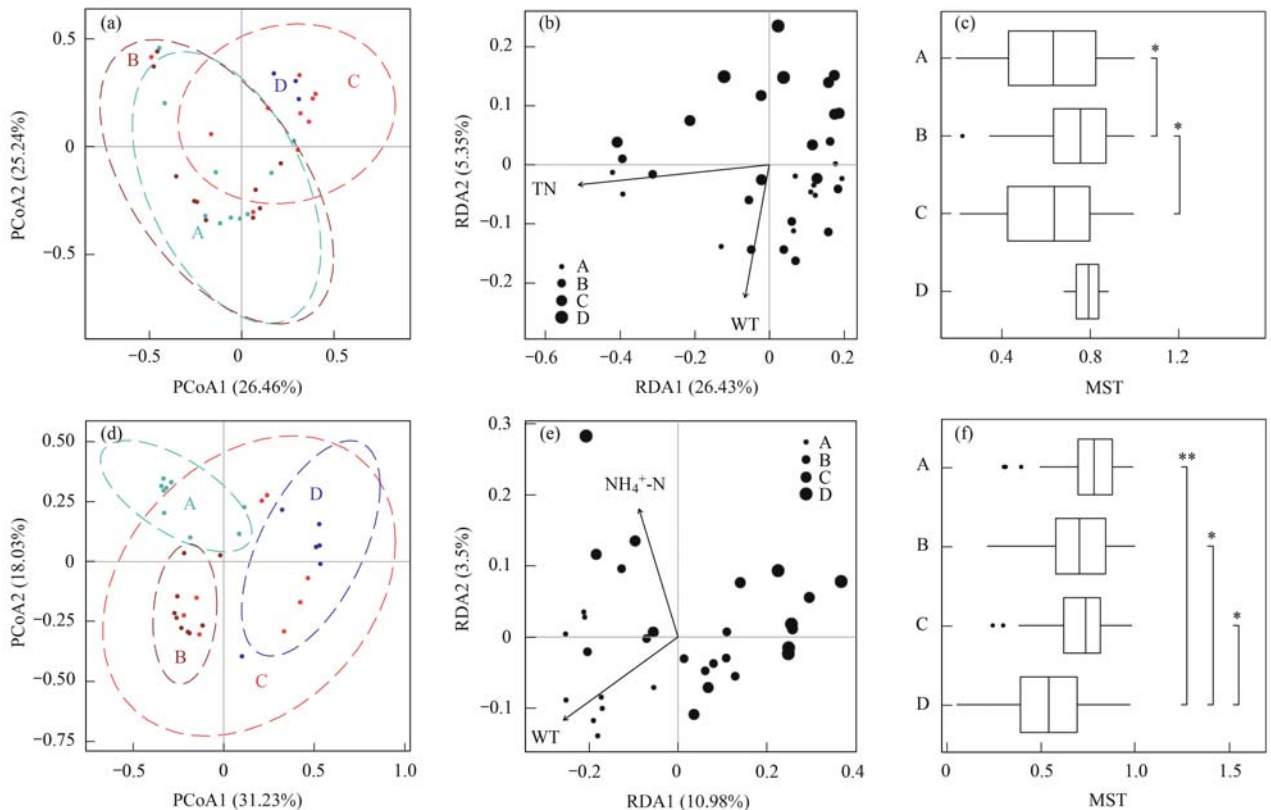
浮游植物群落构建过程中确定性过程与随机过程相对重要性见图 6(c) (MST 值 < 0.5 , 则表明确定性过程占主导作用; MST 值 > 0.5 , 则表明随机过程占主导作用), 春季 A 层随机过程对于浮游植物群落形成的重要性是大于确定性过程的 (MST = 0.628), B 层随机过程重要性有所增加 (MST = 0.741), C 层随机过程的重要性则略有下降 (MST = 0.617), D 层浮游植物群落形成过程中随机过程处于支配地位 (MST = 0.785).

秋季, 浮游植物群落 PCoA 分析结果见图 6(d); PCoA 第一轴贡献率为 31.23%, 第二轴贡献率为 18.03%, 两轴总贡献率为 49.26%, 解释了近 50% 的浮游植物群落差异. 总体来说, A、B 和 D 层

在群落结构上表现出明显差异,而 C 层与其他 3 层在群落结构上差距较小。

浮游植物群落结构与环境因子的 RDA 分析表明图 6(e),水温和氨氮与秋季浮游植物群落结构显著相关($P < 0.05$),二者共解释了 14.48% 的浮游植物群落结构变化,水温和氨氮是浮游植物群落结构垂向变化的主要原因。

浮游植物群落构建过程中确定性过程与随机过程相对重要性如图 6(f)所示,秋季 A 层随机过程对于浮游植物群落形成的重要性是大于确定性过程的($MST = 0.755$),B 层随机过程重要性有所降低($MST = 0.676$),C 层随机过程的重要性则略有增加($MST = 0.694$),D 层浮游植物群落形成过程中随机过程相对较低($MST = 0.536$)。



不同星号表示 Pearson 相关系数的显著性水平, *** 表示 $P < 0.001$; ** 表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$

图 6 春、秋季千岛湖浮游植物群落 PCoA 分析、样点分层与环境因子 RDA 排序和浮游植物群落构建过程的比例

Fig. 6 PCoA analysis of phytoplankton community, plot stratification and RDA ordination diagram of environmental factors, and proportion of phytoplankton community construction process in Qiandao Lake in spring and autumn

3 讨论

千岛湖作为一座亚热带深水人工湖泊,其具有典型的深水湖泊特征,即水体的季节性分层现象.根据湖泊和水库水温分层类型判断公式^[36]:

$$a = \text{入湖年径流量} / \text{总蓄水量}$$

当 $a < 10$ 时,湖泊和水库属于稳定分层型,千岛湖平均入湖年径流量为 $9.45 \times 10^9 \text{ m}^3$,总蓄水量为 $1.78 \times 10^{10} \text{ m}^3$,计算得出 $a = 0.53$,故千岛湖属于稳定分层型湖泊.10 月千岛湖表层水温相对较高,温跃层出现在较深水区(30~45 m),温跃层强度 $0.47^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$;4 月温跃层并未出现在水深 20~40 m 之间,而出现在 2~15 m 之间,温跃层强度较弱,为 $0.30^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$.根据以往关于千岛湖水温分层研究,表层水温与温跃层深度呈现显著负相关^[21,26,28],与图 2

所得结果一致,并且千岛湖 4 月正处于温跃层的形成期,因此温跃层强度较弱,而 10 月则处于温跃层的稳定期,温跃层强度明显大于 4 月。

稳定的温跃层显著影响秋季营养盐垂向分布格局,氮、磷营养盐浓度呈现为“上低下高”的趋势.究其原因是秋季表层水体与空气交换频繁,充足的光照与氧气使得浮游植物充分利用氮、磷营养盐^[37],致使上层水体中氮、磷营养盐浓度下降.当水体深度达到 20 m 以上时,温跃层的存在阻碍下层与上层之间营养盐交换,氮、磷营养盐在底层堆积,这与王琳杰等^[38]在抚仙湖所作的研究结果相同.春季,千岛湖氮、磷营养盐浓度则呈现“上高下低”的趋势.形成该格局的原因可能是由于农民的春耕活动以及降雨量的增加,大量的雨水将湖岸土壤中大量氮、磷营养盐冲刷进入湖中^[23],因此春季上层营养盐浓

度较高,充足的营养盐为春季浮游植物提供了有利的生长环境。

磷酸盐与春季浮游植物丰度垂向分布呈显著正相关。春季表层光照相对较强,而较强的光照会对浮游植物产生光抑制作用^[39],因此浮游植物丰度最大层并不是表层,而是相对较深的次表层。国内外众多学者曾对于湖泊水体中氮磷比做了大量研究,并制定限制标准^[40,41],当 $TN/TP > 30$ 时,浮游植物主要受到磷的限制,千岛湖春季平均氮磷比为 63,故磷是千岛湖春季浮游植物丰度的主要限制因子。根据以往关于浮游植物与磷营养盐的研究可知^[42,43],浮游植物主要利用的是磷酸盐,其是浮游植物生物化学活动的能量基础,因此,当春季磷酸盐浓度随水体深度的增加而下降,浮游植物丰度也随之下降。并且由于春季温跃层尚未稳定,强度较弱,对光强的阻碍作用也随之变弱,因此相对于光照而言,磷酸盐对于浮游植物丰度垂向分布的影响较强。

光照强度与秋季浮游植物丰度和 Chla 垂向分布呈显著正相关。深水湖库中,真光层深度(Z_{eu})对于浮游植物的生长和分布具有直接的影响^[44],一般将表层光照强度的 1% 深度作为真光层深度的标准^[45],混合层指水体表层温度与水下温度相差 0.5°C 时所形成的水层^[46]。浮游植物一般在表层通过光合作用进行生长、发育和繁殖。尽管蓝藻门和绿藻门等一些浮游植物可通过浮力或者游动使自身存在于表层水体中,但大部分浮游植物会下沉至底层,它们只有通过水体垂向上的交换才能回到表层进行生长繁殖^[47]。当 $Z_{eu} > Z_{mix}$ 时,浮游植物因得到充足的光照而大量生长,反之则会受到抑制。由图 1 可知,秋季混合层深度较深,真光层相对于混合层而言较浅,当 $Z_{mix} > Z_{eu}$ 时,浮游植物的生长受到抑制^[48],因此在真光层深度与温跃层的双重影响下,浮游植物光合作用效率显著下降。底层营养盐较为丰富,故此营养盐并不是限制浮游植物生长的主要环境因素。综上所述,秋季浮游植物丰度垂向变化主要是受到光照的限制,随着水体深度增加而逐渐降低的光照是导致浮游植物丰度呈现断崖式下降的主要原因。

水温和氮是影响千岛湖春秋季节浮游植物群落结构垂向变化的主要驱动因素。春季水体表层水温较低,蓝藻生长较为缓慢^[49],并且氮、磷营养盐浓度随着水体深度的增加而下降,导致假鱼腥藻的优势地位逐渐丧失,中层隐藻成为唯一的优势属。而小环藻丰度在底层较高的原因主要是由于下沉作用。Bramburger 等^[50]在对五大湖中的伊利湖进行浮游植物垂向分布调查时同样发现,水体表层浮游植物

群落结构主要由藻体本身浮力较大的蓝藻组成,而底层浮游植物群落结构则主要由受到下沉作用影响的硅藻组成;秋季表层水温较高,氮浓度较高,主要以蓝藻门的假鱼腥藻和束丝藻为优势属;春季温度较低,主要以隐藻和假鱼腥藻为优势属。这与其他湖泊水库的研究结果相同^[51,52]。根据美国环境保护署 (USEPA) 环境水质标准建议,当 $\rho(TN) > 0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(TP) > 0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[53]时,水体呈现富营养化,千岛湖秋季表层 $\rho(TN)$ 和 $\rho(TP)$ 平均值分别为 $0.84 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.017 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,因此表层具备充足的营养盐,而且研究表明蓝藻主要吸收以氨氮为主的营养盐^[43],故此,高氮条件下假鱼腥藻和束丝藻占据优势^[54],成为表层优势属。随着温跃层的出现,营养盐与太阳辐射传递受到阻碍,浮游植物在底层的生长发育受到限制,细胞丰度明显下降,优势属发生演替,由假鱼腥藻和细鞘丝藻占优(次表层和中层)演替为仅细鞘丝藻占优(底层)。总体而言,由水温温差引起的温跃层以及氮营养盐浓度对两季浮游植物群落结构垂向变化起着决定性的作用。

随机过程也同样影响不同季节和不同水层浮游植物群落的构建过程。在温跃层相对稳定的秋季,随机过程的重要性随着水体深度的增加而逐渐降低,主要是由于温跃层的存在限制了浮游植物的扩散^[21]。在温跃层强度较弱的春季,随机过程在垂直方向上并无明显规律。由于随机过程占优势且难以预测,在今后的研究中应增强对更多环境因素的考虑,如水体扰动方式、热分层现象和湖泊水库中的水体调度,综合多方面因素对浮游植物群落垂向分布格局进行更全面和更深入的分析研究,找出影响浮游植物群落垂向分布的最主要驱动因素,从而更好地加强对于湖泊和水库水生态环境的管理。

4 结论

(1)春、秋季营养盐垂向分布上存在差异。春季表层至底层营养盐浓度逐渐下降,主要是由于浮游植物生命活动的消耗。其中氨氮浓度呈现上升后下降的趋势,这与浮游植物丰度垂向变化趋势相同;秋季则呈现相反的趋势,表层至底层营养盐浓度呈现上升趋势,主要是受到温跃层的阻隔作用影响,营养盐在底层堆积。

(2)春、秋季浮游植物丰度、Chla 和多样性随水体深度的增加而降低,但不同季节驱动因素存在差异。春季影响浮游植物丰度垂向变化主要与磷酸盐有关,Chla 主要受到光照强度影响,多样性则与营养盐、光照并无显著相关;秋季浮游植物丰度和 Chla 垂向变化主要受到光照强度影响,多样性主要

受到磷酸盐影响。

(3)春、秋季浮游植物群落结构在垂向上存在显著差异。水温、氨氮和总氮是影响两季浮游植物群落垂向分布特征的主要环境因子。整体而言,春季浮游植物垂向分布主要以隐藻门和蓝藻门为主,隐藻和假鱼腥藻是表层、次表层的优势属,当水体深度增加时,假鱼腥藻优势地位丧失,隐藻成为中层的唯一优势属;秋季浮游植物垂向分布则以蓝藻门为主;表层的优势属为假鱼腥藻和束丝藻,次表层、中层优势属主要是细鞘丝藻和束丝藻,细鞘丝藻是底层的单一优势属。

参考文献:

- [1] Falkowski P G, Laws E A, Barber R T, *et al.* Phytoplankton and their role in primary, new, and export production [A]. In: Fasham M J R (Ed.). *Ocean Biogeochemistry: The Role of the Ocean Carbon Cycle in Global Change* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003. 99-121.
- [2] 卢碧林, 严平川, 田小海, 等. 洪湖水体藻类藻相特征及其对生境的响应[J]. 生态学报, 2012, **32**(3): 680-689.
- Lu B L, Yan P C, Tian X H, *et al.* Characteristics of algal facies of planktonic algae in lake Honghu and its response to habitat [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(3): 680-689.
- [3] Guo F, Jiang G H, Zhao H L, *et al.* Physicochemical parameters and phytoplankton as indicators of the aquatic environment in karstic springs of South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **659**: 74-83.
- [4] Beaver J R, Kirsch J E, Tausz C E, *et al.* Long-term trends in seasonal plankton dynamics in Lake Mead (Nevada-Arizona, USA) and implications for climate change [J]. *Hydrobiologia*, 2018, **822**(1): 85-109.
- [5] Padisák J, Borics G, Grigorcsy 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.
- [6] Cao J, Hou Z Y, Li Z K, *et al.* Succession of phytoplankton functional groups and their driving factors in a subtropical plateau lake [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **631-632**: 1127-1137.
- [7] Liao N, Li H, You L H, *et al.* Succession of phytoplankton functional groups and driving variables in a young canyon reservoir [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021, **18**(7): 1911-1924.
- [8] 林佳, 苏玉萍, 钟厚璋, 等. 一座富营养化水库——福建山仔水库夏季热分层期间浮游植物垂向分布 [J]. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 244-250.
- Lin J, Su Y P, Zhong H Z, *et al.* Vertical distribution of phytoplankton in a eutrophic reservoir, Shanzi Reservoir (Fujian) during summer stratification [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(2): 244-250.
- [9] 王雅慧, 李兰, 卜俊杰. 水库水温模拟研究综述 [J]. 三峡环境与生态, 2012, **34**(3): 29-36.
- Wang Y H, Li L, Bian J J, *et al.* Review on reservoir water temperature simulation [J]. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2012, **34**(3): 29-36.
- [10] 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.
- [11] Zhang M, Duan H T, Shi X L, *et al.* Contributions of meteorology to the phenology of cyanobacterial blooms: implications for future climate change [J]. *Water Research*, 2012, **46**(2): 442-452.
- [12] Liu M, Zhang Y L, Shi K, *et al.* Spatial variations of subsurface chlorophyll maxima during thermal stratification in a large, deep subtropical reservoir [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, **125**(2), doi: 10.1029/2019jg005480.
- [13] Dyhrman S T, Chappell P D, Haley S T, *et al.* Phosphonate utilization by the globally important marine diazotroph *Trichodesmium* [J]. *Nature*, 2006, **439**(7072): 68-71.
- [14] 安瑞志, 潘成梅, 塔巴拉珍, 等. 西藏巴松错浮游植物功能群垂直分布特征及其与环境因子的关系 [J]. 湖泊科学, 2021, **33**(1): 86-101.
- An R Z, Pan C M, Lazhen T, *et al.* Vertical distribution characteristics of phytoplankton functional groups and their relationships with environmental factors in Lake Basomtso, Tibet, China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(1): 86-101.
- [15] Lagus A, Suomela J, Weithoff G, *et al.* Species-specific differences in phytoplankton responses to N and P enrichments and the N:P ratio in the Archipelago Sea, northern Baltic Sea [J]. *Journal of Plankton Research*, 2004, **26**(7): 779-798.
- [16] Domingues R B, Barbosa A, Galvão H. Nutrients, light and phytoplankton succession in a temperate estuary (the Guadiana, south-western Iberia) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, **64**(2-3): 249-260.
- [17] 杨敏, 毕永红, 胡建林, 等. 三峡水库香溪河库湾春季水华期间浮游植物昼夜垂直分布与迁移 [J]. 湖泊科学, 2011, **23**(3): 375-382.
- Yang M, Bi Y H, Hu J L, *et al.* Diel vertical migration and distribution of phytoplankton during spring blooms in Xiangxi Bay, Three Gorges reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, **23**(3): 375-382.
- [18] Li P Y, Yao Y, Lian J J, *et al.* Effect of thermal stratified flow on algal blooms in a tributary bay of the Three Gorges reservoir [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, **601**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126648.
- [19] 笪文怡, 朱广伟, 吴志旭, 等. 2002—2017 年千岛湖浮游植物群落结构变化及其影响因素 [J]. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1320-1333.
- Da W Y, Zhu G W, Wu Z X, *et al.* Long-term variation of phytoplankton community and driving factors in Qiandaohu reservoir, southeast China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(5): 1320-1333.
- [20] 胡忠军, 莫丹玫, 周小玉, 等. 千岛湖浮游植物群落结构时空分布及其与环境因子的关系 [J]. 水生态学杂志, 2017, **38**(5): 46-54.
- Hu Z J, Mo D M, Zhou X Y, *et al.* Spatial and seasonal distribution of phytoplankton in Qiandao Lake and relationship with environmental factors [J]. *Journal of Hydroecology*, 2017, **38**(5): 46-54.
- [21] 吴志旭, 刘明亮, 兰佳, 等. 新安江水库(千岛湖)湖泊区夏季热分层期间垂向理化及浮游植物特征 [J]. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 460-465.
- Wu Z X, Liu M L, Lan J, *et al.* Vertical distribution of phytoplankton and physico-chemical characteristics in the

- lacustrine zone of Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao) in subtropic China during summer stratification[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24**(3): 460-465.
- [22] 笪文怡, 朱广伟, 黎云祥, 等. 新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 713-727.
- Da W Y, Zhu G W, Li Y X, *et al.* High-frequency dynamics of water quality and phytoplankton community in Inflowing river mouth of Xin'anjiang reservoir, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 713-727.
- [23] 韩晓霞, 朱广伟, 吴志旭, 等. 新安江水库(千岛湖)水质时空变化特征及保护策略[J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(6): 836-845.
- Han X X, Zhu G W, Wu Z X, *et al.* Spatial-temporal variations of water quality parameters in Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao) and the water protection strategy[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, **25**(6): 836-845.
- [24] Wu Z X, Zhang Y L, Zhou Y Q, *et al.* Seasonal-spatial distribution and long-term variation of transparency in Xin'anjiang reservoir: implications for reservoir management [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, **12**(8): 9492-9507.
- [25] 史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 等. 新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2137-2148.
- Shi P C, Zhu G W, Yang W B, *et al.* Spatial-temporal distribution of suspended solids and its sedimentation flux and nutrients effects in Xin'anjiang reservoir, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2137-2148.
- [26] 白杨, 张运林, 周永强, 等. 千岛湖水温垂直分层的空间分布及其影响因素[J]. *海洋与湖沼*, 2016, **47**(5): 906-914.
- Bai Y, Zhang Y L, Zhou Y Q, *et al.* Spatial distribution of the thermal stratification in Qiandao lake and its influencing factors [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, **47**(5): 906-914.
- [27] 董春颖, 虞左明, 吴志旭, 等. 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(7): 2574-2581.
- Dong C Y, Yu Z M, Wu Z X, *et al.* Study on seasonal characteristics of thermal stratification in lacustrine zone of lake Qiandao [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2574-2581.
- [28] 刘明亮, 吴志旭, 何剑波, 等. 新安江水库(千岛湖)热力学状况及热力分层研究[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(3): 447-454.
- Liu M L, Wu Z X, He J B, *et al.* Thermodynamics and stratification in Xin'anjiang reservoir (Lake Qiandao) [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(3): 447-454.
- [29] 崔扬, 朱广伟, 李慧赞, 等. 天目湖沙河水库水质时空分布特征及其与浮游植物群落的关系[J]. *水生态学杂志*, 2014, **35**(3): 10-18.
- Cui Y, Zhu G W, Li H Y, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of water quality in Shahe reservoir within Tianmuhu reservoir and its relationship with phytoplankton community [J]. *Journal of Hydroecology*, 2014, **35**(3): 10-18.
- [30] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- Hu H J, Wei Y X. The freshwater algae of China—systematics, taxonomy and ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [31] Xu Y G, Li A J, Qin J H, *et al.* Seasonal patterns of water quality and phytoplankton dynamics in surface waters in Guangzhou and Foshan, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **590-591**: 361-369.
- [32] Akaike H T. A new look at the statistical model identification [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, **19**(6): 716-723.
- [33] Koutecky P. MorphoTools: a set of R functions for morphometric analysis [J]. *Plant Systematics and Evolution*, 2015, **301**(4): 1115-1121.
- [34] Varol M. Phytoplankton functional groups in a monomictic reservoir: seasonal succession, ecological preferences, and relationships with environmental variables [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(20): 20439-20453.
- [35] Ning D L, Deng Y, Tiedje J M, *et al.* A general framework for quantitatively assessing ecological stochasticity [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(34): 16892-16898.
- [36] 张垒, 李秋华, 黄国佳, 等. 亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 438-447.
- Zhang L, Li Q H, Huang G J, *et al.* Seasonal stratification and eutrophication characteristics of a deep reservoir, Longtan Reservoir in subtropical area of China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 438-447.
- [37] Xu Y F, Yang J, Ou M M, *et al.* Study of *Microcystis aeruginosa* inhibition by electrochemical method [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2007, **36**(3): 215-220.
- [38] 王琳杰, 余辉, 牛勇, 等. 抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1384-1392.
- Wang L J, Yu H, Niu Y, *et al.* Distribution characteristics of water temperature and water quality of Fuxian Lake during thermal stratification period in summer [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1384-1392.
- [39] Behrenfeld M J, Falkowski P G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration [J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**(1): 1-20.
- [40] Zhang Y, Song C L, Ji L, *et al.* Cause and effect of N/P ratio decline with eutrophication aggravation in shallow lakes [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **627**: 1294-1302.
- [41] Cuvín-Aralar M L, Focken U, Becker K, *et al.* Effects of low nitrogen-phosphorus ratios in the phytoplankton community in Laguna de Bay, a shallow eutrophic lake in the Philippines [J]. *Aquatic Ecology*, 2004, **38**(3): 387-401.
- [42] 陈格君, 周文斌, 李美婷, 等. 鄱阳湖氮磷营养盐对浮游植物群落影响研究[J]. *中国农村水利水电*, 2013, (3): 48-52, 61.
- Chen G J, Zhou W B, Li M T, *et al.* Research on the of nitrogen and phosphorus on the phytoplankton community in Poyang lake [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013, (3): 48-52, 61.
- [43] Ferber L R, Levine S N, Lini A, *et al.* Do cyanobacteria dominate in eutrophic lakes because they fix atmospheric nitrogen? [J]. *Freshwater Biology*, 2004, **49**(6): 690-708.
- [44] 李凯迪, 周远洋, 周起超, 等. 云南程海真光层深度的时空分布及其影响因素[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(1): 256-267.
- Li K D, Zhou Y Y, Zhou Q C, *et al.* Temporal-spatial distribution of euphotic depth and its influencing factors in Lake Chenghai, Yunnan Province, China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(1): 256-267.
- [45] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- [46] Brainerd K E, Gregg M C. Surface mixed and mixing layer depths [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research*

- Papers, 1995, **42**(9): 1521-1543.
- [47] 杨霞. 三峡水库香溪河库湾异重流背景下水华暴发影响因子研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2011.
- Yang X. Main controlling factors of algae bloom under reverse density current in Xiangxi Bay of Three Gorges reservoir [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2011.
- [48] Doyon P, Klein B, Ingram R G, *et al.* Influence of wind mixing and upper-layer stratification on phytoplankton biomass in the Gulf of St. Lawrence [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2000, **47**(3-4): 415-433.
- [49] Lürting M, Eshetu F, Faassen E J, *et al.* Comparison of cyanobacterial and green algal growth rates at different temperatures [J]. *Freshwater Biology*, 2013, **58**(3): 552-559.
- [50] Bramburger A J, Reavie E D. A comparison of phytoplankton communities of the deep chlorophyll layers and epilimnia of the Laurentian Great Lakes [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2016, **42**(5): 1016-1025.
- [51] 陶敏, 岳兴建, 罗家林, 等. 四川丘陵区水库浮游植物功能群季节演替特征及驱动因子[J]. *水生生物学报*, 2021, **45**(4): 826-837.
- Tao M, Yue X J, Luo J L, *et al.* Seasonal succession of phytoplankton functional groups and its driving factors in reservoirs in hilly regions of Sichuan Province [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(4): 826-837.
- [52] 王远飞, 周存通, 赵增辉, 等. 亚热带水库浮游植物季节动态及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2021, **41**(10): 4010-4022.
- Wang Y F, Zhou C T, Zhao Z H, *et al.* Seasonal dynamics of phytoplankton and its relationship with the environmental factors in subtropical reservoirs [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(10): 4010-4022.
- [53] Lin Y J, He Z L, Yang Y G, *et al.* Nitrogen versus phosphorus limitation of phytoplankton growth in Ten Mile Creek, Florida, USA [J]. *Hydrobiologia*, 2008, **605**(1-3): 247-258.
- [54] 潘静云, 杨阳, 韩博平. 亚热带磷限制水库中浮游植物群落对氮磷比变化的响应[J]. *热带亚热带植物学报*, 2021, **29**(1): 20-30.
- Pan J Y, Yang Y, Han B P, *et al.* Responses of phytoplankton communities to N/P ratio changes in phosphorus-limited subtropical reservoir in southern China [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2021, **29**(1): 20-30.



CONTENTS

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