

贵州省西南部麦岗水库沉积物的 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 测年与沉积速率研究

李春梅, 王红亚

(北京大学 城市与环境学院 资源环境地理系 地表过程与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 对贵州省西南部麦岗水库沉积物柱芯 MG4-2, 采用 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 法进行了测年与现代沉积速率研究。结果表明, 该柱芯中存在这3个明显的 ^{137}Cs 蓄积峰, 对应1964, 1975, 1986年3个计年时标。运用 ^{210}Pb 的恒定补给速率(CRS)模式计算得到的年代, 总体上与 ^{137}Cs 法的结果吻合较好, 但存在一定的偏差, 特别是与1964年的计年时标的偏差较大, 这可能是因为沉积物柱芯受到了一些人为扰动所致。两种核素测定的平均沉积速率在数值上有一定的偏差, 但都反映了麦岗水库沉积物近几十年以来经历了从慢到快再到慢的沉积过程, 初步推测, 沉积速率的这种变化与人类活动有一定的关系。两种计年方法结合, 相互印证, 使计年和沉积速率的研究更为准确。

关键词: ^{137}Cs 法; ^{210}Pb 法; 测年; 沉积速率; 麦岗水库

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)02-0215-05

中图分类号: S157, S124

^{137}Cs and ^{210}Pb Dating and Inference of Sedimentation Rate for Maigang Reservoir in Southwest Guizhou Province

LI Chun-mei, WANG Hong-ya

(Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, and Department of Resources, Environments and Geography, School of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: ^{137}Cs and ^{210}Pb techniques are used to date a sediment core (MG4-2) retrieved from Maigang Reservoir in Ziyun County, Southwest Guizhou and infer its sedimentation rates. Three distinctive ^{137}Cs peaks are identified in this core, which are ascribed to the abundant fallouts occurring in 1964, 1975, and 1986. The ^{210}Pb ages calculated with CRS model are generally coincident to the ages inferred with ^{137}Cs activities. However, there are also some discrepancies in the dates derived from the two methods. In particular, the age calculated with ^{210}Pb for the depth with an age of 1964 inferred with ^{137}Cs activities is remarkably different from the ^{137}Cs age. Although the sedimentation rates derived with the two methods are different, both of them indicate a quite similar trend of changes in accumulation in the reservoir during the last decades. Sedimentation was rather slow in the earlier stage, then was fast in the middle stage, and finally slowed down again in the later stage. Such variations in sedimentation rate in MG4-2 may be due to the human being activities in the catchment of Maigang Reservoir. Simultaneous uses of ^{137}Cs and ^{210}Pb methods may allow cross-checks of the results derived with the two methods and thus lead more reliable and accurate chronology and sedimentation rate.

Keywords: ^{137}Cs ; ^{210}Pb ; dating; sedimentation rate; Maigang Reservoir

湖泊(水库)沉积物是流域侵蚀和环境污染物质的重要寄载体, 湖泊(水库)沉积的连续性及其剖面保存的完整性, 使其成为揭示湖(库)区气候和环境变化的指示器, 是研究过去环境变化的重要档案馆^[1]。精确确定沉积物的沉积年代, 是研究过去环境变化的基

础。沉积速率是指由重力、沉积物及流体的物理、化学特性与动力环境相互作用而产生的单位时间内沉积物堆积的厚度^[1]。确定沉积速率对揭示区域和全球环境变化、提取沉积记录环境信息、以及了解流域侵蚀与湖泊沉积关系等均具有重要意义^[2]。因此, 沉积

收稿日期: 2009-09-02

修回日期: 2009-11-27

资助项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目“长江流域环境与水资源演化规律”(2003CB415201); 科技部基础性工作专项课题(2007FY140800-1)

作者简介: 李春梅(1985—), 女(汉族), 四川省会东县人, 博士研究生, 研究方向为土地科学。E-mail: lichunmei023@126.com。

通信作者: 王红亚(1958—), 男(汉族), 河北省清苑县人, 教授, 博士生导师, 研究方向为自然地理。E-mail: why@urban.pku.edu.cn。

速率是湖泊沉积学研究的一个重要方面。利用沉积物中的 ^{137}Cs (半衰期为 30.2 a) 及 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (半衰期为 22.3 a) 测定其近几十年乃至百年来的年龄已得到广泛的应用^[3,4]。应用放射性同位素 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 可以使湖泊现代沉积速率的推估定量化,同时,两者相互印证,使沉积速率的确定更为准确^[5]。本研究采用 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 方法,测定麦岗水库沉积物的年龄及沉积速率,分析沉积速率的变化情况,探讨这两种核素计年方法在水库沉积物研究中的应用。并结合当地的实际情况,特别是人类活动的变化,分析其对水库沉积速率或流域土壤侵蚀的影响,为麦岗水库流域和与之类似地区的水土保持和生态环境修复提供科学依据。

1 研究区概况

麦岗水库(26°00′50.3″N, 106°17′38.4″E)地处贵州省西南紫云县东北部的坝羊乡,距紫云县城约 56 km,有公路通至大坝,交通较为方便。水库位于珠江流域格凸河二级支流洛河的上游,于 1956 年修建。水库以大气降水补给为主,坝址以上积水面积约为 7.5 km²,多年平均降水量约 1 337 mm,多年平均流量 0.17 m³/s,是一座以灌溉为主,兼人饮、养鱼等综合任务的蓄水水库。

麦岗水库流域处于亚热带季风湿润气候带。流域地带性植被为亚热带常绿阔叶林,但是,在过去几十年中,天然植被已经遭到了很大的破坏,现在,流域内的植被以人工次生针叶林、灌丛草坡为主,林种多为马尾松林、茶树等。流域内喀斯特地貌发育,地形起伏相对较小。土壤主要以黄壤、石灰土为主,水稻土次之。耕地为流域内主要的土地利用类型,很多坡度较大的山坡也已经开垦为耕地,而耕地以旱地为主,水田较少。

2 采样和实验方法

2008 年 4 月,使用中国科学院贵阳地球化学研究所研制的 SWB-1 型重力采样器,在麦岗水库坝前(距大坝约 70 m)取得长 16 cm、内直径 60 mm 的沉积物柱芯 MG4-2(26°00′25.2″N, 106°17′31.1″E)。沉积物柱芯取出水面时保存完好,未受扰动,取样器内界面水清亮透明。柱芯取出后,在现场,以 1 cm 间隔进行分割,自上而下进行编号,共计 16 个样品。样品装入干净的 50 ml 离心管密封保存,并运往北京做实验测量和分析。

样品经离心、冷冻干燥后,在中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所 IAEA 环境放射性分析

网络实验室(国际原子能机构)使用 Canberra 公司生产的 Be5030 型配备高纯锗探头的能谱仪进行 ^{137}Cs 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度测试^[6]。 ^{137}Cs 的测定误差小于 6%。 ^{210}Pb 的测定程序为:沉积物样品过 1 mm 筛后封存 28 d,以使样品中 ^{226}Ra 和 ^{222}Rn 达到平衡。然后,在能量为 46.5 keV 处测定沉积物中的总的 ^{210}Pb 活度(Bq/kg),测定的时间在 12~48 h 之间; ^{226}Ra 在能量为 351.9 keV 处测得,用时 80 000 s,测定误差小于 10%。用测定的总的 ^{210}Pb 比活度减去与 ^{226}Ra 平衡的 ^{210}Pb 活度,即计算出 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度。

3 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 测年原理

3.1 ^{137}Cs 测年原理

^{137}Cs 是一种人为产生的放射性核素,它通过核爆炸试验或核泄漏进入全球循环,经过同温层转移到对流层,直到进入到地球表层。湖泊和水库沉积物中的 ^{137}Cs 主要来源于以下几部分:一是在水体表面随大气直接沉降的 ^{137}Cs ;二是侵蚀下来的土壤颗粒上吸附的 ^{137}Cs ;三是可能在大的降雨事件中来源于以前就有土壤吸附而当时没有被侵蚀的 ^{137}Cs 。一般认为,前两种是湖泊沉积物中 ^{137}Cs 的主要来源^[7-8]。在侵蚀泥沙研究中, ^{137}Cs 主要用于测定 1963 年以来的侵蚀速率,调查流域泥沙的来源,湖泊(水库)沉积物断代和侵蚀泥沙规律的研究^[9]。

全球范围的 ^{137}Cs 沉降始于 20 世纪 50 年代初,北半球沉积物中 1954 年可作为一个计年时标,但 1954 年时标的 ^{137}Cs 比活度低,经过衰变,至今已难以辨识^[10];北半球 ^{137}Cs 最后一次显著沉降发生在 1963 年,湖泊沉积物 ^{137}Cs 峰值的 1963—1964 年计年时标已经得到众多学者的认可;20 世纪 70 年代初又进行了几次大气层核试验,因时间是在 1963 年停止大规模大气层核试验近 10 a 以后,所以,有的研究认为其可作为一个辅助时标;1986 年前苏联的切尔诺贝利(Chernobyl)核泄漏事件对北半球湖泊沉积物记录存在一定的影响,一些学者认为 1986 年也可以作为一个计年时标^[10-11]。

利用 ^{137}Cs 的蓄积峰位置可以计算沉积物堆积速率^[12]:

$$S = D / (A_1 - A_0)$$

式中: S ——平均沉积速率[g/(cm²·a)]; A_1 ——采集的沉积物所对应的年代; A_0 ——出现 ^{137}Cs 比活度峰值所对应的年代; D ——沉积物柱芯中 ^{137}Cs 浓度分布峰值对应的质量深度(g/cm²)。

3.2 ^{210}Pb 测年原理

^{210}Pb 作为铀系的衰变子体,广泛存在于自然环

境中,²¹⁰Pb 通过其母体核素²²²Rn 的大气扩散, 在环境中形成了特殊的分配关系;²¹⁰Pb 的半衰期适合于现代人类活动时间尺度($n \times 10 \sim n \times 10^2$ a) 环境过程的示踪, 鉴于以上 3 个原因,²¹⁰Pb 是环境地球化学过程的优良示踪剂, 在流域侵蚀和现代沉积研究中具有很好的示踪价值^[1]。大气中的²¹⁰Pb 通过干、湿沉降进入湖泊、海湾, 并蓄积在沉积物中, 沉积物中蓄积的这部分²¹⁰Pb 因不与其母体²²⁶Ra 共存和平衡, 通称为过剩²¹⁰Pb(标记为²¹⁰Pb_{ex}), 通过沉积物柱芯中不同层节样品的²¹⁰Pb_{ex}比活度分析, 便可计算沉积速率或某一层节的沉积年龄^[1]。

利用²¹⁰Pb_{ex} 计算沉积速率或某一层节的沉积年龄的常见模式有常量初始浓度(CIC)模式和恒定补给速率(CRS)模式^[12-13]。前者适用于当沉积物沉积时单位质量沉积物携带和捕获的²¹⁰Pb_{ex} 数量恒定、沉积速率恒定时, 一定质量深度的沉积物中,²¹⁰Pb_{ex} 的比活度也将随该层节的质量深度成指数衰减关系的情况。后者通常用于当²¹⁰Pb_{ex} 输入通量保持恒定, 而沉积物堆积速率可能随时间变化的情况。

4 结果与讨论

4.1 沉积物柱芯的¹³⁷Cs、²¹⁰Pb_{ex}测年结果及其分析

MG4-2 的¹³⁷Cs、²¹⁰Pb_{ex} 分析结果见图 1。与其它相关的研究对比发现, MG4-2 的¹³⁷Cs 含量较万国江^[10] 在洱海、红枫湖的测量结果, 以及吕明辉等^[14] 在红枫湖的测量结果等都低。一方面, 这主要是因为麦岗水库的流域面积仅约为 7.5 km², 比洱海(2 470 km²)、红枫湖(1 551 km²) 等的流域面积小得多, 从而使水库沉积物中接受由流域内侵蚀下来的土壤颗粒吸附的¹³⁷Cs 减少, 导致沉积物柱芯中的¹³⁷Cs 含量偏低。而 MG4-2 的¹³⁷Cs 含量与流域面积相当的小河水库(17 km²)^[15]、石板桥水库(5.76 km²)^[16] 的测量结果接近, 也说明了流域面积对湖泊沉积物中¹³⁷Cs 含量的影响。另一方面, 由于采样时间晚于上述其它研究的采样时间,¹³⁷Cs 本身的衰变也会对沉积物中¹³⁷Cs 的含量造成一定的影响。

¹³⁷Cs 计年的可靠性是以¹³⁷Cs 在沉积物中赋存状态的稳定性为基础的^[17]。虽然¹³⁷Cs 具有一定的扩散能力, 但其分子扩散不足以改变蓄积峰的位置^[18]。MG4-2 的¹³⁷Cs 垂直剖面存在 3 个蓄积峰, 初步推测, 这 3 个蓄积峰分别是: 13 cm(7.29 g/cm², 即 3.45 Bq/kg) 处的 1964 年的蓄积峰、10 cm(5.14 g/cm², 即 3.08 Bq/kg) 处的 1975 年的蓄积峰和 6 cm(2.22 g/cm², 即 3.06 Bq/kg) 处的 1986 年由前苏联切尔诺贝利核泄漏形成的蓄积峰。这与在云贵高原

地区的一些其他研究定年结果一致。万国江^[10] 对贵州红枫湖和云南洱海沉积物研究发现, 两个湖泊沉积物中的¹³⁷Cs 存在 3 个蓄积峰, 分别对应 1964, 1975, 1986 年这 3 个计年时标, 而且根据计年时标计算出的红枫湖和洱海沉积物平均堆积速率完全一致, 说明 1975 和 1986 年次级蓄积峰作为计年时标的可靠性。吕明辉等^[14] 对贵州红枫湖沉积物的研究中也指出沉积物柱芯中的¹³⁷Cs 存在 3 个蓄积峰, 推测蓄积峰对应的年份可能分别为 1964, 1975 和 1987 年。

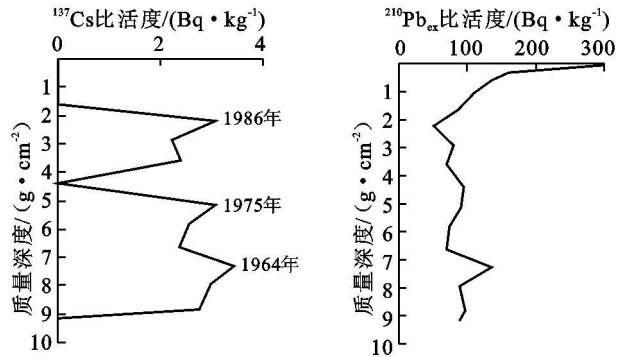


图 1 沉积物柱芯 MG4-2 的¹³⁷Cs、²¹⁰Pb_{ex}垂直剖面分布

沉积物柱芯 MG4-2 的²¹⁰Pb_{ex} 比活度随质量深度的变化没有呈现出指数衰减的趋势(图 1), 它的异常波动可能在一定程度上与人类活动以及沉积速率的变化有关。同时, 考虑到麦岗水库沉积物堆积速率随着时间而变化, 本研究采用 CRS 模式, 沉积物某一层的沉积年龄 t 、沉积速率 S 分别为:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A_0}{A}; S = \frac{Z}{t}$$

式中: A_0 ——沉积物柱芯中²¹⁰Pb_{ex} 的总累计输入量; Z ——质量深度; A ——在一定质量深度 Z 以下各层沉积物中²¹⁰Pb_{ex} 的累计总量; λ ——²¹⁰Pb 放射性衰变常数, $\lambda = 0.311$ 4/a。运用 CRS 模式得出 MG4-2 的沉积年代, 模式计算得到的结果为模式年代, 为了与¹³⁷Cs 的测年结果进行比较, 根据采样时间为 2008 年 4 月, 把沉积物最上层的年代定为 2007 年, 减去模式年代, 将模式年代换算成绝对年代(图 2)。

²¹⁰Pb_{ex} 与¹³⁷Cs 的测年结果存在一定的偏差, 但总体上吻合得较好。按¹³⁷Cs 的推算结果, 1986, 1975, 1964 年分别对应的深度为 6 cm(2.22 g/cm²), 10 cm(5.14 g/cm²), 13 cm(7.29 g/cm²); 通过²¹⁰Pb_{ex} 的 CRS 模式计算得出的对应深度上的年代依次为 1987, 1971 和 1949 年。可以看出,¹³⁷Cs 的 1986 和 1975 年的计年时标与²¹⁰Pb_{ex} 的 CRS 模式计算结果比较接近, 但 1964 年时标与 CRS 模式计算结果偏差较大, 有随着深度加深偏差增大的趋势。此外, 麦

岗水库修建于 1956 年, 但 MG4-2 最底层的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的 CRS 模式测年结果为距今约 95 a 的时间。

一方面, 这可能是由于沉积物柱芯受到了一些人为扰动, 以及核素的迁移、扩散的影响, 而且, 沉积物的深层受到的这些影响可能更大, 导致 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的 CRS 模式测年结果误差偏大, 并有随着深度加深偏差增大的趋势。但这样的扰动、迁移和扩散还不足以改变 ^{137}Cs 蓄积峰的位置。同时, ^{137}Cs 的 1964 年时标与 CRS 模式计算结果偏差较大, 但如前所述, ^{137}Cs 的 1964 年时标已经得到众多学者的认可。因此, 笔者认为 ^{137}Cs 的计年结果更接近实际, 但 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 对 ^{137}Cs 计年在一定程度上具有辅助作用。另一方面, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的 CRS 模式测得的柱芯底层年代偏早, 可能是因为沉积物柱芯采集深度到达了水库建设以前就存在的土壤。当然, 也可能还有其它的原因, 有待进一步探究。

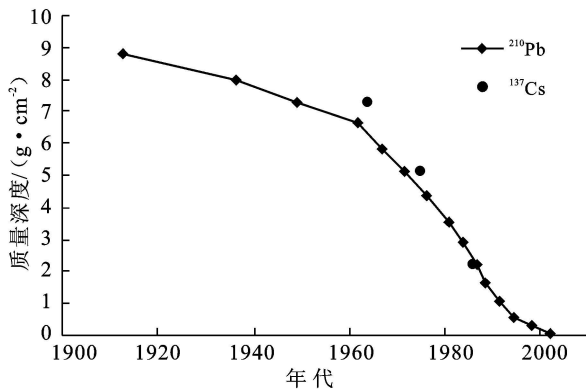


图 2 沉积物柱芯 MG4-2 测定年代

4.2 沉积物柱芯的沉积速率分析

通过 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的 CRS 模式计算得出的沉积物柱芯 MG4-2 沉积速率, 如表 1、图 3 所示。沉积物柱芯 1—6 cm 沉积层的 ^{137}Cs 平均沉积速率为 $0.106 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的 CRS 模式计算出平均沉积速率为 $0.104 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$; 6—10 cm 沉积层的 ^{137}Cs 平均沉积速率为 $0.265 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的 CRS 模式计算出平均沉积速率为 $0.191 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$; 10—13 cm 沉积层的 ^{137}Cs 平均沉积速率为 $0.196 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的 CRS 模式计算出平均沉积速率为 $0.096 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ 。两种核素测定的沉积速率存在一定的差异, 而且跟定年结果相似, 有随着深度的加深偏差增大的趋势。同时, 根据 ^{137}Cs 计算的沉积速率要普遍高于 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的 CRS 模式计算的沉积速率, 这与叶崇开^[19]对鄱阳湖的近代沉积速率研究得出的结果一致。主要原因可能是 ^{210}Pb 法比 ^{137}Cs 法的误差大, 因为 ^{210}Pb 法对沉积物的要求严格, 样品只有在尽量未受扰动的前提下才可能真实反映沉积速

率^[20], 但自然过程和人类活动对麦岗水库沉积物的扰动影响是不可避免的。

虽然由两种核素测定、推算的 MG4-2 的沉积速率存在一定的差异, 但所反映的沉积速率变化趋势是相同的, 都反映了在过去几十年中, 麦岗水库沉积物经历了一个沉积速率从慢到快再到慢的变化过程。初步推测, 麦岗水库的沉积速率变化与人类活动有着一定的关系。20 世纪 50 年代末至 60 年代初, “大炼钢铁”运动使水库流域内的大量植被被砍伐, 从而加剧了土壤侵蚀, 这是导致麦岗水库沉积速率从慢到快变化的重要原因之一; 近年来, 紫云县采取了多种水土保持的措施, 如退耕还林、坡地改梯田 (“坡改梯”) 等, 在一定程度上使麦岗水库流域内的土壤侵蚀得到了控制, 这可能是导致麦岗水库沉积速率从快变慢的重要原因。更深层次的原因有待进一步的研究和探讨。

表 1 沉积物柱芯 MG4-2 的沉积速率 $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$

沉积物段/ cm	^{137}Cs 对应的 沉积速率	$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 对应的 沉积速率
1—6	0.106	0.104
6—10	0.265	0.191
10—13	0.196	0.096

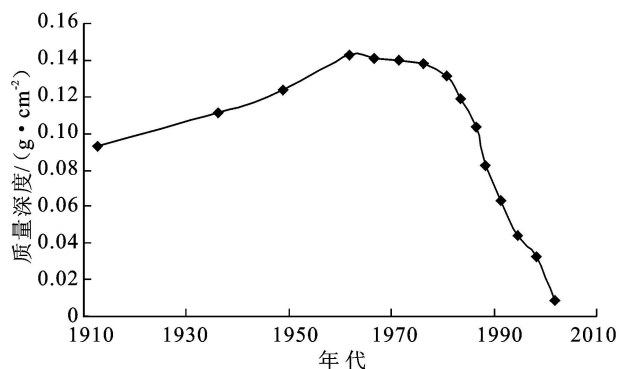


图 3 沉积物柱芯 MG4-2 测定的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 沉积速率

5 结论

(1) MG4-2 柱芯中存在 ^{137}Cs 的 3 个蓄积峰, 初步推测, 3 个蓄积峰分别对应 1964, 1975 和 1986 年这 3 个蓄积峰, 这与万国江等在西南地区其它湖泊或沉积物研究中的定年一致。 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 的测年结果总体上吻合较好, 两者联合定年, 可以相互印证、相互检验, 提高沉积物定年的准确性和可靠性。

(2) ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 的测年和沉积速率测定结果也存在一些小偏差。通过 ^{137}Cs 计算得到的沉积速率要高于 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的 CRS 模式计算得出的沉积速率, 这与

叶崇开等对鄱阳湖沉积速率的研究结果一致。这可能是因为沉积物柱芯受到了一些人为扰动,以及核素的迁移、扩散,导致²¹⁰Pb的CRS模式测年结果误差偏大,但这样的扰动、迁移和扩散还不足以改变¹³⁷Cs蓄积峰的位置。而²¹⁰Pb法对沉积物的要求严格,样品只有在尽量未受扰动的情况下才可能真实反映沉积速率。其它原因有待进一步研究。

(3) 虽然两种核素计算得到的沉积速率在数值上存在一定的差异,但都显示出麦岗水库沉积物在过去几十年中,经历了沉积速率从慢到快再到慢的沉积过程。初步推测,麦岗水库沉积物的沉积速率变化与人类活动有很大的关系,更深层次的原因有待进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] L 霍次松, M 杨松. 湖泊沉积学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 193.
- [2] 万国江. 现代沉积的²¹⁰Pb 计年[J]. 第四纪研究, 1997 (3): 230-239.
- [3] Xiang L, Lu X X, Higgitt D L, et al. Recent lake sedimentation in the middle and lower Yangtze basin inferred from ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb measurements[J]. Journal of Asian Earth Science, 2002, 21: 77-86.
- [4] Simms A D, Woodroffe C, Jones B G, et al. Use of ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs to simultaneously constrain ages and sources of post-dam sediments in the Cordeaux reservoir, Sydney, Australia[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2008, 99(7): 1111-1121.
- [5] Benninger LK, Suayah I B, Stanley D J. Manzala lagoon, Nile delta, Egypt: modern sediment accumulation based on radioactive tracers[J]. Environmental Geology, 1997, 34(2/3): 183-193.
- [6] Li Y, Poesen J, Yang J C. Evaluating gully erosion using ¹³⁷Cs and ¹³⁷Cs/²¹⁰Pb ratio in a reservoir catchments [J]. Soil Tillage and Research, 2003, 69: 107-115.
- [7] Ritchie J C, McHenry J R. A comparison of three methods for measuring recent rates of sediment accumulation[J]. Water Resources Bulletin, 1985, 21(1): 99-103.
- [8] Walling D E, He Q. Use of fallout ¹³⁷Cs in investigations of over-bank sediment deposition on river flood plains[J]. Catena, 1997, 29: 263-282.
- [9] 张信宝, 贺秀斌, 文安邦, 等. 川中丘陵区小流域泥沙来源的¹³⁷Cs、²¹⁰Pb 双同位素法研究[J]. 科学通报, 2004, 49(15): 1537-1541.
- [10] 万国江. 现代沉积年分辨的¹³⁷Cs 计年: 以云南洱海和贵州红枫湖为例[J]. 第四纪研究, 1999(1): 73-80.
- [11] 夏威夷, 薛滨. 吉林小龙湾沉积速率的²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 年代学方法测定[J]. 第四纪研究, 2004, 24(1): 124-125.
- [12] Krishnaswamy S, Lal D, Martin J M, et al. Geochronology of lake sediments[J]. Earth and Science Letters, 1971, 11: 407-414.
- [13] Appleby P G, Oldfield F. The calculation of ²¹⁰Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported ²¹⁰Pb to the sediment[J]. Catena, 1978, 5: 1-8.
- [14] 吕明辉, 王红亚, 蔡运龙, 等. 贵州红枫湖 HFF-2 孔沉积物的磁性特征及其土壤侵蚀意义[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3): 298-305.
- [15] 徐琳, 王红亚, 蔡运龙. 黔中喀斯特丘原区小河水库沉积物的矿物磁性特征及其土壤侵蚀意义[J]. 第四纪研究, 2007, 27(3): 408-416.
- [16] 王红亚, 霍豫英, 吴秀芹, 等. 贵州石板桥水库沉积物的矿物磁性特征及其土壤侵蚀意义[J]. 地理研究, 2006, 25(5): 865-876.
- [17] 王苏民, 张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展[J]. 科学通报, 1999, 44(6): 579-587.
- [18] Robbins J A, Edgington D N. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1975, 39(3): 285-304.
- [19] 叶崇开. ¹³⁷Cs 法和²¹⁰Pb 法对比研究鄱阳湖近代沉积速率[J]. 沉积学报, 1991, 9(1): 106-114.
- [20] 杨洪, 易朝路, 邢阳平, 等. ²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 法对比研究武汉东湖现代沉积速率[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2004, 38(1): 109-113.