

^{210}Pb 沉积速率测定法在浅水动力环境中的应用*

陈卫跃 沈健

(华东师范大学河口海岸研究所, 上海)

D. Eisma G. W. Berger

(荷兰国家海洋研究所)

提要 本文根据瓦登海 (Waddensea) 潮滩沉积物 ^{210}Pb 强度的测定和有关实验, 讨论了 ^{210}Pb 沉积速率测定法在浅水动力环境中应用所存在的一些问题和原因; 提出了 ^{210}Pb “转换时间”和“沉降时间”概念; 分析了泥沙运动与沉积物 ^{210}Pb 强度的关系并依据粒度指标对某些不规则 ^{210}Pb 剖面进行修正; 发现 Jade 湾潮滩现代沉积速度为 $0.16-0.29\text{cm/a}$, Greetsiel 为 0.16cm/a , Afsluitdijk 大坝附近达 6.0cm/a , 反映了大坝工程改变动力环境后出现的聚淤现象。

^{210}Pb 技术已经有效地用于动力较稳定环境中的现代沉积速率的测定, 如大陆架、湖泊以及盐沼带等等, 然而, 由于受波浪、潮流的作用以及人为因素的影响, 近岸浅水环境如潮滩、河口区的沉积过程十分复杂, 给 ^{210}Pb 技术的应用带来很大困难。为究其原因, 本文测定了瓦登海潮滩的 24 个箱式样品并进行了有关实验, 分析了沉积物过剩 ^{210}Pb 含量的影响因素以及泥沙吸附 ^{210}Pb 的机率。

一、区域概况与研究方法

瓦登海是一个障壁岛环绕的浅海, 平均潮差 1.34m 。由于障壁岛的保护作用, 潮滩广为发育, 但所处的部位不同, 沉积过程也不一样, 在摆荡性小潮沟的两侧, 往往出现侧向沉积; 而在大潮沟底部或摆荡性潮沟影响弱的潮滩上部, 则以垂向沉积为特征。由于“沉积滞后”和“冲刷滞后”效应, 高潮滩沉积物较细, 低潮滩沉积物较粗。

^{210}Pb 强度测定是通过测定从沉积物中释放出来的 ^{210}Pb 的中间子体—— ^{210}Po α 粒子的能量完成的。沉积物样品首先烘干称重, 得到 $1-4\text{g}$ 干样, 加入适量 ^{209}Po 示踪剂后, 再经过加酸处理, 最后把过滤溶液中的同位素电解在薄银片表面, 以 α 谱仪进行放射强度测定。

二、结果与讨论

1. ^{210}Pb 剖面特征

* J. Kalf 先生和 J.V. Ieperen 女士协助实验分析, 荷兰国家教育科学部资助财政, 谨此志谢。

收稿日期: 1987 年 3 月 31 日。

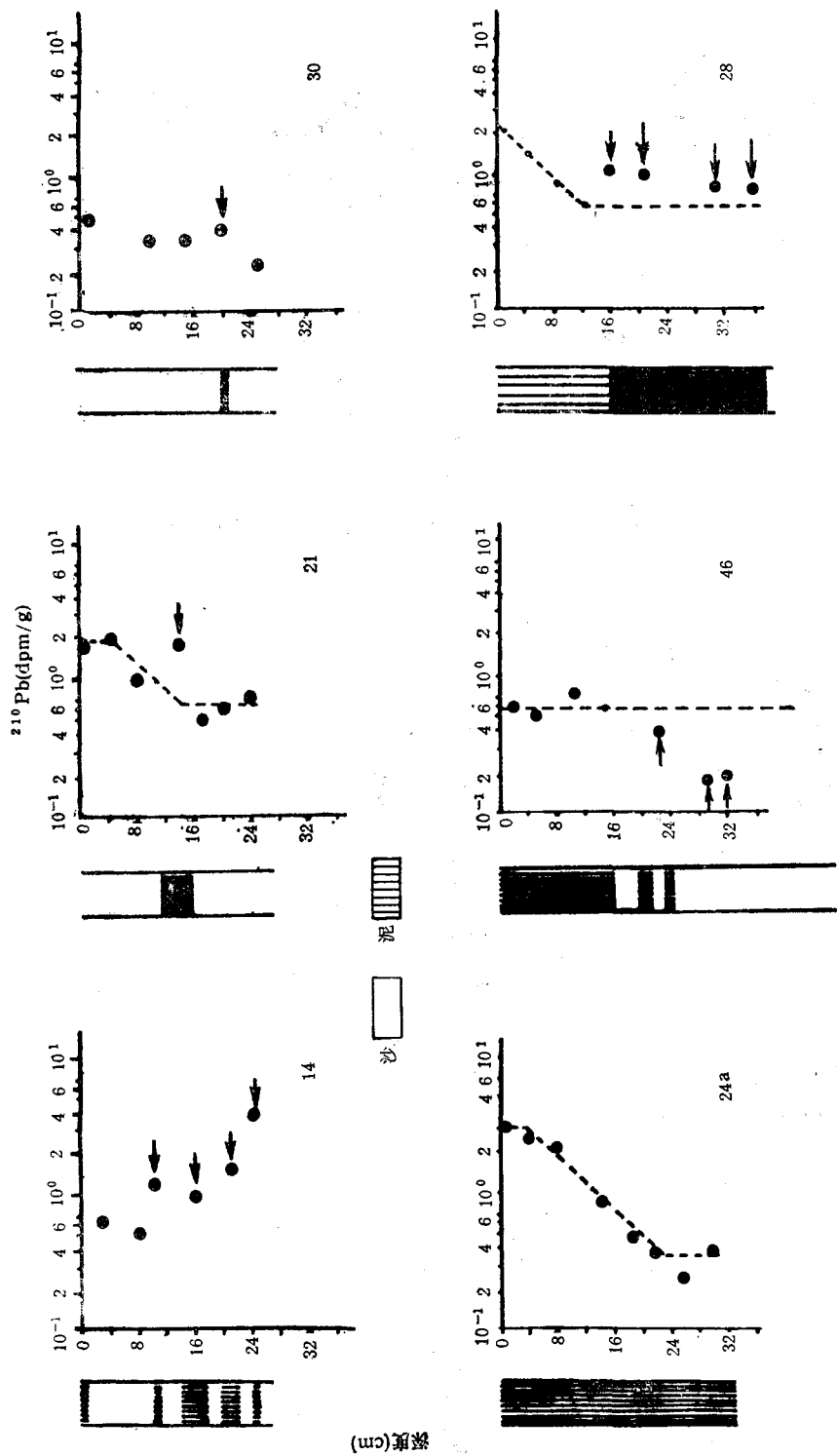


图 1 典型的 ^{210}Pb 剖面 and ^{210}Pb 强度与沉积物的关系
 Fig. 1 Typical ^{210}Pb profiles and the relation between ^{210}Pb activity and sediments

图 1 所示 ^{210}Pb 剖面呈三种类型: 第一类, 在表面混合层以下, ^{210}Pb 强度随深度呈指数递减, 这类样品大多取自沉积稳定的高潮滩和大潮沟底部, 可直接利用 ^{210}Pb 剖面进行沉积速率计算。第二类, 虽然 ^{210}Pb 强度较高, 但上下层强度均一, 甚至出现上层低、下层高的倒置剖面; 这类剖面大多出现在侧向沉积较强的低潮滩和中潮滩下部, 在利用 ^{210}Pb 剖面确定沉积速率之前, 必须对 ^{210}Pb 剖面进行校正。第三类出现在动力作用强的沙质潮滩, 上、下层 ^{210}Pb 强度都很低, 为 $0.15\text{--}0.75\text{dpm/g}$, 由于 ^{210}Pb 强度接近背景值, 无法进行沉积速率的计算。

2. 泥沙运动与沉积物 ^{210}Pb 强度的关系

沉积物中的 ^{210}Pb 由背景值和过剩值两部分组成, 后者为沉积物在其运动过程中吸附的 ^{210}Pb 值。泥沙从水体中吸附 ^{210}Pb , 随着泥沙的沉积, ^{210}Pb 也停积在沉积层中, 如果沉积层中过剩 ^{210}Pb 不出现迁移变化, 那么, 可以通过测定不同层次沉积物中的过剩 ^{210}Pb 来确定各层形成的年代差, 从而计算出沉积速率, 这就是 ^{210}Pb 现代沉积速率测定法的基础。

在大陆架、湖泊等相对稳定的沉积环境中, 沉积过程较为连续, 上、下各层沉积物组成较均一, 因此, ^{210}Pb 剖面往往呈理想的指数形态。然而, 在波浪、潮流作用频繁的海岸地带, 泥沙运动频繁, 沉积物往往经过悬移、沉积、再悬移、再沉积的复杂运动过程。与此相适应, 沉积物对 ^{210}Pb 的吸附过程往往也很复杂, 因此, 对泥沙运动与泥沙吸附 ^{210}Pb 的关系进行评估是十分重要的。

假设近岸水体中溶解性 ^{210}Pb 的损失完全是由泥沙吸附所引起的, 而水体中 ^{226}Ra 都是由泥沙所挟带, 海水本身挟带 ^{226}Pa 的量可以忽略不计; 那么:

$$\frac{dN_{\omega}}{dt} = I - KN_{\omega} - U_{\omega}N_{\omega} \quad (1)$$

$$\frac{dN_s}{dt} = U_{\omega}N_{\omega} - U_sN_s - KN_s + P \quad (2)$$

其中, I 为 ^{210}Pb 进入水体的速率 [$\text{dpm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$]; P 为水体中由 ^{226}Ra 衰变产生 ^{210}Pb 的速率 [$\text{dpm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$]; K 为 ^{210}Pb 自然衰变常数 ($0.0311/\text{a}$); N_s, N_{ω} 分别表示水体中泥沙所挟带的 ^{210}Pb 量和海水中溶解性 ^{210}Pb 量 (dpm/cm^2), 二者之和即为水体所含 ^{210}Pb 的总量 (N); U_s, U_{ω} ($1/\text{a}$) 分别为 ^{210}Pb 的垂向转换常数和泥沙吸附溶解性 ^{210}Pb 的吸附常数, 它们的倒数 ($1/U_s, 1/U_{\omega}$) 定义为 ^{210}Pb 的“沉降时间”(t_s)和“转换时间”(t_{ω})。

在稳定状态下:

$$\frac{dN_{\omega}}{dt} = 0, \quad \frac{dN_s}{dt} = 0$$

由方程式(1),(2)得:

$$t_{\omega} = 1/U_{\omega} = \frac{N_{\omega}}{(I - KN_{\omega})} \quad (3)$$

$$t_s = 1/U_s = \frac{N_s}{(U_{\omega}N_{\omega} - KN_s + P)} \quad (4)$$

水体中 ^{210}Pb 来自大气降水、陆地径流和水体中 ^{226}Ra 的衰变, 而大气降水则是最主要的来源。据英国 Milford Haven 站的观测, 每年从大气降落到水体的 ^{210}Pb 为 0.51 dpm/

cm^2 , 荷兰瓦登海区域同上述观测站降水量相近, 取 I 为 $0.51\text{dpm}/\text{cm}^2$ 。瓦登海取样分析表明, 泥沙挟带的 ^{210}Po 值为 $0.32\text{dpm}/\text{L}$, 溶解性 ^{210}Pb 为 $0.015\text{dpm}/\text{L}$, ^{210}Pb 和 ^{210}Po 之间已经达到平衡, 活度比为 1; 取瓦登海潮滩带平均水深 2m , 以此可以推得 $N = 0.067\text{dpm}/\text{cm}^2$, $N_w = 0.003\text{dpm}/\text{cm}^2$, $N_s = 0.064\text{dpm}/\text{cm}^2$ 。在此还缺少 P 的观测值, 但 P 与 I 相比很小, 在印度 Bombay 的 Tansa, Tulsi 和 Powai 湖, P 比 I 小二个数量级^[1]; 在美国的 Bikini Atoll 海洋站也存在这种情况^[3], 为此, 取 $P = 0.005\text{dpm}/\text{cm}^2$ 。

由(3),(4)式可求得 ^{210}Pb 的“转换时间”和“沉降时间”:

$$t_w = 0.003 \times 365 / (0.51 - 0.0311 \times 0.003) = 2.15\text{d}$$

$$t_s = 0.064 \times 365 / (170 \times 0.003 - 0.0311 \times 0.064 + 0.005) = 45.5\text{d}$$

$U_s(1/t_s)$ 是理想条件下 ^{210}Pb 沉降速率的估计值, 在瓦登海潮滩带, 由于泥沙的频繁运动, 水体中的 ^{210}Pb 平均 45.5d 更新一次。如果不考虑泥沙运动所引起的 ^{210}Pb 的再分配, 那么, 平均每天沉降到每平方厘米沉积物表面的 ^{210}Pb 量为 $1.4 \times 10^{-3}\text{dpm}$, 显然, 此值相当之小。然而, 由于泥沙运动, 使各个区域 ^{210}Pb 的沉降量差异很大, 在细颗粒悬移泥沙聚集的区域, ^{210}Pb 含量很高, 而在波浪、潮流作用很强、细颗粒悬沙很难沉积的区域, ^{210}Pb 的沉降量又可能极小。

“转换常数” $U_w(1/t_w)$ 可以用来估计泥沙吸附溶解 ^{210}Pb 的平均速率。在瓦登海潮滩带, 泥沙平均每天从每平方厘米柱状水体中吸取 0.001dpm 的 ^{210}Pb , 泥沙悬浮时间越长, 所吸附的 ^{210}Pb 越多。假设平均含沙量为 $50\text{mg}/\text{L}$, 那么, 每 g 悬沙吸附 1dpm ^{210}Pb 所需的时间为 7.158d 。对某一特定浅水地带而言, 动力环境的变化会影响泥沙悬浮的时间, 从而使沉积样品的 ^{210}Pb 剖面很不规则。

上述估计值代表了全年的平均状况, 实际上, 由于降水量的季节性变化, 大气进入水体的 ^{210}Pb 量也有季节性变化, 在雨季, 水体中溶解 ^{210}Pb 含量高, 悬沙可以在较短的时间内吸附大量的 ^{210}Pb ; 而在干季, 溶解 ^{210}Pb 含量低, 悬沙吸附 ^{210}Pb 较困难。由此可见, 降水量季节分配不均越明显, 水体中 ^{210}Pb 含量的变化也就越大, ^{210}Pb 剖面也就可能越复杂。

3. 泥沙吸附 ^{210}Pb 的机率与能力

泥沙颗粒大小对吸附能力的影响主要表现在两个方面: 一是不同粒径泥沙吸附 ^{210}Pb 的能力不同, 二为泥沙运动形式不同导致吸附 ^{210}Pb 机率的差异。

充分混合条件下的试验表明, 泥沙吸附 ^{210}Pb 的量同单位重量泥沙的表面积成正比; 在相同条件下, 单位重量泥沙的表面积越大, 吸附的 ^{210}Pb 越多, 反之亦然(图 2)。由于 ^{210}Pb 与 ^{210}Po 的化学性质类似, 所以泥沙对 ^{210}Pb 的吸附也应具有类似的特性。

由于悬沙对 ^{210}Pb 的“过滤”作用, 推移质吸附溶解 ^{210}Pb 的机率比悬移质小得多。实验表明, 泥沙可以在半小时之内吸附水体所含溶解 ^{210}Pb 的一半。根据文献[2]所测资料和文献[4]提出的计算公式 $t = 270h/U_m$ (其中 h 为水深, U_m 为最大水深平均流速), 算得瓦登海潮滩垂直混合时间约 0.7h ; 假如瓦登海悬沙吸附能力同实验相同, 那么, 推移质吸附水体所含溶解 ^{210}Pb 的机率不及悬沙的一半。

三、 ^{210}Pb 剖面的校正与现代沉积速率的计算

综上所述, 在近岸浅水动力环境中, 复杂的泥沙运动, 以及不同粒径泥沙吸附 ^{210}Pb 能

力的差异,使单位时间内进入单位面积沉积层表面的 ^{210}Pb 量存在时间与空间上的差异,一般而言,悬沙比底沙、细颗粒比粗颗粒更易吸附 ^{210}Pb ,吸附量的多少同泥沙悬移的时间成正比。在一定动力条件下,泥沙运动的形式和悬移的时间取决于泥沙的粒径,现场和实验资料都表明,泥沙粒径同表层沉积物 ^{210}Pb 强度成反比(图 3,4)。在瓦登海潮滩,当泥沙

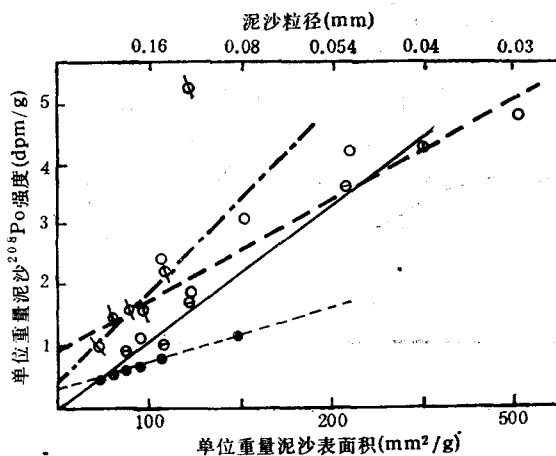


图 2 不同条件吸附试验中 ^{210}Po 强度与单位重量泥沙表面积 (s) 的关系

Fig. 2 Relation between ^{210}Po activity and surface area (s) per unit weight of sediment particle in adsorption experiments in different conditions

平均粒径大于 0.1mm 时,沉积物 ^{210}Pb 强度接近背景值,无法计算沉积速率,如第三类样品。第一、二类 ^{210}Pb 剖面也不同程度地受到粒径的影响,有必要利用粒径指标进行修正。

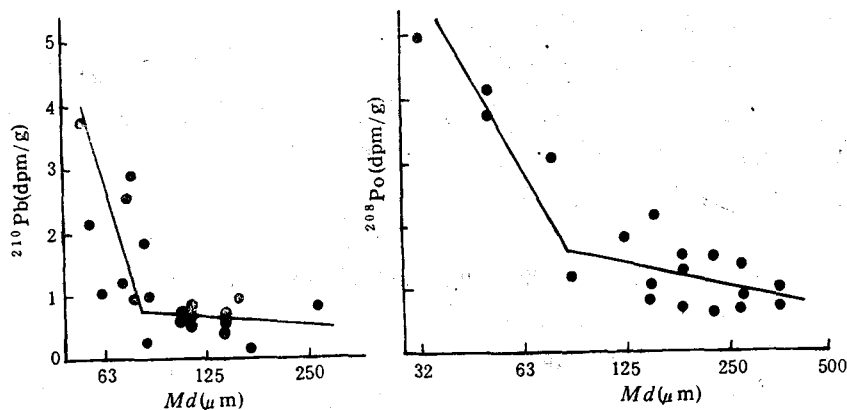


图 3 瓦登海潮滩表层沉积物 ^{210}Pb 强度与中值粒径的关系

Fig. 3 Relation between ^{210}Pb activity and the median grain size from the top bottom sediment samples in the Dutch-German Waddensea tidal flat

图 4 吸附试验中 ^{210}Po 强度与泥沙粒径的关系

Fig. 4 Relation between ^{210}Po activity and sediment particle size in adsorption experiment

但 ^{210}Pb 与粒度之间的定量关系有待进一步研究,对 ^{210}Pb 剖面进行精确校正仍然困难,目前只能对某些特殊情况,如样品剖面可以分成某些质地较一致的层次(样品 28)或 ^{210}Pb 剖面之中只有少数异常点(样品 21),采取删除“异常点”或选择质地相似的沉积层计算沉积速率的方法予以解决。

按照上述原则对瓦登海潮滩带 11 个样品的 ^{210}Pb 剖面进行了修正,并利用 c·i·c 方法(假定沉积物柱状体中任何一层中每单位干重泥沙中 ^{210}Pb 过剩值的初始浓度为常数)计算了沉积速率(表 1)。由此可见, Jade 湾潮滩带平均沉积速率约 0.23cm/a,与 Wilhelmshaven 潮汐站在 1860—1950 年期间观测到的海平面上升值(0.24cm/a)相近,其中 Jade 湾西北部的沉积速率高于南部,潮滩上部的沉积速率又大于潮滩下部;Greetsiel 附近平均淤积率为 0.16cm/a;Vlieter 附近淤积很快,每年淤高 6cm 左右,反映了 Afsluitdijk 大坝修筑后的快速淤积过程。

表 1 瓦登海潮滩 ^{210}Pb 现代沉积速率

Tab. 1 Modern ^{210}Pb depositional rates in the Dutch-German Waddensea tidal flats

地点	Vlieter	Jade Bay						Greetsiel		
样品号	3	24a	24b	25	27	28	29	50	51	21
沉积速率 (cm/a)	6	0.18	0.27	0.26	0.17	0.13	0.23	0.12	0.36	0.14

四、结 语

1. 在浅水动力环境中,表层沉积物 ^{210}Pb 剖面形态较为复杂。如下三个因素影响沉积物 ^{210}Pb 的初始值: 1) 单位时间内从大气降落到水体的 ^{210}Pb 量; 2) 泥沙运动的形式以及泥沙悬浮的时间; 3) 沉积物的粒径。

一般而言,大气降落到水体的 ^{210}Pb 量越大,泥沙所能吸附的 ^{210}Pb 值越多,沉积物 ^{210}Pb 的初始值越高;泥沙悬浮时间越长,吸附 ^{210}Pb 的机会越多;泥沙颗粒越细,吸附能力越强;沉积环境较稳定,物质组成越均一, ^{210}Pb 剖面也就越规则。在浅水动力环境中,应用 ^{210}Pb 技术确定沉积速率,必须考虑沉积剖面结构,并进行必要的修正和检验,否则,有可能得出错误的结论。

2. Jade 湾潮滩带现代沉积速率为 0.23cm/a, Greetsiel 附近潮滩每年淤高 0.16cm, Afsluitdijk 大坝附近为 6cm/a。

3. ^{210}Pb 的“转换时间”和“沉降时间”概念反映了泥沙吸附溶解 ^{210}Pb 的速率以及由于泥沙沉降引起的 ^{210}Pb 的沉降速率,经过计算得到瓦登海潮滩带 ^{210}Pb 的转换时间为 2.15d,沉降时间为 45.50d。这表明,瓦登海潮滩带水体中的 ^{210}Pb 平均每 45.50 天更新一次。

参 考 文 献

- [1] Krishnaswami, S., 1978. Radionuclide limnology. In *Lakes Chemistry Geology Physics*, ed by A. Lerman Springer-Verlag, pp. 153—173.

- [2] Postma, H., 1961. Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea. *Neth. Jour. Sea Res.* 1(1,2): 148—190.
- [3] Schell, W. R., 1977. Concentrations Physico-chemical states and mean residence time of ^{210}Pb in marine and estuarine waters. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 41: 1019—1031.
- [4] Uncles, R. J. & I. R. Joint, 1982. Vertical mixing and its effects on phytoplankton growth in a turbid estuary. *Canad. Jour. Fish. Aquat. Sci.* 40: 221—228.

APPLICATION OF ^{210}Pb -METHOD TO SHALLOW WATER ENVIRONMENTS

Chen Weiyue Shen Jian

(*Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai*)

D. Eisma and G. W. Berger

(*Netherlands Institute for Sea Research*)

ABSTRACT

^{210}Pb activity was measured in tidal flat sediments from the Waddensea. Some problems in application of ^{210}Pb dating to shallow water environments are discussed. The “transfer time” and “settling time” of ^{210}Pb are derived to analyse the relationships between sediment movements and ^{210}Pb activities in the sediment. Factors influencing the initial ^{210}Pb activities are: 1. the input amount of ^{210}Pb per unit time from the atmosphere into the waters; 2. the pattern of the sediment movement and the time during which particles are suspended in the waters; 3. the grain size of sediment.

The ^{210}Pb profiles are examined according to the relationship between ^{210}Pb activity and the sediment texture. The recent sedimentation rates were found to be 0.16—0.29 cm/a in the tidal flats of Jade Bay, 0.16 cm/a in the tidal flats near Greetsiel, W. German and 6.0 cm/a near Afsluitdijk, the Netherlands. The recent sediment accumulation in the tidal flats of Jade Bay keeps pace with the sea level rise.