三峡水库富营养化问题与对策研究

蔡庆华　胡征宇
(中国科学院水生生物研究所; 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉　430072)

摘要: 三峡水库蓄水后, 大部分库湾已出现富营养化态势, 并暴发了数次以甲藻(拟多甲藻)和硅藻(小环藻)为主的水华现象, 特别是在春季。以香溪河库湾为例, 分析两周年的营养状态变化, 总体上说, 除冬季外, 大多数月份为富营养, 在春季则为重富营养。对三峡水库 22 条入库支流库湾的营养状态进行综合评价, 结果表明, 有 5 条(22.7%)支流库湾为中营养, 17 条(77.3%)支流库湾为富营养(重富营养化支流库湾有 10 条, 占 45.5%); 但三峡水库本身水质尚好, 仍保持中营养状态。统计分析表明, 入库支流流域的年均流量和流域面积与支流库湾叶绿素 *a* 存在显著负相关关系, 说明支流库湾越小或年均流量越小, 藻类叶绿素 *a* 浓度就越高, 即越容易在春季形成水华。文中讨论了控制和减缓富营养化几项措施。

关键词: 三峡水库; 富营养化; 藻类水华
中图分类号: X171　　文献标识码: A　　文章编号: 1000-3207(2006)01-0007-05

三峡工程是举世瞩目的特大型水利枢纽工程, 它的兴建在防洪、发电、航运等方面带来了巨大的经济效益, 同时, 也对库区的生态环境产生显著的影响。三峡水库蓄水后, 库区水位提高、水流减缓、水体扩散能力减弱、库湾和支流污染物的滞留时间延长, 水域环境发生了巨大变化, 水生生物群落也随之发生了根本性改变。特别是因受水库回水顶托, 库湾和部分支流污染加重, 局部水域已出现富营养化现象。富营养化现象不仅给库区社会、经济和环境的可持续发展造成严重影响, 并将最终影响到三峡工程预期各项服务目标的实现, 因此是一个极其重要的环境问题。

本文对三峡水库蓄水两年来部分库湾富营养化状态进行评价, 分析影响富营养化的主要因素, 并探讨控制和减缓富营养化几项措施, 为有效保障三峡水库的水质安全提供参考。

1　材料与方法

在三峡水库库首(茅坪—归州段)设 14 个采样点(5 个断面), 香溪河库湾设 13 个采样点(含 2 断面), 进行逐月采样; 针对三峡水库易于春季暴发水华的情势, 2005 年 3 月 22—29 日选定干流及 22 条入库支流库湾共设 86 个采样点, 测得藻类叶绿素 *a* (Chl. *a*)、TP、透明度(Sd)等指标。选用 Carlson 提出[1]经 Aizaki 修订[2]的营养状态指数(Trophic State Index)TSI_M 法, 评价研究水域的富营养化状态, 并采用加权平均处理之[3—6], 其计算公式分别为:

$$TSI_M(Chl.\ a) = 10 \times (2.46 + \ln(Chl.\ a)/\ln 2.5)$$

$$TSI_M(TP) = 10 \times (2.46 + (6.71 + 1.15 \times \ln(TP))/\ln 2.5)$$

$$TSI_M(Sd) = 10 \times (2.46 + (3.69 - 1.53 \times \ln(Sd))/\ln 2.5)$$

$$TSI_M = W(Chl.\ a) \times TSI_M(Chl.\ a) + W(Sd) \times TSI_M(Sd) + W(TP) \times TSI_M(TP)$$

其中, TSI_M 为综合营养状态指数, W(X)为上述三参数的权重, 即 W(Chl. *a*)=54.0%, W(Sd)=29.7%, W(TP)=16.3%[3—6]。评价标准为: $TSI_M < 37$ 为贫营养, $37 \leqslant TSI_M < 53$ 为中营养, $TSI_M \geqslant 53$ 为富营养[3—6]。

2　结果与讨论

2.1　三峡水库的藻类水华

三峡水库蓄水后, 入库支流和库湾区域的水体

收稿日期: 2005-07-31; 修订日期: 2005-09-28
基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-SW-111); 国家自然科学基金重点项目(30330140); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412300)资助
作者简介: 蔡庆华(1964—), 湖北人; 博士, 研究员。主要从事淡水生态学、系统生态学和流域生态学研究。刘国祥、叶麟、周广杰、汤宏波、胡建林、黎道丰、曹明、刘瑞秋、邵美玲、韩新芹、徐耀阳等同志参加野外工作, 并提供相关数据资料, 谨致谢忱。E-mail: qhcai@ihb.ac.cn
通讯作者: 胡征宇, E-mail: huzy@ihb.ac.cn

各方面理化性质(特别是流态)发生了巨大变化,形成了一些新的、非常不稳定的生境。这类环境具备了藻类大量生长的营养条件,且缺乏抑制藻类生长的上层消费者,一些原来并不占据优势的淡水藻类,包括一些以前不为人知的新种和新记录种、稀见种类迅速、大量生长,甚至出现水华现象[7]。具有代表意义的种类包括甲藻门几种拟多甲藻(*Peridiniopsis* spp.)(分别为新种、新记录种,以及它们的变种和变型等)、硅藻门里海小环藻(*Cyclotella caspia*)、美丽星杆藻(*Asterionella formosa*)和隐藻门湖沼红胞藻(*Rhodomonas lacustris*)(稀见种)等(刘国祥等,未发表资料)。

三峡水库蓄水半年后,部分支流库湾即开始出现藻类水华。据野外采样和走访,2004 年 2 月底,三峡支流香溪河、童庄河、大宁河等地的水就呈现酱油色,优势种类为甲藻、硅藻等,持续时间可能长达一个多月。蓄水 1 年里三峡水库发生几次典型水华事例的主要特征见表 1。

甲藻门的许多种类能形成赤潮或水华,特别是在海洋中,一些种类还具有毒素,近年来国内多个地方报道有甲藻水华出现(如武汉东湖、云南漫湾水库、四川白石海等),这是一个值得注意的新现象。硅藻门水华在淡水比较常见,如汉江就多次发生小环藻水华,而 2004 年 4 月在三峡地区的多个长江支流中发现高密度的里海小环藻,该藻个体很小,只有 2—3μm,是一种稀见种类,此前未见文献报道有如此的高密度。隐藻门的红胞藻属大部分为海产,淡水种类不多,此属所含的藻红蛋白使细胞出现血红色,如此高密度(4×10^{10}cell/L)的湖沼红胞藻在淡水出现,是第一次报道,其生物学意义不明(此属的部分种类有毒)(刘国祥等,未发表资料)。

表 1 三峡蓄水 1 年间几次典型水华事例及其主要特征

Tab. 1 Some typical algal blooms and their main characters in the Three Gorges Reservoir

时 间	地 点	藻类密度(cell/L)	生物量(mg/L)	主要种类
2004 年 2—4 月	长江干流部分小库湾	2.12×10^8	88	拟多甲藻、小环藻等
2004 年 2—4 月	香溪河库湾近河口	4.95×10^7	42	小环藻、针杆藻等
2004 年 2—4 月	香溪河库湾的盐关至峡口沿线	$4.7-5.2\times 10^7$	约 40	甲藻、小环藻、星杆藻等
2004 年 4 月上旬	香溪河的盐关	3.15×10^8	2	里海小环藻
2004 年 6 月	香溪河库湾峡口以上	$5.8-9.2\times 10^7$	约 50	小环藻等
2004 年 7 月底	香溪河库湾近河口	4×10^{10}	110	隐藻门红胞藻

2.2 三峡水库及部分支流库湾营养状态评价

对三峡水库 22 条入库支流库湾的营养状态进行综合评价(图 1)。结果表明,有 5 条(22.7%)支流库湾为中营养,17 条(77.3%)支流库湾为富营养。如果将 $TSI_M\geq 65$ 定为重富营养,则重富营养化支流库湾有 10 条,占 45.5%,形势严峻。

但三峡水库的主泓,无论是重庆段还是湖北段,基本保持中营养状态(TSI_M 分别为 41.60 和 41.19),水质尚好。

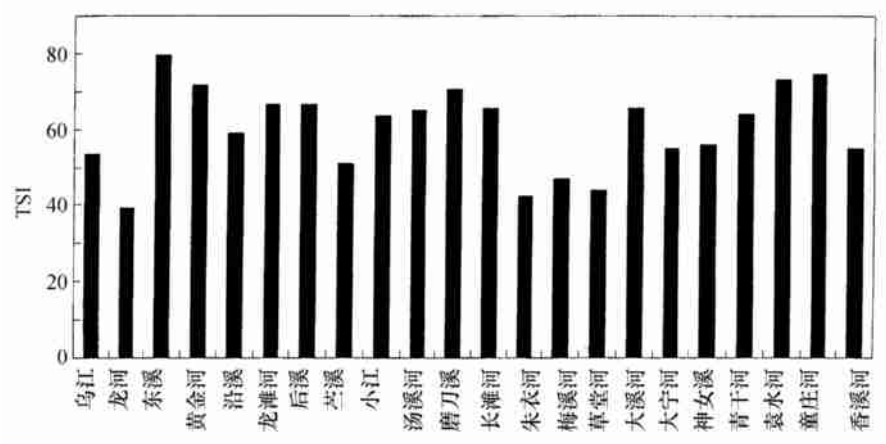

图 1 三峡水库部分支流库湾营养状态评价

Fig. 1 Trophic state of some bays in the Three Gorges Reservoir

对蓄水两周年(2003 年 7 月—2005 年 5 月)来三峡水库坝首(茅坪—归州段)和香溪河库湾富营养化动态进行分析(图 2), 表明, 三峡水库本身总体保持中营养状态, 在统计的 23 个月份中, 有 2 个月份(2005 年 1、2 月)为贫营养(占 8.7%), 17 个月份(73.9%)为中营养, 只有 4 个月份(2003 年 8、9 月, 2004 年 3、6 月)为富营养(17.4%); 而香溪河库湾总体上为富营养, 其中 7 个月份为中营养(30.4%), 16 个月份为富营养(69.6%), 如果仍以 $TSI_M \geq 65$ 为重富营养, 则 2004 年 3 月和 2005 年 4 月为重富营养。

2.3　影响库湾富营养化的因素

三峡水库及其主要库湾水域的 TN、TP 含量都相当高, 已经远远超过国际公认富营养化产生所需的阈值[8—9]。虽然蓄水后三峡水库内营养盐浓度有所下降, 但由于流速减缓, 藻类得到更适宜的生存条件, 富营养化征兆更加明显。与水库主体部分相比, 库湾的藻类叶绿素 *a* 含量更高, 富营养化现象也更显著。研究表明, 三峡水库部分库湾易在春季暴发藻类水华。

据调查统计, 三峡库区流域面积大于 100km^2 的水系有 40 条(长江水资源保护科学研究所, 2002, 内部资料)。根据 2005 年春季的研究资料, 以藻类叶绿素 *a* 为代表, 探讨支流库湾富营养化程度与该支流流域特征(年均流量、流域面积等)的关系, 结果见图 3(a, b)。统计分析表明, 入库支流流域的年均流量(D, m^3/s)和流域面积(A, km^2)与支流库湾叶绿素 *a* (Chl. *a*, μg/L)存在显著负相关关系:

年均流量(D)与 Chl. *a*: Chl. $a = -55.494\ln(D) + 239.64$, $R^2 = 0.8652$

流域面积(A)与 Chl. *a*: Chl. $a = -51.795\ln(A) + 423.51$, $R^2 = 0.7465$

这一结果说明, 支流库湾越小或年均流量越小, 藻类 Chl. *a* 浓度就越高, 即越容易在春季形成水华。

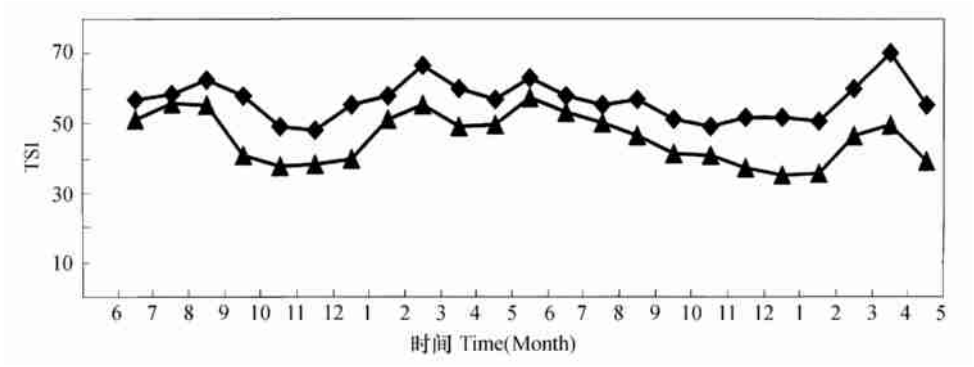

图 2　三峡水库坝首(茅坪—归州段)和香溪河库湾营养状态的动态变化(2003, 6—2005, 5)

Fig. 2　Dynamics of trophic state of Xiangxi (◆) Bay and the Three Gorges Reservoir (▲)

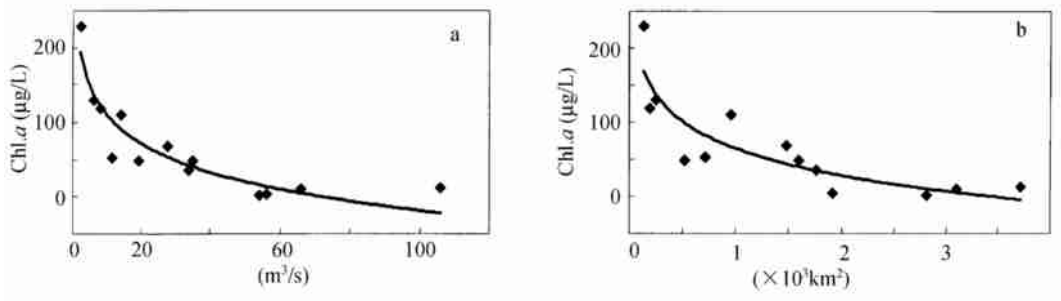

图 3　流域特征(a: 年均流量, b: 流域面积)与库湾藻类叶绿素 *a* 关系

Fig. 3　Relationship between watershed characters (a: annual discharge, b: catchment area) and chlorophyll *a* of bays in the Three Gorges Reservoir

2.4　控制三峡水库富营养化的几点建议

1) 污染控制　　研究表明, 三峡库区水体营养物本底浓度较高, 在合适的时间和地点极易暴发藻类水华。根据国家环保总局近年来有关三峡工程生态与环境监测公报, 每年排入长江的工农业废水(及其污染物含量)和城市生活污水等有大幅度上升(表 2), 尽管长江干流本身由于水交换较快, 目前水质尚好, 处于中营养状态, 但污染形势依然严峻, 有必要进一步加强点源污染控制和面源水土保持工作。

表 2 三峡入库污染物统计

Tab. 2 Annual statistic of pollutants into the Three Gorges Reservoir

年份	工业废水(亿吨) Industrial waste (10^8t)		污染物(万吨) Pollutants (10^4t)			城市污水(亿吨) Town sewage (10^8t)	
	总量	重庆主城区	总量	COD	NH_4-N	总量	重庆主城区
2004	2.47	1.27(51.4%)	2.59	2.43	0.15	4.99	3.07(61.6%)
2003	1.84	0.60(32.8%)	2.50	2.41	0.08	4.04	2.53(62.6%)
2002	1.44	0.49(34.3%)	0.99	0.94	—	3.19	1.91(59.9%)
2001	1.08	0.47(43.3%)	0.8	0.76	0.03	3.17	1.91(60.0%)
2000	1.28	0.75(58.1%)	—	—	—	2.95	1.90(64.4%)

资料来源: 国家环境保护总局, 长江三峡工程生态与环境监测公报, 2001—2005。

2) 全面调查 针对三峡水库富营养化等问题的研究, 国内外有不少工作已经完成或正在开展, 并取得了许多阶段性成果, 但总体而言, 尚不能全面把握水华暴发的时间、地点、程度、范围等。三峡水库将于 2006 年蓄水至 156m 高程、2009 年蓄水至 175m 高程, 如果没有更进一步的有效措施, 预计富营养化态势将更加严重。因此有必要结合三峡工程建设规划, 适时开展有针对性的全面调查, 积累资料, 为政府决策提供依据。

3) 机理研究 20 世纪 60、70 年代以来, 国际上开展了大量的有关水体富营养化研究。但由于水域生态系统的复杂性, 也由于形成原因和影响的复杂性, 特别在人类活动严重干扰下, 作为自然和人为因素叠加的过程, 水体富营养化仍然是一个因环境受损而引起的资源、环境、生态和社会发展的世界性问题。富营养化过程、水华暴发机理等仍是因时因地而异。因此有必要在三峡水库典型入库支流库湾(如香溪河、大宁河、小江等)开展水域生态系统动态的长期监测, 从气象、水文、物理、化学、生物、数学、地理等多学科综合的角度, 研究三峡水库富营养化的形成机理和调控对策[10—14]。

4) 生态调度 水库富营养化的主要影响因素可分为营养因子(N、P 等)、环境因子(水温、光照、透明度等)和水文因子三类。研究表明, 水库的面积、容积、水深、岸线系数、入库径流补给系数、换水周期和水位变幅、出库径流、流速等与富营养化关系密切[15]。图 3 也说明了这一问题。因此有必要进一步加强水文、气象等过程对藻类及其他水生生物时空格局影响的研究, 在构建水库流场模型的基础上, 叠加生态因子场[16], 针对三峡水库及主要库湾在不同时段的水文、水生态特点, 结合防洪、发电、下游航道管理、水库水环境保护, 合理进行基于生态系统管理[17]的水库生态调度, 可能是控制或减缓三峡水库水华暴发的一种有效手段。

参考文献:

[1] Carlson R E. A trophic state index for lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, **22**(2): 361—369

[2] Aizaki M. Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese lakes and its relationships to other parameters related to trophic state [R]. *Research Report of National Institute of Environmental Study*, 1981, (23): 13—31

[3] Cai QH, Liu JK and King L. A comprehensive model for assessing lake eutrophication. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(12): 1674—1678

[4] Cai QH. Comprehensive evaluation of eutrophication in Donghu Lake, Wuhan [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1993, **24**(4): 335—339[蔡庆华. 武汉东湖富营养化的综合评价. 海洋与湖沼, 1993, **24**(4): 335—339]

[5] Cai Q H. On the comprehensive evaluation methods for lake eutrophication [J]. *Journal of Lake Science*, 1997, **9**(1): 89—94[蔡庆华. 湖泊富营养化评价方法综述. 湖泊科学, 1997, **9**(1): 89—94]

[6] Yoshimi H. Simultaneous construction of single-parameter and multiparameter trophic state indices. *Water Research*, 1987, **21**(12): 1505—1511

[7] Kuang QJ, Bi YH, Zhou GJ, *et al*. Study on the phytoplankton in the Three Gorges Reservoir before and after sluice and the protection of water quality [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2005, **29**(4): 353—358[况琪军, 毕永红, 周广杰, 等. 三峡水库蓄水前后浮游植物调查及水环境初步分析. 水生生物学报, 2005, **29**(4): 353—358]

[8] Cao M, Cai QH, Liu RQ, *et al*. Comparative research on physicochemical factors of Three Gorges Reservoir before and after impoundment. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(1): 12—19[曹明, 蔡庆华, 刘瑞秋, 等. 三峡水库初期蓄水前后理化因子的比较研究. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 12—19]

[9] Cao M, Cai QH, Liu RQ, *et al*. Comparative study on physicochemical characters between Xiangxi Bay and the Three Gorges Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(1): 20—25[曹明, 蔡庆华, 刘瑞秋, 等. 三峡水库及香溪河库湾理化特征的比较研究. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 20—25]

[10] Cai Q H and Liu J K. Effect of human population growth and fishery

development on water quality of Lake Donghu, Wuhan [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1994, **18**(1): 87—89[蔡庆华, 刘建康. 人口增长与渔业发展对武汉东湖水质的影响. 水生生物学报, 1994, **18**(1): 87—89]

[11] Ye L, Xu YY, Cai QH. The spatial and temporal distribution of nitrate and phosphate in the Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir region during spring bloom period. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(1): 75—79[叶麟, 徐耀阳, 蔡庆华. 三峡水库香溪河库湾春季水华期间硝酸盐、磷酸盐的时空分布. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 75—79]

[12] Ye L, Han XQ, Cai QH. Kinetic study of the dissolved organic carbon in the Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir region during the spring bloom period. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(1): 80—83[叶麟, 韩新芹, 蔡庆华. 三峡水库香溪河库湾春季水华期间可溶性碳动力学研究. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 80—83]

[13] Xu YY, Ye L, Han XQ, *et al*. Characteristic and regression analysis of the PAR attenuation coefficient in Xiangxi Bay during spring bloom [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(1): 84—88[徐耀阳, 叶麟, 韩新芹, 等. 三峡水库香溪河库湾春季水华期间水体光学特征及相关分析. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 84—88]

[14] Han X Q, Ye L, Xu YY, *et al*. Analysis of the spatial and temporal changes of chlorophyll a concentration in Xiangxi Bay in Spring and its impact factors [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(1): 89—94[韩新芹, 叶麟, 徐耀阳, 等. 香溪河库湾春季叶绿素 *a* 浓度动态变化及其影响因子分析. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 89—94]

[15] Wagner M. Effect of hydrological patterns of tributaries on biotic processes in a lowland reservoir-consequences for restoration. *Ecological Engineering*. 2000, **16**: 79—90

[16] Zhao B and Cai Q. Geostatistical Analysis of Chlorophyll a in Freshwater Ecosystems. *Journal of Freshwater Ecology*, 2004, **19**(4): 613—621

[17] Tang T, Qu XD, Cai QH, *et al*. River ecosystem management-a case study of Xiangxi River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, **13**(6): 594—598[唐涛, 渠晓东, 蔡庆华, 等. 河流生态系统管理研究. 以香溪河为例. 长江流域资源与环境, 2004, **13**(6): 594—598]

STUDIES ON EUTROPHICATION PROBLEM AND CONTROL STRATEGY IN THE THREE GORGES RESERVOIR

CAI Qing-Hua and HU Zheng-Yu

(*State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan* 430072)

Abstract: On 1st June 2003, the Three Gorges Reservoir (TGR) began its storage officially, and the water level reached at 135 m on 10 June (and at 139 m on 5 November). Three are a lot of tributaries been flooded in the lower reaches, and many bays are therefore formed from that time in the reservoir. We monitored the changes of ecological environment of TGR, and found that most of bays was in eutrophic state and emerged several serious algal blooms predominated by dinoflagellate (*Peridiniopsis* spp.) and diatom (*Cyclotella* sp.), especially in spring. In case of Xiangxi Bay, the largest one in Hubei part of TGR and the one most close to the dam, the monthly monitoring of 2 years shown that the trophic state in most month was eutrophic, except in winter. Furthermore, the trophic state in spring was hyper-eutrophic. On the other hand, to get a general information of eutrophication situation in TGR, we assessed the trophic state of 22 bays and TGR itself in spring, 2005. The results shown that 5 bays (22.7%) were in meso-trophic, and 17 bays (77.3%) were in eutrophic (10 bays in hyper-trophic, occupied 45.5%). The water quality of TGR itself, however, was still in good condition (meso-trophic), due to its fast exchange rate of water. Statistic analyses shown that relationship between chlorophyll *a* and watershed characters (annual discharge and catchment area) of bays in TGR was significant negative. It implied that, generally, the smaller of the bay (or its annual discharge), the higher of chlorophyll *a* concentration, *i.e.* the easier of forming algal bloom in spring. Based on the monitoring and researching, we discussed and proposed several strategies to control or mitigate eutrophication phenomena in TGR, including pollution control, complete survey, mechanism study and eco-hydraulic regulation.

Key words: Three Gorges Reservoir; Eutrophication; Algal bloom