

安徽太平湖浮游植物群落结构*

熊莲¹, 刘冬燕^{1,2**}, 王俊莉¹, 吴明珠¹, 李东京¹

(1: 上海师范大学环境科学系, 上海 200234)

(2: 上海师范大学城市生态与环境研究中心, 上海 200234)

摘要: 安徽太平湖已被列入国家第二批生态环境保护专项。于2012年11月到2014年10月对太平湖浮游植物进行调查,共鉴定出浮游植物109属150种。其中绿藻门最多,共计46属80种,占总种数的53.33%。黄藻门未在镜检中出现,团藻在3个样品中出现;浮游植物丰度平均值为 212.81×10^4 cells/L,生物量平均值为1.04 mg/L。Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数平均值分别为2.17和0.61。优势种共4门17种,其中O-寡污带指示藻1种,P-多污带指示藻4种,其余12种藻类均为 β -中污带指示藻,嗜蚀隐藻(*Cryptomonas erosa*)和尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*)未成为优势种,太平湖优势门类为硅藻和蓝藻;2013和2014年变化表明,太平湖浮游植物群落结构有变化但变幅不大,浮游植物群落结构处于比较稳定的状态;浮游植物聚类分析表明,夏、秋季太平湖浮游植物群落结构相似,H1、H2和H3采样点浮游植物群落结构相似,H4和H5采样点浮游植物群落结构相似;相关性分析表明,丰度、生物量与水温呈极显著正相关,丰度、生物量与透明度呈极显著负相关,水质指标的变化会直接影响到浮游植物的变动,并伴随太平湖水生态系统的复杂变化和生态学过程。

关键词: 安徽太平湖;浮游植物;多样性指数;优势种;相关性;聚类分析;群落结构

Phytoplankton community structure in Lake Taiping of Anhui Province

XIONG Lian¹, LIU Dongyan^{1,2**}, WANG Junli¹, WU Mingshu¹ & LI Dongjing¹

(1: Department of Environmental Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, P.R.China)

(2: Urban Ecology and Environment Research Centre, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, P.R.China)

Abstract: Lake Taiping of Anhui Province has been listed in the second batch of national ecological environment protection. A preliminary study was conducted on the phytoplankton in Lake Taiping from November 2012 to October 2014. A total of 150 phytoplankton species belonging to 109 genera were identified. The phytoplankton community was dominated by Chlorophyta which is comprised of 46 genera and 80 species, and the proportion of Chlorophyta is 53.33%. Xanthophyta didn't appear in the microscopic examination, but *Volvox* appeared in 3 samples. The average phytoplankton abundance is 212.81×10^4 cells/L, the average phytoplankton biomass is 1.04 mg/L. The average of Shannon-Wiener and Pielou evenness index are 2.17 and 0.61, respectively. The dominant species add up to 17, belonging to 4 phyla, and 12 species of them are β -moderate pollution indication algae which focus on Cyanophyta and Bacillariophyta. Annual change indicates that phytoplankton community structure is relatively stable in Lake Taiping. Cluster analysis indicates that phytoplankton community structure is similar between summer and autumn, and phytoplankton community structure is similar in H1, H2, H3 to the H4 and H5 sampling sites. Correlation analysis indicates that abundance and biomass are significant positively related with temperature, but abundance and biomass are significant negatively related with the transparency. Changes in water quality will directly affect phytoplankton changes, and cause complex changes in ecosystem and ecological process in Lake Taiping.

Keywords: Lake Taiping; phytoplankton; diversity index; dominant species; correlation; cluster analysis; community structure

多年来,人们将湖泊当作“天然纳污场”,工业废水和生活污水直接向湖泊排放,农业生产和农村生活方

* 国家自然科学基金项目(31170441,31070419)资助。2015-07-21 收稿;2015-12-23 收修改稿。熊莲(1991~),女,硕士研究生;E-mail:xiONGLIAN0619@163.com。

** 通信作者;E-mail:liudy@shnu.edu.cn。

式产生的面源污染也直接威胁着湖泊生态. 为保护湖泊生态环境,改善湖泊水质,避免众多湖泊走“先污染、后治理”的老路,从2010年起,财政部、环保部联合开展了对水质良好湖泊生态环境的保护工作,明确提出优先保护水质良好和生态脆弱的湖泊,贯彻落实“让江河湖泊休养生息”的战略部署^[1]. 2012年太平湖被列入全国第二批水质良好湖泊生态环境保护专项,2013年太平湖被国家列入生态环境保护专项15个重点支持湖泊之一,太平湖环境保护工作已升至国家战略.

浮游植物是水域重要的初级生产者,对维持水生态系统的平衡起着非常重要的作用,其生物量的多寡也直接影响水生态系统中其它水生生物的正常代谢,在淡水生态系统的能量流动和物质循环传递中起着至关重要的作用,从研究浮游植物群落出发,不仅反映了群落组成中物种的丰富程度,也反映了不同自然地理条件与群落的相互关系,以及群落的稳定性与动态,是群落组织结构的重要特征. 浮游植物的群落结构可以灵敏而迅速地反映环境的变化,不同浮游植物的群落结构决定了其在生态系统中的功能差异,对浮游植物群落结构进行研究是研究演替、群落机能、分类和分布、群落与环境的基础^[2].

在水库等水体中,浮游植物群落的种类组成和数量结构的变化具有一定规律,其变化规律主要受相关的物理、化学和生物等环境因子的影响. 在一个特定的水体中,浮游植物种类较多,浮游植物群落结构与动态是多个环境因子在时间和空间序列上作用的结果,如何认识特定水体中浮游植物群落的组成与动态是一个相当复杂的问题^[3]. 浮游植物数据处理有不同的统计分析方法,如相关性分析和聚类分析,相关性分析能够对两个或多个具有相关性的变量元素进行分析,从而衡量两个变量因素的相关密切程度;聚类分析能够将研究对象分为相对同质的群组,因简单、直观而受到重视^[4].

太平湖水库(30°00'~30°22'N,117°50'~118°21'E)位于安徽省黄山市^[2]. 关于太平湖的调查不多,1985—1986年和1992—1993年中国科学院水生生物研究所的况琪军、夏宜琤等^[5-6]对太平湖水库浮游藻类进行了调查,1990年安徽省黄山区水产局的裴满意^[7]对太平湖浮游生物进行了调查,2006年黄山环保局对太平湖浮游植物做过一次简单的调查(数据由项目合作单位安徽省黄山市黄山区环保局提供),2012—2013年上海师范大学的王俊莉等^[8]对太平湖水环境生态做了调查,复旦大学的陆君、李响等^[9-11]对太平湖水资源承载力和污染负荷进行了调查. 况琪军等对太平湖浮游植物的调查仅包含种类、丰度和生物量、多样性指数、优势种、指示种及其对水质的评价,未对环境因子、浮游植物的群落结构进行分析,因此,有必要对太平湖浮游植物群落进行聚类分析并研究其与环境因子的相关性,分析探讨浮游植物与水质指标之间的关系,以期为该流域水体生态环境保护提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样点布设及采样时间

在太平湖共设5个采样点,分别记为H1、H2、H3、H4、H5(图1). 从2012年11月到2014年10月,对太平湖共进行10次采样,时间分别为2012年11月,2013年1、3、5、7、9、12月和2014年4、7、10月. 整个调查周期分为2个小周期:第1周期为2012年11月至2013年9月,每2个月采样1次,共6次;第2个周期为2013年12月至2014年10月,每3个月采样1次,共4次.

1.2 样品采集和处理

浮游植物定性水样采集是用25号筛绢网在水面下0.5 m处做“∞”形反复拖拽,速度为20~30 cm/s,保持约5 min,然后把网提起抖动滤水,轻轻打开网头,将液体倒入贴有标签的样品瓶中并加入样品量4%体积的甲醛溶液保存,回实验室在10×40倍光学显微镜下,根据文献^[5-8]对浮游植物的种类进行鉴定.

浮游植物定量水样用有机玻璃采水器采集,分别在上、中、下3层采样,各层采样量均为5 L,采好水样后立即加入鲁哥试剂并摇匀. 静置48 h后吸去上清液,浓缩至50 ml,均按照《淡水浮游生物调查技术规范》进行^[12]. 定量计数时充分摇匀,吸取0.1 ml滴入计数框内,在10×40倍光学显微镜下用视野法计数各个种的细胞数和个体数,计数40个视野,每个样品计数2次取平均值,发现新的藻类均增入定性统计. 根据浓缩倍数换算为每升水样中的细胞数(即丰度,10⁴ cells/L)及群体数,细胞数与体积系数的乘积为生物量(mg/L)^[13].

测定叶绿素 a(Chl.a)浓度的水样分别在上、中、下3层采集,取水量根据季节和水质进行调节. 水样经

Whatman GF/C 玻璃纤维滤纸过滤,将带样品的滤纸剪碎后在研钵中加适量 90% 丙酮研磨至足够细,移入具塞刻度离心管中于暗处静置萃取 20~24 h 后,离心得清液定容,使用 752 型分光光度计测波长在 665 和 750 nm 处,加 1% 盐酸酸化前和酸化后的吸光度,由此计算叶绿素 a 浓度^[14].

水温(T)和溶解氧(DO)浓度分别在上、中、下 3 层测定,水深(D)和透明度(SD)测 3 次取平均值,水深、水温和溶解氧用 YSI 6600 型多参数水质监测仪测定,透明度用塞氏盘测定.

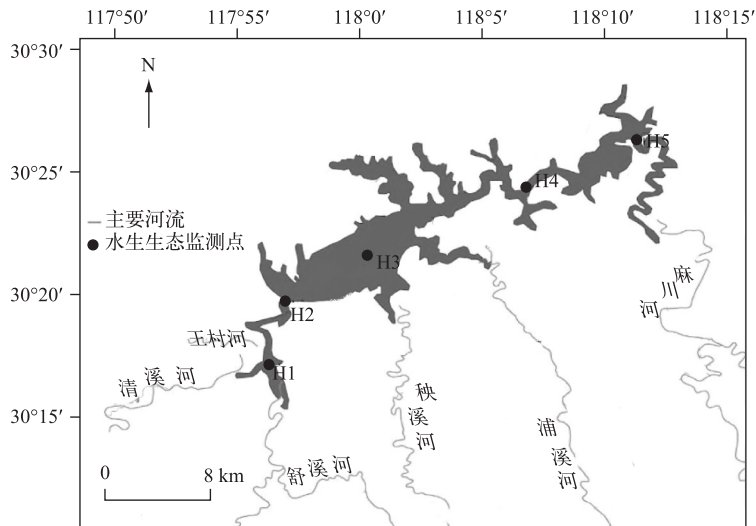


图 1 太平湖采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Lake Taiping

1.3 数据处理

本研究中水温、溶解氧、叶绿素 a 浓度、浮游植物种类数、丰度和生物量、多样性指数等指标均采用上、中、下 3 层数据的平均值,水深、透明度为 3 次测定的平均值. 数据统计分析及图表绘制在 Excel 2007 软件中进行,相关性分析和聚类分析在 SPSS 19.0 软件中进行.

1.3.1 Menaughton 优势度指数 优势度指数(Y)计算公式为:

$$Y = (N_i/N) \cdot f_i \quad (1)$$

式中, N_i 为第*i*种物种的个体数, N 为样品中全部物种的个体数, f_i 为第*i*种在所有采样点中出现的频率,当 $Y > 0.02$ 时,该浮游植物为采样点内的优势种^[15].

1.3.2 Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener 多样性指数(H')计算公式为:

$$H' = - \sum_{i=1}^S (N_i/N \cdot \ln(N_i/N)) \quad (2)$$

式中, S 为样点中浮游植物的种类数. 当 $H' > 3$ 为轻度污染或无污染水质,处于 1~3 之间为中度污染水质,<1 为重度污染水质^[16-18].

1.3.3 Pielou 均匀度指数 Pielou 均匀度指数(J)计算公式为:

$$J = H'/\ln S \quad (3)$$

当 J 处于 0.5~0.8 之间为轻度污染或无污染水质, J 处于 0.3~0.5 之间为中度污染水质, $J < 0.3$ 为重度污染水质^[19].

1.3.4 叶绿素 a 浓度 叶绿素 a 浓度计算公式为:

$$Chl.a = 27.3(D_{665} - D_{750} - S_{665} + S_{750}) \cdot V_1/V_2 \quad (4)$$

式中, V_1 为定容体积(ml), V_2 为抽滤水样体积(L), D_{665} 和 D_{750} 分别为酸化前在 665 和 750 nm 处的吸光度, S_{665} 和 S_{750} 分别为酸化后在 665 和 750 nm 处的吸光度^[20].

1.3.5 相关性分析 相关性分析指标包括:水深、透明度、水温、溶解氧浓度、叶绿素 a 浓度、浮游植物种类数、丰度和生物量、多样性指数 H' 、均匀度指数 J 。

1.3.6 聚类分析 聚类分析指标包括:透明度、水温、溶解氧浓度、叶绿素 a 浓度、浮游植物种类数、各门种类数、优势种数、各门优势种数、丰度和生物量、多样性指数 H' 和均匀度指数 J , 聚类方法采用组间连接法 (between-groups linkage), 数据间距离则采用皮尔逊相关性度量 (Pearson correlation), 由于数值相差较大, 先对相关数据进行对数处理, 计算公式为:

$$Y_i = \ln(X_i + 1) \quad (5)$$

式中, X_i 为原始数值, Y_i 为转换后的数值。

2 结果

2.1 水质指标

各采样点水深从 H1 到 H5 依次增加, 变化范围较大, 最低为 2013 年 1 月 H1 采样点处的 9.1 m, 最高为 2014 年 7 月 H5 采样点处的 53.0 m。透明度除 2013 年 5 月、2014 年 7 月外, 从采样点 H1 到 H5 总体呈增加趋势但增幅不大。水温季节变化明显, 夏、秋季水温高, 冬、春季水温低。溶解氧浓度季节变化较明显, 冬季、初春溶解氧浓度高, 春末、夏季和秋季溶解氧浓度低, 从采样点 H1 到 H5 总体呈下降趋势 (表 1)。叶绿素 a 浓度季节变化较明显, 夏季、初秋叶绿素 a 浓度远高于其他季节。

表 1 太平湖各采样点水质指标
Tab.1 Summary of water quality in Lake Taiping

采样点	水质指标	采样时间									
		2012-11	2013-01	2013-03	2013-05	2013-07	2013-09	2013-12	2014-04	2014-07	2014-10
H1	D/m	10.3±0.3	9.1±0.2	13.2±0.2	16.4±0.1	18.3±0.2	12.2±0.2	11.0±0.2	13.0±0.1	19.0±0.3	18.0±0.1
	SD/m	2.2±0	3.0±0.1	2.1±0	2.6±0.1	2.1±0.1	1.6±0.1	2.5±0.1	2.2±0.1	2.0±0.1	1.9±0.1
	T/°C	19.0±0	7.5±0.7	11.9±0.2	27.1±0.3	26.8±0.3	27.5±0.4	7.6±0.1	17.7±0.7	26.3±1.8	24.2±0.2
	DO/(mg/L)	8.44±0.02	11.31±0.24	10.81±0.08	10.49±0.27	8.01±0.42	6.53±0.12	10.35±0.63	7.49±0.91	8.81±0.80	5.28±0.42
H2	D/m	11.5±0	21.1±0.3	16.2±0.2	15.3±0.3	19.2±0.2	14.2±0.2	12.0±0.1	15.0±0.2	19.0±0.2	18.0±0.1
	SD/m	2.7±0.2	3.9±0.2	2.6±0	3.5±0.1	2.0±0	1.5±0	2.2±0.1	3.4±0.2	3.1±0.1	2.0±0.1
	T/°C	20.4±0.2	8.5±0.3	9.5±0.1	27.5±0.6	26.1±1.1	27.1±0.8	9.8±0.1	13.7±3.6	28.3±0.8	24.4±0
	DO/(mg/L)	8.27±0.07	10.95±0.02	10.95±0.03	9.44±0.27	7.39±0.55	6.94±0.07	10.08±0.02	8.18±0.50	8.68±0.90	5.48±0.32
H3	D/m	17.0±0.5	20.4±0.2	19.3±0.2	20.3±0.3	21.8±0.2	16.3±0.2	14.0±0.1	17.0±0.1	24.5±0.2	23.0±0.1
	SD/m	3.3±0.2	4.8±0.1	3.5±0	4.3±0.3	1.9±0.1	2.1±0.1	3.6±0.2	3.4±0.2	3.2±0.2	2.0±0.1
	T/°C	20.9±0.3	8.8±0.1	9.8±0.3	26.6±1.4	26.5±1.3	27.2±0.3	11.2±0.4	14.9±1.7	27.2±1.5	24.3±0.1
	DO/(mg/L)	7.92±0.01	10.74±0.10	11.05±0.04	8.81±0.09	7.29±0.56	6.88±0.41	8.68±0.24	8.45±0.98	7.49±1.66	5.84±0.96
H4	D/m	36.0±0	37.9±0.3	17.3±0.2	41.8±0.3	36.3±0.2	26.0±0.4	21.0±0.3	16.0±0.1	29.0±0.1	28.0±0.1
	SD/m	3.5±0	4.5±0.1	3.0±0	5.2±0.2	3.1±0.1	3.0±0	3.3±0.2	5.9±0.3	5.0±0.2	2.0±0.1
	T/°C	20.1±0	9.3±0.4	11.9±0.2	26.3±0	25.7±2.4	26.3±1.3	12.0±0.2	13.8±2.9	26.2±2.5	24.0±0.4
	DO/(mg/L)	7.22±0	10.02±0.06	10.90±0.04	8.85±0	6.65±1.13	5.16±1.54	8.04±0.45	8.76±0.59	6.58±1.70	5.58±1.58
H5	D/m	47.5±0	49.7±0.5	41.2±0.2	51.3±0.3	52.2±0.2	45.3±0.2	43.5±0.1	47.5±0.2	53.0±0.3	52.0±0.2
	SD/m	3.0±0.3	4.5±0.1	4.2±0	2.9±0.2	4.1±0.2	3.0±0	3.5±0.2	6.2±0.3	4.2±0.2	3.0±0.2
	T/°C	21.2±0	9.6±0.1	10.4±1.0	25.9±0	24.7±2.8	25.2±2.0	12.6±0.3	13.2±3.1	24.8±3.7	23.2±0.8
	DO/(mg/L)	5.62±0	10.10±0.01	10.72±0.28	8.86±0	6.97±1.03	4.25±1.43	7.30±0.37	9.10±0.10	6.93±2.34	3.95±1.15

2.2 浮游植物种类组成

调查期间太平湖各采样点共鉴定出浮游植物 109 属 150 种 (含变种), 其中, 绿藻门最多, 共 46 属 80 种, 占总种数的 53.33%; 硅藻门次之, 共 28 属 29 种, 占 19.33%; 蓝藻门共 20 属 23 种, 占 15.33%; 裸藻门有 5 属 5 种; 甲藻门和金藻门种数一样, 为 4 属 5 种; 隐藻门最少, 为 2 属 3 种 (表 2)。绿藻门浮游植物种类数的变化决定着太平湖全湖浮游植物种类数的变化^[21]。

表 2 太平湖浮游植物群落结构

Tab.2 The phytoplankton community structure in Lake Taiping

门	目	科	属	种	各门所占比例
蓝藻门 Cyanophyta	念珠藻目 Nostocales	2	6	7	15.33%
	颤藻目 Oscillatoriales	3	5	5	
	色球藻目 Chroococcales	4	9	11	
硅藻门 Bacillariophyta	圆筛藻目 Coscinodiscales	1	4	4	19.33%
	根管藻目 Rhizosoleniales	1	2	2	
	盒形藻目 Biddulphiales	1	1	2	
	无壳缝目 Araphidiales	1	6	6	
	双壳缝目 Biraphidinales	3	8	8	
	管壳缝目 Aulonraphidinales	2	4	4	
	单壳缝目 Monoraphidales	1	2	2	
	拟壳缝目 Raphidionales	1	1	1	
	绿藻门 Chlorophyta	绿球藻目 Chlorococcales	7	26	
四孢藻目 Tetrasporales	2	2	2		
团藻目 Volvocales	2	7	7		
丝藻目 Ulotrichales	2	3	3		
鼓藻目 Desmidiiales	1	6	10		
双星藻目 Zygnematales	1	2	2		
裸藻门 Euglenophyta	裸藻目 Euglenales	1	5	5	3.33%
金藻门 Chrysophyta	色金藻目 Chromulinales	2	3	4	3.33%
	黄群藻目 Synurales	1	1	1	
甲藻门 Dinophyta	多甲藻目 Peridinales	3	4	5	3.33%
隐藻门 Cryptophyta	隐鞭藻目 Cryptomonadales	1	2	3	2.00%

太平湖浮游植物种数随时间变化较明显,2012年11月种类数最多(64种),夏季和初秋种类数较多,冬季和春季种类数较少;空间变化不明显,H1到H5采样点浮游植物种类数变化不一,总体呈下降趋势,但降幅不大(图2)。

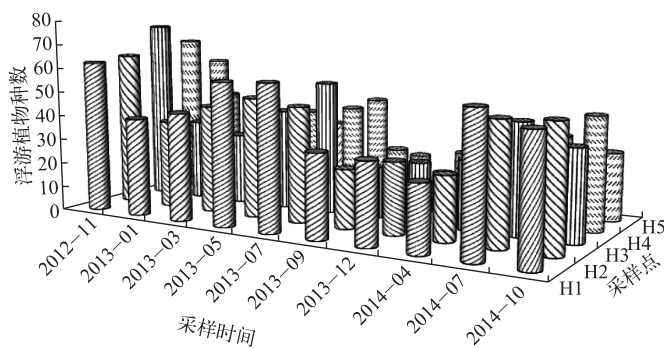


图 2 太平湖浮游植物种类数的时空变化

Fig.2 Spatio-temporal variation of phytoplankton species in Lake Taiping

2.3 浮游植物丰度与生物量

太平湖浮游植物丰度平均值为 212.81×10^4 cells/L, 范围为 $58.11 \times 10^4 \sim 641.47 \times 10^4$ cells/L, 生物量平均值为 1.04 mg/L, 范围为 $0.44 \sim 1.89$ mg/L. 调查期间太平湖各门类浮游植物丰度比例差距较大, 蓝藻门丰度比例最大, 占总丰度的 53.43%; 其次为硅藻门, 占 31.09%; 再次为绿藻门, 占 9.97%; 裸藻门、金藻门、甲藻门

和隐藻门丰度比例非常小;硅藻门生物量比例最大,占40.34%;其次为蓝藻门,占28.29%;再次为绿藻门,占8.83%;隐藻门、裸藻门、金藻门和甲藻门生物量比例分别为7.64%、6.81%、4.64%和3.45%。

太平湖浮游植物丰度的时间变化明显,在2013年9月最高,为 641.47×10^4 cells/L,在2013年3月最低,为 58.11×10^4 cells/L;空间变化不明显,总体上H1采样点丰度较高,H5采样点较低。浮游植物生物量的时间变化明显,在2014年10月最高,为1.89 mg/L,在2014年4月最低,为0.44 mg/L;生物量空间变化不明显(图3)。

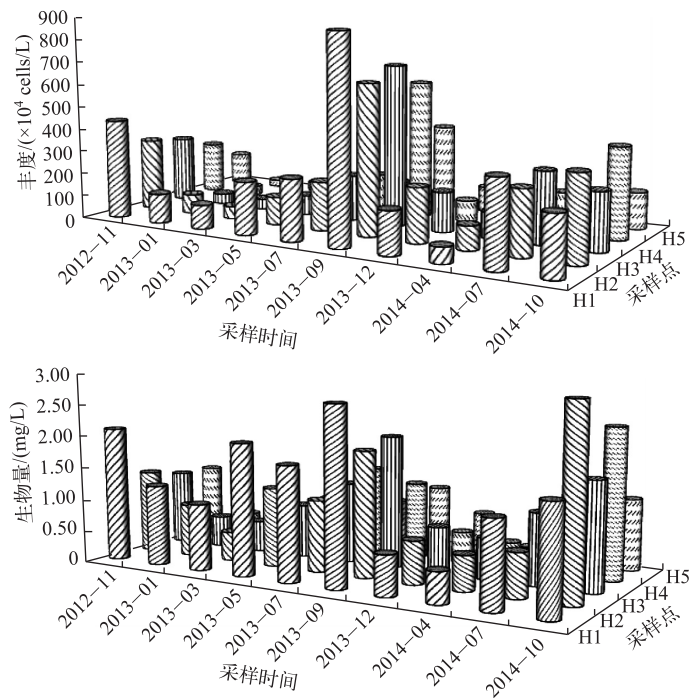


图3 太平湖浮游植物丰度和生物量的时空变化

Fig.3 Spatio-temporal variation of phytoplankton abundance and biomass in Lake Taiping

2.4 多样性指数

H' 和 J 值均在秋季最大,冬季最低, H' 均值为2.17,变化范围为1.61~2.82, J 均值为0.61,变化范围为0.51~0.73。春、夏、秋和冬季 H' 、 J 的平均值分别为2.28、0.67、1.99、0.55、2.67、0.69和1.75、0.54(表3)。

表3 太平湖浮游植物多样性指数的季节变化

Tab.3 Seasonal variation of phytoplankton diversity index in Lake Taiping

季节	H1		H2		H3		H4		H5		平均值	
	H'	J	H'	J	H'	J	H'	J	H'	J	H'	J
春季	2.37	0.66	2.47	0.69	2.10	0.64	2.45	0.71	2.01	0.64	2.28	0.67
夏季	2.12	0.54	1.91	0.52	1.98	0.54	1.96	0.55	1.99	0.58	1.99	0.55
秋季	2.76	0.68	2.82	0.73	2.66	0.68	2.82	0.70	2.30	0.64	2.67	0.69
冬季	1.77	0.52	1.71	0.51	1.61	0.54	1.71	0.51	1.94	0.63	1.75	0.54

2.5 优势种

调查期间太平湖优势种共4门17种,春季共4门10种,硅藻是春季的主要优势藻;夏、秋季均为4门11种,蓝藻是夏、秋季的主要优势藻;冬季共3门6种,主要优势种不明显。四季均出现的优势藻为蓝藻门的水

华束丝藻、硅藻门的直链藻和针杆藻(表4). 冬季太平湖优势藻数量最少而春、夏、秋季数量较多是温度造成的,春季以硅藻占优势,蓝藻喜高温环境,所以夏、秋季以蓝藻占优势. 除小环藻为 O-寡污带指示藻,鱼腥藻、水华束丝藻、小球藻和嗜蚀隐藻为 P-多污带指示藻外,其余 12 种藻类均为 β -中污带指示藻.

表 4 太平湖浮游植物优势种的季节变化

Tab.4 Seasonal variation of phytoplankton dominant species in Lake Taiping

门类	优势种	指示性	季节			
			春季	夏季	秋季	冬季
蓝藻门	鱼腥藻(<i>Anabaena</i> sp.)	P-中污染		✓	✓	✓
	伪鱼腥藻(<i>Pseudanabaena mucicola</i> sp.)	β -中污染	✓	✓	✓	
	水华束丝藻(<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>)	P-中污染	✓	✓	✓	✓
	颤藻(<i>Oscillatoria</i> sp.)	β -中污染		✓	✓	
	微囊藻(<i>Microcystis</i> sp.)	β -中污染		✓	✓	
	欧氏藻(<i>Woronichinia</i> sp.)	β -中污染		✓		
硅藻门	小环藻(<i>Cyclotella</i> sp.)	O-寡污染	✓		✓	✓
	直链藻(<i>Melosira</i> sp.)	β -中污染	✓	✓	✓	✓
	针杆藻(<i>Synedra</i> sp.)	β -中污染	✓	✓	✓	✓
	脆杆藻(<i>Fragilaria</i> sp.)	β -中污染	✓	✓		
	冠盘藻(<i>Stephanodisus</i> sp.)	β -中污染	✓			
	圆筛藻(<i>Coscinodiscus</i> sp.)	β -中污染			✓	
绿藻门	栅藻(<i>Scenedesmus</i> sp.)	β -中污染		✓		
	集星藻(<i>Actinastrum</i> sp.)	β -中污染	✓			
	小球藻(<i>Chlorella</i> sp.)	P-多污染			✓	
隐藻门	尖尾蓝隐藻(<i>Chroomonas acuta</i>)	β -中污染	✓	✓		✓
	嗜蚀隐藻(<i>Cryptomonas erosa</i>)	P-多污染	✓		✓	

2.6 浮游植物与环境因子的相关性分析

将太平湖浮游植物种类数、丰度和生物量、 H' 、 J 值与水深、透明度、水温、溶解氧浓度、叶绿素 a 浓度进行线性回归分析,结果显示太平湖浮游植物丰度、生物量与水温、透明度的相关性高,丰度、生物量与水温呈极显著正相关($P < 0.01$),丰度、生物量与透明度呈极显著负相关($P < 0.01$)(图4).

2.7 浮游植物群落聚类分析

2012 年 11 月和 2013 年 7 月太平湖浮游植物聚为一类,相似系数为 0.983. 2014 年 7 月和 10 月浮游植物聚为一类,相似系数为 0.979,说明夏、秋季太平湖浮游植物群落结构相似(图5).

采样点 H1、H2、H3 处浮游植物聚为一类,其中采样点 H1、H2 处群落结构相似系数为 0.997,采样点 H1、H3 处群落结构相似系数为 0.996. 采样点 H4、H5 处浮游植物聚为一类,相似系数为 0.996(图5).

3 分析

3.1 浮游植物群落结构的周年变化

本次调查共鉴定出浮游植物 7 门 150 种,历年调查结果显示,1985—1986 年和 1992—1993 年均鉴定出浮游植物 8 门,分别有 175 和 112 种^[5-6],2006 年鉴定出浮游植物 6 门 30 种^[8],与历年调查相比,本次调查的浮游植物门类有所减少,指示水质清洁的黄藻门未在镜检中观察到. 与 2006 年相比浮游植物种数增幅较大,以绿藻、蓝藻、硅藻增幅为主,在所有浮游植物中绿藻仍占主导地位(图 6a). 本次调查与历年调查相比,调查方法一致,浮游植物定量采样均为分层采样;调查样点具体位置并不一致,但是采样点均按照太平湖上游、中游、下游来布设,采样点布设思路一致;调查时间不太一致,历年调查均以季节为调查周期,而本次调查中,2012 年 11 月—2013 年 9 月每两月调查一次,2013 年 12 月—2014 年 10 月以季节为调查周期,所以本次调查与历年相比,调查周期相对较短,调查频率相对较高,调查数据相对较多. 本次调查为一项长期的研

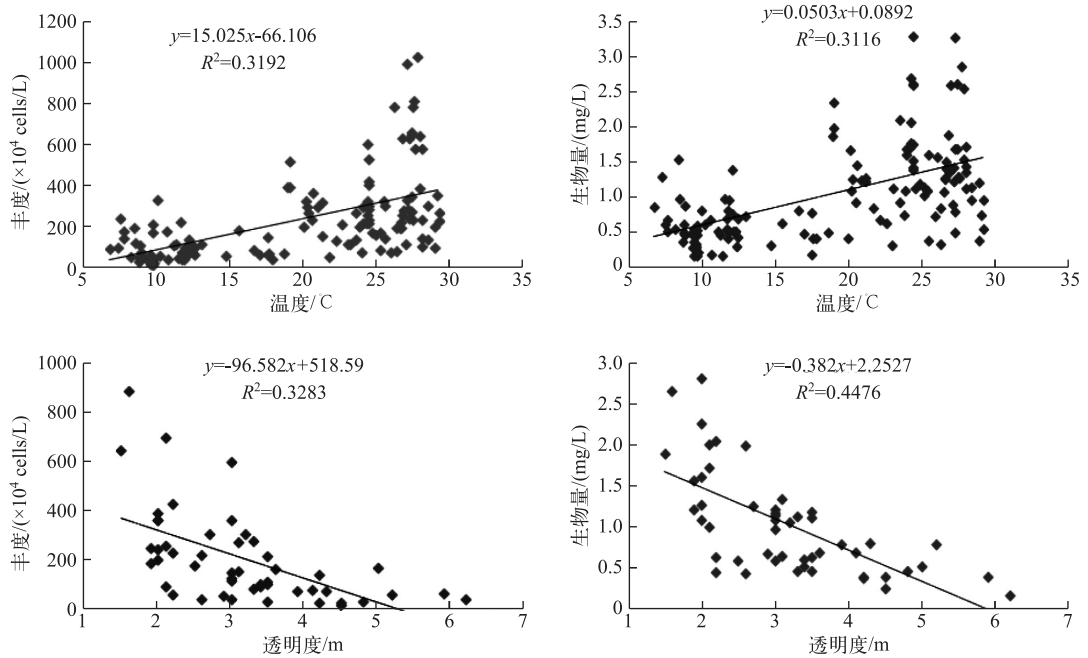


图 4 太平湖浮游植物和环境因子的关系

Fig.4 Correlation between phytoplankton and environment in Lake Taiping

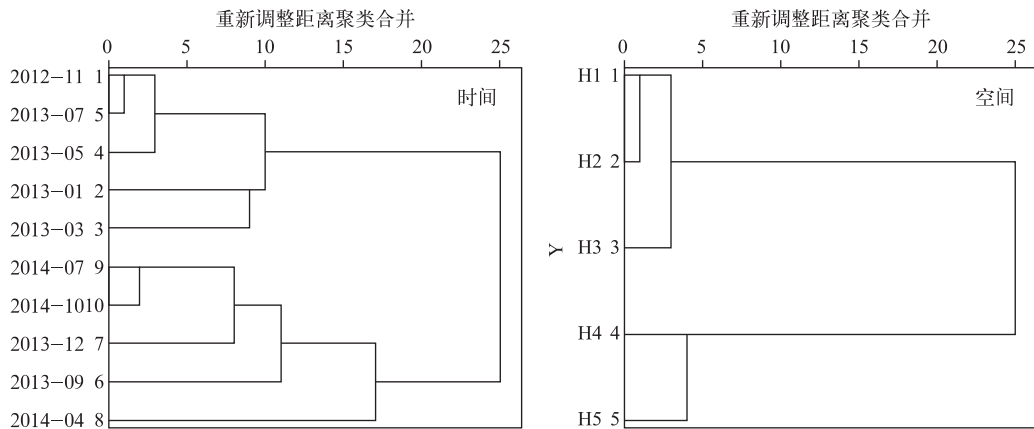


图 5 太平湖浮游植物的时空聚类图

Fig.5 Dendrogram of phytoplankton in Lake Taiping

究,数据可信度高.

本次调查的第 1 周期(2012 年 11 月至 2013 年 9 月,之后统称 2013 年)共鉴定浮游植物 7 门 132 种,第 2 周期(2013 年 12 月至 2014 年 10 月,之后统称 2014 年)共鉴定浮游植物 7 门 105 种,2014 年与 2013 年相比,绿藻门的种数有所减少但减幅不大,其余门类均无明显变化,说明太平湖浮游植物种类组成和数量处于比较稳定的状态(图 6b). 本次为期两年的周年调查,绿藻门中指示水质清洁的团藻并未在 2013 年观察到,但在 2014 年观察到 3 次,分别是 2014 年 4 月的 H4 采样点和 2014 年 10 月的 H1、H2 采样点,指示水质清洁的团藻出现,在一定程度上反映 2014 年安徽太平湖水水质有转好的趋势.

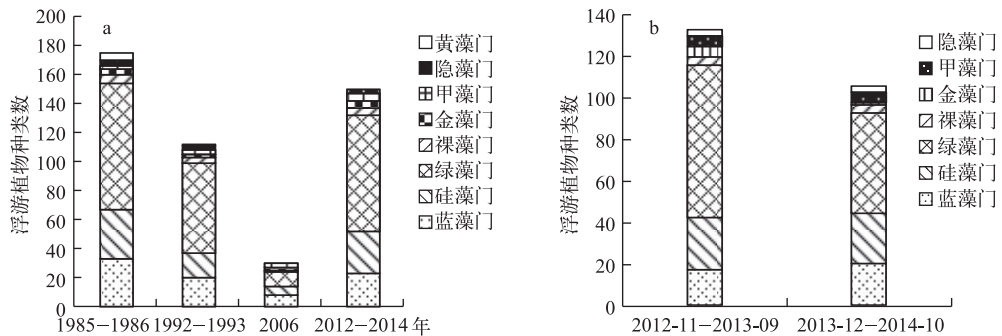


图 6 太平湖浮游植物种类组成的年际变化

Fig.6 Annual variation of phytoplankton species in Lake Taiping

太平湖浮游植物丰度和生物量在 2013 年分别为 223.73×10^4 cells/L 和 1.12 mg/L, 在 2014 年分别为 196.42×10^4 cells/L 和 0.94 mg/L, 2014 年与 2013 年相比, 丰度和生物量略有下降. 太平湖浮游植物 *H'* 和 *J* 在 2013 年分别为 2.36 和 0.66, 在 2014 年分别为 1.88 和 0.53, 与 2013 年相比, 2004 年 *H'* 和 *J* 也略有下降, 这与太平湖浮游植物数量变化趋势相一致.

2013 年共鉴定出浮游植物优势种 4 门 11 种, 太平湖全年第 1、2、3 优势种分别为针杆藻、鱼腥藻和尖尾蓝隐藻, 主要优势种不明显; 2014 年共鉴定出浮游植物优势种 3 门 14 种, 隐藻未成为优势种, 优势种及优势程度顺序发生变化, 太平湖全年第 1、2、3 优势种分别为直链藻、鱼腥藻和针杆藻, 这 3 种浮游植物也是太平湖全年主要优势种 (表 5). 2013 年优势种中啮齿隐藻和尖尾蓝隐藻分别为 P-多污带和 β -中污带指示种, 相对丰度较高, 2014 年啮齿隐藻和尖尾蓝隐藻未成为优势种, 且二者相对丰度之和不到 0.1%, 指示 P-多污带的隐藻数量的下降也在一定程度上反映出 2014 年太平湖污染程度的减弱.

表 5 太平湖浮游植物优势种的周年变化

Tab.5 Annual variation of phytoplankton dominate species in Lake Taiping

门类	优势种	指示性	2013 年	2014 年
蓝藻门	鱼腥藻 (<i>Anabaena</i> sp.)	P-多污染	✓	✓
	颤藻 (<i>Oscillatoria</i> sp.)	β -中污染	✓	✓
	伪鱼腥藻 (<i>Pseudanabaena mucicola</i> sp.)	β -中污染		✓
	水华束丝藻 (<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>)	P-多污染	✓	✓
	微囊藻 (<i>Microcystis</i> sp.)	β -中污染		✓
	欧氏藻 (<i>Woronichinia</i> sp.)	β -中污染		✓
	针杆藻 (<i>Synedra</i> sp.)	β -中污染	✓	✓
硅藻门	脆杆藻 (<i>Fragilaria</i> sp.)	β -中污染	✓	✓
	小环藻 (<i>Cyclotella</i> sp.)	O-寡污染	✓	✓
	直链藻 (<i>Melosira</i> sp.)	β -中污染	✓	✓
	冠盘藻 (<i>Stephanodisus</i> sp.)	β -中污染		✓
	圆筛藻 (<i>Coscinodiscus</i> sp.)	β -中污染		✓
	小球藻 (<i>Chlorella</i> sp.)	P-多污染	✓	
绿藻门	四足十字藻 (<i>Crucigenia tetrapedia</i>)	β -中污染	✓	
	集星藻 (<i>Actinastrum</i> sp.)	β -中污染		✓
	栅藻 (<i>Scenedesmus</i> sp.)	β -中污染		✓
	啮齿隐藻 (<i>Cryptomonas erosa</i>)	P-中污染	✓	
尖尾蓝隐藻 (<i>Chroomonas acuta</i>)	β -中污染	✓		

综上所述, 2014 年与 2013 年相比, 太平湖全年浮游植物种类数、丰度和生物量、*H'* 和 *J* 均有所下降, 但降幅

不大,优势种在门类和种类上也发生一些变化,整体而言变化不大,太平湖浮游植物群落结构处于比较稳定的状态。

3.2 浮游植物的聚类分析

夏、秋季太平湖浮游植物群落结构相似(图5),以蓝藻门为主要优势门类(表4),而蓝藻门中的鱼腥藻为最主要的优势种,其优势度为0.318,远高于其它藻类,夏、秋季太平湖浮游植物平均丰度为 132.20×10^4 cells/L。

浮游植物空间聚类(图5)表明,H1、H2和H3采样点浮游植物群落结构相似,以直链藻、鱼腥藻和水华束丝藻为主要优势种,H4和H5采样点浮游植物群落结构相似,以直链藻、小环藻和鱼腥藻为主要优势种。孙翠慈等^[22]认为人类活动对生态系统的影响不仅表现为浮游植物的数量分布特征,也表现在浮游植物的群落结构。太平湖浮游植物空间聚类区域的划分与区域分布和人类活动的影响有关,采样点H1位于入湖口,距离采样点H2较近,两采样点空间分布较相似,H3采样点位于太平湖湖心,附近的太平湖旅游接待中心设有码头,游客较多,H3采样点较其它采样点人为污染相对严重,H2采样点距湖心最近,也会受到码头污染的影响,因此H1、H2和H3采样点浮游植物群落结构划为一区;H4采样点位于太平湖下游,H5采样点位于出湖口,两采样点空间分布较相似,且距太平湖旅游接待中心较远受码头污染影响较轻,因此H4和H5采样点浮游植物群落结构划为一区。

3.3 浮游植物与环境的关系

温度不仅影响浮游植物的季节演替,还影响浮游植物在水体中的时空分布和组成变化^[23]。俞秋佳等认为水温是影响浮游植物种类组成及多样性的关键因子,随着水温的升高,大量浮游植物得以快速生长和繁殖,水温降到浮游植物的最适温度以下时,浮游植物的生长逐渐减缓直至停止生长^[24]。浮游植物丰度、生物量与水温线性回归分析(图4)表明,水温在24~30℃时,浮游植物丰度、生物量出现高密度点,而太平湖5、7、9、10月水温通常在24~27℃左右(表1),适宜蓝藻的生长,这与浮游植物丰度和生物量最高值出现的时间(图3)一致。

透明度会直接影响浮游植物和其他水生生物的生存,以致影响整个湖泊生态系统^[25]。浮游植物丰度、生物量与透明度的线性回归分析(图4)表明,随着透明度的增加,丰度和生物量逐渐减小,这与潘继征等对抚仙湖藻类和透明度的研究结果一致^[26]。从采样点H1到H5透明度逐渐增大(表1),总体上看丰度、生物量在H1采样点高,在H5采样点低(图3),与线性回归分析结果较为一致。

4 参考文献

- [1] Li Tao, Ma Zhong, Shi Lei *et al.* Evaluation of the current status of the water environment of Taiping Lake. *Environmental Protection Science*, 2014, (6): 14-18 (in Chinese with English abstract). [李涛, 马中, 石磊等. 太平湖水环境现状评估. 环境保护科学, 2014, (6): 14-18.]
- [2] Liu Dongyan, Lin Wenpeng, Zhao Min. Community structural characteristics of phytoplankton in Suzhou creek. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(10): 914-918 (in Chinese with English abstract). [刘冬燕, 林文鹏, 赵敏. 苏州河浮游植物群落结构特征. 长江流域资源与环境, 2009, 18(10): 914-918.]
- [3] Li Qiuhua, Han Boping. Structure and dynamics of phytoplankton community based CCA analysis in a pumped storage reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, (6): 2355-2364 (in Chinese with English abstract). [李秋华, 韩博平. 基于CCA的典型调水水库浮游植物群落动态特征分析. 生态学报, 2007, (6): 2355-2364.]
- [4] Zhang Li, Gang Qianfu, Wu Xu eds. The application of biometric SPSS 19.0. Xiamen: Xiamen University Press, 2013: 115-130 (in Chinese). [张力, 甘乾福, 吴旭. SPSS19.0(中文版)在生物统计中的应用. 厦门: 厦门大学出版社, 2013: 115-130.]
- [5] Kuang Qijun, Xia Yizheng. Algae in Taipinghu reservoir and its trophic level. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1992, 3(2): 165-198 (in Chinese with English abstract). [况琪军, 夏宜珍. 太平湖水库的藻类与营养型评价. 应用生态学报, 1992, 3(2): 165-198.]
- [6] Kuang Qijun, Xia Yizheng. Community dynamics of algae and limiting nutrient in Taipinghu reservoir. *J Lake Sci*, 1995, 7(3): 235-239 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/1995.0305. [况琪军, 夏宜珍. 太平湖水库藻类演替

- 与营养鉴别研究. 湖泊科学, 1995, 7(3): 235-239.]
- [7] Pei Manyi. The production potential of plankton, silver carp and bighead carp in Taiping lake. *Chinese Journal of Fisheries*, 1995, (2): 41-45(in Chinese with English abstract).[裴满意. 太平湖浮游生物及鲢鳙鱼产潜力. 水产学杂志, 1995, (2): 41-45.]
- [8] Wang Junli, Liu Dongyan, Gu Binhe *et al.* Environmental assessment of lake Taiping(Anhui province) based on a phytoplankton community analysis. *J Lake Sci*, 2014, 26(6): 939-947(in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2014.0617.[王俊莉, 刘冬燕, 古滨河等. 基于浮游植物群落的安徽太平湖水环境生态评价. 湖泊科学, 2014, 26(6): 939-947.]
- [9] Lu Jun, Shu Rongjun, Li Xiang *et al.* Analysis of water resources carrying capacity of Taiping Lake basin, Huangshan City, Anhui Province. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2013, (6): 822-828(in Chinese with English abstract).[陆君, 舒荣军, 李响等. 黄山市太平湖流域水资源承载力分析. 复旦学报: 自然科学版, 2013, (6): 822-828.]
- [10] Lu Jun, Liu Yafeng, Huang Honghui *et al.* Correlation analysis between land use structure and water quality of the Taiping Lake watershed in HuangShan. *Journal of Fudan University(Natural Science)*, 2014, (6): 731-736, 746(in Chinese with English abstract).[陆君, 刘亚风, 黄洪辉等. 黄山市太平湖流域土地利用结构与河流水质相关性分析. 复旦学报: 自然科学版, 2014, (6): 731-736, 746.]
- [11] Li Xiang, Lu Jun, Qian Minlei *et al.* Study on pollution loading and water environmental capacity in watershed—A case study of Taiping Lake Basin, Anhui Province, China. *China Environmental Science*, 2014, (8): 2063-2070(in Chinese with English abstract).[李响, 陆君, 钱敏蕾等. 流域污染负荷解析与环境容量研究——以安徽太平湖流域为例. 中国环境科学, 2014, (8): 2063-2070.]
- [12] The ministry of agriculture of the People's Republic of China. SC/T 9402—2010 freshwater plankton survey technical specification. Beijing: Standards Press of China, 2011(in Chinese).[中华人民共和国农业部. SC/T 9402—2010 淡水浮游生物调查技术规范. 北京: 中国标准出版社, 2011.]
- [13] He Zhihui. The biomass of freshwater plankton—improve the work of plankton quantitative priority. *Chinese Journal of Zoology*, 1979, (4): 53-56, 46(in Chinese with English abstract).[何志辉. 淡水浮游生物的生物量——改进浮游生物定量工作的当务之急. 动物学杂志, 1979, (4): 53-56, 46.]
- [14] Li Zhenguo, Lu Jun, Wang Guoxiang *et al.* Comparison of measurement of phytoplankton chlorophyll-a concentration by spectrophotometry. *Environmental Monitoring in China*, 2006, (2): 21-23(in Chinese with English abstract).[李振国, 卢军, 王国祥等. 分光光度法测定浮游植物叶绿素 a 的比较研究. 中国环境监测, 2006, (2): 21-23.]
- [15] Hao Yuanyuan, Sun Guojun, Zhang Lixun *et al.* Relationship between community characteristics of the phytoplankton and environmental factors in Heihu River basin. *J Lake Sci*, 2014, 26(1): 121-130(in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2014.0115.[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. 湖泊科学, 2014, 26(1): 121-130.]
- [16] Wilhm JL. Use of biomass units in shannons formula. *Ecology*, 1968, 48: 153-155.
- [17] Magnussen S, Boyle TJB. Estimating sample size for inference about the Shannon-Weaver and the Simpson indices of species diversity. *Forest Ecology and Management*, 1995, 78(1): 71-84.
- [18] Beisel JN, Moreteau JC. A simple formula for calculating the lower limit of Shannon's diversity index. *Ecological Modeling*, 1997, 99(2): 289-292.
- [19] Almorza Gomar D, Garcia Nieto MH. Several results of Simpson diversity indices and exploratory data analysis in the Pielou model. *Ecosystems and Sustainable Development V*, 2005: 145-154.
- [20] Wu Zhixu, Zhang Yayan. Improvement on method for the determination of the concentration of phytoplankton chlorophyll a. *Chemical Analysis and Meterage*, 2002, (6): 37-38(in Chinese with English abstract).[吴志旭, 张雅燕. 浮游植物体内叶绿素 a 测定方法的改进. 化学分析计量, 2002, (6): 37-38.]
- [21] Zhang Zongshe, Huang Xiangfei eds. The research method for the fresh water plankton. Beijing: Science Press, 1991: 3-133(in Chinese).[章宗涉, 黄翔飞. 淡水浮游生物研究法. 北京: 科学出版社, 1991: 3-133.]
- [22] Sun Cuici, Wang Youshao, Sun Song *et al.* Analysis dynamics of phytoplankton community characteristics in Daya Bay. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 3948-3958(in Chinese with English abstract).[孙翠慈, 王友绍, 孙松等. 大亚湾浮游植物群落特征. 生态学报, 2006, 26(12): 3948-3958.]

- [23] Lan Jia, Wu Zhixu, Li Jun *et al.* Analysis of phytoplankton community and its preliminary influenced factors in Xin'an Jiang reservoir. *Environmental Monitoring in China*, 2014, (2): 40-46(in Chinese with English abstract). [兰佳, 吴志旭, 李俊等. 新安江水库浮游植物群落特征及影响因素分析. 中国环境监测, 2014, (2): 40-46.]
- [24] Yu Qiuqiu, Xu Fengjie, Jiang Yue *et al.* Characteristics of phytoplankton community in Suzhou river in summer and autumn and their affecting factors. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, (4): 450-457(in Chinese with English abstract). [俞秋佳, 徐凤洁, 蒋跃等. 夏秋季苏州河浮游植物群落特征及其影响因子. 生态与农村环境学报, 2014, (4): 450-457.]
- [25] Zhang Xiaojing, Li Changyou, Jia Keli *et al.* Spatial-temporal changes in water transparency and its impact factors in Lake Wuliangshuai. *J Lake Sci*, 2009, **21**(6): 879-884(in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2009.0619. [张晓晶, 李畅游, 贾克力等. 乌梁素海水体透明度分布及影响因子相关分析. 湖泊科学, 2009, **21**(6): 879-884.]
- [26] Pan Jizheng, Xiong Fei, Li Wenchao *et al.* Spatial-temporal dynamic changes of the water transparency and their influencing factors in Lake Fuxian, Yunnan Province. *J Lake Sci*, 2008, **20**(5): 681-686(in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2008.0519. [潘继征, 熊飞, 李文朝等. 云南抚仙湖透明度的时空变化及影响因子分析. 湖泊科学, 2008, **20**(5): 681-686.]