

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.04.009

阳宗海叶绿素 a、磷、氮动态特征及富营养化趋势

李晓铭¹,李世玉²

(1. 昆明市环境监测中心, 云南 昆明 650028; 2. 云南大学工程技术研究院, 云南 昆明 650091)

摘要:分析 2002—2012 年阳宗海 TN、TP、Chl-a、氮磷比的动态变化特征及相互关系,并用综合营养状态指数法评价阳宗海的富营养化状态。结果表明:阳宗海富营养化呈上升趋势,2007 年从之前的贫营养级上升为中营养级;Chl-a、TN、TP 浓度在 2007 年后均呈快速上升趋势。Chl-a 浓度与 TN、TP 浓度呈正相关,且氮磷比越接近阈值 16:1,Chl-a 浓度上升就越快。指出若营养盐输入得不到有效控制,预测阳宗海将在 2017 年前后达到富营养级水平,水质将进一步下降。

关键词:富营养化;营养状态指数;氮磷比;阳宗海

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2014)04-0043-04

Dynamic characteristics of nitrogen, phosphorus, chlorophyll a and eutrophication trend in Yangzonghai Lake

LI Xiaoming¹, LI Shiyu²

(1. Environmental Monitoring Center of Kunming, Kunming 650028, China;
2. Research Institute of Engineering and Technology, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: The dynamic characteristics of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), chlorophyll a (Chl-a), and the N/P ratio, and the correlations between these indices in Yangzonghai Lake from 2002 to 2012 were analyzed. The eutrophication status of the lake was evaluated using the comprehensive nutrition index method. The study results show that the eutrophication level of the lake had an increasing trend. Around the year 2007, the level of the eutrophication increased from a low level to a medium level. The concentrations of Chl-a, TN, and TP showed a rapidly increasing trend after the year 2007. The concentration of Chl-a was positively correlated with the concentrations of TN and TP, and the concentration of Chl-a increased faster as the N/P ratio was close to 16:1. It was found that, if the nutrient salt input cannot be reduced effectively, the lake will be at a eutrophic status around the year 2017, and the water quality will deteriorate further.

Key words: eutrophication; trophic level index; N/P ratio; Yangzonghai Lake

尽管国际上关于水体富营养化的研究很多^[1-3],但是富营养化至今仍然是一个世界性的水污染难题,也是造成水质性缺水的重要因素^[4-7]。我国湖泊众多,湖库总贮水量可达 $6.38 \times 10^{11} \text{ m}^3$,湖泊占城镇饮用水源的 50% 以上。随着经济的增长,我国湖泊的富营养化现象日趋严重^[7-8],水体富营养化控制是我国环境保护亟需攻克的难关,也是解决我国长期水质性缺水的关键对策之一。

磷和氮是富营养化的限制因子^[9-12],而评价和

辨识富营养化的方法通常是生物反映法,即初级生产力的迅速增加,具体表现在 Chl-a 含量的迅速上升或大型藻类的增多^[1]。Chl-a 含量的高低与水体藻的种类、数量等呈正相关,它还反映了水体理化性质的动态变化,因此通常用 Chl-a 浓度来反映水体富营养化状况^[13],即 Chl-a 浓度可作为富营养化预警的一项重要指标。笔者研究了阳宗海湖泊 TN、TP 和 Chl-a 等指标 2002—2012 年的动态变化特征,分析了 Chl-a 与 TN、TP 之间的关系,并用综合营养

基金项目:国家自然科学基金(51168047);云南大学校基金(2011YB44)
作者简介:李晓铭(1960—),男,高级工程师,主要从事环境监测与环境污染控制研究。E-mail: lixiaoming_km@163.com
通信作者:李世玉,助理研究员。E-mail: lishiyukm@163.com

状态指数法评价了阳宗海的营养状态。

1 方法

1.1 研究区概况

阳宗海(102°5′~103°02′E, 24°51′~24°58′N)是一个平均水深为 20m 的高原深水湖泊。水面面积 31.6 km²,海拔 1769.90 m,流域面积 192 km² [14]。气温年平均为 15.2℃,平均最高 21.5℃,平均最低 12.4℃,年活动积温 5498.1℃。阳宗海属封闭型湖泊,仅有一个出水口——汤池河,出水量受人为控制。流域人口 45700 人,主要为农村人口,占 77.8%。流域主要以农业为主,仅有 2 家工业企业和 3 家旅游服务企业,这些企业的废水均不排入湖泊。土地利用类型为林地、耕地、草地、水域和工矿用地,面积分别为 84.1 km²、53.1 km²、17.2 km²、31.6 km²、6.0 km²。2010 年,流域的森林覆盖率为 43.8% (包括林地和灌木林地)。入湖水系主要有阳宗大河和七星河。另外,为解决阳宗海水量不足的问题,1960 年由外流域摆依河通过开凿人工渠引水入湖,渠道长 2.34 km。研究显示,阳宗海目前正面临着富营养化的威胁 [14],不断增加的营养盐负荷正威胁着阳宗海的使用功能。

1.2 采样及测定方法

TN、TP、Chl-a、COD_{Mn} 等各项目样品采集、保存以及所用主要仪器和试剂按照文献 [15] 方法进行,透明度 (SD) 用塞氏盘测定。

1.3 富营养化评价方法

本文选用营养状态指数法对阳宗海水质富营养化进行评价,综合营养状态指数计算公式为

I_{TL}(\Sigma) = \sum_{i=1}^m W_i I_{TL}(i)

式中:I_{TL}(\Sigma) 为综合营养状态指数;W_i 为第 i 种参数的营养状态指数的相关权重;I_{TL}(i) 为第 i 种参数的营养状态指数。

由于至今未见关于权重系数取值的新文献,目

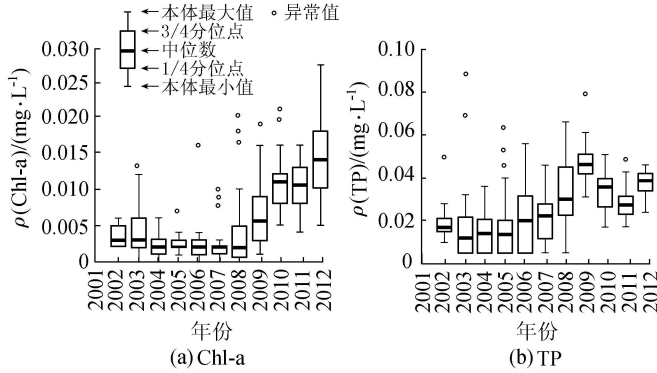


图 1 2002—2012 年 Chl-a、TP、TN 质量浓度和氮磷比的动态变化

前的学者们仍然采用金相灿等 [16-18] 十多年前提出的参数值,本研究中仍引用此组系数取值 [16]:Chl-a: 0.266 3, TP: 0.187 9, TN: 0.179 0, SD: 0.183 4, COD_{Mn}:0.183 4。Chl-a、TP、TN、SD、COD_{Mn} 的营养状态指数计算公式 [16] 分别为

I_{TL}(Chl-a) = 10 [2.5 + 1.086 \ln \rho(Chl-a)];

I_{TL}(TP) = 10 [9.436 + 1.624 \ln \rho(TP)];

I_{TL}(TN) = 10 [5.453 + 1.694 \ln \rho(TN)];

I_{TL}(SD) = 10 [5.118 - 1.94 \ln(SD)];

I_{TL}(COD_{Mn}) = 10 [0.109 + 2.661 \ln \rho(COD_{Mn})]

评价级别 [17]: I_{TL}(\Sigma) < 30 属贫营养; 30 \leq I_{TL}(\Sigma) \leq 50 属中营养; I_{TL}(\Sigma) > 50 属富营养,其中 50 < I_{TL}(\Sigma) \leq 60 属轻度富营养, 60 < I_{TL}(\Sigma) \leq 70 属中度富营养, I_{TL}(\Sigma) > 70 属重度富营养。

2 结果

2.1 Chl-a、TP 和 TN 浓度的动态变化

图 1 为 2002—2012 年 Chl-a、TP、TN 质量浓度和氮磷比的动态变化图,其中矩形框是箱线图的主体,上、中、下 3 条线分别表示变量值的第 75、50、25 百分位数,变量的 50% 的观测值落在这一区域中。Chl-a 在 2008 年开始迅速上升,到 2012 年这 5 年间增加了 5 倍(图 1(a));TP 在 2005 年后快速上升,到 2009 年达到峰值,2009 年 10 月份后开始下降,到 2012 年又开始上升(图 1(b));TN 浓度水平一直较高,年平均值均在 0.3 mg/L 以上,2010 年开始上升较明显(图 1(c));氮磷比的年际变化见图 1(d),在 2002—2007 年间较高,2008—2009 年较低,之后又升高。

2.2 营养状态指数

2002—2012 年综合营养状态指数由 26.97 增加到 41.20(图 2)。2006 年前,湖泊属于贫营养状态,而 2007 年之后,综合营养状态指数超过 30,并呈不断上升趋势,2010 年达到 40 以上,之后还在继续升高。

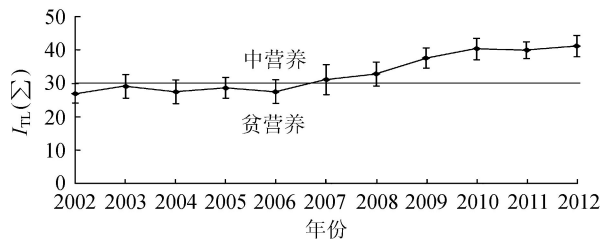


图2 2002—2012年阳宗海的综合营养状态指数

3 讨论

3.1 Chl-a、TP 和 TN 及其相互关系

自2008年开始,阳宗海 Chl-a 浓度迅速升高,同期,TP、TN 浓度均不同程度升高(图1),说明水体的富营养化程度加重,水质下降^[13]。回归分析表明,Chl-a 与 TP、TN 的浓度均分别呈显著正相关(图3, $p < 0.01$)。TN 和 TP 的绝对浓度对藻类的生长影响很大,氮磷浓度均比较充足时藻类生长最快^[19],Chl-a 相应增多。根据 Ferreira 等^[1]的报道,TP、TN 均可能造成 Chl-a 的升高,这两个指标浓度的增加可能会促使藻类密度增加^[1],加速富营养化趋势。

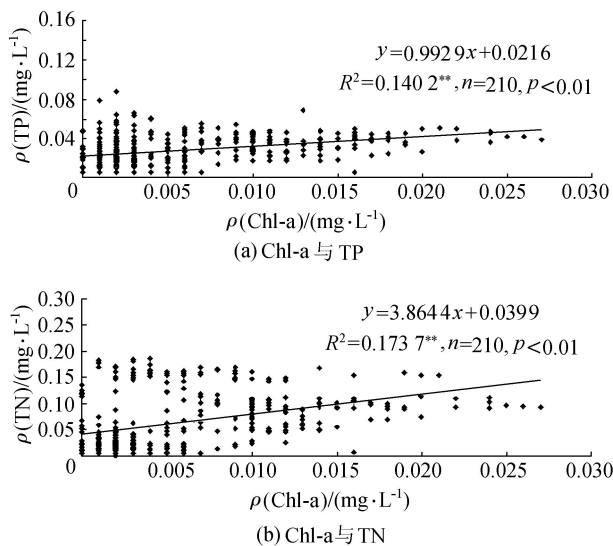


图3 Chl-a 与 TP 和 TN 的相关性

3.2 Chl-a 与氮磷比的关系

湖泊水体的氮磷比是判断一个湖泊属氮限制湖泊还是属磷限制湖泊的重要依据,1958年,Redfield^[19]提出了氮磷比的阈值为16:1,高于这个阈值是磷限制,低于这个阈值是氮限制,而接近这个阈值则是氮磷的最佳比例,此时富营养化速度加快。阳宗海氮磷比分析结果表明(图2):氮磷比在2008年起接近这个阈值,此后一直在这个阈值附近,与 Chl-a 从2008年起迅速上升的趋势非常吻合。笔者的研究结果再次验证了 Redfield 的阈值理论:当水体的氮磷比接近16:1时,藻类生长受限最小,生长最快。而另一些研究^[20-21]则表明,TN 和 TP 浓度较

低,藻类的生长速率受氮磷比的限制才明显,而藻类生长速度最佳氮磷比因藻的种类差异也不尽相同,中、高氮磷比时微囊藻对颤藻的竞争抑制参数(α)大于颤藻对微囊藻的竞争抑制参数(β),而低氮磷比时则相反^[21]。但是,当 TN 和 TP 浓度都很高时,藻类的生长很快,这种营养元素的绝对浓度对藻类生长的影响超过了氮磷比的影响,氮磷比对生长速率几乎没影响^[20]。

阳宗海氮磷比在2008—2009年间明显降低,2010年开始又回升。其原因是,2008年6月,阳宗海经历了严重的砷污染,水体中砷的质量浓度一度达到0.13 mg/L 峰值。同期观测到水体中 TP 浓度也明显升高,导致湖水中氮磷比下降。2009年底开始,在湖中喷洒铁盐絮凝剂治理砷污染,砷浓度开始下降,同期观测到水体中 TP 也明显下降,导致氮磷比从2010年开始回升。这说明除砷的铁盐絮凝剂也同时具有除磷的效果。这还说明,造成阳宗海砷污染的废水具有砷磷同源的特征,这与后来查实污染来自磷化工企业相吻合。

分析图2还发现,正是在阳宗海砷污染事件发生以后,水体中的氮磷比明显下降,接近16:1的阈值,对于阳宗海湖泊,该阈值是氮磷的最佳比例,导致阳宗海富营养化速度明显加快。

Havens 等^[22]研究表明,湖泊的入湖污染负荷中氮磷比会影响湖泊水体中的氮磷比值,并表现出相同的趋势。因此,可以通过控制入湖污染负荷的氮磷比来进行湖内氮磷比值的调节。

3.3 营养状态评价

阳宗海综合营养状态指数从2007年起超过30(图2),标志着阳宗海营养状态从贫营养级进入中营养级,而且处于不断上升的趋势。阳宗海从2006—2007年,富营养化程度明显加重,说明流域营养盐输入大幅增加。这可能与流域内土地利用方式的变化有关。在此期间,流域内种植结构从传统的粮食作物向蔬菜和花卉转变,化肥施用量增加,最终导致营养盐输入负荷增加,湖水中 TN、TP 浓度上升。如果入湖营养盐负荷不能得到有效控制,按照2007—2012年的发展预测,阳宗海综合营养状态指数将以每年约2.0的速度上升,预计到2017年左右,阳宗海将达到富营养级水平。根据前人的研究^[23],湖泊的富营养化状态还与季节有关系,比如太湖流域的小型湖泊,冬、春季处于中营养状态,夏、秋季营养状态略高。同样,许秋瑾等^[24]对三峡水库支流的研究也表明:富营养化状态有季节性特点,春、夏季节库区11条支流发生富营养化的风险较高,应为控制库区富营养化发生的敏感时期^[24]。

4 结 论

研究了阳宗海 2002—2012 年 Chl-a、TP、TN 的动态变化及其相互关系,结果发现 2008—2012 年这几项指标均呈上升趋势,富营养化程度加重;同时,发现 Chl-a 与 TP、TN 的浓度呈正相关。Chl-a 的变化受氮磷比距离阈值远近的影响,该研究结论支持和验证了 Redfield 的阈值理论:当水体的氮磷比接近 16 : 1 时,藻类生长受限最小,生长最快。研究发现,突发砷污染事件很偶然地改变了湖泊的氮磷比,使之接近 16 : 1,使得富营养化程度加快。

采用综合营养状态指数法分析阳宗海 2002—2012 年的营养状态,得出 2002—2012 年阳宗海的营养状态指数呈逐年上升趋势,营养级别从 2006 年前的贫营养级上升到 2007 年后的中营养级,而且呈现继续上升趋势。若阳宗海营养盐输入量得不到有效控制,预测阳宗海将在 2017 年前后将达到富营养级水平,水质将进一步恶化。因此,阳宗海的富营养化问题应及早引起重视。

参考文献:

[1] FERREIRA J G, ANDERSEN J H, BORJA A, et al. Overview of eutrophication indicators to assess environmental status within the European Marine Strategy Framework Directive [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93: (2) 117-131.

[2] LI Y, CAO W Z, SU C X, et al. Nutrient sources and composition of recent algal blooms and eutrophication in the northern Jiulong River, Southeast China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 63: 249-254.

[3] 高学平,李文猛,张晨,等. 入湖河流对南四湖水质的影响 [J]. *水资源保护*, 2013, 29 (2): 1-5. (GAO Xueping, LI Wenmeng, ZHANG Chen, et al. Impact of inflowing rivers on water quality of Nansi Lake [J]. *Water Resources Protection*, 2013, 29 (2): 1-5. (in Chinese))

[4] SCHÜCKEL U, KRÖNCKE I. Temporal changes in intertidal macrofauna communities over eight decades: a result of eutrophication and climate change [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, 117: 210-218.

[5] LUNDBERG C. Eutrophication, risk management and sustainability, the perceptions of different stakeholders in the northern Baltic Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 66(1/2): 143-150.

[6] 沈国华,王谦. 太湖进出水量变化对水环境的影响[J]. *水资源保护*, 2013, 29 (1): 46-50. (SHEN Guohua, WANG Qian. Influences of input and output flow on water environment in Taihu Lake [J]. *Water Resources*

Protection, 2013, 29 (1): 46-50. (in Chinese))

[7] QIN B Q, XU P Z, WU Q L, et al. Environmental issues of Taihu Lake, China [J]. *Hydrobiologia*, 2007, 581 (1): 3-14.

[8] STEINMAN A, CHU X F, OGDahl M. Spatial and temporal variability of internal and external phosphorus loads in Mona Lake, Michigan [J]. *Aquatic Ecology*, 2009, 43 (1): 1-18.

[9] 金相灿,刘鸿亮,屠清瑛. 中国湖泊富营养化[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990: 21-23.

[10] TOOTHMAN B R, CAHOON L B, MALLIN M A. Phosphorus and carbohydrate limitation of fecal coliform and fecal enterococcus within tidal creek sediments [J]. *Hydrobiologia*, 2009, 636: 401-412.

[11] LIU J Y, WANG H, YANG H J, et al. Detection of phosphorus species in sediments of artificial landscape lakes in china by fractionation and phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectroscopy [J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157: 49-56.

[12] WANG H J, WANG H Z. Mitigation of lake eutrophication: loosen nitrogen control and focus on phosphorus abatement [J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19 (10): 1445-1451.

[13] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京:中国标准出版社,2000.

[14] YANG C L, LI S Y, YUAN L N, et al. The eutrophication process in a plateau deepwater lake ecosystem: response to the changes of anthropogenic disturbances in the watershed [C]//Macau University. 2012 International Conference on Biomedical Engineering and Biotechnology (ICBEB). Macau:IEEE CS Press, 2012:1445-1451.

[15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002:88-129.

[16] 金相灿,刘树坤,张宗涉,等. 中国湖泊环境 [M]. 北京:海洋出版社,1995: 278.

[17] 王鹤扬. 综合营养状态指数法在陶然亭湖富营养化评价中的应用[J]. *环境科学与管理*, 2012, 37 (9): 188-194. (WANG Heyang. Application of comprehensive eutrophication state index in evaluation in Taoranting Lake [J]. *Environmental Science and Management*, 2012, 37 (9): 188-194. (in Chinese))

[18] 张蕊,苏婧,霍守亮,等. 抚仙湖营养状态评价及营养物水质标准制定 [J]. *环境工程技术学报*, 2012, 2 (3): 218-222. (ZHANG Rui, SU Jing, HUO Shouliang, et al. The trophic status evaluation and development of nutrient water quality standards for Fuxian Lake [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2012, 2 (3): 218-222. (in Chinese))

[19] REDFIELD A C. The biological control of chemical factors in the environment [J]. *American Science*, 1958, 46: 205-222.

countermeasures in Shanghai [J]. Urban Roads Bridge & Flood Control, 2007,4(4):86-87. (in Chinese))

[9] ZHANG J,LIN Z. Climate of China[M]. New York: John Willey Sons,1992:376.

[10] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999:43-47.

[11] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学,1992,16(4):482-493. (FU Congbin, WANG Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1992,16(4):482-493. (in Chinese))

[12] 邵晓梅,许月卿,严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报:自然科学版,2006,42(4):503-509. (SHAO Xiaomei, XU Yueqing, YAN Changrong. Wavelet analysis of rainfall variation in the Yellow River basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006, 42 (4): 503-509. (in Chinese))

[13] 徐家良,柯晓新,周伟东. 长江三角洲城市地区气候变化及其影响[C]//首届长三角科技论坛:气象科技发展论坛论文集. 杭州:浙江省科学技术协会,2004.

[14] 邵玲玲,黄炎. 上海“8.5”特大暴雨的成因和特点[J]. 气象,2002,28(8):47-50. (SHAO Lingling, HUANG Yan. Mechanism and characteristics of the severe heavy rainfall in Shanghai on 5 August 2001 [J]. Meteorological Monthly, 2002,28(8):47-50. (in Chinese))

(收稿日期:2013 - 12 - 16 编辑:彭桃英)

(上接第 42 页)

[11] 韩龙喜,张书农,金忠青. 复杂河网非恒定流计算模型:单元划分法[J]. 水利学报,1994(2):52-56. (HAN Longxi, ZHANG Shunong, JIN Zhongqing. Cell-dividing method in the calculation of unsteady flow for river network in plain area [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1994(2):52-56. (in Chinese))

[12] 张二骏,张东生,李挺. 河网非恒定流的三级联合解法[J]. 华东水利学院学报,1982,10(1):1-13. (ZHANG Erjun ZHANG Dongsheng,LI Ting. “Three Steps Method” to compute unsteady flow for river networks [J]. Journal of East China Technical University of Water Resources, 1982,10(1):1-13. (in Chinese))

[13] 溪梅成. 数值分析方法[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1995:60-100.

[14] 卢士强,徐祖信. 平原河网水动力模型及求解方法探讨[J]. 水资源保护,2003,19(3):5-9. (LU Shiqiang, XU Zuxin. Hydrodynamic model for plain river networks and its solution [J]. Water Resources Protection, 2003, 19 (3): 5-9. (in Chinese))

[15] DEWEY R J. Application of stochastic dissolved oxygen model[J]. Journal of Environmental Engineering, 1984, 110(2):412-429.

[16] HU K M,PANG Y,WANG H,et al. Simulation study on water quality based on sediment release flume experiment in Taihu Lake, China[J]. Ecological Engineering,2011,37(4):607-615.

[17] 罗缙,逢勇,罗清吉,等. 太湖流域平原河网区往复流河道水环境容量研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2004,32(2):144-146. (LUO Jin, PANG Yong, LUO Qingji, et al. Study on water environment capacity for reversing current channels in plain river network region in Taihu Lake Basin [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2004,32(2):144-146. (in Chinese))

(收稿日期:2013 - 10 - 16 编辑:高渭文)

(上接第 46 页)

[20] 许海,朱广伟,秦伯强,等. 氮磷比对水华蓝藻优势形成的影响[J]. 中国环境科学,2011,31(10):1676-1683. (XU Hai,ZHU Guangwei,QIN Boqiang,et al. Influence of nitrogen-phosphorus ratio on dominance of bloom-forming cyanobacteria (Microcystis aeruginosa) [J]. China Environmental Science, 2011, 31 (10): 1676-1683. (in Chinese))

[21] 孟顺龙,裘丽萍,胡庚东,等. 氮磷比对两种蓝藻生长及竞争的影响[J]. 农业环境科学学报,2012,31(7):1438-1444. (MENG Shunlong, QIU Liping, HU Gengdong,et al. Effect of nitrogen and phosphorus ratios on growth and competition of two blue-green algae [J]. Journal of Agro-Environment Science,2012,31(7):1438-1444. (in Chinese))

[22] HAVENS K E, JAMES R T, EAST T L, et al. N : P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution [J]. Environmental Pollution, 2003, 122 (3): 379-390.

[23] 高振美,张波,商景阁,等. 太湖流域小型水源性湖泊氮、磷时空分布及营养状态评价[J]. 环境污染与防治,2012,34(1):9-14. (GAO Zhenmei,ZHANG Bo,SHANG Jingge,et al. Temporal and spatial distribution of nitrogen and phosphorus and evaluation of trophic status of a water supply lake in Taihu Basin [J]. Environmental Pollution and Control,2012,34(1):9-14. (in Chinese))

[24] 许秋瑾,郑丙辉,朱延忠,等. 三峡水库支流营养状态评价方法[J]. 中国环境科学,2010,30(4):453-457. (XU Qiujin,ZHENG Binghui, ZHU Yanzhong, et al. Nutrient status evaluation for tributary of Three Gorges Reservoir [J]. China Environmental Science,30(4):453-457. (in Chinese))

(收稿日期:2013 - 11 - 09 编辑:徐 娟)