2002—2017 年千岛湖浮游植物群落结构变化及其影响因素*

笄文怡^{1,3}, 朱广伟^{1**}, 吴志旭², 黎云祥³, 许海¹, 朱梦圆¹, 兰佳², 郑文婷², 张运林¹, 秦伯强¹

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 杭州市生态环境局淳安分局, 杭州 311700)

(3: 西华师范大学环境科学与工程学院, 南充 637002)

摘要: 为认识大型水库中浮游植物群落结构的演替特征及其驱动机制, 以钱塘江流域新安江水库(下称“千岛湖”)为例, 基于 2002—2017 年 16 年的水库浮游植物数据, 结合同期千岛湖水质与水文气象资料, 分析了千岛湖浮游植物结构及优势属的长期变化特征, 探讨了影响浮游植物群落结构变化的主要因素。结果表明: 2002—2017 年千岛湖共鉴定出浮游植物 7 门 93 属, 主要由硅藻门、绿藻门、蓝藻门及隐藻门种类组成。16 年间, 浮游植物年均丰度和群落结构经历了 4 个阶段: 2008 年前丰度持续低值且蓝藻不是主要类群, 2009—2012 年丰度较高且蓝藻成为主要类群, 及 2013—2015 年丰度降低且蓝藻占比降低, 2016—2017 年丰度增加且蓝藻再次成为主要类群。浮游植物门类变化的同时伴随着优势属的变化: 浮游植物年优势属从 2002—2008 年的小环藻属(*Cyclotella*)、隐藻属(*Cryptomonas*)和蓝隐藻属(*Chroomonas*)转变为 2009—2012 年的颤藻属(*Oscillatoria*)、小球藻属(*Chlorella*)、小环藻属和蓝隐藻属, 2013—2017 年又转变为鱼腥藻属(*Anabaena*)、束丝藻属(*Aphanizomenon*)、小环藻属、针杆藻属(*Synedra*)、直链藻属(*Melosira*)、栅藻属(*Scenedesmus*)和蓝隐藻属。冗余分析表明, 气温、风速、水位、入库流量等气象水文因子和总氮浓度、电导率、氮磷比、透明度等水质因子与浮游植物群落结构变化关系密切。研究结果表明, 在千岛湖这种大型贫—中营养水库, 浮游植物群落结构不仅受来水营养盐负荷的影响, 还在很大程度上受水文、气象条件的影响, 给水库藻类水华等生态风险的预测以及水库水质管理带来了挑战。

关键词: 新安江水库(千岛湖); 浮游植物; 长期趋势; 冗余分析(RDA); 富营养化; 气象水文

Long-term variation of phytoplankton community and driving factors in Qiandaohu Reservoir, southeast China

DA Wenyi^{1,3}, ZHU Guangwei^{1**}, WU Zhixu², LI Yunxiang³, XU Hai¹, ZHU Mengyuan¹, LAN Jia², ZHENG Wenting², ZHANG Yunlin¹ & QIN Boqiang¹

(1: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(2: Hangzhou Bureau of Ecology and Environment Chun'an Branch, Hangzhou 311700, P.R.China)

(3: College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637002, P.R.China)

Abstract: To understand the succession characteristics and driving mechanism of phytoplankton community structure in large reservoirs, the Xin'anjiang Reservoir (Qiandaohu Reservoir) in Qiantang River Basin was chosen as the case study. From 2002 to 2017, the surveyed phytoplankton data, physicochemical variables and hydro-meteorological conditions were investigated to understand long-term variations of phytoplankton community and dominant genus, therefore to discover the main factors driving changes of phytoplankton community structure. The results showed that from 2002 to 2017, 7 phyla including 93 genera of phytoplankton

* 国家自然科学基金项目(41830757)、中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC008)、中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”战略发展规划项目(NIGLAS2017GH04)和淳安县环境保护局项目(CAZFCGK2016-111)联合资助。2018-11-24 收稿; 2019-03-01 收修改稿。笄文怡(1994 ~), 女, 硕士研究生; E-mail: dwyzls@163.com.

** 通信作者; E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn.

were existed in Qiandaohu Reservoir, which were mainly composed of Bacillariophyta, Chlorophyta, Cyanophyta and Cryptophyta. In the past 16 years, annual abundance and community structure of phytoplankton experienced four stages: before 2008, the abundance of phytoplankton cell maintained at a low level and cyanobacteria was not the main group. During 2009 and 2012, the cell abundance of phytoplankton was at a high level with cyanobacteria becoming the main group. The cell abundance of phytoplankton and proportion of Cyanophyta decreased during 2013 and 2015. Phytoplankton cell abundance increased during 2016 and 2017 with cyanobacteria becoming the main group again. When the phytoplankton changed, the dominant genus also changed. The phytoplankton dominant genus were *Cyclotella*, *Cryptomonas* and *Chroomonas* from 2002 to 2008, then changed to *Oscillatoria*, *Chlorella*, *Cyclotella* and *Chroomonas* during 2009 and 2012, and turned *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Cyclotella*, *Synedra*, *Melosira*, *Scenedesmus* and *Chroomonas* during 2013 and 2017 at last. RDA analysis showed that hydro-meteorological factors such as temperature, wind speed, water level and inflow, and water quality factors such as total nitrogen, conductivity, nitrogen-phosphorus ratio and transparency were significantly related to phytoplankton community structure. The results show that in oligotrophic and mesotrophic reservoirs such as Qiandaohu Reservoir, the phytoplankton community structure was not only affected by the nutrients, but also strongly affected by hydro-meteorological conditions. This complex relationship poses a giant challenge to the ecological risks prediction of reservoir algal blooms and water quality management.

Keywords: Xinanjiang Reservoir (Qiandaohu Reservoir); phytoplankton; long-term trend; redundancy analysis; eutrophication; hydro-meteorological

浮游植物是水生态系统中重要的初级生产者及水生食物网的基础,与水生生态系统能量流动、物质循环、信息传递等密切相关;同时浮游植物的群落结构和动态变化可以反映出环境因子对生态系统的影响,对水生生态系统的健康及稳定具有重要指示意义^[1-3]。近年来,随着全球气候变化及环境压力增加,我国湖泊和水库的富营养化问题突出,藻类水华的暴发已成为我国乃至世界性的主要水环境问题之一^[4-6]。相关研究表明湖泊和水库正面临温度升高、热分层期变长和增强、水文改变及营养负荷增加等问题,这将有利于蓝藻的生长繁殖,造成水体透明度降低、有害藻类恶性增殖、浮游动物及鱼类的结构发生改变等一系列负面影响,对水生生态系统及人类的健康构成严重威胁^[7-12]。因此,研究湖库浮游植物群落的组成、变化趋势及其影响因子具有十分重要的意义。

浮游植物对环境变化反应迅速,其丰度及结构的动态变化是营养盐(氮、磷浓度等)、物理条件(温度、光照等)、水动力条件(水稳定性、水力滞留时间等)及生物因素(浮游动物、鱼类等)等时空变化的结果^[13-15]。一般来说,不同浮游植物对环境变化的响应不同,且不同纬度或类型水库的环境条件也有差异。马沛明等发现水力滞留时间、SiO₂、水温(WT)、氮磷比是汤浦水库浮游植物发生演替的关键因子^[16];杨军等认为厦门水库的蓝藻生物量与水位变化率、透光深度及总磷(TP)密切相关,水位升高可通过稀释效应直接降低蓝藻生物量^[17]。入库流量减少和温度升高可能是导致美国水库有害藻类异常增殖的原因^[18]。

千岛湖是钱塘江的重要水源,保障其水质安全具有重要战略意义。近年来,关于千岛湖浮游植物的研究也得到重视,莫丹玫对千岛湖 2013—2014 年浮游植物群落结构的多样性进行了探讨^[19],张雅燕等研究提出水温和溶解氧是影响千岛湖 1998—2001 年浮游植物生物密度的主要因子^[20],胡忠军等研究了 2010 年千岛湖浮游植物结构的时空分布及影响因素,指出 WT、pH、溶解氧(DO)及氨氮是影响浮游植物时空分布的主要因子^[21],吴志旭等分析了千岛湖湖泊区 2010 年夏季浮游植物的特征,发现水温是决定浮游植物垂直分布的重要因素^[22]。这些研究尽管从不同角度揭示了千岛湖浮游植物变化的影响因素,但这些研究主要集中在短期的季节性变化分析,暂没有关于千岛湖浮游植物的长期变化趋势研究。特别是近年来千岛湖的水质发生了明显变化,浮游植物群落结构是否发生了改变值得关注。本研究通过对千岛湖 2002—2017 年的浮游植物群落结构数据进行定量分析,并结合同步的气象、水文、水质数据,使用 RDA 分析方法,探讨了千岛湖浮游植物的长期变化特征及影响因素,以期对千岛湖水环境的管理与保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点概况

千岛湖(29°22′~29°50′N, 118°36′~119°14′E)位于浙江省淳安县和建德市境内,是 1957 年为建筑新安

江水电站而筑坝形成的大型人工湖泊,同时也是钱塘江流域重要的水源地和水源涵养区,在水质安全、下游供水等方面起着至关重要的作用.千岛湖流域位于亚热带季风湿润性气候,温暖湿润,雨量充沛,四季分明,年均气温为 17.8°C ,年均降水量为 1636.5 mm ,年日照时数达 1951 h ^[23].千岛湖水库面积为 583 km^2 ,总库容 $1.78\times 10^{10}\text{ m}^3$,有效库容 $1.03\times 10^{10}\text{ m}^3$,控制的流域面积约 10442 km^2 ,平均水深 31 m ,最大水深 100 m ,属于典型的深水湖泊,换水周期约 2 年^[24].此外,千岛湖的南北纵长为 150 km ,宽处达 10 km ,湖内包含 1078 个面积大于 0.25 hm^2 的岛屿.环湖有包括新安江、富强溪、武强溪等 30 多条入库河流,其中新安江占总入库水量的比例高于 60%,年均入库水量高于 $67.77\times 10^8\text{ m}^3$ ^[25].

1.2 数据概况及来源

本研究的时间跨度为 2002 年 1 月—2017 年 12 月,研究位点是千岛湖的 3 个国控监测点位(街口、小金山和三潭岛),各点位的位置如图 1 所示.因早期监测条件限制,2002—2017 年各监测点的浮游植物监测频率不一致,其中 2002—2009 年期间的监测频率为每两月一次(1、3、5、7、9 及 11 月),2010—2017 年期间的监测频率为每月一次(小金山 2010 年仍为两月一次).此外,2012 年 9—12 月、三潭岛 2013 年 1 月及小金山 2017 年 11 月的浮游植物样本数据缺失.

图 1 千岛湖监测点位分布

Fig.1 Location of the monitoring sites in Qiandaohu Reservoir

本研究使用的浮游植物鉴定数据及水质监测数据均来源于浙江省淳安县环境保护局的调研数据.浮游植物样品及水化样品均使用有机玻璃采水器采集水面以下 0.5 m 处的样品.浮游植物样品是 2.5 L 水样通过固定、浓缩等步骤而得.浮游植物的细胞丰度及组成通过光学显微镜进行定量鉴定,各属的鉴定标准参考文献^[26].水化样品采集之后,及时送至实验室测定总氮(TN)、TP、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})等指标,测定方法参照国家《水和废水监测分析方法》^[27].现场使用塞氏盘测定透明度(SD),使用多参数水质分析仪测定 WT、pH、DO 及电导率(SpCond).

气象水文数据(气温、降雨量、入库流量等)通过相应网站收集,其中降雨量、气温等气象数据来源于国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn>),入库流量数据为太湖流域片水文信息服务系统(<http://218.1.102.99:8100/indexWater.html>)中的鱼梁和屯溪两个流量监测站的累加数据.水位数据收集于淳安县水雨情服务系统(<http://caslj.hzyuansi.com/info/Gridpage.aspx>).

1.3 数据处理

按照春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12—次年2月)计算浮游植物及环境因子数据的季节均值,然后使用 LOSSE 拟合分析其年际及季节变化趋势. 年浮游植物优势度(Y)通过优势度指数计算得到^[28],计算公式为: $Y = \frac{n_i}{N} f_i$, 式中, n_i 为第 i 个属的细胞数, N 为所有属的细胞数, f_i 为第 i 属的出现频率, 出现频率(f_i) = 镜检检出次数/总调查次数, 优势属为优势度(Y) 大于 0.02 的属.

使用冗余分析(RDA)判定浮游植物群落结构改变的显著解释变量. RDA 分析中的浮游植物数据为出现频率(f_i) 大于 1% 的浮游植物属的丰度数据, 气温(T)、降雨量(R)、入库流量(IF)、水位(WL)、风速(WS)、日照时数(ST)等气象水文数据为采样当月的月平均数据. TN 、 TP 、 NH_3-N 、 SD 、 pH 值、 DO 、 COD_{Mn} 、 $Sp-Cond$ 、氮磷比($TN:TP$)等水质数据为浮游植物样品采集时测定的同期水质数据. RDA 分析过程中, 采用 hellinger 方法对浮游植物数据进行转换, 环境因子数据全部进行 $\log_{10}$ 转换.

水库综合营养状态指数(TLI)计算公式为: $TLI(\Sigma) = \Sigma W_j \cdot TLI(j)$, 式中, W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重, $TLI(j)$ 为第 j 种参数的营养状态指数^[29].

浮游植物季节丰度与年均丰度的相关性通过 SPSS 21.0 中 Pearson 相关性分析得到.

数据处理及图形绘制使用 Excel 2010、Origin 8.5、R 3.5.1 及 ArcGIS 10.2 软件完成.

2 结果与分析

2.1 浮游植物群落结构动态特征

2002—2017 年期间, 千岛湖共检出浮游植物 7 门 93 属, 包括蓝藻门 18 属、绿藻门 43 属、硅藻门 18 属、隐藻门 2 属、甲藻门 4 属、裸藻门 3 属及金藻门 5 属. 千岛湖浮游植物主要由硅藻(37%)、绿藻(23%)、蓝藻(19%)和隐藻(19%)组成; 甲藻、裸藻及金藻的数量较少, 平均细胞丰度占比仅为 2% (图 2). 16 年间, 浮游植物群落结构发生了较大的改变, 因蓝藻是威胁水质安全非常重要的指标, 可根据蓝藻占比发生重大转折的时期, 将变化过程划分为 4 个阶段: 2002—2007 年, 蓝藻的占比极低, 平均细胞丰度占比仅为 17%, 群落主要由绿藻、隐藻及硅藻组成, 各类群在浮游植物丰度中平均占比分别为 27%、25% 和 27%; 2008—2010 年, 蓝藻及硅藻大量增加, 绿藻持续减少, 硅藻、蓝藻、绿藻及隐藻的平均细胞丰度占比分别为 37%、29%、18% 和 14%; 2011—2015 年, 蓝藻占比大幅下降, 硅藻及绿藻占比持续上升, 硅藻、绿藻、隐藻及蓝藻的细胞丰度占比分别为 48%、24%、16% 和 11%; 2016—2017 年, 蓝藻比例再次升高, 最大占比达到 16 年来的最大值, 成为占比最高的类群, 蓝藻、硅藻、绿藻及隐藻的细胞丰度占比分别为 31%、30%、20% 和 17%.

图 2 千岛湖浮游植物丰度占比长期变化特征

Fig.2 Long-term variation of phytoplankton cell abundance ratio in Qiandaohu Reservoir

2.2 浮游植物丰度动态特征

2002—2017年,千岛湖浮游植物丰度在 $2.50 \times 10^6 \sim 1.46 \times 10^7$ cells/L 之间波动,根据丰度年均值可将变化过程划分为4个阶段:2002—2007年,年均总细胞丰度变幅较小,在 $3.25 \times 10^6 \sim 5.71 \times 10^6$ cells/L 之间波动;2007—2010年丰度持续增加,并达到16年来的最大值 1.46×10^7 cells/L;2010—2013年,年均丰度持续下降,最低值为 2.50×10^6 cells/L;2013年之后,总细胞丰度再次持续上升.此外,季节总细胞丰度多年来也发生了明显的变化,2003—2007年春季总细胞丰度明显高于其他季节,但2008年以来,夏季和秋季的总细胞丰度大幅增加,远高于春季和冬季(图3).

浮游植物各门细胞丰度均值的年际变化趋势不一致.蓝藻的年均丰度在2002—2009呈上升趋势,2010—2013年呈下降趋势,2014—2017年又开始呈上升趋势,年均最大值出现在2009年,达到 7.93×10^6 cells/L.绿藻年均丰度在2002—2007年较低且波动不大,2008—2011年呈上升趋势,2012—2017年一直稳定在 1.67×10^6 cells/L 左右.硅藻年均丰度在2002—2005年期间变化不大,2006—2011年呈显著上升趋势,2012—2017年呈下降趋势,年均最高值出现在2010年,达到 5.90×10^6 cells/L.隐藻年均丰度在2002—2007年呈小幅下降趋势,2007—2011年呈上升趋势,2012—2017年又呈下降趋势.其他藻的年均丰度在2002—2008年变化不明显,2009年后年均丰度显著降低并一直处于较低水平(图3).

图3 千岛湖浮游植物细胞丰度长期变化特征

Fig.3 Long-term variation of cell abundance of phytoplankton phylum in Qiandaohu Reservoir

不同季节的浮游植物丰度有明显的年际动态(图3和表1).总藻各季节丰度的年际动态与年均丰度年际动态基本一致,其中秋季丰度与年均丰度相关性最强($R^2 = 0.930, P < 0.01$).蓝藻夏、秋季节丰度与年均丰度年际动态基本一致且呈极显著相关($P < 0.01$), R^2 分别达到 0.900 和 0.920.此外,各季节蓝藻丰度对年均

丰度的贡献值存在较大的年际变化,2008 年前的丰度主要取决于春季,2009—2017 年则主要取决于秋季。绿藻春、夏季节的丰度与年均丰度的年际动态变化基本一致,其中夏季丰度与年均丰度的相关性最强 ($R^2 = 0.870, P < 0.01$),秋季绿藻丰度与年均丰度也存在较强相关性 ($R^2 = 0.710, P < 0.01$),但 2011 年后表现出下降趋势,与年均丰度变化趋势不同。硅藻各季节丰度的年际动态与年均丰度年际动态基本一致,其中春、夏季节丰度与年均丰度相关性最好, R^2 分别达到 0.790 和 0.780 ($P < 0.01$)。春、夏季节丰度对年均丰度的贡献存在较大年际差异,2002—2008 年的硅藻年均丰度主要取决于春季丰度,而 2009—2017 年取决于夏季丰度。除冬季外,隐藻各季节丰度与年均丰度的年际动态均呈极显著相关关系,其中夏季丰度与年均丰度的相关性最高 ($R^2 = 0.800, P < 0.01$)。

2.3 优势属变化

2002—2017 年,千岛湖浮游植物的主要优势属包括鱼腥藻属、色球藻属 (*Chroococcus*)、束丝藻属 (*Aphanizomenon*)、颤藻属 (*Oscillatoria*)、集胞藻属 (*Synechocystis*)、泽丝藻属 (*Limnothrix*)、栅藻属 (*Scenedesmus*)、四角藻属 (*Tetraedron*)、并联藻属 (*Quadrigula*)、小球藻属 (*Chlorella*)、卵囊藻属 (*Oocystis*)、小环藻属 (*Cyclotella*)、脆杆藻属 (*Fragilaria*)、直链藻属 (*Melosira*)、针杆藻属 (*Synedra*)、曲壳藻属 (*Achnanthes*)、隐藻属 (*Cryptomonas*) 及蓝隐藻属 (*Chroomonas*) (图 4)。16 年来,千岛湖的优势属的组成发生了改变,优势属明显增多。2002—2008 年,优势属较少且细胞丰度偏低,主要优势属为硅藻门的小环藻属和隐藻门的隐藻属及蓝隐藻属。2009—2012 年,蓝藻门的颤藻属、集胞藻属和绿藻门的小球藻属细胞丰度增大,并成为优势属,期间共有 11 个优势属。2013 年后,蓝藻门的鱼腥藻属和束丝藻属优势度增加,硅藻门的针杆藻属、直链藻属及脆杆藻属占优频次增多,绿藻门的栅藻属取代小球藻属,成为优势属,期间共有 11 个优势属。

图 4 2002—2017 年千岛湖浮游植物主要优势属细胞丰度变化特征
(不同颜色的柱子代表不同门的浮游植物属(蓝色为蓝藻门;绿色为绿藻门;橙色为硅藻门;灰色为隐藻门))
Fig.4 Cell abundance variation of main dominant genus of phytoplankton in Qiandaohu Reservoir from 2002 to 2017

2.4 环境因子长期变化特征

2.4.1 水质变化 千岛湖各水质指标的变化趋势不同。TN 浓度在 0.61~1.40 mg/L 之间,春季的 TN 浓度最

表 1 浮游植物季节细胞丰度与
年均丰度的 Pearson 相关性

Tab.1 Pearson correlation between phytoplankton
cell abundance of season and annual mean

	春季	夏季	秋季	冬季
总藻	0.680 **	0.880 **	0.930 **	0.770 **
蓝藻门	0.460	0.900 **	0.920 **	0.260
绿藻门	0.560 *	0.870 **	0.710 **	-0.010
硅藻门	0.790 **	0.780 **	0.600 *	0.700 **
隐藻门	0.650 **	0.800 **	0.670 **	0.430
其他	0.700 **	0.750 **	0.736 **	-0.196

** 表示极显著相关, $P < 0.01$; * 表示显著相关, $P < 0.05$.

高,2014年以来,夏季的TN浓度大幅度增加并接近春季的浓度;各季节TN的变化趋势基本一致,均在2002—2008年持续增加,2009—2011年略有降低,2012年以来再次持续增加并超过多年的平均浓度. TP浓度在0.009~0.023 mg/L之间,均值为0.016 mg/L,TP浓度在不同季节间差异很大,春、夏季显著高于其他季节,2011年以来的TP平均浓度显著高于2002—2010. TN:TP在2002—2006年持续增加,2007—2009年出现小幅降低,2010—2014年呈上升趋势,2015年后持续降低. 2013年前冬季的TN:TP高于其他季节,2014年以来,冬季的TN:TP持续下降,并低于其他季节. COD_{Mn} 多年均值为1.64 mg/L,夏季的 COD_{Mn} 显著高于其他季节;各季节的变化趋势基本一致,均在2002—2009年呈上升趋势,2010—2017年呈下降趋势. 历年来SD的变化较大,春、夏、秋季的SD在2002—2006年呈上升趋势,2007—2017年持续降低,冬季的SD历年来表现出上升趋势. SpCond在各季节的变化趋势基本一致,2002—2007年持续上升,2008—2017年维持在较高水平,2013—2017年呈现出小幅下降趋势,但2014年以来,冬季SpCond呈显著下降趋势(图5).

图5 2002—2017年千岛湖水水质指标变化趋势

Fig.5 Long-term variation of water quality index in Qiandaohu Reservoir from 2002 to 2017

2.4.2 水文气象变化 2002—2017年期间,千岛湖的水文气象条件存在较大变化. 2002—2017年,平均气温没有明显的变化趋势,2010—2011年春季和冬季的气温均较低,2011年以来,冬季和春季的气温持续升高,2016—2017年冬季的平均温度为8.3℃,比2011年的冬季气温(5.4℃)高出3℃. 降雨量和入库流量的变化趋势较为一致,春、夏季的值明显高于秋、冬季,2006—2017年,春、夏季的降雨量及入库流量均持续增加,给千岛湖带来了更多的营养盐负荷;2014年冬季的降雨及入库流量呈下降趋势. 千岛湖的水位表现为夏季显著高于其他季节;历年来,各季节水位的变化趋势均一致,2002—2005年的水位较低,2006—2010年水位持续升高,2011年以来水位始终维持在较高水平. 日照时数在4.12~5.78 h之间波动,16年以来夏、秋季的日

照时数持续下降,而冬季的日照时数自 2011 年以来持续升高. 年均风速在 1.27~2.10 m/s 之间,各季节变化趋势基本一致,均在 2002—2010 年持续降低,2011 年后持续升高(图 6).

图 6 2002—2017 年千岛湖气象水文因子变化趋势

Fig.6 Long-term variation of meter-hydrological factors in Qiandaohu Reservoir from 2002 to 2017

2.5 影响浮游植物群落的主要环境因子

为探究千岛湖的水文气象条件及营养盐对浮游植物群落结构的影响,对 2002—2017 年的浮游植物群落与环境因子进行了 RDA 分析(图 7). 结果表明,千岛湖浮游植物群落结构发生变化的显著影响因子包括温度、总氮、风速、水位、氮磷比、透明度、入库流量、电导率($P<0.01$),这些环境因子共解释了群落结构变化的 21%. 其中温度和营养盐浓度是影响浮游植物的主要原因,其次是风速、透明度及水位. 温度对蓝藻及绿藻的生长起到促进作用,温度越高蓝藻及绿藻就越多,隐藻和硅藻则更适合低温条件. 从优势属来看,蓝藻门的鱼腥藻属、丝状藻属、束丝藻属、针杆藻属及硅藻门的曲壳藻属、脆杆藻属等优势属主要受氮、磷营养盐浓度及风速的影响,它们在营养盐及风速较高的水体会生长得更好. 硅藻门的小环藻属主要受到透明度的影响,适合在透明度较高的水体生长. 硅藻门的直链藻属与入库流量关系比较密切,入库流量大的时候,其生长得更好. 隐藻门的蓝隐藻属与电导率的关系更加密切.

3 讨论

3.1 浮游植物群落的动态特征

16 年来,硅藻是千岛湖最主要的浮游植物类群,各季节均具有较高细胞丰度占比,春季到冬季的细胞丰度占比分别为 44%、33%、26% 及 45%. 千岛湖春季和冬季的浮游植物主要类群为硅藻和隐藻,细胞丰度占

图7 千岛湖浮游植物与环境因子的 RDA 分析

(T:气温;WL:水位;WS:风速;SD:透明度;TN:总氮;TN:TP:氮磷比;IF:入库流量;SpCond:电导率.

图中标注的环境因子均为浮游植物群落变化的显著影响因子 ($P < 0.01$).

黑色三角形表示历年来优势属的位置,非优势属的位置未展示在图中)

Fig.7 RDA analysis of phytoplankton and environmental factors in Qiandaohu Reservoir

比分别为 44% 及 25%;夏季主要为绿藻及硅藻,细胞丰度占比分别为 34% 和 33%;秋季主要为蓝藻、绿藻及硅藻,细胞丰度占比分别为 32%、28% 及 26%。硅藻型的浮游植物群落是营养水平较低水体的特征,而蓝-绿藻型则是营养化水平较高水体的表征^[30]。浙江横山水库的浮游植物群落变化规律为:春、冬季节为硅-隐藻型,夏季为蓝-绿藻型,秋季为硅藻型,富春江水库的藻类季节演替也表现为春季绿、隐及硅藻占优,夏季蓝藻及硅藻占优、秋季硅藻和隐藻占优。千岛湖藻类的季节变化规律与横山水库及富春江水库类似,均符合 Sommer 等提出温带中营养深水湖泊的藻类演替模式 (PEG)^[31]。千岛湖浮游植物丰度具有年际动态特征,2008 年前的总藻、蓝藻及硅藻丰度均在春季最高,2009—2017 年,总藻和硅藻丰度转变为夏季最高,蓝藻丰度转变为秋季最高。大多数水库的浮游植物丰度出现在春季,如浙江横山水库及杨浦水库^[16, 32],但也有水库浮游植物丰度最大值出现在夏季,如丹江口^[33]和天目湖^[34]。

千岛湖 2002—2008 年的主要优势属是硅藻门的小环藻属及隐藻门的隐藻属、蓝隐藻属,2009 年以来,蓝藻优势属类别及优势属个体数增多,新增了蓝藻门的鱼腥藻属、束丝藻属、颤藻、泽丝藻属,绿藻门的栅藻属以及硅藻门的直链硅藻、脆杆藻等属,但小环藻属和蓝隐藻属仍为主要优势属,蓝藻是目前水库水华最主要的藻类,出现在营养水平较高的水体中,且蓝藻门的束丝藻属、微囊藻属、泽丝藻属及鱼腥藻属存在较多可产毒的种类^[35],对水生态系统的安全具有巨大威胁。因此,相关部门应注意蓝藻增多可能带来的水质健康威胁。

3.2 浮游植物群落结构变化的影响因素

浮游植物的生长周期很短,可对环境变化做出快速响应。大量研究表明:温度、光照强度、氮磷营养盐、水体滞留时间、入库流量、生物因素等条件对水库浮游植物的丰度、组成及演替均具有非常重要的影

响^[19, 36]. 本研究发现温度、营养盐、风速、水位及电导率是影响浮游植物的主要因素.

一般而言,温度是水库中影响浮游植物的主要因素之一. 温度具有明显的季节特性,一方面可直接影响浮游植物生长,另一方面会通过影响浮游动物物、鱼类的生长和运动能力及水体的其他物理和化学因子,进一步影响浮游植物丰度及群落结构. 盛海燕等研究发现富春江水库的细胞丰度及群落结构的主要影响因子为温度、降雨量及水利滞留时间^[37]. 杨亮杰等发现横山水库浮游植物群落结构的主要影响因子为水温、透明度、化学需氧量及 pH^[31]. 水温也是渔洞水库^[38]、香溪河水库^[39]及流溪河水库^[40]等水库浮游植物群落变化的主要影响因素.

此外,冬季气温与浮游植物的生长及组成也密切相关. 一方面,较高的温度能促进藻类的生长繁殖并使蓝藻形成优势^[41],冬季在巢湖和千岛湖均曾发生过微囊藻水华事件^[42],且2013年以来鱼腥藻属及束丝藻属也多次在冬季占优. 另一方面,冬季气温的增加,对来年的浮游植物的生长也会产生较大的影响. Weyhenmeyer 认为暖冬会导致浮游植物的生长期增加1个月以上,且蓝藻及绿藻等温度敏感型藻类会提前开始大量生长^[43]. 邓建明等提出气温的升高会提高浮游植物生长速率,有利于蓝藻、绿藻等温度适应范围较大的藻类提前开始大量繁殖^[44]. 2013—2017年,千岛湖冬季平均气温持续升高,截至2017年,冬季的平均温度已升高3℃,冬季的气温较以往偏暖. 2013—2017年冬季气温与第2年的春、夏季蓝藻门细胞丰度之间具有较好的相关性($R^2 = 0.38, P < 0.001$) (图8). 这说明2013—2017年千岛湖冬季气温的升高对于春季和夏季的蓝藻生长有促进作用. 因此,认为2016—2017年蓝藻门的细胞丰度的增加与近年冬季温度升高存在一定联系.

营养盐是浮游植物生长的物质基础,其浓度变化不仅会影响浮游植物丰度,也会引起浮游植物群落结构发生改变. 本研究结果表明,仅氮营养盐对浮游植物群落结构改变具有显著影响,Paerl 等^[45]指出,随着水体富营养化程度的加剧,浮游藻类群落逐渐向蓝藻占优势转变. 周小玉指出鱼腥藻、微囊藻、直链藻、脆杆藻等主要出现在高营养水平水体^[35]. 王英华等指出丹江口水库营养水平的升高可能是脆杆藻生物量升高的主要原因^[46]. 16年来,千岛湖的营养水平发生了较大改变,TLI水平超过30且呈上升趋势(图9),达到水体呈中营养状态^[29]. TLI在2009年及2017年出现峰值,而这两年蓝藻的细胞丰度也较高,这与谭香等提出的蓝藻丰度越高,水库富营养化程度越高的结论相一致^[33].

透明度降低会影响光照进入水体,进而影响到硅藻及隐藻的生长和繁殖^[47-48]. 透明度高低与浮游植物及其分泌物以及水体中的有机悬浮物、无机悬浮物浓度关系密切. 2011年以来,春季的入库流量及降雨持续增加,降低了水体的透明度,春季硅藻细胞丰度在2011年之后也呈下降趋势(图3). 此外,降雨及入库流量的增加也带动水库水位升高,林秋奇指出水位升高会促进蓝藻的生长^[40]. 降雨及入库流量带入的地表径流是千岛湖营养盐的主要来源,千岛湖透明度与降雨量及入库流量均表现为显著负相关($P < 0.01$),因此,营养盐、透明度及水位对浮游植物群落结构的影响在一定程度上可归结为气象水文条件变化给浮游植物群落结

图8 2013—2017年千岛湖冬季气温与春、夏季细胞丰度的关系 (AT_{winter}:冬季气温;Cynano_{spr-sum}:春、夏季的蓝藻门细胞丰度)

Fig.8 Relationship between winter temperature and Cyanophyta cell abundance in spring and summer in Qiandaohu Reservoir

图9 2002—2017年千岛湖 TLI 的变化趋势
Fig.9 Long-term variation of TLI in Qiandaohu Reservoir from 2002 to 2017

构带来的影响。

浮游植物位于食物链的底端,其丰度与鱼类的数量关系密切^[43, 49]。历年来,浮游植物丰度在 2009—2011 年出现了较大峰值,2013—2017 年的千岛湖的氮、磷营养盐浓度、冬季气温、入库流量等均高于 2009—2011 年,但 2017 年的浮游植物丰度比 2009 年低很多。兰佳等指出鱼类下行效应对千岛湖 2008—2009 年间的浮游植物具有很大影响^[50]。朱淑君等发现千岛湖网箱养殖会导致水体富营养化,并造成鱼腥藻和直链藻占优势^[51]。2005 年以来,在市场刺激下,千岛湖的网箱养殖面积不断扩大。网箱养殖期间,由于技术粗放、养殖管理不当,造成野杂鱼资源急骤下降及严重的水质污染,给浮游植物的生长繁殖提供了绝佳机会,部分区域发生了局部水华事件^[52]。因此,本研究认为 2009—2012 年高浮游植物丰度与网箱养殖的泛滥及不当的养殖方式存在一定的联系。养殖不当引起的浮游植物丰度增加在岩滩水库^[53]、江谷水库^[54]及红潮江水库^[49]也同样被发现。因本研究缺少浮游动物及鱼类的调查数据,不能推算下行效应对千岛湖历年浮游植物变化的贡献率。但出于湖库安全角度看,特别是对于千岛湖这类营养盐水平不高的湖库,鱼类养殖对水体的影响值得我们进一步探究,相关部门在鱼类养殖方面的管理也应该加强,注重科学和生态养殖。

4 结论

1) 过去 16 年间,千岛湖浮游植物年均细胞丰度在 $2.50 \times 10^6 \sim 1.46 \times 10^7$ cells/L 之间波动,浮游植物群落结构发生较大变化。在细胞丰度上,经历了 4 个阶段:2002—2007 年,年均总细胞丰度变幅较小,在 $3.25 \times 10^6 \sim 5.71 \times 10^6$ cells/L 之间波动;2007—2010 年丰度持续增加,并达到 16 年来的最大值 1.46×10^7 cells/L;2010—2013 年,年均丰度持续下降,最低值为 2.50×10^6 cells/L;2013 年之后,总细胞丰度再次持续上升。在群落结构上经历了 3 个阶段:2002—2007 年,蓝藻占比较低,千岛湖的主要优势属为小环藻属、隐藻属及蓝隐藻属,2008—2011 年,蓝藻及硅藻大量增加,主要优势属为小环藻属和蓝隐藻属及颤藻属蓝藻,且蓝藻门的鱼腥藻属、色球藻属、束丝藻属及硅藻门的直链藻属、脆杆藻属、针杆藻属出现占优势情况。2012 年以来,蓝藻门占比持续增加且在 2016—2017 年达到历年最高值,主要优势属为鱼腥藻属、束丝藻属、栅藻属、小环藻属、直链藻属、脆杆藻属、针杆藻属及蓝隐藻属,泽丝藻属、曲壳藻属、隐藻属也在部分年份占优,优势属类别明显增多。

2) 千岛湖浮游植物群落长期变化的主要影响因子包括温度、总氮、风速、透明度、水位、电导率、氮磷比及入库流量,水温为影响群落结构发生变化的最主要原因。此外,千岛湖气象水文条件会对水体的物理及化学条件造成较大影响,进而对浮游植物的生长及群落结构造成影响。因此,在今后千岛湖的水质管理过程中,不仅要考虑营养盐水平的增加,更要充分考虑气象水文条件带来的巨大影响,这对我国水库的管理提出了更大的挑战。

致谢:感谢浙江省淳安县环境保护局在浮游植物鉴定数据收集集中提供的帮助,感谢上海海洋大学的张玮老师和暨南大学的肖利娟老师在论文修改中提供的帮助,感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所的邹伟、国超旋、彭凯、邓建明等在数据分析、绘图及论文修改中提供的帮助。

5 参考文献

- [1] Zhang M, Yu Y, Qian SQ *et al.* Phytoplankton community structure and biodiversity in summer Yunnan-Guizhou Plateau lakes. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 829-836. DOI: 10.18307/2010.0604. [张民, 于洋, 钱善勤等. 云贵高原湖泊夏季浮游植物组成及多样性. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 829-836.]
- [2] Kazamia E, Helliwell KE, Purton S *et al.* How mutualisms arise in phytoplankton communities: Building eco-evolutionary principles for aquatic microbes. *Ecology Letters*, 2016, **19**(7): 810-822. DOI: 10.1111/ele.12615.
- [3] Wang YW. Phytoplankton communities and their response to water quality in three large reservoirs, South China [Dissertation]. Guangzhou: Jinan University, 2013. [王雅文. 华南地区三座大型水库浮游植物群落特征与水环境评价[学位论文]. 广州: 暨南大学, 2013.]
- [4] Li ZC, Deng YX, Zheng BH. Investigation of the eutrophication status of the lakes and reservoirs in China. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(S1): 209-213. [李子成, 邓义祥, 郑丙辉. 中国湖库营养状态现状调查分析. 环境科学与技术, 2012, **35**(S1): 209-213.]

- [5] Zheng W, Han XZ, Liu C *et al.* Satellite remote sensing data monitoring “Huang Tai” algae bloom in Lake Ulansuhai, Inner Mongolia. *J Lake Sci*, 2010, **22**(3): 321-326. DOI: 10.18307/2010.0303. [郑伟, 韩秀珍, 刘诚等. 内蒙古乌梁素海“黄苔”暴发卫星遥感动态监测. 湖泊科学, 2010, **22**(3): 321-326.]
- [6] Ndlela LL, Oberholster PJ, van Wyk JH *et al.* An overview of cyanobacterial bloom occurrences and research in Africa over the last decade. *Harmful Algae*, 2016, **60**: 11-26. DOI: 10.1016/j.hal.2016.10.001.
- [7] Carey CC, Ibelings BW, Hoffmann EP *et al.* Eco-physiological adaptations that favour freshwater Cyanobacteria in a changing climate. *Water Research*, 2012, **46**(5): 1394-1407. DOI: 10.1016/j.watres.2011.12.016.
- [8] Backer L, Manassaram-Baptiste D, LePrell R *et al.* Cyanobacteria and algae blooms: Review of health and environmental data from the harmful algal bloom-related illness surveillance system (HABISS) 2007–2011. *Toxins*, 2015, **7**(4): 1048-1064. DOI: 10.3390/toxins7041048.
- [9] Carmichael WW, Boyer GL. Health impacts from Cyanobacteria harmful algae blooms: Implications for the North American Great Lakes. *Harmful Algae*, 2016, **54**: 194-212. DOI: 10.3390/toxins7041048.
- [10] Paerl HW, Otten TG. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls. *Microbial Ecology*, 2013, **65**(4): 995-1010. DOI: 10.1007/s00248-012-0159-y.
- [11] O’Neil JM, Davis TW, Burford MA *et al.* The rise of harmful Cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful Algae*, 2012, **14**(1): 313-334. DOI: 10.1016/j.hal.2011.10.027.
- [12] Brookes JD, Carey CC. Resilience to blooms. *Science*, 2011, **334**(6052): 46-47. DOI: 10.1126/science.1207349.
- [13] Becker V, Caputo L, Ordóñez J *et al.* Driving factors of the phytoplankton functional groups in a deep Mediterranean reservoir. *Water Research*, 2010, **44**(11): 3345-3354. DOI: 10.1016/j.watres.2010.03.018.
- [14] Vogt RJ, Sharma S, Leavitt PR. Decadal regulation of phytoplankton abundance and water clarity in a large continental reservoir by climatic, hydrologic and trophic processes. *Journal of Great Lakes Research*, 2015, **41**: 81-90. DOI: 10.1016/j.jglr.2014.11.007.
- [15] Ineke Van Gremberghe, Jeroen Van Wichelen, Katleen Van der Gucht *et al.* Covariation between zooplankton community composition and cyanobacterial community dynamics in Lake Blaarmeersen (Belgium). *FEMS Microbiology Ecology*, 2008, **63**(2): 222-237. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2007.00422.x.
- [16] Ma PM, Shi LD, Zhang JF *et al.* Succession of phytoplankton assemblages and its influencing factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4560-4569. DOI: 10.13227/j.hjlx.201605095. [马沛明, 施练东, 张俊芳等. 浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析. 环境科学, 2016, **37**(12): 4560-4569.]
- [17] Yang J, Lv H, Yang J *et al.* Decline in water level boosts Cyanobacteria dominance in subtropical reservoirs. *Science of the Total Environment*, 2016, **557/558**: 445-452. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.094.
- [18] Beaver JR, Kirsch JE, Tausz CE *et al.* Long-term trends in seasonal plankton dynamics in Lake Mead (Nevada-Arizona, USA) and implications for climate change. *Hydrobiologia*, 2018, **822**(1): 85-109. DOI: 10.1007/s10750-018-3638-4.
- [19] Mo DM. Community structures of phytoplankton and comparison on them between two identification methods in Lake Qiandaohu [Dissertation]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016. [莫丹玫. 千岛湖浮游植物群落结构多样性及其鉴定方法的研究[学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2016.]
- [20] Zhang YY, Wu ZX, Zhu XJ. Model prediction of *Anabaena* bloom using backward multiple regression between algae & related environmental factors in Thousand-island Lake. *Environmental Monitoring in China*, 2002, **18**(3): 37-41. [张雅燕, 吴志旭, 朱淑君. 千岛湖藻类及相关环境因子多元线性回归和鱼腥藻预测模型的建立. 中国环境监测, 2002, **18**(3): 37-41.]
- [21] Hu ZJ, Mo DM, Zhou XY *et al.* Spatial and seasonal distribution of phytoplankton in Qiandao Lake and relationship with environmental factors. *Journal of Hydroecology*, 2017, **38**(5): 46-54. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2017.05.007. [胡忠军, 莫丹玫, 周小玉等. 千岛湖浮游植物群落结构时空分布及其与环境因子的关系. 水生态学杂志, 2017, **38**(5): 46-54.]
- [22] Wu ZX, Liu ML, Lan J *et al.* Vertical distribution of phytoplankton and physico-chemical characteristics in the lacustrine zone of Xin’anjiang Reservoir (Lake Qiandao) in subtropic China during summer stratification. *J Lake Sci*, 2012, **24**(3): 460-465. DOI: 10.18307/2012.0319. [吴志旭, 刘明亮, 兰佳等. 新安江水库(千岛湖)湖泊区夏季热分层期间垂向理化及浮游植物特征. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 460-465.]
- [23] Hu ZJ, Sun YJ, Liu QG *et al.* Temporal and spatial distribution of profundal macrozoobenthic community in Lake Qiandao, Zhejiang, China. *J Lake Sci*, 2010, **22**(2): 265-271. DOI: 10.18307/2010.0217. [胡忠军, 孙月娟, 刘其根等. 浙江

- 千岛湖深水区大型底栖动物时空变化格局. 湖泊科学, 2010, 22(2): 265-271.]
- [24] Zhang X, Xu GF, Shen DW *et al.* Maintenance and natural regeneration of *Castanopsis sclerophylla* populations on Islands of Qiandao Lake Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 424-431. [张欣, 徐高福, 沈栋伟等. 千岛湖岛屿苦槠 (*Castanopsis sclerophylla*) 种群的维持和天然更新. 生态学报, 2007, 27(2): 424-431.]
- [25] Zhang HJ, Peng SH, Zhou Y *et al.* Analysis of current pollutant loads and investigation of total pollutant discharge limits in Qiandao Lake. *Water Resources Protection*, 2014, (4): 53-56. [张红举, 彭树恒, 周娅等. 千岛湖现状污染负荷分析与限制排污总量研究. 水资源保护, 2014, (4): 53-56.]
- [26] Hu HJ, Li YY, Wei YX *et al.* eds. Freshwater algae in China. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1980. [胡鸿钧, 李尧英, 魏印心等. 中国淡水藻类. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.]
- [27] Editorial board of "Water and wastewater monitoring and analysis method", Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Monitoring and analysis methods of water and wastewater; fourth edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [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. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [28] McNaughton SJ. Relationships among functional properties of Californian grassland. *Nature*, 1967, 216(5111): 168-169. DOI: 10.1038/216168b0.
- [29] Wang MC, Liu XQ, Zhang JH. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication. *Environmental Monitoring China*, 2002, 18(5): 47-49. [王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, 18(5): 47-49.]
- [30] Kangro K, Laugaste R, Nõges P *et al.* Long-term changes and seasonal development of phytoplankton in a strongly stratified hypertrophic lake. *Hydrobiologia*, 2005, 547(1): 91-103. DOI: 10.1007/s10750-005-4151-0.
- [31] Sommer U, Gliwicz MZ, Lampert W *et al.* The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in freshwaters. *Archives of Hydrobiology*, 1986, 106: 422-477.
- [32] Yang LJ, Yu PF, Zhu JQ *et al.* Community structure characteristics of phytoplankton and related affecting factors in Hengshan Reservoir, Zhejiang, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2): 569-576. [杨亮杰, 余鹏飞, 竺俊全等. 浙江横山水库浮游植物群落结构特征及其影响因子. 应用生态学报, 2014, 25(2): 569-576.]
- [33] Tan X, Xia XL, Cheng XL *et al.* Temporal and spatial pattern of phytoplankton community and its biodiversity indices in the Danjiangkou reservoir. *Environmental Science*, 2011, 32(10): 2875-2882. DOI: 10.13227/j.hjxx.2011.10.008. [谭香, 夏小玲, 程晓莉等. 丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数. 环境科学, 2011, 32(10): 2875-2882.]
- [34] Sun X, Zhu GW, Yang WB *et al.* Spatio-temporal variations in phytoplankton community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China. *Environmental Science*, 2017, 38(10): 4160-4168. DOI: 10.13227/j.hjxx.201704161. [孙祥, 朱广伟, 杨文斌等. 天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性. 环境科学, 2017, 38(10): 176-184.]
- [35] Zhou XY. The planktonic algae succession in relation to environmental factors of Lake Qiandao and the influence mechanism [Dissertation]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012. [周小玉. 千岛湖浮游藻类演替格局与环境因子的关系及其机理的初探[学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2012.]
- [36] Xiao LJ. Comparative analysis of phytoplankton communities and their succession in two large reservoirs, South China [Dissertation]. Guangzhou: Jinan University, 2011. [肖利娟. 华南地区两座大型水库浮游植物群落与演替机制比较[学位论文]. 广州: 暨南大学, 2011.]
- [37] Sheng HY, Yu ZM, Han YC *et al.* Phytoplankton community and its relationship with environmental factors of a large riverine reservoir, Fuchunjiang Reservoir in subtropical China. *J Lake Sci*, 2010, 22(2): 235-243. DOI: 10.18307/2010.0213. [盛海燕, 虞左明, 韩轶才等. 亚热带大型河流水库——富春江水库浮游植物群落及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2010, 22(2): 235-243.]
- [38] Wu WJ, Yang K, Wang ZC *et al.* Community structure and seasonal succession of phytoplankton in Yudong Reservoir of Yungui-plateau. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(2): 69-75. [吴卫菊, 杨凯, 汪志聪等. 云贵高原渔洞水库浮游植物群落结构及季节演替. 水生生态学杂志, 2012, 33(2): 69-75.]
- [39] Fang LJ, Liu DF, Yang ZJ *et al.* Effects of water temperature on the phytoplankton community structure. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(S2): 45-50. [方丽娟, 刘德富, 杨正健等. 水温对浮游植物群落结构的影响实验研究. 环境科学与技术, 2014, 37(S2): 45-50.]
- [40] Lin QQ, Hu R, Han BP. Effect of hydrodynamics on nutrient and phytoplankton distribution in Liuxihe Reservoir. *Acta*

- Ecologica Sinica*, 2003, **23**(11): 2278-2284. [林秋奇, 胡韧, 韩博平. 流溪河水库水动力学对营养盐和浮游植物分布的影响. 生态学报, 2003, **23**(11): 2278-2284.]
- [41] Tan X, Kong FX, Yu Y *et al.* Effects of enhanced temperature on algae recruitment and phytoplankton community succession. *China Environmental Science*, 2009, **29**(6): 578-582. [谭啸, 孔繁翔, 于洋等. 升温过程对藻类复苏和群落演替的影响. 中国环境科学, 2009, **29**(6): 578-582.]
- [42] Li QH, Han BP. Structure and dynamics of phytoplankton community based CCA analysis in a pumped storage reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(6): 2355-2364. [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, **27**(6): 2355-2364.]
- [43] Weyhenmeyer GA. Warmer winters: Are planktonic algal populations in Sweden's largest lakes affected? *Ambio-a Journal of the Human Environment*, 2001, **30**(8): 565-571. [Weyhenmeyer GA. 暖冬: 瑞典最大湖泊的浮游藻类种群是否受到影响? *AMBIO-人类环境杂志*, 2001, **30**(8): 565-571.]
- [44] Deng JM, Qin BQ. A review on studies of effects of climate change on phytoplankton in freshwater systems. *J Lake Sci*, 2015, **27**(1): 1-10. DOI: 10.18307/2015.0101. [邓建明, 秦伯强. 全球变暖对淡水湖泊浮游植物影响研究进展. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 1-10.]
- [45] Paerl HW, Huisman J. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environmental Microbiology Reports*, 2009, **1**(1): 27-37. DOI: 10.1111/j.1758-2229.2008.00004.x.
- [46] Wang YH, Chen L, Niu Y *et al.* Spatio-temporal variation in phytoplankton community and its influencing factors in Danjiangkou Reservoir. *J Lake Sci*, 2016, **28**(5): 1057-1065. DOI: 10.18307/2016.0516. [王英华, 陈雷, 牛远等. 丹江口水库浮游植物时空变化特征. 湖泊科学, 2016, **28**(5): 1057-1065.]
- [47] Yang LL. Zooplankton community structure and its relation to environment factors in Qiandao lake [Dissertation]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012. [杨丽丽. 千岛湖浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系[学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2012.]
- [48] Zhang JL. Comparative analysis of nutrient dynamic during high and low precipitation years in Liuxihe Reservoir [Dissertation]. Guangzhou: Jinan University, 2012. [张建林. 丰水年与枯水年流溪河水库营养盐动态的比较分析[学位论文]. 广州: 暨南大学, 2012.]
- [49] He AY, Han YQ, Lei JJ. Phytoplankton survey in cage culture area of Hongchao river reservoir. *Guangxi Aquatic Science and Technology*, 2012, (3): 6-14. [何安尤, 韩耀全, 雷建军. 洪潮江水库网箱养殖区浮游植物调查. 广西水产科技, 2012, (3): 6-14.]
- [50] Lan J, Wu ZX, Li J *et al.* Analysis of phytoplankton community and its preliminary influenced factors in Xin'an Jiang Reservoir. *Environmental Monitoring China*, 2014, **30**(2): 40-46. [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, **30**(2): 40-46.]
- [51] Zhu XJ, Wang FQ, Wang W. Impact of fishpond using netted boxes on water quality. *Arid Environmental Monitoring*, 2003, **17**(1): 57-58. [朱淑君, 王芳群, 王伟. 浅析网箱养鱼对水质的影响. 干旱环境监测, 2003, **17**(1): 57-58.]
- [52] Chen YS, Yu YZ. The present situation and countermeasure of cage fish culture in Qiandao lake. *Hangzhou Agricultural Science and Technology*, 2007, (2): 14. [陈顺友, 余艳芝. 千岛湖网箱养鱼的现状及对策. 杭州农业与科技, 2007, (2): 14.]
- [53] Zhou Q, Chen BJ, Lou FR *et al.* Grey relational analysis between phytoplankton diversity and environmental factors in Yantan Reservoir. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2015, **42**(3): 140-146. [周晴, 陈柏娟, 娄方瑞等. 岩滩水库浮游植物多样性与环境因子的灰色关联性分析. 广东农业科学, 2015, **42**(3): 140-146.]
- [54] Lan YQ, Yuan YW, Peng L *et al.* Cage cultural eutrophication and phytoplankton functional groups as bio-indicators in Jianggu Reservoir (Zhaoqing City, Guangdong Province). *Ecology and Environment Sciences*, 2015, (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, (6): 1028-1036.]