

doi: 10.7541/2015.3

洱海蓝藻水华暴发期浮游植物群落变化及影响因素

陈建良¹ 胡明明^{2,3} 周怀东³ 王雨春³ 王英才⁴ 李艳晖⁵ 刘永定²
高继军³ 洪宇宁³

(1. 武汉大学, 武汉 430072; 2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;
4. 长江流域水环境监测中心, 武汉 430072; 5. 太原师范学院, 太原 030031)

摘要: 对洱海水质和浮游植物进行了调查, 分析了洱海藻类水华暴发季节水质营养水平及浮游植物多样性, 并探讨了洱海浮游植物种群演替的环境机制。研究表明, 洱海蓝藻水华在 6—10 月份大量暴发, 蓝藻数量高达 10^7 cells/L, 水华种类为微囊藻(*Microcystis*)属的一些种, 微囊藻在 6—10 月份占绝对优势, 最高可达 90%以上。分析 5—11 月洱海营养水平, 其中 7 月营养水平最高, 浮游植物生物量 10 月份最大(以叶绿素 *a* 表示)。使用 SPSS 里的 pearson 分析了浮游植物和各理化因子的关系, 结果表明相对于其他浮游植物种类, 总磷(TP)对微囊藻的影响比较大。

关键词: 浮游植物; 微囊藻; 洱海; 理化因子

中图分类号: S932.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2015)01-0024-05

浮游植物是水环境中的初级生产者和食物链的基础环节, 在物质循环和能量转化过程中起着重要作用。浮游植物群落结构的变化, 往往是反映水环境状况的重要指标^[1, 2]。洱海是云南省第二大湖泊, 位于大理市境内, 面积 249.0 km², 湖区属于亚热带高原季风气候^[3]。洱海水量充足, 是大理市主要的饮用水源地, 但自 20 世纪 90 年代以来, 随着社会经济的发展, 洱海的旅游业日渐兴旺, 人类活动干扰不断加剧, 洱海水质变差, 水生植被大量消退, 洱海水质在 1950s 处于贫营养水平, 在 1992 年到 2001 年期间一直保持在中营养水平^[4, 5], 现阶段处于中营养向富营养湖泊的过渡阶段^[6, 7]。

目前洱海污染源以面源污染为主, 工业和城镇生活的污染贡献率相对较低^[8], 富营养化问题日益突出, 在 1996 年和 1998 年秋季暴发了大面积蓝藻水华。水华发生期间, 水体透明度由 3.3 m 骤降至 1.5 m, 严重影响了洱海水源的安全^[9]。近几年来尽管采取了很多措施加大了对洱海的治理力度, 洱海的水生生态系统恢复和蓝藻水华暴发的局势仍不容乐观, 本

研究调查了洱海水华暴发期浮游植物群落组成、分布及水质现状, 探讨了洱海浮游植物种群演替的环境机制, 以期对洱海的治理提供基础研究资料。

1 材料与方法

1.1 样点分布及采样方法

采样时间为洱海蓝藻水华易暴发期(2009 年 5—11 月), 每月中旬进行一次采样, 全湖共设置 12 个采样点, 采样点从南至北分四个断面, 每个断面分东、中、西 3 个采样点(图 1)。用 5 L 有机玻璃采水器采集表层(0.5 m)水样, 其中 1 L 水样鲁哥氏液固定用于藻类细胞计数^[10]; 剩余 4 L 水样用于分析总氮(TN)、总磷(TP)、可溶性总氮(DTN)、氨氮(NH₃-N)、硝氮(NO₃-N)、化学需氧量(COD_{Mn})、叶绿素 *a* (Chl. *a*), 现场测定水温(T)和透明度(SD)。总氮、总磷、可溶性总氮、氨氮、硝氮、化学需氧量和叶绿素 *a* 均使用标准方法进行分析^[11]。同时用 25# 浮游植物网将浮游网在水体表面呈“∞”形来回拖动数次, 捞取少量藻样用于藻细胞定性分析。

收稿日期: 2013-11-01; 修订日期: 2014-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179205, 51309252); 国家重大科技专项(2008ZX07105-006)资助

作者简介: 陈建良(1970—), 男, 广东清远人; 博士研究生; 主要从事水资源与水环境研究。E-mail: 1452318829@qq.com

通信作者: 胡明明(1983—), 女, 助理研究员, 博士; 主要从事藻类环境生物学研究。E-mail: hmmmkeke@163.com

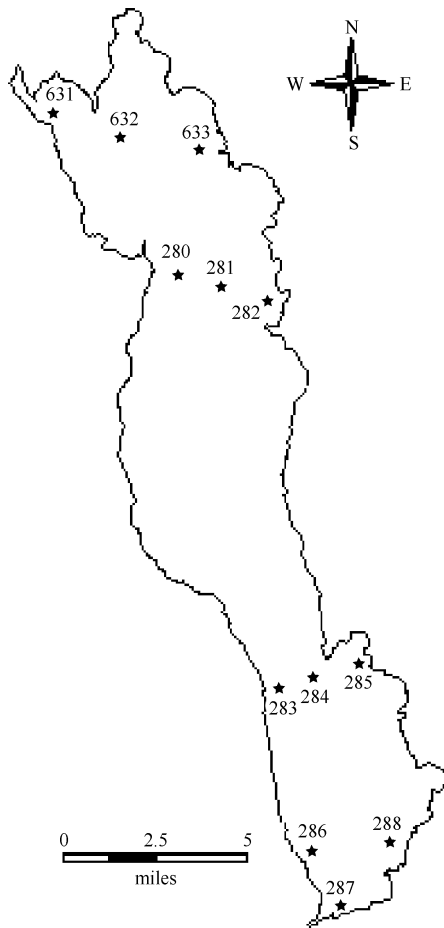


图 1 洱海采样点位置

Fig. 1 Sampling sites of Lake Erhai

1.2 藻类分析方法

在实验室借助显微镜和微生物图谱、检索表以及各类鉴定手册对浮游植物定性样品进行鉴定。浮游植物定量水样倒入 1000 mL 分液漏斗中静置沉淀 48h 抽出上清液, 浓缩至 30 mL, 计数前充分混匀, 取 0.1 mL 于浮游植物计数框内计数, 计数三行, 即 2、5、8 行, 每个样本重复计数 2 次。其中, 小型个体与个体较大的种类分别计数, 以减少误差。结果计算参照国家环保总局的方法^[12]。

1.3 水体营养状况评价采用的评价指标与标准

本文采用了包括叶绿素 *a*、高锰酸盐指数、总氮、总磷和透明度在内的相关加权综合营养状态指数来评价各河流的营养状态^[13]。综合营养状态指数计算公式为:

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

式中, $TLI(\Sigma)$ 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, 叶绿素 *a*、高锰酸盐指数、总氮、总磷和透明度各因子 W_j 取值分别为 0.2663、0.1834、0.1790、0.1879、0.1834, 以 Chl. *a* 作为基准参数。营养状态指数计算公式为: $TLI(\text{Chl. } a) = 10 (2.5 + 1.086 \ln \text{Chl. } a)$; $TLI(\text{TP}) = 10 (9.436 + 1.624 \ln \text{TP})$; $TLI(\text{TN}) = 10 (5.453 + 1.694 \ln \text{TN})$; $TLI(\text{SD}) = 10 (5.118 - 1.94 \ln \text{SD})$; $TLI(\text{COD}_{\text{Mn}}) = 10 (0.109 + 2.166 \ln \text{COD}_{\text{Mn}})$ 。采用 0 - 100 的一系列连续数字对水体营养状态进行分级: $TLI(\Sigma) < 30$ 贫营养, $30 \leq TLI(\Sigma) \leq 50$ 中营养, $TLI(\Sigma) > 50$ 富营养, $(50 < TLI(\Sigma) \leq 60)$ 轻度富营, $60 < TLI(\Sigma) \leq 70$ 中度富营养, $TLI(\Sigma) > 70$ 重度富营养。在同一营养状态下, 指数值越高, 其营养程度越重。

2 结果

2.1 蓝藻水华暴发期间各理化指标与浮游植物生物量的分布与变化

如图 2 所示, 从 5 月份开始, 洱海浮游植物生物量(叶绿素 *a* 含量)开始增加, 在 9 月份有稍许降低, 10 月份达到峰值, 11 月份开始下降。浮游植物数量和叶绿素 *a* 的变化趋势基本一致, 从 7 月份开始藻细胞密度由 7.63×10^6 个/L 上升为 2.08×10^7 个/L, 7、8、9、10 四个月份一直维持在较高水平, 为水华暴发的高峰期, 11 月份开始降低。8 月份较 7 月份叶绿素 *a* 含量高, 但是藻细胞数量却大幅下降, 这可能是因为 8 月份较 7 月份鱼腥藻细胞数量大幅增加, 虽然两个月份都是微囊藻占绝对优势, 但洱海鱼腥藻细胞较大^[14], 远远大于微囊藻, 所以虽然 8 月份细胞数量低于 7 月份, 但是叶绿素 *a* 仍有增加。

从图 2 还可以看出各指标在时间上的变化。10 月份的硝氮($\text{NO}_3\text{-N}$)最高, 为 0.211 mg/L; 9 月份的可溶性总氮(DTN)最高, 为 0.618 mg/L; 高锰酸钾指数(COD_{Mn})5—7 月份相差不大, 8—10 月有所下降, 11 月份继续下降; 总氮(TN)各月份的波动较大; 总磷(TP)和氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)各月份间无明显变化。

5—11 月洱海浮游植物数量以蓝藻门种类占绝对优势, 而浮游植物种群以绿藻门种类最多、蓝藻门和硅藻门次之。6—10 月洱海水华种类为微囊藻属的一些种, 微囊藻在这些月份中占绝对优势(图 3), 常见种为铜绿微囊藻、绿色微囊藻、挪氏微囊藻等。微囊藻属的比例从 5 月份开始上升, 在 7 月达到最高, 为 93.13%, 8 月份大幅下降, 9、10 月份又开始回升, 分别为 83.22% 和 94.9%。至 11 月份下降至 50.24%。浮游植物构成中蓝藻门所占比例在各月之

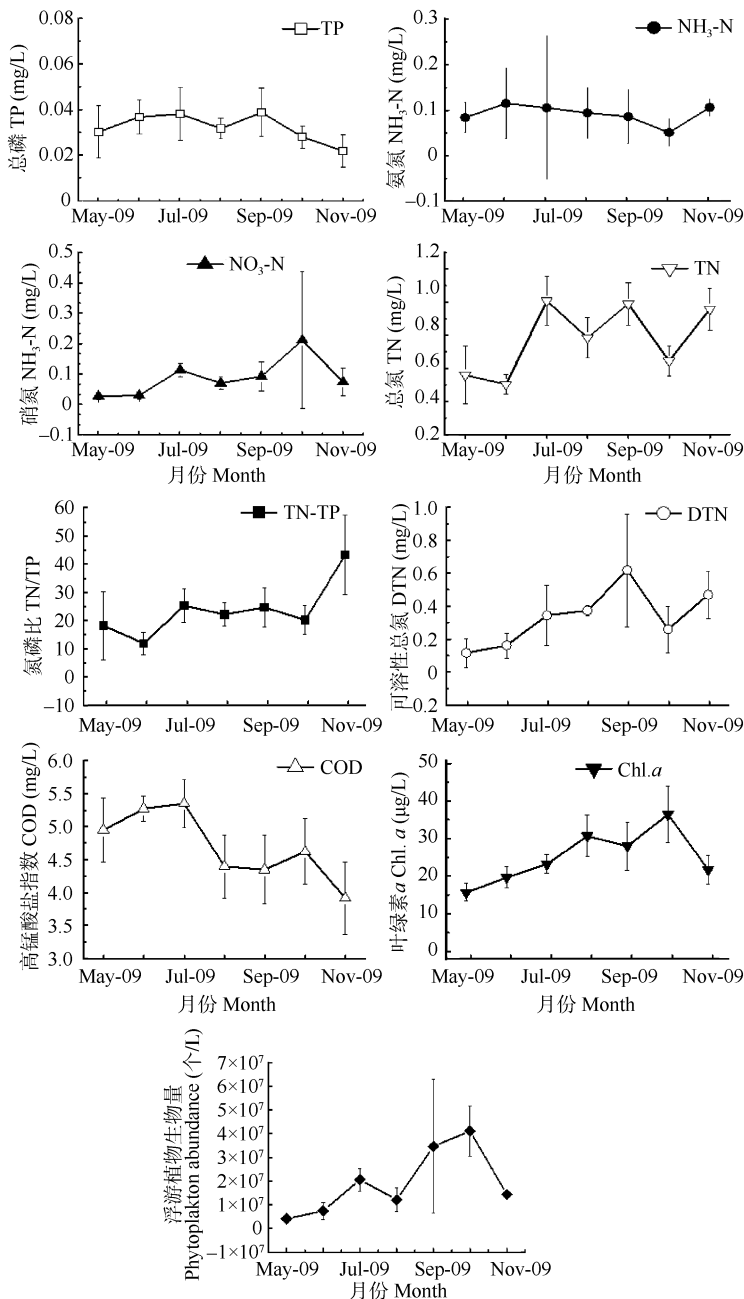


图2 2009年5—11月洱海理化因子及生物因子的变化情况

Fig. 2 Variation of physicochemical and biological factors in Lake Erhai from May to November, 2009

间的变化与微囊藻属的变化趋势基本相同。

2.2 洱海水质营养水平分析

从图4可以看出2009年5—11月各月营养水平指数均大于43,7月份营养水平指数最高接近50,5月份最低。这说明洱海水质依然处于中营养水平,和2006年的水质相比变化不大^[14]。

2.3 浮游植物与理化因子的相关性分析

2009年5—11月洱海浮游植物与各理化因子

Pearson 相关分析的统计数据见表1。从表中可发现各理化因子间相关性良好。研究发现,浮游植物生物量和总氮、硝氮、可溶性氮、温度呈显著正相关;微囊藻生物量和总氮、总磷、硝氮、可溶性氮、温度呈显著正相关。这说明相对于其他浮游植物种类,总磷(TP)对微囊藻的影响比较大。

3 讨论

洱海藻类水华的发生与其富营养化水平密切相关,浮游植物种群的变化反映了洱海水质的变化。从1957年到1997年,湖水中三态氮增加近20倍,磷酸盐增加了4倍^[15]。黎尚豪等^[16]曾报道洱海1957年南部出现水华束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae*)水华,进入80年代直至1995年,仍由水华束丝藻为主的水华出现在春秋二季,且范围扩大,主要分布在东南部及北部,其细胞数量达 5093.8×10^4 个/L。至1996年9月底至10月中,螺旋鱼腥藻(*Anabaena spiroides*)水华暴发,其细胞数高达 4449×10^4 个/L,占藻类种群数量的93.03%,最大生物量15.37 mg/L,占藻类总生物量的82.19%。球形鱼腥藻(*Anabaenasphaefica*)、铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、水华微囊藻(*M. flos-aquae*)、水华束丝藻构成该季水华的亚优势种群,梭形裸藻(*Euglena acells*)、美丽团藻(*Volvox aureus*)、小颤藻(*Oscillatoria tennis*)在此时期也大量繁殖。水华持续半月余。1997年虽没有大量水华发生,但藻类优势种群发生了急剧演变,总体上体现为:水华束丝藻-钝脆杆藻(*Fragilaria capucina*)、水华微囊藻-卷曲鱼腥藻(*Anabaena circinalis*)、螺旋鱼腥藻-卷曲鱼腥藻、水华束丝藻的四季转换^[9]。在此过程中,蓝藻门逐渐形成了绝对优势地位。

1998年,洱海藻类群落演变成终年以卷曲鱼腥藻、球形鱼腥藻、水华束丝藻、铜绿微囊藻、钝脆杆藻构成亚优势种群的蓝藻型浮游植物群落结构^[9]。以卷曲鱼腥藻为主的水华发生于9—11月。在水华期间,卷曲鱼腥藻细胞数量最高可达 11422×10^4 个/L,蓝藻门构成藻类群落总细胞数的79.9%—98.7%^[9]。潘晓洁^[14]2006年6—10月对洱海浮游植物的调查研究

表 1 2009 年 5—11 月洱海浮游植物生物量与各理化因子的相关性分析

Tab. 1 Association analysis between abundance of phytoplankton and physico-chemical factors of Lake Erhai from May to November in 2009

	TN	TP	NH ₃ -N	NO ₃ -N	DTN	COD _{Mn}	T	PA	Mic
TN	1	0.033	0.117	0.079	0.643**	-0.248*	-0.559**	0.364**	0.323**
TP	0.033	1	0.017	-0.042	0.102	0.436**	0.322*	0.160	0.241*
NH ₃ -N	0.117	0.017	1	-0.095	0.115	0.030	0.034	-0.189	-0.165
NO ₃ -N	0.079	-0.042	-0.095	1	0.085	-0.031	0.166	0.502**	0.513
DTN	0.643**	0.102	0.115	0.085	1	-0.404**	0.589**	0.339**	0.303**
COD _{Mn}	-0.248*	0.436**	0.030	-0.031	-0.404**	1	-0.172	-0.124	-0.040
T	0.599**	0.322*	0.034	0.166	0.589**	-0.172	1	0.461**	0.474**
PA	0.364**	0.160	-0.189	0.502**	0.339**	-0.124	0.461**	1	0.972**
Mic	0.323**	0.241*	-0.165	0.513**	0.330**	0.040	0.474**	0.972**	1

注: PA. 浮游植物生物量; Mic. 微囊藻属的生物量; **表示 $P < 0.01$ 水平下极显著相关; *表示 $P < 0.05$ 水平下显著相关

Note: PA. Phytoplankton abundance; Mic. *Microcystis* sp. abundance; ** Correlation is significant at the 0.01 level. * Correlation is significant at the 0.05 level

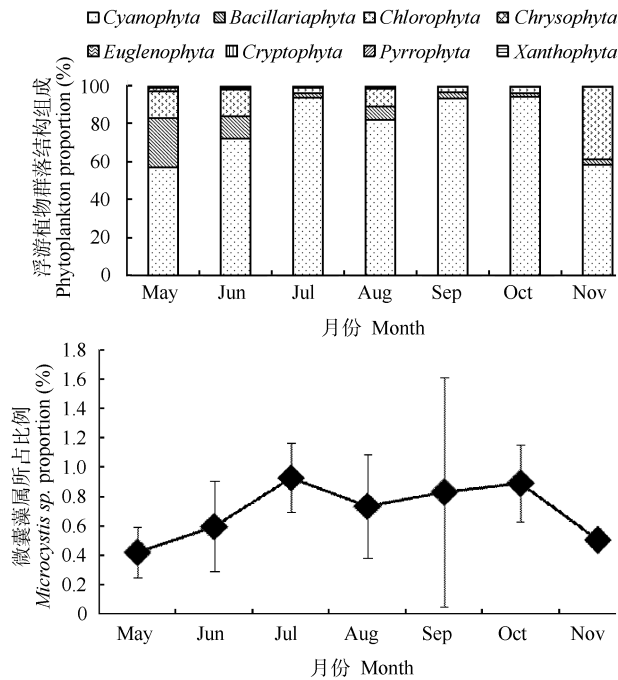


图 3 2009 年 5—11 月浮游植物构成比例

Fig. 3 Phytoplankton component from May to November, 2009

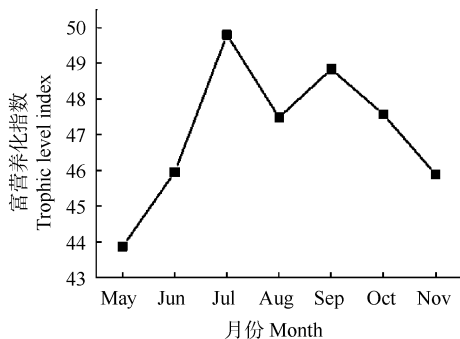


图 4 2009 年 5—11 月洱海各月水质的营养水平

Fig. 4 Trophic levels of Lake Erhai from May to November, 2009

发现, 在洱海蓝藻水华发生期间暴发期, 藻类种类相对较少, 以鱼腥藻或微囊藻占有绝对优势, 两属的种类交替大量生长形成水华, 藻细胞数保持在 10^7 cells/L 的水平。我们的研究结果进一步表明洱海水华暴发趋势已经十分严峻, 在蓝藻暴发期, 始终是微囊藻占绝对优势。

4 小结

洱海蓝藻水华一般发生在每年的 6—10 月份, 水华发生时蓝藻数量高达 10^7 cells/L, 水华主要为微囊藻属的一些种, 微囊藻在 6—10 月份占绝对优势, 数量最高可达 93.13%。洱海 2009 年 6—10 月份浮游植物种群较 2006 年发生变化, 由 2006 年的鱼腥藻和微囊藻交替大量生长形成水华转变为微囊藻占绝对优势的蓝藻水华。分析 2009 年 5—11 月洱海营养水平, 7 月营养水平最高。用 SPSS 分析了浮游植物和各理化因子的关系, 结果说明相对于其他浮游植物种类, 总磷(TP)对微囊藻的影响比较大。

参考文献:

- [1] Liu J K. Advanced Aquatic Biology [M]. Beijing: Science Press. 1999 [刘建康. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社. 1999]
- [2] Dong J, Li Y H, Li G B, et al. Seasonal dynamics characteristics and affecting physical factors of phytoplankton functional groups in Dongjiang River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, 37(5): 836—843 [董静, 李艳晖, 李根保, 等. 东江水系浮游植物功能群季节动态特征及影响因子. 水生生物学报, 2013, 37(5): 836—843]
- [3] Wang S M, Dou H S. Records of Lakes in China [M].

- Beijing: Science Press. 1998 [王苏民, 龚鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社. 1998]
- [4] Jin X C. Environment of Chinese Lakes [M]. Beijing: Ocean Press. 1995 [金相灿. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社. 1995]
- [5] Yang G S, Ma R H, Zhang L, *et al.* Lake status, major problems and protection strategy in China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(6): 779—810 [杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 799—810]
- [6] Yang X X. Analysis on total phosphorus and total nitrogen pollution in Erhai Lake [J]. *Yunnan Environmental Science*, 2006, **25**(Supplement): 113—115 [杨晓雪. 洱海总磷、总氮污染现状分析. 云南环境科学, 2006, **25**(增刊): 113—115]
- [7] Pan H X, Wang Y F, Dong Y S. Factor analysis of eutrophication in Erhai Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1999, **11**(2): 184—188 [潘红玺, 王云飞, 董云生. 洱海富营养化影响因素分析. 湖泊科学, 1999, **11**(2): 184—188]
- [8] Peng W Q, Wang S Y, Liu X B. Assessment on Erhai Lake water quality [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2005, **3**(3): 192—198 [彭文启, 王世岩, 刘晓波. 洱海水质评价. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, **3**(3): 192—198]
- [9] Dong Y X. Research on blue algae plankton bloom in Erhai Lake [J]. *Yunnan Environmental Science*, 1999, **18**: 28—31 [董云仙. 洱海蓝藻水华研究. 云南环境科学, 1999, **18**: 28—31]
- [10] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [M]. 18th edn. American Public Health Association, Washington DC. 1992
- [11] Chang F Y, Pan X J, Kang L J, *et al.* Phosphorus bioavailability in relation to submerged macrophyte species and biomass in fourteen temperate lakes, China [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2010, **19**: 50—56
- [12] China Environmental Protection Administration, Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods (4th Edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 2002 [国家环保总局. 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].
- [13] Jin X C, Tu Q Y. Survey Standards of Lake Eutrophication (2nd Edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 1990, 286—302 [金相灿, 屠清英. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京: 中国环境科学出版社. 1990, 286—302]
- [14] Pan X J. Studies on the Ecophysiology and Toxicology of Anabaena spp. in Lakes Dianchi and Erhai [D]. Doctoral Dissertation, University of Chinese Academy of Sciences. 2008 [潘晓洁. 滇池与洱海鱼腥藻生态生理和毒理学研究. 博士学位论文, 中国科学院研究生院. 2008]
- [15] Wu Q L, Wang Y F. On the succession of aquatic communities in Erhai Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1999, **11**(3): 267—273 [吴庆龙, 王云飞. 洱海生物群落的历史演变分析. 湖泊科学, 1999, **11**(3): 267—273]
- [16] Li S H, Yu M J, Li Z G, *et al.* Limnological survey of the lakes of Yunnan Plateau [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1963, **5**: 87—114 [黎尚豪, 俞敏娟, 李正光, 等. 云南高原湖泊调查. 海洋与湖沼, 1963, **5**: 87—114]

STUDIES ON POPULATION DYNAMICS AND THE UNDERLYING IMPACT FACTORS OF PHYTOPLANKTON DURING THE CYANOBACTERIA BLOOM IN LAKE ERHAI

CHEN Jian-Liang¹, HU Ming-Ming^{2,3}, ZHOU Huai-Dong³, WANG Yu-Chun³, WANG Ying-Cai⁴, LI Yan-Hui⁵, LIU Yong-Ding², GAO Ji-Jun³ and HONG Yu-Ning³

(1. Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 3. Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. Yangtze Valley Water Environment Monitoring Center, Wuhan 430072, China; 5. Departments of Biology, Taiyuan Normal University, Taiyuan 030031, China)

Abstract: Field studies were conducted in Lake Erhai from May to November in 2009. We investigated the phytoplankton composition and found that the cyanobacterial blooms occurred between June and October during which the phytoplankton abundance reached 10^7 cells/L or higher. The dominant species in the blooms were *Microcystis* sp., and their highest relative abundance could be above 90%. The analysis of the water quality showed that at currently Lake Erhai maintained a mesotrophic status. The trophic level of the water body was the highest in July, and the biomass of phytoplankton (Chl. *a*) reached the peak value in October. Furthermore, the results of the SPSS analysis suggested that compared to other phytoplankton species *Microcystis* sp. could be much more influenced by the total phosphorus (TP).

Key words: Phytoplankton; *Microcystis* sp.; Lake Erhai; Physical and chemical factors