

# 同位素定年原理和方法

## 对定年方法选择的启示

李秋立

中国科学院地质与地球物理研究所

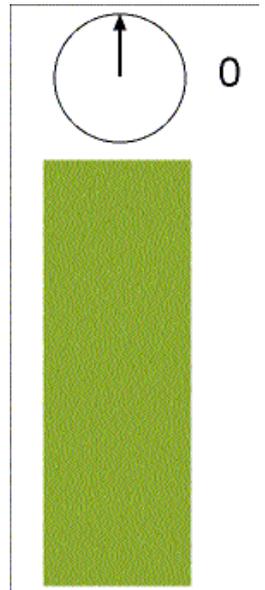
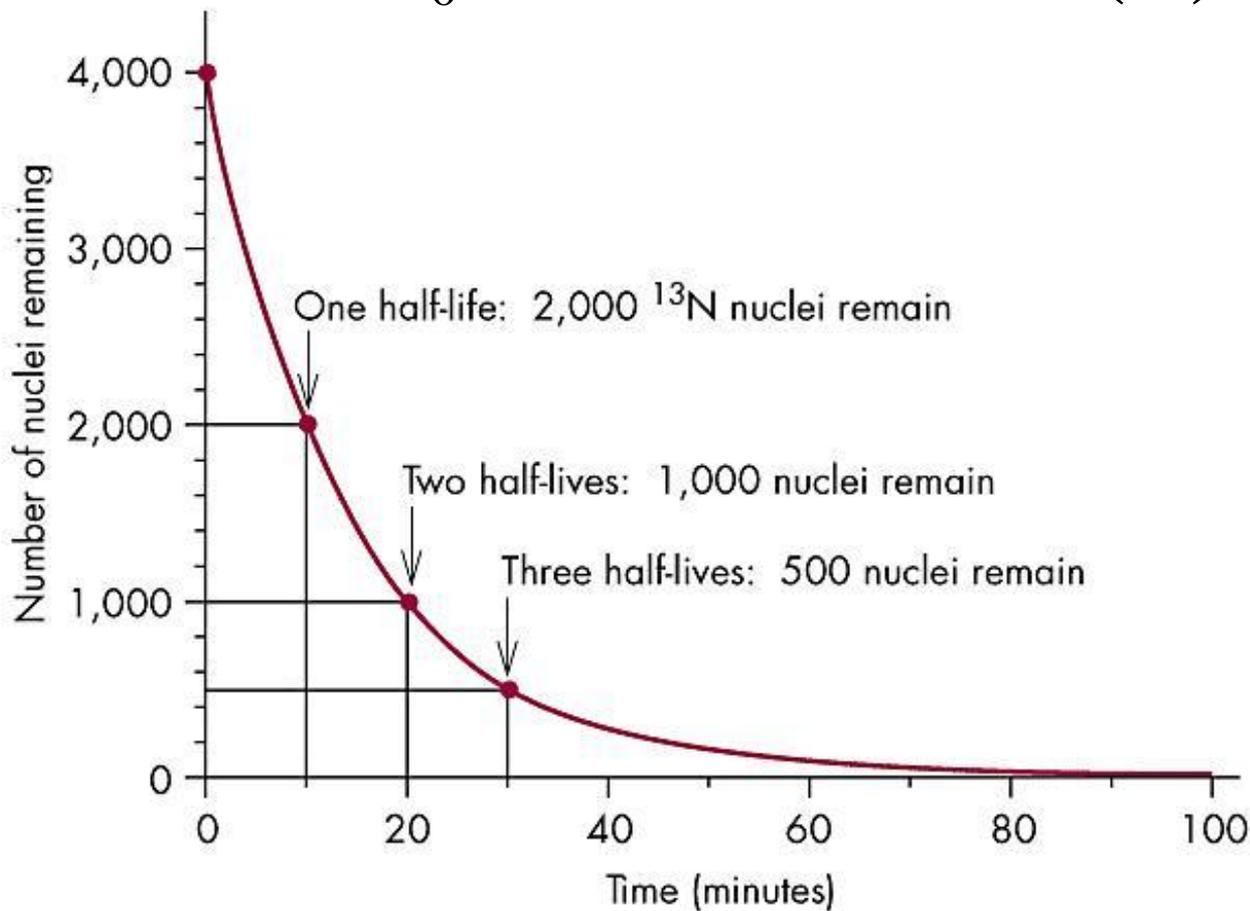
衰变常数  $\lambda$  :

一个原子核在单位时间内发生衰变的几率

$$\frac{dP}{dt} = -\lambda P$$

$$P = P_0 e^{-\lambda t}$$

当  $P/P_0 = 1/2$       $t = \ln(2)/\lambda$      半衰期



常用体系	半衰期	衰变常数	母体已衰变
$^{238}\text{U}-^{206}\text{Pb}$	44.7 亿年	$1.55125\text{e-}10$	51 %
$^{235}\text{U}-^{207}\text{Pb}$	7 亿年	$9.8485\text{e-}10$	99 %
$^{232}\text{Th}-^{208}\text{Pb}$	140 亿年	$4.9475\text{e-}11$	20 %
$^{40}\text{K}-^{40}\text{Ar}$	12.5 亿年	$5.543\text{e-}10$	92 %
$^{87}\text{Rb}-^{87}\text{Sr}$	488 亿年	$1.42\text{e-}11$	6 %
$^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$	1060 亿年	$6.5397\text{e-}12$	3 %
$^{187}\text{Re}-^{187}\text{Os}$	416 亿年	$1.666\text{e-}11$	7 %
$^{176}\text{Lu}-^{176}\text{Hf}$	357 亿年	$1.94\text{e-}11$	8 %

一般无法测得初始母体元素含量，因此以衰变子体量代替衰变量，即：

$$\text{放射成因子体 } D^* = P_0 - P$$

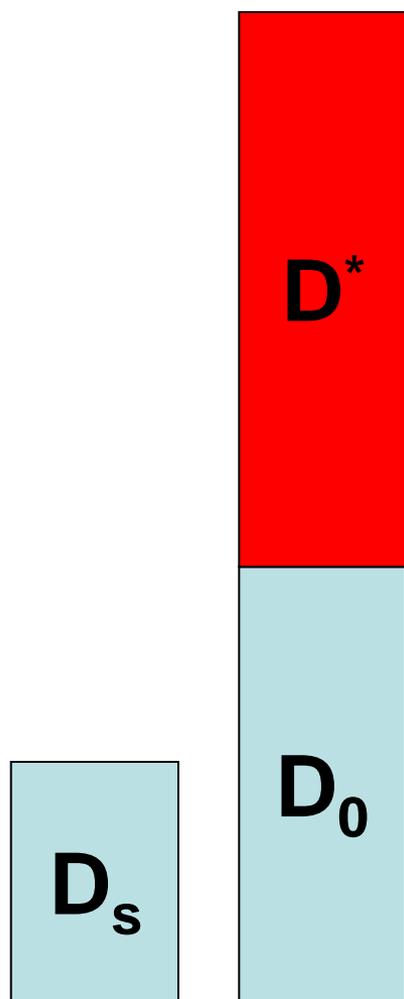
$$D^* = P(e^{\lambda t} - 1)$$

$$t = \ln\left(\frac{D^*}{P} + 1\right) / \lambda$$

然而，子体元素不都是放射成因，存在  $D_0$

$$D = D_0 + D^*$$

在子体元素中找出一个稳定的自始以来不变的同位素  $D_s$



$$D^* = D - \frac{D_0}{D_s} \times D_s$$

或：

$$\frac{D^*}{D_s} = \frac{D}{D_s} - \frac{D_0}{D_s}$$

衰变方程基本公式：

$$\frac{D}{D_s} = \frac{D_0}{D_s} + \frac{P}{D_s} (e^{\lambda t} - 1)$$

非放射成因子体元素的影响程度：

$$f = \frac{D_0}{D} \quad D^* = D(1 - f)$$

$$t = \ln\left(\frac{D(1 - f)}{P} + 1\right) / \lambda$$

对于这些长半衰期体系，大体上

$f = n\%$ ，则年龄影响约 $n\%$

**U Th K Rb Sm Re Lu**

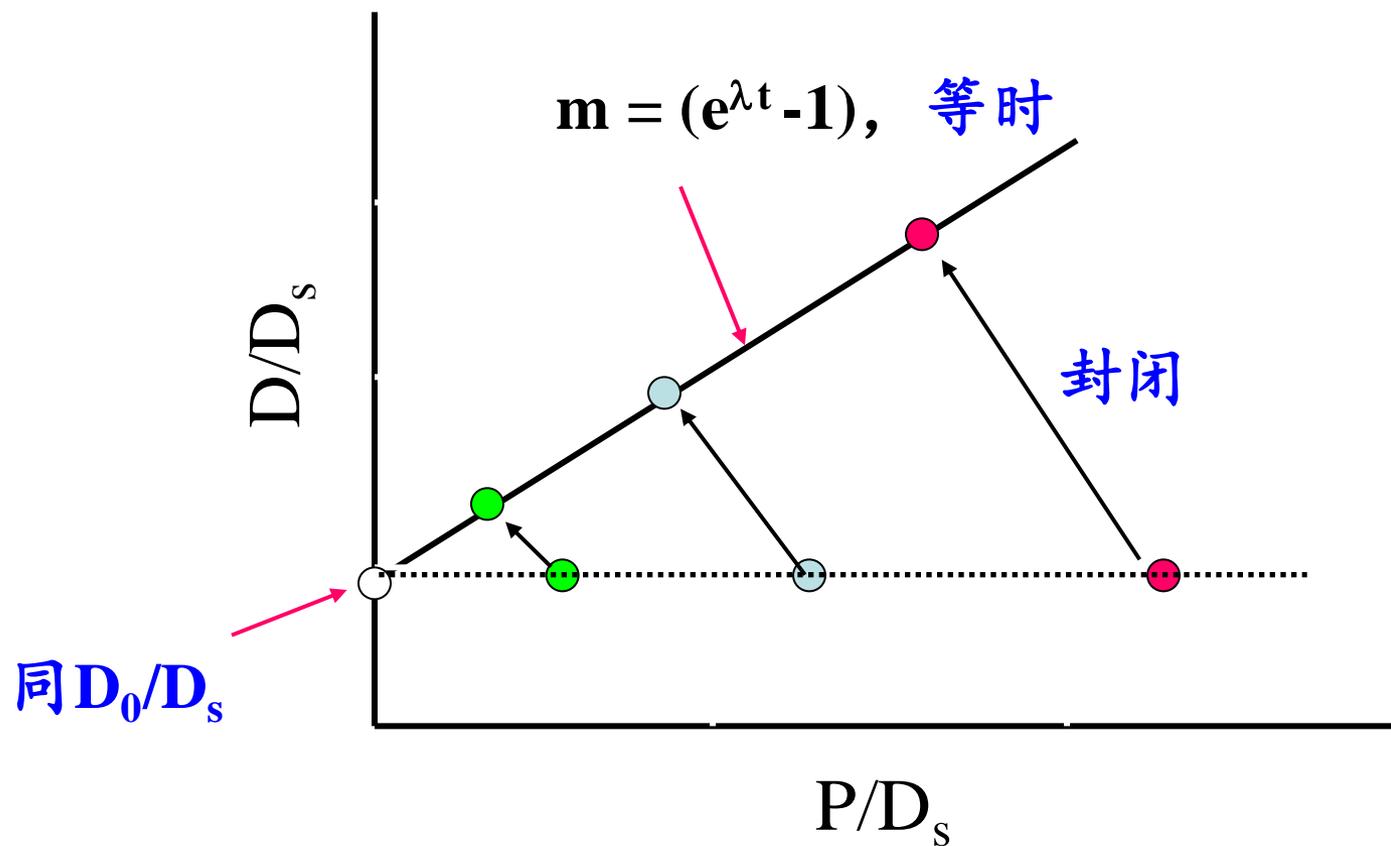
$$f = \frac{D_0}{D} = \frac{D_0}{D_s} / \frac{D}{D_s}$$

	$D_0/D_s$	$D/D_s (f < 1\%)$	
$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	: 295.5 (过剩Ar除外)	>30000	√
普通Pb	: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18 \pm 3$	>2000	√
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	: 0.703 – 0.710	> 7	罕见
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	: $0.511 \pm 0.003$	> 5	×
$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	: 0.12 – 1	>100	√
$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	: $0.282 \pm 0.002$	>2.8	罕见

$f < 1\%$ 时，校正对年龄影响都很小

$f$ 高, 等时线:

$$\frac{D}{D_s} = \frac{D_0}{D_s} + \frac{P}{D_s} (e^{\lambda t} - 1)$$



母体进入分子式:

**K-Ar** 钾长石 ( $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ )、

白云母 ( $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$ )

黑云母 ( $K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(F,OH)_2$ )

角闪石 ( $K_{0-1}B_2C_5T_8O_{22}(OH,F,Cl)_2$ )

**U-Th-Pb** 晶质铀矿  $UO_2$ , 沥青铀矿  $U_3O_8$

铀石  $USiO_4$ , 钍石  $ThSiO_4$

钒钾铀矿  $K_2[UO_2]_2[VO_4]_2[H_2O]_3$

**Re-Os** 辉铼矿  $ReS_2$

铜铼硫化矿  $CuReS_4$

# U Th K Rb Sm Re Lu

母体易于进入晶格，子体不易进入的：

**U-Th-Pb:**  $U^{4+} = Zr^{4+} / Ti^{4+} / REE^{3+} + P^{5+}$

一级：锆石、斜锆石、独居石、磷钇矿、氟碳铈矿...

二级：金红石、榍石、钙钛矿、锡石、磷灰石...

**Rb-Sr:** 含Li/K/Cs 矿物替代

云母、钾长石类

**Re-Os:** 亲硫性，且  $Re^{4+} = Mo^{4+}$  (离子半径最接近)

90% 辉钼矿可以认为不含有普通Os

**Lu-Hf:** 富重稀土，贫高场强元素

石榴石、磷灰石、磷钇矿

# U Th K Rb Sm Re Lu

---

母子体都可进入:

**Sm-Nd:** 稀土, 化学性质相近

取决于Sm/Nd分异程度

石榴石、萤石、白钨矿、方解石等.....

**Re-Os:** 亲硫性, 一般硫化物中

**Rb-Sr:** 硫化物中

流体包裹体、矿物包裹体

## 测试方法

化学法：都可用

不得不用：质量分辨率不够，含量不够高

干扰

质量分辨率

$^{87}\text{Rb} - ^{87}\text{Sr}$

>30 万

$^{187}\text{Re} - ^{187}\text{Os}$

>6000 万

$^{144}\text{Sm} - ^{144}\text{Nd}$

> 7 万

$^{176}\text{Lu} - ^{176}\text{Hf}$

> 14 万

## 大样品量可能带来的问题：

矿物生长多期次

包裹体多期次

后期蚀变

初始同位素不平衡



改进方法



## 测试技术的进步：

全流程空白将低  
仪器高精度测试需求减少

**Pb** : TIMS, < 30 pg ( $^{206}\text{Pb}$  0.1% 水平)

样品量需求：

单颗锆石：~10  $\mu\text{g}$  (100 ppm U, 100 Ma)

应用最广，国外早已常规，国内最不成熟的方法

**Sr** : TIMS,  $< 0.5 \text{ ng}$  ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.005\%$ )

样品量: 1 ppm含量只需0.5 mg

云母: 一般 $>10\text{ppm}$ , 单片 $<0.1 \text{ mg}$

**Nd**: N-TIMS,  $< 1 \text{ ng}$  ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} < 0.005\%$ )

样品量: 1 ppm含量只需1 mg

石榴石:  $\sim 0.1\text{-}1 \text{ ppm}$ , 1-10 mg

**Sr-Nd测试我所TIMS实验室已达到国际一流水平**

**Hf** : MC,  $10 \text{ ppb} * 0.5 \text{ ml} = 5 \text{ ng}$

$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} < 0.005\%)$

样品量: 一般  $0.1 \text{ ppm}$ ,  $> 50 \text{ mg}$

**Os** : N-TIMS, MC, MS-ICPMS

无初始Os时, 只需测Re-Os含量

样品量: Re 含量  $\text{ppt} - 2\%$

**Re-Os** 年龄分析测试国际水平目前可达  $0.1\%$

## Ar-Ar法：

一般理解：子体是惰性气体，不进入晶格，初始Ar组成确定时（大气Ar组成），总能获得一个年龄数字，但对其正确的地质意义解读不容易。

技术进步带来样品量需求的降低：

标本尽量小，颗粒尽量少，

纯度尽量高，种类尽量少。

同时：技术进步带来对操作者要求的提高，非常规生产项目

**微区原位方法:**

**U-Th-Pb :**

**SIMS**

**LA-(MC)-ICPMS**

**EMP**

**Ar-Ar : LA**

**Sm-Nd : LA, 需要Nd > 200 ppm**

一般是轻稀土富集矿物, 不适宜定年

$$t = \ln\left(\frac{D^*}{P} + 1\right) / \lambda$$

微区原位方法同时测试不同元素离子比值(Ar-Ar除外), 因离子产率的差异, 需要标样校正

$$\frac{\frac{^{206}\text{Pb}^+}{^{238}\text{U}^+}_{st}}{^{206}\text{Pb}}}{^{238}\text{U}_{st}} = \frac{\frac{^{206}\text{Pb}^+}{^{238}\text{U}^+}_u}{^{206}\text{Pb}}}{^{238}\text{U}_u}$$

我国U-Pb定年靠微区方法, 受限于标准样品不足

已知矿物种类4700余种

定年用矿物不过几十种



广阔天地大有作为

Thanks

