

## 气候变暖和营养水平对洱海浮游植物的长期影响(1980—2009年)\*

吴功果<sup>1,2</sup>, 倪乐意<sup>1</sup>, 曹特<sup>1</sup>, 张敏<sup>3</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: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 华中农业大学水产学院, 农业部淡水生物繁育重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:** 气候变暖下湖泊富营养化进程是近年研究热点之一。本文对1980—2009年期间洱海富营养化进程研究发现, 水体总磷、总氮与气温均呈升高趋势。气温、水体总磷和总氮均能显著促进浮游植物增长。统计分析表明, 气温对浮游植物增长的促进作用不受水体总氮、总磷的影响; 水体总磷对浮游植物增长的促进作用不受气温的影响, 受水体总氮的影响; 水体总氮对浮游植物增长的促进作用不受气温和水体总磷的单独影响, 受它们共同的影响。因此, 气候变暖与营养水平的增加共同促进了洱海的富营养化进程。

**关键词:** 富营养化; 气候变暖; 氮磷富集; 洱海

## Warming and nutrients affect the growth of phytoplankton in Lake Erhai over the period of 1980—2009

WU Gongguo<sup>1,2</sup>, NI Leyi<sup>1</sup>, CAO Te<sup>1</sup>, ZHANG Min<sup>3</sup>, XIE Ping<sup>1</sup> & 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, P. R. China*)

(2: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

(3: *Key Laboratory of Freshwater Animal Breeding, Ministry of Agriculture, College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, P. R. China*)

**Abstract:** Eutrophication under climate warming is a hot topic in limnology recently. Our study demonstrated that epilimnetic total phosphorus (TP), total nitrogen (TN) and air temperature increased with the process of eutrophication in Lake Erhai in 1980—2009. Statistics analysis demonstrated that, air temperature promoted the growth of phytoplankton with no effect from TP and TN, TP promoted the growth of phytoplankton with no effect from air temperature but with effect from TN, TN promoted the growth of phytoplankton with no effect from air temperature and TP individually but with effect from their interaction. Climate warming and nutrient enrichment promote eutrophication of Lake Erhai together.

**Keywords:** Eutrophication; climate warming; phosphorus and nitrogen enrichment; Lake Erhai

气候变暖是重要的生态环境问题<sup>[1]</sup>, 能够影响湖泊富营养化进程<sup>[2-3]</sup>. Mooij 等<sup>[4]</sup>基于模型研究发现气候变暖能够使浅水湖泊浮游植物在低氮、磷水平下成为优势生产者类群; Kosten 等<sup>[5]</sup>通过对浅水湖泊的比较发现温暖气候区湖泊浮游植物比寒冷地区的更容易成为优势类群. Liu 等<sup>[6]</sup>对杞麓湖6年浮游植物影响因素分析发现, 水温和总磷是影响藻类增长的重要因素. Zhang 等<sup>[7]</sup>发现气候变化影响太湖藻类水华暴发.

关于水体营养增加对水域富营养化的影响研究很多<sup>[8-9]</sup>. 如 Schindler 等<sup>[10-11]</sup>通过对实验湖区的添加实验提出磷是湖泊富营养化的重要限制因子. Lewis 等<sup>[12]</sup>认为氮对湖泊富营养化的作用不能忽视. Xu 等<sup>[13]</sup>通

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2008ZX07105-005)、国家自然科学基金项目(31170439, 30870428)和国家重点基础研究发展计划“973”项目(2008CB418001-1)联合资助. 2012-05-23 收稿; 2012-05-28 收修改稿. 吴功果, 男, 1987年生, 硕士研究生; E-mail: wugongguo@yahoo.com.cn.

\*\* 通信作者; E-mail: xieping@ihb.ac.cn; xujun@ihb.ac.cn.

过短期添加实验发现,氮的增加影响浮游植物生长. Conley 等<sup>[14-15]</sup>认为富营养化的控制应同时控氮控磷.

洱海是云南省第二大湖泊,位于大理市境内,面积 249.0 km<sup>2</sup>,最大水深 20.7 m,平均水深 10.17 m,蓄水量 25.31 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,属深水湖,湖区属于亚热带高原季风气候<sup>[16]</sup>.洱海从 1950s 贫营养,1990s 中营养,到目前处于富营养水平<sup>[17-18]</sup>.自 1996 年首次暴发全湖藻类水华以来,近年来湖区局部地区藻类水华暴发不断.本文通过研究洱海近 29 年(1980—2009 年)气温与水体总氮、总磷对藻类密度的影响,分析从中营养发展到富营养化过程中气候变化与营养水平对洱海浮游植物的长期影响,为评价气候变化与营养水平对湖泊富营养化进展的影响提供依据.

## 1 数据挖掘与分析

洱海气温(T)以大理市区气温为代表,数据来自于大理气象站 1980—2008 年观测数据<sup>[19]</sup>;水位数据来源为厉恩华等<sup>[20]</sup>;水体总氮(TN)、总磷(TP)及浮游植物数量数据来源于杜宝汉等的研究<sup>[21-26]</sup>.

气温、水位、水体氮磷与年份、水体浮游植物的关系均使用相关分析;以水体磷含量和气温作为协变量、水体氮与浮游植物数量的关系,以水体氮和气温作为协变量、水体磷与浮游植物数量的关系,以水体氮磷作为协变量、气温和浮游植物数量的关系均使用偏相关分析;相关分析和偏相关分析用 SPSS 17.0 软件分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 洱海富营养化过程中气温、水位与氮、磷营养的历史变化

1980—2009 年洱海气温逐渐升高( $r=0.448, P<0.05$ ),表现出气候变暖的趋势.洱海由中营养向富营养化转变<sup>[17-18]</sup>,说明气候变暖影响湖泊富营养化<sup>[2-3]</sup>.洱海水位历史变化表明(图 1),水位随年逐渐升高( $r=0.659, P<0.01$ ),水位变化与洱海气温升高、富营养化趋势一致.

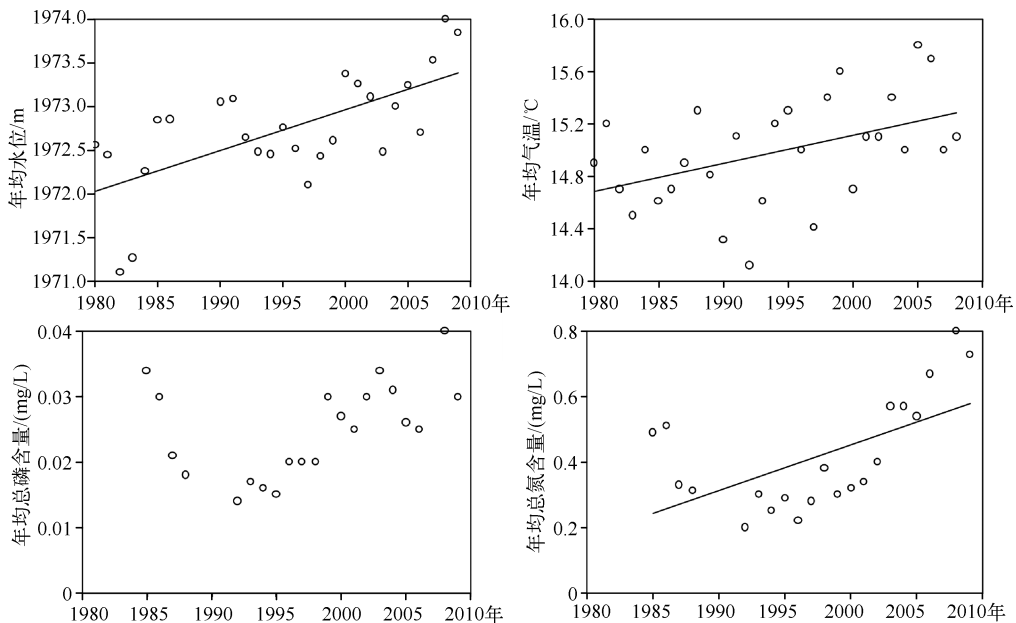


图 1 1980—2009 年洱海年均水位、气温、水体总磷、总氮变化

Fig. 1 Annual variation of mean water level, air temperature, total phosphorus and total nitrogen of water in Lake Erhai from 1980 to 2009

洱海水体总磷和总氮含量的历史变化表明(图 1),总磷随年份增加趋势存在( $r=0.428, P=0.053$ ),总氮随年份增加明显( $r=0.587, P<0.01$ ).洱海从中营养发展到富营养化初期<sup>[17-18]</sup>的过程中,总磷和总氮含量呈逐渐增加的趋势.

## 2.2 气温、水位和氮、磷增加对浮游植物生长的影响

气温升高、水位、水体总磷和总氮浓度升高均能显著促进浮游植物生长(图2)( $T:r=0.574, P<0.05$ ;  $TP:r=0.607, P<0.01$ ;  $TN:r=0.704, P<0.001$ ), 气候变暖, 水体总磷、总氮升高可促进洱海浮游植物生长<sup>[6-7, 12-13]</sup>. 水位升高也能影响浮游植物生长( $r=0.388, P=0.112$ ), 这可能是气候变化影响流域降雨, 使流域营养输入增加导致的<sup>[27]</sup>.

进一步分析发现, 无论水体总磷、总氮单独还是一起作为协变量, 气温依旧显著促进浮游植物的增长( $P<0.05$ ). 气候变暖对洱海浮游植物促进作用不受水体总氮和总磷变化的影响. 洱海 1980—2009 年气候变暖对浮游植物生长的促进作用表明, 气候变暖对浮游植物的促进作用除了在浅水湖泊中存在<sup>[6-7]</sup>, 在深水湖泊中也存在.

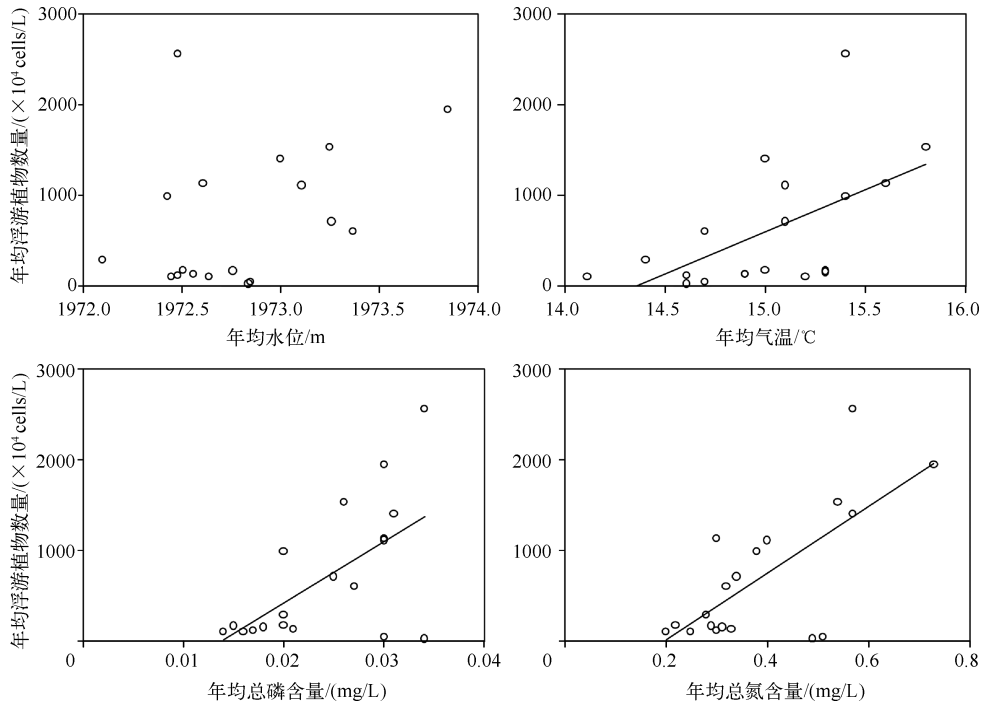


图2 1980—2009年浮游植物数量与洱海水位、气温、水体氮磷的关系

Fig. 2 Relationship between annual mean water level and the number of phytoplankton cell of water in Lake Erhai, as well as air temperature, total phosphorus/nitrogen content of water from 1980 to 2009

以气温作为协变量, 水体总磷促进浮游植物增长( $P<0.05$ ), 这表明水体总磷对浮游植物增长的促进作用不受气温的影响, 是影响浮游植物增长的重要限制因素<sup>[28]</sup>. 但是将水体总氮单独, 或将水体总氮和气温一起作为协变量时, 水体总磷与浮游植物之间没有显著的相关性( $P>0.05$ ), 这表明洱海富营养化过程中(1980—2009年), 水体总氮增加对浮游植物增长的影响超过了水体总磷的贡献. 而将气温和水体总磷单独作为协变量时, 水体总氮促进浮游植物增长( $P<0.05$ ), 这表明洱海水体总氮对浮游植物的促进作用不受气温和总磷的单独影响, 是长期存在的<sup>[13, 29]</sup>. 但是再将气温和水体总磷一起作为协变量时, 水体总氮与浮游植物没有显著的相关性( $P>0.05$ ), 这表明在排除了气温变化和水体总磷变化的共同影响后, 洱海水体总氮对浮游植物的增长无影响.

洱海气温、水体总磷、总氮对浮游植物的影响表明, 气候变暖对洱海浮游植物的增长很显著, 这与以往研究结果一致<sup>[6-7]</sup>. 洱海富营养化过程中, 水体总磷升高不显著, 而水体总氮升高显著, 水体总氮升高对浮游植物的影响超过了水体总磷升高对其的影响. 这表明, 在湖泊长期变化过程中(1980—2009年), 水体总磷变化不大, 水体总氮含量升高能够促进藻类生长. 本研究中洱海 1980—2009 年水体总磷和总氮变化对浮游植物增长的影响, 与 Schindler 等<sup>[28]</sup>通过长期添加磷、不添加氮并不能控制富营养化的结果一致. 因此, 在气候

变暖的大背景下,控制水域富营养化需要同时考虑氮磷营养盐的影响<sup>[9,12,15]</sup>。

### 3 参考文献

- [ 1 ] IPCC. Climate change 2007: the physical basis-summary for policy makers. Paris: World Meteorological Organization/United Nations Environmental Programme, 2007.
- [ 2 ] Moss B, Kosten S, Meerhoff M *et al.* Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland Waters*, 2011, **1**(2): 101-105.
- [ 3 ] Maberly SC, Elliott JA. Insights from long-term studies in the Windermere catchment: external stressors, internal interactions and the structure and function of lake ecosystems. *Freshwater Biology*, 2012, **57**(2): 233-243.
- [ 4 ] Mooij W, Janse J, De-Senerpont DL *et al.* Predicting the effect of climate change on temperate shallow lakes with the ecosystem model PCLake. *Hydrobiologia*, 2007, **584**: 443-454.
- [ 5 ] Kosten S, Jeppesen E, Huszar V *et al.* Ambiguous climate impacts on competition between submersed macrophytes and phytoplankton in shallow lakes. *Freshwater Biology*, 2011, **56**: 1540-1553.
- [ 6 ] Liu Y, Guo HC, Yang PJ. Exploring the influence of lake water chemistry on chlorophyll a: A multivariate statistical model analysis. *Ecological Modelling*, 2010, **221**(4): 681-688.
- [ 7 ] Zhang M, Duan HT, Shi XL *et al.* Contributions of meteorology to the phenology of cyanobacterial blooms: Implications for future climate change. *Water Research*, 2012, **46**(2): 442-452.
- [ 8 ] Smith VH. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: A global problem. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2003, **10**(2): 126-39.
- [ 9 ] Smith VH, Schindler DW. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology and Evolution*, 2009, **24**(4): 201-207.
- [ 10 ] Schindler DW, Brunskill GL, Emerson S *et al.* Atmospheric carbon dioxide: Its role in maintaining phytoplankton standing crops. *Science*, 1972, **177**(4055): 1192-1194.
- [ 11 ] Schindler DW. Evolution of phosphorus limitation in lakes: Natural mechanisms compensate for deficiencies of nitrogen and carbon in eutrophied lakes. *Science*, 1977, **195**(4275): 260-262.
- [ 12 ] Lewis WM, Wurtsbaugh AW. Control of lacustrine phytoplankton by nutrients: Erosion of the phosphorus paradigm. *International Review of Hydrobiology*, 2008, **93**(4/5): 446-465.
- [ 13 ] Xu H, Paerl HW, Qin BQ *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(1): 420-432.
- [ 14 ] Conley DJ, Paerl HW, Howarth RW *et al.* Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. *Science*, 2009, **323**: 1014-1015.
- [ 15 ] Paerl HW. Controlling eutrophication along the freshwater-marine continuum: Dual nutrient (N and P) reductions are essential. *Estuaries and Coasts*, 2009, **32**: 593-601.
- [ 16 ] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.
- [ 17 ] 金相灿. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] 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.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] 杜宝汉. 洱海富营养化研究. 湖泊科学, 1992, **4**(2): 86-92.
- [ 22 ] 颜昌宙, 金相灿, 赵景柱等. 云南洱海的生态保护及可持续利用对策. 环境科学, 2005, **26**(5): 38-42.
- [ 23 ] 潘晓洁. 滇池与洱海鱼腥藻生态生理和毒理学研究[学位论文]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2008.
- [ 24 ] 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[学位论文]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2010.
- [ 25 ] 汪贞. 海湾亚系统的稳态转换——以洱海湖湾为例[学位论文]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2011.
- [ 26 ] 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**: 267-273.
- [ 27 ] Paerl HW, Huisman J. Climate: blooms like it hot. *Science*, 2008, **320**: 57-58.
- [ 28 ] Schindler DW, Hecky RE, Findlay DL *et al.* Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *PNAS*, 2008, **105**(32): 11254-11258.
- [ 29 ] Schindler DW, Hecky RE. Eutrophication: More nitrogen data needed. *Science*, 2009, **324**: 721-722.