

文章编号: 1674-5566(2024)05-1176-11

DOI: 10.12024/jsou.20240204435

千岛湖浮游植物群落时空变化及其与环境因子的关系

童璐^{1,2}, 刘丹^{1,2}, 段骄阳^{1,2}, 胡忠军^{1,2}, 盘家永³, 卢小利³, 崔帅康³, 刘其根^{1,2}

(1. 上海海洋大学 农业农村部鱼类营养与环境生态研究中心, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 农业农村部淡水水产种质资源重点实验室, 上海 201306; 3. 杭州千岛湖发展集团有限公司, 浙江 杭州 311700)

摘要: 浮游植物群落动态变化及其与环境因子的关系是了解湖库水环境变动及开展水环境质量评价的重要依据。于2021—2022年对千岛湖浮游植物与水环境因子进行逐月调查, 分析了浮游植物群落结构特征、时空分布格局及其主要环境驱动因子, 旨在为了解千岛湖最新水环境变化和生态系统的演变提供重要的基础资料。结果显示: 调查期间共鉴定出藻类8门240种, 物种组成以绿藻门(51.67%)、硅藻门(21.67%)和蓝藻门(17.84%)为主, 优势种以蓝藻和硅藻为主。2021—2022年均生物密度为 $(404.21 \pm 116.59) \times 10^4$ cells/L, 年均生物量为 (0.84 ± 0.22) mg/L, 密度和生物量均存在显著的时空差异, 浮游植物各门类密度和生物量占比最高的是蓝藻门。Shannon多样性指数存在显著的季节差异, 空间上差异不显著, 其余指数无显著时空差异。Spearman相关性分析显示, 浮游植物密度和生物量与水温、氨氮及高锰酸盐指数呈显著正相关, 与透明度呈显著负相关。RDA分析显示, 水温、氨氮和亚硝酸盐氮是影响千岛湖浮游植物优势种群群落分布的主要环境因子。

关键词: 千岛湖; 浮游植物; 环境因子; 群落结构; 相关性分析

中图分类号: Q 142; S 932.7; X 131.3 **文献标志码:** A

作为水域生态系统的初级生产者, 浮游植物种类和数量的变化不仅是对外来营养物输入的直接响应, 还受到水体食物网下行效应的影响, 同时也是水环境质量的良好指示, 了解浮游植物的组成变化及其驱动因素是有效维护水生态系统健康稳定的重要科学依据^[1-2], 鉴于此, 国内外学者对湖库中的浮游植物进行了深入研究。多项研究揭示了在不同水文条件下, 湖泊浮游植物群落的丰度、多样性指数呈现出显著的季节变化^[3-6]。此外, 水温、pH和总磷等环境因子被认为是影响浮游植物群落的关键因素^[7-9]。

千岛湖, 原名新安江水库, 位于浙江省杭州市淳安县, 是一个以鲢鳙占优势的水库生态系统。近年来, 不少学者对千岛湖浮游植物群落特征与环境因子的关系进行了研究, 研究结果

发现, 水温、透明度、总氮等环境因子是影响浮游植物群落的关键因素^[10-13]。这些结果表明, 千岛湖浮游植物与某些湖库浮游植物与总磷显著相关的结果存在较大的差异。那么这种差异是以上学者所研究年份偶然呈现与总氮而非总磷的关系, 还是在鲢鳙占优的千岛湖, 浮游植物与总磷的不相关是常态? 其次, 鲢鳙放养被一些学者认为会引起藻类小型化, 因此, 本研究希望通过千岛湖浮游植物种类组成及其时空变化、浮游植物与环境因子关系的分析, 更好地了解当前藻类的变化规律及其主要驱动因素, 以及了解其藻类是否存在小型化, 以期为了解千岛湖水环境变动规律及水环境保护与管理提供依据, 同时为研究鲢鳙与水环境的关系提供参考资料。

收稿日期: 2024-02-29 修回日期: 2024-05-14

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD2400900)

作者简介: 童璐(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水域生态学。E-mail: 1250908573@qq.com

通信作者: 刘其根, E-mail: qgliu@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

1 材料与方法

1.1 采样点设置

基于千岛湖的动力学特征和水流方向在全湖设置 11 个采样点,根据空间特点,全湖分为西北湖区(S1、S2、S3)、西南湖区(S8、S9)、中心湖区(S4、S10)、东南湖区(S5、S6、S7)和东北湖区

(S11),见图 1。

2021 年 11 月至 2022 年 10 月,每月中旬在各采样点采集浮游植物样品和水质指标样品。其中,前 7 个点位分为 6 个水层,按 0.5、4、8、12、16、20 m 分层采集水样和浮游植物样品,后 4 个点位采集上(0.5、4、8 m)、下(12、16、20 m)两层混合样品。

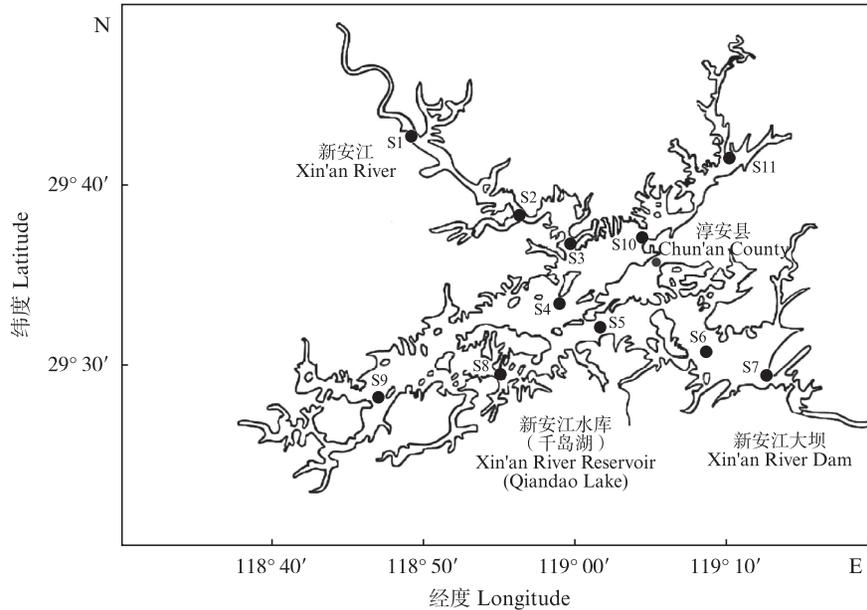


图 1 千岛湖采样点位图

Fig. 1 Sampling points map of Qiandao Lake

1.2 样品的采集与处理

使用 10 L 采水器在各样点采集 1 L 浮游植物样品,随后加入 15 mL 碘液,分液装置沉降 48 h,收集后加入 5 mL 甲醛溶液。处理好的样品在光学显微镜下鉴定并计数。水温(WT)、溶解氧(DO)、pH 等环境因子使用便携式多参数水质检测仪(YSI)现场测定,塞氏盘测定透明度(SD),BBE 测定叶绿素 a(Chl.a)。各采样点采集 500 mL 水样带回实验室进行水化学指标的测定,主要测定总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})。

1.3 数据处理与分析

使用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)和 Margalef 丰富度指数(R)来分析浮游植物群落多样性,以优势度指数(Y) > 0.02 来判断优势种^[14-16],各指数计算公式如下:

$$H' = -\sum (n_i/N) \ln(n_i/N) \quad (1)$$

$$J = H'/\ln S \quad (2)$$

$$R = (S - 1)/\ln N \quad (3)$$

$$Y = n_i/N \times f_i \quad (4)$$

式中: n_i 为第 i 种藻类的细胞数量; N 为藻类总细胞数量; S 为样品的藻类物种数; f_i 为第 i 种藻类在各采样点出现的频率。通过 Microsoft Excel 软件对原数据进行汇总分析与绘图,使用 SPSS 25.0 软件对各季节和湖区的生物密度、生物量和多样性指数进行单因素方差分析,分析前进行正态检验,若不符合正态,则进行非参数秩和检验(Kruskal-Wallis 检验)。使用 SPSS 软件对藻类与环境因子进行 Spearman 相关性分析;使用 CANOCO 5 软件对藻类优势种与环境因子进行 RDA 分析,分析前对各类数据(除 pH)进行 $\lg(x+1)$ 转换。

2 结果

2.1 环境理化因子的季节变化

由表 1 可知,TN、NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 在各季节间

无显著差异($P>0.05$),其余理化因子各季节间呈显著差异,其中夏、秋季的WT显著高于冬、春季($P<0.05$),冬、春季的DO显著高于夏、秋季($P<0.05$);春季的pH显著高于秋季和冬季($P<0.05$),夏季显

著高于秋季($P<0.05$);冬季的SD显著高于其他季节($P<0.05$);夏季的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 显著高于春季和冬季($P<0.05$);夏季的 COD_{Mn} 和TP显著高于冬季($P<0.05$);冬季的Chl.a显著低于其他季节($P<0.05$)。

表1 千岛湖主要水环境因子的季节变化
Tab. 1 Seasonal variations of major environment factors in Qiandao Lake

水环境因子 Environmental factors	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
水温 WT/°C	15.06±2.15 ^b	23.65±2.72 ^a	22.45±2.13 ^a	14.05±3.04 ^b
溶解氧 DO/(mg/L)	9.94±0.88 ^a	6.52±1.36 ^b	6.15±1.11 ^b	8.83±0.86 ^a
pH	9.09±0.33 ^a	8.60±0.73 ^{ab}	7.72±0.01 ^c	7.98±0.20 ^{bc}
透明度 SD/m	4.30±1.19 ^b	3.21±0.46 ^b	4.50±0.45 ^b	6.13±0.90 ^a
总氮 TN/(mg/L)	1.02±0.07 ^a	1.04±0.09 ^a	0.85±0.19 ^a	0.94±0.09 ^a
硝酸盐氮 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ /(mg/L)	0.78±0.07 ^a	0.68±0.13 ^a	0.46±0.35 ^a	0.70±0.04 ^a
氨氮 $\text{NH}_3\text{-N}$ /(mg/L)	0.08±0.05 ^b	0.20±0.05 ^a	0.15±0.08 ^{ab}	0.04±0.01 ^b
亚硝酸盐氮 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ /(mg/L)	0.014±0.007 ^a	0.012±0.004 ^a	0.006±0.002 ^a	0.007±0.004 ^a
高锰酸盐指数 COD_{Mn} /(mg/L)	1.50±0.19 ^{ab}	1.99±0.20 ^a	1.55±0.31 ^{ab}	0.92±0.53 ^b
总磷 TP/(mg/L)	0.020±0.008 ^{ab}	0.034±0.011 ^a	0.024±0.005 ^{ab}	0.016±0.006 ^b
叶绿素 a Chl.a/($\mu\text{g/L}$)	3.81±1.06 ^a	4.87±1.22 ^a	4.25±1.58 ^a	1.46±0.02 ^b

注:同行数据没有相同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Notes: Peer data without the same letter indicate significant difference ($P<0.05$).

2.2 浮游植物种类组成与优势种

2021至2022年共鉴定出浮游植物8门240种,其中,绿藻门124种(51.67%),硅藻门52种(21.67%),蓝藻门42种(17.84%),甲藻门4种(1.67%),裸藻门8种(3.33%),隐藻门6种(2.50%),金藻门2种(0.83%),黄藻门2种(0.83%)。

从季节上来看(图2),夏季种类最多,有175种,其余为秋季(174种)>春季(141种)>冬季

(132种)。从空间上来看(图3),西北湖区种类最多,有210种,东南湖区(165种)、中心湖区(157种)和西南湖区(121种)次之,东北湖区(102种)最少。各季节和湖区均以绿藻门种类最多。

各季节共检出浮游植物优势种17种(表2),优势种主要呈蓝-硅藻型,冬季优势种主要以硅藻为主,夏秋两季优势种以蓝藻为主。

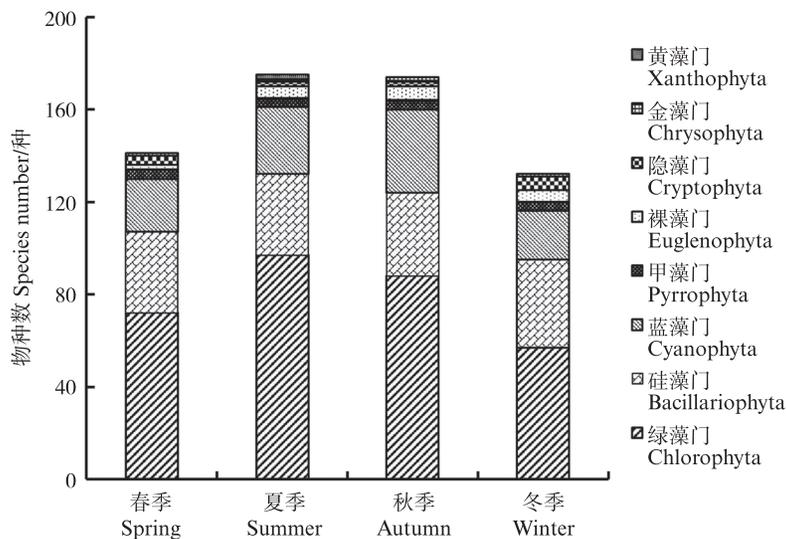


图2 千岛湖各季节浮游植物物种组成

Fig. 2 Species composition of phytoplankton in different seasons of Qiandao Lake

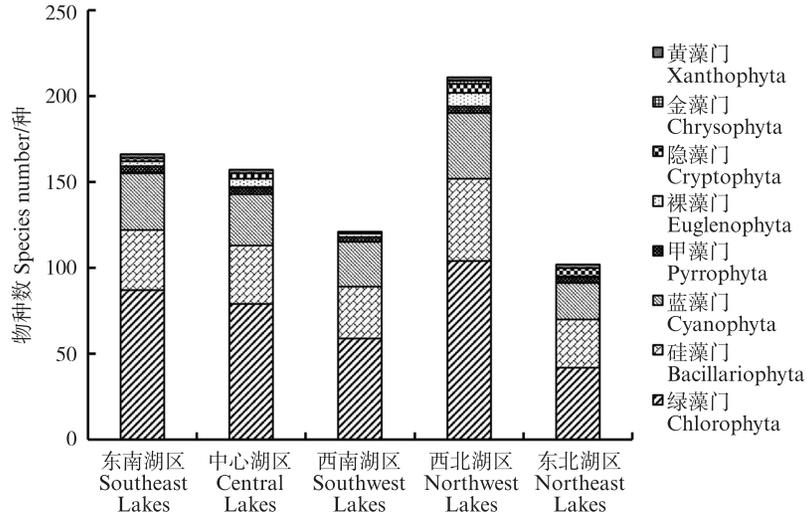


图 3 千岛湖各湖区浮游植物物种组成

Fig. 3 Species composition of phytoplankton in each lake area of Qiandao Lake

表 2 不同季节浮游植物优势种及优势度

Tab. 2 Dominant species and dominance degree of phytoplankton in different seasons

优势种 Dominant species	冬季 Winter	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	编号 Code
蓝藻门 Cyanophyta					
点状平裂藻 <i>Merismopedia punctata</i>	-	0.032	-	-	Cya1
湖泊鞘丝藻 <i>Lyngbya limnetica</i>	-	-	-	0.053	Cya2
束丝藻 <i>Aphanizomenon</i> sp.	-	-	0.083	0.324	Cya3
弯形尖头藻 <i>Raphidiopsis curvata</i>	-	-	0.084	0.060	Cya4
微小隐球藻 <i>Aphanocapsa delicatissima</i>	-	-	-	0.080	Cya5
假鱼腥藻 <i>Pseudoanabaena</i> sp.	0.158	0.523	0.414	0.170	Cya6
细鞘丝藻 <i>Leptolyngbya</i> sp.	-	-	0.036	0.183	Cya7
依沙束丝藻 <i>Aphanizomenon issatschenkoi</i>	-	-	0.041	0.030	Cya8
鱼腥藻 <i>Anabeana</i> sp.	0.182	0.036	0.033	-	Cya9
硅藻门 Bacillariophyta					
短小曲壳藻 <i>Achnanthes exigua</i>	-	0.093	-	-	Bac1
颗粒沟链藻 <i>Aulacoseira granulata</i>	0.155	-	-	-	Bac2
颗粒沟链藻极狭变种 <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	0.185	-	-	-	Bac3
小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	-	0.026	-	-	Bac4
针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	-	0.048	0.036	-	Bac5
直链藻 <i>Melosira</i> sp.	0.065	-	-	-	Bac6
绿藻门 Chlorophyta					
双对栅藻 <i>Scenedesmus bijuga</i>	-	-	0.023	-	Ch11
狭形纤维藻 <i>Ankistrodesmus angustus</i>	-	0.021	-	-	Ch12

2.3 浮游植物现存量的时空变化

千岛湖浮游植物年均生物密度为(404.21±116.59)×10⁴ cells/L, 年均生物量为(0.84±0.22) mg/L。全年密度主要由蓝藻、硅藻和绿藻组成, 其中蓝藻门占比最高(83.56%); 生物量由蓝藻、硅藻和绿藻组成, 其中蓝藻门占比最高(52.26%)、硅藻门次之(34.93%)。

如表 3 所示, 浮游植物生物密度(H=33.029, df=3, P<0.001)在季节间存在显著差异, 多重比较显示, 生物密度夏季显著高于春季和冬季, 秋季显著高于冬季。密度在春季、夏季和秋季均以蓝藻为绝对优势群落, 蓝藻在秋季占比最高, 达到 95.37%; 冬季, 硅藻成为优势群落(48.14%)。浮游植物生物量(H=30.316, df=3, P<0.001)在季

节间存在显著差异,冬季的生物量显著低于春夏秋 3 个季节。蓝藻在夏季和秋季的生物量较高,其余季节则以硅藻为优势群体(表4)。

从不同湖区来看(图4),浮游植物生物密度($H=12.768, df=4, P=0.012$)和生物量($H=19.890, df=4, P=0.001$)在湖区间存在显著差异。生物密度西北湖区 $[(852.36\pm 121.27)\times 10^4 \text{ cells/L}]$ 显著

高于东南湖区 $[(158.48\pm 33.13)\times 10^4 \text{ cells/L}]$ 。生物量西南湖区 $(0.32\pm 0.09 \text{ mg/L})$ 显著低于中心湖区 $(0.97\pm 0.16 \text{ mg/L})$ 和西北湖区 $(1.63\pm 0.20 \text{ mg/L})$,东南湖区 $(0.39\pm 0.07 \text{ mg/L})$ 显著低于西北湖区。密度在各湖区均以蓝藻占优势,西北湖区生物量蓝藻占比最大,其余湖区以硅藻为优势群体。

表3 不同季节浮游植物生物密度、生物量和多样性指数的变化

Tab. 3 Changes in phytoplankton biological density, biomass and diversity index in different seasons

季节 Season	生物密度 Biological density ($\times 10^4 \text{ cells/L}$)	生物量 Biomass/(mg/L)	Shannon 多样性指数 Shannon diversity index	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	Margalef 丰富度 指数 Margalef richness index
春季 Spring	206.63 \pm 74.93 ^{bc}	0.64 \pm 0.17 ^a	1.67 \pm 0.06 ^b	0.63 \pm 0.04 ^a	3.49 \pm 0.19 ^a
夏季 Summer	592.88 \pm 127.11 ^a	1.54 \pm 0.35 ^a	2.06 \pm 0.11 ^a	0.65 \pm 0.03 ^a	4.09 \pm 0.20 ^a
秋季 Autumn	648.46 \pm 217.99 ^{ab}	0.76 \pm 0.24 ^a	1.93 \pm 0.05 ^a	0.63 \pm 0.01 ^a	3.90 \pm 0.34 ^a
冬季 Winter	35.81 \pm 5.95 ^c	0.12 \pm 0.02 ^b	1.65 \pm 0.08 ^b	0.67 \pm 0.02 ^a	3.58 \pm 0.33 ^a

注:同行数据没有相同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Notes: Peer data without the same letter indicate significant difference ($P<0.05$).

表4 不同季节浮游植物各门类现存量百分比

Tab. 4 Percentage of density and biomass of different phytoplankton phyla in different seasons

种类 Species	生物密度 Density/($\times 10^4 \text{ cells/L}$)				生物量 Biomass/(mg/L)			
	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
蓝藻门 Cyanophyta	63.86	79.17	95.37	41.79	36.11	50.43	74.09	12.21
绿藻门 Chlorophyta	11.37	13.02	2.51	9.54	11.69	10.14	5.65	11.61
硅藻门 Bacillariophyta	24.17	7.49	1.98	48.14	46.20	36.70	17.51	71.39
金藻门 Chrysophyta	0.03	0	0.01	0.01	0.11	0	0.01	0
甲藻门 Pyrrophyta	0.33	0.07	0.09	0.22	4.81	1.63	2.53	4.18
裸藻门 Euglenophyta	0.04	0.08	0.01	0.04	0.48	0.42	0.09	0.30
隐藻门 Cryptophyta	0.20	0.02	0.03	0.20	0.59	0.02	0.12	0.31
黄藻门 Xanthophyta	0	0.14	0	0	0	0.66	0	0

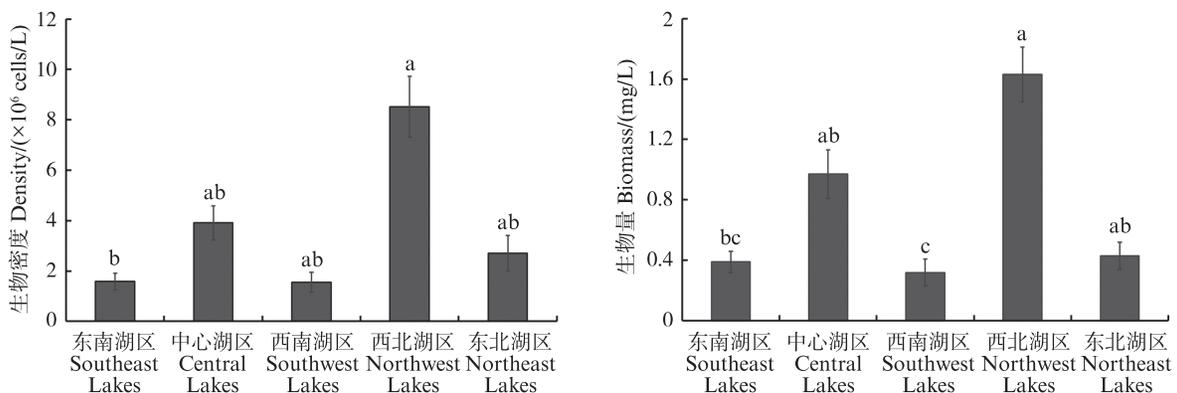


图4 千岛湖各湖区浮游植物生物密度和生物量

Fig. 4 Biological density and biomass of phytoplankton in each lake area of Qiandao Lake

2.4 浮游植物多样性的时空变化

Shannon 多样性指数年均值为 1.83 ± 0.07 , 在

季节间存在显著差异 ($F=6.184, df=3, P=0.005$), 湖区间无显著差异 ($F=0.263, df=4, P=0.897$)。

Shannon 多样性指数夏、秋季显著高于春、冬季(表3);均匀度指数和丰富度指数的年均值分别为 0.65 ± 0.01 、 3.78 ± 0.17 ,在季节和湖区间均无显著差异。

2.5 浮游植物与环境因子的相关性分析

2.5.1 浮游植物与环境因子的 Spearman 相关性分析

相关性分析显示:浮游植物生物密度和生物

量与 WT、NH₃-N 及 COD_{Mn} 呈显著正相关;生物密度与 DO、SD、ORP 呈显著负相关,生物量与 SD、SPC 呈显著负相关。Shannon 多样性指数与 WT、NH₃-N 呈显著正相关,与 DO 呈显著负相关;均匀度指数与 SD 呈显著正相关;丰富度指数与环境因子无显著相关性;浮游植物各群落参数与 TP 无显著相关性(表5)。

表5 浮游植物现存量及多样性与环境因子的 Spearman 相关性

Tab. 5 Spearman correlation between the environmental factors with diversity index and biological density and biomass of phytoplankton

水环境因子 Environmental factors	生物密度 Biological Density	生物量 Biomass	Shannon 多样性指数 Shannon diversity index	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	Margalef 丰富度指数 Margalef richness index
水温 WT	0.888**	0.797**	0.720**	-0.259	0.308
溶解氧 DO	-0.720**	-0.508	-0.608*	0.049	-0.140
透明度 SD	-0.692*	-0.811**	-0.538	0.580*	-0.427
氧化还原电位 ORP	-0.678*	-0.563	-0.336	0.434	0.063
电导率 SPC	-0.458	-0.601*	-0.098	0.203	0.308
氨氮 NH ₃ -N	0.762**	0.769**	0.643*	-0.378	0.315
总磷 TP	0.235	0.307	0.407	-0.327	0.248
高锰酸盐指数 COD _{Mn}	0.825**	0.958**	0.497	-0.559	0.252

注:*表示 $P<0.05$, 差异显著;**表示 $P<0.01$, 差异极显著。

Notes: * indicates significant difference ($P<0.05$); ** indicates highly significant difference ($P<0.01$).

2.5.2 浮游植物与环境因子的 RDA 分析

对千岛湖 17 种浮游植物优势种进行去趋势对应分析(DCA),结果显示排序轴最大长度小于 3,因此使用 RDA 分析。在 RDA 排序轴中,轴一和轴二的特征值分别为 0.621 8 和 0.174 2,前两轴共解释了物种与环境之间 80.65% 的相关性。WT、NH₃-N 和 NO₂⁻-N 对藻类优势种的影响较大,且呈显著相关($P<0.05$)。如图 5 可知,微小隐球藻(*Aphanocapsa delicatissima*)、束丝藻(*Aphanizomenon* sp.)等大部分蓝藻门藻类和绿藻门的双对栅藻(*Scenedesmus bijuga*)都与 WT 和 NH₃-N 呈正相关;短小曲壳藻(*Achnanthes exigua*)、点状平裂藻(*Merismopedia punctata*)等与 NO₂⁻-N 呈正相关。

3 讨论

3.1 千岛湖浮游植物群落结构特征及变化

本研究共监测到浮游植物 8 门 240 种,主要由绿藻、硅藻和蓝藻组成,共占总种类数的 91.18%,上述结果与历史研究基本一致^[10-11,13,17];监测出优势种 17 种,这些优势种有一些常见的小型藻类,其中包括微小隐球藻、短小曲壳藻、小环藻(*Cyclotella*

sp.)等,这说明藻类存在一定的小型化。有研究认为,这可能与千岛湖鲢鳙占主导地位有关,鲢鳙的摄食活动会导致藻类出现小型化格局^[18]。相关的围隔实验研究也表明,鲢鳙的牧食会使大型藻类的数量减少,而小型藻类体积微小不易被鲢鳙滤食,进而能够获得更有利的生长条件,最终也会导致小型藻类数量的增加。此外,鲢鳙也会牧食对小型藻类生长有抑制作用的枝角类浮游动物,其数量减少,最终也会导致小型藻类数量的增加^[19-21]。但藻类小型化也是对水体营养程度的一种响应,千岛湖是寡-中营养型湖泊,当水体营养盐水平较低时,小体积的藻类拥有更大的比表面积,对营养盐的吸收效率较高,从而在竞争营养中获得优势^[22]。在类似寡-中营养水体中,如抚仙湖^[23]、丹江口水库^[24]、流溪河水库^[25]等湖库,藻类优势种也多以小型藻类为主。在富营养水体中,如淀山湖^[26]、漏湖^[27]、长湖^[28]等湖泊,优势种以群体性蓝藻和绿藻等大型藻类为主。本研究中,千岛湖汛期后大型藻类的占比显著上升,表明随着营养盐可获性的增加,大型藻类迅速繁殖并成为优势。由此可知,鲢鳙放养可能不是小型化的主要原因,营养盐的可获性更可能是藻类小型化的驱动因素。

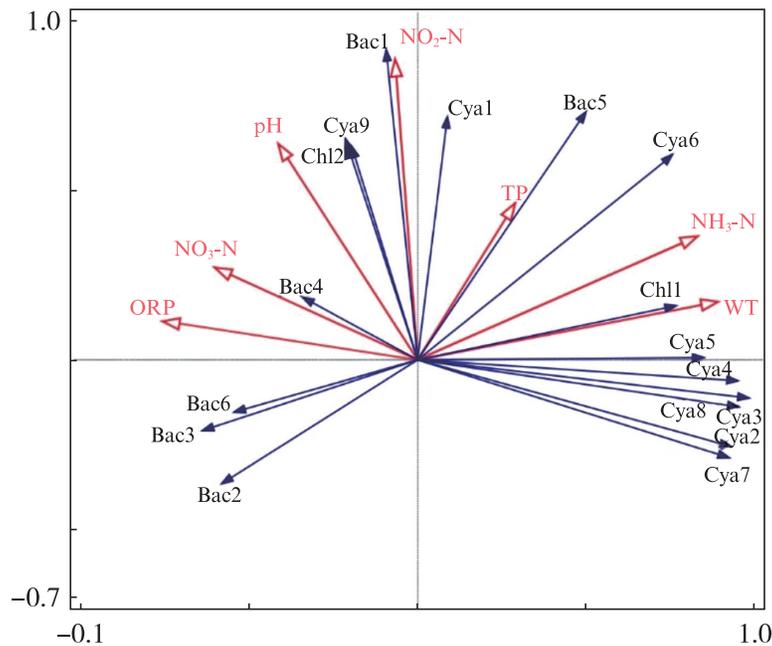


图5 浮游植物优势种与环境因子的RDA图

Fig. 5 RDA diagram of dominant species of phytoplankton and environment factors

从全年生物量上来看,蓝藻门贡献率最高,其次是硅藻门和绿藻门,这与胡忠军等^[10]、陈玉茹等^[29]的结果有一定差异。本研究中,夏秋季节出现了较高的蓝藻生物量,在总藻类生物量中分别占50.43%、74.09%。夏季恰逢梅汛期,降雨量较大,大量营养物质通过地表径流汇入水库,水体的营养盐浓度在短期内明显升高,尤其是TP浓度,TP浓度增加为蓝藻的生长提供了物质基础,水体中磷浓度达到一定程度利于蓝藻形成优势^[30-31]。有研究^[32]发现,蓝藻在寡营养水体中主要受营养盐补充的影响,在中营养水体受温度影响。对于寡-中营养的千岛湖,其受到流域面源污染输入的营养补充后,又受到温度驱动。2021—2022年夏秋季节水温较高,在多种环境条件的联合影响下,蓝藻大量繁殖。此外,2020年7月千岛湖经历了自建库以来的第一次“九孔泄洪”,泄洪使得鲢鳙大量下泄,虽然2021、2022年鲢鳙鱼种的放养有所补充,但鲢鳙的生长周期长,因此2020年下半年开始,其对藻类的牧食作用下降,也可能导致水体中蓝藻等藻类数量增加。但需要注意的是,蓝藻过高的生物量可能会导致蓝藻水华的形成,某些蓝藻如束丝藻、微囊藻(*Microcystis* sp.)等还会产生有毒物质,对水生态系统造成污染和危害。因此,相关部门应关注蓝藻增加带来的风险,并进行科学管理和防控。从

空间上看,西北湖区的物种数、现存量均高于其他湖区,原因在于西北湖区位于水库上游河流区,上游污水排放多,营养盐丰富,导致藻类大量繁殖;此外,上游水体流速较快,较强的水流环境不适合单一藻种的生长^[12],因此不会存在优势度高的种类占据生存空间。

3.2 千岛湖浮游植物与环境因子的关系

藻类群落结构与环境因子间存在密切的联系。RDA结果显示WT、NH₃-N和NO₂⁻-N是影响千岛湖藻类群落的主要环境因子,与2010年的研究结果相比存在明显的差异^[10]。两次研究中,WT都是影响藻类优势种群落分布的关键因素。水温作为藻类繁殖发育的重要因素,其能通过调控藻类生长所需关键酶的活性来影响藻类的生理活动^[33]。绿藻门的双对栅藻和蓝藻门大部分藻类都与WT呈显著正相关,这与蓝绿藻喜高温环境有关;硅藻门的直链藻(*Melosira* sp.)、颗粒沟链藻(*Aulacoseira granulata*)等与WT呈显著负相关,这与硅藻喜低温环境有关。相较于NO₂⁻-N, NH₃-N与大部分藻类存在显著正相关,这是因为NH₃-N是同化过程耗能较少的无机氮,更容易被藻类吸收利用,因此NH₃-N会促进藻类生长^[34]。Spearman分析结果表明,现存量与SD呈显著负相关,这是因为藻类数量的增加会降低水体的透明度^[35]。本研究冬季的现存量最低,SD最高,其

他季节藻类生长速率较快,藻类增加导致透明度下降。密度与DO呈显著负相关,DO除了与藻类生长耗氧有关外,还与水温、有机体呼吸耗氧等密切相关,一定条件下,水温越高,DO越低^[36]。本研究中,DO受温度影响从而成为影响藻类密度的被动因子的可能性更大。现存量与COD_{Mn}呈显著正相关,这是因为水体有机质能被微生物分解成藻类可吸收的营养盐,促进藻类繁殖生长^[37]。在多数湖库中,营养盐水平越高,藻类的密度和生物量越大。藻类的生长离不开营养盐,尤其是TP,它是淡水湖库富营养化的关键^[38]。然而,本研究中,TP与藻类群落参数的相关性不显著,这可能与千岛湖鲢鳙占优势有关,藻类密度和生物量会受到鲢鳙牧食作用的遏制,所以其与TP的显著关系不能从藻类的现存量中得到简单的反映。而在一些鲢鳙不占优势的水体中,如抚仙湖^[39]、西凉湖^[40]、Kuriftu湖^[41]等,藻类现存量与TP呈现显著的相关性,这些湖库中,浮游动物是主要的藻食生物,其数量通常是随藻类的数量而变动,因此浮游动物很难会改变营养盐对藻类的上行作用。这也从侧面说明鲢鳙的存在可能改变了藻类现存量与TP的关系。当然,千岛湖中藻类现存量与TP不显著相关的原因还需要进一步的研究予以证实。

4 结论

本次调查共鉴定出浮游植物8门240种,种类由绿藻、硅藻和蓝藻组成,优势种呈现出蓝-硅藻型。浮游植物群落存在明显的时空差异,从季节上看,夏秋两季的物种数、密度、生物量和Shannon多样性指数均高于其他季节;从空间上来看,西北湖区的物种数、密度和生物量均高于其他湖区。Spearman相关分析表明,浮游植物现存量与WT、NH₃-N及COD_{Mn}呈显著正相关,与SD呈显著负相关。RDA分析表明,影响千岛湖浮游植物优势种群落分布的主要环境因子是WT、NH₃-N和NO₂⁻-N。

参考文献:

- [1] 段萍萍,陈明帅,宋宁宁,等. 东平湖与大汶河浮游植物群落结构季节变化及水质评价[J]. 水产学杂志, 2023, 36(4): 89-98.
- DUAN P P, CHEN M S, SONG N N, et al. Seasonal variation in phytoplankton community structure and water

quality evaluation in Dongping Lake and Dawen River[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2023, 36(4): 89-98.

- [2] 吴转璋,朱超,唐萍,等. 巢湖湖区浮游植物群落与水质因子相关性分析[J]. 生物学杂志, 2023, 40(1): 79-84.
- WU Z Z, ZHU C, TANG P, et al. Correlation analysis of phytoplankton community and water quality factors in Chaohu Lake[J]. Journal of Biology, 2023, 40(1): 79-84.
- [3] GARCÍA-RODRÍGUEZ J, MOLINA-ASTUDILLO F I, MIRANDA-ESPINOZA E, et al. Seasonal phytoplanktonic variation in an urban lake from Cuernavaca, Morelos, Mexico[J]. Acta Universitaria, 2015, 25(1): 3-11.
- [4] ASATRYAN V, STEPANYAN L, HOVSEPYAN A, et al. The dynamics of phytoplankton seasonal development and its horizontal distribution in Lake Sevan (Armenia) [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2022, 194(10): 757.
- [5] 高海鹏,孙兴,张昆,等. 2020年春季青海湖浮游植物群落结构及其影响因子[J]. 淡水渔业, 2023, 53(4): 44-53.
- GAO H P, SUN X, ZHANG K, et al. Community structure of phytoplankton and environmental impact factors in Qinghai Lake during spring and summer in 2020 [J]. Freshwater Fisheries, 2023, 53(4): 44-53.
- [6] 王尽文,黄娟,姜万钧,等. 日照近岸海域冬夏季网采浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(1): 86-96.
- WANG J W, HUANG J, JIANG W J, et al. Features of Net-phytoplankton communities and their environmental factors in the coastal waters of Rizhao in winter and summer [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(1): 86-96.
- [7] APRIADI T, MELANI W R, ZULFIKAR A, et al. Phytoplankton community dynamics in Sei Gesek Reservoir, Bintan Island [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1260(1): 012010.
- [8] FIRSOVA A, GALACHYANTS Y, BESSUDOVA A, et al. Environmental factors affecting distribution and diversity of phytoplankton in the Irkutsk reservoir ecosystem in June 2023 [J]. Diversity, 2023, 15(10): 1070.
- [9] 丰叶,王俊,吴博文,等. 固城湖浮游植物群落结构季节变化及其环境影响因子[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(8): 1042-1050.
- FENG Y, WANG J, WU B W, et al. Seasonal variation characteristics of phytoplankton community in Gucheng Lake and the influential environmental factors [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(8): 1042-1050.

- [10] 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.
- [11] 莫丹玫. 千岛湖浮游植物群落结构多样性及其鉴定方法的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
MO D M. Community structures of phytoplankton and comparison on them between two identification methods in Lake Qiandaohu [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [12] 张真, 胡忠军, 史先鹤, 等. 千岛湖浮游植物群落结构及功能群的划分[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(1): 37-48.
ZHANG Z, HU Z J, SHI X H, et al. Community structures and functional groups of phytoplankton in Qiandao Lake [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(1): 37-48.
- [13] 王吉毅. 千岛湖浮游植物群落结构时空分布格局与营养盐的相关性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2022.
WANG J Y. Correlation between spatial and temporal distribution pattern of phytoplankton community structure and nutrients in Qiandao Lake [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2022.
- [14] ZULKARNAIN D A, SARI L A, SARI P D W, et al. Monitoring the distribution of phytoplankton in vannamei shrimp cultivation in intensive system, Banyuwangi, East Java, Indonesia [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1273(1): 012041.
- [15] 苏新然, 于潘, 尤庆敏, 等. 三峡库区浮游植物群落结构特征及水生态评价[J]. 湖泊科学, 2023, 35(2): 493-506.
SU X R, YU P, YOU Q M, et al. Phytoplankton community structure and water ecological assessment in the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(2): 493-506.
- [16] 秦娇娇, 王艳. 浮游植物多样性指数的应用及评价[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2014, 32(4): 502-505.
QIN J J, WANG Y. Application and evaluation of phytoplankton diversity indexes [J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2014, 32(4): 502-505.
- [17] 周小玉. 千岛湖浮游藻类演替格局与环境因子的关系及其机理的初探[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
ZHOU X Y. The planktonic algae succession in relation to environmental factors of Lake Qiandaohu and the influence mechanism [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012.
- [18] VÖRÖS L, OLDAL I, PRÉSING M, et al. Size-selective filtration and taxon-specific digestion of plankton algae by silver carp[J]. Hydrobiologia, 1997, 342: 223-228.
- [19] 王丽卿, 许莉, 陈庆江, 等. 鲢鳙放养水平对淀山湖浮游植物群落影响的围隔实验[J]. 环境工程学报, 2011, 5(8): 1790-1794.
WANG L Q, XU L, CHEN Q J, et al. Stocking level effects of silver and bighead carps on the phytoplankton community in enclosures in Dianshan Lake [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(8): 1790-1794.
- [20] 王嵩, 王启山, 张丽彬, 等. 水库大型围隔放养鲢鱼、鳙鱼控藻的研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(11): 1190-1195.
WANG S, WANG Q S, ZHANG L B, et al. Large enclosures experimental study on algal control by silver carp and bighead [J]. China Environmental Science, 2009, 29(11): 1190-1195.
- [21] 苏玉萍, 李赫龙, 张玉珍, 等. 山仔水库不同季节围隔放鱼控藻效果研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2016, 32(4): 47-55.
SU Y P, LI H L, ZHANG Y Z, et al. Research on the effects of algae controlling by mesocosm stocking fish in different seasons at Shanzi Reservoir [J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2016, 32(4): 47-55.
- [22] 徐凤洁, 俞秋佳, 王昊彬, 等. 淀山湖夏秋季浮游植物优势种生态特征分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2014(6): 90-100, 120.
XU F J, YU Q J, WANG H B, et al. Ecological characteristics analysis of phytoplankton's dominant species in summer and autumn in the Dianshan Lake, China [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2014(6): 90-100, 120.
- [23] 吉正元, 刘绍俊. 抚仙湖浮游植物群落结构、影响因素及水质评价[J]. 中国环境监测, 2019, 35(4): 67-77.
JI Z Y, LIU S J. Phytoplankton community structure, related influencing factors and the evaluation of water quality in the Fuxian Lake [J]. Environmental Monitoring in China, 2019, 35(4): 67-77.
- [24] 肖玉娜, 程靖华, 莫晓聪, 等. 丹江口水库浮游植物群落时空变化及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2023, 35(3): 821-832.
XIAO Y N, CHENG J H, MO X C, et al. Spatio-temporal variation of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in Danjiangkou Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(3): 821-832.
- [25] 林秋奇, 胡韧, 韩博平. 流溪河水库水动力学对营养盐和浮游植物分布的影响[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2278-2284.
LIN Q Q, HU R, HAN B P. Effect of hydrodynamics on

- nutrient and phytoplankton distribution in Liuxihe Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2278-2284.
- [26] 李强, 伦凤霞, 葛婷婷. 淀山湖浮游植物群落结构特征及水生健康评价[J]. *水生态学杂志*, 2024, 45(2): 10-19.
- LI Q, LUN F X, GE T T. Phytoplankton community structure characteristics and ecological health assessment of Dianshan Lake[J]. *Journal of Hydroecology*, 2024, 45(2): 10-19.
- [27] 高亚, 潘继征, 李勇, 等. 江苏溧湖北部区整治后浮游植物时空分布及环境因子变化规律[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(4): 649-656.
- GAO Y, PAN J Z, LI Y, et al. Spatio-temporal distribution of phytoplankton and environmental factors in the north part of Lake Gehu (Jiangsu) after multi-treatment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(4): 649-656.
- [28] 彭梦, 黄城晨, 李立杰, 等. 长湖浮游植物优势种生态位特征及种间联结性分析[J]. *生态学报*, 2024, 44(4): 1549-1563.
- PENG M, HUANG C C, LI L J, et al. Niche characteristics and interspecific association of dominant phytoplankton species in Lake Changhu [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(4): 1549-1563.
- [29] 陈玉茹, 刘佳睿, 郑文婷, 等. 浮游植物优势属演替和丝状蓝藻增殖的驱动因子研究——以千岛湖为例[J]. *水生生物学报*, 2023, 47(12): 1877-1888.
- CHEN Y R, LIU J R, ZHENG W T, et al. The driving forces for dominant genus succession of phytoplankton and proliferation of filamentous cyanobacteria: a case study of Qiandaohu reservoir [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, 47(12): 1877-1888.
- [30] 许海, 陈洁, 朱广伟, 等. 水体氮、磷营养盐水平对蓝藻优势形成的影响[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(5): 1239-1247.
- XU H, CHEN J, ZHU G W, et al. Effect of concentrations of phosphorus and nitrogen on the dominance of cyanobacteria [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(5): 1239-1247.
- [31] 李兴月, 刘禹, 张生, 等. 达里诺尔湖浮游植物群落结构的时空变化及其影响因素[J]. *湿地科学*, 2023, 21(6): 897-906.
- LI X Y, LIU Y, ZHANG S, et al. Spatiotemporal variation of phytoplankton community structure and its influencing factors in the Dalinor Lake[J]. *Wetland Science*, 2023, 21(6): 897-906.
- [32] RIGOSI A, CAREY C C, IBELINGS B W, et al. The interaction between climate warming and eutrophication to promote cyanobacteria is dependent on trophic state and varies among taxa [J]. *Limnology and Oceanography*, 2014, 59(1): 99-114.
- [33] PULSIFER J, LAWS E. Temperature dependence of freshwater phytoplankton growth rates and zooplankton grazing rates[J]. *Water*, 2021, 13(11): 1591.
- [34] 周琼, 苟金明, 邱小琼, 等. 黄河干流宁夏段浮游植物群落结构及其影响因子研究[J]. *环境污染与防治*, 2022, 44(10): 1362-1367.
- ZHOU Q, GOU J M, QIU X C, et al. Phytoplankton community structure and its influencing factors in Ningxia section of Yellow River mainstream [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2022, 44(10): 1362-1367.
- [35] 邓恺芊, 顾太波, 肖晶, 等. 贵州省3座不同营养型水库浮游植物群落时空格局及影响因子[J/OL]. *水生态学杂志*: 1-13 [2024-05-13]. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202310300301>.
- DENG K Q, GU T B, XIAO J, et al. Spatio-temporal patterns and influencing factors of phytoplankton communities in three reservoirs with different nutrition and status in Guizhou [J/OL]. *Journal of Hydroecology*: 1-13 [2024-05-13]. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202310300301>.
- [36] 王文婷, 李丰, 徐赛赛, 等. 上海青草沙水库浮游植物功能群时空变化特征及其影响因子[J]. *上海海洋大学学报*, 2023, 32(6): 1224-1236.
- WANG W T, LI F, XU S S, et al. Spatiotemporal variation of phytoplankton communities and their relationship with environmental factors in Shanghai Qingcaosha Reservoir [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2023, 32(6): 1224-1236.
- [37] 李锋. 二滩水库浮游植物群落结构与水环境因子时空变化及其相关性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- LI F. Study on the spatiotemporal variation and correlation of factors and phytoplankton community structure and water environmental factors in Ertan Reservoir[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.
- [38] 张琦, 陈宇琛, 林育青, 等. 澜沧江梯级水库浮游植物群落结构特征及其关键驱动因子[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(2): 530-539.
- ZHANG Q, CHEN Y C, LIN Y Q, et al. Characteristic of phytoplankton community structure and its driving factors along the cascade reservoirs in the Lancang River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(2): 530-539.
- [39] 刘晓曦, 陈丽, 蒋伊能, 等. 抚仙湖浮游植物群落时空变化特征及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(3): 793-803.
- LIU X X, CHEN L, JIANG Y N, et al. Spatiotemporal variation of phytoplankton communities and their relationship with environmental factors in Lake Fuxian [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(3): 793-803.
- [40] 邓文博. 西凉湖鱼类群落结构及食物网特征[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- DENG W B. Fish community structure and food web characteristics of Xiliang Lake [D]. Wuhan: Huazhong

Agricultural University, 2023.
[41] ETISA D, KIFLE D, FETAHI T. Phytoplankton functional dynamics in relation to some physicochemical parameters

in Lake Kuriftu (Oromia, Ethiopia) [J]. *Algal Research*, 2024, 79: 103462.

Temporal and spatial changes of phytoplankton communities and their relationship with environmental factors in Qiandao Lake

TONG Lu^{1,2}, LIU Dan^{1,2}, DUAN Jiaoyang^{1,2}, HU Zhongjun^{1,2}, PAN Jiayong³, LU Xiaoli³, CUI Shuaikang³, LIU Qigen^{1,2}

(1. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrition of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Freshwater Aquatic Genetic Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Hangzhou Qiandao Lake Group Co. Ltd, Hangzhou 311700, Zhejiang, China)

Abstract: The dynamic changes of phytoplankton community and its relationship with major environmental factors are important for understanding the changes of lake and reservoir water environment and carrying out water environmental quality assessment. In this study, a monthly survey of phytoplankton and water environmental factors in Qiandao Lake was conducted from 2021 to 2022, and the characteristics of phytoplankton community structure, spatial and temporal distribution pattern and main environmental driving factors were analyzed, in order to provide important basic data for understanding the latest water environment changes and ecosystem evolution in Qiandao Lake. The results showed that a total of 240 species belonging to 8 phyla were identified, with Chlorophyta (51.67%), Bacillariophyta (21.67%) and Cyanophyta (17.84%) as the main species, and Cyanophyta and Bacillariophyta as the main dominant species. The average annual biological density from 2021 to 2022 was $(404.21 \pm 116.59) \times 10^4$ cells/L, and the average annual biomass was (0.84 ± 0.22) mg/L, showing significant spatio-temporal differences in both biological density and biomass. Cyanophyta had the highest biological density and biomass of phytoplankton. Shannon diversity index showed significant seasonal differences, but no significant spatial differences, and there was no spatio-temporal difference in other indices. Spearman correlation analysis showed that phytoplankton density and biomass were significantly positively correlated with water temperature, ammonia nitrogen and permanganate index, and negatively correlated with transparency. RDA analysis showed that water temperature, ammonia nitrogen and nitrite were the main environmental factors affecting the distribution of phytoplankton dominant species in Qiandao Lake.

Key words: Qiandao Lake; phytoplankton; environmental factors; community structure; correlation analysis