

文章编号: 1672-9250(2005)01-0063-05

太湖水体溶解营养盐(N、P、Si)的冬、夏二季变化特征及其与富营养化的关系

李 军^{1, 2}, 刘丛强¹, 王仕禄¹, 周志华^{1, 2}, 朱兆洲^{1, 2}, 肖化云¹

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 先后于冬季(2003年1月)和夏季(2003年7月)对太湖水体溶解营养盐的组成进行了调查, 分析了营养盐在湖水中的分布规律, 初步探讨了太湖浮游植物营养盐限制因子的季节变化特征。结果显示: 太湖溶解无机氮、磷、硅夏季比冬季略高一点, 主要来自流域外源输入和湖泊内源释放, 分布趋势受人活动大小和湖泊自身特点的影响。

关键词: 冬季; 夏季; 太湖; 水体; 溶解营养盐

中图分类号: X142 **文献标识码:** A

太湖位于长江中下游地区, 是我国第三大淡水湖, 面积约 2 338 km², 平均水深 1.9 m, 最大水深 3.4 m。太湖周围有无锡、苏州、常州、湖州等城市, 流域工农业发展迅速, 受人为活动影响较大, 水体富营养化严重。太湖具有供水、渔业、航运、防洪、娱乐等重要功能, 对于该区社会稳定和经济发展具有重要作用。20世纪80年代以来, 太湖水体富营养化愈来愈频繁, 持续时间也越来越长, 已经严重影响了流域社会和经济的可持续发展^[1-2]。

本文拟通过对太湖水体溶解营养盐不同季节的对比研究, 分析和评价各种污染源对该湖构成的生态环境压力, 探讨水体营养盐的分布特征和控制因素, 为进一步的污染治理和环境恢复提供可靠的背景资料和理论依据。

1 样品的采集与测试

太湖是一个大型草藻结合型浅水湖泊, 湖流总体流向为西北—东南, 沿此方向湖泊也由藻型湖泊向草型湖泊逐渐过渡, 同时人为污染的程度也在逐渐减小^[3]。根据太湖的水文特征和富营养化程度,

借助全球定位系统(GPS), 在太湖选取6个代表性采样点(图1), 而T1—T6正好也是沿西北—东南分别分布。先后于2003年1月(冬季)和2003年7月(夏季), 利用卡盖式采水器分别对以上点位表层(离水面0.5 m)和底层水样(离水底0.5 m)进行采集。冬季采样时气温较低, 湖面出现少有的全湖封冻现象; 夏季采样时藻类生长旺盛, 湖面出现大面积的蓝藻“水华”, 水体温度较高, 最高可达34℃。

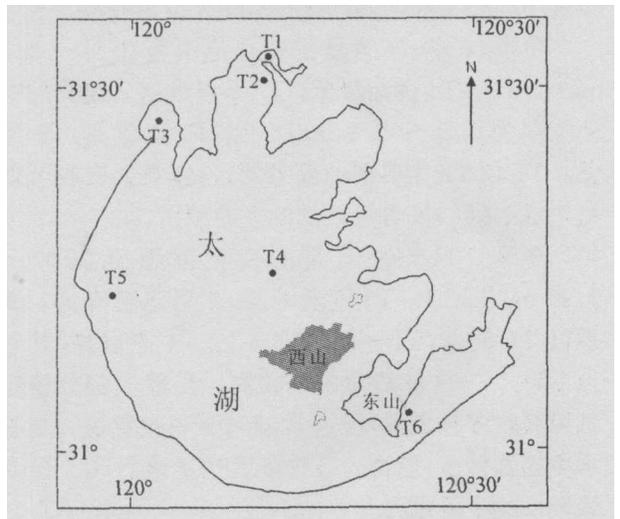


图1 采样点位置图

Fig. 1. Map showing the sample localities.

收稿日期: 2005-01-03; 修回日期: 2005-03-10

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX1 SW 12); 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2 105); 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412300)

第一作者简介: 李军(1971—), 男, 博士研究生, 主要从事营养盐的环境地球化学研究。

水样经 $0.45 \mu\text{m}$ 的醋酸纤维滤膜过滤后,用于测定水体营养盐组成等项目。硝酸根离子(NO_3^- -N)和亚硝酸根离子(NO_2^- -N)用离子色谱法测定(HPL1100型HPLC);铵根离子(NH_4^+ -N)用纳氏试剂法测定(GB 7479-87);可溶性二氧化硅(SiO_2)用硅钼蓝方法测定;可溶性正磷酸盐(SRP)用钼锑抗分光光度法测定(UV-2000型分光光度计)^[4-5]。所有营养盐分析结果见图2。

水体中可被生物利用的氮多为无机氮,主要以 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N等形式存在,可能包含少量有机氮,本文以 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N三者之和代替无机氮。水体中可被生物利用的磷多为无机磷,主要以正磷酸盐形式存在,可能包括少量无机聚磷酸盐,本文以SRP代替无机磷。水体中可被生物利用的硅主要为可溶性 SiO_2 。据此,可以计算水体无机氮、磷、硅的原子比(N:P:Si;N:Si:P)。

2 结果与讨论

2.1 溶解无机氮

DIN含量由T1到T6逐渐降低,与湖泊水体的富营养化程度、受污染程度以及水文特征基本一致(图2)。冬季的变化范围为 $0.2 \sim 2.9 \text{ mg/L}$,以T3点最高;夏季比冬季略高一点,变化范围为 $0.4 \sim 5.1 \text{ mg/L}$,以T1最高。T1处于湖湾,水体交换容量小,受人为污染影响较大,DIN含量较高。

冬季 NO_3^- -N含量的变化范围为 $0.1 \sim 2.2 \text{ mg/L}$,T1-T6逐渐降低,以T2点最高。夏季的变化范围为 $0.2 \sim 2.9 \text{ mg/L}$,以T3点最高,T6最低。T1和T2为典型的藻型湖区,藻类的吸收可能是造成 NO_3^- -N含量较低的主要原因。

冬季 NH_4^+ -N含量的变化范围为 $0.07 \sim 0.99 \text{ mg/L}$,T1-T3逐渐升高,然后迅速降低。夏季以T1最高,T4-T6最低。除T1点以外,其它点 NH_4^+ -N含量都为冬季较高。虽然大部分植物都可吸收多种氮源,但通常倾向于吸收氨氮。夏季水生植物繁茂,植物的吸收可能是夏季 NH_4^+ -N含量较低的主要原因。

冬季 NO_2^- -N含量极低,没有检测出来。夏季

的变化范围为 $0.1 \sim 2.5 \text{ mg/L}$,T1-T3逐渐降低,T4-T6含量极低,变化不大。冬季湖水 O_2 的含量较高(11.72 mg/L),利于 NO_2^- -N的氧化。夏季湖水 O_2 的含量较低(6.62 mg/L),并且夏季温度较高,生物作用十分强烈。夏季生物对 NO_3^- -N的反硝化作用的速率较快,可能是夏季 NO_2^- -N含量较高的主要原因。

2.2 可溶性二氧化硅

可溶性 SiO_2 含量的变化趋势与DIN基本一致,如图2所示。冬季变化范围为 $0.1 \sim 0.6 \text{ mg/L}$,T1-T3变化不大,然后迅速降低。夏季含量比冬季略高一点,变化范围为 $0.2 \sim 0.8 \text{ mg/L}$,T1-T3先降低后升高,T3-T6迅速降低。Si是一种保守的营养元素,主要源于地表岩石和土壤中硅酸盐的风化和侵蚀,受人为活动的影响较小^[9]。与N、P等营养盐相比,Si的再生周期相对较长,生物遗体中硅的再生周期的最短推算也为几十天^[7-8]。因此,对Si而言,沉积物更多的是“汇”,而不是“源”。

2.3 可溶性正磷酸盐

同样,SRP也与DIN具有相似的变化趋势(图2)。冬季SRP含量极低,变化范围为 $0.004 \sim 0.008 \text{ mg/L}$ 。夏季含量较高,变化范围为 $0.01 \sim 0.1 \text{ mg/L}$,T1-T3逐渐降低,然后迅速降低,T4-T6含量极低且变化不大。

夏季湖水较高的SRP在一定程度上和流域外源的输入有关,但更多的却是来自湖泊的内源释放。根据前人研究^[9-11],浅水湖泊的内源释放主要来自沉积物的再悬浮作用。虽然这种释放作用发生的同时也伴随着迅速的再吸附作用,但是在足够大的水动力条件下,这种释放对磷的贡献量可占到入湖外源总量的15%以上。另外,武汉东湖的已有研究证实,在藻类繁茂时,藻类不仅可以促进其它形态的磷向SRP的转化,而且还可促使沉积物中的磷向水体的释放^[12-15]。夏季采样时太湖藻类繁茂,局部已经出现了严重的“水华”现象,那么藻类的爆发可能是湖水中SRP含量增高的主要原因。同时,夏季也是藻类新陈代谢最为旺盛的季节,这可造成大量有机质的积累,而有机质的降解也可促使有机磷的降解释放。

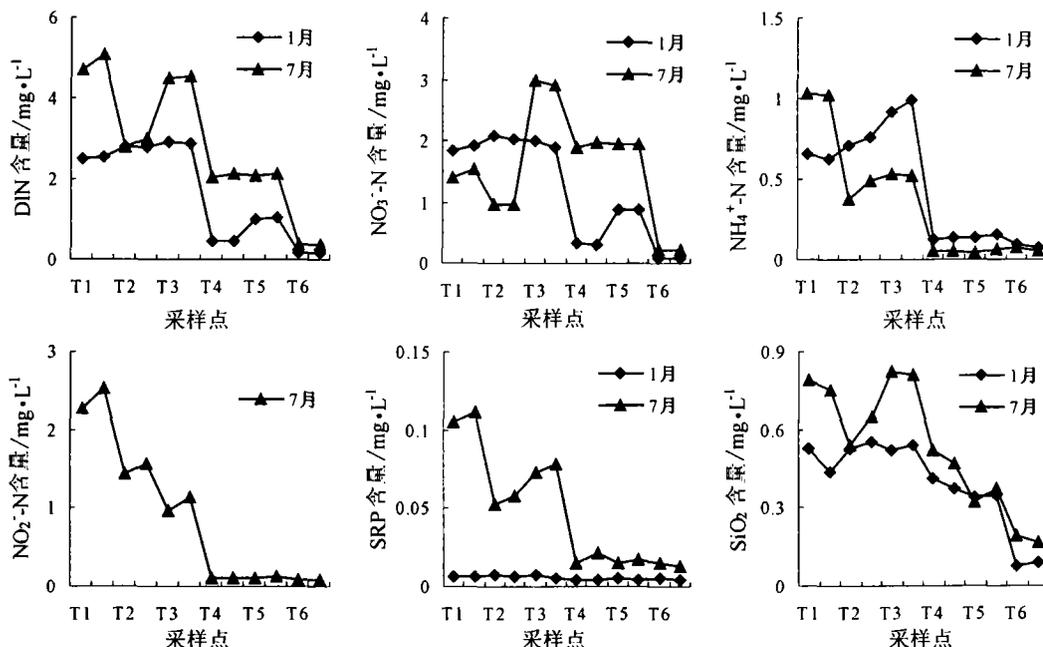


图 2 太湖水体营养盐含量分布图
Fig. 2. Concentrations of different nutrients in lake water of Taihu Lake.

2.4 氮、磷、硅之间比值

太湖 N : P 和 Si : P 的季节性变化较大, 而 Si : N 的季节性变化较小(图 3)。冬季 N : P 较高, 介于 80 ~ 1 270 之间; 夏季介于 50 ~ 310 之间。Si : P 的变化与 N : P 的变化相似, 冬季介于 6 ~ 96 之间, 夏季介于 4 ~ 20 之间。Si : N 比值较小, 介于 0.03 ~ 0.23 之间。从上文的分析可知, SRP 较大的季节性差别是造成 N : P 和 Si : P 较大季节性变化的主要原因。

Justic 等^[16-17] 在研究河口海洋营养盐与浮游植物的关系时, 提出营养盐浓度的绝对限制和相对限制法则, 即限制浮游植物生长的营养盐只有一种。限制浮游植物生长的营养盐浓度阈值为: 可溶性 SiO₂ = 2 μmol/L, DIN = 1 μmol/L, SRP = 0.1 μmol/L, 这称为营养盐浓度的绝对限制法则。另外, 当水体中 Si : P > 22 和 N : P > 22 时, P 为浮游植物营养盐的限制因子; 当 N : P < 10 和 Si : N > 1 时, N 为限制因子; 当 Si : P < 10 和 Si : N < 1, Si 为限制因子, 这称为营养盐浓度的相对限制法则。如果每种营养盐的浓度都大于浮游植物生长的阈值, 那么就不存在营养盐限制因子。如果某种营养盐的浓度低于浮游植物生长的阈值, 那么这种营养盐就是唯一的限制因子。如果两种或两种以上的营养盐浓度低于浮游植物生长的阈值, 那么就要通过相对限制法则来判断营养盐限制因子。

无论是冬季还是春季, 太湖水体 N、P、Si 的浓度都大于限制浮游植物生长的营养盐浓度阈值, 根据绝对限制法判断 N、P、Si 都不是营养盐限制因子, 这与前人的研究结果不太一致^[2]。根据 Redfield 比率, 限制浮游植物生长所需 C、N、P 的原子比率为 106 : 16 : 1。只有当浮游植物耗尽水中的 CO₂ 和 HCO₃⁻ 时, C 才可能成为营养盐限制因子, 这种情况很少发生, 更多的是 N、P 的浓度太低, 不能满足浮游植物生长的需要。根据这一原则, 太湖浮游植物营养盐限制因子为 P, 这与前人的研究结果十分一致。如果假设根据绝对限制法则太湖存在多种营养盐限制因子, 通过相对限制法则可以发现, 冬季太湖浮游植物营养盐限制因子为 P, 这与前人的研究结果和 Redfield 原则比较吻合; 然而夏季却为 Si, 这与前人的研究结果和 Redfield 原则差异较大(图 3)。

大量研究结果已经证实^[18-21], 由于人为活动的影响, 大量营养盐污染(N、P)输入海洋, 特别是 P 可以导致浮游植物大量繁殖。浮游植物所吸收的大量的 Si, 最终沉积于海底沉积物中。由于 Si 的再生周期较长, 长期下去可以导致海水中 Si 浓度的降低, 改变海洋营养盐的组成结构, 致使浮游植物营养盐限制因子由 N 转变为 Si, 最终导致浮游植物种群的生态结构发生变化, 即由以硅藻种群为优势的生态系统转化为以非硅藻种群为优势的生态系统。同时, 研究者发现在淡水系统中也存在着类似的现象。

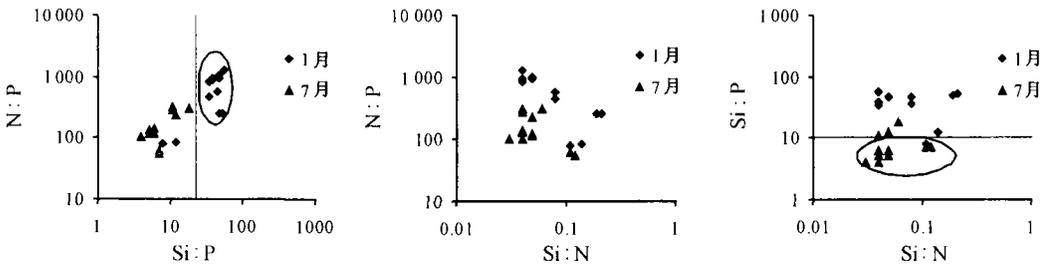


图3 营养盐原子比散点图

Fig. 3. Scatter diagrams of atomic nutrient ratios in Taihu Lake.

如 Schelske 等^[22-24] 利用反映硅藻生产力的生物硅沉积记录研究了北美五大湖的富营养化历史, 并对富营养化发生的机制及其所导致的浮游植物种群结构演变的趋势进行了有意义的探讨, 为研究其它淡水湖营养盐限制因子提供了可靠的参考。夏季大量藻类繁殖生长, 不仅需要吸收大量的 Si, 而且可将大量的 Si 带到沉积物中去, 导致夏季浮游植物营养盐限制因子由其它类型转变为 Si 限制型^[25-28]。

由于人为活动的影响, 大量营养盐污染(N、P)输入太湖, 而 Si 为一种保守元素, 受人为活动影响较小, 含量变化不大。淡水湖泊多为 P 限制型, 太湖也不例外, 大量营养盐(N、P)负荷, 特别是 P 对藻类的生长繁殖具有重要的作用。太湖频繁而且持久爆发的藻类“水华”, 可能会导致水体中 Si 含量的逐渐减少。这种变化是否真实反映了营养盐限制因子

的变化趋势, 或是营养盐限制因子的季节性变化, 还有待于进一步深入研究。

3 主要结论

调查分析结果显示, 太湖营养盐含量从西北到东南逐渐减小, 夏季比冬季略高一点, 这与湖泊的水文特征、水体的富营养化特点以及受污染程度基本一致, 说明人为污染输入依然是太湖水质恶化的主要原因。营养盐, 特别是磷, 在夏季藻类爆发时可能有较大的释放, 对水体的富营养化程度有明显的影

响。

致谢: 感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖湖泊生态系统研究站等单位在野外采样工作中提供的大力支持和帮助!

参 考 文 献

- [1] 王苏民, 龚鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- [2] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛, 等. 中国湖泊富营养化[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990
- [3] 孙顺才, 黄漪平. 太湖[M]. 北京: 海洋出版社, 1993
- [4] 国家环境保护局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法(第三版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989
- [5] 国家环境保护局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- [6] Wollast R, Mackenzie F T. The global cycle of silica[A]. Ashton S R. Silicon geochemistry and biogeochemistry[M]. London: Academic Press, 1986
- [7] Jorgensen E G. Solubility of silica in diatoms [J]. Physiologia, 1955, 8: 846 - 851
- [8] Lewin J. The dissolution of silica from diatom wall [J]. Geochim. Cosmochim. Acta., 1961, 21: 182 - 198
- [9] 秦伯强, 胡维平, 高光, 等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J]. 科学通报, 2003, 48(17): 1 822 - 1 831
- [10] 范成新, 张路, 秦伯强, 等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(8): 760 - 768
- [11] 张路, 范成新, 秦伯强, 等. 模拟扰动条件下太湖表层沉积物中磷行为的研究[J]. 湖泊科学, 2001, 13(1): 35 - 42
- [12] Zhou Y Y, Li J Q, Zhang M. Temporal and spatial variations in kinetics of alkaline phosphatase in sediments of a shallow Chinese eutrophic lake (Lake Donghu) [J]. Wat. Res., 2002, 36(8): 2 084 - 2 090

- [13] Zhou Y Y, Zhou X Y. Seasonal variation in kinetics of alkaline phosphatase activity in a shallow Chinese freshwater lake (Donghu Lake) [J]. *Wat. Res.*, 1997, 31(5): 1 232 – 1 235
- [14] Xie L Q, Xie P, Tang H J. Enhanced of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by *Microcystis* blooms – an enclosure experiment in a hyper eutrophic subtropical Chinese lake [J]. *Environ. Pollut.*, 2003, 122: 391 – 399
- [15] Xie L Q, Xie P, Li S, et al. The low TN : TP ratio, a cause or a result of *Microcystis* bloom [J]. *Wat. Res.*, 2003, 37: 2 073 – 2 080
- [16] Justic D, Rabalais NN, Turner RE, et al. Changes in nutrient structure of river dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Sci.*, 1995, 40: 339 – 356
- [17] 杨东方, 张经, 陈豫, 等. 营养盐限制的唯一性因子探讨 [J]. *海洋科学*, 2001, 25(12): 49 – 51
- [18] Egge J K, Aksnes D L. Silicate as regulating nutrient of new in phytoplankton competition [J]. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 1992, 83: 281 – 289
- [19] Rabalais N N, Turner R E, Justic D, et al. Nutrient changes in the Mississippi River and system responses on the adjacent continental shelf [J]. *Estuaries*, 1996, 19: 386 – 407
- [20] Balod M, Purina I, Bechemin C, et al. Effects of nutrient enrichment of growth rates and community structure of summer phytoplankton from the Gulf of Riga Baltic Sea [J]. *Plankton. Res.*, 1998, 20(12): 2 251 – 2 271
- [21] 曲克明, 陈碧鹃, 袁有宪, 等. 氮磷营养盐影响海水浮游硅藻种群组成的初步研究 [J]. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 445 – 448
- [22] Schelske C L, Stoermer E F. Eutrophication, silica depletion and predicted changes in algal quality in Lake Michigan [J]. *Science*, 1971, 173: 423 – 424
- [23] Schelske C L, Stoermer E F, Conley D J, et al. Early eutrophication in the lower Great Lakes: new evidence from biogenic silica in the sediments [J]. *Science*, 1983, 222: 320 – 322
- [24] Schelske C L, Stoermer E F, Fahnenstiel G L, et al. Phosphorus enrichment, silica utilization, and biogeochemical silica depletion in the Great Lakes [J]. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 1986, 43: 407 – 415
- [25] Bartone C R, Schelske C L. Lake wide seasonal changes in limnological conditions in Lake Michigan in 1976 [J]. *Great Lakes Res.*, 1982, 8: 413 – 427
- [26] Chang W Y B, Rossmann R. Changes in the abundance of blue green algae related to nutrient loading in the nearshore of Lake Michigan [J]. *Hydrobiologia.*, 1988, 157: 271 – 278
- [27] Schelske C L. Historic trends in Lake Michigan silica concentrations [J]. *Int. Rev. Ges. Hydrobiol.* 1988, 73: 559 – 591
- [28] Barbiero R P, Carrick H J, Volerman J B, et al. Factors affecting temporal and spatial distribution of diatoms in Lake Michigan [J]. *Verh. Int. Verein. Limnol.* 2001, 27: 1 788 – 1 794

SEASONAL VARIATIONS IN COMPOSITION AND DISTRIBUTION OF DISSOLVED NUTRIENTS IN THE WATER COLUMN OF TAIHU LAKE, CHINA

LI Jun^{1, 2}, LIU Cong qiang¹, Wang Shi lu¹, ZHOU Zhi hua^{1, 2}, ZHU Zhao zhou^{1, 2}, Xiao Hua yun¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences
Guiyang 550002, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract

In order to understand the cycling of nutrients in shallow lakes the compositional and distributional characteristics of dissolved nutrients (N, P and Si) in the water column of Taihu Lake during winter (January, 2003) and summer (July, 2003) are described. On a whole, nutrients ions and alkalinity are higher during summer than in winter at all stations and tend to decrease gradually from station T1 to station T6. This trend indicated the anthropologic activities and lake characteristics have a strong impact on the water quality of Taihu Lake. Soluble reactive phosphate has positive correlations with soluble reactive silicate, implying the loading of high nutrients in Taihu Lake mainly originated from external input. Ratios of N : P, Si : P and Si : N in the water column of Taihu Lake show the nutrient limitation for phytoplankton varies according to seasonal changes suggesting that changes in nutrient structure would affect the phytoplankton community.

Key words: winter; summer; Taihu Lake; water column; dissolved nutrients