

太湖表层沉积物中多磷酸盐检出的环境意义

李 军¹, 周志华¹, 朱兆洲², 陈孝军³, 王仕禄¹, 汪福顺⁴1. 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. 天津师范大学城市与环境科学学院, 天津 300387;
3. 天津市引滦工程于桥水库管理处, 天津 301900; 4. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200072

摘要: 在氮限制型富营养化湖泊中, 沉积多磷酸盐 (Poly-P) 可以用来示踪营养盐磷的输入和湖泊的富营养化过程。太湖是一个典型的磷限制型富营养化湖泊, 通过对太湖表层沉积物中总有机碳 (TOC)、总氮 (TN)、总磷 (TP)、氢氧化钠可提取磷 (NaOH-P) 以及 Poly-P 的提取分析, 初步探讨了太湖营养盐磷输入的历史记录, 并揭示了该湖 Poly-P 的主要来源和保存机制。太湖 Poly-P 的质量浓度较低, 变化范围为 $0.004\text{--}0.065\text{ mg g}^{-1}$ 。NaOH-P 占 TP 组成的 22%, 是太湖沉积物总磷的主要组成部分之一。结果显示, 在湖泊水体藻类生物量较大和 NaOH-P 是沉积物 TP 重要组成部分的磷限制型湖泊中, Poly-P 也是沉积物磷组成的一个重要部分, 同时还是一个可以反映由人为磷输入增大导致湖泊富营养化程度加剧的敏感指标。

关键词: 总磷; 多磷酸盐; 氢氧化钠可提取磷; 富营养化; 太湖

中图分类号: X131.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-2175 (2007) 03-0719-06

传统观点认为, 湖泊藻类的生产力与水体总磷 (TP) 的质量浓度具有直接的联系。这种建立在经验基础之上的假设对 TP 形态的关注明显不够, 而对水体中不同形态磷的区分是建立藻类生产力和磷质量浓度关系的基础^[1]。水体中可被生物所利用的磷主要可分为两类: 一是溶解性活性磷 (SRP), 指的是水体中还未被生物所吸收的那部分无机磷; 二是多磷酸盐 (Poly-P), 指的是作为能量储备被生物所吸收, 而储存于细胞中并不真正增加生物量的那部分无机磷^[1]。在有氧条件下, 藻类和细菌可以吸收过多的磷, 以 Poly-P 形式储存起来; 而在厌氧条件下, 藻类和细菌可以以这些 Poly-P 为营养和能量进行新陈代谢作用^[2-3]。随着生物的死亡沉降, 未被释放的 Poly-P 便被保存到沉积物中去了。

最近的研究显示, 在富营养化湖泊中, 水土界面氧化还原条件的变化是控制 Poly-P 释放的主要因素, 而厌氧条件下 Poly-P 的降解释放可能是湖泊底泥磷释放的重要机制之一^[4-5]。然而也有研究显示, Poly-P 的强碱 (NaOH) 提取法可能因有机磷 (Porg)、钙结合态磷 (Ca-P) 及铁结合态磷 (Fe-P) 的大量水解而受到干扰^[6]。另外, 有关 Poly-P 存在的化学证据似乎也比较缺乏^[6]。本文以超纯水为提取剂, 对太湖表层沉积物中的 Poly-P 进行了分级提取^[7], 并初步探讨了太湖沉积物中 Poly-P 的主要来源和保存机制。

1 材料与方法

1.1 样品采集

太湖位于长江中下游, 面积约 2350 km^2 , 平均

水深 1.9 m , 是一个典型的浅水湖泊。太湖的富营养化形势十分严峻, 营养盐的内源释放已经引起了人们广泛的关注^[8-10]。2004年7月, 利用中科院南京湖泊与地理所自行研制的柱状采样器, 对太湖梅梁湾 (T2) 和竺山湾 (T3) 的沉积柱样进行采集 (见图1)。柱样的垂直深度约 25 cm , 现场以 1 cm 间隔分样, 样品置于经酸和水浸洗过的离心管中密闭低温保存 ($4\text{ }^{\circ}\text{C}$)。同时, 对采样点水柱、界面水及界面沉积物 (界面土) 的溶解氧 (DO) 和氧化还原电位 (Eh) 进行了现场测定, 测定结果见表1。

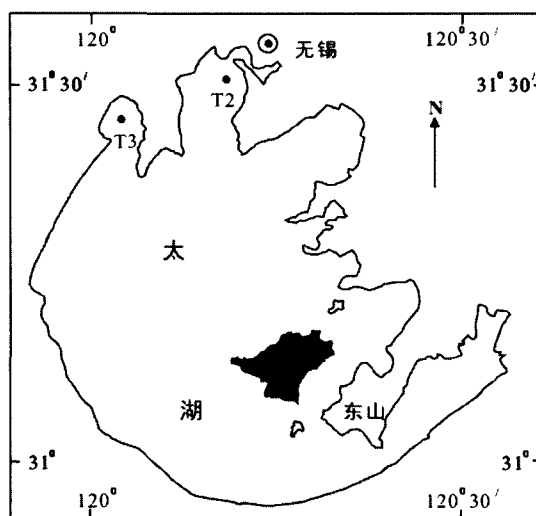


图1 采样点位置图

Fig. 1 Map of the sampling sites

基金项目: 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划资助项目; 国家重大基础研究计划 (973) 项目 (2006CB403200); 国家自然科学基金重点项目 (90610037); 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX1-SW-12)

作者简介: 李 军 (1971 -), 男, 博士, 副研究员, 主要从事水环境研究。Tel: +86-851-5890409; E-mail: junli5931@hotmail.com

收稿日期: 2006-12-21

表1 T2、T3点的基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of T2 and T3 sites

| T2点 | $\rho(\text{DO})$ /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) | $V(\text{Eh})$ /mV | T3点 | $\rho(\text{DO})$ /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) | $V(\text{Eh})$ /mV |
|-------|---|-----------------------|-------|---|-----------------------|
| 0 m | 9.14 | 95 | 0 m | 11.41 | 135 |
| 0.5 m | 8.70 | 120 | 0.5 m | 9.8 | 123 |
| 2 m | 7.30 | 108 | 2 m | 7.52 | 146 |
| 界面水 | 未检测 | 97 | 界面水 | 未检测 | 133 |
| 界面土 | 未检测 | -129 | 界面土 | 未检测 | -133 |

表2 Poly-P及NaOH-P的提取方法

Table 2 Methods for the extraction of Poly-P, and NaOH-P

| 形态 | 试剂 | 提取方法 |
|--------|--------------------------------------|---|
| 水溶性磷 | 18 M Ω 超纯水 | 1.0 g 沉积物+50 ml 超纯水, 25 $^{\circ}\text{C}$ 平衡 20 h (离心弃去) |
| Poly-P | 18 M Ω 超纯水 | 接上步+50 ml 超纯水, 100 $^{\circ}\text{C}$ 消解 0.5 h |
| NaOH-P | 0.1 mol $\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 溶液 | 0.5 g 沉积物+50 ml 0.1 mol $\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 溶液, 25 $^{\circ}\text{C}$ 平衡 17 h |

1.2 分析方法

室内将样品冷冻干燥,干燥后研细待用(粒径 $<125\ \mu\text{m}$)。首先称取定量沉积物干样,利用 $1\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{HCl}$ 浸泡除去无机碳,超纯水清洗去除盐酸后冷冻干燥,研磨后测定沉积物总有机碳(TOC)和总氮(TN)的质量浓度,并计算有机碳、氮的原子比值(C/N)。同时称取 $0.1\ \text{g}$ 沉积物干样进行灰化(温度: $500\ ^{\circ}\text{C}$;时间:2 h),然后利用酸提法($1\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{HCl}$,时间:16 h)对其中的TP进行提取^[11]。另外,参照前人的方法,对其中的Poly-P和氢氧化钠可提取磷(NaOH-P)分别进行提取,提取方法见表2^[7]。各形态磷的分析测定均采用磷钼蓝比色法^[12],结果表示为干样的质量浓度($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)。

2 结果与讨论

2.1 TOC和TN的垂直变化

与太湖其它湖区相比,T2和T3点表层沉积物TOC的质量浓度较低(图2),这与太湖不同湖区的富营养化程度及受人为影响强弱的差异类似^[13]。T2点TOC质量浓度的变化范围为 $0.7\%\sim 1.2\%$,平均值为 0.9% 。顶部至 $12\ \text{cm}$,TOC的总体变化趋势为逐渐降低, $12\ \text{cm}$ 至底部基本不变,逐渐趋于稳定,既反映了沉积物有机质降解程度逐渐减弱的趋

势,也反映了人为活动对湖泊营养水平的影响。T3点顶部沉积物TOC的质量浓度较高,总体变化趋势与T2点基本类似,TOC质量浓度的变化范围为 $0.7\%\sim 2.3\%$,平均值为 1.1% 。

与TOC的变化类似,T2和T3点表层沉积物TN的质量浓度也较低(图2)。T2点TN质量浓度的变化范围为 $0.09\%\sim 0.21\%$,平均值为 0.14% 。顶部至底部TN的总体趋势为逐渐降低,中间多有波动。T3点TN质量浓度的变化范围为 $0.11\%\sim 0.37\%$,平均值为 0.17% 。除界面可能受含氮蛋白优先降解,导致TN质量浓度较低以外,顶部到底部TN变化的总体趋势也为逐渐降低。TOC和TN与湖泊初级生产力有紧密的联系,并易受沉积后期保存条件的影响。T2点TN与TOC的相关性不显著($R^2=0.17$, $P>0.05$),而T3点TN与TOC呈明显的正相关关系($R^2=0.68$, $P<0.01$),说明沉积物中的N主要来自与湖泊TOC沉积相伴的生物沉积,这与太湖东太湖和武汉东湖的研究结果基本一致^[14-15]。

湖泊自生藻类的C/N原子比值一般介于 $4\sim 10$ 之间,而陆生脉管植物的C/N原子比值多大于 20 ^[16]。T2点的C/N原子比值介于 $5.5\sim 10.8$ 之间,T3点除界面以外,其余介于 $5.9\sim 9.2$ 之间,说明除

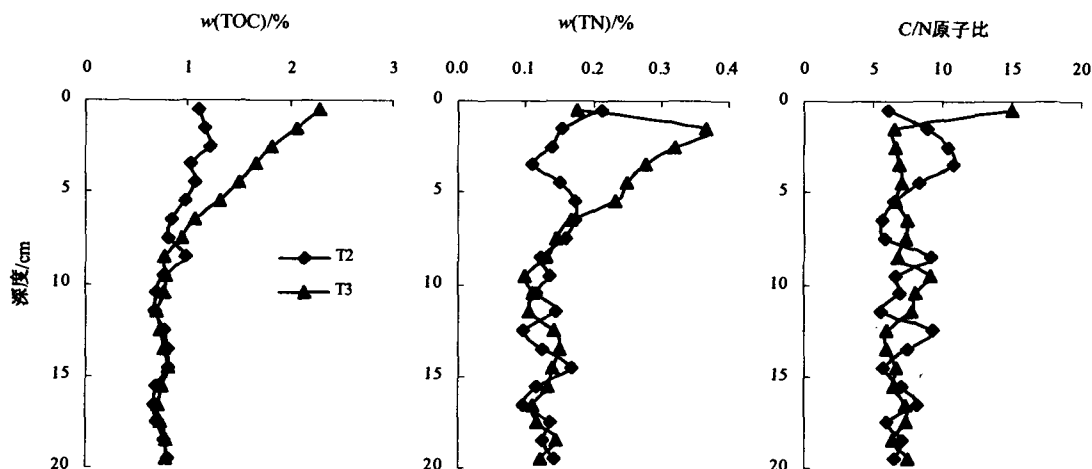


图2 T2和T3点表层沉积物TOC、TN及C/N原子比的垂直变化

Fig. 2 Vertical variations of TOC, TN, and C/N atomic ratios in surficial sediments

极少数点可能受陆源输入影响较大,或有机质降解过程中含氮蛋白优先降解释放,导致有机 C/N 原子比值较高以外, T2 和 T3 点剖面的有机 C/N 原子比值均小于 10, 并且变化较小(图 2), 表明太湖沉积有机质的来源稳定, 始终以湖泊自生为主, 受陆源输入影响较小, 并且在早期成岩作用过程中, 没有发生明显的选择性降解^[16]。

2.2 TP 及其各形态磷的垂直变化

与 TOC 和 TN 的变化类似, T2 和 T3 点表层沉积物 TP 的质量浓度也较低(图 3)。T3 点上部略高一点, 下部几乎相差无几, 变化的趋势都为从顶部到 10 cm 附近逐渐降低, 随后基本保持不变。T2 和 T3 点上部较高的 TP 质量浓度可能与近代人为活动导致的磷输入增大, 湖泊富营养化程度加剧, 以及水体生产力增大引起的磷积累有关^[17-18]。T2 点 TP 的变化范围为 0.31~0.50 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 0.37 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; T3 点 TP 的变化范围为 0.27~1.06 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 0.49 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。T2 和 T3 点的 TP 与 TOC 之间都呈良好的正相关关系 (R^2 分别为 0.78 和 0.96, P 值均小于 0.01), 说明沉积物中的 P 与 N 一样, 基本上也都是来自与湖泊 TOC 沉积相伴随的生物沉积。

在 T2 和 T3 点表层沉积物的上部都检测到了 Poly-P 的存在, T3 较 T2 点高, 并且都是顶部的质量浓度较高(图 3)。T2 点自 5 cm 向上检测到了 Poly-P 的存在, 变化范围为 0.009~0.018 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 0.014 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。T3 自 9 cm 向上检测到了 Poly-P 的存在, 变化范围为 0.011~0.065 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 0.031 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 5 cm 向上有所升高, 并且升高幅度较大。T2 和 T3 点下部都未检测到的存在, 这可能与 Poly-P 的还原降解有关。T3 点的质量浓度较高, 并且埋藏也深度较深, 这与近代人为活动

导致的湖泊富营养化及不同湖区的水文特点有关。与竺山湾相比, 梅梁湾是太湖北部一个较大的湖湾, 水动力条件较强, 沉积物的侵蚀扰动和有机降解相对比较充分^[13], 即保存条件的差异导致了 T2 点上部 Poly-P 的部分缺失。

一般情况下, NaOH-P 代表的是沉积物中可被生物所利用的那部分磷, 主要为 Fe、Ca、Al 等氧化物或氢氧化物所吸附的磷, 包括少量的有机磷和生物成因磷及多磷酸盐^[19]。T2 和 T3 点表层沉积物 NaOH-P 的质量浓度较高, 是沉积物 TP 的主要组成部分, T3 比 T2 略高一点(图 3)。T2 点 NaOH-P 的变化范围为 0.063~0.092 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 0.067 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 自底部到 9 cm 基本保持不变, 9 cm 向上略有升高。T3 点 NaOH-P 的变化范围为 0.05~0.45 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 0.15 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 自底部到 10 cm 基本保持不变, 10 cm 向上有所升高, 并且升高幅度较大, 顶部 3 cm 有所降低, 可能与沉积物的内源释放有关。

2.3 多磷酸盐的主要来源及保存机制

前人通过研究发现, 在氮限制型富营养化湖泊中, 沉积物的 Poly-P 可以用来示踪营养盐磷的输入和湖泊的富营养化过程^[7]。当然, 这必须满足两个必要的前提条件: 一是研究对象必须是氮限制型富营养化湖泊; 二是湖泊水体 TP 的质量浓度必须大于叶绿素 a 的质量浓度或湖泊沉积物的 NaOH-P 必须是 TP 的主要组成部分。在贫营养型湖泊中, 要么藻类的生物量较小, 要么沉积物只是可以短暂保存较少的 Poly-P, 所以 Poly-P 缺乏必要的生态环境意义。在磷限制型湖泊中, 磷是营养盐的限制因子, 因此藻类也缺乏足够的磷以 Poly-P 形式作为过量储备而储存起来。同样, 水体中 TP 的质量浓度必须大于叶绿素 a 的质量浓度, 也是保证湖泊为非磷

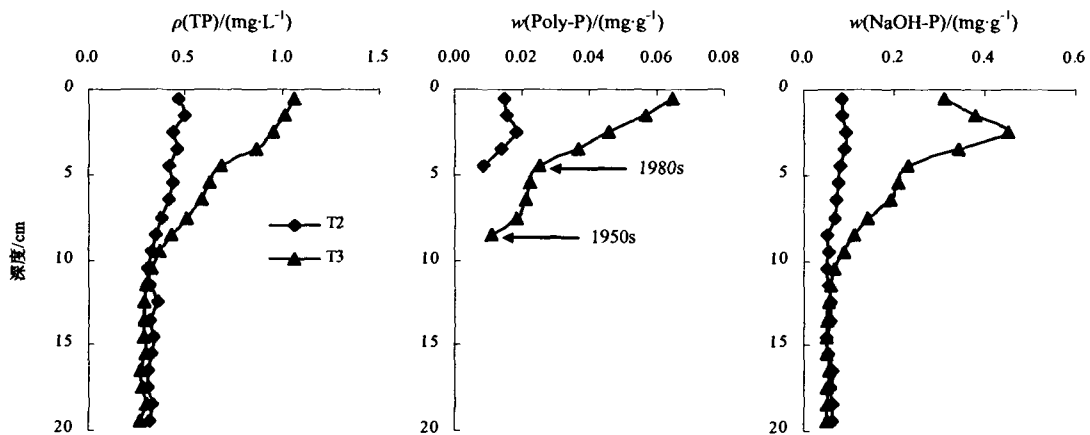


图3 T2和T3点表层沉积物TP、Poly-P、NaOH-P的垂直变化
Fig. 3 Vertical variations of TP, Poly-P, and NaOH-P in surficial sediments

限制型湖泊。另外, NaOH-P 是沉积物 TP 的重要组成部分是为了确保沉积物中可被生物所利用的磷没有发生大规模的降解释放, 即 Poly-P 没有因降解释放而消失殆尽。太湖是一个典型的磷限制型富营养化湖泊, 那么太湖沉积物 Poly-P 的主要来源及保存机制又是如何呢?

2.3.1 多磷酸盐的主要来源

细菌和藻类一般都可储存一定的 Poly-P, 那么太湖表层沉积物中的 Poly-P 究竟是来自细菌还是藻类呢? 在富营养化水体的沉积物中, 每克沉积物大概含 10^9 个细菌, 折合干重约为 $0.1 \text{ mg}^{[20]}$ 。细菌中 P 的质量浓度约为细菌干重的 1%, 那么每克沉积物所含的细菌 P 约为 10^{-3} mg 。这与太湖的实测结果相差甚远, 因此细菌应该不是太湖 Poly-P 的主要来源。太湖在 20 世纪 60 年代就已经出现了大面积的蓝藻水华, 其后藻类水华爆发的规模越来越大, 持续时间也越来越久。在此过程中, 藻类的生物量也越来越大, 藻类的数量由 20 世纪 60 年代的每升数万个增至 70 年代的十万个、80 年代的百万个、90 年代的千万个直至现在的万万个, 每年有数万乃至数十万吨藻类沉积于太湖^[13, 21]。例如, 1991 年 6 月全湖藻类的生物量为 22 772 t, 8 月为 42 552 t, 10 月为 42 074 t, 局部水域藻类的生物量高达 $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 主要分布于太湖西北的广大湖面及沿岸区域^[22]。太湖虽然为磷限制型湖泊, 但是太湖藻类具有如此巨大的生物量, 并且营养盐磷的质量浓度也较高。随着藻类的死亡沉降, 这么巨大的藻类沉积, 即使浅水湖泊的有机降解比较充分, 也不可能完全降解完所有的藻类。因此, 太湖较高的藻类生产力和生物量应该是太湖沉积物 Poly-P 的主要来源。

在富营养化湖泊中, 人为输入可能导致沉积物成为重要的磷汇, 而 Poly-P 正是这个磷汇的重要组成部分之一^[7]。当然, 这个“汇”并不总是稳定的, 随着环境条件的变化是可以转变为“源”的^[8-10]。Poly-P 是被藻类作为能量和营养储备而储存于细胞内的, 并未真正参与藻类的新陈代谢, 因此, 也没有增加藻类的生物量。随着藻类的死亡沉降, Poly-P 可被保存于沉积物达数十年或更久^[7]。这个过程可从水体吸收大量 SRP, 保存于沉积物而较少发生扩散释放。通过这个过程, Poly-P 可对水体-沉积物的磷循环产生重要的影响, 从而有利于水体富营养化形势的控制。T2 点 Poly-P 平均占 TP 组成的 3%, T3 占 4%。因此, 在磷限制型湖泊中, Poly-P 也是沉积物磷汇的一个重要组成部分。

2.3.2 多磷酸盐的保存机制

首先, 这与太湖沉积物较高的 NaOH-P 质量浓

度具有紧密的联系。T2 点 NaOH-P 占沉积物 TP 组成的 15%~21%, 平均为 18%。与 T2 点相比, T3 点 NaOH-P 占沉积物 TP 组成的比例有所升高, 为 17%~47%, 平均为 26%。NaOH-P 是太湖沉积物 TP 的重要组成部分, 而 NaOH-P 又是沉积物中可被生物所利用磷的主要组成部分。虽然强酸和强碱可以导致有机磷的水解, 从而高估了沉积物 NaOH-P 的质量浓度, 然而从已有的研究可知^[13], Fe-P、Ca-P、Al-P 等是太湖沉积物 TP 的主要组成部分, 所以其 NaOH-P 的主要组成部分应该是被金属的氧化物或氢氧化物所吸附的无机磷, 而不是被水解的有机磷。与 NaOH-P 相比, Poly-P 相对比较稳定且不易发生释放^[7]。太湖虽为磷限制型湖泊, 但 NaOH-P 沉积物 TP 的重要组成部分, 随着藻类的生长, 大量 NaOH-P 可能首先发生释放, 而不致或较少发生 Poly-P 的释放, 因此, 太湖沉积物较高的 NaOH-P 质量浓度是其 Poly-P 之所以能够保存的主要原因。

其次, 这与太湖水体较高的 DO 质量浓度和 Eh 有关。太湖是一个浅水湖泊, 水体的复氧条件较好, 水体-沉积物界面的供氧也必然是充分的, 多年的监测和实测结果 (表 1) 也已证明了这一点^[13]。水体及水体-沉积物界面较高的 DO 质量浓度和 Eh 是不利于 Poly-P 的还原降解的^[4-5], 这也是促使 Poly-P 保存下来的重要因素。

最后, 这可能也与太湖水体居高不下的 TP 质量浓度具有一定的联系。自 20 世纪 60 年代以来, 太湖水体 TP 的质量浓度也是一直在增长的, 由 20 世纪 60 年代的 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 已增至现在的 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[13, 21], 这在一定程度上也降低了沉积物中磷的释放强度。

2.4 多磷酸盐沉积记录的环境意义

与前人的研究结果类似, 太湖 Poly-P 的沉积记录也有效反映了太湖水体的富营养化过程, 即随着水体富营养化程度的逐渐加深, 藻类生产力和生物量逐渐增大的过程。T2 点在 5 cm 处检测到了 Poly-P 的存在, 向上逐渐升高, 3 cm 至顶部有所降低。T3 点则在 9 cm 处就检测到了 Poly-P 的存在, 向上也是逐渐升高, 5 cm 至顶部升高的幅度有所增大。T2 和 T3 点水文条件的差异较大, 因此沉积物保存条件的差异也较大, 导致环境信息的保存状况也有不同, 即在沉积记录上也有差别。T2 和 T3 点的 ^{210}Pb 沉积年代学显示, T2 点的 5 cm 处约为 1980 s 年, T3 点的 9 cm 处约为 1950 s, 5 cm 处也约为 1980 s^[23]。与其它沉积记录一致, Poly-P 也反映了太湖自上个世纪 50 年代以来水体的富营养化, 以及随后 80 年代以来富营养化加剧的过程^[13, 17]。T2 点只

是保存了太湖 20 世纪 80 年代以后水体富营养化加剧的沉积记录,而 T3 点不仅保存了自 20 世纪 50 年代以来,太湖围栏垦殖和水利设施修建导致的水体富营养化,而且保存了 80 年代以后水体迅速富营养化过程的沉积记录。

3 结论

太湖表层沉积物 Poly-P 的主要来源为湖泊自生藻类,而不是湖泊沉积细菌。沉积物较高的 NaOH-P 质量浓度、水体较高的 DO 质量浓度及 Eh 是 Poly-P 赖以保存的主要机制,而水体较高的 TP 质量浓度对其的保存也有一定的积极作用。在水体藻类生物量较大和 NaOH-P 是沉积物 TP 重要组成部分的磷限制型湖泊中, Poly-P 既是沉积物磷汇组成的一个重要部分,同时也是一个可以反映由人为磷输入增大导致湖泊富营养化程度加剧的敏感指标。近年来,随着营养盐输入和藻类生物量的增加,沉积 Poly-P 的质量浓度显著增加(顶部 5 cm),反映了随着人为活动强度的增大,该湖水体富营养化程度逐渐加剧的特点。

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支持和帮助。

参考文献:

- [1] CHAPRA S C, AUER M T. Management models to evaluate phosphate loads in lakes [A]/REDDY, O'CONNOR, SCHELSKE. Phosphorus biogeochemistry in subtropical ecosystems [C]. Lewis Publishers, New York, 1999.
- [2] NEWMAN S, ALDRIDGE F J, PHILIPS E J, et al. Assessment of phosphorus availability for natural phytoplankton populations from a hypereutrophic lake [J]. Arch Hydrobiol, 1994, 23: 201-205.
- [3] KHOSHMANESH A, HART B T, DUNCAN A. Luxury uptake of phosphorus by sediment bacteria [J]. Water Res, 2002, 36: 774-778.
- [4] HUPFER M, RÜBE B. Origin and diagenesis of polyphosphate in lake sediments: a ^{31}P -NMR study [J]. Limnol Oceanogr, 2004, 49: 1-10.
- [5] SANNIGRAHI P, INGALL E. Polyphosphates as a source of enhanced P fluxes in marine sediments overlain by anoxic waters: evidence from ^{31}P NMR [J]. Geochem Trans, 2005, 6: 52-59.
- [6] GOLTERMAN H, PAING J, SERRANO L, et al. Presence of and phosphate release from polyphosphates or phytate phosphate in lake sediments [J]. Hydrobiologia, 1998, 364: 99-104.
- [7] KENNEY W F, SCHELSKE C L, CHAPMAN A D. Changes in polyphosphate sedimentation: a response to excessive phosphorus enrichment in a hypereutrophic lake [J]. Can J Fish Aquat Sci, 2001, 58: 879-887.
- [8] 金相灿, 王圣瑞, 庞燕, 等. 湖泊沉积物对磷酸盐的负吸附研究[J]. 生态环境, 2004, 13(4): 493-496.
Negative sorption of phosphate on lake sediments [J]. Ecology and Environment, 2004, 13(4): 493-496.
- [9] 孙晓杭, 张昱, 张斌亮, 等. 微生物作用对太湖沉积物磷释放影响的模拟实验研究[J]. 环境化学, 2006, 25(1): 24-27.
SUN Xiaohang, ZHANG Yu, ZHANG Binliang, et al. Microbial effects on phosphorus release in Taihu Lake sediments [J]. Environmental Chemistry, 2006, 25(1): 24-27.
- [10] 范成新, 张路, 包先明, 等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化: 2. 磷释放的热力学机制及源-汇转换[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 207-217.
FAN Chenxin, ZHANG Lu, BAO Xianming, et al. Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-water interface of Lake Taihu: 2. Chemical thermodynamic mechanism of phosphorus release and its source-sink transition [J]. J Lake Sci, 2006, 18(3): 207-217.
- [11] ASPILA K I, AGEMIAN H, CHAU A S Y. A semiautomated method for the determination of inorganic, organic and total phosphate in sediment [J]. Analyst, 1976, 101: 187-197.
- [12] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
Water and Wastewater's Monitor and Analytical Method Editorial Board of Environmental Protection Administration. Water and Wastewater's Monitor and Analytical Method [M]. Environmental Science China Press, Beijing, 2002.
- [13] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
QIN Boqiang, HU Weiping, CHEN Weimin. Process and mechanisms of environmental changes of Lake Taihu [M]. Science Press, Beijing, 2004.
- [14] 李文朝. 东太湖沉积物中氮的积累与水生植物沉积[J]. 中国环境科学, 1997, 17(5): 418-421.
LI Wenchao. Nitrogen accumulation in the sediment of East Taihu Lake and biological sedimentation of aquatic plants [J]. China Environmental Science, 1997, 17(5): 418-421.
- [15] 杨洪, 易朝路, 谢平, 等. 人类活动在武汉东湖沉积物中的记录[J]. 中国环境科学, 2004, 24(3): 261-264.
YANG Hong, YI Chaolu, CHEN Weimin, et al. Records of human activities in the sediments of Lake Donghu, Wuhan [J]. China Environmental Science, 2004, 24(3): 261-264.
- [16] MEYERS P A, ISHIWATARI R. Lacustrine organic geochemistry—an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments [J]. Org Geochem, 1993, 20: 867-900.
- [17] 吴敬禄, 林琳, 刘建军, 等. 太湖沉积物碳氮组成特征与环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(2): 25-30.
WU Jinglu, LIN Lin, LIU Jianjun, et al. Environmental significance and stable isotope signatures from sedimented organic matter in Lake Taihu [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2005, 25(2): 25-30.
- [18] 陈诗越, 于兴修, 吴爱琴. 长江中下游湖泊富营养化过程的湖泊沉积记录[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 526-529.
CHEN Shiyue, YU Xingxiu, WU Aiqin. Lake nutrients accumulation process from lacustrine records in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River [J]. Ecology and Environment, 2005, 14(4): 526-529.
- [19] OLILA O G, REDDY K R. Influence of redox potential on phosphate-uptake by sediments in two sub-tropical eutrophic lakes [J]. Hy-

- drobiologia, 1997, 345: 45-57.
- [20] JONES J G. Bacterial in freshwater sediments [A]/Nedwell, Brown. Sediment microbiology [C]. Academic Press, London, 1982.
- [21] 李军, 刘丛强, 肖华云, 等. 太湖北部夏季浮游藻类多样性与水质评价[J]. 生态环境, 2006, 15(3): 453-456.
- LI Jun, LIU Congqiang, XIAO Huayun, et al. Summer phytoplankton diversity and water quality evaluation in northern part of Taihu Lake, China [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(3): 453-456.
- [22] 杨清心. 太湖水华成因及控制途径初探[J]. 湖泊科学, 1996, 8(1): 67-74.
- YANG Qingxin. Algal bloom in Taihu Lake and its control [J]. J Lake Sci, 1998, 8(1): 67-74.
- [23] 周志华. 长江中下游湖泊的环境演化: 沉积物的碳、氮同位素记录研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2006.
- ZHOU Zhihua. Paleo-environmental change of the Lakes in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, China: Study on carbon and nitrogen Records of the Lake sediments [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2006.

Detection of polyphosphate in surficial sediments of Taihu Lake and its environmental significance

LI Jun¹, ZHOU Zhihua¹, ZHU Zhaozhou², CHEN Xiaojun³, WANG Shilu¹, WANG Fushun⁴

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry//Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Urban and Environmental Science College, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China;

3. Tianjin Yuqiao Reservoir Administration, Tianjin 301900, China;

4. Environmental and Chemical Engineering College, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract: In N-limited lakes, polyphosphate (Poly-P) has often been considered as an important P sink with anthropogenic enrichment, but which has been few reported in P-limited lakes. Taihu Lake is a both P-limited and typical eutrophication lake. The sedimentary records of Poly-P were investigated to recognize its depositional mechanisms and the eco-environment changes in Taihu Lake. Low concentrations of Poly-P in the sediments are found in Taihu Lake, ranging from 0.004 to 0.065 mg·g⁻¹. The NaOH-P, which accounts for about 22% of sedimentary total P (TP), is a main composition of sedimentary TP. The concentrations of Poly-P have increased during the latest years (the top 5 cm sediments) with the increase of the nutrients concentrations and the algae biomass, which may be responsible for the deposition of poly-P in the sediments of Taihu Lake. In P-limited lakes, Poly-P sedimentation could be an important P sink stored by algae without increasing algae biomass when there is high algae biomass and large fraction of NaOH extractable P (NaOH-P) in sedimentary TP. In addition, the increase of Poly-P concentration in sediments is a sensitive indicator which can reflect the accelerated eutrophication caused by the increased input of anthropogenic P in the past.

Key words: TP; Poly-P; NaOH-P; eutrophication; Taihu Lake