

# 基于 CCA 的典型调水水库浮游植物群落动态特征分析

李秋华 韩博平\*

(暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

**摘要** 调水水库是一类特殊的水体,其浮游植物群落的组成与动态的调节机制与其它水库存在较大的差别。为了解这类水库浮游植物群落的特征,于 2005 年 1 月~12 月,对位于广东省珠海市的调水型供水水库——大镜山水库的浮游植物和相关的理化因子进行了 2 周 1 次的采样。全年共检测到浮游植物 100 种(属)浮游植物丰度在  $0.86 \sim 106.27 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$  之间,生物量在  $1.08 \sim 20.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间变化,全年以假鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.)为主要优势藻,肘状针杆藻(*Synedra ulna*)在冬春为次优势藻,浮游植物群落相对比较稳定。运用典范对应分析(CCA)方法对浮游植物群落的组成及动态与环境因子之间的关系进行了分析和探讨。样品(cases)的 CCA 分析表明,全部的样品分布在主轴 1 和主轴 2 构成的 4 个象限内,与四季相对应,样品在 4 个象限的分布并不均匀,反映了热带水库所处的气候四季不分明,冬春季很短,夏秋季较长,但夏秋与冬春有较为明显的分割;蓝藻门、裸藻门和硅藻门的藻类主要分布在夏、秋季所对应的象限内,而绿藻门的大部分,金藻门和隐藻门的藻类分布在冬、春季所对应的象限内。水温和降雨量是大镜山水库浮游植物群落结构动态的主要驱动因子,降雨量不仅影响水库水位,同时直接影响调水量和入库的营养盐负荷。

**关键词** 浮游植物;环境因子;典范对应分析;调水水库

文章编号:1000-0933(2007)06-2355-10 中图分类号:Q178,Q948.8 文献标识码:A

## Structure and dynamics of phytoplankton community based CCA analysis in a pumped storage reservoir

LI Qiu-Hua, HAN Bo-Ping\*

Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (6) 2355 ~ 2364.

**Abstract** : In pumped storage reservoir, the phytoplankton community is regulated in a distinct way from that in the other types of reservoirs. To study its dynamics, we biweekly sampled the phytoplankton in Dajinshan Reservoir in 2005. Dajinshan Reservoir, is in the northern part of the in tropics in Guangdong Province. It is a typical pumped storage reservoir. 100 taxa were identified. Phytoplankton had an abundance ranging from  $0.86 \times 10^6$  to  $106.27 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ , and total biomass varied from  $1.08$  to  $20.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . The phytoplankton community was dominated by *Pseudanabaena* sp. across all the sampling year. *Synedra ulna* had a high biomass in spring only. The composition of phytoplankton community was highly stable. Canonical correspondence analysis was used to investigate the environment-phytoplankton relationship. Case ordination by CCA divided all samples into four groups, distributed in the four districts forming axis 1 and axis 2, corresponding to the seasons: winter, spring, summer and autumn. Most samples were located in the districts of

基金项目 国家教育部“优秀青年教师资助计划”资助项目 珠海重大科技资助项目(PC20052040)

收稿日期 2006-08-30;修订日期 2007-03-05

作者简介 李秋华(1977~)男,博士生,主要从事水域生态学及水环境修复研究。E-mail: qiuhua2002@126.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tbphan@jnu.edu.cn

致谢: Henri J. Dumont 教授对本文的修改给予帮助,在此表示衷心的感谢。

**Foundation item** : The project was financially supported by the Chinese Education Ministry Grant and Great Science Project of Zhuhai (No. PC20052040)

**Received date** 2006-08-30; **Accepted date** 2007-03-05

**Biography** LI Qiu-Hua, Ph. D. candidate, mainly engaged in field in aquatic ecology. E-mail: qiuhua2002@126.com

summer and autumn ,and 54 main species were selected for performing of a CCA. The Cyanophyta , Bacillariophyta and Euglenophyta were restricted to the districts at the left of axis 1 , While most of the Chlorophyta , Chrysophyta , and Cryptophyta were at the right of axis 1. Temperature and precipitation were the most important factors regulating the composition and dynamics of the community.

**Key Words :** phytoplankton ; environmental factors ; canonical correspondence analysis ; a pumped storage reservoir

在水库等水体中 ,浮游植物群落的种类组成和数量结构的变化具有一定规律 ,其变化规律主要受相关的物理、化学和生物等环境因子的影响<sup>[1,2]</sup>。在不同类型的水库中 ,起主导作用的环境因子 ,在不同的时期的作用也有差别。一般而言 ,营养盐和水温是影响浮游植物生长的关键因子<sup>[3,4]</sup> ,但其它物理和化学以及生物因子也能够通过一定方式和过程影响水温和营养盐在水体中的分布。水温的高低主要由水体的经纬度所决定 ,在热带地区 ,水温常年较高 ,深水水体中容易出现热分层 ,从而影响水层之间的营养盐交换 ,特别依赖于内源营养盐的水体。水温的季节变化在直接影响浮游植物生长的同时 ,也会影响水体的其它物理和化学因子 ,进一步影响浮游植物种类和数量组成。水体的水动力学特征在很大程度上也能影响浮游植物的种类组成和数量<sup>[5-8]</sup> ,通常认为水力滞留时间是测度水体动力学特征的宏观变量。在一个特定的水体中 ,入库水量如降水能够影响水库的滞留时间 ,这种水动力学的变化也可以由水库水位的变化所体现。在富营养化水体中 ,浮游植物以蓝藻为优势类群 ,这反映了营养盐浓度的作用 ,但优势蓝藻的种类则与水体的水动力有关。在深水的长滞留时间的水体中 ,微囊藻容易成为优势种并发生水华<sup>[9-11]</sup>。在一个水体中 ,浮游植物种类较多 ,浮游植物群落结构与动态是多个环境因子在时间和空间序列上作用的结果 ,如何认识特定水体中浮游植物群落的组成与动态是一个相当复杂的问题 ,目前还缺少一致的理论来解释所观察到的现象<sup>[1]</sup>。不同的统计方法 ,如主成份 (PCA) 、典范对应分析 (CCA) 等广泛用于多因子作用下的浮游植物群分析<sup>[12-14]</sup>。CCA 分析因具有能同时结合多个环境因子 ,包含的信息量大 ,结果明确、直观、效果好等优点而受到重视。CCA 提供分析浮游植物群落与环境因子间复杂关系的工具<sup>[2,15-17]</sup>。

大镜山水库是广东省珠海市区供水系统和澳门行政特别区的重要水源之一 ,总库容为  $12.10 \times 10^6 \text{ m}^3$  ,集雨面积为  $5.95 \text{ km}^2$  ,年调节水量为  $49.015 \times 10^6 \text{ m}^3$  ,水库以调节生活用水为主。大镜山水库无入库河流 ,集雨和从河流调水是入库水量的主要来源。大镜山水库降雨主要集中在 5~8 月 ,多年平均降雨量为 1991mm。本文运用 CCA 方法分析和探讨了大镜山水库浮游植物种类组成与环境因子之间的关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点的位置和频率

在 2005 年 1 月至 12 月对大镜山水库采样 ,每 2 周采样一次。根据大镜山水库的库盆特点设置 4 个采样点 ,分别是 S1 (N 22° 18' 03. 0" ,E113° 32' 28. 4" ) ,S2 (N22° 18' 08. 5" ,E113° 32' 49. 6" ) ,S3 (N22° 17' 42. 5" ,E113° 33' 04. 4" ) ,S4 (N22° 17' 43. 1" ,E113° 32' 59. 4" ) ,其中 S1 为库尾 ,水流较缓 ,受外界的干扰较少 ,S2 为库中 ,而 S3 和 S4 位于大坝附近 ,S3 为水库出水口 ,S4 为水库入水口 ,调水主要从 S4 进入水库 ,外界对 S3 和 S4 干扰相对较大。

### 1.2 实验方法

用 YSI 水质仪现场测定水温 (Temperature) ;用萨克斯盘测定透明度 (Secchi disk depth ,SD) ;用 pH S-3C 酸碱度计测定水体的 pH 值。水化指标总磷 (Total phosphate ,TP) 、总氮 (Total nitrogen ,TN) 、正磷酸

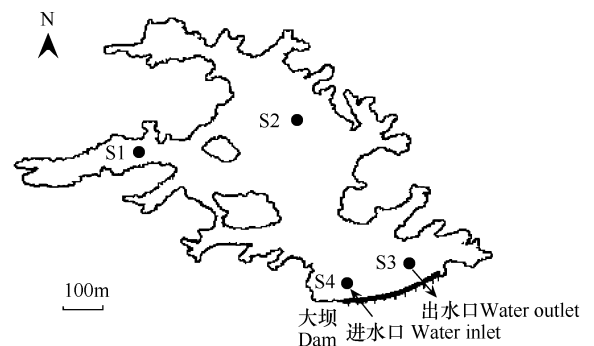


图 1 大镜山水库示意图及采样点的位置

Fig. 1 Map of Dajingshan Reservoir with the four sampling sites  
采样点 Sites S1 S2 S3 S4 ;下同 the same below

(Orthophosphate,  $PO_4\text{-P}$ )、硝氮 (Nitrate nitrogen,  $NO_3\text{-N}$ )、亚硝氮 (Nitrite nitrogen,  $NO_2\text{-N}$ )、氨氮 (Ammonia nitrogen,  $NH_4\text{-N}$ ) 按照国家水质标准方法 GB3838-2002 进行实验。降雨量 (Precipitation) 和水位 (Water-level) 采用全自动监测仪测定。浮游植物定量样品在表层 0.5m 处采取 1L 水样, 用福尔马林固定<sup>[8~19]</sup>, 浓度为 5% 在实验室浓缩沉淀。浮游植物定量样品在显微镜下进行鉴定和计数。

### 1.3 数据分析

数据统计分析采用软件 SPSS 13.0 分析 利用 CANOCO 软件包进行 CCA 分析。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, 为了浮游植物丰度的数据获得正态分布, 将浮游植物丰度值采用  $\log_{10}(x+1)$  进行处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 环境因子

#### 2.1.1 水文动态

大镜山水库是一座调水型水库, 除 12 月份外, 全年每月的供水量较为稳定, 调水主要发生在降雨量较低的枯水期。丰水期开始后, 调水入库减少。水库水位在 4~6 月份水位达到最低值, 最低水位为 15.23m, 5 月开始降雨量增加, 水位也开始逐渐上升。9 月份以后, 一方面为了保证在枯水期城市供水, 另一方面咸潮来临, 增加淡水的蓄水量, 调水入库量超过水库的供水量, 这样在 10~11 月份水位达到最高值, 为 20m (图 2)。大镜山水库地处热带北缘, 降雨受季风的影响, 主要集中在每年的梅雨时期也就是在 5~8 月份, 此阶段降雨量占全年降雨量的 82.8%, 而其他时期很少降雨或几乎没有降雨, 但是在 2005 年 11 月有一次较大的降雨, 降雨量为 142mm。

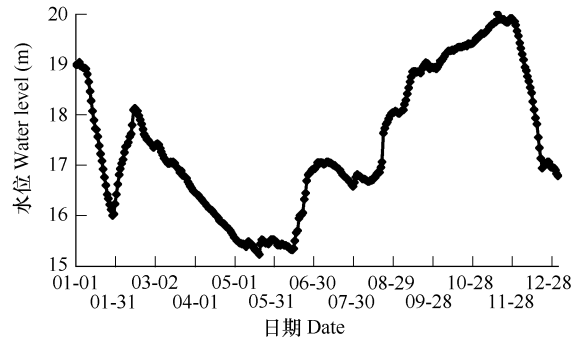


图 2 2005 年大镜山水库水位动态

Fig. 2 Water level dynamics in Dajingshan Reservoir in 2005

#### 2.1.2 理化动态

大镜山水库位于热带北缘, 水体温度常年较高, 最低水温不高于 15℃, 在 3 月末出现明显的热分层。水库总氮的浓度在 0.180~2.050  $mg \cdot L^{-1}$  之间变化, 而总磷的浓度在 0.010~0.084  $mg \cdot L^{-1}$  之间变化。通过显著性检验可以看出总氮和总磷浓度各点之间无显著性差异, 具有相似的变化趋势。营养盐浓度整体上表现出了冬春季明显要高于夏秋季, 以 7、8、9 月份水体营养盐的浓度最低。硝氮是大镜山水库无机氮的主要组成, 其浓度在 0~0.980  $mg \cdot L^{-1}$ , 而亚硝氮和氨氮的浓度相对较低, 正磷酸的浓度在 0~0.023  $mg \cdot L^{-1}$  之间 (图 3)。

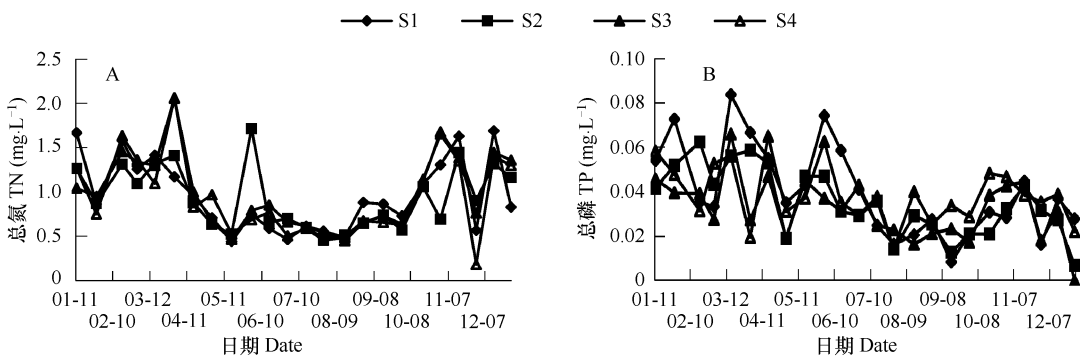


图 3 2005 年大镜山水库总氮 (A) 和总磷 (B) 浓度的变化

Fig. 3 Dynamics of nutrients in 2005: (A) Total nitrogen (TN); (B) Total phosphorus (TP)

## 2.2 浮游植物种类组成与数量分布

### 2.2.1 浮游植物种类组成

调查期间 24 次采样共检测到浮游植物 100 种 (属), 分属 7 门。浮游植物主要是由绿藻门、蓝藻门和硅藻门的藻类组成。绿藻门的藻类有 49 种 (属), 占 49%, 蓝藻门的藻类有 19 种 (属), 占 19%, 硅藻门的藻类有 23 种 (属), 占 23%。甲藻门、金藻门各 2 种, 裸藻门 4 种, 隐藻门 1 种。从浮游植物组成的动态来看, 每次采样的样品中浮游植物的种数在 50 种左右, 而在 9 月浮游植物的种类最多, 为 67 种 (属)。

### 2.2.2 浮游植物丰度

从图 4. A 可以看出大镜山水库 4 个采样点的浮游植物丰度变化趋势基本一致, 浮游植物丰度在  $0.86 \sim 106.27 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$  之间。浮游植物的丰度在 4 月初和 11 月中旬出现了明显的二个高峰值; 在 4、5、6、7 月份浮游植物丰度有较大的波动; 在 8 月、9 月和 10 月份, 浮游植物的丰度最低而且变化较小, 各采样点之间的区别不大。以水库 S4 号点为例 (图 4. B), 大镜山水库蓝藻门藻类的丰度组成了浮游植物的主要丰度, 最高时所占比例达到 99%, 最低也超过 50%。在 1~3 月份, 硅藻的丰度较高, 最多占总丰度的 41%。但是在 3 月以后, 蓝藻在丰度上占绝对优势。

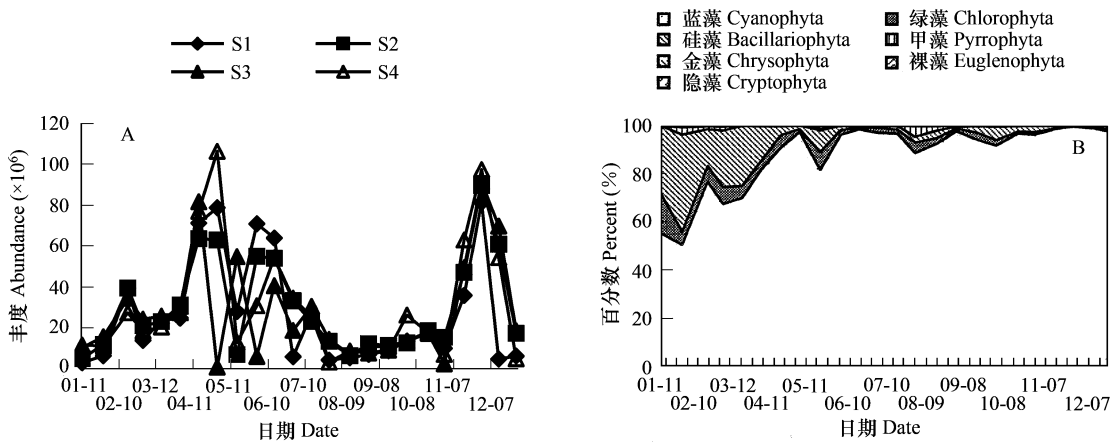


图 4 大镜山水库浮游植物丰度和组成

Fig. 4 Phytoplankton abundance and composition in Dajingshan Reservoir in 2005

A) 4 个采样点; B) S4 采样点浮游植物丰度组成 A) at 4 sampling sites; B) composition of phytoplankton abundance at S4

### 2.2.3 浮游植物生物量的动态变化

浮游植物生物量在  $1.08 \sim 20.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间, 与丰度的变化具有相似的趋势。在 2、3、4 月份大镜山水库浮游植物的生物量最高, 而在 8 月、9 月和 10 月份生物量最低, 在 2 月和 11 月份出现了两次高峰。4 个采样点之间在 4~7 月份变化较大, 而其它月份各点之间区别较小。图 5. B 为采样点 S4 上的浮游植物生物量的组成, 可以明显分成两个不同的阶段, 在 4 月份前, 浮游植物生物量主要由硅藻和蓝藻组成; 4 月后, 浮游植物生物量则主要由蓝藻构成。但在 8 月份甲藻门藻类的生物量也占了水库生物量较大比例。在 1~4 月份硅藻的丰度低于蓝藻门的丰度, 但其生物量则超过了蓝藻; 在 3 月中旬, 硅藻生物量最高时占总生物量的 68.26%。

## 2.3 浮游植物群落与环境因子关系的 CCA 分析

典范相应分析提供分析浮游植物群落组成与环境因子之间对应关系的工具。在环境因子特征变量构成的空间上, 对环境变量和浮游植物等排序作图, 实现了浮游植物与环境因子的对应排序。在由主轴 1 和主轴 2 构成的平面中, 箭头表征了环境因子在平面上的相对位置, 向量长短代表了其在主轴中的作用, 箭头所处象限表示环境因子与排序轴之间相关性的正负<sup>[6]</sup>。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。

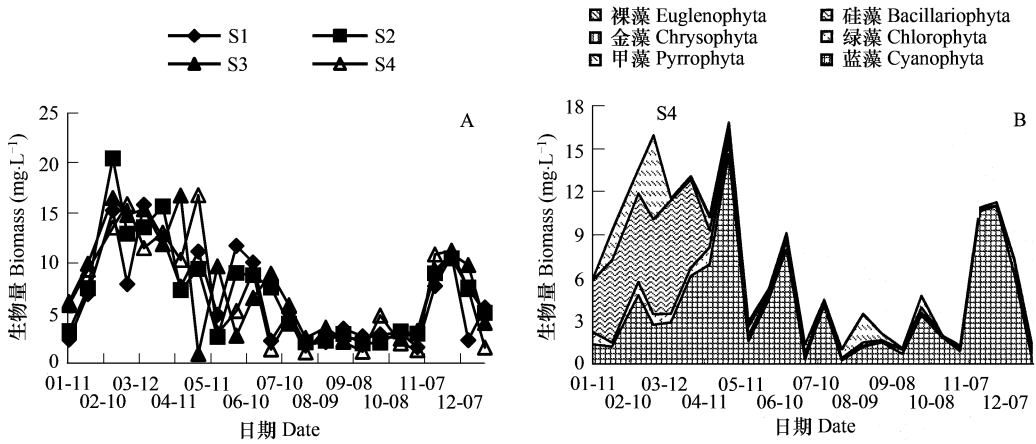


图 5 大镜山水库浮游植物生物量动态

Fig. 5 Dynamics of phytoplankton biomass in Dajingshan Reservoir

A) 4 个采样点 ;B) S4 采样点浮游植物生物量组成 A) Different sites ;B) Composition of phytoplankton biomass at S4 site

2.3.1 采样样品的 CCA 排序

表 1 列出了大镜山水库浮游植物群落 CCA 分析的统计信息,可以看出,各点轴 1 的特征值大于其它各轴的特征值,轴 1 贡献的百分数、方差累计贡献百分数、特征值累计百分数的值都比轴 2 的要高。在浮游植物种类与环境因子之间的相关系数中,可以看到各点轴 1 和轴 2 的相关性都很高,在 S4 采样点,轴 1 中浮游植物种类与环境因子的相关性达 0.971,其它各点也在 0.9 以上。

表 1 大镜山水库浮游植物群落 CCA 分析的统计信息

Table 1 Summary statistics for the first two axes of CCA performed on phytoplankton at Dajingshan Reservoir

| 轴 Axis<br>采样点 Sites                               | Axis 1 |       |       |       | Axis 2 |       |      |        |
|---|--------|-------|-------|-------|--------|-------|------|--------|
|   | S1     | S2    | S3    | S4    | S1     | S2    | S3   | S4     |
| 特征值 Eigenvalues                                   | 0.145  | 0.199 | 0.17  | 0.16  | 0.073  | 0.08  | 0.08 | 0.063  |
| 百分数 Percentage                                    | 18.77  | 22.3  | 18.72 | 18.57 | 9.52   | 8.929 | 8.73 | 7.266  |
| 特征值累计百分数 Cum. Percentage<br>for eigenvalue        | 18.77  | 22.3  | 18.72 | 18.57 | 28.29  | 31.22 | 27.4 | 25.832 |
| 方差累计贡献百分数 Cum. Constr. Percentage<br>for variance | 31.98  | 37.37 | 31.9  | 34.83 | 48.2   | 52.34 | 46.8 | 48.459 |
| 浮游植物种类与环境因子相关性 Spec.<br>-env. correlations        | 0.959  | 0.966 | 0.969 | 0.971 | 0.961  | 0.953 | 0.94 | 0.917  |

全年共有 24 次采样,每一采样点有 24 个样品,分别对 4 个采样点的样品进行 CCA 排序,从图 6 可以看出,水库全年 4 个采样点的样品在环境因子上的分布均与季节一致,分布在由轴 1 和轴 2 构成的 4 个象限,分别对应春、夏、秋、冬 4 个季节。大镜山水库处于热带地区,四季并不分明,冬季很短,位于这一时期的样品只有 2~3 个,多数样品分布在夏秋季节。相对而言,夏秋与冬春有较为明显的分割。

2.3.2 主要浮游植物种类的丰度和环境因子的 CCA 排序

根据浮游植物丰度和出现的频率,对 4 个采样点分别选取了 54 种浮游植物,表 2 给出了这些浮游植物的代码,这些浮游植物丰度占整个水库浮游植物丰度的 99.9%。浮游植物与环境因子之间对应关系见图 7。

4 个采样点均有温度 (TEMP) 和降雨量 (PREC) 与轴 1 呈负相关,而总磷 (TP)、总氮 (TN)、硝氮 (NO<sub>3</sub>-N) 和亚硝氮 (NO<sub>2</sub>-N) 与轴 1 呈正相关。在 S1 点,水位 (W-level) 和透明度 (SD) 与轴 2 呈负相关;在 S2 点,水位与轴 2 呈正相关,pH 值与轴 2 呈负相关。在 S3 点,水位与轴 2 呈负相关,正磷酸和 pH 值与轴 2 呈正相关;在 S4 点,水位与轴 2 呈正相关,正磷酸和 pH 值与轴 2 呈负相关。

由图 7 反映的大镜山水库 S1、S2、S3 和 S4,4 个采样点浮游植物种类和环境因子之间的关系,4 个采样点

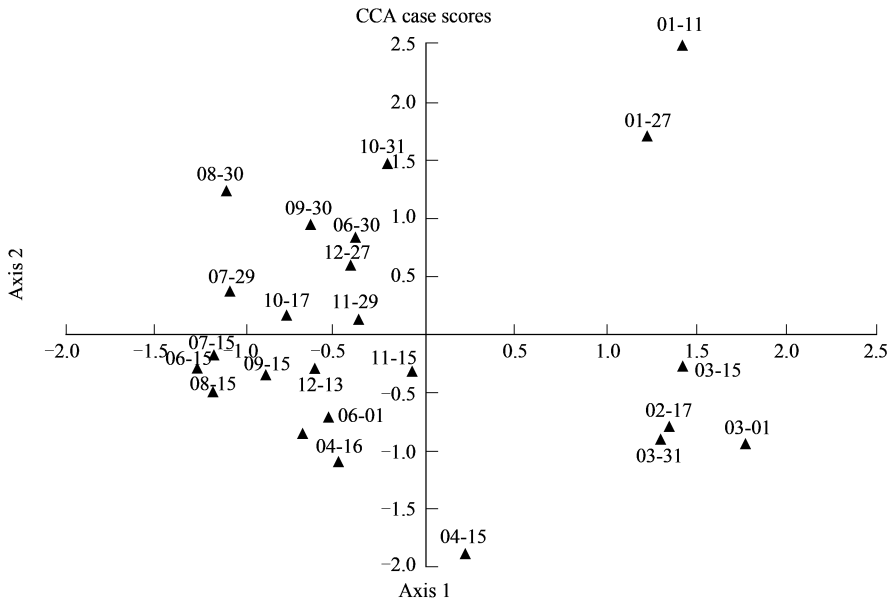


图 6 大镜山水库浮样品的双轴等级排列

Fig. 6 Ordination biplot of cases in Dajingshan Reservoir

表 2 CCA 分析中的浮游植物种类代码

Table 2 Codes of phytoplankton species for CCA

| 编号 Code | 蓝藻门 Cyanophyta   | 编号 Code | 绿藻门 Chlorophyta   |
|---------|--|---------|---|
| C1      | 假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp.                                | A12     | 镰形纤维藻 <i>Ankistrodesmus falcatus</i>                        |
| C2      | 鱼腥藻 <i>Anabaena</i> sp.                                      | A13     | 双对栅藻 <i>Scenedesmus bijuga</i>                              |
| C3      | 拟柱孢藻 <i>Cylindropermopsis</i> sp.                            | A14     | 四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>                         |
| C4      | 针晶蓝纤维藻 <i>Dactylococopsis raphidioide</i>                    | A15     | 二形栅藻 <i>Scenedesmus dimorphus</i>                           |
| C5      | 银灰平裂藻 <i>Merismopedia glauca</i>                             | A16     | 单角盘星藻 <i>Pediastrum simplex</i>                             |
| C6      | 隐球藻 <i>Aphanocapsa</i> sp.                                   | A17     | 单角盘星藻具孔变种 <i>Pediastrum simplex</i> var. <i>duodenarium</i> |
| C7      | 色球藻 <i>Chroococcus</i> sp.                                   | A18     | 凹顶鼓藻 <i>Euastrum ansatum</i> sp.                            |
| C8      | 腔球藻 <i>Coelosphaerium</i> sp.                                | A19     | 厚变浮游角星鼓藻 <i>Staurastrum natator</i>                         |
| C9      | 湖丝藻 <i>Limnithrix</i> sp.                                    | A20     | 微小四角藻 <i>Tetraedron minimum</i>                             |
| C10     | 尖头藻 <i>Raphidiopsis</i> sp.                                  | A21     | 四足十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i>                          |
| C11     | 林氏藻 <i>Lyngbya</i> sp.                                       | A22     | 十字藻 <i>Crucigenia apiculata</i>                             |
|         | 硅藻门 Bacillariophyta  | A23     | 单刺四星藻 <i>Tetrastrum hastiferum</i>                          |
| B36     | 梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>                         | A24     | 四孢藻 <i>Tetraspora lacustris</i> sp.                         |
| B37     | 肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i>                                    | A25     | 小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>                               |
| B38     | 曲壳藻 <i>Achnanthes</i> sp.                                    | A26     | 小空星藻 <i>Coelastrum microporum</i>                           |
| B39     | 颗粒钩链藻 <i>Aulacoseira granulata</i>                           | A27     | 韦斯藻 <i>Estellia botryoides</i>                              |
| B40     | 模糊直链藻 <i>Melosira ambigua</i>                                | A28     | 微茫藻 <i>Micractinium pusillum</i>                            |
| B41     | 湖沼圆筛藻 <i>Coscinodiscus lacustris</i>                         | A29     | 多芒藻 <i>Golenkinia radiata</i>                               |
| B42     | 异极藻 <i>Gomphonema</i> sp.                                    | A30     | 月牙藻 <i>Selenastrum</i> sp.                                  |
| B43     | 舟形藻 <i>Navicula Bory</i> sp.                                 | A31     | 衣藻 <i>Chlamydomonas</i> sp.                                 |
| B44     | 羽纹藻 <i>Pinnularia</i> sp.                                    | A32     | 四角藻 <i>Tetraedron</i> sp.                                   |
| B45     | 平板藻 <i>Tabellaria</i> sp.                                    | A33     | 杂球藻 <i>Pleodorina californica</i>                           |
| B46     | 颗粒直链藻最窄变种 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i> | A34     | 长绿梭藻 <i>Chlorogonium elongatum</i>                          |
| B47     | 桥弯藻 <i>Cymbella</i> Ag. sp.                                  | A35     | 斜生栅藻 <i>Scenedesmus obliquus</i>                            |
|         | 裸藻门 Euglenophyta   | A36     | 空球藻 <i>Eudorina elegans</i> Ehr.                            |
| E51     | 囊裸藻 <i>Trachelomonas</i> sp.                                 | A37     | 粘四集藻 <i>Palmella mucosa</i>                                 |
| E52     | 扁裸藻 <i>Phacus</i> sp.  | A39     | 不朗葡萄酒藻 <i>Botryococcus braunii</i>                          |
| E53     | 尾裸藻 <i>Euglena caudata</i> sp.                               |         | 甲藻门 Pyrrophyta  |
|         | 金藻门 Chrysophyta  | P47     | 飞燕角甲藻 <i>Ceratium hirundinell</i>                           |
| D49     | 分歧锥囊藻 <i>Dinobryon divergens</i>                             | P48     | 多甲藻 <i>Peridinium</i> sp.                                   |
| D50     | 鱼鳞藻 <i>Mallomonas</i> sp.                                    |         | 隐藻门 Cryptophyta   |
|         |  | F54     | 隐藻 <i>Cryptomonas</i> sp.                                   |



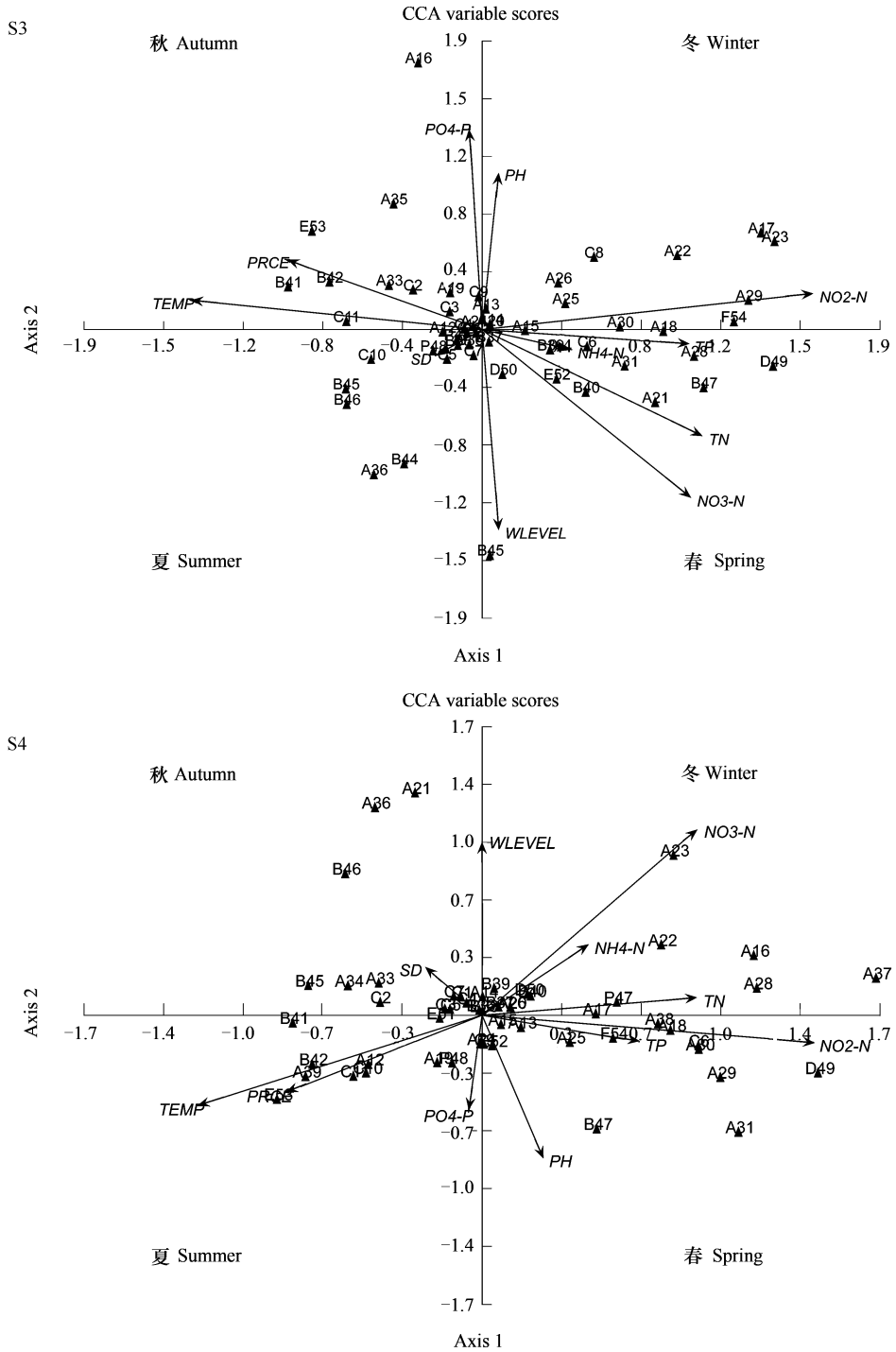


图7 大镜山水库浮游植物种类与环境变量之间的双轴等级排列

Fig. 7 Ordination biplots of species and environmental variables in Dajingshan Reservoir

浮游植物缩写代码见表2 Phytoplankton species abbreviations are listed in Table 2 ;TEMP : Temperature ;PREC : Precipitation ;WLEVEL : Water-level

3 讨论

3.1 浮游植物群落结构的动态特征

大镜山水库是一个富营养化程度较高的热带水体,浮游植物群落在种类和数量组成上具有相应的特点。24次采样中共有大约100种(属),每次采样浮游植物种数在50种左右。蓝藻为绝对的优势类群,优势藻类



较单一,以假鱼腥藻为主,全年浮游植物群落的生物量结构简单,假鱼腥藻的生物量占浮游植物总生物量的 50% 至 99%,全年没有发生浮游植物优势种类的更替。浮游植物生物量组成变化最大的时期为冬春季,这时由于硅藻生物量增加,降低了蓝藻生物量的比例,但没有改变蓝藻的优势地位。通常,水库水量的来源主要由降雨导致集水区大量汇由河流入库,不仅导致了水位的变化,也增加了入库的营养盐负荷,水库水位在丰水期末达到最高值,浮游植物生物量则在丰水期中期达到最高<sup>[20,21]</sup>。大镜山水库的浮游植物的丰度较高,全年一半以上的时间超过了  $10^7 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ ,浮游植物生物量最高时超过了  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。浮游植物生物量的最高值出现在 3 月末,并在 11 月份出现次高峰,而在整个丰水期的生物量较低。大镜山水库浮游植物丰度与生物量的动态特征明显区别于其它水库,这主要与该水库为调水型水库相关。在影响浮游植物总丰度和生物量的主要环境因子中,当水力滞留时间大于 100d 时,水库与湖泊的浮游植物群落具有较高的相似性,水温和营养盐浓度成为主要因子<sup>[22]</sup>。大镜山水库的平均滞留时间约为 100d,因此营养负荷将决定生物量的高低。大镜山水库位于热带地区,水温常较高,冬季特别短,在 3 月份就已出现较为稳定的热分层。该水库的营养盐负荷主要来自外源的调水携带和内源释放,调水携带的营养盐负荷直接与调水量有关。大镜山水库的调水主要发生在枯水期,丰水期出现的营养盐浓度下降则是由调水减少导致,因此浮游植物的总生物量下降。大镜山水库浮游植物群落(种类与数量)的变化体现了典型热带调水水库的特征。

### 3.2 影响浮游植物群落的主要环境因子

大镜山水库浮游群落的种类组成相对稳定,优势种类单一,以蓝藻中的假鱼腥藻为主,硅藻中的肘状针杆藻在冬春成为次优势种,4 个采样点之间没有很大的差异,说明大镜山水库中影响浮游植物群落的环境因子在空间上具较高一致性,但在时间上有一定的变化。根据样品(Cases)的 CCA 分析,水体的理化因子(环境因子)的排序明显地分布在 4 个象限中,与春、夏、秋、冬四个季节相对应。大镜山水库位于热带北缘,没有严格意义上的冬季,四季并不分明,样品的 CCA 排序将 24 次采样的样品明显分为两组群:冬春和夏秋。环境因子的 CCA 排序中,4 个采样点上略有变化,但在两组群上的变化十分一致。在冬春,营养盐与第一主轴呈正相关,为主要贡献变量,而在夏秋季节,水温、降雨和水位则与第一主轴有很高的相关性,为主要贡献变量。主要的 54 种浮游植物丰度的排序同样具有明显的动态特征,即蓝藻和硅藻数量主要由水温、水位和降水的变化所决定,绿藻等则与营养盐的变化相一致。大镜山水库是一座典型的调水水库,除了水温,营养盐和水位等环境因子的变化均直接与调水入库量相关。大镜山水库冬季调水占了全年调水的 80% 以上,水位的变化较大,最高水位和最低水位相差 5m。水位的变化与硝氮浓度 ( $R = 0.671, P < 0.01, n = 96$ )和水体的透明度 ( $R = 0.605, P < 0.01, n = 96$ )及 pH 值 ( $R = -0.378, P < 0.01, n = 96$ )都表现有极强的相关性。CCA 排序反映了浮游植物与具体环境因子之间的对应关系,但本质上仍是对调水量作用的解析。水库作为一个受人工调节程度很高的水体,其浮游植物动态在很大程度上与水动力学有关<sup>[23-25]</sup>,但不同水库和湖泊具有不同主要影响因子。Habib<sup>[16]</sup>等阐明硅作为重要的环境因子影响着浮游植物群落,温度、溶解氧、透明度和化学好氧量对浮游植物群落影响最大;Naselli-Flores<sup>[15]</sup>研究了 Arancio 湖表明:水体温度、电导率、库容对浮游植物的影响最大,而 Rosamarina 湖中硝氮、亚硝氮和混合水深及可溶性硅对浮游植物群落影响最重要;Naselli-Flores<sup>[2]</sup>阐明了在 Sicilian 水库,富营养深度、碱度、库容变化对浮游植物的影响最大。大镜山水库作为一个特殊的热带富营养化水体,由于营养盐浓度和水温常年较高,蓝藻占优势群落结构十分稳定,浮游植物群落的变化主要表现在细胞丰度和生物量上,生物量的变化则在很大程度上由温度(影响生长速率)和降雨量(影响营养盐负荷)所决定。温度和降雨量成为大镜山水库浮游植物群落结构动态的主要驱动因子,这也反映了受季风影响的热带地区富营养化水库浮游植物的生态学特征。

### References :

- [1] Reynolds C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? *Hydrobiologia*, 1998, 369/370: 11-26.
- [2] Naselli-Flores. Phytoplankton assemblages in twenty-one Sicilian reservoirs: relationship between species composition and environmental factors.

- Hydrobiologia, 2000, 424 : 1 – 11.
- [3] Cetinic I, Viličić D, Burić Z, *et al.* Phytoplankton seasonality in a highly stratified karstic estuary (Keka, Adriatic sea). *Hydrobiologia*, 2006, 555 : 31 – 40.
- [4] Chapman B R, Ferry B W, Ford T W. Phytoplankton communities in water bodies at Dungeness, U. K. : analysis of seasonal changes in response to environmental factors. *Hydrobiologia*, 1998, 362 : 161 – 170.
- [5] Naselli-Flores L, Barone R. Importance of water-level fluctuation on population dynamics of cladocerans in a hypertrophic reservoir (Lake Arancio, south-west Sicily, Italy). *Hydrobiologia*, 1997, 360 : 223 – 232.
- [6] Tryfon E, Moustaka-Gouni M. Species composition and seasonal cycles of phytoplankton with special reference to the nanoplankton of Lake Mikri Prespa. *Hydrobiologia*, 1997, 351 : 61 – 75.
- [7] Figueredo C C, Giani A. Seasonal variation in the diversity and species richness of phytoplankton in a tropical eutrophic reservoir. *Hydrobiologia*, 2001, 445 : 165 – 174.
- [8] Kangur K, Möls T, Milius A, *et al.* Phytoplankton response to changed nutrient level in Lake Peipsi (Estonia) in 1992 – 2001. *Hydrobiologia*, 2003, 506 ~ 509 : 265 – 272.
- [9] Salmaso N. Factors effecting the seasonality and distribution of cyanobacteria and chlorophytes ; a case study from the large lakes south of the Alps, with special reference to Lake Garda. *Hydrobiologia*, 2000, 438 : 43 – 63.
- [10] Negro A I, Hoyos C D, Vega J C. Phytoplankton structure and dynamics in Lake Sanabria and Valparaiso reservoir (NW Spain). *Hydrobiologia*, 2000, 424 : 25 – 37.
- [11] Pilkaitytė R, Razinkovas A. Factors controlling phytoplankton blooms in a temperate estuary : nutrient limitation and physical forcing. *Hydrobiologia*, 2006, 555 : 41 – 48.
- [12] Parinet B, Lhote A, Legube B. Principal component analysis : an appropriate tool for water quality evaluation and management-application to a tropical lake system. *Ecological Modelling*, 2004, 178 : 295 – 311.
- [13] Singh P K, Malik A, Mohan D, *et al.* Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India) — a case study. *Water Research*, 2004, 38 : 3980 – 3992.
- [14] Camdevyren H, Demyr N, Kanik A, *et al.* Use of principal component scores in multiple linear regression models for prediction of Chlorophyll-*a* in reservoirs. *Ecological Modelling*, 2005, 181 : 581 – 589.
- [15] Naselli-Flores L, Barone R. Phytoplankton dynamics in two reservoir with different trophic state ( Lake Rosamarina and Lake Arancio, Sicily, Italy). *Hydrobiologia*, 1998, 369/370 : 163 – 178.
- [16] Habib O A, Tippett R, Murphy K J. Seasonal changes in phytoplankton community structure in relation to physico-chemical factors in Loch Lomond, Scotland. *Hydrobiologia*, 1997, 350 : 63 – 79.
- [17] Komárková J, Komárek O, Hejzlar J. Evaluation of the term monitoring of phytoplankton assemblages in a canyon-shape reservoir using multivariate statistical methods. *Hydrobiologia*, 2003, 504 : 143 – 157.
- [18] Jin X C, Tu Q Y. The standard methods in lake eutrophication investigation. Beijing : China Environmental Science Press, 1990.
- [19] Zhang S Z, Huang X F. Study method on freshwater plankton. Beijing : Science Press, 1991.
- [20] LIN Q Q, Hu R, Han B P. Effect of hydrodynamics on nutrient and phytoplankton distribution in Liuxihe Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (11) : 2278 – 2284.
- [21] Zhao M X, Lei L M, Han B P. Seasonal change in phytoplankton communities in Tangxi Reservoir and the effecting factors. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2005, 13 (5) : 386 – 392.
- [22] Straškraba M, Tundisi J G. Reservoir water quality management. International Lake Environment Committee, 1999.
- [23] Arfi R. The effects of climate and hydrology on the trophic status of Sélingué Reservoir, Mali, West Africa. *Lake & Reservoir : Research and Management*, 2003, 8 : 247 – 257.
- [24] Horn H. The relative importance of climate and nutrients in controlling phytoplankton growth in Saldenbach Reservoir. *Hydrobiologia*, 2003, 504 : 159 – 166.
- [25] Gomes L C, Miranda L E. Hydrologic and climatic regimes limit phytoplankton biomass in reservoirs of the Upper Paraná River Basin, Brazil. *Hydrobiologia*, 2001, 457 : 205 – 214.

#### 参考文献 :

- [18] 金湘灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京 : 中国环境科学出版社, 1990.
- [19] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游植物研究方法. 北京 : 科学出版社, 1991.
- [20] 林秋奇, 胡韧, 韩博平. 流溪河水库水动力学对营养盐和浮游植物分布的影响. *生态学报*, 2003, 23 (11) : 2278 – 2284.
- [21] 赵孟绪, 雷腊梅, 韩博平. 亚热带水库浮游植物群落季节变化及其影响因素分析——以汤溪水库为例. *热带亚热带植物学报*, 2005, 13 (5) : 386 ~ 392.