

# 南亚热带城市浅水湖泊富营养化与浮游植物群落的时空特征: 以肇庆星湖为例\*

孔义军<sup>1</sup> 杨浩文<sup>2</sup> 林少君<sup>1</sup> 雷腊梅<sup>1</sup> 韩博平<sup>1\*\*</sup>

(<sup>1</sup>暨南大学水生生物研究所 广州 510632; <sup>2</sup>广东省水文局 广州 510150)

**摘要** 星湖位于我国南亚热带地区, 为城市浅水湖泊, 由5个子湖(仙女湖、波海湖、青莲湖、中心湖和里湖)组成. 于2002年的1月、3月、7月、8月、10月和12月对前4个子湖的水质和浮游植物进行了采样分析. 星湖的总氮和总磷浓度分布范围分别为0.351~2.488 mg L<sup>-1</sup>和0.009~0.151 mg L<sup>-1</sup>, 营养盐浓度变化规律均在3月达到最高值, 7、8月逐渐降低, 10、12月又有所增加. 星湖的营养状态(TSI: 40~56)整体处于中富营养化向富营养化过渡的阶段, 各子湖营养状态存在一定的空间差异, 波海湖富营养化程度最高, 而仙女湖和青莲湖最低, 这种空间差异主要由污染物的入湖位置和子湖的水动力连通特点所决定. 从星湖共检到浮游植物128种, 其丰度的分布范围为0.85×10<sup>6</sup>~44.28×10<sup>6</sup> cells L<sup>-1</sup>. 浮游植物3月丰度最低, 7、8月最高. 在数量组成上, 4个子湖的浮游植物群落有很高相似性, 群落结构以蓝藻-绿藻为优势类群. 1月以绿藻和硅藻占优势, 7、8、10和12月则由蓝藻占绝对优势, 平行藻是最主要的优势种. 浮游植物丰度的季节变化主要受季节性的降水和湖泊水位调节的影响. 图2 表6 参30

**关键词** 富营养化; 浮游植物; 城市浅水湖泊; 南亚热带

CLC X524 + Q178.513

## Eutrophication and Phytoplankton Community Structure of Xinghu Lake, a Shallow Urban Lake in South China\*

KONG Yijun<sup>1</sup>, YANG Haowen<sup>2</sup>, LIN Shaojun<sup>1</sup>, LEI Lamei<sup>1</sup> & HAN Boping<sup>1\*\*</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Hydrobiology, Ji'nan University, Guangzhou 510632, China)

(<sup>2</sup>Bureau of Hydrology, Guangdong Province, Guangzhou 510150, China)

**Abstract** The Xinghu Lake, a typical shallow lake, located in the urban area of Zhaoqing City, Guangdong, China and consists of five sub-lakes, the Xiannü Lake, Bohai Lake, Qinglian Lake, Zhongxin Lake and Lihu Lake. The sub-lakes are connected with each others for boating. In order to understand its eutrophication and phytoplankton community in the lake system, the four sub-lakes were investigated in January, March, July, August, October and December, 2002. The TN and TP concentrations of the Xinghu Lake ranged from 0.351 mg L<sup>-1</sup> to 2.488 mg L<sup>-1</sup> and from 0.009 mg L<sup>-1</sup> to 0.151 mg L<sup>-1</sup>, respectively. The nutrient concentration was highest in March, decreased gradually with precipitation in July and August, and it increased following the dry season. Generally speaking, the Xinghu Lake was a mesotrophic water body with a trophic state index (TSI) between 40 and 56. As the polluted water mainly fed into the northern sub-lakes (Bohai and Xiannü), there existed a significant spatial difference in the trophic state index among the sub-lakes. The Bohai Lake was eutrophic with the highest TSI, and the Xiannü Lake and Qinglian Lake were mesotrophic with the lowest TSI. 128 phytoplankton species were totally observed and sampled from all the four sub-lakes. Phytoplankton abundance had a seasonal dynamics contrast to the nutrients, ranging from 0.85×10<sup>6</sup> cells L<sup>-1</sup> to 44.28×10<sup>6</sup> cells L<sup>-1</sup>. It was found the lowest in March and highest in July and August. As a eutrophic lake system, the phytoplankton community structures of the sub-lakes were quite similar, they were dominated primarily by cyanobacteria—chlorophyta. They were dominated by chlorophyta and diatoms in January, by cyanobacteria (e.g., *Merismopedia glauca*) in March, July, August, October and December. The hydrodynamics affected by the seasonal rainfall and water-level controlling played an important role in regulating the eutrophication and phytoplankton abundance. Fig 2, Tab 6, Ref 30

**Keywords** eutrophication; phytoplankton; shallow urban lake; South China

CLC X524 + Q178.513

富营养化是指由于水体接纳过量的氮、磷等营养盐, 导

致藻类以及一些高等植物大量繁殖和生物量积累, 甚至发生水华, 水体底部溶解氧浓度下降, 出现鱼类等死亡和水质退化的现象, 是当前水环境的主要问题之一<sup>[1]</sup>. 湖泊, 特别受人类活动影响较为明显的浅水湖泊, 富营养化问题尤为突出<sup>[2]</sup>. 大多数城市湖泊均为浅水型湖泊, 由于其重要的景观价值, 受到人为活动的影响要比其它类型的湖泊大得多. 我国云南

收稿日期: 2008-04-22 接受日期: 2008-10-07

\*广东省水文局重点项目(No. SWZ2003-1)和教育部优秀青年基金资助 Supported by the Scientific Project (No. SWZ2003-1) of the Hydrology Bureau of Guangdong Province, China and the Grant to Excellent Young Teachers from the Ministry of Education of China

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

高原地区和长江三角洲地区的城市湖泊,如滇池和太湖等大型湖泊,均面临较为严重的富营养化与蓝藻水华,对这些水体已开展了大量的研究与治理<sup>[3~5]</sup>。城市湖泊的外源污染主要包括流域内地表径流、生活污水、工业污水、大气沉降和旅游活动所产生的污染,水上旅游活动的用船等会增加内源污染的释放。目前我国城市处于一个高速发展阶段,而污染处理系统建设相对滞后,许多城市湖泊仍面临未经处理的工业和生活污水的排放问题,同时,城市湖泊周边的土地利用和开发强度大,增加了入湖的面源污染,大气沉降也是湖泊外源负荷的重要组成。由于位于人类活动的密集区,外源和内源污染复杂,富营养化已成为城市湖泊普遍存在的环境问题。

国际上对湖泊富营养化的研究已有很长的历史,明确了磷负荷的消减是湖泊富营养化和藻类水华控制的关键<sup>[6~8]</sup>。Scheffer等提出了针对浅水湖泊富营养化过程中水体状态转变的理论模型;国内外已有大量湖泊富营养化治理的实践<sup>[9~11]</sup>。湖泊富营养化表现形式与地域有关,目前对高纬度湖泊已有较多的研究,而对低纬度地区的湖泊研究较少<sup>[12, 13]</sup>。我国的低纬度地区,处于热带和亚热带的过渡区,国内也称为南亚热带地区,在该地区天然湖泊很少,仅有的几个湖泊均为重要的景观水体,如广东的星湖和西湖<sup>[13~15]</sup>。由于所处纬度较低,其富营养化过程与浮游植物的响应不同于高纬度地区的湖泊。在南亚热带地区,水温高,年温差小,鱼类生长期长,对浮游动物的捕食物压力,缺少大型滤食性浮游动物,湖泊富营养化后通常很难出现因浮游动物滤食控制的清水期<sup>[12, 16]</sup>,浮游植物群落结构较为稳定,难以运用生物操纵方法控制水质<sup>[17]</sup>。在该地区,降水集中在丰水期,大量集中降水能够显著改变湖泊的水动力学过程<sup>[18]</sup>。城市湖泊受人体的影响是多方面的,多数湖泊需要通过人为控制湖泊水位来维持景观需水,这种对水位的控制,改变了湖泊自然的水位变化和水动力过程,进而影响到水体的营养盐负荷的平衡,这也必然影响水体中浮游植物生物量的积累和时空动态。为了解和认识南亚热带地区人类活动影响下城市湖泊的富营养化特征,于2002年对广东省肇庆星湖进行了调查研究,本文对该湖泊水质特点和浮游植物群落的季节变化进行报道和分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 星湖概况

肇庆星湖是一个典型的城市浅水湖泊,位于广东省肇庆市北郊七星岩风景区(东经112°23', 北纬23°6')内,为广东省的国家级重点风景名胜区。星湖水面积6.24 km<sup>2</sup>,平均水深为2.4 m。上游河流的集水面积为32 km<sup>2</sup>,年均降水量为1 729 mm。入湖水主要为降雨和湖泊周边城市生活区的生活污水,总入库水量约为2.64×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>,水力滞留时间为0.87 a。星湖由5个浅水湖泊即仙女湖、波海湖、青莲湖、中心湖和里湖组成。除里湖外,其余4个子湖由水道或涵洞相连,游船可以过往。在仙女湖和青莲湖建有水闸控制水位,在雨季(4~9月)水位较高时,通过青莲湖的闸门排水入西江,旱季则蓄水保持水位,全年水位稳定。由于入湖河流位于星湖的北部即北岭区,来源于北岭区的集水进入湖泊后,从波海湖分成两支:1)由人工水渠进入仙女湖,再进入青莲湖;2)由波海湖进入中心

湖,通过涵洞进入青莲湖。星湖的污染物主要来源于北岭区土地开发、生活污水和工业废水,这些污染物主要进入波海湖,其次进入仙女湖,青莲湖的控制闸门是整个星湖主要的排水设施。星湖分层不明显,受到风生流的影响,内源污染物较易再悬浮,水体浊度较高。星湖各子湖的主要特征数据见表1。

表1 星湖各子湖的主要特征数据

Table 1 Basic parameters and characteristics of the five sub-lakes of the Xinghu Lake

| 子湖名称<br>Names of sub-lakes | 面积 Area<br>(A/km <sup>2</sup> ) | 水深 Depth<br>(δ/m) | 水力滞留时间<br>Hydraulic<br>retention time (t/a) |
|----------------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------------------|
| 仙女湖 Xiannü Lake            | 1.42                            | 2.2               | 0.37                                        |
| 波海湖 Bohai Lake             | 1.28                            | 2.4               | 0.42                                        |
| 青莲湖 Qinglian Lake          | 1.16                            | 2.1               | 0.15                                        |
| 中心湖 Zhongxin Lake          | 2.12                            | 2.6               | 0.70                                        |
| 里湖 Lihu Lake               | 0.26                            | 1.3               | 0.39                                        |

### 1.2 采样点分布与采样频率

于2002年1月、3月、7月、8月、10月、12月对星湖进行了6次采样,采样点位于星湖的仙女湖、波海湖、青莲湖、中心湖4个子湖的中心位置(图1)。里湖由于水太浅,船无法进入而未进行采样。波海湖在7月、10月由于施工,未能进行样品采集。

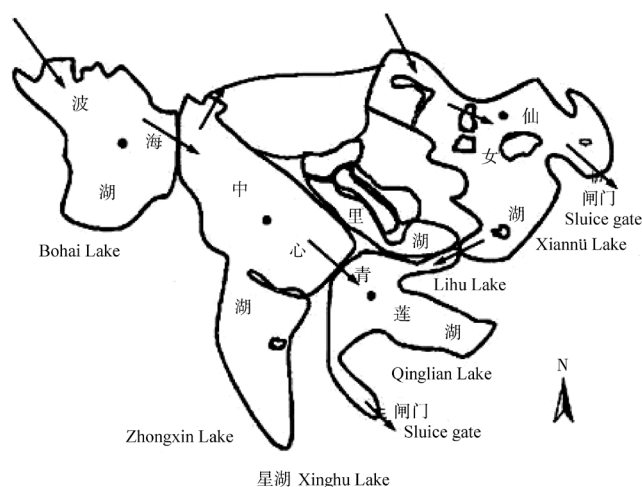


图1 星湖各子湖的联通位置、采样点分布与水流方向  
Fig. 1 The connection, sampling sites and water-flow direction of the five sub-lakes of the Xinghu Lake

### 1.3 采样与分析

水温(*T*)、电导率(*C*)、溶解氧(*DO*)采用美国YSI-85水质分析仪在采样现场测定。透明度(*SD*)采用塞氏盘测定。

水质分析样品的采集与分析:采集距水面0.5 m的表层水样,分别测定其营养盐总氮(*TN*)、总磷(*TP*)和叶绿素(*Chl. a*)等数据。*TN*和*TP*分别采用国标过硫酸钾紫外分光光度法和钼酸铵分光光度法测定。*Chl.a*和浮游植物定量水样为1 L。*Chl.a*采用丙酮反复冻融法,浮游植物采用甲醛溶液固定后沉淀浓缩记数。浮游植物定性样品用网目为64 μm的25#浮游生物网在水中作水平及垂直拖网,样品用甲醛溶液固定,沉淀浓缩后在显微镜下进行种类鉴定和计数。

表2 2002年星湖中氮、磷营养盐的分布  
Table 2 Concentrations of total nitrogen and total phosphorus in the Xinghu Lake in 2002

| 月份 Month                      |                   | Jan.  | Mar.  | Jul.  | Aug.  | Oct.  | Dec.  | 年均值 ± SD<br>Annual average ± SD |
|-------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------|
| TN<br>(ρ/mg L <sup>-1</sup> ) | 仙女湖 Xiannü Lake   | 0.591 | 1.052 | 0.351 | 0.789 | 0.493 | 0.554 | 0.639±0.248                     |
|                               | 波海湖 Bohai Lake    | 0.606 | 2.488 | —     | 1.282 | —     | 2.247 | 1.656±0.873                     |
|                               | 青莲湖 Qinglian Lake | 0.681 | 1.370 | 0.911 | 0.621 | 0.695 | 0.699 | 0.830±0.283                     |
|                               | 中心湖 Zhongxin Lake | 1.058 | 1.536 | 1.276 | 0.815 | 0.965 | 1.424 | 1.179±0.279                     |
|                               | 均值 Average        | 0.734 | 1.612 | 0.846 | 0.877 | 0.718 | 1.231 | 1.023±0.523                     |
| TP<br>(ρ/mg L <sup>-1</sup> ) | 仙女湖 Xiannü Lake   | 0.016 | 0.009 | 0.019 | 0.019 | 0.019 | 0.017 | 0.016±0.004                     |
|                               | 波海湖 Bohai Lake    | 0.041 | 0.151 | —     | 0.055 | —     | 0.073 | 0.080±0.049                     |
|                               | 青莲湖 Qinglian Lake | 0.027 | 0.031 | 0.016 | 0.014 | 0.019 | 0.024 | 0.022±0.007                     |
|                               | 中心湖 Zhongxin Lake | 0.053 | 0.055 | 0.019 | 0.026 | 0.043 | 0.020 | 0.036±0.016                     |
|                               | 均值 Average        | 0.034 | 0.061 | 0.018 | 0.028 | 0.027 | 0.033 | 0.035±0.031                     |

## 2 结果与分析

### 2.1 营养盐

星湖营养盐的时空分布见表2。总氮(TN)浓度范围为0.351~2.488 mg L<sup>-1</sup>, 平均值为1.023 mg L<sup>-1</sup>, 最低值出现在7月的仙女湖, 最高值出现在3月的波海湖。各子湖中, 波海湖TN浓度最高(年均值为1.66 mg L<sup>-1</sup>), 其次为中心湖(年均值为1.18 mg L<sup>-1</sup>)、青莲湖(年均值为0.83 mg L<sup>-1</sup>)、仙女湖(年均值为0.64 mg L<sup>-1</sup>)。总体来看, 各子湖TN的变化规律均是在3月达到最高值, 7、8月逐渐降低, 10、12月又有所增加。

总磷(TP)浓度范围为0.009~0.151 mg L<sup>-1</sup>, 平均值为0.035 mg L<sup>-1</sup>, 最低值出现在3月的仙女湖, 最高值出现在3月的波海湖。各子湖中, 波海湖TP浓度最高(年均值为0.080 mg L<sup>-1</sup>), 其后依次为中心湖(年均值为0.036 mg L<sup>-1</sup>)、青莲湖(年均值为0.022 mg L<sup>-1</sup>)和仙女湖(年均值为0.016 mg L<sup>-1</sup>)。除仙女湖外, 各子湖TP均是在3月达到最高值, 7、8月逐渐降低, 10、12月又有所增加。而仙女湖3月TP浓度明显较低, 这可能与仙女湖在这段时间接纳的污水量较少有关。

### 2.2 叶绿素a浓度与透明度

星湖叶绿素a (Chl.a)和透明度(SD)的时空分布见表3。Chl.a浓度范围为2.342~50.166 μg L<sup>-1</sup>, 年均值为15.80 μg L<sup>-1</sup>, 最低值出现在3月的仙女湖, 最高值出现在12月的波海湖。各子湖中, 波海湖Chl.a浓度最高(年均值为29.45 μg L<sup>-1</sup>), 其次为中心湖(年均值为15.78 μg L<sup>-1</sup>), 仙女湖和青莲湖最低(年均值分别为11.55 μg L<sup>-1</sup>和10.98 μg L<sup>-1</sup>)。各子湖Chl.a浓度季节变化有一

定差异, 仙女湖最大值出现在10月, 最低值在3月; 青莲湖与中心湖的变动趋势相似, 都是出现了两个峰值, 分别是7月和10月; 由于在7、10月没有对波海湖采样, 其动态特点不清楚。

SD范围为0.45~2 m, 平均值为0.998 m, 最低值出现在3月的波海湖, 最大值出现在3月的仙女湖。各子湖中, 波海湖SD最低(年均值0.59 m), 其次是中心湖(年均值为0.76 m), 青莲湖最高(年均值为1.3 m)。SD与Chl.a具有显著的负相关( $r=-0.551$ ,  $P<0.01$ ), 说明浮游植物的生物量仍是影响水体透明度的重要因子。

### 2.3 营养状态指数

星湖的营养状态指数(TSI)变化范围为35.50~56.32, 平均值为45.81 (表4)。除了1、3月的仙女湖外, TSI均在35~56之间, 严格来讲, 这是一个中富营养化向富营养化过渡的水体。各子湖中, 波海湖达到了富营养水平(TSI年均值为52.83), 而其它3个湖都处于中富营养状态, 其中中心湖TSI平均值为47.64, 青莲湖为42.24, 仙女湖为41.16。TSI值的季节变化具有一定的规律, 除了波海湖在7、10月没有采样, 其它3个子湖TSI最高值均出现在10月, 1月和3月为全年最低。

### 2.4 影响富营养化环境因子的主成分分析

考虑影响富营养化的主要因素, 选取营养盐浓度、叶绿素a浓度和透明度作主成分分析(表5)。按特征值≥1的标准, 提取了1个或2个主成分。采用最大方差标准化数据旋转方法对因子进行旋转。从仙女湖数据中提取到了一个主成分, 可以解释原始变量的74%。根据各主成分的解释方差比例及在不同参数上的载荷可以看出, 透明度具有较高的载荷。从波海

表3 2002年星湖中叶绿素和透明度的分布  
Table 3 The concentration of chlorophyll a and Secchi disk depth in the Xinghu Lake

| 月份 Month                         |                   | Jan.  | Mar.  | Jul.  | Aug.  | Oct.  | Dec.  | 年均值 ± SD<br>Annual average ± SD |
|----------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------|
| Chl.a<br>(ρ/μg L <sup>-1</sup> ) | 仙女湖 Xiannü Lake   | 5.61  | 2.34  | 5.55  | 5.02  | 35.65 | 15.14 | 11.55±12.59                     |
|                                  | 波海湖 Bohai Lake    | 12.20 | 24.42 | —     | 31.03 | —     | 50.17 | 29.45±15.86                     |
|                                  | 青莲湖 Qinglian Lake | 3.12  | 2.93  | 16.92 | 5.17  | 22.75 | 14.99 | 10.98±8.37                      |
|                                  | 中心湖 Zhongxin Lake | 5.66  | 8.17  | 26.62 | 11.27 | 26.00 | 16.94 | 15.78±8.99                      |
|                                  | 均值 Average        | 6.65  | 9.47  | 16.36 | 13.12 | 28.13 | 24.31 | 15.80±12.53                     |
| SD<br>(δ/m)                      | 仙女湖 Xiannü Lake   | 1.5   | 2.0   | 1.1   | 1.1   | 0.75  | 0.8   | 1.21±0.47                       |
|                                  | 波海湖 Bohai Lake    | 0.7   | 0.45  | —     | 0.6   | —     | 0.6   | 0.59±0.10                       |
|                                  | 青莲湖 Qinglian Lake | 1.2   | 1.5   | 1.6   | 1.6   | 0.9   | 1.0   | 1.30±0.31                       |
|                                  | 中心湖 Zhongxin Lake | 0.6   | 0.75  | 1.1   | 0.7   | 0.6   | 0.8   | 0.76±0.19                       |
|                                  | 均值 Average        | 1.0   | 1.175 | 1.267 | 1.0   | 0.75  | 0.8   | 1.00±0.42                       |



表4 2002年星湖营养状态指数  
Table 4 Trophic state indexes of the four sub-lakes of the Xinghu Lake

|     | 月份<br>Month |               | Jan.  | Mar.  | Jul.  | Aug.  | Oct.  | Dec.  | 年均值 ± SD<br>Annual average ± SD |
|-----|-------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------|
|     |             |               |       |       |       |       |       |       |                                 |
| TSI | 仙女湖         | Xiannü Lake   | 39.15 | 35.50 | 39.14 | 40.86 | 47.71 | 44.62 | 41.16±3.76                      |
|     | 波海湖         | Bohai Lake    | 46.33 | 56.32 | —     | 52.52 | —     | 56.14 | 52.83±4.67                      |
|     | 青莲湖         | Qinglian Lake | 39.27 | 40.31 | 43.80 | 38.48 | 46.42 | 45.15 | 42.24±3.32                      |
|     | 中心湖         | Zhongxin Lake | 46.12 | 47.62 | 47.81 | 45.90 | 50.71 | 47.73 | 47.64±1.72                      |
|     | 均值          | Average       | 42.72 | 48.08 | 43.58 | 44.44 | 48.28 | 48.21 | 45.81±5.23                      |

湖数据提取的2个主成分可以解释原始变量的98%，主成分1 (PC1)描述原始变量的72%，在总磷和透明度上具有较高的载荷；主成分2 (PC2)描述原始变量的26%，在叶绿素a上具有较高的载荷。从青莲湖数据提取的2个主成分可以解释原始变量的83%，主成分1 (PC1)描述原始变量的52%，在总氮和总磷上具有较高的载荷；主成分2 (PC2)描述原始变量的31%，在透明度上具有较高的载荷。从中心湖数据提取的2个主成分可以解释原始变量的83%，主成分1 (PC1)描述原始变量的54%，在叶绿素a和透明度上具有较高的载荷；主成分2 (PC2)描述原始变量的29%，在总氮上具有较高的载荷。

4个子湖主成分的差别说明各子湖的富营养化表现不尽相同，这是由各子湖的污染来源和水动力过程不同所导致的。仙女湖只有1个有效主成分，说明影响该水体富营养化的因子相对较为稳定。波海湖是一个污染程度相对严重的子湖，第一主成分主要由营养盐和透明度构成，而第二主成分由叶绿素a构成，反映了污染物对水体富营养化(营养盐和透明度)的直接控制。青莲湖的第一主成分由营养盐和叶绿素a构成，但叶绿素a与营养盐有相反的关系，说明营养盐高低不是决定叶绿素a的主要因素，反映了该子湖水体交换快的特点。

## 2.5 浮游植物

**2.5.1 种类组成** 6次采样共检测到浮游植物128种(含变形、变种)，其中绿藻种类数最多，达73种，占总种类数的57%，其次是蓝藻和硅藻，分别占总种类数的18%和15.6%。蓝藻、绿藻、硅藻占总种类数的90%以上。蓝藻、绿藻的最多种类数均出现在每年的8月和9月，最少种类数均在1月；而硅藻种类数在一年中的变化不是很大，在10左右浮动。

**2.5.2 浮游植物丰度** 如图2所示。星湖浮游植物的总丰度范围为 $0.85 \times 10^6 \sim 44.28 \times 10^6$  cells  $L^{-1}$ ，最低值出现在3月，最高值出现在8月。各子湖中，青莲湖和仙女湖的浮游植物丰度较低，中心湖在各月均最高，这是因为中心湖的水力交换时间相对其它子湖较长，水体较为稳定，营养盐浓度常年较高。蓝藻的季节丰度范围为 $0.43 \times 10^6 \sim 42.16 \times 10^6$  cells  $L^{-1}$ ，3月最低，8月达到最高；绿藻的季节丰度范围为 $0.29 \times 10^6 \sim 2.50 \times 10^6$  cells  $L^{-1}$ ，季节变化曲线呈多峰形状，1月、7月、12月较其它月份高；

硅藻的季节丰度范围为 $0.05 \times 10^6 \sim 0.74 \times 10^6$  cells  $L^{-1}$ ，季节变化与绿藻相似，1月、8月、12月较高。总体上说，蓝藻丰度最高，绿藻次之，说明星湖浮游植物群落结构是蓝藻-绿藻型群落。通过对蓝藻丰度和总浮游植物丰度的相关性分析，蓝藻丰度和总浮游植物丰度具有显著的相关性( $r=0.998$ ,  $P<0.01$ )，说明星湖浮游植物总丰度的季节变化主要由蓝藻的丰度决定。

蓝藻是星湖浮游植物的优势类群，除1月外，其相对丰度均超过40%，在7、8、10月超过90%。绿藻和硅藻是1月浮游植物的主要优势，在仙女湖绿藻的相对丰度达到80.96%。

**2.5.3 主要浮游植物的优势种及分布** 蓝藻、绿藻和硅藻是星湖浮游植物在种类和数量上的3个主要藻门，整体上看，优势种是蓝藻门的银灰平列藻(*Merismopedia glauca*)，但1月优势种为绿藻门的被甲栅藻(*Scenedesmus armatus*)和硅藻门的梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)，7、8、10月藻类优势种比较稳定，以蓝藻占优势，主要优势种是银灰平列藻和湖泊假鱼腥藻(*Pseudanabaen limnetica*)。各藻门的优势种类在各子湖中的分布无显著差异(表6)。

全年中蓝藻的第一优势种类以平列藻、假鱼腥藻为主，席藻(*Phormidium* sp.)、林氏藻(*Lyngbya majuscula*)、水华束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae*)、中华尖头藻(*Raphidiopsis sinensis*)在个别子湖的个别月份占据优势，粘球藻(*Gloeocapsa magma*)和色球藻(*Chroococcus minor*)也有较高的丰度，为星湖蓝藻的第二优势种类。下半年各子湖蓝藻第一优势种类是席藻、平列藻和林氏藻交替出现。绿藻的第一优势种类比较稳定，为栅藻、微小四角藻(*Tetraedron minimum*)、衣藻(*Chlamydomonas* sp.)和单角盘星藻(*Pediastrum simplex*)，第二优势种类变化比较大，有美丽胶网藻(*Dictyosphaerium pulchellum*)、实球藻(*Pandorina morum*)、空球藻(*Eudorina elegans*)、四列藻(*Tetraselmis tetrathele*)等。星湖中出现最多、丰度最大的硅藻种类是小环藻和近缘针杆藻(*Fragilaria fasciculata*)，其次是双头舟形藻(*Navicula dicephala*)和颗粒直链藻(*Melosira granulata*)。小环藻是广污种类，有研究结果认为其喜分布于寡营养的水体中，但也有研究发现它在富营养化水体中占据主要优势。一般用优势种为蓝藻[如水华微囊藻

表5 富营养化主成份分析中直角转轴后的因子载荷表  
Table 5 Rotated component matrix of PCA for trophic states

| 因子<br>Factor | 仙女湖主成分<br>PCA of Xiannü Lake | 波海湖主成分<br>PCA of Bohai Lake |        | 青莲湖主成分<br>PCA of Qinglian Lake |        | 中心湖主成分<br>PCA of Zhongxin Lake |        |
|--------------|------------------------------|-----------------------------|--------|--------------------------------|--------|--------------------------------|--------|
|              | 1                            | 1                           | 2      | 1                              | 2      | 1                              | 2      |
| TN           | 0.870                        | 0.816                       | 0.569  | 0.722                          | 0.396  | -0.068                         | 0.972  |
| TP           | -0.897                       | 0.996                       | -0.006 | 0.979                          | -0.149 | -0.893                         | -0.011 |
| Chl.a        | -0.694                       | 0.065                       | 0.997  | -0.512                         | -0.639 | 0.836                          | -0.078 |
| SD           | 0.955                        | -0.977                      | -0.128 | -0.071                         | 0.986  | 0.739                          | 0.584  |

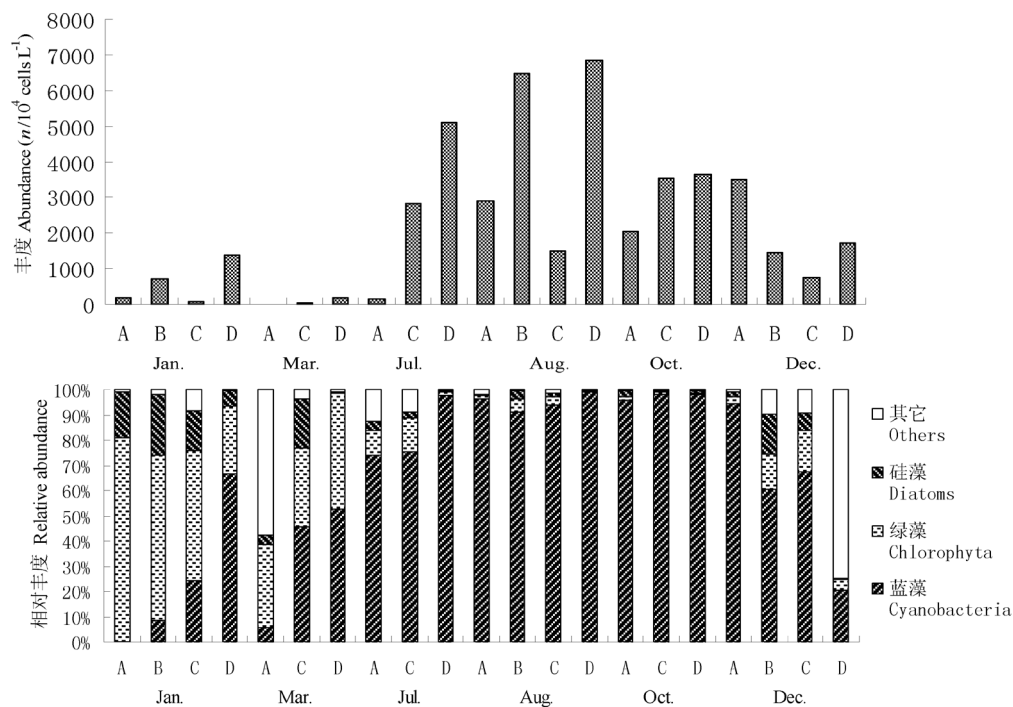


图2 2002年星湖浮游植物丰度季节变化

Fig. 2 Seasonal dynamics of phytoplankton abundance in the Xinghu Lake

A: 仙女湖; B: 波海湖; C: 青莲湖; D: 中心湖 A: Xiannü Lake; B: Bohai Lake; C: Qinglian Lake; D: Zhongxin Lake

(*Microcystis flos-aquae*)、卷曲鱼腥藻(*Anabaena pertuthate*)、水华束丝藻], 伴随硅藻优势种类为脆杆藻的群落结构来指示水体达到富营养化, 星湖的浮游植物群落结构正是如此。

### 3 讨论

#### 3.1 星湖营养状态的时空特征

就富营养化指数而言, 星湖4个子湖存在一定的差异。波海湖已为富营养化水体, 中心湖接近富营养状态(年均营养状态指数为47.6), 青莲湖和仙女湖为中营养状态(年均值营养状态指数在40左右)。对于一个大型水体, 富营养化程度的空间异质性主要与水体的污染物排放口和水流有关<sup>[19, 20]</sup>。星湖的这种空间差异主要由污染物的来源和水体的连通性所决定。波海湖是入湖污染物量最高的水体, 星湖北部北岭区的生活污水直接进入波海湖, 这也是整个星湖污染的直接原因<sup>[21]</sup>。波海湖的总氮与总磷浓度明显地高于其它子湖。仙女湖是接纳污染量第二的水体, 水体面积与波海湖相当, 其入湖水量与波海湖相当, 污染程度要低于波海湖; 仙女湖与波海湖通过渠道相连, 由于汇渠道窄, 过水量有限。中心湖是连接波海湖的水体, 通过涵洞(过船)相连, 除湖面集雨和波海湖的过水外, 没有其它水源, 水力交换时间长(表1), 尽管没有直接的点源污染入湖, 受波海湖污染(接纳波海湖的来水)的影响, 富营养化较仙女湖严重。青莲湖是所调查的4个子湖中最小的子湖, 接纳仙女湖和中心湖的来水, 通过闸门排入西江; 由于湖面降水和蒸发量相当, 从水量平衡的角度, 星湖北部北岭区的集水入湖后, 最后全部在青莲湖南部的闸门排出, 从而导致青莲湖的水力滞留时间较短, 换水期为2 mo左右(表1)。污染物进入波海湖和仙女湖后, 一部分作为沉积物滞留在湖底, 可溶性部分由浮游植物利用, 营养盐以浮游植

物生物量的形式存在, 通过水力交换部分进入青莲湖, 由于青莲湖的水力滞留时间远低于其它子湖, 浮游植物生物量很难在青莲湖中积累, 从而导致青莲湖的营养盐低和浮游植物的生物量都较其它子湖低, 青莲湖也是4个调查子湖中沉水植物相对最多的子湖。

从季节变化上来看, 1月是星湖营养状态最低的时间段, 这主要是由于藻类生物量低所致。从浮游植物的组成以绿藻和硅藻为主的特点可以看出, 水温是直接的控制因子。星湖的营养盐浓度由北岭区入湖的污染物量所决定, 由于以居民生活污染为主, 排放量全年相对稳定, 其浓度则是由入湖总水量和水体的交换所决定。星湖地处南亚热带地区, 降雨量集中在丰水期, 特别7~8月为降水高峰期。星湖各子湖的总氮与总磷营养盐季节分布都是以3月最高, 7、8月逐渐降低, 10、12月又有所增加, 因此水文过程在星湖的水质调节中起着关键的作用。丰水期开始于3月下旬, 为满足城市防洪的要求, 在汛期来临前通过闸门排水来降低水位, 导致3月星湖水位最低。这一时期, 除污水外, 几乎没有湖面降雨和入湖径流量, 湖面的蒸发量大于降雨和入湖径流量的总和, 水体中受再悬浮和底泥释放的影响, 成为全年营养盐浓度最高的时期。星湖是浅水型湖泊, 由于长期外源污染入湖和沉积作用, 营养盐内负荷较高, 因此营养盐的内源释放也应是影响水体中营养盐浓度的主要因子之一, 但目前还缺少相应的研究和数据。

#### 3.2 浮游植物的群落结构特征

一般来说, 在水体富营养的进程中, 浮游植物的群落结构会有明显的变化, 蓝藻最终会成为最主要的优势类群<sup>[22]</sup>。在温带地区, 水温存在较大的季节性变化, 浮游植物群落结

表6 星湖中蓝藻、绿藻和硅藻优势种类的季节变化

Table 6 Seasonal variation in the dominant phytoplankton species of Cyanophyta, Chlorophyta and Bacillariophyta in the Xinghu Lake

| 子湖<br>Sub-lake       | 蓝藻 Cyanophyta                                 |                                          | 绿藻 Chlorophyta                         |                                                                                 | 硅藻 Bacillariophyta                     |                                                                 |
|----------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
|                      | 第一优势种<br>The first<br>dominant species        | 第二优势种<br>The second<br>dominant species  | 第一优势种<br>The first<br>dominant species | 第二优势种<br>The second<br>dominant species                                         | 第一优势种<br>The first<br>dominant species | 第二优势种<br>The second dominant<br>species                         |
| 仙女湖<br>Xiannü Lake   | Jan. 平列藻<br><i>Merismopedia glauca</i>        | 粘球藻<br><i>Gloeocapsa magma</i>           | 衣藻<br><i>Chlamydomonas</i> sp.         | 栅藻<br><i>Scenedesmus armatus</i>                                                | 小环藻<br><i>Cyclotella meneghiniana</i>  | 桥弯藻, 舟形藻<br><i>Cymbella</i> sp.,<br><i>Navicula dicephala</i>   |
|                      | Mar. 假鱼腥藻<br><i>Pseudanabaen limnetica</i>    |                                          | 衣藻<br><i>Chlamydomonas</i> sp.         | 微小四角藻<br><i>Tetraedron minmum</i>                                               | 小环藻<br><i>Cyclotella meneghiniana</i>  | 舟形藻<br><i>Navicula dicephala</i>                                |
|                      | Jul. 平列藻<br><i>Merismopedia glauca</i>        | 色球藻<br><i>Chroococcus minor</i>          | 栅藻<br><i>Scenedesmus armatus</i>       | 衣藻<br><i>Chlamydomonas</i> sp.                                                  | 小环藻<br><i>Cyclotella meneghiniana</i>  | 舟形藻<br><i>Navicula dicephala</i>                                |
|                      | Aug. 林氏藻<br><i>Lyngbya majuscula</i>          |                                          | 栅藻<br><i>Scenedesmus armatus</i>       | 空球藻<br><i>Eudorina elegans</i>                                                  | 模糊直链藻<br><i>Melosira italica</i>       | 脆杆藻<br><i>Fragilaria</i> sp.                                    |
|                      | Oct. 平列藻<br><i>Merismopedia glauca</i>        | 假鱼腥藻<br><i>Pseudanabaen limnetica</i>    | 栅藻<br><i>Scenedesmus armatus</i>       | 二角盘星藻<br><i>Pediastrum duplex</i>                                               | 脆杆藻<br><i>Fragilaria</i> sp.           | 小环藻<br><i>Cyclotella meneghiniana</i>                           |
|                      | Dec. 假鱼腥藻<br><i>Pseudanabaen limnetica</i>    | 平列藻<br><i>Merismopedia glauca</i>        | 栅藻<br><i>Scenedesmus armatus</i>       | 美丽胶网藻<br><i>Dictyosphaerium pulchellum</i>                                      | 脆杆藻<br><i>Fragilaria</i> sp.           | 小环藻<br><i>Cyclotella meneghiniana</i>                           |
| 渤海湖<br>Bohai Lake    | Jan. 平列藻<br><i>Merismopedia glauca</i>        | 粘球藻<br><i>Gloeocapsa magma</i>           | 栅藻<br><i>Scenedesmus armatus</i>       | 四足十字藻<br><i>Crucigenia tetrapedia</i>                                           | 小环藻<br><i>Cyclotella meneghiniana</i>  | 舟形藻<br><i>Navicula dicephala</i>                                |
|                      | Mar. 水化束丝藻<br><i>Aphanizomenon flos-aquae</i> |                                          | 栅藻<br><i>Scenedesmus armatus</i>       |                                                                                 | 颗粒直链藻<br><i>Melosira granulate</i>     |                                                                 |
|                      | Aug. 林氏藻<br><i>Lyngbya majuscula</i>          | 粘球藻<br><i>Gloeocapsa magma</i>           | 栅藻<br><i>Scenedesmus armatus</i>       | 镰形纤维藻<br><i>Ankistrodesmus convolutus</i>                                       | 小环藻<br><i>Cyclotella meneghiniana</i>  | 脆杆藻<br><i>Fragilaria</i> sp.                                    |
|                      | Dec. 平列藻<br><i>Merismopedia glauca</i>        | 假鱼腥藻<br><i>Pseudanabaen limnetica</i>    | 栅藻<br><i>Scenedesmus armatus</i>       | 实球藻<br><i>Pandorina morum</i>                                                   | 模糊直链藻<br><i>Melosira italica</i>       | 小环藻<br><i>Cyclotella meneghiniana</i>                           |
| 青莲湖<br>Qinglian Lake | Jan. 平列藻<br><i>Merismopedia glauca</i>        | 色球藻<br><i>Chroococcus minor</i>          | 微小四角藻<br><i>Tetraedron minmum</i>      | 镰形纤维藻<br><i>Ankistrodesmus convolutus</i>                                       | 小环藻<br><i>Cyclotella meneghiniana</i>  | 异极藻, 舟形藻<br><i>Gomphonema</i> sp.,<br><i>Navicula dicephala</i> |
|                      | Mar. 平列藻<br><i>Merismopedia glauca</i>        | 粘球藻<br><i>Gloeocapsa magma</i>           | 栅藻<br><i>Scenedesmus armatus</i>       | 二角盘星藻<br><i>Pediastrum duplex</i>                                               | 舟形藻<br><i>Navicula dicephala</i>       | 曲壳藻<br><i>Achnanthes</i> sp.                                    |
|                      | Jul. 假鱼腥藻<br><i>Pseudanabaen limnetica</i>    | 平列藻<br><i>Merismopedia glauca</i>        | 衣藻<br><i>Chlamydomonas</i> sp.         | 美丽胶网藻<br><i>Dictyosphaerium pulchellum</i>                                      | 舟形藻<br><i>Navicula dicephala</i>       | 变异直链藻<br><i>Melosira varians</i>                                |
|                      | Aug. 平列藻<br><i>Merismopedia glauca</i>        | 假鱼腥藻<br><i>Pseudanabaen limnetica</i>    | 单角盘星藻<br><i>Pediastrum simplex</i>     | 空球藻<br><i>Eudorina elegans</i>                                                  | 舟形藻<br><i>Navicula dicephala</i>       | 小环藻<br><i>Cyclotella meneghiniana</i>                           |
|                      | Oct. 假鱼腥藻<br><i>Pseudanabaen limnetica</i>    | 平列藻<br><i>Merismopedia glauca</i>        | 栅藻<br><i>Scenedesmus armatus</i>       | 二角盘星藻, 美丽胶网藻<br><i>Pediastrum duplex</i> ,<br><i>Dictyosphaerium pulchellum</i> | 脆杆藻<br><i>Fragilaria</i> sp.           | 舟形藻<br><i>Navicula dicephala</i>                                |
|                      | Dec. 平列藻<br><i>Merismopedia glauca</i>        | 假鱼腥藻<br><i>Pseudanabaen limnetica</i>    | 微小四角藻<br><i>Tetraedron minmum</i>      | 栅藻<br><i>Scenedesmus armatus</i>                                                | 小环藻<br><i>Cyclotella meneghiniana</i>  | 脆杆藻<br><i>Fragilaria</i> sp.                                    |
| 中心湖<br>Zhongxin Lake | Jan. 平列藻<br><i>Merismopedia glauca</i>        | 粘球藻<br><i>Gloeocapsa magma</i>           | 栅藻<br><i>Scenedesmus armatus</i>       | 微小四角藻<br><i>Tetraedron minmum</i>                                               | 小环藻<br><i>Cyclotella meneghiniana</i>  | 颗粒直链藻<br><i>Melosira granulate</i>                              |
|                      | Mar. 平列藻<br><i>Merismopedia glauca</i>        | 水华束丝藻<br><i>Aphanizomenon flos-aquae</i> | 微小四角藻<br><i>Tetraedron minmum</i>      | 栅藻<br><i>Scenedesmus armatus</i>                                                | 曲壳藻<br><i>Achnanthes</i> sp.           | 小环藻<br><i>Cyclotella meneghiniana</i>                           |
|                      | Jul. 假鱼腥藻<br><i>Pseudanabaen limnetica</i>    | 平列藻<br><i>Merismopedia glauca</i>        | 栅藻<br><i>Scenedesmus armatus</i>       | 衣藻<br><i>Chlamydomonas</i> sp.                                                  | 舟形藻<br><i>Navicula dicephala</i>       | 颗粒直链藻<br><i>Melosira granulate</i>                              |
|                      | Aug. 假鱼腥藻<br><i>Pseudanabaen limnetica</i>    | 尖头藻<br><i>Raphidiopsis sinensis</i>      | 微小四角藻<br><i>Tetraedron minmum</i>      | 栅藻<br><i>Scenedesmus armatus</i>                                                | 小环藻<br><i>Cyclotella meneghiniana</i>  | 舟形藻<br><i>Navicula dicephala</i>                                |
|                      | Oct. 假鱼腥藻<br><i>Pseudanabaen limnetica</i>    | 平列藻<br><i>Merismopedia glauca</i>        | 栅藻<br><i>Scenedesmus armatus</i>       | 衣藻<br><i>Chlamydomonas</i> sp.                                                  | 小环藻<br><i>Cyclotella meneghiniana</i>  | 颗粒直链藻<br><i>Melosira granulate</i>                              |
|                      | Dec. 螺旋鱼腥藻<br><i>Anabaena spiroides</i>       | 平列藻<br><i>Merismopedia glauca</i>        | 栅藻<br><i>Scenedesmus armatus</i>       | 四足十字藻<br><i>Crucigenia tetrapedia</i>                                           | 菱形藻<br><i>Nitzschia</i> sp.            | 变异直链藻<br><i>Melosira varians</i>                                |



构主要季节变化受温度的影响十分明显<sup>[19, 20]</sup>。星湖地处南亚热带地区, 浮游植物组成动态体现了热带—亚热带过渡区富营养化水体的特点<sup>[23]</sup>。星湖水温的季节变化幅度较小, 变化范围为15.5~34.2 °C, 年均值为23.9 °C。1月水温最低, 8月水温最高。1月, 绿藻和硅藻是浮游植物主导类群, 这是水温相对低所决定的; 3月是水温的过渡期, 绿藻和硅藻的相对丰度开始下降, 蓝藻的相对丰度增加; 在7、8、10月, 蓝藻成绝对优势类群; 12月浮游植物的组成与3月较为相似, 硅藻和绿藻的相对丰度增加。硅藻是比重较大的浮游植物类群, 水体混合强度是决定其种群数量的重要物理因子, 低水温是保障水体混合的重要条件, 特别是城市湖泊, 风生流相对较弱<sup>[24]</sup>。从丰度上看, 星湖各子湖在3月的数量低, 由于3月的采样时间为中旬, 进入丰水期初期。这一期间降水的营养盐浓度高, 同时降水所形成的地表径流将陆源的污染物大量排入湖泊中; 另一方面, 为了排洪, 通过闸门排水降低了湖泊的水位。因此, 尽管3月份入湖营养盐量很大, 水体中的浓度也高, 但浮游植物丰度很低。这种浮游植物的动态特点正是由城市湖泊运行与管理所导致的, 体现了人类活动的影响。这与其它湖泊有着很大区别, 而与水库等人工水体的浮游植物特点十分接近, 如同地区的大镜山水库<sup>[25]</sup>。

在热带亚热带地区, 由于光照和温度季节性变化没有温带地区显著, 当水体营养盐浓度达到较高的水平, 蓝藻可成为全年的优势类群<sup>[26~28]</sup>。从总体上看, 星湖中浮游植物以蓝藻丰度为最高。全年中蓝藻的第一优势种类以平列藻、席藻为主, 林氏藻、水华束丝藻、中华尖头藻在个别子湖的个别月份占据优势。平裂藻是重度富营养化水体的常见优势种之一。同样位于东莞市的横岗水库, 也是一座浅水水库, 其水动力过程与星湖相似, 也是一座受生活污染影响严重的富营养化水体, 其浮游植物也是以平列藻占优势<sup>[29]</sup>。星湖中绿藻的第一优势种主要是栅藻, 栅藻适于中等偏高的营养水平, 其竞争优势比较大。此外, 星湖的部分子湖在某些季节出现假鱼腥藻为第一优势种, 假鱼腥藻是热带水体的特征性种类, 该种类在南亚热地区的其它湖泊和水库较为普遍<sup>[30]</sup>。从优势种及丰度的变化看, 尽管浮游植物丰度存在一定的季节性差异, 星湖中浮游植物的种类组成结构相对稳定。

## 4 小结

星湖的富营养化水平处于一个中富营养化向富营养化过渡的阶段, 其中波海湖由于接纳的外源污染最多, 富营养化程度也较高, 已达富营养化水平。仙女湖地表径流最大, 接纳外源污染较波海湖少, 富营养化水平较低。青莲湖没有直接的污染来源, 水力滞留时间最短, 其富营养化程度与仙女湖接近。星湖浮游植物群落结构以蓝藻—绿藻为优势群落, 群落结构在种类组成上季节性差异不明显, 而在数量上存在明显的季节性差异。污染物入湖的位置、南亚热带地区的降水特征及对城市湖泊水位的人为调节是决定星湖水体营养化时空特征的关键因素。

星湖是广东省面积最大的天然湖泊, 作为一个重要的城市景观水体, 改善其水质和富营养化控制应以认识其特征和驱动因子为前提。由于星湖的污染主要来源于北岭区的外源

污染, 对这一入湖污染的控制是降低营养负荷的关键。作为一个城市浅水富营养化湖泊, 水上旅游项目活动频繁作用下的内源污染将是制约该湖泊生态恢复的重要因素。目前, 星湖建有观赏性鸟类景区, 鸟类能够在很大程度上影响湖泊营养盐的迁移和循环, 因此, 今后要加强对该湖的内源污染释放控制以及关于鸟类对湖泊富营养化影响的研究, 为星湖的生态恢复提供决策依据。

**致谢** 本研究在野外采样和理化因子测定时得到星湖管理人员的大力协作与帮助。

## References

- Schindler DW. Recent advances in the understanding and management of eutrophication. *Limnol & Oceanogr*, 2006, **51** (1, part 2): 356~363
- Qin BQ (秦伯强). A review and prospect about the aquatic environment studies in Taihu Lake. *J Lake Sci* (湖泊科学), 1998, **10** (4): 1~9
- Chen YW (陈宇炜), Qin BQ (秦伯强), Gao XY (高锡芸). Prediction of blue-green algae bloom using stepwise multiple regression between algae & related environmental factors in Meiliang Bay, Lake Taihu. *J Lake Sci* (湖泊科学), 2001, **13** (1): 63~71
- Xie P (谢平). 浅水湖泊内源磷负荷季节变化的生物驱动机制. *Sci China Ser D Earth Sci* (中国科学D辑: 地球科学), 2005, **35**: 11~23
- Kong FX (孔繁翔), Gao G (高光). Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2005, **25** (3): 589~595
- Schindler DW. Eutrophication and recovery in experimental lakes: Implications for lake management. *Science*, 1974, **184**: 897~899
- Fan CX (范成新), Zhang L (张路), Yang LY (杨龙元), Huang WY (黄文钰), Xu PZ (许朋柱). Simulation of internal loadings of nitrogen and phosphorus in a lake. *Oceanol Et Limnol Sin* (海洋与湖沼), 2002, **33** (4): 370~377
- Carpenter SR. Eutrophication of aquatic ecosystems: Bistability and soil phosphorus. *Proc Nat Acad Sci*, 2005, **102**: 10002~10005
- Scheffer M, Hosper SH, Meijer ML, Moss B, Jeppesen E. Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends Ecol & Evol*, 1993, **8**: 275~279
- Jeppesen E, Sondergaard M, Jesen JP, Havens KE, Anneville O, Carvalho L, Coveney MF, Deneke R, Dokulil MT, Foy B, Gerdeaux D, Hampton SE, Hilt S, Kangur K, Köhler J, Lammens EHHR, Lauridsen TL, Manca M, Miracle MR, Moss B, Nöges P, Persson G, Phillips G, Portielje R, Romo S, Schelske CL, Straile D, Tatrai I, Willén E, Winder M. Lake responses to reduced nutrient loading an analysis of contemporary long term data from 35 case studies. *Freshwater Biol*, 2005, **50**: 1747~1771
- Moss B. The art and science of lake restoration. *Hydrobiologia*, 2007, **581**: 15~24
- Komarkova J, Tavera R. Steady state of phytoplankton assemblage in the tropical Lake Catemaco (Mexico). *Hydrobiologia*, 2003, **502**: 187~196
- Zhao SY (赵帅营), Lin QQ (林秋奇), Liu ZW (刘正文), Han BP (韩博平). Characteristics of the metazoan zooplankton community in Xinghu Lake - A southern sub-tropical lake. *Acta Hydrobiol Sin* (水生生物学报), 2007, **31** (3): 405~413
- Lin SJ (林少君), Gu JG (顾继光), Wei P (魏鹏), Han BP (韩博平).

- Comparison of ecological characteristics between Gongping Reservoir and Xinghu Lake, Guangdong Province. *Chin J Ecol* (生态学杂志), 2005, **24** (7): 773~779
- 15 Tan Z (谭镇), Zhong P (钟萍), Ying WY (应文晔), Liu ZW (刘正文), Zhu GW (朱广伟), Wang JJ (王建军). Preliminary study on the characteristics of nitrogen and phosphorus in the sediments of Huizhou West Lake. *Ecol Sci* (生态科学), 2005, **24** (4): 318~321
- 16 Hargeby A, Blindow I, Hansson LA. Shifts between clear and turbid states in a shallow lake: Multi-causal stress from climate, nutrients and biotic interactions. *Arch Hydrobiol*, 2004, **161** (4): 433~454
- 17 McQueen DJ, Post JR, Mills EL. Trophic relationships in freshwater pelagic ecosystems. *Can J Fish Aquat Sci*, 1986, **35**: 1571~1581
- 18 Li YC (李耀初), Li SY (李适宇), Zhou JF (周劲风), Jia YS (贾艳双), Yang GX (杨广杏), Xie JM (谢镜明). Research of hydrological condition and water quality model of Xinghu Lake I. Investigation of hydrological condition and water quality. *Oceanol Et Limnol Sin* (海洋与湖沼), 2001, **32** (1): 81~87
- 19 Sommer U, Gliwicz ZM, Lampert W, Duncan A. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Arch Hydrobiol*, 1986, **106**: 422~477
- 20 Reynolds CS. The ecology of phytoplankton. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 362~389
- 21 Li YC (李耀初), Li SY (李适宇), Zhou JF (周劲风), Jia YS (贾艳双). Analysis of hydrologic environment of Xinghu in Zhaoqing. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni* (中山大学学报自然科学版), 1998, **37** (2): 199~203
- 22 Dokulil MT, Teubner K. Cyanobacterial dominance in lakes. *Hydrobiologia*, 2000, **438**: 1~12
- 23 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
- 24 Reynolds CS. The Ecology of Freshwater Phytoplankton. London: Cambridge University Press, 1984
- 25 Li QH (李秋华), Han BP (韩博平). Dynamics and structure of phytoplankton community in spring in a southern subtropical pumped-water reservoir. *J Trop & Subtrop Bot* (热带亚热带植物学报), 2007, **15** (4): 294~300
- 26 Downing JA, Watson SB, McCauley E. Predicting cyanobacteria dominance in lakes. *Can J Fish & Aquat Sci*, 2001, **58**: 1905~1908
- 27 Hunt RJ, Matveev V, Jones GJ, Warburton K. Structuring of the cyanobacterial community by pelagic fish in subtropical reservoirs: experimental evidence from Australia. *Freshwater Biol*, 2003, **48**: 1482~1492
- 28 Wang W (王伟), Gu JG (顾继光), Han BP (韩博平). Analysis of factors affecting chlorophyll a concentration in small reservoirs in South China. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2009, **15** (1): 064~071
- 29 Chen MR (陈绵润), Ouyang H (欧阳昊), Han BP (韩博平). Analysis on eutrophication characteristics of Henggang Reservoir. *Ecol Sci* (生态科学), 2006, **25** (5): 445~449
- 30 Han BP (韩博平), Lin GH (林桂花), Zhong XY (钟秀英). 水库蓝藻和蓝藻毒素分布与检测——广东省典型供水水库研究. Beijing, China (北京): China Environmental Science Press (中国环境科学出版社), 2006