

专题讲座 — 同位素地质年代学与地球化学

第一讲

Rb-Sr和Sm-Nd地质年代学与地球化学

李 献 华

中国科学院广州地球化学研究所

放射性衰变的基本公式

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^t -\lambda dt \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

假设： $N/N_0 = 1/2$ （母体衰变到一半时）

$$\ln \frac{1}{2} = -\lambda t_{1/2} \quad \text{or} \quad \ln 2 = \lambda t_{1/2}$$

放射性母体半衰期与衰变常数的关系：

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

放射性子体 (**D**) 的积累:

$$D = N_0 - N$$

$$D = Ne^{\lambda t} - N = N(e^{\lambda t} - 1)$$

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

或

$$D/D_{\text{稳定}} = D_0/D_{\text{稳定}} + N/D_{\text{稳定}} (e^{\lambda t} - 1)$$

同位素地质年代学常用的放射性同位素衰变体系及衰变常数

Parent	Decay Mode	λ	Half-life	Daughter	Ratio
^{40}K	β^+ , e.c, β^-	$5.543 \times 10^{-10} \text{y}^{-1}$	$1.28 \times 10^9 \text{yr}$	^{40}Ar , ^{40}Ca	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$
^{87}Rb	β^-	$1.42 \times 10^{-11} \text{y}^{-1}$	$4.8 \times 10^{10} \text{yr}$	^{87}Sr	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
^{138}La	β^-	$2.67 \times 10^{-12} \text{y}^{-1}$	$2.59 \times 10^{11} \text{yr}$	^{138}Ce	$^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce}$, $^{138}\text{Ce}/^{136}\text{Ce}$
^{147}Sm	α	$6.54 \times 10^{-12} \text{y}^{-1}$	$1.06 \times 10^{11} \text{yr}$	^{143}Nd	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$
^{176}Lu	β^-	$1.867 \times 10^{-11} \text{y}^{-1}$	$3.7 \times 10^{10} \text{y}$	^{176}Hf	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$
^{187}Re	β^-	$1.64 \times 10^{-11} \text{y}^{-1}$	$4.23 \times 10^{10} \text{y}$	^{187}Os	$^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$
^{232}Th	α	$4.948 \times 10^{-11} \text{y}^{-1}$	$1.4 \times 10^{10} \text{y}$	^{208}Pb , ^4He	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^3\text{He}/^4\text{He}$
^{235}U	α	$9.849 \times 10^{-10} \text{y}^{-1}$	$7.07 \times 10^8 \text{y}$	^{207}Pb , ^4He	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^3\text{He}/^4\text{He}$
^{238}U	α	$1.551 \times 10^{-10} \text{y}^{-1}$	$4.47 \times 10^9 \text{y}$	^{206}Pb , ^4He	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^3\text{He}/^4\text{He}$

$$R = R_0 + R_{P/D} (e^{\lambda t} - 1)$$

Rb-Sr放射性同位素体系:

$$\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} = \left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} \right)_0 + \frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}} (e^{\lambda t} - 1)$$

Rb (Z = 37)	同位素	丰度	Sr (Z = 38)	同位素	丰度
	${}^{85}\text{Rb}$	72.1654%		${}^{84}\text{Sr}$	0.56%
	${}^{87}\text{Rb}$	27.8346%		${}^{86}\text{Sr}$	9.86%
				${}^{87}\text{Sr}$	6.98%
				${}^{88}\text{Sr}$	82.59%

Sm-Nd放射性同位素体系:

$$\frac{{}^{143}\text{Nd}}{{}^{144}\text{Nd}} = \left(\frac{{}^{143}\text{Nd}}{{}^{144}\text{Nd}} \right)_0 + \frac{{}^{147}\text{Sm}}{{}^{144}\text{Nd}} (e^{\lambda t} - 1)$$

Sm (Z = 62)	同位素	丰度	Nd (Z = 60)	同位素	丰度
	${}^{144}\text{Sm}$	3.1%		${}^{142}\text{Nd}$	27.1%
	${}^{147}\text{Sm}$	15.0%		${}^{143}\text{Nd}$	12.2%
	${}^{148}\text{Sm}$	11.2%		${}^{144}\text{Nd}$	23.9%
	${}^{149}\text{Sm}$	13.8%		${}^{145}\text{Nd}$	8.3%
	${}^{150}\text{Sm}$	7.4%		${}^{146}\text{Nd}$	17.2%
	${}^{152}\text{Sm}$	26.7%		${}^{148}\text{Nd}$	5.7%
	${}^{154}\text{Sm}$	22.8%		${}^{150}\text{Nd}$	5.6%

$$R = R_0 + R_{P/D} (e^{\lambda t} - 1)$$

如果已知 R_0 ，那么测定一个样品的 R 和 $R_{P/D}$ ，代入上述方程则可以计算出年龄 t 。

例题一：

已知一个花岗岩样品中磷灰石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.704$ ，
测得一个全岩样品的 $\text{Rb} = 121.9 \text{ ppm}$ ； $\text{Sr} = 75.5 \text{ ppm}$ ；
 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7502$ 。试计算该花岗岩的年龄。

$\lambda_{87\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11} \text{ y}^{-1}$ 。

磷灰石是富Sr不含Rb的矿物，其Sr同位素比值近似于花岗岩的初始Sr比值，所以：

$$\mathbf{R_0 = \left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} \right)_0 = 0.704}$$

$$\mathbf{R = \frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} = 0.7502}$$

$$\mathbf{R_{P/D} = \frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}} = \frac{\text{Rb}}{\text{Sr}} (2.69258 + 0.28299 \times \frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}}) = 4.690}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{t} &= \frac{1}{1.42 \times 10^{-11}} \times \ln [1 + (0.7052 - 0.704)/4.690] \\ &= 690 \times 10^6 \text{ y} = \mathbf{690 \text{ Ma}^*} \end{aligned}$$

*黑云母的Rb-Sr封闭温度为350°C，严格讲该年龄是花岗岩冷却年龄。

例题二：

测得一个花岗岩样品中黑云母的Rb = 438 ppm; Sr = 1.80 ppm; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 1.9125$ 。试估算该花岗岩的冷却年龄。

$$\mathbf{R_0 = \left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} \right)_0 = ?} \qquad \mathbf{R = \frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} = 1.9125}$$

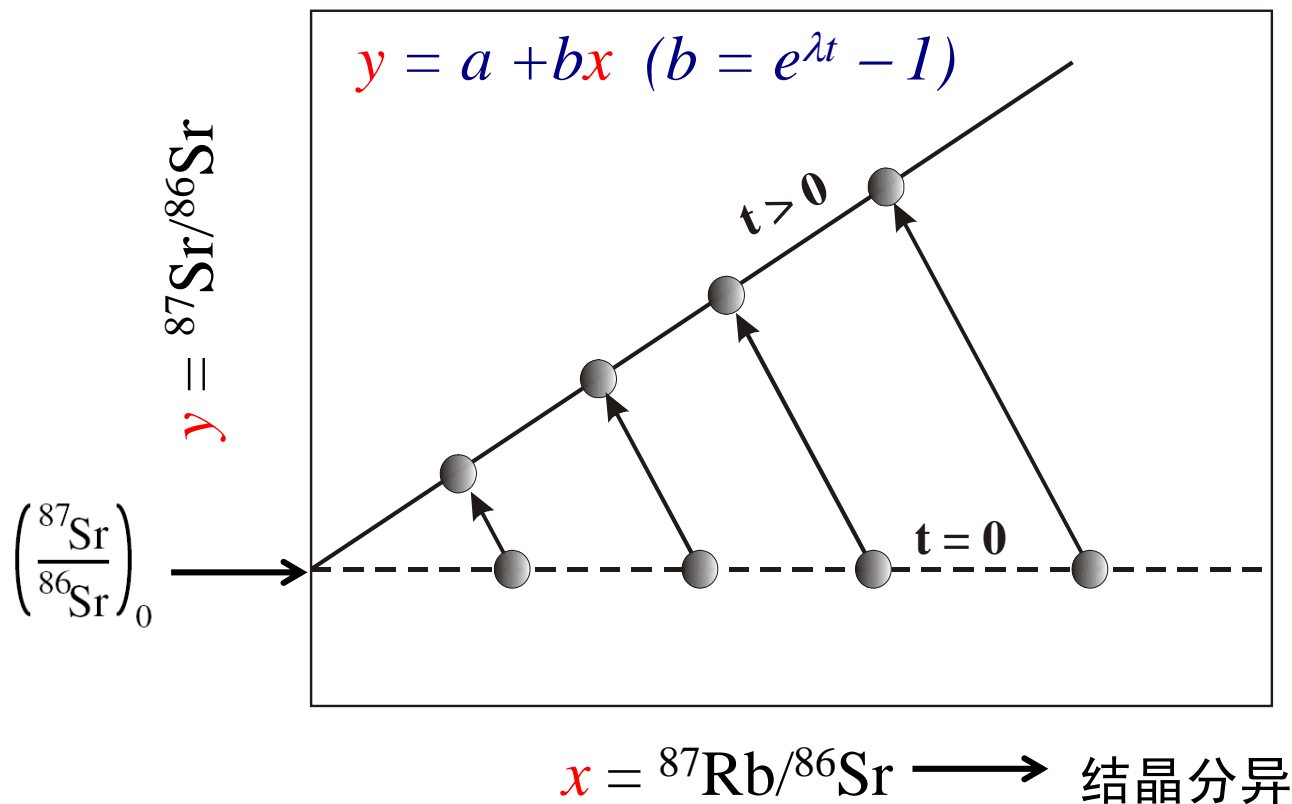
$$\mathbf{R_{P/D} = 786.9}$$

假设 $\mathbf{R_0 = 0.704 \quad 0.710 \quad 0.720 \quad 0.730 \quad 0.740 \quad 0.750}$

$\mathbf{t = 108.1 \quad 107.5 \quad 106.6 \quad 105.7 \quad 104.9 \quad 104.0 \text{ Ma}}$

这个结果是否有点意外？意义何在？

$$\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} = \left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}}\right)_0 + \frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}}(e^{\lambda t} - 1)$$



从均匀岩浆中结晶出的一组岩石样品的**Rb-Sr**同位素组成随时间的演化 —— **Rb-Sr**等时线

$$\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} = \left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} \right)_0 + \frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}} (e^{\lambda t} - 1)$$

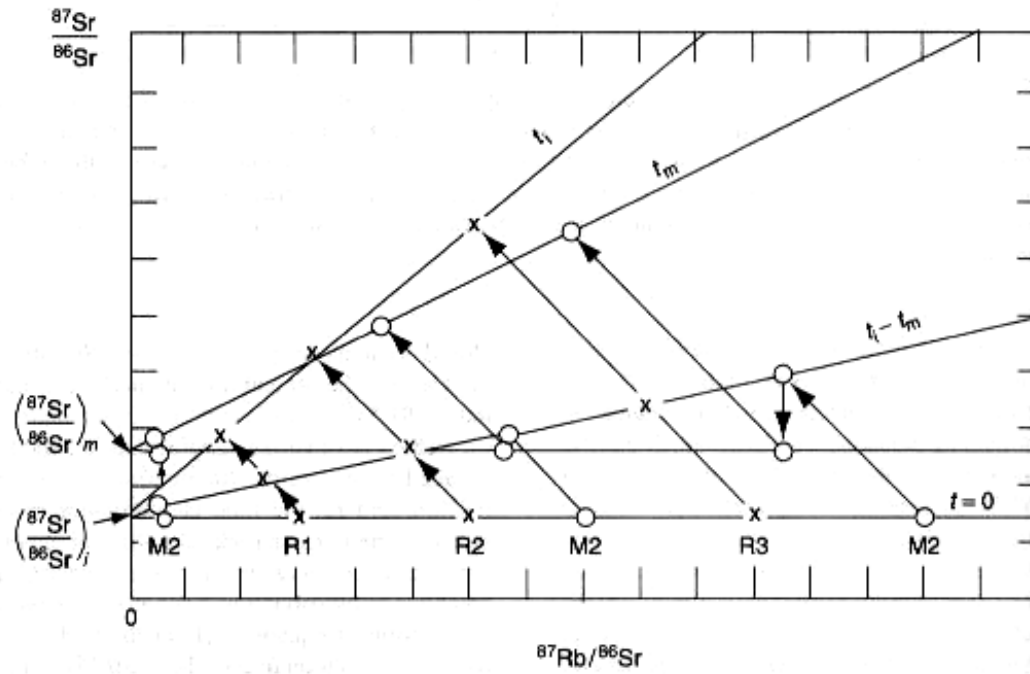
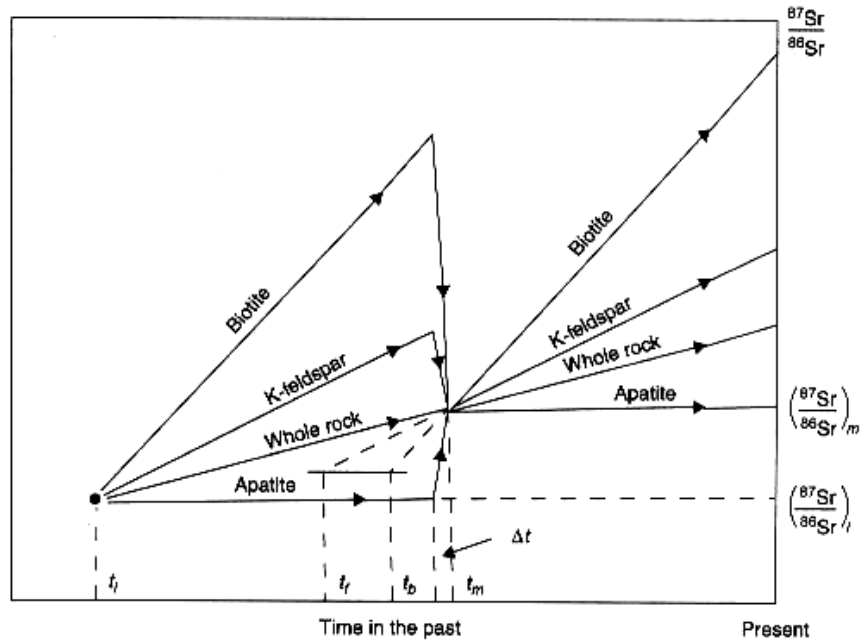
等时线的基本前提:

- 1、 $(e^{\lambda t} - 1) =$ 常数, 即所测定的一组样品是同时形成的(或非常接近);
- 2、 $({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_0 =$ 常数, 即所有样品同源, 具有均一的Sr同位素组成;
- 3、自岩浆结晶以后母-子体同位素体系保持封闭。

工作原则:

分析的样品数越多、母-子体同位素比值 (${}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr}$) 范围越大, 则统计误差越小, 由等时线斜率获得年龄越精确。

矿物内部等时线



User's Manual for

Isoplot/Ex

version 2.2

A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel

**Berkeley Geochronology Center
Special Publication No. 1a**

Kenneth R. Ludwig

Rev. February 21, 2000

2455 Ridge Road, Berkeley CA 94709

FAX (510) 644-9201; Email kludwig@bgc.org

MSWD = **M**ean **S**quare of **W**eighted **D**eviates.

(基于YORK方程的双误差线形回归)

MSWD value is roughly a measure of the ratio of the *observed* scatter of the points (from the best-fit line) to the *expected* scatter (from the assigned errors and error correlations).

MSWD (≥ 0) 不能和相关系数 ($0 \leq R^2 \leq 1$) 相比

当给定的误差 = 分析误差, MSWD = 1

当给定的误差 > 分析误差, MSWD < 1

当给定的误差 < 分析误差, MSWD > 1 (含有非分析来源的误差, 如“地质误差”等)

目前分析的误差水平: $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} \sim 1\%$ 、 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} \sim 0.5\%-1\%$

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \sim 0.005\%$

“二点、三点”等时线问题

等时线的回归是对一组样品的线形相关性的统计，回归线的统计误差与样本数 N （或自由度 $N-2$ ）有关，斜率误差 $\propto 1/\sqrt{N-2}$ ， $N \geq 3$ 。因此从统计的角度上，样本数越多，统计误差越小。

玄武岩Rb-Sr等时线问题

Sm-Nd全岩等时线问题

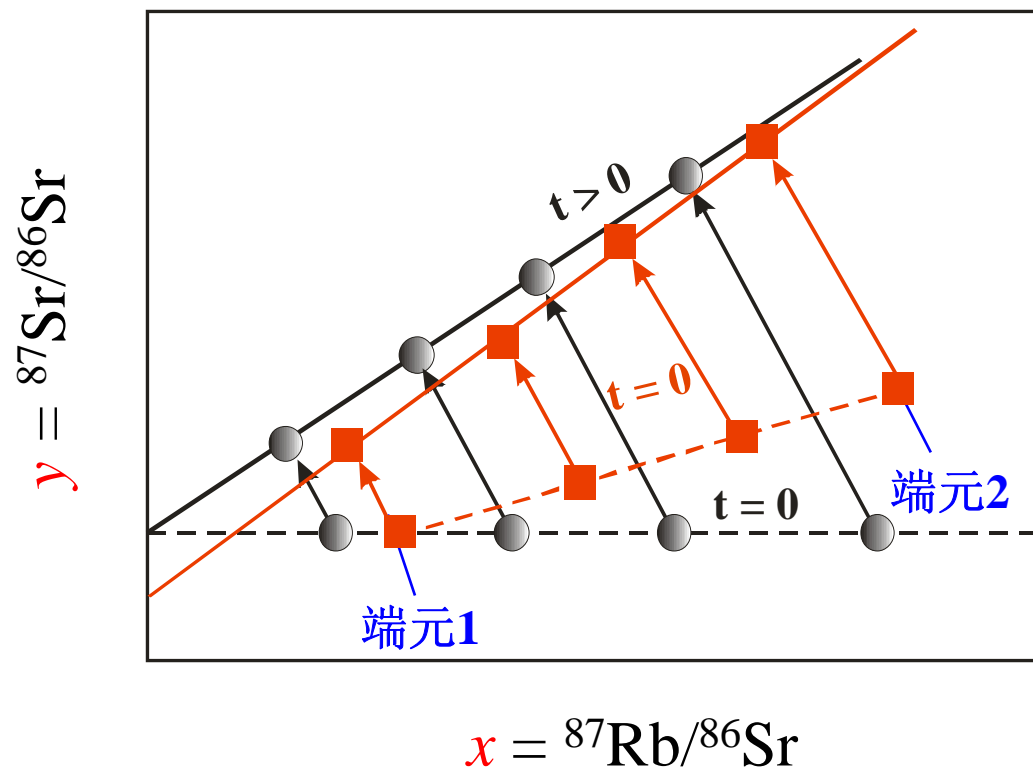
初始同位素比值不均一性问题

等时线的“老化效应 (Aging effect)”

“等时线” vs. “假等时线/误差线” vs. “混合线”

“Isochron” vs. “pseud-isochron/errochron” vs. “binary mixing line”

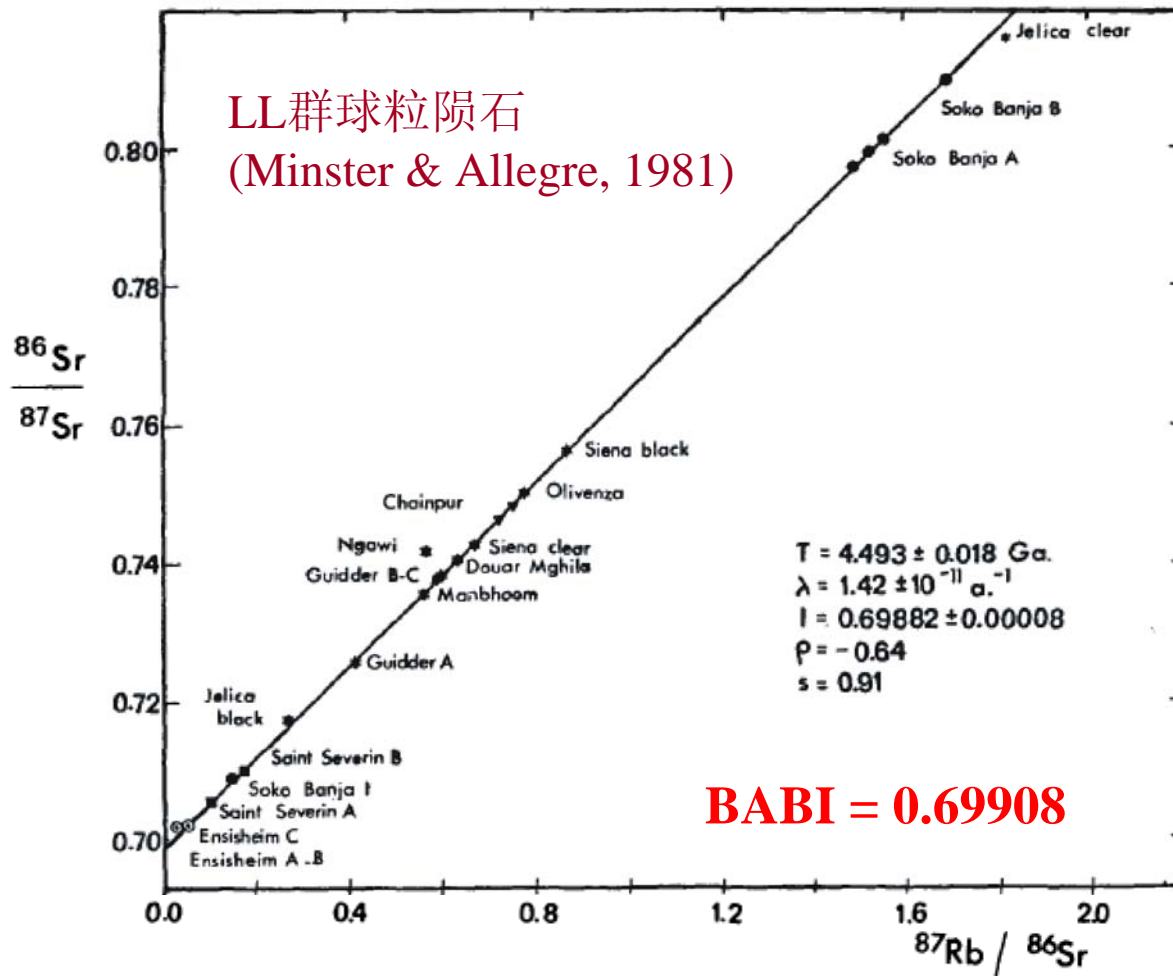
数学表达式相同 $y = a + bx$ vs. $y = a' + b'x$



判断“二元”混合需要“两个”独立的同位素体系！

Rb-Sr和Sm-Nd年代学应用实例

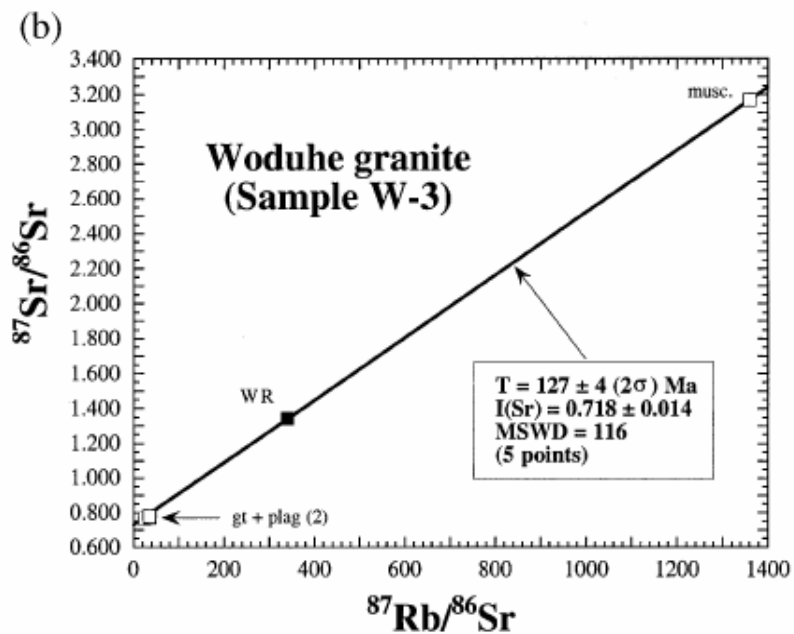
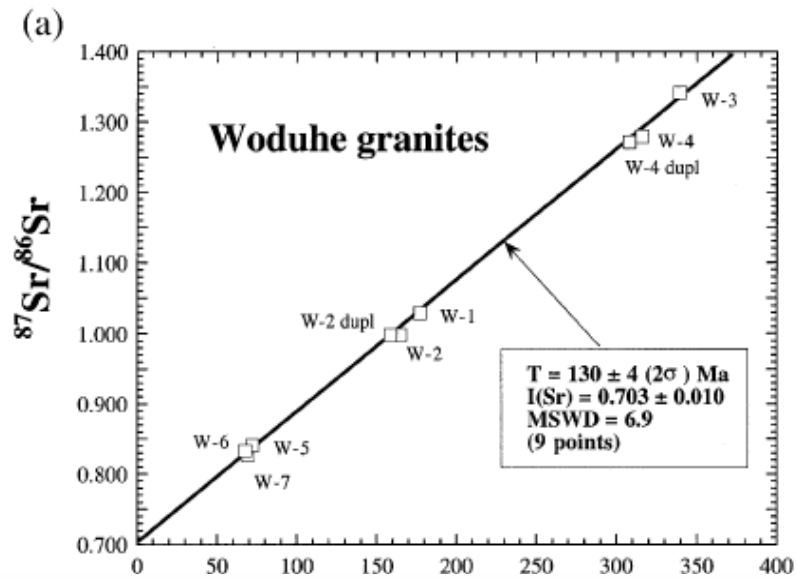
- 1、陨石定年
- 2、岩浆岩定年
- 3、变质岩定年
- 4、矿床定年
- 5、**Rb-Sr微等时线 (microchron)**



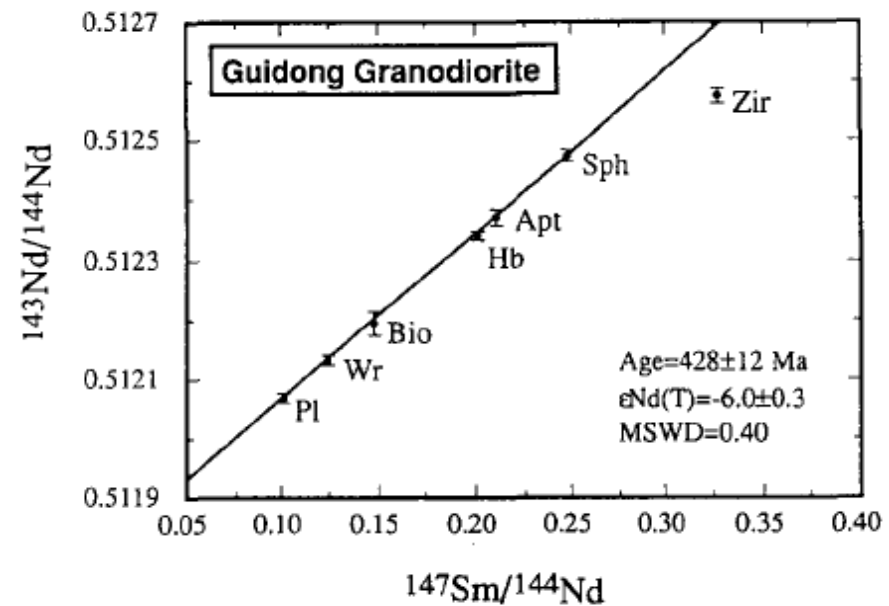
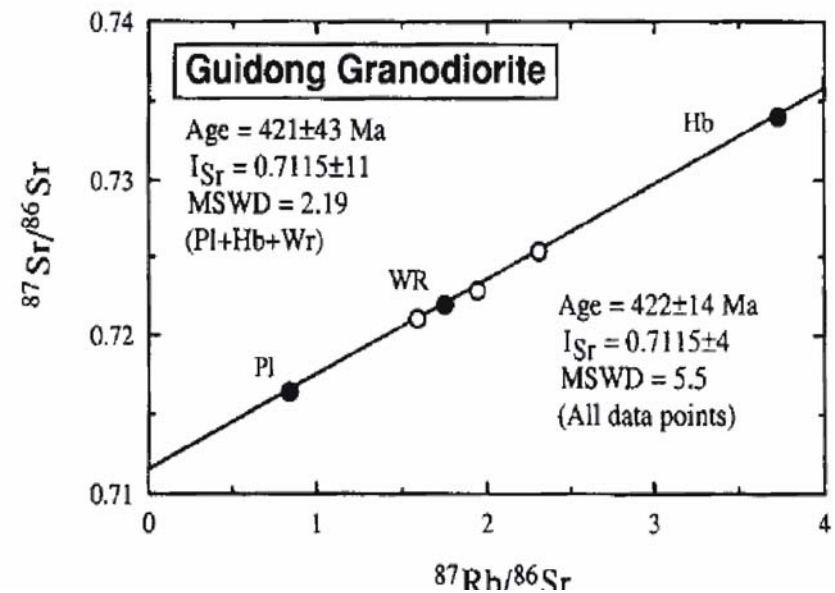
BABI: Basaltic Achondrite Best Initial

(relative to NBS 987 = 0.71025, Papanastassiou & Wasserburg, 1969)

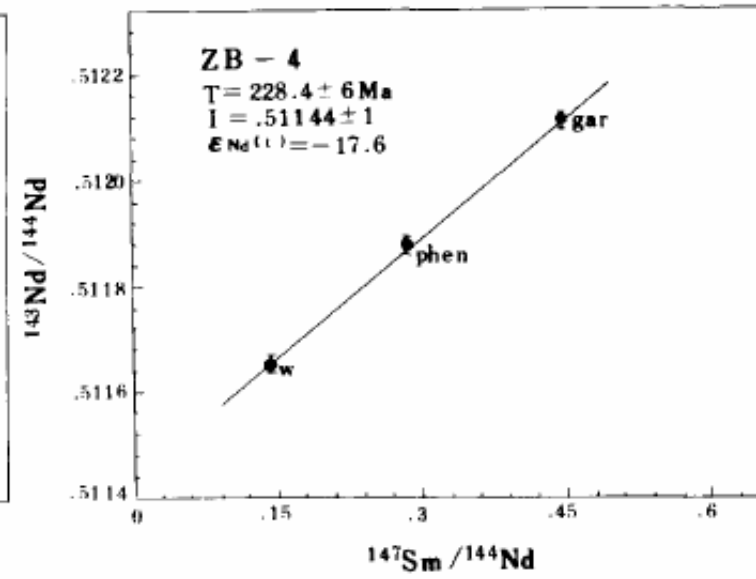
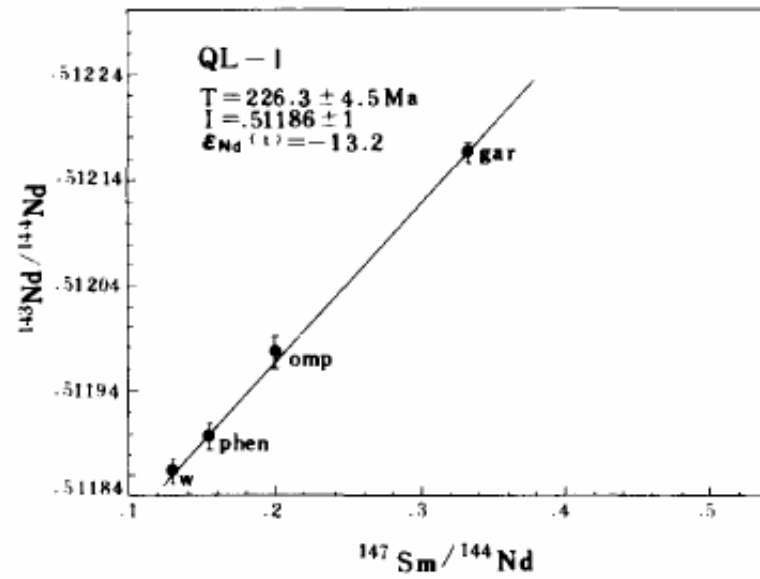
黑龙江窝都河碱性花岗岩 (Jahn et al., 2001)

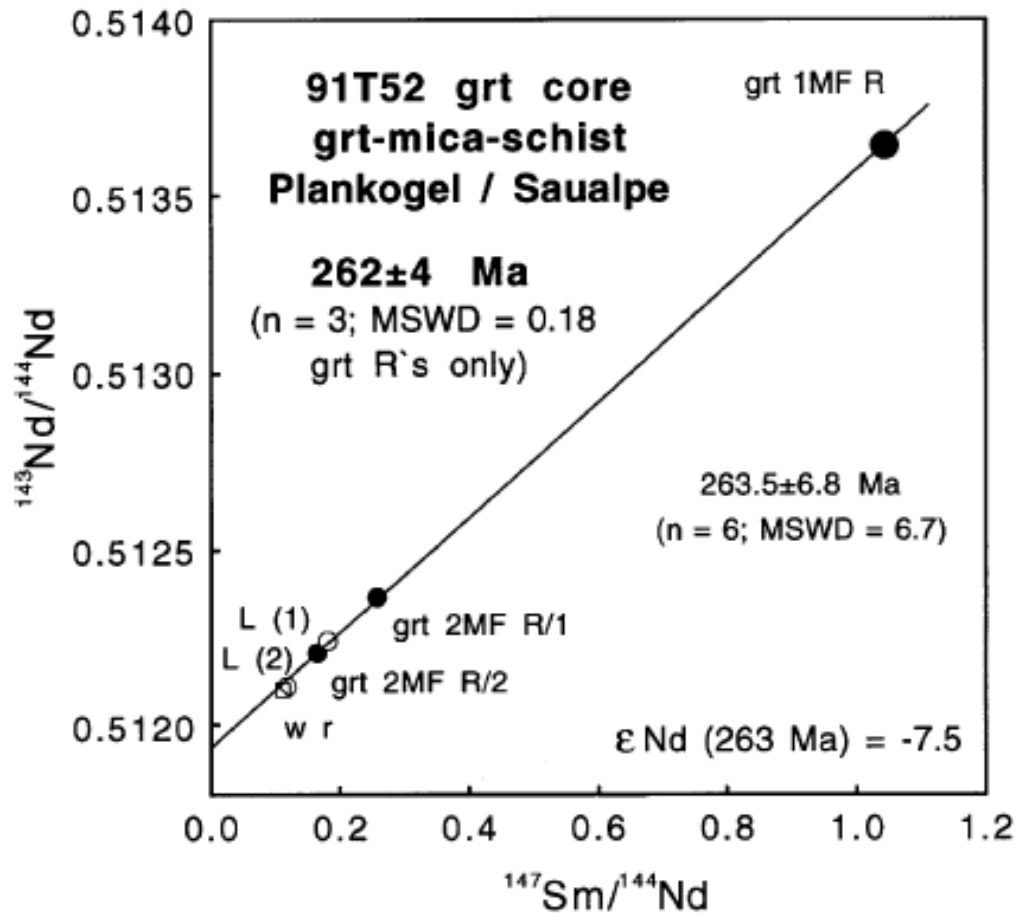


湖南桂东花岗闪长岩 (Li, 1994)



大别山榴辉岩Li et al. (1994)

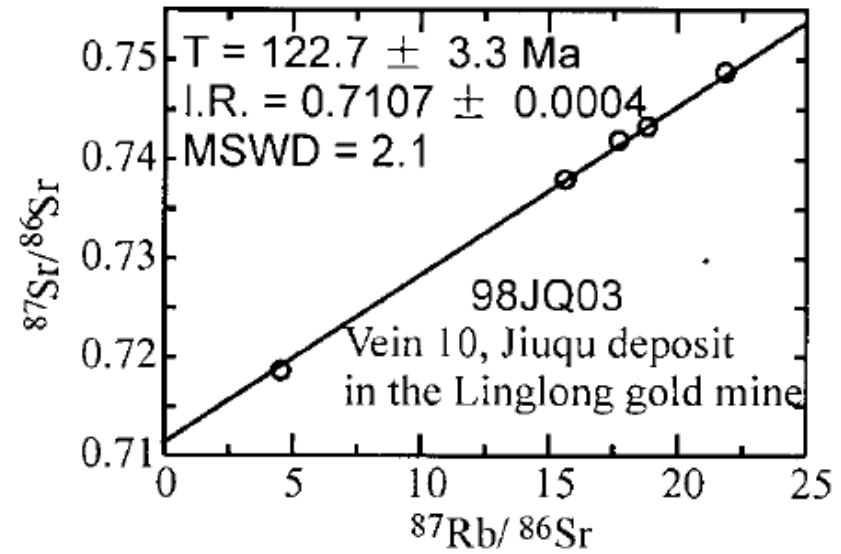
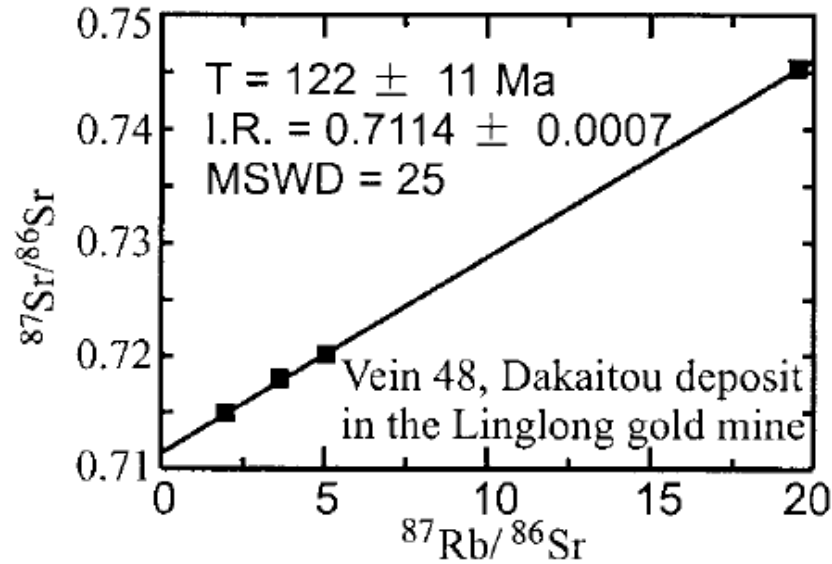




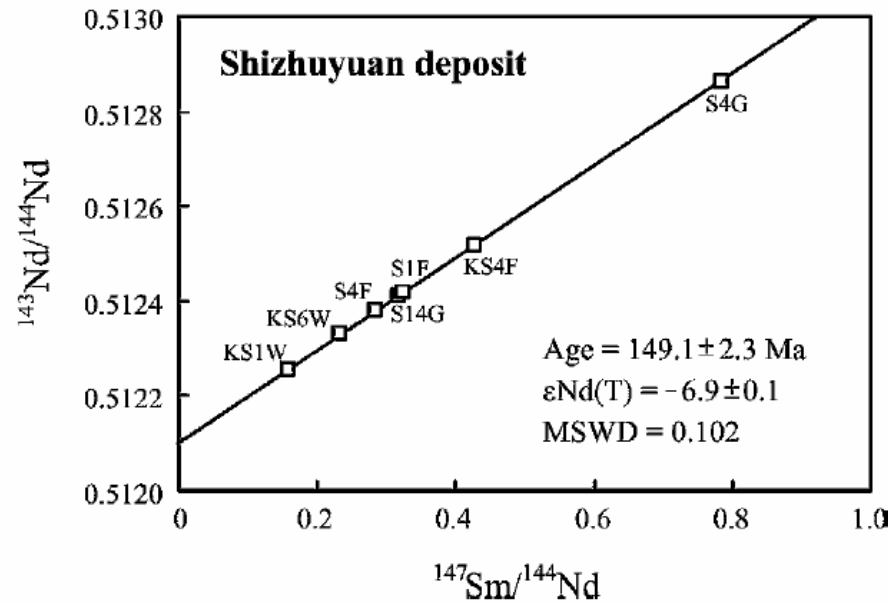
对石榴子石进行化学淋滤，可以消除富LREE矿物包裹体（如绿帘石、褐帘石、黝帘石、磷灰石、榍石、独居石等）的影响，提高定年的精度。

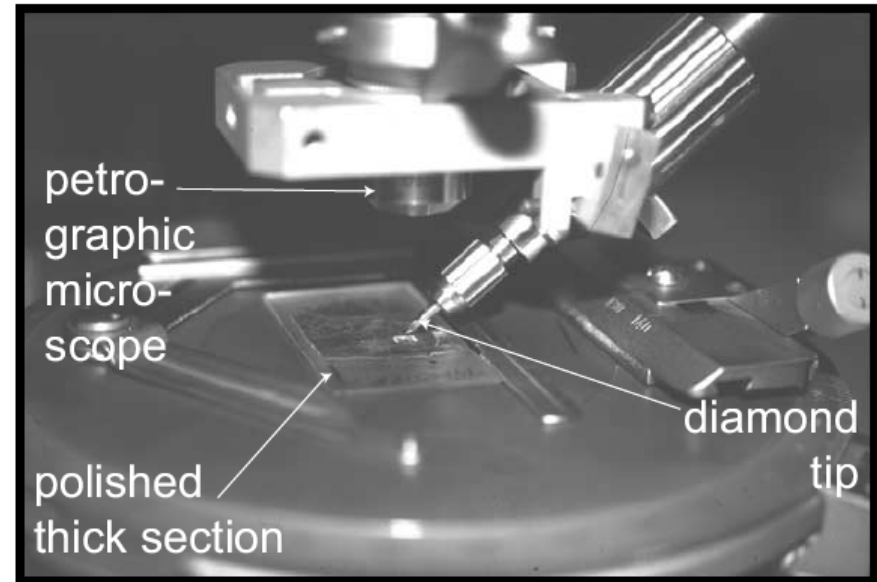
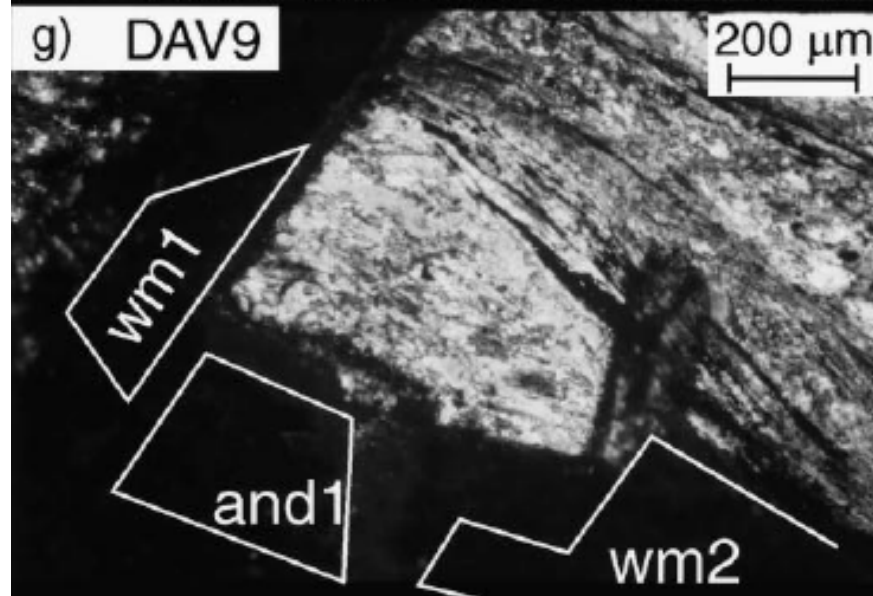
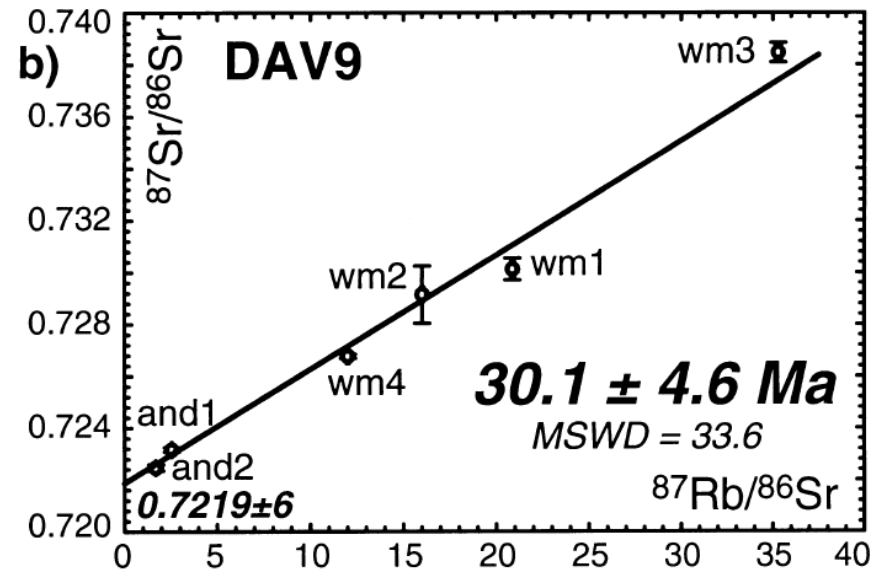
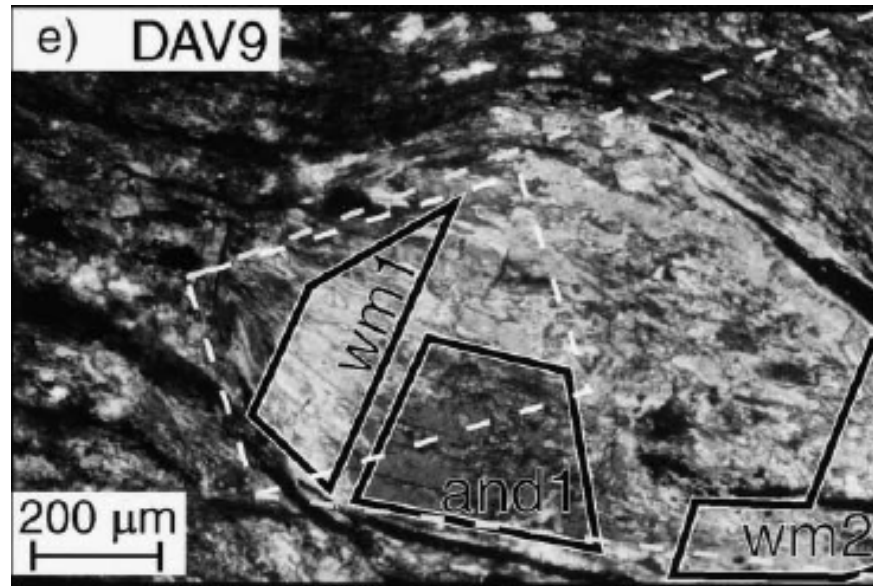
Garnet-mica schist, Alps变质基底石榴云母片岩(Thoni, 2003)

山东玲珑金矿的黄铁矿Rb-Sr定年 (Yang & Zhou, 2001)



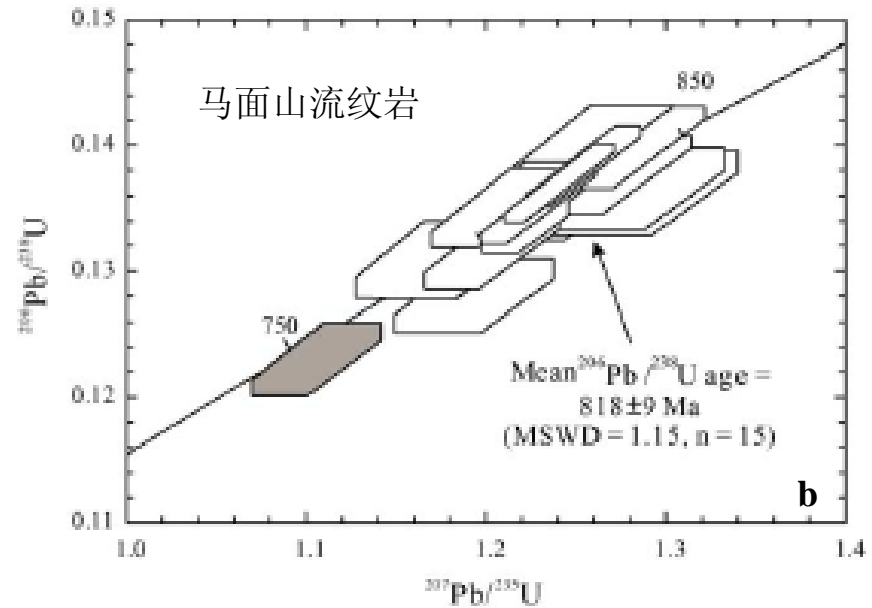
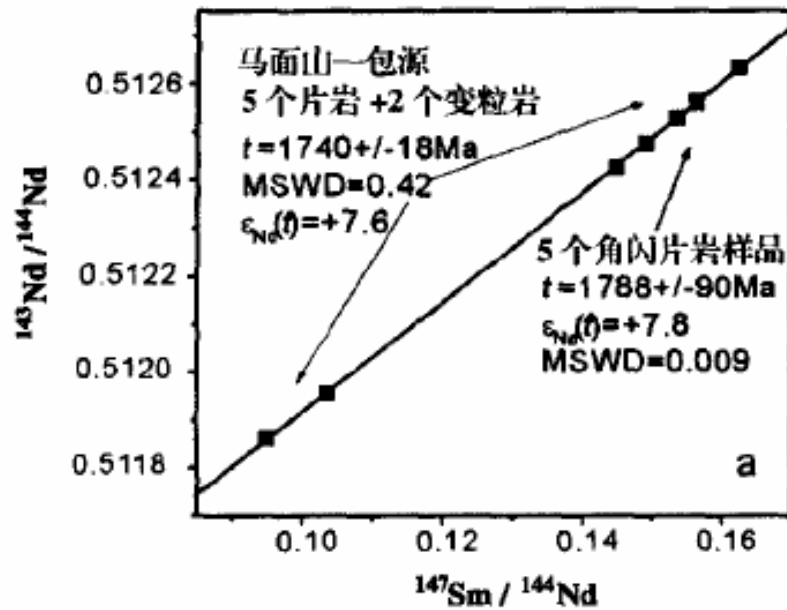
湖南柿竹园W-Sn-Mo-Bi多金属矿床Sm-Nd定年 (Li et al, 2004)



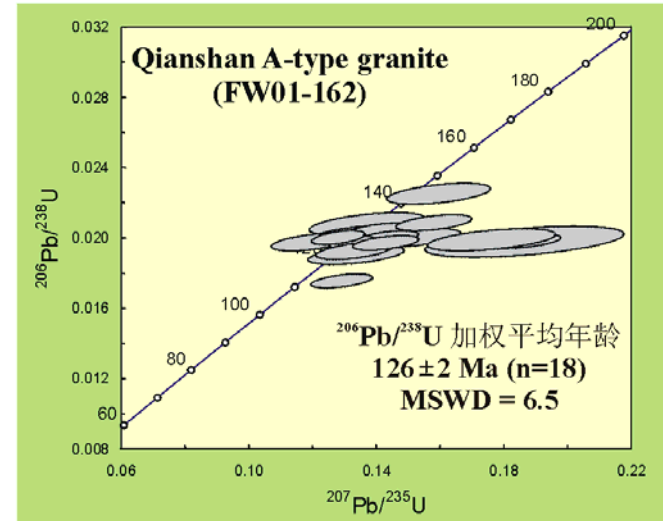
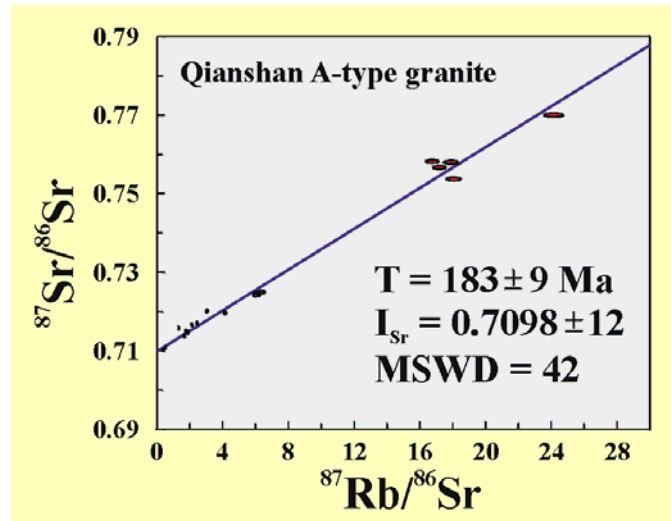
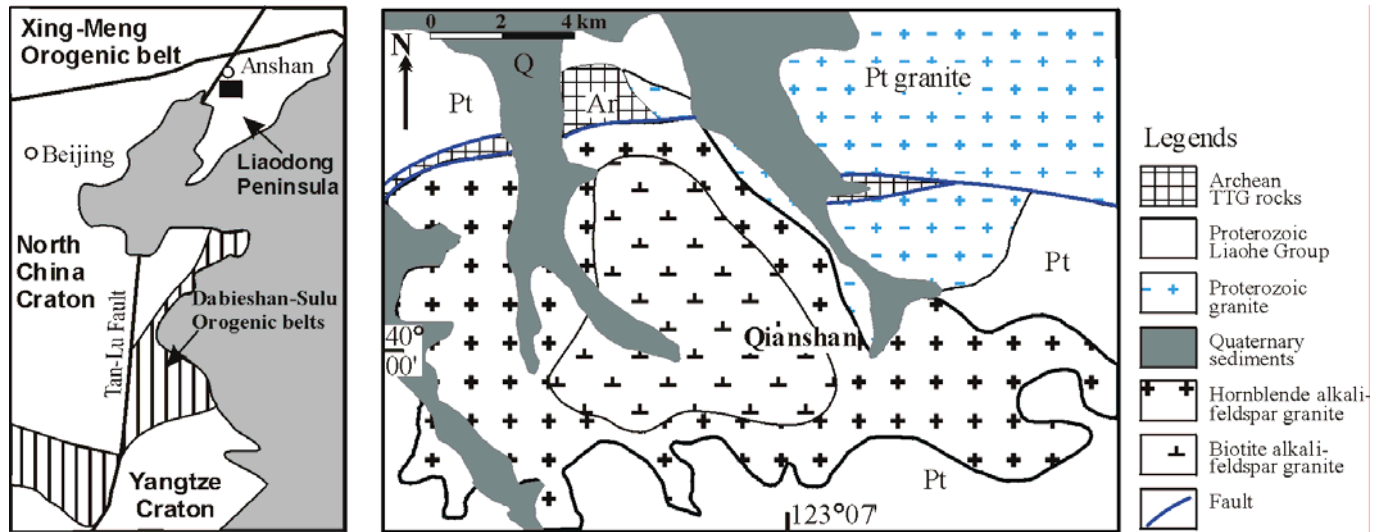


东阿尔卑斯断裂糜棱岩形成时代的Rb-Sr微等时线定年 (Müller et al., 2001)

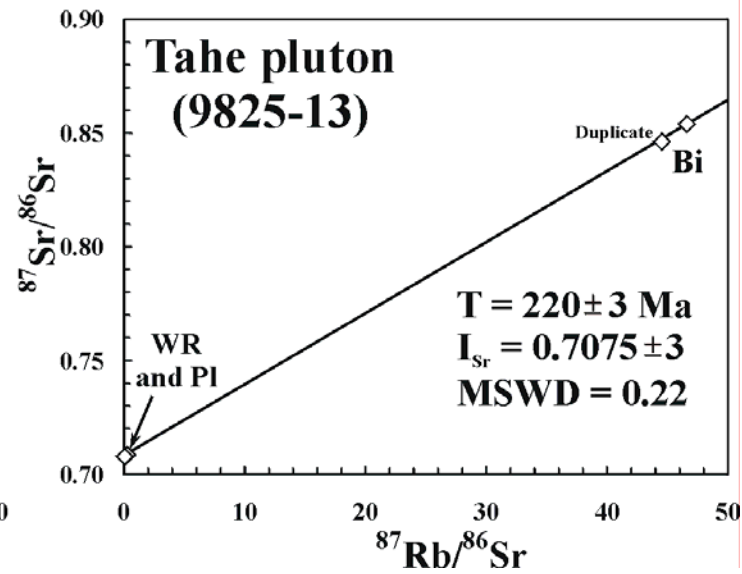
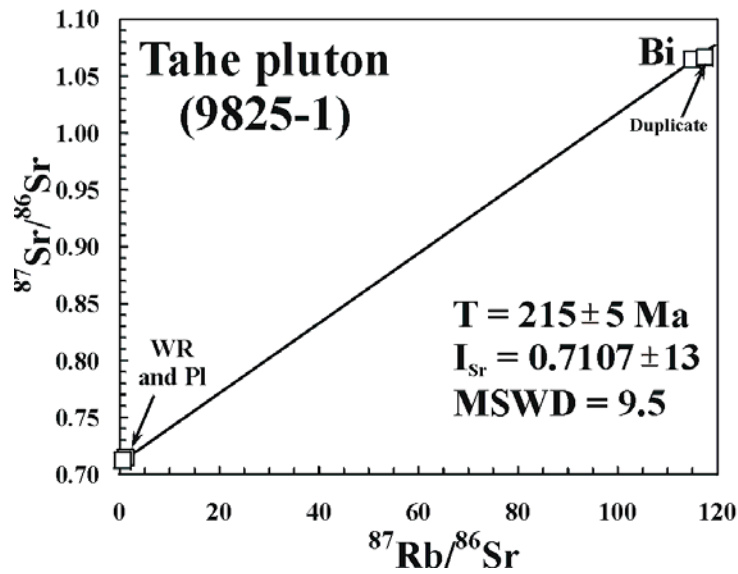
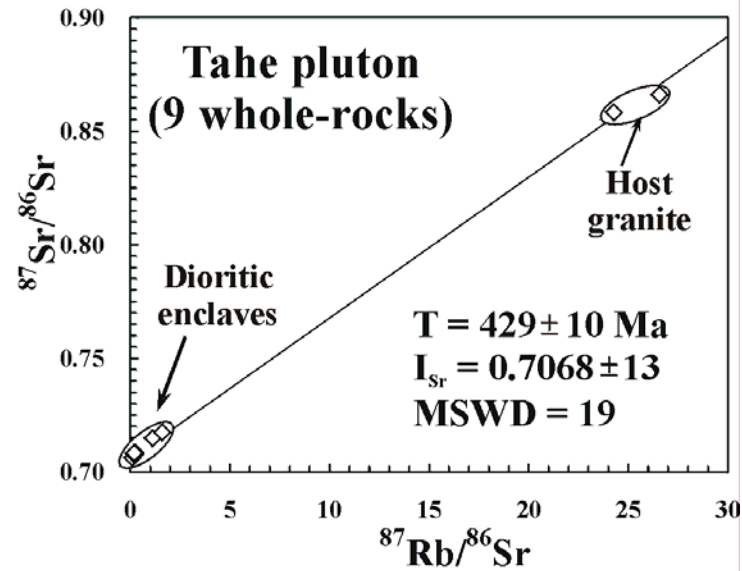
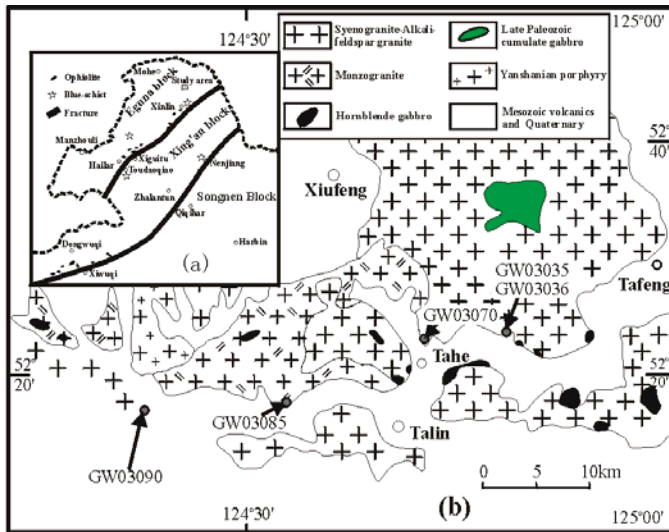
Pseud-isochron/errochron 实例



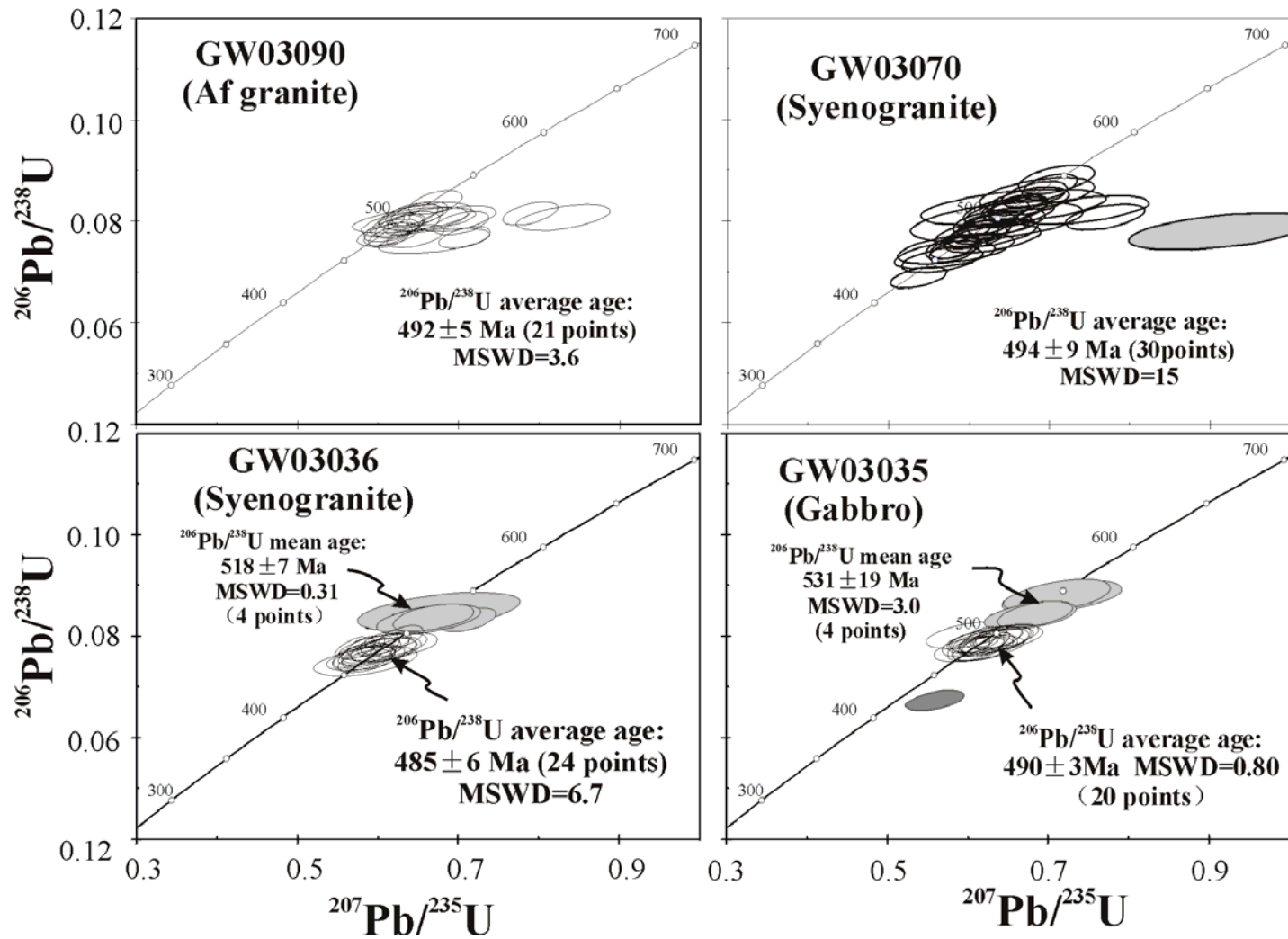
福建 (a) 马面山-包源绿片岩和变粒岩Sm-Nd相关图 (王鹤年等, 2003);
(b) 马面山流纹岩SHRIMP U-Pb一致图 (Li et al., 2005)



Yang et al. (in press)



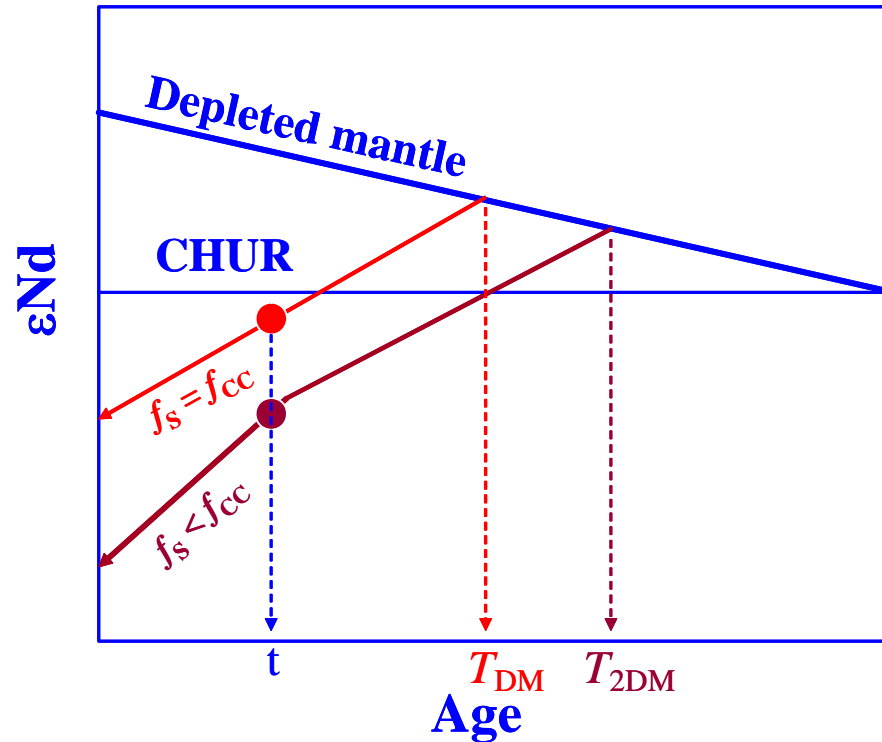
Wu et al. (unpublished data)



葛文春等 (2005)

Nd模式年龄定义

Nd模式年龄就是根据一定的模式前提假设计算获得的一个样品从其源区分离至今的时间（样品从源区分离时与源区的Nd同位素组成相同）。



基于大陆地壳从地幔中派生的基本假设，对地壳样品进行Nd模式年龄计算的前提 (Arndt & Goldstein, 1987):

- (1) 已知地幔源区的Sm-Nd同位素组成和演化；
- (2) 样品从地幔分离进入大陆地壳后在很短的时间内具有类似大陆地壳的Sm/Nd比值；
- (3) 样品的Sm/Nd同位素组成没有被后期地壳的地质作用所改变

Nd模式年龄的计算公式与参数

$$T_{\text{DM}} = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{sam}} - ({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}}{({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{sam}} - ({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}} + 1 \right)$$

$$T_{2\text{DM}} = T_{\text{DM}} - (T_{\text{DM}} - t) \frac{f_{\text{cc}} - f_{\text{s}}}{f_{\text{cc}} - f_{\text{DM}}}$$

$$({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.51315; \quad ({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.2137;$$

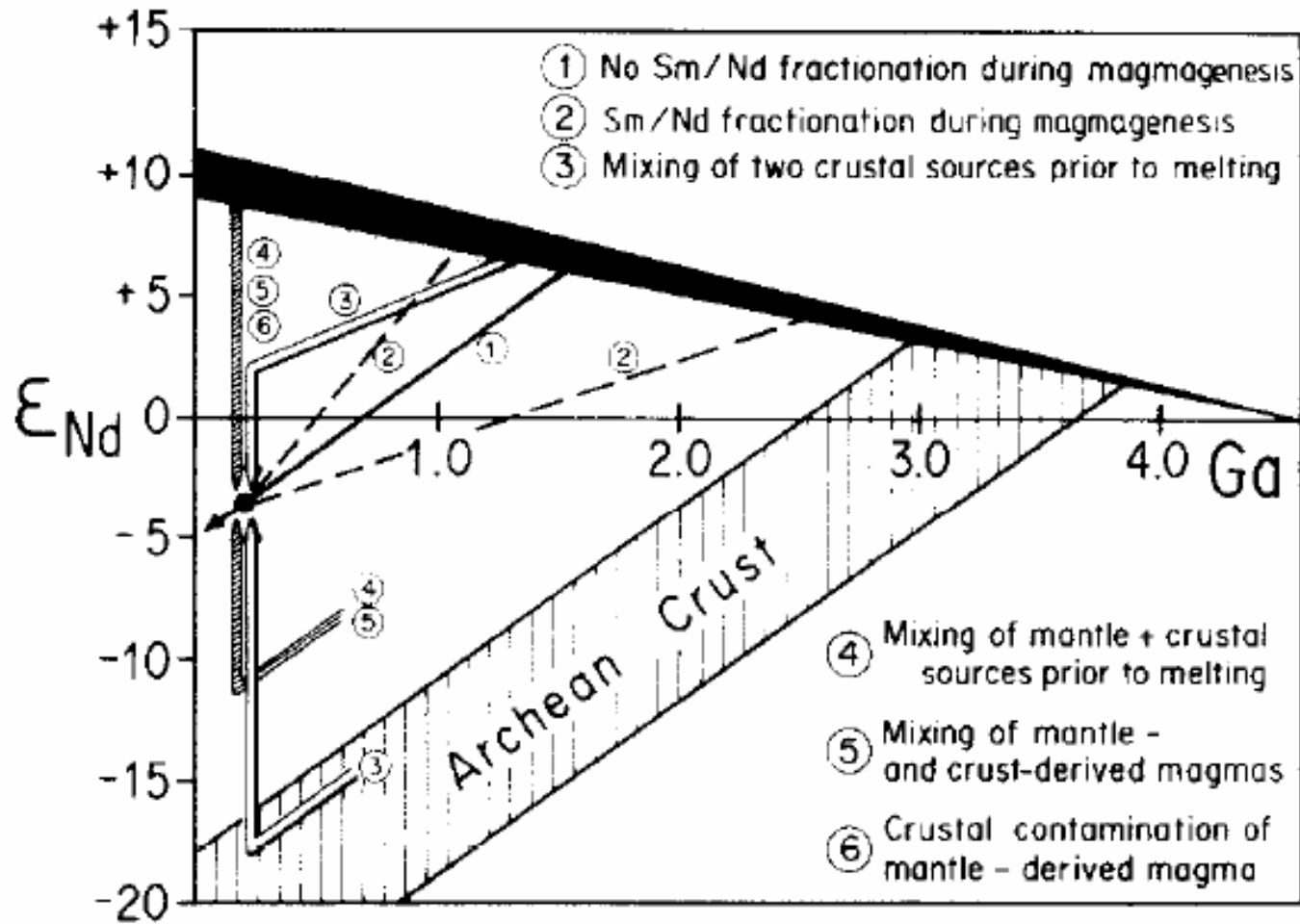
$$f_{\text{s}} = ({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{sam}} / ({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1$$

$$({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.1967$$

$$f_{\text{cc}} = -0.4; \quad f_{\text{DM}} = 0.8592$$

地壳样品Nd模式年龄的一般含义：平均地壳存留年龄

(Mean crustal residence age)



Jahn et al. (1990)

Nd模式年龄的适用性

对所有满足Nd模式年龄计算前提的地壳样品都可以计算Nd模式年龄，但实际上前提 (2)是判断样品是否可以计算Nd模式年龄的最直接依据。在实际应用中， $f_{\text{Sm/Nd}} = -4 \pm 1$ (或 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.118 \pm 0.018$)的大多数沉积岩、中酸性岩浆岩和变质岩是比较适合计算 T_{DM} 的样品。

当地壳样品的 $f_{\text{Sm/Nd}} < -5$ 或 > -3 时，不适合计算单阶段模式年龄 T_{DM} ，但可以根据两阶段模式年龄的前提假设计算 $T_{2\text{DM}}$ （需已知样品的形成年龄）。

应用1、大陆地壳演化

各类地壳岩石的Sm-Nd同位素组成和Nd模式年龄系统研究，示踪“平均地壳”组成和大陆地壳增长演化，并可以限定沉积岩的沉积时代下限。

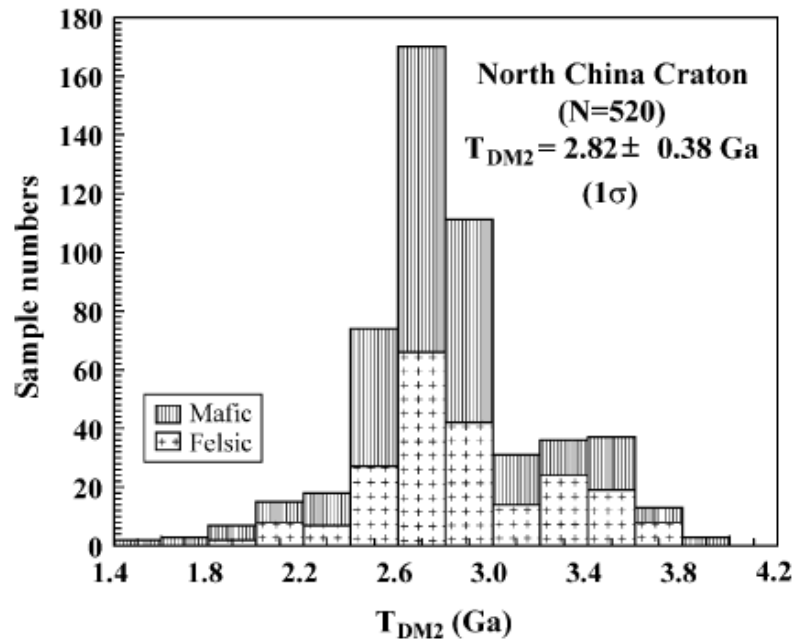
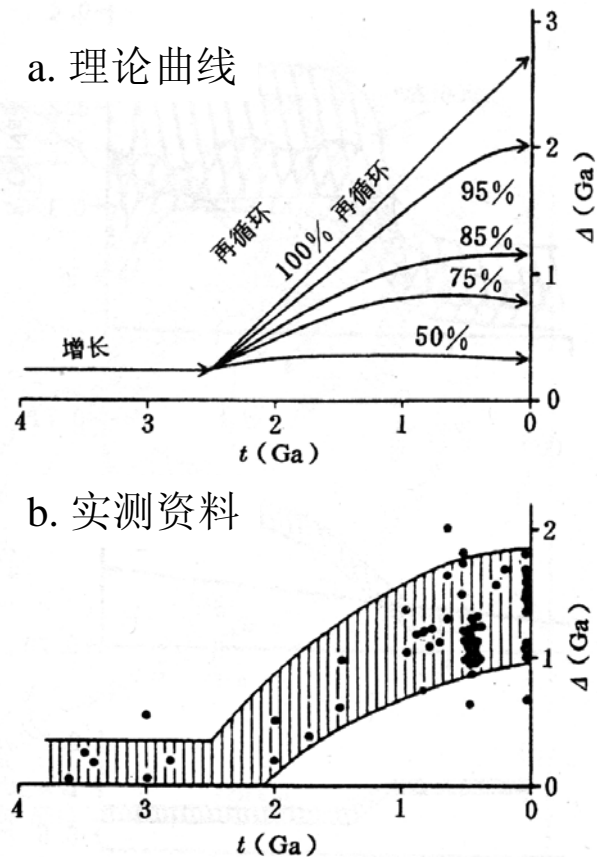


Fig. 3. A histogram of Nd model ages (T_{DM2}) for basement rocks throughout the North China Craton, showing an important crustal growth period at 3.0–2.6 Ga and minor events at 3.6–3.2 Ga and ~2.2 Ga. The average crustal age is about 2.82 Ga.

据Wu et al. (2005)

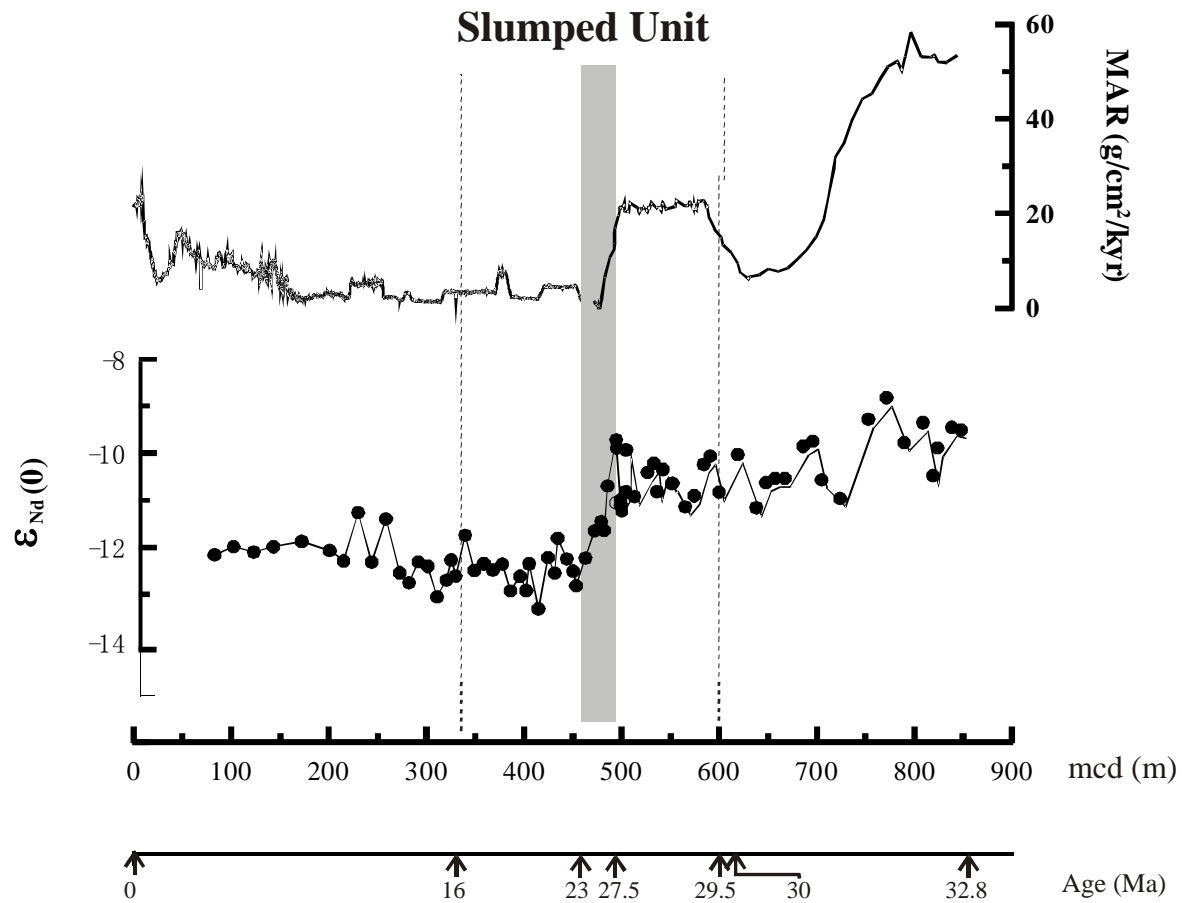


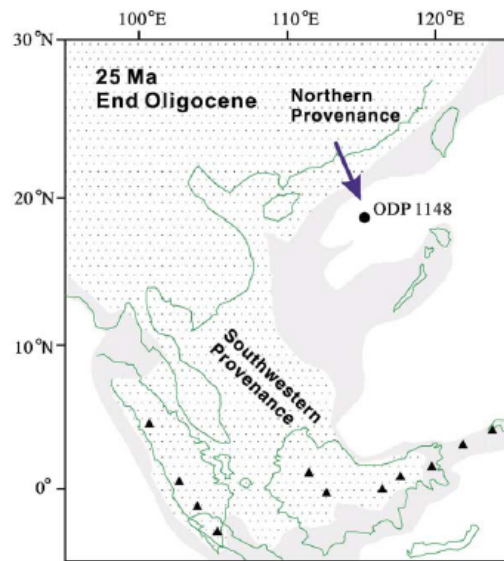
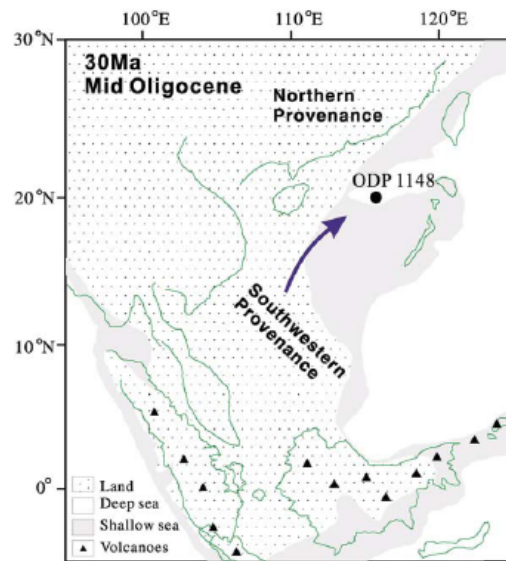
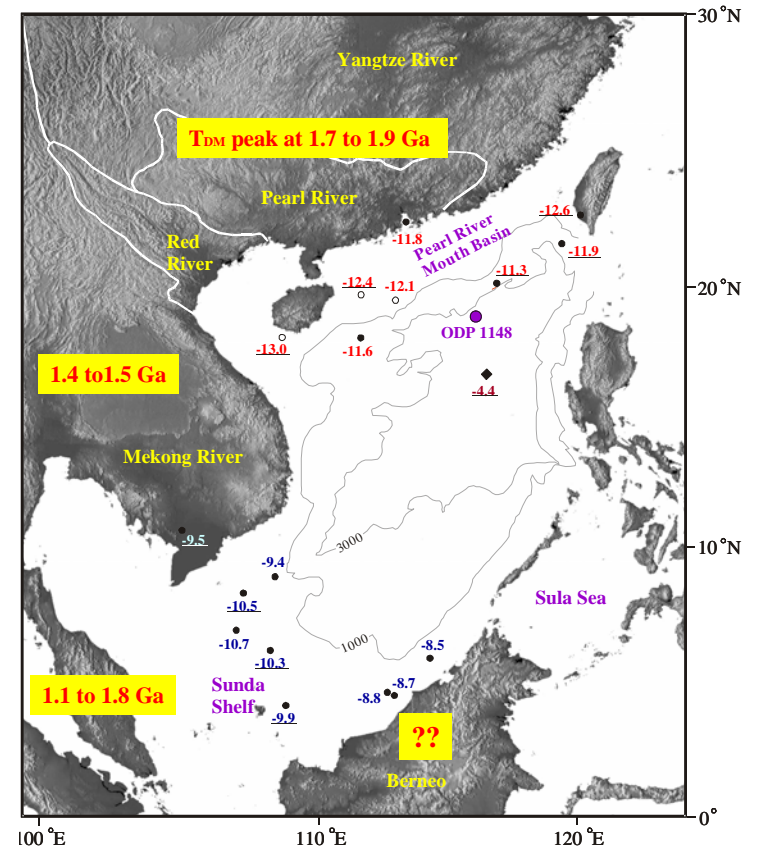
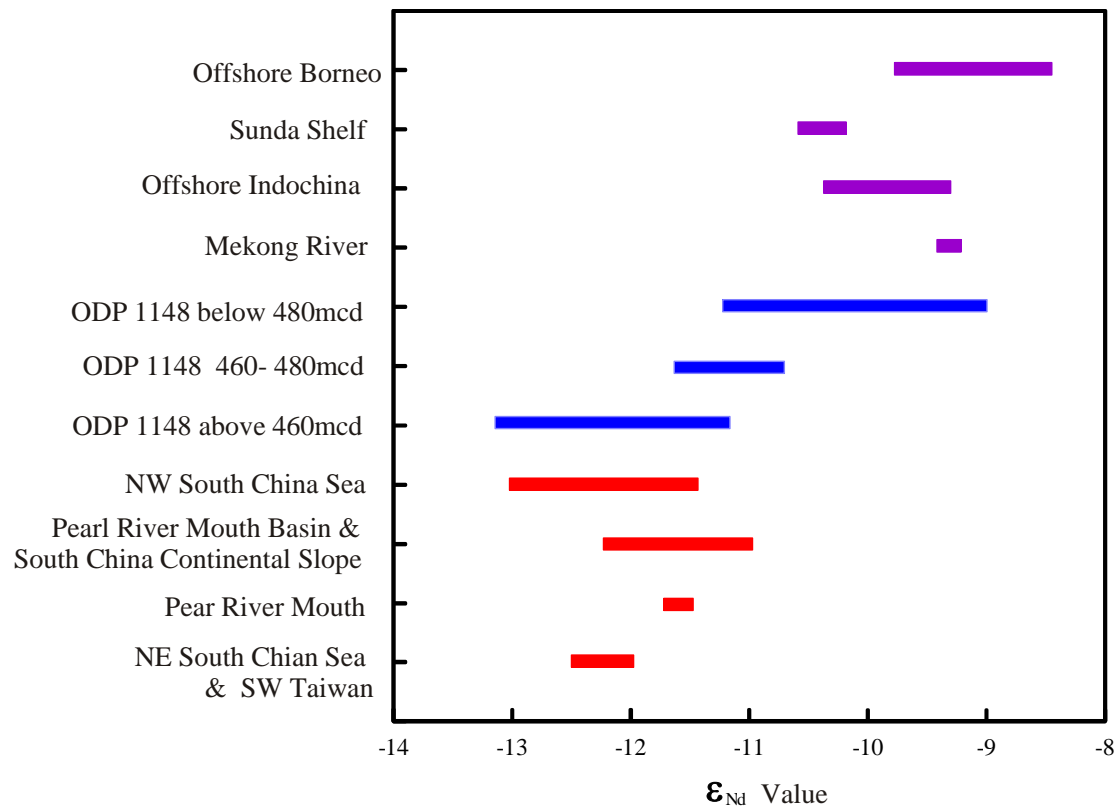
沉积岩的 Δ 演化趋势 (Veizer & Jansen, 1985)

(Δ = Nd模式年龄 - 沉积年龄)

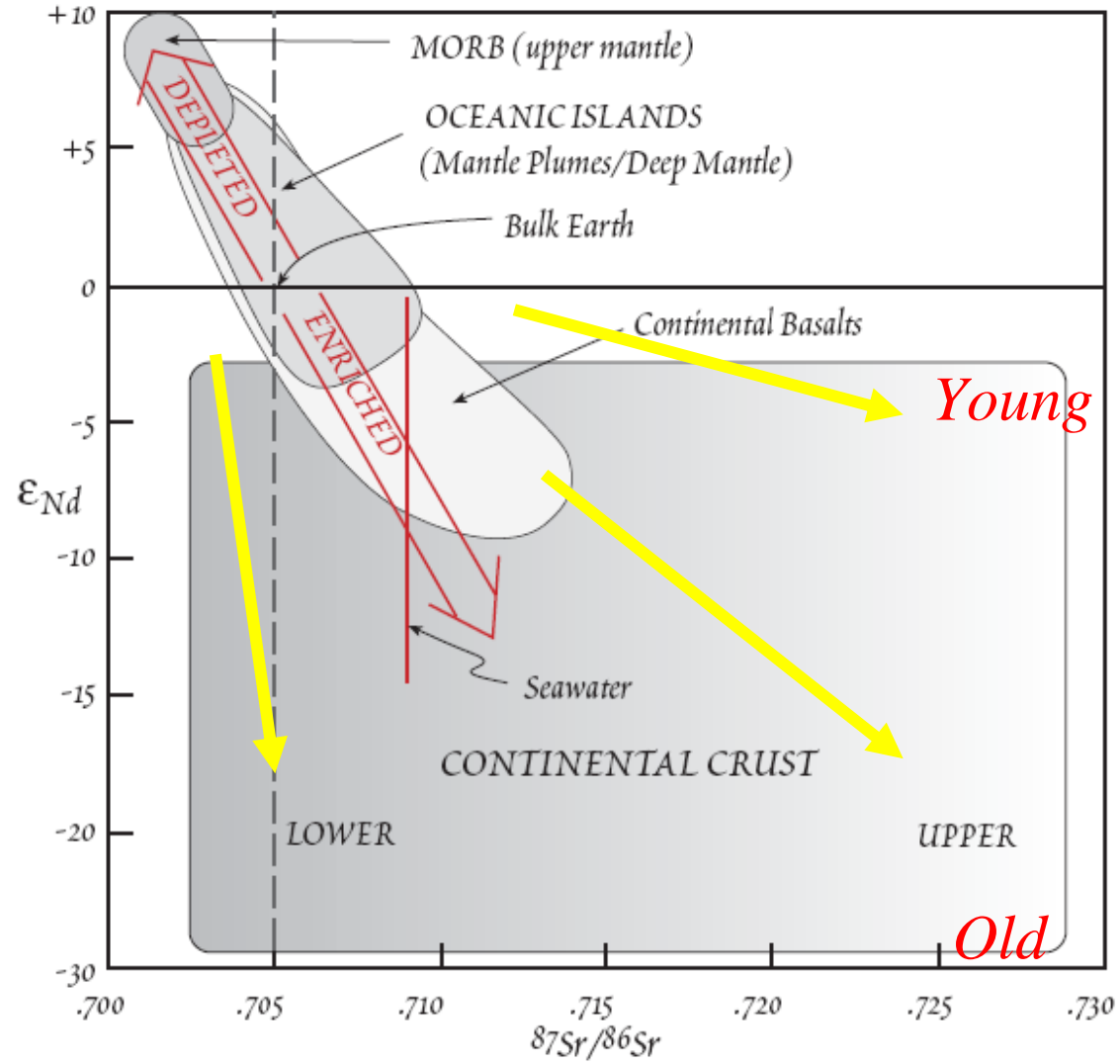
应用2、沉积物源区改变与构造演化

南海北部新生代沉积物源研究实例 (Li et al. EPSL, 2003, 211: 207-220)



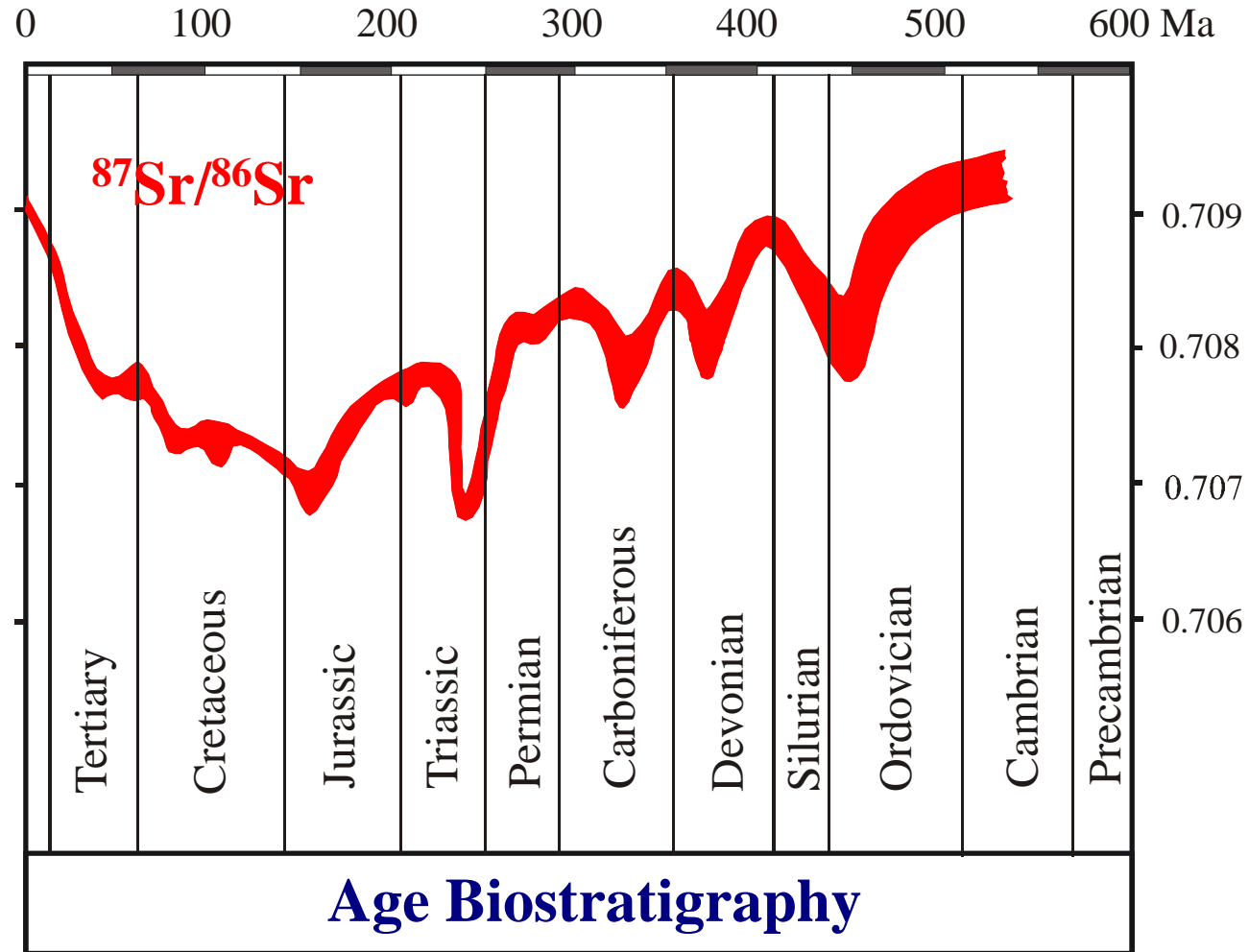


岩浆岩物质来源示踪



White (2001)

Sr同位素地层学



练习题

试根据相关元素的同位素丰度推导出 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 与 Rb/Sr 、 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 与 Sm/Nd 、 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 与 Lu/Hf 之间的关系式。

$$\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}} = \frac{\text{Rb}}{\text{Sr}} \times (2.69258 + 0.28299 \times \frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}})$$

$$\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}} = \frac{\text{Sm}}{\text{Nd}} \times (???)$$

$$\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} = \frac{\text{Lu}}{\text{Hf}} \times (???)$$