

$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 沉积通量突发增大对湖泊生产力的指示*

——以程海为例

万国江** 陈敬安 胥思勤 吴丰昌

(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)

P. H. Santschi

(Department of Marine Sciences, Texas A&M University, Galveston, TX 77551, USA)

摘要 ^{210}Pb 沉积计年的基本假设是大气沉降并经由湖水转入沉积物的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 通量稳定. 当沉积速率相对稳定时, 沉积物中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度将随沉积年代呈指数衰减. 湖泊水体中的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 主要随有机微粒的沉降而进入沉积物. 如果湖泊水体中有机质沉积通量出现突发增大时, 则可能显著地增大 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 被清洗而转入沉积物的通量. 这种突发性清洗效应, 一方面显然不符合 ^{210}Pb 沉积计年的基本前提; 另一方面可能指示湖泊水体初级生产力的明显变化. 根据云南程海近代沉积物 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 垂直剖面的特殊变化, 对这一问题进行讨论. 沉积物柱芯于 1997 年 6 月采自程海深水湖区. ^{137}Cs 比活度垂直剖面呈现出 3 峰特征, 给出了可靠的计年结果并显示出近几十年间沉积物堆积的稳定性. 而 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度垂直剖面呈现出特异的峰值分布, 并与 C_{org} 垂直剖面相似. 这一现象可能与制约 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 转入沉积物的机制有关. 程海沉积物中 $\text{H}_{\text{org}}/\text{C}_{\text{org}}$ 和 $\text{C}_{\text{org}}/\text{N}_{\text{org}}$ 原子比平均值分别为 5.51 和 7.04, 表明其有机质主要源于内生藻类残骸. 根据沉积物有机质“沉降-降解-堆积”的 3 阶段特征, 模拟计算出 1970 年以来有机碳 C_{org} 的沉积通量 ($F(\text{C}_{\text{org}})$). 不同年代 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的沉积通量 ($F(^{210}\text{Pb}_{\text{ex}})$) 与 $F(\text{C}_{\text{org}})$ 显示出很好的同步关系. 特别是 1972~1974 年和 1986~1989 年的两个时段, 二者同步增大. $F(\text{C}_{\text{org}})$ 的变化导致 $F(^{210}\text{Pb}_{\text{ex}})$ 的变化; $F(^{210}\text{Pb}_{\text{ex}})$ 的变化在一定程度上反映出湖泊生产力的历史变化.

关键词 突发性清洗效应 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 湖泊初级生产力 程海

2003-03-21 收稿, 2003-06-16 收修稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40373038, 49773207)、中国科学院百人计划和美国国家科学基金项目(NSF 82-50)共同资助

** E-mail: gjw@ms.gyig.ac.cn

湖泊、海湾近代沉积物灵敏地记录了其汇水区域挽近历史时期环境变化的信息. 而准确地确定沉积年代, 则是认识环境记录的重要基础. ^{210}Pb , ^{137}Cs 及沉积纹理计年原理在数十至百年时间尺度环境计年中获得了广泛的应用^[1-19].

湖泊沉积物中蓄积的 ^{210}Pb 由沉积物所含天然铀系产物 ^{226}Ra 的衰变子体(平衡部分, 标记为 $^{210}\text{Pb}_{\text{eq}}$) 与大气沉降的 ^{222}Rn 衰变子体(非平衡部分, 也称过剩部分, 标记为 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) 组成. ^{210}Pb 沉积计年的基本假设是: 大气沉降并经由湖水转入沉积物的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 通量稳定, 并且沉积速率相对稳定时, 沉积物中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度将随沉积年代(沉积深度)呈指数衰减. 早年, 许多研究者报道了用 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 计年的良好结果^[1-9]. 然而, 表层沉积物的微粒混合作用^[13-15]、沉积物顶部 Rn 的丢失^[16]、沉积物-水界面 ^{210}Pb (及 ^{210}Po) 的沉积后迁移作用^[17-23], 以及过剩 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的校正^[24] 等问题均可能导致 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 垂直剖面的异常, 从而影响计年结果. 但是, 尚未有关于流域水体生态环境因素变化而影响输入沉积物中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 蓄积的报道.

通常, 由大气沉降和流域侵蚀而输入湖泊水体中的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 不可能全部进入沉积物中. 瑞士 Greifensee 资料表明, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在该湖沉积物中的累计量仅仅为其输入湖泊总量的 27.8%^[18, 25]. 湖泊水体中的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 主要随有机微粒的沉降而进入沉积物^[2]. 可以设想, 如果湖泊水体有机质沉积通量相对稳定时, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 由水体转入沉积物的通量会相对稳定. 反之, 当湖泊水体因营养盐积累或其他生态环境条件变化而导致湖泊初级生产力突发增高时, 必然出现藻类残骸沉积通量的增大, 相应地影响 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 被清洗而转入沉积物的通量. 这种突发性清洗效应的出现, 一方面不符合 ^{210}Pb 沉积计年的基本假设, 导致沉积物中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度垂直剖面的变异; 另一方面, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 沉积通量的这种增大却可能指示湖泊水体初级生产力的明显变化, 从而对湖泊水体富营养状态具有重要示踪价值. 本文根据云南程海沉积物 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 垂直剖面的特殊变化, 对这一问题进行讨论.

1 湖区概况

程海位于云南省西北部永胜县城西南约 20 km 处($26^{\circ}27' \sim 26^{\circ}38' \text{N}$, $100^{\circ}38' \sim 100^{\circ}41' \text{E}$), 形成于更新世早期, 系一构造断陷湖泊, 由海口河与金沙江相通. 明朝中期后水位逐年下降, 海口河断流, 湖水不再外泄并演变为闭流型湖泊. 1690~1980 年的 290 a 间, 水位下降 39 m, 平均每年下降 0.134 m.

程海呈南北向椭圆形展布, 长 19.35 km, 最大宽度 5.3 km, 平均宽约 4.0 km, 湖岸长 45.1 km, 水位 1503.0 m. 湖面面积 77.22 km², 汇水面积 228.9 km², 补给系数 2.96. 该湖平均水深 25.7 m, 最大水深 35.1 m; 蓄水量 $19.87 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年来水量 $1.477 \times 10^8 \text{ m}^3$, 水寄宿时间 13.45 a. 该湖无远源性河流输入. 入湖水中, 湖周地表径流、地下水和湖面降水分别占 18.8%, 42.7% 和 38.5%^[26].

湖区属温带山地季风气候, 主要受西南季风影响, 是典型的金沙江干热河谷区之一. 湖区年均气温 13.5°C ; 湖水年均水温 15.9°C , 历年最高水温 31.2°C (8 月), 最低水温 2.0°C (1 月), 平均变幅 13.9°C . 湖区年均降水量 738.6 mm, 6~9 月约占年降水量的 90%; 年蒸发量 2040.3 mm. 特定的水文气候条件导致了湖水呈弱碱性, 高硬度, 离子总量达 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 已接近盐湖下限.

湖区广泛发育玄武岩, 砂岩, 白云质灰岩及泥质页岩. 湖周地带性土壤以红壤、红棕壤为主, 沿湖为耕作土. 植被主要有云南松、针阔叶混交林和灌丛. 湖水黄绿色, 透明度 3.0~3.5 m, 最大 4.0 m.

2 样品的采集、处理及分析

利用湖泊沉积物-水界面装置于 1997 年 6 月在程海深水湖区采集沉积物柱芯, 样点远离湖岸、河道入口和湖水出口. 湖面气温 25.5°C , 表层水温 22°C , 覆水深 28 m, 沉积物柱芯长 43 cm. 悬浮层由粘土微粒组成, 厚度 1 cm, 质量深度 $0.073 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 孔隙度 97.0%; 采样过程中, 悬浮层未受扰动, 界面水清澈透明. 野外现场按 1.0 cm 间隔分截沉积物柱芯. 室内

1) 云南省水利水电厅、云南省水文总站编制. 云南省地表水资源. 1984, 15~16

对沉积物样品用真空冷冻干燥器(TechcompFD-3-85-MP, -79°C , 36 mT)干燥. 根据样品的干、湿称量, 计算各层节的质量深度和孔隙度. 干燥样品研磨至 0.15 mm, 备分析用.

^{210}Pb 比活度用放射化学 α 谱法通过 ^{210}Po 测量. 在采样 1.3 a 之后, 沉积物样品用 ^{208}Po 和 ^{209}Po 示踪, HNO_3 和 H_2O_2 热硝解, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 共沉淀, 银片自镀. α 谱测量使用 Canberra 公司生产的 S-100 多道能谱仪及 PIPS 硅探测器进行. 用国际间多个实验室互校的 ^{208}Po (半衰期 2.93 a) 及 ^{209}Po (半衰期 103 a) 作为示踪剂. 通过模数(M/D)转换和积分计算, ASP α 谱计数计算软件用于计数结果处理, 直接输出 $^{210}\text{Pb}(=^{210}\text{Po})$ 比活度.

^{137}Cs 及 ^{226}Ra 的比活度用 S-100 多道能谱仪进行 γ 谱测定. 根据样品量的情况, 分别用 GC5019 同轴锗探测器(效率 50%)或 GCW3022 井型锗探测器(效率 30%). ^{137}Cs 和 ^{226}Ra 计数峰的位置分别为 661.6 及 186.2 keV. 实验用液体标准源由中国科学院原子能研究所和美国同位素产品实验室(Isotope Products Laboratories, Gentech Industries Inc., USA)提供.

有机 C, H, N, S 采用 PE 公司生产的 PE2400 SERIES II 型元素分析仪分析, 测量误差小于 5%. 无机碳(C_{inorg})采用化学容量法测定, 测量误差小于 10%.

3 分析结果及讨论

沉积物柱芯中 ^{210}Pb , ^{137}Cs 及 C-H-N-S 等元素的分析结果汇总于表 1, 表 2 及图 1 至图 4. 根据分析资料进行如下讨论:

3.1 沉积物顶部的微粒混合作用及 ^{210}Pb 丢失

程海沉积物顶部悬浮层约为 1 cm 厚. 由表 1 和表 2 可见其主要特征是: (i) 悬浮层微粒中总碳含量偏低, C_{total} 为 2.14%. 其中, C_{inorg} 与 C_{org} 分别为 0.87%, 1.26%, 显示出湖水对碳酸盐沉积的过饱和特征. (ii) ^{137}Cs 在悬浮层微粒中的比活度较其下覆的沉积物顶部层节略高, 为 $(7.0 \pm 1.5)\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表明了 ^{137}Cs 在沉积物-水界面微粒混合作用特征. (iii) 与 ^{226}Ra 平衡的 $^{210}\text{Pb}_{\text{eq}}$ 比活度高达 $(97.6 \pm 4.0)\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, 为该沉积物柱芯平均值的 1.7 倍, 并明显较 $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$

比活度 $(81.3 \pm 4.2)\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 高. 当考虑到不同测量方法之间的可能误差及 ^{210}Pb 与 ^{210}Po 之间的不平衡因素后, 这种差异仍然可能存在. 这一方面表明 ^{226}Ra 在表层沉积物中伴随 MnO_2 而富集, 另一方面显示出沉积物悬浮层微粒中 ^{210}Pb 与 ^{226}Ra 的不平衡状况, 并存在着 ^{226}Rn , ^{210}Pb (或 ^{210}Po) 的迁移丢失. 此外, 悬浮层及沉积物顶部 2 cm 层节微粒样品的 γ 谱测量发现, 在 477.6 keV 及其附近能量位置的计数率为背景水平, 未能检测出 ^7Be 的存在. 这一现象说明雨季来临之前, ^7Be 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 等核素的大气沉降和转入沉积物是不明显的.

3.2 ^{137}Cs 比活度垂直剖面给出可靠的沉积物堆积速率并显示沉积作用的稳定性

表 1 资料可见, 程海沉积物柱芯中 ^{137}Cs 比活度随沉积物深度呈现出 3 峰特征. 这与洱海和红枫湖沉积物柱芯的 ^{137}Cs 垂直分布剖面^[27~30]相似. ^{137}Cs 的最大蓄积峰出现在质量深度 $14.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ (35 cm), 标记了 1964 年全球散落高峰; 质量深度 $9.56 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ (24 cm) 处出现的次级蓄积峰, 与 1975 年的全球散落沉降一致. 而质量深度 $3.36 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ (9 cm) 以上 ^{137}Cs 比活度的增高, 则与前苏联切尔诺贝利核电站于 1986 年发生的核泄漏有关.

利用 1964 年 ^{137}Cs 的蓄积峰及 1975 年次级蓄积峰的位置分别作为计年时标, 该柱芯沉积物平均堆积速率分别为 $(0.433 \pm 0.006)\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; $(0.434 \pm 0.011)\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. 两个不同时标确定的沉积物堆积速率很相近, 平均值为 $(0.43 \pm 0.01)\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 3). 上述 ^{137}Cs 时标平均沉积物堆积速率计算不仅给出了可靠的计年结果; 而且该沉积物柱芯还显示出近几十年间, 程海的沉积物堆积相当稳定. 图 1 中绘出了 CH970608-1 柱芯中校正到沉积年代 ^{137}Cs 比活度的垂直剖面分布. 图 2 给出了该沉积物柱芯的时间标尺.

3.3 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度垂直剖面显示出不稳定蓄积的特异峰值分布变异

由图 1 可见: 程海沉积物柱芯中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度垂直剖面呈现出特异的峰值分布. 其特征是: (i) $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在沉积物顶部 2 cm ($0.53 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$) 以内存在明

表1 程海沉积物柱芯(CH970608-1) ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 资料汇总^{a)}

| 几何深度 /cm | 质量深度 /g·cm ⁻² | 沉积年代 | | $^{137}\text{Cs}^{\text{b)}}$ | $^{137}\text{Cs}^{\text{c)}}$ | $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ | $^{210}\text{Pb}_{\text{eq}}$ | $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}^{\text{b)}}$ | $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}^{\text{c)}}$ | $F(^{210}\text{Pb}_{\text{ex}})^{\text{c)}}$ | $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ |
|-------------|-----------------------------|------|--------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|---|---|--|---------------------------------|
| | | /a | 公元 | /Bq·kg ⁻¹ | /Bq·kg ⁻¹ | /Bq·kg ⁻¹ | /Bq·kg ⁻¹ | /Bq·kg ⁻¹ | /Bq·kg ⁻¹ | /Bq·m ⁻² ·a ⁻¹ | / $^{137}\text{Cs}^{\text{c)}}$ |
| 0 | 0.04 | 0.1 | 1997.4 | 7.00±1.46 | 7.01±1.46 | 81.3±4.2 | 97.6±4.0 | 30.8±2.0 | 30.9±2.0 | 134.1 | 4.4 |
| 1 | 0.25 | 0.6 | 1996.9 | 5.07±0.54 | 5.14±0.55 | 100.1±4.7 | 55.4±1.3 | 50.4±2.7 | 51.3±2.7 | 222.5 | 10.0 |
| 2 | 0.53 | 1.2 | 1996.3 | 5.14±0.61 | 5.28±0.63 | 106.2±5.4 | 61.5±1.4 | 56.8±3.2 | 59.0±3.3 | 255.9 | 11.2 |
| 3 | 0.78 | 1.8 | 1995.7 | 4.19±0.59 | 4.36±0.62 | 97.4±4.4 | 57.3±1.6 | 47.6±2.5 | 50.3±2.7 | 218.4 | 11.5 |
| 4 | 1.24 | 2.9 | 1994.6 | 5.81±0.76 | 6.20±0.81 | 92.7±4.8 | 56.3±1.9 | 42.7±2.6 | 46.7±2.9 | 202.6 | 7.5 |
| 5 | 1.73 | 4.0 | 1993.5 | 5.65±0.58 | 6.19±0.64 | 89.3±5.8 | 57.7±1.4 | 39.2±2.7 | 44.3±3.1 | 192.3 | 7.2 |
| 6 | 2.11 | 4.9 | 1992.6 | 6.57±0.66 | 7.34±0.74 | 77.4±4.4 | 61.5±1.7 | 26.8±1.7 | 31.2±2.0 | 135.3 | 4.2 |
| 7 | 2.55 | 5.9 | 1991.6 | 9.75±0.72 | 11.15±0.83 | 72.4±4.8 | 52.3±1.4 | 21.6±1.5 | 25.9±1.8 | 112.5 | 2.3 |
| 8 | 2.98 | 6.9 | 1990.6 | 9.89±0.80 | 11.57±0.94 | 66.9±3.5 | 50.8±1.8 | 15.9±1.0 | 19.6±1.2 | 85.1 | 1.7 |
| 9 | 3.36 | 7.7 | 1989.8 | 7.92±0.82 | 9.45±0.97 | 81.1±4.5 | 63.3±2.2 | 30.6±2.0 | 38.9±2.5 | 168.9 | 4.1 |
| 10 | 3.69 | 8.5 | 1989.0 | 2.91±0.48 | 3.54±0.58 | 107.3±5.1 | 62.9±1.4 | 57.9±3.1 | 75.3±4.0 | 327.0 | 21.3 |
| 11 | 4.15 | 9.6 | 1987.9 | 2.66±0.59 | 3.32±0.73 | 119.2±5.4 | 75.7±1.5 | 70.7±3.5 | 95.1±4.7 | 412.9 | 28.7 |
| 12 | 4.65 | 10.7 | 1986.8 | 3.82±0.41 | 4.89±0.53 | 103.6±4.8 | 57.2±1.1 | 54.0±2.7 | 75.3±3.8 | 326.7 | 15.4 |
| 13 | 5.00 | 11.5 | 1986.0 | 4.49±0.45 | 5.85±0.58 | 86.7±4.1 | 60.0±1.2 | 36.7±1.9 | 52.4±2.7 | 227.5 | 9.0 |
| 14 | 5.38 | 12.4 | 1985.1 | 4.88±0.45 | 6.48±0.60 | 86.6±5.0 | 52.8±1.1 | 36.4±2.2 | 53.4±3.3 | 231.7 | 8.2 |
| 15 | 5.77 | 13.3 | 1984.2 | 5.29±0.56 | 7.17±0.76 | 75.0±4.1 | 70.2±1.5 | 24.4±1.4 | 36.9±2.2 | 160.2 | 5.1 |
| 16 | 6.16 | 14.2 | 1983.3 | 6.25±0.53 | 8.65±0.73 | 81.4±3.8 | 61.9±1.3 | 30.9±1.6 | 48.0±2.4 | 208.5 | 5.6 |
| 17 | 6.55 | 15.1 | 1982.4 | 5.87±0.60 | 8.29±0.85 | 70.8±3.7 | 69.9±1.4 | 20.1±1.1 | 32.0±1.8 | 139.0 | 3.9 |
| 18 | 6.95 | 16.0 | 1981.5 | 7.24±0.61 | 10.46±0.88 | 78.1±4.7 | 55.3±1.4 | 27.5±1.8 | 45.2±3.0 | 196.3 | 4.3 |
| 19 | 7.38 | 17.0 | 1980.5 | 7.54±0.60 | 11.13±0.89 | 72.3±3.8 | 67.8±1.7 | 21.6±1.3 | 36.6±2.1 | 158.7 | 3.3 |
| 20 | 7.83 | 18.0 | 1979.5 | 7.71±0.66 | 11.66±0.99 | 74.0±4.3 | 51.8±1.7 | 23.3±1.6 | 40.7±2.7 | 176.7 | 3.5 |
| 21 | 8.25 | 19.0 | 1978.5 | 8.21±0.61 | 12.69±0.94 | 74.7±3.9 | 73.6±1.5 | 24.0±1.4 | 43.3±2.5 | 188.1 | 3.4 |
| 22 | 8.67 | 20.0 | 1977.5 | 9.75±0.76 | 15.42±1.20 | 74.4±4.7 | 52.6±1.7 | 23.6±1.7 | 43.8±3.1 | 190.2 | 2.8 |
| 23 | 9.10 | 21.0 | 1976.5 | 10.40±0.74 | 16.83±1.19 | 65.8±3.3 | 50.2±1.6 | 14.7±0.9 | 28.2±1.7 | 122.6 | 1.7 |
| 24 | 9.56 | 22.0 | 1975.5 | 11.85±0.83 | 19.62±1.37 | 71.8±3.8 | 47.8±1.6 | 21.0±1.3 | 41.5±2.6 | 180.0 | 2.1 |
| 25 | 10.00 | 23.0 | 1974.5 | 9.89±0.74 | 16.76±1.26 | 89.4±4.2 | 55.8±1.8 | 39.4±2.3 | 80.6±4.6 | 349.6 | 4.8 |
| 26 | 10.37 | 23.9 | 1973.6 | 4.39±0.56 | 7.59±0.96 | 105.3±5.7 | 60.2±1.4 | 55.8±3.3 | 117.2±6.9 | 508.5 | 15.4 |
| 27 | 10.72 | 24.7 | 1972.8 | 4.24±0.52 | 7.47±0.91 | 88.3±4.1 | 50.7±1.3 | 38.4±2.0 | 82.5±4.4 | 358.2 | 11.1 |
| 28 | 11.07 | 25.5 | 1972.0 | 5.38±0.55 | 9.66±0.99 | 88.5±4.7 | 53.6±1.4 | 38.3±2.3 | 84.5±5.0 | 366.6 | 8.7 |
| 29 | 11.45 | 26.4 | 1971.1 | 8.42±0.76 | 15.42±1.39 | 68.3±5.0 | 52.8±1.5 | 17.2±1.3 | 39.1±3.0 | 169.5 | 2.5 |
| 30 | 11.91 | 27.4 | 1970.1 | 10.44±0.73 | 19.60±1.37 | 68.6±4.7 | 47.7±1.5 | 17.6±1.3 | 41.2±3.1 | 178.9 | 2.1 |
| 31 | 12.40 | 28.6 | 1968.9 | 13.12±0.85 | 25.26±1.64 | 32.4±1.7 | 45.4±1.6 | | | | |
| 32 | 12.88 | 29.7 | 1967.8 | 16.86±1.13 | 33.31±2.23 | 58.3±4.2 | 56.0±2.3 | 6.9±0.6 | 17.3±1.4 | | 0.5 |
| 33 | 13.37 | 30.8 | 1966.7 | 17.19±1.20 | 34.83±2.44 | 35.3±2.4 | 51.6±2.2 | | | | |
| 34 | 13.84 | 31.9 | 1965.6 | 17.16±1.01 | 35.64±2.10 | 54.4±2.6 | 50.6±1.9 | 2.8±0.2 | 7.5±0.5 | | 0.2 |
| 35 | 14.30 | 32.9 | 1964.6 | 21.45±1.37 | 45.64±2.92 | 53.5±4.5 | 51.5±2.4 | 1.9±0.2 | 5.2±0.5 | | 0.1 |
| 36 | 14.73 | 33.9 | 1963.6 | 19.71±1.20 | 42.90±2.62 | 54.9±2.8 | 60.5±2.4 | 3.3±0.2 | 9.5±0.6 | | 0.2 |
| 37 | 15.18 | 35.0 | 1962.5 | 16.04±1.14 | 35.77±2.54 | 55.6±3.6 | 49.4±2.1 | 4.0±0.3 | 12.0±0.9 | | 0.3 |
| 38 | 15.64 | 36.0 | 1961.5 | 14.48±1.17 | 33.07±2.68 | 53.3±2.8 | 53.9±2.4 | 1.7±0.1 | 5.3±0.4 | | 0.2 |
| 39 | 16.62 | 38.3 | 1959.2 | 14.51±1.00 | 34.91±2.41 | 54.3±2.7 | 49.8±1.9 | 2.7±0.2 | 8.5±0.5 | | 0.2 |
| 40 | 17.23 | 39.7 | 1957.8 | 5.41±0.84 | 13.45±2.10 | 48.0±3.0 | 53.4±1.9 | | | | -- |

a) 表内样品采样时间: 1997年6月8日; ^{137}Cs 测量时间: 1997年12月至1998年6月; 放化处理时间: 1998年9月至1998年12月, 放射性测量按1个标准差

b) 校正到采样时间

c) 校正到沉积时间

表 2 程海沉积物柱芯(CH970608-1)C-H-N-S 资料汇总^{a)}

| 几何深度 /cm | 质量深度 /g · cm ⁻² | 沉积年代 | | 孔隙度/% | C _{total} /% | C _{inorg} /% | C _{org} /% | H _{org} /% | N _{org} /% | S _{org} /% | F(C _{org})/g m ⁻² a ⁻¹ |
|-------------|-------------------------------|------|--------|-------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--|
| | | /a | 公元 | | | | | | | | |
| 0 | 0.04 | 0.1 | 1997.4 | 97.0 | 2.14 | 0.87 | 1.26 | 0.45 | 0.34 | 0.06 | 54.8 |
| 1 | 0.25 | 0.6 | 1996.9 | 85.5 | 2.53 | 1.03 | 1.50 | 0.70 | 0.30 | 0.06 | 65.0 |
| 2 | 0.53 | 1.2 | 1996.3 | 91.5 | 2.71 | 1.21 | 1.50 | 0.71 | 0.26 | 0.08 | 65.1 |
| 3 | 0.78 | 1.8 | 1995.7 | 88.7 | 2.72 | 1.22 | 1.50 | 0.72 | 0.20 | 0.04 | 65.2 |
| 4 | 1.24 | 2.9 | 1994.6 | -- | 2.56 | 1.04 | 1.52 | 0.63 | 0.26 | 0.03 | 65.9 |
| 5 | 1.73 | 4.0 | 1993.5 | 86.1 | 2.24 | 0.91 | 1.33 | 0.70 | 0.22 | 0.06 | 60.8 |
| 6 | 2.11 | 4.9 | 1992.6 | 82.7 | 2.04 | 0.79 | 1.25 | 0.77 | 0.24 | 0.07 | 59.2 |
| 7 | 2.55 | 5.9 | 1991.6 | 81.8 | 1.91 | 0.80 | 1.10 | 0.69 | 0.20 | 0.07 | 54.5 |
| 8 | 2.98 | 6.9 | 1990.6 | 83.4 | 2.00 | 0.77 | 1.22 | 0.85 | 0.21 | 0.08 | 63.2 |
| 9 | 3.36 | 7.7 | 1989.8 | 85.5 | 2.26 | 1.03 | 1.23 | 0.73 | 0.24 | 0.09 | 66.2 |
| 10 | 3.69 | 8.5 | 1989.0 | 87.3 | 3.15 | 1.46 | 1.70 | 0.63 | 0.34 | 0.09 | 94.1 |
| 11 | 4.15 | 9.6 | 1987.9 | -- | 3.17 | 1.42 | 1.75 | 0.67 | 0.34 | 0.11 | 101.9 |
| 12 | 4.65 | 10.7 | 1986.8 | 84.8 | 2.54 | 1.34 | 1.20 | 0.73 | 0.27 | 0.08 | 73.5 |
| 13 | 5.00 | 11.5 | 1986.0 | 86.0 | 2.45 | 1.52 | 0.93 | 0.65 | 0.26 | 0.10 | 58.9 |
| 14 | 5.38 | 12.4 | 1985.1 | 83.7 | 2.55 | 1.86 | 0.69 | 0.61 | 0.24 | 0.09 | 45.5 |
| 15 | 5.77 | 13.3 | 1984.2 | 84.2 | 2.11 | 1.03 | 1.08 | 0.58 | 0.24 | 0.11 | 73.7 |
| 16 | 6.16 | 14.2 | 1983.3 | 84.0 | 2.02 | 1.03 | 0.99 | 0.71 | 0.22 | 0.10 | 70.0 |
| 17 | 6.55 | 15.1 | 1982.4 | 84.2 | 2.11 | 0.97 | 1.13 | 0.59 | 0.10 | 0.11 | 83.7 |
| 18 | 6.95 | 16.0 | 1981.5 | 83.1 | 2.02 | 1.18 | 0.84 | 0.73 | 0.17 | 0.11 | 64.3 |
| 19 | 7.38 | 17.0 | 1980.5 | 81.8 | 2.05 | 1.23 | 0.83 | 0.61 | 0.13 | 0.14 | 66.2 |
| 20 | 7.83 | 18.0 | 1979.5 | 81.6 | 1.96 | 1.10 | 0.86 | 0.65 | 0.11 | 0.11 | 72.1 |
| 21 | 8.25 | 19.0 | 1978.5 | 83.9 | 1.94 | 1.06 | 0.88 | 0.65 | 0.12 | 0.12 | 76.7 |
| 22 | 8.67 | 20.0 | 1977.5 | 81.9 | 1.89 | 0.99 | 0.89 | 0.66 | 0.14 | 0.13 | 81.2 |
| 23 | 9.10 | 21.0 | 1976.5 | 82.4 | 1.89 | 0.95 | 0.94 | 0.60 | 0.08 | 0.14 | 90.0 |
| 24 | 9.56 | 22.0 | 1975.5 | 80.6 | 1.84 | 0.83 | 1.01 | 0.74 | 0.16 | 0.12 | 100.9 |
| 25 | 10.00 | 23.0 | 1974.5 | 83.4 | 2.42 | 1.20 | 1.22 | 0.79 | 0.26 | 0.12 | 127.1 |
| 26 | 10.37 | 23.9 | 1973.6 | 86.0 | 2.87 | 1.61 | 1.26 | 0.82 | 0.23 | 0.13 | 135.8 |
| 27 | 10.72 | 24.7 | 1972.8 | 85.8 | 3.46 | 1.41 | 2.05 | 0.83 | 0.29 | 0.17 | 229.6 |
| 28 | 11.07 | 25.5 | 1972.0 | 85.4 | 2.29 | 1.32 | 0.97 | 0.80 | 0.25 | 0.14 | 112.9 |
| 29 | 11.45 | 26.4 | 1971.1 | 83.6 | 1.90 | 1.06 | 0.84 | 0.71 | 0.16 | 0.16 | 100.9 |
| 30 | 11.91 | 27.4 | 1970.1 | 78.8 | 1.78 | 0.93 | 0.85 | 0.69 | 0.17 | 0.15 | 107.5 |
| 31 | 12.40 | 28.6 | 1968.9 | 81.5 | 1.79 | 0.90 | 0.89 | 0.67 | 0.17 | 0.16 | 117.7 |
| 32 | 12.88 | 29.7 | 1967.8 | 78.9 | 1.66 | 0.69 | 0.97 | 0.67 | 0.18 | 0.17 | 134.5 |
| 33 | 13.37 | 30.8 | 1966.7 | 81.8 | 1.69 | 1.11 | 0.58 | 0.73 | 0.26 | 0.17 | |
| 34 | 13.84 | 31.9 | 1965.6 | 79.5 | 1.70 | 1.31 | 0.38 | 0.69 | 0.21 | 0.18 | |
| 35 | 14.30 | 32.9 | 1964.6 | 83.0 | 2.03 | 1.45 | 0.58 | 0.83 | 0.22 | 0.18 | |
| 36 | 14.73 | 33.9 | 1963.6 | 82.1 | 1.87 | 1.46 | 0.40 | 0.75 | 0.20 | 0.18 | |
| 37 | 15.18 | 35.0 | 1962.5 | 80.9 | 1.85 | 1.45 | 0.39 | 0.74 | 0.19 | 0.16 | |
| 38 | 15.64 | 36.0 | 1961.5 | 81.6 | 1.90 | 1.61 | 0.29 | 0.72 | 0.20 | 0.20 | |
| 39 | 16.62 | 38.3 | 1959.2 | 78.9 | 2.00 | 1.70 | 0.30 | 0.64 | 0.20 | 0.17 | |
| 40 | 17.23 | 39.7 | 1957.8 | -- | 1.99 | 1.34 | 0.65 | 0.71 | 0.19 | 0.16 | |

a) 样品采样时间: 1997年6月8日

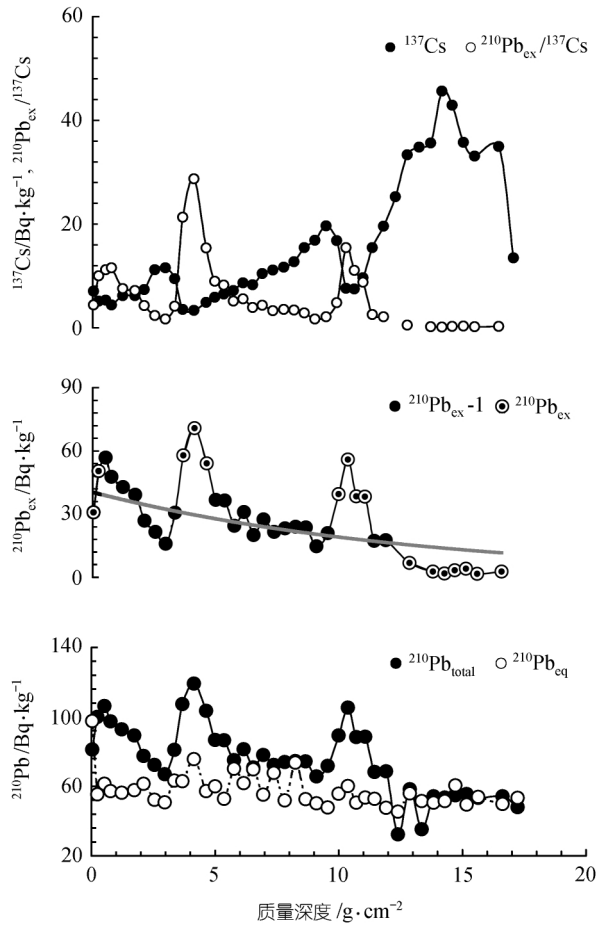


图 1 程海沉积物柱芯(CH970608-1) ^{210}Pb 及 ^{137}Cs 垂直剖面比较

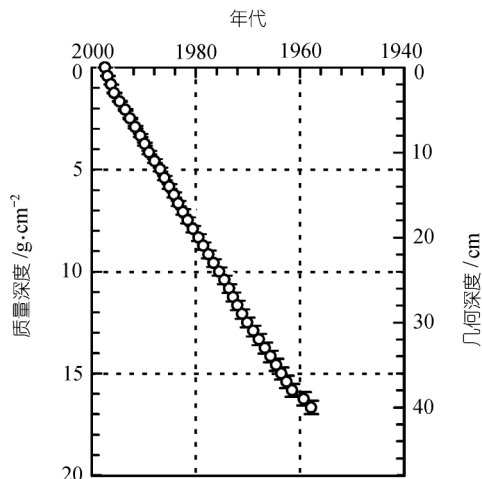


图 2 程海沉积物柱芯(CH970608-1)时间标尺

显的丢失现象; (ii) $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在质量深度 3.69~4.65 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ (即 10~12 cm)及 10.00~11.07 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ (即 25~28 cm)存在着异常的峰值分布; (iii) 在质量深度 12.88 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ (即 32 cm)以下, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 处于背景水平的波动. 这种特异的峰值分布图示不仅与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 沉积计年基本假设相符; 而且也不能用沉积物的机械混合、生物扰动或沉积后再迁移等因素进行解释.

同时, 图 1 还可见: $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ 与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的垂直剖面变化趋势一致, 也呈现出相似的峰值分布. 而与 ^{226}Ra 平衡的 $^{210}\text{Pb}_{\text{eq}}$ 垂直剖面处于比较稳定的水平. ^{226}Ra 作为天然放射性 U 系衰变的中间产物, 存在于粘土矿物结晶骨架中. 表土微粒中绝大部分 ^{226}Ra 以残渣相存在^[31,32]. 不考虑悬浮层的特殊情况, 整个柱芯中 $^{210}\text{Pb}_{\text{eq}}$ 平均值为 $56.7 \pm 3.2 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$. 上述现象一方面显示出程海沉积物柱芯中 $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ 的垂直剖面波动主要受 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的影响; 另一方面还说明程海沉积物柱芯中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的沉积通量在某些时段存在着明显的突发性增大现象.

$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度垂直剖面的特异峰值分布还与 ^{137}Cs 比活度的垂直剖面存在对耦关系. 校正到沉积年代的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 ^{137}Cs 比活度比值($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}} / ^{137}\text{Cs}$)不仅与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 垂直剖面图示一致, 还同样与 ^{137}Cs 比活度垂直剖面对耦. 这一现象证明了 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度的特异峰值分布与制约 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 转入沉积物的沉积过程有关. 为证实 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 沉积过程受有机质沉积作用控制, 有必要进一步考察程海沉积物中有机质的来源和年际变化.

当然, 尽管 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的垂直剖面展示出明显的波动性, 不适宜于沉积计年. 但是, 当不考虑 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在沉积物-水界面的丢失、沉积峰值的出现以及低水平背景波动等因素时, 我们仍然可以由图 1 中的($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}-1$)部分, 模拟出其比活度随沉积深度的指数衰减关系: $A_{\text{Pb-210}}=40.43\exp(-0.0748Z)$, $r=0.71$. 按照此关系计算出沉积物平均堆积速率为 $0.42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. 此值与表 3 中列出的 ^{137}Cs 时标计年结果相近, 同样佐证了 ^{137}Cs 时标沉积物计年结果的可靠性.

3.4 程海沉积物中 C_{org} 的沉积过程特征

图 3 绘出了程海沉积物中总碳(C_{total})、有机碳

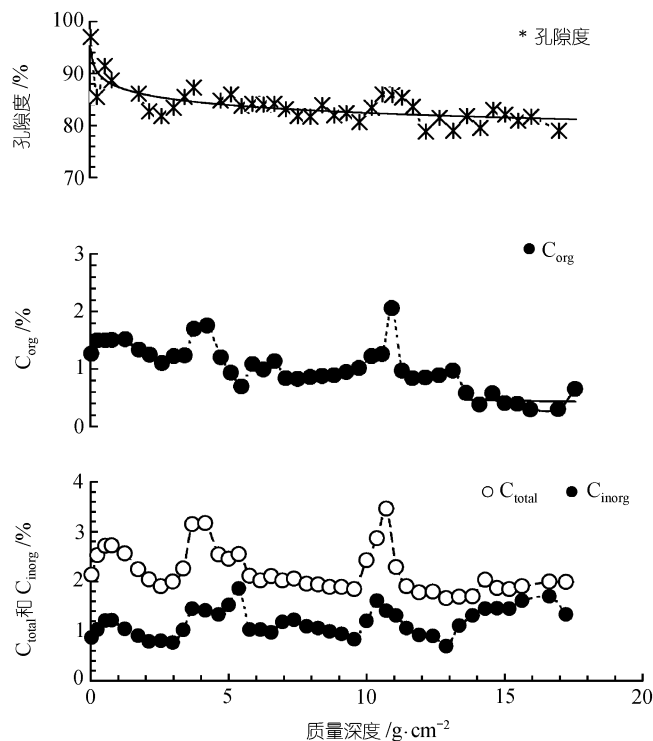
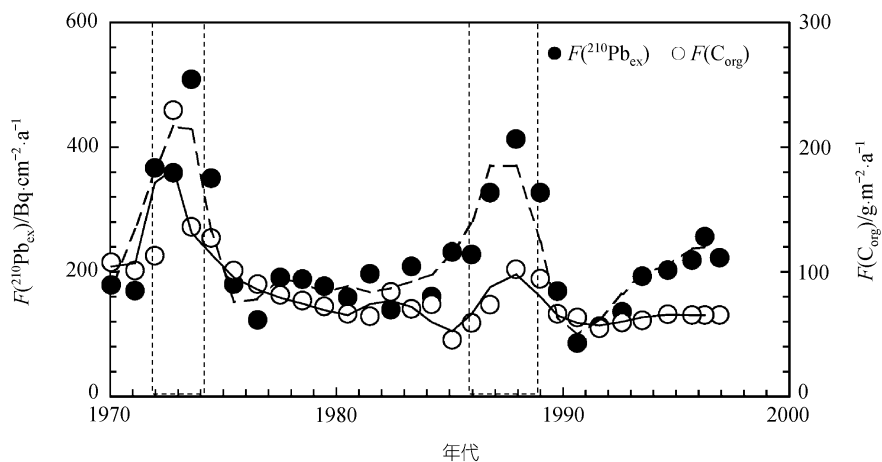


图 3 程海沉积物柱芯(CH970608-1)碳垂直剖面比较

图 4 程海沉积物中近 30 年 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 C_{org} 沉积通量变化表 3 程海 ^{137}Cs 时标计年的沉积物平均堆积速率

| 柱芯号 | 时标年代 | 质量深度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ | 沉积物平均堆积速率 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ |
|------------|------|---|--|
| CH970608-1 | 1964 | 14.30 | 0.433 ± 0.006 |
| | 1975 | 9.56 | 0.434 ± 0.011 |
| | 平均 | | 0.43 ± 0.01 |

(C_{org})和无机碳(C_{inorg})含量的垂直剖面。由图可见,三者都表现出非常规的分布特征;并且沉积物组成的变化也同样在沉积物孔隙度的垂直剖面中显示出来。在 C_{org} 的增高层节,孔隙度呈现出同步增大。在该沉积物柱芯质量深度 $12.88 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ (即 32 cm)以内,有

机碳(C_{org})和无机碳(C_{inorg})的蓄积共同制约着碳的堆积. 一些年代, 二者基本同步; 而另一些年代, 二者存在对耦关系. 这暗示了不同年份程海碳的沉积过程有着明显的变化. 由于程海湖水对碳酸盐过饱和程度大, 其深水湖区沉积物碳酸盐主要产生于自生沉积作用^[33]. 当温度及其引起的光合作用强度对自生碳酸盐沉淀起主导作用时, 有机碳(C_{org})与无机碳(C_{inorg})含量呈正相关变化^[34].

湖泊沉积物有机质的碳-氮-氢组成与其物源关系密切. 当沉积物有机质主要来源于水生浮游植物残骸时, 其 H_{org} 与 C_{org} 的原子比通常大于 1.7, C_{org} 与 N_{org} 的原子比一般小于 $10^{[35, 36]}$. 程海沉积物有机质具有较高的 $\text{H}_{\text{org}}/\text{C}_{\text{org}}$ 原子比和较低的 $\text{C}_{\text{org}}/\text{N}_{\text{org}}$ 原子比^[34]. 在有机质沉降阶段(即 1~4 cm 深度)的沉积物中 $\text{H}_{\text{org}}/\text{C}_{\text{org}}$ 原子比平均值和 $\text{C}_{\text{org}}/\text{N}_{\text{org}}$ 原子比平均值分别为 5.51 和 7.04. 二者都表明程海沉积物有机质主要源于内生藻类残骸.

洱海现代沉积作用的研究中, 业已从沉积物有机碳垂直剖面分布展示出有机质“沉降-降解-堆积”的三阶段特征^[37~39]. 程海沉积物柱芯顶部 4 cm(即质量深度 $1.24 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$)有机碳(C_{org})含量稳定, 平均值为 1.50%, 显示出其有机质在沉积后的 4 a 间处于稳定的沉降阶段; 而 33 cm 深度(质量深度 $13.37 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$)以下, 即沉积物形成约 30 a 以后, 有机碳(C_{org})含量再度趋于稳定, 平均值为 0.45%, 有机质进入堆积阶段. 假设沉积物形成后的 4~30 a 间, 有机质处于降解阶段, 根据观测数据, 计算得程海沉积物在早期成岩作用过程中有机质降解的速率常数 $\lambda = 0.0434 \text{ a}^{-1}$, 寄宿时间 $\tau = 23 \text{ a}$, 即是程海沉积物中有机碳(C_{org})存在的半衰减时间为 16 a. 由此可见, 由于湖区年均气温较高的影响, 程海沉积物早期成岩作用过程中有机质降解速率为洱海的 2.52 倍. 根据上述模拟结果, 并按沉积物平均堆积速率计年, 分别计算出 1970 年以来(即沉积深度 30 cm, 质量深度 $12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 以上)有机碳(C_{org})的沉积通量($F(\text{C}_{\text{org}})$)(表 2, 图 4).

4 结论: $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 对湖泊初级生产力历史变化的示踪价值

图 1 与图 3 比较可见, 程海沉积物中 C_{org} 垂直剖

面显示出与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 相似的特异峰值分布. 当计算出不同年代 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的沉积通量($F(^{210}\text{Pb}_{\text{ex}})$)并与有机碳(C_{org})的沉积通量($F(\text{C}_{\text{org}})$)比较, 总体显示出很好的同步沉积关系(表 1、表 2, 图 4). 其中, 特别是 1972~1974 年和 1986~1989 年的两个时段, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 与 C_{org} 二者的沉积通量明显同步增大.

$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 来源于大气沉降, 未能进入沉积物的矿物晶格, 主要集中在非残渣相^[2]. 前期研究资料^[20]计算表明, 洱海和红枫湖沉积物中非碳酸盐相铅分别占总铅的 95.5% 和 96.4%, 而碳酸盐相铅的比例仅为 4.5% 和 3.6%. 可以认为, 有机质沉积通量的突发性增高成为导致 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 被清洗而转入沉积物通量增大的主要原因. 反之, 沉积物 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 沉积通量的增大在一定程度上指示出湖泊初级生产力突发性增高的历史变化.

致谢 本项研究中曾获郭劳动博士、白占国、王长生研究员、黄荣贵高级实验师等的帮助, 谨此一并致谢.

参 考 文 献

- 1 Goldberg E D, Koide M. Rates of sediment accumulation in the Indian Ocean. In: Geiss J, Goldberg E D, ed. Earth Sciences and Meteoritics. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1963. 90~102
- 2 Krishnaswamy S, Lal D, Martin J M, et al. Geochronology of lake sediments. Earth and Planetary Science Letters, 1971, 11: 407~414
- 3 Koide M, Soutar A, Goldberg E D. Marine geochronology with ^{210}Pb . Earth and Planetary Science Letters, 1972, 14: 442~446
- 4 Robbins J A, Edgington D N. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using ^{210}Pb and ^{137}Cs . Geochimica et Cosmochimica Acta, 1975, 39: 285~304
- 5 Appleby P G, Oldfield F. The calculation of ^{210}Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. Catena, 1978, 5: 1~8
- 6 Wan G J, Appleby P G. Radionuclides in ecological systems. In: Farina A, ed. Perspectives in Ecology, A Glance from the VII International Congress of Ecology (INTECOL), Florence, Italy, 19-25 July 1998. Leiden: Backhuys Publishers of NL, 1999. 369~379
- 7 万国江. ^{137}Cs 及 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 方法湖泊沉积计年研究新进展. 地球科学进展, 1995, 10 (2): 188~192
- 8 万国江, Appleby P G. 环境生态系统散落核素示踪研究新进展. 地球科学进展, 2000, 15(2): 172~177
- 9 万国江. 现代沉积的 ^{210}Pb 计年. 第四纪研究, 1997, (3): 230~239
- 10 蔡平河, 黄奕普, 陈 敏, 等. 运用 $^{228}\text{Ra}-\text{NO}_3^-$ 法测定南沙海域

- 的新生产力. 中国科学, D 辑, 2002, 32(3): 249~254
- 11 朱立平, 陈玲, 李炳元, 等. 西昆仑山南红山湖沉积反映的过去 150a 湖区环境变化. 中国科学, D 辑, 2001, 31(7): 601~607
 - 12 吴敬禄, Schleser G H, 王苏民, 等. 青藏高原东部兴措湖近 0.2 ka 来的气候定量复原. 中国科学, D 辑, 2001, 31(12): 1024~1030
 - 13 Edgington D N, Robbins J A. Patterns of deposition of natural and fallout radionuclides in sediments of Lake Michigan and their relation to limnological processes. In: Nriagu J O, ed. Environmental Biogeochemistry. Ann Arbor, 1976, 2: 705~729
 - 14 Dominik J, Mangini A, Muller G. Determination of recent deposition rates in Lake Constance with radioscopic methods. Sedimentology, 1981, 28: 653~677
 - 15 Bloesch J, Evans R D. Lead-210 dating of sediments compared with accumulation rates estimated by natural markers and measured with sediment traps. Hydrobiologia, 1982, 92: 578~586
 - 16 Imboden D M, Stiller M. The influence of radon diffusion on the ^{210}Pb distribution in sediments. J Geophys Res, 1982, 87: 557~565
 - 17 Wan G J, Santschi P H, Farrenkothen K, et al. Postdepositional remobilization of ^{210}Pb in freshwater sediments. EOS, 1984, 65(45): 941
 - 18 Wan G J, Santschi P, Sturm M, et al. Natural (^{210}Pb , ^7Be) and fallout (^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{90}Sr) radionuclides as geochemical tracers of sedimentation in Greifensee, Switzerland. Chemical Geology, 1987, 63: 181~196
 - 19 万国江, Santschi P H, Sturm M, 等. 放射性核素和纹理工率对比研究瑞士格莱芬湖近代沉积速率. 地球化学, 1986, (3): 259~270
 - 20 万国江, 刘菊英, 黎秉铭. 洱海沉积物顶部铅的同位素特征和再迁移作用. 科学通报, 1992, 37(9): 825~828
 - 21 Wan Guojiang. Remobilization of Pb during the early diagenesis in the lacustrine sediments. International Association of Theoretical and Applied Limnology. Proceedings, 1993, 25(I): 242~248
 - 22 Santschi P H, Hoehener P, Benoit G, et al. Chemical processes at the sediment-water interface. Marine Chemistry, 1990, 30: 269~315
 - 23 Benoit G, Hemond H F. Evidence for diffusive redistribution of Pb in lake sediments. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 55: 1963~1975
 - 24 万国江, 黄荣贵, 王长生, 等. 红枫湖沉积物顶部 $^{210}\text{Po}_{\text{ex}}$ 垂直剖面的变异. 科学通报, 1990, 35(8): 621~624
 - 25 万国江, Santschi P H. 瑞士 Greifensee 湖沉积物中放射性核素累计值预测研究. 地理科学, 1987, 7(4): 358~363
 - 26 王苏民, 窦鸿身, 主编. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998. 377~378
 - 27 万国江, 林文祝, 黄荣贵, 等. 红枫湖沉积物 ^{137}Cs 垂直剖面的计年特征及侵蚀示踪. 科学通报, 1990, 35(19): 1490~1493
 - 28 万国江. 现代沉积年分辨的 ^{137}Cs 计年——以云南洱海和贵州红枫湖为例. 第四纪研究, 1999, 19 (1): 73~80
 - 29 徐经意, 万国江, 王长生, 等. 云南省泸沽湖、洱海现代沉积物中 ^{210}Pb , ^{137}Cs 的垂直分布及其计年. 湖泊科学, 1999, 11(2): 110~116
 - 30 胥思勤, 万国江. 云南省程海现代沉积物 ^{137}Cs , ^{210}Pb 的分布及计年研究. 地质地球化学, 2001, 29(1): 28~31
 - 31 Bai Z G, Wan G J, Huang R G, et al. A Comparison on accumulation characteristics of ^7Be and ^{137}Cs in lake sediments and surface soils in Western Yunnan and Central Guizhou, China. CATENA, 2002, 49: 253~270
 - 32 白占国, 万曦, 万国江等. 岩溶山区表土中 ^7Be , ^{137}Cs , ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 的地球化学相分配及其侵蚀示踪意义. 环境科学学报, 1997, 17(4): 407~411
 - 33 王云飞, 胡文英, 张秀珠. 云南湖泊的碳酸盐沉积. 海洋与湖沼, 1989, 20(2): 122~130
 - 34 陈敬安, 万国江, 汪福顺, 等. 湖泊现代沉积物碳环境记录研究. 中国科学, D 辑, 2002, 32(1): 73~80
 - 35 Talbot M R, Livingstone D A. Hydrogen index and carbon isotopes of lacustrine organic matter as lake level indicators. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1989, 70: 121~137
 - 36 Dean W E. The carbon cycle and biogeochemical dynamics in lake sediments. Journal of Paleolimnology, 1999, 21 (4): 375~393
 - 37 万国江, 白占国, 王浩然, 等. 洱海近代沉积物中碳-氮-硫-磷的地球化学记录. 地球化学, 2000, 29(2): 189~197
 - 38 万国江, 白占国, 黄荣贵, 等. 碳酸盐岩地区湖泊近代沉积物中碳-氮-硫-磷的地球化学记录——以洱海为例. 见: 万国江, 等著. 碳酸盐岩与环境(卷二). 北京: 地震出版社, 2000. 87~108
 - 39 Wan G J, Bai Z G, Qing H, et al. Geochemical records in recent sediments of Lake Erhai: implications for environmental changes in a low latitude-high altitude lake in southwest China. Journal of Asian Earth Sciences, 2003, 21: 489~502