

天目湖水体与沉积物中营养盐时空分布及成因

贺冉冉¹,高永霞²,王芳²,朱广伟²,陈伟民²

(1.南京农业大学资源与环境科学学院环境工程系,江苏 南京 210095;2.中国科学院南京地理与湖泊研究所,江苏 南京 210008)

摘要 采用现场监测及实验室分析方法,2006年对天目湖水体和沉积物营养盐等进行了调查。结果发现,天目湖水体中营养盐浓度影响最大的是上游流域输入,冬季天目湖上游输入的颗粒物是导致水体营养盐尤其是TN水平升高的主要因素,而在夏季,水体中营养盐以溶解态为主,天目湖的营养类型是磷限制。表层沉积物营养盐含量最高的点位是下游靠近大坝取水口附近,表层沉积物N、P含量明显高于其下各层,尤其对于营养盐含量较高的点位。研究表明,作为一个兼顾饮用水源地和旅游功能的水库,上游流域综合保护、水库渔业调控及旅游活动的进一步规范是控制天目湖富营养化的关键。

关键词 水库;富营养化;饮用水源地;内源;营养盐

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)02-0353-08

Spatial-temporal Distribution of Nutrients and Its Causation in Tianmu Lake, China

HE Ran-ran¹, GAO Yong-xia², WANG Fang², ZHU Guang-wei², CHEN Wei-min²

(1.College of Resource and Environment Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract The concentrations of nutrients in water and sediment, such as nitrogen, phosphorus and organic matter, were investigated during 2006 in Tianmu Lake, a reservoir which was the main drink water resource and recreation place in Liyang City, Jiangsu Province, China. Up-stream input had strong influence on nutrients concentrations in the reservoir. On the other hand, contributions from the tourism and real-estate construction around the reservoir were also very significant. In winter, the particulate nutrients from upstream were the main sources of the nutrients in the lake. However, most of the N and P in lake were presented as dissolved form in summer, indicating the strong influence from fishery and tourism. The annual mean value of nitrogen/phosphorus ratio in water was 33, suggested that the eutrophication of the lake was phosphorus limited. Nutrients contents in top layer sediments were significantly higher than those in deeper layers, especially in the outlet area. The research suggested that environment protection in the catchments, fishery adjust, as well as tourism control were very important for the eutrophication control of Tianmu Lake.

Keywords reservoir; eutrophication; drink water source; internal loading; nutrients

长江中下游地区是我国湖泊分布最为集中的地区。由于人为干扰十分的强烈,导致了这一地区大量的湖泊出现了富营养化状况^[1]。以太湖为例,1997年以后水体的总氮、总磷及叶绿素a含量等指标均呈恶化的趋势^[2]。2007年爆发的太湖饮用水危机事件也表明了目前水质型缺水问题的严重性^[3]。在这种情况下,

水库作为地区性饮用水源地的作用就日渐突出^[4]。水库作为人工调节能力更强的水体,已经成为地方供水的基本保障线。长江流域是我国各类水库比较集中的地区,已经建成了各类水库4.8万座,其中大型水库157座,中型水库1025座^[5]。

但是目前来看,水库也面临着长江中下游天然湖泊所面临的同样的问题^[5]。与天然浅水湖泊相比,水库的富营养化规律有其自身特点。首先,水库由于具有相对简单的流域水系,集水区面积相对较小,此外,水库的换水期较短,这样,流域的状况,如上游入库水体的水质状况对水库水质的影响就会相对比较大一些^[6]。

收稿日期:2008-03-25

基金项目:中国科学院知识创新工程方向性项目(KZCX2-YW-419);
国家重点基础研究发展计划(2008CB418103)

作者简介:贺冉冉(1983—)男,安徽蚌埠人,在读研究生。

E-mail:heran198311@163.com

通讯作者:朱广伟 E-mail:gwzhu@niglas.ac.cn

从沉积物对上覆水体的影响方式上来说,浅水湖泊底泥中营养盐向上覆水体的释放很大程度上受到动力扰动的影响^[7],也就是说,水土界面受风浪扰动而导致的沉积物再悬浮是影响水体中营养盐浓度的主要因素。而水库作为深水湖泊,营养盐从底泥的释放主要是以静态释放为主,随着季节变化呈现出周期性变化。并且由于水体分层的存在,阻隔了水柱的垂向交换。这样营养盐的分布会呈现出垂直的差异,导致在分层季节水体下层的营养盐浓度高于上层。这也是在营养盐的内源释放问题上水库自身的特征之一。

近年来,关于天然浅水湖泊富营养化机制的研究较多。相比之下,水库富营养化发生机制的研究就比较少,使得对水库富营养化的防治缺乏理论依据。为此,在2006年我们展开了对天目湖的调查。天目湖位于江苏省溧阳市南部丘陵地区,集水区面积148.5 km²,面积12 km²,最大蓄水量约1.1×10⁸ m³,是江苏省六座大型水库之一。天目湖的富营养化问题发生较早,对其的研究历史也很长^[8]。管理部门采取了较多的治理措施,其中一些治理工程已经结束。但是这些治理的手段效果如何?近年来水质的变化根源何在?这些问题还需要深入的研究。我们希望通过在天目湖水体以及沉积物中营养盐的时空分布规律的研究,更加深入地了解影响天目湖以及类似水库的水体及沉积物中营养盐分布的主要因素,摸清这些水库富营养化发生的机理,为水库的水源保护提供理论指导。

1 调查方法与仪器

水质周年监测的采样点布设10个点(W1~W10),如图1。采样点布设的基本原则是,W1~W3号点位于下游,W1号点接近水库大坝的出水口,W2号和W3号点分别靠近两个旅游景点区,反映旅游开发的压力对水库水质的影响。W5号点临近水库的渔业养殖点。W6号点和W7号点分别位于天目湖抽水蓄能电站抽水口的上下游。W8号点和W9号点靠近上游的农业区。W10号点位于天目湖最大入流平桥河的入库口附近。

监测基本都在每个月的中旬进行。采样点为表层50 cm深度。现场监测指标包括水温、透明度、溶解氧、pH、浊度等,实验室分析指标包括总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸钾指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₄-N)等。7月份增加了溶解性总氮(DTN)和溶解性总磷(DTP)项目。

透明度的测定采用塞氏盘法,溶解氧使用YSI-

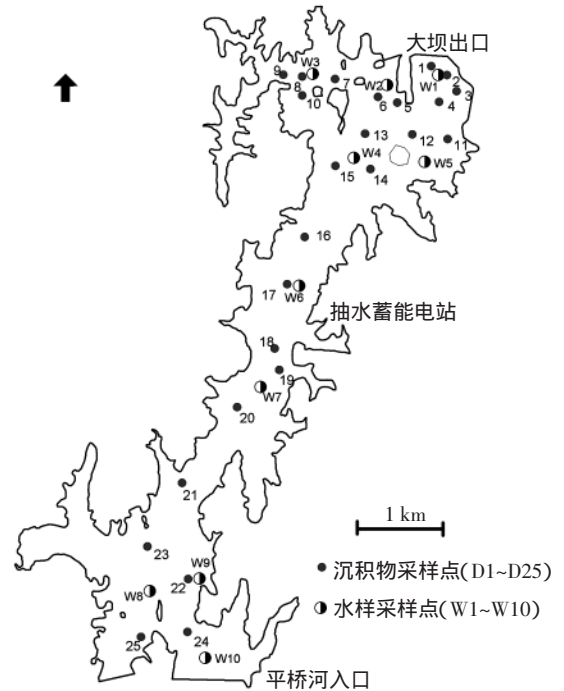


图1 采样点分布

Figure 1 Location of sampling sites

6600型水质仪或Hanna-HI9143型溶氧仪现场测定,水温则用溶解氧探头同时测定,pH和叶绿素浓度采用YSI-6600型水质仪测定,浊度采用Hanna-HI97703-11型浊度仪测定。TN、TP采用碱性过硫酸钾消解后,TN采用210 nm紫外比色法,TP采用钼锑抗显色后700 nm比色测定。DTN、DTP与TN、TP的方法相同,但在消解前用GF/C滤膜现将颗粒物过滤去除。NH₄-N采用System SAN⁺型Skalar流动分析仪测定。所有采样均按照《湖泊生态系统观测方法》中相关项目的监测方法进行^[9]。

9月份的底泥调查采样点的布设如图1,共布置了25个点位(D1~D25),现场记录下了各点的经纬度并绘制在地图上。现场采集的泥样立即用塑料袋封装并编号,留待实验室分析。

2 结果与分析

2.1 水体的物理状况

如表1,天目湖全年的SS值平均值为6.80 mg·L⁻¹,最高值出现在11月份,达到了11.47 mg·L⁻¹,最低值出现在2月份,为3.47 mg·L⁻¹。从pH值来看,有6个月的pH值超过了8(因仪器故障有两个月的pH值缺失)。从已有的透明度数据来看,透明度最高出现在3月份,最低出现在11月份,即SS最高的月份。

热力学分层会影响营养盐在水柱上下层之间的垂向交换。随着温度的升高, 大气的热量传给水体的表面, 再由表面向深处纵传递。当传递到一定深度的时候, 水深向下 1 m, 温度下降 1 °C 以上, 即形成了温跃层。按照张运林等人的报道, 天目湖主要在 3 到 10 月份存在温跃层^[10], 而这次的调查也验证了这一点。值得注意的是不同湖区热力学分层的情况有所不同。天目湖南部水较浅, W9 号点和 W10 号点在大部分时间都维持在 3~4 m 的水平; 而北湖的 W1 号点水深一般维持在 10 m 左右。从图 2 可以看出, 由于南部水体较浅的深度会使温跃层难以形成, 所以与深水区相比南部的几个点位温跃层的持续时间较短。

2.2 水体的营养盐水平

如表 1, 天目湖总氮全年的平均值是 1.49 mg·L⁻¹。其中最高值出现在 4 月, 达到了 2.06 mg·L⁻¹, 其次分别为 6 月和 2 月, 总氮浓度分别为 1.95 和 1.91 mg·L⁻¹。总氮最低值出现在 1 月, 为 0.92 mg·L⁻¹。在全年的 12 个月中, 有 6 个月的总氮浓度高于 Ⅲ类水的标准, 即

1.5 mg·L⁻¹。与 5 年前对天目湖水质的调查结果相比, 天目湖的水质明显下降, 其中问题主要体现在营养盐浓度的升高方面。在 2001—2002 年的调查中, 天目湖总氮的含量有一半的时间高于 Ⅲ类水的标准, 即 0.5 mg·L⁻¹, 处于刚刚进入 Ⅲ类水的阶段^[10]。而这次的调查表明天目湖的总氮在部分时段内甚至已经达到了 Ⅲ类水质标准。

总磷浓度的年平均值为 0.047 mg·L⁻¹。总磷浓度的最高点出现在 7 月份, 达到 0.081 mg·L⁻¹。总磷的年变化趋势与总氮有一定的相似, 都在 3 月份降到谷底 (0.017 mg·L⁻¹)。造成这种情况的原因是在 2 月份下旬到 3 月份是浮游动物生长的旺季, 由于藻类的数量本身并不高, 加上浮游动物的捕食压力, 致使藻类的生物量较少, 进而影响了营养盐的浓度。与 5 年前相比, 总磷的水平也下降了一个等级, 大部分时间处于 Ⅲ类水范围或高于 Ⅲ类水的上临界值。

2.3 沉积物中营养盐的空间分布

在 25 个点位的表层泥样中, 总氮浓度大部分分

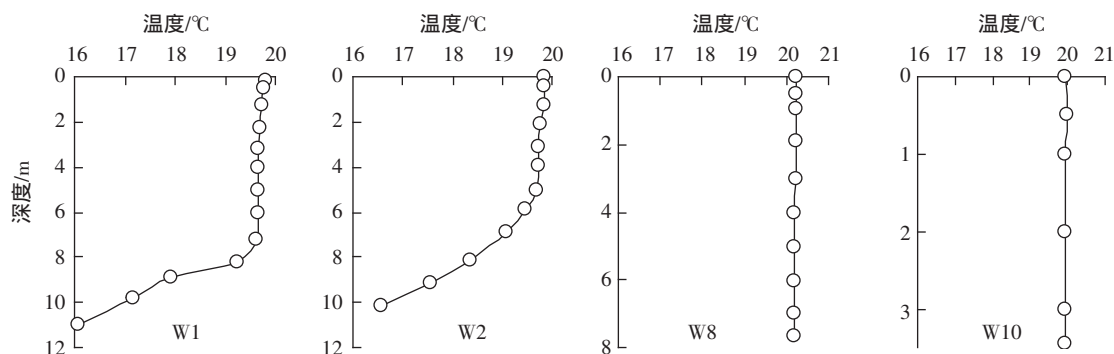


图 2 5 月份天目湖 4 个点位的温度垂向变化

Figure 2 The vertical temperature changes of four sites in May

表 1 天目湖水体的物理及化学状况

Table 1 The physical and chemical conditions of Tianmu Lake

月份	TN/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	SS/mg·L ⁻¹	COD/mg·L ⁻¹	pH	DO/mg·L ⁻¹	透明度/m
1 月	0.92±0.11	0.017±0.002	5.30±0.80	3.51±0.26	7.93±0.12	11.67±0.28	1.4±0.2
2 月	1.91±0.99	0.075±0.012	3.47±1.55	3.84±0.40	8.20±0.06	12.08±0.56	1.5±0.3
3 月	1.02±0.40	0.017±0.002	4.24±1.43	3.15±0.22	8.37±0.06	9.47±0.36	1.7±0.3
4 月	2.06±0.28	0.053±0.010	5.43±2.36	3.56±0.20	7.66±0.58	5.06±0.54	1.3±0.2
5 月	1.77±0.24	0.057±0.010	5.40±3.68	4.38±0.15	8.34±0.30	8.85±0.85	1.0±0.2
6 月	1.95±0.86	0.033±0.005	5.83±0.53	4.59±0.12	8.52±0.16	9.46±0.80	-
7 月	1.48±0.30	0.081±0.015	7.15±2.61	3.99±0.26	8.11±0.32	6.87±1.28	1.2±0.2
8 月	1.06±0.09	0.040±0.008	7.29±2.87	4.28±0.33	-	9.42±0.29	1.1±0.2
9 月	1.72±0.73	0.059±0.010	8.37±4.70	3.54±0.50	-	-	0.9±0.2
10 月	1.08±0.29	0.052±0.014	9.13±5.53	3.15±0.38	7.74±0.19	6.85±1.03	1.1±0.3
11 月	1.21±0.13	0.038±0.009	11.47±5.47	3.35±0.36	7.62±0.32	7.84±0.45	0.8±0.3
12 月	1.72±0.64	0.043±0.005	8.55±1.74	2.82±0.37	8.01±0.37	10.38±0.60	-

于 1 000~4 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均为 2 598 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 3)。沉积物中总氮的最高值出现在下游的 D1 号点, 达到了 9 890 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 其次是 D3 号点, 为 6 253 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。最低值出现在 D8 号点, 为 72 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。最高值和最低值得差异较大, 达到了 136 倍。

TP 的含量大多介于 100~500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均为 323 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从图 3 中可以看出总氮与总磷的空间分布趋势基本一致。总磷的最高值也出现在 D1 号点, 达到了 894 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 其次是 D3 号点, 为 589 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。总磷最低值出现在 D8 号点, 为 117 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

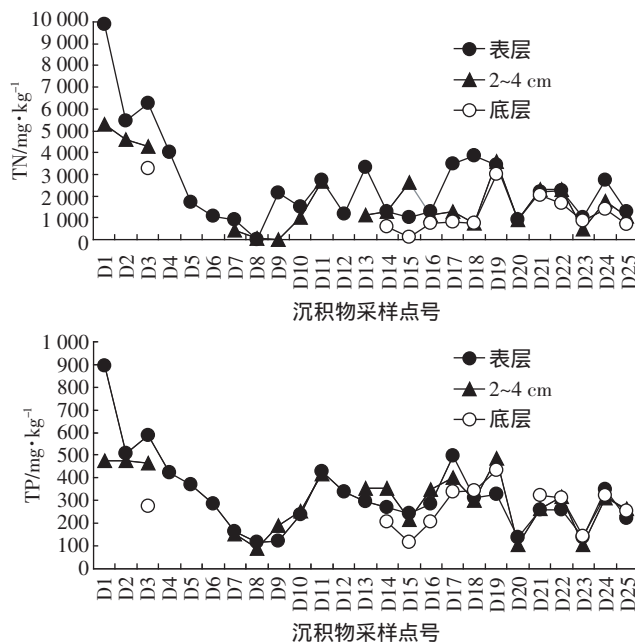


图 3 沉积物 TN、TP 含量比较

Figure 3 Comparison of TN and TP contents in sediment from 25 sites

分析沉积物中营养盐浓度的垂向变化趋势也发现, 表层营养盐含量明显高于其下各层。尤其是对于营养盐含量较高的点位(如下游的几个点), 表层与下层的营养盐含量差别更大。

3 讨论

3.1 水体中 TN 与 TP 来源分析

对于水体中的营养盐来说, 其来源可以是外源的输入, 也可以是沉积物中营养盐的释放。至于何种因素起主导作用, 要根据具体的情况才能够确定。

图 4 对上游 (W8、W9、W10 3 个点位) 和下游 (W1、W2、W3 三个点位) 总氮和总磷的月平均值作了比较。可见在 2006 年大部分时间, 上游的总氮浓度都是明显大于下游的。尤其是在 2 月份, 上游的总氮平

均浓度为 3.29 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 远高于下游的 1.16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。而 6 月份和 9 月份藻类生长旺盛季节, 总氮浓度出现的情况是下游高于上游的。总氮的这种分布趋势与 2001—2002 年张运林等的监测结果比较类似^[8]。与 TN 类似, TP 的空间变化特征也是在大部分时间上游高于下游, 但不如 TN 上下游的差别来的明显。尤其值得注意的是在 4、5 月份的时候, W5 号点的 TP 浓度与其他点位相比明显较高。根据调查的情况来看, 这很可能与 W5 号点附近的渔业养殖等活动有关, 这致使 W5 号点及下游水域的 TP 相对来说较高。

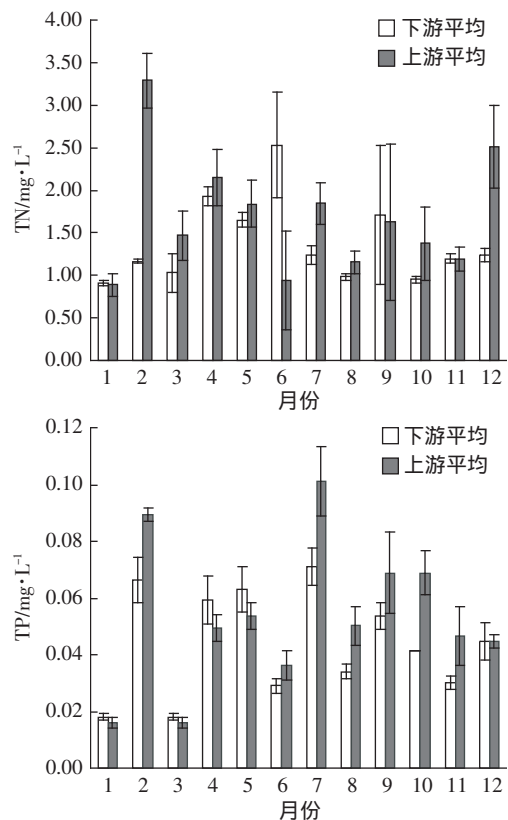


图 4 上游与下游水体营养盐浓度比较

Figure 4 Comparison of nutrient concentrations between upstream sites and downstream sites

全年的大部分时间上游的营养盐浓度高于下游, 可以判断上游输送的营养盐负荷对天目湖营养盐分布起到了极大的影响。从现场观察到的情况判断, W8 号点和 W9 号点附近有农业区, 会产生面源污染; 而 W10 号点位于天目湖最大的平桥河入库口附近, 上游输送的营养盐与水库的营养盐浓度会有很大的关系。总的来说, 对天目湖水体中营养盐贡献最大的是上游入库水体的输入, 下游周边旅游开发的影响也不可忽视。

3.2 水体中营养盐的输送方式

由于水库入口在上游,大坝出口在下游,所以经常会出现从上游到下游的水质变化梯度特点^[11]。这种梯度的变化使水库的上游状况接近于河流,下游则更类似于湖泊^[12]。而这次天目湖水体中悬浮颗粒物(SS)的空间分布也呈现出这种分布特点。上游的泥沙较大,透明度较低,而下游的透明度则相对较大。

不同的季节,悬浮物中有机质的含量多少有很大的区别,这可以从悬浮颗粒物的烧失量(SSLOI)大小上反映出来。夏季水体中 SS 的有机质含量就明显比冬季要高,这是由夏季水体中存在着较多的浮游生物所致。例如在 7 月份全湖 SSLOI 的平均值达到了 88%,而 12 月份只有 26.6%。从空间分布上来看,上游靠近入流的湖区 SSLOI 较下游明显偏低,说明了上游悬浮物中无机颗粒物的比例较大。从对几个主要入流水体的调查反映,悬浮物中有机质的含量与湖区相比明显较低。这说明了一个趋势,对于全年大部分时间来说,天目湖水体中的 SS 很大一部分来自于上游入库水体的输送。上游出现较高的 SS 是入流带来较多的颗粒物所导致,而湖水的稀释作用以及悬浮颗粒物的沉降作用,使得沿着水流方向水体中的悬浮颗粒物含量呈现出下降的梯度。并且可以认为冬季水体中的 SS 主要是外源输入的,而夏季由于生物活动的影响,水体中 SS 中生物颗粒物所占的比例较大。

逐月对 SS 监测值和采样点距离最大入流平桥河入口的直线距离(L)进行回归分析,发现大部分时间存在显著的负相关(图 5)。使用线性、指数函数、幂函数及对数函数进行拟合,比较后发现对数函数的拟合

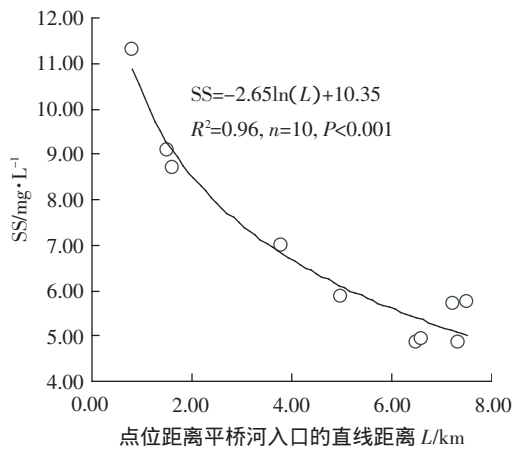


图 5 不同点位的 SS 年均值与点位距平桥河入口直线距离(L)的关系

Figure 5 Correlation between SS concentration and the distance to Pingqiao river mouth(L)of monitoring sites

具有最好的相关性。从季节变化上来看,冬季两者的相关性要好于夏季的,如在 4、5 月份两者就没有什么相关性。这是由于此时浮游生物的生长较为旺盛,水体中 SS 的主要来源不再是外源输送的,所以全湖 SS 的空间分布不再沿着水流方向出现明显的梯度。在图 5 中对 10 个点位的 SS 年均值与采样点距离平桥河入口的距离(L)进行了拟合,两者呈显著负相关($P < 0.001$)。

颗粒物的输送会携带营养盐进入水库,进而影响水库水体营养盐的浓度。以 2 月为例,与 SS 相同, TN 也是沿着水流方向呈现明显下降的梯度。对 TN 与 SS 作相关分析,可以看出 TN 的浓度与 SS 有很明显的相关性($R^2=0.936$, $n=10$, $P < 0.001$)。此外在冬季的其他月份也发现了与 2 月份类似的趋势。为了便于季节比较,选取 1 月、2 月和 12 月代表冬季,6 月、7 月和 8 月代表夏季,分别对全湖 TN 和 SS 的季节平均值进行了回归分析(图 6)。可见在冬季, TN 的浓度与 SS 有呈显著相关性,而夏季就没有什么相关。因为冬季水体中的 SS 主要是外源输入的,这就说明了在冬季天目湖水体中 TN 很大一部分来自于上游颗粒物的输送,致使在这段时间内 TN 在全湖的空间分布与 SS 的分布趋于一致。造成这种结果的原因是在冬季植被

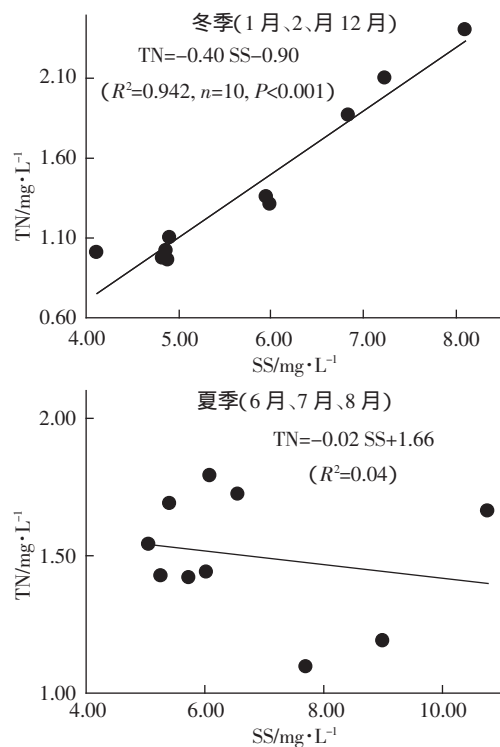


图 6 冬季与夏季 TN 与 SS 的关系

Figure 6 Correlations between TN and SS concentration in winter and summer

表2 七月份水体营养盐浓度及溶解态比例

Table 2 The nutrient concentrations and the dissolved percentage in July, 2006

采样点	TN/mg·L ⁻¹	DTN/mg·L ⁻¹	DTN/TN	TP/mg·L ⁻¹	DTP/mg·L ⁻¹	DTP/TP	TN/TP
W1	1.34	1.29	96%	0.064	0.056	87%	21
W2	1.24	1.06	85%	0.073	0.056	76%	17
W3	1.12	0.76	68%	0.077	0.051	67%	15
W4	1.56	1.30	83%	0.073	0.051	71%	21
W5	1.48	1.27	86%	0.073	0.051	71%	20
W6	1.21	1.02	85%	0.073	0.060	82%	17
W7	1.31	0.93	71%	0.077	0.056	72%	17
W8	1.59	1.21	77%	0.115	0.056	48%	14
W9	1.88	1.28	68%	0.094	0.051	55%	20
W10	2.07	1.79	86%	0.094	0.060	64%	22

覆盖较少,土壤裸露,水土流失比较严重,大量的营养盐随着颗粒物被输送到水体中;而在另一方面,由于在冬季旅游业不太兴旺,下游人为的污染对全湖TN的分布并未起主导作用。相比之下,在夏季影响营养盐分布的因素就要多一些,比如下游旅游区人为的干扰。值得注意的是,对冬季的TP与SS作相关分析,发现并未出现类似于TN与SS那么好的相关性。这可能与上游土壤的氮磷含量有关,导致出现这种情况的原因值得进一步的研究。

在夏季情况则有所不同。在7月份做了一次溶解态营养盐含量的调查。根据对入流水体的调查,发现几个入流水体的DTN/TN比平均接近100%(表2),也就是说在上游外源输入的TN中绝大多数是溶解态的。同时全湖的DTN/TN平均也达到了81%。TP的情况与TN类似,几个入库河流水体的DTP/TP平均值达到了71%,而全湖的DTP/TP平均值也达到了69%。这说明了在夏季,天目湖水体中的N、P很大一部分是以溶解态的形式输入的,这部分营养盐不易沉降,较易于生物利用。

值得关注的是,溶解性氮、磷比例较高的W1、W2号点靠近旅游活动区,而W4、W5、W10号点附近有渔业养殖活动,说明旅游和养殖也对溶解性营养盐有贡献。

3.3 水体中的氮磷比

分析7月份天目湖水体中的氮磷比可以发现(表2),在10个采样点中有3个大于20,只有1个点小于15,平均值达到18,溶解态的氮磷比更高,平均值达到了22。全年氮磷比的平均值达到了33。这说明了天目湖是磷限制型的水库。我们分析了从6月份到10月份水体中悬浮的颗粒有机质的含量与TN、TP的相

关性,发现与TN相比,有机颗粒物的含量与TP显示出更好的相关性。对10个点位的有机颗粒物和TP浓度5个月(6月到10月)的平均值作回归分析,发现显著的相关性,相关式为:

$$\text{有机颗粒物}(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}) = 103.48 \times \text{TP}(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}) - 0.72$$

$$(R^2=0.873, n=10, P<0.001)$$

相比之下,有机颗粒物与TN就没有什么相关性($R^2=0.024$)。由于水体中悬浮的有机颗粒物的量基本上可以反映出浮游生物的多少,这也说明了对于浮游生物的生长,天目湖的水体是磷限制的。所以控制天目湖的富营养化,控制磷的负荷极其重要。

3.4 沉积物中营养盐的空间分布特征

分析调查点位沉积物的烧失量,发现烧失量与营养盐的浓度有着同样的水平和垂直分布趋势。由图7可知,对TN、TP与烧失量作相关分析,发现在沉积物中TN、TP与烧失量有着很好的相关性,这与以前一些文献的报道一致^[13]。由于烧失量的大小基本上可以反映出底泥中有机质的多少^[14],这就说明了沉积物中营养盐主要是以有机态的形式存在的,有机物的空间分布决定着营养盐的分布。

从表层沉积物烧失量的大小来看,上游靠近湿地的4个点(D22、D23、D24、D25)烧失量的平均值仅有4.47%,而下游靠近大坝取水口的4个点烧失量的平均值达到了10.17%,尤其是D1号点,达到了16.19%。这说明上游表层沉积物中有机质的含量较少,而下游沉积物中有机质的含量较高。从现场的观察来看,靠近取水口的几个点的沉积物都有2~3cm的黑色的浮泥,而上游点位的沉积物表层则多为砂土或粘土。这些点位沉积物砂的含量较大反映了水体较大的流动强度和浑浊度^[15],说明了不同湖区的沉积条件的不

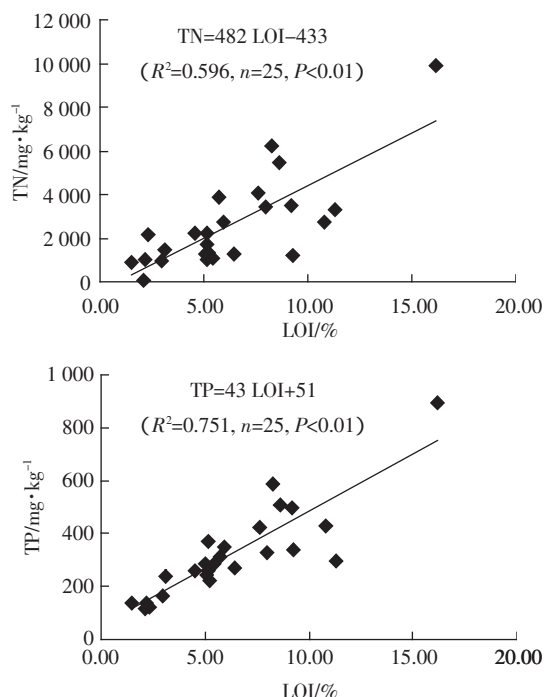


图 7 沉积物 TN、TP 含量与烧失量的关系

Figure 7 Correlations between TN and TP contents and LOI in sediments

同。此外，D7、D8、D9、D10 所在的湖区也有入库水体，所以烧失量也很低，平均值仅为 2.6%。

沉积物中有机质的来源大致可以分为内源输入和外源输入^[16]。内源输入的有机物是指由水体生产力本身产生的动植物残体、浮游生物及微生物的沉积而产生的沉积物，外源输入的有机质是通过外界水源补给过程中带来的颗粒态或溶解态有机物。大体来说，水库根据水力学和水文学特征可以分为河流区、过渡区和湖泊区^[17]。对于天目湖来说，上游 D21 到 D25 5 个点所在的区域以及 D7、D8、D9、D10 所在的湖区，由于河流带来大量的悬浮物，导致泥沙量较大，透明度较低，具有河流的特征。而下游的 D1 到 D6 6 个点以及 D11、D12、D13 这些点位所在的区域，由于水流较缓，透明度较高，具有湖泊的特征。在河流区，入流水体带来的颗粒物大量在此沉积，所以说外源性颗粒物的沉积是上游沉积物来源的主要部分。由于农村河流输送的颗粒物有机质的含量较低，这就使沉积物中有机质的含量相对较小。而下游沉积物的来源主要是以内源输入为主，也就是说主要来源于水体中动植物残体及浮游生物的沉积。从沉积条件上来说，下游水体受到的扰动较少，温跃层的存在也使得有机颗粒物易于沉降。此外，下游旅游区人为的排污会导致水体

有机质的增加，进而影响沉积物中有机质的含量。这些因素导致了下游沉积物中有机质的含量相对比较大，也就导致了较高的营养盐含量。

如上所述，与水体的营养盐空间分布情况不同，天目湖底泥中营养盐的空间分布是下游取水口附近明显高于上游。天目湖水体中与沉积物中营养盐的分布并不一致，这一点与一些文献中对浅水湖泊的报道有所区别。例如朱广伟等对长江中下游地区湖泊底泥和上覆水体的研究中发现，底泥与上覆水体中的总磷有着显著的相关性^[13]。谢丽强等对武汉东湖的研究中也发现，6 个采样站底泥中总磷的年平均含量与湖水中总磷的年平均浓度之间具有极好的相关关系^[18]。从这里可以看出水库（深水湖泊）与浅水湖泊在富营养化发生的方式上的一些区别。对于浅水湖泊，沉积物由于受到扰动，营养盐的释放会极大地影响上覆水体营养盐的浓度^[7]，而对于水库，沉积物中营养盐的释放主要以静态释放为主，也就是通过自然形成的向上的浓度梯度进行，或者是受到底栖动物扰动而发生。这样水库沉积物的释放对上覆水体中营养盐浓度造成的影响就不及浅水湖泊来的明显，水体营养盐浓度相对更加依赖于流域输入。

3.5 天目湖的富营养化状态

应用综合营养指数法对 7 月份 10 个点位的富营养化状况作了个评价，计算了综合营养指数值（TLI），如图 8 所示。其中 $TLI < 30$ 为贫营养， $30 < TLI \leq 50$ 为中营养， $50 < TLI \leq 60$ 为轻度富营养， $60 < TLI \leq 70$ 为中度富营养， $TLI > 70$ 为重度富营养^[19]。可见有 6 个点位已经达到了轻度富营养的状态，而其余几个点也已经接近富营养的临界值。

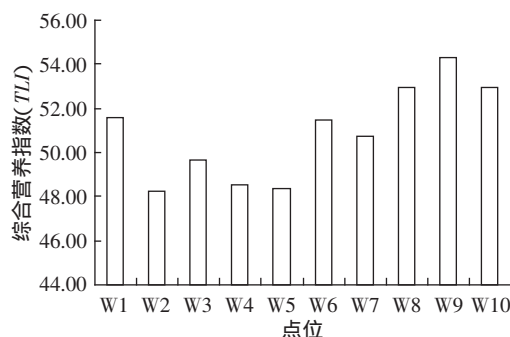


图 8 7 月份天目湖水质的综合营养指数(TLI)评价

Figure 8 Trophic state index of the 10 sampling sites in July

参考文献：

- [1] QIN Bo-qiang, ZHU Guang-wei. The nutrient forms, cycling and exchange flux in the sediment and overlying water system in lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *Science in China* :

- Series D Earth Sciences*, 2006, 49(S1) :1-13.
- [2] 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1) : 21-26.
ZHU Guang-wei. Eutrophic status and causing factors for a large, shallow and subtropical Lake Taihu, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(1) :21-26.
- [3] YANG Min, Yu J, Li Z, et al. Taihu Lake not to blame for Wuxi's woes[J]. *Science*, 2008, 319 :158.
- [4] JIA Hai-feng, CHENG Sheng-tong, XIAO Yang. Development and application of a GIS database for the Miyun Reservoir water quality protection[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 1999, 11(4) :485-491.
- [5] 王孟, 邬红娟, 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.
WANG Meng, WU Hong-juan, MA Jing-an. Causes and characteristics of the eutrophication in large reservoirs in the Yangtze basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(5) :477-481.
- [6] De Ceballosa B S O, Königa A, De Oliveira J F. Dam reservoir eutrophication: A simplified technique for a fast diagnosis of environmental degradation[J]. *Water Research*, 1998, 32(11) :3477-3483.
- [7] QIN Bo-qiang, HU Wei-ping, GAO Guang, et al. Dynamics of sediment resuspension and the conceptual schema of nutrient release in the large shallow Lake Taihu, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(1) : 54-64.
- [8] 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) :99-103.
ZHANG Yun-lin, CHEN Wei-min, YANG Ding-tian, et al. Main physical and chemical factors in Tianmuhu Lake, with evaluation of eutrophication from 2001 to 2002[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(1) :99-103.
- [9] 陈伟民, 黄祥飞, 周万平, 等. 湖泊生态系统观测方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
CHEN Wei-min, HUANG Xiang-fei, ZHOU Wan-ping, et al. Lake Ecosystem observatory methods[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2005.
- [10] 张运林, 陈伟民, 杨顶田, 等. 天目湖热力学状况的监测与分析[J]. 水科学进展, 2004, 15(1) :61-67.
ZHANG Yun-lin, CHEN Wei-min, YANG Ding-tian, et al. Monitoring and analysis of thermodynamics in Tianmuhu Lake[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(1) :61-67.
- [11] 边金钟, 王建华, 王洪起, 等. 于桥水库富营养化防治前置库对策可行性研究[J]. 城市环境与城市生态, 1994, 7(3) :5-10.
BIAN Jin-zhong, WANG Jian-hua, WANG Hong-qi, et al. Practicality of pre-dam for eutrophication control in Yuqiao Reservoir[J]. *Urban Environment and Urban Ecology*, 1994, 7(3) :5-10.
- [12] 邬红娟, 胡传林, 张庆. 不同夏季水位时黑龙滩水库的理化性状[J]. 水生生物学报, 2000, 24(1) :36-41.
WU Hong-juan, HU Chuan-lin, ZHANG Qing. Physicochemical characters at different summer water levels in Heilongtan Reservoir[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, 24(1) :36-41.
- [13] ZHU Guang-wei, QIN Bo-qiang, ZHANG Lu. Phosphorus forms and bioavailability of lake sediments in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *Science in China (Series D Earth Sciences)*, 2006, 49(S1) :28-37.
- [14] Dean W E. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: Comparison with other methods [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1974 :44 :242-248.
- [15] 刘红, 何青, 王元叶, 等. 长江口表层沉积物粒度时空分布特征[J]. 沉积学报, 2007, 25(3) :445-455.
LIU Hong, HE Qing, WANG Yuan-ye, et al. Temporal and spatial characteristics of surface sediment grain-size distribution in Changjiang estuary[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(3) :445-455.
- [16] 朱广伟, 陈英旭. 沉积物中有机质的环境行为研究进展[J]. 湖泊科学, 2001, 13(3) :272-279.
ZHU Guang-wei, CHEN Ying-xu. A review of geochemical behaviors and environmental effects of organic matter in sediments[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2001, 13(3) :272-279.
- [17] Thornton K W, et al. Reservoir limnology[M]. John Wiley & Sons Inc, 1989.
- [18] 谢丽强, 谢平, 唐汇娟. 武汉东湖不同湖区底泥总磷含量及变化的研究[J]. 水生生物学报, 2001, 25(4) :305-310.
XIE Li-qiang, XIE Ping, TANG Hui-juan. The concentration and dynamics of sediment phosphorus in various lake regions of Lake Donghu[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2001, 25(4) :305-310.
- [19] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002, 18(5) :47-49.
WANG Ming-cui, LIU Xue-qin, ZHANG Jian-hui. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2002, 18(5) :47-49.

致谢:天目湖旅游度假区管委会在经费资助、采样等方面提供了大量帮助,表示感谢!