

# 广州市区人工湖泊 PFU 原生动物群落群集过程及其对水质差异的指示作用\*

陈廷 黄建荣 陈晟平 邱文智 林铁豪 郑则俊 温少明 徐润林\*\*

(中山大学生命科学学院 广州 510275)

**摘要** 应用 PFU 法(GB/T12990-91)对广州市区主要湖泊——流花湖、荔湾湖和麓湖的原生动物群落与水质进行研究.结果表明:用 PFU 法所测定和计算的原生动物群集的种类数、植鞭虫指数、群集参数( $S_{eq}$ 、 $G$ 、 $T_{90\%}$ )、群落多样性指数  $d$  和群落污染值(CPV)等都能较好地指示 3 个人工湖泊水质的差异,水质由优到劣的排列顺序为麓湖 > 荔湾湖 > 流花湖.流花湖、荔湾湖和麓湖目前虽仍处于富营养状态,但清污截流等对城市湖泊污染的综合治理措施可以减少湖泊外部营养物负荷及沉积物内负荷,降低水体的营养盐含量,有助于原生动物群落的恢复.图 3 表 3 参 16

**关键词** 城市湖泊;原生动物群集过程;PFU 法;水质

CLC Q959.110.8 : X832

## PFU PROTOZOAN COMMUNITY COLONIZATION PROCESS AND ITS INDICATION OF WATER QUALITY IN GUANGZHOU URBAN ARTIFICIAL LAKES\*

CHEN Ting, HUANG Jianrong, CHEN Shengping, QIU Wenzhi,

LIN Tiehao, ZHENG Zejun, WEN Shaoming, XU Runlin\*\*

(School of Life Sciences, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract** With the PFU method (GB/T12990-91), the protozoan community colonization process was studied in three urban artificial lakes. Liuhua Lake, Liwan lake, and Luh Lake in Guangzhou. The result indicated that the numbers of protozoan species, phytomastigophora index, colonization process parameter ( $S_{eq}$ ,  $G$ ,  $T_{90\%}$ ), diversity index  $d$  and community pollution value(CPV) could well show the water quality. In these three lakes, totally 181 species of protozoan, including 53 phytoflagellates, 24 zooflagellates, 24 sacrocodinas and 80 ciliates were found during the investigation. The species and phytomastigophora index of Liwan Lake were 100 and 24%, while those of Liuhua Lake were 107 and 26.16%, and those of Luh Lake were 138 and 27.54%, respectively. The PFU protozoan community colonization in Liuhua Lake reached its species maximum of 65 on the 3rd day, while that in Liwan Lake and Luh Lake reached the species maximum of 66 and 90 on the 5th day. Though the three lakes were still in eutrophication condition, the comprehensive prevention and contermesasures including pollution-cutting engineering and cleaning out the substrate sludge could decrease the inside and outside loading of nutrition and sediments, reduce the nutrition salt content of water column, and help restore the protozoan community. Fig 3, Tab 3, Ref 16

**Keywords** urban artificial lake; protozoan community colonization process; polyurethane foam unit (PFU) method; water quality

CLC Q959.110.8 : X832

在我国,城市湖泊位于城市内或城市近郊,具有景观、旅游娱乐和养殖等多种使用功能,也曾是城市生活污水和工业废水排放场所.在过去的几十年里,由于种种原因,我国各地的城市湖泊富营养化程度普遍偏高,部分城市湖泊甚至达到高度富营养化程度<sup>[1-3]</sup>.目前,各地在进行城市环境综合治理时,均将城市内水体的富营养化及其防治作为重点,并已取得一定的效果<sup>[4,5]</sup>.

《水质微型生物群落监测——PFU 法》(GB/T12990-91)<sup>[6]</sup>自制定以来,由于快速、准确、经济的优点,已在废水处理、河流污染及其自净的生物监测方面被广泛应用,在城市湖泊方面也有一些报道<sup>[7-12]</sup>.

流花湖、荔湾湖和麓湖是广州市区最主要的 3 个人工湖泊,其中个别湖泊也曾被严重污染,引起鱼群大量死亡.从 1999 年起,广州市在对流花湖、荔湾湖和麓湖截污,保证生活污水不再进湖的同时,对流花湖、荔湾湖进行了清淤整治,将原有的污染沉积物进行了清除,以改善湖水水质.本实验应用 PFU 法研究了清淤截污后的流花湖、荔湾湖和麓湖 3 个城市人工湖泊 PFU 原生动物群落群集过程及其对水质差异的指示作用.

收稿日期:2003-03-03 接受日期:2003-06-17

\* 国家自然科学基金重点项目(No.39730070)和国家自然科学基金项目(No.39770144)的部分内容 Supported by the National Natural Foundation of China

\*\* 通讯作者 Coresponding author

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点介绍

流花湖位于周围人口稠密,工商业发达的越秀区流花公园内,水域面积  $3.3 \times 10^5 \text{ m}^2$ ,是市区最大的人工湖泊;荔湾湖位于广州市西关老城区的荔湾区,水域面积  $1.71 \times 10^5 \text{ m}^2$ ;荔湾湖和流花湖都是 1958 年开挖建成的人工湖. 麓湖位于广州城区北缘,白云山风景区南麓,水域面积  $2.1 \times 10^5 \text{ m}^2$ ,1958 年修坝蓄水而成. 流花湖、荔湾湖和麓湖都为封闭性的湖泊,但有河涌与珠江干流广州市段相通,可通过闸门控制湖泊水位. 如图 1 所示.

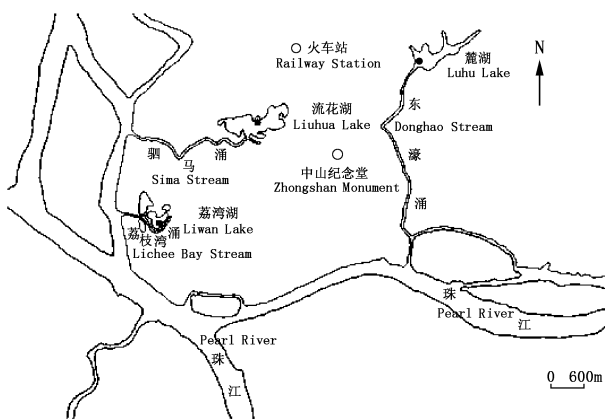


图 1 荔湾湖、流花湖、麓湖采样点示意图  
Fig. 1 A map showing Liwan Lake, Liuhua Lake and Luh Lake

### 1.2 样品的采集和分析

实验时间为 2002 年 9 月下旬至 10 月初. PFU 的放置、收集以及原生动物的观察统计均按 PFU 法 (GB/T12990-91) 进行;种类鉴定与分类依据文献的描述<sup>[6,8,13]</sup>.

在放置人工基质的同时,采集水样,按照水质评价和监测标准对水中主要理化指标进行分析.

### 1.3 群落多样性指数的计算

群落多样性指数按 Margalef 多样性指数公式:

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

式中, $d$  为群落多样性指数; $S$  为原生动物种类数, $N$  为个体数.

## 2 结果

### 2.1 水质的理化状况分析(表 1)

### 2.2 三个湖泊 PFU 原生动物群落结构

在流花湖、荔湾湖和麓湖 3 个湖泊中共观察到原生动物 181 种,其中纤毛虫 80 种,植物性鞭毛虫 53 种,动物性鞭毛虫 23 种,肉足虫 24 种. 如表 2 所示.

图 2 所示为 3 个湖泊原生动物种类数及植物性鞭毛虫比例(%).

流花湖常见的居留种为:宽扁裸藻 *Phacus pleuronestes*、卵形波豆虫 *Bodo ovatus*、球四鞭藻 *Carteria globosa*、舞行波豆虫 *Bodo saltans*、三星眼虫 *Euglena tristella*. 荔湾湖常见的居留种为:绿眼虫 *Euglena viridis*、珍珠映毛虫 *Cinetochilum margaritaceum*、卵形波豆虫 *Bodo ovatus*、污钟虫 *Vorticella putrina*、三星眼虫

*Euglena tristella*. 麓湖常见的居留种为:珍珠映毛虫 *Cinetochilum margaritaceum*、活跃波豆虫 *Bodo ludibundus*、衣眼虫 *Euglena chlamydophora*、三角波豆虫 *Bodo triangularis*、宽扁裸藻 *Phacus pleuronestes*.

表 1 流花湖、荔湾湖、麓湖水水质理化指标  
Table 1 The physicochemical parameters of water qualities in the three lakes

| 采样点<br>Sampling sites *                        | A    | B    | C    |
|------------------------------------------------|------|------|------|
| $\theta_{H_2O}/^{\circ}\text{C}$               | 24.2 | 25.6 | 23.2 |
| pH                                             | 7.2  | 7.2  | 7.1  |
| TS ( $\rho/\text{mg L}^{-1}$ )                 | 26   | 60   | 50   |
| DO ( $\rho/\text{mg L}^{-1}$ )                 | 4.0  | 3.92 | 6.95 |
| BOD <sub>5</sub> ( $\rho/\text{mg L}^{-1}$ )   | 25.6 | 23.1 | 18.5 |
| COD ( $\rho/\text{mg L}^{-1}$ )                | 60.1 | 56.1 | 45.1 |
| TP ( $\rho/\text{mg L}^{-1}$ )                 | 0.16 | 0.12 | 0.15 |
| TN ( $\rho/\text{mg L}^{-1}$ )                 | 2.72 | 2.42 | 1.43 |
| NO <sub>3</sub> -N ( $\rho/\text{mg L}^{-1}$ ) | 0.37 | 0.72 | 0.27 |
| NO <sub>2</sub> -N ( $\rho/\text{mg L}^{-1}$ ) | 0.68 | 0.53 | 0.26 |
| NH <sub>3</sub> -N ( $\rho/\text{mg L}^{-1}$ ) | 0.75 | 0.65 | 0.74 |

\* A:流花湖 Liuhua Lake; B:荔湾湖 Liwan Lake; C:麓湖 Luh Lake.  
下同 The same below

### 2.3 3 个湖泊原生动物群落群集过程

小型纤毛虫最先群集到 PFU 内,然后是纤毛虫和肉足虫类. 群集的原生动物种类数在开始时都呈上升趋势,但随着暴露时间的延长,种类数达到一定数量后都逐渐下降,固着生活的缘毛类则逐渐增加. 3 个湖泊原生动物群落群集过程如图 3 所示.

### 2.4 PFU 原生动物群落群集过程参数和多样性指数

3 个湖泊的原生动物群落群集过程参数  $S_{eq}$  (平衡时的种类数)、 $G$  (群集速度常数)、 $T_{90\%}$  (达到 90%  $S_{eq}$  所需的时间)和原生动物群落 Margalef 多样性指数  $d$  如表 3 所示.

## 3 讨论

### 3.1 城市湖泊 PFU 原生动物群落组成特点

原生动物根据营养方式可划分为 6 个功能类群,即光合作用户者(P)、食菌-碎屑者(B)、食藻者(A)、腐养者(S)、食肉者(R)和无选择的杂食者(N). 在干净的水体中,PFU 群集的原生动物种类数及 P、A 类群种类数多,植物性鞭毛虫比例高,随着水体的有机污染程度提高,群集的原生动物种类数少,异养的原生动物比例增加<sup>[8,14,15]</sup>. 本次实验中,PFU 原生动物群落在形成的早期 P 类群占优势,然后逐渐被 B 类群取代,P 类群和 B 类群占到群落种类数的 62%. 原生动物各功能类群与富营养状态的武汉东湖相比, P 和 A 类群比例较高,而 B 和 S 类群比例要少<sup>[8]</sup>. 在种类组成的相似性上,珠江广州市段 PFU 群集的原生动物绝大部分在广州市区湖泊中被检测到,但组成上有异同,表现为广州市区湖泊中动物性鞭毛虫种类数少,纤毛虫和肉足虫的种类数多,而植物性鞭毛虫种类数则相近<sup>[9]</sup>. 3 个湖泊当中,流花湖群集的原生动物种类数和植物性鞭毛虫比例(%)最小;荔湾湖次之,而麓湖最大(图 2). 按照 PFU 群集的原生动物种类数和植物性鞭毛虫比例对水质的评价,3 个湖泊水质由优到劣的排列顺序是麓湖 > 荔湾湖 > 流花湖.



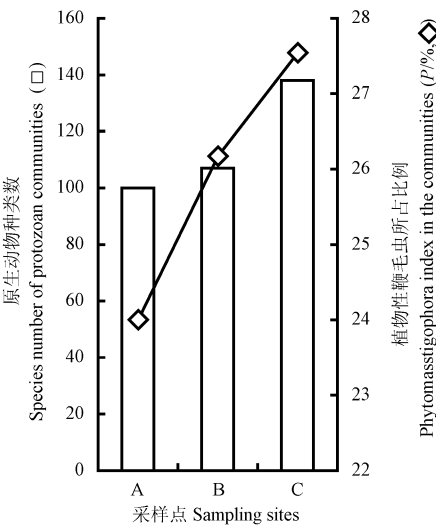


图2 广州市区人工湖泊的 PFU 原生动物群落种类数和植物性鞭毛虫比例

Fig. 2 Species numbers of PFU protozoan communities and phytomastigophora proportion in the lakes

A:流花湖 Liuhua Lake; B:荔湾湖 Liwan Lake; C:麓湖 Luhua Lake. 下同 The same below

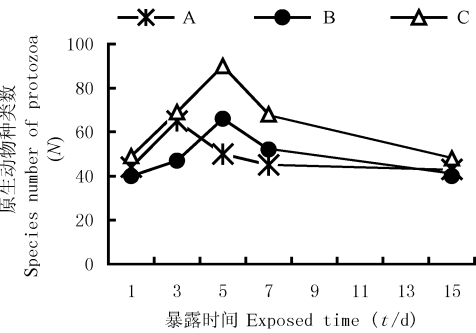


图3 3个湖泊原生动物在 PFU 块中的群集过程

Fig. 3 Colonization process of protozoas on PFU in the lakes

表3 PFU 原生动物群集过程参数  
Table 3 The parameter of protozoan colonization

| 采样点<br>Sampling sites | $S_{eq}$ | $G$  | $T_{90\%}$ | $d$  |
|-----------------------|----------|------|------------|------|
| A                     | 57.94    | 0.43 | 5.68       | 2.67 |
| B                     | 58.84    | 0.41 | 5.95       | 2.69 |
| C                     | 78.03    | 0.4  | 6.23       | 3.33 |

3.2 荔湾湖、流花湖和麓湖水水质差异与 PFU 原生动物群集过程特征

根据我国地面水环境质量标准 (GB3838—2002), 麓湖溶解氧含量为Ⅱ类,荔湾湖和流花湖溶解氧含量为Ⅴ类;麓湖的总氮含量为Ⅳ类,荔湾湖和流花湖总氮含量则超过Ⅴ类水质标准;3个湖泊的总磷含量都属于Ⅴ类,COD、BOD<sub>5</sub>则大大超过Ⅴ类水质标准。按照我国湖泊富营养化评分及分级的计算方法<sup>[2]</sup>,3个湖泊的营养状况评分指数 M 值分别为 77.7、79.3 和 73.9,都处于富营养状态。

PFU 法在群落水平上对水质进行生物监测,相对于单一指示种类监测方法层次更高,因此这种方法能提供更多的环境信

息,更准确地对水质进行评价和监测。有相当多的研究证明,由 PFU 法所测定和计算的群落群集参数如  $S_{eq}$ 、 $G$ 、 $T_{90\%}$ 、异养性指数  $HI$  和多样性指数  $d$  等都与化学综合污染指数  $P$  和综合营养指数  $T_{LI}$  在统计学上呈显著性相关,水质的状况可通过 PFU 群落参数表现出来,如在污染较少的水体中  $G$  值小,  $S_{eq}$  和  $T_{90\%}$  值大;而水质较差尤其是富营养化程度高的水体中  $G$  值大,  $S_{eq}$  和  $T_{90\%}$  值少<sup>[7-12,16]</sup>。

本次实验中,流花湖  $S_{eq}$  和  $T_{90\%}$  值都最小,其次为荔湾湖,而麓湖最高。在群集速度上,流花湖在 d 3 就达到种类数的最大值,为 65 种, $G$  值最大,为 0.43。荔湾湖和麓湖虽然都在 d 5 达到种类数的最大值,但麓湖种类数更多,为 90 种,且  $G$  值最小,为 0.40。3 个湖泊当中,麓湖的多样性指数最高,荔湾湖次之,流花湖最低。群落污染值 (CPV) 反映的是群落耐污种类的作用,数值越高说明水污染越严重,根据有关资料计算出 3 个湖泊的 PFU 原生动物群落污染值<sup>[7]</sup>,流花湖为 2.85,属极重污染水体;荔湾湖为 2.73,属重污染水体;麓湖为 2.58,属轻度污染水体。因此,广州市区 3 个人工湖泊 PFU 原生动物群集参数、多样性指数和群落污染值对水质的指示作用与理化分析结果是一致的,它们都能较好地反映其水质的差异,并对水质的污染状况作出评价。麓湖地处城市近郊,周围山地森林覆盖率高,有山泉汇流补充,加速湖水的更换,因此在 3 个湖泊中,水质最好;而流花湖地处闹市商业繁华地带,游人如织,湖水也被开发用于养殖大量观赏鱼类,因此水质最差。

3.3 城市湖泊富营养化污染治理与生态恢复

根据有关资料,荔湾湖、流花湖和麓湖在治理前的总磷含量分别为 0.62 mg/L、0.54 mg/L 和 0.22 mg/L,总氮含量荔湾湖、流花湖分别为 4.8 mg/L、8.3 mg/L<sup>[2,4]</sup>;在清淤截污后荔湾湖和流花湖总磷含量分别下降到 0.12 mg/L 和 0.16 mg/L,总氮含量分别下降到 2.42 mg/L 和 2.72 mg/L;而位于城市近郊,只进行了截污工程的麓湖总磷含量下降较少,为 0.15 mg/L。同样用 PFU 法,在对有城市生活污水排入的长春南湖中,共采集原生动物 114 种,其中植鞭虫 7 种,占总数的 6.16%,常见居留种也是异养性的鞭毛虫居多,如波豆虫、扁眼虫和异鞭虫<sup>[12]</sup>。而荔湾湖、流花湖和麓湖群集的原生动物无论在植鞭虫种类数和植物性鞭毛虫比例上都较长春南湖高,常见的居留种中,自养性原生动物种类数也增多。说明清污截流等对城市湖泊污染综合治理措施,无论对降低水体的营养盐含量还是对原生动物群落的恢复均有较显著的效果。

相对河流而言,湖泊水体更新周期长、水流速度慢,营养盐和污染物积累较快。清淤截污、栽种水生植物、养殖食用鱼类和人工更换湖水等措施可以减少外部点源污染和沉积物内负荷,增加湖中的氮、磷输出,然而城市湖泊作为游览胜地和休闲场所,旅游娱乐产生的废水、弃置物和废油;养殖观赏鱼类产生的大量残饵和鱼类排泄物;城镇地表径流中大量的氮、磷输入;降雨对城市大气的淋洗;城市降尘及地下水等非点源污染都大大增加了湖泊的氮、磷负荷量,加速了水体的富营养化进程。清淤截污后的广州市区 3 个湖泊目前还处于富营养化状态,在

理化指标上,其总磷、总氮,特别是 COD、BOD<sub>5</sub>等含量离广州市要求的旅游娱乐用水Ⅳ类水质目标还有较大的差距,地处繁华闹市的流花湖水质更差,说明城市湖泊在点源污染得到控制后,非点源污染对城市湖泊的富营养化影响仍然不容忽视。

## 4 结论

4.1 PFU 法群集过程参数能较好地指示广州市区 3 个人工湖泊水质的差异。

4.2 三个湖泊当中,麓湖水质最好,荔湾湖次之,流花湖最差,但目前仍都处于富营养状态。

4.3 清污截流等对城市湖泊污染的综合治理措施可以减少湖泊外部营养物负荷及沉积物内负荷,有助于原生动物群落的恢复。

### References

- 1 Yuan XY(袁旭音). Primary appraisal of pollution for lakes of China. *Volcanol & Mineral Resour* (火山地质与矿产), 2000, **21**(2): 128 ~ 136
- 2 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998
- 3 Sun G(孙刚), Sheng LX(盛连喜). Ecological engineering for eutrophication in lake. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2001, **12**(4): 590 ~ 592
- 4 Huang WY(黄文钰), WU YG(吴延根) Shu JH(舒金华). Hydrographical environmental problems and countermeasures of main lakes and reservoirs in china. *J Lake Sci* (湖泊科学), 1998, **10**(3): 83 ~ 90
- 5 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术. 北京: 化学工业出版社, 2001
- 6 Water quality-microbial community biomonitoring-PFU method GB/T 12990-91. 154
- 7 沈韞芬, 顾曼如, 冯伟松. 水污染的微型生物监测. 生命科学, 1997, **9**(2): 81 ~ 85
- 8 Shen YF(沈韞芬), Zhang ZS(章宗涉), Gong XJ(龚循矩), Gu MR(顾曼如), Shi ZX(施之新), Wei YX(魏印心). *Modern Biomonitoring Techniques Using Fresh-Water Microbiota*. Beijing: China Architecture & Building Press, 1990
- 9 Xu RL(徐润林), Bai QS(白庆笙), Xie RW(谢瑞文). PF unit protozoan community characteristics and the relation with the water quality in the Guangzhou Reach of the Peael River. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2002, **22**(4): 479 ~ 485
- 10 Xu MQ(许木启), Zhu J(朱江), Cao H(曹宏). The relationship between the protozoan community diversity and the water quality in the Baiyangdian lake. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2001, **21**(7): 1114 ~ 1120
- 11 Xu MQ(许木启), Cao H(曹宏), Wang YL(王玉龙). The purification efficiency of the Huanggu Stabilization Ponds and its relationship with biodiversity of protozoan community. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2000, **20**(2): 283 ~ 287
- 12 谢允田, 孙晓成, 付春燕等. PFU 方法在研究长春南湖富营养化中的应用. 东北水利水电, 1998(10): 40 ~ 44
- 13 Kahl A. Urtiere oder Protozoa. In: Dahled. *Die Tierwelt Deutschlands*. 1935
- 14 Shen YF(沈韞芬). *Protozoology*. Beijing: Science Press, 1999
- 15 Liu JK(刘健康). *Advance Hydrobiology*. Beijing: Scientific Press, 1998
- 16 Wang RC(王荣昌), Wen XH(文湘华), Li CZ(李翠珍), Qian Y.(钱易). Study on the correlation between aquatic microbial community parameters and the indicators of waqter quality. *Res Environ Sci* (环境科学研究), 2002, **15**(4): 43 ~ 49

## “CLC”:《中国图书馆分类法 = Chinese Library Classification》语种代码

从 2000 年第 1 期起,本刊正式用“CLC”作为《中国图书馆分类法》分类标引符号的语种代码. 本刊编辑部曾在专文[见:我国期刊论文分类标引问题面面观/孙二虎//编辑学报, 1999, **11**(1): 4 ~ 8]中论及我国缺乏类似“UDC”、“DDC”之类的分类语种专用代号的不便,并“盼望中国期刊界尽快得到分类语种代码的法定或约定的统一形式”. 现在这一问题事实上已经得到解决:第四版《中国图书馆分类法》(内容上涵盖了详简不同的四种版本,特别重要的是用上标“+”法包容了“资料本”)(北京:北京图书馆出版社, 1999. 3. ISBN 7-5013-1603-1/G. 418)公布的英文并列书名为《Chinese Library Classification》,依照国际文献分类工作惯例,我们完全可以用“CLC”作为该分类语种的标准代码。

我们郑重建议:用中外皆可识别的“CLC”标识,代替不规范的“中图分类号”或“中图法分类号”标识。

本刊编辑部