

太湖浮游植物功能群季节演替特征及水质评价*

夏莹霏^{1,2}, 胡晓东^{1**}, 徐季雄¹, 李一平², 吴苏舒¹, 吴沛沛¹

(1: 江苏省水利科学研究院, 南京 210017)

(2: 河海大学环境学院, 南京 210098)

摘要: 2013年10月—2015年7月对太湖分季节共进行8次采样, 以分析太湖浮游植物功能群组成、时空变化及其理化影响因子。结果显示: 调查期间共鉴定出20组功能群, 其中主要代表性功能群11组, 分别为M、Y、C、J、P、S1、D、H1、T、MP、W1。两年的数据显示太湖浮游植物功能群的季节演替变化明显, 其中富营养水体的代表性功能群M、C、Y组在各季节均占优势。RDA分析显示, 以M、C功能群为主的夏、秋季功能群分布主要受到透明度的影响; 以Y功能群为主的春季功能群分布主要是受到总氮浓度的影响。Pearson相关性分析显示基于功能群计算的 Q 指数和Shannon-Wiener指数与水温、氨氮浓度存在显著关系, 两种评价方法之间也呈显著正相关。对比 Q 指数、Shannon-Wiener指数以及 TLI 指数3种水质评价方法, 发现 Q 指数评价方法能更好地反映水体的营养状态。综上所述, 功能群能直观反映太湖浮游植物季节演替特征, 更能客观指示太湖水质状况。

关键词: 太湖; 浮游植物; 功能群; Q 指数; 冗余分析

Seasonal succession of phytoplankton functional group and assessment of water quality in Lake Taihu

XIA Yingfei^{1,2}, HU Xiaodong^{1**}, XU Jixiong¹, LI Yiping², WU Sushu¹ & WU Peipei¹

(1: *Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, P.R.China*)

(2: *College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China*)

Abstract: From October 2013 to July 2015, composition and seasonal succession of phytoplankton functional groups in Lake Taihu were investigated during different seasons. During the survey, 20 functional groups were identified with the predominant groups in the succession of M, Y, C, J, P, S1, D, H1, T, MP and W1. Functional groups composition in Lake Taihu demonstrated obviously seasonal dynamics, and the M, C and Y functional groups had higher proportion in each season. Redundancy analysis showed that the distribution of functional groups dominated by M and C functional groups in summer and autumn was mainly affected by transparency, and the distribution of functional groups dominated by Y functional groups was mainly affected by total nitrogen concentration. Pearson correlation analysis showed that there was a significant positive relationship between Q index and Shannon-Wiener index with water temperature and ammonia nitrogen, and there was also a significant positive correlation between the two water quality assessment methods. Comparing the Q index, Shannon-Wiener index and the TLI index, we found that the Q index evaluation method can better reflect the nutritional status of the water body. Above all, this study shows that functional groups can directly reflect the seasonal succession characteristics of phytoplankton in Lake Taihu, and can objectively indicate the water quality of Lake Taihu.

Keywords: Lake Taihu; phytoplankton; functional groups; Q index; redundancy analysis

浮游植物是水生态系统中的初级生产者, 了解其种类组成及现存量的空间分布有利于对湖泊的认知,

* 江苏省创新能力建设计划项目 (BM2016031)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (SJCX17_0136, 2017B762X14) 和江苏省水利科技项目 (2013002) 联合资助。2018-03-15 收稿; 2018-06-28 收修改稿。夏莹霏 (1994 ~), 女, 硕士研究生; E-mail: xia.yingfei@qq.com.

** 通信作者; E-mail: huxiaodong1979@sohu.com.

也是水环境监测中的重要指示生物^[1].关于太湖浮游植物的生态研究众多,人们通常利用浮游植物生物量、丰度、优势种和多样性指数等来反映太湖水体的生态环境状况^[2-14].但常规传统的浮游植物的种属分类方法会对预测浮游植物群落结构存在一定局限性^[15].

近些年,Reynolds 鉴于 Grime 的三角模型提出的功能群(functional groups)概念逐渐用于藻类生态学的研究.2002 年 Reynolds 第一次将具有相同生态位的浮游植物优势种组合划分为 31 个不同的功能群^[16].之后,其他研究者基于此,对功能群进行扩充并以不同的出发点进行划分^[17-19].目前功能群在浮游植物的生态学研究已成为国内外的热点问题,各国学者们对不同河流、湖泊及水库的浮游植物功能群进行了不同程度的研究^[15,20-22].由于划分功能群的主要依据是利用浮游植物的相似性,包括形态特征以及对生境适应性特征,因此不仅可以简化对浮游植物群落的研究,更能从物种的功能性上对水体生态系统进行研究,除此之外还能更为精确地展现浮游植物与环境因子的关系.

目前,水质评价可通过富营养化指数法、生物评价方法中的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Q 指数等方法,其中富营养化指数是根据水质物理化学参数的实测值为依据,Shannon-Wiener 多样性指数是通过反映浮游植物组成结构来指示水质,而 Q 指数是一种基于功能群划分的水质评价方法^[15,23].

本文是首次利用功能群这个概念对太湖浮游植物进行划分,并对其与环境因子的关系进行研究分析,明确太湖浮游植物群落结构的主要影响因子.最后再将 Q 指数评价方法和其他水质评价方法进行比较,为太湖水环境保护及水质评价提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域与样点设置

太湖(30°55'40"~31°32'58"N,119°52'32"~120°36'10"E)位于长江三角洲的南缘,湖泊面积 2338 km²,流域面积 36895 km²,是我国第 3 大淡水湖泊.随着经济的发展,不合理的开发和利用导致水环境问题日益凸显.本研究参考湖泊调查规范和太湖湖区的水体现场情况^[24],在太湖湖区共布设 30 个样点(T1~T30),涵盖了太湖的梅梁湾(T1~T4)、竺山湖(T5~T6)、贡湖(T7~T10)、东太湖(T11~T13)、湖心区(T14~T19)、西部沿岸区(简称西区 T20~T21)、东部沿岸区(简称东区 T22~T25)和南部沿岸区(简称南区 T26~T30),共计 8 个区域(图 1).采样时间从 2013 年 10 月—2015 年 7 月,每个季度采集 1 次,共采集 8 次.

1.2 浮游植物样品采集与计数

浮游植物定性样品的采集及分析:使用 25#浮游生物网(网孔 0.064 mm),在水面呈“∞”状拖动浮游网数次,最后浓缩到 50 ml 试剂瓶中,用甲醛溶液固定.定性样品均使用 NIKON 50i 光学显微镜鉴定拍照,浮游植物鉴定方法参考经典文献^[1].

浮游植物定量样品的采集及分析:采水器在水面表层下 0.5 m 处采集 1 L 水样后,现场加入 10 ml Lugol's 试剂固定,回到实验室后沉淀 24 h,去除上清液,浓缩到 250 ml,再次沉淀 24 h,去除上清液,最后浓缩到 50 ml 并转移到试剂瓶中,加入 2 ml 甲醛溶液密封保存制作成定量样品.定量样品计数前先摇匀,使用 10~100 μ l 规格的 Dragon Lab 移液枪精确吸取 0.1 ml,均匀涂在浮游植物计数框内,在光学显微镜下使用 40 \times 10 倍观察计数,每号标本计数重复 3 次,取平均值.生物量的计算方法是参考文献得到各种浮游植物的体积系数,通过浮游植物的体积系数与丰度的乘积得到生物量^[25].

1.3 环境因子的测定与分析

水体透明度(SD)使用赛氏盘现场测量,pH 值、水温(WT)和溶解氧(DO)现场利用 YSI EXO2 多参数水质监测仪测定.其他理化数据,包括总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和生化需氧量(BOD₅) 在实验室内参照湖泊富营养化调查规范(第二版)测定^[24].

1.4 数据分析

通过 Excel 2010 和 Origin 9.0 软件对数据进行统计和分析.使用 ArcGIS 软件对太湖底图进行绘制,并运用反距离权重法对浮游植物平面分布进行描述^[26-27].使用 Canoco 4.5 对数据进行冗余分析(RDA),使用 SPSS 22.0 软件对浮游植物生物量分布的空间差异及环境因子变化进行 t 检验,并对物种数据和环境数据进行 Pearson 相关性分析^[28].

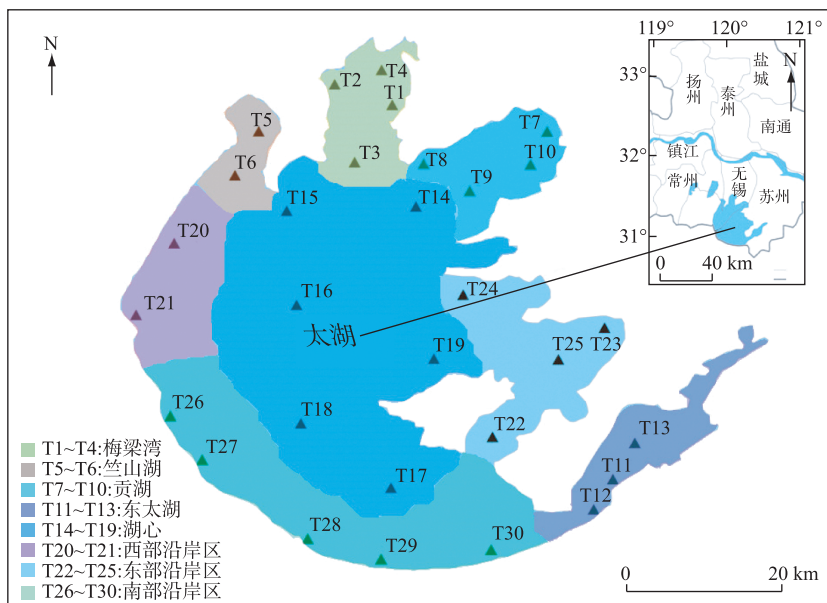


图1 太湖采样点分布

Fig.1 Location of sampling sites in Lake Taihu

欧盟水框架 (Water Framework Directive, European Parliament and Council, 2000) 在功能群与环境特征相互响应的基础上开发出生态健康指数用以环境监测, 其中分为, Q 评价指数 (湖泊或水库) 和 Q_n 评价指数 (河流)^[18]. 其中:

$$Q = \sum_{i=1}^n \left(\frac{n_i}{N} \cdot F_i \right) \quad (1)$$

式中, n 为浮游植物功能群的数量, N 为浮游植物的总生物量, n_i 为第 i 个功能群的生物量, F_i 为第 i 个功能群的赋值^[28-29].

Q 指数 0~5 分别表示: 0~1 差; 1~2 耐受; 2~3 中等; 3~4 好; 4~5 极好. 一般认为, Q 指数越小, 水体富营养化程度越高. Q 指数主要是利用浮游植物的功能群组成和生物量来反映水体的营养状态, 这与水体富营养的表征, 即浮游生物的过度繁殖是密切相关的, 因此能够很好地对湖泊富营养化程度进行判定^[30].

Shannon-Wiener 多样性指数主要是反映水体浮游植物群落的结构的复杂程度, 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来判定不同水域水质的健康状况. 一般来说, 水体的 Shannon-Wiener 多样性指数越高, 其群落结构就越复杂, 稳定性越强, 进而反映水质较好; 而当水体受到污染时, 敏感型的浮游植物种类就会消失, 导致多样性降低, 使得水体中浮游植物群落结构趋于简单, 稳定性变差, 水质下降. Shannon-Wiener 多样性指数的计算方法采取传统计算公式^[24].

综合富营养化指数是作为评价湖泊富营养化的指标, 计算公式如下:

$$TLI(\text{Chl.a}) = 10(2.5 + 1.086 \ln \text{Chl.a}) \quad (2)$$

$$TLI(\text{TP}) = 10(9.436 + 1.694 \ln \text{TP}) \quad (3)$$

$$TLI(\text{TN}) = 10(5.453 + 1.694 \ln \text{TN}) \quad (4)$$

$$TLI(\text{SD}) = 10(5.118 - 1.94 \ln \text{SD}) \quad (5)$$

$$TLI(\Sigma) = W(\text{Chl.a}) \cdot TLI(\text{Chl.a}) + W(\text{TP}) \cdot TLI(\text{TP}) + W(\text{TN}) \cdot TLI(\text{TN}) + W(\text{SD}) \cdot TLI(\text{SD}) \quad (6)$$

式中, $W(\text{Chl.a})$ 、 $W(\text{TP})$ 、 $W(\text{TN})$ 和 $W(\text{SD})$ 分别为 0.3260、0.2300、0.2192 和 0.2246^[31]. 综合富营养化指数 0~100 分别表示: 0~30 贫营养; 30~50 中营养; 50~60 轻度富营养; 60~70 中度富营养; 70~100 高度富营养.

2 结果与分析

2.1 太湖浮游植物种类及功能群组成

在调查期间,共鉴定浮游植物 147 种,隶属 7 门 65 属. 其中绿藻门种类数最多,共计 25 属 69 种;其次为硅藻门 18 属 39 种;蓝藻门 10 属 17 种;裸藻门 4 属 9 种;金藻门 2 属 5 种;甲藻门 4 属 4 种;隐藻门 2 属 4 种. 太湖各季节各区域浮游植物种类以蓝藻门、硅藻门和绿藻门为主,甲藻门、裸藻门和隐藻门种类较少,金藻门种类只在温度较低的春、冬季节出现.

参考 Reynolds 等提出的浮游藻类功能群^[16],将太湖两年 8 次采集的样品中出现的物种归纳为 20 组功能群,分别为 M、S1、L0、H1、LM、W1、W2、D、C、P、MP、Y、X2、F、G、X1、J、T、N、E. 本文参考 Colin 等^[32],把每个样本中相对生物量大于 5% 的种类规定为代表性功能群,得到太湖区域两年数据共 11 组代表性功能群(表 1),分别是 M、Y、C、J、P、S1、D、H1、T、MP、W1,各功能群耐受性、敏感性及生境如表 1 所示. 其中 2014 年秋季主要功能群为 J、M、P、MP、W1,冬季为 P、C、Y、M、D、MP,春季为 Y、M、C,夏季为 M、C、J、S1;2015 年秋季主要功能群为 M、C、Y、J,冬季为 M、Y、C、P,春季为 C、J、Y、P、M、T、H1,夏季为 M、C、Y.

表 1 调查期间太湖浮游植物功能群组成
Tab.1 Functional group composition in Lake Taihu during this survey

序号	功能群	代表性种(属)	拉丁名	耐受性	敏感性	生境(环境描述)
1	M	微囊藻	<i>Microcystis</i> spp.	暴晒	冲刷作用、低光照	小到中型、富营养到超富营养、稳定、透明度较高
2	Y	啮蚀隐藻	<i>Cryptomonas erosa</i>	低光照	吞噬作用	静水环境
3	C	梅尼小环藻	<i>Cyclotella meneghiniana</i>		水体分层	富营养的中小型湖泊
4	J	二角盘星藻	<i>Pediastrum duplex</i>		高光照	高营养、混合、浅水,包括坡度较低的河流
		二角盘星藻纤细变种	<i>Pediastrum duplex</i> var. <i>gracillimum</i>			
		单角盘星藻具孔变种	<i>Pediastrum simplex</i> var. <i>duodenarium</i>			
5	P	颗粒沟链藻	<i>Aulacoseira granulata</i>	中程度的低光照和低碳含量	水体分层、硅元素缺乏	2~3 m 持续或半持续的混合水层,营养水平较高
		颗粒沟链藻极狭变种	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>			
6	S1	假鱼腥藻属	<i>Pseudanabaena</i> sp.	极低的光照	冲刷作用	混合浑浊、透明度低
7	D	针杆藻	<i>Synedra</i> sp.	冲击	营养耗尽	浅的浑浊的水体,包括河流
		谷皮菱形藻	<i>Nitzschia palea</i>			
8	H1	水华鱼腥藻	<i>Anabaena aquae</i>	低含氮量、低含碳量	水体混合、低光照、低含磷量	富营养、分层、含氮低、浅水
9	T	游丝藻	<i>Planctonema</i> sp.	低光照	营养缺乏	具有光限制、表层持续混合的水体,也包括夏季深水湖泊的清澈表层
10	MP	舟形藻	<i>Navicula</i> sp.	混合搅动		经常性搅动、浑浊、浅水
11	W1	裸藻	<i>Euglena</i> sp.	高生化需氧量	牧食作用	有机污染、浅水

太湖浮游植物功能群在时空分布上的差异主要表现在功能群生物量大小和组成比例的变化. 根据独立样本 *T* 检验,2013 年 10 月(秋季)各点之间优势功能群生物量上没有显著差异(图 2),但各区域的功能群组成不同,梅梁湾、贡湖和竺山湖以适应富营养到超富营养的湖泊生境的 M 功能群为主,其他区域以 J 功能群为主;2014 年 1 月份(冬季)汞湖区域主要功能群总生物量极显著高于其他区域($P<0.01$),其中以颗粒沟链藻(*Aulacoseira granulata*)为主的 P 功能群生物量贡献最大,相对比例达到 78.72%;2014 年 4

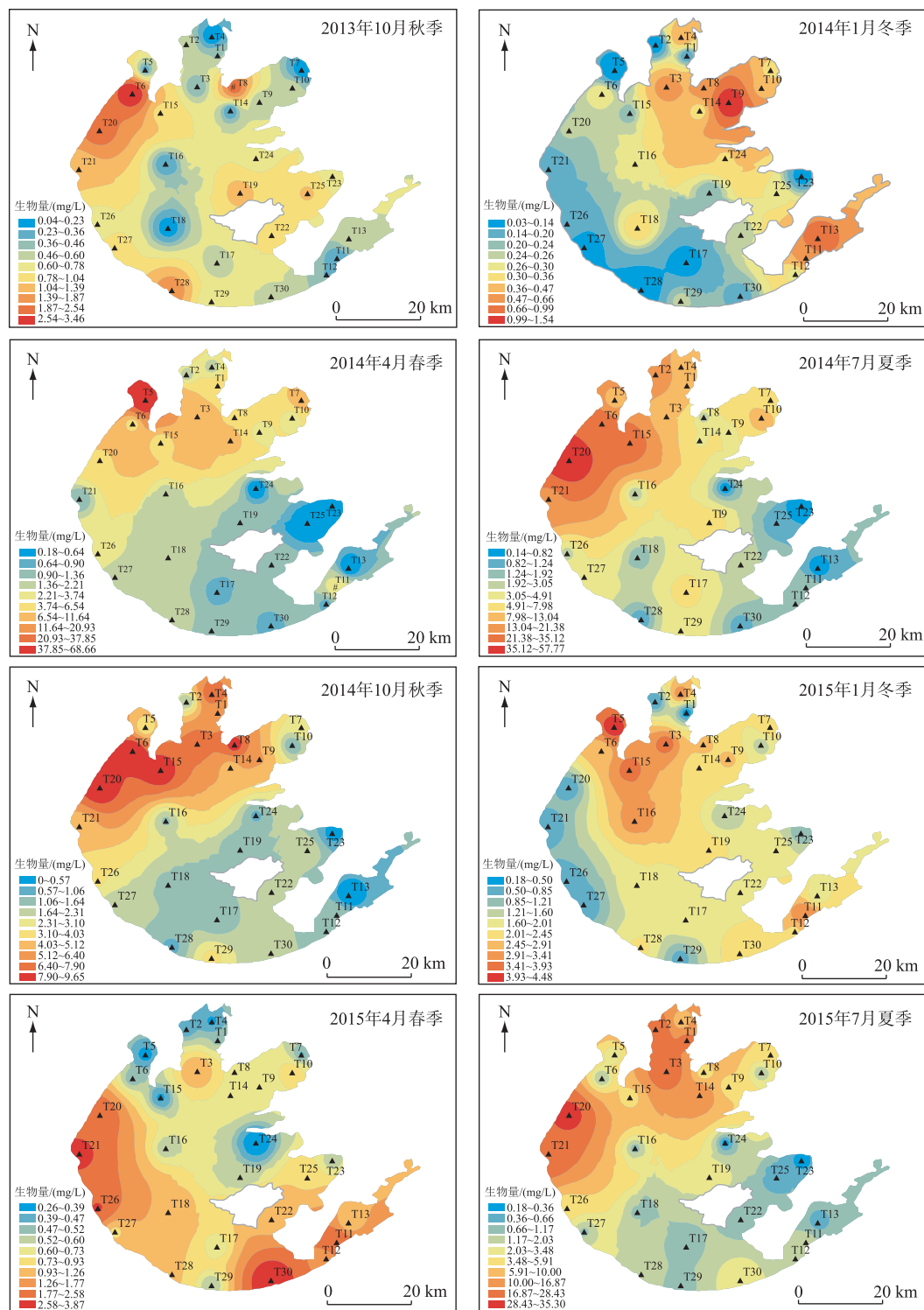


图2 太湖浮游植物主要功能群总生物量水平分布
Fig.2 Horizontal distribution of phytoplankton biomass in Lake Taihu

月(春季)在空间分布上竺山湖的主要功能群总生物量要极显著高于其他区域($P<0.01$),其中以嗜蚀隐藻(*Cryptomonas erosa*)为主的Y功能群的相对比例达到83.15%;2014年7月(夏季)西部沿岸区的主要功能群总生物量要极显著高于其他区域($P<0.01$),其中M功能群在该区域的相对比例达到了84.12%,这主要是因为夏季节光照强度大、温度高,因此适合M型功能群的生长;2014年10月和2015年1月两个季节的数据在空间分布上区域间差异不大,其中秋季浮游植物的分布显示出太湖西北部的梅梁湾、竺山湖和西部沿岸区的主要功能群总生物量要略高于其他区域,从图3可以发现以微囊藻为代表的M功能群在这些区域的比例达到75.88%~78.57%。而进入冬季以后,除了竺山湖的生物量较高以外,其他各区域生物量差异不大。竺山湖地区以梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)为主的C功能群生物量升高,达到50.87%,这是因为水温低和光照强度小,更适合于硅藻门中的梅尼小环藻的生长,其代表的C功能群的相对比例也随之增长^[33];进入春季(2015年4月)和夏季(2015年7月)以后,主要功能群总生物量在各区域间差异明显,其中西部沿岸区和南部沿岸区的主要功能群总生物量要显著高于其他区域($P<0.05$),这主要是与西部沿岸区M功能群和南部沿岸区C功能群生物量的升高有关;而进入夏季以后,西部沿岸区和梅梁湾的主要功能群总生物量要极显著高于其他区域($P<0.01$),这主要是因为M功能群在这两个区域生物量较高,相对比例达到81.78%~90.71%。

从太湖浮游植物功能群整体的时空分布情况来看,M、C和Y功能群是常年的优势功能群,这些功能群都主要分布于中—高富营养的湖泊水体中^[15]。

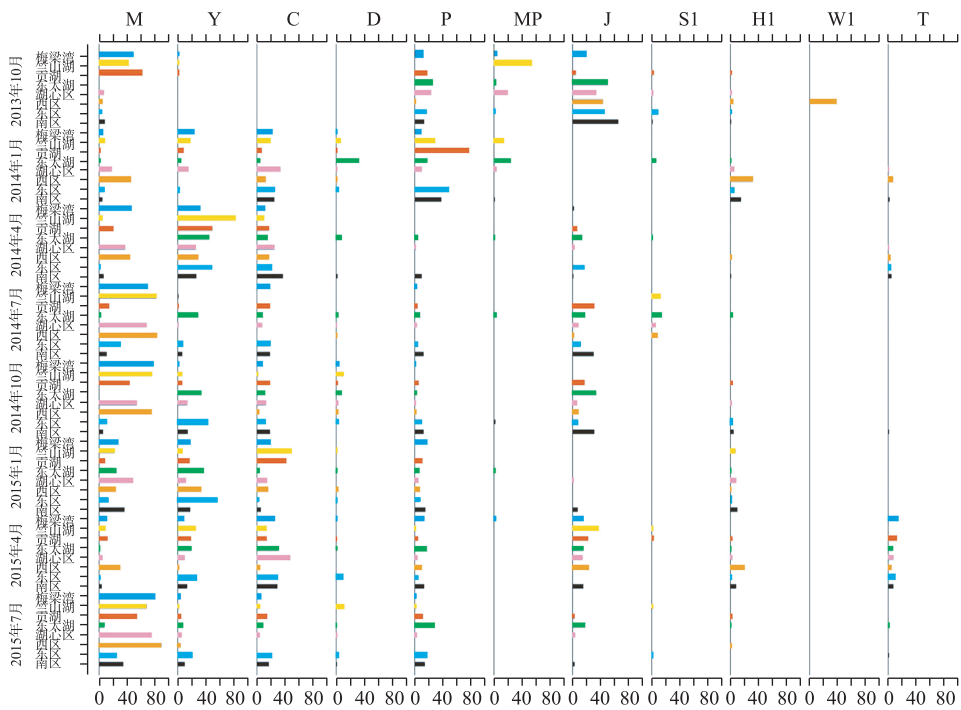


图3 太湖各个区域代表功能群相对生物量变化情况(%)

Fig.3 Relative biomass change of phytoplankton functional groups in each area of Lake Taihu(%)

2.2 基于浮游植物群落的水质评价

2.2.1 Q 指数 通过对太湖2014—2015年8次数据的计算得到8个季度的Q指数的平均范围为0.94~2.16(图4a)。根据结果判定太湖8个季度的水体情况均属于中—耐一差的标准范围。此外,夏季的Q指数明显低于其他季度,表示此时太湖营养化程度最高。其中梅梁湾、竺山湖、湖心区及西区的富营养程度较高。这两年的Q指数大小变化规律均为:夏季<秋季<冬季<春季(图4a),结合水质监测(表2),可推断太湖水体在

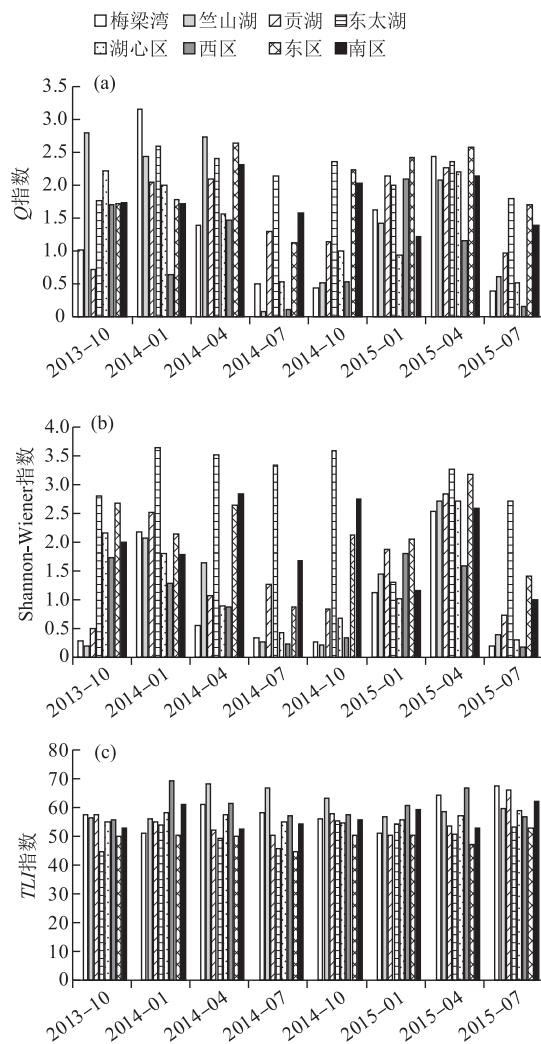


图4 太湖各区域 Q 指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 TLI 指数的季节变化

Fig.4 Q value, Shannon-Wiener index and TLI value of different sites of Lake Taihu in different seasons

春、冬季.其他理化数据差异不明显.

2.3.2 水质评价指标与环境因子的 Pearson 相关性分析 将各个季度的多种环境因子相互之间及与 Q 指数、香农指数、 TLI 指数之间进行相关性分析,结果表明 Q 指数与水温呈显著负相关; Q 指数、Shannon-Wiener 指数均与 NH_4^+-N 浓度呈显著正相关;此外, Q 指数与 Shannon-Wiener 指数之间存在显著的正相关关系.环境因子之间,DO 浓度与水温呈极显著的负相关;pH 与水温、 BOD_5 呈显著正相关,与 DO 浓度呈显著负相关; NH_4^+-N 浓度与水温呈显著负相关,与 DO 浓度呈显著正相关; COD_{Mn} 与 TP 浓度、 BOD_5 均呈显著正相关(表 3).

从表 3 整体来看,水温与 DO 浓度、pH、 NH_4^+-N 浓度等环境因子均存在显著甚至极显著的关系,而水温的变化更多地与季节演替有关,这也充分说明了太湖水质在不同季节有明显变化,尤其在夏季太湖水质较差. Q 指数也因为温度的升高而呈现下降的趋势,说明夏季富营养化程度较高.

春、冬季时富营养化现象较轻,而夏、秋季为太湖水体蓝藻暴发的重要时间段.

而从年际变化来看,2015 年太湖的 Q 指数比 2014 年低,可以判定太湖水质状态近两年有所下降.总体富营养化程度明显升高.而且两年的 Q 指数均在 2 以下,说明整体上太湖水体的富营养化污染问题严重.这也验证了前面对功能群特征的分析中夏季太湖 M 功能群适合暴晒和富营养环境特征的结论.

2.2.2 Shannon-Wiener 多样性指数 通过对太湖 2014—2015 年的 8 次数据的计算得到 Shannon-Wiener 多样性指数在 0.86~2.67 之间(图 4b),太湖总体属于中—重污染水体.秋季(2013 年 10 月)、冬季(2014 年 1 月)以及春季(2015 年 4 月)的 Shannon-Wiener 多样性指数要明显高于其他季度,水质较好,而夏季的 Shannon-Wiener 多样性指数在 0.85~1.05 之间,水体处于重污染状态,其中梅梁湾、竺山湖、贡湖及西区的污染状况较为明显.从年度来看,2014 年的 Shannon-Wiener 多样性指数平均值为 1.63,2015 年的 Shannon-Wiener 多样性指数均值为 1.59.

2.2.3 TLI 综合富营养化指数 太湖 2014—2015 年综合富营养化指数的计算结果显示,太湖总体属于轻度富营养化,其中竺山湖、西部沿岸区污染较为严重,属于中度富营养化.但从整体变化来看,对比两年同季度的 TLI 指数发现,2015 年的太湖水质持续恶化,尤其是 2015 年 7 月时,综合富营养化指数 TLI 就已经达到 59.49,基本属于中度富营养化(图 4c).

2.3 太湖浮游植物与环境因子的关系

2.3.1 环境因子 2014—2015 年太湖 8 个季度水体环境因子平均值及变化范围见表 2,可见水温在秋、夏季明显高于冬、春季.2014 年的环境因子 DO、 NH_4^+-N 浓度明显冬季高于其他季节,2015 年的环境因子如 DO、 NH_4^+-N 和 TN 浓度在夏、秋季低于

表 2 2014 年和 2015 年太湖水体环境因子
Tab.2 Environmental factors of water in Lake Taihu during 2014 and 2015

时间	水质指标	平均值(范围)			
		秋季	冬季	春季	夏季
2014 年	WT/℃	23.24 (21.90~28.80)	5.93 (4.50~7.90)	16.82(15.90~17.80)	26.14(24.70~28.80)
	SD/m	0.40 (0.24~0.82)	0.40 (0.27~0.68)	0.41(0.34~0.63)	0.40 (0.37~0.50)
	DO/(mg/L)	7.45 (3.03~10.12)	11.86 (10.44~13.29)	8.40(6.98~9.60)	8.00 (6.47~9.77)
	pH	8.67 (7.59~9.58)	8.19(7.88~8.80)	8.38(7.99~8.85)	8.50 (7.88~8.98)
	NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)	0.14 (0.04~0.46)	0.25(0.03~1.57)	0.11(0.03~0.50)	0.13 (0.03~1.43)
	TN/(mg/L)	1.70 (0.49~4.81)	1.70(0.41~4.60)	2.65(0.78~6.23)	2.08 (0.86~6.46)
	TP/(mg/L)	0.12 (0.03~0.28)	0.06(0.02~0.13)	0.05(0.03~0.13)	0.06 (0.02~0.20)
	BOD ₅ /(mg/L)	2.97(1.10~8.54)	2.24(1.24~4.04)	2.92(1.24~7.18)	2.34 (1.24~4.97)
	COD _{Mn} /(mg/L)	5.47(3.29~11.5)	3.97(2.42~5.79)	4.35(2.78~8.69)	3.82 (2.56~6.85)
2015 年	WT/℃	21.79(21.20~22.70)	6.42(6.00~7.20)	13.21(12.00~15.10)	23.71(22.80~27.60)
	SD/m	0.40(0.34~0.54)	0.37(0.05~0.48)	0.39(0.29~0.45)	0.42(0.23~0.90)
	DO/(mg/L)	8.74(7.83~11.25)	11.48 (10.48~12.40)	10.79(8.02~12.08)	7.84(6.06~8.59)
	pH	8.49(8.08~9.14)	8.24(7.99~8.67)	8.19(7.75~8.41)	8.26 (7.64~8.99)
	NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)	0.08(0.03~0.35)	0.21(0.02~1.35)	0.31 (0.04~2.59)	0.10 (0.25~0.61)
	TN/(mg/L)	0.84(0.34~2.38)	1.75(0.7~5.56)	2.71 (1.36~6.28)	1.86 (0.86~3.03)
	TP/(mg/L)	0.07(0.02~0.16)	0.08(0.04~0.16)	0.06 (0.02~0.12)	0.08 (0.02~0.15)
	BOD ₅ /(mg/L)	2.43(1.57~5.19)	2.31(0.74~6.21)	1.85 (0.92~3.30)	2.32 (0.67~5.63)
	COD _{Mn} /(mg/L)	4.26(2.99~7.71)	4.44(3.03~7.31)	3.76 (2.66~4.96)	3.91 (2.40~6.38)

表 3 太湖各种环境因子与生物指标 Q 指数的 Pearson 相关性分析
Tab.3 Pearson correlation analysis of various environmental factors and biological indexes Q index in Lake Taihu

	WT	SD	DO	pH	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP	BOD ₅	COD _{Mn}	Q 指数	多样性 指数	TLI 指数
WT	1											
SD	0.605	1										
DO	-0.947 **	-0.656	1									
pH	0.715 *	0.199	-0.761 *	1								
NH ₄ ⁺ -N	-0.725 *	-0.557	0.807 *	-0.628	1							
TN	-0.132	0.053	0.065	-0.331	0.423	1						
TP	0.273	-0.078	-0.352	0.551	-0.186	-0.384	1					
BOD ₅	0.360	0.322	-0.612	0.715 *	-0.649	-0.108	0.422	1				
COD _{Mn}	0.142	-0.117	-0.339	0.681	-0.271	-0.265	0.819 *	0.773 *	1			
Q 指数	-0.732 *	-0.335	0.644	-0.305	0.718 *	0.244	-0.040	-0.053	0.196	1		
多样性指数	-0.540	-0.543	0.564	-0.068	0.721 *	-0.071	0.344	-0.185	0.344	0.815 *	1	
TLI 指数	0.010	0.574	0.006	-0.625	0.024	0.352	-0.469	-0.376	-0.647	-0.164	-0.465	1

** 相关性在 0.01 水平显著(双尾); * 相关性在 0.05 水平显著(双尾).

2.3.3 太湖浮游植物功能群与环境因子的 RDA 分析 根据表 3 中显示,太湖水温、DO 浓度、BOD₅与其他指标间的相关性较强,因此中选取相关性较弱的透明度、TN、TP、COD_{Mn}、NH₄⁺-N 浓度和 pH 指标,分别研究 2014 和 2015 年不同季节太湖 11 个代表性功能群与环境因子的关系.

先对太湖浮游植物代表功能群数据分别进行去趋势对应分析(DCA),结果显示 Lengths of gradient 小于 3,故采用 RDA 进行物种与环境因子的分析^[22]. 浮游植物功能群与环境因子的 RDA 分析结果显示,4 个排序轴对物种与环境因子关系的累积方差为 99.8%,累计解释 97.2%(表 4). 由图 5 可知,NH₄⁺-N、TP、TN 浓度

表 4 物种与水环境因子的相关系数

Tab.4 Correlation coefficients of species and water factors

轴	特征值	物种-环境 相关性	累计方差/%	
			物种数据	物种-环境关系
1	0.697	0.991	69.7	71.5
2	0.236	0.985	93.3	95.7
3	0.031	0.999	96.3	98.8
4	0.009	0.992	97.2	99.8

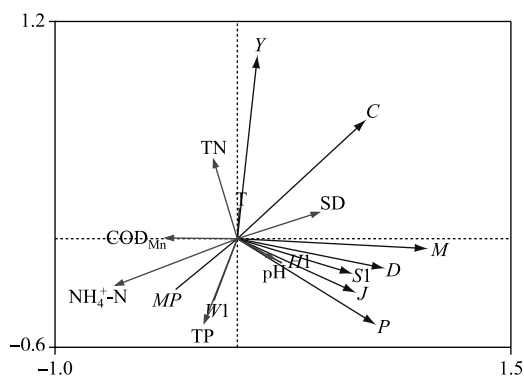


图 5 太湖代表性功能群与环境因子的 RDA 分析
Fig.5 RDA analysis of representative functional groups and environmental factors in Lake Taihu

等是影响浮游植物功能群的主要因素,其中功能群 M 和 C 与透明度、pH 呈正相关;功能群 Y、T 与 TN 浓度呈正相关;功能群 H1 与 TN 浓度呈负相关,因此 H1 功能群在含氮量较低的水体中占优势,如 2014、2015 年的冬季(表 3);功能群 MP、W1 均与 TP、COD_{Mn} 浓度呈极其显著正相关,与透明度呈负相关。

3 讨论

3.1 太湖浮游植物功能群的季节演替特征

由于浮游植物种类繁多,从业人员之间存在专业性差异,甚至不同研究者对同一区域种类鉴定结果都差异很大.Reynolds 在传统植物分类学的基础之上,把具有相同生态位的浮游植物定义为同一种功能群.功能群从物种的生态环境特征出发,对环境具有更明确的指示意义^[33-34].现如今对功能群的分类方法主要分为 3 种:FG (Functional Groups)、MFG (Morpho-Functional Groups) 和 MBFG (Morpho-Based Functional Groups)^[15],它们均有各自的优势和劣势,本文选用的 FG 功能群分类方法,即使不同种属的浮游植物也可能因为在相同的环境中出现而被划入相同的功能群中。

太湖处于我国经济增长最快、城市群密度最高的区域之一,其所承受的环境及生态压力日益

严重.2013 年 10 月—2015 年 7 月的浮游植物数据显示太湖全年的主要功能群为 M、C 和 Y,其所指示的生境特征均表明太湖为富营养型湖泊.以梅尼小环藻为代表的 C 功能群能适应弱光低温条件^[18],对分层现象敏感.太湖 2014 年 1 月(秋)、2015 年 4 月(春)的监测数据显示,C 功能群占主要优势,可能因为冬、春季节为枯水期,昼夜温差较大,水体较其他季节更易发生混合^[35].微囊藻属为代表的 M 功能群在夏、秋季节的相对生物量均达到近 50%,这说明该当前环境比较适合该功能群生长,夏季气温较高,在氮磷浓度较高的富营养水体适合微囊藻等藻类生长.而以嗜蚀隐藻为主的 Y 功能群主要存在于水温较低的春、冬季节。

3.2 太湖浮游植物功能群特征与环境因子的相关性

水生生态系统中浮游植物种类和数量均与水体环境之间存在着密切的联系^[36].太湖作为我国第三大淡水湖泊,现已经处于富营养化状态,浮游植物功能群与环境因子之间的关系密切.环境变量与物种数据的 RDA 分析表示,不同的功能群受到不同环境因子不同程度的影响.水温、透明度、DO、BOD₅、TN 及 TP 浓度是影响太湖藻类功能群分布的主要环境因子,其中水温成为 M、D、S1、J、C 等多个功能群分布的主要影响因素,这与林岩璇等^[37]对黑龙江省宁安县的镜泊湖、于洪贤等^[38]对牡丹江的研究结果一致。

太湖中的 M 功能群在夏、秋季占主要优势,可能与其具有耐暴晒的习性有关^[7],夏、秋季的温度较高,光照较强.在氮、磷等营养盐满足其生长繁殖的情况下,温度是影响 M 功能群季节分布的主要影响因子;功能群 J 仅主要出现在夏、秋季,这可能是因为夏季气温较高,且多强对流暴雨天气,导致大量外源污染物进入湖中,水体透明度相对降低,而 J 功能群常生于浑浊的富营养化水体中^[18],这也在本文研究中得到验证,因此除温度外,透明度也是功能群 J 的主要影响因子^[39].春、冬季节,太湖以 Y 功能群为主,主要受到 TN、BOD₅ 等环境因子的影响,而以嗜蚀隐藻为代表的 Y 功能群对高光敏感,喜欢生活在冷水环境中,因此冬、春季该功能群生物量高,随着进入夏季以后,温度的变化影响了功能群 Y 的生物量^[40-41].除此以外,H1 功能群仅在 2015 年 4 月作为优势功能群出现,且与 TN 浓度呈负相关,这与其对低氮具有耐受性的的结论一致^[18],因此

TN 浓度是影响 H1 功能群季节分布的主要影响因子.由此可见,浮游植物季节演替是不同季节浮游植物和多种环境因子共同作用的结果.

此外,太湖属于亚热带气候,其温度、降雨等气候变化明显,最新研究表明,近年来因为气温升高导致水温升高,尤其是积温导致亚热带地区出现水华提前爆发并加剧的现象^[42],而夏季属于多雨季节,降雨量较大,导致水流速度变大,冲刷作用可能导致藻类的生物量和种类的降低,因此水文(流速、水位)也可能也是会影响太湖浮游植物群落变化的主要因素之一^[43].因此在考虑功能群的指示作用要考虑多方面因素.

3.3 水质评价指标对比

湖泊富营养化评价方法主要有特征法、藻类指数法、综合营养指数法等.此外,利用功能群的分类赋值计算得到的 Q 指数评价方法目前应用也较为广泛^[30].但一般对湖泊进行单一的方法评价往往都不能客观反映水体真实营养状态,因此本研究中采用多样性指数、综合富营养化指数、营养状态 Q 指数几种方法对太湖富营养化进行综合评价.

Q 指数的计算结果显示,太湖的 Q 指数均值为 1.61,指示太湖为富营养化耐受水体,2015 年度的 Q 指数明显小于 2014 年度.按季度变化来说,两年中夏、秋季的 Q 指数均明显低于其他季节,可推断夏、秋季是太湖蓝藻水华问题暴发的重要季节.与 2014 年相比,2015 年太湖的富营养程度有所加重,这与对太湖水体氮、磷营养盐的变化研究结论一致^[11,27].春季时 Q 指数较高的原因可能是春季 M 功能群减少,其他赋值高的功能群比例增大.Shannon-Wiener 多样性指数评价方法是通过水体中生物种类的组成来推断水质状况^[30],Pearson 相关性的分析显示很多不同的环境因子之间存在显著关系, Q 指数与 Shannon-Wiener 多样性指数呈显著正相关,也都与部分环境因子之间存在一定的显著相关性,说明这两种方法评价结果较为一致,都具有很好的指示作用.

传统的 TLI 综合富营养化指数法计算结果显示,太湖整体处于轻度富营养化状态,部分区域污染严重,但总体来看,2015 年的综合富营养化指数高于 2014 年,因此得到基本和 Q 指数监测指标相同的结论.但 2014 年 7 月的 TLI 指数仅为 54.62,低于同年冬季(2014 年 1 月)和春季(2014 年 4 月),这与实际情况不符,可能是由于传统的 TLI 指数的计算方法是基于理化参数指标的,而这些指标往往容易受到环境变化的影响,比如在夏季降雨量较大,入湖水流可能会导致湖中营养盐浓度偏低^[44-46],从而导致太湖在夏季 TLI 指数的评价结果偏低,此时水体富营养状态的减少不是因为水质的改善,也不是生物量减少的结果,而是理化因子的反映.

因此 Q 指数不仅能直接利用水体中浮游植物功能群对环境的反映^[47],而且同样可以像 Shannon-Wiener 多样性指数一样反映浮游植物结构的复杂程度,进而指示水质状况^[48-49].

4 结论

太湖浮游植物共分类鉴定出 20 组功能群,其中主要代表性功能群 11 组,分别为 M、Y、C、J、P、S1、D、H1、T、MP、W1.秋、冬季功能群种类数较多;夏季的功能群生物量明显高于其他季节;在空间分布上,西部沿岸区和梅梁湾的浮游植物生物量明显高于其他湖区.

太湖浮游植物功能群的季节演替变化明显,代表性功能群中 M、C、Y 功能群组成的比例较高,其中 M 功能群的相对生物量最高,达 77.95%,而这些功能群都主要分布在富或高富营养化的湖泊水体中,由此可以看出太湖富营养化问题严重.通过季节的功能群变化特征可以看出,夏、秋季是太湖蓝藻水华的高发期.

通过对太湖 2013 年 10 月—2015 年 7 月共 8 次的浮游植物功能群数据计算,得到 Q 指数范围为 0.94~2.16.其中夏季(2014 年 7 月和 2015 年 7 月) Q 指数最低,秋季(2013 年 10 月和 2014 年 10 月)次之,且 2015 年度各季度 Q 指数均较 2014 年同比降低,表示太湖水体富营养化程度加重,而夏、秋季是水体富营养化最严重的时段,这与功能群季节演替的结论一致.

Pearson 相关性和 RDA 分析表明功能群评价是最能反映水体真实营养状态的方法之一.其中 Q 指数与水温、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均有显著关系,各环境因子间也存在显著关系,尤其水温最为明显,与 DO 浓度、pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度等环境因子均存在显著甚至极显著的关系,因此解决太湖富营养化问题要考虑季节这一重要因素,针对不同季节决定水华的环境因子来确定预防和治理方案.

5 参考文献

- [1] Hu HJ, Wei YX eds. Freshwater algae-systems, classification and ecology in China. Beijing: Science Press, 2006: 1-1023. [胡鸿钧, 魏印心等. 中国淡水藻类: 系统分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006: 1-1023.]
- [2] Meng SL, Chen JZ, Fan LM *et al.* Eco-characteristics of phytoplankton in Lake Wuli, Lake Taihu in 2007. *J Lake Sci*, 2009, **21**(6): 845-854. DOI: 10.18307/2009.0615. [孟顺龙, 陈家长, 范立民等. 2007 年太湖五里湖浮游植物生态学特征. 湖泊科学, 2009, **21**(6): 845-854.]
- [3] Meng SL, Chen JZ, Hu GD *et al.* Annual dynamics of phytoplankton community in Meiliang Bay, Lake Taihu, 2008. *J Lake Sci*, 2010, **22**(4): 577-584. DOI: 10.18307/2010.0415. [孟顺龙, 陈家长, 胡庚东等. 2008 年太湖梅梁湾浮游植物群落周年变化. 湖泊科学, 2010, **22**(4): 577-584.]
- [4] Yuan JL, Yin WL, Shen JY *et al.* Phytoplankton and its relations with eutrophication of southern Taihu Lake. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28**(11): 2197-2201. [原居林, 尹文林, 沈锦玉等. 南太湖浮游植物特征及富营养化评价. 生态学杂志, 2009, **28**(11): 2197-2201.]
- [5] Li QQ, Deng JC, Hu WP *et al.* Community structure of phytoplankton and its relationships with environmental factors in drinking water source of Jinshu Bay, Taihu Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(7): 1844-1850. [李钦钦, 邓建才, 胡维平等. 太湖金墅湾水源浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 2010, **21**(7): 1844-1850.]
- [6] Wu SC, Chen WM. The periodic change of phytoplankton biomass in Taihu Lake. *China Environmental Science*, 2004, **24**(2): 151-154. [吴生才, 陈伟民. 太湖浮游植物生物量的周期性变化. 中国环境科学, 2004, **24**(2): 151-154.]
- [7] Qian KM, Chen YW, Song XL. Long-term development of phytoplankton dominant species related to eutrophication in Lake Taihu. *Ecological Science*, 2008, **27**(2): 65-70. [钱奎梅, 陈宇炜, 宋晓兰. 太湖浮游植物优势种长期演化与富营养化进程的关系. 生态科学, 2008, **27**(2): 65-70.]
- [8] Xu HS, Zhang Y, Wang YC *et al.* Spatial and temporal variation in the composition of phytoplankton species in Taihu Lake. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2012, **4**(6): 38-41. [徐恒省, 张咏, 王亚超等. 太湖浮游植物种类组成时空变化规律. 环境监控与预警, 2012, **4**(6): 38-41.]
- [9] Zhou T, Li ZK. The relationship between phytoplankton and nutrients of Lake Taihu, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(2): 327-332. [周涛, 李正奎. 太湖浮游植物与营养盐相互关系. 农业环境科学学报, 2013, **32**(2): 327-332.]
- [10] Li D, Li XW, Niu ZC *et al.* Structure of phytoplankton community and relationship between phytoplankton community and water quality in Taihu Lake. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(11): 1814-1820. [李娣, 李旭文, 牛志春等. 太湖浮游植物群落结构及其与水质指标间的关系. 生态环境学报, 2014, **23**(11): 1814-1820.]
- [11] Liu X, Qian KM, Chen YW *et al.* A comparison of factors influencing the summer phytoplankton biomass in China's three largest freshwater lakes: Poyang, Dongting, and Taihu. *Hydrobiologia*, 2017, **792**: 283-302.
- [12] Liu X, Lu XH, Chen YW *et al.* Long-term evolution of planktonic diatoms and their relationships with environmental factors in Lake Taihu. *Acta Sci Circum*, 2012, **32**(4): 821-827. [刘霞, 陆晓华, 陈宇炜等. 太湖浮游硅藻时空演化与环境因子的关系. 环境科学学报, 2012, **32**(4): 821-827.]
- [13] Ding YQ, Qin BQ, Deng JM. Effects of episodic sediment resuspension on phytoplankton in Lake Taihu: focusing on photosynthesis, biomass and community composition. *Aquatic Sciences*, 2017, **79**(1): 1-13.
- [14] Chen YW, Fan CX, Teubner K *et al.* Changes of nutrients and phytoplankton chlorophyll-a in a large shallow lake, Taihu, China: an 8-year investigation. *Hydrobiologia*, 2003, **506**: 273-279.
- [15] Hu R, Lan YQ, Xiao LJ *et al.* The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups. *J Lake Sci*, 2015, **27**(1): 11-23. DOI: 10.18307/2015.0102. [胡韧, 蓝于倩, 肖利娟等. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法及应用. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 11-23.]
- [16] Reynolds CS, Huszar V, Kruk C *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428.
- [17] Salmaso N, Padisák J. Morpho-functional groups and phytoplankton development in two deep lakes (Lake Garda, Italy and Lake Stechlin, Germany). *Hydrobiologia*, 2007, **578**(1): 97-112.

- [18] Padisák J, Crossetti L, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1): 1-19.
- [19] Weithoff G. The concepts of 'plant functional types' and 'functional diversity' in lake phytoplankton—a new understanding of phytoplankton ecology. *Freshwater Biology*, 2003, **48**(9): 1669-1675.
- [20] Becker V, Huszar VLM, Crossetti LO. Responses of phytoplankton functional groups to the mixing regime in a deep sub-tropical reservoir. *Hydrobiologia*, 2009, **628**(1): 137-151.
- [21] Lu JS, Hu YP. Spatiotemporal succession of algae functional groups and the influence of environment change in a deep-water reservoir. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2611-2617. [卢金锁, 胡亚潘. 深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响. 环境科学, 2013, **34**(7): 2611-2617.]
- [22] Huang GJ, Li QH, Chen C *et al.* Phytoplankton functional groups and their spatial and temporal distribution characteristics in Hongfeng Reservoir, Guizhou Province. *Acta Ecological Science*, 2015, **35**(17): 1-14. [黄国佳, 李秋华, 陈稼等. 贵州高原红枫湖水浮游植物功能分组及其时空分布特征. 生态学报, 2015, **35**(17): 1-14.]
- [23] Kruk C, Mazzeo N, Lacerot G *et al.* Classification schemes for phytoplankton: a local validation of a functional approach to the analysis of species temporal replacement. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(9): 901.
- [24] Jin XC, Tu QY eds. Specification for investigation of lake eutrophication: second edition. Beijing: China Environmental Science Press, 1900. [金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范: 第二版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.]
- [25] Zhao W ed. *Hydrobiologia*. Beijing: China Agriculture Press, 2005. [赵文. 水生生物学. 北京: 中国农业出版社, 2005.]
- [26] Tang GA ed. ArcGIS geographic information system spatial analysis experiment course. Beijing: Science Press, 2006. [汤国安. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [27] Dai XL, Qian PQ, Ye L *et al.* Changes in nitrogen and phosphorus concentrations in Lake Taihu, 1985–2015. *J Lake Sci*, 2016, **28**(5): 935-943. DOI: 10.18307/2016.0502. [戴秀丽, 钱佩琪, 叶凉等. 太湖水体氮、磷浓度演变趋势 (1985–2015 年). 湖泊科学, 2016, **28**(5): 935-943.]
- [28] Zhu WJ, Pang WT, You QM *et al.* Phytoplankton community structure and the evaluation of water quality in spring Huaihe River Basin. *J Lake Sci*, 2017, **29**(3): 637-645. DOI: 10.18307/2017.0312. [朱为菊, 庞婉婷, 尤庆敏等. 淮河流域春季浮游植物群落结构特征及其水质评价. 湖泊科学, 2017, **29**(3): 637-645.]
- [29] Padisák J, Borics G, Grigorczyk I *et al.* Use of phytoplankton assemblages for monitoring ecological status of lakes within the Water Framework Directive: the assemblage index. *Hydrobiologia*, 2006, **553**(1): 1-14.
- [30] Gao GJ, Xiao LJ, Lin QQ *et al.* Structure of phytoplankton functional groups and water quality assessment of main reservoirs in Hainan Province. *Ecological Science*, 2013, **32**(2): 144-150. [高国敬, 肖利娟, 林秋奇等. 海南省典型水库浮游植物功能类群的结构特征与水质评价. 生态科学, 2013, **32**(2): 144-150.]
- [31] Kong XH, Xiao LL, Su HJ *et al.* Status of aquatic plants and its relationship with water environment factors in the lakes along the lower reaches of the Yangtze River. *J Lake Sci*, 2015, **27**(3): 385-391. DOI: 10.18307/2015.0303. [孔详虹, 肖兰兰, 苏豪杰等. 长江下游湖泊水生植物现状及与水环境因子的关系. 湖泊科学, 2015, **27**(3): 385-391.]
- [32] Colin S R, Vera H, Carla K *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428.
- [33] Huang GJ. Phytoplankton function groups and their spatial and temporal succession characteristics in Hongfeng Reservoir and Baihua Reservoir, Guizhou Province, Guizhou Province [Dissertation]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2015. [黄国佳. 贵州高原红枫湖水库和百花湖水浮游植物功能群时空演替特征[学位论文]. 贵阳: 贵州师范大学, 2015.]
- [34] Huang XH, Hu Ren, Lei LM *et al.* Seasonal succession of phytoplankton functional groups in typical small and medium-sized reservoirs in southern China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(2): 311-318. [黄享辉, 胡韧, 雷腊梅等. 南亚热带典型中小型水库浮游植物功能群季节演替特征. 生态环境学报, 2013, **22**(2): 311-318.]
- [35] Zhang YC, Qian X, Qian Y *et al.* Field measurement and analysis on diurnal stratification in Taihu Lake. *Environmental Science and Management*, 2008, **33**(6): 117-121. [张玉超, 钱新, 钱瑜等. 太湖水温分层现象的监测与分析. 环境科学与管理, 2008, **33**(6): 117-121.]
- [36] Lan YQ, Yuan YW, Peng L *et al.* Cage cultural eutrophication and phytoplankton functional groups as bio-indicators in Jianggu Reservoir (Zhao qing City, Guangdong Province). *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(6): 1028-

1036. [蓝于倩, 袁一文, 彭亮等. 江谷水库鱼类网箱养殖富营养化及浮游植物功能群的指示作用. 生态环境学报, 2015, 24(6): 1028-1036.]
- [37] Lin KX, Wang X, Wang Y *et al.* Composition and influencing factors of algal functional groups in Jingpo Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(4): 520-528. [林岍璇, 汪星, 王瑜等. 镜泊湖浮游藻类功能群的演替特征及其影响因素. 环境科学研究, 2017, 30(4): 520-528.]
- [38] Yu HX, Qu C, Ma CX. Correlation between phytoplankton abundance and its environmental factors in Mudan River. *Wetland Science*, 2008, 6(2): 293-297. [于洪贤, 曲翠, 马成学. 牡丹江浮游植物丰度与环境因子的相关性分析. 湿地科学, 2008, 6(2): 293-297.]
- [39] Wang X, Li LQ, Zheng BH *et al.* Composition and influential factors of algal function groups in Dongting Lake. *China Environmental Science*, 2016, 36(12): 3766-3776. [汪星, 李利强, 郑丙辉等. 洞庭湖浮游藻类功能群的组成特征及其影响因素研究. 中国环境科学, 2016, 36(12): 3766-3776.]
- [40] Barone R, Naselli-Flores L. Distribution and seasonal dynamics of *Cryptomonads* in Sicilian water bodies. *Hydrobiologia*, 2003, 502: 325-329.
- [41] Reynolds CS, Thompson JM, Ferguson AJ *et al.* Loss processes in the population dynamics of phytoplankton maintained in closed systems. *Journal of Plankton Research*, 1982, 4: 561-600.
- [42] Deng JM, Qin BQ, Paerl HW *et al.* Earlier and warmer springs increase cyanobacterial (*Microcystis* spp.) blooms in sub-tropical Lake Taihu, China. *Freshwater Biology*, 2014, 59: 1076-1085.
- [43] Qian KM, Liu X, Duan M *et al.* Distribution and its influencing factors of bloom-forming cyanobacteria in Poyang Lake. *China Environmental Science*, 2016, 36(1): 261-267. [钱奎梅, 刘霞, 段明等. 鄱阳湖蓝藻分布及其影响因素分析. 中国环境科学, 2016, 36(1): 261-267.]
- [44] Yi R, Cai DS, Zhang YX *et al.* Benthic diatom assemblages distribution in Longjiang River in relation to environmental factors. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(4): 40-46. [易燃, 蔡德所, 张永祥等. 龙江底栖硅藻群落特征及与环境因子的关系. 环境科学与技术, 2015, 38(4): 40-46.]
- [45] Deng PY, Zhang W, Wang XT *et al.* The effects of water quality on epilithic diatoms communities of Dongjiang river basin. *Acta Ecological Sciences*, 2015, 35(6): 1-13. [邓培雁, 张婉, 王旭涛等. 水质对东江流域附生硅藻群落的影响研究. 生态学报, 2015, 35(6): 1-13.]
- [46] Liu J. Diversity and metacommunity of benthic diatoms in the Dong River watershed [Dissertation]. Guangzhou: Jinan University, 2013. [刘静. 东江流域底栖硅藻多样性及集合群落的研究[学位论文]. 广州: 暨南大学, 2013.]
- [47] Li L, Li QH, Jiao SL. Response of phytoplankton functional groups to eutrophication in summer at Xiaoguan Reservoir. *Environmental Science*, 2015, 36(12): 4437-4442. [李磊, 李秋华, 焦树林等. 小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应. 环境科学, 2015, 36(12): 4437-4442.]
- [48] Min WW, Wang PP, Li LJ *et al.* Relationship between phytoplankton functional groups and environmental factors in the Wei River Basin. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(9): 1397-1406. [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. 环境科学研究, 2015, 28(9): 1397-1406.]
- [49] An R, Wang FY, Yu HX *et al.* Characteristics and physical factors of phytoplankton functional groups in Small Xingkai Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(7): 985-994. [安睿, 王凤友, 于洪贤等. 小兴凯湖浮游植物功能群特征及其影响因子. 环境科学研究, 2016, 29(7): 985-994.]