

## 洪湖浮游植物群落结构及其与环境因子的关系\*

邓建明<sup>1,2</sup>, 蔡永久<sup>1,2</sup>, 陈宇炜<sup>1\*\*</sup>, 张 路<sup>1</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 为研究洪湖浮游植物群落结构及其与环境因子的关系, 于2008年3月(枯水期)及7月(丰水期)在洪湖进行采样分析。两次采样共鉴定有浮游植物6门46属95种, 细胞丰度变化范围为 $2.00 \times 10^5 - 284 \times 10^5$  cells/L。硅藻为两个季节绝对优势门类, 其次为绿藻及蓝藻; 主要种属为直链藻、脆杆藻、栅藻等。丰水期与枯水期浮游植物群落结构季节差异较大; 在枯水期由于硅藻对水温 and 光照较好的适应能力使其处于优势门类; 丰水期由于其他藻类对营养盐的竞争及水体中硅含量充足使得绿藻等生长同时硅藻能继续保持优势地位。主成分分析表明在洪湖富营养化水平及水体中离子类型、水体中物质组成和污染程度是影响浮游植物生长的三类主要因素; 典范对应分析结果表明浮游植物群落结构与水温、溶解氧及悬浮物浓度相关。

**关键词:** 洪湖; 浮游植物; 群落结构; 主成分分析; 典范对应分析

## Structure of phytoplankton community and its relationship with environment factors in Lake Honghu

DENG Jianming<sup>1,2</sup>, CAI Yongjiu<sup>1,2</sup>, CHEN Yuwei<sup>1</sup> & ZHANG Lu<sup>1</sup>

(1: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

(2: *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

**Abstract:** Sampling was carried out in March and July 2008 in order to study the structure of phytoplankton community and its relationship with environment factors in different seasons in Lake Honghu. Total 6 phylum, 46 genera and 95 species of phytoplankton were identified. The phytoplankton abundance ranged from  $2.00 \times 10^5$  to  $284 \times 10^5$  cells/L. Bacillariophyta was the most abundance phylum, following as Chlorophyta and Cyanophyta. *Fragilaria*, *Scenedesmus* and *Melosira* were the dominant genera. Of algae community structure was different between dry seasons and wet seasons. Due to adaptability of low water temperature and light intensity in dry seasons, diatoms were predominant phylum. Diatoms were also predominant phylum in wet seasons due to abundant Si in water. Principal Components Analysis (PCA) indicated that the kinds of ions and pollutants in the water body were the most important environment factors in the lake. Canonical Correspondence Analysis (CCA) illuminated water temperature, dissolve oxygen and suspended solids could be the main forces structuring the phytoplankton community in the Lake Honghu.

**Keywords:** Lake Honghu; phytoplankton; community structure; Principal Components Analysis (PCA); Canonical Correspondence Analysis (CCA)

洪湖是浅水草型湖泊, 是湖北省最大、我国第七大淡水湖, 担负着长江中游江汉平原地区的供水、蓄洪排涝、污染自净、农渔业生产等重任, 同时也是候鸟的重要越冬栖息地、航运和旅游的载体<sup>[1,2]</sup>。作为浅水湖和湖滩湿地, 洪湖在东部平原湿地中具有较强的代表性和典型性, 拥有较为丰富的物种多样性, 并有一批国家一级保护动植物<sup>[3]</sup>。

\* 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2008CB418005)、国家自然科学基金项目(30670405)和中国湖泊水质、水量和生物资源调查项目(2006FY110600)联合资助。2009-04-20 收稿; 2009-06-01 收修改稿。邓建明, 男, 1985年生, 硕士研究生; E-mail: qingvil207@126.com.

\*\* 通讯作者; E-mail: ywchen@niglas.ac.cn.

近十年来众多科研工作者对洪湖水生动植物等种类组成和数量<sup>[2,4]</sup>、水质以及生态环境演变等<sup>[5,6]</sup>进行了研究。同时,洪湖也受到人类较大的威胁,已经大大降低了其自然性,呈现出越来越强的脆弱性和退化特征,水利建设、过度养殖和大量施用化肥造成的面源污染,破坏了洪湖湿地的生态平衡和水质<sup>[7]</sup>。

浮游植物生物量和群落结构能很好的反映湖泊现状<sup>[8,9]</sup>。相对于其他水生植物而言,浮游植物由于其生长周期短,对环境变化敏感,所以其生物量及种群结构动态变化能很好地反映湖泊现状及变化,特别是营养水平的变化<sup>[10]</sup>;反之,环境条件的改变也直接或间接地影响到浮游植物的群落结构<sup>[11]</sup>。根据20世纪80年代初调查,洪湖有浮游植物92种,生物量为2.44mg/L<sup>[4]</sup>;近几年,有研究指出洪湖有浮游植物7门77属280种<sup>[11]</sup>。其中硅藻门是水环境中常见门类,硅藻(例如 *Fragilaria* sp.、*Stephanodiscus* sp.等)最适宜生长温度为21℃(绿藻门,例如 *Scenedesmus* sp.、*Coelastrum* sp.等最适宜生长温度为37℃)<sup>[12]</sup>,适宜生长的营养盐质量比为N:Si:P=7.5:15:1<sup>[13]</sup>;生活环境pH为中性或偏碱性(例如 *Melosira*)<sup>[14]</sup>。同时,通过计算硅藻群集指数(DAIpo)<sup>[15]</sup>或硅藻种类<sup>[14]</sup>能评价水质状况。

为了弥补对洪湖浮游植物群落结构研究的不足,我们于2008年3月10日及同年7月31日跟随“中国湖泊水质、水量和生物资源调查”项目(枯水期和丰水期)对洪湖进行采样研究,预计通过本次研究能了解洪湖浮游植物生物量及群落结构,并使用主成分分析、典范对应分析等统计学方法探寻影响群落结构的主要环境因子。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域简介和采样点设置

2500年前燕山运动形成盆地而演化为今天的洪湖<sup>[4]</sup>,它属于长江中游江汉湖群,处于四湖(长湖、三湖、白露湖、洪湖)流域下游;该湖位于北纬29°42′-29°58′、东经113°13′-113°29′,湖北省洪湖市西南部,跨洪湖、监利2个市;湖泊面积现为348.2km<sup>2</sup>,东西长23.4km,南北宽20.8km;多年最高水位为24.58-27.18m、最低水位22.87-23.92m、平均水位24.31m,一般年份洪湖水位变幅为24.0-26.5m,年水位变幅可达1-4m<sup>[5]</sup>,平均水深1.91m,蓄水量6.58×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup><sup>[16]</sup>;湖底自西向东略有倾斜,西浅东深<sup>[17]</sup>;大规模的水利建设,使洪湖由一个通江的吞吐湖泊变成了一个半封闭的水体<sup>[18]</sup>。洪湖地处北亚热带,受季风影响,气候湿热,年均气温16.6℃,无霜期264d,全湖冰冻现象罕见<sup>[19]</sup>;湖水为HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>Ca型<sup>[20]</sup>,以TP、TN、DIN作为评价指标,洪湖水体已属中营养湖泊<sup>[6]</sup>。根据文献资料,洪湖有各种植物472种21变种1变型种,隶属于116科、303属<sup>[2]</sup>。浮游动物169种,生物量0.559mg/L;底栖动物66种,总生物量约4.4×10<sup>5</sup>t;拥有鱼类54种<sup>[4]</sup>。

本文在湖面均匀布置8个采样点(图1)。枯水期采样时东部沿岸水草较少,透明度见底,菹草、竹叶眼子菜为主;南部湖水浑浊水草稀少,以菹草为主,养螃蟹、家鱼、泥鳅等;沿岸有莲藕区;5<sup>#</sup>以南水草密布,6<sup>#</sup>位于排水闸航道口附近,有野藕分布;由于6<sup>#</sup>点往西水很浅难以行船,所以枯水期共采6个点。丰水期采样时湖水清澈,共采8个点;1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>点为水草全覆盖,6<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>点水草丰富,3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>点未见水草,水草以苦草、金鱼藻、轮叶黑藻为主。

### 1.2 样品采集、处理与分析

现场用YSI 6600 V2型多参数水质监测仪(美国)测定表层(0.2-0.3m)及中下层(约1m)的pH、水温(WT)、电导率(SpCond)、溶解氧(DO)、矿化度(TDS)等水质指标;取50ml混合水样装入聚乙烯小瓶内,加入0.5ml鲁戈试剂固定,用于浮游植物分析。同时根据现场水草情况按照“无、零星分布、较多、全覆盖”描述当时水草分布情况。

水样采集后冷冻保存,带回实验室使用重量法测定悬浮物(SS)、微量流动注射分析系统(Skalar-SA1000)测定氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、可溶性正磷酸盐磷(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)、酸性高锰酸盐测定高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、碱性过硫酸钾测定总氮(TN)和总磷(TP);样品的采集、保存与测定详细步骤参考《水和废水监测分析方法》<sup>[21]</sup>。

浮游植物计数时从50ml浮游植物样品中取25ml样品放入25ml管状浮游生物沉淀器(Plankton Sediment Cylinders,奥地利Uwitec公司)静置24h,浓缩体积至3ml于圆形计数框内(Plankton Counting Chambers,奥地利Uwitec公司),用倒置显微镜(Zeiss Axiovert135)在512倍(20×1.6×16)下鉴定浮游植物种类<sup>[14]</sup>和

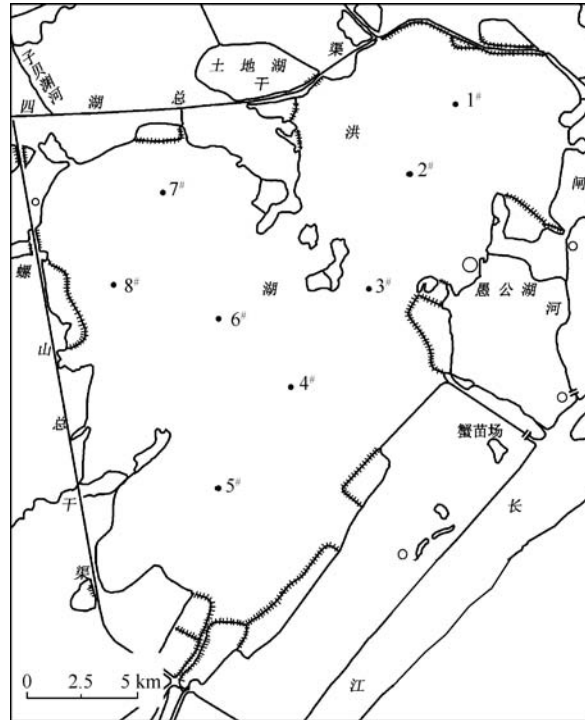


图1 洪湖采样点示意图

Fig. 1 Map of Lake Honghu showing the location of the sampling sites

计数<sup>[22]</sup>;计数方法为目镜行格法,一般随机计数两个垂直行格(行格大小 $0.49\text{mm} \times 25\text{mm}$ ),对于生物量较大而不便使用行格法的样品采取视野计数法,一般计数30-50个视野,使得细胞数在300以上.由于浮游植物的比重接近于1,故可以直接由浮游植物的体积换算为生物量(湿重),即生物量为浮游植物的数量乘以各自的平均体积,单位为 $\text{mg/L}$ ,单细胞的生物量主要根据浮游植物个体形状测量而得.本节实验主要参考《淡水浮游生物研究方法》<sup>[22]</sup>.

### 1.3 数据分析

运用生态研究中常用的 Margalef、Pielou、Simpson、Shannon-Wiener 等  $\alpha$  多样性指数描述群落内种类多样性<sup>[23]</sup>.

主成分分析(Principal Components Analysis, PCA),是将多个变量通过线性变换以选出较少个数重要变量的一种多元统计分析方法,它们彼此之间相互独立,又能综合反映原来多个指标(多因素)的大部分信息<sup>[24]</sup>. 选入分析的指标为所有现场和实验室测定指标,为使不同量纲数据可比,在计算过程由软件对数据进行标准化. 本文计算过程使用 SPSS 16.0 实现.

典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA),是基于对应分析发展而来的一种排序方法,将对应分析与多元回归分析相结合,每一步计算均与环境因子进行回归,又称多元直接梯度分析;目前在浅型湖泊浮游植物与浮游动物等生态研究中已经有广泛的使用<sup>[25-26]</sup>. CCA 分析包括两个矩阵:解释矩阵包含全部所测因子:pH、电导率(SpCond)、水温(WT)、溶解氧(DO)、矿化度(TDS)、总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、悬浮物(SS)、氨氮( $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ )、正磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ )、Si;环境因子由软件自动标准化,对于众多环境因子,通过软件自动选择若干个影响显著的因子进行分析. 物种数据矩阵为主要属的细胞丰度(cells/L),按照生物量贡献 $>1\%$ 或者在各个点出现频率 $>60\%$ 的条件入选生物矩阵<sup>[27-29]</sup>,为:鱼腥藻属(*Anabaena*)、隐藻属(*Cryptomonas*)、直链藻属(*Melosira*)、羽纹藻属(*Pinnularia*)、脆杆藻属(*Fragilaria*)、舟形藻属(*Navicula*)、异极藻属(*Gomphonema*)、桥弯藻属(*Cymbella*)、栅藻属(*Scenedesmus*)、盘星藻属(*Pedias-*

trum)、十字藻属(*Crucigenia*)、角星鼓藻属(*Staurastrum*)、鼓藻属(*Cosmarium*)等13属,在软件分析时进行 $\lg(x+1)$ 转换使数据更趋于正态分布. 本文计算过程采用Canoco 4.5软件实现.

本文各种统计学检验使用SPSS16.0完成、绘图使用SigmaPlot 9.0完成.

## 2 结果与分析

### 2.1 水质理化指标

枯水期和丰水期环境因子全湖平均值及标准差(表1)可知,洪湖pH值较高,湖水偏碱性(mean = 8.68, range 7.78 - 10.01),且枯水期显著高于丰水期( $P < 0.05$ ). 对两个季节的环境因子进行独立样本 $T$ 检验,结果为:pH、水温(WT)、溶解氧(DO)、总磷(TP)、氨氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )、硅(Si)差异显著( $P < 0.05$ ),其他因子季节差异不显著.

表1 洪湖两季节环境因子对比

Tab.1 Compare of environment factors of two seasons in Lake Honghu

	pH	SpCond ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	WT ( $^{\circ}\text{C}$ )	DO ( $\text{mg}/\text{L}$ )	TDS (ppt)	TN ( $\text{mg}/\text{L}$ )	TP ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	COD <sub>Mn</sub> ( $\text{mg}/\text{L}$ )	SS ( $\text{mg}/\text{L}$ )	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ( $\text{mg}/\text{L}$ )	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	Si ( $\text{mg}/\text{L}$ )
枯水期 平均值	9.17	262.08	14.74	11.79	0.21	0.84	36.82	6.22	10.22	0.03	2.21	0.52
标准偏差	0.74	32.98	0.95	1.98	0.03	0.15	11.44	0.53	8.10	0.01	0.73	0.16
丰水期 平均值	8.31	342.38	28.50	5.57	0.22	1.28	68.88	6.14	14.12	0.51	16.15	3.27
标准偏差	0.54	102.93	0.50	2.36	0.07	1.33	34.68	0.73	14.12	0.31	22.92	1.54

参考《湖泊富营养化调查规范》<sup>[30]</sup>及《中国湖泊志》<sup>[16]</sup>,根据各个指标对洪湖进行富营养评价(表2),表明洪湖目前处于中富营养.

表2 洪湖富营养水平评价结果

Tab.2 Results of level of eutrophication test

	TN	TP	COD <sub>Mn</sub>	Chl. a	SD	平均	营养级别
90年代初 <sup>[16]</sup>	55	42	55	34	38	44.8	中
枯水期	55	45	60	35	-	48.8	中
丰水期	60	55	60	50	-	56.2	中

### 2.2 浮游植物群落结构

2.2.1 浮游植物种类 两次调查共观察到浮游植物6门46属95种(未鉴定到种的按1个种,下同). 其中硅藻门(Bacillariophyta)12属26种;绿藻门(Chlorophyta)20属39种;蓝藻门(Cyanophyta)8属14种;裸藻门(Euglenophyta)3属11种;隐藻门(Cryptophyta)2属4种;甲藻门(Dinophyta)1属1种. 两次调查优势种群主要为硅藻和绿藻,其次为蓝藻. 直链藻、脆杆藻、栅藻等3属两次调查中各点均有出现,其次是盘星藻、舟形藻. 主要种类为:颗粒直链硅藻(*Melosira granulata*)、尖针杆藻(*Fragilaria ulna* var. *acus* [注:亦即原来*Synedra acus*<sup>[31]</sup>,中文名称本文仍称“尖针杆藻”])、双对栅藻(*Scenedesmus bijuga*)、四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)、单角盘星藻(*Pediastrum simplex*).

2.2.2 浮游植物数量及生物量 对两次调查数据进行平均,各点平均丰度变化范围为 $3.42 \times 10^5 - 143 \times 10^5$  cells/L,平均为 $39.2 \times 10^5$  cells/L. 硅藻门丰度占总丰度43.06%,蓝藻门49.80%,绿藻门6.94%,隐藻门0.12%,裸藻门0.08%,甲藻门0.01%;丰度较高的有颗粒直链硅藻及其窄变种 $17.05 \times 10^5$  cells/L;点形并列藻(*Merismopedia punctata*) $5.71 \times 10^5$  cells/L;鱼腥藻 $5.56 \times 10^5$  cells/L;水华微囊藻(*Microcystis flos-aucae*) $3.21 \times 10^5$  cells/L;双对栅藻 $0.592 \times 10^5$  cells/L;脆杆藻 $0.459 \times 10^5$  cells/L及单角盘星藻 $0.446 \times 10^5$  cells/L等.

各点平均生物量变化范围为0.28 - 13.53mg/L,平均为2.4mg/L. 硅藻门生物量占总生物量93.72%,蓝藻门1.35%,绿藻门4.13%,裸藻门0.51%,隐藻门0.26%,甲藻门0.03%;生物量较高的种类有颗粒直

链硅藻及其窄变种 2.3mg/L;脆杆藻 0.17mg/L;单角盘星藻 0.02mg/L 等。

枯水期各点平均细胞丰度变化范围为  $2.00 \times 10^5 - 8.28 \times 10^5$  cells/L, 平均为  $3.99 \times 10^5$  cells/L. 硅藻门细胞丰度占总丰度 48.68%, 蓝藻门 24.72%, 绿藻门 23.72%, 裸藻门 0.03%, 隐藻门 2.84%; 细胞丰度较大的种类有颗粒直链硅藻  $1.07 \times 10^5$  cells/L、鱼腥藻  $0.69 \times 10^5$  cells/L、尖针杆藻  $0.54 \times 10^5$  cells/L、双对栅藻  $0.28 \times 10^5$  cells/L、点形平列藻  $0.23 \times 10^5$  cells/L 等。枯水期各点平均生物量变化范围为 0.22 - 0.53mg/L, 平均为 0.39mg/L. 硅藻门占 84.40%, 蓝藻门 0.62%, 绿藻门 10.84%, 裸藻门 0.14%, 隐藻门 4.00%; 生物量较大的种类有颗粒直链硅藻 0.16mg/L, 尖针杆藻 0.11mg/L 等。

丰水期各点平均丰度变化范围为  $2.20 \times 10^5 - 284 \times 10^5$  cells/L, 平均为  $71.3 \times 10^5$  cells/L. 硅藻门细胞丰度占总细胞丰度 42.82%, 蓝藻门 50.85%, 绿藻门 6.24%, 裸藻门 0.08%, 甲藻门 0.01%, 隐藻门 0.003%; 细胞丰度较大种类有颗粒直链硅藻及其窄变种  $28.93 \times 10^5$  cells/L、点形平列藻  $9.82 \times 10^5$  cells/L、鱼腥藻  $9.22 \times 10^5$  cells/L、水华微囊藻  $5.63 \times 10^5$  cells/L 等。丰水期各点平均生物量变化范围为 0.19 - 26.85mg/L, 平均为 4.40mg/L. 硅藻门占 94.33%, 蓝藻门 1.40%, 绿藻门 3.69%, 裸藻门 0.53%, 甲藻门 0.03%, 隐藻门 0.01%; 生物量较大的种类有颗粒直链硅藻及其窄变种 3.90mg/L、脆杆藻 0.15mg/L、单角盘星藻 0.03mg/L 及鱼腥藻 0.03mg/L.

2.2.3 枯水期与丰水期群落结构对比 洪湖枯水期生物种类数量及生物量要低于丰水期. 枯水期共鉴定有 5 门 29 属 45 种, 其中绿藻门 12 属 18 种、硅藻门 11 属 19 种、隐藻门 2 属 4 种、蓝藻门 3 属 3 种、裸藻门 1 属 1 种. 优势种群为硅藻门及绿藻门, 它们占总生物量的 95.24%, 其次是隐藻门. 颗粒直链硅藻、尖针杆藻、双对栅藻、单角盘星藻、脆杆藻及四尾栅藻是主要种类, 细胞丰度占总体 58.88%, 生物量占总体 81.26%.

表 3 浮游植物种类多样性指数\*

	枯水期	丰水期
物种丰富度指数 Margalef	3.41	5.39
物种均匀度指数 Pielou	0.91	0.75
Simpson 多样性指数	0.86	0.84
Shannon-Wiener 多样性指数	3.34nat	3.48nat
物种数 N	45	86

\* nat 表示以 10 为底数的计算结果.

表 4 因子载荷矩阵

	因子 1	因子 2	因子 3
SpCond	0.938	0.299	0.053
TDS	0.771	0.563	0.199
TP	0.952	0.177	-0.075
COD	-0.060	0.518	-0.536
SS	0.282	0.577	-0.625

## 2.3 浮游植物群落与环境因子的关系

2.3.1 影响浮游植物生物量主要因子 (PCA) 将 12 个环境因子进行相关性检验 (KMO and Bartlett's Test) 结果为 0.629, 说明现有数据比较适合做主成分分析. 特征值大于 1 的主成分共有 3 个, 第一主成分特征值为 7.039, 贡献率 58.66%; 第二主成分特征值为 1.979, 贡献率为 16.49%; 第三主成分特征值为 1.374, 贡献率为 11.45%, 前三个主成分累计贡献率为 86.60%, 表 4 给出几个主要因子的载荷矩阵.

丰水期共分析鉴定出浮游植物 6 门 43 属 86 种, 其中绿藻门 19 属 36 种、硅藻门 10 属 21 种、蓝藻门 8 属 14 种、裸藻门 3 属 11 种、隐藻门 2 属 3 种、裸藻门 1 属 1 种. 优势种群为硅藻门、绿藻门及蓝藻门, 占总生物量 99.41%. 主要种类为颗粒直链硅藻、脆杆藻、单角盘星藻、鱼腥藻、双对栅藻及水华微囊藻等, 细胞丰度占总体 56.57%, 生物量占总体 84.83%.

枯水期和丰水期的多样性指数(表 3)可知, 物种丰富度指数丰水期要高于枯水期, 而物种均匀度指数枯水期要高于丰水期.

2.2.4 浮游植物水平分布 各点浮游植物生物量季节差异较大(图 2), 但是各点都基本以硅藻为主要种类. 枯水期各点浮游植物组成相近, 基本以硅藻及绿藻为主; 除此之外, 2# 还观察到隐藻, 6# 观察到少量蓝藻(图 2a). 丰水期浮游植物组成各点差异较大, 例如 1# 绿藻门为主要组成种类, 其他各点均以硅藻为主; 2#、6# 和 8# 观察到裸藻; 5# 和 6# 有较多蓝藻(图 2b).

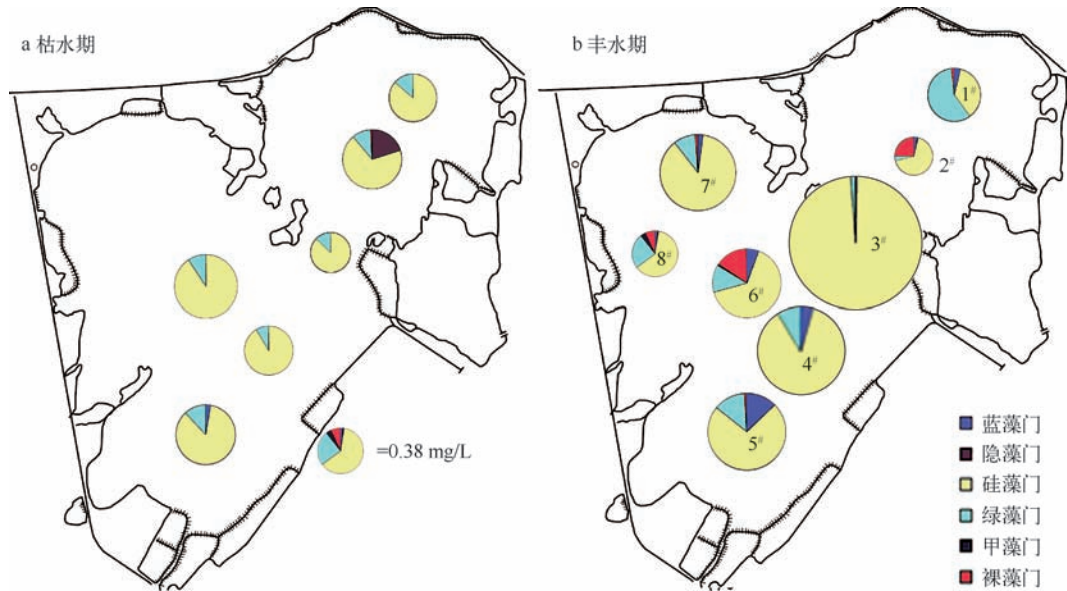


图2 洪湖浮游植物水平分布(b图中3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>图形大小不代表生物量大小)

Fig. 2 Distribution of phytoplankton between two seasons in Lake Honghu

根据因子的载荷及特征值计算每个主成分的各个因子系数,结果如下:

$$F_1 = -0.30\text{pH} + 0.35\text{SpCond} + 0.26\text{WT} - 0.30\text{DO} + 0.29\text{TDS} + 0.30\text{TN} + 0.36\text{TP} - 0.02\text{COD}_{\text{Mn}} \\ + 0.11\text{SS} + 0.33\text{NH}_4^+ - \text{N} + 0.33\text{PO}_4^{3-} - \text{P} + 0.31\text{Si}$$

$$F_2 = 0.05\text{pH} + 0.21\text{SpCond} - 0.37\text{WT} + 0.33\text{DO} + 0.40\text{TDS} + 0.28\text{TN} + 0.13\text{TP} + 0.37\text{COD}_{\text{Mn}} \\ + 0.41\text{SS} - 0.23\text{NH}_4^+ - \text{N} + 0.06\text{PO}_4^{3-} - \text{P} - 0.30\text{Si}$$

$$F_3 = 0.26\text{pH} + 0.05\text{SpCond} - 0.31\text{WT} + 0.23\text{DO} + 0.17\text{TDS} + 0.33\text{TN} - 0.06\text{TP} - 0.46\text{COD}_{\text{Mn}} \\ - 0.53\text{SS} + 0.01\text{NH}_4^+ - \text{N} + 0.38\text{PO}_4^{3-} - \text{P} + 0.01\text{Si}$$

第一主成分中总磷(TP)与电导率(SpCond)的系数绝对值较大,分别为0.36和0.35,是决定第一主成分的主要两个因子;矿化度(TDS)与悬浮物(SS)是决定第二主成分的两个因子、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)与悬浮物(SS)是决定第三主成分两个主要因子。

2.3.2 主要浮游植物种属丰度和环境因子 CCA 排序 前两个排序轴的特征值分别为0.119和0.069,环境因子轴与物种排序轴之间的相关系数(Species-environment correlation)分别为0.959和0.770.物种变异累积百分数(Cumulative percentage variance of species data)分别为25.7%、40.5%;物种-环境变异累积百分数(Cumulative percentage variance of species-environment correlation)分别为25.7%、40.5%;两个物种(SP1、SP2)排序轴近似垂直,相关系数为-0.05,两个环境排序轴(EN1、EN2)的相关系数为0(表5),说明排序轴与环境因子间线性结合的程度较好地反映了物种与环境之间的关系,排序结果是可靠的<sup>[11,25]</sup>.经软件自动筛选,最后得出悬浮物(SS)、水温(WT)、正磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P,图3中简称为PO<sub>4</sub>-P)、矿化度(TDS)以及溶解氧(DO)是影响洪湖群落结构的若干主要因子(图3).

### 3 讨论

#### 3.1 洪湖水水质评价

洪湖pH值较高(表1),可能是由于污染及生物呼吸作用<sup>[32]</sup>.营养盐质量比枯水期为TN:Si:TP=24:16:1,丰水期TN:Si:TP=17:53:1.因此,从营养盐比例可以看出洪湖可能处于磷限制。

表5 前4个排序轴和5个主要环境因子的相关系数

Tab.5 Correlation coefficients of five environmental factors with the first four axes of CCA

	SP1	SP2	SP3	SP4	EN1	EN2	EN3	EN4	WT	DO	TDS	SS
SP2	-0.05	1.00										
SP3	0.00	0.01	1.00									
SP4	-0.10	0.12	0.14	1.00								
EN1	0.96	0.00	0.00	0.00	1.00							
EN2	0.00	0.77	0.00	0.00	0.00	1.00						
EN3	0.00	0.00	0.77	0.00	0.00	0.00	1.00					
EN4	0.00	0.00	0.00	0.82	0.00	0.00	0.00	1.00				
WT	-0.69	0.31	-0.29	0.03	-0.72	0.41	-0.38	0.04	1.00			
DO	0.60	-0.46	0.27	-0.30	0.62	-0.60	0.35	-0.36	-0.82	1.00		
TDS	-0.13	0.24	0.41	0.62	-0.13	0.32	0.53	0.76	0.11	-0.36	1.00	
SS	0.43	0.55	0.08	0.12	0.45	0.71	0.10	0.15	0.15	-0.15	0.40	1.00
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	-0.43	-0.02	0.10	0.69	-0.44	-0.03	0.13	0.84	0.41	-0.50	0.80	0.07

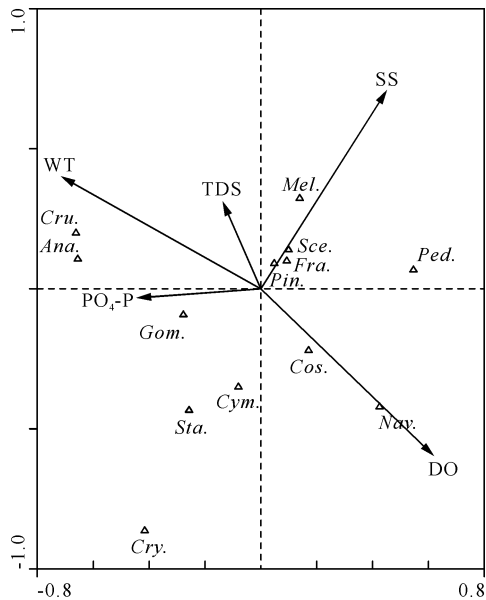


图3 主要属与环境变量之间的双轴排序图  
(Ana. = 鱼腥藻; Cry. = 隐藻; Mel. = 直链藻;  
Pin. = 羽纹藻; Fra. = 脆杆藻; Nav. = 舟形藻;  
Gom. = 异极藻; Cym. = 桥弯藻; Sce. = 栅藻;  
Ped. = 盘星藻; Cru. = 十字藻; Sta. = 角星鼓藻;  
Cos. = 鼓藻)

Fig. 3 Ordination biplots of genus and environmental variables

洪湖浮游植物群落结构季节差异较大,而形成这种季节差异的主要原因可能是水温. 在枯水期,浮游植物基本以硅藻为主,其它门类生物量所占比例较低. 这是因为在枯水期水温较低、同时光照不充分,因此对水温和光照有着很好适应能力的硅藻(平板藻属 *Tabellaria* sp., 脆杆藻属等)能够获得优势地位<sup>[35]</sup>. 丰水期,洪湖虽然仍以硅藻为主,但随着水温升高,绿藻、蓝藻等其他藻类所占比例有所升高. PEG (Plankton Ecology Group) 模式能很好描述温带中营养深水湖泊浮游植物群落季节演替规律<sup>[36]</sup>,该模式指出:春季绿藻对 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的竞争

根据环境因子进行评价,洪湖现在处于中营养水平. 此外,在枯水期和丰水期样品中都鉴定出了大量 β-中污染指示物种存在(克洛脆杆藻 (*Fragilaria crotonensis*)、肘状针杆藻 (*Synedra ulna*)、尖针杆藻、直链硅藻),说明水体处于 β-中污染.

另根据《地表水水质标准》(GB3838-2002),此次调查水质处于 III-IV 类水之间,水质恶化驱动因子为营养盐;这些营养盐主要来自洪湖养殖业、流域居民生活污水和洪湖上游工业废水<sup>[18,33]</sup>,同时由于围网养殖导致水草面积减少,湖泊自净能力有所下降,使得营养盐在湖泊中累积<sup>[2]</sup>.

### 3.2 洪湖浮游植物群落结构特征及成因

α 多样性指数是描述群落内多样性的指数,它与种类数目(丰富度)及种类中个体分配上的均匀性相关<sup>[34]</sup>,在生态学中 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数是 α 多样性指数中常见的两种<sup>[23]</sup>. 计算(见本文 2.2.3 节)发现:洪湖尽管丰水期物种丰富,但由于物种数量分布不及枯水期均匀,所以种群多样性指数都略低于枯水期.

洪湖浮游植物以硅藻为主,其次为绿藻、蓝藻,隐藻、甲藻等所占比例较低. 主要优势种为颗粒直链硅藻、尖针杆藻、双对栅藻、四尾栅藻、单角盘星藻等;浮游植物水平分布丰水期差异较大. 丰水期物种较多,但不同种之间细胞丰度差异较大. 形成这种差异的原因可能是洪湖各点天然或受人为影响不一致造成各地水草分布不同进而影响浮游植物群落结构.

中硅藻可以从中保持优势,但是随着硅藻对硅的消耗,硅藻数量下降<sup>[37]</sup>并导致蓝藻占优势<sup>[38]</sup>. 洪湖属于浅水中营养湖泊,通过计算营养盐的比例发现,除枯水期 6# 点位可能出现 N 限制( $TN: Si = 0.316 < 1$ ,  $TN: TP = 7.16 < 10$ )<sup>[13]</sup>外其它点位可能是磷限制,而丰水期水体中硅含量均值为  $3.27\text{mg/L}$  ( $1.75 - 5.58\text{mg/L}$ ). 在洪湖硅是非限制因子或许是使得硅藻在丰水期随着水温升高亦能保持优势的关键因子.

### 3.3 洪湖浮游植物群落结构与环境因子的关系

3.3.1 浮游植物生物量与环境因子的关系 卫雯雯等在使用主成分分析研究的 5 个因子(pH、电导率、磷、氮、钾)中 pH、电导率、磷是 3 个主要因子<sup>[17]</sup>. 此次调查结果使用主成分分析,结果表明:第一主成分主要包括总磷(TP)和电导率(SpCond)2 个因子. 总磷是引起湖泊富营养化的主要因子之一;电导率(SpCond)与离子的种类有关,它主要能反映水体中离子类型<sup>[17]</sup>;所以第一主成分反映的是洪湖水体的营养水平和水体离子属性. 第二主成分主要包括矿化度(TDS)和悬浮物浓度(SS)2 个因子. 矿化度可以直接反映湖水离子组成的化学类型,又可以间接反映出湖泊盐类物质积累或稀释的环境条件<sup>[16]</sup>;悬浮物浓度包括了由径流带入的各种悬浮物和藻类等固体物质;所以第二主成分主要反映的是湖水的物质组成. 第三主成分主要包括高锰酸盐指数( $COD_{Mn}$ )和悬浮物浓度 2 个因子. 高锰酸盐指数( $COD_{Mn}$ )能反映湖泊污染程度;悬浮物浓度能反映径流带来的悬浮颗粒,它的增加会导致湖水的透明度下降从而影响光在水下的传播,间接影响藻类的生长;所以第三主成分主要反映的是洪湖污染情况.

因此,主成分分析结果表明,在洪湖富营养化水平及水体中离子类型、水体中物质组成和污染程度是影响浮游植物生长的三类主要因素.

3.3.2 浮游植物群落结构与环境因子的关系 浮游植物群落结构及其变化受到光照、水温、营养盐浓度以及其他生物环境的综合影响<sup>[39-40]</sup>. CCA 分析中经过软件自动筛选的 5 个环境因子,水温(WT)与第一排序轴呈最大负相关( $-0.69$ ),其次为溶解氧(DO),呈最大正相关( $0.60$ ),这说明第一轴明确的反映了水体温度不同季节的变化,即排序轴从左到右,水温升高而溶解氧含量下降;与第二排序轴关系最大的是悬浮物浓度,其值为  $0.55$ ,沿排序轴方向由下而上悬浮物浓度逐渐增加(图 3).

位于左下方的物种有:异极藻、角星鼓藻、桥弯藻和隐藻(图 3),从它们的位置不难看出,这些物种与正磷酸盐有较大的正相关性. 而右下方的鼓藻、舟形藻与溶解氧相关性较高. 位于右上方的直链藻、脆杆藻、羽纹藻及栅藻各属与悬浮物浓度正相关,SS 能使透明度降低、光线容易成为限制因子,而这些藻都是对光有着较好的适应能力<sup>[35]</sup>. 左上角的十字藻和鱼腥藻与水温相关性较大,一般容易在丰水期生长.

除此之外,浮游植物群落结构还受其它水生植物竞争的影响. 例如在丰水期 8 个采样点中,3#、4# 点位没有水草分布,其余各点均有不同种类不同数量的水草分布,沉水植物平均生物量为  $2.3\text{kg/m}^2$  ( $2.1 - 3.5\text{kg/m}^2$ ) (根据彼得森采泥器采底栖动物时采集到的水草计算). 而 3# 点浮游植物生物量为  $5.03\text{mg/L}$ , 4# 点为  $26.85\text{mg/L}$ ,其余点平均值为  $0.53\text{mg/L}$ . 笔者认为造成这种有无水草分布浮游植物生物量相差很大( $t = -4.6, P < 0.01$ )的原因主要是有水生植物的生长影响光在水中的传播,因此在水草区光可能是一个主要的限制因子.

致谢:侍成军及其他人员协助野外采样工作;徐徽、商景阁等参与测定化学数据;刘霞对本文的修改提出了宝贵意见. 在此,向他们表示衷心的感谢.

## 4 参考文献

- [1] 卢山,李世杰,王学雷. 洪湖的环境变迁与生态保护. 湿地科学, 2004, 2(3): 234-237.
- [2] 卢山,姜加虎. 洪湖湿地资源及其保护对策. 湖泊科学, 2003, 15(3): 281-284.
- [3] 任宪友,吴胜军. 洪湖湿地综合评价研究. 国土资源科技管理, 2007, 24(5): 95-99.
- [4] 陈世俭. 洪湖的环境变迁及其生态对策. 华中师范大学学报(自然科学版), 2001, 35(1): 4.
- [5] 尹发能. 洪湖自然环境演变研究. 人民长江, 2008, 39(5): 19-23.
- [6] 胡学玉,陈德林,艾天成. 1990-2003 年洪湖水体环境质量演变分析. 湿地科学, 2006, 4(2): 6.
- [7] 覃明,陆剑. 洪湖湿地生态系统面临的问题与治理对策. 中国水利, 2005, (7): 64-66.
- [8] Salmaso N, Morabito G, Buzzi F *et al.* Phytoplankton as an indicator of the water quality of the deep lakes south of the Alps. *Hydrobiologia*, 2006, 563: 167-187.



- [9] Crossetti LO, Bicudo CED. Phytoplankton as a monitoring tool in a tropical urban shallow reservoir (Garcas Pond): the assemblage index application. *Hydrobiologia*, 2008, **610**: 161-173.
- [10] Marchetto A, Padedda BM, Marinani M *et al.* A numerical index for evaluating phytoplankton response to changes in nutrient levels in deep mediterranean reservoirs. *J Limnol*, 2009, **68**(1): 106-121.
- [11] 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.
- [12] Gamier J, Billen G, Coste M. Seasonal succession of diatoms and Chlorophyceae in the drainage network of the Seine River: Observations and modeling. *Limnology and Oceanography*, 1995, **40**(4): 750-765.
- [13] Paul JT, Ramaiah N, Sardessai S. Nutrient regimes and their effect on distribution of phytoplankton in the Bay of Bengal. *Marine Environmental Research*, 2008, **66**: 337-344.
- [14] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.
- [15] Watanabe T, Asai K, Houki A *et al.* Saprophytic and eurytopic diatom taxa to organic water pollution and diatom assemblage index (DAIpo). *Diatom*, 1986, **2**: 23-73.
- [16] 王苏民, 龚鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.
- [17] 卫雯雯, 金卫斌. 洪湖及其周边水域若干水质指标的主成分分析. *长江大学学报(自科版)农学卷*, 2007, **4**(5): 92-95.
- [18] 桂峰, 于革. 江汉平原洪湖流域营养物质输移演变数值模拟. *科学通报*, 2008, **53**(14): 1709-1718.
- [19] 方文珍, 何定富, 王兴媛等. 洪湖越冬水禽的研究. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 1997, **31**(4): 464-467.
- [20] 杜耘, 陈萍, Kieko S 等. 洪湖水环境现状及主导因子分析. *长江流域资源与环境*, 2005, **14**(4): 283-287.
- [21] 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(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 784.
- [22] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [23] 马克平. 生物多样性的测度方法. I.  $\alpha$ 多样性的测度方法(上). *生物多样性*, 1994, **2**(3): 162-168.
- [24] 张力. SPSS 在生物统计中的应用. 厦门: 厦门大学出版社, 2008: 171.
- [25] Cajo JF, Braak T. Canonical Correspondence Analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 1986, **67**(5): 1167-1179.
- [26] Luciana de Souza Cardoso, David da Motta Marques. Hydrodynamics-driven plankton community in a shallow lake. *Aquatic Ecology*, 2009, **43**(1): 73-84.
- [27] 沈会涛, 刘存歧. 白洋淀浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析. *湖泊科学*, 2008, **20**(1): 773-779.
- [28] Lopes M, Bicudo C, Ferragut M. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil. *Hydrobiologia*, 2005, **542**(1): 235-247.
- [29] Muylaert K, Sabbe K, Vyverman W. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuary (Schelde, Belgium). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, **50**: 673-687.
- [30] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 中国环境出版社, 1990: 317.
- [31] 陈宇炜, 李朋富, Dokulil M. 浮游藻类三个常见属(颤藻属、直链硅藻属和针杆藻属)学名变更的解释. *湖泊科学*, 2003, **15**(1): 85-94.
- [32] 王学雷, 刘兴土, 吴宜进. 洪湖水环境特征与湖泊湿地净化能力研究. *武汉大学学报(理学版)*, 2003, **49**(2): 217-220.
- [33] 朱明勇, 宁龙梅, 王学雷. 洪湖水环境承载力初步研究. *水资源与工程学报*, 2007, **18**(6): 4-7.
- [34] 马克平, 刘玉明. 生物多样性的测度方法. I.  $\alpha$ 多样性的测度方法(下). *生物多样性*, 1994, **2**(4): 231-239.
- [35] Wetzel RG. *Limnology: Lake and river ecosystems*. Elsevier Science Technology Books, 2001: 359.
- [36] Sommer U, Gliwicz ZM, Lampert W *et al.* The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Archives of Hydrobiology*, 1986, **106**(4): 433-471.
- [37] Montecino V, Cabrerias. Phytoplankton activity and standing crop in an impoundment of central Chile. *J Plankton Res*, 1982, **4**(4): 943-950.
- [38] 宋晓兰, 刘正文, 潘宏凯等. 太湖梅梁湾与五里湖浮游植物群落的比较. *湖泊科学*, 2007, **19**(6): 643-652.
- [39] Reynolds CS. *The ecology of phytoplankton*. Cambridge University Press, 2006: 535.
- [40] Pinilla GA. Vertical distribution of phytoplankton in a clear water lake of Colombian Amazon (Lake Boa, Middle Caqueta). *Hydrobiologia*, 2006, **568**: 79-90.