

^{210}Pb 测年法的数据处理问题*

康 兴 伦

(中国科学院海洋研究所)

^{210}Pb 是天然放射性铀系的一个子体成员,半衰期为22.3年,可用来测定冰川、积雪、湖泊及海洋沉积物的年龄和堆积速率。由于化学分析和物理测量方法的日臻成熟,它已成为最可靠的近百年左右的测年法。这对于沿海海洋工程的建设、海洋开发、海洋地质学和海洋生物学的研究有重大意义。

目前, ^{210}Pb 法常用两种方法(作图法和积分法)来计算测量结果。这两种方法始见于南极冰雪年龄的测定^[3]。现已普遍应用于海洋沉积速率的计算。然而,海洋沉积与冰雪累积的情况不尽相同。在海洋上,由于生物学、物理学和人类活动的作用^[1],使整个沉积岩心分为三层:上面是表面混合层、中层是放射性衰变带、底层是本底放射带。这种现象在南极的冰雪中则不多见。因此,将这两种方法用来处理海洋沉积问题,需从理论上进行推导之后方可采用,而这项工作尚未见有人做过。正是由于这个缘故,目前这两种方法在海洋学上使用混乱,不少作者概念不清,生搬硬套公式,导致错误的结论。本文将海洋沉积作为研究对象,对这两种计算方法进行严格的推导证明,特别在有表面混合层存在的情况下,提出可靠的处理方法。

一、理论推导**1. 作图法**

假定 ^{210}Pb 在沉积物中的初始浓度 N_0 不随时间而变化,则有:

$$N_i = N_0 e^{-\lambda t_i}$$

$$\lg N_i = \lg N_0 + \lg e^{-\lambda t_i}$$

$$\lg N_i = -\lambda t_i \lg e + \lg N_0$$

式中, N_i 为第*i*层沉积物中 ^{210}Pb 浓度;

λ 为 ^{210}Pb 衰变常数(0.03108/a);

t_i 为第*i*层沉积物之年龄。

如果沉积物的堆积速率也不随时间而变化,那么:

$$\lg N_i = -\lambda \frac{M}{R} \lg e + \lg N_0$$

(1)

式中, M 为质量深度 g/cm^2 (克/厘米²); R 为沉积物的堆积速率 $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{a}$ (克/厘米²·年); N_i 和 M 可通过测量而得到。根据实验结果,由最小二乘法拟合可得到图1中的曲线 C_1 。

由式(1)得知,曲线 C_1 的斜率等于 $-\frac{\lambda \lg e}{R}$,

因此 R 可以求出。

在假想的有表面混合层和无表面混合层存在的情况下 ^{210}Pb 含量随质量深度变化的分布图见图1。

在有表面混合层存在的情况下,则得到图1中的 C_2 。如果表面混合层的质量厚度 oh 是不随时间而变化的,那么每年在表面混合层和放射性衰变区的界面上将堆积一层沉积物,这层沉积物的 ^{210}Pb 浓度 N_0' 是不随时间而变化的,其堆积速率也应该等于 R (整个表面混合层可理解为混合均匀的一层水体)。曲线 C_2 的表达式是:

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第1173号。

1) 本文中提到的 ^{210}Pb 浓度皆指过剩 ^{210}Pb 浓度。

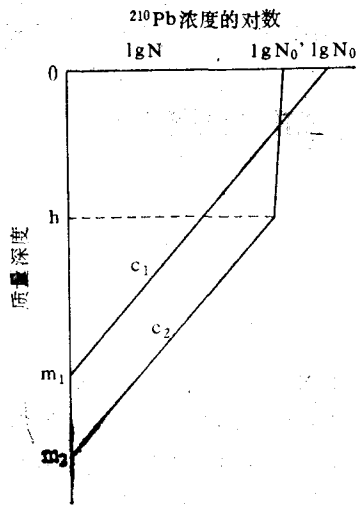


图1 ^{210}Pb 含量随质量深度变化的分布
Fig. 1 Change of ^{210}Pb content with mass depth

$$\lg N_1' = -\lambda \frac{M'}{R} \lg e + \lg N_0' \quad (2)$$

比较(1)式和(2)式中可以发现, 曲线 C_1 和 C_2 的斜率是相等的。因此, 尽管有表面混合层的干扰, 测得的曲线是 C_2 而不是 C_1 , 但由于二者的斜率相等, 仍然可以通过 C_2 求出堆积速率 R 。

2. 积分法

假定进入沉积物的 ^{210}Pb 沉积通量 F 不随时间而变化, 则有:

$$\begin{aligned} \Sigma N_i &= F \int_0^{t_i} e^{-\lambda t} dt \\ \Sigma N_i &= \frac{-F}{\lambda} e^{-\lambda t} \bigg|_0^{t_i} = \frac{-F e^{-\lambda t_i}}{\lambda} + \frac{F}{\lambda} = \frac{F}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (3) \end{aligned}$$

式中, ΣN_i 为从表层至与时间 t_i 相对应的第 i 层的 ^{210}Pb 总量。

由(3)式得到

$$F = \frac{\Sigma N_{\infty} \cdot \lambda}{1 - e^{-\lambda t_{\infty}}} \quad (4)$$

$$t \rightarrow \infty \quad e^{-\lambda t} \rightarrow 0$$

(4)式可改写为

$$F \approx \lambda \Sigma N_{\infty} \quad (5)$$

在实际上 ΣN_{∞} 可取到实测值为零止。

将(5)式代入(3)式得到

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{-1}{\lambda} \ln \left[1 - \frac{\lambda \Sigma N_1}{\lambda \Sigma N_{\infty}} \right] \\ &= \frac{-1}{\lambda} \ln \left[1 - \frac{\Sigma N_1}{\Sigma N_{\infty}} \right] \quad (6) \end{aligned}$$

如果沉积物的堆积速率不随时间而变化, 则有

$$\frac{M}{R} = \frac{-1}{\lambda} \ln \left[1 - \frac{\Sigma N_1}{\Sigma N_{\infty}} \right] \quad (7)$$

在有表面混合层存在的情况下, 正如前述, 则得到曲线 C_2 , 相应地质量沉积深度由 om_1 变为 om_2 。混合的结果并不能改变沉积速率, 因此, om_2 仅是表观沉积深度, 并不是真实沉积深度, 真实沉积深度仍然是 om_1 。由于混合的结果, ^{210}Pb 总是由上层往下层输送, 致使下层的 ^{210}Pb 浓度偏高, 从而, 表观深度总是大于真实深度。如果将表观深度代入(7)式, 则得到表观堆积速率 R' , 显然, $R' > R$ 。

前面已经提到, 如果表面混合层的厚度不随时间而变化, 表面混合层以下可以看作是一个新的沉积岩心, 这个新沉积岩心的堆积速率应该等于真实堆积速率 R 。(7)式相应地变为

$$\frac{M - oh}{R} = \frac{-1}{\lambda} \ln \left[1 - \frac{\Sigma N_1'}{\Sigma N_{\infty}'} \right] \quad (8)$$

式中, oh 为表面混合层质量厚度, $\Sigma N_1'$ 和 $\Sigma N_{\infty}'$ 都应从表面混合层以下开始加合。由

(8)式的推导过程可知, 根据(8)式求出的 R 是真实堆积速率, 它不受表观深度的影响。

3. 逐步逼近法

根据定义, 沉积通量除以堆积速率应该等

于初始浓度, 即

$$N_0 = \frac{F}{R} \quad (9)$$

用作图法或根据 (8) 式求出 R , 根据 (5) 式求出 F , 将 F 和 R 代入 (9) 式, 求出 N_0 。在图 1 的横坐标轴上找出 $\lg N_0$ 点, 从该点作平行线平行于曲线 C_2 , 应该得到无混合层存在的曲线 C_1 。对照曲线 C_1 和 C_2 , 可得到真实沉积深度。将真实沉积深度代入 (7) 式, 可求出真实堆积速率 R 。

二、讨 论

1. 不少学者把作图法称做恒初始浓度法 (Constant initial concentration, 简称为 C. I. C.), 把积分法称做恒供给速度法 (Constant rate of supply, 简称为 C. R. S.)^(2,4)。其实, 这种提法并不严格。因为 ^{210}Pb 法的主要目的是用来测量堆积速率, 用这两种方法计算堆积速率时, 都要求堆积速率 R 不随时间变化。根据 (9) 式 $N_0 = \frac{F}{R}$,

只要 F 恒定, N_0 即恒定; 反之, 只要 N_0 恒定, F 也是恒定的。因此, 使用这两种方法计算堆积速率时, 所要求的边界条件是相同的, 即沉积物的堆积速率、 ^{210}Pb 的沉积通量和在沉积物中的初始浓度都不随时间而变化。即使不是用来测量堆积速率, 不提堆积速率恒定这一边界条件, 只要沉积通量 F 是恒定的, 也很容易联想到这一海区的堆积速率 R 可能也是恒定的。难以设想, 一个海区的沉积通量 F 恒定, 而堆积速率 R 是变动的。

Madsen⁽²⁾ 曾研究了西波恩霍尔姆海盆的堆积速率问题。在该海区的沉积物的上层 5cm 以内, ^{210}Pb 的浓度取对数后与质量深度之间没有线性关系, 他认为这是生物搅拌引起的。Madsen 在计算 5cm 以内的表面混合层的堆积速率时用积分法, 5cm 以下用作图法。显然这是错误的。混合的结果 ^{210}Pb 总是由上层往下层输送, 上层的 ^{210}Pb 浓度降低, 下层的升高, 致使测量结果 ΣN_1 小于理论计算值

$$F \int_0^{t_1} e^{-\lambda t} dt$$

即

$$\Sigma N_1 < F \int_0^{t_1} e^{-\lambda t} dt$$

特别在表面混合层内, 这种情况尤为严重。因此用积分法计算表面混合层内的堆积速率属概念上的错误。P. P. Madsen 又分别用积分法和作图法计算了沉积岩心不同层段的年龄。所采用的公式是作图法中的 $\lg N_1 = -\lambda t_1 \lg e + \lg N_0$ 和积分法中的

$$t_1 = \frac{-1}{\lambda} \ln \left[1 - \frac{\Sigma N_1}{\Sigma N_\infty} \right]$$

公式 (6) 来自 $\Sigma N_1 = F \int_0^{t_1} e^{-\lambda t} dt$, 前面已指出, 由于混合作用, 该等式在上层已不存在, 所以继续运用 (6) 式来计算沉积年龄 t_1 是错误的。同样由于混合的缘故, N_1 与 t_1 已失去对应关系, N_0 在这里也是一个未知数, 用表层 ^{210}Pb 的浓度来代替 N_0 是不合适的, 它一般低于 N_0 。因此, 作图法中的公式 $\lg N_1 = -\lambda t_1 \lg e + \lg N_0$ 在这里也是不可用的, 类似的计算错误也出现在其它文献中^(4,5)。

2. 在存在表面混合层的情况下, 不管是作图法还是积分法, 都仅能应用放射性衰变区的数据, 表面混合层内的数据弃而不用, 这是方法上的大缺陷。特别值得提出的是, 表面混合层内的 ^{210}Pb 含量高, 分析误差小, 数据可靠。而混合层以下的情况刚好相反, 在这里 ^{210}Pb 含量逐渐降低, 分析误差随之扩大。在那些表面混合层厚、放射性衰变带薄的海区, 只有少数几个数据能用, 它们很难反映实际情况, 势必影响到计算结果的精度, 方法上的缺点在这里表现得尤为突出。

另一方面, 表面混合层与放射性衰变带之间并没有明确的界限, 需要人为的判断 (见图 2)⁽¹⁾。前面已经讲过, 只有放射性衰变区才能使用 (8) 式, 表面混合层内的数据不能引用 (8) 式, 否则将带来误差。对于作图法来

说,也存在这个问题,只有放射性衰变区才存在曲线 C_2 ,如果表面混合层内的数据也参加回归,势必影响曲线的斜率。因此,判断表面混合层与放射性衰变带的界限必需持慎重态度,否则将带来人为的误差。这是作图法和积分法的又一缺陷。

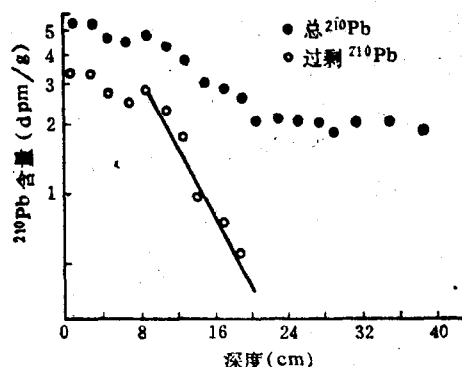


图2 ^{210}Pb 含量随深度的分布

Fig. 2 Change of ^{210}Pb Content with depth

采样地点: 丁字湾三角洲外缘 ($36^{\circ}30.0'\text{N}$, $121^{\circ}14.9'\text{E}$)。采样时间: 1981年9月。

3. 从 ^{210}Pb 的深度分布图可看出一个岩心的沉积作用过程的基本概况。水文条件、生物活动、人类活动和地质事件的影响都能在图上反映出来。所以首先根据测量结果作图是必要的。

用积分法可以求出 F 。从推导过程可以看出, 这样求出的 F 不受表面混合层的影响。这是该方法最大的优点。

4. 逐步逼近法实际上是作图法和积分法的综合形式, 它具备两种方法的优点, 而避开了某些不足。

由图1不难看出, N_0 应该大于 N_0' , C_1 曲线应在 C_2 的上面。如果用(9)式求的 N_0 和进一步得到的 C_1 不是这种情况, 那么, 用作图法或(8)式求出的 R 必然是错误的, 这首先就是对作图法和积分法的一种检验。

用这种方法得到了真实沉积深度, 避免了表观深度的干扰。由(7)式可以看出, 在这里所有测量结果都得到了应用, 因此, 该方法的基础雄厚, 最后得到的结论是可靠的。特别

在那些沉积速率低、表面混合层厚的海区, 该法将显示出它的优越性。

当然, 这种方法比较麻烦, 需要处理的数据较多, 但随着电子计算机的普及, 这样的问题将逐步得到解决。

5. 我国的许多冰川每年都有融化的现象, 融化的水往下渗透, 这给 ^{210}Pb 法测年带来了困难。但如果每年的融化厚度和渗透深度都基本保持恒定, 作者仍然认为这样的冰川是可以用 ^{210}Pb 法测年的。冰川融化, 使上层水体混合。这种混合很象本文反复叙述的沉积物表面混合层。在冰川的混合层内, ^{210}Pb 浓度随深度不呈指数变化。但一旦超越混合层, ^{210}Pb 浓度取对数后与深度之间仍会有线性关系, 所以用 ^{210}Pb 法测我国冰川年龄是可能的。冰川的混合层主要受历年气候变化的影响, 而海洋沉积物的表面混合层是生物学、水文物理、人类活动等诸因素促成的, 二者相比, 气候变化更有规律性。相应地, 冰川混合层比沉积物混合层的变化规律更强, 也就是说, 用 ^{210}Pb 法测冰川的年龄还要更容易一些。

参考文献

- [1] 康兴伦等, 1985. ^{210}Pb 法在测定沉积速率中的应用. 海洋科学, 9(1): 38—42页。
- [2] Madsen, P.P., 1979. Validation of the Pb-210 dating method. *J. of radioanalytical chemistry* 54 (1-2): 39—48.
- [3] Crozaz, G., E. Picciotto, 1964. Antarctic snow chronology with Pb-210. *J. of Geophysical Research*. 69(12): 2597.
- [4] Oldfield, F., P. G. Appleby, 1978. Alternative Pb-210 dating: results from the New Guinea Highlands and Lough Erne. *Nature*, 271(5643): 339.
- [5] Robbins, J.A., D. N. Edgington, 1975. Determination of recent sedimentation rates in lake Michigan using Pb-210 and Cs-137. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39 (3): 285.

ON THE DATA TREATMENT OF ^{210}Pb DATING METHOD

Kang Xinglun

(Institute of Oceanology, Academia Sinica)

Abstract

The graph and integration method usually are used to treat data about ^{210}Pb dating today. There is a surface mixing layer in the surface of marine sediment. A strict mathematical deduction is conducted concerning how to use the two methods under the existence of the surface mixing layer in this article, limitations of the methods is shown here. The author advances a progressive approach, which can avoid some defects of aforementioned two methods and especially is suitable for areas where the surface mixing layer is thick and the sediment rate is slow.