

# 洱海水生植物与浮游植物的历史变化及影响因素分析

吴功果<sup>1,2</sup> 倪乐意<sup>1</sup> 曹特<sup>1</sup> 谢平<sup>1\*</sup> 徐军<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院水生生物研究所, 东湖湖泊生态系统试验站, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 水生植物与浮游植物是湖泊清水稳态和浊水稳态的优势初级生产者代表类群。洱海是云贵高原第二大淡水湖泊, 经历了从贫营养、中营养到富营养化初期的过程。本文根据文献资料整理了从1977到2009年期间沉水植物种类、水生植物分布面积、浮游植物细胞数量等变化; 研究发现伴随着藻类水华爆发频次的增加, 沉水植物种类、水生植物分布面积随时间显著减少, 浮游植物细胞数量显著增加。通过对1985到2009年水体总磷和总氮分析发现, 营养盐与浮游植物细胞数量成显著正相关; 而同期水体透明度显著降低, 并且与沉水植物种类数成显著正相关, 与浮游植物细胞数量成显著负相关; 同期气温随时间显著升高, 且与浮游植物细胞数量成显著正相关; 同期洱海水位波动也很大。水体氮磷营养含量的增加、透明度降低、气候变暖、水位波动等是影响洱海草藻长期变化的重要因素。在气候变暖的背景下, 控制水体氮磷等营养含量、提高透明度、提高沉水植物种类多样性、科学制定合理的水位是促使洱海保持清水稳态、避免进入浊水稳态要考虑的重要措施。

**关键词:** 沉水植物种类; 水生植物分布面积; 浮游植物数量; 富营养化; 透明度; 气候变暖; 水位波动; 外来种

中图分类号:

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207

水生植物和浮游植物是水域生态系统的初级生产者。水生植物能够为浮游动物提供避难所、为鱼类繁殖提供生境<sup>[1]</sup>; 浮游植物是水域生态系统浮游食物网的重要食物源<sup>[2]</sup>; 二者是水域生态系统清水稳态和浊水稳态的优势生产者类群<sup>[3]</sup>。湖泊从清水型到浊水型的稳态转变是由多种因素驱动, 例如营养增加、食物网结构改变、气候变暖、水位波动等。

营养增加被认为导致稳态灾变的重要原因<sup>[4]</sup>, Sand-Jensen等<sup>[5]</sup>分析丹麦湖泊100年沉水植物的变化认为, 水体营养增加, 浮游植物大量增长, 导致透明度降低, 限制了沉水植物的生长。气候变暖对湖泊稳态变化的影响是近几年研究较多的驱动因素之一<sup>[6]</sup>, Kosten等<sup>[7]</sup>对北美、南美、欧洲不同气候区的782个湖泊分析发现, 温暖气候区的湖泊更容易在较低营养水平下从以沉水植物为主的清水稳态转变为以浮游植物为主的浊水稳态, 气候变暖下沉水植物的优势地位更容易被浮游植物取代。水位波动也能够促使湖泊灾变, Loverde-Oliveira等<sup>[8]</sup>发现水位降低能够使湖泊更容易从清水稳态转变到浊水稳态。

洱海是云贵高原第二大淡水湖泊, 位于云南省大理白族自治州境内, 是洱海流域重要的生活、生产水源地。湖泊面积249.0 km<sup>2</sup>, 最大水深20.7 m, 平均水深10.17 m, 湖区属中亚热带高原季风气候。湖泊营养水平从20世纪50年代的贫营养、90年代的中营养变到目前的富营养化初期<sup>[9,10]</sup>。湖泊水生植物和浮游植物发生了很大的变化, 缺乏对这种长期变化和影响因素的全面分析。本文通过分析洱海1977-2009年沉水植物种类、水生植物分布面积、浮游植物数量的变化, 以及水体氮磷营养、水体透明度、气温、水位、银鱼入侵等对水生植物和浮游植物长期变化的影响, 探讨水生植物、浮游植物长期变化的影响因素, 为保护和恢复洱海及其它类似湖泊水域环境, 制定合理的保护政策提供理论依据。

## 1 材料与方法

洱海沉水植物种类数据来自于<sup>[11-17]</sup>; 水生植物分布面积的数据来自于<sup>[11-16,18-21]</sup>; 浮游植物数量数据来自于<sup>[19,22-25]</sup>。洱海水体总氮、总磷和透明度数据来自于<sup>[17,22-25]</sup>; 洱海位于大理市境内, 大理的年均气温可以代表洱海的年均气温, 洱海的气温数据来自于<sup>[26]</sup>; 洱海水位数据来自于<sup>[21,27]</sup>; 银鱼年产量数据来自于<sup>[28]</sup>。

收稿日期: 2012-05-21; 修订日期: 2012-06-18;

基金项目: 国家水专项洱海项目 (No.2008ZX07105-005)、国家自然科学基金 (31170439 和 30870428) 联合资助

作者简介: 吴功果 (1987-), 男, 硕士研究生; E-mail: [wugongguo@yahoo.com.cn](mailto:wugongguo@yahoo.com.cn)

通讯作者: 谢平, E-mail: [xieping@ihb.ac.cn](mailto:xieping@ihb.ac.cn) 徐军, E-mail: [xujun@ihb.ac.cn](mailto:xujun@ihb.ac.cn)

洱海沉水植物种类、水生植物分布面积、浮游植物数量，洱海水体总氮含量、总磷含量、透明度，洱海水位，洱海气温等分别与年份的相关性；洱海水体总氮含量、总磷含量、透明度、洱海气温等分别与浮游植物数量的相关性；水体透明度与沉水植物种类的相关性；均使用皮尔森相关分析，使用 SPSS 分析软件分析（Version 17.0, SPSS Inc.）。

## 2 结果与讨论

### 2.1 洱海水生植物随时间变化过程

洱海水生植物研究集中在 1977-2009 年（表 1）。对水生植物历史变化进行分析，沉水植物种类数随时间显著减低（ $r=-0.868$ ,  $P<0.05$ ,  $n=7$ ）（图 1）。这与 Sand-Jensen 等<sup>[5]</sup>研究的富营养化导致沉水植物种类减少和 Vonlanthen 等<sup>[29]</sup>研究发现的富营养化导致物种多样性降低一致。多样性的降低会降低沉水植物对湖泊稳态的维持能力<sup>[30]</sup>，这表明洱海保持以沉水植物为主的清水稳态能力在降低。

表 1 洱海水生植物研究历史

Table 1 The history of macrophytes studies in Lake Erhai

研究时间 Times	主要研究内容 Main research content	研究结论 Research conclusion	参考文献 Literature
1943-1945	分布、种类	西面有很多水生植物分布，1944 年鉴定洱海 21 种水生植物，其中 8 种沉水植物	[31,32]
1957	分布	大于 3 米无水草	[33]
1977	分布、种类	大于 7 米无水草，12 个水生植物群落	[12]
1981-1983	分布、种类、环境效应	大于 8.6 米无水草，32 种水生植物，人类活动促进入湖营养增多	[11]
1975-1983	分布、种类、环境效应	大于 10 米无水草，40 种水生植物，水位波动和人类活动的影响	[34]
1985-1986	分布、种类、环境效应	大于 10.5 米无水草，50 种水生植物，营养增加的促进作用	[13]
1992	分布、种类、环境效应	大于 8 米无水草，有 18 种沉水植物，网箱养鱼和水质恶化的影响	[14]
1994	分布、种类、环境效应	大于 10.5 米无水草，35 种水生植物，网箱养鱼、打捞水草、水位下降和围垦湖滩的影响	[15]
1998	分布、种类、环境效应	大于 9 米无水草，13 种沉水植物、水体富营养化与网箱养鱼的影响	[16]
2008	分布、种类、环境效应	大于 7 米无水草，25 种水生植物，优势类群是苦草和金鱼藻，富营养化的影响	[17]
2009	分布、种类、环境效应	大于 6 米无水草，优势类群是金鱼藻和微齿眼子菜，富营养化、水位波动的影响	[21,25]

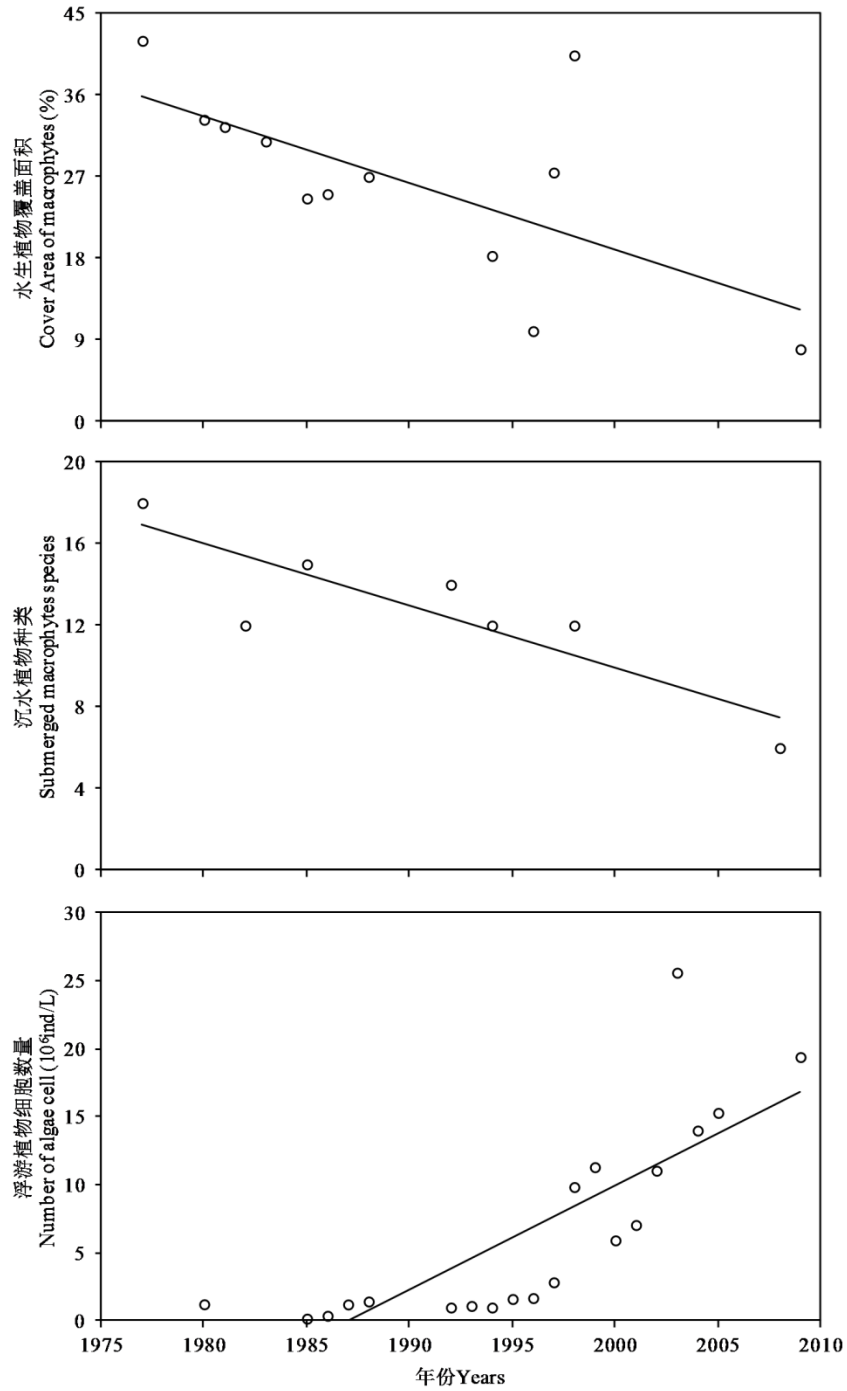


图 1 1977-2009 年洱海水生植物与浮游植物的变化

Fig. 1 Dynamics of submerged macrophytes species, cover area of macrophytes, and number of phytoplankton cell in Lake Erhai from 1977 to 2009

水生植物分布面积的历史变化表明（图 1），水生植物分布面积随时间显著缩小（ $r=-0.648$ ,  $P<0.05$ ,  $n=12$ ），虽然 1997 年洱海实施“双取消”工程后水生植物得到了一定的恢复<sup>[16]</sup>，但洱海仍处在富营养化过程中，2003 年再次全湖暴发藻类水华，2009 年调查时发现水生植物分布面积只有全湖面积的 8%，并且洱海湖心平台不再有水生植物分布<sup>[21]</sup>。这与 Sand-Jensen 等<sup>[5]</sup>研究发现富营养化导致水生植物分布减少一致。洱海富营养化过程中，以沉水植物为优势的清水稳态正在改变。

## 2.2 洱海浮游植物随时间变化过程

洱海浮游植物研究也集中在 1977-2009 年（表 2）。对浮游植物历史变化进行分析，发现浮游植物细胞数量随时间显著增多（ $r=0.792$ ,  $P<0.001$ ,  $n=20$ ）（图 1）。自 1996 和 2003 年爆发全湖藻类水华后，2004、2005、2006 三年洱海局部地区有藻类水华爆发<sup>[35]</sup>；2007、2008、2009 局部湖区依旧有藻类水华爆发。富营养化过程中，以浮游植物为优势的浊水稳态正在形成。

表 2 洱海浮游植物研究历史

Table 2 The history of phytoplankton studies in Lake Erhai

研究时间 Times	主要研究内容 Main research content	研究结论 Research conclusion	参考文献 Literature
1944-1945	种类	优势种类是 <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> 和 <i>Diplocystis aeruginosa</i>	[32]
1957	种类、生物量	优势种类是单凸板星藻和水华束丝藻、浮游植物的数量为 $0.65 \times 10^6 \text{ind/L}$	[33]
1980	种类、生物量	51 属，浮游植物的数量为 $1.24 \times 10^6 \text{ind/L}$	[19]
1984	种类、生物量	139 个种和亚种，干季浮游植物的数量为 $0.36 \times 10^6 \text{ind/L}$ ，湿季浮游植物的数量为 $0.34 \times 10^6 \text{ind/L}$	[36]
1985-1986	种类	192 个种，1957 年发现的云南飞燕角甲藻和暗丝藻已逐渐消失	[37]
1988	种类	192 个种	[38]
1992	种类	102 属	[39]
1997	种类	48 属、蓝藻门逐渐占据绝对优势地位	[39]
2003	种类	74 属	[24]
2007	种类	94 属	[24]
2008	种类	42 种	[40]
2009	种类	147 种，蓝藻门是周年密度最大的浮游植物	[25]

根据 1977-2009 年沉水植物种类（1977-2008）、水生植物分布面积（1977-2009）、浮游植物细胞数量（1980-2009）等的分析发现，洱海从贫-中营养发展到富营养化过程中<sup>[9,10]</sup>，沉水植物多样性降低，水生植物分布面积降低，浮游植物细胞数量增加，洱海面临着从以沉水植物为主的清水稳态灾变到以浮游植物为主的浊水稳态，导致这个过程的驱动因素需要深入研究。

## 2.3 影响洱海水生植物与浮游植物长期变化的因素分析

1977 年到 2009 年，洱海营养水平经历了从贫-中营养发展到富营养化初期<sup>[9,10]</sup>的过程，海菜花的群落和自然种群从洱海消失<sup>[15,16]</sup>，全湖暴发藻类水华（1996 年和 2003 年）。

洱海首次全湖藻类水华发生在 1996 年<sup>[20]</sup>，1997 年当地政府取消了从 1984 年开始推行的湖内网箱养鱼，采取禁止在洱海使用机动船只和打捞水草等措施保护洱海生态环境<sup>[15,16]</sup>；2003 年，再次全湖爆发藻类水华，2004 年 6 月 1 日当地政府立法通过了提高洱海最低运行水位<sup>[27]</sup>等措施来遏制洱海富营养化；2004、2005、2006 年洱海局部地区有水华爆发<sup>[35]</sup>，2007、2008、2009 年洱海局部湖区依旧有藻类水华爆发，并且在 2009 年洱海内部存在从清水稳态、草-藻稳态、藻-草稳态、到浊水稳态不同的状态<sup>[25]</sup>。

表 3 洱海草藻历史变化的影响因素

Table 3 Factors influences the historical changes of macrophytes and phytoplankton in Lake Erhai

	年份 Years	沉水植物种类 Submerged macrophytes species	浮游植物数量 Number of phytoplankton cell	水生植物分布面积 Cover area of macrophytes	
水体总磷	<i>r</i>	0.428	-0.528	0.607**	-0.172
total phosphorus of water	<i>P</i>	0.053	0.360	0.006	0.684
	<i>n</i>	21	5	19	8
水体总氮	<i>r</i>	0.587**	-0.751	0.704**	-0.221
total nitrogen of water	<i>P</i>	0.005	0.143	0.001	0.598
	<i>n</i>	21	5	19	8
水体透明度	<i>r</i>	-0.764**	0.901*	-0.837**	0.594
sechii depth of water	<i>P</i>	<0.001	0.037	<0.001	0.120
	<i>n</i>	21	5	19	8
年均气温	<i>r</i>	0.481**	-0.515	0.574*	-0.032
mean air temperature	<i>P</i>	0.005	0.237	0.010	0.926
	<i>n</i>	32	7	19	11
年均水位	<i>r</i>	0.564**	-0.330	0.388	-0.400
mean water level	<i>P</i>	0.001	0.470	0.112	0.223
	<i>n</i>	30	7	18	11
沉水植物种类	<i>r</i>			-0.606	0.436
submerged macrophytes species	<i>P</i>			0.394	0.564
	<i>n</i>			4	4
浮游植物数量	<i>r</i>				-0.271
number of phytoplankton cell	<i>P</i>				0.480
	<i>n</i>				9

水体总磷随时间增多，并且与浮游植物数量成正相关（表 3）。总磷增多促进浮游植物数量增加<sup>[41]</sup>，影响沉水植物种类和水生植物分布。与 Sand-Jensen 等<sup>[5]</sup>研究丹麦一个湖泊 70 多年内总磷含量升高导致沉水植物种类减少、水生植物分布减少是一致的。水体总氮随时间增多，并且与浮游植物数量成正相关（表 3）。总氮浓度增加促进浮游植物生长<sup>[42]</sup>，影响沉水植物种类和水生植物分布。与 Sagrario 等<sup>[43]</sup>研究发现水体总氮的升高会对水生植物分布产生负面影响一致。水体透明度随时间降低，并且透明度与浮游植物成负相关，与沉水植物种类成正相关（表 3），影响水生植物分布。与 Scheffer 等<sup>[3]</sup>研究发现的低光影响沉水植物生长、Sand-Jensen 等<sup>[5]</sup>研究发现的透明度降低显著了沉水植物分布和降低沉水植物种类多样性等结果一致。

洱海气温的历史变化表明，气温随时间升高。气温随时间升高，并且与浮游植物数量成正相关，影响沉水植物种类和水生植物分布<sup>[44]</sup>（表 3）。与 Kosten 等<sup>[7]</sup>研究发现气候温暖气候区浮游植物容易在较低营养状态下取代沉水植物的优势地位结果一致。

洱海水位的历史变化表明，1977-2009 年水位随时间显著升高（表 3）。1996 年和 2003 年爆发全湖藻类水华时洱海水位较低，2003 年以后的水位都比 2003 的高。1973-2003 年，洱海水域处于人为控制状态，年均水位介于 1971.10-1974.90m；2004-2009 年，水域依旧人为控制状态，当地政府立法通过了提高洱海最

低和最高运行水位的方案, 年均水位介于 1972.70-1973.97m<sup>[21,27]</sup>。Loverde-Oliveira 等<sup>[8]</sup>研究发现水位波动能够促使湖泊从清水稳态灾变到浊水稳态。1977-2009 年, 随着洱海水位升高, 沉水植物种类减少、水生植物分布面积缩小、浮游植物数量增加。洱海水位升高过程中水体氮磷含量增加且透明度降低。在富营养化过程中, 水体透明度降低, 2009 年对洱海调查时, 沉水植物最大分布水深为 6m, 作为过去水生植物分布区域的湖心平台的水深都超过 6m, 沉水植物难以在湖心平台区域分布, 这个对于降低水生植物分布影响很大。但是如果降低水位, 水体营养物质浓度提高, 有利于浮游植物的增长和透明度降低, 这将影响沉水植物多样性和分布。洱海水位波动影响洱海草藻变化过程。

除了水体总氮、总磷、透明度, 洱海气温、水位外, 食物网消费者结构的改变也是一个重要因素。例如, 太湖新银鱼对水生植物和浮游植物的长期变化影响很大。从 1984 年开始引种太湖新银鱼, 到 1991 年引种成功, 当年产 530 吨<sup>[28]</sup>。银鱼自 1991 年成功引种后, 产量呈现上升的趋势, 在 2005-2009 年每年捕捞的银鱼在 900 吨左右, 是洱海渔民捕捞的重要经济鱼类。由于银鱼捕食浮游动物, 而浮游动物捕食浮游植物, 银鱼产量的升高促使浮游动物锐减, 浮游植物数量增加。1997 年调查时发现浮游动物密度只是 1957 年的八分之一, 而浮游植物的密度是 1957 年的近 10 倍<sup>[19]</sup>。银鱼成功入侵洱海后导致的浮游动物锐减是影响洱海藻类爆发式增长的重要原因<sup>[28]</sup>。食物网下行效应的改变导致藻类增长进而影响水体透明度, 影响了沉水植物种类多样性和水生植物的分布。银鱼入侵后的下行效应是影响洱海水生植物和浮游植物变化的重要因素之一。

### 3 结论

1977-2009 年, 洱海经历了从贫-中营养发展到富营养化初期, 这个过程沉水植物种类减少(如海菜花自然种群消失)、水生植物分布面积缩小、浮游植物数量大量增长。同期水体氮磷浓度升高、透明度降低、洱海气候变暖, 这些都能直接促进浮游植物的增长, 影响沉水植物种类和水生植物的分布面积; 洱海水位的波动虽未直接促进浮游植物的增长, 但水位波动影响清水稳态和浊水稳态的灾变, 影响洱海水生植物和浮游植物的长期变化; 银鱼成功入侵后, 通过下行效应促进浮游植物的增长, 影响洱海沉水植物种类和水生植物的分布。在气候变暖的大背景下, 采取有效措施控制水体氮磷等营养含量、提高透明度、提高沉水植物种类多样性、控制外来种对生态系统的影响、科学制定合理的水位是保持湖泊良好生态环境时要考虑的重要措施。

### 参考文献:

- [1] Jeppesen E, Sondergaard M, Sondergaard M, *et al.* Structuring role of submerged macrophytes in lakes [M] Springer, Heidelberg. 1997, 91-113
- [2] Xu J, Xie P. Studies on the food web structure of Lake Donghu using stable carbon and nitrogen isotope ratios [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2004, **19(4)**: 645-650
- [3] Scheffer M, Hosper S H, Meijer M L, *et al.* Alternative equilibria in shallow lakes [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 1993, **8(8)**: 275-279
- [4] Smith V H. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: a global problem [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2003, **10(2)**: 126-139
- [5] Sand-Jensen K, Pedersen N L, Thorsgaard I, *et al.* 100 years of vegetation decline and recovery in Lake Fure, Denmark [J]. *Journal of Ecology*, 2008, **96(2)**: 260-271
- [6] Moss B, Kosten S, Meerhoff M, *et al.* Allied attack: climate change and eutrophication [J]. *Inland Waters*, 2011, **1(2)**: 101-105
- [7] Kosten S, Jeppesen E, Huszar V, *et al.* Ambiguous climate impacts on competition between submersed macrophytes and phytoplankton in shallow lakes [J]. *Freshwater Biology*, 2011, **56(8)**: 1540-1553
- [8] Loverde-Oliveira S M, Huszar V L M, Mazzeo N, *et al.* Hydrology-Driven Regime Shifts in a Shallow Tropical Lake [J]. *Ecosystems*, 2009, **12(5)**: 807-819

- [9] Jin X C. Lake in China Research on Their Environment (III) [M]. Beijing: China Ocean Press. 1995, 174-210 [金相灿. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社. 1995, 174-210]
- [10] 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)**: 799-810 [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]
- [11] Dai Q Y. A preliminary study of the aquatic vegetation in Lake Erhai [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1984, **4**: 31-41 [戴全裕. 洱海水生植被的初步研究. 海洋湖沼通报, 1984, **4**: 31-41]
- [12] Li H. Retrospection of aquatic vegetations in Lake Erhai. Shen R X, *et al.* Lake Erhai Scientific Research [M]. Kunming: Yunnan Nationality Press. 1989, 31-44 [李恒. 洱海水生植被的回顾. 沈仁湘等. 云南洱海科学论文集. 昆明: 云南民族出版社. 1989, 31-44]
- [13] Qian D R. Investigation on aquatic vegetation in Lake Erhai. Shen R X, *et al.* Lake Erhai Scientific Research [M]. Kunming: Yunnan Nationality Press. 1989, 45-67 [钱德仁. 洱海水生植被考察. 沈仁湘等. 云南洱海科学论文集. 昆明: 云南民族出版社. 1989, 45-67]
- [14] Du B H. Sino-Japanese joint survey on the ecological condition of Lake Erhai [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1994, **25(5)**: 532-538 [杜宝汉. 日中洱海生态调查. 海洋与湖沼, 1994, **25(5)**: 532-538]
- [15] Dong Y X, Xie J P, Dong Y S, *et al.* Water vegetation resources of Lake Erhai and its sustainable utilization ways [J]. *Ecological Economy*, 1996, **5**: 15-19 [董云仙, 谢建平, 董云生, 等. 洱海水生植被资源及其可持续利用途径. 生态经济, 1996, **5**: 15-19]
- [16] Hu X Z, Jin X C, Du B H, *et al.* Submerged macrophyte of Lake Erhai and its dynamic change [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, **18(1)**: 1-5 [胡小贞, 金相灿, 杜宝汉等. 云南洱海沉水植物现状及动态变化. 环境科学研究, 2005, **18(1)**: 1-5]
- [17] Shen Y Q. Sediment requirements assessment of submerged macrophytes and investigations on vegetation in Yunnan-Guizhou plateau lakes and the yellow river mainstream [D]. Master thesis, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan. 2010 [沈亚强. 沉水植物的沉积物条件需求研究及云贵高原湖泊、黄河干流植被研究. 硕士论文, 中国科学院水生生物研究所, 武汉. 2010]
- [18] Gao L C, Zhuang D D. A preliminary study on the evolution and differentiation of fish fauna in relation to origination and dynamics of Erhai Lake. Shen R X, *et al.* Lake Erhai Scientific Research [M]. Kunming: Yunnan Nationality Press. 1989, 277-283 [高礼存, 庄大栋. 云南洱海的形成、演变与鱼类区系的演替及其分化的初步研究. 自: 沈仁湘等. 云南洱海科学论文集. 昆明: 云南民族出版社. 1989, 277-283]
- [19] Wu Q L, Wang Y F. On the succession of aquatic communities in Lake Erhai [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1999, **11(3)**: 267-273 [吴庆龙, 王云飞. 洱海生物类群的历史演变分析. 湖泊科学, 1999, **11(3)**: 267-273]
- [20] Du B H. Ecological environment sustainable development strategy of Lake Erhai [J]. *Environment Protection of Dali*, 2000, **1**: 5-9 [杜宝汉. 洱海生态环境可持续发展战略. 大理科技, 2000, **1**: 5-9]
- [21] Li E H, Wang X L, Cai X B, *et al.* Features of aquatic vegetation and the influence factors in Erhai lakeshore wetland [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, **23(5)**: 738-746 [厉恩华, 王学雷, 蔡晓斌等. 洱海湖滨带植被特征及其影响因素分析. 湖泊科学, 2011, **23(5)**: 738-746]
- [22] Du B H. Study on eutrophication of Lake Erhai [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1992, **4(2)**: 86-92 [杜宝汉. 洱海富营养化研究. 湖泊科学, 1992, **4(2)**: 86-92]
- [23] Yan C Y, Jin X C, Zhao J Z, *et al.* Ecological protection and sustainable utilization of Lake Erhai, Yunan [J]. *Environmental Science*, 2005, **26(5)**: 38-42 [颜昌宙, 金相灿, 赵景柱等. 云南洱海的生态保护及可持续发展. 环境科学, 2005, **26(5)**: 38-42]
- [24] Pan X J. Studies on the species composition, ecophysiology and toxicology of *Anabaena* spp. in Lakes Dianchi and Erhai [D]. Doctoral dissertation, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences,

- Wuhan. 2008 [潘晓洁. 滇池与洱海鱼腥藻生态生理和毒理学研究. 博士论文, 中国科学院水生生物研究所, 武汉. 2008]
- [25] Wang Z. Studies on the regime shift of lake bay subsystem-Bays in Lake Erhai as example [D]. Doctoral dissertation, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan. 2011 [汪贞. 湖湾亚系统的稳态转换-以洱海湖湾为例. 博士论文, 中国科学院水生生物研究所, 武汉. 2011]
- [26] Huang H J, Wang Y P, Li Q H. Evaporation variation from Erhai Lake and its controls under climatic warming [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2010, **26(1)**: 32-35 [黄慧君, 王永平, 李庆红. 气候变暖背景下洱海水面蒸发量的变化及影响因素. 气象与环境学报, 2010, **26(1)**: 32-35]
- [27] Li P. Lake Erhai water level adjust analysis characteristics [J]. *Pearl river*, 2008, **2**: 46-49 [李萍. 大理市洱海特征水位调整分析. 人民珠江, 2008, **2**: 46-49]
- [28] Du B H. Loss of biodiversity results in Lake Erhai eutrophication. *Yunan Environmental Science*, 1997, **16(2)**: 30-34 [杜宝汉. 洱海富营养化研究. 云南环境科学, 1997, **16(2)**: 30-34]
- [29] Vonlanthen P, Bittner D, Hudson A G, *et al.* Eutrophication causes speciation reversal in whitefish adaptive radiations [J]. *Nature*, 2012, **482**: 357-362
- [30] Cardinale B J. Biodiversity improves water quality through niche partitioning [J]. *Nature*, 2011, **472**: 86-89
- [31] Hsiao S C. A Limnological study of Erh Hai, Yunnan: physic-chemical characteristics [J]. *Journal of Animal Ecology*, 1946, **15**: 1-8
- [32] Hsiao S C. A Limnological study of Erh Hai [J]. *Journal of Animal Ecology*, 1949, **18**: 89-99.
- [33] Li S H, Yu M J, Li Z G, *et al.* Limnological survey of the lakes of Yunan plateau [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1963, **5(2)**: 98-107 [黎尚豪, 俞敏娟, 李光正等. 云南高原湖泊调查. 海洋与湖沼, 1963, **5(2)**: 98-107]
- [34] Li H, Shang Y M. Aquatic vegetation in Lake Erhai, Yunnan [J]. *Mountain Research*, 1989, **7(3)**: 166-174 [李恒, 尚榆民. 云南洱海水生植被. 山地研究, 1989, **7(3)**: 166-174]
- [35] Pan X J, Chang J F, Li G B, *et al.* Taxonomic evaluation of dominant species of Anabaena in Lake Erhai based on morphology and 16S RNA Gene sequences [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2008, **26(3)**: 229-234 [潘晓洁, 常锋毅, 康丽娟等. 洱海鱼腥藻优势种的形态鉴定与 16SrRNA 基因序列分析. 武汉植物学研究, 2008, **26(3)**: 229-234]
- [36] Deng X Y, Xu J H, Wang R N. A study on phytoplankton in Tali Erhai Lake of Yunan province [J]. *Journal of Yunan University*, 1988, **10(1)**: 55-59 [邓新晏, 许继宏, 王若南. 大理洱海藻类植物研究. 云南大学学报, 1988, **10(1)**: 55-59]
- [37] Dong Y X. A preliminary study of algae in Lake Erhai. Shen R X, *et al.* Lake Erhai Scientific Research [M]. Kunming: Yunnan Nationality Press. 1989, 68-79 [董云仙. 洱海藻类的初步研究. 沈仁湘等. 云南洱海科学论文集. 昆明: 云南民族出版社. 1989, 68-79]
- [38] Du B H. Study on the deterioration of eco-environment of Lake Erhai and countermeasures for comprehensive treatment [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1994, **25(3)**: 312-318 [杜宝汉. 洱海生态环境恶化及综合治理对策研究. 海洋与湖沼, 1994, **25(3)**: 312-318]
- [39] Pan H X, Wang Y F, Dong Y S. Factor analysis of eutrophication in Lake Erhai [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]
- [40] Zhang M, Yu Y, Qian S Q, *et al.* Phytoplankton community structure and biodiversity in summer Yunan-Guizhou Plateau lakes. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22(6)**: 829-836 [张民, 于洋, 钱善勤等. 云贵高原湖泊夏季浮游植物组成及多样性. 湖泊科学, 2010, **22(6)**: 829-836]



- [41] Schindler D W, Hecky R E, Findlay D L, *et al.* Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(32): 11254-11258
- [42] Xu H, Paerl H W, Qin B Q, *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China [J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(1): 420-432
- [43] Sagrario M A G., Jeppesen E, Goma J, *et al.* Does high nitrogen loading prevent clear-water conditions in shallow lakes at moderately high phosphorus concentrations [J]? *Freshwater Biology*, 2005, **50**(1): 27-41
- [44] Li Z Q, Zhang M, Xu J. Biodiversity and community ecology of aquatic plant in Lake Nam Co, Tibetan Plateau [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, **35**(1): 1-13 [李中强, 张萌, 徐军. 青藏高原纳木错水生植物多样性及群落生态学研究. *水生生物学报*, 2011, **35**(1): 1-13]

## Patterns and controls of dynamics of macrophytes and phytoplankton changes in Lake Erhai from 1977 to 2009

WU Gong-Guo<sup>1,2</sup>, NI Le-Yi<sup>1</sup>, CAO Te<sup>1</sup>, XIE Ping<sup>1\*</sup> and XU Jun<sup>1\*</sup>

(1. Donghu Experimental Station of Lake Ecosystems, State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology of China, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Macrophytes is dominant in clear-water, while the phytoplankton biomass becomes abundant when aquatic ecosystem shifts into turbid state. Lake Erhai is the second largest freshwater lake in Yunnan Province, in southwestern of China. We analyzed the submerged macrophytes species (SMS), distribution of macrophytes (DM), phytoplankton cell numbers (Phyt) from 1977 to 2009 based on data mining of the historical literatures. With the bloom appeared frequently, SMS and DM decreased with years ( $P < 0.05$ ) and Phyt increased ( $P < 0.001$ ). Total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN) increased from 1985 to 2009 (TP,  $P < 0.054$ ; TN,  $P < 0.01$ ) and have positive correlation with Phyt (TP,  $P < 0.01$ ; TN,  $P < 0.001$ ). Secchi depth (SD) of water decreases with years ( $P < 0.05$ ) and has positive correlation with the SMS and negative correlation with Phyt (both  $P < 0.001$ ). Air temperature (T) on Lake Erhai increases from 1977 to 2008 ( $P < 0.01$ ) and has positive correlation with Phyt ( $P < 0.05$ ). Annual mean water level has wide variation with years. *Neosalanx taihuensis* was first introduced to Lake Erhai in 1984, success alive in 1991, the production of it increase with years from 1991, which increased Phyt through top-down by eating zooplankton. The changes of nutrients, secchi depth of water, climate warming, water level, and invasive species affect the dynamic of macrophytes and phytoplankton from 1977 to 2009. We suggests to reduce the nutrients loading, increase SD and biodiversity of submerged macrophytes, control the negative effects from the invasive species, and keep reasonably water level to protect lake from eutrophication, especially under climate warming.

**Key words:** biodiversity of submerged macrophytes; distribution of macrophytes; phytoplankton cell numbers; nutrient content of water; secchi depth of water; climate warming; variation of water level; invasive species