

文章编号: 1000-0550(2008) 04-0655-06

^{137}Cs 剖面的沉积信息提取¹ ——以香港贝澳湿地为例

潘少明¹ 郭大永² 刘志勇¹

(1. 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室 南京 210093 2. 南京大学物理系 南京 210093)

摘要 通过建立模型,对采自香港大屿山岛贝澳湿地三个站位的沉积样品的 ^{137}Cs 实测剖面与模型计算剖面的比较分析,得出三个站位的沉积速率分别为 0.24 cm/a、0.21 cm/a、0.34 cm/a。除 P1 站位外, P2、P3 站位由于受到潮水的作用,表层沉积物受到侵蚀,侵蚀量分别为 4.8 cm 和 7 cm。该结果与常用的时标方法的结果进行了比较, P1 站位由上述模型所得的结果与常用的时标方法所得的结果一致。可以看出,在稳定的沉积环境下,常用的确定时标的方法可以较准确地计算出沉积速率,而在堆积与侵蚀变化的沉积环境下,常用的确定时标的方法就存在一定的缺陷。该工作为 ^{137}Cs 剖面的沉积信息提取进行了有益的尝试。但上述模型中,由于采用日本东京地区的 ^{137}Cs 大气沉降通量记录替代香港地区的 ^{137}Cs 大气沉降通量记录,并没有考虑 ^{137}Cs 的扩散效应,所以该模型还有待进一步的改进。

关键词 ^{137}Cs 香港贝澳湿地 模型 沉积速率

第一作者简介 潘少明 男 1957 年出生 博士 教授 同位素测年及海洋沉积 E-mail: spm@nju.edu.cn
中图分类号 X141 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

^{137}Cs 是一种人工产生的放射性核素(半衰期为 30.2 年)。自 1945 年到 1964 年的地面核爆炸实验产生了大约 200 种放射性核素(包括 ^{137}Cs)^[1],这些放射性核素通过大气扩散沉降输入到地表和海洋环境。 ^{137}Cs 很容易被土壤、沉积物,特别是含有粘土矿物的土壤、沉积物吸附,并且具有较长的半衰期和容易测量的特点,因此被广泛用作环境放射性示踪元素来研究海洋、河流、湖泊沉积物的沉积及流域的侵蚀^[1-7]。通过对沉积柱样 ^{137}Cs 剖面的测量研究,可以了解放射性核素的沉降历史,同时为研究现代沉积作用,估算沉积物的沉积速率提供了一种有效的方法。常用的方法是通过确定 ^{137}Cs 实测剖面中几个特殊的点作为时标,即 50 年代初的起始值,1963 年最大峰值和 1986 年切尔诺贝利事故峰值,把这几个位置的时标分别定为 1954 年、1963 年和 1986 年。根据各时标所对应的沉积物深度可推算沉积速率^[1,2]。该方法的不足为只利用了 ^{137}Cs 实测剖面中几个特殊点的信息,而没有把储存在 ^{137}Cs 实测剖面中的现代沉积过程信息提取出来,特别是在海岸带,环境变化迅速,沉积与侵蚀交替变化, ^{137}Cs 测年的单独使用有

一定的局限性^[8-10],因此探索一种 ^{137}Cs 剖面的沉积信息提取方法就显的更为重要。

1 沉积物中的 ^{137}Cs 计算模型

在海岸带, ^{137}Cs 主要来自于大气沉降,研究表明全球 ^{137}Cs 具有明确的沉降量的时序分布^[8,10,11],从日本东京、美国和英国上空的 ^{137}Cs 散落量的年度变化来看,全球变化趋势是基本一致的。自 1945 年 ^{137}Cs 被释放到大气中之后,到了 1952~1954 年全球环境开始出现较大的 ^{137}Cs 散落量(可探测到)。此后,全球的 ^{137}Cs 沉降量呈上升趋势,直至 1963 年达到最大峰值。70 年代以后主要核试验国家转入地下核试验, ^{137}Cs 的大气沉降量已很少。此外,地区性的核事故(如 1986 年切尔诺贝利核事故)对某些地区的 ^{137}Cs 大气沉降量有较大的影响,但就全球范围而言则影响有限^[7,11]。

^{137}Cs 被沉积物吸附后,反映在沉积物中的 ^{137}Cs 剖面则是沉积、侵蚀和混合作用的结果。假设忽略沉积物的挤压效应和混合作用, ^{137}Cs 在沉积柱样中的分布可以用下面的偏微分方程描述^[10]:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = -S \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} - \lambda C \quad (1)$$

¹ 国家重点基础研究发展规划项目(编号 2002CB412401)资助。

收稿日期: 2007-08-28 收修修改稿日期: 2007-12-04

其中 C 是样品中 ^{137}Cs 的放射性比度 (Bq/kg), x 是沉积物的深度 (cm), S 是沉积速率 (cm/a), λ 是 ^{137}Cs 的衰变常数 (a^{-1})。在初始条件为 $C(x, 0) = 0$ 并且沉积速率不随时间变化的条件下, 方程 (1) 的解为^[10]:

$$C(x, t) = I_0(\theta) \exp(-\lambda \frac{x}{S}) \quad (2)$$

其中 I_0 为一与时间有关的输入函数 (Bq/kg), 参数 $\theta = t - x/S$ 。接下去假定沉积样品中的 ^{137}Cs 均来源于大气沉降, 则输入函数 I_0 在每一年度内为常数:

$$I_0 = K_s C_i^0 \quad (i-1)\Delta t < t < i\Delta t, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

其中 $\Delta t = 1\text{y}$, C_i^0 是每年大气中 ^{137}Cs 的沉降量 (mCi/km^2), 见图 1。 N 是测量时间与 1954 年之间的年数。 K_s 为转换系数, 即将 ^{137}Cs 大气沉降通量的年度变化转换成 ^{137}Cs 的比度随深度的变化:

$$K_s = \frac{3.7 \times 10^{10} \times 10^{-3}}{10^6 \rho \cdot S \cdot 10^{-2}} = \frac{3.7 \times 10^3}{\rho \cdot S} \quad (4)$$

上式中 ρ 为样品的干容重 (假设不随深度而变化), 单位为 kg/m^3 , S 为沉积速率, 单位为 cm/a 。

在实际测量样品时, 总是先将样品按一定的间隔进行分层, 使得每一层样品均是几年时间沉积而成。这样该层样品中 ^{137}Cs 的放射性比度就是几年的平均值。由方程 (2)、(3)、(4) 我们可以得到:

$$C(\Delta x, t) = K_s \sum_{m=j}^k f_m C_{N-m}^0 \exp(-\lambda \tau_m) \quad (5)$$

其中 $\Delta x = x_{i+1} - x_i$ 是每层样品的厚度。指数 j, k 由下式给出:

$$j = \text{Int}(\frac{x_i}{S \Delta t}) + 1 \quad (6)$$

$$k = \text{Int}(\frac{x_i + 1}{S \Delta t}) + 1 \quad (7)$$

上式中 Int 表示取整函数。由于每一样品层由几年的沉积物组成, 我们把每年的沉积物看作一个单位层。在对沉积柱样分层时, 由于不可能确定分层的位置恰好在两单位层的分界面处, 必然导致分层后的样品表面位置存在不完整的单位层, 系数 f_m 即是代表该不完整单位层的比例, 可以计算为:

$$f_m = \begin{cases} m - \frac{x_i}{S \Delta t} & m = j \\ 1 & j < m < k \\ \frac{x_{i+1}}{S \Delta t} - (m - 1) & m = k \end{cases} \quad (8)$$

单位层沉积的时间用 τ_m 表示。 τ_m 的计算式为:

$$\tau_m = \begin{cases} (m - 0.5f_m) \Delta t & m = j \\ (m - 0.5f_m) \Delta t & j < m < k \\ (m - 1 + 0.5f_m) \Delta t & m = k \end{cases} \quad (9)$$

在具体应用中, 先确定取样地区的年大气沉降通量, x 和 N 的值, 带入到方程 (5) ~ (9) 中。粗略估计沉积速率 S , 在一定的范围内不断改变 S 的值, 便可得到一系列的 ^{137}Cs 垂直分布曲线。如果样品的表层可能受到侵蚀, 我们可以通过不断增加一个小量 δx 对柱样进行坐标变换, 直到理论曲线与实验曲线最为符合为止。此时模型曲线中的参数 S 较为精确的反映了该取样位置的沉积速率, 同时得到表层侵蚀的信息。

2 样品的采集与分析

三个站位的沉积样品于 1997 年 6 月采集于香港大屿山岛贝澳湿地。其中 P2、P3 位于潮水沟边, P1 位于湿地的中间 (图 1)。

采样时, 在采样地点挖一深约 60 cm 的坑, 将坑壁修平, 形成剖面, 沿剖面自上而下进行分层采样。P1、P2 站位按 1 cm 的间隔分层, P3 站位按 2 cm 的间隔分层。装入密闭的塑料袋中。在实验室中, 样品放在烘箱中烘干, 温度控制在 90°C 左右。将烘干的样品研磨、搅拌均匀后制成重为 100 g 的粉状干样。

^{137}Cs 分析采用 Ge(Li) 谱仪相对测量的方法^[11]。仪器为美国 EG&G ORTEC 公司生产的 GEM-25210 型高纯 Ge(Li) 探测器, 探测器位于老铅制成的铅室中。铅室壁由有机玻璃铜铅三层组成, 有机玻璃厚 5 mm, 铜厚 3 mm, 铅厚 2 mm, 经铅室屏蔽后, 本底比无铅室时小 10 倍。 ^{137}Cs 标准沉积样由加拿大贝德福海洋研究所提供^[11]。

3 结果与讨论

3.1 ^{137}Cs 剖面

三个站位中的 ^{137}Cs 垂直分布如图 2。可以看出三个站位的 ^{137}Cs 剖面均存在明显的峰值, 所不同的是位于潮水沟边的 P2、P3 两个站位的 ^{137}Cs 分布为单峰, 而位于湿地中间的 P1 站位呈现出双峰。对于 P1 ^{137}Cs 最大值为 $2.94 \text{ Bq}/\text{kg}$ 位于沉积剖面的 8~9 cm 层位; P2 最大值为 $4.65 \text{ Bq}/\text{kg}$ 位于沉积剖面的 2~3 cm 层位; P3 最大值为 $6.15 \text{ Bq}/\text{kg}$ 位于沉积剖面的 4~6 cm 层位。这些数据可以与香港附近海域一些沉积柱样中的 ^{137}Cs 相比较, Lo 等^[12] 研究了香港东

部地区的 8 个沉积柱样的 ^{137}Cs 分布, 其中最大值介于 4.7~6.2 Bq/kg 之间, 并且与 ^{210}Pb 的测年结果一致。而根据 Yu 等^[13]的研究结果, 东部海区沉积柱样中的 ^{137}Cs 的最大值为 2.36 Bq/kg, 可见 P1、P2、P3 三个沉积剖面中的 ^{137}Cs 最大值应对应于 ^{137}Cs 的最大沉积年 (1963~1964 年)。按照常用的时标方法, 则 P1、P2、P3 三个站位的沉积速率分别为 0.25 cm/a、0.07 cm/a、0.13 cm/a。显然, 除 P1 站位外, P2、P3 站位所得的结果无法解释该两个站位实测的 ^{137}Cs 剖面。

1986 年切尔诺贝利事故对香港地区沉积物中 ^{137}Cs 含量的影响是明显的, 1986 年 5 月在香港土壤中蓄积的 160 Bq/m² 的 ^{137}Cs 中有近 18% 来自切尔诺贝利核事故^[16]。因此在香港大屿山岛贝澳湿地的沉积物中应该能找到切尔诺贝利核事故的纪录。由图 2 可以看出, P1 站位的 ^{137}Cs 剖面除在 8~9 cm 层位处有一峰值外, 在 2~3 cm 处还有一强度相近的峰值。该峰的出现无法用 ^{137}Cs 的迁移扩散来解释。而

且以 8~9 cm 层位对应于 1963 年得出的该站位的沉积速率来推算, 该峰值正好对应于 1986 年。两峰值比 (1986 年蓄积峰值 / 1963 年蓄积峰值) 为 0.89。项亮等^[14]研究了江苏的固城湖中的两个沉积柱样与安徽的女山湖中的一个沉积柱样, 它们的 ^{137}Cs 剖面中, 两峰值比分别为 1.12、1.11、1.26。两者的结果可以相比较。因此我们认为 P1 站位保留了完整的 ^{137}Cs 剖面, 位于 2~3 cm 处的 ^{137}Cs 次级峰为 1986 年切尔诺贝利核事故所形成的。P2 与 P3 站位的 ^{137}Cs 剖面只呈现一个峰值, 则是由于这两个站位位于潮水沟边, 表层土壤受到潮水侵蚀的结果。

3.2 结果与讨论

在香港贝澳湿地, 只有大潮时才会被海水淹没, 沉积物中的 ^{137}Cs 主要来自于大气沉降。由于香港地区没有完整时间序列的 ^{137}Cs 大气沉降通量记录, 本文用日本东京地区的年 ^{137}Cs 大气沉降量代替 (图 3)。

由站位 P₁ ^{137}Cs 剖面图 (图 2), 粗略估算沉积速

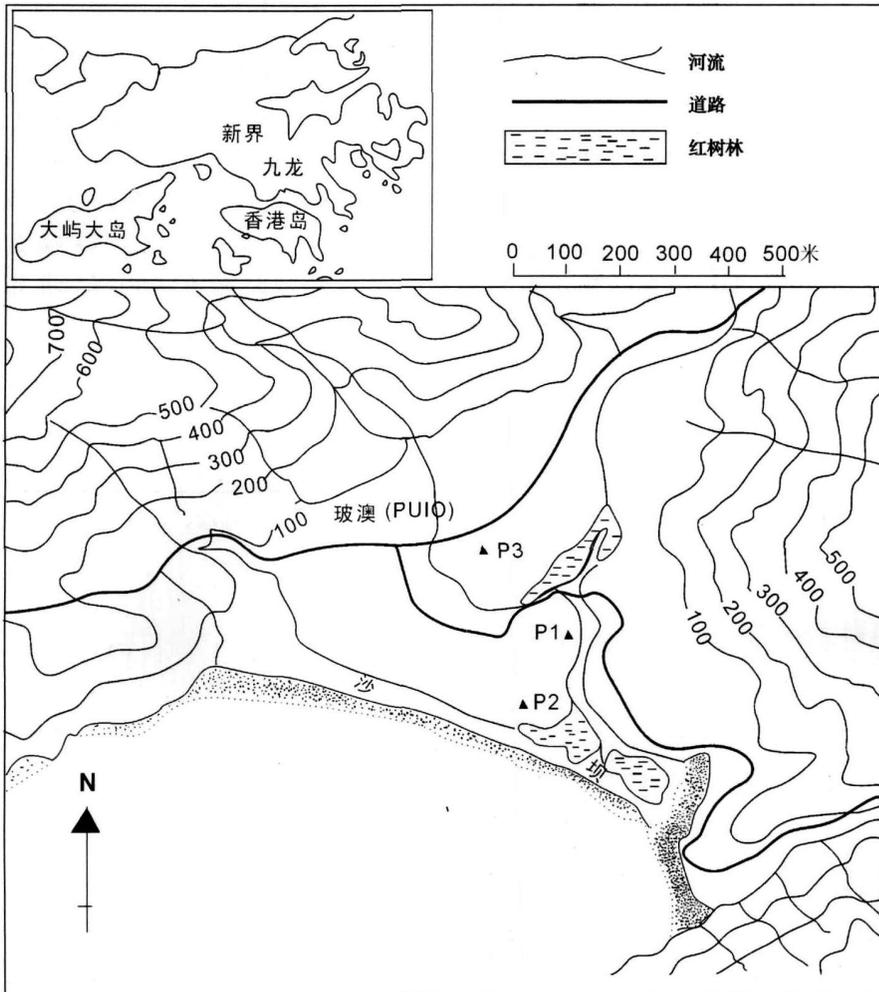


图 1 采样站点的地理位置

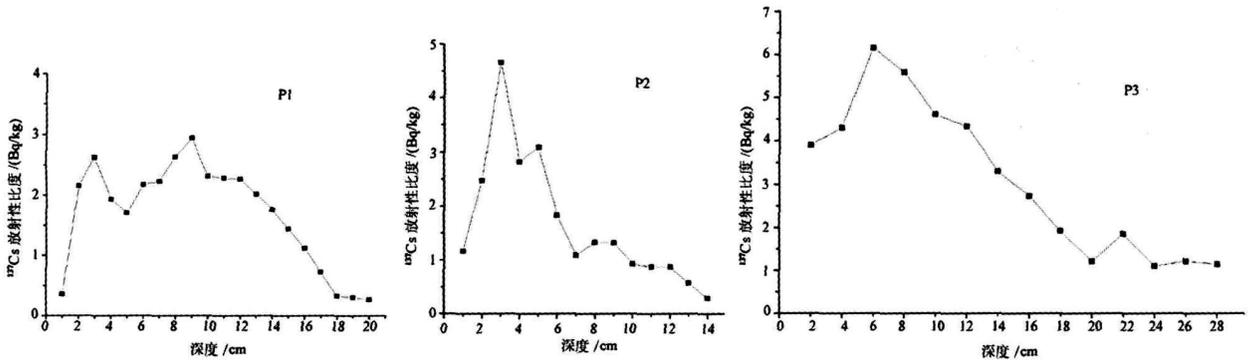


图 2 贝澳湿地沉积样品中的 ¹³⁷Cs 剖面

Fig 2 ¹³⁷Cs profiles in sediment samples in Pui O salt marsh

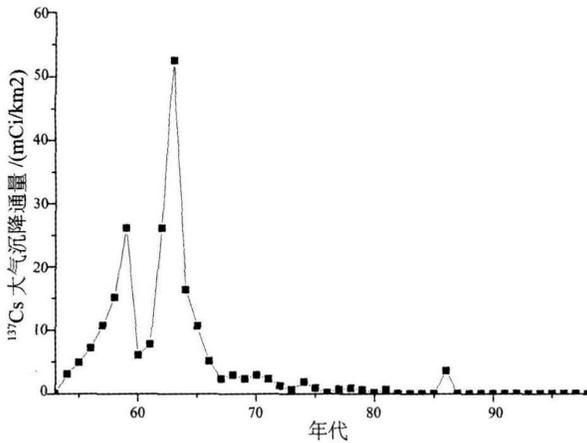


图 3 日本东京地区 ¹³⁷Cs 大气沉降通量年度的变化

Fig 3 Annual ¹³⁷Cs fallout flux in Tokyo, Japan

率 S 为 0.3 cm/a 取 S 的变化范围在 $0.2 \sim 0.5 \text{ cm/a}$ 之间, 每次增量为 0.01 cm/a 。由于可能存在表面侵蚀, 对应每个 S , δx 取值从 $0 \sim 0.9 \text{ cm}$, 依次增加 0.1 cm 。如果 δx 取值大于 1, 则此时的 ¹³⁷Cs 剖面与 δx 取它小数部分时的 ¹³⁷Cs 剖面形状完全相同, 只是坐标原点发生了平移, 所以只让 δx 从 0 变化到 0.9 cm ($\delta x = 1 \text{ cm}$ 与 $\delta x = 0$ 相同) (图 4)。

计算结果表明, ¹³⁷Cs 放射性比度的计算值远大于实测值。其原因大致有三: (1) 模型中所使用的 ¹³⁷C 大气沉降通量是日本东京地区的值, 与香港地区的年度值存在一定的差异, 而且差异可能很大。(2) 取样站点位于海岸附近, ¹³⁷Cs 易受到潮水的作用被侵蚀搬运。(3) 没有考虑混合扩散效应。为了能在

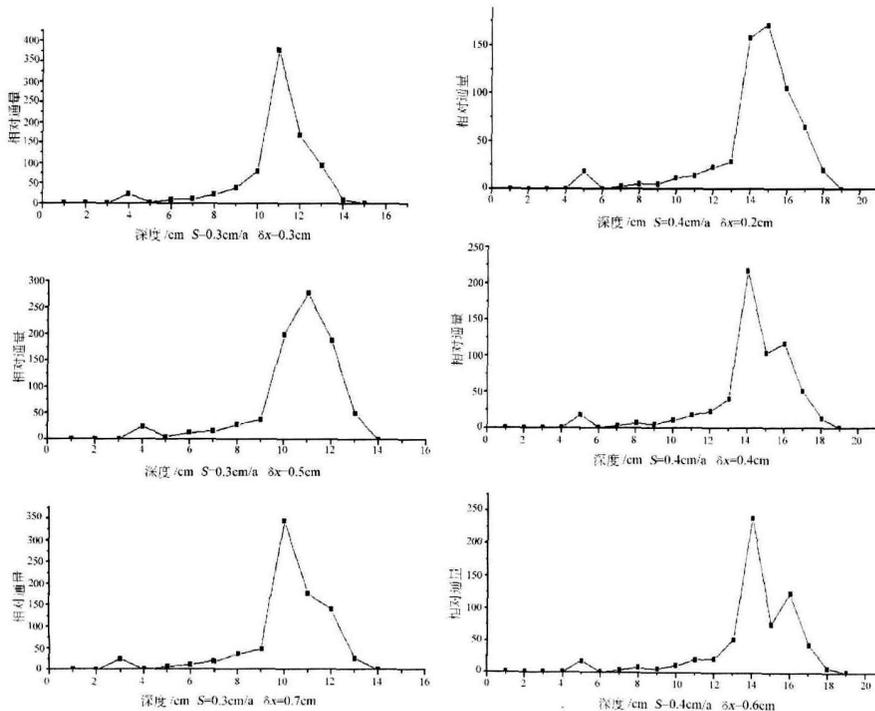
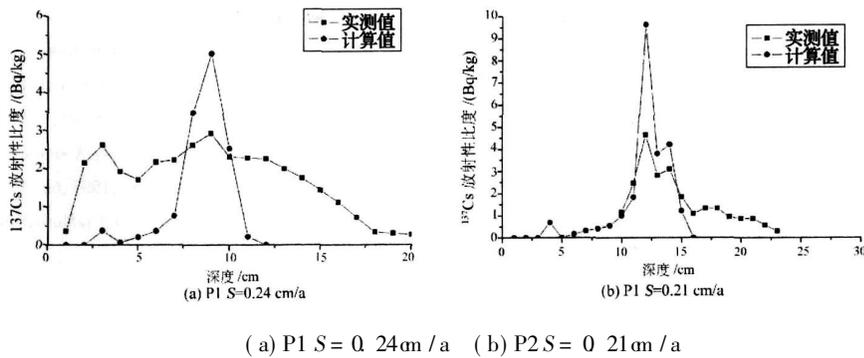


图 4 不同 S 和 δx 条件下沉积柱样中的 ¹³⁷Cs 剖面

Fig. 4 ¹³⁷Cs profiles for different S and δx



(a) $P1 S = 0.24 \text{ cm/a}$ (b) $P2 S = 0.21 \text{ cm/a}$

图 5 沉积样品中 ^{137}Cs 实测剖面与计算剖面的比较

Fig 5 Compare between calculated and measured ^{137}Cs profiles

同一坐标下比较理论计算的结果和实验结果,我们将理论计算结果乘上一个衰减因子 f , f 可在 0.01 到 0.05 之间取值,得到的计算剖面形状不变。为了保证 ^{137}Cs 的蓄积总量一定,由 P1(剖面最完整)给出 $f = 0.032$ 。在同一坐标系中作出 ^{137}Cs 的计算剖面和实测剖面(图 5)。

利用上述模型得到三个站位 P1、P2、P3 的沉积速率分别为: 0.24 cm/a 、 0.21 cm/a 、 0.34 cm/a 。站位 P1 的表层侵蚀为零,而 P2、P3 站位的侵蚀量分别为 4.8 cm 和 7 cm 。由于 P2、P3 站位位于潮水沟边,在潮流的作用下表层的沉积物受到侵蚀。P1 站位由上述模型所得的结果与常用方法所得的结果一致。可以看出,在稳定的沉积环境下,常用的确定时标的方法可以较准确地计算出沉积速率,而在侵蚀与堆积同时存在的沉积环境下,常用的确定时标的方法就存在一定的缺陷,单独使用 ^{137}Cs 时标法,不能得到可靠的沉积速率及沉积环境的信息,这与 Milan (1995)、Kirchner (1998) 的研究结果一致。

从图 5 可以看出,实测剖面 ^{137}Cs 分布要平缓得多,峰值不是很突出,而且最大峰值以上的层位至表层还保持相对高的放射性比度,与计算剖面有一定的差异。 ^{137}Cs 分布的平缓主要是由于沉积后的 ^{137}Cs 再迁移导致 ^{137}Cs 向更深地层扩散,引起峰值变宽。

三个站位的 ^{137}Cs 实测剖面有一共同特点,剖面的尾部变化缓慢,并且比预期的深度要深。这主要是由于 50 年代,贝澳湿地曾被围垦用作耕地,50 年代末又还田于湿地,反映在 ^{137}Cs 剖面上,由于耕地的影响,使得这一时期 ^{137}Cs 的分布较为均匀。

4 结论

通过建立模型与香港大屿山岛贝澳湿地三个站

位的 ^{137}Cs 实测剖面的比较分析,得出 P1、P2、P3 三个站位的沉积速率分别为 0.24 cm/a 、 0.21 cm/a 、 0.34 cm/a 。除 P1 站位外, P2、P3 站位由于受到潮水的作用,表层沉积物受到侵蚀,侵蚀量分别为 4.8 cm 和 7 cm 。

P1 站位由上述模型所得的结果与常用的时标方法所得的结果一致,表明在稳定的沉积环境下,常用的确定时标的方法可以较准确地计算出沉积速率,而在堆积与侵蚀同时存在的沉积环境下,常用的确定时标的方法就存在一定的缺陷,不能反映出沉积过程的信息。

在上述模型中,由于采用日本东京地区的年 ^{137}Cs 大气沉降通量记录代替香港地区的 ^{137}Cs 大气沉降通量记录,并没有考虑 ^{137}Cs 的扩散效应,所以该模型还有待进一步的改进,通过本工作为 ^{137}Cs 剖面的沉积信息提取进行了有益的尝试。

参考文献 (References)

- 1 潘少明,朱大奎,李炎,等. 河口港湾沉积物中的 ^{137}Cs 剖面及沉积学意义 [J]. 沉积学报, 1997, 15(4): 67-71 [Pan Shao ming, Zhu Da kui, Li Yan, et al. ^{137}Cs profiles in sediments in estuaries and its application in sedimentology [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(4): 67-71]
- 2 张燕,潘少明,彭补拙,等. 用 ^{137}Cs 计年法确定湖泊沉积物沉积速率研究进展 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 671-678 [Zhang Yan, Pan Shao ming, Peng Buzhuo, et al. An overview on the evaluation of sediment accumulation rate of lake by ^{137}Cs dating [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(6): 671-678]
- 3 夏小明,杨辉,李炎,等. 长江口—杭州湾连海区的现代沉积速率 [J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 130-135 [Xia Xiaoming, Yang Hui, Li Yan, et al. Modern sedimentation rates in the contiguous sea area of Changjiang estuary and Hangzhou Bay [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1): 130-135]
- 4 潘少明,王雪瑜,Smith JN. 海南岛洋浦港现代沉积速率 [J]. 沉积

- 学报, 1994, 12(2): 86-95 [Pan Shaoming, Wang Xueyu, Smith J N. Sedimentation rates in Yangpu Harbour on Hainan Island [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(2): 86-95]
- 5 Smith J N, Ellis K M, *et al*. Transport mechanism for ^{210}Pb , ^{137}Cs and Pu fallout radionuclides through fluvio-marine systems [J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1982, 46: 941-954
 - 6 Walling D E, Qusine T A. Use of ^{137}Cs measurements to investigate soil erosion on arable fields in the UK: potential applications and limitations [J]. *Journal of Soil Science*, 1991, 42: 147-165
 - 7 Jeny C, Ritchie M, Henry 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
 - 8 Milan C S, Swenson E M, Turner R E, *et al*. Assessment of the ^{137}Cs method for estimating sediment accumulation rates Louisiana salt marshes [J]. *Journal of Coastal Research*, 1995, 11: 296-307
 - 9 Chanton J P, Martens C S, Kipputh G W, *et al*. Lead-210 sediment geochronology in a changing coastal environment [J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1983, 47: 1791-1804
 - 10 Kirchner G, Ehlers H. Sediment geochronology in Changing Coastal environments: potentials and limitations of the ^{137}Cs and Pb-210 methods [J]. *Journal of Coastal Research*, 1998, 14: 483-492
 - 11 Hirose K. Annual deposition of Sr-90, Cs-137 and Pu-239, 240 from the 1961-1980 nuclear explosions: A simple model [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1987, 65: 259-277
 - 12 Lo C K, Fung Y S. Heavy metal pollution profiles of dated sediment cores from Hebe Haven, Hong Kong [J]. *Water Research*, 1992, 26: 1605-1609
 - 13 Yu K N, Young E C, Stokes M J *et al*. Determination of sedimentation rates in Eastern Sea of Hong Kong with gamma-ray spectrometry [J]. *Nuclear Geophysics*, 1995, 9: 73-81
 - 14 项亮, 王苏民, 薛滨. 切尔诺贝利核事故泄漏 ^{137}Cs 在苏皖地区湖泊沉积物中的蓄积及时标意义 [J]. *海洋与湖沼*, 1996, 27: 132-137 [Xiang Liang, Wang Sumin, Xue Bin. Accumulation and time marker significance of Chernobyl-derived ^{137}Cs in lake sediments from Jiangsu-Anhui [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1996, 27: 132-137]

Sedimentation and Erosion in Pui O Salt Marsh of Hong Kong from ^{137}Cs Distribution in Sediment

PAN Shaoming¹ GUO Da-yong² LIU Zhi-yong¹

(1. The Key Laboratory of Coast and Island Exploitation of MOE, Nanjing University, Nanjing 210093

2. Physics Department of Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract Three sediment cores, 40~60 m in depth, extracted at three locations in Pui O Salt marsh of Hong Kong were analyzed for ^{137}Cs content at 1~2 cm intervals. Concentrations of ^{137}Cs were measured γ -spectrometrically. The results of the ^{137}Cs analyses shown that there were recognizable ^{137}Cs peak and horizon in the ^{137}Cs profiles in the sediment of the three stations. However, there was only one peak in the ^{137}Cs distribution in the two stations, while two peaks were observed in the other station. The maximums of ^{137}Cs activity in the three stations are 2.94 Bq/kg, 4.65 Bq/kg and 6.15 Bq/kg respectively. These values may be compared with that of sediment cores sampled from eastern zone of Hong Kong. Sediment accumulation rates are traditionally calculated by relating the first occurrence of ^{137}Cs in the sediment sequence to the year 1954 and its maximum activity to 1963. But this method does not make full use of the information stored in the ^{137}Cs distribution in the sediment column and sometimes it is difficult to get the right sedimentation rate in coastal area. To obtain more sedimentation process information, a model was fitted to the ^{137}Cs vertical distribution. The difference between the measured and calculated profiles of ^{137}Cs is distinct, accounting for the simplistic model, but the rationality of the model still exists and the difference can be explained. The sediment rates of the three sites were 0.24 cm/a, 0.21 cm/a, 0.34 cm/a according to the model, and some erosion may take place in the surface layer in recent year in P2 and P3 stations. The eroded sediments were about 4.8 and 7 cm respectively. And in P1 station the sedimentation rate calculated using the model is coincidence with the result using its maximum activity to 1963. This study indicate that in the coastal area when the sedimentation environment is steady a reliable result can be got using ^{137}Cs dating, and when the sedimentation environment was changed from sedimentation to erosion there is some limitations using ^{137}Cs maximum activity to get the sedimentation rate.

Key words ^{137}Cs ; Pui O Salt marsh; model; sedimentation rate