

抚仙湖水体 N P 变化及其非点源污染特征

夏天翔^{1,2}, 潘继征³, 刘雪华¹, 赵孟彬², 祁云宽⁴, 熊 飞⁵, 徐力刚³

(1.清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2.中关村海淀园北京锦绣大地农业股份有限公司博士后工作站, 北京 100049; 3.中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 4.玉溪市环境监测站, 云南 玉溪 653100; 5.江汉大学, 湖北 武汉 430056)

摘 要:通过调查抚仙湖 1981—2005 年水体 N、P 变化, 以及监测该流域 33 条主要入湖河道水体 N、P 的输入情况, 从而揭示抚仙湖水体 N、P 变化规律及该流域非点源污染主要特征。结果表明, 近 20 多年来, 抚仙湖水体 N 素水平增长迅速而 P 素水平稳定, 2001—2005 年表层水体 TN:TP 平均值达到 33.06, P 素成为抚仙湖水体藻类生长的主要限制因子之一。2005 年, 抚仙湖 33 条主要入湖河道 TN 和 TP 输入量分别为 528.3 t 和 70.7 t, 抚仙湖北部澄江县已成为非点源污染源最为严重区域, 化肥的过量施用和畜禽养殖规模的过快发展已成为该流域非点源污染的主要原因。

关键词:抚仙湖; 氮磷比; 河道输入; 非点源污染

中图分类号:X524 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)04-1340-06

Non-point Source Pollution Characteristics in Fuxianhu Lake Watershed and Variation Law of N and P in Lake Water

XIA Tian-xiang^{1,2}, PAN Ji-zheng³, LIU Xue-hua¹, ZHAO Meng-bin², QI Yun-kuan⁴, XIONG Fei⁵, XU Li-gang³

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Glorious Land Agricultural Co., LTD enterprise postdoctoral workstation of Zhongguancun (Haidian) Science Park, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 4. Yuxi Environmental Monitoring Station, Yuxi 653100, China; 5. Academy of Development, Jiangnan University, Wuhan 430056, China)

Abstract: Protecting water resources from non-point source pollution is an important public-health concern and a major national environmental issue. Based on the water body investigation and monitoring results from 33 influx rivers of total nitrogen and total phosphate, the non-point source pollution characteristics in the watershed and the variation law of total nitrogen and total phosphate were identified in Fuxianhu Lake from 1981 to 2005. The results demonstrated that the total nitrogen in water body increased quickly, however, the total phosphate in water body was stable from 1981 to 2005. The average ratio of total nitrogen to total phosphate was as high as 33.06 from 2001 to 2005. Phosphate has become one of the mainly limited factors for alga growth. It can be seen that the influx mass for total nitrogen and total phosphate are 528.3 t and 70.7 t separately. The north of Fuxianhu watershed, Chengjiang County, is the most severe polluted area because of the overuse of fertilizers and extensively bloom of livestock and poultry raising. The findings of this paper help to explore the distribution and migration of nitrogen in agricultural lands, as well as to explore the characteristics of non-point source pollution resulting from agricultural activities. The work presented in this paper is also believed to be useful in formulating management strategies for extensive cropping watershed to reduce diffusive pollution from agricultural activities.

Keywords: Fuxianhu Lake; ratio of total nitrogen to total phosphate; influx mass; non-point source pollution

收稿日期: 2008-02-25

基金项目: 国家 863 子课题(河口水质净化技术研究与工程示范)(2005AA60101004); 国家自然科学基金(40701176); 江苏自然科学基金(BK2006579); 河海大学水文与水资源与水利科学工程国家重点实验室开放基金(2006412511)

作者简介: 夏天翔(1979—), 男, 江苏镇江人, 博士, 主要从事湖泊生态与农业面源污染研究。E-mail: xtx0715@163.com

通讯作者: 潘继征 E-mail: jzhp@niglas.ac.cn

抚仙湖是我国著名的云南高原深水湖泊,湖泊容水量 189.3 亿 m^3 ,流域人口约 16.03 万人,是流域社会经济发展的重要物质基础。近 20 多年来,抚仙湖水体一直处于贫营养状态,但随着湖区人为干扰的迅速增加,湖泊富营养化进程明显加快^[1]。

N、P 是导致湖泊发生富营养化的重要营养元素,对湖泊藻类生长和蓝藻的爆发具有重要影响^[2-5]。非点源污染中的 N、P 输入数量及比例能够导致湖泊水体 N、P 水平发生明显变化,从而影响湖泊富营养化进程^[6,7]。河道污染物输入是我国非点源污染的主要途径之一,其所携带的 N、P 数量多的可占到入湖总量的 90% 以上^[8]。目前,关于云南高原湖泊水质变化及非点源污染研究尚不多见^[9],本文通过调查抚仙湖 1981—2005 年水体 N、P 变化,并结合该流域主要河道 N、P 的输入特征,从而揭示抚仙湖水体 N、P 变化规律及该流域非点源污染主要特征,为该区域流域管理与非点源污染控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域介绍

抚仙湖位于滇中盆地中部长江水系与珠江水系的分水岭地带,地理位置为 E 102°49′~102°57′, N 24°21′~24°38′,属玉溪市辖区,跨澄江、江川、华宁 3 县,湖面 212 km^2 (澄江县辖 127.15 km^2 ,占 60%)。抚仙湖属中亚热带半湿润季风气候,常年平均气温 15.6 $^{\circ}\text{C}$,多年平均降雨量 951.4 mm,雨季旱季分明。抚仙湖沿南北方向断陷而成,南北长 30 km,东西宽 10 km,湖岸线长 90.6 km,最大水深 157.3 m,平均水深 87.0 m,是我国第二深水湖泊。湖面海拔 1 722 m,运行水位 1 720.50~1 722.00 m,系珠江上游西江水系南盘江流域的源头型湖泊,属我国主要大江大河上游水源的保护范围。

抚仙湖集水域面积 665.2 km^2 (星云湖除外),入湖水量大部分由分布在湖周围的许多入湖河道及其区间坡面径流直接汇入,其中较大河道 30 余条。由于四周山地环抱,流域面积很小,故汇入湖泊的河流均很短小,坡陡,地表漫流速度大,汇流时间短,地表径流的损失量很小。此外,这些河流多属雨水补给类型,因此多为间歇性河流。在旱季,较小的流域面积得不到充足的地下水补给,因而断流。不少河流即使在雨季,也只有降雨时有流,雨停不久便干枯^[10]。

1.2 数据来源与分析方法

1981—2005 年抚仙湖水质数据(包括 TN、TP、透

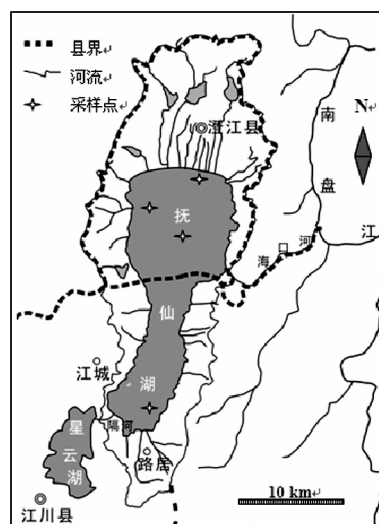


图 1 县界、河流以及采样点分布

Figure 1 Locations of distribution of dividing lines of countries, rivers and sampling sites

明度、悬浮物和藻类)来源于玉溪市环境监测站的常规监测资料,全湖共设马房新村、湖心、尖山和路居 4 个固定监测点(图 1),每年枯、丰和平水期各监测两次,取平均值。

抚仙湖集水域尚没有长系列的水文历史观测数据^[11],2005 年对抚仙湖 33 条主要入湖河道进行了流量及水质监测,监测指标包括 TN、TP、悬浮物浓度,河道流量采用经验径流系数法,每月监测 1 次,河道月径流量及 N、P 月径流流失量计算公式如下:

$$Q = \sum_{m=1}^n R_m \times k_m \times A_m \times 10^3$$

$$T = \sum_{m=1}^n Q_m \times C_m \times 10^{-3}$$

式中: Q 为月径流量, m^3 ; R 为河道流域范围月降雨量, mm; k 为流失系数; A 为河道流域面积, km^2 ; m 、 n 为河道数目; T 为 TN、TP 月径流流失量, kg; C 为河道水体 TN、TP 月平均浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

澄江县化肥施用量和畜禽养殖规模数据来源于 1980—2004 年澄江县统计年鉴。

2 结果与分析

2.1 抚仙湖水体 N、P 变化

1981—2005 年,抚仙湖表层水体 TN、TP 以及 TN:TP 值如图 2 所示。24 a 间湖泊水体 TN 平均浓度逐渐上升,2001—2005 年表层水体 TN 平均浓度为 1981—1985 年的 2.23 倍,已超过地表水 I 类标准,而 TP 平均浓度则相对平稳在 0.01 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。随着抚仙湖水体 TN、TP 浓度的历史变化,水体 TN:TP 平均

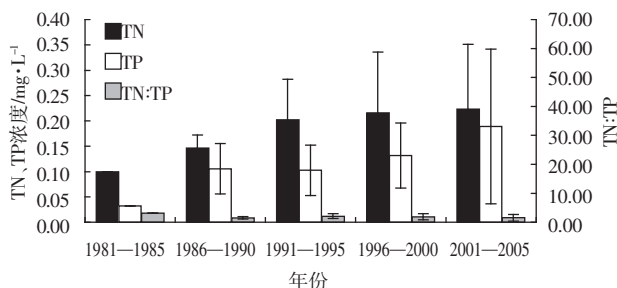


图2 1981—2005 年抚仙湖水体 TN、TP 浓度及 TN:TP 比值
Figure 2 TN, TP concentrations and TN:TP ratios in Fuxianhu Lake from 1981 to 2005

值呈明显上升趋势,从 1981—1985 年的 5.56 上升到 2001—2005 年的 33.06,上升幅度达到 5 倍左右。N、P 是浮游藻类生长的必需元素,水体中 N、P 浓度的高低及其比例对浮游藻类的生长^[12]和结构组成^[13,14]有着显著影响。Redfield(1958)认为 TN:TP 值在 16:1 时最适宜浮游藻类的生长,而 TN:TP 值超过或小于该比例 P 素或 N 素将分别成为藻类生长的限制因子^[15]。2001—2005 年抚仙湖水体中 TN:TP 平均值为 Redfield 值的 2 倍多,表明 P 素已成为抚仙湖水体浮游藻类繁殖的主要限制因子之一,这与世界大多数湖泊所面临的情况相似^[16]。湖泊水体 TN:TP 值低于 22:1 易导致水体中固 N 蓝藻成为优势种,反之则相反^[3]。1981—2005 年,随着抚仙湖湖泊水体 TN:TP 平均值的逐渐增加,藻类总数增加了 9.5 倍,而蓝藻浓度则下降了 80%(图 3 A),蓝藻在藻类总数中的比例也由 42%下降到 1%左右(图 3 B)。水体透明度(SD)的下

降有助于抑制蓝藻成为优势种类^[19],1981—2005 年抚仙湖水体透明度不断下降(图 3 C)。抚仙湖为深水湖泊,各采样点的平均水深在 80 m 左右,水土界面稳定,再悬浮作用弱^[18],因此 SD 的下降应与沉积物再悬浮过程无关^[19],且这一期间抚仙湖悬浮物(SS)浓度略有下降(图 3 D),因此抚仙湖透明度的逐年下降应与由水体 TN 浓度增加而引起的藻类总数增长有直接关系。

2.2 抚仙湖非点源污染主要特征

2.2.1 入湖河道 N、P 输入特征

流域 N、P 入湖总量按照不同入湖途径可分为:入湖河道、大气的干湿沉降、地下水入渗以及湖泊四周的地表散流^[20],其中入湖河道为我国大部分流域污染物入湖的主要途径^[20-22]。

2005 年 1 月—12 月抚仙湖主要入湖河道 N、P 径流量变化如图 4 所示。抚仙湖流域雨季旱季分明,雨季(6 月—11 月)N、P 径流量远高于旱季(12 月,1 月—5 月),分别占全年 N、P 径流量的 83.2%、93.4%。抚仙湖是典型的云南高原湖泊,多年监测数据表明,雨季(6 月—11 月)的降雨量占全年的 81%左右^[9],降雨的过度密集不仅会导致 N、P 随泥沙大量输入湖体^[23],同时也加剧了土壤中可溶性 N、P 的流失^[9]。本次调查的 33 条主要入湖河道全年 TN、TP 径流量分别达到 528.3 t、70.7 t(表 1),其 TN:TP 值接近 7.5:1。入湖河道的 N、P 输移比例,与湖泊水体的 TN:TP 值关系密切。Havens(2003)研究表明,随着湖泊 N、P 输移中 TN:TP 值的不断降低(从 18:1 下降到 12:1),湖泊

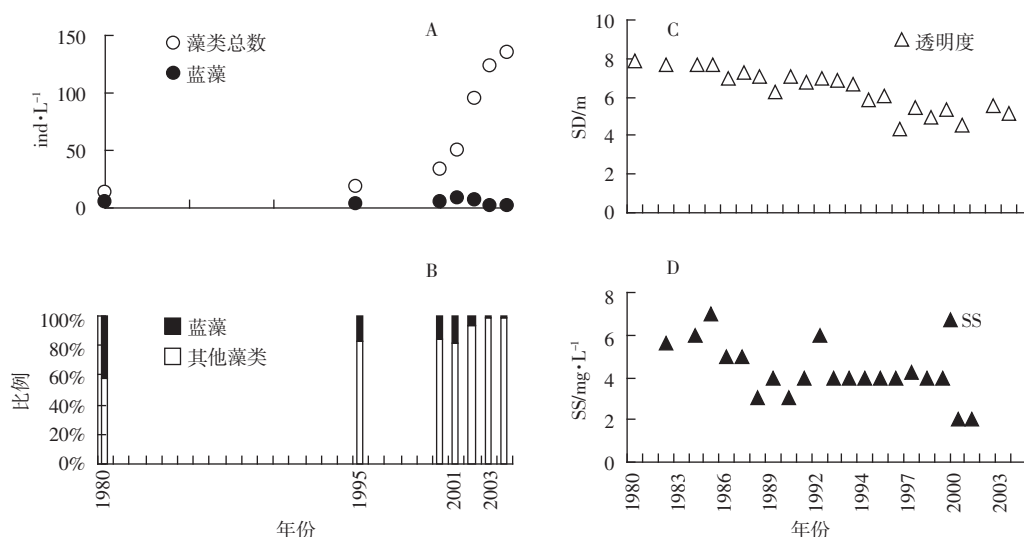


图3 1980—2005 年抚仙湖水体藻类总数、蓝藻(A、B),含量(D)以及透明度(C)变化
Figure 3 Average concentrations of total algae, cyanobacteria(A, B),SS and SD in water body of Fuxianhu Lake from 1980 to 2005

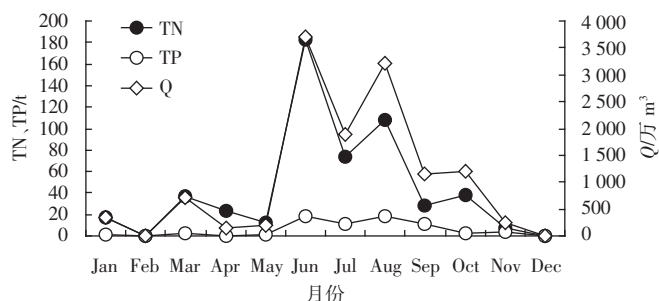


图 4 2005 年 1 月—12 月抚仙湖 33 条主要入湖河流径流量 Q , N 和 P 输入量

Figure 4 Amounts of accumulative runoff and N and P loading from 33 main influx rivers to the Fuxianhu Lake from Jan. to Dec. in 2005

水体中 TN:TP 值同样表现出逐步下降趋势^[6]。由于缺乏长期的历史监测数据,因此目前尚无法反映抚仙湖流域两者的相关性。但 2005 年,抚仙湖河道 N、P 输移过程中 TN:TP 值(7.5:1)远低于 Redfield 值(16:1)^[15],在抚仙湖水体 P 素已成为藻类增长主要限制因子的情况下,河道输移中 P 素比例的相对较高应引起足够重视。

本次调查的 33 条主要入湖河道中,澄江县河道全部分布于抚仙湖北部,共 16 条;而非澄江县河道全部分布于南部,共 17 条。由于抚仙湖特殊的地理特征,其南、北部径流区污染物径流量存在明显差异(表 1)。北部澄江县河道 TN、TP 径流量均明显高于南部非澄江县河道,可见澄江县径流区已经成为抚仙湖最为主要的非点源污染源产生区域。此外,SS 的流失主要由雨蚀引起,这一过程已成为湖泊接纳外部营养盐的最主要来源之一^[8],SS 中携带的 N、P 数量远高于可溶性 N、P 的流失数量,密云水库流域不同坡度下 N、P 流失量,前者甚至可达到后者的 10 倍左右^[24]。本次调查发现,澄江县河流 SS 径流量远低于非澄江县河流,而 N、P 径流量却明显高于后者,该结果暗示了澄江县河流中可溶性 N、P 含量应远高于非澄江县河流,而该区域化肥施用过程中可溶性 N、P 的流失很有可能是其最为主要的来源。

2.2.2 非点源污染原因分析

综上所述,近 20 a 来抚仙湖水体 N 素水平增长迅速, N 素污染主要来源于农业非点源污染,太湖流域 N 素农业非点源污染更是占据了入湖总 N 量的 77% 以上^[25]。2004 年对抚仙湖流域各类型污染源的 N 排放量进行了初步估算^[26],结果见图 5,该流域非点源污染源 N 素排放量占总排放量的 91% 以上,其中农业化肥流失与畜禽粪便已成为该流域 N 排放的主要来源,其数量分别占总排放量的 27% 和 58% 左右。

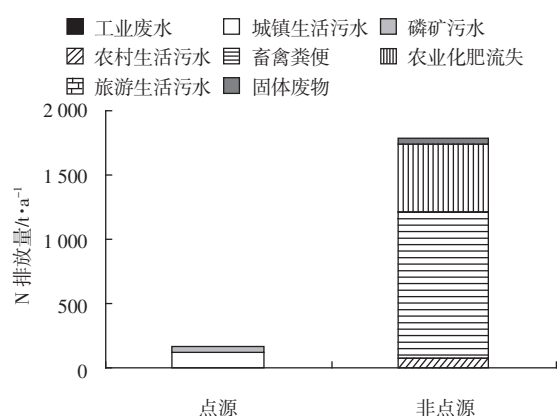


图 5 2004 年抚仙湖流域各污染源 N 排放量

Figure 5 Amounts of the TN drainage from different land sources at the Fuxianhu Lake watershed in 2004

由此,本文调查了抚仙湖最为主要的非点源污染源产生区域澄江县农业化肥用量和畜禽养殖规模的历史变化。结果如表 2 所示,澄江县 1980—2004 年化肥施用量呈不断上升趋势,从而导致 N 肥施用量急剧升高,2004 a 澄江县 N 肥施用量已经达到 $2\,178.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,这一数值大大超过我国平均水平,甚至远超过集约化蔬菜生产非常发达的山东寿光。2003 年山东寿光 N 肥施用量为 $940.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[8],仅为澄江县的 43% 左右。近 20 a 间,该区域畜禽养殖中猪和家禽的数量也同时分别增长了 52% 和 46% 左右。由此可见,澄江县化肥的过量施用,畜禽养殖规模的过快发展,应为抚仙湖流域非点源污染的主要影响因素。

表 1 2005 年抚仙湖流域不同区域河流径流总量 Q , N, P 及 SS 输入量

Table 1 Amounts of accumulative runoff, N, P loading and SS from rivers at different districts of Fuxianhu Lake Watershed in 2005

河道分布	Q		TN		TP		SS	
	数量/ 10^4m^3	比例/%	数量/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	比例/%	数量/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	比例/%	数量/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	比例/%
所有河道	12 762.0	100.0	528.3	100.0	70.7	100.0	37 309.7	100.0
澄江县河道	8 133.6	63.7	303.8	57.5	49.9	70.6	9 754.9	26.1
非澄江县河道	4 628.4	36.3	224.4	42.5	20.8	29.4	27 554.8	73.9

表 2 1980—2004 年澄江县化肥和畜禽养殖规模变化

Table 2 Changes of amounts of fertilizer, livestock and poultry at Chengjiang County from 1980 to 2004

年份	化肥施用量		畜禽养殖	
	总量/kg·hm ⁻²	N 肥/kg·hm ⁻²	猪/头	家禽/只
1980	769.6	546.1	46 959	265 000
1985	1 244.1	698.0	59 052	220 000
1990	1 801.1	845.6	73 325	239 000
1995	3 013.8	1 302.3	72 385	216 000
2000	3 443.6	1 490.1	61 666	307 000
2004	4 378.3	2 178.5	71 486	386 898

目前,抚仙湖非点源污染治理措施包括人工湿地终端控制,测土配方施肥,生态农业建设等,但结果尚差强人意,因此进一步结合抚仙湖特殊的生态环境,限制主要污染区域(澄江县)农业污染源发展规模,加强对非点源污染中污染物主要入湖途径(河道输入)的管理控制,从而为减缓湖泊水体的富营养化进程提供必要保障。

3 结论

(1)近 20 多年来,抚仙湖水体 N 素水平增长迅速而 P 素水平相对稳定,2001—2005 年表层水体 TN:TP 值达到 33.06,P 素已成为抚仙湖水体浮游藻类生长的主要限制因子。

(2)2005 年,抚仙湖 33 条主要入湖河道全年 TN、TP 径流量分别为 528.3 t、70.7 t,其 TN:TP 值接近 7.5:1,河道输移中 P 素比例相对较高应引起足够重视。

(3)澄江县是抚仙湖流域非点源污染源最严重区域,该区域化肥的过量施用和畜禽养殖规模的过快发展已成为流域非点源污染的主要原因。

(4)抚仙湖非点源污染的防治应结合云南高原湖泊特殊的生态环境,在严格控制农业非点源污染源的前提下,加强在雨季对主要入湖河道 N、P 输入的污染控制。

参考文献:

- [1] 李荫玺,刘红,陆娅,等.抚仙湖富营养化初探[J].湖泊科学,2003,15(3):285-288.
LI Yin-xi, LIU Hong, LU Ya, et al. Preliminary studies on eutrophication in Fuxian Lake[J]. *Journal of Lake Science*, 2003, 15(3):285-288.
- [2] Smith V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton[J]. *Science*, 1983(221):669-671.
- [3] Smith V H, Bierman V J, Jones B L, et al. Historical trends in the Lake Okeechobee ecosystem IV. Nitrogen:phosphorus ratios, cyanobacterial dominance, and nitrogen fixation potential[J]. *Archiv für Hydrobiologie*,

Monographische Beiträge, 1995(107):71-88.

- [4] 陈永根,刘伟龙,韩红娟,等.太湖水体叶绿素 a 含量与氮磷浓度的关系[J].生态学杂志,2007,26(12):2062-2068.
CHEN Yong-gen, LIU Wei-long, HAN Hong-juan, et al. Relationships between Chlorophyll-a content and TN and TP Concentrations in water bodies of Taihu Lake, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12):2062-2068.
- [5] 孙凌,金灿,钟远,等.不同氮磷比条件下浮游藻类群落变化[J].应用生态学报,2006,17(7):1218-1223.
SUN Ling, JIN Xiang-can, ZHONG Yuan, et al. Changes of Algal Communities in Water Body with Different Proportions of Nitrogen and Phosphorus[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7):1218-1223.
- [6] 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):379-390.
- [7] Schindler D W. Evolution of phosphorus limitation in lakes[J]. *Science*, 1977(195):260-262.
- [8] 朱兆良,David N,孙波.中国农业面源污染控制对策[M].北京:中国环境科学出版社,2006.36,75.
ZHU Zhao-liang, David N, SUN Bo. Policy for reducing non-point pollution from crop production in China[M]. Beijing:China Environmental Science Press, 2006.36,75.
- [9] 夏天翔.云南高原湖泊污染源控制的有机农业途径研究[D].南京:中国科学院南京地理与湖泊研究所,2007.10.
XIA Tian-xiang. Study on organic farming as a pathway for pollution control of plateau lakes in Yunnan Province[D]. Nanjing:Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, 2007.10.
- [10] 中国科学院南京地理与湖泊研究所.抚仙湖[M].北京:海洋出版社,1990.
Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences. Fuxianhu Lake[M]. Beijing:Oceanpress, 1990.
- [11] 徐金涛,张奇,徐力刚.抚仙湖集水区域地表径流入湖水量模拟[J].湖泊科学,2007,19(6):718-726.
XU Jin-tao, ZHANG Qi, XU Li-gang. Surface runoff modeling of Lake Fuxian Catchment[J]. *Journal of Lake Science*, 2007, 19(6):718-726.
- [12] Caperon J. Population growth in microorganisms limited by food supply[J]. *Ecology*, 1967(48):715-722.
- [13] Balod M, Purina I, Bechemin C, et al. Effects of nutrient enrichment on the growth rates and community structure of summer phytoplankton from the Gulf of Riga, Baltic Sea[J]. *Journal of Plankton Research*, 1998, 20(12):2251-2271.
- [14] Boyd C E, Mnnisiri P. Phosphorous absorption capacity and availability of added phosphorous in soils from aquaculture areas in Thailand[J]. *Journal of World Aquaculture*, 1996, 27(2):160-167.
- [15] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment[J]. *American Science*, 1958, (46):205-222.
- [16] Schindler D W. Evolution of phosphorus limitation in lakes[J]. *Science, New Series*, 1977, 195(4275):260-262.
- [17] Duin E H S van, Aalderink R H, Lijklema L. Light adaptation of Oscil-

- latoria agardhii at different time scales[J]. *Water Science Technology*, 1995(32):35-48.
- [18] Scheffer M. Ecology of shallow lakes[M]. Chapman & Hall, 1998.
- [19] Havens K E, James R T. Localized changes in transparency linked to mud sediment expansion in Lake Okeechobee, Florida: ecological and management implications[J]. *Lake and Reservoir Management*, 1999(15):54-69.
- [20] 许朋柱, 秦伯强. 2001—2002 水文年环太湖河道的水量及污染物通量[J]. *湖泊科学*, 2005, 17(3):213-218.
- XU Peng-zhu, QIN Bo-qiang. Water quantity and pollutant fluxes of the surrounding rivers of lake taihu during the hydrological year of 2001—2002[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, 17(3):213-218.
- [21] 高 超, 朱建国, 窦贻俭. 农业非点源污染对太湖水质的影响: 发展态势与研究重点[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(3):260-263.
- GAO Chao, ZHU Jian-guo, DOU Yi-jian. Contribution of agricultural non-point source pollution to water quality deterioration in Tai Lake watershed: recent trends and research priorities[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11(3):260-263.
- [22] 胥彦玲, 李怀恩, 贾海娟, 等. 陕西省黑河流域水土流失型非点源污染估算[J]. *水土保持通报*, 2005, 25(5):78-80.
- XU Yan-ling, LI Huai-en, JIA Hai-juan, et al. Estimate the loss load of non-point source pollution by soil and water loss in heihe basin of shannxi province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2005, 25(5):78-80.
- [23] Stefano C D, Ferro V, Palazolo E. Sediment delivey processes and agricultural non-point pollution in a Sicilian basin[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2000, 77(1):103-112.
- [24] 黄生斌, 刘宝元, 刘晓霞. 密云水库流域农业非点源污染基本特征分析[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4):1219-1223.
- HUANG Sheng-bin, LIU Bao-yuan, LIU Xiao-xia, et al. Characteristics of agricultural non-point source pollution in the watershed of miyun reservoir[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):1219-1223.
- [25] 姜翠玲, 崔广柏. 湿地对农业非点源污染的去除效应[J]. *农业环境保护*, 2002, 21(5):471-473, 476.
- JIANG Cui-ling, CUI Guang-bo. Effect of wetlands in removal of non-point pollutants from agricultural source[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(5):417-473, 476.
- [26] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 《2006—2020 年抚仙湖流域全面保护与治理规划》[R]. 玉溪市环境监测站, 2006.
- Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences. All-sided project report of environmental protection and treatment for Fuxianhu Watershed from 2006 to 2020[R]. Yuxi Environmental Monitoring Station, 2006.