

大型过水性湖泊——洪泽湖浮游植物群落结构及其水质生物评价*

吴天浩^{1,2}, 刘劲松³, 邓建明¹, 戴小琳³, 唐荣桂⁴, 彭 凯^{1,2}, 邹 伟^{1,2}, 蔡永久¹, 龚志军^{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: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 江苏省水利厅, 南京 210029)

(4: 江苏省洪泽湖水利工程管理处, 淮安 223199)

摘 要: 大型过水性湖泊——洪泽湖是南水北调东线工程重要的调蓄湖泊, 在气候调节、防洪抗旱、旅游休闲、水资源和水产品供应等方面都有着重要的作用. 为了解其浮游植物群落结构和水质健康状态, 于 2015 年 8 月—2016 年 7 月, 对洪泽湖浮游植物进行了逐月野外采样. 共鉴定浮游植物 147 种, 隶属于 8 门, 其中绿藻门、硅藻门、蓝藻门物种最多. 浮游植物细胞丰度全湖年平均值为 $5.35 \times 10^7 \pm 4.67 \times 10^7$ cells/L, 生物量平均值为 14.24 ± 8.52 mg/L. 洪泽湖浮游植物分布存在明显的时空差异, 空间格局上, 北部成子湖区浮游植物细胞丰度最高, 绿藻门为优势门类; 西部溧河洼湖区丰度次高, 蓝藻门为优势门类; 湖心区及南部丰度较低, 大部分点位蓝藻门或绿藻门为优势门类. 季节动态上, 夏季浮游植物细胞丰度高, 蓝藻门是主要的优势门类; 冬季细胞丰度较低, 硅藻门是主要的优势门类. 与 1980s 的调查相比, 近年来浮游植物种(属)数有所下降, 丰富度、均匀度等也低于早期调查结果. 利用浮游植物进行水质生物评价的结果显示, 洪泽湖总体上处于 β -中污带, 与周边水体相比, 洪泽湖富营养化水平低于骆马湖, 但高于淮河、高邮湖.

关键词: 洪泽湖; 浮游植物; 群落结构; 水质生物评价

Community structure of phytoplankton and bioassessment of water quality in a large water-carrying lake, Lake Hongze

WU Tianhao^{1,2}, LIU Jingsong³, DENG Jianming¹, DAI Xiaolin³, TANG Ronggui⁴, PENG Kai^{1,2}, ZOU Wei^{1,2}, CAI Yongjiu¹ & GONG Zhijun^{1**}

(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: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(3: Jiangsu Water Conservancy Bureau, Nanjing 210029, P.R.China)

(4: Administrative Agency for Water Conservancy Projects of Lake Hongze, Huai'an 223199, P.R.China)

Abstract: Lake Hongze is an important storage lake for the Eastern route of the South-to-North Water Diversion Project. It plays an important role in climate regulation, flood control and drought protection, tourism and recreation, supply of water resources and aquatic products. In order to understand its phytoplankton community structure and aquatic health status, this study conducted monthly field survey for phytoplankton in Lake Hongze from August 2015 to July 2016. A total of 147 phytoplankton species were identified, belonging to 8 phyla, of which Chlorophyta, Diatomophyta, Cyanophyta were the most abundant. The annual average abundance of phytoplankton was $5.35 \times 10^7 \pm 4.67 \times 10^7$ cells/L, and the average biomass was 14.24 ± 8.52 mg/L. There was obvious spatial and temporal difference in the distribution of phytoplankton in Lake Hongze. In terms of spatial pattern, phytoplankton in Lake Chengzihu had the highest cell abundance, dominated by Chlorophyta; the Lihewa Lake had the second highest abundance and dominated by the Cyanophyta; the centre and south lake region had low phytoplankton abundance, and Chlorophyta or Cyanophyta was dominant in the most sites. In terms of seasonal pattern, phytoplankton were abundant in summer with Cyanophyta domi-

* 国家自然科学基金项目(41671110, 31270505)和江苏省水利科技项目(2018039)联合资助. 2018-05-08 收稿; 2018-07-03 收修改稿. 吴天浩(1994~), 男, 硕士研究生; E-mail: 1509378322@qq.com.

** 通信作者; E-mail: zjgong@niglas.ac.cn.

nant. In winter, phytoplankton abundance was low and diatoms were dominant. Compared with the survey in the 1980s, the number of phytoplankton species (genera) had declined in recent years, and the richness, evenness, etc. had also been lower than those of earlier investigations. The results of bioassessment of phytoplankton showed that Lake Hongze was suffered β -mesosaprobic zone pollution, and its eutrophication level was lower than that of Lake Luoma, but higher than Huaihe River and Lake Gaoyou.

Keywords: Lake Hongze; phytoplankton; community structure; bioassessment of water quality

洪泽湖是淮河流域重要的大型水库和航运枢纽,在气候调节、防洪抗旱、旅游休闲以及渔业资源和生产生活供水等方面都有着重要的作用^[1-2]. 然而随着社会经济的发展,洪泽湖上游淮河来水水质欠佳、圈圩和围网养殖面积不断扩大、湖泊周边城镇快速扩张以及农田生产活动不断加强造成点源面源污染日益严重,湖水水质面临着日益严峻的威胁. 近年来,尤其是南水北调工程实施以来,洪泽湖作为南水北调东线工程重要的调蓄湖泊,其水体健康情况更受到社会的广泛关注.

近年来,我国研究者对洪泽湖进行了大量的研究,对湖泊的多项生态及环境数据进行了充分的调研和分析,如葛绪广等^[3]研究显示,洪泽湖水质为V类,已到达富营养化;叶春等^[4]使用综合营养指数判定洪泽湖处于轻度富营养化状态;舒卫先等^[5]研究发现洪泽湖水质处于富营养化状态. 综合各结果发现洪泽湖目前处于中度富营养化的状态. 不过此类研究多着眼于水化学指标的年际变化,通过与周边宏观环境变化的拟合得出结论,并提出指导性的方针意见^[2]. 而对湖泊健康重要的指示生物—浮游植物的群落结构和时空规律年度周期变化进行调查,并且进行水质生物评价的研究较少,有限的研究也多是基于单次或季节的采样,对于洪泽湖这样一个高异质性的浅水富营养湖泊而言,这样的研究是无法全面揭示浮游植物时空规律的.

浮游植物是水生态系统中的重要初级生产者,在水生植物受到严重破坏的水体中,浮游植物甚至成为唯一的生产者,是水体物质循环和能量流动的源头. 浮游植物的群落结构、丰度、生物量等特征值的变化,强烈的受水质影响^[6]. 根据欧盟水框架的建议,对地表水的评价在达到化学标准的同时,也应该注重生态标准,即使用生物群落数据对水质进行评价. 浮游植物由于其生长周期较短,能快速响应周边环境变化,因此往往被用来指示水质环境的变化,国内外已有大量研究者利用浮游植物对水体进行水质生物评价^[6-8].

鉴于以上原由,本研究通过2015年8月—2016年7月的浮游植物周年的野外调查数据研究,旨在揭示洪泽湖水生态环境的月际变化的情况,利用水质生物评价方法评判湖泊健康状况,同时与早期研究结果进行对比,分析洪泽湖水生态系统近年来的变化趋势,为洪泽湖的环境保护提供详实的资料.

1 研究区域和方法

1.1 研究区域

洪泽湖(33°06'~33°40'N,118°10'~118°52'E)是中国第四大淡水湖(面积约1576.9 km²),位于淮河南游末端,地处淮安、宿迁两市境内,跨洪泽、泗阳、泗洪和盱眙四县. 洪泽湖长65.0 km,最大宽55.0 km,平均宽24.26 km,最大水深4.37 m,平均水深1.77 m,蓄水量27.9×10⁸ m³^[9]. 洪泽湖属于过水性湖泊,换水周期较快,约35 d. 其周边河网密布,上游进入洪泽湖的主要河流分布于湖泊西侧,有淮河、濉河、濉河、安河和维桥河等,其中流入水量以淮河最大. 下游的出湖水道主要分布在湖泊东侧,有入江水道、苏北灌溉总渠、淮沭新河和淮河入海水道等. 出入湖泊的水流在湖泊南侧蒋坝区域形成流速较快的过水通道^[4].

1.2 研究方法

洪泽湖湖区之间差异较为显著,大致可将湖泊分为3部分:北部成子湖区、中南部湖心及过水通道区和西部溧河洼湖区^[5]. 成子湖区出入湖河流较少,水体流动性差,但水草分布较广泛;西部溧河洼湖区为设立的湿地保护区,此湖区水深较浅,有利于水生植物的生长,因此水草密布,但是也有大量围网分布;中南部的湖心及过水通道区西承淮河等河流流入,东由入江水道等河流排出,水体流动性好,水流速较快,水生植物难以生长,同时该处水质受淮河水质的影响较大. 根据3个湖区的情况,考虑水质、养殖围网、出入湖河流的情况,在洪泽湖较为典型的地点设置10个采样点(图1),调查时间为2015年8月—2016年7月间每月初.

浮游植物采样时,在每个采样点使用2 L有机玻璃采水器分别取表层、中层以及下层水水样各2 L,充分

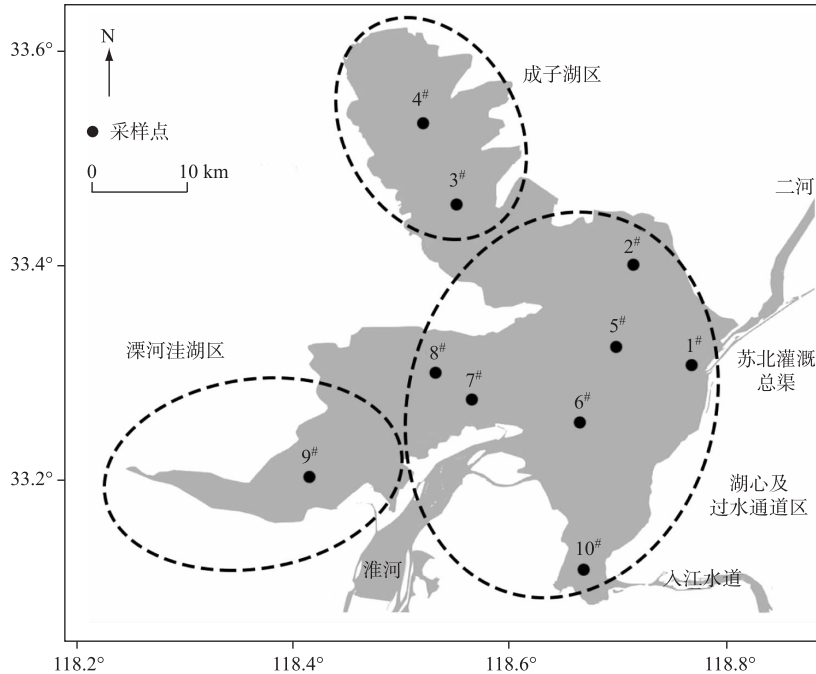


图1 洪泽湖采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Lake Hongze

混合后取部分混合水样定容至 1000 ml, 现场加入 10~15 ml 鲁格试剂固定浮游植物. 带回实验室静置沉淀 48 h 后用虹吸管小心的吸取上清液, 将样品浓缩至约 30 ml. 镜检时取浓缩后的样品 0.1 ml 在体式显微镜 ($\times 400$ 倍) 下进行种类鉴定和计数, 随机计数 100~200 个视野, 使细胞总数在 300 以上. 藻类生物量 (湿重) 通过体积换算间接获得^[10].

水温、电导率、总溶解性固体 (TDS)、盐度、浊度、溶解氧 (DO)、pH 等基础数据由 YSI 水质分析仪原位现场测定. 透明度 (SD) 使用塞氏盘现场测定. 总氮 (TN) 浓度使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, 总磷 (TP) 浓度使用钼酸铵分光光度法测定, 氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$) 浓度使用纳氏试剂比色法测定, 高锰酸盐指数 (COD_{Mn}) 采用高锰酸盐滴定法测定, 叶绿素 a (Chl.a) 浓度采用热乙醇萃取分光光度法测定^[11].

综合营养状态指数计算公式为:

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

式中, $TLI(\Sigma)$ 为综合营养状态指数, 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^[11]. 本次营养状态参数包括 Chl.a、TP、TN、SD 和 COD_{Mn} , 权重分别为 0.266、0.188、0.179、0.266 和 0.183.

Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 计算公式为: $H' = -\sum_{i=1}^S P_i \cdot \log_2 P_i$, 其中 S 为样品中的种类总数, P_i 为第 i 种的个体数与总个体数的比值^[6]. Pielou 均匀度指数计算公式为: $J = H' / \log_2 S$ ^[14]. Margalef 丰富度指数计算公式为 $D = (S-1) / \ln N$, 其中 N 为采集样品中所有物种的总个数^[7]. 3 个指数的评价标准见表 1.

浮游植物的优势种通过优势度来判断, 计算公式为 $Y = (n_i / N) f_i$, 其中 n_i 为第 i 种的总个数, f_i 为第 i 种在各样点出现的频率^[12].

表 1 Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数和 Margalef 指数的评价标准
Tab.1 Evaluation criteria of Shannon-Wiener index, Pielou index and Margalef index

Shannon-Wiener 指数	水质类型	Pielou 指数	水质类型	Margalef 丰富度指数	水质类型
>3	清洁-寡污型	0.8~1.0	清洁型	0~1	重污染型
1~3	β -中污型	0.5~0.8	清洁-寡污型	1~2	中度污染
0~1	α -中污型	0.3~0.5	β -中污型	2~3	轻度污染
		0~0.3	α -中污型	>3	清洁型

2 结果分析

2.1 洪泽湖水质指标状况

从水质理化指标方面看,叶绿素 a 浓度随季节变化极大,而其他指标与季节的相关性较小,全年透明度均值约为 21.12 cm, TN 浓度均值约为 1.97 mg/L, TP 浓度均值约为 0.12 mg/L, COD_{Mn} 均值约为 5.10 mg/L, 而叶绿素 a 浓度均值约为 11.97 μ g/L. 利用水质数据计算 TLI 指数,发现其存在月度波动,但幅度不大,全年均值约为 58.07,属轻度富营养化(图 2).

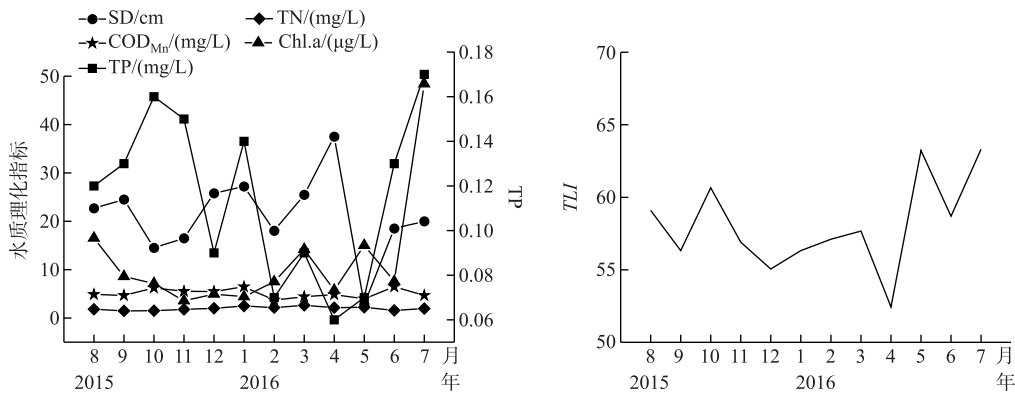


图 2 洪泽湖水质指标情况
Fig.2 Water quality indicators in Lake Hongze

2.2 浮游植物群落结构

2.2.1 浮游植物种类 本次调查总共鉴定到浮游植物包括蓝藻门、绿藻门、硅藻门、隐藻门、裸藻门、金藻门、甲藻门和黄藻门的共 8 门 70 属 147 种. 其中绿藻门 27 属,硅藻门 18 属,蓝藻门 12 属,裸藻门 5 属,甲藻门 4 属,隐藻门 2 属,黄藻门和金藻门各 1 属. 因此,从种类数上来看,绿藻门、硅藻门和蓝藻门是洪泽湖浮游植物组成的主要门类.

从细胞丰度来看,本次调查鉴定中优势度较大($Y \geq 0.02$)的属主要属于蓝藻门和绿藻门,主要种属及其优势度(括号内为优势度)为蓝藻门的颤藻属(*Oscillatoria*, 0.035)、微囊藻属(*Microcystis*, 0.045),绿藻门的丝藻属(*Ulothrix*, 0.093)、纤维藻属(*Ankistrodesmus*, 0.033)、栅藻属(*Scenedesmus*, 0.035)以及隐藻门的隐藻属(*Cryptomonas*, 0.020).

而从生物量来看,优势度较大的属为硅藻门的小环藻属(*Cyclotella*, 0.032)、直链藻属(*Melosira*, 0.021),裸藻门的裸藻属(*Euglena*, 0.02),隐藻门的优势属为隐藻属(0.081),绿藻门的优势属为栅藻属(0.078)、四角藻属(*Tetraedron*, 0.048)、丝藻属(0.036).

2.2.2 浮游植物细胞丰度和生物量空间分布 总体而言,浮游植物的丰度在北部的成子湖区最高,西部的溧河洼湖区也相对较高,而在湖心区及南部蒋坝过水通道处相对较低(图 3a). 其中 4[#]点浮游植物细胞丰度最大,达到约 1.4×10^7 cells/L,丰度最低的点位为 7[#]点,细胞丰度约为 1.2×10^6 cells/L,平均值为 $5.35 \times 10^7 \pm 4.67 \times 10^7$

cells/L. 从群落结构而言,靠近北部成子湖区的1[#]~4[#]点绿藻细胞丰度都占优势,大于50%,蓝藻次之;西部溧河洼湖区、湖心区以及南部过水通道区的点大都是蓝藻占优势,绿藻次之,其余藻类丰度较低;其中湖心区的6[#]点较为特殊,隐藻丰度较高,蓝藻、硅藻和绿藻次之,占比较为均匀. 总之,从细胞丰度而言,蓝藻门、绿藻门为洪泽湖的优势门类.

洪泽湖浮游植物的生物量分布与丰度分布较为相似,北部、西部湖湾区较高,而湖心区较低(图3b). 最高值出现在9[#]点(为3.52 mg/L),最低值出现在7[#]点(为0.19 mg/L),平均值为14.24 mg/L. 大部分点位都是绿藻的生物量占主导,硅藻次之. 9[#]、10[#]点绿藻和硅藻占比相近,裸藻和隐藻其次;湖心区的6[#]点较为特殊,为隐藻占主导,硅藻、绿藻次之. 蓝藻由于单体生物量较低,虽然其丰度较高,但是总生物量较低.

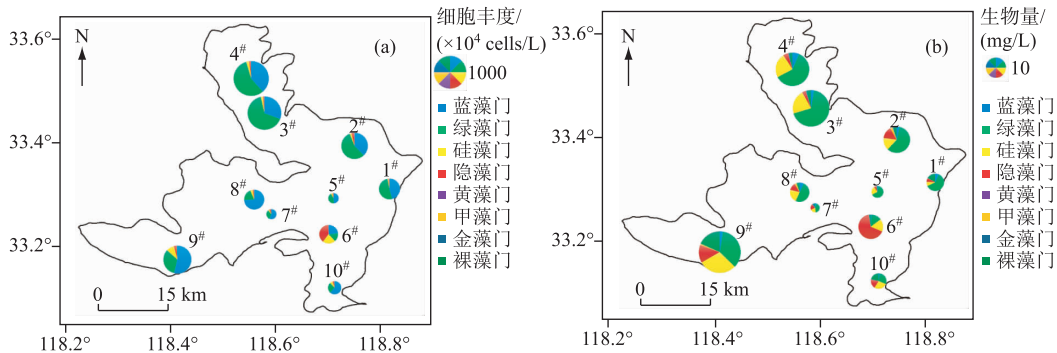


图3 洪泽湖浮游植物丰度(a)和生物量(b)空间分布

Fig.3 Spatial distribution of phytoplankton abundance(a) and biomass(b) in Lake Hongze

2.2.3 浮游植物细胞丰度和生物量时间分布 全年的浮游植物细胞丰度及生物量分布均呈现双峰分布,峰值分别出现在秋季(2015年9月)及夏季(2016年6月)(图4). 2015年9月细胞丰度的峰值主要由蓝藻门贡献,之后蓝藻门丰度及其他藻类丰度逐渐降低. 从2016年2月开始绿藻门细胞丰度逐渐增加并成为优势门类直到当年6月. 而蓝藻门的快速增长则开始的较晚,从5月开始剧烈上升,至7月超越绿藻门成为丰度最高的优势门类. 从各门类细胞丰度所占比例来看,7—11月蓝藻门为优势门类,约占50%~60%;1—6月则绿藻门为优势门类,占比均高于60%,5月甚至高达87%;硅藻门在12月—次年1月也占约20%的比例.

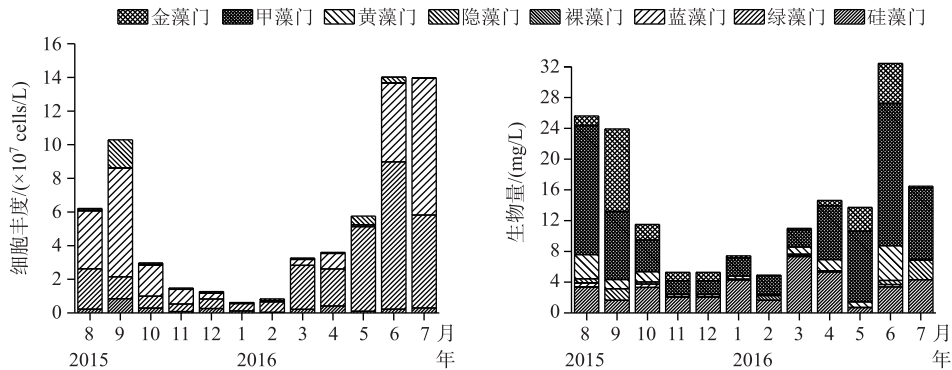


图4 洪泽湖浮游植物丰度和生物量分布及占比情况

Fig.4 Distribution and proportion of phytoplankton abundance and biomass in Lake Hongze

藻类生物量变化与丰度变化类似. 2015年8月的生物量峰值主要由绿藻门贡献. 9月藻类生物量与8月基本持平,但是主要由隐藻门和绿藻门共同贡献. 9月之后各种藻类的生物量都逐渐降低,至2016年3月硅藻门生物量开始增加,成为优势门类. 此时绿藻门也开始逐步增长,4月超过硅藻门成为优势门类,直至6

月达到峰值. 从各藻类生物量所占比例来看,大部分月份中都是绿藻门占优势,占比约 50%~70%. 此外,2015 年 12 一次年 4 月硅藻门所占比例也较高,约为 30%~70%. 而隐藻门在 2015 年 9 月占比较高,占比约 40%.

2.3 洪泽湖水水质生物学评价

使用浮游植物群落的 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数以及 Margalef 丰富度指数对洪泽湖进行水质生物评价(表 1)发现,洪泽湖目前处于寡污型向 β -中污型过渡的状态,但是不同时间,不同点位仍有较大差异(图 5)^[14]. 其中 Shannon-Wiener 多样性指数全年大多介于 1~3 之间,属于 β -中污型水质;Margalef 丰富度指数差异较大,但是大多介于 0.5~1 之间,部分介于 2~3 之间,表明洪泽湖处于中度污染型至重污染型的过渡状态;而 Pielou 均匀度指数大多介于 0.5~0.8 之间,部分介于 0.25~0.5 之间,少部分高于 0.8,说明洪泽湖处于寡污型至 β -中污型的过渡状态.

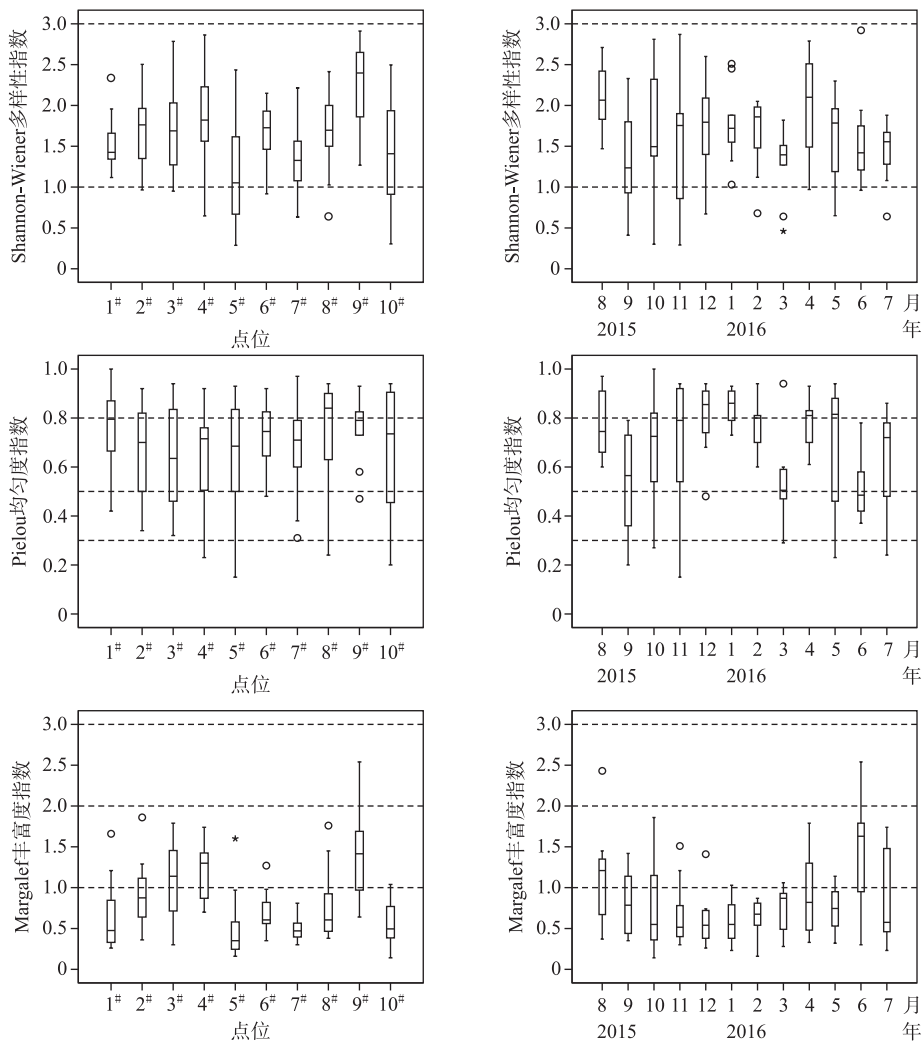


图 5 洪泽湖浮游植物 3 种多样性指数分布

Fig.5 Three kinds of indexes distribution of phytoplankton in Lake Hongze

从点位来看,成子湖区的点位,以及湖西溧河洼湖区的点位多样性指数较高,最高值出现在 9# 点,该点多样性指数和丰富度指数均为最高,且均匀度指数也较高,总体而言浮游植物群落较为复杂且较为均匀,以

水质生物学评价该点的水质,大致属于 β -中污型水体,接近寡污型水体. 而位于湖心区的点位多样性指数则较低,最低值出现在 5[#]点,该点多样性指数及丰富度指数均为最低,且均匀度也相当低,表明该点浮游植物群落简单,且优势种明显,水质生物评价表明该点为 α -中污型水体.

从不同时间来看,夏季丰富度指数较高,在 2015 年 8 月达到 1 个高值,而均匀度较低. 秋季多样性指数逐渐上升,而丰富度指数开始下降,且在 2015 年 11 月达到 1 个低值,均匀度指数则逐渐上升. 冬季多样性指数约等于年平均,丰富度指数始终保持较低水平,均匀度进一步升高. 春季多样性指数较高,2016 年 4 月出现了第 2 个丰富度指数的高值,均匀度指数约为年平均且有所增长,丰富度指数则基本保持不变.

3 讨论

3.1 洪泽湖浮游植物群落演变

据《中国湖泊志》记载,1980s 左右,洪泽湖检出浮游植物 8 门 141 属 165 种,优势属主要有微胞藻、色球藻、颤藻、丝藻、双胞藻、小球藻、裸甲藻、直链藻等^[9]. 1980s 调查中的优势门类仅为蓝藻,约占细胞丰度的 46%. 韩爱民等^[15]的研究共检出 105 种浮游植物,优势门类为硅藻及绿藻,优势种的细胞丰度约为 21.7%. 据王兆群等^[18]的研究结果,浮游植物中蓝藻占年浮游植物细胞丰度的比例为 85.7%,2005—2007 年藻类数量基本稳定,而 2008—2009 年藻类丰度显著上升. 据舒卫先等^[5]2011 年的调查结果,共发现 7 门 60 属 144 种,浮游植物种类略低于本次调查结果,其中绿藻门种类最多,达 66 种,占全部浮游藻类种类的 50.4%,弱细颤藻 (*Oscillatoria tenuis*)、不定微囊藻 (*Microcystis incerta*) 和水华微囊藻 (*Microcystis flos-aquae*) 为全湖优势物种. 本研究中浮游植物群落的丰富度基本不变,但均匀度已经有了相当程度的改善,说明其群落结构在不断向好发展,这一点从洪泽湖水质数据历史变化中同样可以得到印证. 早期洪泽湖水质较好,之后随着上游来水水质降低,湖泊流域内工农业生产的快速发展,以及采砂、围网养殖等生产活动的开展,其水质逐渐恶化^[3],TN 浓度从早期的 1.39 mg/L 升高至 2.40 mg/L,TP 浓度为 0.10~0.20 mg/L^[4,5,9]. 近些年来随着对采砂的大力禁止,对周边污染源的有效控制,洪泽湖水质不断改善,从本次研究得到的数据来看,水质指标明显优于 1990s,TN 和 TP 浓度分别降为 1.97 和 0.12 mg/L,DO 浓度也由早期的 7.06 mg/L 升高至约 8.00~10.40 mg/L,浮游植物群落结构不断向好发展^[9,16-17].

3.2 洪泽湖水质生物学评价

洪泽湖水质大体处于 β -中污带状态,从空间格局来看,位于西部湖湾的 9[#]点与北部成子湖区的 2[#]、3[#]和 4[#]点情况较为相似,浮游植物的多样性和丰富度指数较高,均匀度略高于均值. 这可能是由于该湖区水草较多、水流速度较慢,外源输入较少,因此水质较好. 1[#]点与 5[#]~8[#]及 10[#]点情况较为相似,多样性指数一般,丰富度指数较低,均匀度指数较低. 1[#]点位于苏北灌溉总渠河口,5[#]~8[#]点位于淮河河口及湖心区,10[#]点位于三河闸河口,这几个点位同属于洪泽湖的南部过水通道,换水周期快,水流速度较快^[4],水生植被由于水流湍急,生长情况一般,仅在沿岸区域少量分布. 同时,该区域受淮河来水影响较大,作为洪泽湖最重要的入湖河流,淮河的水质较差,因此给洪泽湖湖心区、过水通道区带来大量的营养盐及有机物外源输入,对湖区水质产生了剧烈的影响^[19].

从时间来看,多样性指数变化规律不明显,大致上为春、夏季较高,秋、冬季较低. 而丰富度指数则有较为明确的变化趋势,秋、冬季较低,进入春季之后逐渐上升,6—8 月达到高峰,之后下降. 这一趋势与温度变化相一致,主要原因是浮游植物的生长主要受温度调控^[20]. 均匀度指数则是夏、秋季较低,冬、春季较高,主要原因是经过春季的繁殖,夏秋两季蓝藻、绿藻等优势物种数量急剧升高,超过其他物种,造成了均匀度较低. 而秋季之后温度降低,蓝藻、绿藻数量大大下降,与其他物种的数量差距变小,造成冬、春季两季均匀度指数较高.

将洪泽湖的浮游植物群落结构与临近水体相比发现,与北部的骆马湖 ($H' = 1.03$, $J = 0.63$) 相比,洪泽湖的多样性指数 ($H' = 1.634$) 以及均匀度 ($J = 0.690$) 都更高^[21],其多样性指数也高于南部的太湖蠡湖 ($H' = 1.58$)^[22]. 与流入洪泽湖的淮河安徽段 ($H' = 1.85 \sim 2.56$, $J = 0.61 \sim 0.79$) 相比,洪泽湖的浮游植物多样性低于淮河,而均匀度与淮河相当. 洪泽湖的 6[#]点位于淮河入湖口,其浮游植物群落结构与淮河安徽段相似度较高,周边的 5[#]、7[#]等点位也与之表现出较高的相似性,说明淮河来水对洪泽湖的湖心区及南部过水通道影响

较大^[23]. 而洪泽湖下游的高邮湖($H' > 3$, $J > 0.7$), 其多样性及均匀性都高于洪泽湖, 可能源于高邮湖具有较大的水生植物覆盖率, 其水质状况也好于洪泽湖^[24].

洪泽湖水质生物评价结果优于周边湖泊可能的原因是由于洪泽湖换水周期较快, 藻类难以聚集. 同时洪泽湖长期存在非法采砂行为, 导致水体较为浑浊、透明度较低^[25], 微囊藻等有害藻类的大规模繁殖受到抑制^[26], 这可能导致洪泽湖虽处于如太湖中度富营养化的背景之下, 水质生物学评价结果却偏乐观. 因此, 不能由于洪泽湖的水质生物评价结果较好就放松警惕, 而应当继续严格控制外源污染的进入, 尤其是换水相对较慢的成子湖区、溧河洼湖区应当格外重视监测, 控制污染输入, 防范蓝藻水华的暴发.

致谢: 感谢江苏省洪泽湖水利工程管理处野外采样中的帮助.

4 参考文献

- [1] Fan YM, He HC, Cui YX *et al.* Study on dynamic changes of Hongze Lake in the middle and lower reaches of the Huaihe River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **12**: 67-73. [范亚民, 何华春, 崔云霞等. 淮河中下游洪泽湖水域动态变化研究. 长江流域资源与环境, 2010, **12**: 67-73.]
- [2] Ge XG, Wang GX. Research on ecological environment investigation and improvement countermeasures of Hongze Lake. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, **18**: 5537-5539. [葛绪广, 王国祥. 洪泽湖生态环境调查与改善对策研究. 安徽农业科学, 2007, **18**: 5537-5539.]
- [3] Ge XG, Wang GX. Eco-environment problems and causes of Hongze Lake. *Yangtze River*, 2008, (1): 28-30. [葛绪广, 王国祥. 洪泽湖面临的生态环境问题及其成因. 人民长江, 2008, (1): 28-30.]
- [4] Ye C, Li CH, Wang B *et al.* Discussion on construction scheme of Hongze Lake healthy water ecosystem. *J Lake Sci*, 2011, **23**(5): 725-730. DOI: 10.18307/2011.0509. [叶春, 李春华, 王博等. 洪泽湖健康水生态系统构建方案探讨. 湖泊科学, 2011, **23**(5): 725-730.]
- [5] Shu WX, Zhang YS, Wei CZ *et al.* The dynamics and influencing factors of planktonic algae changes in Hongze Lake. *Water Resources Protection*, 2016, **5**: 115-122. [舒卫先, 张云舒, 韦翠珍等. 洪泽湖浮游藻类变化动态及影响因素. 水资源保护, 2016, **5**: 115-122.]
- [6] Spatharis S, Roelke D, Dimitrakopoulos P *et al.* Analyzing the (mis) behavior of Shannon index in eutrophication studies using field and simulated phytoplankton assemblages. *Ecological Indicators*, 2011, **11**(2): 697-703. DOI: 10.1016/j.ecolind.2010.09.009.
- [7] Gao SR, Pan LJ, Sun FY *et al.* Evaluation of environmental water pollution and eutrophication by aquatic organisms. *Environment Science and Management*, 2006, (6): 174-176. [高世荣, 潘力军, 孙凤英等. 用水生生物评价环境水体的污染和富营养化. 环境科学与管理, 2006, (6): 174-176.]
- [8] Camp J, Flo E, Vila M *et al.* Pros and cons of biological quality element phytoplankton as a water-quality indicator in the NW Mediterranean Sea. *Springer International Publishing*, 2015, **43**: 135-160. DOI: 10.1007/978_2015_392.
- [9] Wang SM, Dou HS eds. *Lakes in China*. Beijing: Science Press, 1998: 268-271. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998, 268-271.]
- [10] Zhang ZS, Huang XF eds. *Research methods of freshwater plankton*. Beijing: Science Press, 1991. [章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.]
- [11] Editorial board of "Monitoring and Analysis Method of Water and Wastewater", Ministry of Environmental Protection of China ed. *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: 环境科学出版社, 2002.]
- [12] Liu JD, Gu ZM, Yang YJ *et al.* Phytoplankton community structure and water quality evaluation in Changchun Reservoir. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(11): 2865-2871. [刘金殿, 顾志敏, 杨元杰等. 长沼水库浮游植物群落结构及水质评价. 生态学杂志, 2012, **31**(11): 2865-2871.]
- [13] Wang MC, Liu XQ, Zhang JH. Lake eutrophication evaluation method and grading standard. *Environmental Monitoring in 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.]
- [14] Gao Y, Ci HX, Qi SC *et al.* Seasonal dynamics and water quality assessment of phytoplankton diversity in four tributaries

- of the Yi River. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(2): 176-180. [高远, 慈海鑫, 亓树财等. 沂河4条支流浮游植物多样性季节动态与水质评价. 环境科学研究, 2009, **22**(2): 176-180.]
- [15] Han AM, Yang GL, Zhang SH *et al.* Investigation and evaluation of eutrophication and ecological status in Hongze Lake. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2002, (6): 18-20. [韩爱民, 杨广利, 张书海等. 洪泽湖富营养化和生态状况调查与评价. 环境监测管理与技术, 2002, (6): 18-20.]
- [16] China Environmental Monitoring Station. National surface water quality report. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2016. [中国环境监测总站. 全国地表水水质月报. 中华人民共和国生态环境部, 2016.]
- [17] Fang PZ, Cao JY. Analysis on ecological system evolution of hongze lake and diagnosis of ecological safety problems. *Pearl River*, 2018, **39**(3): 16-21. [方佩珍, 晁建颖. 洪泽湖生态系统演变趋势分析及生态安全问题诊断. 人民珠江, 2018, **39**(3): 16-21.]
- [18] Wang ZQ, Zhang NH, Zhang Y *et al.* Evaluation of water eutrophication in Hongze Lake. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2010, (6): 33-37. [王兆群, 张宁红, 张咏等. 洪泽湖水质富营养化评价. 环境监控与预警, 2010, (6): 33-37.]
- [19] Zhu WJ, Pang WT, You QM *et al.* Phytoplankton community structure and its water quality assessment in Huaihe River Basin in spring. *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.]
- [20] Eppley RW. Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fishery Bulletin- National Oceanic and Atmospheric Administration*, 1972, **70**(4): 1063-1085.
- [21] Zhai TE, Zhang JT, Hua F *et al.* Distribution characteristics of dissolved organic nitrogen in the sediments of the eastern plain lake area. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, (9): 5001-5008. [翟天恩, 张靖天, 华飞等. 东部平原湖区沉积物中溶解性有机氮分布特征. 环境工程学报, 2016, (9): 5001-5008.]
- [22] Meng SL, Chen JC, Hu GD *et al.* Phytoplankton community characteristics and assessment of water quality in Lake Lihu of Taihu Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(1): 30-35. [孟顺龙, 陈家长, 胡庚东等. 太湖蠡湖浮游植物群落特征及其对水质的评价. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(1): 30-35.]
- [23] Zhao XX, Hou GJ, Li J *et al.* Characteristics of phytoplankton community structure in Anhui section of the mainstream of the Huaihe River in 2015. *Wetland Science*, 2017, (4): 497-504. [赵秀侠, 侯冠军, 李静等. 2015年淮河干流安徽段浮游植物群落结构特征. 湿地科学, 2017, (4): 497-504.]
- [24] Xia T, Chen J, Long J *et al.* Analysis of eutrophication characteristics of lake groups in Gaobao lake district of Jiangsu Province. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2016, (4): 40-45. [夏霆, 陈静, 龙健等. 江苏省高宝湖区湖泊群富营养化特征分析. 环境监控与预警, 2016, (4): 40-45.]
- [25] Zou W, Li TM, Li L *et al.* Macrozoobenthos community structure and water quality assessment in Luoma Lake, northern Jiangsu Province. *J Lake Sci*, 2017, **29**(5): 1177-1187. DOI: 10.18307/2017.0515. [邹伟, 李太民, 刘利等. 苏北骆马湖大型底栖动物群落结构及水质评价. 湖泊科学, 2017, **29**(5): 1177-1187.]
- [26] Wu Z, Cai Y, Liu X *et al.* Temporal and spatial variability of phytoplankton in Lake Poyang: The largest freshwater lake in China. *Journal of Great Lakes Research*, 2013, **39**(3): 476-483. DOI: 10.1016/j.jglr.2013.06.008.