

滇池福保湾水体可溶性无机碳与蓝藻水华的相关性

张彦辉¹, 匡武¹, 杨劭² (1. 安徽省环境科学研究院, 安徽合肥 230022; 2. 华中师范大学生命科学院, 湖北武汉 430079)

摘要 [目的] 探索蓝藻水华暴发至消亡过程中水体无机碳在水体中的变化规律, 为制订对蓝藻水华的有效防治措施提供决策依据。[方法] 通过采样分析滇池福保湾生态恢复区水体中无机碳浓度与浮游藻类浓度, 研究了富营养化水体中可溶性无机碳的时空动态变化及其相关影响因素。[结果] 福保湾水体叶绿素 a 浓度和 CO_3^{2-} 浓度呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与水体 pH 均呈显著正相关 ($P < 0.05$); 与 CO_2 浓度均呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与总无机碳浓度和 HCO_3^- 浓度均呈显著负相关 ($P < 0.05$)。[结论] 蓝藻水华的消是导致水体无机碳形态与浓度剧烈变化的重要原因。

关键词 滇池; 可溶性无机碳; 蓝藻水华

中图分类号 S181; X52 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)22-060-03

Study on the Correlation between Dissolved Inorganic Carbon(DIC) Content and Cyanobacterial Blooms in Fubao Bay, Dianchi Lake
ZHANG Yan-hui¹, KUANG Wu¹, YANG Shao² (1. Anhui Research Academy of Environmental Science, Hefei, Anhui 230022; 2. College of Life Sciences, Central China Normal University, Wuhan, Hubei 430079)

Abstract [Objective] The aim was to explore the change of inorganic carbon in water during the process of outbreak to extinction of cyanobacterial bloom, to provide basis for formulating effective control measures of cyanobacterial bloom. [Method] Inorganic carbon and planktonic algae concentration in water body of Fubao Bay ecological restoration area in Dianchi Lake was analyzed, temporal and spatial dynamic change and relevant influencing factors of DIC in eutrophic water body were studied. [Result] The results indicated that the concentration of chlorophyll a was extremely significant positive correlated with CO_3^{2-} ($P < 0.01$) and pH values ($P < 0.05$); and the concentration of chlorophyll a was extremely significant negative correlated with CO_2 ($P < 0.01$), DIC and HCO_3^- ($P < 0.05$). [Conclusion] The outbreak and extinction of cyanobacterial bloom is an important reason for the drastic change of inorganic carbon form and concentration.

Key words Dianchi Lake; Dissolved inorganic carbon(DIC); Cyanobacterial bloom

滇池是云贵高原第一大湖泊, 位于云南省昆明市西南部。福保湾位于滇池东北岸, 是由大清河和海河冲击扇包围形成的湖湾, 湖岸线长 3.16 km, 面积约 1 km²。目前, 福保湾水体富营养化程度日益加剧, 由于其原有的湖滩湿地被人为混凝土“防浪堤”替代, 冬春季的风浪对湖堤强烈的冲蚀作用, 使湖底沿岸带沉积物变得坚硬而贫瘠, 水生植被消失, 蓝藻水华现象频发, 湖泊生态系统受到严重破坏^[1]。水体中可溶性无机碳共有 3 种不同存在形式: 自由 CO_2 (溶解于水中的分子形式为 CO_2 和 H_2CO_3)、离子态的 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 。在滇池富营养化水体中, 蓝藻水华的大规模暴发降低了 CO_2 和 HCO_3^- 在水体中的浓度, 且大气 CO_2 的扩散速率难以满足水华对碳的利用速率, 造成水体可利用无机碳水平极低^[2-3]。笔者以滇池福保湾生态恢复区水体为研究对象, 研究了富营养化水体中可溶性无机碳的时空动态变化及其相关影响因素, 探索了蓝藻水华暴发至消亡过程中水体无机碳在自然水体中的变化规律, 以期制订蓝藻水华的有效防治措施提供决策依据。

1 材料与与方法

1.1 样点分布及采样方法 福保湾东岸属于一个整体, 针对其直立堤岸带水深、水质较差、透明度较低、风浪淘蚀性强, 对水生态系统重建尤其是水生植被的恢复短期难以实现的现状, 在该区实施了底泥疏挖与吹填示范工程, 根据吹填与否把该区域分成 2 个吹填区 (吹填 I 区和吹填 II 区); 1 个非吹填区 (非吹填区) 和 1 个未开发区 (好望角)。

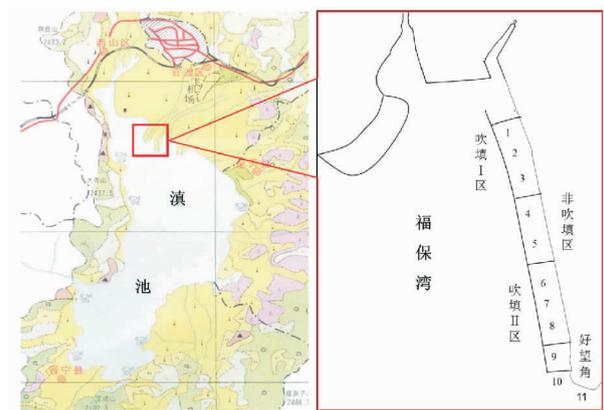


图 1 滇池福保湾采样点分布

Fig. 1 The distribution of sampling sites in Fubao Bay, Dianchi Lake

在福保湾生态恢复区水域共选取 11 个采样点, 分别为吹填 I 区 3 个 (1~3#), 非吹填区 2 个 (4~5#), 吹填 II 区 3 个 (6~8#), 区外好望角 3 个 (9~11#) (图 1)。统计结果以各区采样点的平均值为标准。2007 年 3~12 月用有机玻璃采样器对滇池福保湾生态恢复区各采样点的表层水进行采集。采样的同时测定水温和 pH。采样频率为每月分别 2 次 (由于不可抗力因素, 个别月份仅 1 次)。采样时间为 9:00~11:00。

1.2 水中无机碳的测定和计算方法 按照国标法^[4]测定水中碱度, 然后按照以下方法计算无机碳浓度^[5]:

$$\alpha_0 = \left(1 + \frac{K_1}{[H^+]} + \frac{K_1 K_2}{[H^+]^2}\right)^{-1}$$

$$\alpha_2 = \left(1 + \frac{[H^+]^2}{K_1 K_2} + \frac{[H^+]}{K_2}\right)^{-1}$$

基金项目 国家“水体污染控制与治理”科技重大专项 (2012ZX07103-003, 2012ZX07103-004)。

作者简介 张彦辉 (1981-), 男, 河北石家庄人, 工程师, 从事水污染控制研究。

收稿日期 2016-07-22

$$\alpha_1 = \left(1 + \frac{[H^+]}{K_1} + \frac{K_2}{[H^+]}\right)^{-1}$$

$$C_T = \{[\text{总碱度}] + [H^+] - [OH^-]\} / (\alpha_1 + 2\alpha_2)$$

$$[CO_2] = C_T \alpha_0$$

$$[HCO_3^-] = C_T \alpha_1$$

$$[CO_3^{2-}] = C_T \alpha_2$$

式中, K_1 、 K_2 分别是 H_2CO_3 的一级和二级解离常数, α 是碳酸平衡系数, C_T 是无机碳浓度。

1.3 叶绿素 a 浓度的测定 采样后 12 h 内, 采用 90% 丙酮抽提法测定叶绿素 a 浓度^[6], 用岛津 UV2401 分光光度计测量吸光值。

1.4 统计分析 采用 SPSS 12.0 的 Spearman 相关性分析工具和线性回归分析工具统计数据。

2 结果与分析

2.1 福保湾水体叶绿素 a 的分布及变化 从图 2 可以看出, 2007 年 3~12 月吹填 I 区和吹填 II 区内水体叶绿素 a 平均含量较非吹填区和好望角高, 平均值分别为 249.6 和 236.4 $\mu\text{g/L}$; 4 个采样区域叶绿素 a 的变化趋势基本相同, 水体叶绿素 a 从 3 月份开始升高, 在 4 月中旬到达 1 个小高峰, 然后开始下降至 5 月中旬最低, 这段时间, 福保湾水体中主要与水华束丝藻的生消相对应; 5 月底 6 月初为水华微囊藻的复苏阶段, 7~9 月为微囊藻水华的全面暴发阶段, 同时水体叶绿素 a 在 8 月中旬达到最大值, 随后随着时间的推移而下降, 10~12 月为微囊藻水华的消亡阶段, 同时以水华束丝藻为主的浮游藻类再次开始出现^[7]。

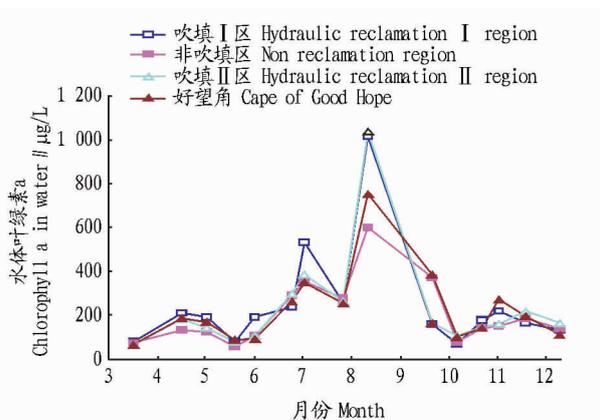


图 2 2007 年 3~12 月福保湾水体叶绿素 a 的变化情况

Fig. 2 Changes of chlorophyll a in water of Fubao Bay during Mar. - Del. 2007

2.2 福保湾水体无机碳、温度和 pH 的分布及变化 从图 3 可以看出, 吹填 II 区、非吹填区和好望角水体中福保湾水体中 3 种形态无机碳含量、总无机碳含量和 pH 的变化趋势基本相同; 之后 2007 年 3~12 月 3 个区水体中总可溶性无机碳、 HCO_3^- 和 CO_2 含量在 3 月保持最大值, 然后随着水体中水华束丝藻的生长逐渐降低, 到 4 月中旬伴随水华束丝藻的暴发达到较低值, 随后又逐渐上升, 之后伴随 5 月底 6 月初微囊藻水华的复苏和随后的暴发一直降低, 直到 11 月初开始再次升高; CO_3^{2-} 含量和 pH 与水体中总可溶性无机碳、

HCO_3^- 和 CO_2 含量呈现出相反的变化趋势。

吹填 I 区与其他 3 个区相比有明显不同, 可能由于吹填 I 区紧邻海河口, 水体理化指标受海河水污染的程度严重。2007 年 3~12 月吹填 I 区水体中总可溶性无机碳、 HCO_3^- 和 CO_2 的平均含量均为最高, 分别为 1.682、1.557 和 0.012 mmol/L, CO_3^{2-} 平均含量和 pH 为最低, CO_3^{2-} 平均含量为 0.112 mmol/L, pH 平均为 9.09。

4 个采样区的水温随时间变化趋势基本保持一致, 2007 年 3~12 月平均温度大于 19.7 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.3 福保湾水体浮游藻类与无机碳等环境因子的相关性 相关性分析结果表明 (表 1), 非吹填区、吹填 II 区和好望角水体叶绿素 a 浓度和 CO_3^{2-} 浓度均呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 CO_2 浓度均呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与总无机碳浓度和 HCO_3^- 浓度均呈显著负相关 ($P < 0.05$); 吹填 II 区和好望角水体叶绿素 a 浓度与水体 pH 均呈显著相关 ($P < 0.05$), 非吹填区叶绿素 a 浓度与水体 pH 呈极显著相关 ($P < 0.01$)。吹填 I 区水体叶绿素 a 浓度仅与 CO_3^{2-} 浓度呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与其他因子无相关性。4 个采样区中只有好望角水体中水体叶绿素 a 浓度与水温呈显著正相关 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 水体浮游藻类和无机碳等环境因子动态变化成因分析 吹填 I 区和吹填 II 区内水体叶绿素 a 平均含量较高的原因可能是围隔的封闭以及与湖湾水体交换缓慢造成。另外, 吹填底泥较短时间内稳定性差, 易受到风浪的剧烈作用, 使底泥中营养盐释放再悬浮, 也可能造成浮游藻类的大量生长。海河是福保湾的主要纳污河流之一, 也是接纳周边污染物的主要通道之一, 水质属于劣 V 类, 每年向湖湾排放大量氮、磷等污染物, 而吹填 I 区的北侧正对海河口, 致使该区内水中氮、磷含量较高, 为浮游植物的大规模生长提供了营养基础。

每年 5~10 月是云贵高原地区的雨季, 大量降水通过海河汇入福保湾, 对福保湾水体尤其是正对海口口的吹填 I 区造成影响, 造成水体 pH 降低, 进而影响水体中的无机碳浓度。这可能是造成吹填 I 区水体中总可溶性无机碳、 HCO_3^- 和 CO_2 平均含量较高, CO_3^{2-} 平均含量和 pH 最低的主要原因。

湖水 pH 是湖泊及其流域各种自然地理因素综合作用的结果。在正常天然湖水中, 氢离子浓度主要取决于湖水的 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_2 的对比关系。 CO_2 是浮游藻类进行光合作用的原料, 其繁殖速度很快, 尤其是蓝绿藻消耗 CO_2 的速度迅速, 以至于难以与大气中的 CO_2 平衡, 使 pH 升高到 9 或更高^[8]。这与该研究监测数据相符, 2007 年 3~12 月福保湾水体 pH 为 8.1~9.3, 最高达 10.3。

影响水体无机碳浓度的一个重要因素是 pH 的变动与滇池流域广泛分布的碳酸盐岩石在适宜的水文地质及构造条件下发生的岩溶作用有关, 由于碳酸盐岩石在水中的分解造成水体 HCO_3^- 和 OH^- 含量较高, 导致滇池水体偏碱性^[9]。研究表明, 高 pH (>8) 更有利于原核藻类的生长^[10], 滇池水

体的碱性环境有利于原核生物蓝藻的生长,一旦其生长的其他条件满足即可暴发水华。由此可见,水体无机碳源与 pH

是影响浮游藻类生长繁殖和生物量积累的重要条件^[11-12]。

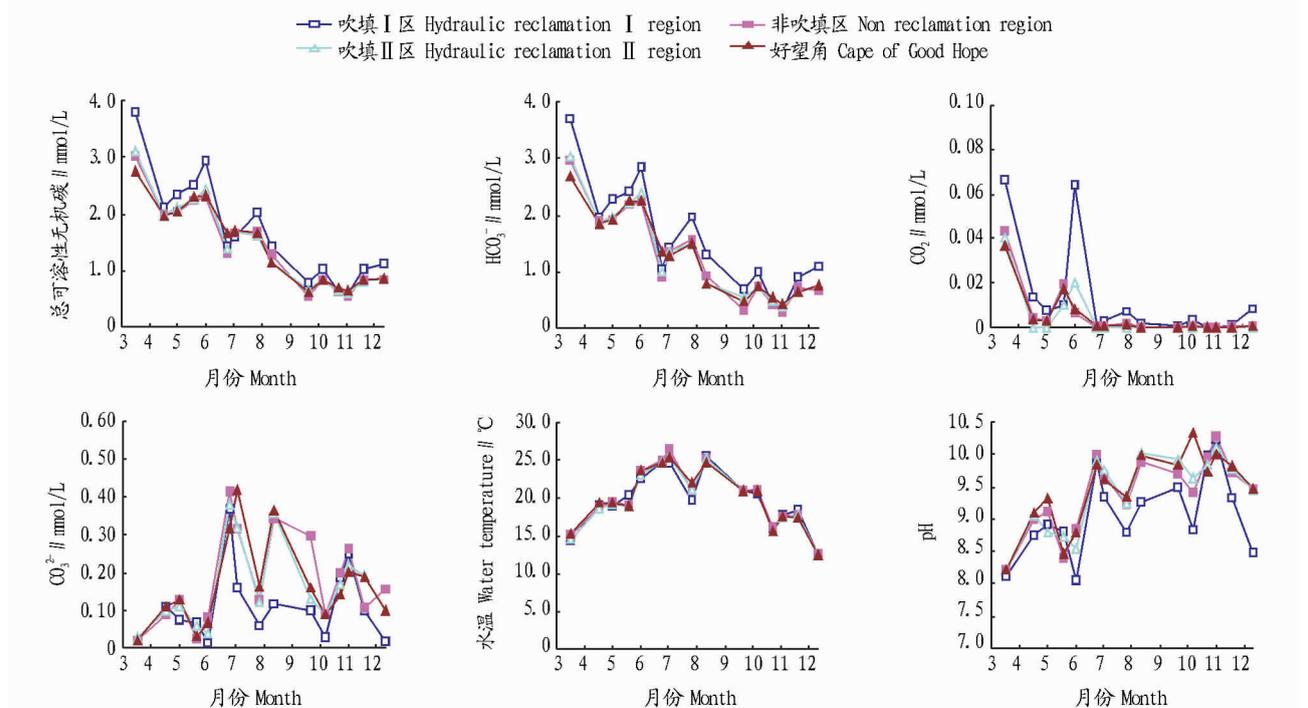


图3 2007年3~12月滇池福保湾水体无机碳、水温和 pH 的变化情况

Fig. 3 Changes in inorganic carbon, water temperature and pH in Fubao Bay, Dianchi Lake during Mar. - Del. 2007

表1 叶绿素 a 浓度与水体无机碳的相关性

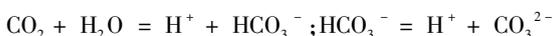
Table 1 Correlation between chlorophyll a concentration and inorganic carbon in water

指标 Indexs	叶绿素 a Chlorophyll a			
	吹填 I 区 Hydraulic reclamation I region	非吹填区 Non reclamation region	吹填 II 区 Hydraulic reclamation II region	好望角 Cape of Good Hope
DIC	-0.029	-0.556*	-0.632*	-0.532*
HCO ₃ ⁻	-0.057	-0.525*	-0.632*	-0.550*
CO ₂	-0.307	-0.709**	-0.694**	-0.718**
CO ₃ ²⁻	0.584*	0.893**	0.817**	0.918**
pH	0.422	0.728**	0.637*	0.614*
水温 Water temperature	0.477	0.441	0.492	0.556*

注: * 表示显著相关($P < 0.05$); ** 表示极显著相关($P < 0.01$)。

Note: * stands for significant correlation($P < 0.05$); ** stands for extremely significant correlation($P < 0.01$).

3.2 水体浮游藻类与无机碳等环境因子相关性分析 赵梦绪等^[13]研究表明,汤溪水库在7月大规模蓝藻水华发生时,蓝藻的丰度与 pH 呈显著的正相关关系。这与笔者研究得出的结论相一致。湖水 pH 呈现随藻类生长而显著增高的趋势,主要是由于藻类特别是蓝藻光合作用消耗 CO₂,大部分蓝藻还可以利用 HCO₃⁻ 作为光合无机碳源,使湖水中溶解无机碳的浓度降低,水中 H⁺ 浓度减少,最终导致 pH 升高^[14]。水中3种无机碳源相互转化遵守化学平衡方程:



根据化学平衡移动原理,藻类光合作用吸收利用水中溶解的 CO₂,使3种碳源相互转化的化学平衡发生移动,结果是 H⁺ 浓度降低和 CO₃²⁻ 浓度相对升高,最终引起 pH 升高。蓝藻水华的暴发和水中无机碳源 CO₂ 和 HCO₃⁻ 浓度的降低,正好体现了水体叶绿素 a 浓度与水中无机碳源 CO₂ 和

HCO₃⁻ 浓度的负相关性关系。

在富营养型水体中,水体 pH 主要受生物过程的控制,王志红等^[15]关于水库富营养化进程和 pH 的相关性的研究表明,富营养化进程中,特别是在水华暴发阶段,水体中上层区域 pH 快速上升,同时每天的 pH 波动也较大。可见,浮游藻类的生命活动对水体 pH 上升有一定促进作用。

温度与浮游植物的生长关系密切,水华蓝藻的丰度及其叶绿素 a 浓度均与水温具有显著的正相关关系,较高的水温有利于蓝藻成为优势种群和蓝藻水华的暴发^[16-21]。这与笔者研究得出的结论相一致,表明水温对蓝藻生长具有明显的控制作用。

4 结论

(1) 在营养盐相对充足的水体中,受水体温度升高的驱

(下转第 117 页)

色粘液较大,授粉效果好,坐果率高^[10],授粉时间应选择晴天 8:30~10:30 进行,避开阴雨天或干燥天气,以期提高结果率和果荚的质量^[11-12]。通过人工辅助授粉可大大提高鼓槌

石斛的结实率。鼓槌石斛与其他石斛杂交败育等原因不明确还有待进一步研究。



图7 果实

Fig.7 Fruits



图8 果实纵剖面

Fig.8 Longitudinal section of fruits

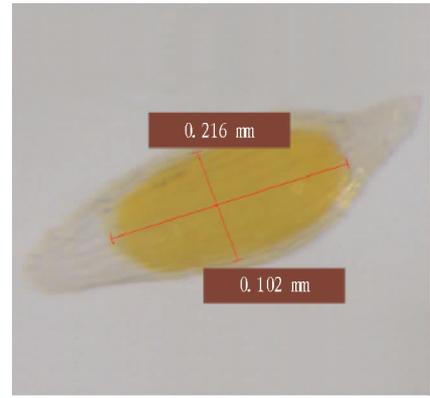


图9 种子大小

Fig.9 Seed size

参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[S]. 北京:中国医药科技出版社,2010:851.
- [2] 马国祥,徐国钧,徐珞珊,等. 鼓槌石斛及其化学成分的抗肿瘤活性作用[J]. 中国药科大学学报,1994,25(3):188-189.
- [3] 王天山,陆跃鸣,马国祥,等. 鼓槌石斛中化学成分对 K562 肿瘤细胞株生长抑制作用体外试验[J]. 天然产物研究与开发,1997(2):1-3.
- [4] 肖春宏,黄飞燕,杨波. 鼓槌石斛研究进展[J]. 山西农业科学,2014,42(6):647-649.
- [5] 唐德英. 野生鼓槌石斛引种和栽培技术[J]. 中国中药杂志,2006(15):1297-1298.
- [6] 2010 版中国药典石斛质量标准[S/OL]. [2016-04-01]. <http://www.docin.com/p-442027888.html>.

- [7] 徐红,丁家宜. 药用石斛生物技术研究概况[J]. 中国野生植物资源,2001(1):1241.
- [8] 付开聪. 鼓槌石斛快繁育苗技术的研究[J]. 中草药,2009,40(S1):259-262.
- [9] 唐德英,马洁,张丽霞,等. 鼓槌石斛种质资源调查研究[J]. 中国中药杂志,2010,35(12):1529-1531.
- [10] 林从发,钟爱清,林云斌,等. 铁皮石斛类原球茎增殖和分化的研究[J]. 江西农业学报,2007,19(1):84-86.
- [11] 金银兵. 铁皮石斛的生物学特性与开花授粉技术研究[J]. 安徽农业科学,2009,37(11):450-452.
- [12] 高燕,李泽生,李桂林,等. 鼓槌石斛杂交育种及组培育苗技术研究[J]. 热带农业科技,2015,38(1):15-20.

(上接第 62 页)

使,水体中 CO_2 , HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 浓度的剧烈变化直接与浮游藻类的快速生长有关。由于大气 CO_2 的扩散速率难以满足藻类对碳的利用速率,蓝藻的大规模生长降低了水体中 CO_2 和 HCO_3^- 浓度,导致水体可利用无机碳水平极低。

(2) 当水体处于无机碳限制的条件下,蓝藻更容易生长,进而形成优势种群,演替为蓝藻水华。受水体无机碳限制与蓝藻水华遮阴的双重作用,可能又直接导致了沉水植物的消亡,加剧了水体的富营养化进程。

参考文献

- [1] 李文朝,刘正文,胡耀辉,等. 滇池东北部沿岸带生态修复技术研究及工程示范-环境恶化、生态退化现状及其成因[J]. 湖泊科学,2004,16(4):305-311.
- [2] 李香华,胡维平,杨龙元,等. 太湖梅梁湾冬季水-气界面二氧化碳通量日变化观测研究[J]. 生态学杂志,2005,24(12):1425-1429.
- [3] 嵇晓燕,崔广柏,杨龙元,等. 太湖水-气界面 CO_2 交换通量观测研究[J]. 环境科学,2006,27(8):1479-1486.
- [4] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境出版社,2002:120-124,201-205.
- [5] 汤鸿霄. 水化学[M]. 北京:科学出版社,1987:129-133.
- [6] ELEY J H. Effect of carbon dioxide concentration on pigmentation in the blue-green alga *Anacystis nidulans*[J]. Plant & cell physiology,1971,12:311-316.
- [7] 李原,张梅,刘若南. 滇池的水华蓝藻的时空变化[J]. 云南大学学报(自然科学版),2005,27(3):272-276.
- [8] VERMAAT J E. Periphyton removal by freshwater micrograzers[M]//VAN VIERSSSEN W, HOOTSMANS M, VERMAAT J. Lake Veluwe, a macrophyte-dominated system under eutrophication stress. Dordrecht, the Nether-

- lands; Kluwer Academic Publishers,1994:213-249.
- [9] 黄富荣. 云南滇池地区下寒武统磷块岩的稀土元素特征及其地球化学演化[J]. 稀土,1995,16(4):48-51.
- [10] 刘永定,范晓,胡征宇. 中国藻类学研究[M]. 武汉:武汉出版社,2001.
- [11] 张宝玉,李夜光,李中奎,等. 温度、光照强度和 pH 对雨生红球藻光合作用和生长速率的影响[J]. 海洋与湖沼,2003,34(5):558-565.
- [12] 王正方,张庆,吕海燕,温度、盐度、光照强度和 pH 对海洋原甲藻增长的效应[J]. 海洋与湖沼,2001,32(1):15-18.
- [13] 赵梦绪,韩博平. 汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子[J]. 生态学报,2005,25(7):1554-1560.
- [14] BERMAN - FRANK I, KAPLAN A, ZOHARY T, et al. Carbonic anhydrase activity in the bloom-forming dinoflagellate *Peridinium gatunense* [J]. Journal of phycology,1995,31:906-913.
- [15] 王志红,崔福义,安全,等. pH 与水库水富营养化进程相关性研究[J]. 给水排水,2004,30(5):37-41.
- [16] 赵文,董双林,李德尚,等. 盐碱池塘浮游植物初级生产力的研究[J]. 水生生物学报,2003,23(1):47-54.
- [17] ZHENG W F, ZENG Z Q. High temperature adaptation of fresh water Cyanobacterium[J]. Journal of lake science,1994,6(4):356-363.
- [18] NALEWAJKO C, MURPHY T P. Effects of temperature and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of *Anabaena* and *Microcystis* in Lake Biwa, Japan: An experimental approach[J]. Limnology,2001,2:45-48.
- [19] LIN Y X, HAN M. The study growth factor of the *Microcystis aeruginosa* Kütz during eutrophication of Dianchi Lake[J]. Advances in environmental science,1998,6(3):82-87.
- [20] CHEN Y W, QIN B Q, GAO X Y. Prediction of blue-green algae bloom using stepwise multiple regression between algae & related environmental factors in Meiliang Bay, Lake Taihu[J]. Journal of lake science,2001,13(1):63-71.
- [21] WANG W, FANG Z F, YU W D. Research on restricted factors of Cyanophyceae density in Qian-dao Lake[J]. Heilongjiang environmental journal,2003,27(2):60-63.