

# 太湖五里湖富营养化的碳同位素记录<sup>\*</sup>

李军<sup>1,2\*</sup> 肖化云<sup>1</sup> 朱兆洲<sup>2</sup> 王仕禄<sup>1</sup> 王美丽<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>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, 贵阳 550002; <sup>2</sup>天津师范大学水环境与水资源重点实验室, 天津 300387)

**摘要** 通过太湖五里湖表层沉积物柱样中总有机碳、总氮、总磷的变化, 探讨了五里湖营养盐磷输入的历史记录, 结合总有机碳碳同位素的分析, 揭示了该湖富营养化和初级生产力的演化过程。总有机碳碳同位素值为  $-27.0\text{‰} \sim -26.3\text{‰}$ , 平均  $-26.6\text{‰}$ , 从底部向上波动变化, 在深度 12 cm 处最大, 然后向上逐渐减小, 5 cm 处降至最小, 随之向上逐渐增大, 反映了随着人为活动强度的加大, 该湖水体富营养化程度逐渐加剧的特点, 并且总有机碳碳同位素与有机碳、氮原子比值记录了湖泊水生植物群落由水草为主—草藻结合—藻类为主的演替过程。

**关键词** 总磷; C/N 原子比值; 碳同位素; 富营养化; 五里湖

**中图分类号** X142 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2009)11-2245-05

Historical eutrophication in Wuli Bay of Taihu Lake, China based on carbon isotope record. LI Jun<sup>1, 2</sup>, XIAO Hua-yun<sup>1</sup>, ZHU Zhao-zhou<sup>2</sup>, WANG Shi-lu<sup>1</sup>, WANG Mei-li<sup>2</sup> (<sup>1</sup> State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; <sup>2</sup> Key Laboratory of Aquatic Environment and Water Resource, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China). Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(11): 2245-2249.

**Abstract:** Through the analysis of total organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus concentrations in surface sediment cores from Wuli Bay of Taihu Lake, the historical record of phosphate input in the Bay was studied, and in combining with the analysis of carbon isotope value of bulk sedimentary organic matter, the evolution process of the primary productivity and eutrophication in the Bay was revealed. The carbon isotope value of the sediment total organic C was  $-26.6\text{‰}$  on average, with a variation between  $-27.0\text{‰}$  and  $-26.3\text{‰}$ . It was decreased with depth up to the lowest value at 5 cm, subsequently increased gradually up to the highest value at 12 cm, and then fluctuated downward with the depth, which suggested that the evolution of eutrophication, productivity, and primary producer was associated with the increasing phosphorus input from human activities. Moreover, the concentrations of total phosphorus and the C/N atomic ratios of total organic carbon to total nitrogen recorded the succession process of aquatic plant community from float grass to float grass + algae to algae.

**Key words:** total phosphorus; C/N atomic ratio; carbon isotope; eutrophication; Wuli Bay

为了有效控制湖泊水体的富营养化, 就须全面了解湖泊营养盐的输入记录 (Bodini 2000)。沉积物有机碳及其同位素组成不仅可以反映水体初级生产力的变化, 而且还可有效示踪营养盐, 特别是磷的

输入 (Schelske & Hodell 1995)。国内有关湖泊富营养化的研究相对较多 (秦伯强等, 2004), 但是关于沉积物有机碳及其同位素组成与湖泊富营养化演化关系方面的相关报道却很少 (周志华等, 2007)。与太湖其他部分相比, 五里湖富营养化程度最为严重, 富营养化演化的历史记录也较为完备。另外, 在富营养化的发生过程中, 五里湖的水生植物群落也发生了相应的变化。因此, 选取太湖五里湖湖区表

\* 环境地球化学国家重点实验室开放课题和自主课题、国家自然科学基金项目 (90610037)、天津市科技发展计划项目 (06YFZSF05100) 和贵州省科学技术基金资助项目 ([2007] 2167)。

\*\* 通讯作者 E-mail: lijun5931@163.com

收稿日期: 2009-03-10; 接受日期: 2009-06-17

层沉积物为研究对象, 探求湖泊沉积有机碳同位素与营养盐的输入、湖泊富营养化、以及水生植物群落演化的内在联系, 旨在为湖泊富营养化的机理及其控制提供依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

五里湖毗邻无锡, 是太湖西北的一个小型浅水湖湾。现代五里湖为典型藻型湖泊, 然而有资料表明, 20世纪 50年代五里湖水草丰茂, 覆盖率几乎为 100%, 只是在局部偶见藻类水华, 湖水清澈, 水质较好, 属中营养水平; 50年代开始围栏垦殖, 60年代后期全面发展, 导致湖中高等水生植物逐年退化, 加之人工堤坝与水闸的修建, 阻碍了五里湖与大太湖水体之间的交换, 以及城市污水的大量输入, 致使水体富营养化趋势日趋严重, 重富营养化藻类数量逐年增加, 藻类水华分布面积逐渐扩大; 70年代初期首先在五里湖爆发大规模藻类水华, 其后由于沿湖城市人口增长、工业和航运发展, 大量工业和生活污染排入湖中, 导致湖泊大面积富营养化; 80年代以后湖泊藻类水华爆发的规模及频率逐年增加, 并且持续时间也愈来愈久; 90年代以后五里湖已呈明显超富营养化趋势(朱树屏和杨光圻, 1959; 中国科学院南京地理研究所, 1965; 范成新, 1996; 李文朝, 1996; 秦伯强等, 2004)。

### 1.2 样品采集与处理

于 2002年 10月, 在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的帮助下, 利用柱状采样器在太湖五里湖西部, 远离航道、河口、未经疏浚的湖湾处 ( $31^{\circ}32'30.1''N$   $120^{\circ}13'21''E$ ) 采集 5个长约 20 m 的柱状沉积物样品。现场以 1 m 为间隔分割样品, 分别装于预先处理过的离心管低温 ( $4^{\circ}C$ ) 密闭保存。同时, 于 2005年 8月对太湖表层沉积物、浮游藻类以及部分水草进行采集。沉积物样品经真空冷冻干燥, 研磨(粒径  $< 125 \mu m$ )后置于塑封袋中密闭保存待用; 植物样品漂洗后经真空冷冻干燥, 研磨(粒径  $< 125 \mu m$ )后置于塑封袋中密闭保存待用。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 总有机碳、总氮及总磷分析** 称取 0.5 g 沉积物干样, 利用  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$  浸泡除去无机碳, 水洗去除盐酸后冷冻干燥, 研磨后用元素分析仪 (PE2400-II) 测定沉积物总有机碳 (TOC) 和总氮

(TN) 含量, 并计算有机碳氮的原子比值 (C/N)。另外, 称取 0.1 g 沉积物干样进行灰化 (灰化温度:  $500^{\circ}C$ ; 灰化时间: 2 h), 然后利用酸提法 ( $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$ , 提取时间: 16 h) 对其中的总磷 (TP) 进行提取和分析 (Aspila et al., 1976), 并计算有机碳磷的原子比值 (C/P)。最后, 植物样品直接用元素分析仪测定 TOC 和 TN 含量, 并计算有机 C/N 比值。

**1.3.2 总有机碳同位素分析** 称取 5 g 沉积物干样, 去除无机碳 (方法同上) 后, 用气体质谱仪 (MAT252 测定有机碳的碳同位素组成 ( $\delta^{13}C$ ); 植物样品直接用气体质谱仪测定  $\delta^{13}C$  以国际纤维素标样 IAEA-C3 ( $\delta^{13}C = -24.91\%$ ) 为参考标准, 测定结果用千分比单位 ( $\%$ ), 以  $\delta$  符号表示, 并与国际标准 PDB 相对应:

$$\delta^{13}C(\%) = [(R_{\text{样品}} - R_{\text{PDB}}) / R_{\text{PDB}}] \times 1000$$

$$\delta^{13}C \text{ 的分析误差} < 0.1\%$$

## 2 结果与分析

### 2.1 TOC、TN 及 TP 的垂向变化

采样点附近沉积物的平均沉积速率为  $3.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ , 近年有所增加 (孙顺才和黄漪平, 1993; 秦伯强等, 2004; 朱广伟等, 2007)。根据沉积速率可以推算所采沉积物柱样的沉积年代, 结合相关文献 (范成新, 1996; 李文朝, 1996; 秦伯强等, 2004) 记录的生态变化, 以及沉积柱样总有机碳  $\delta^{13}C$  的变化, 可将整个沉积柱样划分为 3 个阶段 (图 1)。

五里湖沉积物 TOC 的含量较高, 平均为  $34.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 变化范围为  $28.4 \sim 40.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。顶部至 12 m TOC 的含量总体比较稳定, 中间偶有波动, 12 ~ 14 m 迅速降低, 14 m 至底部逐渐趋于稳定 (图 1), 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。14 m 处为 20 世纪 50 年代后期, 50 年代开始的围栏垦殖可能导致水体营养盐增大, 其后全面发展的围栏垦殖、堤坝水闸的修建以及城市化产生的大量污染, 导致水体富营养化程度逐渐加剧, 湖泊初级生产力逐渐增大, 沉积有机质及营养盐逐渐积累。

TN 含量较高, 平均为  $3.7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 变化范围为  $1.7 \sim 4.9 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 演化趋势与 TOC 相似 (图 1), 与 TOC 呈明显的正相关关系 (图 2), 说明沉积物中的 TN 主要来自与 TOC 伴随的生物沉积。TOC 和 TN 与湖泊初级生产力有紧密的联系, 并受沉积后期保存条件的影响。以 14 m 处为界, TN 与 TOC 显示

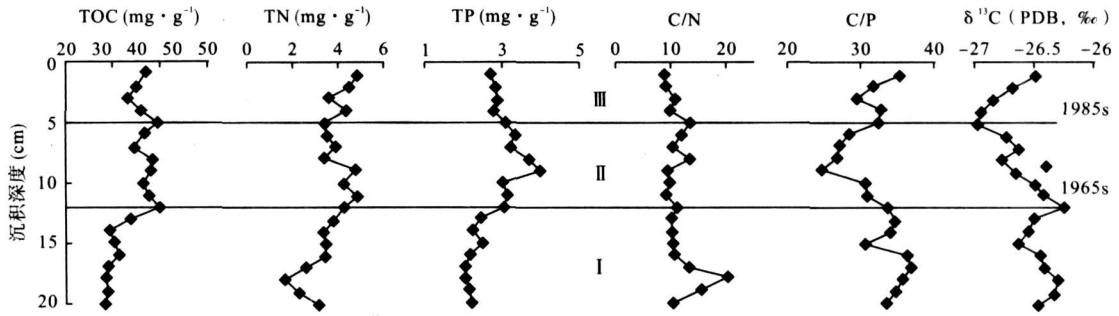


图 1 TOC、TN、TP、C/N、C/P 及  $\delta^{13}\text{C}$  的垂向变化  
 Fig. 1 Vertical variations of TOC, TN, TP, C/N, C/P and  $\delta^{13}\text{C}$

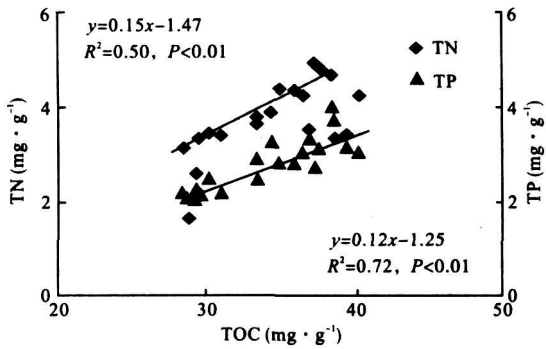


图 2 TOC 与 TN、TP 的相关关系  
 Fig. 2 Correlative diagram of TOC versus TN and TP

了相似的演化趋势,说明了相同的问题。

TP 含量较高,平均为  $2.8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,变化范围为  $2.1 \sim 3.9 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,演化趋势与 TOC 相似(图 1),与 TOC 呈显著的正相关关系(图 2),说明沉积物中 TP 的来源与 TN 相同。TP 含量由底部向上先升高后降低,9 cm 处为峰值,反映了磷的积累和释放。总体上,上部沉积物中 TP 的含量还是较下部高,尤其是在 14 cm 附近,说明了人为活动导致的磷输入和积累的增大。9 cm 处为 20 世纪 70 年代初期,较高的 TP 含量可能是当时首先在五里湖大规模爆发的藻类水华的沉积记录(范成新,1996)。太湖流域发达的农业生产,近代无锡已具规模的民族工业,新中国成立后人地矛盾导致的农业生产方式和土地利用方式的转变,如围垦、养殖、化肥的大量使用等都可能致底部较高的 TP 含量(Chang, 1996)。上部 TP 含量逐渐降低的趋势可能与近年来无锡污染排放的控制,以及浅水湖泊复杂的磷循环机制有关。据资料统计(秦伯强等,2004),1987—1988 年太湖流域 TP 的排放量为  $1988.5 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,到 1998 年已增至  $2886.3 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。自 1998 年年底在太湖流域实施污染达标排放行动以来,水体 TP 的含量略有下降,由 1998 年的  $0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  下降到 1999 年的  $0.09 \text{ mg}$

$\cdot \text{L}^{-1}$ ,但是水质并没发生明显的改善(黄文钰等,2002)。首先是污染达标排放仅能控制点源,而对面源收效甚微。其次是实施减污排放,可能打破了沉积物和水体之间原有的平衡,形成新的浓度梯度从而加剧了沉积物的内源释放。浅水湖泊表层 0~10 cm 沉积物中的磷都能参加整个湖泊的新陈代谢,其中的磷可随时间流逝而逐渐释放,最终可能导致其中 TP 含量逐渐降低(Sjndergaard et al., 2003)。

## 2.2 C/N、C/P 及 $\delta^{13}\text{C}$ 的垂向变化

湖泊自生藻类的 C/N 原子比值一般介于 4~10 而陆生维管植物的 C/N 比值多数大于 20(Meyers, 1997)。有机 C/N 比值在 18.12、8.5 cm 处较高(图 1),可能受陆源输入影响较大,或有机质降解过程中含氮蛋白的优先降解释放,导致 C/N 比值较高。其他层均在 8.8~10.6(图 1),虽然也受陆源输入的影响,但是影响较小。

有机 C/P 原子比值与 TP 的变化趋势恰好相反,从顶部至底部都小于藻类光合作用所产生有机质的 C/P 比值为 106(图 1)。较高的 C/P 比值意味着一定的磷亏损,即有机质降解时,有机磷已经以无机磷的形式有了较大的释放,而较低的 C/P 比值则反映了较高的磷输入和磷积累(Sjben et al., 1998)。太湖为磷限制型湖泊(金相灿等,1990),虽然其沉积物中的磷已经有了一定的释放,然而其中的磷积累机制还有待进一步研究。

五里湖表层沉积物有机  $\delta^{13}\text{C}$  的变化较小,介于  $-27.0\text{‰} \sim -26.3\text{‰}$ ,平均为  $-26.6\text{‰}$ (图 1),属典型湖相水生有机沉积(Meyers, 1997)。 $\delta^{13}\text{C}$  的整体趋势为从底部向上波动变化,在 12 cm 处最大,然后向上逐渐减小,5 cm 处降至最小,随之向上迅速增大,反映了湖泊初级生产力和营养水平的阶段性变化趋势。利用湖泊沉积物有机  $\delta^{13}\text{C}$  解释环境问题时,

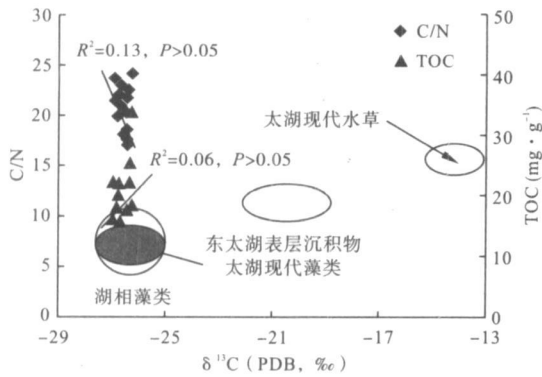


图 3  $\delta^{13}\text{C}$  与 C/N TOC 的相互关系  
 Fig. 3 Scatter diagram of  $\delta^{13}\text{C}$  versus C/N and TOC  
 圆圈表示的是  $\delta^{13}\text{C}$  和 C/N 的变化范围。

必须考虑沉积物源以及早期成岩作用过程中, 有机质的选择性降解可能造成的  $\delta^{13}\text{C}$  分馏 (Meyers, 1997)。陆生脉管植物和水生高等植物  $\delta^{13}\text{C}$  的分布范围较宽 (平均值为  $-14\text{‰}$ ) , 与湖泊自生藻类 (平均值为  $-28\text{‰}$ ) 之间存在部分重叠。同时, 有机质的选择性降解可以导致  $\delta^{13}\text{C}$  的降解分馏 (Meyers, 1997) , 所以不能仅仅根据  $\delta^{13}\text{C}$  来区分陆源和湖泊自生有机物源。

由图 3 可见,  $\delta^{13}\text{C}$  与 C/N 和 TOC 均没有明显的相关关系, 说明  $\delta^{13}\text{C}$  的变化并不是由有机质的选择性降解造成的, 而是原始有机质的沉积记录 (Talbot & Johannessen, 1992)。除少数点以外, 其他点都落入湖相藻类沉积的范围之内 (Meyers, 1997), 部分甚至落入现代太湖藻类的范围之内, 而与东太湖表层沉积物和现代太湖水草截然不同, 说明五里湖沉积物中有机质的来源还是以湖相自生为主, 受陆源输入的影响不大 (Meyers, 1997)。现代东太湖为典型草型湖泊, 而现代五里湖为典型藻型湖泊, 现代太湖水草 东太湖表层沉积物 五里湖表层沉积物 现代太湖藻类 C/N 及有机  $\delta^{13}\text{C}$  的演化序列, 说明五里湖可能存在初级生产者类型的演变交替。

### 3 讨论

#### 3.1 $\delta^{13}\text{C}$ 与湖泊富营养化演化的关系

在光合作用中, 水生植物优先吸收较轻的  $^{12}\text{C}$  导致水体富集较重的  $^{13}\text{C}$  (Schelske & Hodell, 1995)。在封闭体系中, 随着  $\text{CO}_2$  的亏损, 碳同位素的分馏趋势逐渐减弱 (Lajtha & Michener, 1994)。而  $\text{CO}_2$  也是一个限制水生植物生长的营养盐, 在其亏损的情况下, 水生植物逐渐趋于接受富含  $^{13}\text{C}$  的碳酸氢根 (Hein, 1997)。随着营养盐输入的增大, 湖泊的

初级生产力会逐渐增大,  $\text{CO}_2$  的可利用性逐渐减少, 导致有机质  $\delta^{13}\text{C}$  随初级生产力同步增大, 湖泊这种初级季节性生产力增大导致的有机质  $\delta^{13}\text{C}$  增大, 同样也会被保存在湖泊沉积物的长期记录中去。淡水湖泊多属 P 限制型, 随着营养盐特别是 P 输入的增大, 初级生产力会逐渐增大, 导致水体出现  $^{12}\text{C}$  亏损  $^{13}\text{C}$  富集 (Gu & Schelske, 1996)。这种较高的湖泊初级生产力可以导致大量富集  $^{13}\text{C}$  的有机质在沉积物中的保存, 直接掩盖了微生物作用可能对  $\delta^{13}\text{C}$  所造成的偏负影响 (Hollander & Smith, 2001)。因此, 在富营养化程度较高的淡水湖泊体系, 湖泊初级生产力的对沉积有机质的碳同位素组成起着明显的控制作用, 而沉积有机质的碳同位素组成也可反映湖泊初级生产力的对沉积有机质的碳同位素组成起着明显的控制作用, 同时也可有效示踪营养盐的输入。

#### 3.2 五里湖富营养化的演化过程

五里湖虽在 20 世纪 50 年代 (16 m 处) 就已开始围栏垦殖, 但水体营养盐含量的增长并不大, 加之湖泊生态变化具有一定的滞后性, 所以生态结构并没发生明显变化, 直至 60 年代后期 (12 m 处) 围栏垦殖的全面发展, 生态结构才发生了明显变化, 结合 TR C/N 原子比值以及有机  $\delta^{13}\text{C}$  所反映的生态变化, 可将整个沉积柱样划分为如下 3 个阶段:

I 阶段: 从底部为 20 世纪 30 年代末期到 12 m 处为 60 年代中期。这个阶段虽已开始围栏垦殖但规模较小, 湖泊营养盐含量的增长也不大。高等水生植物依然占优势地位, 浮游藻类生物量较小 (李文朝等, 1996)。沉积有机  $\delta^{13}\text{C}$  较高, 随藻类生物量和陆源输入量的变化有所波动, 但依然保持着高等水生植物的特点。与低等藻类相比, 高等水生植物具有较高的  $\delta^{13}\text{C}$  (Fry & Sherr, 1984), 这也与东太湖表层沉积物较高的有机  $\delta^{13}\text{C}$  保持一致。同时, 由于高等植物具有较高的碳含量, 因此有机 C/N 原子比值也较高 (Kenney et al., 2002)。所以底部较高的有机 C/N 原子比值, 既是陆源输入的反映, 也是高等水生植物的反映。

II 阶段: 从 12 m 处为 20 世纪 60 年代中期到 5 m 处为 80 年代中期。随着围栏垦殖以及城市化的全面发展, 大量营养盐特别是 P 的输入, 导致浮游藻类大量繁殖, 高等水生植物逐渐衰退。20 世纪 70 年代天然高等水生植物已在五里湖的一些水域里消失了, 到 80 年代初期五里湖已无大面积的天然高等水生植物分布了 (李文朝等, 1996)。随着浮游藻类

生物量的增加,大面积的藻类水华首先在五里湖爆发(范成新等,1996)。由于水生植物在光合作用中优先吸收较轻的 $^{12}\text{C}$ 因此浮游藻类的大量繁殖导致沉积有机 $\delta^{13}\text{C}$ 逐渐降低。同时,TOC变化不大而TN略有降低,这可能是含氮蛋白优先降解的表现,直接导致有机C/N原子比值略有升高(Meyers,1997)。另外,随着天然高等水生植物的衰退,湖泊逐渐丧失了对污染物拦截的自然功能。因此,略有升高的有机C/N原子比值也可能是陆源输入的反映。

II阶段:从5 m处为20世纪80年代中期到顶部为21世纪初期。富营养化形势日趋严重,藻类生物量迅速增大,大面积频繁且持久的藻类水华,导致溶解 $\text{CO}_2$ 逐渐成为限制性因素。藻类 $\delta^{13}\text{C}$ 因此逐渐增加,沉积有机 $\delta^{13}\text{C}$ 也相应升高,有机C/N原子比值持续降低。20世纪90年代初期,湖面已无天然生长的高等水生植物了,湖内的天然沉水植物也已几乎绝迹(李文朝等,1996)。然而,浮游藻类却从20世纪50年代初期的 $26.7 \times 10^4$ 个 $\cdot\text{L}^{-1}$ ,增至90年代初期的 $4174 \times 10^4$ 个 $\cdot\text{L}^{-1}$ ,增加了155倍,其后仍没得到有效控制(秦伯强等,2004)。这种居高不下湖泊初级生产力对沉积有机质的碳同位素组成起着绝对的控制作用。近年来虽然对点源污染排放有所控制,但面源污染以及沉积物内源P释放,导致的湖泊富营养化程度继续恶化的趋势并没有得到有效遏止,湖泊水体依然保持较高的生产力水平,沉积物有机 $\delta^{13}\text{C}$ 仍旧逐年升高。

致谢 感谢中国科学院南京湖泊与地理研究所太湖湖泊生态系统研究站等单位在野外采样中给予的支持,感谢耿龙年工程师、安宁工程师、陶发祥研究员等在碳同位素分析中给予的帮助。

## 参考文献

- 范成新. 1996 太湖水体生态环境历史演变. 湖泊科学, 8(4): 297-304
- 黄文钰, 杨桂山, 许朋柱. 2002 太湖流域“零点”行动的环境效果分析. 湖泊科学, 14(1): 67-71
- 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛, 等. 1990 中国湖泊富营养化. 北京: 中国环境科学出版社.
- 李文朝. 1996 五里湖富营养化过程中水生生物及生态环境的演变. 湖泊科学, 8(增刊): 37-45
- 秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 2004 太湖水环境演化过程与机理. 北京: 科学出版社.
- 孙顺才, 黄漪平. 1993 太湖. 北京: 海洋出版社.
- 中国科学院南京地理研究所. 1965 太湖综合调查初步报告. 北京: 科学出版社.

- 周志华, 李 军, 朱兆洲. 2007 龙感湖沉积物碳、氮同位素记录的环境演化. 生态学杂志, 26(5): 693-699
- 朱广伟, 秦伯强, 高 光. 2007 太湖现代沉积物中磷的沉积通量及空间差异性. 海洋与湖泊, 38(4): 329-335
- 朱树屏, 杨光圻. 1959 太湖北部湖水中几种理化性质的周年变化. 海洋与湖泊, 2(3): 146-162
- Chang WYB. 1996 中国太湖 1950以来主要环境的变化和迅速富营养化的开始. 古生物学报, 35(2): 155-174
- Aspik KJ, Agam J, H Chau ASY. 1976 A semi-automated method for the determination of inorganic, organic and total Phosphate in sediment. Analyst, 101: 187-197.
- Bodini A. 2000 Reconstructing trophic interactions as a tool for understanding and managing ecosystems: Application to a shallow eutrophic lake. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 57: 1999-2009.
- Fry B, Sherr EB. 1984  $\delta^{13}\text{C}$  measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems. Contributions to Marine Science, 27: 13-47.
- Gu B, Schelske CL, Brenner M. 1996 Relationship between sediment and plankton isotope ratios ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ ) and primary productivity in Florida lakes. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 53: 875-883
- Hein M. 1997. Inorganic carbon limitation of photosynthesis in lake phytoplankton. Freshwater Biology, 37: 545-552
- Hollander DJ, Smith MA. 2001. Microbially mediated carbon cycling as a control on the  $\delta^{13}\text{C}$  of sedimentary carbon in eutrophic Lake Mendota (USA). New models for interpreting isotopic excursions in the sedimentary record. Geochimica et Cosmochimica Acta, 65: 4321-4337.
- Kenney WF, Waters MN, Schelske CL, et al. 2002 Sediment records of phosphorus-driven shifts to phytoplankton dominance in shallow Florida lakes. Journal of Paleolimnology, 27: 367-377.
- Lajtha K, Michener RH. 1994 Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Meyers PA. 1997 Organic geochemical proxies of paleoenvironmental, paleolimnological and paleoclimatic processes. Organic Geochemistry, 27: 213-250
- Schelske CL, Hodell DA. 1995 Using carbon isotopes of bulk sedimentary organic matter to reconstruct the history of nutrient loading and eutrophication in Lake Erie. Limnology and Oceanography, 40: 918-929.
- Sjndergaard M, Jensen JP, Jeppesen E. 2003 Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. Hydrobiologia, 506/509: 135-145.
- Stiben D, Wapensdorf E, Voss K, et al. 1998 Application of lake marls at Lake Arrendsee, NE Germany. First results of geochemical monitoring during the restoration experiment. Science of the Total Environment, 218: 33-44.
- Talbot MR, Johannessen TA. 1992 A high resolution paleoclimatic record for the last 27,000 years in tropical West Africa from the carbon and nitrogen isotope composition of lacustrine organic matter. Earth and Planetary Science Letters, 110: 23-37.

作者简介 李 军,男,1971生,博士,副研究员。主要从事环境地球化学研究。E-mail: lijun5931@163.com  
责任编辑 魏中青