

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.027

长荡湖、溇湖、竺山湾藻类功能群结构组成与环境因子的关系

王礼权^{1,2}, 刘钰^{2,3}, 张毅敏^{2,4}, 张志伟², 高月香², 肖娴¹, 赵远¹

(1. 常州大学环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 3. 国家管网集团东部原油储运有限公司, 江苏 徐州 221008; 4. 宁夏大学地理科学与规划学院, 宁夏 银川 750021)

摘要:为研究太湖流域上游长荡湖、溇湖、竺山湾三大典型浅水湖泊藻类功能群结构组成与环境因子的关系,基于2019年2月至2020年10月水文、水质及浮游植物数据,采用 Q 指数、香农-维纳多样性指数、TLI综合富营养化指数分析了3个湖泊的水质状况,采用非度量多维尺度变换(NMDS)分析了浮游植物群落结构组成特征,采用冗余分析探讨了浮游植物功能群与环境因子的关系。结果表明:长荡湖和溇湖水质整体属于轻度富营养化,竺山湾除冬季外,均属于中度富营养化;长荡湖、溇湖、竺山湾分别有浮游植物7门61属96种、8门75属129种和6门53属124种,分别划分为9、10和11个优势功能群;3个湖泊藻类功能群变化的共同环境因子是水温、高锰酸盐指数和总磷,而总氮和氮磷比对3个湖泊功能群结构变化的作用并不明显。

关键词:藻类功能群;环境因子;浅水湖泊;长荡湖;溇湖;竺山湾

中图分类号:X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)02-0224-09

Relationship between structural composition of algal functional groups and environmental factors in Changdang Lake, Ge Lake and Zhushan Bay // WANG Liquan^{1,2}, LIU Yu^{2,3}, ZHANG Yimin^{2,4}, ZHANG Zhiwei², GAO Yuexiang², XIAO Xian¹, ZHAO Yuan¹ (1. College of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Science, MEE, Nanjing 210042, China; 3. China Sinopec Pipeline Storage and Transportation Co., Ltd., Xuzhou 221008, China; 4. School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to study the relationship between structural composition of algae functional groups and environmental factors in the three typical shallow lakes of Changdang Lake, Ge Lake and Zhushan Bay, the water qualities of the three lakes are analyzed with Q index, Shannon-Wiener diversity index and TLI comprehensive eutrophication index based on the data of hydrology, water quality and phytoplankton from February 2019 to October 2020. Non-metric multidimensional scale (NMDS) is adopted to analyze the composition characteristics of phytoplankton community structure. RDA is adopted to analyze the relationship between phytoplankton functional groups and environmental factors. The results indicated that, the overall water qualities of Changdang Lake and Ge Lake are mild eutrophication, while the water quality of Zhushan Bay is moderate eutrophication except for that in winter. There are 96 species 61 genera 7 phyla, 129 species 75 genera 8 phyla and 124 species 53 genera 6 phyla of phytoplankton, which can be classified into 9, 10 and 11 dominant function groups respectively, are identified in Changdang Lake, Ge Lake and Zhushan Bay, respectively. It is found that the common environmental factors of the changes in algae functional groups in the three lakes are water temperature, permanganate index and total phosphorus. The effect of total nitrogen and N/P ratio on the structural changes of functional groups in the three lakes are non-significant.

Key words: algal functional groups; environmental factors; shallow lakes; Changdang Lake; Ge Lake; Zhushan Bay

基金项目:国家重大水体污染治理专项(2017ZX07202006)

作者简介:王礼权(1998—),男,硕士研究生,主要从事水体污染控制与生态修复研究。E-mail:2660229494@qq.com

通信作者:张毅敏(1965—),女,研究员,博士,主要从事水体污染控制与生态修复研究。E-mail:zym7127@163.com

浮游植物作为水生生态系统的主要生产者和食物链循环的基础环节,可以直接反映水环境的变化,浮游植物的物种组成、数量分布、优势种和群落特征可以作为水生态系统环境质量的重要指标^[1-2]。受湖泊营养输入、水文条件及人类活动等因素的影响,不同浮游植物群落结构组成在时间和空间上的变化也各不相同。汪星等^[3]对镜泊湖藻类调查发现,影响浮游植物分布的主要环境因子是透明度(SD)、溶解氧(DO)、水温、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和氨氮(NH₃-N);严广寒等^[4]对洞庭湖浮游植物调查发现水温和pH值是影响浮游植物分布的关键环境因子。因此开展浮游植物的时空变化特征及其影响因素的研究,对湖泊生态环境监测及管理具有重要意义。

长荡湖、溇湖和竺山湾位于长江以南,是太湖流域上游的三大典型浅水湖泊^[5]。长荡湖水域面积8530万m²,平均水深1.05m,蓄水量1亿m³。长荡湖湖泊水体自西向东经北干河主要支流汇入溇湖^[6]。溇湖水域面积1.64亿m²,平均水深1.25m,蓄水量2.05亿m³。溇湖湖泊水体经太湖运河主要支流汇入竺山湾^[7]。竺山湾水域面积1亿m²,平均水深1.9m,蓄水量1.9亿m³。竺山湾因其半封闭的自然形状且承受本应汇入梅梁湖的主要污染物,成为太湖水质污染最严重的湖湾之一^[8]。

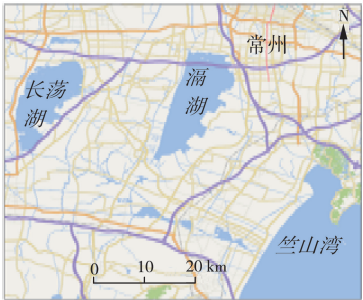
目前,在营养盐、环境和生态因素对湖泊的富营养化影响方面已有较多的研究成果^[9-10],但研究对象多集中在单一湖泊,很少关注上下连通或水体环境相似的湖泊。长荡湖、溇湖、竺山湾自然环境相近,湖泊中藻类的分布应有一定相似性,其差异恰恰反映了环境因子的不同,同时其连通性又说明了其差异的独立性和客观性,且太湖流域蓝藻水华现象一直是治理太湖流域富营养化问题的难点^[11-12]。因此,本文基于2019年2月至2020年10月长荡湖、溇湖和竺山湾的水文、水质及浮游植物数据,分析浮游植物群落结构组成特征及浮游植物功能群与环境因子的关系,以期深入了解太湖蓝藻水华发生规律及水体营养化状态评价和污染防治提供参考。

1 材料与方法

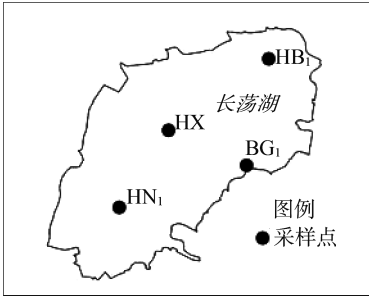
1.1 采样点设置与采样时间

根据长荡湖、溇湖和竺山湾的水域面积及《湖泊富营养化调查规范》^[13],遵循有代表性和覆盖性的原则,在3个湖泊共设置了16个采样点:①长荡湖4个,分别为湖北区(HB₁)、北干河口区(BG₁)、湖心区(HX)、湖南区(HN₁);②溇湖8个,分别为取水口(QS)、湖北区(HB₂)、湖南区(HN₂)、滢里河口

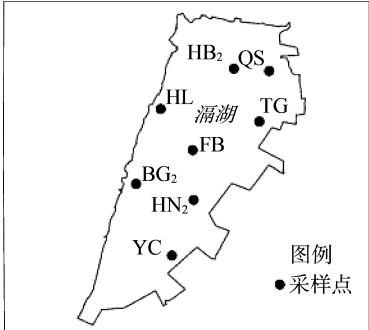
(HL)、北干河口(BG₂)、太湖河口(TG)、繁保区(FB)、殷村港(YC);③竺山湾4个,分别为雅浦港河口(YP)、沙塘港河口(ST)、竺山湖南(ZS)、焦山(JS)。采样点具体位置如图1所示,监测时间从2019年2月到2020年10月,于每月上旬天气晴朗时间段内采集样品。



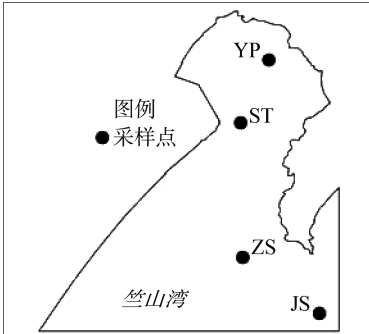
(a) 湖泊位置



(b) 长荡湖采样点



(c) 溇湖采样点



(d) 竺山湾采样点

图1 采样点位置示意图

Fig.1 Map of the sampling stations

1.2 水样采集与测定方法

将有机玻璃采水器置于水下约0.5m处采集1L

水样,加入鲁哥试剂 10 mL 低温(4 ℃)运回实验室,静置 48 h,使用虹吸法得到一份待测试样;过 0.7 μm 孔径的 GF/F 膜后得到另一份待测试样,于当天在实验室测试各项理化指标。

测定的基本理化指标主要包括水温、pH 值、DO、SD、总氮(TN)、总磷(TP)、NH₃-N、COD_{Mn}、叶绿素 a(Chl-a)。采用 YSI 多参数水质分析仪现场测定水温、pH 值和 DO;SD 采用赛氏盘现场测定;参照《水和废水监测分析方法》^[14]测定水样理化指标,其中,采用碱性过硫酸钾-紫外分光光度法测定 TN,采用钼酸铵分光光度法测定 TP,采用纳氏试剂分光光度法测定 NH₃-N,采用酸性高锰酸钾法测定 COD_{Mn},采用乙醇法测定 Chl-a。样品中的浮游植物参照《中国淡水藻类》^[15]进行鉴定,并采用目镜行格法在 20 mm × 20 mm 的计数框中计数。

1.3 数据处理与分析方法

采用香农-维纳多样性指数(I_{SH})、 Q 指数、TLI 指数对 3 个湖泊的水质状况进行评价,采用雷诺兹功能群(Reynolds functional group, RFG)优势度对藻类优势功能群进行划分,采用非度量多维尺度变换(non-metric multi-dimensional scaling, NMDS)分析浮游植物群落结构组成特征。

a. 香农-维纳多样性指数。香农-维纳多样性指数主要用于反映水体浮游植物群落结构的复杂程度,以此作为指示水质的生物指标,利用浮游植物的群落组成可以判定不同水域水质的健康状况: $I_{SH} > 3$ 为清洁; $2 < I_{SH} \leq 3$ 为轻度污染; $1 < I_{SH} \leq 2$ 为中度污染; $0 < I_{SH} \leq 1$ 为重度污染^[16]。

b. 雷诺兹功能群优势度。采用雷诺兹功能群优势度对优势功能群进行划分,雷诺兹功能群优势度计算公式为

$$Y = f_i P_i \quad (1)$$

式中: Y 为优势度; f_i 为功能群 i 出现的频率; P_i 为功能群 i 生物量占总生物量的比例。当 $Y \geq 0.2$ 时,该功能群定义为优势功能群^[17]。

c. NMDS。在湖泊调查过程中,使用 NMDS 分析功能群的年度变化。分析方法是形成一个“距离”矩阵,该矩阵归纳两个对象之间不同的数据。调整对象在二维空间中的位置,以改善“距离”与该空间中各种数据之间的对应关系,减小“距离”以标记对象点在空间中的相对位置,并使其靠近。实际距离越远越好^[18]。

d. Q 指数。 Q 指数为水质污染指数,计算公式为

$$Q = \sum_i \left(\frac{n_i}{N} F_i \right) \quad (2)$$

式中: N 为浮游植物的总生物量,个/mL; n_i 为功能群 i 的生物量,个/mL; F_i 为功能类群 i 的赋值。 Q 指数取值 0 ~ 5,将水质分为 5 个等级:0 < Q ≤ 1 差;1 < Q ≤ 2 较差;2 < Q ≤ 3 中等;3 < Q ≤ 4 好;4 < Q ≤ 5 很好^[19]。

e. TLI 指数。TLI 指数为综合营养状态指数,用于评价湖泊富营养化状况,计算公式为

$$I_{TLI} = \sum_j w_j I_{TLI,j} \quad (3)$$

式中: I_{TLI} 为 TLI 指数; $I_{TLI,j}$ 为参数 j 的营养状态指数; w_j 为参数 j 的营养状态指数的权重。TLI 指数分为 5 个等级:0 < I_{TLI} < 30 贫营养;30 ≤ I_{TLI} ≤ 50 中营养;50 < I_{TLI} ≤ 60 轻度富营养;60 < I_{TLI} ≤ 70 中度富营养;70 < I_{TLI} ≤ 100 高度富营养^[20]。

采用 Origin 和 IBM SPSS Statistics 25 进行分析,利用 Canoco for Windows 5.0 软件进行冗余分析。由于物种数据和环境因子数据之间存在数量级的差别,因此对除 pH 值之外的数据进行了 lg($X + 1$) 对数转换。采用除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)方法来选取合适的模型分析物种与环境因子间的关系。根据 DCA 分析结果,按梯度长度(lengths of gradient)的第一轴大小来确定是采用单峰模型还是线性模型。

2 结果与分析

2.1 水环境因子分析

2019 年 2 月至 2020 年 10 月,3 个湖泊的水温、pH 值、DO、SD、TN、TP、NH₃-N、COD_{Mn}、Chl-a、氮磷比 10 个环境因子的月均值如表 1 所示。

3 个湖泊水体水温较为接近,pH 值相差无几,基本维持在 7 ~ 9 之间。长荡湖、漏湖和竺山湾 TN 质量浓度月均值分别为 0.79 mg/L、1.08 mg/L 和 1.20 mg/L,TP 质量浓度月均值分别为 0.08 mg/L、0.10 mg/L 和 0.11 mg/L,TN 和 TP 质量浓度变化较大,这可能与湖泊所处周边环境和各采样点受有机污染程度不同有关。TN、TP、NH₃-N、COD_{Mn}、Chl-a 和氮磷比 6 项指标数值自长荡湖经漏湖至竺山湾呈现逐渐增大的趋势,水体水质趋于恶化。温超男等^[21]的研究表明太湖水体水质整体呈现为劣 V 类。

3 个湖泊的氮、磷质量浓度值均已劣于 IV 类水质标准,且部分采样点甚至劣于 V 类水质标准,这也是造成近年来太湖蓝藻大量生长繁殖的原因之一。

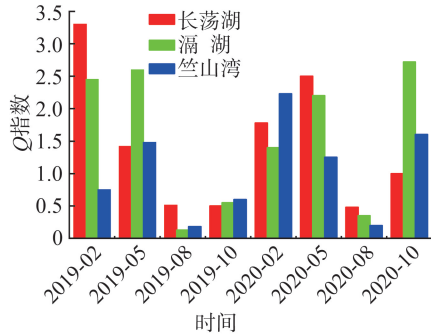
2019 年 2 月至 2020 年 10 月长荡湖、漏湖、竺山湾 Q 指数的季度均值分别为 0.48 ~ 3.30、0.13 ~ 2.72 和 0.18 ~ 2.23(图 2(a)),水体水质处于中等偏差范围。 Q 指数在夏季和秋季显著低于其他季节,

表1 2019年2月至2020年10月水体环境因子均值

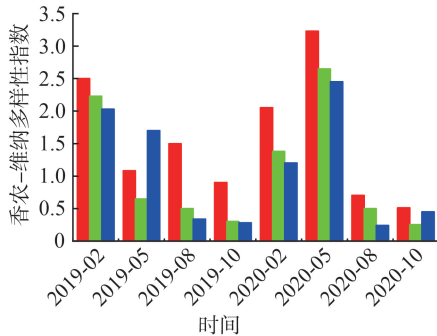
Table 1 The average of environmental factors of the water bodies from February 2019 to October 2020

湖泊	水温/℃	pH 值	$\rho(\text{DO})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	SD/m	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Chl-a})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	氮磷比
长荡湖	18.57 (5.12 ~ 30.25)	7.87 (7.71 ~ 8.68)	10.15 (7.08 ~ 14.56)	0.33 (0.16 ~ 0.58)	0.79 (0.23 ~ 2.26)	0.08 (0.02 ~ 0.22)	0.36 (0.06 ~ 1.01)	5.73 (4.73 ~ 9.41)	16.01 (4.15 ~ 19.20)	16.66 (4.10 ~ 50.76)
溇湖	17.46 (3.81 ~ 30.5)	7.99 (7.77 ~ 8.54)	9.76 (6.42 ~ 12.12)	0.27 (0.11 ~ 0.46)	1.08 (0.66 ~ 1.91)	0.10 (0.02 ~ 0.27)	0.48 (0.07 ~ 1.34)	6.40 (3.16 ~ 10.61)	24.19 (7.75 ~ 55.77)	19.04 (6.11 ~ 53.92)
竺山湾	17.49 (3.52 ~ 31.2)	8.36 (7.72 ~ 8.49)	10.04 (7.35 ~ 12.45)	0.23 (0.08 ~ 0.42)	1.20 (0.68 ~ 2.23)	0.11 (0.02 ~ 0.38)	0.76 (0.10 ~ 1.40)	7.30 (2.18 ~ 11.04)	32.23 (14.54 ~ 66.08)	18.96 (5.76 ~ 49.03)

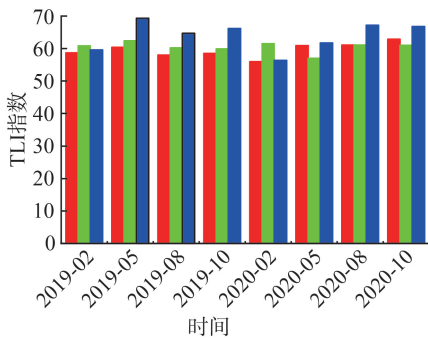
注:括号内的数值为环境因子在调查期间内的变化范围。



(a) 长荡湖



(b) 溇湖



(c) 竺山湾

图2 不同指数的季节变化

Fig.2 Seasonal changes of different indices

其中冬季处于全年最高水平,而夏季最低。 Q 指数从小到大依次是夏季、秋季、春季、冬季。结合水质数据(表1),湖泊水域春季和冬季的富营养化水平较低,水体中蓝藻在夏季和秋季占据优势。另外, Q 指数在调查期间均在4以下,说明湖泊水体的富营养化和污染问题较为严重。

长荡湖、溇湖和竺山湾水体的香农-维纳多样性

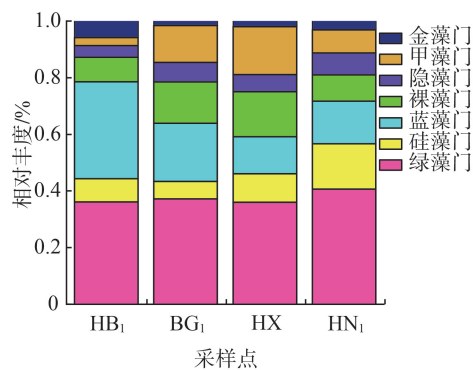
指数的变化范围分别为0.51~3.23、0.25~2.65和0.24~2.45(图2(b)),平均值分别为1.56、1.62和1.09。从平均值来看,3个湖泊水体处于中度污染状态,冬季(2019年2月)和春季(2020年5月)香农-维纳多样性指数显著高于其他季节,夏季(2020年8月)竺山湾香农-维纳多样性指数最低,此时水体污染最为严重。从年度变化来看,长荡湖湖泊水质有改善的迹象,而溇湖和竺山湾水质基本无变化。

长荡湖、溇湖和竺山湾的TLI指数的变化范围分别为55.97~62.89、57.06~62.44和56.35~69.37(图2(c))。整体来看,3个湖泊水体水质2020年比2019年有所下降,但变化幅度不大。其中,竺山湾从夏季至秋季TLI指数持续增长,富营养化程度持续加重。

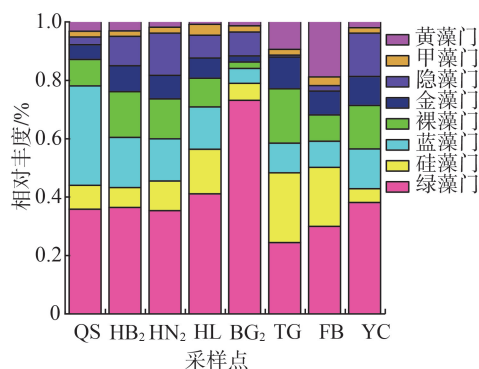
2.2 浮游植物种类组成分析

根据浮游藻类的调查结果,长荡湖共鉴定出浮游植物7门61属96种,以绿藻门(Chlorophyta)种类最为丰富(40种),占据绝对优势,硅藻门(Bacillariophyta)、蓝藻门(Cyanophyta)、裸藻门(Euglenophyta)、隐藻门(Cryptophyta)、甲藻门(Pyrrophyta)、金藻门(Chrysophyta)分别为21种、20种、9种、3种、2种和1种。溇湖共鉴定出浮游植物8门75属129种,种类最为丰富的是绿藻门,有59种,占据绝对优势,硅藻门、蓝藻门、裸藻门、金藻门、甲藻门、隐藻门、黄藻门(Xanthophyta)分别为26种、18种、14种、5种、3种、3种和1种。竺山湾共鉴定出浮游植物6门53属124种,以绿藻门种类最为丰富(47种),占据绝对优势,硅藻门和蓝藻门分别为34种和30种。溇湖浮游植物种类组成相对较为丰富,这可能与其周围环境污染源复杂有关^[22]。

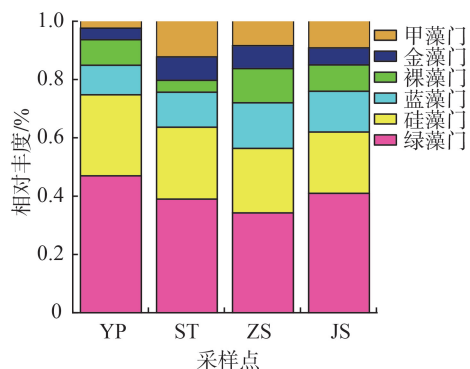
3个湖泊的浮游植物门水平组成如图3所示,3个湖泊的浮游植物种类在门水平上基本保持一致,绿藻门占绝对优势,硅藻门、蓝藻门、裸藻门也占有很大的比例。金藻门在长荡湖、溇湖和竺山湾中均占比最低。黄藻门仅在溇湖中被检出(图3(b))。



(a) 长荡湖



(b) 溇湖



(c) 竺山湾

图3 浮游植物门水平组成

Fig.3 Horizontal composition of planktonic algae

2.3 浮游植物功能群特征分析

根据文献[23]的功能群划分方法,调查期间长荡湖浮游植物进入功能群的有96种,归入17个功能群;溇湖有128种,归入24个功能群;竺山湾有140种,归入20个功能群。根据雷诺兹功能群划分方法,长荡湖、溇湖和竺山湾分别得到9个、10个和11个优势功能群(表2)。不同季节优势功能群不同,长荡湖春季为Lo、LM、M,夏季为M、B、S1、Lo,秋季为S1、B、M、P、Lo,冬季为P、B、D、LM;溇湖春季为S1、M、B、Y、J、X1,夏季为M、S1、LO、H1、B、X1,秋季为B、M、H1、S1、P、Lo,冬季为Lo、M、X2、S1、B、X1、Y、J、P;竺山湾春季为B、J、Y、P、M、T、H1,夏季为M、B、Y,秋季为J、M、P、MP、W1,冬季为P、B、Y、M、D、MP。

表2 浮游植物优势功能群组成

Table 2 Composition of dominant functional groups of phytoplankton

湖泊	功能群	代表性种	生境条件
长荡湖	M	不定微囊藻	小到中型水体,富营养到超富营养,稳定,透明度较高
	D	针状菱形藻	含有营养盐,浑浊
	S1	小席藻	浑浊,透明度低
	Lo	色球藻	
	B	梅尼小环藻	中营养,中或大型浅水
	MP	舟形藻	经常性搅动,浑浊,浅水
	LM	针晶蓝纤维藻	富营养,中小型水体
	P	螺旋颗粒直链藻	持续或半持续的混水层
	X2	简单衣藻	中到富营养,浅水
	S1	链状伪鱼腥藻	浑浊,透明度低
溇湖	M	铜绿微囊藻	小到中型水体,富营养到超富营养,稳定,透明度较高
	B	梅尼小环藻	中营养,中小型水体或大型浅水
	Y	嗜蚀隐藻	静水环境
	J	四尾栅藻	高营养,浑浊,浅水
	X1	小球藻	超富营养,浅水
	H1	长孢藻	富营养,分层,含氮低,浅水
	P	颗粒直链藻极狭变种	持续或半持续的混水层
	X2	蓝隐藻	中到富营养,浅水
	Lo	细小平裂藻	贫到富营养,中到大型水体,可深可浅
竺山湾	M	微囊藻属	小到中型水体,富营养到超富营养,稳定,透明度较高
	Y	嗜蚀隐藻	静水环境
	B	梅尼小环藻	中营养,中或大型浅水
	J	二角盘星藻	高营养,浅水
	P	颗粒沟链藻	持续或半持续的混水层
	S1	假鱼腥藻属	浑浊,透明度低
	D	针杆藻	含有营养盐,浑浊
	H1	长孢藻	富营养,分层,含氮低,浅水
	T	游丝藻	持续混合水层
	MP	舟形藻	经常性搅动,浑浊,浅水
	W1	裸藻	有机污染,浅水

由图4(a)可知长荡湖共有优势功能群9个,与雷诺兹功能群划分结果一致。其中绿藻门1属4种,分别为衣藻属的卵形衣藻(*C. ovalis*)、简单衣藻(*C. globosa* snow)、球衣藻(*C. globosa*)和小球衣藻;蓝藻门4属4种,分别为色球藻(*Chroococcus* sp.)、针晶蓝纤维藻(*D. raphidioides*)、不定微囊藻(*M. incerta* Lemm)、小席藻(*P. tenue*);隐藻门1属1种,为尖尾蓝隐藻(*Chroomonasacuta*);硅藻门2属2种,分别为针状菱形藻(*N. acicularis*)和螺旋颗粒直链藻(*M. granulata*)。样本分布显示,春夏秋冬四季均有各自独立的区域,浮游植物群落结构表现出明显的季节差异。

由图4(b)可知,调查期间溇湖的浮游植物群落的分布在时间上有明显的变化,且沿逆时针方向分布。群落结构的演替可分为3组,其中春季组为第I组、夏季组和秋季组为第II组、冬季组为第III组。

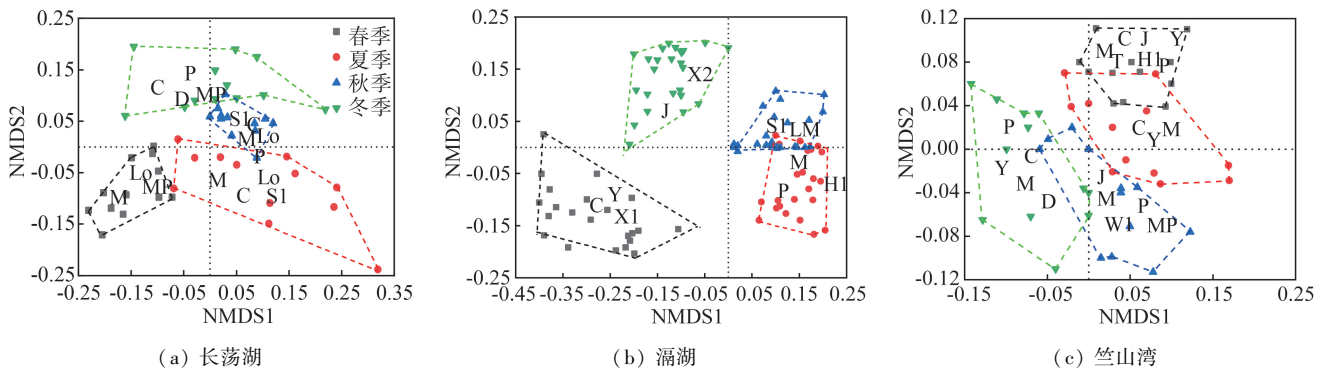


图 4 不同季节浮游植物 NMDS 分析

Fig. 4 NMDS analysis of phytoplankton in different seasons

第 I 组主要位于 NMDS 图的左侧,这一组的浮游植物群落遍布整个空间,其物种数量和物种相似系数均在下降。第 II 组主要位于 NMDS 图的右侧,该组样本之间的“距离”相对较短,又有一些重叠,这表示夏季和秋季的浮游植物物种是最相似和最丰富的物种,物种数量在此时最多,共有 120 种。同时,夏季和秋季这两个季节经鉴定的相同物种共有 29 种。在两个季节中均占有优势的是细小平裂藻 (*Merismopedia minima*)、铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*)、小环藻 (*Cyclotella* sp.)、链状伪鱼腥藻 (*Pseudanabaena catenata*)、长孢藻 (*Dolichospermum*)。第 III 组占据了 NMDS 空间的左上部分,样本分布直观上呈现出零碎分散状,物种数最少,仅 30 种。第 III 组中的蓝隐藻 (*Chroomonas* sp.) 占绝大多数,是优势种。

由图 4(c) 可知,调查期间春季和夏季样本在二维空间中的位置相对较近,且基本分布在图的顶部。春季和夏季的功能群有重叠的区域。秋季和冬季的功能群样本主要占据图的左下方部分,与春夏分布的规律类似,同样存在少许的重叠部分。从图中整体功能群的分布来看,在不同季度更替的同时,有一个过渡的过程,通过过渡,浮游植物群落形成了一个沿着季度变化的完整循环。整体而言,浮游植物群落的结构显示出明显的季节性差异。

2.4 功能群结构变化与环境因子的关系

为探究长荡湖、溧湖和竺山湾浮游植物功能群

结构变化与环境因子的关系,选取水温、pH 值、DO、SD、TN、TP、NH₃-N、COD_{Mn}、Chl-a、氮磷比共 10 个因子作为环境指标进行分析。依据物种选择的两个原则,同时考虑各湖泊浮游植物的优势物种状况,确定所需分析的优势功能群。DCA 结果显示长荡湖、溧湖、和竺山湾的梯度长度分别为 0.639、0.728 和 0.554,均小于 3,因此可选用冗余分析方法分析功能群与环境因子的关系。长荡湖、溧湖和竺山湾浮游植物功能群结构变化与环境因子的冗余分析结果如表 3 和图 5 所示。

根据 Monte-Carlo 置换检验鉴别各环境因子对藻类功能群变化的统计学意义,基于有条件的效应 (conditional effects) 分析结果表明,10 个因子皆均为对藻类功能群变化有统计学意义的变量 ($p < 0.05$),同时, Monte-Carlo 置换检验结果显示所有排序轴均呈现显著性差异,表明本文得到的结果是非常可靠的。

长荡湖各功能群关于排序轴 1 和排序轴 2 的位置关系见图 5(a),水温、pH 值、DO、COD_{Mn}、Chl-a 与排序轴 1 具有较强相关性,SD、TN、TP、NH₃-N 与排序轴 2 有较强相关性。这些环境因子显著地影响着长荡湖浮游植物功能群生物量的变化。而溧湖功能群生物量的变化受环境因子影响较大(图 5(b)),水温、SD、TP、COD_{Mn}、Chl-a 与排序轴 1 具有较强相关性,TN、TP、NH₃-N、Chl-a 与排序轴 2 有较强相关性。竺山湾各功能群关于排序轴 1 和排序轴 2 的位

表 3 浮游植物功能群冗余分析结果

Table 3 RDA analysis of phytoplankton functional groups

湖泊	排序轴	特征值	功能群与环境因子相关性	物种累积变化率/%	功能群与环境累积变化率/%	总特征值	总典范特征值
长荡湖	1	0.161	0.834	17.3	34.7	1.000	0.460
	2	0.149	0.850	33.6	62.8	1.000	0.460
溧湖	1	0.165	0.752	14.1	42.2	1.000	0.455
	2	0.141	0.700	23.0	70.2	1.000	0.455
竺山湾	1	0.152	0.758	14.8	42.9	1.000	0.480
	2	0.165	0.719	24.9	70.0	1.000	0.480

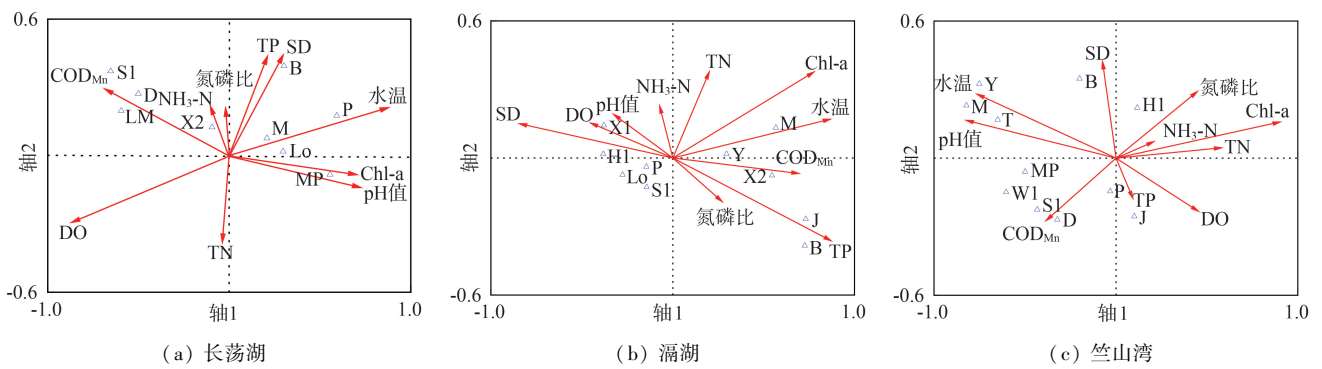


图5 功能群与环境因子冗余分析结果

Fig. 5 RDA analysis of functional groups and environmental factors

置关系见图 5 (c), 水温、pH 值、DO、TN、COD_{Mn}、Chl-a 与排序轴 1 具有较强相关性, SD、COD_{Mn}、氮磷比与排序轴 2 有较强相关性。

浮游植物会因受特定的生态环境影响而进化出一个能承受这种环境的特定群体, 因此, 不同功能群组可以共存于多种环境因素共同作用下的水体中。闵文武等^[24]对渭河流域浮游植物与环境因子关系的研究发现, 丰水期影响功能群演变的主要环境因子是 DO 和 TN, 枯水期是流速、TN 和 COD_{Mn}。郑诚等^[25]对四明湖水库浮游植物的调查发现, 湖泊水体中浮游植物结构发生动态变化的关键环境因子是 WT、SD 和硝氮 (NO₃-N), 浮游植物的生长繁殖受到了一定程度的影响。需要说明的是, NO₃-N 不仅影响水体中浮游植物的结构变化, 也影响反硝化微生物群落的分布^[26]。相比之下, 本文研究结果表明不同水体环境中藻类功能群结构的影响因素也有所不同。

由图 5 可知, 水温作为重要的环境因子, 不仅影响浮游植物群落时空分布^[27], 也影响浮游植物结构及生物量的变化。长荡湖对水温变化响应明显的功能群是 M、P、MP、Lo, 溧湖是 M、Y、P、X2、J, 竺山湾是 M、Y、T、Lo。功能群 M 在溧湖的种群主要是铜绿微囊藻, 在长荡湖是不定微囊藻, 在竺山湾是微囊藻属。管祥洋等^[28]对溧湖水华初期浮游植物群落特征的研究中也同样发现, 铜绿微囊藻在夏季的溧湖占据绝对优势。此外, 较高的水温及 TP、NH₃-N、COD_{Mn} 和 Chl-a 质量浓度对功能群 M 的生长繁殖具有促进作用, 这表明其在夏季和秋季湖泊水体中具有良好的适应能力, 这一结论与魏代春等^[29]对溧湖微囊藻的调查结果一致。由图 5 (b) 可知, 功能群 X1 相比功能群 X2 对水温的响应更为明显。功能群 X1 主要种群是小球藻属和纤维藻属, 其在 2019 年秋季的溧湖中占主导地位, 这与该季节溧湖水体中高浓度磷相一致。另外, 小球藻属 (功能群 X1)

还在 2020 年占主导地位。功能群 Lo 的检出率和密度均不高, 该功能群与水温呈正相关关系, O'Farrell 等^[30]在对巴拉那河 (Parana River) 的藻类调查时有类似发现。

TP 作为重要的环境因子, 对 3 个湖泊浮游植物功能群的结构变化起着重要的作用, 冬季长荡湖、溧湖和竺山湾氮磷比分别为 50.76、35.47 和 38.8, 春季分别为 36.94、53.92 和 49.03, 结合表 1 氮磷比的均值 (>16), 表明冬春两季 3 个湖泊游植物生长主要被磷限制。Guo 等^[31]对太湖长期调查同样发现浮游植物的生物量与 TP 呈显著正相关关系; 谭清乾等^[32]在梅尼小环藻对昼夜温差变化的生理响应研究中也发现磷是梅尼小环藻生长繁殖的限制因素, 可见磷作为浮游植物生长限制因素的结论具有一定的普适性。

3 结 论

a. Q 指数结果表明, 调查期间长荡湖、溧湖和竺山湾水体水质均处于中等偏差范围, 香农-维纳多样性指数结果表明 3 个湖泊水体属于中度至重度污染水体, TLI 指数结果表明长荡湖和溧湖属于轻度富营养化, 竺山湾属于中度富营养化 (除冬季外), 3 个连通的湖泊下游较上游富营养化严重。

b. 长荡湖有浮游植物 7 门 61 属 96 种, 划分 9 个优势功能群; 溧湖有浮游植物 8 门 75 属 129 种, 划分 10 个优势功能群; 竺山湾有浮游植物 6 门 53 属 124 种, 划分 11 个优势功能群。3 个湖泊的藻类功能群复杂性较高。

c. 长荡湖特有功能群是 LM, 溧湖是 X1、X2, 竺山湾是 MP、T、W1。而 M、B 和 Y 功能群在长荡湖、溧湖和竺山湾中全年占据优势, 且均是主要分布于中-高富营养湖泊水体中。

d. 3 个湖泊对功能群结构变化影响较为强烈的环境因子存在差异, 其中长荡湖为水温、pH 值、

Chl-a、TP 和 COD_{Mn} ，涪湖为水温、SD、TP 和 COD_{Mn} ，竺山湾为水温、pH 值、SD、TP 和 COD_{Mn} 。3 个湖泊相同的环境驱动因子是水温、TP 和 COD_{Mn} ，而 TN 和氮磷比对长荡湖、涪湖和竺山湾功能群结构变化的作用并不明显。

参考文献:

[1] 王振方,张玮,杨丽,等. 异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 环境科学,2019,40(5):2249-2257. (WANG Zhenfang,ZHANG Wei,YANG Li,et al. Characteristics of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in different regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China [J]. Environmental Science, 2019, 40 (5): 2249-2257. (in Chinese))

[2] 刘凌,朱良珍,叶键,等. 张福河浮游植物群落结构及生态位特征[J]. 水资源保护,2021,37(3):7-12. (LIU Ling,ZHU Liangzhen,YE Jian,et al. Community structure and niche characteristics of phytoplankton in Zhangfu River[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):7-12. (in Chinese))

[3] 汪星,刘录三,李黎,等. 镜泊湖浮游藻类组成及其与环境因子的相关分析[J]. 中国环境科学,2015,35(11):3403-3413. (WANG Xing, LIU Lusan, LI Li, et al. Correlation analysis of algae composition and environmental factors in Jingpo Lake [J]. China Environmental Science, 2015, 35 (11): 3403-3413. (in Chinese))

[4] 严广寒,殷雪妍,汪星,等. 长江三口—西洞庭湖环境因子对浮游动物群落组成的影响[J]. 水生态学杂志,2021,42(2):23-32. (YAN Guanghan, YIN Xueyan, WANG Xing, et al. Effects of environmental factors on zooplankton community composition in the three outlets of Yangtze River to West Dongting Lake [J]. Journal of Hydroecology,2021,42(2):23-32. (in Chinese))

[5] 张小琼,邵勇,徐东炯. 洮湫水系主要湖泊底质微生物群落功能多样性的研究[J]. 环境科技,2020,33(1):61-64. (ZHANG Xiaoqiong,TAI Yong,XU Dongjiong. The functional characteristics of the microbial community existing in base microflora of the Taoge River system[J]. Environmental Science and Technology,2020,33(1):61-64. (in Chinese))

[6] ZHANG Yongdong, SU Yaling, LIU Zhengwen, et al. A comparative study of the hopanoid hydrocarbons in sediments of two lakes (Fuxian and Changdang) with contrasting environments [J]. Limnologica, 2019, 76: 1-10.

[7] TIAN Feng, HUANG Jiacong, CUI Zhen, et al. Integrating multi indices for identifying priority management areas in lowland to control lake eutrophication; a case study in lake

Gehu, China [J]. Ecological Indicators, 2020, 112:106103.

[8] 薛银刚,刘菲,孙萌,等. 太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素[J]. 环境科学,2018,39(3):1151-1158. (XUE Yingang, LIU Fei, SUN Meng, et al. Community structure and influencing factors of Bacterioplankton in spring in Zhushan Bay, Lake Taihu [J]. Environmental Science, 2018, 39 (3): 1151-1158. (in Chinese))

[9] BARTOSIEWICZ M, MARANGER R, PRZYTULSKA A, et al. Effects of phytoplankton blooms on fluxes and emissions of greenhouse gases in a eutrophic lake [J]. Water Research, 2021, 196: 116985.

[10] 李娜,周绪申,孙博闻,等. 白洋淀浮游植物群落的时空变化及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学,2020,32(3):772-783. (LI Na,ZHOU Xushen,SUN Bowen,et al. Spatiotemporal variation of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in the Lake Baiyangdian [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32 (3): 772-783. (in Chinese))

[11] 朱喜,李贵宝,王圣瑞. 太湖蓝藻暴发的治理[J]. 水资源保护,2020,36(6):106-111. (ZHU Xi, LI Guibao, WANG Shengrui. Treatment of blue algae outbreak in Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (6): 106-111. (in Chinese))

[12] 杨超慧,王超,欧阳萍,等. 丙二酸对铜绿微囊藻的抑制效果[J]. 水资源保护,2021,37(3):121-126. (YANG Chaohui, WANG Chao, OUYANG Ping, et al. Inhibitory effect of malonic acid on *Microcystis aeruginosa* [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (3): 121-126. (in Chinese))

[13] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 2版. 北京:中国环境科学出版社,1990.

[14] 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[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社,2002.

[15] 胡鸿钧,李尧英,魏印心,等. 中国淡水藻类[M]. 上海:上海科学技术出版社,1980.

[16] GUERRA-GARCÍA J M, NAVARRO-BARRANCO C, ROS M, et al. Ecological quality assesment of marinas: an integrative approach combining biological and environmental data [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 286: 112237.

[17] 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 Science, 2018, 30 (2): 431-440. (in Chinese))

[18] 邓建明,汤祥明,邵克强,等. 非度量多维标度在亲水河浮游植物群落分析中的应用[J]. 生态与农村环境学

- 报, 2016, 32 (1): 150-156. (DENG Jianming, TANG Xiangming, SHAO Keqiang, et al. Application of NMDS to analysis of phytoplankton community: a case study of Qinshui River [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, 32 (1): 150-156. (in Chinese))
- [19] EU. Directive 2000/60/EC of the European parliament and of the council of 23 October 2000 establishing, a framework for community action in the field of water policy [R]. Brussels; European Parliament and Council, 2000.
- [20] 马腾飞, 罗汉金, 李志敏, 等. 水源水库富营养化趋势分析及预警模型构建 [J]. 环境科学与技术, 2020, 43 (5): 145-153. (MA Tengfei, LUO Hanjin, LI Zhimin, et al. Eutrophication trend analysis and forewarning model construction of water source reservoirs [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43 (5): 145-153. (in Chinese))
- [21] 温超男, 黄蔚, 陈开宁, 等. 太湖滨岸带浮游动物群落结构特征与环境因子的典范对应分析 [J]. 水生态学杂志, 2020, 41 (2): 36-44. (WEN Chaonan, HUANG Wei, CHEN Kaining, et al. Canonical correspondence analysis between zooplankton community structure and environmental factors in the littoral zone of Taihu Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2020, 41 (2): 36-44. (in Chinese))
- [22] 燕文明, 温茂增, 麻林, 等. 小型浅水湖泊氨氧化细菌分布特征及其对氮素垂向分布的响应 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (6): 521-527. (YAN Wenming, WEN Maozeng, MA Lin, et al. Distribution characteristics of ammonia-oxidizing bacteria of small shallow lakes and its response to vertical distribution of nitrogen [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (6): 521-527. (in Chinese))
- [23] PADISÁK J. The Phycogeography of freshwater algae [M]//LIKENS G E. Encyclopedia of Inland Waters. Amsterdam; Elsevier, 2009: 219-223.
- [24] 闵文武, 王培培, 李丽娟, 等. 渭河流域浮游植物功能群与环境因子的关系 [J]. 环境科学研究, 2015, 28 (9): 1397-1406. (MIN Wenwu, WANG Peipei, LI Lijuan, et al. Relationship between phytoplankton functional groups and environmental factors in the Wei River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28 (9): 1397-1406. (in Chinese))
- [25] 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 等. 四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 [J]. 环境科学, 2018, 39 (6): 2688-2697. (ZHENG Cheng, LU Kaihong, XU Zhen, et al. Seasonal succession of phytoplankton functional groups and their driving factors in the Siminghu Reservoir [J]. Environmental Science, 2018, 39 (6): 2688-2697. (in Chinese))
- [26] 张松贺, 袁强, 陈洁, 等. 硝氮对狐尾藻附着生物膜细菌群落的影响 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (3): 272-278. (ZHANG Songhe, YUAN Qiang, CHEN Jie, et al. Effects of nitrate on bacterial communities of biofilm attached on *Myriophyllum Verticillatum* [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (3): 272-278. (in Chinese))
- [27] 严莹. 秦淮河秋冬季浮游植物群落与环境因子典范对应分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2013, 41 (6): 505-510. (YAN Ying. Canonical correspondence analysis of phytoplankton community and environmental factors in Qinhuai River in autumn and winter [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41 (6): 505-510. (in Chinese))
- [28] 管祥洋, 孔明, 张毅敏, 等. 漏湖水华初期浮游植物群落特征及与水环境因子相关性分析 [J]. 环境科学学报, 2020, 40 (3): 901-914. (GUAN Xiangyang, KONG Ming, ZHANG Yimin, et al. Characteristics of phytoplankton communities and their relationship with environmental factors during the initial algae bloom period in Gehu Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40 (3): 901-914. (in Chinese))
- [29] 魏代春, 苏婧, 陈学民, 等. 阳澄湖和漏湖微囊藻毒素分布及其与富营养化因子的关系 [J]. 环境工程学报, 2014, 8 (6): 2322-2328. (WEI Daichun, SU Jing, CHEN Xuemin, et al. Distribution of *Microcystins* and its relationship with eutrophication factors in Yangcheng Lake and Gehu Lake [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8 (6): 2322-2328. (in Chinese))
- [30] O'FARRELL I, TELL G, PODLEJSKI A. Morphological variability of *Aulacoseira granulata* (Ehr.) simonsen (Bacillariophyceae) in the Lower Parana River (Argentina) [J]. Limnology, 2001, 2 (2): 65-71.
- [31] GUO Wenjing, ZHU Yuanrong, FU Zhiyou, et al. Influences of environmental factors on biomass of phytoplankton in the northern part of Tai Lake, China, from 2000 to 2012 [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189 (12): 608.
- [32] 谭清乾, 王沛芳, 王洵, 等. 不同光照下梅尼小环藻对昼夜温差变化的生理响应 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (3): 127-135. (TAN Qingqian, WANG Peifang, WANG Xun, et al. Physiological response of *Cyclotella meneghiniana* to diurnal temperature difference under different light conditions [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (3): 127-135. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-03-20 编辑: 熊水斌)