

DOI:10.14188/j.ajsh.2021.06.001

城市新建景观湖泊浮游植物群落结构及其与环境因子的关系

李诗琦^{1,2}, 李 为^{1*}, 郭 超^{1,2}, 买 占^{1,2}, 廖传松¹, 刘家寿¹, 葛炫辰³, 尹文文³, 范宇涛³

(1. 中国科学院水生生物研究所 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 南通创新区管理办公室, 江苏 南通 226000)

摘要: 2019年对南通市中央创新区新建湖泊紫琅湖的浮游植物进行了4个季度的调查,旨在研究典型城市新建景观湖泊的浮游植物群落结构特征及其与环境因子关系。紫琅湖全年共鉴定出浮游植物种类7门186种,春季种类数最多,共6门113种,其中蓝藻门(Cyanophyta)占17.7%,绿藻门(Chlorophyta)占19.5%,硅藻门(Bacillariophyta)占39.8%;夏季种类数最少,共7门43种,其中蓝藻门占32.6%,绿藻门占30.2%,硅藻门占16.3%;冬季和春季则硅藻种类多。从丰度来看,各季节浮游植物组成均以蓝藻为主,冬、夏、秋季蓝藻的丰度分别为 $(26.81 \pm 6.70) \times 10^6$ ind./L、 $(12.77 \pm 1.02) \times 10^6$ ind./L和 $(31.99 \pm 10.23) \times 10^6$ ind./L,显著高于其他藻类($P < 0.05$)。典范对应分析(CCA)表明透明度、pH、总磷和浊度是与浮游植物群落相关性较强的4个环境因子,其中透明度是最主要的环境因子。冬季和春季浮游植物主要与透明度正相关,夏季主要与总磷和浊度呈正相关,秋季主要与pH呈正相关。紫琅湖的浮游植物优势类群以蓝藻门为主,其中伪鱼腥藻(*Pseudoanabaena* sp.)为全年唯一的优势藻类(优势度指数分别为 $Y_{冬}=0.66$, $Y_{春}=0.10$, $Y_{夏}=0.16$, $Y_{秋}=0.26$)。综合营养指数表明湖泊处于轻度富营养水平,浮游植物多样性水质评价表明夏季水体污染相对严重。城市新建景观湖泊紫琅湖营养水平较高、透明度低、浮游植物群落结构波动大,暴发蓝藻水华的可能性较高,研究结果可为城市新建景观湖泊水质改善和健康生态系统的构建提供科学依据。

关键词: 新建湖泊;浮游植物;群落结构;环境因子;生态系统构建

中图分类号: S932.7

文献标志码: A

文章编号: 2096-3491(2021)06-0535-10

Phytoplankton community structure and its relationships with environmental factors in a new urban landscape lake

LI Shiqi^{1,2}, LI Wei^{1*}, GUO Chao^{1,2}, MAI Zhan^{1,2}, LIAO Chuansong¹, LIU Jiashou¹, GE Xuanchen³,
YIN Wenwen³, FAN Yutao³

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, Hubei, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Management Office of Nantong Innovation Zone, Nantong 226000, Jiangsu, China)

Abstract: To study the phytoplankton community structure and its relationship with environment of newly built urban lakes, we used Zilang Lake as a model ecosystem and conducted a seasonal investigation in 2019. We found that there were a total of 186 species of phytoplankton from 7 phyla in Zilang Lake. The species number was the most in

收稿日期: 2021-09-17 修回日期: 2021-11-05 接受日期: 2021-11-29

作者简介: 李诗琦(1994-),男,硕士,研究方向:渔业生态。E-mail: lishiqi@ihb.ac.cn

*通讯联系人: 李为(1983-),男,副研究员,研究方向:渔业生态与水产增养殖。E-mail: liwei@ihb.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0900601);国家大宗淡水鱼产业技术体系项目(CARS-45);中国科学院青年创新促进会人才项目(2019331)和南通市中央创新区紫琅湖生态水处理项目

引用格式: 李诗琦, 李为, 郭超, 等. 城市新建景观湖泊浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生物资源, 2021, 43(6): 535-544.

Li S Q, Li W, Guo C, et al. Phytoplankton community structure and its relationships with environmental factors in a new urban landscape lake [J]. Biotic Resources, 2021, 43(6): 535-544.

spring (6 phyla, 113 species), among which Cyanophyta accounted for 17.7%, Chlorophyta 19.5%, and Bacillariophyta 39.8%. The species number was the least in summer (7 phyla, 43 species), among which Cyanophyta accounted for 32.6%, Chlorophyta 30.2% and Bacillariophyta 16.3%. There were many diatoms in winter and spring, and many blue-green algae in summer and autumn. The abundance of cyanobacteria was $(26.81 \pm 6.70) \times 10^6$ ind./L, $(12.77 \pm 1.02) \times 10^6$ ind./L and $(31.99 \pm 10.23) \times 10^6$ ind./L in winter, summer and autumn, respectively, significantly higher than that of other algae ($P < 0.05$). CCA analysis showed that transparency, pH, total phosphorus and turbidity were four environmental factors strongly correlated with phytoplankton community, among which transparency was the most important environmental factor. The structure of phytoplankton was positively correlated with transparency in winter and spring, with total phosphorus and turbidity in summer, and with pH in autumn. The dominant alga species in the newly built lake were mainly cyanobacteria, among which *Pseudoanabaena* sp. was the only year-round dominant algae ($Y_{\text{Winter}} = 0.66$, $Y_{\text{Spring}} = 0.10$, $Y_{\text{Summer}} = 0.16$, $Y_{\text{Autumn}} = 0.26$). Comprehensive nutrient index showed that the lake was in a mild eutrophication level, and the evaluation of phytoplankton diversity showed that the water pollution level was relatively serious in summer. Our study indicates that the blue-green algae bloom easily in new-built urban landscape lakes, with higher nutrient level, lower transparency and vulnerable phytoplankton community. The results can provide scientific basis for improving water quality and constructing healthy ecosystem in newly built urban landscape lakes.

Key words: newly built lake; phytoplankton; community structure; environment factor; ecosystem construction

0 引言

浮游植物是水生态系统的初级生产者,是水域食物网中能量流动、物质循环和信息传递的基础^[1]。同时,浮游植物群落易受外界环境变化的影响,与水生态环境因子之间具有复杂的相互作用关系^[2,3],其群落结构特征能够反映一定时期水环境的时空变化,常用来作为水环境健康程度的一种生物评价指标^[4,5]。随着我国城镇化建设的不断加快,一些城市的水污染、水资源短缺、城市生态服务功能衰退等问题日趋严重^[6],在城市中新建湖、库水体成为此类问题的重要应对措施^[7]。然而,新建水体通常生态系统结构不完善,自我调节能力差,在营养盐的短时间波动下容易发生水华现象,不仅影响湖泊景观效果,影响水质质量,对水生态系统及人类健康也会构成严重威胁^[8]。因此,适时监测和分析城市新建湖泊浮游植物群落结构及相关环境因子变化,及时评价水质健康程度,针对性地提出水质改善和健康生态系统构建的方案,对促进这类新建水生态系统良性循环具有重要意义。

南通市地处江苏东南部,近5年其经济高速发展,为了构建与经济发展相适应的生态环境优美、宜居宜业的创新花园城,南通市中央创新区于2018年10月新建城市景观水体——紫琅湖,作为新建的人工湖泊,由于其生态系统刚刚建立,对其生态系统结构和水环境特征还没有深入了解。本研究拟通过调查分析紫琅湖蓄水初年浮游植物群落结构和水质的周年动态变化特点,探究浮游植物群落结构特征与环境因子的关系,旨在从浮游植物角度对新建水体

水环境进行科学评价,为城市新建景观湖泊水质改善和景观效应提升提供基础数据资料。

1 材料与方法

1.1 研究区域与采样点

紫琅湖(N31°57'55", E120°55'40")位于江苏省南通市中央创新区南部,占地面积约800亩,平均水深2.5 m,有效库容110万m³。作为中央创新区“一湖七横三纵”水系的核心节点,紫琅湖周边连通水系众多,主要引水来源为南通市第一运河——通吕运河。本研究依据湖泊的形态特征及采样的可行性等特点,在紫琅湖设置4个采样点S1(N31°58'03", E120°56'01")、S2(N31°57'49", E120°55'57")、S3(N31°57'33", E120°55'51")和S4(N31°57'26", E120°55'60") (图1)。采样时间为2019年1月(冬季)、2019年4月(春季)、2019年7月(夏季)和2019年10月(秋季)。

1.2 样本的采集与检测

1.2.1 浮游植物的采集与鉴别

浮游植物样品的采集参考《湖泊生态调查观测与分析》^[9],分别采集定性和定量样品。采集定性样品时,采用25号浮游生物网(孔64 μm)在水面下0.5 m处作“∞”形循环拖动,约3~5 min后将网慢慢提起,将浓缩的水样装入100 mL聚乙烯标本瓶中,取样约30~50 mL,用1%~1.5%样品体积的鲁哥氏液固定。定量样品则用有机玻璃采水器在水下0.5 m处采集水样,收集至1 L聚乙烯样品瓶中,加入10 mL鲁哥氏液充分摇匀固定,在实验室内静置48 h后浓缩至30 mL。藻类种类鉴定参考《中国淡

水藻类-系统、分类及生态》^[10]和《淡水微型生物图谱》^[11]。定量样品用0.1 mL浮游生物计数板在显微镜下通过视野计数法计数并计算密度和生物量^[12]。

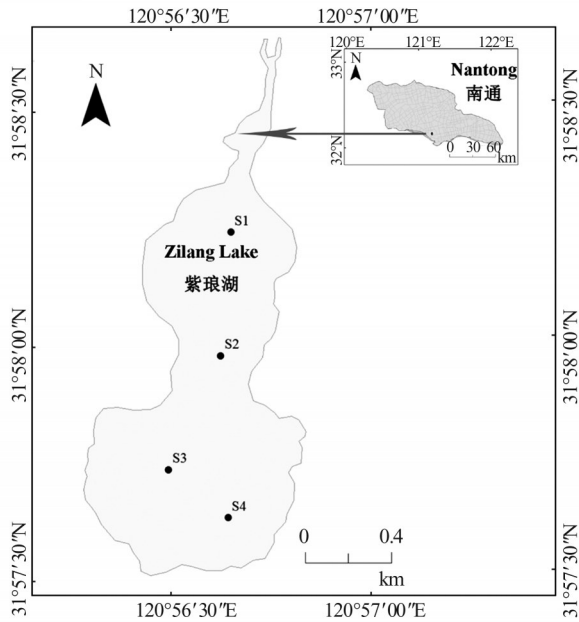


图1 紫琅湖位置及采样点

Fig. 1 Location and sampling sites of Zilang Lake

1.2.2 水质理化参数的测定

采集每个样点的浮游植物的同时,测定相应的环境参数水质理化指标。现场用SM-5便携式测深仪测定水深(WD),赛氏透明度盘测定透明度(SD),HACH 2100Q浊度仪测定浊度(TUR),YSI Pro-Plus(Yellow Spring Inc.,美国)便携式多参数水质分析仪测定水温(WT)、溶解氧(DO)和pH。然后用5 L采水器取中层水样,注入用湖水涮洗过的1 L塑料瓶密封保存,带回实验室测定总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和叶绿素a(Chl. a)。TP、TN、 NH_4^+-N 和 COD_{Mn} 的测定按照《水和废水监测分析方法——第四版》^[13]相关标准方法进行,Chl. a测定采用丙酮萃取法。比色仪器采用WFZ UV-2000型分光光度计。

1.3 数据处理方法

1.3.1 多样性指数和优势度

运用Shannon-Wiener物种多样性指数(H')和Margalef物种丰富度指数(D)对浮游植物生物多样性进行评价^[14],并计算浮游植物优势度(Y),各参数计算公式如下:

$$(1) H' = -\sum (P_i \ln P_i)$$

$$(2) D = (S-1)/\ln N$$

$$(3) Y = (N_i/N) f_i$$

式中, N_i 为群落中第*i*种的个体数; N 为群落中所有物种数量; P_i 为群落中第*i*种个体数的比例,即 $P_i = N_i/N$;S为群落中物种种类数量, f_i 为第*i*种在各点出现的频率,以 $Y > 0.02$ 作为优势种^[15]。

1.3.2 综合营养状态指数

营养程度评价方法采用《地表水环境质量评价技术规范》中的综合营养状态指数(即相关加权营养状态指数TLI)方法,选取Chl. a、TP、TN、SD、 COD_{Mn} 5个指标,该方法以修正的卡尔森营养状态指数为基础,以叶绿素a的状态指数为基准,计算公式如下:

$$(4) \text{TLI}(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot \text{TLI}(j)$$

$$(5) W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2}$$

式中:TLI(Σ)为综合营养状态指数; W_j 为第*j*种参数的营养状态指数的相关权重;TLI(*j*)为代表第*j*种参数的营养状态指数; r_{ij} 为第*j*种参数与基准参数Chl. a的相关系数; m 为评价参数的个数。Chl. a单位为 mg/m^3 ,SD单位为m,其他项目单位均为 mg/L 。分级标准为:TLI<30时水体营养状况为贫营养、 $30 \leq \text{TLI} \leq 50$ 时为中营养、 $50 < \text{TLI} \leq 60$ 时为轻度富营养、 $60 < \text{TLI} \leq 70$ 时为中度富营养、TLI>70时为重度富营养。

1.3.3 浮游植物群落与环境因子的相关关系

采用CANOCO 5.0分析浮游植物物种丰度和环境因子的关系之前,先进行除趋势对应分析(DCA),若排序轴长度(lengths of gradient)最大值超过4,则选择典范对应分析(CCA)进行后续分析;若小于3,则选择冗余分析(RDA)分析^[16]。DCA分析显示四个轴中梯度长度最大值为3.3,在此选择CCA进一步对浮游植物丰度与环境因子之间的关系进行分析。为保证数据的正态性,所有数据均做 $\log(X+1)$ 转换^[17]。参与分析的环境因子包括SD、WT、DO、pH、TRU、TN、TP、COD、 NH_4^+-H 、Chl. a,参与分析的物种为各季节的优势种($Y \geq 0.02$)的丰度^[18]。数据处理分析、图表绘制分别使用SPSS 23.0和Origin 2021。

2 结果与分析

2.1 理化参数及营养状态

紫琅湖的SD、WT、DO、pH值和 NH_4^+-N 随季节变动较大,各季节差异显著(ANOVA, $P < 0.05$),SD由冬季到秋季呈现下降趋势,秋季DO和pH值最高;夏秋季节浊度显著高于冬春季节($P < 0.05$),

TN在冬季最高,TP在秋季最高,Chl. a含量夏季最高,但是各季节差异不显著($P>0.05$),整体处于较高水平(表1)。紫琅湖蓄水初期各点位综合营养状态指数变动于53.67~60.49,整体处于轻度富营养水平(表2)。

2.2 浮游植物种类组成

紫琅湖共鉴定出浮游植物种类7门186种,其中蓝藻门(Cyanophyta)占20.4%,绿藻门(Chlorophyta)占26.9%,硅藻门(Bacillariophyta)占32.8%,裸藻门(Euglenophyta)占7.5%,隐藻门(Cryptophyta)占5.4%,甲藻门(Pyrroptata)占5.4%,金藻门(Chrysophyta)占1.6%。1月(冬季)共鉴定出浮游植物种类5门66种,其中蓝藻门种类占19.70%,绿藻门占28.79%,硅藻门占40.91%,裸藻门占6.06%,

隐藻门占4.54%;4月(春季)鉴定出共6门113种,其中蓝藻门占17.70%,绿藻门占19.47%,硅藻门占39.82%,裸藻门占9.73%,隐藻门占7.08%,甲藻门占6.20%;7月(夏季)共鉴定出7门43种,其中蓝藻门占32.56%,绿藻门占30.23%,硅藻门占16.28%,裸藻门占6.98%,隐藻门、甲藻门和金藻门各占4.65%;10月(秋季)共鉴定出7门65种,其中蓝藻门占24.62%,绿藻门占36.92%,硅藻门占21.54%,裸藻门、甲藻门和金藻门各占4.61%,隐藻门占3.08%。冬春季节硅藻种类占有较大比例,夏秋季节蓝绿藻种类占有较大比例(图2)。

2.3 浮游植物丰度和生物量

2019年4个季节紫琅湖浮游植物的平均丰度为 $(26.61\pm15.46)\times10^6$ ind./L,秋季丰度最高,为

表1 2019年紫琅湖四个季节的水质理化参数

Table 1 Physicochemical parameters of water quality in four seasons of Zilang Lake in 2019

季节	水深/ cm	透明 度/cm	水温/℃	溶解氧/ mg·L ⁻¹	pH	浊度 (NTU)	总氮(TN)/ mg·L ⁻¹	总磷(TP)/ mg·L ⁻¹	COD/ mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/ mg·L ⁻¹	Chl.a/ ug·L ⁻¹
冬季	235± 38	72±2 ^a	6.5± 0.1 ^d	12.62± 0.18 ^b	8.61± 0.03 ^c	8.35± 0.30 ^c	1.23±0.05 ^a	0.041± 0.004 ^b	6.85± 0.73 ^{ab}	1.09± 0.11 ^a	49.68± 2.41
春季	206± 14	59±2 ^b	22.3± 0.1 ^b	7.85± 0.50 ^d	7.46± 0.18 ^d	11.46± 1.52 ^{bc}	0.64±0.14 ^b	0.034± 0.005 ^b	7.38± 0.12 ^{ab}	0.26± 0.03 ^c	43.02± 5.43
夏季	286± 50	48±2 ^c	29.7± 0.5 ^a	9.70± 0.53 ^c	8.88± 0.02 ^b	18.30± 3.70 ^a	0.69±0.19 ^b	0.069± 0.010 ^a	6.33± 0.36 ^b	0.05± 0.02 ^d	51.49± 9.17
秋季	280± 43	39±3 ^d	21±0.7 ^c	18.96± 0.92 ^a	9.70± 0.16 ^a	14.95± 1.67 ^{ab}	0.64±0.02 ^b	0.047± 0.007 ^b	7.767± 0.49 ^a	0.55± 0.08 ^b	39.12± 3.54

注:同一列数据上标标注有不同字母代表有显著性差异

Note: data labeled with different letters mean significant differences

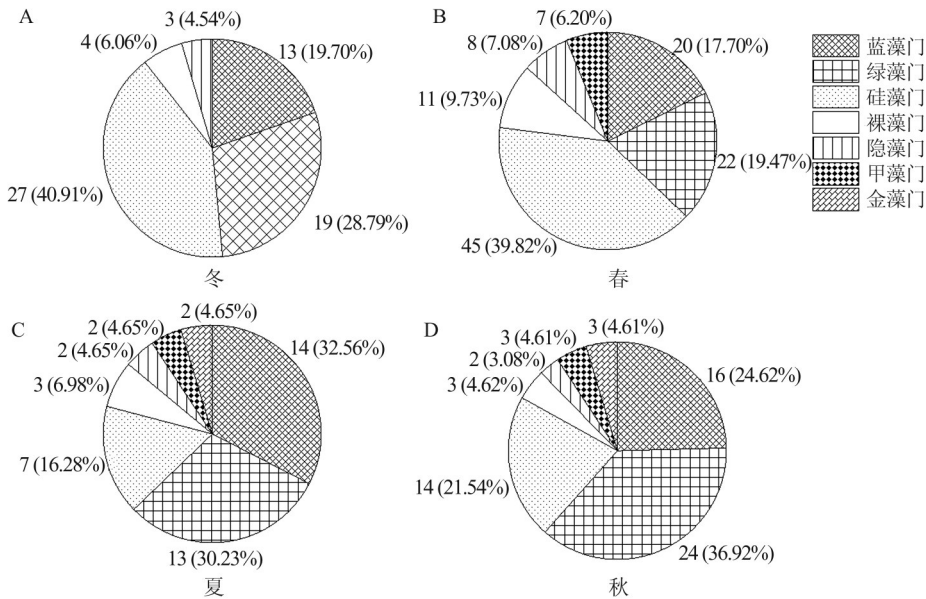


图2 紫琅湖各季节浮游植物种类组成

Fig. 2 Species composition of phytoplankton in each season of Zilang Lake

表2 紫琅湖不同采样点综合营养状态指数
Table 2 Comprehensive trophic state index in each sampling point of Zilang Lake

指数	冬季	春季	夏季	秋季
TLI _m	59.22	54.43	57.31	56.96
营养状况	轻度富营养	轻度富营养	轻度富营养	轻度富营养

(45.16 ± 8.03) $\times 10^6$ ind./L, 春季丰度最低, 为(8.15 ± 4.97) $\times 10^6$ ind./L, 冬季和夏季丰度分别为(34.45 ± 7.89) $\times 10^6$ ind./L 和(18.34 ± 1.69) $\times 10^6$ ind./L。各季节蓝藻的丰度都明显大于其他藻类丰度, 冬季、夏季和秋季差异均达到显著水平($P < 0.05$)。冬季蓝藻丰度为(26.81 ± 6.70) $\times 10^6$ ind./L, 春季蓝藻丰度为(4.99 ± 4.21) $\times 10^6$ ind./L, 夏季蓝藻丰度为(12.77 ± 1.02) $\times 10^6$ ind./L, 秋季蓝藻丰度为(31.99 ± 10.23) $\times 10^6$ ind./L。秋冬季蓝藻丰度高于春夏季节, 不同采样点间的蓝藻门丰度有较大差异, 这可能因为是新建水体, 刚引水进来, 水流缓, 营养盐也高, 而且秋季藻类比较高, 秋冬换季时仍有藻类剩余。生物量的变化趋势与丰度一致, 秋季总生物量最高, 为(54.09 ± 15.70) mg/L, 春季总生物量最低, 为(8.45 ± 2.40) mg/L, 全年平均生物量为(27.16 ± 16.68) mg/L, 详见图3。

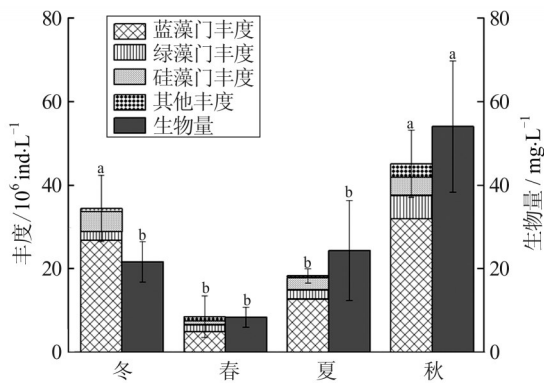


图3 紫琅湖浮游植物丰度和生物量的季节变化
Fig. 3 Seasonal changes of phytoplankton abundance and biomass of Zilang Lake

注:不同字母表示季节间存在显著性差异
Note: different letters above bars mean significant differences between seasons

2.4 浮游植物优势种

冬季紫琅湖优势种为蓝藻门的弯形尖头藻(*Raphidiopsis curvata*)、伪鱼腥藻(*Pseudoanabaena* sp.)和硅藻门的翼状茧形藻(*Amphiprora alata*);春季优势种为蓝藻门的弯形尖头藻、伪鱼腥藻、针状蓝纤维藻(*Dactylococcopsis acicularis*)、微小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*)、绿藻门的四尾栅藻

(*Scenedesmus quadricauda*)、硅藻门的翼状茧形藻(*Amphiprora alata*)和隐藻门的卵形隐藻(*Cryptomonas ovata*);夏季优势种为蓝藻门的伪鱼腥藻、泽丝藻(*Limnothrix* sp.)、鞘丝藻(*Lyngbya* sp.)、浮丝藻(*Planktothrix* sp.)、小尖头藻(*Raphidiopsis* sp.)、绿藻门的并联藻(*Quadrigula* sp.)、硅藻门的舟形藻(*Navicula* sp.)、小环藻(*Cyclotella* sp.)和扁圆卵形藻(*Coccooneis placentula*);秋季优势种为蓝藻门的伪鱼腥藻、泽丝藻、鞘丝藻、浮丝藻、小尖头藻、尖头藻(*Riphiidiopsis* sp.)、拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis* sp.)、绿藻门的栅藻(*Scenedesmus* sp.)、硅藻门的舟形藻、小环藻、隐藻门的尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*)和金藻门的小金色藻(*Chromulina* sp.)。各季节优势种以蓝藻为主,且蓝藻门中伪鱼腥藻为全年优势种(表3)。

2.5 浮游植物多样性变化及水质评价

对不同季节浮游植物多样性结果分析(表4),紫琅湖不同季节浮游植物的Shannon-Wiener物种多样性指数(H')由高到低分别为春季(3.85)>秋季(3.08)>夏季(2.73)>冬季(1.90),评价结果表明春季无污染,秋季轻污染,夏冬季节为中污染;Margalef物种丰富度指数(D')由高到低分别为春季(6.61)>冬季(3.68)>秋季(3.36)>夏季(2.28),评价结果表明夏季为 β -中污型,其余各季节为无污染型。春季浮游植物群落结构较稳定,水质状况较好,夏季浮游植物多样性较低,水质污染较为严重。

2.6 浮游植物群落结构与环境因子的关系

CCA分析表明,与紫琅湖浮游植物群落结构相关性较强的环境因子分别为SD($F=11.8, P=0.002$)、TP($F=4.9, P=0.004$)、pH($F=4.3, P=0.002$)、TUR($F=2.6, P=0.004$),其中SD是最相关的环境因子。前两轴共同解释了68.2%浮游植物物种演替和89.1%浮游植物物种-环境变化关系的内容。第一轴中物种-环境的相关系数为0.995,第二轴中为0.892,且各环境因子排序轴之间的相关系数为0,表明了CCA分析结果能够较好地反映出浮游植物群落结构与主要环境因子之间的相关关系。

紫琅湖16个样点可以划为4组,样点在聚类上具有明显的季节性。相似性分析(analysis of similarities, ANOSIM)表明, $R=0.901, P=0.001$,表明样品在季节间分组差异显著(图4)。主要环境指标主要与第一轴呈现较强相关性,SD与第一轴呈正相关,TP、pH和TUR呈负相关。不同季节的样点在第一轴和第二轴上具有明显的分化,且与浮游植物群落结构相关性较强的环境因子在各季节是不同

表3 各季节浮游植物优势种及优势度(Y)
Table 3 Dominant species and dominant degree (Y) of phytoplankton in different seasons

门类	种类	冬		春		夏		秋		简称
		f_i	Y	f_i	Y	f_i	Y	f_i	Y	
蓝藻门	弯形尖头藻(<i>Raphidiopsis curvata</i>)	1	0.02	1	0.02					Cya1
	伪鱼腥藻(<i>Pseudanabaena</i> sp.)	1	0.66	0.5	0.10	1	0.16	1	0.26	Cya2
	针状蓝纤维藻(<i>Dactylococcopsis acicularis</i>)	1	0.01	1	0.04			1	0.00	Cya3
	微小平裂藻(<i>Merismopedia tenuissima</i>)	0.25	0.00	1	0.17					Cya4
	泽丝藻(<i>Limnothrix</i> sp.)					1	0.14	1	0.14	Cya5
	鞘丝藻(<i>Lyngbya</i> sp.)					1	0.15	1	0.05	Cya6
	浮丝藻(<i>Planktothrix</i> sp.)					1	0.14	1	0.05	Cya7
	小尖头藻(<i>Raphidiopsis</i> sp.)					1	0.04	1	0.11	Cya8
	尖头藻(<i>Riphidiopsis</i> sp.)					1	0.01	1	0.06	Cya9
	拟柱孢藻(<i>Cylindrospermopsis</i> sp.)					0.75	0.00	1	0.02	Cya10
绿藻门	四尾栅藻(<i>Scenedesmus quadricauda</i>)	0.25	0.00	0.75	0.04					Chl1
	并联藻(<i>Quadrigula</i> sp.)					1	0.04	0.5	0.00	Chl2
	栅藻(<i>Scenedesmus</i> sp.)					0.25	0.00	1	0.03	Chl3
硅藻门	翼状蜚形藻(<i>Amphiprora alata</i>)	1	0.03	1	0.01					Bac1
	梅尼小环藻(<i>Cyclotella meneghiniana</i>)	0.5	0.01	1	0.03			1	0.01	Bac2
	舟形藻(<i>Navicula</i> sp.)					1	0.06	1	0.02	Bac3
	小环藻(<i>Cyclotella</i> sp.)	1	0.01	0.5	0.00	1	0.03	1	0.03	Bac4
	扁圆卵形藻(<i>Cocooneis placentula</i>)			0.25	0.00	0.75	0.04	0.75	0.00	Bac5
隐藻门	卵形隐藻(<i>Cryptomonas ovata</i>)	1	0.01	1	0.03					Cry1
	尖尾蓝隐藻(<i>Chroomonas acuta</i>)			0.25	0.00	0.25	0.00	1	0.03	Cry2
金藻门	小金色藻(<i>Chromulina</i> sp.)					0.5	0.00	1	0.02	Chr1

注:空格部分表示藻类在此季节未出现; f_i 为第*i*种在各点位出现的频率
Note: blanks mean algae were not present in this season; f_i is the frequency of the *i* at each point

表4 紫琅湖浮游植物的多样性变化
Table 4 Seasonal variation of phytoplankton diversity of Zilang Lake

季节	多样性		丰富度	
	H'	评价结果	D	评价结果
冬	1.90	中污染	3.68	无污染
春	3.85	无污染	6.61	无污染
夏	2.73	中污染	2.28	β-中污染
秋	3.08	轻污染	3.36	无污染

的。冬季和春季样点主要集中在第一、四象限,浮游植物群落与SD呈正相关;夏季样点集中在第二象限,浮游植物群落与TP和TUR呈正相关,秋季样点主要集中在第三象限,与pH呈明显正相关。

参与分析的优势藻类中,蓝藻门中弯形尖头藻、针状蓝纤维藻和微小平裂藻丰度与SD呈明显的正相关,与pH、TUR和TP有一定负相关,伪鱼腥藻丰

度与各环境指标相关性不大,其余蓝藻种类基本均与pH、TUR和TP呈正相关(浮丝藻与TP为负相关)。绿藻门中四尾栅藻与SD呈明显正相关,并联藻主要与TP呈正相关,栅藻主要与pH呈正相关。硅藻门中翼状蜚形藻和梅尼小环藻与SD呈正相关,其余与pH、TUR和TP呈一定正相关。硅藻门中卵形隐藻与SD呈正相关,尖尾蓝隐藻与pH呈明显负相关。小金色藻与pH、TUR和TP呈正相关,与SD呈负相关(图5)。

3 讨论
3.1 浮游植物群落结构的特征变化

紫琅湖蓝藻和绿藻在水温较高的夏秋季节种类百分比比较高,而硅藻与之相反,在水温较低的冬春季节占比较高。在夏秋季节,虽然蓝绿藻种类数差别不大,但是蓝藻的丰度远大于绿藻,且在所有藻类中

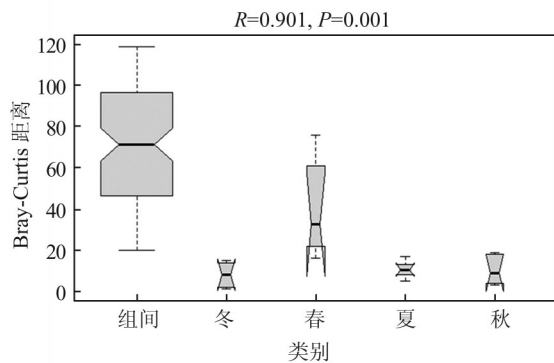


图4 相似性分析结果

Fig. 4 The results of ANOSIM

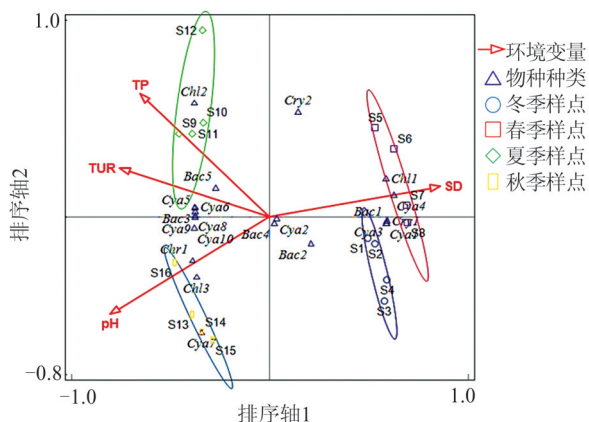


图5 物种-环境相互关系的典范对应分析排序图

Fig. 5 CCA ordination of the species-environment relationship

占有较大比例;在冬春季节,蓝藻丰度比例下降,硅藻比例上升,但蓝藻仍是优势门类。蓝藻由于其特殊的生理构造,易于在高温季节大量繁殖占据空间和营养生态位,而在低温季节,随着蓝藻的衰亡,喜低温的绿藻和硅藻种群易于扩增成为主要类群,国内一些典型富营养化或者有富营养化趋势的湖泊、水库藻类的群落结构便具有以上特点^[19~22]。紫琅湖藻类组成的季节变化有些不同,秋冬季节蓝藻丰度明显高于夏季。这可能与紫琅湖作为新建水体,在初期生态系统不完善,易受到外界营养盐输入(如施工)和交换水等人为因素干扰。但紫琅湖作为富营养化相对较高水体,仍具有蓝藻为主要藻类群体的特点。对于水质评价较好、污染程度较小的水体,大多各季节藻类密度和生物量相对较低,以硅藻和绿藻组成为主^[23~25],水温较高的地区在夏季偶尔也会出现以蓝藻为主的现象^[26]。蓝藻是我国受污染湖库中水华暴发的主要贡献者,在适宜的水温、光照、水流等条件下^[27],富营养化水体容易形成蓝藻水华,紫琅湖水体作为新建的水生态系统,浮游植物对环境适应能力的差异性会加速单一蓝藻水华暴发的风

险。整体来看,作为新建人工湖泊,紫琅湖初期浮游植物群落结构变化规律为冬春季节的硅藻和绿藻比例上升,但整体仍以蓝藻为主,受人为干扰因素和新建水体生态系统完整性较差特点的影响,浮游植物的转变规律与 Sommer 等提出的中营养水体 PEG (planktonecology group)模型略有差异^[28]。

3.2 浮游植物群落结构与环境因子的相互关系

由于水体生态系统中包含其特有的生物环境和非生物因子,受生物与非生物之间的相互作用、生物之间的上下行效应的影响,不同环境条件下生物的群落结构通常具有异质性^[3,29],浮游植物种类对环境具有选择适应性,不同时空条件下其种类组成具有独特特点,对环境变化特别是营养盐水平的改变具有指示作用^[30],可以通过浮游植物反应水质状况^[31],如在富营养水体或者生态系统结构单一、物质能量转化较差的水体,往往形成蓝藻水华^[32],在清洁的水体多以清洁型种类为主^[33],如硅藻适宜生活在较为温暖、透明度高、营养盐频繁波动的水体^[34]。

本研究中,紫琅湖不同季节间的浮游植物群落结构显著不同,这说明紫琅湖不同季节的浮游植物群落结构受到水环境因子季节变化的显著影响。长江中下游湖库四季水温变化明显,水温是生物代谢活动的驱动因子,往往是影响浮游植物群落结构的主要环境因子^[17,20,35]。但是,决定紫琅湖浮游植物群落结构的主要环境指标为SD、TP、pH和TUR,水温的影响效果较小,这可能与湖泊新建初期生态系统结构单一,水体初期理化与生物因素对水体的变动影响较大有关。

紫琅湖蓝藻在各季节中都有明显优势种,伪鱼腥藻在各季节都是明显优势种,与主要环境指标相关性不高,表现出极强的繁殖适应能力,这可能是环境指标均满足其生长阈值有关,如TP和TN主要营养水平均达到其生长要求,伪鱼腥藻已处于最佳繁殖水平。中弯形尖头藻、针状蓝纤维藻和微小平裂藻作为冬春季节的优势种,其丰度与SD呈明显正相关,与pH、TUR和TP有一定负相关。其余蓝藻门种类,如泽丝藻与上述变化规律相反。蓝藻种类多样性变化说明新建初期水体营养水平高,生态位较为充足,绝对优势种伪鱼腥藻对其他藻类种类的竞争抑制作用较小,呈现出“共同繁殖”现象。对乌梁素海的研究发现,蓝藻主要与湖泊TP分布有密切关系^[36]。有研究显示DO、Chl. a和TP是影响白洋淀春季浮游植物空间分布的重要因子^[22]。有学者总结得出SD、TP和捕食是影响华盛顿湖浮游植物分布的主要因子^[37],本研究得出影响浮游植物

变动的主要环境指标为SD、TP、TUR和pH,TP作为主要营养控制因子,与上述结论相同。而也有相关研究得出在TN和TP营养盐影响因子中,TN为主要的影因子^[1,14,38,39]。也有针对浮游植物群落结构变化的多年研究表明,TN、TP与浮游植物群落变动无显著关系^[40]。TP和TN的影响作用差异与外界污染源干扰、水体内物质循环有关。紫琅湖作为城市新建景观湖泊,水源较差、底质不稳定、湖泊岸带周边较多工程施工,导致湖泊水体的透明度、浊度波动较大,浮游植物群落结构不稳定,这些现象是新建水体生态系统易于出现的问题,也是富营养化水体常伴随的现象^[41,42]。本研究结果表明,对于此类城市中新建的景观湖泊,通过控制紫琅湖内源营养负荷、优化鱼类群落结构、构建沉水植物群落,降低浮游植物丰度和生物量,提高多样性,是降低水华暴发风险的重要基础。

通过对长江中下游城市新建景观湖泊紫琅湖初期的浮游植物与水质的周年调查分析表明:①紫琅湖整体处于轻度富营养化状态,浮游植物群落组成以蓝藻、绿藻和硅藻为主,夏秋季节蓝藻占主要比例,且以水华藻类伪鱼腥藻等为主,存在较大水华爆发的风险。②浮游植物的群落结构具有季节特异性,主要的影响因子为SD、TP、pH和TUR,其中SD为主要的物理影响因子,TP为主要的营养盐影响因子。③作为新建湖泊,紫琅湖生态系统结构简单、稳定性差,建议在进一步摸清鱼类、底栖动物、浮游动物以及沉水植物等重要生物类群变化规律的基础上优化紫琅湖生态系统结构。

参考文献

- [1] 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]. Lake Sci, 2019, 31(5): 1320-1333.
- [2] 武士蓉,徐梦佳,赵彦伟,等. 白洋淀湿地水质与水生物相关性研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(11): 3160-3165.
- Wu S R, Xu M J, Zhao Y W, *et al.* Correlation between water quality and aquatic life in Baiyangdian wetland [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(11): 3160-3165.
- [3] 杨潇,马吉顺,张欢,等. 鄱阳湖不同水文期浮游生物群落结构特征和影响因素及水质评价[J]. 水生生物学报, 2021, 45(5): 1093-1103.
- Yang X, Ma J S, Zhang H, *et al.* Community structure and the water quality during different hydrological periods in Poyang Lake [J]. Acta Hydrobiologia Sinica, 2021, 45(5): 1093-1103.
- [4] David M J. Use of algae for monitoring rivers III [J]. Journal of Applied Phycology, 1999, 11(6): 596-597.
- [5] Whitton B A. Changing approaches to monitoring during the period of the 'Use of Algae for Monitoring Rivers' symposia [J]. Hydrobiologia, 2012, 695(1): 7-16.
- [6] 潘鸿,韩晓玉,蓝文朗,等. 新建城市湿地公园浮游植物群落结构及富营养化评价[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2018, 36(4): 376-379.
- Pan H, Han X Y, Lan W L, *et al.* Phytoplankton community structure and eutrophication evaluation of a newly built urban wetland park [J]. Journal of Hubei Minzu University(Natural Science Edition), 2018, 36(4): 376-379.
- [7] 王颖. 城市扩张中的人工湖区规划设计[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- Wang Y. Planning and designing of artificial lake district in urban sprawl [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [8] 王捷,石瑛,刘琪,等. 汾河太原河段水华藻类分类及分子系统研究[J]. 湖泊科学, 2018, 30(5): 1332-1342.
- Wang J, Shi Y, Liu Q, *et al.* Taxonomic and molecular phylogenetics of bloom-forming algae from the Taiyuan section of Fenhe River, China [J]. J Lake Sci, 2018, 30(5): 1332-1342.
- [9] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- Huang X F. Survey, observation and analysis of lake sciences [M]. Beijing: Standards Press of China, 2000.
- [10] 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 algal of China, systematics, taxonomy and ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [11] 周凤霞,陈剑虹. 淡水微型生物图谱[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- Zhou F X, Chen J H. Map of freshwater micro-biological [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [12] 杨威,刘琪,张婷婷,等. 赣江中下游浮游植物群落结构及其水质生物学评价[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(2): 68-76.
- Yang W, Liu Q, Zhang T T, *et al.* Phytoplankton community structure and its biological evaluation of water quality in the middle and lower reaches of the Ganjiang River [J]. Journal of Hydroecology, 2020, 41(2): 68-76.
- [13] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第4版)[M]. 北京: 中国环境科

- 学出版社, 2002.
- Editorial board of the methods for monitoring and analysis of water and wastewater, Chinese Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis methods (version 4) [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2002.
- [14] 王丽, 魏伟, 周平, 等. 铜陵市河流冬季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 247-254.
- Wang L, Wei W, Zhou P, *et al.* Phytoplankton's community structure and its relationships with environmental factors in the rivers of Tongling City, Anhui Province of East China in winter [J]. Chin J Appl Ecol, 2013, 24(1): 247-254.
- [15] 胡芯, 印江平, 唐洪玉, 等. 乌杨调节坝运行初期汉丰湖浮游植物群落结构及其与环境因子的相关性分析[J]. 淡水渔业, 2019, 49(6): 48-55.
- Hu X, Yin J P, Tang H Y, *et al.* Phytoplankton community structure and its redundancy correlation with environmental factors in Hanfeng Lake during the early stage of the operation of Wuyang Regulating Dam [J]. Freshwater Fisheries, 2019, 49(6): 48-55.
- [16] Šmilauer P, Lepš J. Multivariate analysis of ecological data using Canoco 5 [M]. America: Cambridge University Press, 2014.
- [17] 赵思琪, 范垚城, 代嫣然, 等. 水体富营养化改善过程中浮游植物群落对非生物环境因子的响应: 以武汉东湖为例[J]. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1310-1319.
- Zhao S Q, Fan Y C, Dai Y R, *et al.* Responses of phytoplankton community to abiotic environmental variables with the mitigation of eutrophication: a case study of Donghu Lake, Wuhan City [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(5): 1310-1319.
- [18] 葛秋诗, 张萍, 倪茂飞, 等. 典型喀斯特高原水库浮游植物与环境因子的关系[J]. 生态环境学报, 2021, 30(1): 156-164.
- Ge Q S, Zhang P, Ni M F, *et al.* Relationships between phytoplankton and environmental factors in a typical karst plateau reservoir [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(1): 156-164.
- [19] 武丹, 王海英, 张震. 天津于桥水库夏季浮游生物调查及群落结构变化[J]. 湖泊科学, 2013, 25(5): 735-742.
- Wu D, Wang H Y, Zhang Z. Investigation of summer plankton community structure in Yuqiao Reservoir, Tianjin [J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(5): 735-742.
- [20] 苟婷, 马千里, 王振兴, 等. 龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4141-4150.
- Gou T, Ma Q L, Wang Z X, *et al.* Eutrophication and characteristics of cyanobacteria bloom in the summer in Guishi Reservoir [J]. Environmental Science, 2017, 38(10): 4141-4150.
- [21] 刘绍俊, 吉正元, 普发贵, 等. 星云湖浮游植物群落结构及水体营养状态生物评价[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(4): 1439-1447.
- Liu S J, Ji Z Y, Pu F G, *et al.* On phytoplankton community composition structure and biological assessment of water trophic state in Xingyun Lake [J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(4): 1439-1447.
- [22] 魏洪祥, 蒋湘辉, 张涛, 等. 水丰水库浮游植物群落特征及水质评价[J]. 生态学杂志, 2021, 40(2): 402-411.
- Wei H X, Jiang X H, Zhang T, *et al.* Phytoplankton community characteristics and water quality evaluation in Shuifeng Reservoir [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(2): 402-411.
- [23] 郝媛媛, 孙国钧, 张立勋, 等. 黑河流域浮游植物群落特征与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2014, 26(1): 121-130.
- Hao Y Y, Sun G J, Zhang L X, *et al.* Relationship between community characteristics of the phytoplankton and environmental factors in Heihe River basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(1): 121-130.
- [24] 杨宋琪, 祖廷勋, 王怀斌, 等. 黑河张掖段浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2019, 31(1): 159-170.
- Yang S Q, Zu T X, Wang H B, *et al.* Relationship between the structure of phytoplankton community and environmental factors in the Zhangye section of Heihe River [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(1): 159-170.
- [25] 买占, 李诗琦, 郭超, 等. 汉江中下游浮游植物群落结构及水质评价[J]. 生物资源, 2020, 42(3): 271-278.
- Mai Z, Li S Q, Guo C, *et al.* Phytoplankton community structure and water quality evaluation in the middle and lower reaches of the Hanjiang River [J]. Biotic Resources, 2020, 42(3): 271-278.
- [26] 胡韧, 雷腊梅, 韩博平. 南亚热带大型贫营养水库浮游植物群落结构与季节变化--以新丰江水库为例[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 40-52.
- Hu R, Lei L M, Han B P. Phytoplankton assemblage and seasonal dynamics in the large oligotrophic Xinfengjiang reservoir in southern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 40-52.
- [27] Heisler J, Glibert P, Burkholder J, *et al.* Eutrophication and harmful algal blooms: a scientific consensus [J]. Harmful Algae, 2008, 8(1): 3-13.
- [28] Sommer U, Gliwicz Z M, Lampert W, *et al.* The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters [J]. Archiv Fur Hydrobiologie, 1986, 106(4): 1-44.

- 433-471.
- [29] 杨宋琪, 高兴亮, 王丽娟, 等. 西北干旱区典型水库浮游植物群落结构特征及驱动因子[J]. 湖泊科学, 2021, 33(2): 377-387.
- Yang S Q, Gao X L, Wang L J, *et al.* Phytoplankton community structure and driving factors in typical reservoirs of arid region of northwest China [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(2): 377-387.
- [30] Aldo M, Bachisio M P, Maria A M, *et al.* A numerical index for evaluating phytoplankton response to changes in nutrient levels in deep Mediterranean reservoirs [J]. Journal of Limnology, 2009, 68(1): 106-121.
- [31] 洪松, 陈静生. 中国河流水生生物群落结构特征探讨[J]. 水生生物学报, 2002, 26(3): 89-99.
- Hong S, Chen J S. Structure characteristics of aquatic community from the main rivers in China [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2002, 26(3): 89-99.
- [32] 秦伯强, 张运林, 杨桂军, 等. 太湖蓝藻水华“暴发”的动态特征及其机制[J]. 科学通报, 2016, 61(7): 759-770.
- Qin B Q, Zhang Y L, Yang G J, *et al.* Dynamics of variability and mechanism of harmful cyanobacteria bloom in Lake Taihu, China [J]. Chinese Journal, 2016, 61(7): 759-770.
- [33] 陶敏, 熊钰, 李斌, 等. 嘉陵江四川段浮游植物群落时空分布及其环境影响因子[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7): 1680-1694.
- Tao M, Xiong Y, Li B, *et al.* Spatio-temporal distribution of phytoplankton and its environmental impact factors in Sichuan section of Jialing river [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(7): 1680-1694.
- [34] Cupertino A, Gücker, B, Von Rückert G, *et al.* Phytoplankton assemblage composition as an environmental indicator in routine lentic monitoring: taxonomic versus functional groups [J]. Ecological Indicators, 2019, 101: 522-532.
- [35] Roshith C M, Meena D K, Manna R K, *et al.* Phytoplankton community structure of the Gangetic (Hooghly-Matla) estuary: status and ecological implications in relation to eco-climatic variability [J]. Flora, 2018, 240: 133-143.
- [36] 李建茹, 李畅游, 李兴, 等. 乌梁素海浮游植物群落特征及其与环境因子的典范对应分析[J]. 生态环境学报, 2013, 22(6): 1032-1040.
- Li J R, Li C Y, Li X, *et al.* Phytoplankton community structure in Wuliangsuhai Lake and its relationships with environmental factors using Canonical Correspondence Analysis [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(6): 1032-1040.
- [37] Arhonditsis G B, Winder M, Brett M T, *et al.* Patterns and mechanisms of phytoplankton variability in Lake Washington (USA) [J]. Water Res, 2004, 38(18): 4013-4027.
- [38] 谢斌, 张硕, 李莉, 等. 海州湾海洋牧场浮游植物群落结构特征及其与水质参数的关系[J]. 环境科学学报, 2016, 37(1): 121-129.
- Xie B, Zhang S, Li L, *et al.* Community structure of phytoplankton in the sea farming of Haizhou Bay and its relationships with environmental factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 37(1): 121-129.
- [39] 夏品华, 马健荣, 李存雄, 等. 红枫湖水库冬春季浮游生物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学研究, 2011, 24(4): 378-386.
- Xia P H, Ma J R, Li C X, *et al.* Canonical correspondence analysis between the plankton community and environmental factors in Hongfeng Lake reservoir in winter and spring [J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(4): 378-386.
- [40] Tarafdar L, Kim J Y, Srichandan S, *et al.* Responses of phytoplankton community structure and association to variability in environmental drivers in a tropical coastal lagoon [J]. Science of The Total Environment, 2021, 783, 1-16.
- [41] Zhen W, Zhang X M, Guan B H, *et al.* Stocking of herbivorous fish in eutrophic shallow clear-water lakes to reduce standing height of submerged macrophytes while maintaining their biomass [J]. Ecological Engineering, 2018, 113: 61-64.
- [42] Jurajda P, Adámek Z, Janáč M, *et al.* Use of multiple fish-removal methods during biomanipulation of a drinking water reservoir-evaluation of the first four years [J]. Fisheries Research, 2016, 173(1): 101-108.

□

(编辑: 张丽红)