

# 镜泊湖浮游藻类组成及其与环境因子的相关分析

汪 星<sup>1,2</sup>, 刘录三<sup>1,2\*</sup>, 李 黎<sup>1,2</sup>, 周 娟<sup>1,2</sup>, 王 瑜<sup>1,2</sup>, 夏 甫<sup>3</sup>, 夏 阳<sup>1,2</sup> (1. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院, 国家环境保护河口与海岸带环境重点实验室, 北京 100012; 3. 北京中环国宏环境资源科技有限公司, 北京 100012)

**摘要:** 2013年5月、9月及10月在镜泊湖26个采样位点共采集到浮游藻类8门74属140种。其中绿藻门最多, 共58种, 占41.5%。浮游藻类组成以绿藻和硅藻占优, 并且藻类群落结构存在明显的时空差异, 各调查位点藻的种类范围在3~35种, 密度范围在 $0.5 \times 10^4 \sim 230.8 \times 10^4$ 个/L。调查期间, 浮游藻类的Margalef指数、Shannon-Wiener指数以及Pieloud指数范围分别为0.48~2.31, 1.27~3.97, 0.45~0.94, 水体综合营养状态指数TLI在40~60之间, 总的来看, 镜泊湖水体属于中营养-轻度富营养状态。Pearson相关分析结果显示, 镜泊湖藻类群落分布受水环境因子影响明显。整体上, 水温、DO、SD、COD<sub>Mn</sub>及NH<sub>3</sub>-N是影响镜泊湖藻类种群分布格局的主要因素。

**关键词:** 镜泊湖; 藻类组成; 营养等级; 环境因子

中图分类号: X82 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2015)11-3403-11

**Correlation analysis of algae composition and environmental factors in Jingpo Lake.** WANG Xing<sup>1,2</sup>, LIU Lu-san<sup>1,2\*</sup>, LI Li<sup>1,2</sup>, ZHOU Juan<sup>1,2</sup>, WANG Yu<sup>3</sup>, XIA Fu<sup>3</sup>, XIA Yang<sup>1,2</sup> (1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Estuarine and Coastal Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. China Environmental Resources Technology Co., Ltd. Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2015, 35(11): 3403~3413

**Abstract:** This research was performed at May, September and October in 2013 at 26 stations of Jingpo Lake, aiming to investigate the algal species. A total of 140 kinds of algal species belonging to 74 genera of 8 phyla were identified. The algal community was dominated by Chlorophyta and Bacillariophyta, and significant difference was found on algal composition across 26 sampling stations. The algae had the species ranging from 3 to 35 and abundance ranging from  $0.5 \times 10^4$  to  $230.8 \times 10^4$  cells/L, and obviously different across the sampling stations in the three seasons. Overall, Margalef values varied from 0.48 to 2.31, while Shannon-Wiener and Pieloud varying from 1.27 to 3.97 and 0.45 to 0.94, and TLI of the water varied from 40 to 60, both showing that the water status of Jingpo Lake varied from middle nutrition to light eutrophication. Pearson correspondence analysis was applied to explore the relationship between algal species and environmental parameters by SPSS 13.0. The result showed that water temperature, dissolved oxygen (DO), transparency (SD), permanganate index (COD<sub>Mn</sub>) and ammonia nitrogen (NH<sub>3</sub>-N) were the most important factors influencing the distribution of algal species across the 26 sampling stations. Besides these, the other factors just like total nitrogen (TN) and fluorides (F) were also important to the algal species.

**Key words:** Jingpo Lake; algae composition; nutrition level; environmental factors

湖泊水体是人类重要的淡水资源, 随着现代经济的高速发展和人口剧增, 工农业污染物不断注入湖泊, 使湖泊水体富营养化日益严重, 引起湖泊中的浮游植物大量繁殖, 水质恶化而丧失其功能<sup>[1]</sup>。镜泊湖位于黑龙江省宁安县, N43°30′~44°20′, E128°07′~129°06′, 距牡丹江市约100km, 是中国最大的高山堰塞湖, 在淡水养殖、旅游、

发电、运输以及饮水水源等方面具有重要经济效益。该地区属温带季风性气候, 冬季长而严寒, 夏季短而温爽, 由于湖区所处纬度较高, 平均日照

收稿日期: 2015-04-15

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2013ZX07502001)

\* 责任作者, 研究员, liuls@craes.org.cn

时间年变化较大,1 月份日照时间最短,平均 4h/d,6 月份平均日照时间最长,达 6h/d.镜泊湖湖面南北长 45km,东西最宽处达 6km,湖水南浅北深,平均水深 13.8m,最深处 70m,湖泊面积 79.3km<sup>2</sup>,最大面积 141.1km<sup>2</sup>[2].近年来,但由于不断地开发、上游污染源、湖区污染源和农牧渔业及水土流失对湖区的污染等原因,镜泊湖环境污染也日益加剧[3].

藻类处于水生态系统食物链的始端,作为初级生产者的藻类生活周期短,对污染物反应灵敏,在不同水体中具有特定的种类组成,其群落的性质和数量会随着水化学成分而改变,因此常被用作水质监测和评价的重要参数[4-6].本研究共设置了 26 个采样位点,由于 2013 年夏季(7~8 月)镜泊湖遭遇洪水,另考虑到镜泊湖属于北方寒冷型湖泊,冬季冰封期较长(11 月~4 月),本研究最终选择 5 月、9 月和 10 月对镜泊湖流域的浮游藻类群落结构、多样性以及水体营养等级进行了研究,并分析了藻类密度、种类及多样性与水环境因子之间的相关性,以期对镜泊湖水体营养状态评价及污染治理提供科学的数据支持.

1 材料与方法

1.1 采样位点设置与采样方法

本研究共设置 26 个采样位点,如图 1 和表 1 所示;监测时间为 2013 年 5 月、9 月和 10 月.藻类样品的采集使用国际标准的 25 号筛绢制成

的小型浮游生物网,于水体自下向上垂直托取定量样品,用 5%的甲醛溶液固定保存.另取表层水样 2L,摇匀,一部分原水样直接分装于 250mL 磨口瓶,用于测定总磷、总氮、氨氮、化学需氧量、氟化物等常规水质指标.

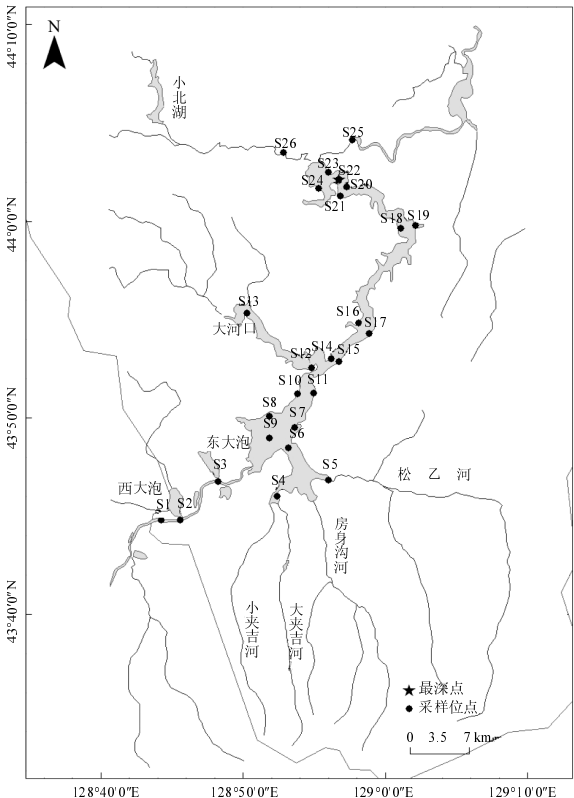


图 1 镜泊湖采样位点示意  
Fig.1 The sampling stations of Jingpo Lake

表 1 镜泊湖调查点位信息

Table 1 The sampling stsites information of Jingpo Lake

| 编号  | 所在区域      | 经度(°E)  | 纬度(°N) | 代表性           |
|-----|-----------|---------|--------|---------------|
| S1  | 大山嘴子      | 128.737 | 43.755 | 吉林来水生态多样性     |
| S2  | 西大泡       | 128.743 | 43.764 | 西大泡入湖生态多样性    |
| S3  | 东大泡       | 128.801 | 43.789 | 东大泡入湖生态多样性    |
| S4  | 大小夹吉河交汇处  | 128.873 | 43.774 | 大小夹吉河入湖生态多样性  |
| S5  | 松乙河入湖口    | 128.945 | 43.779 | 松乙河入湖生态多样性    |
| S6  | 镜泊湖养殖场进水  | 128.891 | 43.810 | 镜泊湖养殖场进水生态多样性 |
| S7  |           | 128.889 | 43.834 |               |
| S8  | 老咕砬子      | 128.897 | 43.858 |               |
| S9  | 上游湖心      | 128.858 | 44.824 | 上游湖区生态多样性     |
| S10 | 养殖区出水     | 128.915 | 43.841 |               |
| S11 |           | 128.916 | 43.859 |               |
| S12 | 尔站河入出湖交汇口 | 128.919 | 43.875 | 尔站河入湖口生态多样性   |

续表 1

| 编号  | 所在区域     | 经度(°E)  | 纬度(°N) | 代表性             |
|-----|----------|---------|--------|-----------------|
| S13 | 大河口      | 128.826 | 43.920 | 尔站河上游来水生态多样性    |
| S14 | 航运区进水    | 128.934 | 43.881 |                 |
| S15 |          | 128.957 | 43.887 |                 |
| S16 |          | 129.015 | 43.975 |                 |
| S17 | 航运区中段    | 129.032 | 43.966 | 湖区生态多样性         |
| S18 | 航运区出水    | 129.018 | 43.994 |                 |
| S19 |          | 129.019 | 44.004 |                 |
| S20 |          | 128.966 | 44.026 |                 |
| S21 | 电视塔      | 128.971 | 44.018 | 镜泊山庄和抱月湾来水生态多样性 |
| S22 | 湖区最深点    | 128.958 | 44.034 |                 |
| S23 | 镜泊山宾馆后院  | 128.930 | 44.036 |                 |
| S24 | 镜泊湖湖心岛附近 | 128.941 | 44.031 |                 |
| S25 | 果树场      | 129.019 | 44.059 |                 |
| S26 | 紫菱湖      | 128.899 | 44.063 |                 |

1.2 水样测试方法

水样的 COD<sub>Mn</sub>、TN、TP、NH<sub>3</sub>-N 以及氟化物的测定方法参照《水和废水监测分析方法》<sup>[7]</sup>.酸性高锰酸钾法测定高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>);碱性过硫酸钾-紫外分光光度法测定总氮(TN);钼酸铵分光光度法测定总磷(TP);纳氏试剂分光光度法测定氨氮(NH<sub>3</sub>-N);离子色谱法测定氟化物(F).pH、水温(T)、溶解氧(DO)与电导率(EC)的测定采用便携式 pH 计和水质多参数测定仪(YSI)现场直接测定(水面下 0.5m),透明度(SD)采用赛氏盘测定;参照《中国淡水藻志》<sup>[8]</sup>对采集的样品进行分类、鉴定,藻细胞密度采用显微镜法<sup>[9]</sup>.

1.3 数据分析

1.3.1 多样性指数及优势度分析 (1) Margalef 指数:

$$d=(S-1)/\ln N$$
 (1)

式中: $d$  为丰富度指数; $S$  为浮游藻类总种类数; $N$  为浮游藻类总个体数.

(2) Shannon-wiener 指数:

$$H'=-\sum_{i=1}^S(n_i/n)\ln(n_i/n)$$
 (2)

式中: $H'$  为多样性指数; $n$  为浮游藻类总个体数; $S$  为浮游藻类总种类数; $n_i$  为  $i$  种浮游藻类个体数.

(3) Pielou 均匀度指数:

$$J=H'/H_{\max}$$
 (3)

式中: $J$  为均匀度; $H'$  为浮游藻类 Shanner-wiener 多样性指数; $H_{\max}$  为多样性指数最大值, $H_{\max}=\ln S$ ;  $S$  为浮游藻类种类总数.

(4) 优势种分析

优势种根据物种的出现频率及个体数量来确定,用优势度来表示<sup>[10]</sup>:

$$y=f_i \times P_i$$
 (4)

式中: $y$  为优势度; $f_i$  为第  $i$  种的出现频率; $P_i$  为第  $i$  种个体数量在总个体数量的比例;当  $y>0.02$  时,定为优势种<sup>[11]</sup>.

数据统计和分析均在 SPSS13.0 中完成.

1.3.2 水体营养等级计算 采用综合营养状态指数法进行计算:

$$TLI(\sum)=\sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j)$$
 (5)

式中:TLI( $\Sigma$ )表示综合营养状态指数;TLI( $j$ )代表第  $j$  种参数的营养状态指数; $W_j$  为第  $j$  种参数的营养状态指数的相关权重.营养状态指数、权重计算及具体分级方法参见文献[12].

2 结果与分析

2.1 镜泊湖浮游藻类的种类组成

2013 年对镜泊湖 26 个采样站位进行了浮游藻类的调查,共鉴定出藻类 8 门 74 属 140 种.其中绿藻门最多,为 58 种,占 41.5%;硅藻门 49 种,占 35.0%;蓝藻门 17 种,占 12.2%;裸藻门 8 种,占 5.7%;

隐藻门、金藻门、黄藻门、甲藻门各 2 种,均占 1.4%.

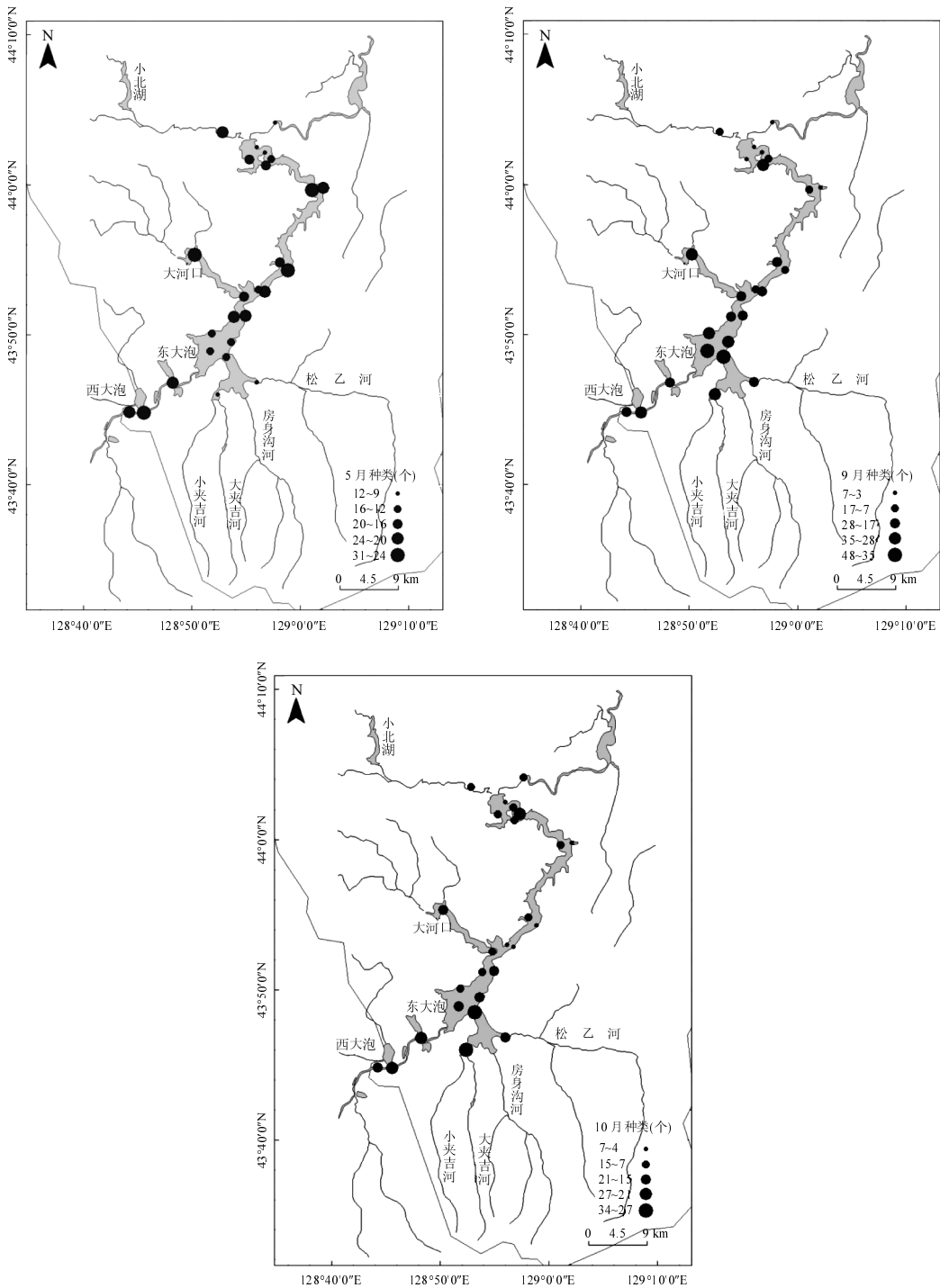


图2 2013年镜泊湖浮游藻类种类分布示意  
Fig.2 Algae species of Jingpo Lake in 2013

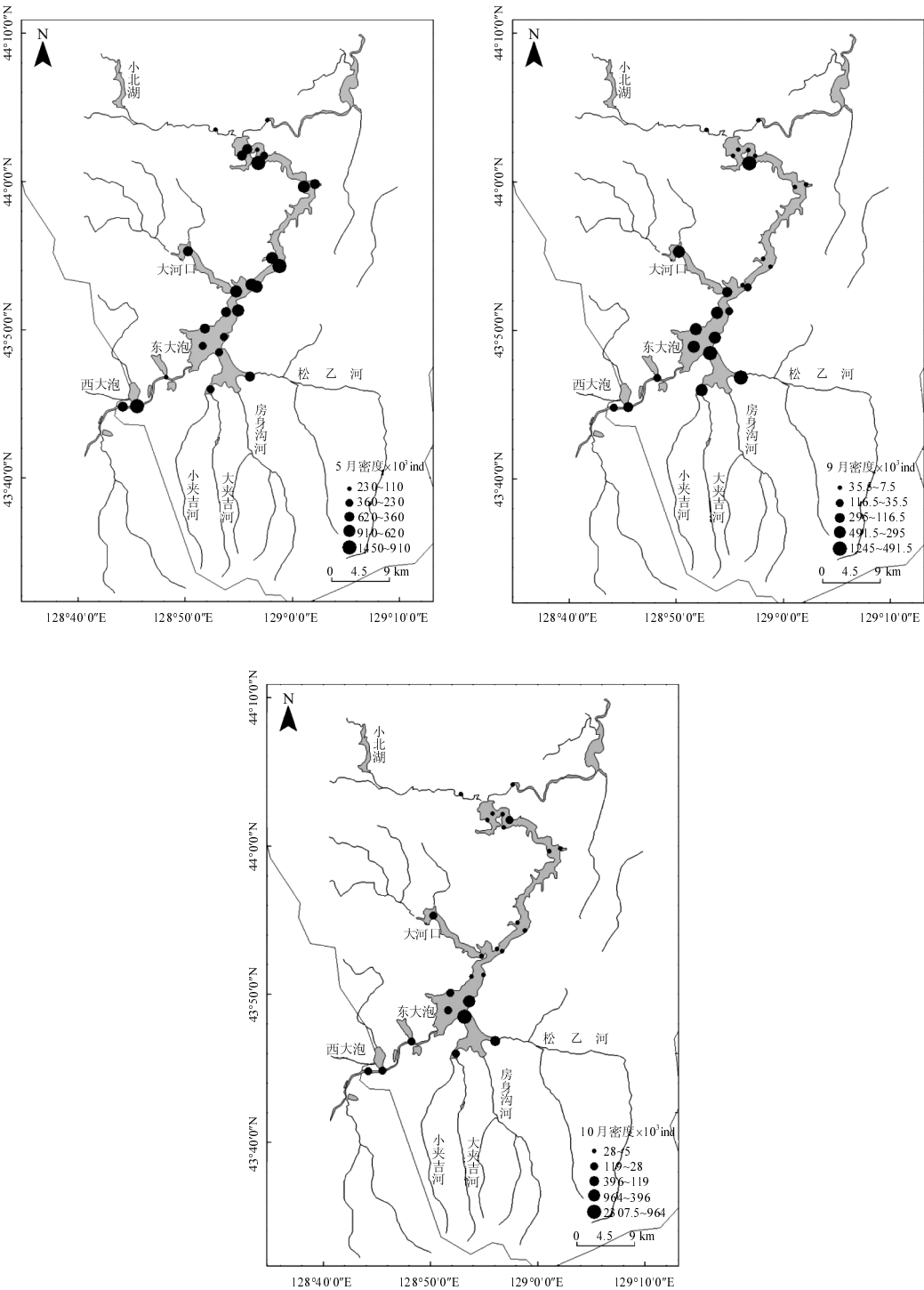


图3 2013年镜泊湖浮游藻类密度分布示意  
Fig.3 Algae abundance of Jingpo Lake in 2013

从不同时期藻的种类分布来看(图2),5月浮游藻类的种类变化范围为 9~31,最大值出现在航运区中段(S17),而湖区最深处(S22)的种类最少,整体来看,入湖口及湖中区藻的种类明显较湖区上游和

出湖口多;9 月浮游藻类的种类变化范围为 3~35, 最大值出现在养殖场进水口(S6),而湖区最深处 (S22)和镜泊山宾馆后院(S23)的种类最少,整体来看,入湖口及湖区上游藻的种类显著高于湖中区和 湖区上游藻的种类显著高于湖中区和出湖口。

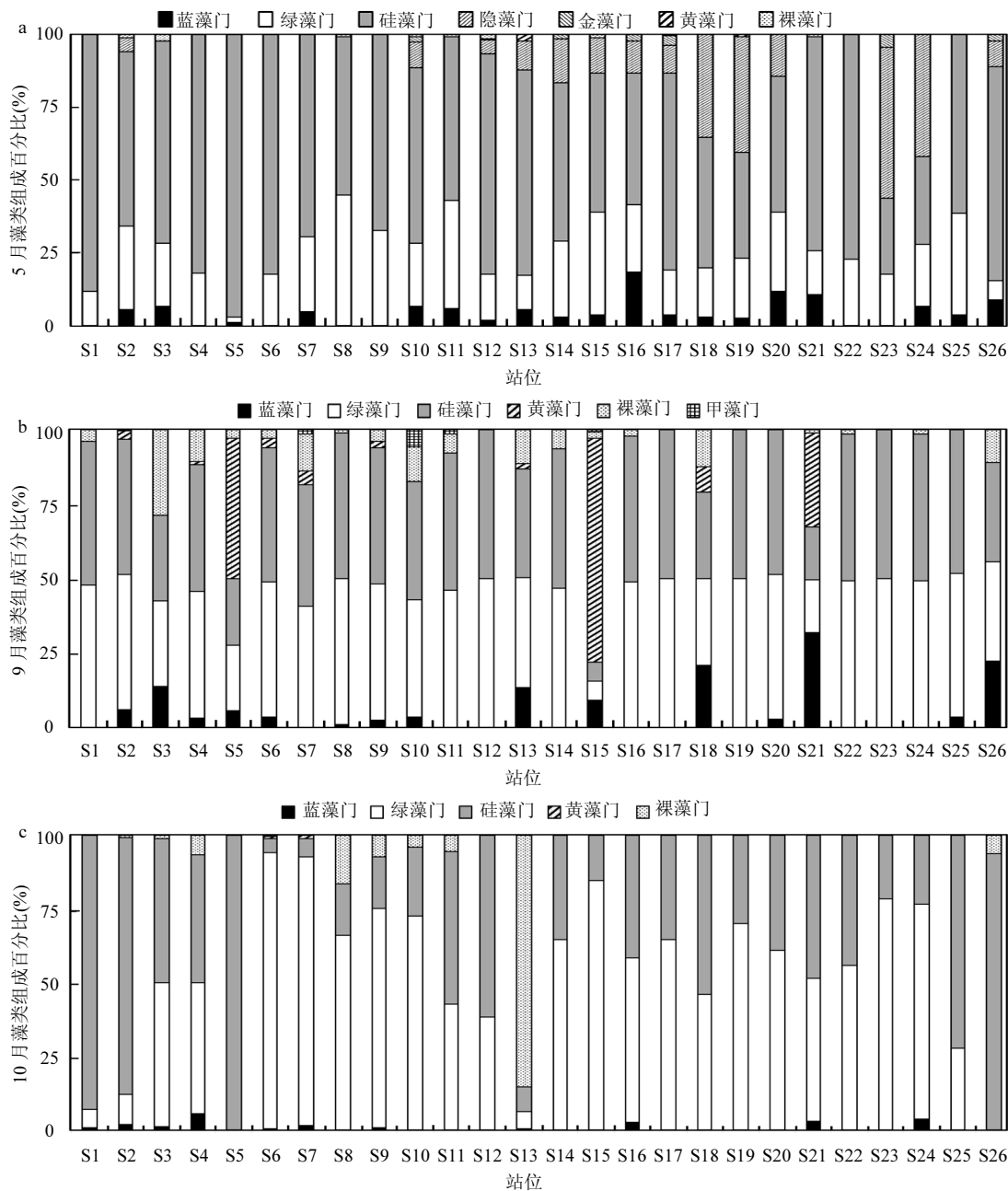


图 4 2013 年 5 月、9 月、10 月镜泊湖浮游藻类种类组成示意  
Fig.4 Algae species composition of Jingpo Lake in May, September, October of 2013

从不同时期藻的密度分布来看(图 3),5 月浮游藻类的密度变化范围为  $11.0\times10^4\sim145.0\times10^4$  个/

L,最大值出现在电视塔(S21),而湖区最深处(S22)的密度最小,整体来看,入湖口及湖中区藻的密度明显较湖区上游和出湖口多;9 月浮游藻类的密度变化范围为  $0.75\times10^4\sim124.5\times10^4$  个/L,最大值出现在养殖场进水(S6),而航运区中段(S17)的密度最小,整体来看,入湖口及湖区上游藻的密度显著高于湖中区 and 出湖口;10 月浮游藻类的密度变化范围为  $0.5\times10^4\sim230.8\times10^4$  个/L,最大值出现在养殖场进水(S6),而航运区出水(S19)的密度最少,整体来看,入湖口及湖区上游藻的密度显著高于湖中区和出湖口。

从不同时期藻的种类组成来看,5 月以硅藻在各采样站位所占比例最高,其次是绿藻和隐藻,其中硅藻和绿藻在各采样站位均有分布,整体来看,入湖口及湖区上游以硅藻占绝对优势,湖区上游的绿藻比例较入湖口有明显上升,湖中区的航运

区进水至出水的隐藻比例逐渐上升,航运区出水(S19)及镜泊山庄(S23、S24)的隐藻比例甚至超过硅藻,出湖口又回归至硅藻占优(图 4a),9 月以绿藻在各采样站位所占比例最高,其次是硅藻,其所占比例较 5 月有明显下降,黄藻在部分站位的优势显著,其中硅藻和绿藻在各采样站位均有分布,整体来看,入湖口及湖区的绿藻和硅藻占绝对优势,所占比例相当(图 4b),值得注意的是,松乙河入口(S5)和航运区进水(S15)的黄藻比例显著高于其他类型。10 月以绿藻在各采样站位所占比例最高,其次是硅藻,裸藻在局部区域呈现优势,整体来看,入湖口及出湖口以硅藻占绝对优势,湖区部分主要分布为绿藻(图 4c),值得注意的是,松乙河入口(S5)只发现了硅藻,大河口(S13)的裸藻占据绝对优势。总的看来,镜泊湖的入湖口一直以硅藻占优,湖区的主导优势类群从春季的硅藻逐渐转变成秋季的绿藻。

表 2  2013 年镜泊湖浮游藻类优势种分布

| 浮游藻类 | 种名                                                           | 5 月      |          | 9 月      |          | 10 月     |          |
|------|--------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|      |                                                              | <i>f</i> | <i>y</i> | <i>f</i> | <i>y</i> | <i>f</i> | <i>y</i> |
| 绿藻门  | 小球藻属 <i>Chlorella vulgaris</i>                               | 0.88     | 0.057    | 0.88     | 0.279    | 0.92     | 0.44     |
|      | 镰形纤维藻 <i>Ankistrodesmus falcatus</i>                         | 0.73     | 0.030    |          |          |          |          |
|      | 集星藻 <i>Actinastrum hantzschii</i>                            |          |          | 0.38     | 0.025    |          |          |
|      | 细链丝藻 <i>Hormidium subtile</i>                                | 0.88     | 0.071    |          |          |          |          |
| 硅藻门  | 针杆藻属 <i>Synedra</i> sp.                                      | 1.00     | 0.197    |          |          | 0.62     | 0.024    |
|      | 尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>                                     | 0.58     | 0.045    |          |          |          |          |
|      | 弧形蛾眉藻 <i>Ceratoneis arcus</i>                                | 0.31     | 0.034    |          |          |          |          |
|      | 直链藻属 <i>Melosira</i> sp.                                     | 0.96     | 0.092    |          |          | 0.85     | 0.079    |
|      | 颗粒直链藻最窄变种 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i> |          |          | 0.77     | 0.047    | 0.77     | 0.043    |
|      | 舟形藻属 <i>Navicula</i> sp.                                     | 0.88     | 0.067    | 0.69     | 0.032    | 0.62     | 0.032    |
|      | 放射舟形藻 <i>Navicula radiosa</i>                                |          |          | 0.73     | 0.022    | 0.54     | 0.025    |
|      | 胡斯特桥弯藻 <i>Cymbella tumida</i>                                |          |          |          |          | 0.65     | 0.024    |
|      | 脆杆藻属 <i>Fragilaria</i> Lyngby                                |          |          | 0.65     | 0.061    | 0.54     | 0.024    |
|      | 美丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>                            | 0.85     | 0.053    |          |          |          |          |
|      | 菱形藻属 <i>Nitzschia</i> sp.                                    | 0.81     | 0.035    |          |          |          |          |
|      | 扁圆卵形藻 <i>Cocconeis placentula</i>                            |          |          |          |          | 0.38     | 0.021    |
| 黄藻门  | 小形黄丝藻 <i>Tribonema minus</i>                                 |          |          | 0.38     | 0.060    |          |          |
| 裸藻门  | 密集囊裸藻 <i>Trachelomonas crebea</i>                            |          |          | 0.58     | 0.027    | 0.27     | 0.045    |
| 隐藻门  | 尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>                                | 0.54     | 0.102    |          |          |          |          |

注:此处优势种均选择优势度*y*>0.02的种类

在不同时期藻的优势种方面(表 2),5 月的优势种从属于硅藻门、隐藻门和绿藻门,按其优势度从高到低排列依次为针杆藻、尖尾蓝隐藻、直链藻、细链丝藻、舟形藻、小球藻、美丽星杆藻、尖针杆藻、菱形藻、弧形蛾眉藻及镰形纤维藻;9 月的优势种从属于绿藻门、硅藻门、

黄藻门和裸藻门,按其优势度从高到低排列依次为小球藻、脆杆藻、小型黄丝藻、颗粒直链藻最窄变种、舟形藻、密集囊裸藻、集星藻及放射舟形藻;10 月的优势种从属于绿藻门、硅藻门和裸藻门,按其优势度从高到低排列依次为小球藻、直链藻、密集囊裸藻、颗粒直链藻最窄变种、舟形藻、放射舟形藻、针杆藻、胡斯特桥弯藻、脆杆藻及扁圆卵形藻.总的看来,镜泊

湖浮游藻类优势种分布情况与前述的种类组成状况基本一致.

2.2 镜泊湖浮游藻类多样性

如图 5 所示,镜泊湖浮游藻类的 Margalef 指数( $d$ )范围为 0.48~2.31, Shannon-Wiener 指数( $H'$ )范围为 1.27~3.97,Pielou 指数( $J$ )变幅为 0.45~0.94,整体来看,入湖口的藻类多样性明显高于湖区和出湖口,3 种多样性指数的变化趋于一致.

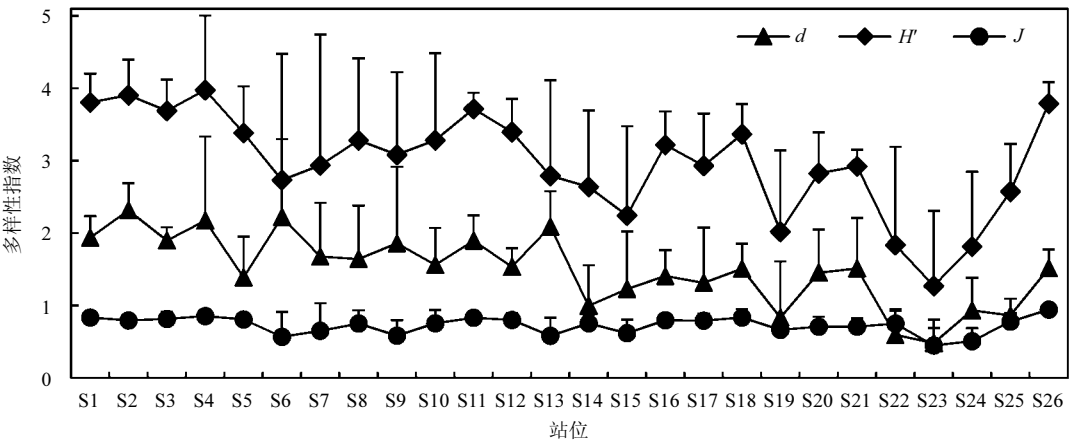


图 5 2013 年镜泊湖浮游藻类多样性分布  
Fig.5 Algae biodiversity of Jingpo Lake in 2013

2.3 镜泊湖水体营养状况

如图 6 所示,所有采样站位的营养状态指数值均处在 40~60 之间,可见镜泊湖整体属于中营养-轻

度富营养水平.镜泊湖自入湖口到出湖口水体营养水平明显下降,其中,入湖口及湖区上游属于轻度富营养水平,而湖中区及出湖口属于中营养水平.

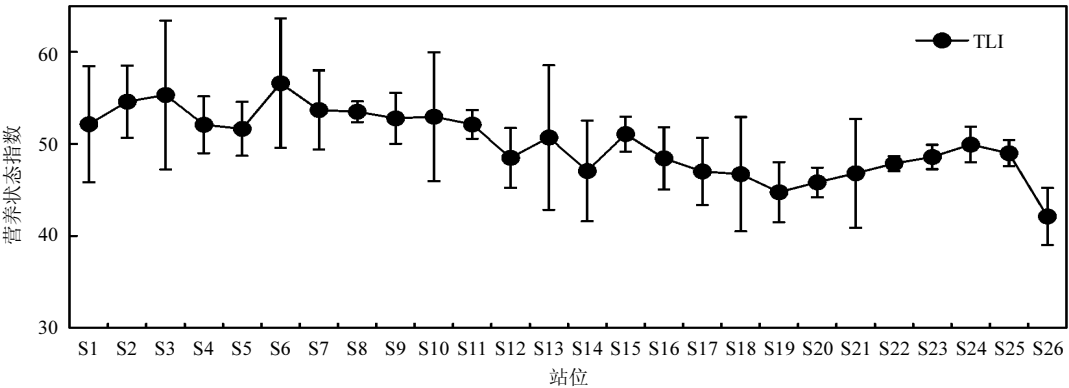


图 6 2013 年镜泊湖水体营养化状况示意  
Fig.6 TLI of Jingpo Lake in 2013

2.4 镜泊湖浮游藻类与水环境因子相关分析

如表 3 所示,5 月镜泊湖的水温与浮游藻类多



样性的相关性较好,与 Shanon 多样性指数的相关系数达到0.665,且相关性极显著( $P<0.001$ ),同样地,水温还与藻种类数呈现相关性,且相关性显著( $P<0.05$ );水体中 TN、TP 及  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度均与藻类多样性指数呈现负相关,且相关性显著( $P<0.05$ );另外,水体中的氟化物浓度与藻类多样性指数呈现正相关,且相关性显著( $P<0.05$ ).9 月镜泊湖的水温、化学需氧量均与浮游藻类多样性及种类数呈现负相关,且相关性显著( $P<0.05$ );而水体中的 DO 浓度则与浮游藻类多样性及种类数呈现较好的正相关,与 Shanon 多样性指数的相关系数达到 0.616,且相关性极显著( $P<0.001$ );水体 SD、 $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度均与浮游藻类多样性及种类数呈现较强的负相关,SD 与 Margalef 丰富度指数、Shanon 多样性指数以及种类数的相关系数分别达到 -0.694、-0.776、-0.669, $\text{NH}_3\text{-N}$  与该 3 种指数的相关系数分别达到-0.661、-0.683、-0.606,且相

关性均极显著( $P<0.001$ );TN 浓度与藻类 Pieloud 均匀度指数呈现负相关,且相关性显著( $P<0.05$ ).10 月镜泊湖的水温、DO 浓度、SD、化学需氧量均与浮游藻类多样性指数及种类数呈现较好的相关性且相关性显著,其中,水温与 Margalef 丰富度指数、种类数的相关系数分别达到-0.628、-0.648( $P<0.001$ ),DO 浓度与 Margalef 丰富度指数、种类数的相关系数分别达到 0.623、0.677( $P<0.001$ ),SD、化学需氧量与种类数的相关系数分别达到-0.612、-0.675( $P<0.001$ );另外,DO 浓度、pH 值与藻类密度呈现正相关,而化学需氧量、氟化物浓度则与藻类密度呈现负相关,且相关性均显著( $P<0.05$ );TN、氟化物浓度与藻类多样性指数呈现负相关,且相关性显著( $P<0.05$ ).总的看来,水温、DO、SD、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  及  $\text{NH}_3\text{-N}$  是影响镜泊湖藻类种群分布格局的主要因素,另外,TN 及氟化物浓度对藻类种群的分布影响也较为明显.

表 3 2013 年镜泊湖浮游藻类生物指数与理化因子的相关分析

Table 3 Correlation of algae bio-metrics and environmental factors in Jingpo Lake in 2013

| 月份 | 项目       | <i>T</i> | DO      | pH 值   | EC     | SD       | $\text{COD}_{\text{Mn}}$ | TN      | TP      | $\text{NH}_3\text{-N}$ | <i>F</i> |
|----|----------|----------|---------|--------|--------|----------|--------------------------|---------|---------|------------------------|----------|
| 5  | Margalef | 0.570*   | -0.192  | -0.049 | -0.037 | -0.206   | -0.214                   | -0.311  | -0.406* | -0.374                 | 0.213    |
|    | Shanon   | 0.665**  | -0.281  | 0.045  | 0.006  | -0.169   | -0.112                   | -0.495* | -0.353  | -0.420*                | 0.473*   |
|    | Pieloud  | 0.225    | -0.186  | 0.072  | -0.004 | 0.116    | 0.073                    | -0.355  | 0.016   | -0.081                 | 0.437*   |
|    | 种类       | 0.521*   | -0.093  | -0.047 | -0.017 | -0.198   | -0.180                   | -0.249  | -0.368  | -0.308                 | 0.134    |
|    | 密度       | 0.033    | 0.242   | -0.018 | 0.067  | -0.341   | -0.101                   | 0.185   | 0.086   | 0.037                  | -0.284   |
| 9  | Margalef | -0.472*  | 0.573*  | 0.107  | -0.285 | -0.694** | -0.508*                  | -0.224  | -0.030  | -0.661**               | -0.072   |
|    | Shanon   | -0.545*  | 0.616** | 0.036  | -0.282 | -0.776** | -0.550*                  | -0.337  | -0.104  | -0.683**               | -0.103   |
|    | Pieloud  | -0.390*  | 0.437*  | -0.187 | -0.192 | -0.512*  | -0.417*                  | -0.396* | -0.178  | -0.378                 | -0.030   |
|    | 种类       | -0.469*  | 0.550*  | 0.144  | -0.292 | -0.669** | -0.495*                  | -0.199  | -0.013  | -0.606*                | -0.083   |
|    | 密度       | -0.339   | 0.186   | 0.042  | -0.312 | -0.381   | -0.282                   | -0.087  | -0.119  | -0.220                 | -0.036   |
| 10 | Margalef | -0.628** | 0.623** | 0.128  | 0.153  | -0.550*  | -0.595*                  | -0.396* | 0.276   | -0.092                 | -0.228   |
|    | Shanon   | -0.497*  | 0.339   | -0.210 | -0.003 | -0.388*  | -0.164                   | -0.448* | 0.217   | -0.205                 | 0.273    |
|    | Pieloud  | -0.162   | 0.002   | -0.247 | 0.016  | -0.093   | 0.204                    | -0.278  | 0.049   | -0.202                 | 0.509*   |
|    | 种类       | -0.648** | 0.677** | 0.198  | 0.104  | -0.612** | -0.675**                 | -0.367  | 0.268   | -0.075                 | -0.301   |
|    | 密度       | -0.207   | 0.398*  | 0.549* | 0.066  | -0.330   | -0.414*                  | -0.054  | -0.103  | -0.035                 | -0.390*  |

注:\* $P<0.05$ ;\*\* $P<0.001$

3 讨论

3.1 镜泊湖浮游藻类的群落结构特征

通过对镜泊湖不同季节浮游藻类的调查得出,该流域内浮游藻类种群分布存在明显的时空差异.藻类密度方面,从 5 月的硅藻占优转变为 9

月的硅藻、绿藻主导,最后转变为 10 月的绿藻占优,且入湖口的藻类密度明显高于湖区和出湖口.1994 年陈立群等<sup>[13]</sup>、2007 年张新刚等<sup>[14]</sup>、2009 年宋辞等<sup>[15]</sup>、2010 年马成学等<sup>[2]</sup>的调查结果均显示,镜泊湖以绿藻门最多、硅藻门与蓝藻门次之,汪星等<sup>[6]</sup>、陈格君等<sup>[16]</sup>对长江的典型通

江湖泊洞庭湖及鄱阳湖的调查结果也显示,浮游藻类组成以绿藻门最多,硅藻门和蓝藻门次之,均与本研究的结果基本一致.可见,近年来,尽管随着社会经济的迅猛发展,人类活动(旅游开发、水产养殖、种植业等)不断增多,镜泊湖藻类群落结构并未发生明显改变.

群落物种多样性是群落组织独特的生物学特征,它反映了群落特有的物种组成和个体密度特征.总的来看,镜泊湖 5 月藻类的 Shannon 多样性( $3.33\pm0.44$ )均高于 9 月( $3.18\pm1.30$ )和 10 月( $2.43\pm1.02$ ),入湖口的多样性在不同时期均高于湖区和出湖口(图 2、图 5).如按多样性来对水体质量状况进行评价,则镜泊湖春季的水质要优于秋季的水质,且入湖口的水质要优于湖区和出湖口的水质,宋辞等<sup>[15]</sup>的研究结果表明,镜泊湖夏季水质最好,春、冬季节次之,秋季水质最差,上游水质>下游,刘玉勇等<sup>[1]</sup>指出镜泊湖浮游植物多样性指数上游较高,中下游较低,与本研究结果一致,可见,近年来,镜泊湖水水质和浮游藻类的分布状况基本稳定,未见明显变化.

### 3.2 镜泊湖水体营养状况分析

中营养型湖泊中常以甲藻、隐藻、硅藻类占优势,富营养型湖泊则常以绿藻、蓝藻类占优势<sup>[17-18]</sup>.本研究中,镜泊湖的优势藻类从 5 月(春季)的硅藻、绿藻、隐藻向 9 月、10 月(秋季)的绿藻、硅藻、裸藻转变,说明镜泊湖水体处于中营养-富营养状态,同样地,本研究对镜泊湖营养等级的分析亦表明,镜泊湖水体处于中营养-轻度富营养状态,这与董惠文<sup>[19]</sup>、刘曼红等<sup>[20]</sup>、刘玉勇等<sup>[21]</sup>的研究结果基本一致.然而,本研究中发现,镜泊湖上游及入湖口的营养等级明显高于湖区及其下游,这与前述的多样性指数的评价结果存在差异,究其原因,可能是镜泊湖上游来水流速较大,水体夹带着大量泥沙,透明度较低,镜泊湖入湖口受上游来水影响,加之水深较浅,水体透明度仍然较低,并且入湖口受镜泊湖水产养殖场的影响,水体营养状态受人为干扰影响较大,使得镜泊湖上游及入湖口的营养等级处于轻度富营养化状态.而镜泊湖整体属于山谷型火山堰塞湖,其湖区中部及下游水深逐渐增大,特别地,镜泊山附近水深达到近

70m,致使上游来水流速减缓,且悬浮物得到有效地沉降,水体透明度显著升高,最终导致湖区及其下游的水体营养指数值要低于上游及入湖口.

### 3.3 镜泊湖浮游藻类与环境因子相关分析

研究表明,pH 值、水温、溶解氧、总氮、透明度、总磷、氨氮、生化需氧量以及化学需氧量均能成为影响浮游藻类群落分布的主要环境因子<sup>[6,22-28]</sup>,本研究结果显示,水温、DO、SD、COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>3</sub>-N 是影响镜泊湖浮游藻类群落分布的主要因子.作为北方寒冷性湖泊,镜泊湖不同季节以及昼夜的水温差异显著,因此,水温必然成为藻类生长的限制因子,这在刘鸿雁等<sup>[23]</sup>、于洪贤等<sup>[24]</sup>的研究中均有报道.藻类的生长需要光合作用,同时也需要氧气来完成呼吸作用,可见水体的 SD 与 DO 是藻类生长的两个关键影响因子,有研究表明,DO 与藻类生长呈显著正相关<sup>[29]</sup>,作为典型的通江湖泊,洞庭湖的浮游藻类也受到 DO 的限制,Arhonditsis 等<sup>[27]</sup>的研究也表明,透明度、总磷和捕食压力对浮游植物的影响最大. COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>3</sub>-N 通常作为反映点源和面源污染的两项监测指标,在本研究中,该两项指标成为影响镜泊湖浮游藻类群落分布的主要因子,于洪贤等<sup>[24]</sup>研究发现,COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>3</sub>-N 是分别影响牡丹江春季和夏季浮游藻类丰度的主要环境因子,这与本研究的结果基本一致,作为牡丹江的一部分,镜泊湖的水体营养状况直接影响到牡丹江中下游,同为通江型湖泊的洞庭湖,其浮游藻类的生长主要受到氮(尤其是氨态氮)的限制,添加氨氮能明显促进浮游藻类生物量的增加<sup>[30]</sup>,可见 NH<sub>3</sub>-N 在调控湖泊水体富营养化过程中的重要性.有调查表明<sup>[31]</sup>,镜泊湖的外源污染主要来自于上游敦化市的工业废水和生活污水、湖区周边农业用肥以及湖区内生活污水与垃圾渗滤液,其中工业废水则是 COD<sub>Mn</sub>的主要来源,而生活污水及农用肥料则是氨氮的主要贡献者.随着社会经济的继续稳步发展,人类活动更加频繁,镜泊湖的生态环境质量问题应引起有关部门重视.

## 4 结论

4.1 2013 年在镜泊湖 26 个采样位点共采集到

浮游藻类 8 门 74 属 140 种,其中绿藻门最多,共 58 种,占 41.5%。浮游藻类组成以绿藻和硅藻占优,并且藻类群落结构存在明显的时空差异,调查期间,藻的种类范围在 3~35 种,密度范围在  $0.5 \times 10^4 \sim 230.8 \times 10^4$  个/L。

4.2 调查期间,浮游藻类的 Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数以及 Pieloud 指数范围分别为 0.48~2.31,1.27~3.97,0.45~0.94,水体营养状态指数值处在 40~60 之间,总的来看,镜泊湖水体属于中营养-轻度富营养状态。

4.3 Pearson 相关分析结果显示,镜泊湖藻类群落分布受水环境因子影响明显。整体上,水温、DO、SD、COD<sub>Mn</sub> 及 NH<sub>3</sub>-N 是影响镜泊湖藻类种群分布格局的主要因素。

#### 参考文献:

- [1] 刘玉勇,周绪申,侯炳江,等.镜泊湖浮游植物多样性现状分析[J]. 黑龙江大学学报,2012,3(3):20-24.
- [2] 马成学,刘曼红,黄璞玮,等.镜泊湖枯水期和丰水期浮游植物群落结构[J]. 东北林业大学学报,2010,38(2):35-37.
- [3] 潘保原,付海全,马 云,等.镜泊湖水环境容量与水污染防治对策研究[J]. 环境科学与管理,2011,36(11):27-29.
- [4] 孙凯峰,王 娜,刘莉莉,等.基于四尾栅藻响应的有机磷农药生态风险评估[J]. 中国环境科学,2013,33(5):868-873.
- [5] 董旭辉,羊向东,王 荣.长江中下游地区湖泊富营养化的硅藻指示性属种[J]. 中国环境科学,2006,26(5):570-574.
- [6] 汪 星,郑丙辉,刘录三,等.洞庭湖典型断面藻类组成及其与环境因子典范对应分析[J]. 农业环境科学学报,2012,31(5):995-1002.
- [7] 国家环保总局.水和废水监测分析方法[M]. 第四版.北京:中国环境出版社,2002.
- [8] 齐雨藻,李家英.中国淡水藻志[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [9] 徐金森,郑天凌,郭清华,等.两种海洋细菌对赤潮藻的细胞生物量的影响研究[J]. 海洋科学,2002,26(12):57-60,67.
- [10] Aksnes D L, Wassmann P. Modeling the significance of zooplankton grazing for export production[J]. Limnology and Oceanography, 1993,38(5):978-985.
- [11] Lampitt R S, Wishner K F, Turley C M, et al. Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean: distribution, composition and role as a food source for migrating plankton[J]. Marine Biology, 1993,116(4):689-702.
- [12] 王明翠,刘雪芹.湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测,2002,18(5):47-49.
- [13] 陈立群,王友联,王全喜,等.镜泊湖的浮游藻类及水质评价[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报,1994,10(1):80-84.
- [14] 张新刚,冷雪莲,于洪贤.镜泊湖水环境质量综合评价及保护对策探讨[J]. 水利渔业,2007,27(4):55-56.
- [15] 宋 辞,于洪贤.镜泊湖浮游植物多样性分析及水质评价[J]. 东北林业大学学报,2009,(4):40-42.
- [16] 陈格君,周文斌,胡春华.鄱阳湖五河入湖口浮游藻类及营养现状评价[J]. 湖北农业科学,2013,52(9):2048-2052.
- [17] 庞清江,李白英.东平湖水体富营养化评价[J]. 水资源保护,2003,19(5):42-44.
- [18] Mark William Matthews. Eutrophication and cyanobacterial blooms in South African inland waters: 10years of MERIS observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2014,155:161-177.
- [19] 董慧文.镜泊湖水质的曹养特征及变化趋势分析[J]. 黑龙江环境通报,2005,29(2):18-19.
- [20] 刘曼红,马成学,左彦东,等.镜泊湖大型底栖动物群落调查[J]. 水生态学杂志,2009,2(4):1-7.
- [21] 刘玉勇,周绪申.镜泊湖水水质及富营养化状况分析[J]. 东北水利水电,2013,31(8):57-58.
- [22] 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[J]. 湖泊科学,2008,20(1):773-779.
- [23] 刘鸿雁,徐云麟.镜泊湖藻类生长和湖泊富营养化预测初探[J]. 生态学报,1996,16(2):195-201.
- [24] 于洪贤,曲 翠,马成学.牡丹江浮游植物丰度与环境因子的相关性分析[J]. 湿地科学,2008,6(2):293-297.
- [25] Jiang Y J, He W, Liu W X, et al. The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in a large eutrophic chinese lake (Lake Chaohu)[J]. Ecological Indicators, 2014,40:58-67.
- [26] 潘继征,熊 飞,李文朝,等.云南抚仙湖透明度的时空变化及影响因子分析[J]. 湖泊科学,2008,20(5):681-686.
- [27] Arhonditsis G B, Winder M, Brett MT et al. Patterns and mechanisms of phytoplankton variability in Lake Washington (USA). Water Research, 2004,38:4013-4027.
- [28] 杨丽标,韩小勇,孙 璞,等.巢湖藻类组成与环境因子典范对应分析[J]. 农业环境科学学报,2011,30(5):952-958.
- [29] 游 亮,崔莉凤,刘载文,等.藻类生长过程中 DO、pH 与叶绿素相关性分析[J]. 环境科学与技术,2007,30(9):42-45.
- [30] 李利强,黄代中,熊 剑,等.洞庭湖浮游植物增长的限制性营养元素研究[J]. 生态环境学报,2014,23(2):283-288.
- [31] 李淑芹.镜泊湖水环境质量现状分析与评价[J]. 黑龙江环境通报,2013,37(4):88-90.

作者简介:汪 星(1983-),男,湖北荆州人,副研究员,博士,主要从事水生生物评价的研究.发表论文 20 余篇。