

# 上海崇明岛明珠湖浮游植物群落结构\*

陈立婧<sup>1</sup> 吴竹臣<sup>1</sup> 胡忠军<sup>2</sup> 彭自然<sup>2</sup> 刘其根<sup>2\*\*</sup>

(<sup>1</sup>上海海洋大学省部共建水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306; <sup>2</sup>上海海洋大学农业部水产种质资源与养殖生态重点开放实验室, 上海 201306)

**摘要** 2007年1月至12月对崇明岛明珠湖的浮游植物群落结构和物种多样性的周年动态进行了初步研究. 共发现浮游植物120种, 隶属于8门63属. 优势种包括小席藻、微小平裂藻、旋折平裂藻、不定微囊藻和肘状针杆藻. 浮游植物的年平均丰度和年平均生物量分别为 $5361.57 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $7.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 浮游植物现存量各月间差异极显著( $P < 0.01$ ), 在7月达到最高峰值, 但各站点间差异不显著. 浮游植物的Shannon多样性指数和Margalef指数夏秋季低, 冬春季高. 生物学评价显示, 明珠湖冬春两季的水质要优于夏秋两季, 且目前正处于中富营养阶段, 水体为 $\alpha$ -中污型. 典范相关分析结果表明, 影响明珠湖浮游植物群落结构的主要因子依次为温度、总磷和总氮.

**关键词** 明珠湖 浮游植物 多样性指数 典范相关分析 环境因子

**文章编号** 1001-9332(2011)06-1599-07 **中图分类号** Q949.2 **文献标识码** A

**Phytoplankton community structure in Mingzhu Lake of Chongming Island, Shanghai.** CHEN Li-jing<sup>1</sup>, WU Zhu-chen<sup>1</sup>, HU Zhong-jun<sup>2</sup>, PENG Zi-ran<sup>2</sup>, LIU Qi-gen<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Ministry of Education Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; <sup>2</sup>Ministry of Agriculture Key Laboratory of Aquatic Genetic Resources and Aquaculture Ecology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(6): 1599-1605.

**Abstract:** A preliminary study was conducted on the phytoplankton community structure and the annual variation of species diversity in Mingzhu Lake of Chongming Island from January to December 2007. A total of 120 phytoplankton species belonging to 8 phyla and 63 genera were collected, among which, *Phormidium tenue*, *Meismopedia tenuissima*, *M. convoluta*, *Microcystis incerta* and *Synedra ulna* were the dominant species. The mean annual density and biomass of the phytoplankton were  $5361.57 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$  and  $7.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , respectively. There was a significant difference in the monthly phytoplankton standing crop ( $P < 0.01$ ), being the highest in July, but no significant difference was observed among different observation stations. The Shannon index and Margalef index of the phytoplankton community were higher in spring and winter than in the summer and autumn. Biological evaluation indicated that the water quality of Mingzhu Lake was better in spring and winter than in the other two seasons, and canonical correlation analysis (CCA) suggested that the main factors affecting the phytoplankton community were water temperature, followed by total phosphorus, and total nitrogen.

**Key words:** Mingzhu Lake; phytoplankton; diversity index; canonical correlation analysis (CCA); environmental factor.

浮游植物是水域生态系统中的初级生产者, 具有生命力强、繁殖快、对环境条件变化反应敏感等特点

点, 同时也是水中重要的饵料生物. 浮游植物的分布与水环境之间有着十分密切的关系, 其种类组成、生物量等群落特征是水环境质量的重要标志<sup>[1-2]</sup>, 因此浮游植物可作为监测水质变化的指示生物, 并在水质监测中日益受到重视.

崇明岛地处长江口门户, 是世界上最大的河口

\* 上海市科技兴农推广项目(2006-3-4)、上海市重点学科建设项目(S30701)、上海海洋大学博士启动项目和校研究生科研基金项目(A-87119)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: qgliu@shou.edu.cn  
2010-11-06 收稿, 2011-03-23 接受.

冲积岛,中国第三大岛,现有面积 1267 km<sup>2</sup>.明珠湖地处崇明岛西部绿华镇境内,面积为 3 km<sup>2</sup> (31°43.7'—31°45.0' N,121°14.8'—121°15.5' E).其原是长江南支的一条支流,20 世纪 70 年代经人工筑堤围造而成的潟湖,现建有 2 个进出水闸门,属通江湖泊.近年来由于崇明经济的发展和明珠湖旅游景区的开放,对明珠湖造成很大的污染,水质状况正在逐步恶化,水污染的治理问题已经刻不容缓,因此对明珠湖水质的监测和研究显得尤为重要.在崇明实施生态岛建设过程中,许多研究机构和人员在崇明岛进行了大量生态学研究,如对明珠湖的轮虫、原生动物以及底栖生物做了相关研究<sup>[3-5]</sup>,但未见对明珠湖浮游植物的报道.为此,本文对明珠湖的浮游植物群落结构与物种多样性周年变化进行研究,以期为评价环境污染、生态旅游、生态岛建设提供基础资料与参考体系,并为崇明岛乃至整个上海地区淡水生态系统浮游植物生态学的深入研究提供基础数据.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样站点设置

在明珠湖由北到南共设置 6 个采样点(图 1),1 号站点(31°43'47.16" N,121°14'51.47" E),位于入水口附近;2 号站点(31°43'55.58" N,121°15'05.93" E),为水草区;3 号站点(31°44'07.89" N,121°15'00.58" E),位于明珠湖服务区;4 号站点(31°44'20.38" N,121°15'10.50" E),位于湖中心;5 号站点(31°44'33.58" N,121°15'19.70" E),位于明珠湖的码头区;6 号站点(31°44'54.96" N,121°15'04.61" E),位于明珠湖养殖区.于 2007 年 1 月至 12 月每月中旬各采样 1 次.

### 1.2 样品采集与鉴定

使用柱状采水器,水深 2 m 以内的站点,只采表层(0.5 m)水样 1000 mL,水深 3~10 m 的站点,采取表层(0.5 m)和底层(离底 0.5 m)两处的水样各 500 mL,混合.水样加入鲁哥氏碘液及 5% 的甲醛固定,带回实验室沉淀、浓缩,镜检<sup>[6]</sup>.微囊藻计数时,先将群体等分为  $n$  个部分,计数其中一个小群体的

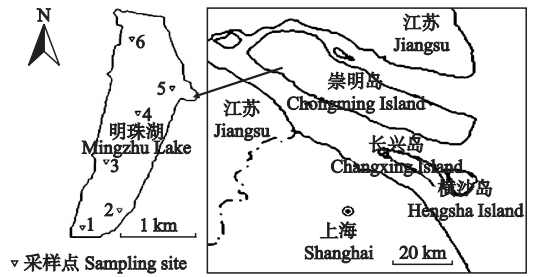


图 1 明珠湖各采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites of Mingzhu Lake.

数量,最后乘以  $n$ ,得到整个微囊藻群体的数量.种类鉴定主要依据《中国淡水藻类志》等<sup>[7-9]</sup>.

现场测定水温、水深、透明度、溶解氧等水质因子,用柱状采水器采集湖水 1000 mL,带回实验室后测定总氮(TN)、总磷(TP)等(表 1).

生物量测定,优势种选取 30~50 个个体,非优势种随机选取个体,采用 Olympus-cx21 光学显微镜拍照,用 WT-1000GM 软件测量其特征值,通过公式对其体积进行换算<sup>[6]</sup>.

### 1.3 数据分析

采用种类优势度  $Y = (N_i/N)f_i$ ;式中, $N_i$  为第  $i$  种的个体数, $N$  为每个种的总个体数, $f_i$  为第  $i$  种在各站位中出现的频度. $Y > 0.02$  为优势种<sup>[10]</sup>.

生物多样性指数采用 Shannon 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数. Shannon 多样性指数  $H = -\sum (N_i/N) \log_2(N_i/N)$ ; Margalef 丰富度指数  $D = (S-1)/\log_2 N$ ; Pielou 均匀度指数  $J = H/\ln S$ .式中: $N$  为采集样品中的所有种类总个体数; $S$  为采集样品中的种类总数; $N_i$  为第  $i$  种的个体数<sup>[11]</sup>.

采用 SPSS 18.0 和 CANOCO 软件对数据进行统计及相关性分析.其中,典范相关分析(CCA)是采用浮游植物丰度指标来反映浮游植物种类与环境的关系,为了使浮游植物丰度数据呈正态分布,对其进行  $\lg(x+1)$  处理.本试验用于排序的物种要满足下面的 2 个条件:该物种 2007 年全年出现频度  $\geq 30\%$ ;该物种在 2007 年的相对丰度  $\geq 0.1\%$ .

表 1 2007 年明珠湖主要理化因子年均值

Table 1 Annual average of main physical and chemical parameters of Mingzhu Lake in 2007

	水温 Water temperature (°C)	水深 Water depth (m)	透明度 SD (cm)	pH	溶解氧 DO (mg·L <sup>-1</sup> )	总氮 TN (mg·L <sup>-1</sup> )	总磷 TP (mg·L <sup>-1</sup> )
平均值 Average	17.3	2.4	46.3	8.4	8.77	1.788	0.121
范围 Range	6.0~30.1	1.0~4.1	9~107	7.4~9.3	6.02~10.83	0.093~6.350	0.01~0.403

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游植物种类组成

2007 年明珠湖共鉴定浮游植物 8 门 63 属 120 种. 其中, 绿藻门 22 属 57 种, 占 50.0%; 蓝藻门 19 属 34 种, 占 26.7%; 硅藻门有 12 属 15 种, 占 11.7%; 其他门共占 11.6%, 分别为裸藻门 3 属 5 种, 黄藻门 3 属 4 种, 甲藻门 2 属 3 种, 金藻门 1 属 1 种.

明珠湖浮游植物种类在 6 月达到第 1 个高峰, 至 10 月达到最大值(图 2). 明珠湖的浮游植物在夏秋季节温度较高的时候种类最丰富, 其中以绿藻门和蓝藻门最多, 分别占到总数的 50.8% 和 20.5%, 其次为硅藻门, 占到 15.2%; 冬春季节温度较低的时候种类比较少, 但仍然是绿藻门和蓝藻门占主导地位.

明珠湖 2007 年各月的优势种较多, 共 32 种, 其中包括蓝藻门 10 种, 绿藻门 8 种, 硅藻门 3 种, 甲藻门 2 种, 金藻门 1 种, 隐藻门 1 种, 裸藻门 1 种. 其中全年优势种 5 种, 包括小席藻 (*Phormidium tenue*)、微小平裂藻 (*Meismopedia tenuissima*)、旋折平裂藻 (*M. convolute*)、肘状针杆藻 (*Synedra ulna*)、不定微囊藻 (*Microcystis incerta*), 其 *Y* 值分别为 0.32、0.11、0.08、0.03 和 0.02.

2007 年明珠湖春季共有优势种 17 种, 其中主要为绿藻门种类. 夏季浮游植物优势种只有 6 种, 且优势度都较高, 主要为蓝藻门种类, 其中尤以小席藻优势度最高. 秋季浮游植物优势种与夏季基本一致,

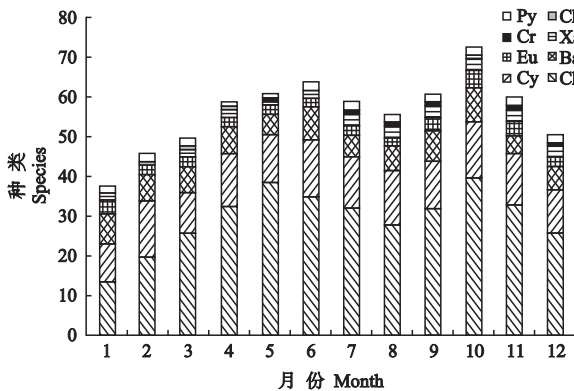


图 2 2007 年明珠湖浮游植物种类组成的周年变化

**Fig. 2** Annual variation of species composition of phytoplankton in Mingzhu Lake in 2007.

Chr: 金藻门 Chrysophyta; Xa: 黄藻门 Xanthophyta; Ba: 硅藻门 Bacillariophyta; Cr: 隐藻门 Cryptophyta; Eu: 裸藻门 Euglenophyta; Cy: 蓝藻门 Cyanophyta; Ch: 绿藻门 Chlorophyta; Py: 甲藻门 Pyrrophyta. 下同 The same below.

共 7 种, 但旋折平裂藻替代了小席藻, 成为了优势度最高的藻类, 新出现了卵形隐藻 (*Chroomonas ovate*), 但其优势度不高, 主要仍以蓝藻门为主. 冬季优势种有 15 种, 以蓝藻门最多, 但优势度最高的则是硅藻门中的肘状针杆藻.

### 2.2 浮游植物生物密度和生物量的时空变化

明珠湖浮游植物年平均生物密度为  $5917.51 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ . 其中以蓝藻门为主, 年平均生物密度为  $4758.96 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ , 占总密度的 88.8%; 其次为绿藻门, 年平均生物密度为  $383.46 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ , 占 7.2%; 硅藻门第三, 年平均生物密度为  $170.97 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ , 占 3.2%; 数量最少的是金藻门, 年平均生物密度为  $0.69 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ . 明珠湖浮游植物年平均生物量为  $7.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 其中以蓝藻门最高, 为  $5.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 占 70.4%; 其次为硅藻门, 年平均生物量为  $1.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 占 15.4%; 然后是绿藻门, 年平均生物量为  $0.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 占 9.2%; 最少的为金藻门, 年平均生物量还不到  $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

浮游植物生物密度的月变化呈单峰形(图 3), 峰值出现在 7 月, 为  $24800 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ , 主要为蓝藻门小席藻和宽松螺旋藻; 最小值出现在 1 月, 为  $51.7 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ . 2007 年明珠湖各月间生物密度

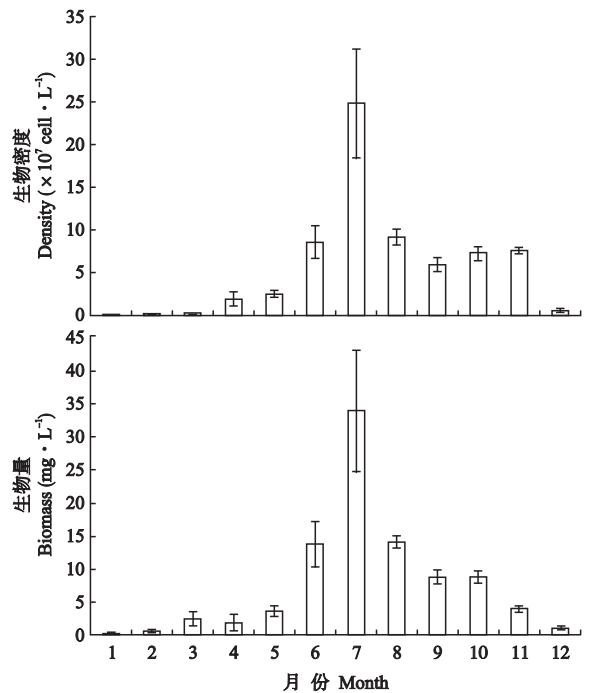


图 3 2007 年明珠湖浮游植物生物密度及生物量的周年变化

**Fig. 3** Annual variation of density and biomass of phytoplankton in Mingzhu Lake in 2007.

表 2 2007 年明珠湖各站点浮游植物年均丰度及生物量水平分布

Table 2 Horizontal distribution of density and biomass of phytoplankton in stations of Mingzhu Lake in 2007

站点 Station	丰度 Density ( $\times 10^4$ cell $\cdot$ L $^{-1}$ )	生物量 Biomass (mg $\cdot$ L $^{-1}$ )
1	5694.12 $\pm$ 5776.98	8.00 $\pm$ 7.81
2	5347.91 $\pm$ 7534.63	7.88 $\pm$ 10.16
3	4359.10 $\pm$ 4700.30	6.23 $\pm$ 6.46
4	8050.57 $\pm$ 10240.02	8.03 $\pm$ 10.24
5	5674.82 $\pm$ 7553.10	8.11 $\pm$ 10.07
6	6594.07 $\pm$ 9895.93	9.75 $\pm$ 13.81

存在极显著差异 ( $P < 0.01$ )。明珠湖生物量变化与生物密度基本相似,也呈现为单峰形,其最大峰值同样出现在 7 月,为 33.72 mg  $\cdot$  L $^{-1}$ ;1 月达到最小值,为 0.25 mg  $\cdot$  L $^{-1}$ 。各月的生物量差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

明珠湖各调查站点的平均生物密度之间无显著差异(表 2),其中 4 号站平均值最大,为 8018.11  $\times 10^4$  cell  $\cdot$  L $^{-1}$ ,3 号站最小,为 4359.10  $\times 10^4$  cell  $\cdot$  L $^{-1}$ 。站点的平均生物量也无显著差异,最大的是 6 号站,生物量为 9.75 mg  $\cdot$  L $^{-1}$ ,最小的是 3 号站,为 6.23 mg  $\cdot$  L $^{-1}$ 。

总的来说,明珠湖各站点浮游植物的生物密度与生物量的趋势为湖心最大,湖岸次之,中间地带最小。

### 2.3 明珠湖浮游植物多样性指数

浮游植物的 Shannon 多样性指数的周年变化在 1.20 ~ 2.75 之间,平均值为 2.18  $\pm$  0.44,冬春两季其多样性指数值较高,夏秋两季指数值则偏低。Margalef 丰富度指数在 1.03 ~ 3.08 之间,其平均值为 2.33  $\pm$  0.55,其变化规律与 Shannon 多样性指数相似,呈现冬春高、夏秋低的变化趋势。Pielou 均匀度指数周年波动在 0.31 ~ 0.89 之间,平均值为 0.61  $\pm$  0.17。各站点多样性指数无显著差异(图 4)。

### 2.4 主要浮游植物种类丰度和环境因子的 CCA 分析

根据浮游植物相对丰度和出现的频度,选取 33 种浮游植物用于 CCA 分析。在环境因子变量和浮游植物丰度的排序图中,箭头表示生境因子,箭头连线的长短表示植物物种和群落的分布与该生境因子相关性的。箭头连线与排序轴的夹角的大小表示生境因子与排序轴相关性的,夹角小说明关系越密切,箭头所处的象限表示生境因子与排序轴

之间的正负相关性<sup>[12]</sup>。环境因子与前两个排序轴的相关系数见表 3,浮游植物代码见表 4。

分析时,可以作某一种类与环境因子连线的垂线,垂线与环境因子连线相交点离箭头越近,表示该种与该类环境因子的正相关性越大,处于另一端则表示与该类环境因子具有的负相关性越大。对主要浮游植物种类的丰度在主轴上排序,则可反映这些浮游植物与环境因子之间的对应关系<sup>[12]</sup>。从图 5 可以看出,所选取的 7 个环境因子对浮游植物的种类都有一定程度的影响,其中温度、总磷和总氮对浮游植物的影响明显大于其他环境因子。硅藻门的 S11 和 S12 与总氮呈正相关关系,而与温度和总磷则呈负相关关系。黄藻门的 S31、S32 和隐藻门的 S33 均与温度、总磷呈现正相关关系。蓝藻门藻类除 S1、S2 以外,均与温度和总磷呈正相关。另外,S8 离坐标原点距离较近,说明其受到环境因子的影响较小。

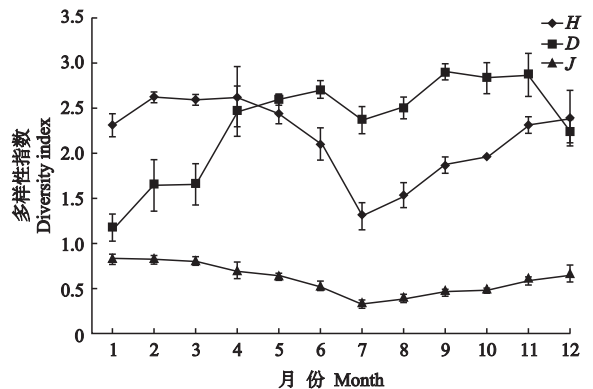


图 4 2007 年明珠湖浮游植物多样性指数

Fig. 4 Diversity indices of phytoplankton of Mingzhu Lake in 2007.

表 3 环境因子与前两个排序轴的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between environmental factors and the first two ordination axes

环境因子 Environmental factor	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2
T	-0.570	-0.084
SD	-0.037	-0.149
pH	0.010	-0.190
COD <sub>Mn</sub>	-0.236	0.296
DO	0.152	-0.077
TN	0.420	-0.342
TP	-0.477	-0.261

T: 水温 Water temperature; SD: 透明度 Water transparency; COD<sub>Mn</sub>: 化学需氧量 Chemical oxygen demand based on Mn method; DO: 溶解氧 Dissolved oxygen; TN: 总氮 Total nitrogen; TP: 总磷 Total phosphorus.



营养盐是影响浮游植物数量的最基本的因素,尤其是限制性营养盐.本次调查中,各种浮游植物均与总磷、总氮显示了较好的相关性. Tilman 等<sup>[22]</sup> 提出磷酸盐潜在限制水域蓝藻和绿藻组分增加,从 CCA 分析中我们看到,蓝藻门和绿藻门的浮游植物除了少数几种之外均与总磷呈正相关关系.有研究表明,在一定范围内浮游植物栖息密度随着 N/P 的升高而增加,但当 N/P 远离其正常值(16)时,浮游植物的生长和繁殖便受到抑制.在淡水浮游植物中,环境中的 N/P 大于 20 时,被认为是磷限制性的,小于 10 时被认为是氮限制性的<sup>[23]</sup>,明珠湖除了夏季以外,其 N/P 都小于 10,因此在大部分季节里,明珠湖中的硅藻都受到 N 的限制,与总氮呈现正相关关系.卵形隐藻适合生长在氮、磷含量丰富的水体当中,由于明珠湖水体中的总氮含量明显高于总磷,总磷就成了其生长的限制因子,并与总磷的含量呈明显正相关.上海崇明岛明珠湖各浮游植物的现存量与 N、P 的关系较为复杂,这可能与各种藻类生长时所需的营养物质不同有关.总体上,明珠湖的浮游植物的生物密度、生物量与总磷呈负相关( $r = -0.210, P < 0.01; r = -0.193, P < 0.01$ ),与总氮呈正相关( $r = 0.381, P < 0.01; r = 0.358, P < 0.01$ ).

由于明珠湖面积较小,整体水深较浅,故水体的溶解氧、pH、透明度变化不明显,对浮游植物的分布及现存量影响较小.

### 3.3 明珠湖水质的生态学评价

物种多样性是衡量群落规模和重要性的基础,也是反映水体营养状况的重要参数.因而,浮游植物的多样性指数也就成为判断湖泊水库营养状况最常用的检测指标<sup>[10]</sup>. Margalef 丰富度指数  $D > 5$  为清洁,  $> 4$  为寡污型,  $> 3$  为  $\beta$ -中污型,  $< 3$  为  $\alpha$ -中污型; Shannon 多样性指数  $H > 3$  为轻或无污染,  $1 \sim 3$  为中污染,  $0 \sim 1$  为重污染<sup>[24]</sup>. 2007 年明珠湖的水体为  $\alpha$ -中污型,为中污染.

由于多样性指数会受到多种因素影响.为确保评价结果的可信性,可选用 2 种或 2 种以上的多样性指标来评价水质.本文参照况琪军等<sup>[24]</sup> 利用浮游植物生物密度和生物量评价水质的标准得出 2007 年明珠湖的水质为中富营养型.

整个调查期间,明珠湖 2~3 个月进行一次换水,对该湖水质的富营养化进程有一定程度的减缓作用.尽管如此,浮游植物的现存量以及多样性仍显示明珠湖水体已受到较严重的污染.这也可能与湖中进行水产养殖,存在投喂饵料的残留问题有关.

致谢 上海海洋大学水产与生命学院顾静、邱小亮、年平胜、丰浪等同学参加部分野外调查与室内试验.调查期间,上海崇明明珠湖发展有限公司施兵、陆美超等给予了大量支持.一并感谢!

### 参考文献

- [1] Comin FA, Menendez M, Lucena JK. Proposal for macrophyte restoration in eutrophic coastal lagoons. *Hydrobiologia*, 1990, **200/201**: 427-436
- [2] Liu D-Y (刘东艳), Sun J (孙军), Zhang L-Y (张利永). Structural characteristics of phytoplankton community during harmful algae bloom in Jiaozhou Bay. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2003, **14**(11): 1963-1966 (in Chinese)
- [3] Chen L-J (陈立婧), Gu J (顾静), Peng Z-R (彭自然), et al. Community structure of rotifer in Mingzhu Lake of Chongming Island, Shanghai. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2009, **20**(12): 3057-3062 (in Chinese)
- [4] Chen L-J (陈立婧), Gu J (顾静), Hu Z-J (胡忠军), et al. The research of Protozoan community structure in Mingzhu Lake of Chongming Island, Shanghai. *Journal of Fisheries of China (水产学报)*, 2010, **34**(9): 1404-1413 (in Chinese)
- [5] Hu Z-J (胡忠军), Liu Q-G (刘其根), Chen L-J (陈立婧), et al. Structural characteristics of chironomid community and their indicative significance in bioassessment of water quality in Mingzhu Lake of Chongming Island, Shanghai. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2009, **20**(4): 929-936 (in Chinese)
- [6] Huang X-F (黄祥飞). Survey, Observation and Analysis of Lake Ecology. Beijing: China Standards Press, 1999 (in Chinese)
- [7] Hu H-J (胡鸿钧), Wei Y-X (魏印心). The Freshwater Algae of China: Systematics, Taxonomy and Ecology. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese)
- [8] Wei Y-X (魏印心). Flora Algarum Sinicarum Aquae Dulcis Tomus VII Chlorophyta Zygnematales Mesotaeiaceae Desmidiaceae Desmidiaceae Sectio. Beijing: Science Press, 2003 (in Chinese)
- [9] Zhu H-R (朱浩然). Flora Algarum Sinicarum Aquae Dulcis Tomus IX Cyanophyta Hormogonophyceae. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese)
- [10] Zhang T (张婷), Li L (李林), Song L-R (宋立荣). Annual dynamics of phytoplankton abundance and community structure in the Xionghu Reservoir. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2009, **29**(6): 2971-2979 (in Chinese)
- [11] Li G-G (李共国), Yu Z-M (虞左明). Community

- structure of rotifera and ecological assessment of water quality in Qiandao Lake. *Journal of Lake Science* (湖泊科学), 2003, **15**(2): 169–178 (in Chinese)
- [12] Leps J, Smilauer P. *Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO*. New York: Cambridge University Press, 2003
- [13] Du G-S (杜桂森), Wang J-T (王建厅), Wu D-W (武殿伟), *et al.* Structure and density of the phytoplankton community of Miyun Reservoir. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2001, **25**(4): 501–504 (in Chinese)
- [14] Kangro K, Laugaste R, Noges P, *et al.* Long-term changes and seasonal development of phytoplankton in a strongly stratified hypertrophic lake. *Hydrobiologia*, 2005, **547**: 91–103
- [15] Liu L-H (柳丽华), Zuo T (左涛), Chen R-S (陈瑞盛), *et al.* Community structure and diversity of phytoplankton in the estuary of Yangtze River in autumn. *Marine Fisheries Research* (海洋水产研究), 2007, **28**(3): 112–119 (in Chinese)
- [16] Danilov RA, Ekelund NGA. The efficiency of seven diversity and one similarity indices based on phytoplankton data for assessing the levels of eutrophication in lakes in central Sweden. *Science of the Total Environment*, 1999, **234**: 15–23
- [17] Wang X-H (王新华), Ji B-C (纪炳纯), Li M-D (李明德), *et al.* Phytoplankton and bioassessment of water quality in upper waters of Yinluan Project. *Research of Environmental Sciences* (环境科学研究), 2004, **17**(4): 18–24 (in Chinese)
- [18] Jiang Z-F (姜作发), Tang F-J (唐富江), Dong C-Z (董崇智), *et al.* Phytoplankton population composition in Heilongjiang River System. *Journal of Jilin Agricultural University* (吉林农业大学学报), 2007, **29**(1): 53–57 (in Chinese)
- [19] Bo F-F (薄芳芳), Yang H (杨虹), Zuo Z (左倬), *et al.* Relationship between phytoplankton community in summer and environmental factors in Shanghai park lakes. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2009, **28**(7): 1259–1265 (in Chinese)
- [20] Luan Q-S (栾青杉), Sun J (孙军), Song S-Q (宋书群), *et al.* Canonical correspondence analysis of summer phytoplankton community and its environment in the Yangtze River Estuary, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2007, **31**(3): 445–450 (in Chinese)
- [21] Hu R (胡韧), Xiong J-X (熊江霞), Han B-P (韩博平). Structure and dynamics of phytoplankton assemblage in a small eutrophic reservoir with a short residence time. *Ecology and Environment* (生态环境), 2008, **17**(4): 1319–1326 (in Chinese)
- [22] Tilman D, Kilham SS, Kilham P. Phytoplankton community ecology: The role of limiting nutrients. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1982, **13**: 349–372
- [23] Schanz F, Juon H. Two different methods of evaluating nutrient limitation of periphyton bioassays using water from the River Rhine and eight of its tributaries. *Hydrobiologia*, 1983, **102**: 187–195
- [24] Kuang Q-J (况琪军), Ma P-M (马沛明), Hu Z-Y (胡征宇), *et al.* Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2005, **5**(2): 87–91 (in Chinese)

---

作者简介 陈立婧,女,1972年生,副教授.主要从事浮游生物生态学研究. E-mail: ljchen@shou.edu.cn

责任编辑 肖红

---