

赵冰冰^{1,2} 朱鑫昊² 张华^{1,2} 王金花^{1,2} 黄健^{1,2} 奚姗姗^{1,2} 罗涛² 彭炜²

巢湖西半湖真核浮游植物群落动态与理化因子相关性探究

摘要

浮游植物作为湖泊生态系统物质循环、能量循环的主要参与者,获取其群落结构信息对于调节湖泊生态系统具有重要意义.通过高通量测序检测巢湖西半湖冬季和夏季真核浮游植物的群落特征,在研究期间共检测出真核浮游植物 7 门 71 属,其中,夏季 7 门 59 属、冬季 5 门 27 属,以绿藻门、硅藻门为主,冬季较夏季优势属变化较大.夏季、冬季 Shannon-Wiener 指数均值分别为 1.83、1.88, Pielou 指数均值分别为 0.75、0.83.两种多样性指数均值均为夏季小于冬季.水质分析结果表明,在研究期间巢湖西半湖水体 TN、TP 偏高,夏季、冬季水体理化指标具有显著性差异($P \leq 0.05$).冗余分析表明, $PO_4\text{-P}$ 、TN、TP 和 $NH_4\text{-N}$ 浓度对真核浮游植物群落解释率较大,其中, $PO_4\text{-P}$ 浓度的影响达到显著水平($P \leq 0.05$).Mantel 相关性分析表明,真核浮游植物丰度与水温、溶解氧、pH、 $NH_4\text{-N}$ 、TN 和 Chl. a 有着良好的相关性.通过方差分解分析得到,季节因素对真核浮游植物群落解释度最高.

关键词

高通量测序;巢湖西半湖;真核浮游植物;理化因子

中图分类号 X171

文献标志码 A

收稿日期 2023-07-26

资助项目 安徽省高校自然科学基金项目(2022AH050241);安徽省教育厅科学研究一般项目(KJ2021JD11);安徽建筑大学引进人才及博士启动基金项目(2022QDZ10);安徽省生态文明研究院开放课题(AHSWY-2022-02)

作者简介

赵冰冰,女,博士,主要研究方向为水污染治理.814486119@qq.com

张华(通信作者),女,博士,教授,主要从事水处理理论和技术研究.zhanghuapaper@163.com

0 引言

浮游植物是水生态系统中主要生产者之一,浮游植物的群落结构和动态变化可以深刻影响水生态系统和能量循环^[1-2].浮游植物具有对环境变化反应迅速的特点,其丰度可以作为反映水体状况的重要生物指标^[3].生物因素、气候因素、水文因素和地理因素等均会影响浮游植物群落结构的组成以及多样性^[4-6].巢湖西半湖临近合肥市区,大量工业和城市废水流入西半湖,使巢湖富营养化程度从东向西逐渐增强,近一二十年间巢湖水华频率和严重程度有所增加^[7].氮磷等营养元素与水温均会对浮游植物群落结构产生影响,且环境因子之间存在相互作用,这使得对浮游植物的调控变得更为复杂^[8-9].分析湖区浮游植物群落组成的季节和空间分布及其与环境因子之间的关系,可为污染控制和水质评价提供科学依据.目前,对巢湖浮游植物群落与水质指标间的关系已有相关研究,但研究区域相对单一^[10-11].本研究对巢湖河湖交汇处、岛屿、湖心、城镇和乡村周边水域均进行采样检测,在保证研究数据的准确与全面的基础上,探究巢湖西半湖水体理化因子与浮游植物群落之间的关系.

高通量测序法可以提供相关浮游植物群落组成的详细信息^[12],较之通过显微镜进行的相关检测,更容易区分小型浮游植物并识别计数^[13].本文采用高通量测序的方式检测浮游植物群落结构.首先对巢湖西半湖水体理化因子和浮游植物丰度的时空变化进行研究,并分析水体理化因子中对该区域真核浮游植物时空动态变化的影响.研究结果对日后在实验室中模拟水体理化因子中的某一种、某几种因素对真核浮游植物群落变化的影响有积极意义,也为巢湖水质保护积累了基础数据.期望能对研究区域门、属水平的真核浮游植物进行调控,为巢湖的环境保护及科学管理提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 采样点设置

本研究共设置 14 个采样点,具体布置如图 1 所示.采样点 1~7 分

1 安徽建筑大学 安徽省生态文明研究院,合肥,230601

2 安徽建筑大学 环境与能源工程学院,合肥,230601

别对应南淝河、十五里河、塘西河、派河、杭埠河、白石天河、兆河与巢湖西半湖交汇区域;采样点 8、9 分别代表孤山和姥山岛湖区;采样点 10 代表受村落影响的湖区;采样点 11、12 代表受城镇影响的湖区;采样点 13、14 代表巢湖西半湖湖区水域中心。

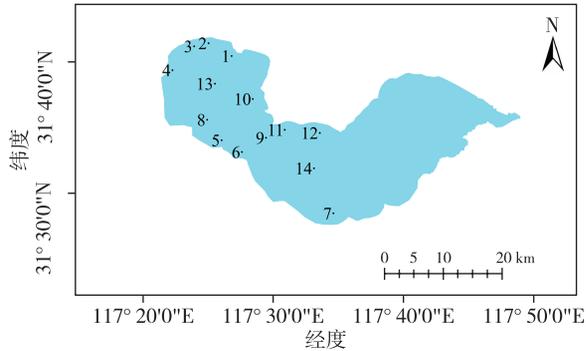


图 1 巢湖西半湖采样点分布

Fig. 1 Distribution map of sampling points in western Chaohu Lake

1.2 样品的采集

采样时间为 2022 年 8 月和 2023 年 2 月,使用玻璃采水器在采样点水面以下 0.5 m 处采集水样 2 L,此水样用于检测巢湖水质指标.另使用玻璃采水器在水面以下 0.5 m 处采集水样,水样经网孔直径为 64 μm 的 25 号浮游生物滤网现场过滤,过滤浓缩后的水样装入离心管中,放置于保温箱内带回实验室.水样在实验室经 0.22 μm 醋酸纤维滤膜过滤,收集水样中的真核浮游植物,通过高通量测序,鉴定真核浮游植物群落结构.滤膜放入离心管中,保存在液氮罐内。

1.3 理化因子的检测

使用多参数水质分析仪在采样现场测得水温 (WT)、酸碱度 (pH)、溶解氧 (DO).采集水样装入聚乙烯采样瓶中,避光保存,带回实验室.在实验室测得氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、总氮 (TN)、总磷 (TP)、磷酸盐 ($\text{PO}_4^-\text{-P}$) 以及叶绿素 a (Chl.a) 浓度指标.样品的保存与测定均参照《水与废水监测分析方法》^[14].

1.4 浮游生物 DNA 提取与测序

使用 TGuide S96 磁珠法 DNA 提取试剂盒完成核酸的提取.使用酶标仪 (synergy HTX) 对提取的核酸进行浓度检测,后续进行 PCR 扩增,扩增后的 PCR 产物使用 1.8% (质量分数) 的琼脂糖进行电泳检测.PCR 扩增及测序基于 18S rDNA 中 V4 区间,F:

CCAGCASCYCGCGTAATTCC 和 R:ACTTTCGTTCTTGATYRA 作为引物,扩增体系为 10 μL .扩增程序为:95 $^\circ\text{C}$ 预变性 5 min,25 个循环(95 $^\circ\text{C}$ 变性 30 s,50 $^\circ\text{C}$ 退火 30 s,72 $^\circ\text{C}$ 延伸 40 s),最后 72 $^\circ\text{C}$ 延伸 7 min.构建好的文库使用 Illumina NovaSeq 6000 (NovaSeq 6000,Illumina) 上机测序。

1.5 测序控制与数据分析

首先使用 Trimmomatic 0.33 软件,对测序得到的原始序列 (Raw Reads) 进行过滤,然后使用 cutadapt 1.9.1 软件进行引物序列的识别与去除,再使用 USEARCH 10.0 对双端序列 (Reads) 进行拼接并去除嵌合体,最终得到高质量序列 (Clean Reads) 用于后续分析.使用 USEARCH 10.0 在相似性 97% 的水平上对序列进行聚类,得到最佳分类单元 (Operational Taxonomic Units, OTUs).将测序结果与 Silva 138 数据库进行对比,使用朴素贝叶斯分类器对特征序列进行分类学注释,得到每个特征序列对应的物种分类信息。

获取足够的 OTUs 后,使用 R 4.3.1 软件计算真核浮游植物群落的 α 多样性指数,包含 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数,分析各点真核浮游植物多样性.此外,多样性指数可用于水体水质状况的判断,具体如表 1 所示.计算优势度指数 (y'):

$$y' = P_i f_i \quad (1)$$

式中: P_i 为第 i 个物种个体数量与所有个体总数量的比值, f_i 为第 i 个物种在各样点出现的频率^[15-16].

表 1 Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数水质评价指标

Table 1 Water quality evaluated by Shannon-Wiener index and Pielou index

Shannon-Wiener 指数	Pielou 指数	水质类型
>4	(0.8,1]	清洁型
(3,4]	(0.5,0.8]	轻污染
(1,3]	(0.3,0.5]	中污染
(0,1]	(0,0.3]	重污染

用主成分分析 (PCA) 来探究基于真核浮游植物群落结构和水体理化因子的样点分布特征,PCA 分析和 PERMANOVA 分析基于 R 4.3.1 软件 vegan 完成.使用 Canoco 5 软件对真核浮游植物相对丰度进行消除趋势对应分析 (Detrended Correspondence Analysis, DCA),以此结果来选择分析真核浮游植物纲分类水平下相对丰度和水体理化因子关系的方法:若第一轴长度 < 3,选择冗余分析 (Redundancy

Analysis, RDA); 若第一轴长度>4, 选择典型相关分析(Canonical Correlation Analysis, CCA); 若 $3 \leq$ 第一轴长度 ≤ 4 , 两者均可. Mantel 相关分析探究水体理化因子对真核浮游植物门分类水平下的影响, 基于 R 4.3.1 软件 vegan、ggcor、dplyr、ggplot2 包完成. 方差分解分析(Variance Partitioning Analysis, VPA) 基于 R 4.3.1 软件 vegan 包完成. 采样点图使用 ArcMap 10.7 完成绘制.

2 结果与分析

2.1 巢湖水体理化因子分析

巢湖西半湖水体理化因子变化如图 2 所示, 水体理化因子具有时空差异性. 水温(WT)随季节变化差异较大, 最大差值 27 °C. 夏季溶解氧(DO)整体低于冬季, 范围在 6.80~9.73 mg·L⁻¹. 巢湖水体整体呈弱碱性, 最低 pH 为 8.18, 夏季 pH 整体略高于冬季,

夏季、冬季均值分别为 8.57、8.38. 冬季 NH₄⁺-N 质量浓度均值 0.13 mg·L⁻¹, 低于夏季均值 0.65 mg·L⁻¹. 除采样点 13 外, TN 质量浓度夏季大于冬季, 而且夏季有 7 个采样点 TN 指标超过地表水 V 类的标准. 夏季、冬季 NO₃⁻-N 质量浓度范围分别为 0.64~1.34 和 0.35~1.56 mg·L⁻¹. TP 质量浓度偏高, 夏季、冬季分别有 8 个和 9 个采样点达到地表水 V 类的标准, 夏季、冬季总体差异较小. PO₄⁻-P 质量浓度随季节波动较小, 但夏季采样点 2、3 和其他采样点有一定差异. Chl.a 质量浓度夏季波动较大, 范围在 11.41~238.46 μg·L⁻¹, 夏季、冬季均值分别为 61.13 和 12.48 μg·L⁻¹.

采用 PCA 分析各采样点水体理化因子的相似度, 两点坐标直线距离越近, 则两点的水体理化因子差异越小. PCA 分析结果(图 3)显示, PCA 两轴共解释了 69.3%, 所有采样点水质理化因子均在 95% 置

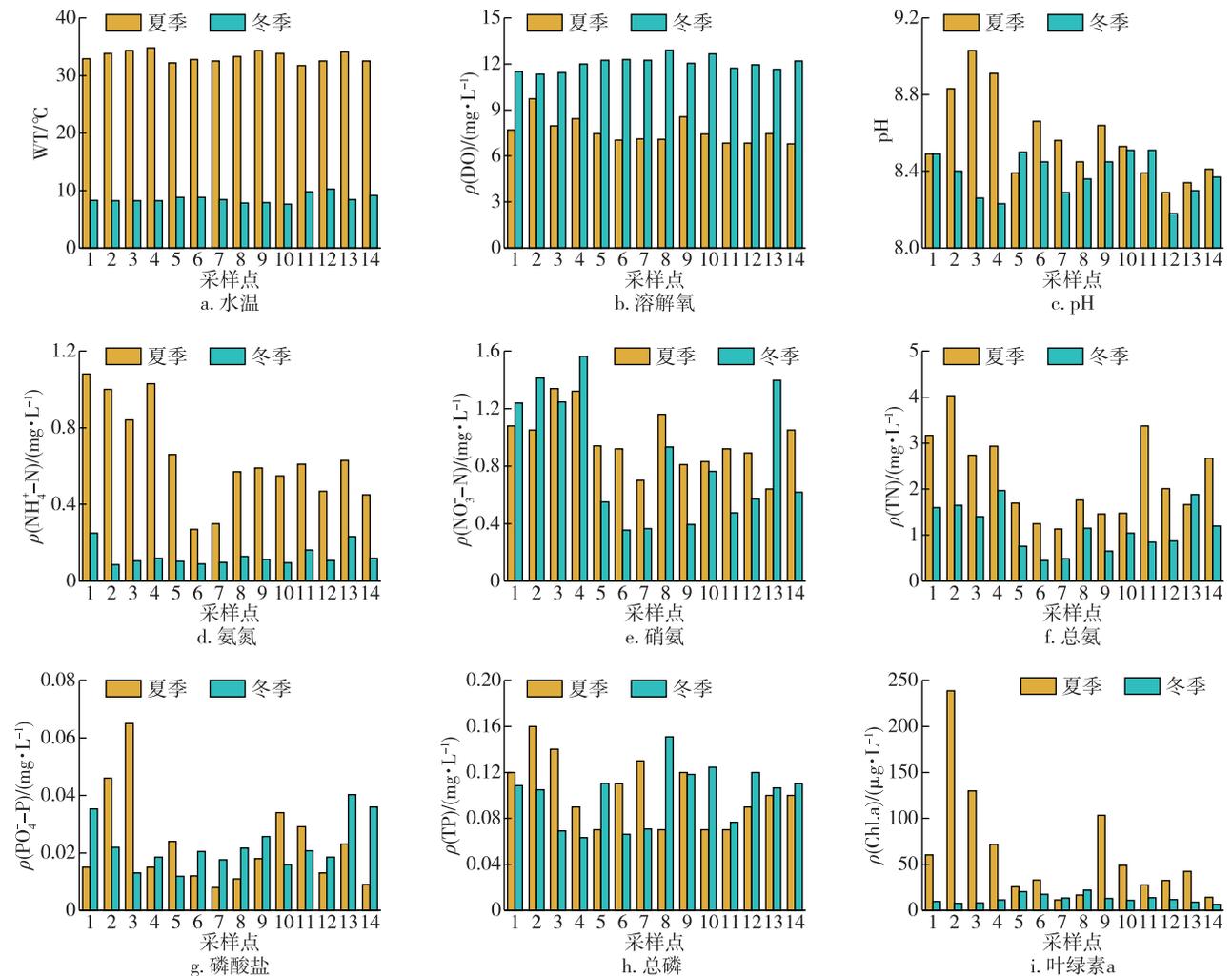


图 2 巢湖西半湖各采样点夏季、冬季水体理化因子变化

Fig. 2 Changes of physicochemical factors in summer and winter at each sampling point in western Chaohu Lake

信区间内,经过 PERMANOVA 分析,巢湖西半湖夏季、冬季水体理化因子具有显著性差异 ($P \leq 0.05$). 夏季采样点均在一四象限,冬季采样点均在二三象限,所有采样点在 PCA 轴 1 具有很好的区分度, TN、TP、WT 等水体理化因子与 PCA 轴 1 具有正相关关系,仅 DO 与 PCA 轴 1 具有负相关关系.

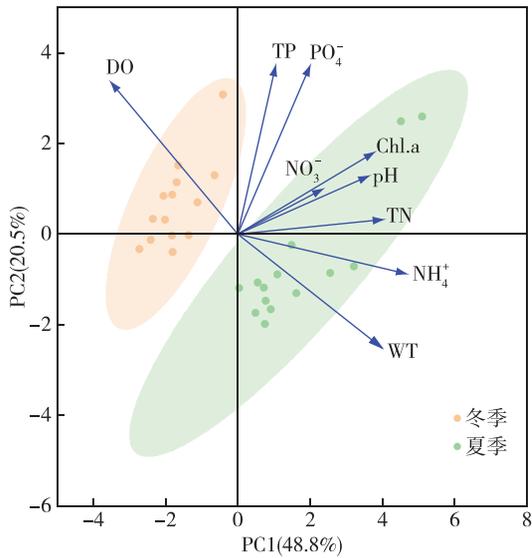


图3 巢湖西半湖夏季、冬季水体理化因子 PCA 分析
Fig. 3 PCA of physical and chemical factors in summer and winter in western Chaohu Lake

2.2 巢湖西半湖真核浮游植物群落组成

2.2.1 测序结果

对夏季、冬季共 28 个样品 18S rDNA 的 V4 区间扩增测序后,共获得 2 235 345 对 Reads,双端 Reads

质控、拼接后共产生 1 953 378 条 Clean Reads,每个样品至少产生 51 468 条 Clean Reads.本研究共检测出 7 门 71 属真核浮游植物.夏季检测出 7 门 59 属,其中,绿藻门 24 属、硅藻门 15 属、金藻门 10 属、隐藻门 4 属、甲藻门 4 属、黄藻门定鞭藻门各 1 属;冬季检测出 5 门 27 属,其中,绿藻门 15 属、硅藻门 4 属、金藻门 4 属、甲藻门 3 属、黄藻门 1 属.冬季除黄藻门之外,其他各藻门包含藻属均有不同程度减少,减少最多的为硅藻门,共减少 11 属,夏季、冬季真核浮游植物群落结构在属水平上差异较大,夏季、冬季均检出的真核浮游植物仅 15 属.

2.2.2 真核浮游植物门水平组成及变化

夏季、冬季两次采样真核浮游植物门分类水平下相对丰度如图 4 所示,研究区域真核浮游植物相对丰度占比较高的均为绿藻门和硅藻门.夏季、冬季绿藻门相对丰度均值分别为 55.78% 和 54.85%,硅藻门则分别为 24.92% 和 27.71%.与冬季相比,夏季各采样点绿藻门、硅藻门相对丰度差异较大.夏季绿藻门相对丰度在 24%~86%,相对丰度较低的 1、3、4 号采样点,均在巢湖西北部,夏季硅藻门相对丰度在 6%~70%;冬季各采样点绿藻门、硅藻门相对丰度分别在 31%~78% 和 16%~38%,与夏季相比波动较小.夏季甲藻门相对丰度最大采样点仅为 5%,冬季甲藻门相对丰度明显增加,各采样点甲藻门平均丰度为 13.85%.同时,隐藻门、定鞭藻门在冬季均未检出.

2.2.3 优势属的变化

研究期内优势属如表 2 所示,巢湖西半湖优势

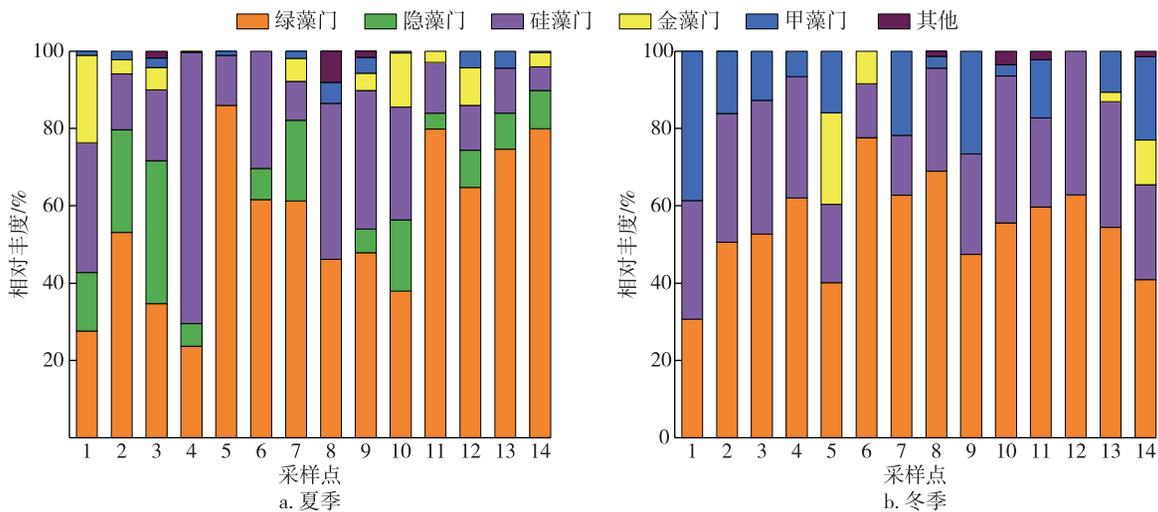


图4 夏季、冬季各采样点真核浮游植物门分类水平下相对丰度
Fig. 4 Relative abundance of eukaryotic phytoplankton at phylum level at each sampling point in summer and winter in western Chaohu Lake

属主要由绿藻门、硅藻门和隐藻门构成,夏季和冬季优势属有较大差异.衣藻属(*Chlamydomonas*)在夏季优势度最大,但在冬季却未检出,沟链藻属(*Aulacoseira*)、角毛藻属(*Chaetoceros*)、隐藻属(*Cryptomonas*)也有类似现象.齿状藻属(*Odontella*)在夏季未检出,但在冬季成为优势属之一;麦可属(*Mychonastes*)在夏季虽有检出,但优势度很低,在冬季却成为优势度最大的藻属.仅绿藻纲未定属(*unclassified_Chlorophyceae*)为夏季、冬季共同优势属.

表 2 巢湖西半湖夏季、冬季优势属和优势度

Table 2 Dominant genera and corresponding dominance in summer and winter in western Chaohu Lake

门	中文学名	拉丁学名	夏季	冬季
	衣藻属	<i>Chlamydomonas</i>	0.355	
绿藻门	绿藻纲未定属	<i>unclassified_Chlorophyceae</i>	0.057	0.160
	麦可属	<i>Mychonastes</i>	0.001	0.333
	沟链藻属	<i>Aulacoseira</i>	0.084	
	角毛藻属	<i>Chaetoceros</i>	0.069	
硅藻门	小环藻属	<i>Cyclotella</i>	0.019	0.118
	齿状藻属	<i>Odontella</i>		0.142
	硅藻门未定属	<i>unclassified_Diatomea</i>	0.013	0.033
隐藻门	隐藻属	<i>Cryptomonas</i>		0.056

注:优势度 ≥ 0.02 定义为优势属.

2.2.4 真核浮游植物时空相似性比较

通过 PCA 对巢湖西半湖夏季、冬季真核浮游植物群落结构进行比较分析,结果如图 5 所示.结果表明,PCA 轴 1 的解释率为 24.4%,PCA 轴 2 解释率为 16.2%,总解释率为 40.6%.冬季各采样点真核浮游植物群落分布在二三象限,夏季各采样点真核浮游植物群落则主要分布在三四象限.通过 PERMANOVA 分析可知,巢湖西半湖夏季、冬季真核浮游植物群落结构具有显著差异性($R^2 = 0.338, P = 0.001$).

2.2.5 多样性分析

夏冬季巢湖西半湖真核浮游植物多样性指数有一定差异,结果如表 3 所示.夏季 Shannon-Wiener 指

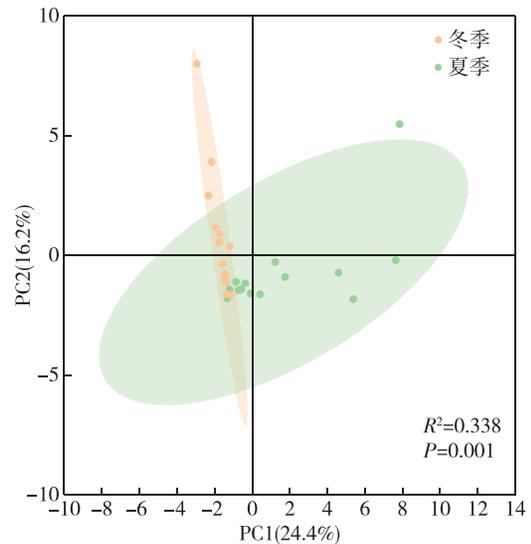


图 5 巢湖西半湖夏季、冬季浮游植物 PCA 分析
Fig. 5 PCA of eukaryotic phytoplankton in summer and winter in western Chaohu Lake

数的范围在 1.04~2.52,均值为 1.83,冬季 Shannon-Wiener 指数的范围在 1.56~2.28,均值为 1.88,如按 Shannon-Wiener 指数均值评价水质,巢湖西半湖夏季、冬季整体处于中污染状态.夏季 Pielou 指数范围在 0.53~0.91,均值为 0.75,冬季 Pielou 指数范围在 0.76~0.89,均值为 0.83,如按 Pielou 指数均值评价水质,巢湖西半湖夏季整体偏轻污染状态,冬季整体偏清洁状态.巢湖西半湖夏季 Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数均值均小于冬季,故推测夏季水生态系统稳定性整体劣于冬季.结果显示, Pielou 指数对于研究区内水质情况有一定区分能力,但 Shannon-Wiener 指数对于研究区内水质情况区分能力较差.

2.3 水体理化因子与真核浮游植物的关系

2.3.1 水体理化因子与真核浮游植物纲水平 RDA 分析

选取 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、Chl.a 质量浓度等 9 个水体理化因子指标,与绿藻纲、共球藻纲、隐藻纲

表 3 巢湖西半湖各采样点多样性指数分析

Table 3 Analysis of diversity index in western Chaohu Lake

季节	多样性指数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
夏季	Shannon-Wiener	2.52	1.99	1.99	1.04	1.20	1.59	2.13	1.95	2.27	2.33	1.62	1.69	1.71	1.95
	Pielou	0.83	0.80	0.83	0.53	0.62	0.89	0.72	0.76	0.80	0.91	0.65	0.66	0.82	0.72
冬季	Shannon-Wiener	1.65	1.94	2.04	1.92	2.28	1.67	1.74	1.94	1.76	1.97	1.86	1.56	1.79	2.25
	Pielou	0.85	0.88	0.85	0.80	0.89	0.76	0.79	0.84	0.84	0.82	0.84	0.80	0.82	0.81

等真核浮游植物纲水平相对丰度进行 DCA 分析,第 1 轴长度为 1.21,故选择进行 RDA 分析,结果如图 6 所示.第 1 轴和第 2 轴解释量分别为 44.3% 和 4.58%.环境因子中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、TN、TP 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 质量浓度对真核浮游植物群落解释率较大,其中, $\text{PO}_4\text{-P}$ 质量浓度的影响达到显著水平 ($P \leq 0.05$).共球藻纲、小豆藻纲、硅藻纲、隐藻纲、金藻纲和间藻纲均在第一象限,与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN、TP、Chl.a 质量浓度和水温均呈正相关.溶解氧、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 质量浓度和各纲均呈负相关.

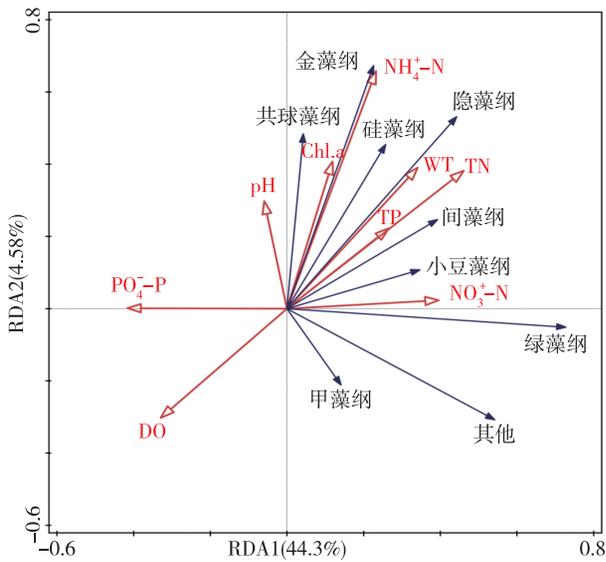


图 6 巢湖西半湖真核浮游植物纲分类水平下与水体理化因子 RDA 分析

Fig. 6 RDA of eukaryotic phytoplankton at class level and physicochemical factors in western Chaohu Lake

2.3.2 水体理化因子与真核浮游植物门分类水平下相对丰度 Mantel 相关性分析

为进一步了解水体理化因子对真核浮游植物的影响,将真核浮游植物门分类水平下的相对丰度与水体理化因子进行 Mantel 相关性分析,结果如图 7 所示.各藻门与 WT、DO、pH 以及 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN 和 Chl.a 质量浓度有着良好的相关性.其中,绿藻门与水温,溶解氧, $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN 质量浓度呈极显著正相关 ($P < 0.01$);隐藻门、硅藻门与水温,溶解氧, pH, $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN、Chl.a 质量浓度呈极显著正相关 ($P < 0.01$);金藻门与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN、Chl.a 质量浓度呈极显著正相关 ($P < 0.01$);甲藻门与水温、溶解氧、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 质量浓度呈极显著正相关 ($P < 0.01$).

2.3.3 真核浮游植物影响因子变差分解

为了解不同类型的水体理化因子和季节对巢湖西半湖真核浮游植物群落结构的影响,对氮相关因子(包含 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$)、磷相关因子(TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$)、其他因子(水温、溶解氧、pH、Chl.a)和季节进行变差分解,结果如图 8 所示.这 4 类因子共解释了 60.3% 的真核浮游植物群落结构变化.其中,季节因素解释率最高,氮相关因子与季节共同解释率为 20.8%,氮相关因子、其他因子与季节共同解释率为 34.5%.

3 讨论

3.1 巢湖西半湖真核浮游植物丰度变化

本次研究通过高通量测序技术共检测出真核浮

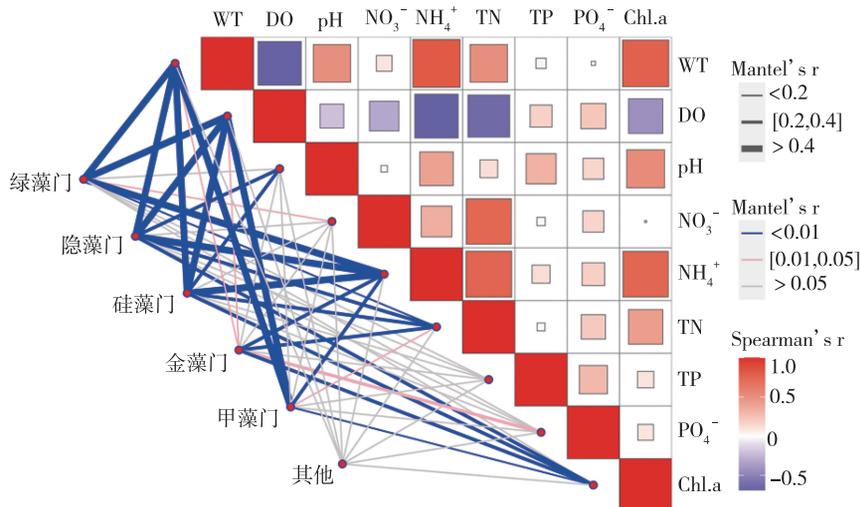


图 7 巢湖西半湖真核浮游植物门分类水平下相对丰度与水体理化因子 Mantel 分析

Fig. 7 Mantel analysis of relative abundance of eukaryotic phytoplankton at phylum level and physicochemical factors in western Chaohu Lake

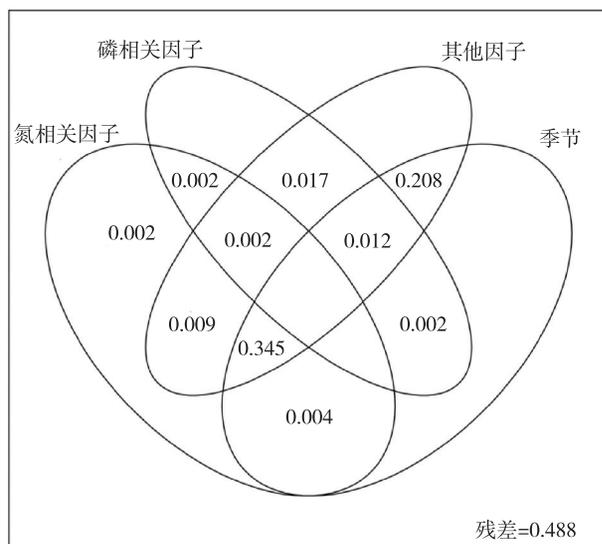


图8 巢湖西半湖真核浮游植物群落结构变差分解

Fig. 8 Variance partitioning of eukaryotic phytoplankton community structure in western Chaohu Lake

游植物 7 门 71 属, 其中夏季检出 7 门 59 属、冬季检出 5 门 27 属, 较显微镜检测结果更为丰富^[17]. 检出真核浮游植物主要为绿藻门、硅藻门、金藻门、隐藻门和甲藻门, 其中, 绿藻门藻属数量最多 (夏季占 40.7%, 冬季 55.6%), 这与前人对巢湖的调查结果基本一致, 在裸藻门结果中略有偏差, 结果可能是和本次选取 18S rDNA 中 V4 区间引物的特异性有关^[18]. 本研究结果中, 隐藻门生物在夏季占有一定比例, 但在冬季未检出, 这种情况可能因为隐藻门与水温有正相关的关系, 冬季水温下降, 导致隐藻门生物在冬季没有被检出^[19]. 目前一般认为硅藻门生物喜低温, 而绿藻门生物更适合温度较高的水体, 有学者对三峡水库上游长寿湖和南海湖进行研究, 冬季硅藻门相对丰度均高于绿藻门相对丰度^[20-21]. 但本研究结果却显示, 冬季巢湖西半湖绿藻门相对丰度大于硅藻门相对丰度, 导致这一结果的原因可能是对真核浮游植物丰度的检测方法不同, 高通量测序可以弥补显微镜观测可能丢失的信息, 如所检出冬季第一优势属绿藻门麦可属 (*Mychonastes*) 由于粒径较小, 难以通过显微镜观测^[22]. 张春霞等^[23] 通过高通量测序的方式对丹江口水库真核浮游植物丰度进行检测, 也出现冬季绿藻门相对丰度大于硅藻门相对丰度的现象. 浮游植物属水平下, 只有一属在夏季、冬季均达到优势属的水平, 其他单一季节优势属只在相应季节达到优势属的水平, 在其他季节不满足优势属条件, 甚至未检出. Shi 等^[24] 发现, 在特定的时

间空间下只有少数物种主导着浮游植物群落结构, 同时伴随着很多相对丰度较低的物种, 但这些相对丰度较低的物种, 一年仍有至少 1~2 次机会达到高丰度, 这与优势属变化较大相契合.

3.2 巢湖水质状况与水质评价

根据检测结果发现, 巢湖水质具有时空差异性, 巢湖西半湖靠近合肥市区, 使其接收到更多的污染物, 致使巢湖西半湖富营养化程度大于东半湖. 结果表明, 靠近合肥市区的采样点 (1~4 号) TN、NH₄⁺-N 质量浓度均值偏高. 不同季节巢湖水质有一定差异, 虽然冬季和夏季 TP、PO₄⁻-P 相近, 但冬季溶解氧含量明显高于夏季, TN、NH₄⁺-N 质量浓度均值却低于夏季, 故认为巢湖冬季水质优于夏季. 本实验夏季、冬季两次采样, TN 质量浓度均值 1.69 mg · L⁻¹, TP 质量浓度均值 0.10 mg · L⁻¹, 相对前期研究结果较低, 推测巢湖治理效果逐渐显现^[25].

群落多样性指数是反映群落结构稳定性的重要参数, 本研究选用了 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数进行对浮游植物群落表征. 其中, Shannon-Wiener 指数夏季、冬季范围分别为 1.04~2.52、1.56~2.28, Pielou 指数夏季、冬季范围分别为 0.53~0.91、0.76~0.89. 两种多样性指数均是夏季波动大于冬季, 间接表明夏季不同水域真核浮游植物群落结构差异大于冬季, 这与夏季绿藻门、硅藻门波动大于冬季相契合. 一般情况下, 浮游植物的多样性指数越大, 认为其群落结构多样性越强, 稳定性越高, 水质条件越好^[26]. 但近年来也有学者在研究中发现浮游植物多样性指数在评价水质中存在不准确的现象, 本次研究分析了两种浮游植物多样性指数对研究区域水质评价的适用性. 对于巢湖西半湖不同季节水体理化因子进行分析, 得到夏季、冬季水体理化因子具有显著性差异, 但结果中 Pielou 指数对研究区域内夏季冬季水体有区分能力, 而 Shannon-Wiener 指数对研究区域内水体区分能力较差. 有学者认为, 在大面积湖泊中经度纬度的梯度变化以及显著的区域特征会给浮游植物多样性指数带来很大的干扰^[27]. 也有学者指出, 浮游植物多样性指数除与水质相关外, 气候也会对其产生深远影响^[28]. 在诸如河流、湖泊等地理跨度大、地形复杂的生态系统中, 多样性指数能在一定程度上表现生态环境变化, 但对水质评价尚需要结合检测所得水质指标进行综合考虑^[29].

3.3 巢湖西半湖浮游植物与影响因素

浮游植物群落结构与水体理化因子的关系一直是水生态研究的重点之一,但是不同时间或相同时间的不同区域浮游生物群落结构的影响因子各不相同.本研究通过 RDA 分析和 Mantel 分析,显示浮游植物相对丰度和水体理化因子有着很好的相关性.水温一般被认为是影响浮游植物群落结构的关键因素,水温通过调节同化作用、细胞内酶的活性以及代谢速率的方式,直接或间接影响浮游植物的群落结构^[30-31].真核浮游植物生长速率受到水温影响,许多浮游植物在水温 20 °C 左右,可以达到最大生长速率^[32].pH 作为一种重要的水体理化指标,不同真核浮游植物生长繁殖对水体 pH 有着不同的要求^[33].通过 RDA 分析,pH 与绿藻门共球藻纲呈正相关,但与绿藻门绿藻纲呈负相关.调查期间,巢湖西半湖水体整体偏碱性,碱性水体有利于浮游植物吸收 CO₂,从而进行光合作用^[34].N、P 元素是真核浮游植物生长代谢必需的元素.有学者认为氮磷比(TN/TP)是营养盐结构的一个重要指标,氮磷比>10 为磷限制性状态,氮磷比<7 为氮限制性状态^[35].N 元素不足,将会导致主要光合色素 Chl.a 的含量大幅下降,并增加非光合色素的含量;P 元素不足,浮游植物增加无磷化合物的合成,导致其他化合物代替细胞膜中的磷脂^[36].NH₄⁺-N 是能够被浮游植物直接吸收利用的氮形态,NH₄⁺-N 浓度增加,对浮游植物有促进作用^[37].通过 RDA 分析得到,浮游植物各纲均与 PO₄⁻-P 浓度呈负相关,出现磷元素对真核浮游有抑制的现象.前人通过 NEB 实验^[38],发现添加磷可能出现抑制浮游植物生长的状况,与本次研究相契合.Chl.a 浓度通常可以被用来表征浮游植物生物量^[39].结果显示,夏季、冬季 Chl.a 质量浓度分别为 61.13 和 12.48 μg · L⁻¹,夏季浮游植物生物量大于冬季,说明夏季更适合浮游植物生长.本研究结果将有利于之后模型的建立、运算以及推演,促进建立水体理化因子与真核浮游植物间的互相约束关系模型,为进一步研究或调控区域水质、浮游植物群落起到正向作用.

4 结论

1)通过高通量测序,检测出巢湖西半湖夏季、冬季真核浮游植物共 7 门 71 属,其中,夏季 7 门 59 属,冬季 5 门 27 属.在门分类水平下,夏季、冬季相对丰度较高的均为绿藻门和硅藻门.夏季、冬季真核浮

游植物群落结构具有显著差异性($P=0.001$).

2)在研究期间,巢湖西半湖水体水质氮磷超标,夏季水质劣于冬季,夏季、冬季水质有显著差异性($P\leq 0.05$).Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数夏季波动大于冬季,均值夏季小于冬季,显示冬季群落结构相较于夏季更稳定.同时,Pielou 指数对研究区域内水质有一定区分能力,Shannon-Wiener 指数对研究区域内水质区分能力较差,对于巢湖西半湖水水质,建议采样生物评价结合理化指标等多种方法综合评价.

3)RDA 分析结果表明,PO₄⁻-P、TN、TP 和 NH₄⁺-N 对真核浮游植物群落解释率较大.其中,PO₄⁻-P 的影响达到显著水平($P\leq 0.05$).Mantel 相关性分析结果表明,真核浮游植物与 WT、DO、pH、NH₄⁺-N、TN 和 Chl.a 有着良好的相关性.变差分解分析结果表明,季节因素对真核浮游植物群落解释度最高.

参考文献

References

- [1] Zhang H H, Yang Y S, Liu X, et al. Novel insights in seasonal dynamics and co-existence patterns of phytoplankton and micro-eukaryotes in drinking water reservoir, Northwest China: DNA data and ecological model [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 857: 159160
- [2] McNabney D W G, Mangal V, Kirkwood A E, et al. Phytoplankton metabolite profiles from two Lake Ontario areas of concern reveal differences associated with taxonomic community composition [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 871: 162042
- [3] Tang C H, Yi Y J, Yang Z F, et al. Planktonic indicators of trophic states for a shallow lake (Baiyangdian Lake, China) [J]. *Limnologica*, 2019, 78: 125712
- [4] Severiano J D S, Almeida-Melo V L D S, Bittencourt-Oliveira M D C, et al. Effects of increased zooplankton biomass on phytoplankton and cyanotoxins: a tropical mesocosm study [J]. *Harmful Algae*, 2018, 71: 10-18
- [5] Chang C, Gao L, Wei J, et al. Spatial and environmental factors contributing to phytoplankton biogeography and biodiversity in mountain ponds across a large geographic area [J]. *Aquatic Ecology*, 2021, 55(2): 721-735
- [6] Jiang Y J, He W, Liu W X, et al. The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in a large eutrophic Chinese lake (Lake Chaohu) [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 40: 58-67
- [7] Fan Y Y, Li B B, Yang Z C, et al. Mediation of functional gene and bacterial community profiles in the sediments of eutrophic Chaohu Lake by total nitrogen and season [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 250: 233-240
- [8] Liu X M, Chen L W, Zhang G X, et al. Spatiotemporal dy-

- namics of succession and growth limitation of phytoplankton for nutrients and light in a large shallow lake[J]. *Water Research*, 2021, 194: 116910
- [9] Rao K, Zhang X, Wang M, et al. The relative importance of environmental factors in predicting phytoplankton shifting and cyanobacteria abundance in regulated shallow lakes[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 286: 117555
- [10] 王徐林, 张民, 殷进. 巢湖浮游藻类功能群的组成特性及其影响因素[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(2): 431-440
WANG Xulin, ZHANG Min, YIN Jin. Composition and influential factors of phytoplankton function groups in Lake Chaohu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(2): 431-440
- [11] 路娜, 尹洪斌, 邓建才, 等. 巢湖流域春季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 950-956
LU Na, YIN Hongbin, DENG Jiancai, et al. Spring community structure of phytoplankton from Lake Chaohu and its relationship to environmental factors[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6): 950-956
- [12] Chen Z F, Zhang Q C, Kong F Z, et al. Resolving phytoplankton taxa based on high-throughput sequencing during brown tides in the Bohai Sea, China[J]. *Harmful Algae*, 2019, 84: 127-138
- [13] Simon M, López-García P, Deschamps P, et al. Marked seasonality and high spatial variability of protist communities in shallow freshwater systems[J]. *The ISME Journal*, 2015, 9(9): 1941-1953
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- [15] 杜红春, 朱挺兵, 龚进玲, 等. 澜沧江西藏段浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(9): 1769-1777
DU Hongchun, ZHU Tingbing, GONG Jinling, et al. Phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in the Xizang reaches of the Lancang River[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(9): 1769-1777
- [16] Cavalcanti L F, Feitosa F A D N, Cutrim M V J, et al. Drivers of phytoplankton biomass and diversity in a macrotidal bay of the Amazon Mangrove Coast, a Ramsar site[J]. *Ecology & Hydrobiology*, 2022, 22(3): 435-453
- [17] 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 Zhuangzhang, ZHU Chao, TANG Ping, et al. Correlation analysis of phytoplankton community and water quality factors in Chaohu Lake[J]. *Journal of Biology*, 2023, 40(1): 79-84
- [18] 朱超, 杨晓冉, 赵彬, 等. 2017年夏季巢湖水华期间浮游植物与蓝藻毒素的时空变化特征[J]. *中国环境监测*, 2018, 34(6): 103-112
ZHU Chao, YANG Xiaoran, ZHAO Bin, et al. Spatiotemporal dynamics of phytoplankton and cyanotoxins in Chaohu Lake during summer cyanobacterial blooms of 2017[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, 34(6): 103-112
- [19] 张俊芳, 陈威, 宋以兴, 等. 雅砻江下游浮游植物群落结构时空变化特征及环境驱动因子[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(5): 950-960
ZHANG Junfang, CHEN Wei, SONG Yixing, et al. Spatiotemporal variation of phytoplankton community structure and environmental driving factors in lower reaches of Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(5): 950-960
- [20] 雷波, 刘朔孺, 张方辉, 等. 三峡水库上游长寿湖浮游藻类的季节变化特征及关键环境影响因子[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(2): 369-377
LEI Bo, LIU Shuru, ZHANG Fanghui, et al. Seasonal phytoplankton dynamics and its relationship with key environmental factors in Lake Changshou, upper reaches of the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(2): 369-377
- [21] 高静滢, 毋凡琛, 何桂豪, 等. 寒区城市湖泊浮游植物群落特征及环境驱动因子[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(6): 1-10
GAO Jingting, WU Fanchen, HE Guihao, et al. Phytoplankton community characteristics and environmental driving factors of urban lakes in cold regions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(6): 1-10
- [22] 李艳晖, 胡明明, 沈银武, 等. 中国淡水绿藻纲新记录属: 麦可属(*Mychonastes*) [J]. *水生生物学报*, 2013, 37(3): 473-480
LI Yanhui, HU Mingming, SHEN Yinwu, et al. *Mychonastes*, a new recorded genus of freshwater chlorophyceae isolated from a Chinese lake[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, 37(3): 473-480
- [23] 张春霞, 贺玉晓, 郭晓明, 等. 丹江口水库夏冬季真核浮游植物群落结构变化及其驱动因素[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(6): 110-122
ZHANG Chunxia, HE Yuxiao, GUO Xiaoming, et al. Community structure variations and driving factors of eukaryotes phytoplankton in Danjiangkou reservoir in summer and winter[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2022, 41(6): 110-122
- [24] Shi X L, Li S N, Zhang M, et al. Temperature mainly determines the temporal succession of the photosynthetic picocoeukaryote community in Lake Chaohu, a highly eutrophic shallow lake[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 702: 134803
- [25] 袁强, 余丽, 李卫华, 等. 巢湖和太湖春季微囊藻毒素动态差异及与环境因子的关系[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(2): 267-277
YUAN Qiang, YU Li, LI Weihua, et al. Dynamic differences of microcystins and their relationship with environmental factors in spring in Lake Chaohu and Lake Taihu[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(2): 267-277
- [26] 贺玉晓, 郑永坤, 李卫国, 等. 丹江口水库早春真核浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(6): 2192-2200
HE Yuxiao, ZHENG Yongkun, LI Weigu, et al. Characteristics of eukaryotic phytoplankton community structure in early spring and its relationship with environmental factors in Danjiangkou Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circ*

- cumstantiae, 2021, 41(6):2192-2200
- [27] 王世欢,张生,武蓉,等.寒旱区湖泊浮游植物特征及其对营养状态的指示作用[J].中国环境科学,2023,43(1):311-320
WANG Shihuan, ZHANG Sheng, WU Rong, et al. Characteristics of phytoplankton in cold and arid areas and their indicator of trophic status[J]. China Environmental Science, 2023, 43(1):311-320
- [28] Blois J L, Williams J W, Fitzpatrick M C, et al. Space can substitute for time in predicting climate-change effects on biodiversity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(23):9374-9379
- [29] Ding Y T, Pan B Z, Zhao G N, et al. Geo-climatic factors weaken the effectiveness of phytoplankton diversity as a water quality indicator in a large sediment-laden river [J]. Science of the Total Environment, 2021, 792:1483-1488
- [30] 钱玺亦,李金彪,敖文,等.呼伦湖浮游植物群落季节动态及其与环境因子的关系[J].湖泊科学,2022,34(6):1814-1827
QIAN Xiyi, LI Jinbiao, AO Wen, et al. Seasonal dynamics of phytoplankton and its relationship with environmental factors in Lake Hulun [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(6):1814-1827
- [31] Su X M, Steinman A D, Xue Q J, et al. Temporal patterns of phyto- and bacterioplankton and their relationships with environmental factors in Lake Taihu, China [J]. Chemosphere, 2017, 184:299-308
- [32] Abirhire O, Davies J M, Imtiaz N, et al. Response of phytoplankton community composition to physicochemical and meteorological factors under different hydrological conditions in Lake Diefenbaker [J]. Science of the Total Environment, 2023, 856:1592-1600
- [33] Kim H, Spivack A J, Menden-Deuer S. pH alters the swimming behaviors of the raphidophyte *Heterosigma akashiwo*: implications for bloom formation in an acidified ocean [J]. Harmful Algae, 2013, 26:1-11
- [34] 胡愈妍,曹亮,屈仁超,等.长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价[J].环境科学,2022,43(8):3998-4007
HU Yuxin, CAO Liang, QU Renchao, et al. Community composition and assessment of the aquatic ecosystem of periphytic algae in the Yangtze River Basin [J]. Environmental Science, 2022, 43(8):3998-4007
- [35] 宋勇军,戚菁,刘立恒,等.程海湖夏冬季浮游植物群落结构与富营养化状况研究[J].环境科学学报,2019,39(12):4106-4113
SONG Yongjun, QI Jing, LIU Liheng, et al. Eutrophication status and phytoplankton community structure in Chenghai Lake in summer and winter [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(12):4106-4113
- [36] Jiang M, Nakano S. The crucial influence of trophic status on the relative requirement of nitrogen to phosphorus for phytoplankton growth [J]. Water Research, 2022, 222:118868
- [37] 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 Qi, CHEN Yuchen, LIN Yuqing, 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
- [38] 李利强,黄代中,熊剑,等.洞庭湖浮游植物增长的限制性营养元素研究[J].生态环境学报,2014,23(2):283-288
LI Liqiang, HUANG Daizhong, XIONG Jian, et al. Nutrient limiting phytoplankton growth in Dongting Lake [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(2):283-288
- [39] Zou W, Zhu G, Xu H, et al. Elucidating phytoplankton limiting factors in lakes and reservoirs of the Chinese eastern plains ecoregion [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 318:115542

Correlation between eukaryotic phytoplankton community dynamics and physicochemical factors in western Chaohu Lake, China

ZHAO Bingbing^{1,2} ZHU Xinhao² ZHANG Hua^{1,2} WANG Jinhua^{1,2}

HUANG Jian^{1,2} XI Shanshan^{1,2} LUO Tao² PENG Wei²

1 Anhui Institute of Ecological Civilization, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China

2 School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China

Abstract Phytoplankton is a major participant in the material and energy cycles of lake ecosystems, and the information of its community structure is of great significance in coping with and regulating lake ecosystems. In this study, the community characteristics of eukaryotic phytoplankton in the western Chaohu Lake in winter and summer were obtained via high-throughput sequencing. A total of 7 phyla and 71 genera of eukaryotic phytoplankton were detected during the survey, including 7 phyla and 59 genera in summer and 5 phyla and 27 genera in winter, dominated by Chlorophyta and Bacillariophyta, and the dominant genera varied greatly in winter compared with those in summer.

The mean values of Shannon-Wiener index in summer and winter were 1.83 and 1.88 respectively, and the Pielou index were averaged 0.75 and 0.83 for summer and winter respectively. The results of water quality analysis indicated that TN and TP were relatively high in the western Chaohu Lake during the study period, and the physicochemical factors of the water body varied significantly between summer and winter ($P \leq 0.05$). Redundancy analysis showed that the eukaryotic phytoplankton community can be roughly explained by PO_4^- -P, TN, TP and NH_4^+ -N, especially the PO_4^- -P ($P \leq 0.05$). Mantel correlation analysis showed a close correlation between eukaryotic phytoplankton abundance and WT, DO, pH, NH_4^+ -N, TN and Chl.a. Variance partitioning analysis showed that seasonal factors explained most of the eukaryotic phytoplankton community dynamics.

Key words high-throughput sequencing; western Chaohu Lake; eukaryotic phytoplankton; physicochemical factors