

广东省高州水库春季蓝藻水华成因初步探讨*

姚玲爱^{1,2}, 赵学敏², 周广杰³, 完颜华¹, 蔡立梅², 胡国成², 许振成^{2**}

(1: 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070)

(2: 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

(3: 广东省环境科学研究院, 广州 510045)

摘要: 高州水库为广东省茂名市重要的饮用水源地, 2009年和2010年春季相继出现蓝藻水华, 给居民饮水带来安全隐患. 对高州水库2009年和2010年春季水华情况进行分析, 结果表明: 两年浮游藻类细胞密度最高分别达 4.08×10^7 cells/L 和 1.47×10^8 cells/L, 其中蓝藻所占比例分别为 98.2% 和 98.7%, 优势藻种均为鱼腥藻 (*Anabaena* spp.) 和铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*). 水库中 TN/TP 比波动在 28 和 64 之间, 磷为主要的限制性因子. 叶绿素 a 含量波动在 2.5 mg/m^3 和 31.6 mg/m^3 之间, 叶绿素 a 与 pH ($r=0.753, P<0.01$)、DO ($r=0.565, P<0.05$) 呈显著正相关. 推断较高的水体稳定性、水温回升、氮磷营养水平接近水华发生的阈值是高州水库蓝藻水华发生的主要原因.

关键词: 高州水库; 蓝藻; 水华; 富营养化

Preliminary regulating factors of spring cyanobacteria bloom in Gaozhou Reservoir, Guangdong Province

YAO Lingai^{1,2}, ZHAO Xuemin², ZHOU Guangjie³, WANYAN Hua¹, CAI Limei², HU Guocheng² & XU Zhencheng²

(1: College of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China)

(2: South China Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, P. R. China)

(3: Guangdong Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, P. R. China)

Abstract: Gaozhou Reservoir is an important drinking water source of Maoming city of Guangdong province. Cyanobacteria blooms, occurring in spring of 2009 and 2010, had brought safe hidden trouble to residents. Based on the data collected from the reservoir in two springs, the highest densities of phytoplankton in the spring of 2009 and 2010 were 4.08×10^7 cells/L and 1.47×10^8 cells/L, and cyanobacteria densities accounted for 98.2% and 98.7% of total phytoplankton, respectively. The dominant species were *Anabaena* spp. and *Microcystis aeruginosa* in the two springs in the reservoir. The TN/TP ratios ranged from 28 to 64, phosphorus was the limiting factor for phytoplankton development. The chlorophyll-a concentration ranged from 2.5 to 31.6 mg/m³, and the correlation between pH ($r=0.753, P<0.01$) and DO ($r=0.565, P<0.05$) was excellent. It can be inferred that the main reasons of spring phytoplankton blooms were the high stability of water, water temperature rising and the nitrogen and phosphorus level close to the threshold value of spring phytoplankton blooms.

Keywords: Gaozhou Reservoir; cyanobacteria; algal bloom; eutrophication

高州水库位于广东省茂名市东北部, 库容量 $11.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 分为石骨和良德两个库区. 石骨库区位于鉴江左侧支流曹江上, 控制流域面积 525 平方公里. 自上世纪 80 年代末, 由于水库流域经济迅速发展及流域土地不合理开发利用, 水土流失严重, 水库水质有所下降, 水库局部曾一度发生水华现象^[1]. 随着人们对蓝藻水华成

* 中央级公益性科研院所专项资金项目 (ZX-201003-54)、国家水体污染控制与治理科技重大专项项目 (2009ZX07211-009-05) 和全国重点湖泊水库生态安全调查及评估项目 (2111101) 联合资助. 2010-09-28 收稿; 2011-02-20 收修改稿. 姚玲爱, 女, 1985 年生, 硕士研究生; E-mail: yaolingai102@163.com.

** 通讯作者; E-mail: xzc@scies.com.cn.

因的深入研究,逐渐认为营养盐浓度的升高可能仅是蓝藻水华形成且人们可以加以控制的因素之一;在探索水华成因时,还需要提前关注蓝藻群体的形成、蓝藻在春季的复苏及其生态阈值,以及蓝藻如何在生长过程中形成群体,并逐步成为湖泊水库水生生态系统中的优势种乃至形成水华的过程^[2].高州水库在2009年和2010年连续两年春季全面暴发蓝藻水华,这给茂名市供水安全造成很大威胁.有文献报道,高州水库水华优势种之一为我国鱼腥藻的新记录种^[3],新藻种的出现又将给蓝藻水华的预防治理带来更大的挑战.

本文主要对高州水库石骨库区连续两年春季水华资料进行分析,对水华成因做出分析,并提出相应的控制措施,以期高州水库藻类水华防治提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 采样点设定

分别于2009年2月和2010年2月水华发生期间进行样品采集,采样点设置如图1所示.S1位于高州水库石骨库区中心(22°3'3.6"N,111°2'25.3"E);S2位于水库出水口处(22°2'7.7"N,111°1'1.2"E);S3位于入库河流朋情河的入库处(22°2'58.3"N,111°4'27.6"E).出水口S2采样点采样期内水深约18m,为底部出水,进入调节水库给水厂供水.为了解出水口藻类垂直分布情况及其对供水的影响,分别在水面下0.5、2、5、10m和底层(18m)采集水样.

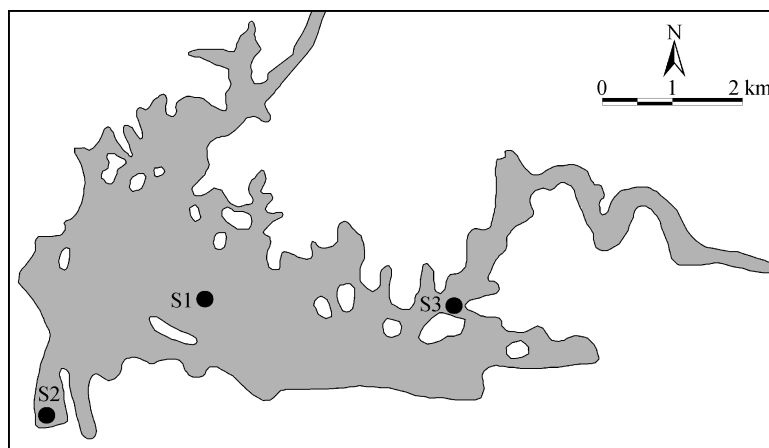


图1 高州水库石骨库区采样点

Fig. 1 Location of three sampling sites in Shigu Reservoir

1.2 样品采集及分析

浮游植物定性样品用25号浮游生物网在水面下划“∞”捞取,4%福尔马林溶液固定.定量样品用采水器采集表层(水下0.5m)水样1L,样品加入鲁哥试剂固定.藻类定量样品经沉淀、浓缩、定容后用“目镜视野法”进行藻细胞计数^[4].浮游藻类的鉴定参照《中国淡水藻类》^[5].

现场测定水温、pH、溶解氧(DO)、透明度(SD);水样采集后在实验室测定叶绿素a(Chl. a)、总氮(TN)、总磷(TP)和高锰酸盐指数(COD_{Mn}),室内分析均按照《水和废水监测分析方法》^[6]进行.

1.3 富营养化评价方法与数据分析

选取高州水库水体Chl. a、TP、TN、SD和COD_{Mn}为评价指标,根据文献[7]计算,利用SPSS 16.0软件包完成相关分析及显著性检验.

2 结果与分析

2.1 高州水库石骨库区水华情况

2.1.1 浮游植物种类和数量 2009年和2010年共发现浮游植物31种,其中蓝藻5种,隐藻2种,绿藻15种,硅藻5种,甲藻2种,黄藻1种,金藻1种.2009年蓝藻细胞密度占藻细胞总密度的97.5%,其余五门藻

类细胞密度相对较少. 2010 年蓝藻、隐藻和硅藻细胞密度分别占藻细胞总密度的 78.8%、13.1% 和 7.2% . 与 2009 年春季水华相比, 2010 年春季蓝藻细胞密度占藻细胞总密度的比值有所下降, 但是蓝藻细胞密度却大幅度增加, 出水口 (S2) 采样点蓝藻细胞密度增长约三倍, 从 2009 年的 3.93×10^7 cells/L 增长到 2010 年的 1.45×10^8 cells/L (图 2). 定义密度所占比例大于 5% 的种类为浮游植物优势种, 2009 年优势种为蓝藻门中的鱼腥藻 (*Anabaena* spp.) 和铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*), 2010 年优势种为蓝藻门的鱼腥藻和铜绿微囊藻, 隐藻门的隐藻 (*Cryptomonas* sp.) 和蓝隐藻 (*Chroomonas* sp.), 硅藻门的梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*).

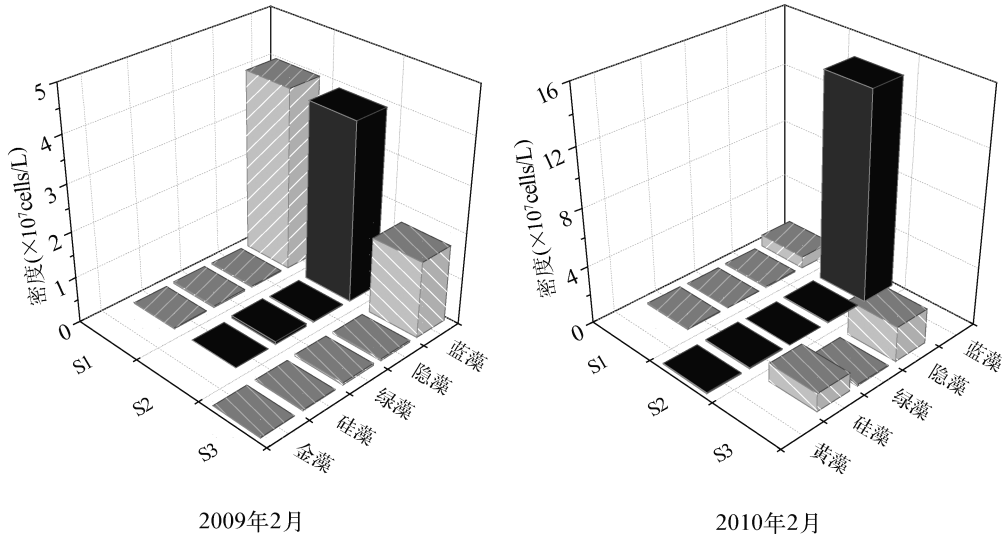


图 2 各采样点藻细胞密度
Fig. 2 Algal cell densities at three sampling sites

2.1.2 理化数据 两年水华期间, TP 含量较低, 最高值为 0.037 mg/L, TN/TP 较高, 变化范围为 28-64, 根据 Redfield 计算的藻类增长所需氮磷比值^[8], 磷为高州水库主要限制性因子. Chl. a 变化范围为 8.6-31.6 mg/m³, 综合营养状态指数 *TLI* (Σ) 介于 41.3-48.6 之间, 为中营养状态. 调查期间, TN 值均超过 0.5 mg/L, 2010 年出水口 (S2) 采样点 TN 达到最大值 1.684 mg/L; TP 值在 2010 年的出水口 (S2) 和朋情河入口 (S3) 采样点分别达到 0.037 mg/L 和 0.033 mg/L; COD_{Mn} 在 2010 年出水口 (S2) 达到 4.52 mg/L. 与 2009 年相比, 2010 年 TN、TP 含量增加, 综合营养状态指数 *TLI* (Σ) 升高 (表 1).

表 1 高州水库理化参数
Tab. 1 Physicochemical parameters in Gaozhou Reservoir

采样时间	采样点	水温 (°C)	pH	DO (mg/L)	SD (m)	Chl. a (mg/m ³)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	COD _{Mn} (mg/L)	TN/TP	<i>TLI</i> (Σ)
2009 年 2 月	S1	23.6	9.05	8.63	1.2	17.9	0.640	<0.010	2.90	64	42.5
	S2	25.1	9.07	8.64	1.3	13.8	0.640	0.020	2.90	32	44.2
	S3	23.6	8.27	8.67	1.9	10.7	0.600	0.013	1.95	46	41.3
2010 年 2 月	S1	21.3	8.75	10.82	2.0	8.6	0.918	0.017	1.50	54	41.7
	S2	21.7	9.34	12.65	0.5	18.8	1.684	0.037	4.52	46	48.6
	S3	21.4	8.68	11.13	1.3	31.6	0.921	0.033	1.60	28	46.3

2.2 藻类群落结构垂直分布

2.2.1 藻类数据 2009 年, 随水深的增加, 蓝藻细胞密度呈先降低后增加趋势, 从表层 (0.5m) 的 3.93×10^7

cells/L降低到10m的 2.27×10^6 cells/L,而后底层(18m)又升高到 7.20×10^6 cells/L,且蓝藻主要分布在水体表层(0.5m)至5m深处;2010年,随着水体深度的增加蓝藻细胞密度逐渐降低,从表层(0.5m)细胞密度 1.45×10^8 cells/L降低到底层(18m)的 2.65×10^6 cells/L(图3).

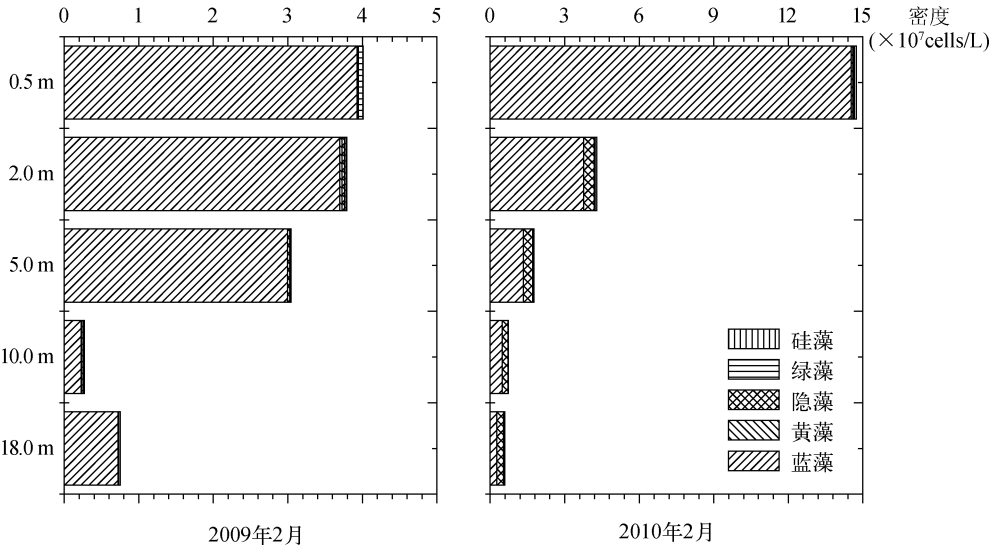


图3 S2 采样点藻类细胞密度垂直分布

Fig. 3 The vertical distribution of algal cell densities at the S2 site

2.2.2 理化数据 石骨库区出水口 S2 采样点水温、pH、DO 随水深的增加而呈降低趋势。Chl. a 先升高后降低,在水深 2m 处达到最大值,而垂直分布藻数据显示最高值出现在表层,这可能与不同种类的藻细胞大小以及叶绿素 a 含量不同有关。2009 年水华期间,出水口采样点 TN、TP 的垂直分布均没有明显差异,2010 年水华期间,出水口采样点 TN、TP 的垂直分布差异均较为明显,为表层浓度较高(图4)。

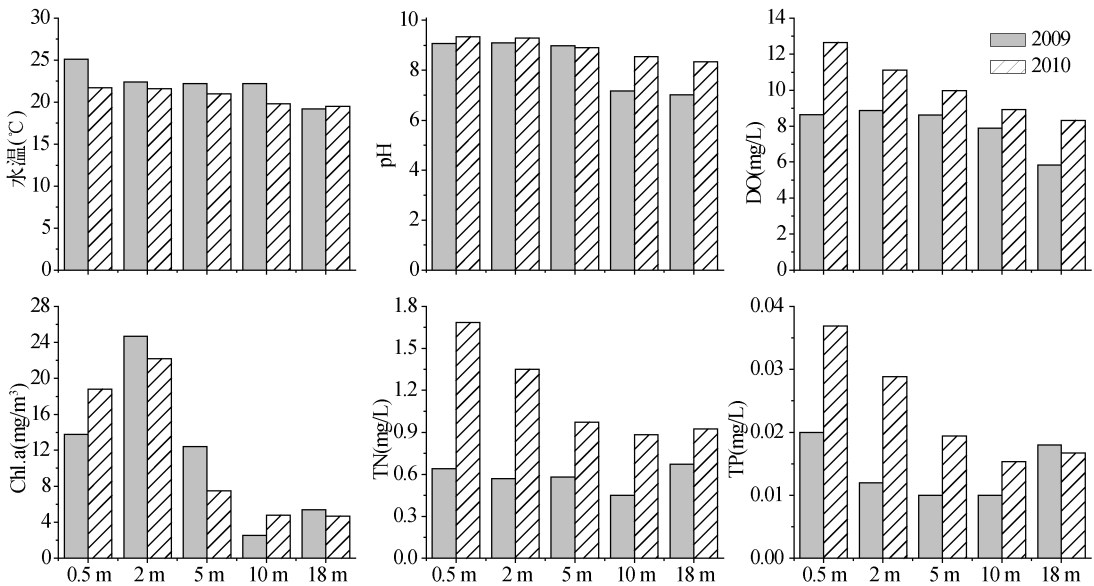


图4 S2 采样点理化参数垂直分布

Fig. 4 The vertical distribution of physicochemical parameters at the S2 site

2.3 相关性分析

整体来看, Chl. a 与理化参数具有较好的相关性, 尤其是 Chl. a 与 pH、DO 呈较显著的正相关关系, 且与 pH 的相关系数最高(图 5). Chl. a 与水温、TN、TP、COD_{Mn} 浓度的相关性没有达到显著水平($P > 0.05$).

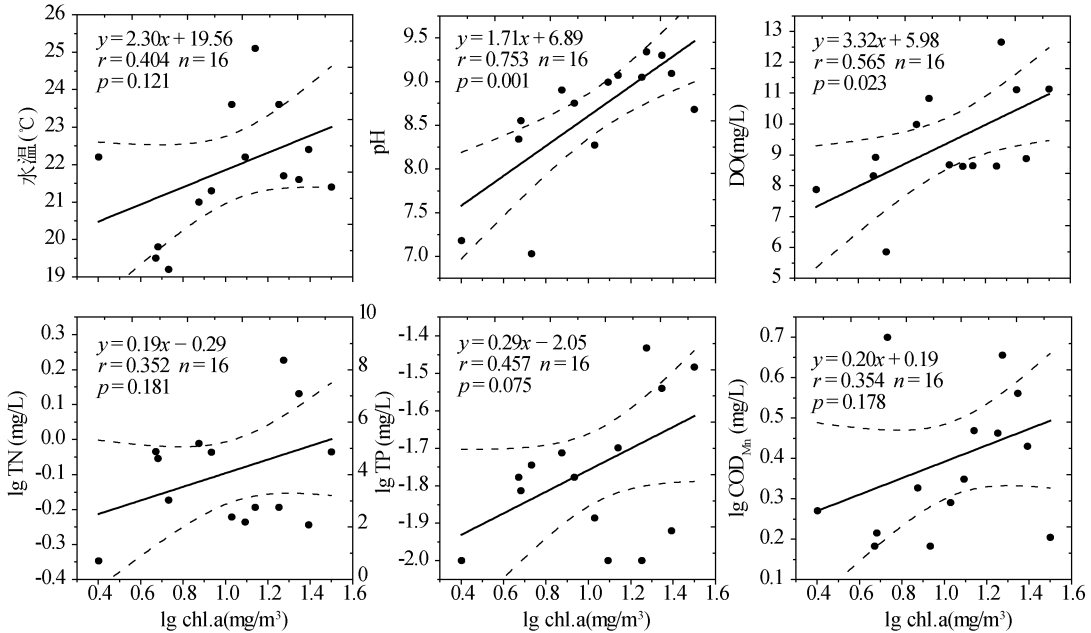


图 5 高州水库叶绿素 a 浓度与理化参数回归分析

Fig. 5 Regression analysis of chlorophyll-a concentration and physicochemical parameters in Gaozhou Reservoir

3 讨论

3.1 国内同类型水库富营养化比较

我国是水库大国, 水库生态系统在区域环境的改善、支撑经济的发展和供水保障方面具有重大的作用, 这是世界上任何一个国家所不能比拟的^[9]. 造成我国水库富营养化的主要原因有面源污染的日益加剧、城市污水排放量的激增、水土流失造成水库泥沙淤积严重、水库蓄水量减少等^[10], 但不同地域条件的水库富营养化主导因子又不尽相同. 高州水库水华暴发在冬末春初, 温度较低. 高州水库水质与其他同等类型水库相比(表 2), 为中营养水平, 综合营养状态指数 $TLI(\Sigma)$ 达到 42.2. 高州水库水华暴发期间 COD_{Mn} 和 TP 相对较低, 分别为 1.5 mg/L 和 0.02 mg/L, 但 TN/TP 达到较高水平, 磷为高州水库主要的限制性营养因子. 较低 TN/TP 亦可暴发蓝藻水华, 不仅是蓝藻水华暴发诱因, 也是水华暴发成因^[11], 如官厅水库、汤溪水库和漫湾水库. 高州水库作为饮用水源水库, 水质处于中营养状态, 却连续两年发生蓝藻水华, 给饮水安全带来威胁.

3.2 高州水库水华原因分析

3.2.1 长期利于水华发生的水体稳定性 高州水库为典型的丘陵型水库, 水力滞留时间为 0.45 a, 但在冬末春初, 由于长期没雨, 水库水体处于一种稳定性较高状态, 在气候条件适宜、光照充足时, 水体易暴发水华. 水体稳定性与蓝藻的悬浮机制密切相关^[17]. 悬浮机制是指部分蓝藻(如微囊藻)能通过改变单位细胞体积中的碳水化合物的比例而改变细胞密度, 从而调节在水体中的上浮与沉降^[20]. 水体分层能够大大降低水体的垂直混合程度, 增加水体稳定性. 高州水库两年的春季水华, 藻类细胞密度垂直分布较为明显, 表层(0.5 m)细胞密度最高, 随水深的增加, 细胞密度呈降低趋势.

表2 水库水质调查资料统计*
Tab.2 Reservoir water quality survey statistics

水库名称	库容 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	Chl. a (mg/m^3)	SD (m)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	COD _{Mn} (mg/L)	TN/TP	TLI(Σ)	营养程度
高州水库	12.80	8.6	2.0	0.92	0.02	1.5	46.0	42.2	中营养
官厅水库 ^[12-13]	41.60	—	0.8	1.63	0.12	6.0	13.6	53.0	轻度富营养
于桥水库 ^[14]	15.59	—	0.8	2.45	0.04	—	61.3	61.9	中度富营养
峡山水库 ^[15]	14.05	15.2	2.0	1.80	0.05	5.7	36.0	55.2	轻度富营养
鹤地水库 ^[16]	11.87	11.1	1.3	1.30	0.02	3.6	65.0	46.7	中营养
汤溪水库 ^[17-18]	3.81	4.5	1.0	0.67	0.05	1.7	13.4	40.3	中营养
漫湾水库 ^[19]	2.60	48.5	0.3	1.58	0.41	—	3.9	60.6	中度富营养

* 各水库选取库区中心采样点

3.2.2 利于水华发生的水温 温度是引起水华发生及决定水华种类的一个重要因素^[21]。有研究表明,水华微囊藻在温度低于13℃时几乎不能生长,高于16℃时能缓慢生长,且随着温度的升高,生长速率增大^[22]。高州水库蓝藻水华一般出现在冬末春初,气温回升之际,此时的温度有利于底泥中蓝藻的复苏及水柱中蓝藻的生长。

3.2.3 氮磷水平接近水华发生的阈值 一般认为,当水体中TN、TP含量分别达到0.20、0.02 mg/L以上时,水体出现富营养化,具备发生藻类水华的营养条件^[23]。有文献表明由于鱼腥藻的氮磷代谢活性的调节机制作用,可以在较低的氮磷浓度下生长^[24],在氮磷含量高出限制阈值时有可能暴发水华^[25]。2009年水华期间TP未达到阈值,TN高于限制阈值;2010年水华期间除石骨库区中心(S1)采样点TP未达到阈值以外,其余各点TN、TP均高于限制阈值,N、P浓度条件基本可以满足藻类生长需要。高州水库两次水华均发生在枯水期,降雨少,加上城镇和规模化商业化农业农村生活污染,水体中的TN、TP和高锰酸盐指数升高,藻类旺盛生长,诱导了水华的暴发。

3.3 控制措施探讨

蓝藻水华暴发的原因比较复杂,其治理也要从多方面进行^[26]。高州水库污染源主要来自城镇和规模化商业化农业农村生活污染,因此可以加大集中式污水处理设施的建设,加强农业面源污染的治理,减少化肥的使用。此外,通过加强水体的生态修复和生态环境保护,以提高水体的自净能力,以优化和调控水生态系统的结构和功能。再次,建立蓝藻水华的预警预报系统,加强应急措施,如常规跟踪监测、物理打捞等。只有科学监控、综合防治、合理利用,才能逐步减缓水体富营养化进程,最终控制水库暴发严重蓝藻水华,从而为居民提供更加安全的饮用水^[27]。

致谢:感谢周杨同学协助资料搜集整理,刘伟锋同学帮助野外采样工作。

4 参考文献

- [1] 魏鹏,林秋奇,胡韧等.高州水库水质与浮游生物动态分析.应用与环境生物学报,2002,8(2):165-170.
- [2] 孔繁翔,高光.大型浅水湖泊富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考.生态学报,2005,25(3):589-595.
- [3] 胡韧,雷腊梅,张成武.我国鱼腥藻的新记录种——粘质鱼腥藻.生态科学,2009,28(1):1-3.
- [4] 章宗涉,黄祥飞.淡水浮游生物研究方法.北京:科学出版社,1991:333-339.
- [5] 胡钧鸿,魏心印.中国淡水藻类——系统、分类及生态.北京:科学出版社,2006:1-995.
- [6] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002:88-671
- [7] 王明翠,刘雪芹,张建辉.湖泊富营养化评价方法及分级标准.中国环境监测,2002,18(5):47-49.
- [8] Home AJ,Goldman CR. Limnology(Second Edition),New York:Mcgraw-Hill Inc,1994:276.
- [9] 韩博平.中国水库生态学研究的回顾和展望.湖泊科学,2010,22(2):151-160.
- [10] 江涛,刘祖发,陈晓宏等.广东省水库富营养化评价.湖泊科学,2005,17(4):378-382.
- [11] Xie LQ, Xie P, Li Sx et al. The low TN: TP ratio, a cause or a result of Microcystis blooms? Water Research, 2003, 37:

2073-2080.

- [12] 李敏慧,杜桂森,姜树军等. 官厅水库的微囊藻毒素及其与水环境的相关性. 生态学报, 2010, **30**(5):1322-1327.
- [13] 杜桂森,王建厅,张为华等. 官厅水库水体营养状况分析. 湖泊科学, 2004, **16**(3):277-281.
- [14] 王立林,杜玉凤,王鸿雁. 于桥水库富营养化控制对策研究. 水科学与工程, 2007, **6**:23-26.
- [15] 郭照河,杨化勇,李 飞等. 峡山水库富营养化评价与对策研究. 水文, 2004, **24**(4):50-52.
- [16] 陈 科. 鹤地水库富营养化状况分析与防治对策. 水利科技与经济, 2009, **15**(3):214-216.
- [17] 赵梦绪,韩博平. 汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析. 生态学报, 2005, **25**(7):1554-1561.
- [18] 赵帅营,林秋奇,胡 韧等. 汤溪水库的富营养化现状研究. 生态科学, 2002, **21**(4):316-319.
- [19] 王海珍,刘永定,沈银武等. 云南漫湾水库甲藻水华生态初步研究. 水生生物学报, 2004, **28**(2):213-215.
- [20] Oliver RL. Floating and sinking in gas-vacuolate cyanobacteria. *Journal of Phycology*, 1994, **30**: 161-173.
- [21] Straskraba M. Lake and reservoir management. *Verh Internat Verein Limnol*, 1996, **26**: 193-209.
- [22] 金相灿,储昭升,杨 波. 温度对水华微囊藻及孟氏浮游蓝丝藻生长、光合作用及浮力变化的影响. 环境科学学报, 2008, **28**(1):50-55.
- [23] 金相灿. 中国湖泊环境. 北京:海洋出版社,1995.
- [24] 常锋毅,潘晓洁,康丽娟. 洱海螺旋鱼腥藻生长生理特性的初步研究. 水生生物学报, 2009, **33**(3):385-390.
- [25] Leigh C, Burford MA, Roberts DT. Predicting the vulnerability of reservoirs to poor water quality and cyanobacterial bloom. *Water Research*, 2010, **44**: 4487-4496.
- [26] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 太湖梅梁湾 2007 年蓝藻水华形成及取水口污水团成因分析与应急措施建议. 湖泊科学, 2007, **19**(4):357-358.
- [27] Onderka M. Correlations between several environmental factors affecting the bloom events of cyanobacteria in Liptovska Mara reservoir(Slovakia)—A simple regression model. *Ecological Modelling*, 2007, **209**: 412-416.