

## 南京玄武湖蓝藻水华治理后水质和浮游植物的动态变化\*

梅卓华, 张哲海, 赵春霞, 徐敏, 李敏  
(南京市环境监测中心站, 南京 210013)

**摘要:** 玄武湖是典型的城市富营养化湖泊, 2005年夏季暴发了大面积微囊藻水华, 其后以粘土法为主, 对微囊藻水华进行了应急治理. 为了解应急治理后玄武湖水生态状况的变化, 通过分析治理后浮游植物种类和数量变化以及重要理化指标的变化, 探讨应急治理对湖水水质和浮游植物群落的影响. 通过对比治理前和水华暴发期的监测数据, 发现治理后浮游植物数量减少, 种类增多; 湖水总磷和叶绿素 a 的浓度都明显降低; 水体透明度大幅提高, 湖水总氮浓度随浮游植物的密度和菹草的生长而出现波动.

**关键词:** 治理; 水质; 浮游植物; 玄武湖

## Dynamics of phytoplankton and water quality with control of cyanobacterial bloom in Lake Xuanwu, Nanjing

MEI Zhuohua, ZHANG Zhehai, ZHAO Chunxia, XU Min & LI Min  
(Nanjing Environmental Monitoring Central Station, Nanjing 210013, P. R. China)

**Abstract:** Lake Xuanwu is a typical urban eutrophic lake. *Microcystis* bloom broke out in a large area of Lake Xuanwu in the summer of 2005. The main method used to control the *Microcystis* bloom was the application of modified clay. In order to discover the changes of the water ecological situation, the following tests were performed: inquiry into the changes of the quality of water and phytoplankton after the treatment, the analysis to the type and quantity of phytoplankton and physico-chemical indexes. The results show: the amount of phytoplankton reduced, while the species increased after the treatment, the concentration of Chl. a and TP reduced, with a substantial increase in SD, the concentration of TN was undulatory with phytoplankton density and *Potamogeton crispus* growth.

**Keywords:** Treatment; water quality; phytoplankton; Lake Xuanwu

玄武湖面积 3.7 km<sup>2</sup>, 平均水深 1.14 m, 最大水深为 2.31 m, 库容约 5 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. 早在 20 世纪 80 年代后期, 玄武湖湖水已经处于严重的富营养化状态<sup>[1]</sup>. 自 20 世纪 90 年代初起, 采取了截污、清淤、引水冲污等措施, 以控制玄武湖富营养化、改善水质, 然而, 2005 年夏季, 玄武湖首次发生大面积以微囊藻 (*Microcystis* sp.) 为主要优势种群的蓝藻水华, 局部区域散发恶臭气味, 严重影响了湖水的景观、养殖和水上运动功能. 为了尽快控制蓝藻水华, 保障玄武湖各种环境功能, 当地政府采取了粘土絮凝、菌制剂杀藻等措施, 对玄武湖蓝藻水华进行了应急治理, 共使用改性粘土约 300 t, 湖面喷洒粘土达 106.0 g/m<sup>2</sup>. 10 月底, “藻华”现象基本消失. 在蓝藻暴发和治理过程中玄武湖高等水生植物没有明显变化, 但 2005 年 11 月至 2006 年 4 月, 玄武湖各湖区出现了的大量菹草生长, 期间采用机械和人工打捞来除草.

通过对浮游植物种类和数量以及重要理化指标的监测, 探讨应急治理对湖水水质和浮游植物群落的影响, 给玄武湖的科学治理和管理提供基础资料.

### 1 调查研究方法

在玄武湖湖面设置 4 个监测点 (图 1), 于 2006 年 4 月至 2007 年 3 月对该湖逐月监测, 监测项目包括浮

\* 南京市环境保护局项目 (200610) 资助. 2008-12-02 收稿; 2009-09-14 收修改稿. 梅卓华, 女, 1970 年生, 高级工程师; E-mail: meizhuoh@sina.com.

游植物、叶绿素 a、总磷、总氮、高锰酸盐指数、透明度、水温。浮游植物、叶绿素 a、总磷、总氮、高锰酸盐指数均采集水面以下 50cm 的水样,监测方法依据《水和废水监测分析方法》(第四版);透明度(SD)由塞氏盘测定;水温用美国 YSI-58 型溶解氧仪于水下 20cm 测定。

2006 年 4 月之前的数据来源于南京市环境监测中心站的年度统计资料。运用 SPSS13.0 分析统计软件分析数据相关性。

## 2 结果和分析

### 2.1 浮游植物种类组成

大规模治理蓝藻水华之后的一年中(2006 年 4 月-2007 年 3 月),玄武湖各湖区共监测到浮游植物 7 门 82 属 176 种,其中绿藻门 39 属 89 种占种数的 50.6%,硅藻门 20 属 35 种占种数的 19.9%,蓝藻门 12 属 19 种占种数的 10.8%,裸藻门 4 属 20 种占种数的 11.4%,隐藻门 2 属 6 种占种数的 3.4%,甲藻门 3 属 4 种占种数的 2.3%,金藻门 1 属 2 种占种数的 1.1%,黄藻门 1 属 1 种占种数的 0.6%。

### 2.2 浮游植物的数量与季节变化

水体中浮游植物的种类、数量及分布情况是水质状况的标志之一。水体营养盐浓度、水温条件和光照强度与藻类细胞密度变化密切相关。治理后的一年中,玄武湖的藻类细胞密度在  $6.93 \times 10^6 - 2.28 \times 10^8$  cells/L 之间波动,年均细胞密度为  $5.32 \times 10^7$  cells/L。玄武湖藻类细胞密度的最高值出现在夏季 7、8 月,数量级在  $10^8$  cells/L;而春季 3、4 月份最低,数量级在  $10^6$  cells/L;6 月份是藻类密度快速上升时期,9 月则是藻类密度快速下降时期,秋、冬季藻类密度维持在  $10^7$  cells/L(图 2a)。

从优势种变化看,玄武湖的优势种主要为蓝藻和硅藻,4-5 月以小环藻(*Cyclotella* sp.)为优势种,5-6 月以席藻(*Phormidium* sp.)为优势种,7-8 月以微囊藻(*Microcystis* sp.)为优势种,9 月至翌年 3 月以银灰平裂藻(*Merismopedia glauca*)为优势种。蓝藻门的微囊藻、席藻都属于富营养藻类。硅藻门的小环藻和蓝藻门的平裂藻则属于中营养藻类。随着季节的变化,上述种类在玄武湖交替出现,成为优势种,反映了玄武湖富营养化的程度和季节变化。

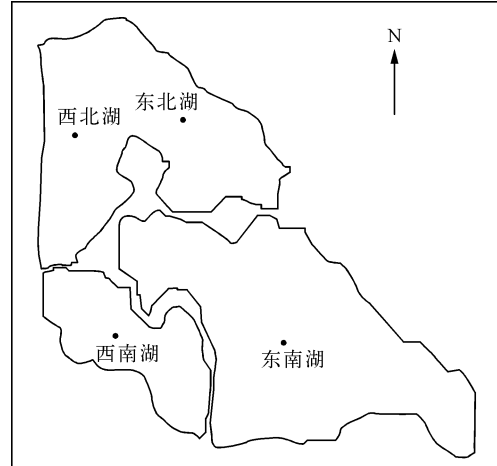


图 1 玄武湖监测点位示意图

Fig.1 Sketch of sampling sites in Lake Xuanwu

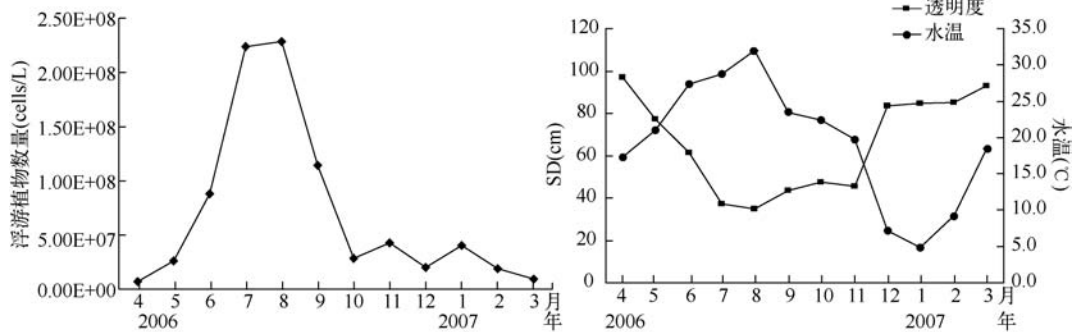


图 2 玄武湖浮游植物数量(a)和水温、透明度(b)变化

Fig.2 Dynamics of quantity of phytoplankton(a) and water temperature, SD(b) in Lake Xuanwu

### 2.3 玄武湖水质及动态

2006 年 4 月-2007 年 3 月期间温度和透明度(SD)的变化情况显示(图 2b),随着水温的升高,SD 明显降低,8 月水温最高,SD 最低;当水温降低,SD 就明显升高,从 12 月至翌年 4 月,玄武湖的 SD 为全年最高,

清澈见底,这与菹草吸收水体和沉积物中的营养盐、减少沉积物及其中的营养盐再悬浮释放,改善水体透明度及水质有密切关系。

玄武湖 TN 浓度一直保持在较高水平,全年平均为 1.69mg/L(表 1),在水温较低的 12 月、1 月和 2 月 TN 浓度有所升高。NO<sub>3</sub>-N 和 NO<sub>2</sub>-N 的变化趋势与 TN 较为一致。有研究表明<sup>[2-3]</sup>,当水中 NH<sub>3</sub>-N 浓度较低 (<0.35 mg/L)时,菹草优先吸收 NO<sub>3</sub>-N。玄武湖菹草的大量繁殖抑制了浮游植物的生长,所以水中的 Chl. a 浓度相应降低。经相关性分析显示 NO<sub>3</sub>-N 的浓度与 Chl. a 的浓度有显著负相关性(相关系数为 -0.863)。

TP 的浓度范围为 0.04 - 0.33mg/L,最低浓度出现在 4 月,最高浓度在 9 月(表 1);PO<sub>4</sub>-P 的浓度变化与微囊藻的繁殖相关,当 PO<sub>4</sub>-P 浓度大于 0.01mg/L 时,适于微囊藻生长<sup>[4-5]</sup>,由于玄武湖的 TP 浓度都大于等于 0.01mg/L,所以 PO<sub>4</sub>-P 浓度的变化与微囊藻的生长没有密切的相关性(相关系数为 0.169)。

表 1 玄武湖营养盐及叶绿素动态  
Tab. 1 Nutrient and Chl. a concentrations in Lake Xuanwu in 2006 and 2007

时间(年-月)	NO <sub>2</sub> -N (mg/L)	NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	TN (mg/L)	PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	TP (mg/L)	Chl. a (μg/L)
2006-04	0.01	1.39	0.06	1.64	0.02	0.06	6.13
2006-05	0.03	0.55	0.13	1.43	0.05	0.09	26.44
2006-06	0.02	0.21	0.09	1.40	0.05	0.12	71.88
2006-07	0.02	0.09	0.18	1.34	0.06	0.18	92.70
2006-08	0.04	0.26	0.27	1.70	0.03	0.15	120.80
2006-09	0.03	0.77	0.10	1.59	0.01	0.33	55.46
2006-10	0.03	0.89	0.09	1.59	0.01	0.06	42.64
2006-11	0.04	1.05	0.08	1.95	0.04	0.07	35.14
2006-12	0.05	1.22	0.55	2.60	0.02	0.05	21.00
2007-01	0.04	1.46	0.19	2.12	0.01	0.05	12.00
2007-02	0.04	1.28	0.21	2.88	0.01	0.05	18.57
2007-03	0.03	0.90	0.18	1.58	0.01	0.04	22.43

2.4 玄武湖富营养化评价

采用卡尔森综合营养状态指数进行富营养化评价,计算公式如下:

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

表 2 水质类别与评分值对应  
Tab. 2 Water types and the corresponding score value

营养状态分级	评分值 TLI(Σ)	定性评价
贫营养	0 < TLI(Σ) ≤ 30	优
中营养	30 < TLI(Σ) ≤ 50	良好
(轻度)富营养	50 < TLI(Σ) ≤ 60	轻度污染
(中度)富营养	60 < TLI(Σ) ≤ 70	中度污染
(重度)富营养	70 < TLI(Σ) ≤ 100	重度污染

式中: TLI(Σ)为综合营养状态指数; W<sub>j</sub>为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重; TLI(j)代表第 j 种参数的营养状态指数。

湖泊水库营养状态分级:采用 0 - 100 的一系列连续数字对湖泊营养状态进行分级(表 2)。

根据 TLI 指数评价玄武湖富营养化状态(表 3), 1 月、3 月和 4 月玄武湖处于中营养状态; 2 月、5 月、6 月、10 月、11 月和 12 月处于轻度富营养状态;

7 月、8 月和 9 月处于中度富营养状态; 全年平均 TLI 为 55.61, 处于轻度富营养状态。

表 3 玄武湖富营养状态评价  
Tab. 3 Assessment of eutrophic status in Lake Xuanwu

日期	2006-04	2006-05	2006-06	2006-07	2006-08	2006-09	2006-10	2006-11	2006-12	2007-01	2007-02	2007-03
TLI	45.06	53.00	58.72	62.11	63.10	60.53	53.70	54.77	50.60	48.70	50.68	49.02
营养状态	中营养	(轻度)富营养	(轻度)富营养	(中度)富营养	(中度)富营养	(中度)富营养	(轻度)富营养	(轻度)富营养	(轻度)富营养	中营养	(轻度)富营养	中营养

### 3 讨论

#### 3.1 治理前后浮游植物群落特征比较

2004年,玄武湖浮游植物组成主要以蓝藻、绿藻和硅藻为主,优势种为蓝纤维藻、栅藻和小环藻等.浮游植物数量为 $7.9 \times 10^7$  cells/L.2005年6月,浮游植物的数量为 $1.68 \times 10^7$  cells/L,优势种为蓝纤维藻、小环藻和隐藻,浮游植物组成与往年基本一致.7月蓝藻水华暴发后,其组成主要以微囊藻为主,浮游植物数量大幅上升,年均数量为 $1.36 \times 10^8$  cells/L,最高达 $5.23 \times 10^9$  cells/L.2006年浮游植物优势种主要为微囊藻、席藻、银灰平裂藻和小环藻,最高数量较2005年下降一个数量级,年均数量为 $9.46 \times 10^7$  cells/L.治理后,浮游植物种类也大幅增加,由2005年的103种增加到2006年的176种.新增种类主要是绿藻门和硅藻门,还出现了金藻门的锥囊藻(图3a).从浮游植物数量组成上看,2006年仍是蓝藻占绝对优势,但比例较2005年有所下降,绿藻、硅藻和裸藻数量有所增加(图3b).

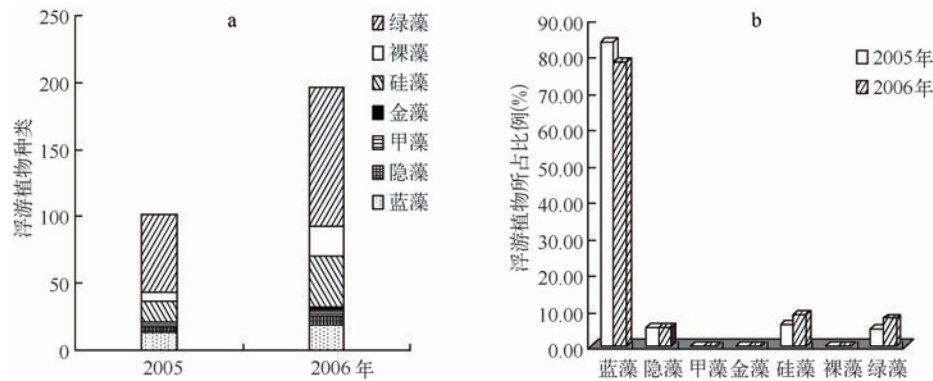


图3 2005年与2006年浮游植物种类(a)和所占比例(b)变化

Fig. 3 Dynamics of species (a) and composition (b) of phytoplankton in 2005 and 2006

#### 3.2 治理前后水质的动态变化

治理前,玄武湖的透明度一直在15-43cm之间,蓝藻水华暴发期也处于该水平.治理后,水体中大量营养盐随蓝藻沉降到湖泊水土界面,2005年11月后,透明度大幅提高.2006年1月达到历史最高点,玄武湖水体清澈见底,2006年全年透明度都高于治理前同期水平(图4a).

治理前,玄武湖的TN浓度一直保持在较高水平,在1.15-1.98mg/L之间(图4b),均值为1.51mg/L.蓝藻水华暴发期间,TN浓度也有所上升,均值为1.97mg/L,最大升幅为18.7%.这主要与浮游植物的生物量增加相关<sup>[6]</sup>.治理后,冬季维持在较高浓度范围内(1.85-3.14mg/L),均值为2.56mg/L,较治理前冬季的平均浓度上升77.8%.这主要是因为蓝藻水华暴发后,大面积微囊藻死亡后,分解释放出大量氮;冬季浮游植物生物量维持在相对低的水平,且这时菹草的生长几乎完全或大部分靠其根吸收底泥中的 $\text{NH}_3\text{-N}^{[7]}$ ,所以水中TN浓度较高.到3、4月份,菹草快速生长,使水中的TN浓度大幅下降,5月菹草死亡后,浮游植物大量繁殖,TN维持在相对较低的水平.

治理前,湖中TP的浓度处于一个较平稳的状态,在0.12-0.19mg/L之间(图4c).在水华暴发期,随着温度和pH值的升高,加快了底泥中磷的释放速度<sup>[8-9]</sup>,使水中TP浓度逐渐升高.同样,在菹草快速生长时,水中的TP浓度也相应下降.2006年TP浓度较2005年有所下降,因此治理有效降低了湖水中TP的浓度.

2004-2006年,冬季玄武湖的Chl. a都处于较低的水平(图4d).在藻华期间达到极值,治理后,湖中Chl. a的浓度明显低于治理前同期Chl. a浓度,它与湖水中浮游植物数量变化呈显著正相关,相关系数是0.741,治理效果比较明显.

### 4 结论

玄武湖蓝藻水华治理过程跟踪监测表明,治理后,玄武湖属于轻度-中度富营养化水平.水体透明度大

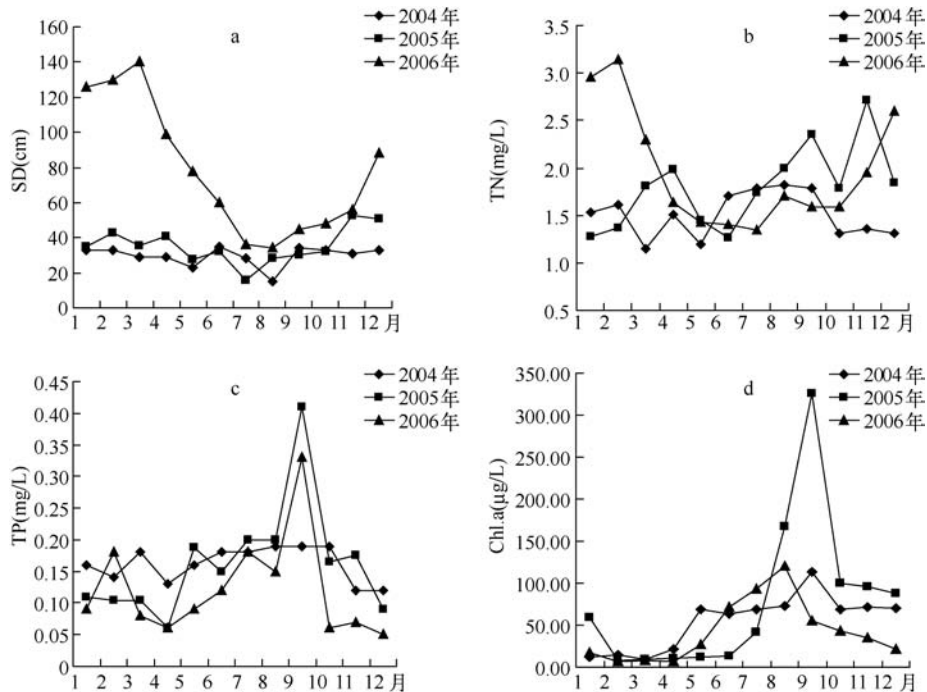


图4 2004-2006年SD(a)、TN(b)、TP(c)、Chl. a(d)动态变化

Fig. 4 Dynamics of SD(a), TN(b), TP(c), Chl. a(d) during 2004-2006

为改善,在冬季全湖清澈见底;湖水中TP浓度主要来源于底质中磷的释放;湖水中TN的浓度随浮游植物的密度和菹草的生长而变动,冬季较高,春季较低;浮游植物的密度下降,种类数大幅增加. 应急治理后,玄武湖的水质和浮游植物群落结构都有一定程度改善.

近10余年来,玄武湖完成了环湖截污、清淤疏浚、生态补水等措施以控制水体富营养化、改善水质,在短期内改善湖水水质、降低富营养化是困难的;而城市湖泊的生态系统一旦退化就很难逆转,再恢复到健康的生态系统需要付出较多的人力、财力和时间<sup>[10]</sup>. 因此玄武湖富营养化治理亟待更多和更加有效的治理投入.

## 5 参考文献

- [1] 梅卓华. 玄武湖水域初级生产力和富营养化的调查研究. 江苏环境科技, 1995, (3): 7-10.
- [2] 李永函, 金送笛, 刘国才. 菹草型水体的理化因子和水生生物状况. 大连水产学院学报, 1992, 6(2): 1-10.
- [3] 金送笛, 李永函, 倪彩虹等. 菹草 (*Potamogeton crispus*) 对水中氮、磷的吸收及若干影响因素. 生态学报, 1994, 14(2): 168-173.
- [4] Colman JA, Santha CR. Critical concentrations of tissue nitrogen and phosphorus for growth rate and yield in the freshwater blue-green alga *Microcystis aeruginosa* Kütz. in the tropics. *Aquatic Botany*, 1988, 32: 167-177.
- [5] Sas H. Lake restoration by reduction of nutrient loading: expectations, experiences, extrapolations. St. Augustin: Academic Verlag Richarz, Germany, 1989.
- [6] 张哲海, 梅卓华, 孙洁梅等. 玄武湖蓝藻水华成因探讨. 环境监测管理与评价, 2006, 18(2): 15-18.
- [7] 王天阳, 王国祥. 玄武湖菹草种群空间格局分析及其环境效应. 生态环境, 2007, 16(6): 1660-1664.
- [8] 龚春生, 姚琪, 范成新等. 城市浅水型湖泊底泥释磷的通量估算——以南京玄武湖为例. 湖泊科学, 2006, 18(2): 179-183.
- [9] 郭志勇, 李晓晨, 王超等. pH值对玄武湖沉积物中磷释放及形态分布的影响. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 873-877.
- [10] 彭俊杰, 李传红, 黄细花. 城市湖泊富营养化成因和特征. 生态科学, 2004, 23(4): 370-373.