

Eutrophication Status of Artificial Lakes in a Small Coastal Watershed in Pearl River Delta*

Yujiu Xiong^{1,2#}, Zhi Wang³

¹Department of Water Resources and Environment, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou

²Key Laboratory of Water cycle and water security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Guangzhou

³Sanya Urban Planning Department, Sanya

Email: #xionguyj@mail.sysu.edu.cn

Received: Sep. 30th, 2013; revised: Nov. 20th, 2013; accepted: Nov. 26th, 2013

Abstract: Water samples were analyzed for a small coastal watershed in Sun Yat-sen University (Zhuhai) from March to July. Based on the results of total nitrogen (TN), total phosphor (TP), phytoplankton and chlorophyll a, eutrophication status were evaluated. The results showed that: 1) the comprehensive trophic level indexes of upper watershed were less than 40, which suggested the water was meso-eutrophic. The indexes of lower watershed were more than 50, which suggested the water was eutrophic; 2) TN concentration was 2.96 - 11.51 mg/L and TP concentration was 0.13 - 0.67 mg/L in artificial lakes in the lower watershed, which exceeded 0.7 mg/L and 0.05 mg/L respectively, the thresholds of lake eutrophication; 3) the abundance of phytoplankton in the artificial lakes was 1.09×10^6 - 4.58×10^6 cells/L, which is higher than 10^6 cells/L, the threshold of eutrophication occurring; 4) the chlorophyll a concentration in the artificial lakes was 65 - 505.23 $\mu\text{g/L}$.

Keywords: Eutrophication; Comprehensive Trophic Level Index; Phytoplankton; Artificial Lake; Zhuhai

珠江三角洲滨海小流域人工景观湖富营养化评价*

熊育久^{1,2#}, 王志³

¹中山大学地理科学与规划学院水资源与环境系, 广州

²中山大学华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广州

³三亚市规划局, 三亚

Email: #xionguyj@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2013 年 9 月 30 日; 修回日期: 2013 年 11 月 20 日; 录用日期: 2013 年 11 月 26 日

摘 要: 在 2009 年 3~7 月间, 通过对中山大学珠海校区滨海小流域上游河流、下游人工景观湖不同监测样点进行取样分析, 根据营养盐、藻类与叶绿素 a 等指标评价该流域水体的富营养化状态, 结果表明: 1) 上游河流采样点的综合营养状态指数(TLI)均小于 40, 水体仅处于中营养状态, 富营养化的风险小, 下游人工景观湖的 TLI 在 50~96 之间, 均已进入轻度富营养状态甚至重度富营养状态; 2) 下游人工景观湖中总氮(TN)浓度在 2.96~11.51 mg/L 之间, 总磷(TP)浓度在 0.13~0.67 mg/L 之间, 均超过湖泊富营养化发生的初始值(TN 为 0.7 mg/L, TP 为 0.05 mg/L); 3) 人工景观湖浮游藻类丰度介于 1.09×10^6 ~ 4.58×10^6 个/L 之间, 大于湖库富营养化发生时的阈值 10^6 个/L, 且浮游藻类以蓝藻、绿藻为主; 4) 人工景观湖中叶绿素 a 浓度在 65~505.23 $\mu\text{g/L}$ 之间。

关键词: 富营养化; 综合营养状态指数; 浮游藻类; 人工景观湖; 珠海

*基金项目: 高校基本科研业务费中山大学青年教师培育项目(12lgpy49)。

作者简介: 熊育久(1982 年-), 男, 博士/讲师, 主要研究方向: 水文水资源评价。

#通讯作者。

1. 研究背景

富营养化是水体接纳过量的氮、磷等营养性物质, 使藻类以及其它水生生物异常繁殖, 造成水体透明度、溶解氧下降、水质恶化的过程, 导致水生生态系统及其功能受到阻碍和破坏^[1]。自然条件下, 水体从贫营养到富营养化的过程要经过几千年或更长时间, 但由于人类不合理的活动(使用大量含氮、磷的肥料、任意排放生活污水等), 加速了富营养化的进程, 可以使水体在几年内出现富营养化现象。

城市人工景观湖, 是城市景观的重要组成部分, 美化环境、改善局部小气候。然而, 城市景观湖大部分封闭性强、水体流动性差, 富营养化发生的几率大, 是城市景观水体的主要环境问题^[2-5]。尤其是随着城市化进程的增加, 大量生活污水进入景观湖, 造成水质急剧下降、富营养化程度高^[6]。珠江三角洲地区城市化进程迅速, 城市景观湖水体富营养化研究相对较少。本文以中山大学珠海校区滨海小流域为研究区, 分别在 2009 年 3~7 月间取样, 对该流域内人工景观湖的富营养化状态进行评价, 为城市景观湖水体富营养化预防与水质管理提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 小流域概况

研究区位于广东省珠海市中山大学珠海校区内, 小流域三面环山, 流域从上游补给区至下游排泄区距离约为 4 km, 集雨面积约为 5 km²。流域上游为丘陵区, 下游地势平坦, 为学校教学生活区, 该区有 4 个人工景观湖, 本次研究关注其中两个, 由北向南分别为岁月湖、隐湖(见图 1), 各湖之间由输水管相连。

研究区属亚热带海洋性气候, 年平均气温 22.3℃, 最低气温 2.5℃。年降雨量为 1770~2300 毫米, 4 月至 9 月盛行东南季风, 为雨季, 降水量占全年的 85%; 10 月至次年 3 月盛行东北季风, 为旱季。

2.2. 样品采集与处理方法

监测点共 6 个, 1、2 号采样点分别设在上游河流断面, 3 号采样点设在下游人工景观湖(岁月湖)出水口, 4、5、6 分别设在下游人工景观湖(隐湖)的污水进水处、湖中部和出水口(见图 1)。



注: 图中红虚线为采样点所处的断面位置, 红实线为流域边界。

Figure 1. Location of the study area and the sample sites
图 1. 研究区域及监测点示意图

2009 年 3~7 月, 每月进行现场采样, 具体采样时间为: 3 月 8 日、4 月 12 日、5 月 5 日、6 月 2 日、7 月 10 日, 采样时间在 10:00~12:00 AM。距水面 0.5 m 处采 1 L 水样 3 次, 分别加入鲁哥试液(检测浮游植物)、硫酸(检测总氮 TN、总磷 TP、高锰酸钾指数 COD_{Mn})、碳酸镁溶液(检测 Chl-a)固定, 当天运回中山大学地理科学与规划学院的实验室分析。现场测定水温(温度计)、PH 值(酸碱试纸)、透明度 SD(圆盘法)。

浮游植物检测采取虹吸法浓缩, 用 0.1 mL 的浮游生物计数框进行藻类定量镜检^[7]。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》^[8]。叶绿素 a 的测定采用分光光度法, 水样经丙酮充分萃取后离心定容, 用 751 型分光光度计分别测量酸化前后上清液在 665 nm 和 750 nm 处的吸光值, 再计算叶绿素 a 含量^[9,10]。其它水质指标检测方法见表 1。

以上各检测指标每次读数或实验 3 次, 取其平均值作为最终检测结果。

2.3. 富营养化评价方法

本文采用综合营养状态指数(TLI)评价研究区富营养化, 其原理是选取叶绿素 a 为基准因子, TLI (Chl-a)为基准状态指数, 将 TP、TN、SD、COD_{Mn} 的营养状态指数同 TLI (Chl-a)加权后累加。若 TLI (Σ) < 30, 水体为贫营养型; TLI 在 30~50 之间为中营养型; TLI > 50, 为富营养型。综合营养状态指数计算方法见公式(1-2)^[11]:

$$TLI = \sum_{j=1}^m (W_j \times TLI(j)) \quad (1)$$

$$TLI(j) = A + B \ln(j) \quad (2)$$

Table 1. Methods to detect water quality indexes
表 1. 水质指标检测方法

检测项目	检测方法	最低检出限 (mg/L)
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光 (GB11894-89)	0.05
TP	氯化亚锡分光光度法 (GB11893-89)	0.01
COD _{Mn}	高锰酸盐指数法(GB11892-82)	0.50

式中: TLI 为综合营养状态指数; $TLI(j)$ 为第 j 种参数的营养状态指数, w_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重; m 为评价参数的个数; A 、 B 为系数^[11](见表 2)。

研究中采用科学制图与数据分析软件 OriginPro 8.5。

3. 结果与分析

3.1. 营养盐

1) 总氮(TN)

从上游的 1 号采样点到下游的 6 号采样点, TN 浓度大致呈增加的趋势, 在 0.81~11.51 mg/L 之间波动, (见图 2)。按照湖泊营养类型标准^[11], 各监测点水体 TN 浓度均已超过富营养化发生的阈值(0.70 mg/L), 大部分检查结果均高于重度富营养化状态 TN 浓度临界值 1.30 mg/L。各采样点 TN 浓度均值从大到小排序为: $S4 > S6 > S5 > S3 > S2 > S1$ 。从流域上游到下游水体受 TN 污染的程度逐渐增加。

2) 总磷(TP)

TP 浓度变化规律比 TN 明显, 从 1 号采样点到 6 号采样点, 5 次采样检测的 TP 浓度均呈相似的增加趋势(见图 3)。上游 1、2 号采样点的 TP 浓度在 5 次采样期间变化不大, 主要在 0.01~0.05 mg/L 之间, 但从下游 3 号采样点开始, 呈明显的爬升状态, TP 浓度在 0.13~0.67 mg/L 之间变化。根据湖泊营养类型标准^[11], 上游 1、2 号监测点水体 TP 浓度仅达到中营养状态, 下游 4 个监测点 TP 浓度均已超过富营养化发生的阈值(0.05 mg/L), 大部分检测结果均高于重度富营养化状态 TP 浓度临界值 0.09 mg/L。各采样点 TP 浓度均值从大到小排序为: $S5 > S4 > S6 > S3 > S2 > S1$ 。从流域上游到下游水体受 TP 污染的程度逐渐增加。

Table 2. The value of A, B and W for Chl-a and other parameters of lakes/reservoirs in China [11]
表 2. 中国湖库营养状态指数权重与 A、B 系数^[11]

系数	指标				
	SD	COD	TN	TP	Chl-a
W	0.1834	0.1834	0.1790	0.1879	0.2663
A	15.18	1.09	54.53	94.36	25
B	-19.4	26.61	16.94	16.24	10.86

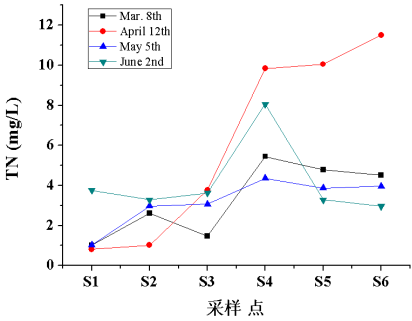


Figure 2. The concentration of total nitrogen for each sample site¹
图 2. 各采样点 TN 浓度¹

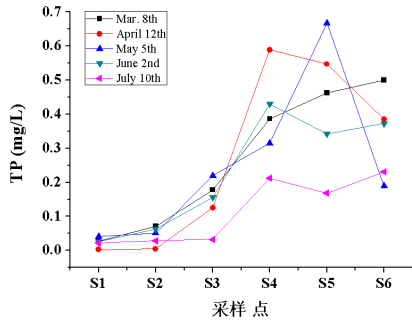


Figure 3. The concentration of total phosphorus for each sample site
图 3. 各采样点 TP 浓度

3.2. 浮游藻类丰度与优势种

上游 1、2 号采样点浮游藻类丰度相对较低, 介于 $0.21 \times 10^4 \sim 45.75 \times 10^4$ 个/L。下游 3、4、5、6 号采样点浮游藻类丰度在 $1.09 \times 10^6 \sim 4.20 \times 10^6$ 个/L(见图 4), 均大于湖库富营养化时浮游藻类丰度的阈值 10^6 个/L(除 3 号采样点在 7 月的丰度低), 表明在监测期间各景观湖的浮游藻类数量处在很高的水平。就浮游藻类平均丰度而言, $S6 > S5 > S4 > S3 > S2 > S1$ 。在空间上同样是流域下游的浮游藻类丰度高于上游, 与 TN、TP 的空间变化一致。

¹7 月份采样数据中, 有 4 个采样点的检测结果小于 TN 的最低检出限 0.05 mg/L, 不采纳该组实验结果。

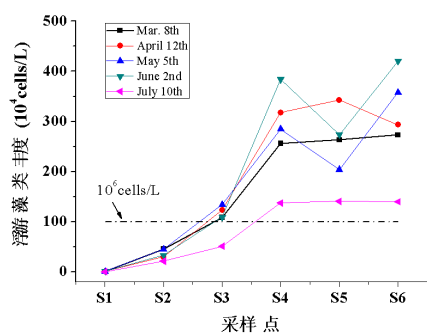


Figure 4. The abundance of algae for each sample site
图 4. 各采样点浮游藻类丰度

在监测期间, 主要检出浮游藻类 4 门 22 属, 分别为绿藻门、蓝藻门、硅藻门、甲藻门。其中: 蓝藻门 6 属, 占 27.3%; 绿藻门 11 属, 占 50%; 硅藻门 3 属, 占 13.6%; 甲藻门 2 属, 占 9.1%(见图 5(a))。研究表明, 硅藻、蓝藻、绿藻是水体富营养化的指示生物(当丰度大于 10^6 个/L 时), 尤其是蓝藻和绿藻, 代表水体富营养化程度非常高, 已进入轻度富营养甚至重度富营养状态; 甲藻表明水体富营养化程度处于中营养状态^[12]。

对各采样点检出的浮游藻类种数而言, $S3 > S5 > S6 > S4 > S2 > S1$ 。其中: 上游 1、2 号点浮游藻类种数较其它点少; 下游 3 号采样点种类最多, 蓝藻与绿藻的种类也最多; 4、5 号采样点蓝藻种类一样, 但 5 号点的绿藻种类略比 4 号点多; 6 号采样点绿藻种类与 3 号点一样多, 但其蓝藻种类较 3、4、5 号点少。藻类种数在各采样点的多寡, 从某种程度上也反映了从上游到下游水体富营养化的程度逐渐严重。

3.3. 叶绿素 a (Chl-a)浓度

叶绿素 a 是反映水体中浮游藻类生物量的一个综合指标。各采样点叶绿素 a 的浓度变化较大, 在 $0.36 \sim 505.23 \mu\text{g/L}$ 之间。1、2、3 号采样点叶绿素 a 浓度在 $0.82 \sim 14.20 \mu\text{g/L}$ 之间(3 号点 3 月份的检测结果除外)(见图 6)。按照金相灿的研究成果^[6], 其水质尚可达到 III 类; 下游 4、5、6 号采样点叶绿素 a 浓度在 $65 \sim 505.23 \mu\text{g/L}$ 之间(6 号点 4 月份的检测结果及 6 月份结果除外), 其水质均为 V 类, 已处于轻度富营养或重度富营养的阶段, 只能满足一般景观用水要求。就叶绿素 a 平均浓度而言, $S4 > S5 > S6 > S3 > S2 > S1$ 。

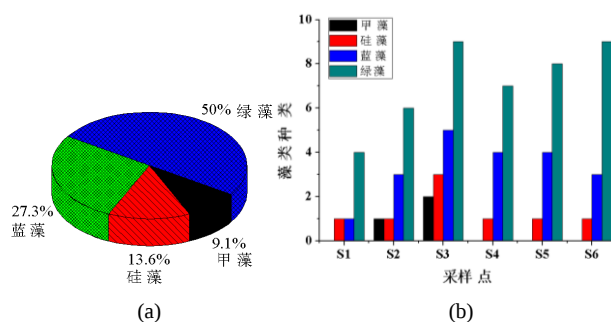


Figure 5. (a) Dominant algae and its ratio; (b) Dominant algae for each sample site

图 5. (a) 浮游藻类优势种及其比例; (b) 各采样点浮游藻类优势类群

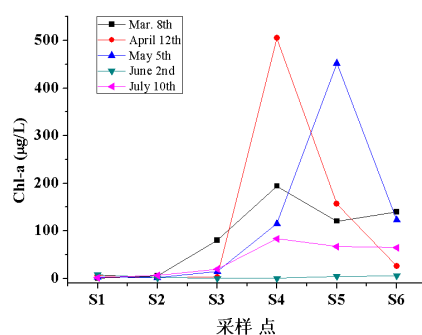


Figure 6. The concentration of chlorophyll a for each sample site
图 6. 各采样点 Chl-a 浓度

3.4. 综合营养状态指数

各采样点综合营养状态指数(TLI)在 23~96 之间变化(见图 7)。就 TLI 平均值而言, 上游 1、2 号采样点仅处于中营养状态($S2 > S1$), 水质相对较好, 富营养化的风险小; 下游 3、4、5、6 号采样点已进入富营养状态, 3 号点富营养化程度较轻, 其它三处均达到重度富营养($S5 > S4 > S6 > S3$)。与前面单指标判断结果基本一致, 即流域下游富营养化严重。

在本次研究中, 由于 6、7 月份分别出现一组实验数据异常现象, 被剔除, 导致其 TLI 结果偏小。6 月份的透明度观测原始数据因 2 个采样点数据缺失, 在计算 TLI 时未参与运算, 若假定各采样点的水质好(透明度均为 30 cm), 则需在现有 TLI 运算结果上加 14 ($0.1834 \times [51.18 - 19.41 \times \ln 0.3]$); 7 月份 TN 的检测结果有 4 个值出现异常, 小于检测方法的最低检出限, 在计算 TLI 时未采用 TN, 若按所有检测 TN 浓度的最小值 0.81 mg/L 计算, 则需在现有 TLI 运算结果上加 9 ($0.1790 \times [54.53 + 16.94 \times \ln 0.81]$)。根据以上假设, 新的 TLI 结果对上游 1、2 号采样点影响不

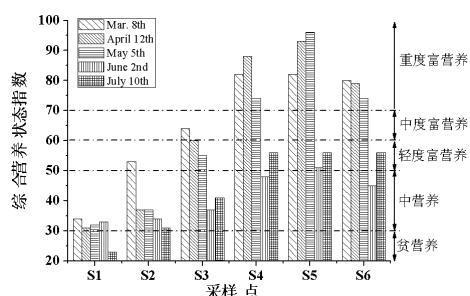


Figure 7. Evaluation results of eutrophication for each sample site
图 7. 各采样点富营养化评价结果

大,但下游 3、4、5、6 号采样点的富营养化程度会有不同程度的增加,尤其是处于流域末端的 4、5、6 号采样点。

从图 1 可见,上游 1 号采样点周边植被覆盖良好,人为活动痕迹很小;2 号采样点周边虽有少数果园、农田分布,但其上游人为活动痕迹小;3 号采样点处于景观湖(岁月湖)出水口,北面中山大学学生宿舍生活区、西面是食堂餐厅,受人为影响较大;4、5、6 号采样点均位于岁月湖下游的隐湖,水质不仅受其上游岁月湖的影响,还受西北面运动场(草地施肥)、东面教学楼(生活污水、垃圾等)影响。

综上所述,小流域上游水质尚好,未发生富营养化。随着河流进入中山大学生活区,生活污水排入及其它不合理的人为活动,导致下游的人工景观湖水质恶化,已呈现轻度至重度富营养化状态。

4. 结论

1) 营养盐在空间上变化明显,均呈现上游低、下游高的趋势。各采样点 TN 浓度在 0.81~11.51 mg/L 之间;上游 1、2 号采样点 TP 浓度主要在 0.01~0.05 mg/L 之间,下游 3、4、5、6 号采样点的在 0.13~0.67 mg/L 之间。

2) 浮游藻类丰度在空间上变化明显,均呈现上游低、下游高的趋势。上游 1、2 号采样点浮游藻类丰度介于 $0.21 \times 10^4 \sim 45.75 \times 10^4$ 个/L,下游 3、4、5、6 号的在 $1.09 \times 10^6 \sim 4.20 \times 10^6$ 个/L 之间。浮游藻类以绿藻、蓝藻为主,分别检出种群的 50%、27.3%。

3) 叶绿素 a 在空间上变化与浮游藻类丰度大致相似。1、2、3 号采样点叶绿素 a 浓度在 0.82~14.20 $\mu\text{g/L}$ 之间,下游 4、5、6 号采样点的在 65~505.23 $\mu\text{g/L}$ 之间。

4) 综合营养状态指数(TLI)在 23~96 之间变化,上游 1、2 号采样点仅处于中营养状态($S2 > S1$);下游 3、4、5、6 号采样点已进入富营养状态,3 号点富营养化程度较轻,其它三处均达到重度富营养($S5 > S4 > S6 > S3$)。

5) 在中山大学珠海校区滨海小流域,上游河流水质尚好,富营养化风险小,下游人工景观湖已出现富营养化现象,流域最下游的隐湖水体进入重度富营养化状态。

5. 致谢

感谢中山大学地理科学与规划学院实验中心提供实验支持;感谢第十一届中国水论坛推荐。

参考文献 (References)

- [1] OECD. Eutrophication of waters, monitoring, assessment and control. Final Report, OECD Cooperative Program on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control), Environment Directorate, OECD, Paris, 1982: 154.
- [2] 沈治蕊,卞小红,赵燕,吴云海,夏红. 南京煦园太平湖富营养化及其防治[J]. 湖泊科学, 1997, 9(4): 377-380. SHEN Zhirui, BIAN Xiaohong, ZHAO Yan, WU Yunhai and XIA Hong. Taiping Lake in Xuyuan Park, Nanjing: Eutrophication, treatment and prevention. Journal of Lakes Sciences, 1997, 9(4): 377-380. (in Chinese)
- [3] 彭俊杰,李传红,黄细花. 城市湖泊富营养化成因和特征[J]. 生态科学, 2004, 23(4): 370-373. PENG Junjie, LI Chunhong and HUANG Xihua. Causes and characteristics of eutrophication in urban lakes. Ecological Science, 2004, 23(4): 370-373. (in Chinese)
- [4] 蔡庆华,胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究[J]. 水生生物学报, 2006, 30(1): 7-11. CAI Qinghua, HU Zhenyu. Studies on eutrophication problem and control strategy in the Three Gorges Reservoir. Acta Hydrobiologica Sinica, 2006, 30(1): 7-11. (in Chinese)
- [5] 江启明,侯伟,顾继光,彭亮,雷腊梅. 广州市典型中小型水库营养状态与蓝藻种群特征[J]. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2461-2467. JIANG Qiming, HOU Wei, GU Jiguang, PENG Liang and LEI Lamei. Nutritional status and population characteristics of Cyanobacteria in small and medium sized reservoirs in Guangzhou, southern China. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(10): 2461-2467. (in Chinese)
- [6] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001. JING Xiangcan. Technique of administration and control of lake eutrophication. Beijing: Chemical industry Press, 2001. (in Chinese)
- [7] 苑宝玲,曲久辉,张金松,葛旭,梁明,田宝珍. 高铁酸盐对 2 种水源水中藻类的去除效果[J]. 环境科学, 2001, 22(2): 78-81. YUAN Baoling, QU Jiuhui, ZHANG Jinsong, GE Xu, LIANG Ming and TIAN Baozhen. The efficiency of algae removal from drinking water by ferrate. Environmental Science, 2001, 22(2): 78-81. (in Chinese)
- [8] 胡鸿钧,魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M].

- 北京: 科学出版社, 2006.
- HU Hongjun, WEI Yinxin. The freshwater algae of China: Systematics, taxonomy and ecology. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [9] 陈宇炜, 高锡云. 浮游植物叶绿素 a 含量测定方法的比较测定[J]. 湖泊科学, 2000, 12(2): 185-188.
- CHEN Yuwei, GAO Xiyun. Comparison of two methods for phytoplankton chlorophyll a concentration measurement. Journal of Lakes Sciences, 2000, 12(2): 185-188. (in Chinese)
- [10] 刘镇盛, 王春生, 倪建宇, 朱根海, 周怀阳. 抚仙湖叶绿素 a 的生态分布特征[J]. 生态学报, 2003, 23(9): 1773-1780.
- LIU Zhensheng, WANG Chunsheng, NI Jianyu, ZHU Genhai and ZHOU Huaiyang. Ecological distribution characteristics of chlorophyll a in Fuxian lake. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(9): 1773-1780. (in Chinese)
- [11] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- JIN Xiangcan, TU Qingying. The standard methods in lake eutrophication investigation (second edition). Beijing: China Environmental Science Press, 1990. (in Chinese)
- [12] 国家环保总局. 水生生物监测手册[M]. 南京: 东南大学出版社, 1993.
- Ministry of Environmental. Protection of the People's Republic of China. Aquatic monitoring manual. Nanjing: Southeast University Press, 1993. (in Chinese)