

水源热泵影响下的湖水细菌和藻类的动态变化^{*}

叶姜瑜^{1,2}, 王云仙¹, 何强^{1,2}, 翟俊^{1,2}, 王勇^{1,2}, 刘涛^{2,3}

(1 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 2 三峡库区生态环境教育部
重点实验室, 重庆 400045; 3 西南大学 生命科学学院, 重庆 400715)

摘 要: 在水源热泵运行前后的 3 个时期, 对安康湖 7 个采样点进行了 3 次水体细菌数、藻类细胞密度及其种类的测定, 并同步对理化因子进行测定。结果表明: 细菌数存在时空差异, 最小值出现在 1 月, 最高值出现在 12 月; 排水口附近的细菌数高于库湾区; 藻类细胞密度的变化趋势与细菌数基本一致, 12 月和 1 月蓝藻占主要优势, 而 3 月硅藻和裸藻占主要优势。细菌数与温度、总磷呈显著相关, 但与总氮、藻类细胞密度无明显相关性, 表明总氮在该水体中不是细菌生长的限制因子。水源热泵系统对水体局部生态系统有一定的影响, 其显著性还需要利用分子生态学等手段进一步研究和评估。

关键词: 细菌; 藻类; 环境因子; 水源热泵

中图分类号: X835

文献标识码: A

文章编号: 1674-8425(2010)07-0023-07

Variability of Bacteria and Algae in Lake Water Under The Effects of Water Source Heat Pump

YE Jiang-yu^{1,2}, WANG Yun-xian¹, HE Qiang^{1,2}, ZHAI Jun^{1,2}, WANG Yong^{1,2}, LIU Tao^{2,3}

(1. City Construction and Environmental Engineering Academy, Chongqing University, Chongqing 400045, China

2. Key Laboratory of Eco-environments of Three Gorges Reservoir Region of Ministry of Education, Chongqing 400045, China

3. School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract Observations are made on bacterial and algae abundance, species composing at seven sites of Ankang Lake during three different periods after the operation of water source heat pump, and the environmental factors are also investigated. It is found that bacterial abundance changes with different times and spaces with its minimum in January and its maximum in December. The bacterial abundance in the outfall is much more than that in bay of the Lake. The change trend of algae abundance is the same as that of bacterial variability. Cyanophyta is the dominant species in December and January while Bacillariophyta and Euglenophyta become the dominant species in March. Generally, bacterial abundance is closely correlated with the temperature and TP, but has no correlation with the TN and algae abundance, which indicates that TN is not the limiting factor for bacteria and the operation

* 收稿日期: 2010-03-15

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07315-003); 国家“十一五”科技支撑计划资助项目 (2006BAJ01A063); 重庆市自然科学基金资助项目 (2007BB6160); 三峡库区水环境安全与生态建设重庆市市级重点实验室开放项目

作者简介: 叶姜瑜 (1963-), 男, 四川青川人, 博士, 副教授, 主要从事环境微生物学及微生物生态学研究。

of water source heat pump affects water ecosystem. However, its prominent effect needs to be further researched and evaluated through molecular ecology.

Key words bacteri; phytoplankton abundance; environmental factors; water source heat pump

细菌和藻类是水生生态系统中最为敏感并极易受环境影响的生物类群。水体中细菌的生存及生命活动决定着其中食物链基本环节的发展^[1-2]。细菌既可将颗粒有机碳(POC)分解转化为溶解性有机碳(DOC),并进一步矿化为营养盐供浮游植物利用,又可吸收DOC合成自身成分,所形成的细胞颗粒通过浮游动物的摄食进入上一营养级。浮游藻类是水体生态系统的重要组成部分,是水体中溶解氧的主要生产者,在水生生态系统食物链中占据着十分重要的地位^[3]。因此细菌和浮游藻类的种群结构及生物量变化直接或间接地反映水生生态系统的变化情况,是环境评估的重要指征。

水源热泵是利用了地球水体所储藏的太阳能资源作为冷热源进行能量转换的供暖空调系统,其机组运行无污染,不会产生城市热岛效应,对环境非常友好,是理想的绿色环保产品,正日益受到重视。不过,水源热泵对水体生态系统的影响却鲜有研究和报道。本研究以重庆市开县城区安康湖的水源热泵运行为对象,调查了不同阶段细菌数的时空变化和浮游藻类生物量变化及其种群组成情况,为水源热泵的利用提供参考。

1 实验材料与方法

1.1 采样位点

安康湖位于开县人民医院附近,水容量常年维持在 $16\sim 22$ 万 m^3 ,水深常年保持在 $5\sim 7.5$ m,安装的水源热泵系统利用安康湖水源进行热交换。在春冬季节(12月、1月、3月)对安康湖7个位点分月进行采样,样点分布如图1所示。

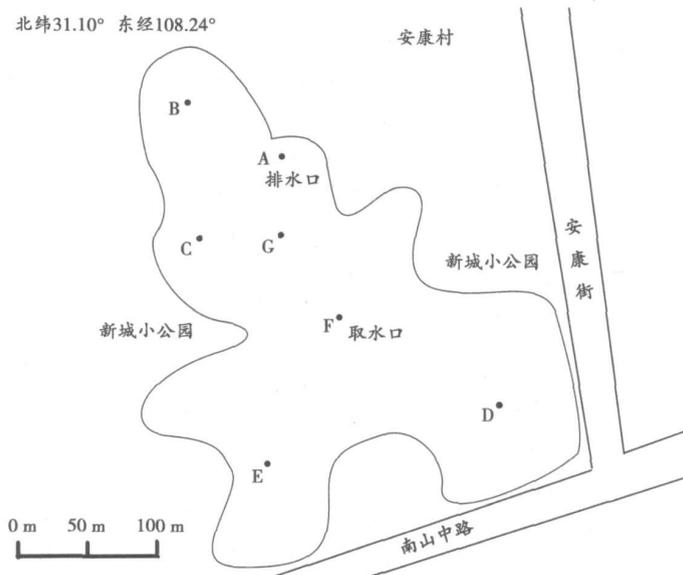


图1 开县安康湖水采样位点

1.2 样品的采集

12月、1月和3月各采集水样1次,微生物样品采集于0.5m处。将水样注入清洗干净并预先灭菌的取样瓶中,加入无颗粒甲醛(甲醛终体积百分比为2%),带回实验室4℃保存至分析时。用于浮游藻类及水质分析的水样为表层水样与0.5m深水样的混合水样,注入预先灭菌的取样瓶中。

1.3 样品的分析

细菌计数采用表面荧光直接计数法^[4]。藻类数量测定及种类鉴定见文献[5]。总氮、总磷用紫外分光光度计测定^[6]; COD_{Mn} 采用酸性法测定^[6]; 温度现场用水温计直接测定。所有实验数据均在SPSS(15.0)软件上进行统计处理。

2 实验结果

2.1 采样区域的水质情况

表1是各采样点理化因子的分布状况。样点A到样点E水温略有上升,但上升幅度不超过1℃。经过多重比较,样点A与样点D、样点A与样点E之间存在显著差异。不同时间水温差异较大,最高水温出现在12月,为14.9℃,最低水温出现在1月,为9.2℃。空间上,最高水温出现在样点E,最低水温出现在样点A。 COD_{Mn} 在空间上差异较小,但时间变化差异较大。总氮的时间和空间变化都不大,但总磷却有较为明显的季节变化。

表1 各采样点的理化因子的分布状况

| 样点 | 温度/℃ | | $TN/(mg \cdot L^{-1})$ | | $TP/(mg \cdot L^{-1})$ | | $COD_{Mn}/(mg \cdot L^{-1})$ | |
|----|------|-----------|------------------------|-------------|------------------------|-------------|------------------------------|--------------|
| | 均值 | 范围 | 均值 | 范围 | 均值 | 范围 | 均值 | 范围 |
| A | 11.8 | 9.2~14.4 | 1.056 | 1.024~1.088 | 0.088 | 0.054~0.151 | 8.019 | 4.674~10.211 |
| B | 12.0 | 9.3~14.6 | 1.003 | 0.961~1.045 | 0.080 | 0.034~0.147 | 7.573 | 4.473~9.520 |
| C | 12.3 | 9.5~14.8 | 1.030 | 0.993~1.067 | 0.093 | 0.038~0.171 | 8.083 | 4.225~11.352 |
| D | 12.4 | 10.4~14.8 | 0.967 | 0.940~0.993 | 0.085 | 0.038~0.159 | 7.600 | 5.156~8.202 |
| E | 12.5 | 10.3~14.9 | 1.020 | 0.972~1.067 | 0.081 | 0.034~0.151 | 7.966 | 5.609~9.738 |
| F | 12.1 | 9.9~14.4 | 1.051 | 0.982~1.119 | 0.070 | 0.034~0.119 | 6.946 | 4.622~8.287 |
| G | 12.1 | 9.4~14.7 | 1.035 | 0.929~1.140 | 0.080 | 0.030~0.155 | 6.990 | 4.727~9.014 |

2.2 细菌数量的动态变化

图2显示的是不同时间各个采样点的细菌数量变化。从图2中可以看出,细菌数最小值出现在1月份(均值为 5.4×10^5 cell/mL,变化幅度为 $(3.4 \sim 7.7) \times 10^5$ cell/mL),3月份的细菌数较高,但12月份的细菌数最高(均值为 13.0×10^5 cell/mL,变化幅度为 $(4.0 \sim 20.2) \times 10^5$ cell/mL)。处于库湾区的样点B、C、D、E的细菌数量偏低,其中:样点D的细菌数量最低,平均为 4.7×10^5 cell/mL,变化幅度为 $(3.4 \sim 6.7) \times 10^5$ cell/mL;位于排水口附近区域的样点A和G细菌数量较高;位于取水口区域的样点F的细菌数最高,平均为 15.3×10^5 cell/mL,变化幅度为 $(7.6 \sim 20.2) \times 10^5$ cell/mL。方差分析显示,样点A、F与位于库湾区的样点B、C、D、E差异显著($p < 0.05$),说明有明显的空间差异。

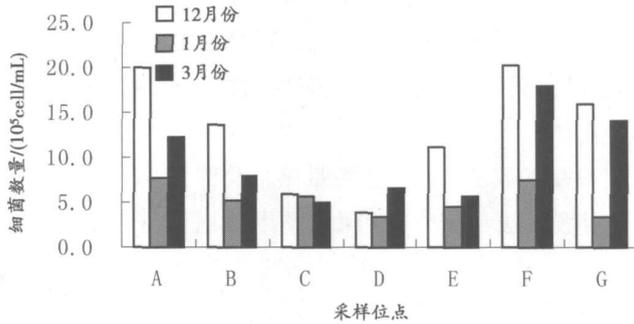


图 2 春冬季节安康湖水体中细菌总数的动态变化

2.3 浮游藻类细胞密度的动态变化

不同时间各个采样点的藻类细胞密度如图 3所示。

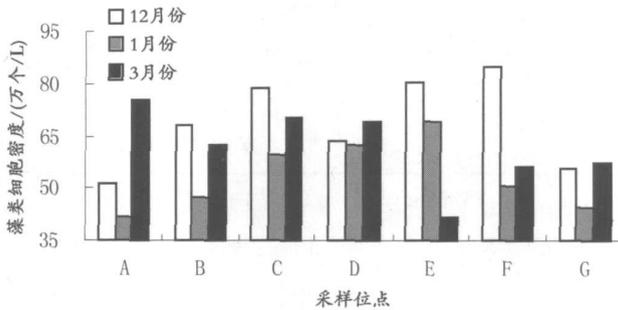


图 3 春冬季节安康湖水体中浮游藻类细胞密度的动态变化

从图 3可看出: 样点 B, C, E, F藻类的细胞密度随着温度的升高而增加, 即在 12月份最高; 随着温度的降低, 1月份藻类数量减少; 从 1月份到 3月份温度开始回升, 同时藻类数量增加。但处于排水口附近的样点 A, G在 12月份的藻类数量却低于 3月份的藻类数量, 样点 D在 12月份和 1月份的藻类数量差异不大, 均低于 3月份的藻类数量。对不同样点的藻类细胞密度进行比较分析, 发现在不同月份, 位于库湾区的样点 B, C, D, E的藻类细胞密度均较高, 而在排水口附近的样点 A和 G的细胞密度相对较低。

2.4 浮游藻类群落组成的动态变化

在整个安康湖水体中, 共发现藻类约有 55种, 分别属于蓝藻、隐藻、绿藻、硅藻、甲藻和裸藻。图 4反映了不同时间各个采样点藻类群落组成的变化情况, 其中数字 1, 2, 3分别代表 12月、1月和 3月。

从图 4可看出: 12月和 1月藻类由蓝藻、隐藻、绿藻、硅藻组成, 其中蓝藻的数量占明显优势 (60% ~ 92%); 3月出现了新种 (甲藻和裸藻), 蓝藻不再占优势。各样点的优势藻不再一积不变, 其中在样点 A, E硅藻的数量占优势, 样点 B, F和 G隐藻占优势, 而在样点 C, D裸藻成为优势种。

3 讨论

3.1 温度对细菌数量的影响

水温可能是影响水体中细菌生长的主要因素^[7-8]。安康湖水体中水源热泵的运行, 尽管对水温有一

定的影响, 但水温变化仍处于自然变化的范围^[9]。细菌数量在水温较高的 12月和 3月明显高于水温较低的 1月(图 2), 原因可能是 12月和 3月水温较高, 利于浮游植物大量繁殖, 而浮游植物的大量生长为水体中的浮游动物提供了充足的饵料, 降低了浮游动物对细菌的捕食压力^[10], 而且大量繁殖的浮游植物进行光合作用产生大量的可溶性有机物(烃类、有机酸等), 为细菌提供了丰富的营养物质。

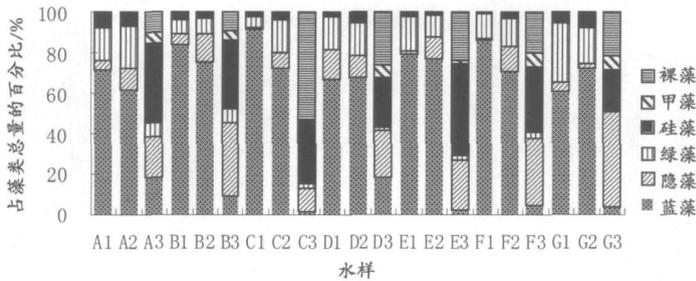


图 4 春冬季节安康湖水体中浮游藻类群落组成变化

从样点分布看, 各样点同期水温差别不高于 1°C , 但不同采样区的细菌数量却存在明显差异, 其中排水口附近的样点 A, G 细菌数量高于库湾区的样点 B, C, D 和 E, 这可能与排水中含有大量有机物有关, 为细菌的生长提供了充足的营养。对水温与水体中细菌数量进行相关分析表明: 12月和 3月, 水温与细菌数量间的相关性较高 ($R^2 = 0.687$, $n = 7$, $p = 0.021$); 1月相关性较低 ($R^2 = 0.153$, $n = 7$, $p = 0.385$); 而 3月介于 12月和 1月 ($R^2 = 0.305$, $n = 7$, $p = 0.198$)。可能的原因: 1月水源热泵处于运行期, 系统热交换过程扰乱了原本的水环境, 从而干扰了细菌数量与水温的相关性; 而到 3月, 水体经过一段时间的自身调整后, 其生态系统逐步恢复, 水温与细菌数量的相关性升高。

3.2 营养盐对细菌数量的影响

N, P 等物质是细菌生长繁殖不可缺少的营养成分。对不同类型水体的研究表明^[11-12], 在寡营养湖泊中, 无机营养物质的含量可能是微生物生长的限制因子, 而 P 含量的高低常常成为水体中细菌生长的限制因素; 在中营养湖泊中, C, N, P 的变化在不同的季节表现出不同的限制作用。不同时间各采样点的水质情况表明, 总 N 的时空变化差异不大, 总 P 的时间变化差异较大。与细菌数的回归分析结果显示, TN 与细菌数量间的相关性较低 ($R^2 = 0.238$, $n = 14$, $p = 0.077$), 而 TP 在 12月和 3月与细菌数量间的相关性较高 ($R^2 = 0.505$, $n = 7$, $p = 0.073$; $R^2 = 0.534$, $n = 7$, $p = 0.217$), 1月相关性较低 ($R^2 = 0.339$, $n = 7$, $p = 0.170$), 这表明水体中的氮含量已完全能够满足细菌的生长。

3.3 环境因子对藻类的影响

各种藻类都有其适宜的温度范围, 藻类数量在温度较高的 12月和 3月较高, 而在温度较低的 1月较低(图 3)。由于过量的泥沙和过快的水流等水文条件不利于藻类的生长, 因此在排水口附近的样点 A, G 的细胞密度相对较低, 而硅藻的含量却较高, 这是由于硅藻适合在流水中生活^[13]。3月各样点硅藻含量均有所增加, 这可能是因为该阶段水温适合硅藻的繁殖, 且没有大量的蓝藻与其竞争营养物质。在样点 B, F 和 G, 隐藻成为优势种, 这可能与隐藻耐低光有关, 即在水体较为浑浊的情况下, 其他浮游植物的生长受到光的限制, 而有利于耐低光的隐藻生长。水温与水体中藻类数量的相关分析表明: 1月水温与藻类数量间的相关性较高 ($R^2 = 0.688$, $n = 7$, $p = 0.021$), 而 12月 ($R^2 = 0.047$, $n = 7$, $p = 0.640$) 和 3月 ($R^2 = 0.059$, $n = 7$, $p = 0.598$) 相关性较低。

冬季水温与气温差别较大, 而 1月份的取样两者较为接近, 这可能是由于 1月份水源热泵处于运行期, 热交换循环水提高了水温。有研究表明, 水体增温对浮游藻类的生长、种类组成等都有影响^[14], 因此

可以认为水源热泵的运行会引起浮游藻类生物量、种类组成等发生变化。安康湖水体中 TN 和 TP 浓度远远超过国际公认的 $TN = 0.2 \text{ mg/L}$ 和 $TP = 0.02 \text{ mg/L}$ 的临界氮磷浓度。相关性分析表明藻类数量与氮、磷浓度不存在明显的相关性, 这可能预示着该水体中氮磷浓度已不是藻类生长的限制性因素。

3.4 藻类与细菌的关系

有研究表明, 细菌生长与浮游藻类的生长密切相关^[7]。安康湖水体中不同时间各个样点的细菌数与藻类细胞密度的动态变化情况如图 5 所示。

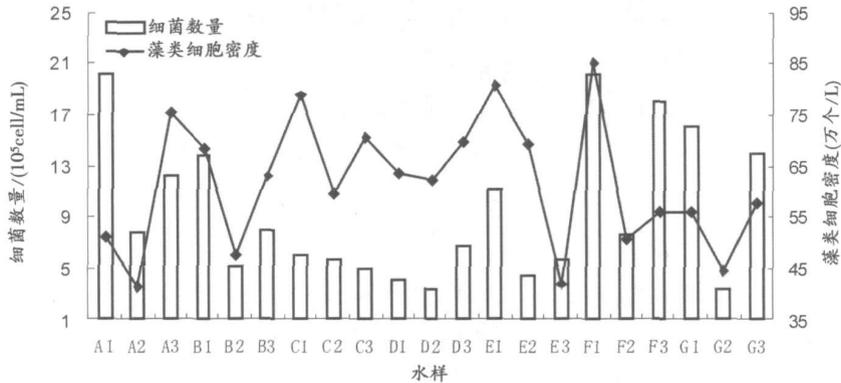


图 5 春冬季节安康湖水体中细菌和藻类的动态变化

从图 5 中可以看出, 细菌数与藻类细胞密度的变化趋势基本一致, 细菌数量与藻类细胞密度的最大值都出现在水温较高的 12 月的样点 F (即 F1), 这可能是细菌与藻类生长相互促进引起的, 因为细菌能为藻体提供生理必须物质如铁和维生素 B_{12} , 而藻体可以为细菌提供附生环境以避免其被捕食, 并增强细菌吸收营养物质的能力^[15]。值得注意的是, A1 的细菌数几乎接近最大值, 但藻类细胞密度却并非如此, 这可能是因为样点 1 处于排水口附近, 受水体的扰动性较大, 浮游植物不易停留、生长、繁殖, 且排水口附近水流速度过大、过快, 导致水体浑浊, 光线不充足, 限制了藻类的生长^[16]。此外, C1 的细菌数较低而藻类细胞密度却较高, 这可能是因为藻类产生的生物毒素对某些细菌的生存造成抑制, 因为在该样点中蓝藻门占绝对优势, 而蓝藻门的微囊藻的分解会使水体中藻毒素的含量显著增加^[17]。水体中藻类细胞密度与细菌数量不存在明显的相关性, 这与以往的研究报道不同。

水源热泵的运行影响了水体生态系统还有待进一步研究, 利用分子生物学方法研究群落结构可提高实验的精确性和结论的可靠性。

4 结论

1) 安康湖水体中细菌数量存在时空差异。1 月份细菌数量较低, 12 月份和 3 月份细菌数量较高, 受温度影响显著; 排水口和取水口附近细菌数量较高, 而库湾区细菌数量较低。

2) 水源热泵运行前后, 藻类生物量、种类组成及优势种发生变化, 藻类细胞密度与细菌数量不存在明显相关性, 很可能与水源热泵进行热交换引起的水温变化有关。

3) TP 与细菌数量呈显著相关, TN 与细菌数量没有明显的相关性, 表明在安康湖水体中氮含量已不成为细菌生长的限制因子。

4) 水源热泵系统对水体局部生态系统有一定的影响, 其显著性还需要利用分子生态学等手段进一步研究和评估。

参考文献:

- [1] David A, Caron E, Robert W, et al Responses of bacterioplankton and phytoplankton to organic carbon and inorganic nutrient additions in contrasting oceanic ecosystems [J]. *Aquat Microb Ecol* 2000, 22: 175–184.
- [2] 肖天. 海洋浮游细菌的生态学研究 [J]. *地球科学进展*, 2001, 16(1): 60–64.
- [3] 刘梅芳, 万文, 裴国凤. 南湖春季细菌和浮游藻类群落的动态变化 [J]. *中南民族大学学报: 自然科学版*, 2007, 26(3): 36–39.
- [4] 冯胜, 秦伯强, 高光. 细菌群落结构对水体富营养化的响应 [J]. *环境科学学报*, 2007, 27(11): 1823–1829.
- [5] 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.
- [6] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [7] 冯胜, 高光, 秦伯强, 等. 太湖北部湖区水体中浮游细菌的动态变化 [J]. *湖泊科学*, 2006, 18(6): 636–642.
- [8] LIW K W, Dickie P M. Temperature characteristics of photosynthetic and heterotrophic activities seasonal variations in temperate microbial plankton [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1987, 53(10): 2282–2295.
- [9] 陈金华, 刘勇, 勇, 等. 重庆开县人民医院湖水源热泵空调系统实测分析 [J]. *暖通空调*, 2008, 38(8): 111–114.
- [10] Van Der Gucht K, Vandekerckhove T, Vebemans N, et al Characterization of bacterial communities in four freshwater lakes differing in nutrient load and food web structure [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2005, 53: 205–220.
- [11] Yannarella C, Kent A D, Lauster G H, et al Temporal patterns in bacterial communities in three temperate lakes of different trophic status [J]. *Microb Ecol* 2004, 46: 391–405.
- [12] ZHENG Jing YANG Liu-Yan DU Hong-Wei et al Bacterioplankton community structure in a eutrophic lake in relation to water chemistry [J]. *World Microbiol Biotechnol* 2009, 25: 763–772.
- [13] 张智, 宋丽娟, 郭蔚华. 重庆长江嘉陵江交汇段浮游藻类组成及变化 [J]. *中国环境科学*, 2005, 25(6): 695–699.
- [14] 史绮, 李宏文, 刘大文. 水体增温对浮游藻类的影响研究 [J]. *苏州城建环保学院学报*, 1999, 12(2): 6–11.
- [15] 郑小红, 肖琳, 任晶, 等. 玄武湖为囊藻水华暴发及衰退期细菌群落变化分析 [J]. *环境科学*, 2008, 29(10): 2956–2962.
- [16] Sekiguchi H, Watanabe M, Nakahara T, et al Succession of bacterial community structure along the Changjiang river determined by denaturing gradient gel electrophoresis and clone library analysis [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, 68(10): 5142–5150.
- [17] 许秋瑾, 高光, 陈伟民. 太湖微囊藻毒素年变化及其与浮游生物的关系 [J]. *中国环境科学*, 2005, 25(1): 28–31.

(责任编辑 刘 舸)