

天目湖水质演变及富营养化状况研究

高永霞^{1,3}, 朱广伟^{1*}, 贺冉冉², 王芳¹

(1. 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, 南京 210008; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 为了解长江中下游地区濒临城市的湖泊型水库富营养化情况并在此基础上提出治理对策, 选择了具有代表性的旅游景区天目湖(沙河水库)为研究对象, 在 2006 年对其水质情况进行了每月 1 次的周年调查, 2007 年 5 月~2007 年 12 月又进行了隔月 1 次的水质调查. 2006 年调查结果表明, 水体总氮(TN)和总磷(TP)的平均浓度分别为 1.49 mg/L 和 0.06 mg/L, 较 2001~2002 年分别增长了 2.7 倍和 2.0 倍; 水体高锰酸盐指数的平均值为 3.68 mg/L, 比 2001~2002 年稍有增加; 水体透明度(SD)的平均值为 1.2 m, 比 2001~2002 年下降了 25 cm, 2006 年藻类生物量平均值为 46.39 mg/L. 天目湖已经由 2001~2002 年的中-中富营养化状态转变为 2006 年的中富营养化状态. 根据 2006 年水质调查结果以及沉积物、渔业生产、浮游生物、底栖生物等综合调查结果提出并实施了天目湖的治理方案, 即必须采取措施控制农业面源、入湖河流、旅游业等外源性污染以及降低水土流失造成的入湖悬浮物质含量以提高水体透明度, 从湖泊外源、内源以及湖泊生态系统的物质循环三者之间的关系着手制定天目湖治理方案. 2007 年水体 TN 的平均浓度为 1.25 mg/L; TP 平均浓度为 0.05 mg/L; 藻类生物量平均值为 22.56 mg/L. 2007 年的再次调查结果表明这些措施的实施对水体营养盐含量以及浮游生物量的降低已初见成效.

关键词: 富营养化; 天目湖; 营养盐; 水库; 水质

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)03-0673-07

Variation of Water Quality and Trophic State of Lake Tianmu, China

GAO Yong-xia^{1,3}, ZHU Guang-wei¹, HE Ran-ran², WANG Fang¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Water quality survey was carried out in 2006 and 2007 in Lake Tianmu (Shahe Reservoir) of China in order to make clear the eutrophication reasons of urban lake-type reservoirs in the middle and lower reaches of Yangtze River, and then put forward the corresponding control measures for such reservoirs. The survey frequency was once a month in 2006 and once two months from May 2007 to Dec. 2007. The results indicate that total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) average concentrations were 1.49 mg/L and 0.06 mg/L respectively in 2006, which are 2.7 and 2 times those of 2001-2002. The average permanganate index was 3.68 mg/L in 2006 and it is a little higher than that of 2001-2002. Secchi disk depth (SD) was 1.2 m in 2006 and it is 25 cm lower than that of 2001-2002. The average algal biomass of 2006 was 46.39 mg/L. All of these show that Lake Tianmu has been situated meso-eutrophication in 2006 from the meso to meso-eutrophication in 2001-2002. Control measures of Lake Tianmu were put forward according to the joint survey results of water quality, sediments, fishery, plankton, benthos etc. in 2006, which considered exogenous, endogenesis and substance cycle of the lake ecosystem in together. The measures pointed out that it was needed to control the pollution of agriculture, river, tourism, soil and water erosion as well as fishery etc. in order to increase SD of the reservoirs. TN and TP average concentrations in 2007 were 1.25 mg/L and 0.05 mg/L respectively, and the average algal biomass of 2007 was 22.56 mg/L. Water quality variation between 2006 and 2007 showed that the control measures had effect on reducing nutrients contents and phytoplankton biomass of the lake.

Key words: eutrophication; Lake Tianmu; nutrients; reservoir; water quality

水库是介于河流和湖泊之间的半人工水体, 是人类水资源利用的重要手段^[1]. 随着全国许多大江大河太湖污染的日益加剧, 水质性缺水问题越来越突出, 水库蓄水作为地区性饮用水源地的地位日显重要^[2,3]. 然而, 当前很多水库与其它天然湖泊一样, 均面临着不同程度的富营养化现象^[4-8]. 通常湖泊富营养化的自然演化过程极其缓慢, 往往需要几百年乃至几千年才能完成, 而人类社会经济活动造成的湖泊富营养化则进展迅速^[9-11]. 水库因生命周期

更短且易受生物非生物因素影响, 其受人为因素的影响较天然湖泊更为严重^[12].

根据王孟等^[13]对长江流域 27 座大型水库富营养化状况的调查结果, 湖泊型水库富营养化的程度要高于河道型水库. 对全国 39 座大、中、小型水库的

收稿日期: 2008-03-29; 修订日期: 2008-06-12

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-419); 国家自然科学基金重点项目(40730529)

作者简介: 高永霞(1980~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为湖泊环境化学与生态修复, E-mail: gyx0813@tom.com

* 通讯联系人, E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn

调查结果^[14]表明,濒临城市和作为水源的水库有不少出现了向富营养化演变的趋势^[15].处于长江中下游地区的天目湖(沙河水库)兼具濒临城市和湖泊型水库的特点,其位于江苏省溧阳市南部丘陵地区,地处东经119°25′,北纬31°18′,湖泊水面面积为12 km²,最大蓄水量约为1.1亿 m³,集水面积148.5 km²^[16],它是溧阳市的主要饮用水水源地,承载着该市50万人的饮用水安全.近年来,随着湖区经济发展,湖泊养殖业的开发,观光旅游业的兴起以及农业面源的污染,导致该湖富营养化有加重的趋势.本试验以天目湖为研究对象,探讨此类水库的富营养化成因,以期为此类水库的富营养化治理提供依据.

1 材料与方法

2001年6月~2002年5月,溧阳市环保局与中国科学院南京地理与湖泊研究所对天目湖进行了为期1 a的逐月生态调查.调查结果显示天目湖水体营养状况全年平均处于中-中富营养化水平^[16].2006年,在2001~2002年水质调查的基础上,再次对天目湖的水质情况进行了每月1次的周年调查.2007年5月~2007年12月又进行了隔月1次的水质调查.调查期间天目湖水位变化约1 m.

1.1 采样点的基本情况

2006~2007年天目湖水质调查中所布设的采样点与2001~2002年对该湖调查时所布设采样点情况一致^[16],即沿天目湖南北向共布设10个采样点.其中下游湖心岛以北3个点(1、2、3号点),上游牛头山以南3个点(8、9、10号点),中间4个点(4、5、6、7号点),如图1所示.其中1号点接近水库大坝的出水口;2号点和3号点分别靠近2个旅游景点区,用于研究旅游压力对水库水质的影响;4号点临近水库的渔业养殖点;6号点和7号点分别位于天目湖抽水蓄能电站抽放水口的下游和上游;8号点和9号点靠近上游的农业区;而10号点位于天目湖最大的入湖河流平桥河的入库口附近.

1.2 水样的采集与分析

采样在每月的中旬进行,整个试验期间10个采样点均采集表层50 cm的水样用于实验室分析.

野外现场测定的指标有水温(t)、透明度(SD)、溶解氧(DO)、pH值.实验室测定的指标为总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数、悬浮物(SS).根据具体情况在2006年7月加测了溶解性氮(DTN)和溶解性磷(DTP),并对1号点按1 m分层采集水样测定了叶绿素含量(Chl-a).

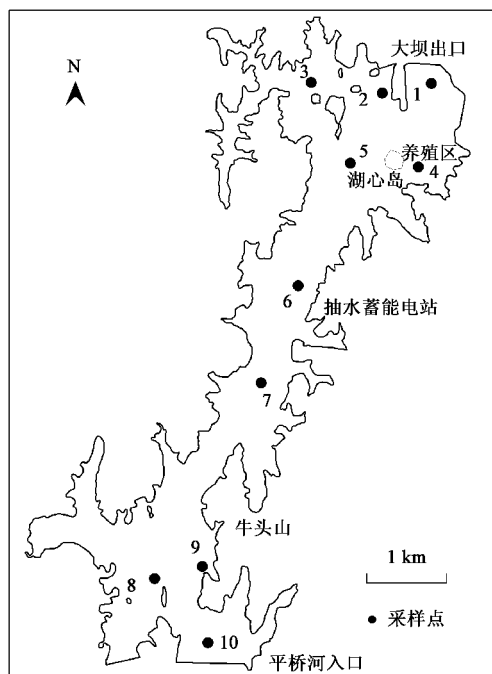


图1 天目湖采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling stations in Lake Tianmu

SD的测定采用赛氏盘;DO采用Hanna-HI9143型溶氧仪或YSI-6600型水质仪现场测定,水温可在溶氧仪表盘上自动显示;pH值采用SHKY E-201-9型pH复合电极测定;TN、TP采用碱性过硫酸钾高温消解后紫外分光光度法和钼酸铵分光光度法测定^[17];DTN、DTP则采用Whatman GF/C膜过滤后的水样加碱性过硫酸钾高温消解,其余步骤同TN、TP;叶绿素用90%丙酮提取后分光光度法进行测定,具体分析方法参见文献^[18].水质富营养化的等级评价参照《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002).

2 结果与讨论

2.1 天目湖水体的富营养化状况分析

2.1.1 水体营养盐含量的变化

2006年全湖TN的年平均浓度为1.49 mg/L,仅达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中的Ⅳ类水质,相当于2001~2002年调查结果(0.54 mg/L)^[16]的2.7倍.2006年各月以及各采样点TN、TP以及高锰酸盐指数浓度见表1.可以看出,5、8、9、10号点的TN年平均浓度均高于1.49 mg/L,总体趋势是北湖(1、2、3号点)比南湖(8、9、10号点)低.位于南湖的8号点和9号点靠近上游农业区,8号点的TN浓度达到1.65 mg/L.而位于天目湖最大的入湖河流平桥河入库口附近的10号点TN平均浓

度竟达到 1.93 mg/L. 2006 年在对天目湖库区调查的同时也对面上几个点进行了调查取样,其中包括平桥河、平桥镇入口、平桥镇出口,表 2 为平桥河与平桥出镇口的一些情况,2006 年平桥河全年的 TN 浓度都远远高于天目湖的 TN 浓度,可见天目湖南

部入湖河流平桥河以及农业面源等外源性污染较重.全年湖水 TN 浓度高于平均值的月份有 2 月、4 月、5 月、6 月、9 月以及 12 月,天目湖一年有半年的时间总氮含量处于Ⅳ类水质,湖水受氮的污染严重.

表 1 2006 年天目湖各月及各采样点 TN、TP 平均浓度以及高锰酸盐指数/mg·L⁻¹

Table 1 Average concentrations of TN, TP and permanganate index at different sampling sites in different months of 2006/mg·L⁻¹

项目	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
TN	0.92	1.91	1.02	2.06	1.77	1.95	1.48	1.06	1.72	1.08	1.21	1.72
TP	0.16	0.08	0.02	0.05	0.06	0.03	0.08	0.04	0.06	0.05	0.04	0.04
高锰酸盐指数	3.51	3.84	3.15	3.56	4.38	4.59	3.99	4.28	3.54	3.15	3.35	2.82

项目	采样点编号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TN	1.39	1.39	1.36	1.39	1.52	1.36	1.45	1.65	1.50	1.93
TP	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07
高锰酸盐指数	3.49	3.44	3.71	3.53	3.55	3.62	3.72	3.83	3.82	4.09

2006 年全湖 TP 的年平均浓度为 0.06 mg/L,按照《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)进行评定属于Ⅲ类水,为 2001~2002 年调查结果(0.03 mg/L)的 2 倍.全湖 TP 与 TN 的变化情况一致,即北湖的浓度稍低于南湖.表 2 中数据显示 2006 年只有 3 月、4 月、5 月、12 月平桥河的总磷含量低于或等于天目湖库区,而其余时间平桥河中 TP 的浓度都远大于天

目湖库区. 2006 年全湖的 TP 平均值总体看变化幅度不大,在 0.05~0.07 mg/L 之间. 1 月份全湖 TP 的平均浓度达 0.16 mg/L,相当于全年平均浓度的 2.7 倍,可见在个别月份总磷对湖水的污染程度相当于总氮.除 1 月 TP 浓度异常高外,2 月和 7 月的 TP 浓度也高于全年平均值.

2006 年 TN/TP 平均值为 25, 2001~2002 年

表 2 平桥河水 TN、TP 浓度以及高锰酸盐指数¹⁾/mg·L⁻¹

Table 2 Concentrations of TN, TP and permanganate index in Pingqiao River/mg·L⁻¹

取样点	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
平桥(TN)	5.88	4.69	2.16	3.75	3.20	4.50	3.92	3.47	5.04	1.83	3.7	4.01
平桥镇出口(TN)	—	—	—	—	—	—	—	4.03	5.13	5.31	7.38	5.15
平桥(TP)	0.27	0.10	0.03	0.05	0.06	0.21	0.11	0.16	0.16	0.10	0.14	0.05
平桥镇出口(TP)	—	—	—	—	—	—	—	0.24	0.18	0.36	0.54	0.14
平桥(高锰酸盐指数)	4.20	3.04	3.82	2.53	3.49	3.84	3.88	3.82	3.82	2.75	4.2	2.38
平桥镇出口(高锰酸盐指数)	—	—	—	—	—	—	—	4.00	4.00	4.99	5.70	2.93

1)“—”表示这些指标没有测定,下同

TN/TP 平均值为 18. Redfield 等^[19]认为浮游植物在光合作用中以吸收一定的 N/P 原子比进行,该比值为 16,当 TN/TP>7 时,则浮游植物生长受磷限制.可以看出天目湖的富营养化进程仍是磷限制型.要想控制天目湖的富营养化进程,关键在于控制磷的污染负荷,包括外源和内源,其中对外源输入的控制是关键. 2006 年 7 月进行了一次溶解性营养盐含量调查,10 个采样点处无论是氮还是磷,其溶解态所占比例都非常高. DTN/TN 的平均值为 80.5%,而 DTP/TP 的平均值也高达 69.2%.这说明天目湖的氮、磷污染很大一部分是以溶解态入湖的,而在治理湖泊以及控制湖泊污染源措施中,溶解态营养盐较颗粒态的更难控制.所以高溶解态的营养盐含量给

天目湖的治理带来了新的挑战.

2.1.2 水体高锰酸盐指数的变化

2006 年天目湖高锰酸盐指数的平均值为 3.68 mg/L,根据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002),它属于Ⅱ类水.由表 1 可以看出,1~10 号点(3 号点除外)高锰酸盐指数基本上呈逐渐升高的趋势,与营养盐在库区的变化趋势相同.比较表 2 中平桥河与平桥镇出口水中的高锰酸盐指数,可以看出平桥河水一年中超出Ⅱ类水的月份仅有 1 月和 11 月,对照平桥河水中营养盐含量与天目湖库区营养盐含量其污染不是主要的,但大部分月份(1 月、3 月、6 月、7 月、8 月、9 月、11 月)河水中高锰酸盐指数仍稍高于天目湖库区.天目湖南部的水深小于北部水

深(2006 年 1 号点平均水深 9.6 m, 2 号点平均水深 8.3 m, 3 号点平均水深 6.1 m, 8 号点平均水深 5.7 m, 9 号点平均水深 3.1 m, 10 号点平均水深 3.4 m), 这可能是 1~10 号点高锰酸盐指数这种变化趋势的一个原因, 而降低农业面源和入湖河水中有有机质含量无疑会缓解天目湖水的富营养化进程. 3 号点的高锰酸盐指数的年平均值明显高于相邻的 2 号点和 4 号点, 可见旅游业带给湖水的有机污染不容忽视. 2006 年 5、6 月有机质污染最为严重, 而 2006 年 5 月的藻类生物量为 127 mg/L, 也是调查期间最高的月份.

2.1.3 水体悬浮物浓度(SS)以及透明度(SD)的变化

2006 年天目湖水体悬浮物(SS)的全年平均值为 6.80 mg/L, 水体透明度(SD)的平均值为 1.2 m, 比 2001~2002 年全湖年平均透明度 1.45 m^[16]下降了 25 cm. 但相对于太湖来讲, 天目湖的透明度还是比较高的, 按照湖泊富营养化等级划分处于中营养状态. 将 2006 年天目湖水体 SD 与 SS 的变化情况进行比较, 如图 2(a)所示, 可以看出天目湖水由北向南越来越浑, 3 号点比临近的 2 号点和 4 号点 SD 明显下降, 可见旅游业会对水体的透明度造成影响. 7 号点由于处于天目湖抽水蓄能电站放水口的上游且此处水比较浅(平均水深 6.2 m), 故水动力作用可能

会扰动湖底物质, 从而使 7 号点的 SS 浓度比较高而 SD 降低. 8、9、10 号点的 SD 平均值分别为 90、90、80 cm, 明显低于全湖平均透明度. 分析可知天目湖由北向南透明度逐渐降低, 这是水土流失、农业面源、河流外源、旅游业以及抽水蓄能电站综合影响的结果. 就全湖 10 个采样点来讲, 凡是悬浮物浓度高的地方, 透明度降低, 即 SD 随 SS 升高而降低, 相关系数 $R = 0.94$, 见图 2(b). 将不同月的 SS 及 SD 进行比较得出 2006 年 3 月水体透明度最高(同 2001~2002 年调查结果), 2006 年与 2007 年水体透明度的最低值均出现在 9 月, 而 2001~2002 年调查中透明度的最低值出现在 11 月. 一般来讲, 水体透明度除了受浮游植物影响外, 湖水颜色、溶解物质和其它悬浮物质对光的吸收系数也是不能忽视的. 而图 2 表明天目湖水体透明度主要受悬浮物质影响, 故在进行流域管理时应制定措施降低湖水中的悬浮物质含量以提高水体透明度, 主要是退耕还林、退耕还草以增加土地涵养量, 控制湖区周围的房地产开发、恢复上游湿地以减少水土流失.

将本研所得到的 2006 年天目湖水质状况与 2001~2002 年溧阳市环保局及中国科学院南京地理与湖泊研究所联合调查所得的水质结果作一比较(表 3), 可以看出天目湖已经由 2001~2002 年的中-

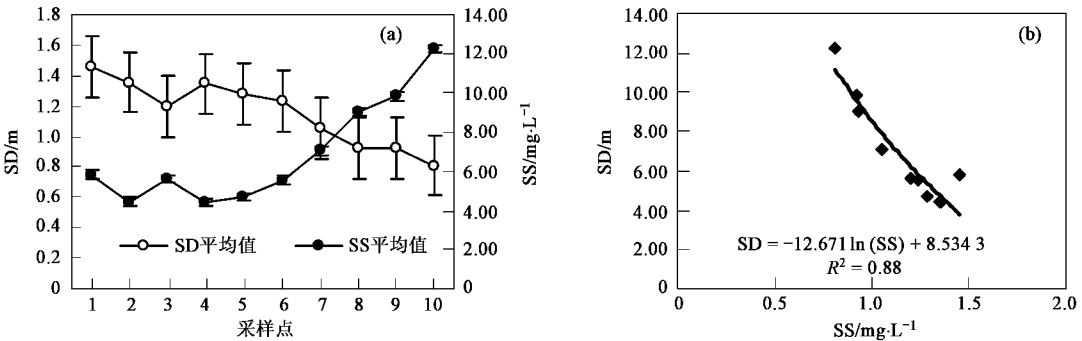


图 2 天目湖各采样点 SD 与 SS 的变化

Fig.2 Variations of SD and SS in different sampling stations of Lake Tianmu

表 3 2006 年与 2001~2002 年天目湖水质比较

Table 3 Water quality of Lake Tianmu comparison between 2006 and 2001-2002

指标	Chl-a/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	SD/m	TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	高锰酸盐指数/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	综合评定结果
2001~2002 年各指标平均值	—	1.45	0.03	0.54	3.22	—
2001~2002 年水体营养程度	贫营养	中营养	中-中富	中营养	中营养	中-中富营养
GB 3838-2002 水质评价结果	—	—	超Ⅱ类	超Ⅱ类	Ⅱ类	—
2006 年各指标平均值	8.82	1.2	0.06	1.49	3.68	—
2006 年水体营养程度	中富营养	中营养	中富营养	中富营养	中营养	中富营养
GB 3838-2002 水质评价结果	—	—	超Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅱ类	—

中富营养化状态转变为 2006 年的中富营养化状态。

除了对水质的调查外,中国科学院南京地理与湖泊研究所还做了其它方面的调查,包括沉积物(2006 年 9 月和 2007 年 6 月)、渔业生产、浮游生物以及底栖生物调查等.综合调查结果显示,天目湖水质由 2001~2002 年的中-中富营养状态演化为 2006 年的中富营养化状态的主要原因在于:①旅游业发展对湖泊污染严重;②沿湖房地产过度开发,造成湖区周围水土流失严重,导致湖泊中悬浮物质含量增加、水体透明度下降;③农业开发面积 > 12 km²,导致土地涵养量严重下降;④鲢鱼、鳙鱼同属于滤食性鱼类,而鳙鱼以浮游动物为主要食物,鲢鱼以浮游植物为只要食物.自然水体中,鲢、鳙鱼之比为 7:3 或 8:2.鳙鱼是天目湖名菜“砂锅鱼头”的主要原料,天目湖因此而过度放养鳙鱼,人为地打破了鲢、鳙鱼之合理比例,致使鲢鱼、鳙鱼年总产量过高且两者比例失调,浮游植物的生长失控;⑤天目湖作为深水湖泊,其温度分层现象导致湖泊底层出现厌氧情况,从而导致有机质在湖底堆积.加之滤食性鱼类鲢、鳙鱼总产量过高且比例失调而产生过高的藻类生物量,这些原因致使湖泊表层沉积物有机质含量高,使天目湖内源污染负荷严重.

2.2 天目湖 2006 年与 2007 年水质状况比较

2007 年 5、7、9、11 月在天目湖又重复进行了 2006 年的调查工作,结果如图 3 所示.图 3(a)和图 3(b)表明 2007 年这 4 个月天目湖水体中 TN 和 TP 均有所降低,而 SS 含量却有所升高[图 3(c)],随着 SS 的升高 2007 年水体透明度稍有降低[图 3(d)],这印证了文中 2.1.3 以及 2.1.1 的结论,天目湖水体透明度主要受水中悬浮物浓度的影响,两者关系密切;天目湖的氮、磷污染很大一部分是以溶解态存在的.图 3(e)显示 2007 年这 4 个月水中高锰酸盐指数稍高于 2006 年同期值.

中国科学院南京地理与湖泊研究所根据 2006 年的调查结果制定并实施了天目湖的治理方案,方案指出治理天目湖要从湖泊的内源、外源、以及湖泊生态系统物质循环三者之间的关系着手:①退耕还草、退耕还林、恢复上游湿地以减少水土流失;提出退渔还湖以降低渔业养殖对湖水造成的污染,这些举措已初步实施;②通过对全湖沉积物分布情况以及对沉积物基本性状、含水率、营养盐含量、有机质含量、粒度等的调查提出了对天目湖沉积物的一期、二期清砂清淤方案,旨在通过减少内源负荷,调节湖泊生态系统生产率与分解率之间的关系,其中一期

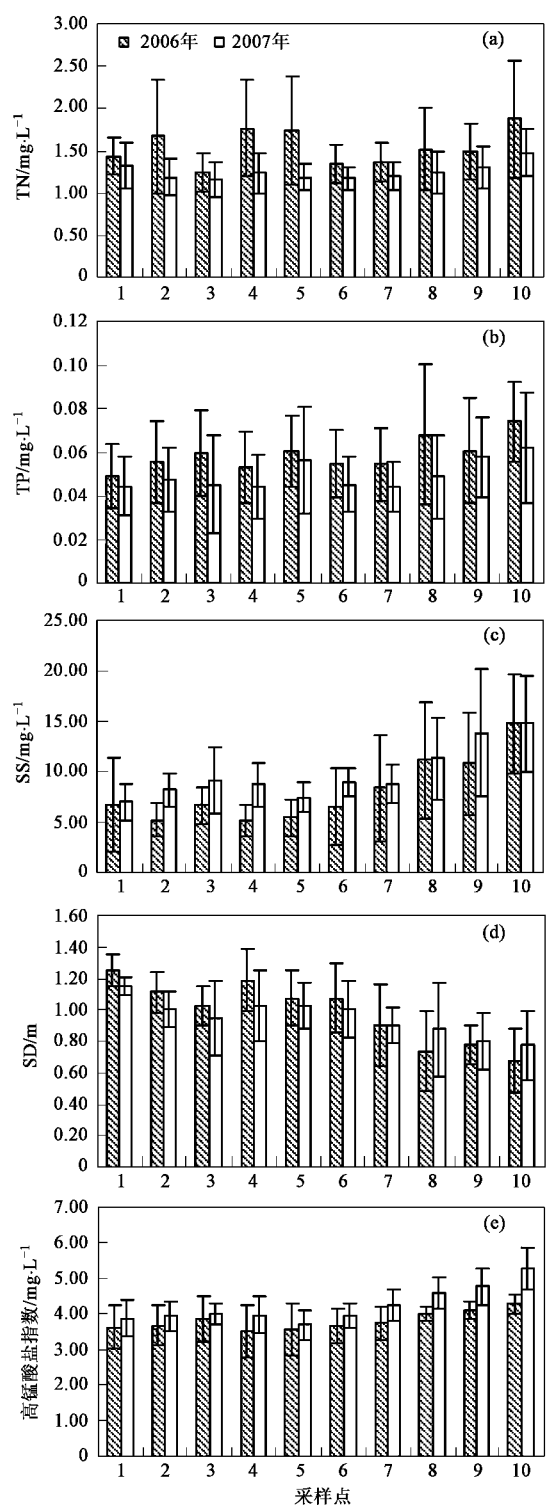


图 3 天目湖 2006 年与 2007 年水质比较

Fig.3 Water quality of Lake Tianmu comparison between 2006 and 2007

清淤工作已完成;③改变湖泊水面经营方式,调整鲢鱼鳙鱼的比例为 7:3,使两者的年总产量在 5 a 之内由 25 万 kg 降到 15 万 kg;④对旅游业实行实际排污量测定,污水集中处理,达标排放.旅游码头应分批搬迁;⑤控制沿湖区的房地产开发;另外,抽水蓄能

电站也自行采取了一定措施防止对湖水以及湖泊生态系统造成不良影响,例如:修建电栅栏、人工鱼礁等。

2006 年与 2007 年天目湖水质的调查结果显示这些措施的实施对水体营养盐含量的降低已初见成效,而对水体悬浮物质含量以及有机质含量的治理效果可能因受退耕还林、退耕还草以及沉积物疏浚等措施的初期影响而具有一定的滞后性,在调查期间尚未有明显改善,还有待于进一步研究。

2006 年 5、7、9、11 月天目湖的藻类生物量平均值分别为 127.23、29.36、20.50 和 8.48 mg/L。而 2007 年相同月份再次测定天目湖的藻类生物量平均值分别为 54.33、20.67、9.88、5.36 mg/L。2007 年水体藻类生物量较 2006 年平均降低了 43.9%。本研究中藻类生物量随水体营养盐含量的降低而降低,这与很多前人的研究结果^[20~24]不同,他们的研究结果表明一些水库的营养盐负荷量降低后,浮游藻类的生物量并不会很快相应地减少,而是滞后很多年或是根本不会降低。Hom^[25]的研究指出水库中浮游藻类生物量的决定因素是气候条件。2006~2007 年天目湖中藻类生物量对水体营养盐变化的这种响应可能主要得益于对滤藻性鲢、鳙鱼类的有效调控。

3 结论

(1)将 2006 年与 2001~2002 年天目湖水体中营养盐含量比较可知,天目湖已经由 2001~2002 年的中-中富营养化状态转变为 2006 年的中富营养化状态。湖水受湖区附近农业面源、上游水土流失以及平桥河等外源污染严重,且这些输入湖泊的营养盐又以溶解态为主要形式,这为湖泊的富营养化治理带来困难。TN/TP 由 2001~2002 年的 18 变为 2006 年的 25,可以看出天目湖的富营养化进程仍是磷限制型。控制天目湖的富营养化进程,关键在于控制磷的污染负荷,且对外源输入的控制是关键。

(2)2006 年天目湖不同采样点处水体中高锰酸盐指数比较可知,旅游业对天目湖水体中有机质含量影响显著,应采取措施严格限制旅游业向湖泊中排放污染物质。

(3)2006 年天目湖水体透明度较 2001~2002 年降低了 25 cm,影响湖水透明度的主要原因是湖水中的悬浮物质含量(相关系数 $R = 0.94$),在进行流域管理时应制定措施降低入湖的悬浮物质含量以提高水体透明度。

(4)将 2007 年与 2006 年天目湖的水质参数比

较可知,天目湖治理方案的实施对水体营养盐含量的降低已初见成效,而对水体悬浮物质含量以及有机质含量的治理效果可能因受退耕还林、退耕还草以及沉积物疏浚等措施的初期影响而具有一定的滞后性。藻类生物量随营养盐含量的降低而降低,这种响应关系的原因可能在于治理方案中对滤食性鱼类鲢、鳙鱼的有效调控。

参考文献:

- [1] 刘军,林叔忠,胡和平. 水源水库富营养化问题及生态治理途径[J]. 水利渔业, 2007, 27(5): 75-77.
- [2] 张运林,陈伟民,周万平,等. 2001~2002 年天目湖(沙河水库)浮游植物的生态学研究[J]. 海洋湖沼通报, 2006, (2): 31-37.
- [3] 吴建丰,陈泽民. 天目湖富营养化现状研究[J]. 污染防治技术, 2006, 19(6): 23-25.
- [4] 刘晓端,葛晓立,杜桂森,等. 密云水库内湖富营养化现状分析[J]. 湖泊科学, 2002, 14(4): 331-336.
- [5] 李春艳,华德尊. 二龙山水库水体富营养化的研究[J]. 环境科学研究, 2002, 15(3): 1-6.
- [6] 林秋奇,胡韧,段舜山,等. 广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物的响应[J]. 生态学报, 2003, 23(6): 1101-1108.
- [7] González E J, Ortaz M, Peñaherrera C, *et al.* Physical and chemical features of a tropical hypertrophic reservoir permanently stratified[J]. Hydrobiologia, 2004, 522 (1-3): 301-310.
- [8] Zalewski M. Minimising the risk and amplifying the opportunities for restoration of shallow reservoirs[J]. Hydrobiologia, 1999, 395/396: 107-114.
- [9] 世界经济合作与发展组织编,柳健生等译. 水体富营养化监测、评价与防治[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1989.
- [10] Matsumura-Tundisi T, Hino K, Claro S M. Limnological studies at 23 reservoirs in Southern part of Brazil[J]. Verh Int Ver Limnol, 1981, 21: 1040-1047.
- [11] Jorgensen S E, Vollenweider R A. Principles of Lake Managements [M]. International Lake Environment Committee and United Nations Environment Programme, 1988.
- [12] Wang S H, Huggins D G, Frees L, *et al.* An integrated modeling approach to total watershed management: water quality and watershed assessment of Cheney Reservoir, Kansas, USA [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2005, 164(1-4): 1-19.
- [13] 王孟,郭红娟,马经安. 长江流域大型水库富营养化特征及成因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(5): 477-481.
- [14] 国家环保总局科技标准司. 中国湖泊富营养化及其防治研究 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2001. 23-28, 98-103.
- [15] 马经安,李红清. 浅谈国内外江河湖库水体富营养化状况[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(6): 575-578.
- [16] 张运林,陈伟民,杨顶田,等. 天目湖 2001~2002 年环境调查及富营养化评价[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(1): 100-103.
- [17] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京:中国环境科学出版社, 1990. 160-164.
- [18] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京:中国标准出版

社, 1999. 77-79.

[19] Redfield A C, Ketchum B H, Rechards F A. The influence of organisms on the composition of sea-water [A]. In: Hill M N(ed). The Sea[C]. New York: Interscience, 1963. 26-77.

[20] Dokulil M T. Long-term response of phytoplankton population dynamics to oligotrophication in Mondsee, Austria [J]. Verh Int Ver Limnol, 1993, **25**(1): 657-661.

[21] Krienitz L, Kasprzak P, Koschel R. Long term study on the influence of eutrophication, restoration and biomanipulation on the structure and development of phytoplankton communities in Feldberger Haussee (Baltic Lake District, Germany) [J]. Hydrobiologia, 1996, **330**: 89-110.

[22] Güde H, Rossknecht H, Wagner G. Anthropogenic impacts on the trophic state of Lake Constance during the 20th century [J]. Arch Hydrobiol, 1998, **53**: 85-108.

[23] Komárkova J, Vyhňálek V. Long-term changes in chlorophyll concentration and phytoplankton structure in two canyon-type reservoirs [J]. Int Rev Hydrobiol, 1998, **83**: 421-430.

[24] Bürgi H, Stadelmann P. Change of phytoplankton composition and biodiversity in Lake Sempach before and during restoration [J]. Hydrobiologia, 2002, **469**(1-3): 33-48.

[25] Horn H. The relative importance of climate and nutrients in controlling phytoplankton growth in Saldenbach Reservoir [J]. Hydrobiologia, 2003, **504**(1-3): 159-166.