

南亚热带高产渔业水库——显岗水库敞水区 浮游植物群落结构的季节变化特征*

孙育平 王晓辉 胡韧 韩博平**

(暨南大学水生生物研究所 广州 510632)

摘要 显岗水库是当地重要的饮用水水源。于2008年对南亚热带高产渔业水库——显岗水库的水文、水质和浮游植物的调查,分析了该水库敞水区浮游植物群落的结构与变化特征及其影响因子。显岗水库敞水区的总氮和总磷浓度较高,平均浓度分别为 0.83 mg L^{-1} 和 0.046 mg L^{-1} ;叶绿素a浓度的变化范围为 $11.02\sim 59.34 \mu\text{g L}^{-1}$ 。共检出浮游植物129种(属),隶属7门,其中绿藻占优势,共78种,其次为蓝藻和硅藻,分别为25种和16种;丰水期的浮游植物种类数量较枯水期的高。浮游植物丰度和生物量变化范围分别为 $0.16\times 10^8\sim 7.49\times 10^8 \text{ cells L}^{-1}$ 和 $0.63\sim 5.09 \text{ mg L}^{-1}$,分别在5月、2月出现极大值,10月均具有极小值;丰水期的丰度较枯水期的高,生物量则相反。浮游植物丰度主要由蓝藻贡献,生物量则主要由硅藻贡献。拟柱孢藻*Cylindrospermopsis* sp.、假鱼腥藻*Pseudoanabeana* sp.、湖丝藻*Limnithrix* sp.、微小隐球藻*Aphanocapsa delicatissima*、针晶蓝纤维藻*Dactylococcopsis raphidioides*是主要的丰度优势种,在全年具有绝对的数量优势。小环藻*Cyclotella meneghiniana*、肘状针杆藻*Synedna ulna*、颗粒直链藻*Melosira granulata*、根管藻*Rhizosolenia longiseta*、曲壳藻*Achnanthes exigua*、微小隐球藻、假鱼腥藻、针晶蓝纤维藻是主要或常见的生物量优势种。根据统计分析,总磷、透明度、入库流量和降雨量是影响显岗水库敞水区浮游植物变化的主要非生物环境因子。图2 表3 参26

关键词 浮游植物;群落结构;丰度;生物量;季节变化;敞水区;高产渔业水库;华南地区

CLC Q178.513 : S931.3

Seasonal Variation of Phytoplankton Communities in Xiangang Reservoir, a Tropical Shallow and High-yield Fishery Reservoir in South China*

SUN Yuping, WANG Xiaohui, HU Ren & HAN Boping**

(Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract The Xiangang Reservoir is an important reservoir for drinking water supply in Guangdong, China. In order to understand seasonal dynamics of pelagic phytoplankton communities in the tropical shallow reservoirs with high fishery yield, phytoplankton, hydrological variables and water quality were investigated in the reservoir in 2008. The reservoir was eutrophic, the annual average concentrations of TN and TP were 0.83 mg L^{-1} and 0.046 mg L^{-1} , respectively, and Chla ranged from 11.02 to $59.34 \mu\text{g L}^{-1}$. A total of 129 phytoplankton species were identified. The species diversity was higher in flood season than in dry season. Chlorophyta was dominant, 78 species in total was found, followed by Cyanophyta (25 species) and Bacillariophyta (16 species). The total phytoplankton abundance ranged from 0.16×10^8 to $7.49\times 10^8 \text{ cells L}^{-1}$ and the total biomass from 0.63 to 5.09 mg L^{-1} . The maximal abundance and biomass occurred in May and February, respectively, while the minimal abundance and biomass both in October. In general, the abundance of phytoplankton was higher in flood season than in dry season, but the biomass had an opposite pattern. Cyanophyta was the most dominant group in total abundance and Bacillariophyta was the most one in total biomass. *Cylindrospermopsis* sp., *Pseudoanabeana* sp., *Limnithrix* sp., *Aphanocapsa delicatissima* and *Dactylococcopsis raphidioides* were the most abundant in distribution, and *Cyclotella meneghiniana*, *Synedna ulna*, *Melosira granulata*, *Rhizosolenia longiseta*, *Achnanthes exigua*, *Aphanocapsa delicatissima*, *Pseudoanabeana* sp. and *Dactylococcopsis raphidioides* were the most contributors of biomass. Statistically, TP, SD, inflows and precipitation played the important roles in the seasonal succession of phytoplankton community in the Xiangang Reservoir. Fig 2, Tab 3, Ref 26

Keywords phytoplankton; community structure; seasonal variation; abundance; biomass; pelagic; high-yield fishery reservoir; South China

CLC Q178.513 : S931.3

浮游植物是水库生态系统中最主要的初级生产者和基础环节,能在水体生态环境的变化作出最直接的响应^[1-2]。水体中浮游植物种类与数量的变化受到生态系统中其它因素

的影响,如营养盐的供给、浮游动物的牧食以及鱼类种类与数量等。鱼类能够借助食物网或食物链的效应直接或间接影响浮游植物的数量^[3-5]。在温带地区小型浅水水体中,鱼类对浮游植物的影响具有明显的作用^[5]。在低纬度的热带及亚热带地区,鱼类主要以滤食性的杂食性鱼类为主,它们对浮游动物具有较强的捕食能力,且全年维持较高的捕食压力,导致浮游动物数量低,从而间接地使鱼类对浮游植物的下行

收稿日期: 2009-08-12 接受日期: 2009-10-27

*国家自然科学基金项目(No. U0733007)和广东省水利厅重点项目资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U0733007) and the Department of Water Resources of Guangdong, China

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

效应减弱, 浮游植物在很大程度上受非生物环境因素的影响。显岗水库是一座典型的南亚热带浅水型渔业高产水库, 水体的营养盐水平已接近富营养化水平。目前水库投放的鱼类主要为滤食性的鲢和鳙。通常认为鲢、鳙对浮游生物具有较强的滤食能力, 尤其是鲢, 能够较为有效地在营养水平较高的水体中影响浮游植物的生物量与结构^[6-8]。随着水资源管理加强, 关于饮用水源地及后备水源地的渔业生产模式与规模存在很大的争议。为了解热带浅水型高产渔业水库——显岗水库现有渔业放养模式下浮游植物群落的结构变化特征及其影响因子, 有效监测和加强对水库富营养化的管理, 于2008年对显岗水库敞水区的浮游植物和相关理化指标进行了调查, 分析了浮游植物的特征及其与环境因子之间的关系, 旨在为南亚热带水库的渔业放养与水质管理方面积累数据和提供参考。

1 材料与与方法

1.1 水体概况与采样点

显岗水库位于珠江流域东江水系沙河支流上游的广东省博罗县境内(大坝位置, 114°07'N, 23°15'E), 于1963年建成, 平均水深6~8 m, 总库容为 1.28×10^9 m³, 坝址以上集雨面积为295 km²。该水库地处南亚热带季风气候区, 夏秋季节是台风多发季节, 多年平均气温22 °C; 雨量充沛, 多年平均降雨量为1 827 mm, 且83%的雨量集中在4~9月, 坝址断面多年

平均流量为10.5 m³ s⁻¹。采样点位于大坝处的敞水区, 于2008年进行了浮游植物的每月采样和其它水体环境因子的观测。

1.2 水样测定与分析

现场直接用萨克斯盘测定水体透明度值; 用YSI-85型水质仪测定水温等。浮游植物定性样品用25#浮游生物网(64 μm)拖取; 定量样品用有机玻璃采水器在水体表层0.5 m处采水, 取1 L水置入采样瓶中; 定性、定量样品均立即加福尔马林至终浓度3%~5%保存。水化指标总氮、总磷按标准方法^[9]测定。现场取部分体积水样经孔径为0.45 μm的醋酸纤维微孔滤膜抽滤, 避光低温冷冻保存后, 采用反复冻融-浸提改进的丙酮萃取方法进行叶绿素a含量的测定^[10]。

浮游植物种类鉴定主要参照《中国淡水藻类——系统、分类及生态》^[11]。样品沉淀、浓缩和计数处理按常规方法^[12]进行。生物量由浮游植物近似几何体积直接换算, 其中假定浮游植物的密度均为1 g cm⁻³ ^[13]。

数据处理和统计分析采用统计分析软件SPSS15.0。

2 结果

2.1 水库水质与水文状况

显岗水库水温常年较高, 敞水区水温平均达23.15 °C, 在14.61~30.70 °C间波动, 7、9月水温最高且高于30 °C; 1、2月最低。透明度在0.58~1.20 m范围内变化, 6月最大, 1月最低, 比较而言, 丰水期(夏秋季)明显高于枯水期(冬春季)

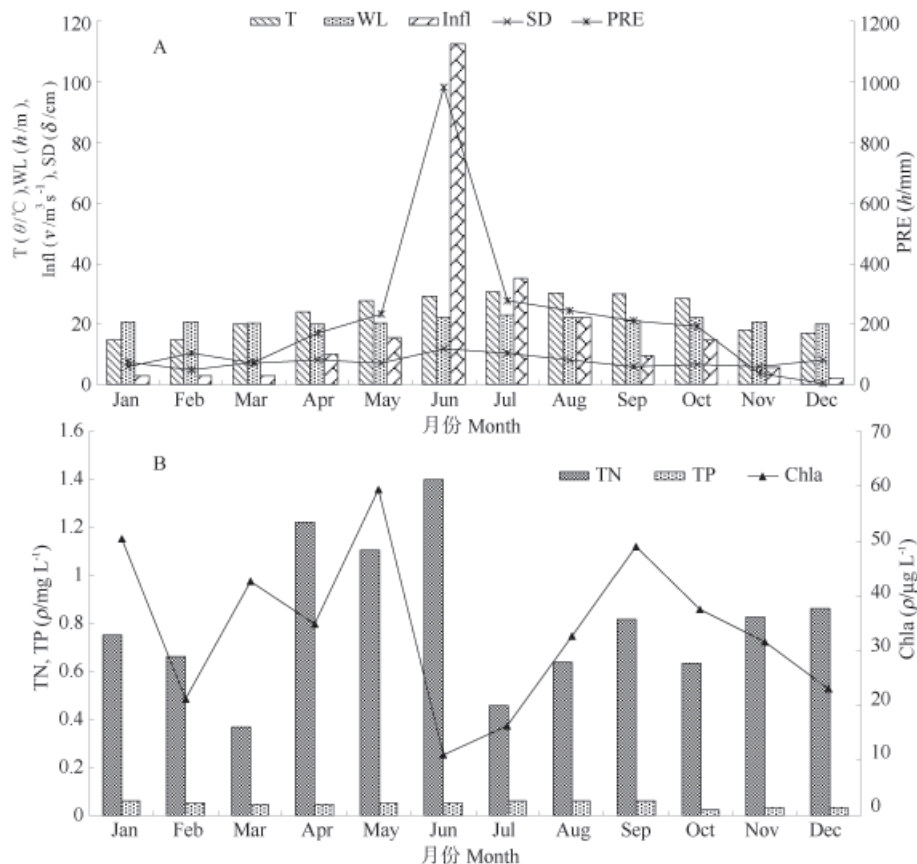


图1 2008年显岗水库敞水区环境指标变化

Fig. 1 Changes in environmental variables in the lacustrine of the Xianggang Reservoir in 2008

A: 温度、水位、入库流量、透明度和降雨量; B: 总氮、总磷和叶绿素a浓度

A: Temperature (T), water level (WL), inflows (Infl), Secchi disk depth (SD) and precipitation (PRE); B: Total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and Chla

($P < 0.05$)。受亚热带季风气候影响, 显岗水库具有明显的丰水期和枯水期, 年均降雨量208.86 mm, 6月最大, 为982.3 mm, 12月最少, 仅为2.2 mm。入库流量也具有典型的季节变化, 丰水期6月具有最大入库流量, 为 $112.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, 枯水期12月入库流量最小, 为 $2.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 。水位变化与入库流量变化相对应, 但水位的季节变化不明显($P > 0.05$) (图1-A)。

总氮和总磷变化范围分别为 $0.37 \sim 1.40 \text{ mg L}^{-1}$ 和 $0.023 \sim 0.059 \text{ mg L}^{-1}$ (图1-B), 平均浓度分别为 0.83 mg L^{-1} 和 0.046 mg L^{-1} ; 二者浓度在枯水期都较丰水期要低, 总氮、总磷分别在6月与9月达到全年最高值, 分别在3月和10月达到最低值。总氮与总磷质量比变化范围为7.82~28.03。叶绿素a浓度表现明显的季节变化, 平均值为 $34.30 \mu\text{g L}^{-1}$, 变化范围为 $11.02 \sim 59.34 \mu\text{g L}^{-1}$ 。叶绿素a浓度在4月出现极大值, 6月出现极小值。枯水期叶绿素a浓度比丰水期高, 但全年均超过 $10 \mu\text{g L}^{-1}$ 。

2.2 浮游植物的群落结构与组成

显岗水库敞水区浮游植物的种类组成季节变化较明显 (表1)。共检出浮游植物 129 种, 分别隶属于7门。其中绿藻占绝对优势, 检出78种; 其它依次为蓝藻25种、硅藻16种、甲藻4种、裸藻3种, 金藻、隐藻种类少, 共检出3种。浮游植物种类丰富度高, 3月最多, 为66种, 1月、12月最少, 为47种。3~4月所有浮游植物种类丰富度表现明显。

绿藻在3月最多可检到43种, 12月最少, 检到24种, 其中以双对栅藻 (*Scenedesmus bijugatus*)、被甲栅藻 (*S. armatus*)、四尾栅藻 (*S. quadricauda*)、齿牙栅藻 (*S. deticulatus*)、丰富栅藻 (*S. abundans*)、尖细栅藻 (*S. acuminatus*)、二形栅藻 (*S. dimorphus*)、弯曲栅藻 (*S. arcuatus*)、小球藻 (*Chlorella vulgaris*)、多芒藻 (*Golekinia radiata*)、顶锥十字藻 (*Crucigenia apiculata*)、四足十字藻 (*C. tetrapedia*)、四角十字藻 (*C. quadrata*)、集星藻 (*Actinastrum fluviatile*)、网球藻 (*Dictyosphaerium ehrenbergianum*)、卵囊藻 (*Oocstis*)、鼓藻 (*Cosmarium*)、镰形纤维藻 (*Ankistrodesmus falcatus*)、拟菱形弓形藻 (*Schroederia nitzschoides*)、四角藻 (*Tetraëdron*)、微芒藻 (*Micractinium pusillum*)、纤细月牙藻 (*Selenastrum gracile*)、角星鼓藻 (*Staurastrum*)、小空星藻 (*Coelastrum microporum*)、空星藻 (*C. reticulatum*)、月牙藻 (*S.*

bibraianum)、粗刺四刺藻 (*Treubaria crassispina*)、转板藻 (*Mougeotia* sp.) 等最为常见。其中, 被甲栅藻、双对栅藻、微芒藻常年可见, 且具有明显的相对丰度优势。蓝藻主要包括拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis* sp.)、假鱼腥藻 (*Pseudanabaena* sp.)、湖丝藻 (*Limnithrix* sp.)、微小隐球藻 (*A. delicatissima*)、针晶蓝纤维藻 (*D. raphidioides*)、微囊藻 (*Microcystis marginata*)、水华鱼腥藻 (*Anabaena flos-aquae*) 等。其中, 拟柱孢藻、湖丝藻、假鱼腥藻、针晶蓝纤维藻和微小隐球藻在调查期间的相对丰度都维持高的水平。硅藻主要由肘状针杆藻 (*Synedra ulna*)、小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*)、曲壳藻 (*Achnanthes exigua*)、颗粒直链藻 (*Melosira granulata*)、根管藻 (*Rhizosolenia longiseta*) 最为常见, 并具有明显的数量优势。甲藻常集中出现在丰水期, 主要由微小多甲藻 (*Peridinium pusillum*) 和角甲藻 (*Ceratium hirundinella*) 组成。金藻、裸藻主要出现在冬春季, 金藻仅由分歧锥囊藻 (*Dinobryon divergens*) 组成; 裸藻则以梭形裸藻 (*Euglena acus*) 为主。隐藻主要出现在夏末秋初, 具尾蓝隐藻 (*Chroomonas acuta*) 和尖尾蓝隐藻 (*C. caudata*) 是主要种。

2.3 浮游植物的数量组成变化

浮游植物丰度具有明显的季节变化, 丰水期明显高于枯水期 (图2-A)。丰度在10月最低, 为 $0.16 \times 10^8 \text{ cells L}^{-1}$, 5月最高, 为 $7.49 \times 10^8 \text{ cells L}^{-1}$, 年平均丰度为 $1.68 \times 10^8 \text{ cells L}^{-1}$ 。2~5月丰度相对较高, 在9~12月相对较低。浮游植物总丰度主要由蓝藻、绿藻和硅藻组成, 其中以蓝藻丰度最高, 在 $0.14 \times 10^8 \sim 7.42 \times 10^8 \text{ cells L}^{-1}$ 之间变化, 最大值和最小值出现时间与浮游植物总丰度相一致, 3~5月呈现明显上升趋势, 而5~12月则明显下降。绿藻和硅藻丰度具有明显的季节变化, 二者变化趋势基本相似, 年均丰度分别为 $0.019 \times 10^8 \text{ cells L}^{-1}$ 和 $0.018 \times 10^8 \text{ cells L}^{-1}$, 在5月、2月分别达到最大值, 为 $0.040 \times 10^8 \text{ cells L}^{-1}$ 、 $0.036 \times 10^8 \text{ cells L}^{-1}$, 而12月和10月出现最小值, 为 $0.0082 \times 10^8 \text{ cells L}^{-1}$ 、 $0.0042 \times 10^8 \text{ cells L}^{-1}$ 。其它如甲藻、裸藻、金藻和隐藻丰度较低, 但季节变化明显 ($P < 0.05$), 甲藻、裸藻、金藻丰度在丰水期都明显低于枯水期, 而隐藻与此相反。甲藻丰度主要出现在4~8月, 裸藻在3月具有最高值, 12月金藻具有最大值, 2月隐藻的最高丰度为 $0.022 \times 10^8 \text{ cells L}^{-1}$ 。

生物量的组成变化具有明显的季节性 (图2-B)。浮游植物生物量在 $0.63 \sim 5.09 \text{ mg L}^{-1}$ 之间波动, 2月出现最大

表1 显岗水库敞水区浮游植物种类组成变化

Table 1 Species composition of phytoplankton in the lacustrine of the Xiangang Reservoir

| 月份 Month | 蓝藻 Cyanophyta | 绿藻 Chlorophyta | 硅藻 Bacillariophyta | 甲藻 Pyrrophyta | 裸藻 Euglenophyta | 金藻 Chrysoophyta | 隐藻 Cryptophyta | 合计 Total |
|-------------|------------------|-------------------|-----------------------|------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------|
| Jan | 10 | 29 | 6 | 1 | 1 | 0 | 0 | 47 |
| Feb | 11 | 28 | 10 | 3 | 0 | 1 | 1 | 55 |
| Mar | 10 | 43 | 8 | 3 | 2 | 0 | 0 | 66 |
| Apr | 14 | 36 | 7 | 3 | 0 | 0 | 0 | 60 |
| May | 12 | 27 | 6 | 3 | 0 | 0 | 0 | 48 |
| Jun | 11 | 35 | 10 | 2 | 1 | 0 | 0 | 59 |
| Jul | 11 | 36 | 9 | 1 | 0 | 1 | 1 | 59 |
| Aug | 12 | 34 | 9 | 2 | 1 | 1 | 0 | 59 |
| Sep | 12 | 32 | 9 | 3 | 1 | 0 | 2 | 62 |
| Oct | 12 | 26 | 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 47 |
| Nov | 12 | 29 | 8 | 1 | 1 | 0 | 0 | 51 |
| Dec | 11 | 24 | 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 47 |

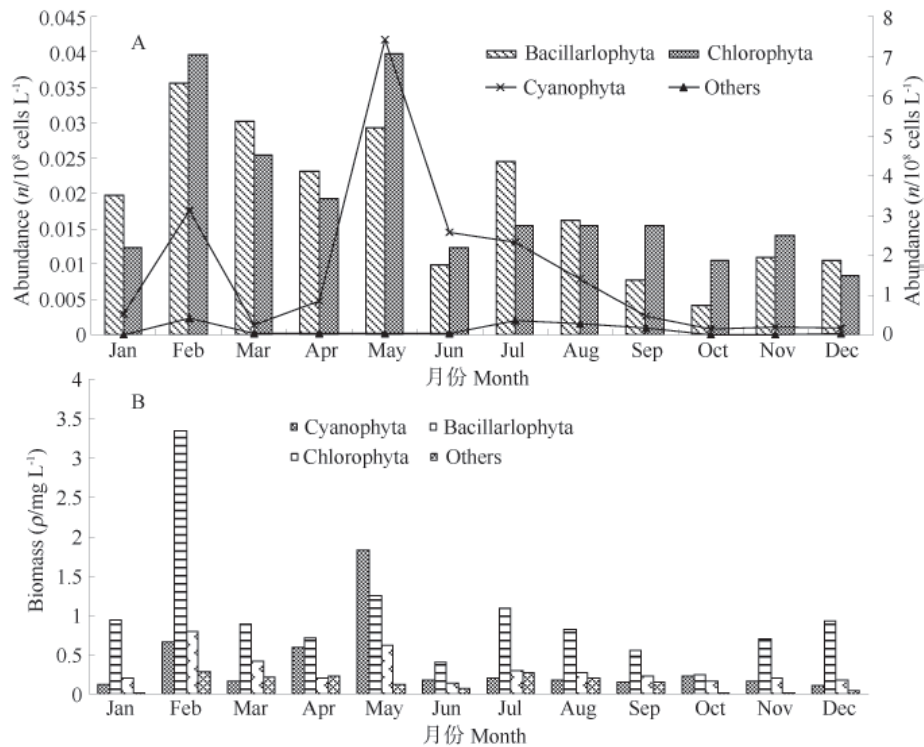


图2 显岗水库敞水区浮游植物数量组成变化(A: 丰度; B: 生物量)
Fig. 2 Phytoplankton abundance (A) and biomass (B) at the lacustrine of the Xiangang Reservoir

值, 10月出现极小值, 1~7月变化明显, 而9~12月变化不显著 ($P>0.05$), 丰水期较枯水期低. 生物量主要由硅藻、蓝藻和绿藻组成. 其中, 硅藻是最主要的贡献者, 枯水期较丰水期高, 年平均生物量为 0.99 mg L^{-1} , 2月最大, 为 3.35 mg L^{-1} , 10月最小, 为 0.24 mg L^{-1} . 其次为蓝藻和绿藻, 生物量分别在 $0.12\sim 1.82 \text{ mg L}^{-1}$ 和 $0.14\sim 0.80 \text{ mg L}^{-1}$ 范围内变化, 最大值与最小值分别出现在1、2月和5、6月. 蓝藻生物量季节变化明显, 1~5月呈现明显上升趋势, 10~12月变化则相反. 绿藻生物量全年变化较小, 仅在季节变化时有较大波动, 但丰水期较枯水期高. 其它藻类如甲藻、裸藻、隐藻和金藻生物量季节性变化明显 ($P<0.05$), 四者年总平均生物量为 0.13 mg L^{-1} . 甲藻在丰水期较枯水期的贡献明显 ($P<0.05$), 4月最高, 为 0.23 mg L^{-1} ; 裸藻、金藻、隐藻生物量分别在3、12和2月达到全年最高值, 分别为 0.048 mg L^{-1} 、 0.019 mg L^{-1} 和 0.22 mg L^{-1} .

2.4 浮游植物优势种的数量变化

浮游植物丰度优势种全年较为稳定, 蓝藻中的微小隐球藻、假鱼腥藻、针晶蓝纤维藻、湖丝藻和拟柱孢藻的相对丰度维持较高水平, 是浮游植物的主要优势种类 (表2). 微小隐球藻丰度在 $0.0085\times 10^8\sim 7.22\times 10^8 \text{ cell L}^{-1}$ 范围内变化, 年均丰度达到 $1.44\times 10^8 \text{ cell L}^{-1}$, 5月出现丰度的峰值, 10月丰度最低, 丰水期明显高于枯水期, 5~10月明显下降, 10~12月上升, 2月有一峰值, 3月处于较低水平. 假鱼腥藻平均丰度为 $0.081\times 10^8 \text{ cell L}^{-1}$, 明显高于针晶蓝纤维藻的 $0.045\times 10^8 \text{ cell L}^{-1}$, 但其变化趋势基本一致, 二者分别于2月和4月达到最大值后呈现下降趋势, 5~12月其丰度变化稳定, 分别维持在 $0.0043\times 10^8 \text{ cell L}^{-1}$ 和 $0.0016\times 10^8 \text{ cell L}^{-1}$ 左右. 与前3种优势种比较, 湖丝藻和拟柱孢藻的丰度全年变化不大, 年均丰度分别为 0.096×10^8

cell L^{-1} 和 $1.14\times 10^8 \text{ cell L}^{-1}$. 9月湖丝藻丰度最高, 为 $0.23\times 10^8 \text{ cell L}^{-1}$, 6月最低, 为 $0.021\times 10^8 \text{ cell L}^{-1}$; 5月拟柱孢藻丰度最高为 $5.68\times 10^8 \text{ cell L}^{-1}$, 3、6月最低, 小于 $0.014\times 10^8 \text{ cell L}^{-1}$.

浮游植物生物量优势种主要由硅藻和蓝藻组成 (表2). 硅藻中的小环藻是最常出现的优势种, 年均生物量为 0.34 mg L^{-1} , 5月最高, 为 0.97 mg L^{-1} , 7月最低, 为 0.12 mg L^{-1} ; 枯水期较丰水期高, 全年变化明显. 肘状针杆藻、颗粒直链藻、曲壳藻和根管藻也具有一定的数量. 肘状针杆藻生物量在 $0.022\sim 0.42 \text{ mg L}^{-1}$ 范围内变化, 1月具有全年峰值, 而在7月处于最小, 其变化与小环藻类似, 枯水期较丰水期高 ($P<0.05$). 颗粒直链藻平均生物量为 0.10 mg L^{-1} , 1~4月明显高于5~12月, 3月最高, 6月最小. 根管藻和曲壳藻分别于2月、5月出现全年最大值, 但在7月都没有被检出. 蓝藻中的微小隐球藻年均生物量为 0.15 mg L^{-1} , 变化范围为 $0.0004\sim 1.31 \text{ mg L}^{-1}$, 5月最高, 10月最低, 2月、5~7月均含量均大于 0.10 mg L^{-1} , 而其它月均小于 0.10 mg L^{-1} . 拟柱孢藻生物量季节变化明显, 5月、10月处于全年的两个峰值分别为 0.25 和 0.11 mg L^{-1} , 6月最低仅为 $0.00064 \text{ mg L}^{-1}$. 假鱼腥藻和湖丝藻生物量的变化趋势相反, 它们分别在2月和9月具有最大值, 为 0.35 mg L^{-1} 和 0.0071 mg L^{-1} , 9月和6月具有最小值, 分别为 0.011 mg L^{-1} 和 0.001 mg L^{-1} . 二者随季节变化波动明显, 2~5月假鱼腥藻生物量随时间变化呈现明显下降趋势, 5~7月、9~12月处于上升趋势, 但不明显; 而湖丝藻生物量在1~5月、6~9月都明显上升, 在其它时间则呈现明显下降趋势.

2.5 相关性分析

对显岗水库敞水区主要环境指标利用SPSS15.0进行Pearson相关性分析 (表3). 叶绿素a与透明度呈极显著负相

表2 显岗水库敞水区浮游植物优势种的组成变化
Table 2 Seasonal variation of the dominant species in the lacustrine of the Xiangang Reservoir

| 月份 Month | 丰度优势种 Species dominating in abundance | 相对丰度 Relative abundance (%) | 生物量优势种 Species dominating in biomass | 相对生物量 Relative biomass (%) |
|-------------|---|--------------------------------|---|-------------------------------|
| Jan | 拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> sp. | 58.77 | 肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i> | 37.87 |
| | 假鱼腥藻 <i>Pseudoanabeana</i> sp. | 18.08 | 小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> | 19.06 |
| | 湖丝藻 <i>Limnithrix</i> sp. | 10.00 | 颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i> | 4.56 |
| Feb | 拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> sp. | 40.84 | 根管藻 <i>Rhizosolenia longiseta</i> | 19.30 |
| | 假鱼腥藻 <i>Pseudoanabeana</i> sp. | 34.37 | 小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> | 11.00 |
| | 湖丝藻 <i>Limnithrix</i> sp. | 6.35 | 肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i> | 8.70 |
| Mar | 假鱼腥藻 <i>Pseudoanabeana</i> sp. | 46.45 | 小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> | 21.93 |
| | 湖丝藻 <i>Limnithrix</i> sp. | 19.34 | 颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i> | 15.48 |
| | 拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> sp. | 6.64 | 曲壳藻 <i>Achnanthes exigua</i> | 13.20 |
| Apr | 拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> sp. | 47.10 | 颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i> | 11.25 |
| | 针晶蓝纤维藻 <i>Dactylococcopsis raphidioides</i> | 32.43 | 小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> | 11.09 |
| | 假鱼腥藻 <i>Pseudoanabeana</i> sp. | 7.85 | 拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> sp. | 5.57 |
| May | 拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> sp. | 92.56 | 拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> sp. | 30.90 |
| | 湖丝藻 <i>Limnithrix</i> sp. | 2.14 | 小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> | 29.53 |
| | 微小隐球藻 <i>Aphanocapsa delicatissima</i> | 1.93 | 曲壳藻 <i>Achnanthes exigua</i> | 6.43 |
| Jun | 微小隐球藻 <i>Aphanocapsa delicatissima</i> | 29.08 | 小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> | 26.44 |
| | 假鱼腥藻 <i>Pseudoanabeana</i> sp. | 15.45 | 曲壳藻 <i>Achnanthes exigua</i> | 11.88 |
| | 湖丝藻 <i>Limnithrix</i> sp. | 14.44 | 肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i> | 8.11 |
| Jul | 湖丝藻 <i>Limnithrix</i> sp. | 35.64 | 小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> | 33.96 |
| | 假鱼腥藻 <i>Pseudoanabeana</i> sp. | 17.97 | 曲壳藻 <i>Achnanthes exigua</i> | 12.94 |
| | 微小隐球藻 <i>Aphanocapsa delicatissima</i> | 12.66 | 根管藻 <i>Rhizosolenia longiseta</i> | 5.11 |
| Aug | 拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> sp. | 48.31 | 小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> | 27.07 |
| | 湖丝藻 <i>Limnithrix</i> sp. | 23.61 | 拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> sp. | 8.91 |
| | 假鱼腥藻 <i>Pseudoanabeana</i> sp. | 9.26 | 曲壳藻 <i>Achnanthes exigua</i> | 6.90 |
| Sep | 拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> sp. | 84.46 | 小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> | 20.17 |
| | 湖丝藻 <i>Limnithrix</i> sp. | 11.57 | 拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> sp. | 17.46 |
| | 假鱼腥藻 <i>Pseudoanabeana</i> sp. | 0.55 | 肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i> | 4.00 |
| Oct | 拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> sp. | 90.54 | 拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> sp. | 45.46 |
| | 假鱼腥藻 <i>Pseudoanabeana</i> sp. | 2.16 | 小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> | 17.73 |
| | 湖丝藻 <i>Limnithrix</i> sp. | 5.40 | 假鱼腥藻 <i>Pseudoanabeana</i> sp. | 6.27 |
| Nov | 拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> sp. | 79.10 | 小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> | 32.93 |
| | 湖丝藻 <i>Limnithrix</i> sp. | 10.35 | 拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> sp. | 17.26 |
| | 假鱼腥藻 <i>Pseudoanabeana</i> sp. | 4.61 | 根管藻 <i>Rhizosolenia longiseta</i> | 10.41 |
| Dec | 拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> sp. | 39.19 | 根管藻 <i>Rhizosolenia longiseta</i> | 28.90 |
| | 假鱼腥藻 <i>Pseudoanabeana</i> sp. | 23.82 | 小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> | 25.68 |
| | 微小隐球藻 <i>Aphanocapsa delicatissima</i> | 15.73 | 肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i> | 9.73 |

关 ($P < 0.01$)；透明度则与降雨量和入库流量呈显著相关 ($P < 0.05$)。其它因子之间则无显著相关性 ($P > 0.05$)。

分别对丰水期和枯水期的环境指标进行相关性分析，结果表明，无论在丰水期或枯水期，蓝藻丰度与浮游植物丰度都呈极显著性相关 ($P < 0.01$)，硅藻生物量与浮游植物生物量呈显著性相关 ($P < 0.05$)，浮游植物种类数与绿藻种类数呈极显著相关 ($P < 0.01$)，而蓝藻种类数在丰水期与透明度呈显著负相关 ($P < 0.05$)。在丰水期，蓝藻种类数受透明度显著影响 ($P < 0.05$)，浮游植物和硅藻、隐藻生物量与透明度呈显著性相关 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 水库的水文与水质特征

水库流域状况、降雨量及水库形态、大小和功能是影响水库生态系统宏观性质的主要因素。常年较高的水温和明显的季节性降水是热带及亚热带低纬度地区水库水质的关键控制因子。显岗水库地处南亚热带，是一座典型的热带浅水型高产渔业水库，主要功能以供水和灌溉为主，结合防洪，兼顾发电和旅游开发等。显岗水库常年水温高，年内温差低 ($16\text{ }^{\circ}\text{C}$)，与南亚热带其它水库特征一致^[14]。虽降雨和入库流

表3 显岗水库敞水区各主要环境指标间的相关性系数
Table 3 Correlation coefficients among the environmental variables in the lacustrine of the Xiangang Reservoir

| 指标 Index | TN | TP | SD | PRE | Infl | WL | T | Chla | 丰度 Abundance | 生物量 Biomass | 种类数 Species number |
|--------------------|--------|--------|----------|---------|--------|--------|--------|--------|-----------------|----------------|-----------------------|
| TN | 1 | | | | | | | | | | |
| TP | 0.050 | 1 | | | | | | | | | |
| SD | 0.242 | 0.242 | 1 | | | | | | | | |
| PRE | 0.594 | 0.213 | 0.626* | 1 | | | | | | | |
| Infl | 0.542 | 0.164 | 0.699* | 0.984** | 1 | | | | | | |
| WL | -0.234 | 0.130 | 0.418 | 0.490 | 0.521 | 1 | | | | | |
| T | 0.151 | 0.223 | 0.203 | 0.570 | 0.498 | 0.656* | 1 | | | | |
| Chla | -0.066 | 0.110 | -0.821** | -0.411 | -0.539 | -0.443 | -0.021 | 1 | | | |
| 丰度 Abundance | 0.237 | -0.128 | -0.369 | -0.086 | -0.186 | -0.123 | 0.303 | 0.641* | 1 | | |
| 生物量 Biomass | -0.118 | 0.268 | 0.214 | -0.313 | -0.331 | -0.219 | -0.274 | 0.085 | 0.329 | 1 | |
| 种类数 Species number | -0.115 | 0.466 | 0.288 | 0.300 | 0.264 | 0.134 | 0.359 | -0.166 | -0.371 | -0.076 | 1 |

** $P < 0.01$, * $P < 0.05$ (两尾检验 Two-tailed test)

量全年变化大,但受水库调水功能影响,水库全年水位变化不明显,最大变幅为2.97 m。显岗水库敞水区透明度全年变化大,根据Pearson相关性分析,影响显岗水库敞水区透明度的主要是叶绿素、入库流量和降雨量。由于浅水型水库敞水区容易受到风浪等的影响^[15],显岗水库敞水区的透明度在枯水期明显高于丰水期,丰水期的透明度主要受到入库悬浮物和台风导致的再悬浮的影响。显岗水库位于珠江流域东江水系沙河支流上游的广东省博罗县境内,平均深度小,生境多样性高。降雨量丰水期较枯水期明显要高,而降雨量会导致大量营养物质和悬浮物的汇集与沉积,这可能是引起总氮和总磷在枯水期比枯水期低的主要原因。总氮、总磷和叶绿素a含量水平已经达到或已接近富营养化^[6]。从氮、磷质量比来看,水库的氮负荷较高,磷是影响该水库浮游植物生长的限制性营养元素,与该地区的其它水库^[16]类似。

3.1 浮游植物的群落结构特征

显岗水库敞水区浮游植物种类组成常年主要以绿藻居多,与广东省其它典型水库^[17]一致。浮游植物主要优势种全年均以蓝藻或硅藻为主,浮游植物季节变化模式为蓝藻—绿藻+硅藻,与同地区其它类型的富营养化水库存在差异^[18]。高水温适合蓝藻和绿藻生长,显岗水库营养水平高,全年总氮/总磷变化大(图1-B),在4、5、6、10、11、12月份其比值在25左右,而在1~3月、7、9月比值在10左右,这可能是导致全年以蓝藻占优势,而以蓝藻—绿藻或蓝藻—硅藻模式进行演替的主要原因,与Smith认为总氮/总磷比对浮游植物特别是蓝藻的演替起了非常主导作用的结论^[19]一致。

浮游植物的数量变化除受捕食的影响外,还主要受水体中营养盐水平的影响。水体中营养盐的来源主要依赖外源性的输入和内源性的释放^[20],浮游植物的数量随着水体营养水平的上升而增加^[21]。显岗水库敞水区的水深较浅,全年没有明显的分层,混合强度高,而其周边具有明显的流域内养殖和农业污染,水库放养的鲢、鳙及其它野杂鱼(以小的罗非鱼为主)向水体中排泄氮磷及对水体的扰动,维持了全年高水平的营养条件;加之全年具有较高的水温和强的光照条件,对敞水区浮游植物全年在丰度和生物量都维持相对高的水平创造了有利的环境条件。

全年总丰度主要由蓝藻组成,而总生物量主要由硅藻贡献。浮游植物总丰度与总生物量存在相反的季节变化,总生物量枯水期比丰水期高,其原因是由于浮游植物在丰、枯水期的种类和丰度的不同组成所致。全年浮游植物丰度组成上主要以蓝藻为主,常见优势种类为拟柱孢藻、湖丝藻、假鱼腥藻、针晶蓝纤维藻和微小隐球藻等丝状或球形的个体体型较小种类。在丰水期,微小隐球藻、假鱼腥藻、湖丝藻、针晶蓝纤维藻的相对丰度占主要优势,大于90%以上,而在枯水期,硅藻中的肘状针杆藻、小环藻、颗粒直链藻等体型较大的种类的相对丰度比丰水期明显升高,这就导致了浮游植物丰度虽然在丰水期要明显高于枯水期,但生物量却比枯水期低的原因。

浮游植物的数量随季节变化具有明显的双峰型波动特征,尤以2月和5月的峰值最为明显。环境因子的剧烈变化会导致浮游植物组成结构发生变化。2为冬末春初的枯水期末期,

5月为春末夏初的丰水期初期,这两个月份正好处于季节交替的过渡期,因而出现两个明显的峰值;而其它月份的气候变化和环境因子变化相对稳定,有利于浮游植物生长,从而浮游植物的数量变化也较为稳定,这与浮游植物的“中度干扰假说”理论^[22]相符。

与肇庆星湖^[23]相似,蓝藻是显岗的主要丰度优势种类。一般来说,浮游植物作为水体初级生产者,对水体的变化能作出迅速的响应,不同的营养水平具有不同的指示种,而大多丝状蓝藻种类喜在营养水平较高、光线较强的水体中生长^[24]。相对其它浮游植物,蓝藻对水体中由于浮游植物的高密度所导致的光线衰减和对热带浅水型高产渔业水库所产生的水体强烈的扰动作用的适用能力明显要强^[2]。此外,蓝藻还能在热带高产浅水型水体中启动特定的生长策略机制^[25],维持其正常的生长和不断的繁殖,故一旦形成了优势种群,便能长期稳定存在,很难发生演替^[6]。组成显岗水库敞水区的其它常见和优势的浮游植物种类如绿藻中的栅藻,硅藻中的肘状针杆藻、小环藻、颗粒直链藻,以及裸藻等,都是水体富营养化程度较高的优势种^[12]。显岗水库主养鲢、鳙鱼,它们对浮游植物具有较强的滤食能力,尤其是鲢^[6-8]。显岗水库敞水区的浮游植物常见种或优势种通常是以大型的群体丝状或粒径微小的单细胞形式存在,并在浮游植物中占绝对优势,表明现有鱼类投入密度条件下,显岗水库这一南亚热带浅水型高产水库敞水区的鱼类下行效应作用可能已相对较弱^[3]。

References

- 1 Lin QQ (林秋奇), Han BP (韩博平). Reservoir limnology and its application in water quality management: An overview. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2001, **21** (6): 1034~1040
- 2 Reynolds CS. Ecology of Phytoplankton. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006
- 3 Carpenter SR, Kitchell JF, Hodgson JR. Cascading trophic interactions and lake productivity: Fish predation and herbivory can regulate lake ecosystems. *Bioscience*, 1985, **35**: 634~639
- 4 Benndorf J. Food web manipulation without nutrient control: A useful strategy in lake restoration? *Schweiz Z Hydrol*, 1987, **49** (2): 237~248
- 5 Reynolds CS. The ecological basis for the successful biomanipulation of aquatic communities. *Archiv für Hydrobiol*, 1994, **130**: 1~33
- 6 Lazzaro, X. A review of planktivorous fishes: Their evolution, feeding behaviours, selectivities, and impacts. *Hydrobiologia*, 1987, **146** (2): 146~167
- 7 Xie P. Gut contents of silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix*, and the disruption of a centric diatom, *Cyclotella*, on passage through the esophagus and intestine. *Aquaculture*, 1999, **180**: 295~305
- 8 Xie P. Gut contents of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) and the processing and digestion of algal cells in the alimentary canal. *Aquaculture*, 2001, **195**: 149~161
- 9 Jin XC (金相灿), Tu QY (屠清瑛). The Standard Methods in Lake Eutrophication Investigation. Beijing, China: China Environmental Science Press (北京: 中国环境科学出版社), 1990. 286~302
- 10 Lin SJ (林少君), He LJ (贺立静), Huang PS (黄沛生), Han BP (韩博平).

- Comparison and improvement on the extraction method for chlorophyll a in phytoplankton. *Ecol Sci* (生态科学), 2005, **24** (1): 9~11
- 11 Hu HJ (胡鸿钧), Wei YX (魏印心). Freshwater Algae in China-Systematics, Taxonomy and Ecology. Beijing, China: Science Press (北京: 科学出版社), 2006
- 12 Zhang ZS (章宗涉), Huang XF (黄祥飞). Research Methods of Phytoplankton in Freshwater. Beijing, China: Science Press (北京: 科学出版社), 1991
- 13 Sun J (孙军), Liu DY (刘东艳), Qian SB (钱树本). Study on phytoplankton biomass. I. Phytoplankton measurement biomass from cell volume or plasma volume. *Acta Oceanol Sin* (海洋学报), 1999, **21**: 75~85
- 14 Lin GE (林国恩), Wang T (望甜), Lin QQ (林秋奇), Han BP (韩博平). Spatial pattern and temporal dynamics of limnological variables in Liuxihe Reservoir, Guangdong. *J Lake Sci* (湖泊科学), 2009, **21** (3): 387~394
- 15 Song XL (宋晓兰), Liu ZW (刘正文), Pan HK (潘宏凯), Yang GJ (杨桂军), Chen YW (陈宇炜). Phytoplankton community structure in Meiliang Bay and Lake Wuli of Lake Taihu. *J Lake Sci* (湖泊科学), 2007, **19** (6): 643~651
- 16 Han BP (韩博平), Li T (李铁), Lin XG (林旭纲). Reservoir Trophic States and the Study of Strategies of Prevention in Guangdong Province. Beijing, China: Science Press (北京: 科学出版社), 2003
- 17 Hu R (胡韧), Lin QQ (林秋奇), Wang ZH (王朝晖), Han BP (韩博平). Phytoplankton composition and distribution in typical reservoirs of Guangdong province. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2002, **22** (11): 1939~1944
- 18 He GQ (何国全), Lei LM (雷腊梅), Han BP (韩博平). Seasonal variation in phytoplankton community in a tropical riverine reservoir: A case study of Feilaixia reservoir. *J Trop & Subtrop Bot* (热带亚热带植物学报), 2006, **14** (3): 183~19
- 19 Smith VH. Low nitrogen to phosphorous ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science*, 1983, **221**: 669~671
- 20 Qin BQ (秦伯强), Hu WP (胡维平), Gao G (高光), Luo LC (罗敛葱), Zhang JS (张金善). The dynamics mechanism of resuspended sediment and conceptual model of nutrient release from inner source in Taihu Lake. *Sci Bull* (科学通报), 2003, **48**: 760~768
- 21 Naselli-Flores L. Phytoplankton assemblages in twenty-one Sicilian reservoirs: relationships between species composition and environmental factors. *Hydrobiologia*, 2000, **424**: 1~11
- 22 Reynolds CS, Padisák J, Sommer U. Intermediate disturbance in the ecology of phytoplankton and the maintenance of species diversity: A synthesis. *Hydrobiologia*, 1993, **249**: 183~188
- 23 Kong YJ (孔义军), Yang HW (杨浩文), Lin SJ (林少君), Lei LM (雷腊梅), Han BP (韩博平). Eutrophication and phytoplankton community structure of Xinghu Lake, a shallow urban lake in South China. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2009, **13** (2): 153~160
- 24 Dokulil M, Teubner K. Cyanobacterial dominance in lakes. *Hydrobiologia*, 2000, **438**: 1~12
- 25 Viner AB. Thermal stability and phytoplankton distribution. *Hydrobiologia*, **125**: 47~69
- 26 Moustaka-Gouni M, Vardaka E, Tryfon E. Phytoplankton species succession in a shallow Mediterranean lake (L. Kastoria, Greece): Steady-state dominance of *Limnithrix redekei*, *Microcystis aeruginosa* and *Cylindrospermopsis raciborskii*. *Hydrobiologia*, 2007, **575**: 129~140