

文章编号: 1001-8166(2005)06-0671-08

## 用<sup>137</sup>Cs 计年法确定湖泊沉积物 沉积速率研究进展

张 燕, 潘少明, 彭补拙

(南京大学城市与资源学系, 江苏 南京 210093)

**摘 要:** <sup>137</sup>Cs 计年法利用<sup>137</sup>Cs 固有的理化和沉降特性, 在湖泊沉积物的<sup>137</sup>Cs 垂直分布与大气<sup>137</sup>Cs 沉降间确立对应关系, 找出有异常<sup>137</sup>Cs 含量的沉积层作为时标, 但需注意<sup>137</sup>Cs 从水体表面至湖底的时间和粘粒含量对<sup>137</sup>Cs 含量的影响, 并用其它方法校验时标的可靠性。再求取不同时标层间的年均沉积厚度, 或因克服了压实效应而更能反映真实沉积速率的年均沉积通量, 且结合 GIS 等手段进一步估算湖泊各区域的沉积总量, 还可延伸研究湖泊内源污染负荷及相关环境演变和湖泊演化。但是, 沉积柱样的分割厚度取多少才能既满足计年精度要求又不使工作量过大, <sup>137</sup>Cs 的大气沉降时间与进入沉积物时间还与泥沙的陆地迁移时间有关, 沉积物中究竟是否发生<sup>137</sup>Cs 下渗及其机理等都还是此法应用中有待解决的问题。

**关键词:** <sup>137</sup>Cs 计年; 沉积通量; 滞后; 下渗  
中图分类号: P512.32 文献标识码: A

湖泊是流域侵蚀土壤的汇, 淤积直接或间接导致湖泊老化、衰亡, 但湖泊沉积物却可完整记录区域环境变化的信息, 要了解湖泊演化进程, 回顾区域环境变迁, 估算湖泊内源污染负荷, 都需确定湖泊沉积速率。

在确定湖泊沉积物沉积速率的众多方法中, 利用放射性同位素测定沉积年代的方法近几十年来发展很快。1961 年 Ravelal<sup>[1]</sup> 分析了湖泊沉积物剖面中放射性射线的分布, 到 20 世纪 60 年代中期, 人们又对总 α、总 β 活度、<sup>137</sup>Cs 和其他放射性核物质在沉积物中的垂直分布做了许多研究<sup>[2-4]</sup>, 并提出, 沉积物中总 α 活度的垂直分布与逐年沉降比率有关, 因此可用这种分布在沉积剖面中确定对应不同时间的沉积层。尤其因半衰期较长(30.2 a), 北半球的沉降量又大, 且在 662 Kev 处的 γ 射线很强, 并无需特殊的化学处理和分离, 用高纯锗等探测器配上多

道分析仪便可相对容易和准确地从 γ 射线能谱中分离和测量 662 Kev 处的特征峰, 故<sup>137</sup>Cs 受到人们的格外重视。

20 世纪 70 年代初发表的许多独立研究报告<sup>[5-8]</sup> 指出, 沉积物中<sup>137</sup>Cs 的垂直分布可能与来自大气的<sup>137</sup>Cs 沉降的时间分布有关, 因此可用它来推断沉积剖面的地质年代。这些研究还利用<sup>137</sup>Cs 在沉积剖面中的垂直分布度量了沉积速率。将其与利用标准的沉积调查方法在同样位置处测量的结果对比<sup>[8,9]</sup> 表明, 不同技术测量的沉积速率具有可比性。而且相比其它测量技术,<sup>137</sup>Cs 技术具有快速、只需一个沉积剖面便可进行测量、不需对同一位置做重复测量等优点<sup>[10]</sup>, 所以,<sup>137</sup>Cs 计年法已被广泛用于湖泊、河流和海洋近几十年沉积速率的研究<sup>[11-13]</sup>。自万国江<sup>[14-16]</sup> 较早于 20 世纪 80 年代中期将这方面研究的方法与成果介绍到国内以来, 中国也普遍

\* 收稿日期: 2004-09-14 修回日期: 2005-02-16.

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“河流入海物质通量变异及其对流域自然变化和人类活动的响应”(编号: 2002CB412401); 国家自然科学基金重点项目“长江三角洲水土资源环境与调控研究”(编号: 49831070) 资助。

作者简介: 张燕(1962-), 女, 江苏南京人, 副教授, 博士, 主要从事资源与环境方面的研究. E-mail: zhangymj@yahoou.com.cn

开展了用放射性核素测算沉积速率的研究<sup>[17-22]</sup>。

## 1 <sup>137</sup>Cs 计年的基本原理及主要特点

地上核试验释放大量放射性物质到自然环境中,后又逐渐通过干湿沉降返回陆地表面与水体,<sup>137</sup>Cs更是其中一种。世界很多地区都有放射性核素沉降的记录,如美国伯明翰(Birmingham)、哥伦比亚(Columbia)、纽约(New York)<sup>[23]</sup>、加拿大萨斯喀彻温(Saskatchewan)<sup>[24]</sup>、丹麦各地<sup>[25]</sup>、南半球 Brisbane<sup>[26]</sup>、Owens<sup>[27]</sup>还报导了全球年际<sup>137</sup>Cs 沉降量。尽管不同区域的<sup>137</sup>Cs 沉降量有差异,但却有明显的时段变化<sup>[10,22]</sup>。<sup>137</sup>Cs 广泛散布到全球环境始于 1952 年的热核试验,土壤中可检测到<sup>137</sup>Cs 的最早年份为 1954 年,受地上核试验影响,全球<sup>137</sup>Cs 沉降的主要时期是 1958 和 1963/1964 年,次要时期为 1971 和 1974 年,1983 和 1984 年在北半球的<sup>137</sup>Cs 沉降已降到检测限水平以下,1986 年前苏联切尔诺贝利核事故将放射性物质喷射到大气层中,致使欧亚很多地区可测到核事故产生的<sup>137</sup>Cs<sup>[28,29]</sup>。

水体中的<sup>137</sup>Cs 来自大气<sup>137</sup>Cs 直接沉降于水体表面及由陆地流失土壤搬运入湖。沉降于水体表面的<sup>137</sup>Cs 被水体中的悬浮物吸附,吸附于悬浮物及流失土壤颗粒上的<sup>137</sup>Cs 大部分随之沉至水底蓄积于沉积物中,仅有少部分流出水体或随溢岸洪水在洪积平原及河湖漫滩上沉积<sup>[10,22]</sup>。含有粘土矿物质与特殊伊利石的沉积物对<sup>137</sup>Cs 强烈吸附,且沉积物中的<sup>137</sup>Cs 绝大部分处于固定态<sup>[20]</sup>,使得沉积物中<sup>137</sup>Cs 的垂直分布与大气沉降<sup>137</sup>Cs 的时间分布相关<sup>[10-12,27]</sup>。<sup>137</sup>Cs 沉降量随时间变化特征可完好保存于沉积序列中,即沉积的顺序发生使沉积物垂直剖面中各层<sup>137</sup>Cs 值反映了各层沉积时的大气<sup>137</sup>Cs 沉降量,于是,<sup>137</sup>Cs 在沉积物中的特异值(主要是峰值)可用作时标。因此,可采集未受扰动的湖底沉积物柱样,测量沉积柱样各层位的<sup>137</sup>Cs 值,根据<sup>137</sup>Cs 值的垂直分布甄别出特定年份的沉积层即可作为沉积层的时标,进而以此估算沉积物沉积速率。

## 2 <sup>137</sup>Cs 时标的确定

### 2.1 <sup>137</sup>Cs 主辅时标的确定

诸多研究<sup>[11,12,25,28]</sup>中都将如下年份确定为<sup>137</sup>Cs 主时标。采样年份:湖泊沉积物顶层沉积年份对应于采样年份;1954 年:土壤中可检测到<sup>137</sup>Cs 最早的年份是 1954 年,沉积物柱样可检测到<sup>137</sup>Cs 的最深层与此对应。但因 1954 年沉积层的<sup>137</sup>Cs 值原

本较低,加上<sup>137</sup>Cs 的衰变,确定 1954 年的沉积层时标往往受到限制;1963 年,1963 年前后大气<sup>137</sup>Cs 沉降量最大,沉积物中<sup>137</sup>Cs 值最大层对应于 1963 年的沉积层。考虑沉积滞后影响时,也有将<sup>137</sup>Cs 最大值层与 1964 年对应的<sup>[10,17,21]</sup>;1986 年:受切尔诺贝利核事故影响的地区,沉积物中可甄别出该年的沉积层。

除<sup>137</sup>Cs 主时标外,局部地区沉积物中可能还存在若干其它标志层,也可作为辅助定年时标,这样有助于更细致地比较不同时期的沉积速率。如受非条约国的地上核试验影响,1971 和 1974 年成为<sup>137</sup>Cs 沉积的又一相对集中时期<sup>[10]</sup>,反映在湖泊沉积物研究中则是在一些区域可甄别出 1971<sup>[10]</sup>与 1975 年<sup>[17]</sup>的沉积层。中国核试验也可成为局部地区<sup>137</sup>Cs 沉积的重要来源<sup>[30]</sup>。国外对中国核试验产生的<sup>137</sup>Cs 对地区土壤<sup>137</sup>Cs 含量的影响也有一些报导,并认为应对不同历史时期中国邻近地区土壤中的<sup>137</sup>Cs 背景值作出修正<sup>[28,31]</sup>。我们在滇池沉积物中就辨认出中国核试验沉降峰值年(1976 年)的一个沉积层<sup>[32]</sup>。

但因世界各地测到<sup>137</sup>Cs 沉降的起始年份、最大<sup>137</sup>Cs 沉降的年份并不完全一致,最大<sup>137</sup>Cs 沉降前后的沉降量变异也比较大,20 世纪 70 年代的<sup>137</sup>Cs 沉降有的增加也有的减少,且各地的沉降量各不相同,因此,确定各地的<sup>137</sup>Cs 时标应根据当地的具体情况具体分析。

### 2.2 <sup>137</sup>Cs 在沉积物中的沉积滞后

水体中悬浮微粒吸附<sup>137</sup>Cs 非常迅速,而悬浮微粒在中小型湖泊水体中的寄宿时间很短,故<sup>137</sup>Cs 随悬浮微粒到达湖底的时间与大气<sup>137</sup>Cs 沉降于水体表面的时间相差不大,但悬浮微粒在大型深水湖泊水体中的寄宿时间长,致使<sup>137</sup>Cs 沉降于湖泊表面的时间与<sup>137</sup>Cs 进入沉积物蓄积的时间不一致,这便是<sup>137</sup>Cs 进入沉积物中的时间相对于大气<sup>137</sup>Cs 沉降时间的滞后<sup>[8,30]</sup>。所以需要<sup>137</sup>Cs 在湖水中寄宿时间对沉积物<sup>137</sup>Cs 时标作校正,即用  $T_s$  (<sup>137</sup>Cs 随悬浮微粒沉降至湖底的半衰时间)加上大气<sup>137</sup>Cs 沉降的标志年份,才能确定沉积物中的合理时标年份。

因湖水中<sup>137</sup>Cs 被悬浮物强烈吸附,其寄宿时间与悬浮微粒相同<sup>[14,27]</sup>,故可由质量平衡原理计算的悬浮微粒寄宿时间代替<sup>137</sup>Cs 寄宿时间,算式如下<sup>[33]</sup>:

$$a = 100 \times H \times (C_p + 1/K_d) / S_a \quad (1)$$

式中  $a$  为悬浮微粒的寄宿时间( $a$ ), $H$  为湖泊的平

均水深(m),  $C_p$  为湖水中悬浮微粒的浓度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $K_d$  为  $^{137}\text{Cs}$  在悬浮微粒与水两相中的分配系数( $\text{cm}^3/\text{g}$ ), 对含可牢固吸附  $^{137}\text{Cs}$  的粘土矿物多的湖泊  $K_d > 10^2 \text{cm}^3/\text{g}$ , 而对有机质丰富、粘土矿物缺乏的湖泊  $K_d \approx 1 \text{cm}^3/\text{g}$ ; $^{34}$ ];  $S_a$  为沉积物年均沉积通量( $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ )。

再求出  $T_a(a)^{[17]}$ :

$$T_a = \frac{S_a}{C_p} \times \ln 2 \quad (2)$$

### 2.3 粘粒校正

由于  $^{137}\text{Cs}$  更易为粘粒吸附, 当沉积物中某沉积层砂粒含量增加, 该层  $^{137}\text{Cs}$  值将下降, 即此时该层  $^{137}\text{Cs}$  值下降可能并非是大气  $^{137}\text{Cs}$  沉降量降低引起的。为克服沉积物粒径分布差异的影响, 用单位粘粒所含  $^{137}\text{Cs}$  值有助于更准确判定各沉积层的沉积年代 $^{[10, 12, 35, 36]}$ 。

### 2.4 $^{137}\text{Cs}$ 时标的验证

人们常用多种方法验证所定  $^{137}\text{Cs}$  时标的正确性, 其中比较成熟和较多使用的是同时采用  $^{137}\text{Cs}$  及  $^{210}\text{Pb}$  计年法进行相互印证 $^{[13, 18, 19, 21, 20, 37]}$ , 或与纹理计年方法对比 $^{[15]}$ , 或用实测输沙资料相互对照 $^{[7, 17, 38]}$ 。除直接验证外, 还可通过由此计算的沉积率的合理性来间接验证。

## 3 借助 $^{137}\text{Cs}$ 时标估算沉积物沉积速率

### 3.1 以实际厚度描述的沉积速率

沉积物沉积速率可用沉积物年均沉积厚度描述。由  $^{137}\text{Cs}$  时标位置估算各时段沉积物平均沉积厚度  $S_d(\text{cm}/\text{a})$  为:

$$S_d = H/T = H/(T_2 - T_1) \quad (3)$$

式中  $T_1$ 、 $T_2$  分别为时段的起始与终止年份;  $H$  为与  $T_1 \sim T_2$  间隔对应的实际厚度( $\text{cm}$ )。

### 3.2 考虑压实效应的沉积物沉积速率

现代沉积物为松散堆积, 沉积物微粒间有空隙, 空隙多被水充填 $^{[19]}$ 。受上覆水体和沉积物自重的压实作用, 湖泊下层沉积物的容重大于上层, 我们研究的滇池沉积物中, 这种压实效应明显可见 $^{[32]}$ , 使得同样体积的上下层样品实际质量不同, 或沉积柱样下层比上层相同质量物质的厚度减少, 即若两个年份实际入湖泥沙量相同, 年份在前的泥沙沉积厚度将小于年份在后的泥沙沉积厚度, 对淤泥、淤泥质粉细砂等压缩率较大的沉积物, 更要特别注意压实作用对沉积厚度的影响 $^{[13]}$ , 因此, 仅由实际厚度描述的沉积速率与实际情况有偏差。

解决此问题有 2 种办法: 一是对现场几何厚度

进行校正 $^{[13, 19, 39]}$ , 即消除压实致密作用, 恢复沉积物的原孔隙度, 用原始厚度来描述沉积速率, 使不同沉积年代的沉积厚度有可比性; 二是用年均沉积通量表示。

#### 3.2.1 对现场几何厚度的校正

对同一柱样的沉积物, 未经压实的上层孔隙度和压实后的下层孔隙度可由上下层样品直接测定, 再以压实前(上层)或压实后(下层)的沉积物作基准, 根据压缩前后沉积物质量不变, 用下式求出沉积物未经压实或压实后的沉积厚度  $h_0$ 、 $h_1(\text{cm})$ 。

$$h_1 = h_0 \times (1 - \rho_0) / (1 - \rho_1) \quad (4)$$

其中:

$$\rho = 1 - m / (V \times d) \quad (5)$$

式中  $\rho_0$ 、 $\rho_1$  分别为压实前后的孔隙度(%),  $V$  为新鲜沉积物的体积( $\text{cm}^3$ ),  $m$  为相应体积沉积物的干重( $\text{g}$ ),  $d$  为沉积物的干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

#### 3.2.2 以质量描述的沉积速率

为克服压实引起沉积厚度的变化, 国内外学者常用累加质量深度(cumulative mass depth)表示深度位置 $^{[12, 15]}$ 。获此值的具体方法为采集沉积柱样, 按一定间隔分割柱样样品, 并烘干分层样品、称重, 定义分层样品质量与采样器横截面积的比值为质量深度(mass depth); 将某一位置至柱样表层间所有样品的质量深度累加获该位置的累加质量深度, 其物理意义为沉积通量, 即某一深度位置单位面积上的沉积物质量:

$$M = B_i \times h_i \text{ 而 } h_i = H \quad (6)$$

则  $T_1 \sim T_2$  时段( $a$ )沉积物年均沉积通量  $S_a$  ( $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{a}$ )为:

$$S_a = M/T = M/(T_2 - T_1) \quad (7)$$

式中  $M$  为与  $T_1 \sim T_2$  间隔(厚度  $H(\text{cm})$ )对应的单位面积上的沉积物质量( $\text{g}/\text{cm}^2$ ), 也称质量深度;  $B_i$  为第  $i$  层沉积物容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $h_i$  为第  $i$  层沉积物厚度( $\text{cm}$ )。

沉积物年均沉积通量  $S_a$  ( $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{a}$ )与年均沉积厚度  $S_d(\text{cm}/\text{a})$  2 种沉积速率之间的换算由孔隙度与沉积物干密度决定, 两者之间的关系为 $^{[19]}$ :

$$S_a = S_d \times (1 - \rho_0) \times d \quad (8)$$

## 4 计算沉积物总量

作为流域的侵蚀基准面, 湖泊汇集来自流域的泥沙时, 受地形、湖盆形态、水动力(如河流入湖射流、风驱湖浪和出湖排流)及物源供给条件等因素

的影响,湖区沉积量的分布存在时空差异,要准确估算湖泊沉积总量,需对湖泊划分不同的沉积区域。为避免采样与测试工作量太大,分区不宜过细,可根据流域地貌、湖盆形态及湖水动力等对湖区进行分区,并尽可能使一个沉积区域的深度一致及采样点与所分湖区相对应。再由 GIS 测量各区域的湖底面积,结合湖区各采样点的沉积速率,计算各湖区及全湖的沉积总量<sup>[32]</sup>。

## 5 <sup>137</sup>Cs 沉积后在沉积物中的再迁移

湖泊沉积物中<sup>137</sup>Cs 记录的沉积信息的可靠性受<sup>137</sup>Cs 沉积后的再分布影响。沉积物中<sup>137</sup>Cs 的再分布由再迁移引起,发生<sup>137</sup>Cs 再迁移的可能原因有<sup>[10, 15, 30]</sup>。生物或波浪等机械扰动; <sup>137</sup>Cs 沉积后因解吸并通过孔隙水扩散位移; 附着于悬浮微粒上的<sup>137</sup>Cs 随微粒重力下移。再迁移扩大了<sup>137</sup>Cs 在沉积物中的分布深度,降低了各层位的<sup>137</sup>Cs 强度,加宽<sup>137</sup>Cs 峰值区域,<sup>137</sup>Cs 向下层扩展(即<sup>137</sup>Cs 下渗)使<sup>137</sup>Cs 蓄积于比原沉积层位更深的位置,特别是 1954 年沉积层向下扩展使该层原本就较低的<sup>137</sup>Cs 强度进一步降低,更增加了确定 1954 年<sup>137</sup>Cs 时标的困难<sup>[10]</sup>甚至导致沉积物最深层时标失效。

要减少因<sup>137</sup>Cs 再迁移引起的计年误差,首先是选择采样点时应考虑湖泊的地理位置、流域地貌形态、湖盆形态、水文要素及沉积物物质来源等因素,采集基本处于自然状态、表面未受扰动、逐年形成的沉积物柱样,以消除机械扰动的影响。其次是计算<sup>137</sup>Cs 下渗深度,在这方面的探讨有如下结果。

David<sup>[30]</sup> 提出<sup>137</sup>Cs 沉积后因解吸并经由扩散下渗的深度  $Z'$  (cm) 的计算公式为:

$$Z' = (4D_p \cdot x t)^{1/2} \quad (9)$$

式中  $D_p$  为<sup>137</sup>Cs 在孔隙水中的扩散系数( $\text{cm}^2/\text{a}$ ),是孔隙度和分布系数  $K_d$  的函数  $D_p = 0.056 \text{cm}^2/\text{a}$ ;  $t$  是自主要<sup>137</sup>Cs 沉降以来的时间(a)。

Walling<sup>[12]</sup> 假定沉积物与陆地参考剖面<sup>137</sup>Cs 下渗速率相同,用未受扰动的陆地土壤剖面(参考剖面)中<sup>137</sup>Cs 的年均下渗深度来代替沉积物中的<sup>137</sup>Cs 年均下渗深度,则剔除<sup>137</sup>Cs 下渗因素后沉积物的沉积通量  $S_{np}$  ( $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ ) 为:

$$S_{np} = (M/T) - v_p \quad (10)$$

$$v_p = M_{\text{ref}}/(T - 1954) \quad (11)$$

式中  $v_p$  为参考剖面<sup>137</sup>Cs 年均下渗质量深度( $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ ),当采样剖面上下干容重一致时,该

值即为<sup>137</sup>Cs 年均下渗深度( $\text{cm}/\text{a}$ ),  $M_{\text{ref}}$  为参考剖面中<sup>137</sup>Cs 分布的累加质量深度( $\text{g}/\text{cm}^2$ )。

苏琼等<sup>[40]</sup> 则建立了校正<sup>137</sup>Cs 在水体沉积物中纵向迁移的数学模型。

## 6 存在的一些其它问题

(1) 样品的合理分截厚度多少为宜。为了精确确定沉积物的沉积年份,分截沉积物柱样时,分截厚度应尽量与年沉积厚度一致,较理想的是每一分层样品代表一年。然而,这不仅受实际年沉积厚度未知的限制,更受设备、测试时需要的样品量、工作量及费用等限制,通常很难达到。尽管如此,在保持计年精度要求与工作量之间平衡的前提下,还是应尽可能使分截厚度薄一些以提高计年精度。有学者提出,湖泊沉积速率 3 ~ 5 mm/a 时,分截厚度以 0.5 ~ 1 cm 为宜<sup>[19]</sup>。

(2) 陆地输移时间对<sup>137</sup>Cs 在沉积物中沉积滞后的影响有多大。<sup>137</sup>Cs 在沉积物中的沉积时间滞后于大气<sup>137</sup>Cs 沉降时间一是<sup>137</sup>Cs 在水中寄宿所致,二是流域侵蚀土壤从陆地输移至湖泊亦需要时间<sup>[41]</sup> 因此,用<sup>137</sup>Cs 计年时还应注意侵蚀来源滞后问题。万国江<sup>[16, 17]</sup> 以流域侵蚀与湖泊沉积间的示踪模型探讨了此问题,并用以评估湖泊沉积物中<sup>137</sup>Cs 的主要来源是大气沉降还是流域侵蚀,可以作为进一步探讨此问题的参照。

(3) <sup>137</sup>Cs 沉积后的再扩散迁移是否发生。沉积后再迁移改变了初始<sup>137</sup>Cs 沉积形成的活度分布,并改变时标所在初始深度位置,如果发生下渗,且各深度(对应不同年代)的下渗深度不同,更会使计年复杂化,高估沉积物沉积速率。因此,对沉积物中的<sup>137</sup>Cs 下渗(机械扰动造成的除外)是否发生及发生的原因和机理究竟是什么应做出正确判断。

正如上文提及,<sup>137</sup>Cs 再迁移的可能原因有机械扰动,但只要湖水足够深,生物扰动又有限,该原因便可不计,剩下的原因便是解吸后通过孔隙水扩散和随微粒重力下移。

<sup>137</sup>Cs 被粘土强烈吸附且基本不可置换<sup>[10]</sup> 沉积物中<sup>137</sup>Cs 吸附动力学及离子交换实验表明,绝大部分<sup>137</sup>Cs 处于固定态<sup>[20]</sup>。然而,当  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{H}^+$  等竞争离子增加时,<sup>137</sup>Cs 的吸附会减少<sup>[10, 42]</sup>。Davis<sup>[43]</sup> 指出,<sup>137</sup>Cs 通过孔隙水迁移在粘土沉积物中较低,而在碳酸盐沉积物中较高,<sup>137</sup>Cs 在碳酸盐沉积物中迁移的机理是,有机质降解释放出的  $\text{CO}_2$  引起吸附于

碳酸盐上的  $^{137}\text{Cs}$  解吸进入孔隙水并沿浓度梯度扩散<sup>[44]</sup>。所以,  $^{137}\text{Cs}$  的化学性质决定了  $^{137}\text{Cs}$  的解吸并通过孔隙水扩散确实会发生<sup>[6]</sup>。但在多数情况下的扩散非常有限<sup>[10, 45]</sup>。

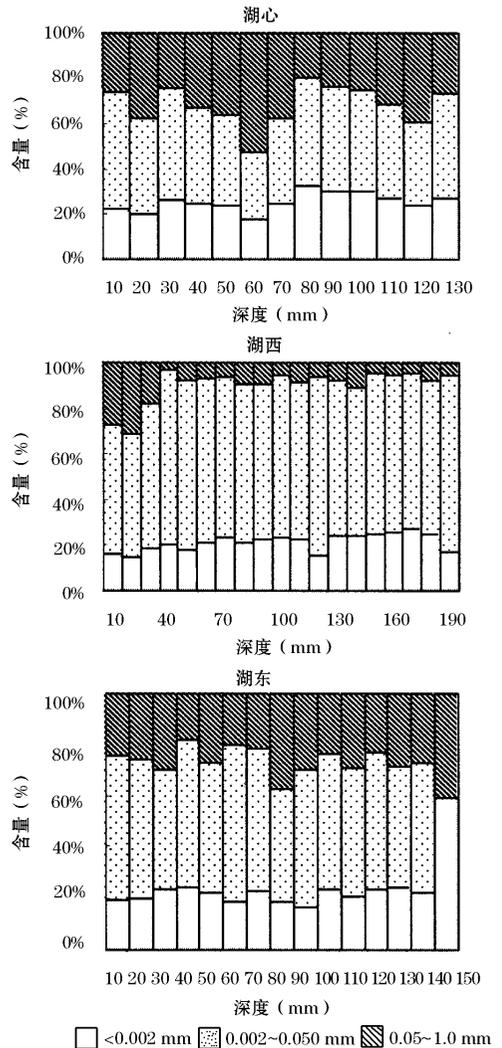
$^{137}\text{Cs}$  主要吸附于粘粒上<sup>[10]</sup> 因而若存在附着在颗粒上的  $^{137}\text{Cs}$  随颗粒物向沉积物下层迁移, 则应出现沉积物下部颗粒比上部细的现象, 但我们对滇池沉积物颗粒分析发现沉积物上下层的颗粒分布无显著差异(图 1), 而有的研究则认为滇池沉积物粒度自下而上略微变细<sup>[46]</sup>; 且与陆地不同, 沉积物颗粒间的孔隙多被水占据, 水的浮力对颗粒重力下移也起抵消作用。这是否意味着沉积物中  $^{137}\text{Cs}$  随颗粒重力下移可以忽略, 还需进一步探讨。

$^{137}\text{Cs}$  在湖泊沉积物中的下渗与在陆地上的下渗是否可比亦需确认。因为陆地非沉积点土壤深层的  $^{137}\text{Cs}$  只能源于下渗, 而陆地沉积点与水底沉积物中即使不发生下渗, 由于迭加堆积, 深层也会存在  $^{137}\text{Cs}$ , 所以在无法区分沉积物中深层的  $^{137}\text{Cs}$  是沉积迭加的结果还是沉积迭加与下渗共同作用的情况下, 是否可用  $^{137}\text{Cs}$  在陆地上的下渗速率代替在沉积物中的下渗速率, 还有待进一步证实。

此外, 在许多研究<sup>[11, 24, 25, 27, 30, 22]</sup> 中, 不考虑  $^{137}\text{Cs}$  下渗得到的沉积率与用其他方法(如纹理计年、 $^{210}\text{Pb}$ 、实际观测)得到的结果相同或相近, 也许表明湖泊沉积物中  $^{137}\text{Cs}$  的扩散迁移即使发生也不会很大, 尤其因未改变峰值的相对位置<sup>[6, 8, 24]</sup>, 故不考虑  $^{137}\text{Cs}$  下渗仍可准确测算沉积物平均沉积通量。

## 7 结 语

在沉积物沉积速率研究中,  $^{137}\text{Cs}$  计年法有独特优势, 但也存在一些限制因素和有待解决的问题, 有些问题是滞后、扩散等客观因素造成的, 也有些问题产生于采样与测量等主观因素, 判断以砂粒为主的沉积物的沉积速率时,  $^{137}\text{Cs}$  时标也可能出现较大偏差。然而, 多数问题会随着研究的深入而得到解决, 这将使  $^{137}\text{Cs}$  在估算土壤侵蚀与沉积物沉积方面的潜力获更充分的发挥。又由于湖泊沉积物还是流域环境污染物的重要宿体, 记载了很多环境污染变化的信息, 因此, 可在计算泥沙沉积量的基础上, 进一步开展湖泊内源污染负荷的研究, 如估算附着于泥沙沉积物上的营养元素及重金属的沉积通量及负荷总量, 人们还借助  $^{137}\text{Cs}$  计年来建立地球化学循环模型, 并据此辨识区域及全球环境变化<sup>[47]</sup>。



□  $<0.002\text{ mm}$     ▨  $0.002\text{--}0.050\text{ mm}$     ▩  $0.05\text{--}1.0\text{ mm}$   
各湖区粘粒、粉粒、砂粒方差检验计算值

湖区	粘粒	粉粒	砂粒	$F_{0.05}$ 值
湖西	0.80	2.61	12.62	$F(12,5)=4.68$
湖心	1.03	3.61	1.98	$F(6,6)=4.28$
湖东	2.62	1.88	1.44	$F(10,3)=8.79$

图 1 滇池各湖区柱样粒度分布图

Fig.1 Particle distribution of sediment cores in Dianchi Lake

## 参考文献(References):

[1] Ravea O. Sediments [A]. In: Accumulation of Fission Products from Fall-out in Lake Bica (Lake Maggiore) [C]. Vienna: Int. Atomic Energy Agency, 1961. 31-37.

- [2] Nelson J L, Perkins R W, Neilsen J M, et al. Reaction of radionuclides from Hanford reactors with Columbia River sediments [A]. In: Disposal of Radioactive Waste in Seas, Oceans, and Surface Waters [C]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1966. 139-161.
- [3] Schreiber B, Peñal T, Mezzadri M G, et al. Gross beta radioactivity in sediments of the North Adriatic Sea: A possibility of evaluating the sedimentation rate [J]. Archives of Oceanography Limnology, 1968, 16: 45-62.
- [4] Pickering R J. Distribution of radionuclides in bottom sediment at the Clinch River, eastern Tennessee [A]. In: United States of America, Department of the Interior. Geological Survey: Professional Paper [C]. Washington DC, 1969. 433.
- [5] Ravera O, Premazzi G. A method to study the history of any persistent pollution in a lake by the concentration of  $^{137}\text{Cs}$  from fallout [A]. In: Radioecology Applied to the Protection of Man and His Environment [C]. EUR 4800, 1971. 703-719.
- [6] Krishnaswami S, Lal D, Martin J M, et al. Geochronology of lake sediments [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1971, 11: 407-414.
- [7] Pennington W, Cambrey R S, Fisher E M. Observations on lake sediments using fallout  $^{137}\text{Cs}$  as a tracer [J]. Nature, 1973, 242: 324-326.
- [8] Ritchie J C, McHenry J R, Gilla C. Dating recent reservoir sediment [J]. Limnology and Oceanography, 1973, 18: 254-263.
- [9] Ritchie J C, McHenry J R. Fallout  $\text{Cs-137}$ : A tool in conservation research [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1975, 30: 283-286.
- [10] Ritchie J C, McHenry J R. Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: A review [J]. Journal of Environmental Quality, 1990, 19: 215-233.
- [11] 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.
- [12] Walling D E, He Q. Use of fallout  $^{137}\text{Cs}$  in investigations of overbank sediment deposition on river floodplains [J]. Catena, 1997, 29: 263-282.
- [13] Wang Yonghong, Shen Huanling. The study methods of sedimentation rates in the estuarine and coastal environments [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22(2): 115-120. [王永红, 沈庭庭. 河口海岸环境沉积速率研究方法 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(2): 115-120.]
- [14] Wan Guojiang, Santschi P, Farrenkøthen K, et al. Distribution and dating of  $^{137}\text{Cs}$  for recent sediments in Lake Greifen (Switzerland) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1985, 5(3): 360-365. [万国江, Santschi P, Farrenkøthen K, 等. 瑞士 Greifen 湖新近沉积物中的  $^{137}\text{Cs}$  分布及其计年 [J]. 环境科学学报, 1985, 5(3): 360-365.]
- [15] Wan Guojiang, Santschi P H, Sturm M, et al. A comparative study on recent sedimentation rates of Lake Greifen, Switzerland using varve counting and radionuclide dating [J]. Geochimica, 1986, (3): 259-270. [万国江, Santschi P H, Sturm M, 等. 放射性核素和纹层计年对比研究瑞士格莱芬湖近代沉积速率 [J]. 地球化学, 1986, (3): 259-270.]
- [16] Wan Guojiang, Santschi P H. Prediction of radionuclide inventory for sediment in Lake Greifen (Switzerland) [J]. Scientia Geographica Sinica, 1987, 7(4): 358-363. [万国江, Santschi P H. 瑞士 Greifen 湖沉积物中放射性核素累计预测研究 [J]. 地理科学, 1987, 7(4): 358-363.]
- [17] Wan Guojiang, Lin Wenzhu, Huang Ronggui, et al. Sedimentation dating and erosion tracing of  $^{137}\text{Cs}$  for sediment in Hongfeng Lake [J]. Chinese Science Bulletin, 1990, 35(19): 1487-1490. [万国江, 林文祝, 黄荣贵, 等. 红枫湖沉积物  $^{137}\text{Cs}$  垂直剖面的计年特征及侵蚀示踪 [J]. 科学通报, 1990, 35(19): 1487-1490.]
- [18] Zhang Shurong, Xu Cuihua, Zhong Zhizhao, et al. Determination of sedimentation rate and dating of sediment in Ehai Lake with  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  dating methods [J]. Radiation Protection, 1993, 13(6): 453-457, 465. [张淑蓉, 徐翠华, 钟志兆, 等. 用  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{137}\text{Cs}$  法测定洱海沉积物的年代和沉积速率 [J]. 辐射防护, 1993, 13(6): 453-457, 465.]
- [19] Wan Guojiang.  $^{210}\text{Pb}$  dating for recent sedimentation [J]. Quaternary Sciences, 1997, 17(3): 230-239. [万国江. 现代沉积的  $^{210}\text{Pb}$  计年 [J]. 第四纪研究, 1997, 17(3): 230-239.]
- [20] Bai Zhanguo, Wan Xi, Wan Guojiang, et al. Geochemical spectation of  $^7\text{Be}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{228}\text{Ra}$  in soils of the Karst region, Southwest China and their erosion trace [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1997, 17(4): 407-411. [白占国, 万曦, 万国江, 等. 岩溶山区表土中  $^7\text{Be}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  和  $^{228}\text{Ra}$  的地球化学相分配及其侵蚀示踪意义 [J]. 环境科学学报, 1997, 17(4): 407-411.]
- [21] Xu Jingyi, Wan Guojiang, Wang Changsheng, et al. Vertical distribution of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  and their dating in recent sediments of Lugu Lake and Ehai Lake, Yunnan Province [J]. Journal of Lake Sciences, 1999, 11(2): 110-116. [徐经意, 万国江, 王长生, 等. 云南省泸沽湖、洱海现代沉积物中  $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  的垂直分布及其计年 [J]. 湖泊科学, 1999, 11(2): 110-116.]
- [22] Pan Shaoming, Zhu Dakui, Li Yan, et al.  $\text{Cs-137}$  Profile in Sediments in Estuaries and Its Application in Sedimentology [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(4): 67-71. [潘少明, 朱大奎, 李炎, 等. 河口港湾沉积物中的  $^{137}\text{Cs}$  剖面及其沉积学意义 [J]. 沉积学报, 1997, 15(4): 67-71.]
- [23] McHenry J R, Ritchie J C, Gilla C. Accumulation of fallout cesium-137 in soils and sediments in selected watershed [J]. Water Resources Research, 1973, 9(3): 676-686.
- [24] Kachanoski R G, Jong E de. Predicting the temporal relationship between soil cesium-137 and erosion rate [J]. Journal of Environmental Quality, 1984, 13: 301-304.
- [25] Aarkrog A, Bøter-Jensen, Jørg L, et al. Environmental radioactivity in Denmark in 1990 and 1991 [R]. Roskilde, Denmark: Riso National Laboratory, 1992.
- [26] Longmore M E, O'Leary B M, Rose C W, et al. Mapping soil erosion and accumulation with the fallout isotope cesium-137 [J].

- Australian Journal of Soil Research, 1983, 21(4): 373-385.
- [27] Owens P N, Walling D E, He Q. The behaviour of bomb-derived caesium-137 fallout in catchment soils[J]. Journal of Environment Radioactivity, 1996, 32: 167-191.
- [28] Chamard P, Velasco R H, Belli M, et al. Caesium-137 and strontium-90 distribution in a soil profile[J]. Science of the Total Environment, 1993, 136: 251-258.
- [29] Wan Guojiang, Appleby P G. Progress on fallout radionuclides as tracers in environmental systems[J]. Advances in Earth Science, 2000, 15(2): 172-177. [万国江, Appleby P G. 环境生态系统散落核素示踪研究新进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(2): 172-177.]
- [30] David N E, Klump J V, Robbins J A, et al. Sedimentation rates, residence times and radionuclide inventories in Lake Balkhal from <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb in sediment cores[J]. Nature, 1991, 350: 601-604.
- [31] Hirose K. Annual deposition of Sr-90, Cs-137 and Pu-234, 240 from the 1961-1980 nuclear explosions: A simple model[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 1987, 65: 259-277.
- [32] Zhang Yan, Peng Buzhuo, Chen Jie, et al. Evaluating amount of sediment accumulation of Dianchi Lake using <sup>137</sup>Cs dating[J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(1): 71-78. [张燕, 彭补拙, 陈捷, 等. 借助<sup>137</sup>Cs估算滇池沉积量[J]. 地理学报, 2005, 60(1): 71-78.]
- [33] Stiller M, Imboden D M. <sup>210</sup>Pb in Lake Kinneret waters and sediments: Residence times and fluxes[A]. In: Sly P G ed. Sediment and Water Interactions[C]. New York: Springer-Verlag, 1986. 501-511.
- [34] David R B, Hess C T, Norton S A, et al. Cs-137 and Pb-210 dating of sediments from soft-water lakes in New England (U. S. A.) Scandinavia, a failure of Cs-137 dating[J]. Chemical Geology, 1984, 44: 151-181.
- [35] Simpson H J, Olsen C R, Trier R M, et al. Man-made radionuclide sedimentation in the Hudson River Estuary[J]. Science, 1976, 194(4261): 179-183.
- [36] He Q, Walling D E. Interpreting particle size effects in the adsorption of <sup>137</sup>Cs and unsupported <sup>210</sup>Pb by mineral soils and sediments[J]. Journal of Environment Radioactivity, 1996, 30: 117-137.
- [37] Dominik J, Mangina I, Müller G. Determination of recent deposition rates in Lake Constance with radioisotopic methods[J]. Sedimentology, 1981, 28: 653-677.
- [38] Bloesch J, Evans R D. Lead-210 dating of sediments compared with accumulation rate estimated by natural markers and measured with sediment traps[J]. Hydrobiologica, 1982, 92: 579-586.
- [39] Xu Hongkun, Lin Changsong. A method for correcting compaction of sediment[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(2): 366. [许红昆, 林畅松. 沉积物压实的一种校正方法[J]. 地学前缘, 2000, 7(2): 366.]
- [40] Su Qiong, Song Haiqing. A mathematical model for correcting deep transfer of <sup>137</sup>Cs in the water-sediment system[J]. Report on Technology of Chinese Nuclear, 1995, (2): 1-12. [苏琼, 宋海青. 校正<sup>137</sup>Cs在水体沉积物中纵向迁移的数学模型[J]. 中国核科技报告, 1995, (2): 1-12.]
- [41] Huang Naiming, Song Haiqing, Nu Guangqiu, et al. Variations of specific activity of radionuclides in marine sediments with depth at GNPS site and evaluation of sedimentation velocity[J]. Radiation Protection Bulletin, 1999, 19(2): 9-12. [黄乃明, 宋海青, 牛广秋, 等. 大亚湾海底泥中放射性核素比活度随深度的变化及底泥沉积速率的估算[J]. 辐射防护通讯, 1999, 19(2): 9-12.]
- [42] Xu Yinliang, Chen Kaixuan, Chen Chuanqun, et al. Behavior of <sup>137</sup>Cs in the water-adsorbent system[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2000, 14(4): 234-240. [徐寅良, 陈凯旋, 陈传群, 等. <sup>137</sup>Cs在水-吸附剂体系中的行为[J]. 核农学报, 2000, 14(4): 234-240.]
- [43] Davis R B, Hess C T, Norton S A, et al. <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb dating of sediments from soft-water lakes in New England (U. S. A.) and Scandinavia, a failure of <sup>137</sup>Cs dating[J]. Chemical Geology, 1984, 44: 151-181.
- [44] Wan Guojiang. <sup>137</sup>Cs Dating by annual distinguish for recent sedimentation: Samples from Erhai Lake and Hongfeng Lake[J]. Quaternary Sciences, 1999, 19(1): 73-80. [万国江. 现代沉积年分辩的<sup>137</sup>Cs计年——以云南洱海和贵州红枫湖为例[J]. 第四纪研究, 1999, 19(1): 73-80.]
- [45] Tamura T. Selective sorption reaction of caesium with mineral soils[J]. Nuclear Safety, 1964, 5: 262-268.
- [46] Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences. Environment and Sedimentation of Fault Lakes, Yunnan Province[M]. Beijing: Science Press, 1989. 291. [中国科学院南京地理与湖泊研究所. 云南断陷湖泊环境与沉积[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 291.]
- [47] McIntyre S C. Reservoir sedimentation rates linked to long-term changes in agricultural land use[J]. Water Resources Bulletin, 1993, 29: 487-495.

## AN OVERVIEW ON THE EVALUATION OF SEDIMENT ACCUMULATION RATE OF LAKE BY $^{137}\text{Cs}$ DATING

ZHANG Yan, PAN Shao-ming, PENG Bu-zhuo

(Department of Urban and Resources Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract :** The vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in sediment profiles is present in accordance with the record of  $^{137}\text{Cs}$  fallout variations in the atmosphere. Therefore,  $^{137}\text{Cs}$  can be used to infer a geochronology for sediment profiles and sediment accumulation rates can be estimated by measuring vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in sediment profiles. But some factors must be taken into account for dating horizon in sediment profiles more accurate and precise. The time lag between the time of atmospheric deposition of  $^{137}\text{Cs}$  and the time of deposition of  $^{137}\text{Cs}$  to sediment profiles should be calculated. For some sediment profiles  $^{137}\text{Cs}$  concentration per unit of clay should be explained. In order to prove the accurate of  $^{137}\text{Cs}$  dating, sediment accumulation rates estimated by  $^{137}\text{Cs}$  dating should also be compared with that measured at same site by other methods, such as standard sediment survey method,  $^{210}\text{Pb}$  dating, sedimentary lamination, pollen and so on. Then with several depositional horizons marked by  $^{137}\text{Cs}$  the depth (cm) or the mass ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) of sediment for different time periods can be calculated. And it can be made to compare sediment accumulation rate in depth (sediment accumulation rate) and in mass (sediment flux) for different time periods. Because of compaction effect on sediment the sediment flux can well and truly reflect sedimentation rate. Based on the sediment flux and the area of lake bed measured by GIS, the annual gross accumulation of sediment can be calculated and internal load of pollutants in the lake sediment, lake evolution and environment changes of the lake basin can be studied further. Therefore,  $^{137}\text{Cs}$  dating has been extensively used for evaluation of sediment accumulation rate of lake, estuary, and ocean. However, there are still some problems under resolve. Firstly, how thickness of sampling should be divided up to meet both the needs of  $^{137}\text{Cs}$  dating precision and the propriety of measurement work. Secondly, attention should be paid to the lag time between  $^{137}\text{Cs}$  deposition in atmosphere and in sediment relates to the transport time from soil loss in field to lake. Thirdly, it should be also carefully taken into account whether diffusion and infiltration movement of  $^{137}\text{Cs}$  in sediment profiles occurred and what their mechanisms are.

**Key words :**  $^{137}\text{Cs}$  dating ; Sediment accumulation rate ; Lag time ; Infiltration .