

大洋多金属结核、结壳的生长

一、引言

- 1、地质年代学的主要任务：将地球历史按照一系列持续时间已知的事件加以分期，而地质年代的所有定量测定均是建立在放射性现象的基础上。
- 2、原则上任何一种放射性核素，只要决定它衰变速率的半衰期的长短适宜，都可用作放射性地质年代的测定。
- 3、铀钍系测年法填补了 ^{14}C 测年法和 K-Ar 测年法的时间空白。

二、方法依据

未受干扰的天然含铀物质，衰变系中的母、子体核素间可建立久期平衡状况。然而，沉积物形成时发生的各种地球化学过程能引起元素间和同位素间的分馏，并导致母、子体核素间的不平衡。如果处于不平衡状态的沉积物一旦形成，随后不生成岩变化或其他的迁移机制，那么原则上可根据放射性核素重建久期平衡状态的程度来测定初始沉积事件的年代。

三、分类

1、子体过剩法：

最初样品形成时子体核素相对于母体核素过剩，通过测定过剩量的衰变测定样品的年龄。8种

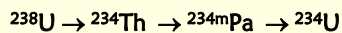
2、子体亏损法：

与子体分离的母体核素独自沉积，或者沉积时子体亏损的程度已知，经过一段时间后，即可根据子体增长，并与母体重建平衡的程度来确定沉积年代。3种

第1部分 基于子体过剩的测年法

一、 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 测年法

1. 原理:



已证明海水中 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ _{A.R.}变化较小, 平均约1.14。当铀从海水中分离出来后, 初始过剩 ^{234}U 以其 $2.48 \times 10^5 \text{a}$ 的半衰期衰变为 ^{230}Th , 直到 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ _{A.R.}=1。 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ _{A.R.}测年法即基于此测年。

2. 条件:

- (1) 则沉积的沉积物其初始 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ _{A.R.}已知, 且不随时间变化。
- (2) 封闭系统假设: 样品形成后不发生 ^{234}U 、 ^{238}U 及其子体的损失和加入, 沉积物内不发生铀的迁移。
- (3) 样品中所含的陆源碎屑很少, 可忽略, 或其数量已知。

3. 测年公式及其推导:

沉积物形成后任一时间 t 时刻 ^{234}U 的放射性活度为:

$$^{234}\text{U}_A = ^{234}\text{U}_{A5} + ^{234}\text{U}_{AX} \quad (1)$$

其中: $^{234}\text{U}_A$ 为单位重量样品中 ^{234}U 的活度浓度;
 $^{234}\text{U}_{A5}$ 代表与 ^{238}U 达到放射性平衡的 ^{234}U 活度浓度;
 $^{234}\text{U}_{AX}$ 为单位重量样品中过剩的 ^{234}U 活度浓度。

$^{234}\text{U}_{AX}$ 放射性比度随时间的变化可用下式表示:

$$^{234}\text{U}_{AX} = ^{234}\text{U}_{AX}^0 \cdot \exp(-\lambda_{234} \cdot t) \quad (2)$$

其中 $^{234}\text{U}_{AX}^0$ 为 $t=0$ 时, 过剩 ^{234}U 的初始比活度, 可表示为:

$$^{234}\text{U}_{AX}^0 = ^{234}\text{U}_A^0 - ^{234}\text{U}_{A5} \quad (3)$$

其中 $^{234}\text{U}_A^0$ 为 $t=0$ 时 ^{234}U 的放射性比度;

因为: $^{234}\text{U}_{A5} = ^{238}\text{U}_A$ (4)

联立(1)、(2)、(3)、(4)式得:

$$^{234}\text{U}_A = ^{238}\text{U}_A + (^{234}\text{U}_A^0 - ^{238}\text{U}_A) \cdot \exp(-\lambda_{234} \cdot t)$$

两边除以 $^{238}\text{U}_A$:

$$\frac{^{234}\text{U}/^{238}\text{U}}{\text{A.R.}} = 1 + \frac{(^{234}\text{U}_A^0 - ^{238}\text{U}_A)}{^{238}\text{U}_A} \cdot \exp(-\lambda_{234} \cdot t)$$

令 $\frac{^{234}\text{U}/^{238}\text{U}}{\text{A.R.}} = r_0$, 则:

$$\frac{^{234}\text{U}/^{238}\text{U}}{\text{A.R.}} = 1 + (r_0 - 1) \cdot \exp(-\lambda_{234} \cdot t)$$

其中 r_0 为样品初始的 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ _{A.R.}

4. 应用:

测年范围: $5 \times 10^4 \text{a} \sim 10^6 \text{a}$

- (1) 已成功地用于测定变质珊瑚化石的年代 (Thurber等, 1965; Veeh, 1966);
- (2) 用于测定沉降于海洋与非海洋环境中 CaCO_3 的年龄 (Thompson等, 1975; Harman等, 1975)
- (3) 远洋沉积物的沉积速率 (Ku等, 1965)。

二、 ^{230}Th 过剩测年法

1、原理：

海洋中Th与U的地球化学行为有很大差别：钍是水溶性核素，它在大洋中的平均停留时间约为50000年。铀是颗粒活性核素，它在大洋水体中的平均停留时间近几十~几百年。当海水中的 ^{234}U 衰变产生 ^{230}Th 后， ^{230}Th 就被吸附到颗粒物上，并随颗粒物进入到海底沉积物中，由此导致沉积物中 ^{230}Th 相对于 ^{234}U 的过剩，根据过剩 ^{230}Th 放射性衰变的剩余量，即可进行年代的测定。

2、条件：

- (1) 继承性假设：海洋水柱中 ^{230}Th 、 ^{234}U 含量在 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ 测年法的测年范围内基本恒定。
- (2) 封闭系统假设：沉积柱内未发生 ^{230}Th 迁移。
- (3) ^{230}Th 由海水向沉积物中的沉积速率基本恒定。
- (4) 沉积物在岩心中的层位遵循正常的沉积过程。

海底火山、构造运动和由此引起的浊流、滑坡等，有可能会破坏沉积的“正常”过程，造成上层年龄比下层更老的现象。

3、测年公式和推导：

岩心某深度 x (cm) 处的沉积速率 S (cm/单位时间) 和沉积年代 t 之间的关系为：

$$S = x/t$$

而： $^{230}\text{Th}_{\text{ex}} = ^{230}\text{Th}_{\text{ex}}^0 \cdot \exp(-\lambda_{230} \cdot t) = ^{230}\text{Th}_{\text{ex}}^0 \cdot \exp(-\lambda_{230} \cdot x/S)$

其中： $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ 、 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}^0$ 分别为 t 、0 时刻过剩 ^{230}Th 的比活度；

$$^{230}\text{Th}_{\text{ex}} = ^{230}\text{Th}_m - ^{234}\text{U}_m$$

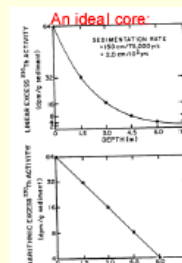
$$\ln ^{230}\text{Th}_{\text{ex}} = \ln ^{230}\text{Th}_{\text{ex}}^0 - (\lambda_{230}/S) \cdot x$$

显然，如果 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}^0$ 和 S 为常数的话， $\ln ^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ 对 x 作图将得到一直线，直线的斜率即为沉积速率的函数。

4、应用：

测年范围为： $< 3 \times 10^5$ a

- (1) 深海沉积速率的测定 (Piggot和Urry, 1939, 1942; Ku等, 1966; 1968; 1972)。
- (2) 铀结核生长速率的测定 (Ku和Broecker, 1967, 1969; Harnes和Dymond, 1967; Bhat等, 1973)



三、²³¹Pa过剩测年法

1、原理：

²³¹Pa由²³⁵U放射性衰变产生： $^{235}\text{U} \rightarrow ^{231}\text{Th} \rightarrow ^{231}\text{Pa}$ ，其半衰期为 3.43×10^4 a。²³¹Pa是颗粒活性核素。当海水中的²³⁵U衰变产生²³¹Pa后，²³¹Pa就被吸附到颗粒物上，并随颗粒物进入到海底沉积物，由此导致沉积物中²³¹Pa相对²³⁵U的过剩，根据过剩²³¹Pa放射性衰变的剩余量，即可进行年代的测定。

2、条件：

- (1) 继承性假设：海洋水柱中²³¹Pa、²³⁵U含量在²³¹Pa_{ex}测年法的测年范围内基本恒定。
- (2) 封闭系统假设：沉积柱内未发生²³¹Pa的迁移。
- (3) ²³¹Pa由海水向沉积物中的沉积速率基本恒定。
- (4) 沉积物在岩心中的层位遵循正常的沉积过程。

3、测年公式和推导：

岩心某深度x (cm) 处的沉积速率S (cm/单位时间) 和沉积年代t之间的关系为：

$$S = x/t$$

而： $^{231}\text{Pa}_{\text{ex}} = ^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}^0 \cdot \exp(-\lambda_{231} \cdot t) = ^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}^0 \cdot \exp(-\lambda_{231} \cdot x/S)$

其中：²³¹Pa_{ex}⁰、²³¹Pa_{ex}⁰ 分别为t、0时刻过剩²³¹Pa的比活度；

$$^{231}\text{Pa}_{\text{ex}} = ^{231}\text{Pa}_{\text{m}} - ^{235}\text{U}_{\text{m}}$$

$$\ln ^{231}\text{Pa}_{\text{ex}} = \ln ^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}^0 - (\lambda_{231}/S) \cdot x$$

显然，如果²³¹Pa_{ex}⁰和S为常数，Ln²³¹Pa_{ex}对x作图将得到一直线，直线的斜率即为沉积速率的函数。

4、应用：

测年范围为： $< 1.5 \times 10^5$ a

- (1) 深海沉积速率的测定 (Sackett, 1960; Kominz等, 1979)
- (2) 锰结核生长速率测定 (Ku等, 1979; Ku和Knaus, 1979)

四、 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 测年法

1、原理：

$^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ 测年法所需的前提条件较多，为减少这些限制，可采用 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 测年法测定样品年龄。其出发点是用同一元素两个同位素之比值测定年龄比用它们中的任何一个来得好，因为不需要考虑每个同位素进入沉积物速率随时间的变化等。

铀是颗粒活性核素。海水中的 ^{230}Th 主要由 ^{234}U 衰变产生， ^{232}Th 则主要由河流、大气输入海洋。二者进入海洋后，一起被吸附到颗粒上，并随颗粒进入到底层沉积物中。因为 ^{232}Th 的半衰期很长 (1.4×10^{10} a)，因此，沉积物中 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 放射性活度比将随时间的推移而降低。根据 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 活度比与沉积深度的关系，即可进行年代的测定。

2、条件：

- (1) ^{230}Th 、 ^{232}Th 在海水中具有同样的化学形态，二者在海水、颗粒物之间不存在同位素分馏。
- (2) 继承性假设：海洋水柱中 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 活度比在测年范围内基本恒定。
- (3) 封闭系统假设：沉积粒内未发生 ^{230}Th 、 ^{232}Th 的迁移或迁移未导致二者的分馏。
- (4) 样品中陆源碎屑含量较低。

3、测年公式和推导：

颗粒物 ^{230}Th 总比活度等于过剩 ^{230}Th 比活度与 ^{234}U 所支持的 ^{230}Th 比活度之和：

$$^{230}\text{Th} = ^{230}\text{Th}_{\text{ex}} + ^{230}\text{Th}_s$$

其中： ^{230}Th ：岩心X深度处每单位干沉积物的 ^{230}Th 比活度；

$^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ ：岩心X深度处单位干沉积物过剩 ^{230}Th 比活度；

$^{230}\text{Th}_s$ ：岩心X深度处单位干沉积物中由 ^{234}U 支持的

^{230}Th 比活度。

对于 $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ ，有：

$$^{230}\text{Th}_{\text{ex}} = ^{230}\text{Th}_{\text{ex}}^0 \cdot \exp(-\lambda_{230} \cdot t)$$

其中， $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}^0$ 是刚沉积时过剩 ^{230}Th 比活度。

以 ^{232}Th 作为参考标准，有：

$$^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th} = ^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}^0 \exp(-\lambda_{230} \cdot t)$$

上述等式没有考虑较长年代样品U所贡献的 $^{230}\text{Th}_s$ ：

$$^{230}\text{Th}_s = (\lambda_{234}/(\lambda_{230} - \lambda_{234})) \cdot ^{234}\text{U}^0 (\exp(-\lambda_{234} t) - \exp(-\lambda_{230} t))$$

假设 ^{234}U 与 ^{238}U 达到久期平衡，有：

$$^{234}\text{U}_A^0 = ^{234}\text{U}_A = ^{238}\text{U}_A$$

而： $\lambda_{230} \gg \lambda_{234}$ ，所以：

$$\lambda_{230} - \lambda_{234} = \lambda_{230}, \quad \exp(-\lambda_{234} t) = 1$$

$$^{230}\text{Th}_{\text{ex}} = ^{238}\text{U}_A (1 - \exp(-\lambda_{230} t))$$

因此：

$$^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th} = (^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}^0) \exp(-\lambda_{230} \cdot t) + ^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}_A (1 - \exp(-\lambda_{230} t))$$

注意：上述第1项随时间推移而降低，而第2项则随时间推移而增加。

4. 应用:

测年范围为: $<3 \times 10^5$ a

(1) 深海沉积速率的测定 (Goldberg和Koike, 1962)

(2) 铀结核生长速率的测定 (Ku和Broecker, 1967, 1969; Harnes和Dymond, 1967; Bhat等, 1973)

五、 $^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}/^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ 测年法

1. 原理:

^{230}Th 与 ^{231}Pa 彼此间无成因联系, 其放射性衰变是独立的。二者的共同特点是来源于同一元素—铀。海洋中的 ^{238}U 、 ^{235}U 含量是比较恒定的, 而河水贡献的无支持的 ^{230}Th 与 ^{231}Pa 很少, 可忽略不计。

这两个核素由其母体产生后, 通过吸附在颗粒物表面或结合进入自生矿物中, 从海水中迁出。因此海洋沉积物中不仅含有过剩的无支持的 ^{230}Th , 同时也有过剩的无支持的 ^{231}Pa 。

如果这两个核素以同样的效率从海水中清除的话, 那么沉积物中过剩 ^{230}Th 与过剩 ^{231}Pa 的活度比将只是时间的函数, 其变化速率取决于二者衰变速率的差别。

2. 条件:

(1) ^{230}Th 与 ^{231}Pa 从海水中清除、迁出到沉积物的机理是相同的, 或十分近似的。

(2) 封闭系统假设: ^{230}Th 与 ^{231}Pa 在沉积物中没有发生迁移, 或者它们中的任何一个能破坏 $^{230}\text{Th}/^{231}\text{Pa}$ 活度比初始比值的核素没有单独迁移。

(3) 陆源或火山源的 ^{230}Th 和 ^{231}Pa 含量很低, 可忽略不计。

3. 公式推导:

$$^{230}\text{Th}/^{231}\text{Pa}_{\text{ex}} = ^{230}\text{Th}/^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}^0 [\exp(-\lambda_{230} t)/\exp(-\lambda_{231} t)]$$

其中: $^{230}\text{Th}/^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}$ 为 t 时刻沉积物中无支持核素的活度比;

$^{230}\text{Th}/^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}^0$ 为刚沉积沉积物无支持核素的活度比;

λ_{230} 、 λ_{231} 分别为 ^{230}Th 与 ^{231}Pa 的衰变常数。

$$^{230}\text{Th}/^{231}\text{Pa}_{\text{ex}} = ^{230}\text{Th}/^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}^0 \exp(\lambda' t)$$

其中: $\lambda' = \lambda_{231} - \lambda_{230} = 12.133 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$, 即有效半衰期为 57100 a。

显然, 岩心中过剩 $^{230}\text{Th}/^{231}\text{Pa}$ 活度比随深度增加而增加。如果沉积速率 S 是恒定的话, $S = X/t$, 则:

$$\ln ^{230}\text{Th}/^{231}\text{Pa}_{\text{ex}} = \ln ^{230}\text{Th}/^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}^0 + \lambda' X/S$$

$\ln ^{230}\text{Th}/^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}$ vs X 为一直线, 斜率为 λ'/S , 截距为 $\ln ^{230}\text{Th}/^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}^0$

4. 应用:

测年范围: $< 1.5 \times 10^5$ a

(1) 深海沉积速率的测定 (Ku, 1976; Sackett, 1964; Broecker和Ku, 1969)

六、 ^{210}Pb 过剩测年法

1. 原理:

^{238}U 的衰变产物 ^{222}Rn 逸逸到大气中, 并通过一系列的短寿命子体衰变成 ^{210}Pb 。 ^{210}Pb 在大气中的停留时间很短, 仅约10 d左右, 之后被雨、雪、尘埃等迁出大气, 沉降于冰、雪、湖泊、海洋, 乃至树木的木质组织中(如橡树、胡桃木等)。无支持的过剩 ^{210}Pb 的比活度随时间的推移而降低, 其变化速率由其半衰期 22.3 a 所控制。根据地质对象中过剩 ^{210}Pb 放射性衰变的剩余量, 即可进行年代的测定。

2. 条件:

- (1) 封闭系统假设: 沉积柱内未发生 ^{210}Pb 的迁移。
- (2) ^{210}Pb 由海水向沉积物中的沉积速率基本恒定。
- (3) ^{210}Pb 的初始比度基本恒定。

3. 测年公式和推导:

岩心某深度 x (cm) 处的沉积速率 S (cm/单位时间) 和沉积年代 t 之间的关系为:

$$S = x/t$$

而: $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}} = ^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}^0 \cdot \exp(-\lambda_{210} \cdot t) = ^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}^0 \cdot \exp(-\lambda_{210} \cdot x/S)$

其中: $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}^0$ 分别为 t 、0 时刻过剩 ^{210}Pb 的比活度

$$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}} = ^{210}\text{Pb}_{\text{m}} - ^{226}\text{Ra}_{\text{m}}$$

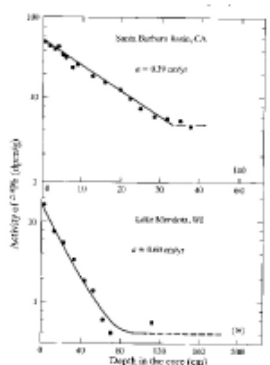
$$\ln ^{210}\text{Pb}_{\text{ex}} = \ln ^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}^0 - (\lambda_{210}/S) \cdot x$$

显然, 如果 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}^0$ 和 S 为常数, $\ln ^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ vs X 作图将得到一直线, 直线的斜率即为沉积速率的函数。

4. 应用:

测年范围为: < 100 a

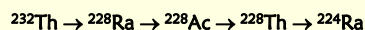
(1) 湖泊、港湾及近岸海域沉积速率的测定 (Krishnaswami等, 1971; Koide等, 1972; 1973)



七、 $^{228}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ 过剩测年法

1. 原理:

^{228}Th 是 ^{232}Th 的子体:



^{228}Th 在近岸海域沉积物中明显地过剩于它的母体 ^{232}Th 和 ^{228}Ra , 其原因在于 ^{228}Ra 的高迁移能力。沉积物中的 ^{228}Ra 可通过间隙水进入海水中, 使海水中 ^{228}Th 含量升高。由于 ^{228}Th 半衰期较短, 在大洋水中无法再回到沉积物中, 而近岸海域沉积物则接受到恒定的过剩“ ^{228}Th ”雨。利用这些过剩的 ^{228}Th 在岩心中的分布即可确定快速沉积环境中的沉积速率。

2. 条件:

- (1) ^{228}Th 与 ^{232}Th 从海水中清除、迁出到沉积物的机理是相同的, 即不存在同位素分馏。
- (2) 封闭系统假设: ^{228}Th 与 ^{232}Th 在测年范围内在沉积物中没有发生迁移或导致其迁移的分馏。
- (3) ^{228}Th 进入沉积物的速率基本恒定。

3. 公式推导:

沉积物中的 ^{228}Th 可能有三个来源:

- (1) 来自于海水中 ^{228}Th 的清除、迁出;
- (2) 来自海水中迁出的 ^{232}Th 的衰变, 这些 ^{232}Th 从海水中迁出时不伴随其子体 ^{228}Ra 、 ^{228}Th ;
- (3) 来自沉积物中过剩 ^{228}Ra 衰变, 这些 ^{228}Ra 沉降时不伴随子体 ^{228}Th 。

$$A^{228}\text{Th}_m = A^{228}\text{Th}_{\text{ex}} + A^{228}\text{Th}_{232\text{Th growth}} + A^{228}\text{Th}_{228\text{Ra growth}}$$

两边除以 ^{232}Th 活度:

$$A^{228}\text{Th}_m/A^{232}\text{Th} = A^{228}\text{Th}_{\text{ex}}/A^{232}\text{Th} + A^{228}\text{Th}_{232\text{Th growth}}/A^{232}\text{Th} + A^{228}\text{Th}_{228\text{Ra growth}}/A^{232}\text{Th}$$

根据Bateman等式可得到由 ^{228}Ra 、 ^{232}Th 生长的 ^{228}Th 量, 有:

$$A^{228}\text{Th}_m/A^{232}\text{Th} = A^{228}\text{Th}_{\text{ex}}/A^{232}\text{Th} + \{1 + [\lambda_{228\text{Ra}} \exp(-\lambda_{228}\text{Th} t) - \lambda_{228\text{Th}} \exp(-\lambda_{228\text{Ra}} t)] / [\lambda_{228\text{Th}} - \lambda_{228\text{Ra}}]\} + R$$

其中R是活度比 $A^{228}\text{Ra}_0/A^{232}\text{Th}$, 即刚沉积的沉积物中的比值。

4. 应用:

测年范围: < 10 a

(1) 近岸海域沉积速率的测定 (Koide, 1973).

八、 ^{234}Th 过剩测年法

1. 原理:

海洋中的 ^{234}Th 由母体 ^{238}U 衰变产生, 由于它是一个颗粒活性核素, 产生后很快被颗粒物所吸附, 进而迁出到沉积物。尽管 ^{234}Th 半衰期很短, 但在近岸海域已观察到 ^{234}Th 的过剩现象。根据沉积物中过剩 ^{234}Th 放射性活度随时间的降低程度, 即可确定沉积速率。

2. 条件:

- (1) 封闭系统假设: 沉积柱内未发生 ^{234}Th 的迁移。
- (2) ^{234}Th 由海水向沉积物中的沉积速率基本恒定。
- (3) ^{234}Th 的初始比度基本恒定。

3. 测年公式和推导:

岩心某深度 x (cm) 处的沉积速率 S (cm/单位时间) 和沉积年代 t 之间的关系为:

$$S = x/t$$

而: $^{234}\text{Th}_{\text{ex}} = ^{234}\text{Th}_{\text{ex}}^0 \cdot \exp(-\lambda_{234} \cdot t) = ^{234}\text{Th}_{\text{ex}}^0 \cdot \exp(-\lambda_{234} \cdot x/S)$

其中: $^{234}\text{Th}_{\text{ex}}$ 、 $^{234}\text{Th}_{\text{ex}}^0$ 分别为 t 、 0 时刻过剩 ^{234}Th 的比活度

$$^{234}\text{Th}_{\text{ex}} = ^{234}\text{Th}_m - ^{238}\text{U}_m$$

$$\ln ^{234}\text{Th}_{\text{ex}} = \ln ^{234}\text{Th}_{\text{ex}}^0 - (\lambda_{234}/S) \cdot x$$

显然, 如果 $^{234}\text{Th}_{\text{ex}}^0$ 和 S 为常数, 的话, $\ln ^{234}\text{Th}_{\text{ex}}$ vs X 作图将得到一直线, 直线的斜率即为沉积速率的函数。

4. 应用:

测年范围: <100 d

(1) 近岸海域沉积速率 (Minagawa和Tsongai, 1980; Aller等, 1980)