

大纵湖浮游植物群落特征及其与环境因子的关系

徐明¹, 许静波¹, 唐春燕², 刘军¹, 王琴¹, 李一平³, 朱立琴³

(1. 江苏省泰州引江河管理处, 江苏 泰州 225321;

2. 环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州 510655;

3. 河海大学, 江苏 南京 210098)

摘要:里下河腹地处于江淮两大水系交融地带, 人类活动严重影响区域水生态环境。鉴于浮游植物群落结构及多样性可作为水环境变化重要指标, 于2015–2017年对里下河腹地典型湖泊大纵湖浮游植物群落结构及环境因子进行逐月采样调查, 分别采用藻类生物学指标和综合营养指数对大纵湖营养状态进行综合评价, 并且基于相关性分析法, 探讨浮游植物与水环境因子的响应关系。结果显示, 大纵湖在调查期间共鉴定出浮游植物7门、123种(属), 以绿藻、硅藻、蓝藻为主, 分别为50、35、18种, 占总种数的40.65%、28.46%、14.63%。全湖各采样点浮游植物的平均丰度为 $3.70 \times 10^6 \sim 6.25 \times 10^6$ 个/L; 空间上略有差异, 夏季藻类丰度较高, 冬季最低。大纵湖各个采样点浮游植物优势种基本相同, 共8种。浮游植物物种多样性指数和均匀度年均值分别为2.74和0.78, 表明大纵湖处于轻-中度污染状态。综合营养指数显示, 大纵湖处于轻度富营养状态, 两者结果基本一致。相关性分析表明, 水温(WT)、透明度(SD)、浊度(TUB)和总氮(TN)是影响大纵湖浮游植物群落结构的主要水质指标。

关键词:群落结构; 浮游植物; 环境因子; 大纵湖

中图分类号: Q142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2021)06-0064-06

浮游植物是水生态系统中的初级生产者, 也是整个水生态系统中物质循环和能量流动的基础(Horne & Goldman, 1994)。浮游植物种群结构与周边水域水质状况密切相关, 其群落特征及生物量的动态变化能综合、真实、灵敏地反映水生态环境的特征和状态(张婷等, 2009)。因浮游植物具有生长周期短、对环境变化敏感等特征, 其群落结构及多样性常常被作为水环境变化重要指示生物之一, 特别是针对有富营养化趋势的水体(马威和孙军, 2014; 柴毅等, 2014; 何瑞等, 2018)。

长江中下游是我国淡水湖泊的主要分布区域, 且绝大多数为浅水湖泊(秦伯强, 2007)。但经济快速发展和过度的湖泊资源开发, 大量污染物质进入湖泊, 导致湖泊水质恶化、富营养化严重、生态结构和功能也不断退化, 水生生物群落也受到了严重影响。近年来, 对长江中下游淡水湖泊浮游植物群落已开展了群落种类组成、多样性、稳定性、群落演替

规律及其与水环境理化指标响应关系等方面的研究, 孟睿等(2013)对长江中下游4个草型清水湖泊开展了浮游植物群落结构调查, 并利用典范对应分析法解析了浮游植物与环境因子的关系, 认为pH和总磷是影响浮游植物群落分布的主要环境因子; 吴世凯等(2014)通过对长江中下游30个浅水湖泊的调查, 探讨了不同类型湖泊蓝藻的群落结构特征、生物量及其与营养盐浓度的关系; 李娣等(2014)利用太湖多点位浮游植物群落结构和水质指标的关系, 发现太湖浮游植物密度较高、多样性较低, 蓝藻门的微囊藻属是绝对优势种群, 水温、透明度、总氮、化学需氧量、叶绿素a是影响太湖浮游植物群落结构的主要水质指标; 代培等(2018)对五里湖浮游植物进行逐月调查, 认为综合整治后五里湖沿岸的浮游植物群落已发生变化, 且藻类密度、生物量和物种数与水体浊度、pH和水温存在显著相关关系。

里下河腹地处于长江、淮河两大水系交融地带, 湖荡数量众多, 主要由大纵湖、射阳湖等41个零星分散的湖泊湖荡及众多的圩区组成, 评估里下河腹地典型湖荡区浮游植物群落结构生态特征是认识其生态系统功能的基础。葛伟等(2015)研究了里下河地区大纵湖出湖河流蟒蛇河至下游新洋港浮游植物种类组成及群落结构, 发现水域浮游植物以硅藻门、绿藻门和蓝藻门为主, 且春、秋季浮游植物优势种存在交叉演替现象; 但目前有关里下河腹地

收稿日期: 2019-08-03 修回日期: 2021-04-20

基金项目:国家自然科学基金(51609060, 51879082); 江苏省自然科学基金(BK20150810); 中央高校基本科研业务费专项资金(2017B14614)。

作者简介:徐明, 1965年生, 男, 高级工程师, 主要从事河湖管理与水生态保护研究。E-mail: 0523xm@163.com

通信作者:朱立琴。E-mail: lqzhu@hhu.edu.cn

典型湖区浮游植物的组成、分布及其多样性研究鲜有报道。

大纵湖作为里下河腹地典型浅水湖泊,在削减区域洪峰、调蓄和净化水资源、保持生物多样性、保障沿湖地区经济协调发展等方面具有极为重要的作用,但同时也面临着水体富营养化、水文调控、水生态系统退化等多重环境因子胁迫(冷辉等,2012)。本研究通过对大纵湖浮游植物及水质因子开展为期两年的逐月监测调查,分析浮游植物群落组成、优势种、丰度、物种多样性及其时空变化特征,探讨浮游植物与水环境因子之间的响应关系,评价水环境健康状况,以期为大纵湖水资源可持续利用、生态系统恢复与保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 区域概况

大纵湖是江苏省级规划保护的重点湖泊之一,位于江淮两大水系交汇的里下河地区洼地中心地带(119°43'~119°50'E,33°7'~33°13'N);湖面呈椭圆形,总面积为36.67 km²,其中自由水面面积为10.02 km²(占27.3%),其余为围圩和围网面积。湖底平坦,大部分湖区平均水深为1 m左右。大纵湖为过水型湖泊,供水能力受泰州引江河调水影响,主要入湖河流有南部和西部的鲤鱼河、中引河及大溪河,主要出湖河流为北边的蟒蛇河。根据引江河2005–2017年引排水流量和水量,夏季汛期为了缓解里下河地区洪涝风险,主要以排水为主,其余时间以引水为主,且一般春末(5–6月)期间引水量较大。大纵湖水深较浅,水–土界面易发生扰动,物质交换强烈,污染物沉积缓慢,水环境承载能力低,水体相对较易发生富营养化,生态系统较为脆弱。

1.2 采样分析

1.2.1 样点布设与样品采集 基于全面覆盖、重点突出的原则,在大纵湖共布设3个监测点(图1)。于2015年9月至2017年8月开展了为期2年的逐月采样,监测指标有水质指标包括水温(WT)、透明度(SD)、浊度(TUB)、电导率(EC)、酸碱度(pH)、溶解氧(DO)、氨氮(NH₃-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总磷(TP)、总氮(TN)叶绿素a(Chl-a)以及浮游植物种类、生物量;此外,大纵湖是过水型湖泊,水文、气象条件是该水生态系统演变的重要影响因素。水位主要受降雨和泰州引江河调水调控影响,本研究也同时收集了引江河的引排水量和湖泊水位数据,进一步探讨水文情势对浮游植物结构的影响。

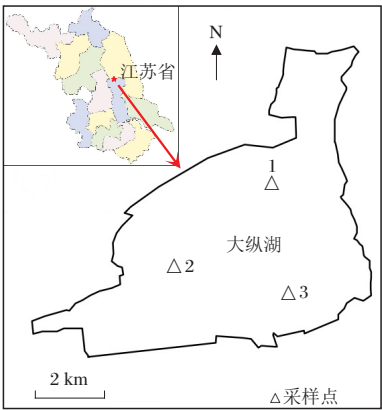


图1 研究区域及监测点位布置

Fig.1 Schematic diagram of the study area and location of sample sites

1.2.2 浮游植物的采集与鉴定 浮游植物定量样品用有机玻璃采水器在水体表层下0.5 m处采集1 L水样,加入15 mL鲁哥试剂并摇匀固定,静置沉淀24 h后浓缩至25~50 mL。浮游植物的观察计数,用0.1 mL浮游植物计数框在光学显微镜(10×40)下进行。根据文献进行分类鉴定,并计算出浮游植物细胞数量(章宗涉和黄祥飞,1991;韩茂森和束蕴芳,1995)。

1.2.3 水质测定 水质取样测定与浮游植物样品的采集同步进行。水质样品的采集和分析参考《地表水环境质量标准(GB3838–2002)》。

1.3 统计分析

1.3.1 综合营养状态指数法 采用综合营养状态指数法对湖泊(水库)富营养化状况进行评价,综合营养状态指数计算公式为:

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

式中:TLI(Σ)为综合营养状态指数;W_j为第j种参数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。选用Chl-a、透明度、总磷、总氮和高锰酸盐指数共5项参数,根据《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》计算综合营养状态指数。

以Chl-a作为基准参数,则第j种参数的归一化相关权重计算公式为:

$$W_j=\frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2} \tag{2}$$

式中:r_{ij}为第j种参数与基准参数Chl-a的相关系数;m为评价参数的个数。

1.3.2 浮游植物生态学特征指数 利用浮游植物群落的优势度指数(Y)、Shannon–Wiener 多样性指数

(H)、Pielou 均匀度指数(J)和藻类丰富度(D)对大纵湖水体的浮游植物生态学特征进行分析评价(郭坤等,2016)。

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i$$

③

式中: n_i 为第*i*种的个体总数; N 为所有浮游植物总个数; f_i 为第*i*种藻类在各站点的出现频率;以 $Y>0.02$ 的种类为优势种。

$$H = - \sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N}$$

④

式中: S 为站点浮游植物总种数。 $H>3$,水质轻污染或无污染; $1<H\leq3$,中污染; $0<H\leq1$,重度污染。

$$J = \frac{H}{\log_2 S}$$

⑤

式中: H 为 Shannon–Wiener 多样性指数; S 为站点浮游植物总种数。 $J>0.5$,水质轻污染或无污染; $0.3<J\leq0.5$,中污染; $0<J\leq0.3$,重污染。

根据湖泊富营养化藻类丰富度(D)评价方法, $D\leq10\times10^6$ 个/L为贫营养状态; 10×10^6 个/L< $D\leq40\times10^6$ 个/L为中营养状态; 40×10^6 个/L< $D\leq80\times10^6$ 个/L为中度富营养状态; 80×10^6 个/L< $D\leq100\times10^6$ 个/L为富营养状态; $D\geq100\times10^6$ 个/L为重度富营养状态(潘鸿等,2018; Carlson, 1977)。

2 结果与分析

2.1 浮游植物群落结构及优势种

调查期间,共记录鉴定大纵湖有浮游植物7门、123种(属)。其中,绿藻、硅藻、蓝藻、裸藻种类分别为50、35、18、11种(属),占总种数的40.65%、28.46%、14.63%、8.94%;隐藻、金藻和黄藻均少于4种(属),占比均小于3.25%(图2)。

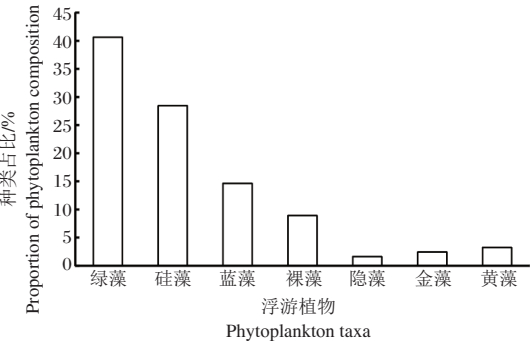


图2 大纵湖浮游植物种类组成

Fig.2 Phytoplankton composition of Dazong Lake

以优势度 $Y>0.02$ 为标准,大纵湖各个采样点浮游植物的优势种基本相同,主要优势种为绿藻门的小球藻属一种(*Chlorella* sp.)、四尾栅藻(*Scenedeam-*

us quadricauda),硅藻门的小环藻属一种(*Cyclotella* sp.)、颗粒直链藻极狭变种(*Melosira granulata* var. *angustissima*),蓝藻门的链状伪鱼腥藻(*Pseudanabaena catenata*)、颤藻属一种(*Oscillatoria* sp.)、细小平裂藻(*Merismopedia minima*),隐藻门的啮蚀隐藻(*Crypomonas erosa*)。

大纵湖浮游植物种类组成具有明显的时空变化特征。各门类浮游植物基本呈现冬季最少、春季逐渐增多、夏季最多的趋势。夏季各采样点浮游植物平均有41种,其中1号样点的种类数最多,为44种,2号和3号样点的浮游植物均为37种。冬季的种类相对较少,各采样点的种类数基本一致。

2.2 浮游植物丰度

2015年9月至2017年8月采样调查期间,全湖各采样点浮游植物平均丰度为 $3.70\times10^6\sim6.25\times10^6$ 个/L,空间上略有差异(图3)。

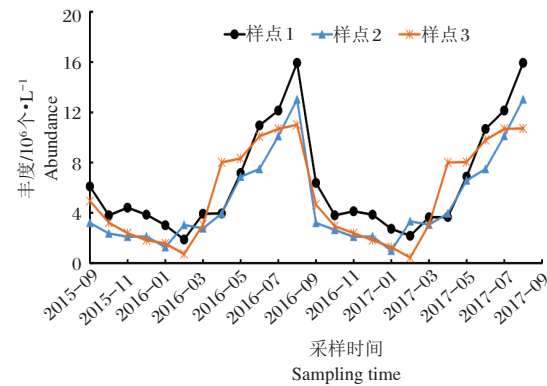


图3 各采样点浮游植物丰度变化

Fig.3 Monthly change of phytoplankton abundance at each sampling site in Dazong Lake

大纵湖浮游植物季节性波动趋势明显,温度和水位变化是浮游植物季节性变化的主要影响因子。每年8–9月,湖泊水位相对较高,浮游植物平均丰度呈现出最大值,随后急剧降低;1–2月,由于气温较低,浮游植物的增殖也受到了抑制,其丰度明显低于其他月份;随着气温回升,浮游植物丰度呈现大幅度上升趋势,如2016年和2017年8月,浮游植物丰度比当年2月分别增加了13.3和6.3倍。

从空间上看,1、2、3号采样点浮游植物丰度分别为 $0.88\times10^6\sim15.56\times10^6$ 个/L、 $0.58\times10^6\sim12.78\times10^6$ 个/L、 $0.5\times10^6\sim10.61\times10^6$ 个/L。大纵湖各采样点浮游植物丰度均呈现冬春季减少、夏秋季增加的变化规律。春、夏、秋、冬各季浮游植物丰度均值分别为 6.53×10^6 、 9.44×10^6 、 4.67×10^6 、 1.5×10^6 个/L。1、2、3号样点浮游植物丰度峰值均出现在8–9月,最低值一般出现

在 1-2 月,最大相差近 26 倍。由此可见,温度是影响浮游植物生长(浮游植物组成和数量)的关键因子。浮游植物的夏秋季高峰主要是由平裂藻属、直链藻属、小球藻、小环藻等藻类引发组成;此外,直链藻属、小环藻属与水位变化关系较为显著。

从大纵湖各采样点各季节浮游植物丰度组成的变化趋势来看(图4),春季各站点浮游植物丰度组成以蓝藻、硅藻、绿藻为主,分别占比 55.2%、22.0%、16.7%;夏季各站点丰度以蓝藻、硅藻、绿藻为主,分别占比 67.0%、15.7%、14.0%;秋季各站点丰度以硅藻、蓝藻、绿藻为主,分别占比 42.8%、28.4%、22.9%;冬季各站点丰度以蓝藻、绿藻、硅藻为主,分别占比 53.5%、29.8%、10.1%。

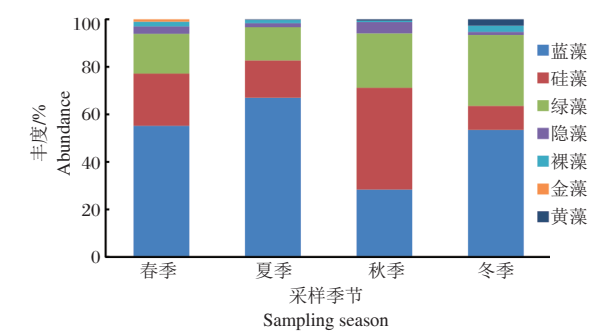


图4 各季节浮游植物丰度组成
Fig.4 Seasonal variation of phytoplankton abundance composition in Dazong Lake

2.3 浮游植物多样性及均匀度的季节变化

大纵湖浮游植物多样性指数年均值约 2.74,从指数可以判断水体属于中度污染水体。从浮游植物的均匀度来看,各样点的年均值为 0.78,指示该湖泊为轻度污染水体。

各采样点浮游植物多样性指数季节性变化较明显(图5)。1、2、3 号样点的多样性指数总体较好,分别为 2.99、2.42、2.68,处于中度污染状态。由于 2 号样点靠近居民生活区以及农业生产区,受人为污染影响较大,营养物质较多,所以 2 号浮游植物多样性相对较低。各采样点多样性指数在秋冬季较低,受污染程度较为严重,夏季则相对较好。1、2、3 号样点的均匀度指均大于 0.6(图6),3 个采样点均匀度最大值均出现在冬季(12 月),最小值分别出现在 2 月、11 月和 8 月,水体处于轻度污染状态。总体来说,大纵湖 3 个样点的均匀性和多样性指数表明水体处于轻-中度污染状态,说明浮游植物的多样性比较丰富,其中 1 号样点多样性指数最高,3 号采样点的均匀度最高。

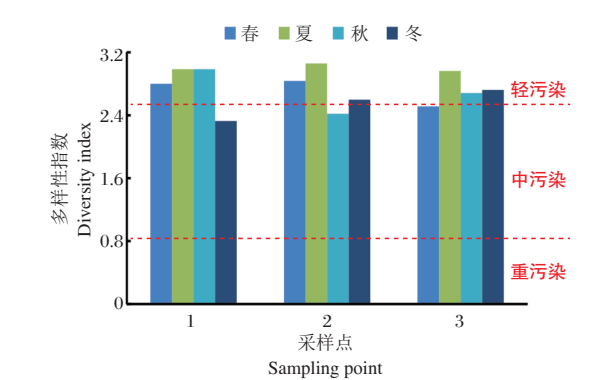


图5 大纵湖浮游植物群落多样性指数时空变化
Fig.5 Spatiotemporal variation in phytoplankton community diversity in Dazong Lake

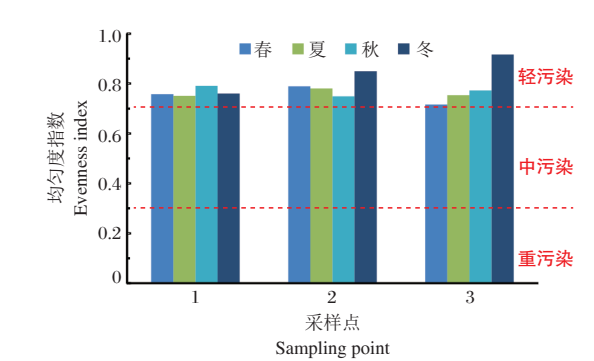


图6 大纵湖浮游植物群落均匀指数时空变化
Fig.6 Spatiotemporal variation in phytoplankton community evenness in Dazong Lake

2.4 浮游植物与环境因子的关系

选用叶绿素 a、透明度、总磷、总氮和高锰酸盐指数 5 项参数,根据综合营养状态指数法计算大纵湖营养状态。结果表明,2015 年 9 月至 2017 年 8 月,综合营养指数(Σ TLI)值为 50~60,属于轻度富营养化。对比上文藻类生物学评价指标结果,表明藻类生物学指标和综合营养状态指数法结果基本一致,能反映出大纵湖的真实营养状态。由此可见,作为苏北地区重要的生态湖泊,大纵湖水生态环境的治理及管理工作仍需进一步加强。

大纵湖水水质指标与浮游植物群落指数的 Pearson 相关关系见表 1。可见水温(WT)、透明度(SD)、浊度(TUB)和总氮(TN)与浮游植物群落参数(丰度、均匀度和多样性)显著相关。太湖作为长江中下游典型的富营养化浅水湖泊,WT、SD、TN、COD、Chl-a 是影响其浮游植物群落结构的主要因子(李娣等, 2014);与本研究结果相似。相比草型湖泊,长江中下游的龙感湖、梁子湖、斧头湖和保安湖浮游植物群落分布则主要受 pH 值和 TP 浓度影响(孟睿等, 2013)。

表 1 大纵湖水质指标与浮游植物群落指数的 Pearson 相关性

指标	TUB	WT	EC	pH	DO	NH ₃ -N	TP	TN	COD _{Mn}	SD
丰度	-0.436*	0.897*	-0.020	-0.111	-0.220	0.022	0.323	0.325*	0.230	0.359*
均匀度	0.131	-0.423*	0.041	0.101	0.234	0.193	0.023	0.555*	-0.111	-0.247
多样性	0.009	0.177	0.170	-0.072	-0.068	0.190	0.282	0.458*	0.146	0.173

注：*表示相关性显著($P<0.05$)。
Note: * indicates that the variables are significantly correlated($P<0.05$).

3 结论

(1)2015–2017 年大纵湖 3 个采样点共鉴定到浮游植物 7 门、123 种,以绿藻、硅藻、蓝藻为主,分别为 50、35、18 种,占总种数的 40.65%、28.46%、14.63%。全湖浮游植物平均丰度为 $3.70\times 10^6\sim 6.25\times 10^6$ 个/L,空间上略有差异,夏季藻类丰度较大,冬季最小。

(2)大纵湖各个采样点浮游植物的优势种基本相同,共 8 种。主要优势种为绿藻门的小球藻(*Chlorella* sp.)、四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)、硅藻门的小环藻(*Cyclotella* sp.)、颗粒直链藻极狭变种(*Melosira granulata* var. *angustissima*)、蓝藻门的链状伪鱼腥藻(*Pseudanabaena catenata*)、颤藻(*Oscillatoria* sp.)、细小平裂藻(*Merismopedia minima*)、隐藻门的嗜蚀隐藻(*Cryptomonas erosa*)。

(3)大纵湖浮游植物多样性指数和均匀度年均值分别为 2.74 和 0.78,水质处于轻–中度污染状态;综合营养指数法显示大纵湖处于轻度富营养状态。水温、透明度、浊度和总氮是影响大纵湖浮游植物群落结构的主要水质指标。

参考文献

柴毅,彭婷,郭坤,等,2014. 2012 年夏季长湖浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 植物生态学报,38(8):857–867.

代培,阎明军,周游,等,2018. 太湖五里湖沿岸带浮游植物群落生态特征(2014–2015 年)[J]. 长江流域资源与环境,27(10):2348–2357.

葛伟,张婷,牛志春,等,2015. 蟒蛇河水域浮游植物调查与水生态评价[J]. 环境监测管理和技术,27(4):35–39,60.

郭坤,杨德国,彭婷,等,2016. 湖北省长湖浮游植物优势种生

态位分析[J]. 湖泊科学,28(4):825–834.

韩茂森,束蕴芳,1995. 中国淡水生物图谱[M]. 北京:科学出版社.

何瑞,蒋然,朱小平,等,2018. 台山附近海域浮游植物的季节变化及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志,37(9):2727–2736.

冷辉,张凤太,王腊春,等,2012. 湖泊形态健康内涵及其集对分析评价——以大纵湖为例[J]. 河海大学学报(自然科学版),40(5):514–519.

李娣,李旭文,牛志春,等,2014. 太湖浮游植物群落结构及其与水质指标间的关系[J]. 生态环境学报,23(11):1814–1820.

马威,孙军,2014. 夏、冬季南海北部浮游植物群落特征[J]. 生态学报,34(3):621–632.

孟睿,何连生,过龙根,等,2013. 长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学,34(7):2588–2596.

潘鸿,杨扬,唐宇宏,2018. 惠州沙田水库浮游植物群落特征及演替研究[J]. 生态科学,37(4):154–159.

秦伯强,2007. 湖泊生态恢复的基本原理与实现[J]. 生态学报,27(11):4848–4858.

吴世凯,谢平,倪乐意,等,2014. 长江中下游地区湖泊中蓝藻及其与氮磷浓度的关系[J]. 水生态学杂志,35(3):19–25.

张婷,李林,宋立荣,2009. 熊河水库浮游植物群落结构的周年变化[J]. 生态学报,29(6):2971–2979.

章宗涉,黄祥飞,1991. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京:科学出版社.

Carlson R E,1977. A trophic state index for lakes[J]. Limnology and Oceanography,22:361–369.

Horne A J,Goldman C R,1994. Limnology[M]. 2nd ed. New York:McGraw–Hill Companies:226–264.

(责任编辑 万月华)

Phytoplankton Community Characteristics and Its Relationship
with Environmental Factors in Dazong Lake

XU Ming¹, XU Jing-bo¹, TANG Chun-yan², LIU Jun¹, WANG Qin¹, LI Yi-ping³, ZHU Li-qin³

- (1. Taizhou Yinjiang Canal Administration of Jiangsu Province, Taizhou 225321, P.R.China;
- 2. South China Institute of Environmental Sciences, MEP, Guangzhou 510655, P.R.China;
- 3. Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

Abstract: Lixiahe District, with a well-developed river/lake system, is affected by the Yangtze and Huaihe Rivers and negatively impacted by human activities. The phytoplankton community provides an important indicator of change in aquatic ecosystems. In this study, Dazong Lake, a typical shallow lake in the Lixiahe District, was selected for a study case, and the structure of phytoplankton community, and associated environmental factors, in Dazong Lake were analyzed, focusing on community composition, dominant species, abundance, diversity and spatiotemporal variations. Meanwhile, algal biological indices and the comprehensive trophic level index were used to assess the trophic status of Dazong Lake. The study was based on monthly phytoplankton surveys and water quality monitoring at three sites from September 2015 to August 2017. A total of 123 phytoplankton species from 7 classes were identified, with dominance by Chlorophyta (50 species), Bacillariophyta (35 species) and Cyanophyta (18 species), accounting for 40.65%, 28.46% and 14.63% of the total species, respectively. There were no differences in the eight dominant species among the three sampling sites, but spatiotemporal variations in phytoplankton community composition were significant. The highest species richness occurred in summer and at sample site No.1, and the lowest was in winter with no differences between sites. The average phytoplankton cell abundance was in the range of 3.70×10^6 – 6.25×10^6 cells/L, with small differences among sites. Temporally, there was marked seasonal fluctuation, with the highest cell densities occurring in the summer and the lowest in winter. Phytoplankton community diversity and evenness indices were 2.74 and 0.78, respectively, indicating that Dazong Lake was in a light to moderate pollution condition. The comprehensive trophic level index (TLI) of Dazong Lake was in the range of 50–60, indicating slightly eutrophic conditions, which is consistent with algal indicators. Correlation analysis of phytoplankton community characteristics with water quality parameters showed that water temperature, transparency, turbidity and total nitrogen were the primary factors affecting phytoplankton community structure in Dazong Lake.

Key words: community structure; phytoplankton; environmental factors; Dazong Lake