

金属矿床定年：现状、讨论

范宏瑞

中国科学院地质与地球物理研究所

矿床的形成

成矿作用: 是指在地球的演化过程中，使分散于地壳和上地幔的化学元素，在特定的地质环境下相对富集形成矿床的作用

成矿作用分类: 内生成矿作用
外生成矿作用
变质成矿作用
叠加成矿作用

成矿作用

(1) 内生成矿作用：

主要是由地球内部的能量作用导致形成各种矿床的地质作用。地球内部能的来源有多种方式，如放射性元素蜕变能、岩浆热能、在地球重力场中物质调整过程中释放出的能量等。内生成矿作用按其物理化学条件不同，可分为岩浆成矿作用、伟晶成矿作用、接触交代成矿作用和热液成矿作用。

(2) 外生成矿作用：

主要是在太阳能和生物能影响下，在岩石圈上部、水圈、气圈和生物圈的作用过程中，导致元素集中，从而形成矿床的作用。外生成矿作用可分为风化成矿作用和沉积成矿作用两大类。

(3) 变质成矿作用：

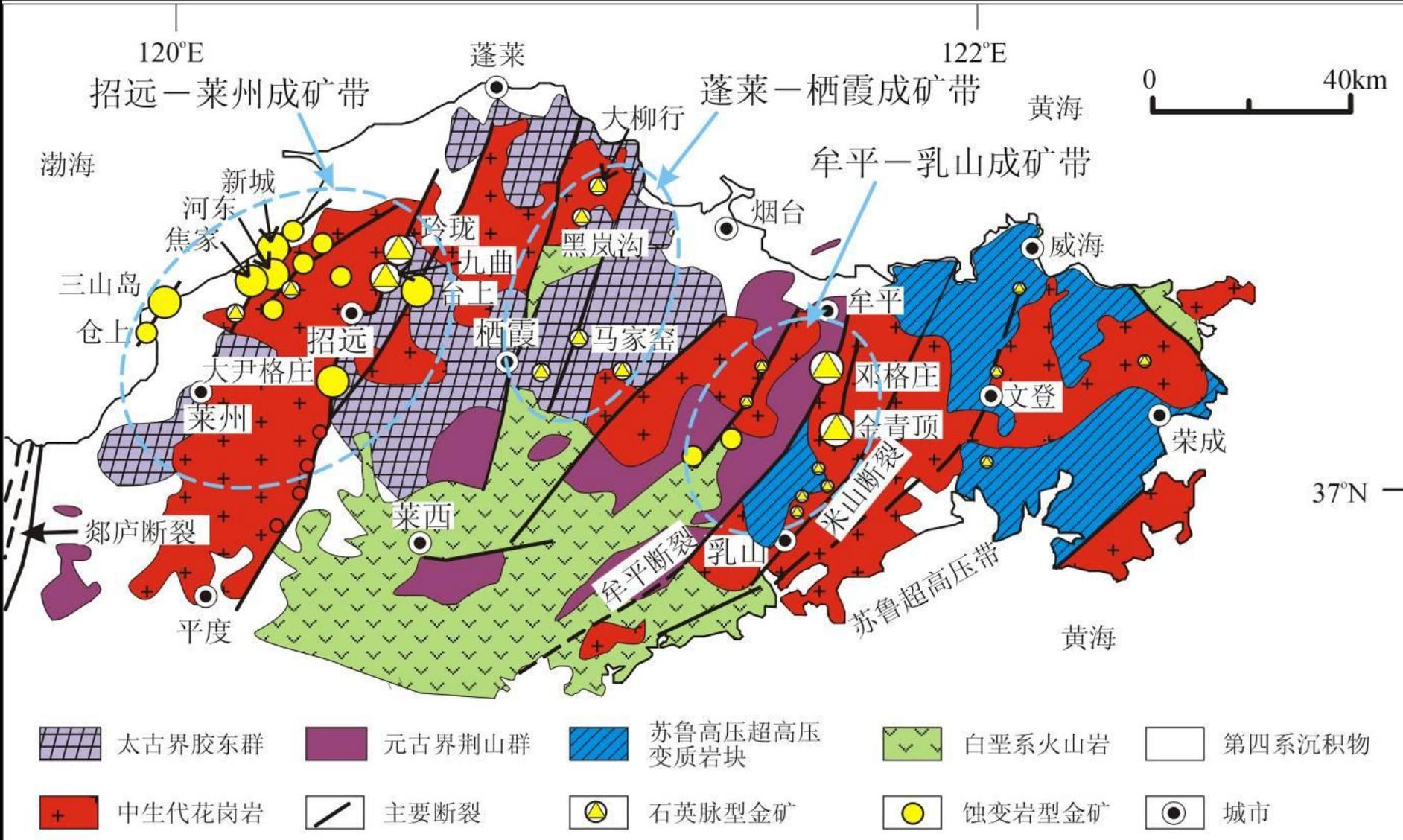
在内生作用和外生作用中形成的岩石或矿床，由于地质环境发生变化，特别是温度、压力的变化，并有其它气液的参加，使其矿物成分、化学成分、物理性质及结构构造等都要发生改变，造成元素集中，形成矿床的过程变质成矿作用可分为接触变质成矿作用、区域变质成矿作用和混合岩化成矿作用等。

(4) 叠加成矿作用：

为一种复合的成矿作用，是在先形成的矿床或含矿建造基础上，又有后期成矿作用叠加，从而形成矿床的过程叠加过程可使矿床成矿或更加富集，同时也可使原矿床贫化。

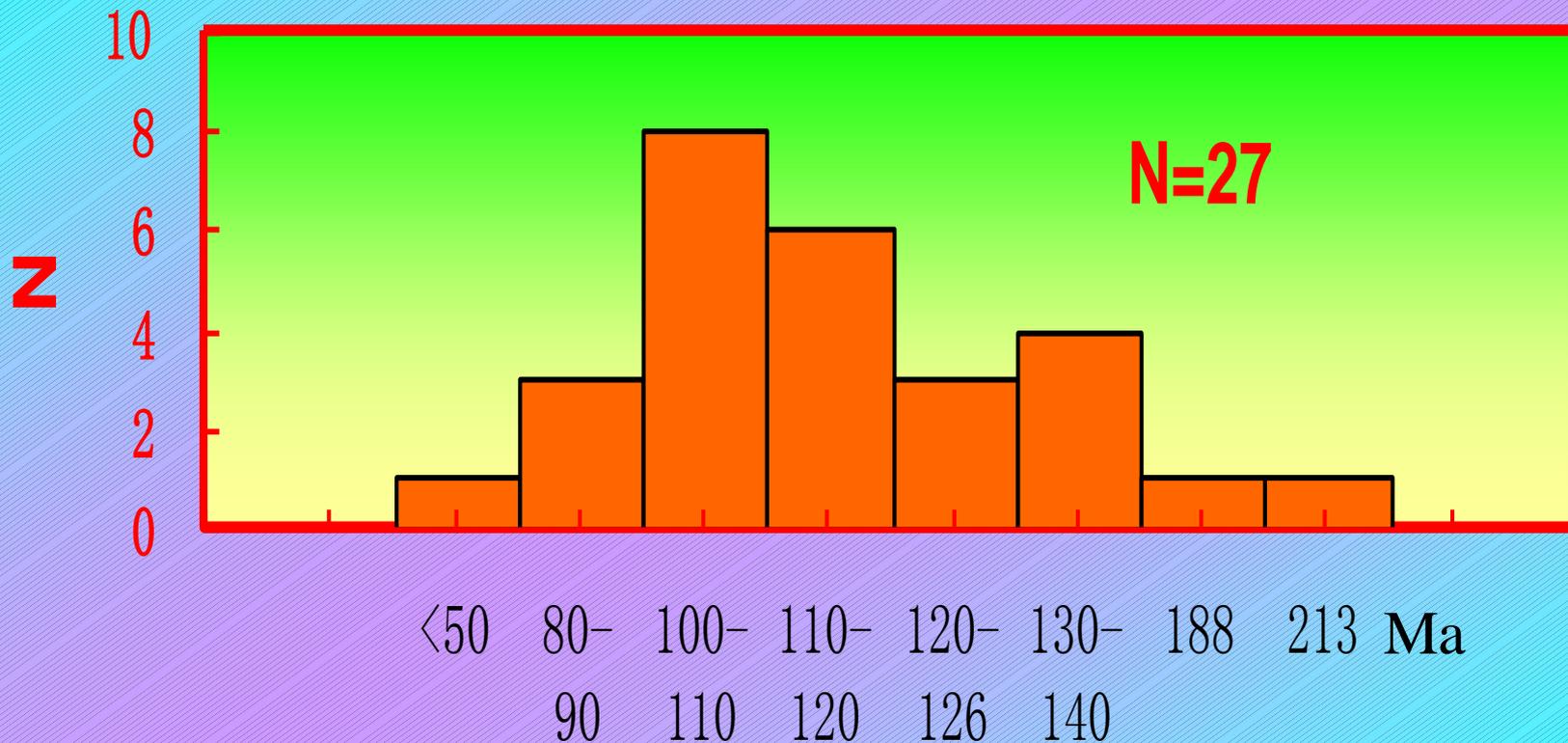
金属矿床定年的重要性:

胶东金矿床的成矿时代



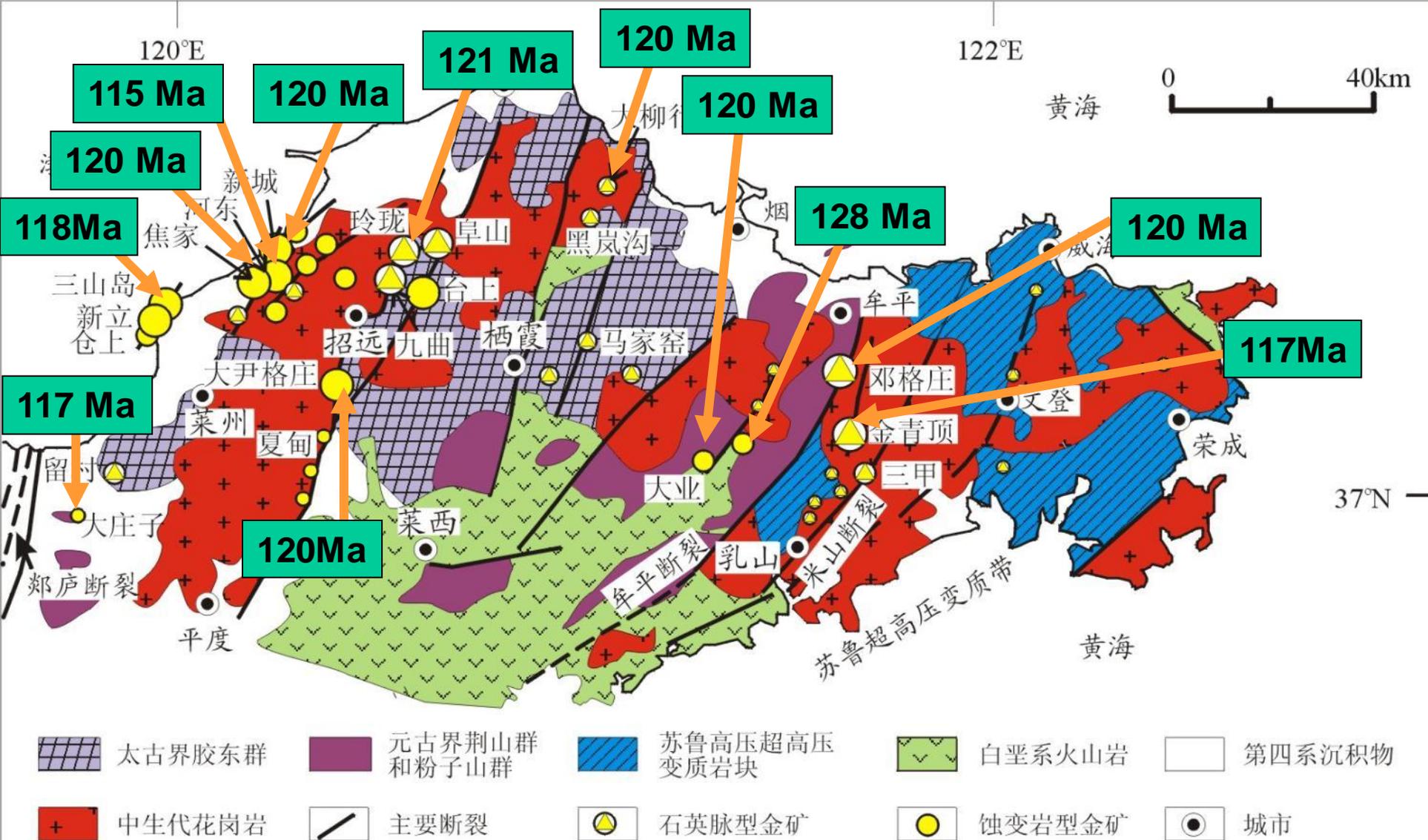
前人所测得的胶东地区金矿成矿时代分布图

2000年之前:



方法: 石英流体包裹体Rb-Sr等时线年龄
蚀变岩及矿物K-Ar和 Rb-Sr等时线年龄

胶东金成矿集中在~120 Ma: 短时成矿



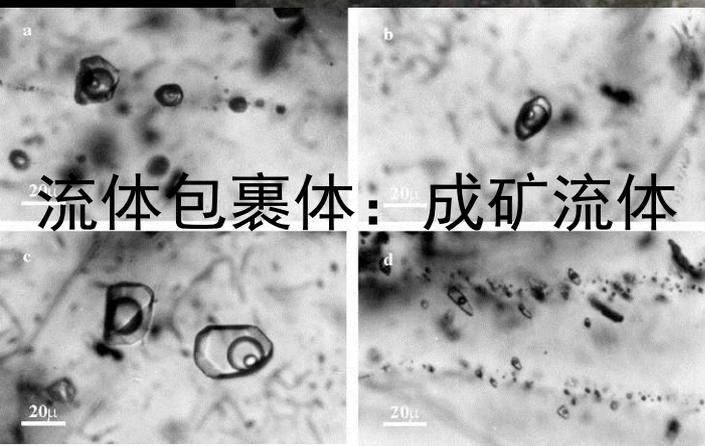
胶东金青顶金矿含金石英脉

花岗岩

基性脉岩

脉石矿物

矿石矿物



流体包裹体：成矿流体

金属矿床矿物组合

传统的金属矿床定年： 脉石(蚀变)矿物和副矿物——间接定年法

Rb-Sr: 绢云母、钠长石、钾长石、绿泥石、
白云母、水白云母和伊利石

Sm-Nd: 萤石、电气石、方解石

Ar-Ar: 钾长石、绢云母、白云母、伊利石、
绿泥石、石英

U-Pb: 锆石、独居石

金属矿床定年： 矿石矿物—直接定年法

Rb-Sr: 闪锌矿、黄铁矿、硫砷碲汞矿

Sm-Nd: 白钨矿、黑钨矿、闪锌矿

U/Pb-Pb: 黄铁矿、磁黄铁矿、磁铁矿、锡石

Re-Os: 辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿

Ar-Ar: 黄铁矿

流体包裹体年代学方法

流体包裹体寄主矿物

- 石英（最主要对象）
- 萤石、方解石、闪锌矿、方铅矿



包裹体的提取方法

- 爆裂法
- 真空研磨法

测试技术

- Rb-Sr
- Sm-Nd
- Ar-Ar

Rb-Sr法确定矿床形成年龄

采用Rb-Sr等时线法测定金属矿床的成矿年龄不是件容易的事，但由于Rb-Sr法测试流程成熟、数据可靠，在年龄测定过程中，所获得的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值还可用来推测成矿物质的来源，而目前的实验技术可以检测矿物中极微量的Rb和Sr(达 $10^{-11} \sim 10^{-12}$)及其同位素组成，目前采样测定蚀变和热液矿物、矿石矿物以及矿石和脉石矿物中的流体包裹体等来进行Rb-Sr法成矿年龄的测定。

Rb-Sr法确定矿床形成年龄

Rb-Sr法要求样品同源、同时、具有相同的同位素初始比值、形成后处于封闭体系和Rb/Sr比值具差异性。由于成矿体系为相对开放体系，成矿过程中存在复杂的水/岩相互作用，成矿期后的流体、构造和岩浆活动等还可能改变其原来的矿物组合，从金属矿床中采集的样品很难满足Rb-Sr等时线定年的基本前提条件。

除了在野外和室内详细研究成矿作用的多期性和阶段性，认真进行矿物共生组合研究，并仔细挑选属于同一成矿期次的蚀变矿物外，还必须对构成等时线的样品进行筛选。

Rb-Sr法确定矿床形成年龄

Tretbar et al., 2000, *Geology*

Galkhaite [(Cs,Tl)(Hg,Cu,Zn)₆(As,Sb)₄S₁₂]

硫砷碲汞矿

TABLE 1. ANALYTICAL DATA FOR GALKHAITE FROM THE GETCHELL MINE

Element	Range (wt%)	Average (wt%)
Cs	3.7–7.1	5.1
Tl	nd–4.2	2.4
Hg	48.3–53.0	50.7
Cu	1.6–3.6	3.2
Zn	0.3–2.5	1.8
As	14.5–15.9	15.2
Sb	nd–3.1	0.3
S	20.9–22.7	22.0

Note: Results are from electron-microprobe analyses of 21 crystals collected from the north pit (from Chen and Szymanski, 1981). The average composition of Getchell galkhaite is $\text{Cs}_{0.67}\text{Tl}_{0.21}(\text{Hg}_{4.42}\text{Cu}_{0.88}\text{Zn}_{0.48})_{55.78}(\text{As}_{3.55}\text{Sb}_{0.04})_{53.59}\text{S}_{12}$, with sulfur normalized to 12; nd—not detected.

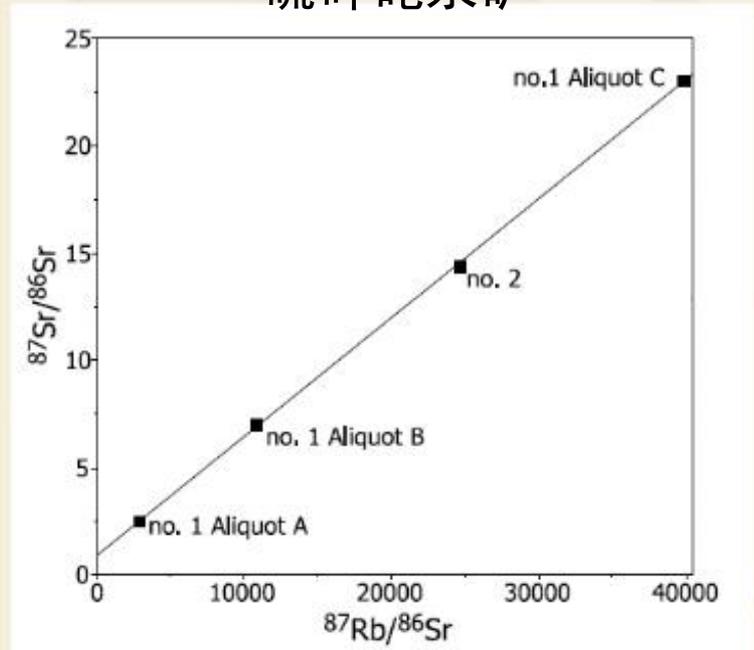


Figure 2. Rb-Sr isotopic diagram for analyses of galkhaite from Getchell Mine, Humboldt County, Nevada. Best-fit line through data indicates age of 39.0 ± 2.1 Ma for galkhaite crystallization. Isotopic data are in Table 2.

Carlin型金矿是一种很重要的金矿类型，但由于缺乏适合定年的矿物，对这类金矿的定年研究一直是个难题。在美国内华达的一些Carlin型金矿中存在一种含Tl的硫砷碲汞矿。岩相学证据以及它含有很高的金含量，证明它是与载金的含砷的黄铁矿同期形成的。由于Cs和Tl与Rb的类质同相置换，硫砷碲汞矿含有很高的Rb含量和Rb/Sr比值，使得它适合于Rb-Sr定年。Tretbar等(2000)利用硫砷碲汞矿的Rb-Sr同位素组成，获得了美国内华达Getchell金矿的精确成矿年龄为 39.0 ± 2.1 Ma。

Rb-Sr法确定矿床形成年龄：玲珑石英脉型金矿

黄铁矿Rb-Sr法年龄：
122 – 123 Ma

Yang et al., 2001, Geology

指示：黄铁矿可具有宽范围的
Rb/Sr比组成

Sample number	Location*	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ
98DK03	DK, 48	1.098	1.609	1.978	0.714932	16
		0.802	0.638	3.629	0.717951	24
98DK07	DK, 48	0.369	0.203	5.254	0.719975	35
		0.413	0.060	19.519	0.745334	32
98JQ01	JQ, 10	0.062	0.098	1.828	0.714928	38
98JQ03	JQ, 10	1.243	0.793	4.540	0.718609	12
		0.732	0.120	17.716	0.741911	26
		0.308	0.047	18.835	0.743299	48
		1.249	0.166	21.857	0.748777	23
		0.307	0.057	15.630	0.737964	11
98JQ07	JQ, 10	0.517	0.071	21.147	0.745900	20
		0.581	0.086	19.614	0.743007	32
		0.957	0.189	14.689	0.734583	13
		0.603	0.108	16.201	0.737008	24
98JQ09	JQ, 18	0.028	0.178	0.459	0.711858	12
98LL06	LL, 108	0.023	0.040	1.630	0.713005	50

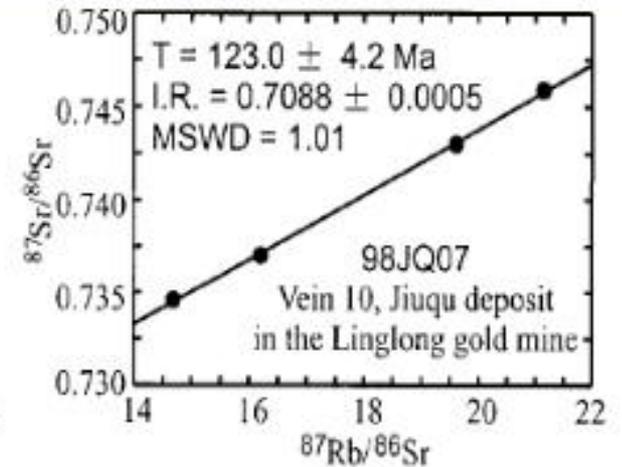
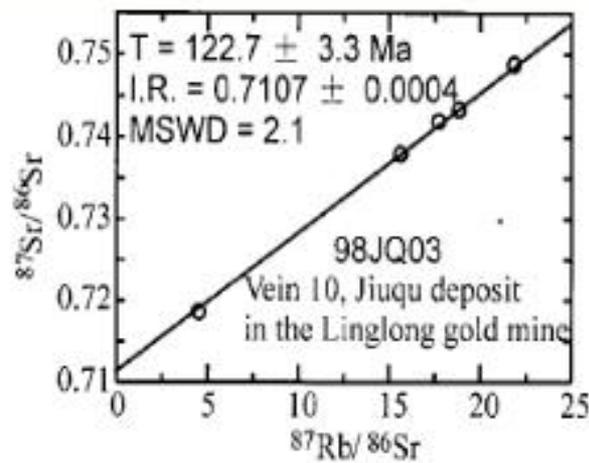
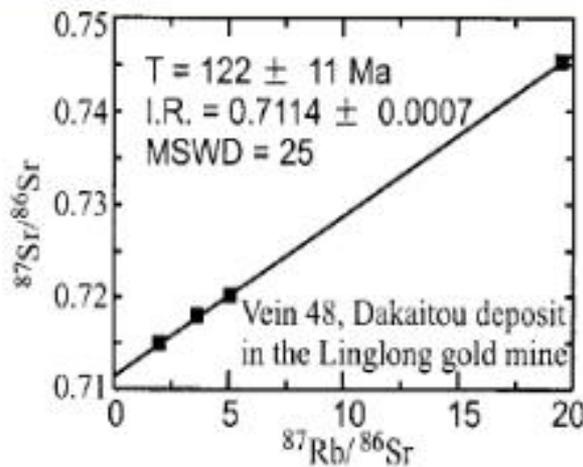
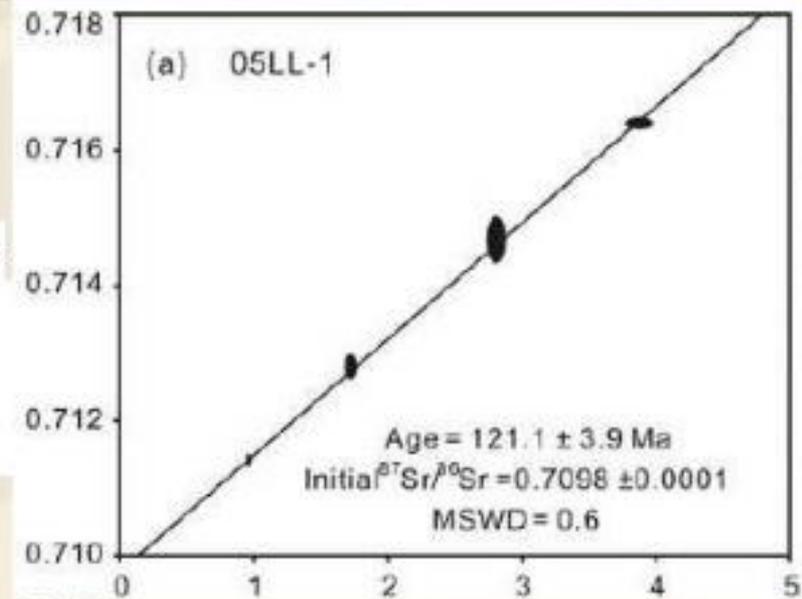


Figure 2. Rb-Sr isochrons for pyrite subsamples from Linglong gold mine. I.R. is initial ratio; MSWD is mean square of weighted deviates.

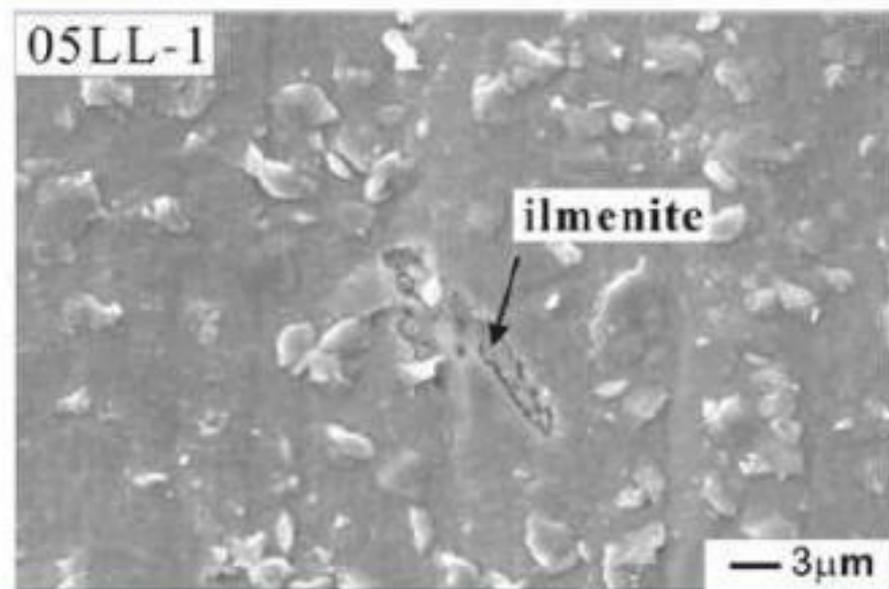
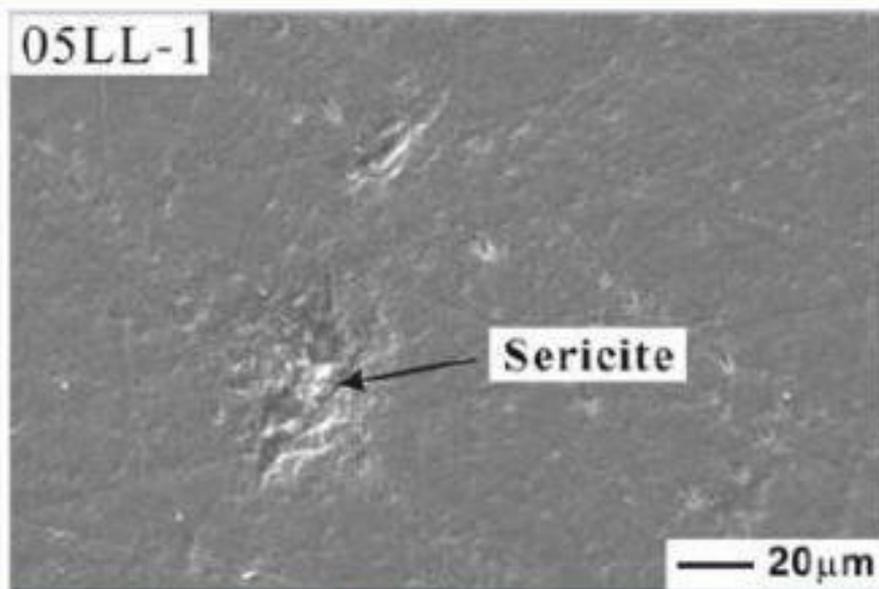
Rb-Sr法确定矿床形成年龄

05LL-1 石英脉中立方体状黄铁矿

		Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
05LL-1	g1	0.106	0.080	3.87	0.71639 (7)
pyrite	g2	0.054	0.056	2.80	0.71467 (29)
	g3	0.041	0.126	0.95	0.71139 (7)
	g4	0.047	0.080	1.71	0.71277 (14)



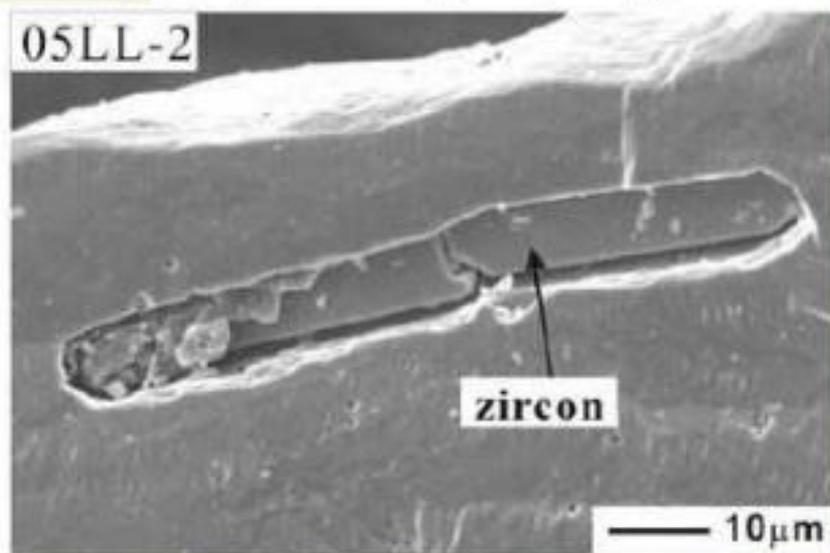
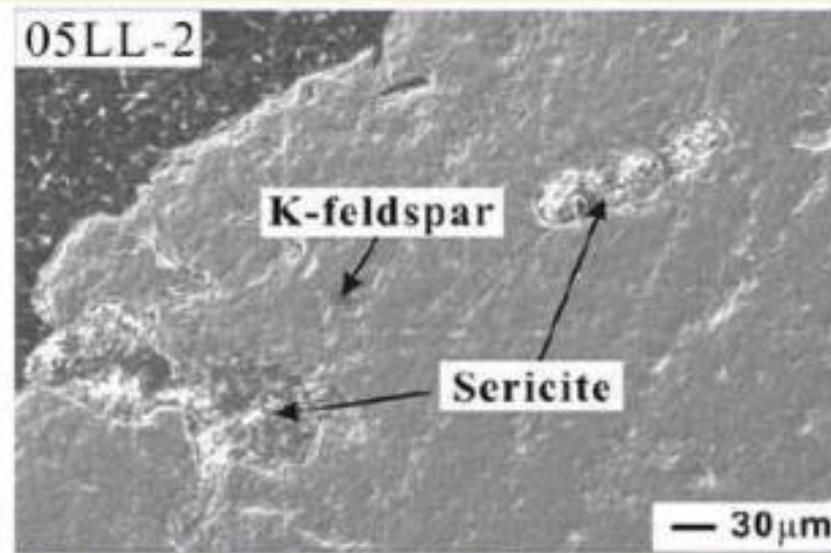
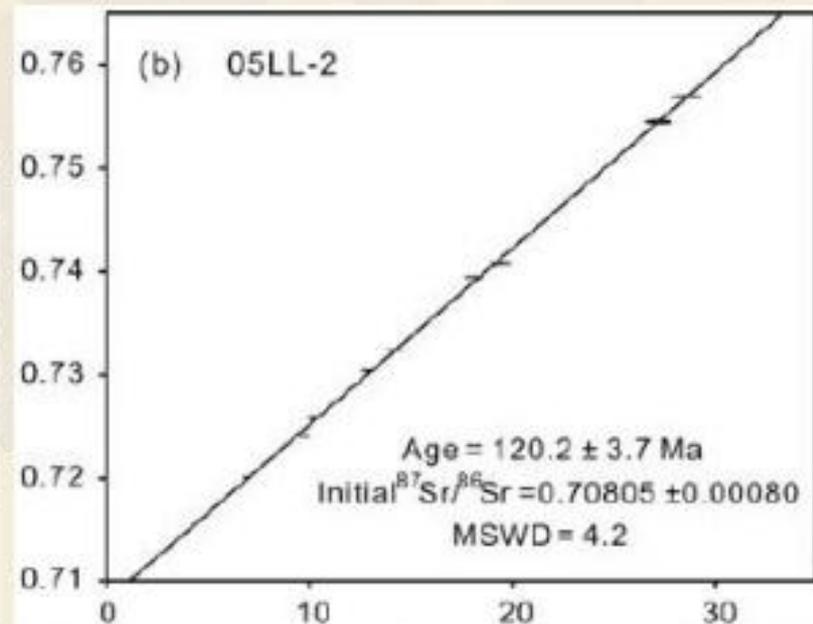
Li et al., 2008. OGR



Rb-Sr法确定矿床形成年龄

05LL-2 烟灰色石英脉中黄铁矿

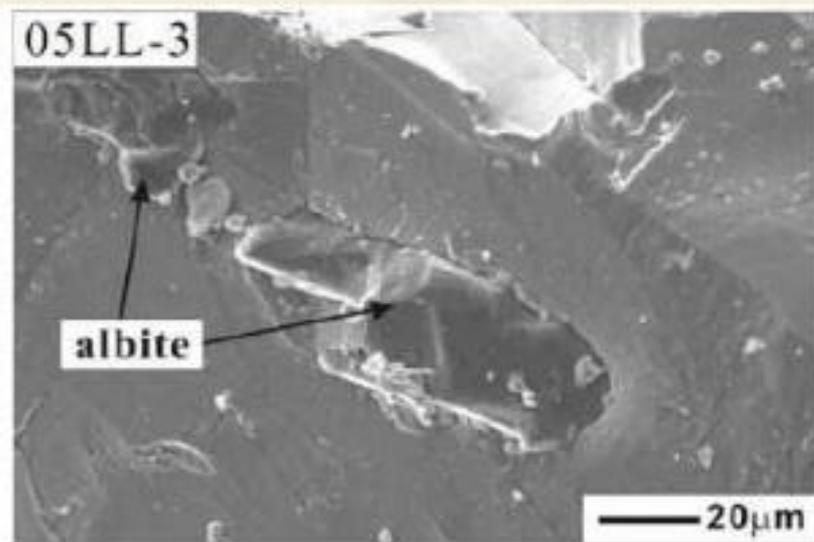
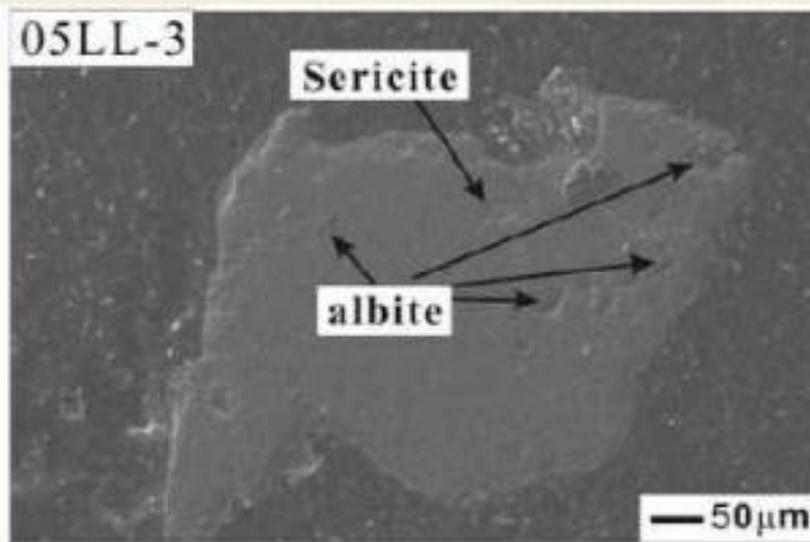
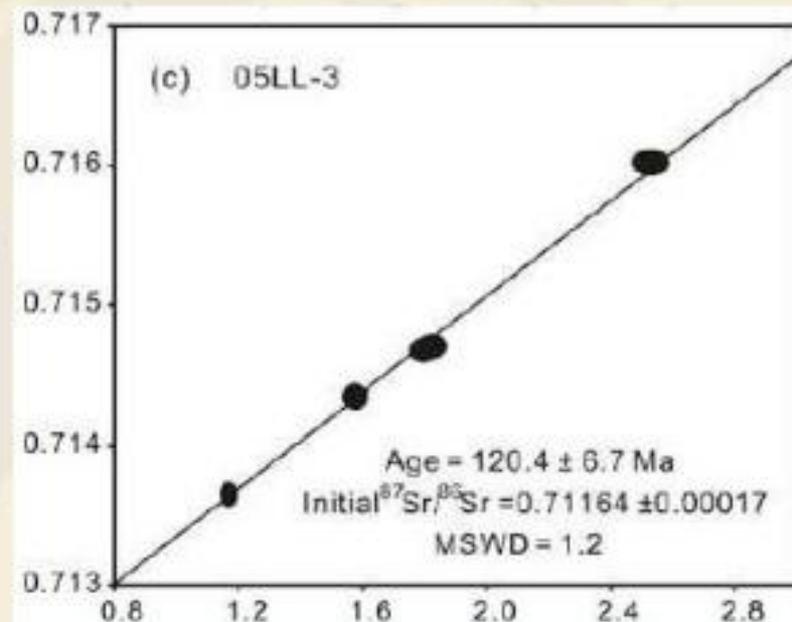
		Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
05LL-2	g1	1.22	0.20	18.11	0.73933 (7)
pyrite	g2	0.45	0.13	9.67	0.72384 (4)
	g3	0.79	0.08	28.59	0.75698 (8)
	g4	0.42	0.09	14.16	0.73220 (6)
	g5	1.00	0.15	19.40	0.74076 (7)
	g6	0.36	0.08	12.81	0.73025 (7)
	g7	0.99	0.42	6.81	0.71990 (4)
	g8	0.58	0.17	10.12	0.72560 (14)
	g9	1.16	0.12	27.21	0.75447 (14)



Rb-Sr法确定矿床形成年龄

05LL-3 被交代花岗岩细脉中黄铁矿

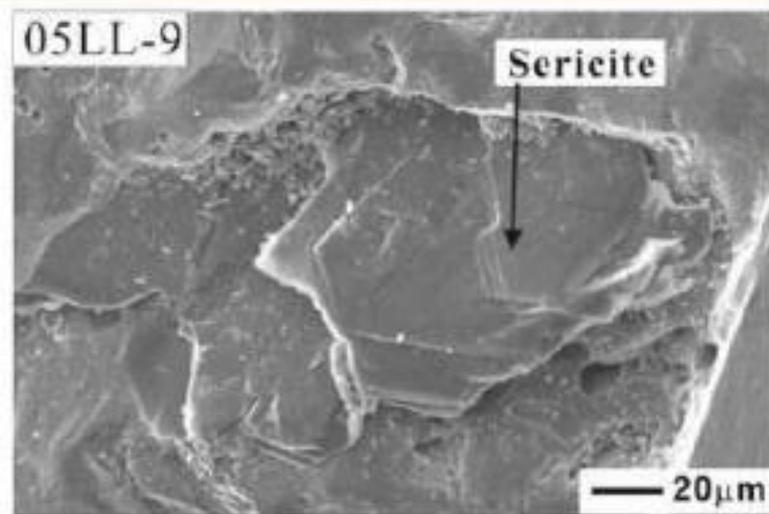
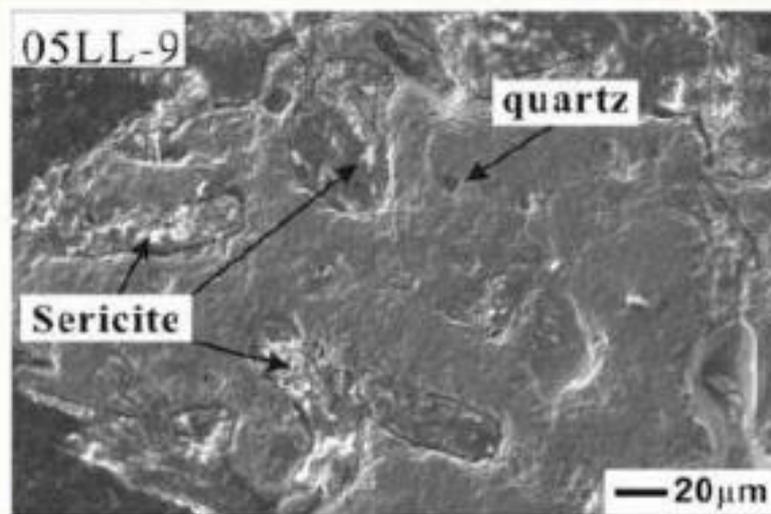
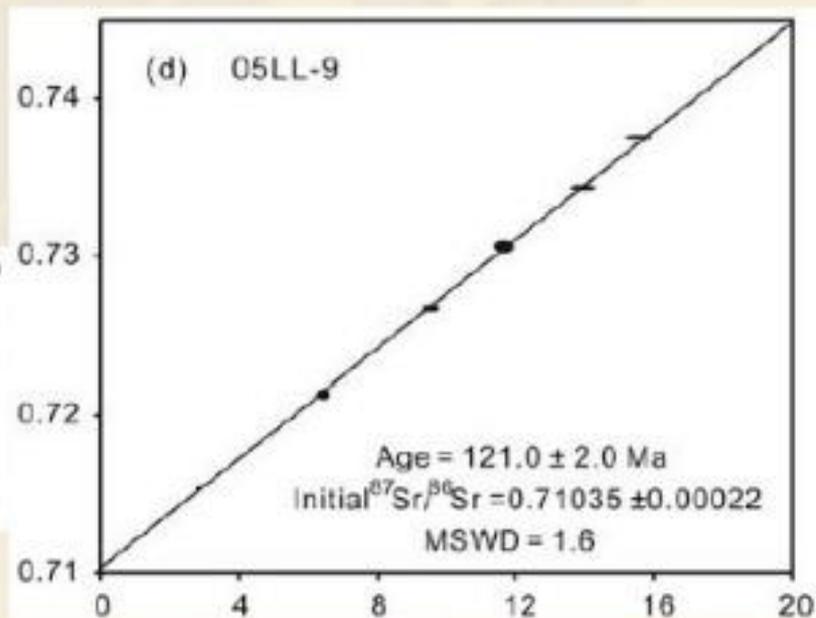
		Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	
05LL-3	f1	2.13	3.45	1.79	0.71467	(4)
pyrite	f2	0.61	1.52	1.16	0.71365	(7)
	f3	1.23	1.41	2.53	0.71602	(6)
	f4	2.21	3.50	1.82	0.71470	(7)
	f5	0.95	1.75	1.57	0.71434	(6)



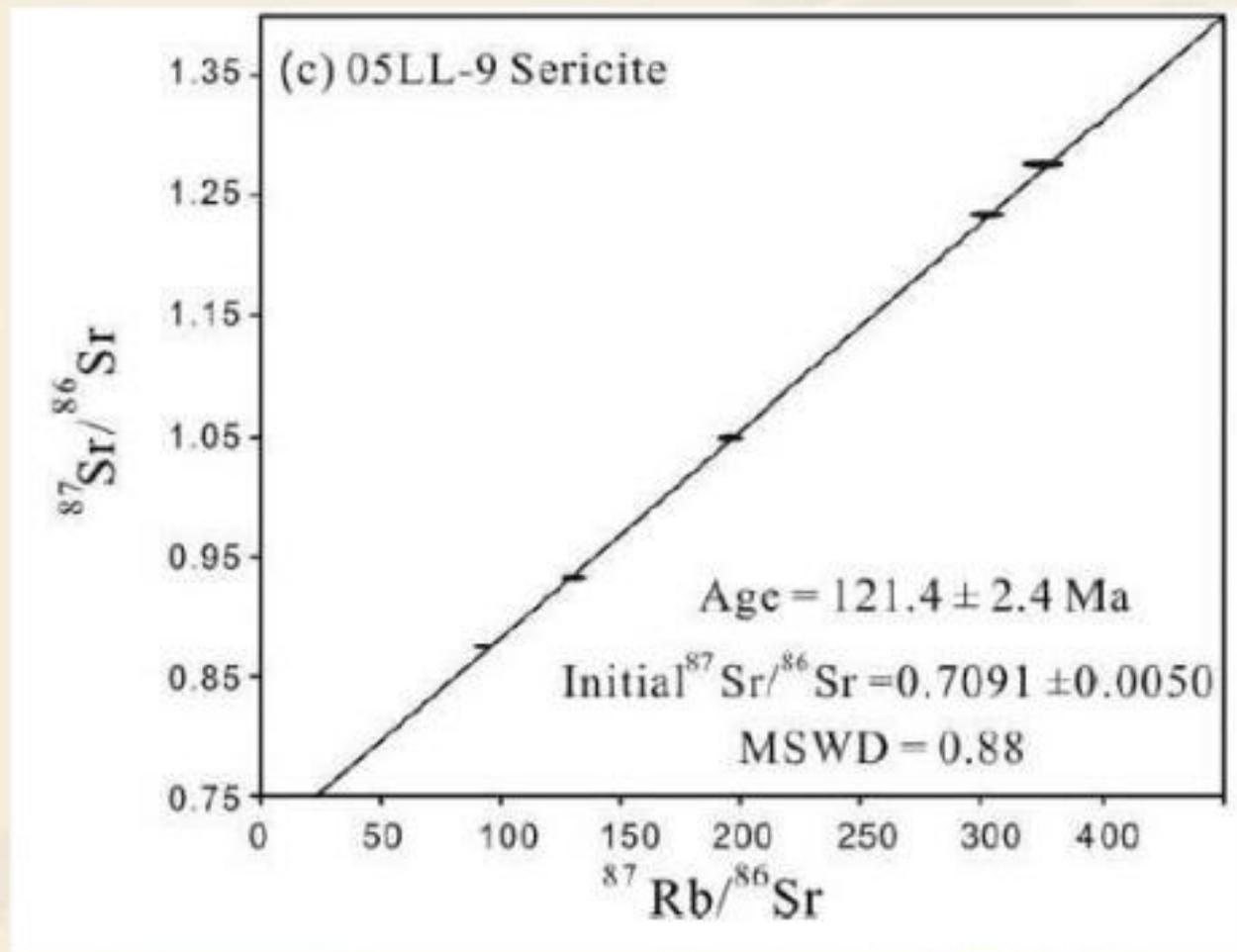
Rb-Sr法确定矿床形成年龄

05LL-9 黄铁绢英岩中黄铁矿

		Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
05LL-9	f1	2.72	0.51	15.55	0.73754 (7)
pyrite	f2	0.76	0.19	11.63	0.73050 (29)
	f3	1.28	0.39	9.52	0.72655 (15)
	f4	2.19	0.46	13.92	0.73428 (11)
	f5	0.46	0.21	6.39	0.72114 (22)
	f6	0.21	0.22	2.76	0.71518 (14)



Rb-Sr法确定矿床形成年龄



同一样品中绢云母与黄铁矿年龄一致，初始值在误差范围内一致

Rb-Sr法确定矿床形成年龄

玲珑金矿的黄铁矿中**Rb-Sr**组成很大程度上受**矿物包裹体**影响;

不同颗粒的包裹体间应达到了**Sr**同位素的平衡, 指示这些包裹体矿物与黄铁矿同期生长

绢云母应与黄铁矿同期生长, 其定年结果可认为矿化时代

结论:

1. 微量样品Rb-Sr处理流程拓宽了Rb-Sr等时线定年方法在矿床定年中的应用
2. 玲珑金矿中的黄铁矿Rb,Sr组成主要受矿物包裹体影响
3. 玲珑金矿中的热液蚀变矿物与黄铁矿同期生长，并达到了同位素的平衡，其年代可作为成矿时代。

Rb-Sr法确定矿床形成年龄

除黄铁矿外，已有学者利用Rb-Sr同位素定年法对**黄铜矿** (Wan *et al.*, 2009)、**白钨矿** (Darbyshire *et al.*, 1996)和**闪锌矿** (Christensen *et al.*, 1995)等矿石矿物进行了Rb-Sr测试，获得了合理的年龄结果。

Sm-Nd同位素定年技术应用于热液成矿定年，需要成矿热液系统满足以下条件：

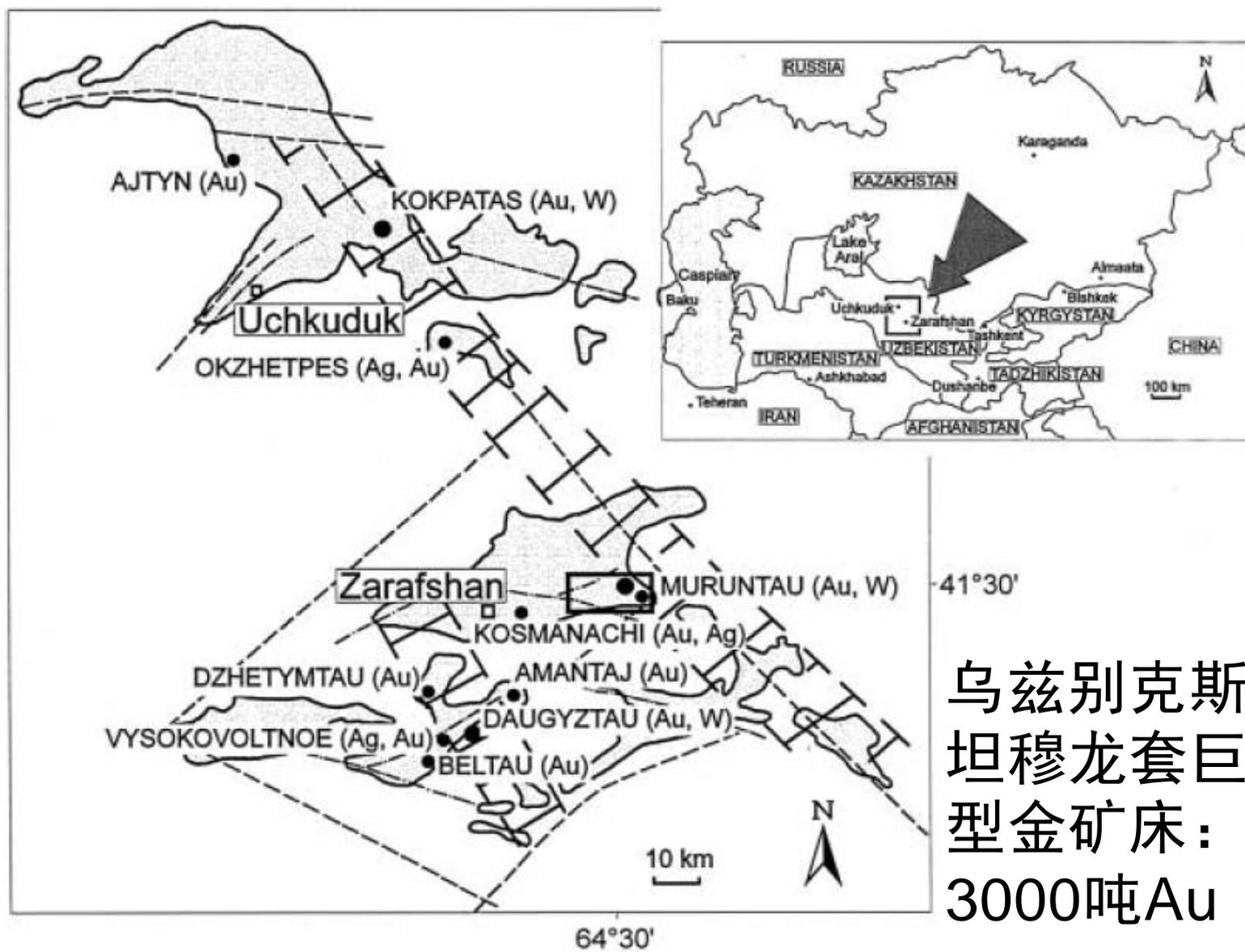
- 从该热液体系沉淀的矿物容纳有足够量的稀土元素；
- 相对于Sm、Nd，矿物结晶后处于封闭状态；
- 矿物中Sm、Nd发生了分馏。

Sm-Nd法确定成矿时代

白钨矿常见于许多夕卡岩型和脉状钨矿床中，也常常是热液金矿、特别是绿岩带金矿的一种常见的伴生矿物。由于白钨矿中稀土含量很高，也具有高的Sm/Nd比值，因此可以用来进行**Sm-Nd定年**。同时，它具有高含量的Sr和很低含量的Rb，其Sr同位素组成就可以代表初始成矿流体的Sr同位素组成，也用来**示踪流体来源**(Voicu *et al.*, 2000)。

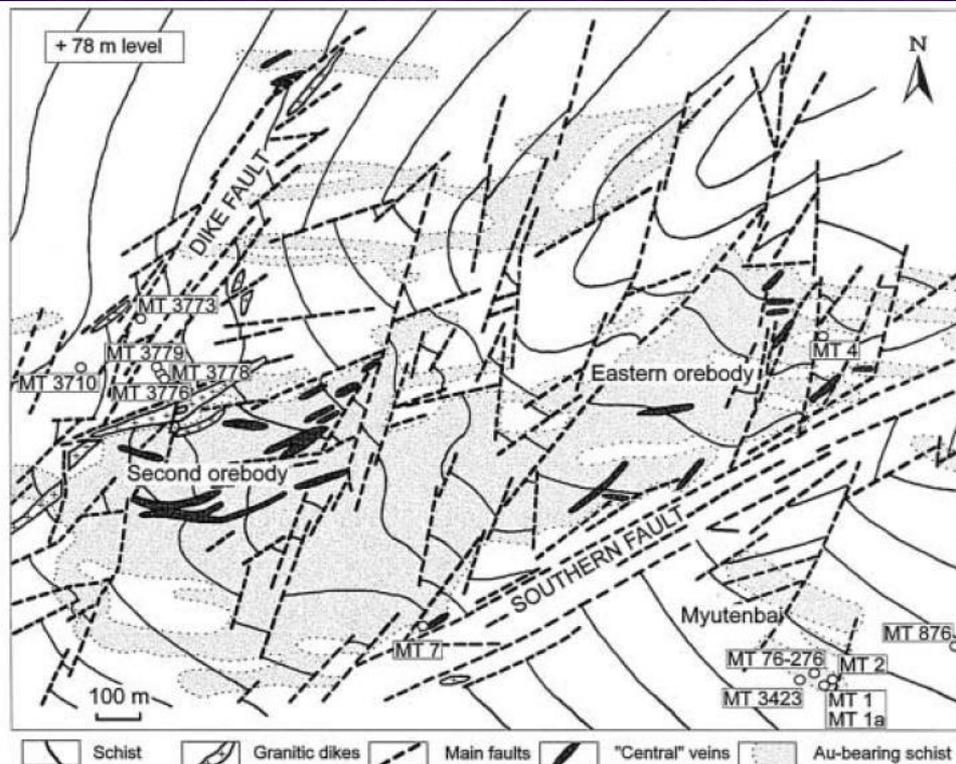
Bell等(1989)最早用白钨矿的Sm-Nd同位素体系对加拿大太古宙Abitibi绿岩带金矿进行了定年，获得一条等时线年龄(2403 ± 47 Ma)。随后有很多利用白钨矿对绿岩带金矿或者钨矿进行成功定年的例子(Darbyshire, *et al.*, 1996; Eichhorn *et al.*, 1997; Kempe *et al.*, 2001)。

Sm-Nd法确定成矿时代

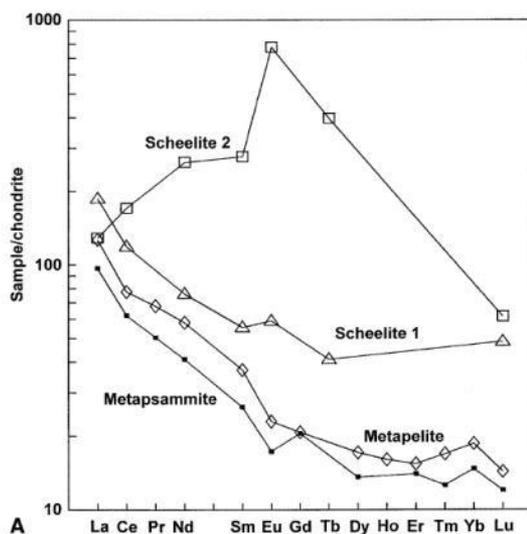


乌兹别克斯坦
坦穆龙套巨
型金矿床：
3000吨Au

Sm-Nd法确定成矿时代

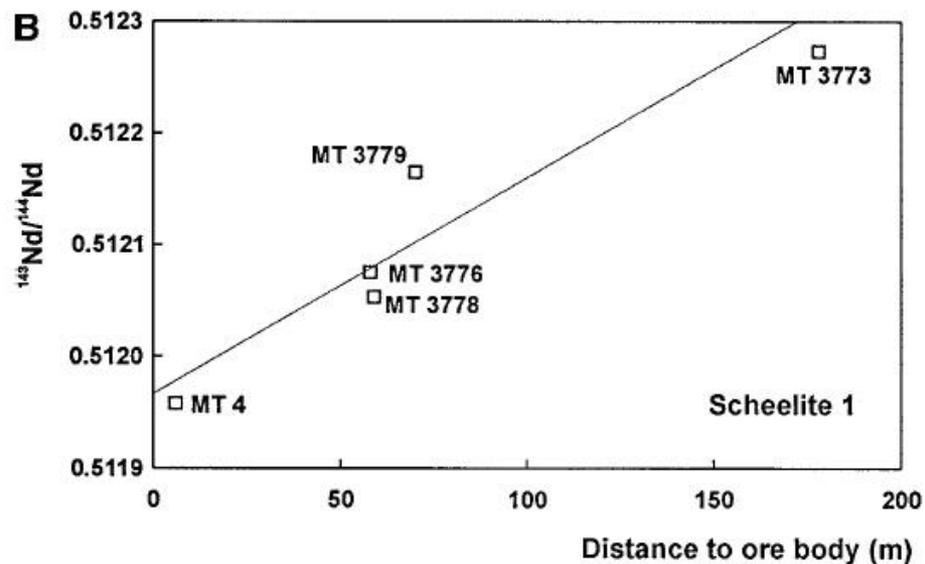
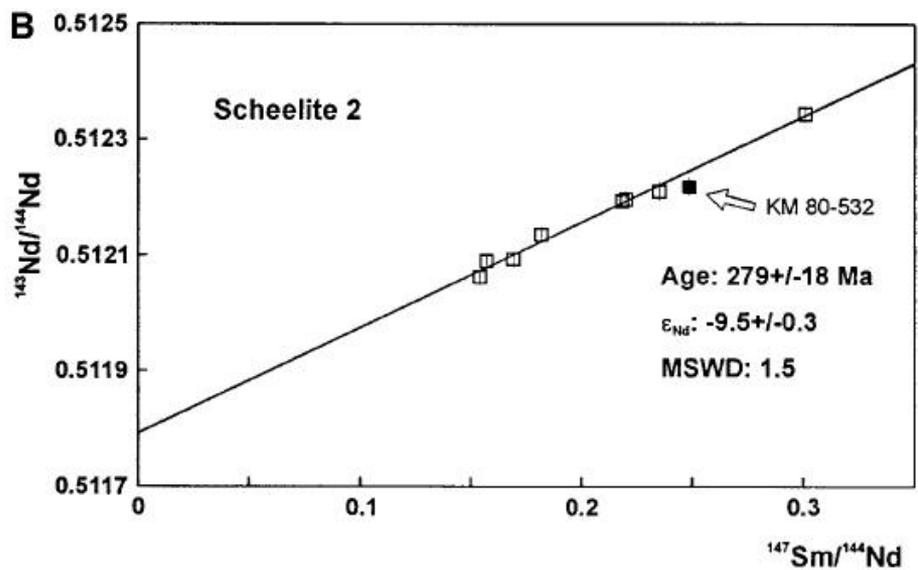
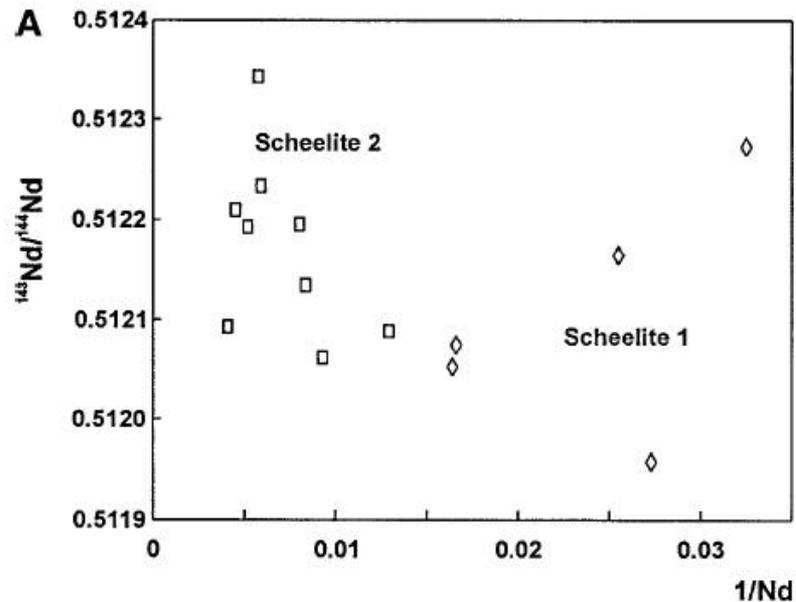
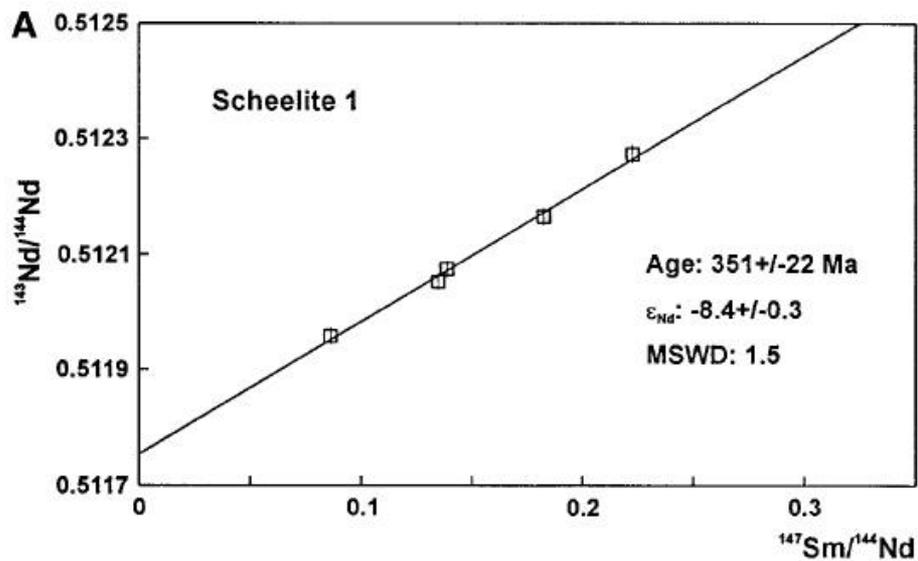


乌兹别克斯坦穆龙套巨型金矿床：
2期白钨矿脉体



	Scheelite 1	Scheelite 2
Geological position	In flat veins or in metasomatites parallel to the foliation	In steeply dipping veins crosscutting the foliation
Mineral association	Greyish quartz, pyrite, pyrrhotite, K-feldspar, chlorite, apatite, calcite Intergrowths with sulfides common Low-grade Au	White quartz, sericite, carbonates, pyrite, molybdenite Intergrowths with sulfides not common High-grade Au
Mineral properties		
Shape	Strongly deformed, disseminated grains, seldom aggregates up to 1-2 cm in diameter	Aggregates of zoned, brecciated crystals up to a few centimetres in diameter
Color	Brownish-grey to white	Brownish-yellow to orange
Luminescence	Strong bluish-white	Quenched yellowish
Trace elements		
Sr	200-260 ppm	400-1100 ppm
La	15-140 ppm	15-80 ppm
Ce	30-250 ppm	60-350 ppm
Nd	30-60 ppm	65-250 ppm
Sm	5-15 ppm	20-90 ppm
Eu	2-7 ppm	9-130 ppm
Tb	1-3 ppm	3-75 ppm
Lu	0.5-4 ppm	0.2-3 ppm
Isotope ratios		
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.7147-0.7151	0.7147-0.7156
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.51196-0.51208	0.51206-0.51234

Sm-Nd法确定成矿时代



2期白钨矿脉体：Sm-Nd定年

Sm-Nd法确定成矿时代

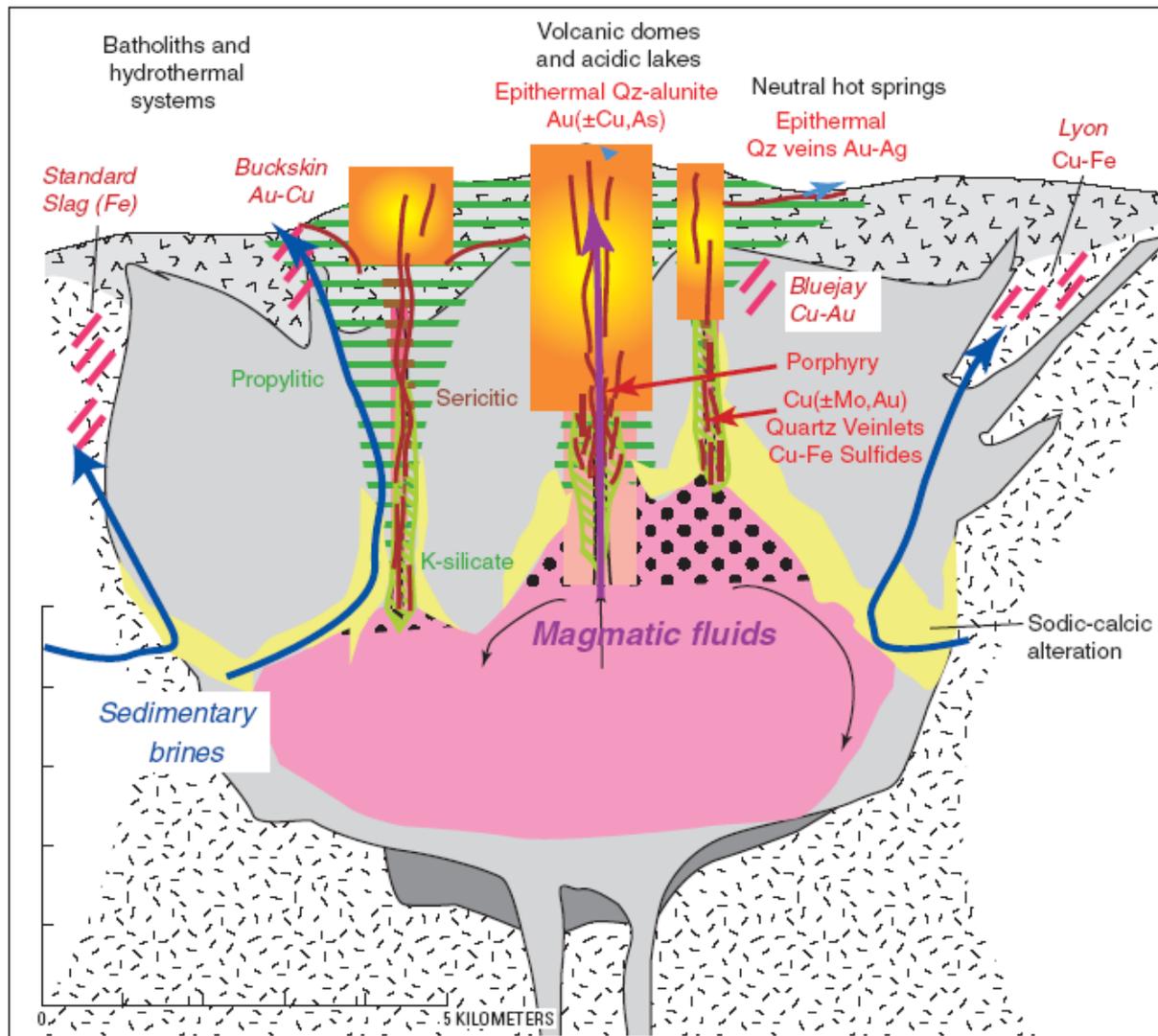
利用矿石矿物Sm-Nd同位素来定年的缺点与用Rb-Sr同位素定年的缺点相似，成矿热液有时处在一种开放体系(如流体的运移或混合的过程)，不能满足等时线理论所要求的基本前提，这都会给成矿年龄带来较大的不确定性。

对于具体的矿床，只有通过尝试才可知道能否给出有意义的年龄数据，况且Sm和Nd元素性质的相似性往往使矿石矿物具有相似的Sm/Nd比值，不利于进行等时线定年。另外因 ^{147}Sm 半衰期较长，不适用于较年轻矿床的定年。

U-Pb法确定成矿时代

以前采用U-Pb法测定成矿年龄仅限于含**沥青铀矿**和**晶质铀矿**等含铀矿物的伟晶岩矿床和热液铀矿床。随着测试分析技术的进步，例如激光剥蚀等**离子体质谱 (LA-ICP-MS)** 和**二次离子质谱仪 (SHRIMP和Cameca IMS-1280)**等微区原位分析仪器的运用，目前可以利用高精度的单颗粒矿物U-Pb法测定矿化蚀变带或矿体中热液成因含铀矿物，如**(热液)锆石、独居石、磷灰石、金红石、褐帘石、钙钛矿、氟碳铈矿、烧绿石和榍石**等。而其它常规U-Pb法测定技术，如微量矿物法、单颗粒矿物U-Pb化学法和Pb-Pb蒸发法等，在金属矿床定年上较少采用。

U-Pb法确定成矿时代



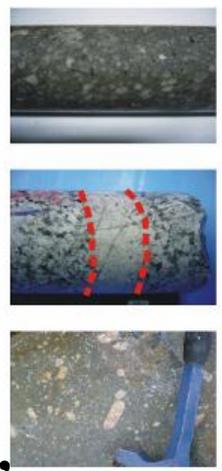
斑岩-浅成低温
热液型成矿模型：

与岩浆作用有关：
U-Pb 锆石定年

Figure E4. Relationship of hydrothermal systems and porphyry copper and related deposits to crystallizing granitic batholith based on exposed deposits and altered rocks in and near the Yerington district in western Nevada. Based on Dilles and Einaudi (1992), Dilles and Proffett (1995), and Dilles, Proffett, and others (2000).

U-Pb法确定成矿时代

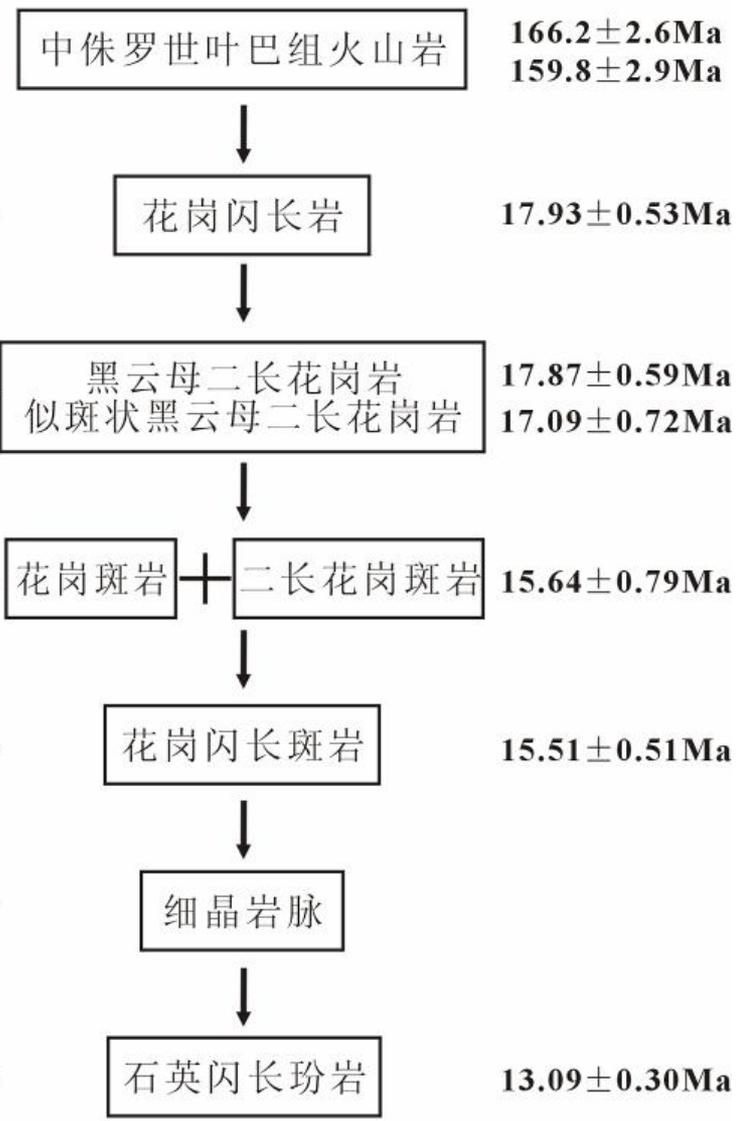
驱龙矿床岩浆岩演化顺序



成矿前

成矿期

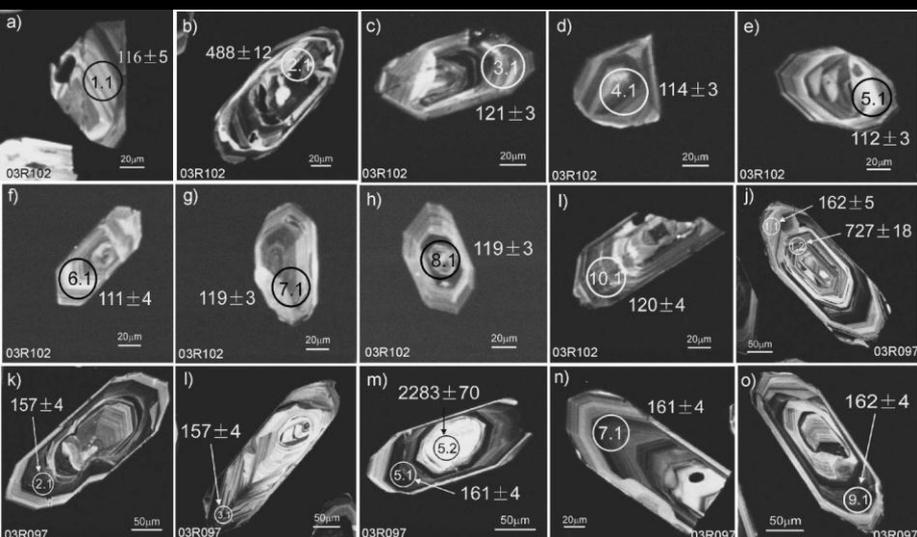
成矿后



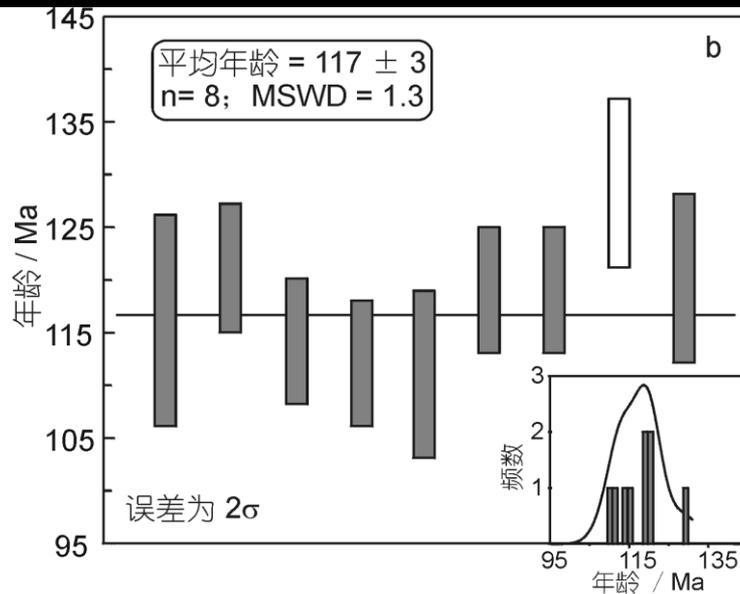
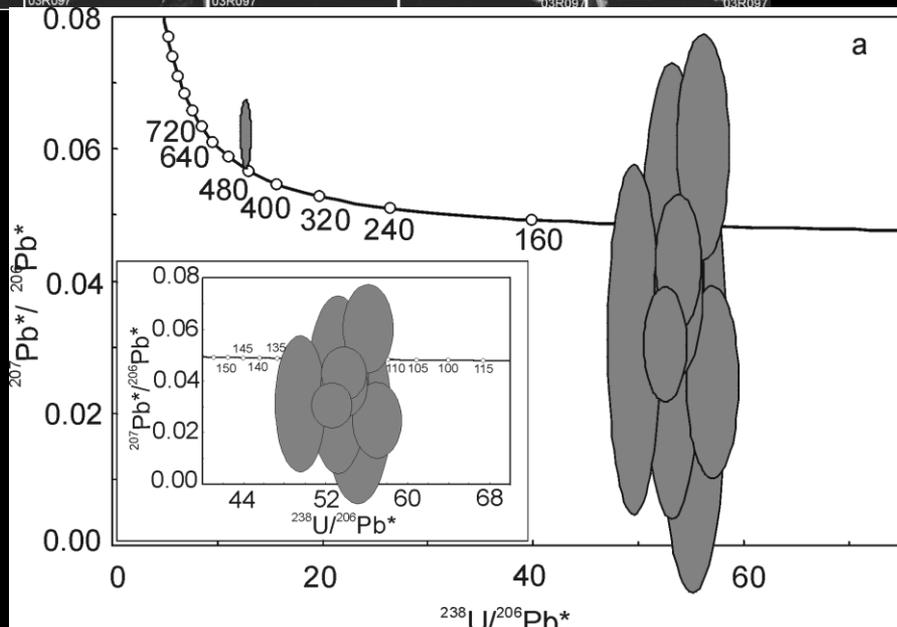
据秦克章等, 2014

U-Pb法确定成矿时代

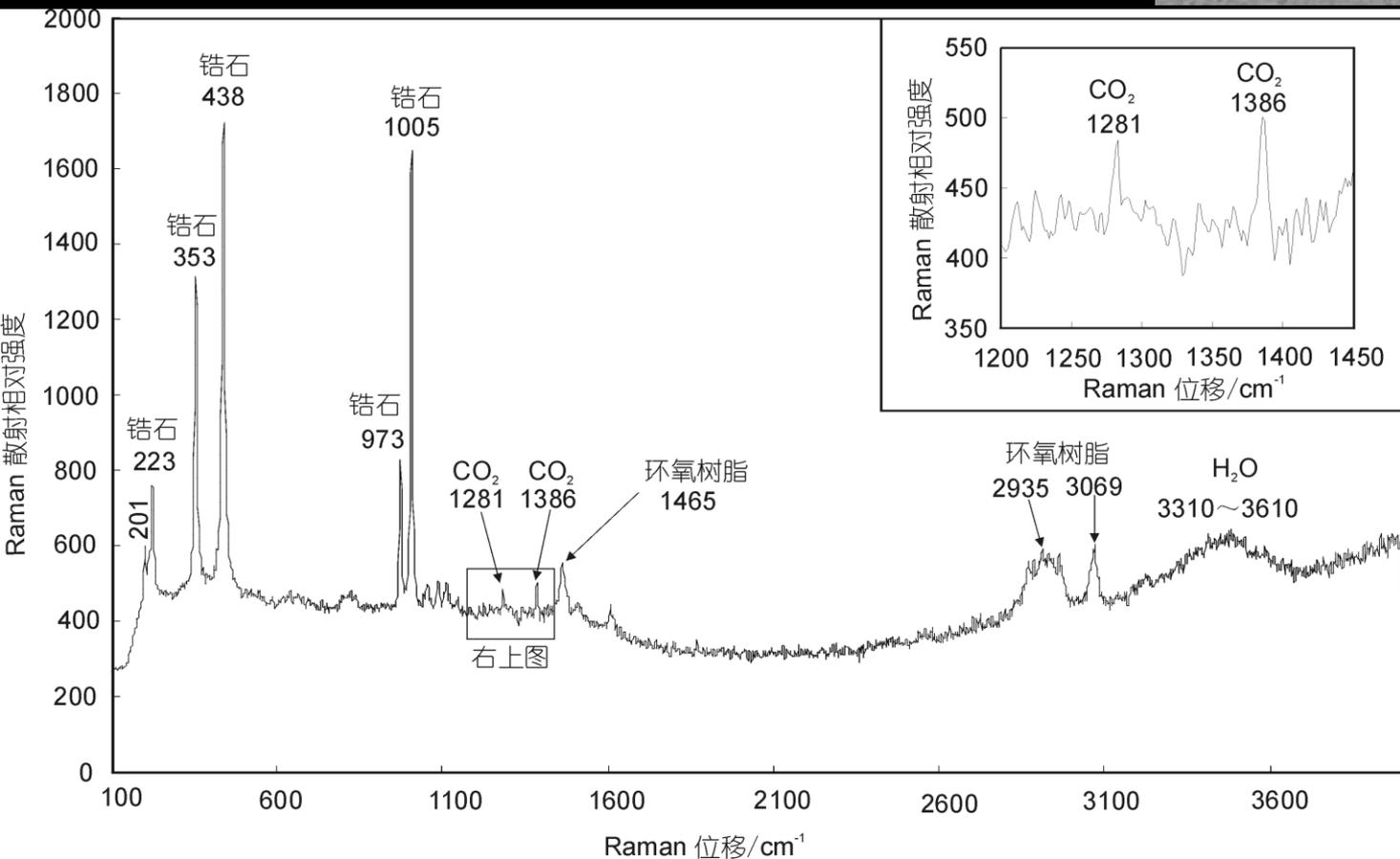
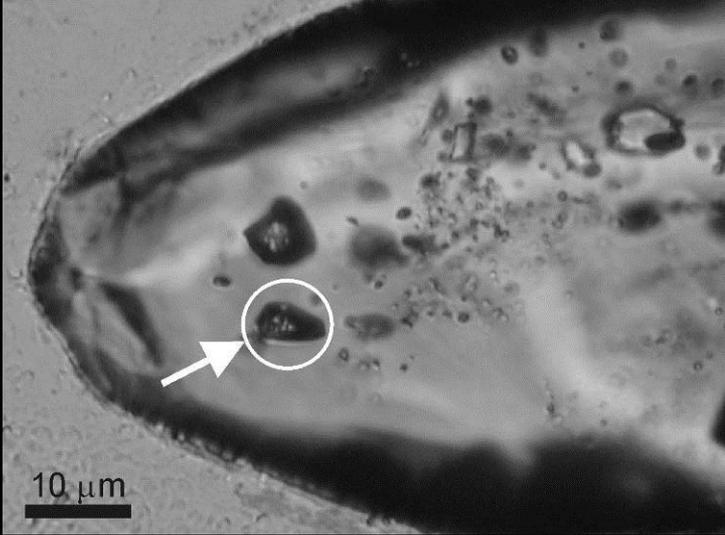
胶东金青顶金矿含金石英脉中热液锆石



117 ± 3Ma
(Hu et al., 2004)



含金石英脉内锆石中捕获有和成矿热液性质一致的CO₂-H₂O流体包裹体



含金石英脉
内锆石为热
液成因

(Hu et al., 2004)

U-Pb法确定成矿时代

金属矿床热液锆石U-Pb定年法存在的问题：

- (1) 石英脉中的锆石往往具有多来源、多成因的特点；
- (2) 含金石英脉中锆石的含量一般很少。

金属矿床锆石U-Pb年代学研究的关键是将热液锆石与捕获锆石有效地区分开来，对锆石的形貌、结构、微量元素组成(包括普通铅的含量)、Lu-Hf和氧同位素、矿物或流体包裹体特征等进行系统研究及综合分析，可以较好地识别热液锆石，将继承锆石、岩浆锆石和热液锆石区分开来，才有可能获得精确的成矿年龄数据。

U-Pb法确定成矿时代

锡石是各类锡多金属矿床最为重要的矿石矿物，由于其属于金红石族矿物，通常其U-Pb含量可以满足开展U-Pb同位素年代学的研究，因而是锡矿床同位素测年的理想对象，Gulson和Jones(1992)初步尝试了其U-Pb测年，并报道了南非Bushveld杂岩Zaaiplaats锡钨稀土矿床和印尼Belituna Island锡矿床的锡石年代学研究结果。然而，由于锡石化学性质稳定，溶样困难，并在溶样过程中难以剔出其他杂质，因而在之后的很长一段时间内并未得到广泛推广和应用。

U-Pb法确定成矿时代

刘玉平等(2007)通过开展高精度的锡石ID-TIMS U-Pb同位素年代学研究,并与相关花岗岩锆石SHRIMP U-Pb年龄对比,证实锡石U-Pb测年方法可以获得可靠的成矿年龄。

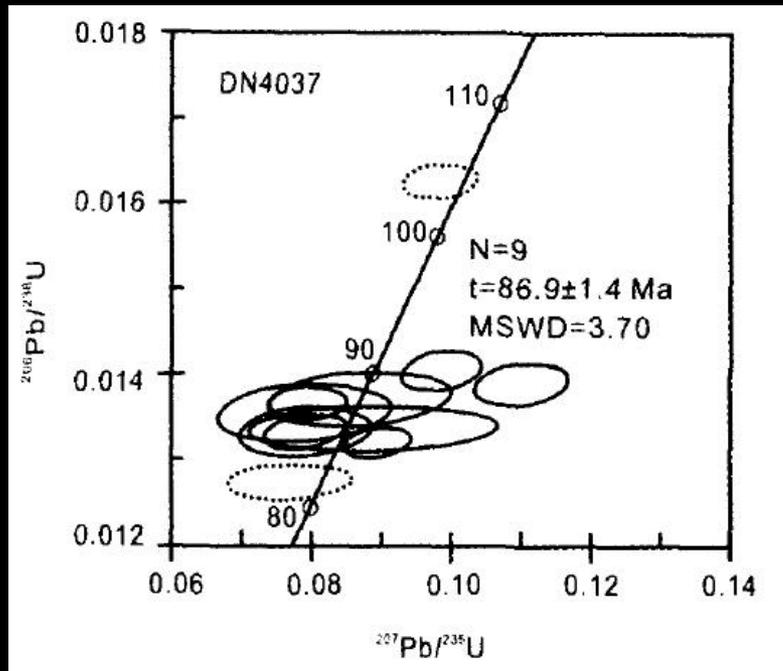
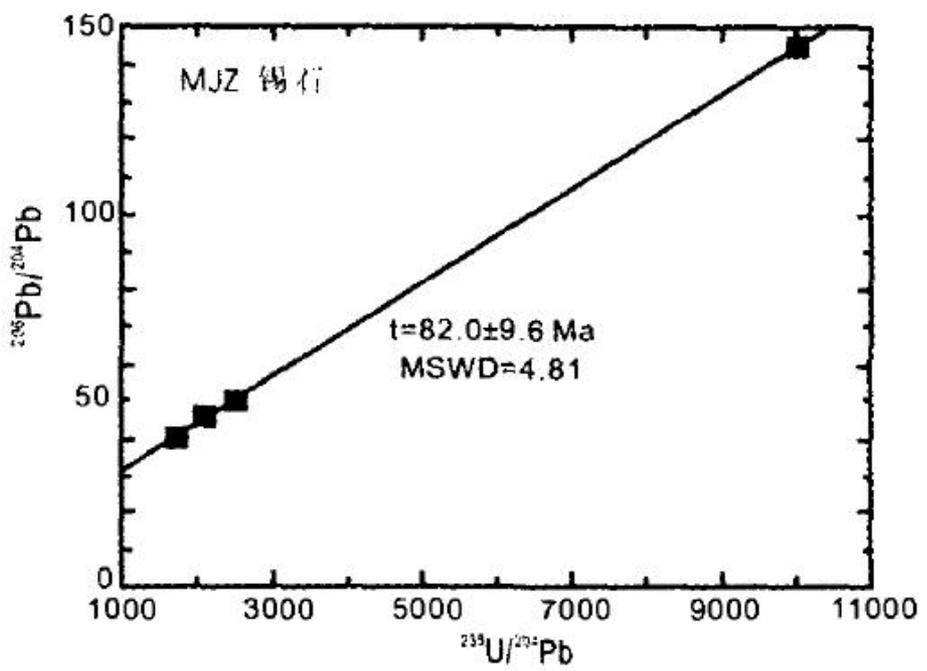
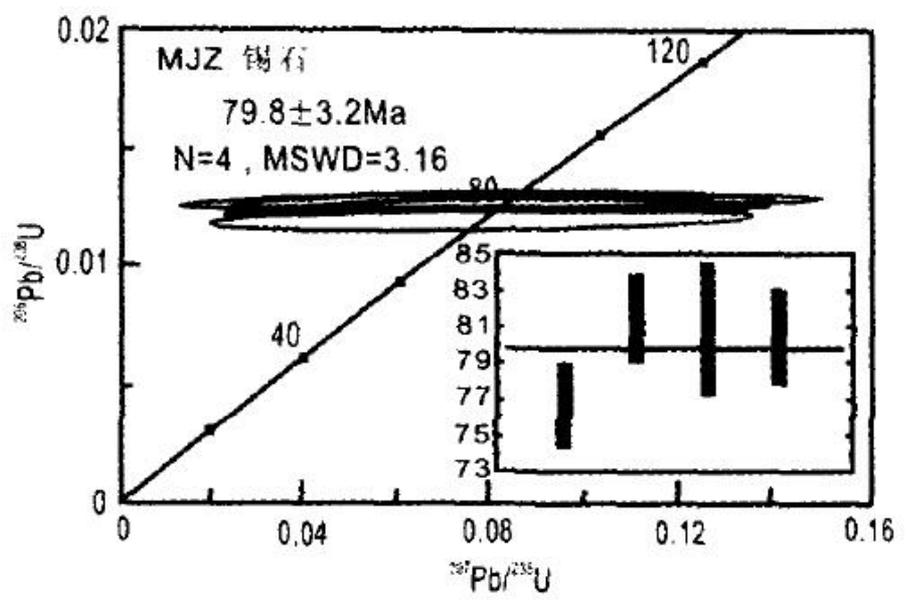


图6 DN4037 锆石 U-Pb 年龄谐和图



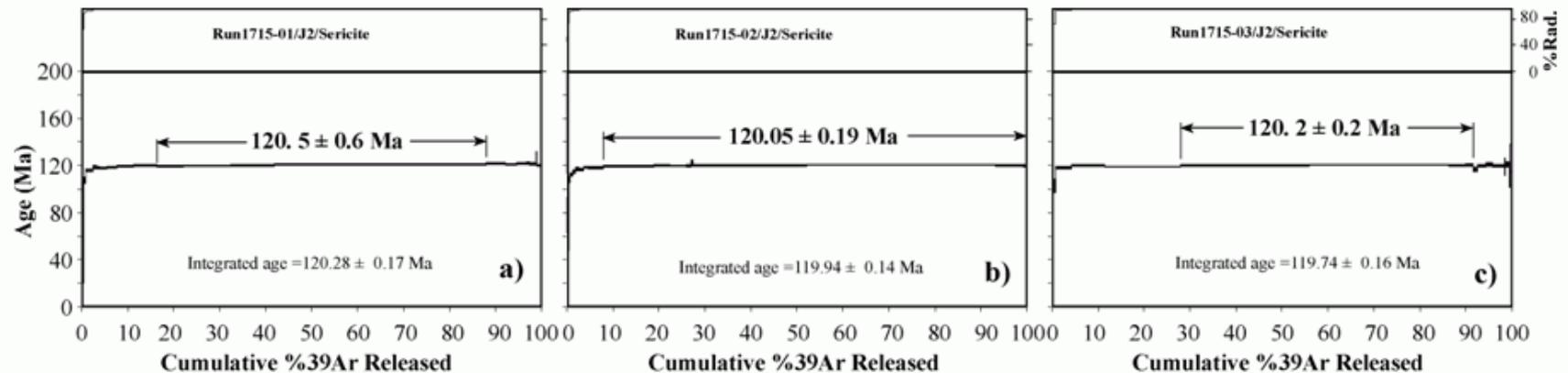
Ar-Ar法确定成矿时代

Ar-Ar法测试手段：

- (1) **阶段加热法**：采用分阶段升温法并对每个温度阶段释放的氩进行纯化和质谱测定，这样，对任何一个样品可得到一系列表面年龄。若以这些表面年龄为纵坐标，与这些表面年龄相对应的、释出氩的累积百分数为横坐标，即可获得样品的年龄谱图。在年龄谱图上可以找到从Ar保持最好的晶格位置上释放出 ^{40}Ar 和 ^{39}Ar 的温度阶段，这些温度阶段的年龄将非常一致形成年龄坪；
- (2) **激光显微探针 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年法**：该方法原理是从岩石手标本上切下薄片(几十至几百 μm)抛光，经反应堆快中子照射后置于超高真空系统中，用脉冲激光束使研究的微区熔化析出Ar，然后用质谱计进行微量Ar同位素分析，最后计算年龄；
- (3) **流体包裹体 ^{40}Ar - ^{39}Ar 真空击碎和阶段加热法**

Ar-Ar法确定成矿时代：胶东金矿

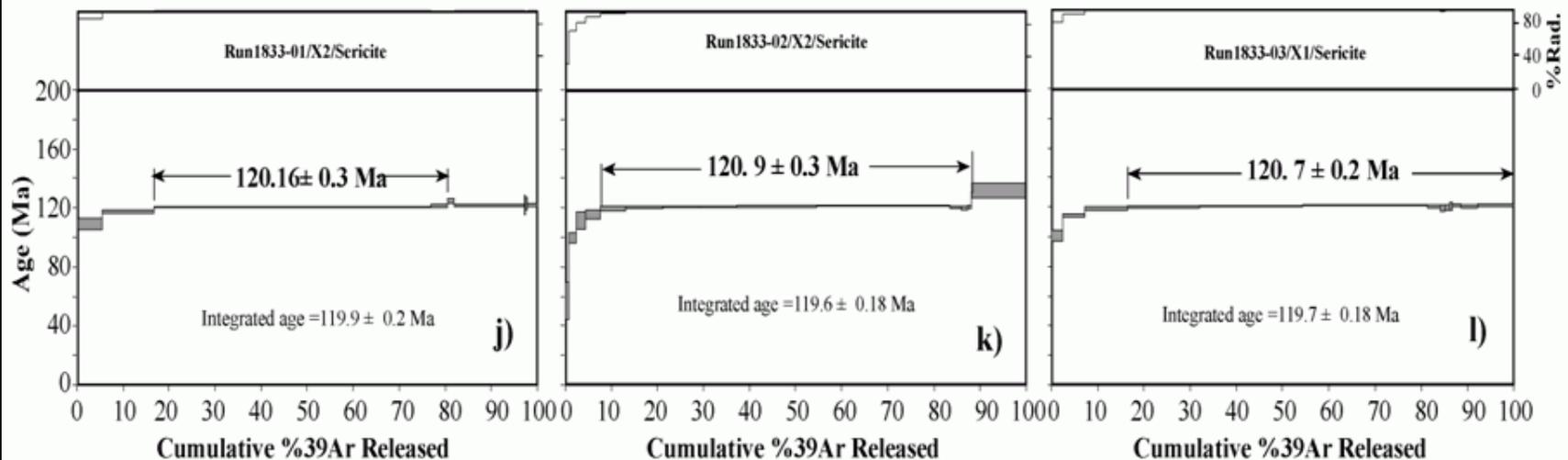
焦家金矿



新城金矿

120 ± 1 Ma

Li et al., 2003



Ar-Ar法确定成矿时代

York等(1982)首先研究了黄铁矿的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年，他们发现一个太古宙矿床的黄铁矿含有少量但是可以测量的K和放射成因的 ^{40}Ar ，因此给出了一条Ar-Ar等时线年龄，这个年龄与共生的黑云母的Ar-Ar年龄是一样的。但当时的方法需要几百mg的高纯度的黄铁矿，加上经中子活化后硫化物的高放射性对操作人员的伤害，硫化物加热分解产生含硫的气体对质谱系统的伤害和污染，以及实验后高放射性的样品粉末难于处理等原因，使得对硫化物 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年研究工作较少。后来，单颗粒矿物激光熔样定年技术的发展解决了这个问题。Smith等(2001)对产于两个火成岩中的黄铁矿单矿物进行了激光 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年，他们的研究表明，即使黄铁矿有轻微的后期蚀变，仍可获得精确的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄。

Ar-Ar法确定成矿时代

Phillips和Miller(2006)对澳洲西部Yilgarn金矿中的黄铁矿做了单颗粒激光探针和单阶段真空击碎 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年尝试。

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of mica-bearing pyrite from thermally overprinted Archean gold deposits
Geology, 2006

David Phillips } School of Earth Sciences, Predictive Mineral Discovery Cooperative Research Centre (pmd*CR),
John M. Miller } University of Melbourne, Parkville, 3010 VIC, Australia

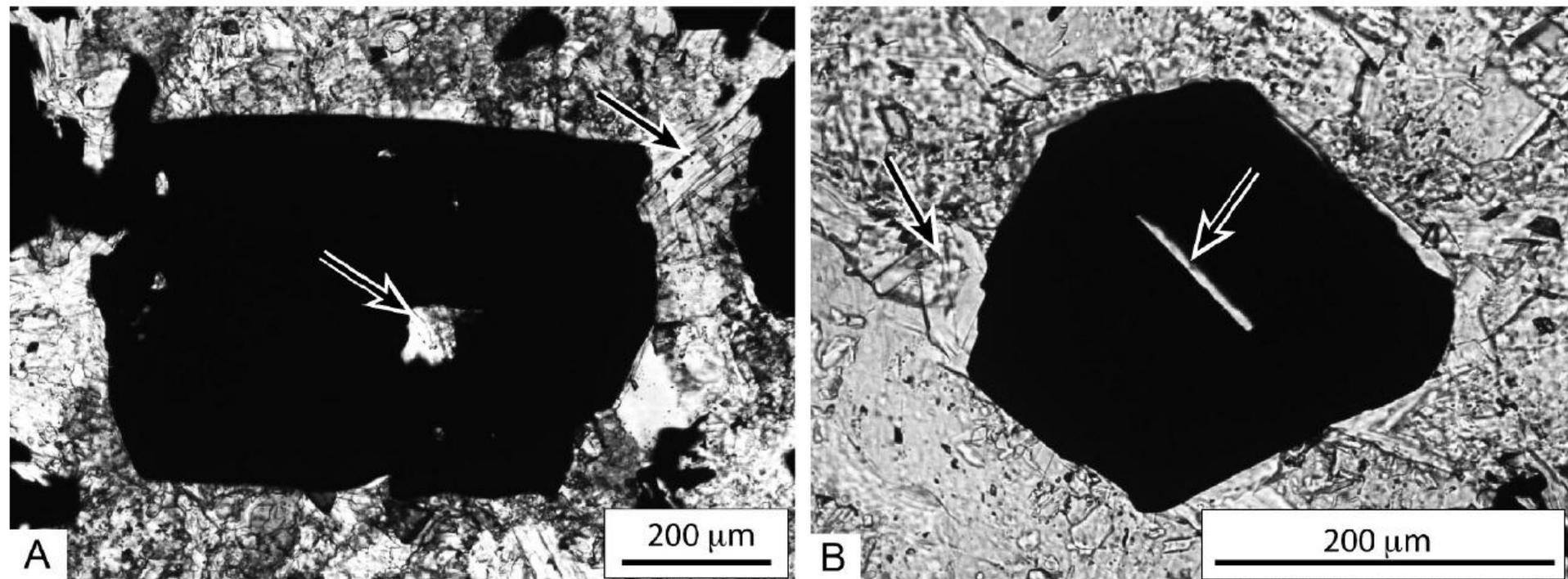


Figure 1. Photomicrograph showing muscovite inclusions in pyrite grains from (A) Mount Charlotte sample MC1 and (B) Kanowna Belle sample GD1. Note relatively coarse grain size of muscovite inclusions. Arrows point to matrix and included mica grains.

Ar-Ar法确定成矿时代

Phillips和Miller(2006)对澳洲西部Yilgarn金矿中的黄铁矿做了单颗粒激光探针和单阶段真空击碎 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年尝试。

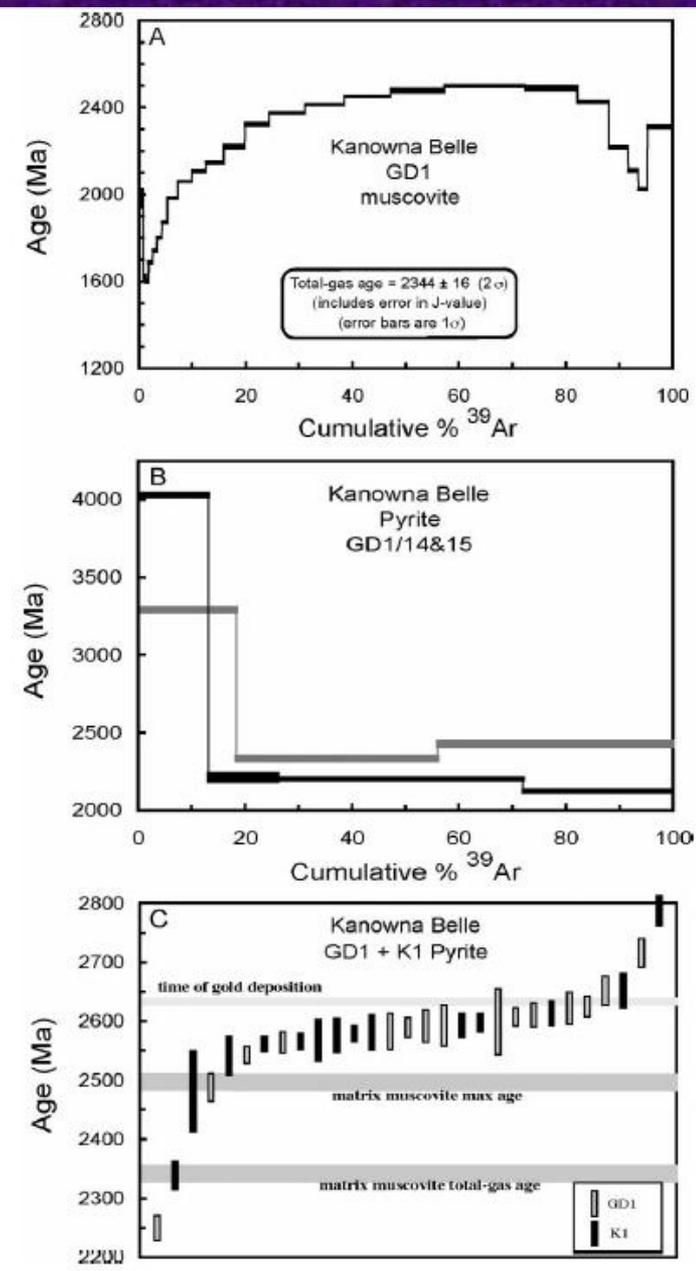
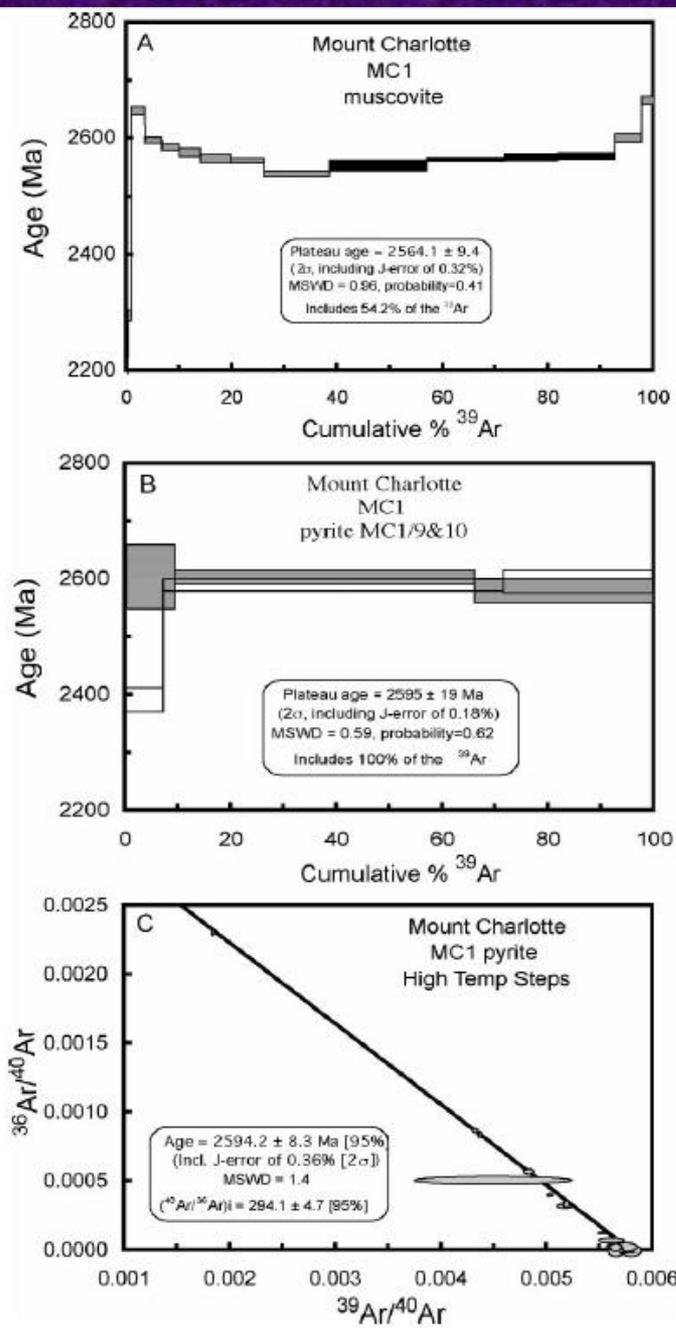
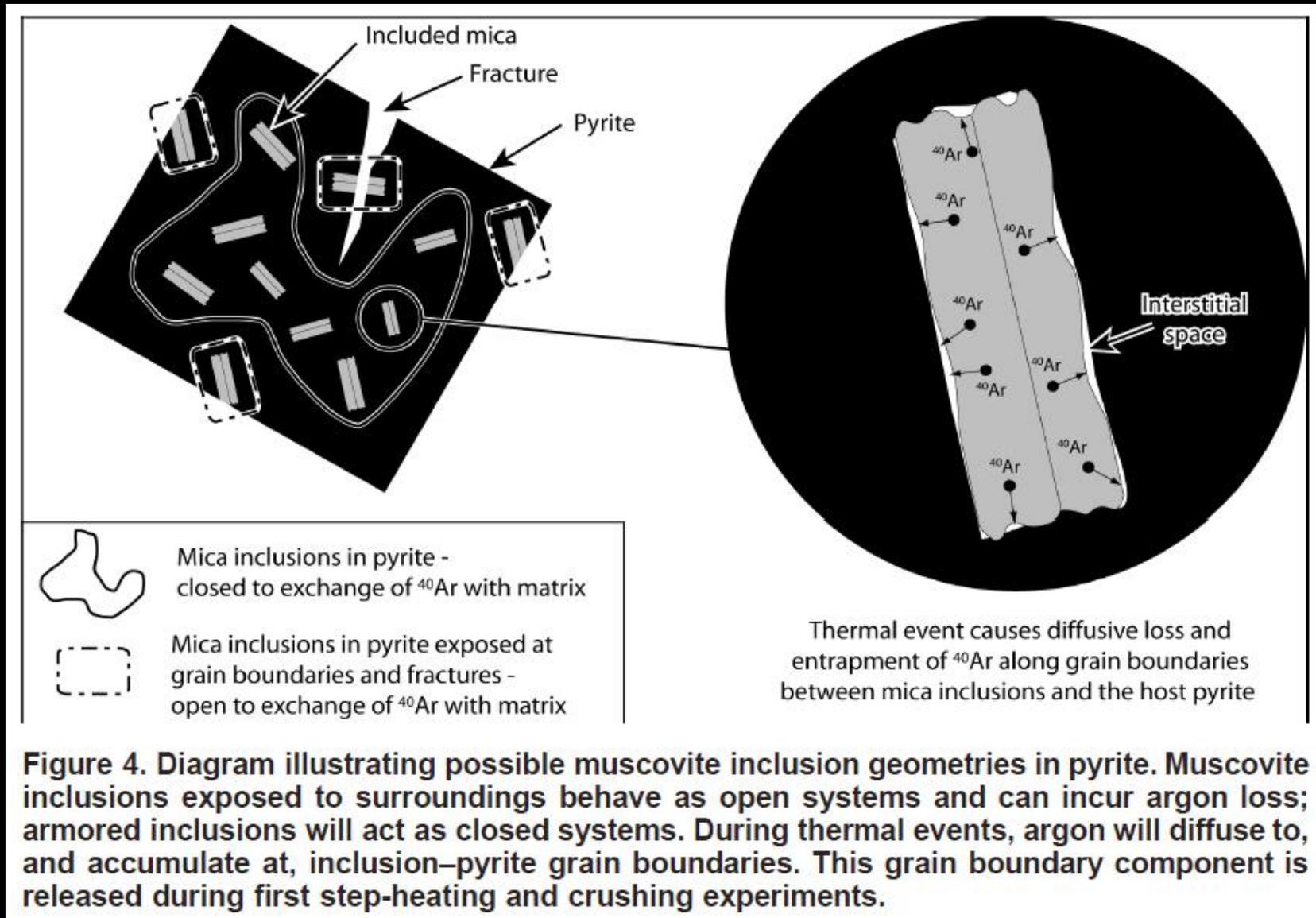


Figure 3. A: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectrum for muscovite from Kanowna Belle.

Ar-Ar法确定成矿时代



$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄：黄铁矿中蚀变矿物白云母年龄！

Ar-Ar法确定成矿时代

利用 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法确定成矿时代的优点：

- ① 它测定的对象广泛且用量较少；
- ② 分阶段加热法得到的年龄谱往往反映了该矿物的热演化史，并且根据等时线获得的初始值可判断样品中是否含有过剩氩。

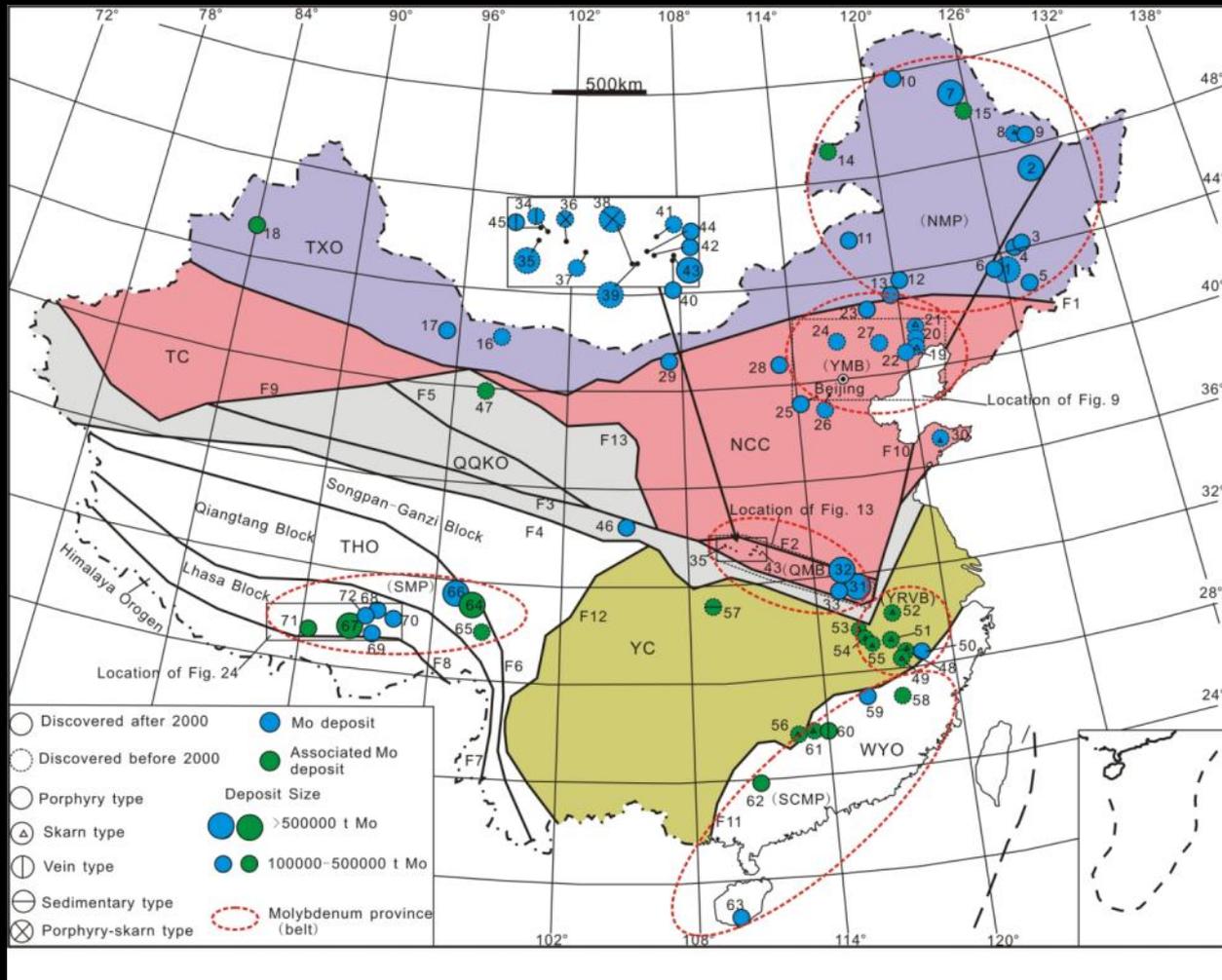
利用 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法确定成矿时代存在的问题：

- ① 氩是一种惰性气体，含钾矿物粒径对 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法有一定的制约，特别是对于多期次的矿床，后期的构造热事件使得氩同位素体系有不同程度的开放，不同形态矿物的扩散方式不完全相同，如果样品中不同程度有效保存着其中的氩，并存在过剩氩，则其年龄谱就会变得比较复杂而难以解释；
- ② 测定石英流体包裹体 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄存在着次生包裹体的影响；
- ③ 在中子照射过程中，部分样品(如伊利石)会存在 ^{39}Ar 反冲而丢失。

在金属矿床的年代学研究中，Re-Os同位素定年方法最大的优点是**能直接对金属矿物进行定年**，并且该方法具有较大的年龄测定范围，既可以测定古老样品，也可以测定年轻样品。例如，Stein等(1999)采用了两种不同的分析方法对芬兰太古代Aittojärvi金矿中辉钼矿进行了Re-Os定年，得到十分一致的成矿年龄(2798~2810Ma)，Suzuki等(1996)报道了小于10Ma的辉钼矿的Re-Os年龄。

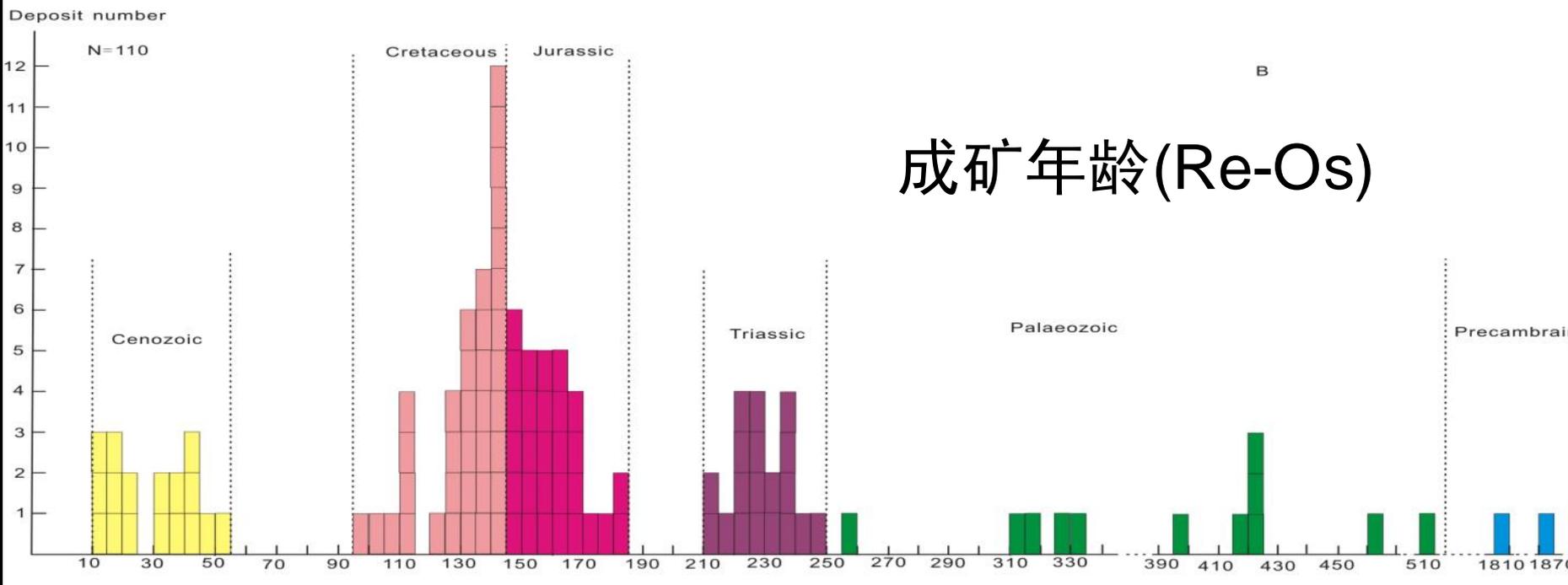
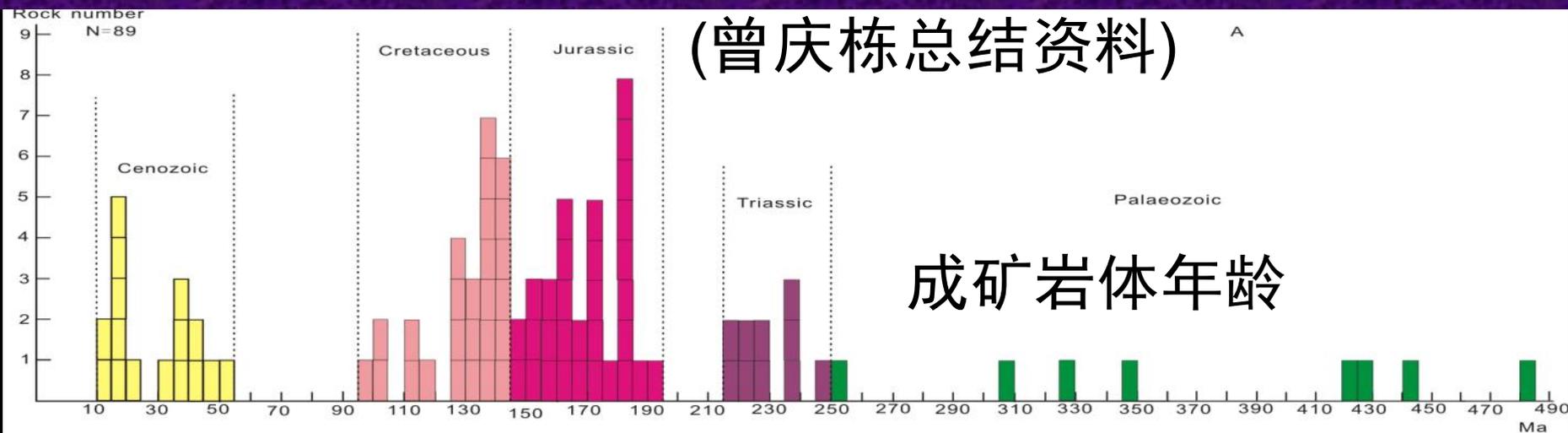
中国钼成矿带划分

- 东北钼成矿省；
- 燕辽钼成矿带；
- 秦岭钼成矿带；
- 长江中下游钼成矿区
- 华南钼成矿区
- 三江钼成矿带



Re-Os法与典型矿床成矿时代

(曾庆栋总结资料)



中国钼矿床成岩、成矿时代

Re-Os法定年存在的问题：

- 虽然辉钼矿的Re-Os法测年技术成熟，应用成果也很多，但近年来也发现有些金属矿床辉钼矿的Re-Os年龄高于其赋矿围岩的年龄，其原因仍不清楚；
- 黄铁矿等多数硫化物矿物含Re量明显偏低，并含有一定程度的普通Os，对样品化学制备过程中低本底的要求很高，一般实验室难以达到，普通Os也难以准确扣除；
- 后期的热液活动有时可以使Os同位素发生重置，因此，金属硫化物Re-Os同位素体系封闭温度及其影响因素是一个亟待解决的问题。

热液矿床流体包裹体年代学

- Shepherd(1981)利用石英中流体包裹体Rb-Sr法对Carrock Fell石英脉型钨矿进行测定, 获得了 $392 \pm 5\text{Ma}$, 该年龄与矿脉内白云母的K-Ar年龄($387 \pm 6\text{Ma}$)一致, 而和成矿有关的花岗岩母岩年龄(395Ma)完全吻合, 从而认定了流体包裹体年代学的可行性和可靠性。
- 李华芹, 刘家齐, 魏林. 1993. 热液矿床流体包裹体年代学研究及其地质应用. 北京: 地质出版社
- 邱华宁, 彭良. 1997. ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学与流体包裹体定年. 合肥: 中国科技大学出版社

流体包裹体年代学的局限性

- 寄主矿物中多期包裹体的影响。
- 成矿流体有时处于开放体系，不符合地质年代学工作的前提。
- 后期热事件的影响，特别是造成Ar同位素不同程度的带入和带出，并存在过剩氩，获得的年龄谱复杂而难以解释。



金属矿床年代学数据的不一致性

吉林夹皮沟金矿：

- 李华芹(1993)： $263 \pm 21\text{Ma}$ (流体包裹体Rb-Sr法)
- 吴尚全(1991)： $1824 \pm 24\text{Ma}$ 、 $1253 \pm 17\text{Ma}$ 、 $203 \pm 60\text{Ma}$ (石英Ar-Ar法)
- 李俊建(1991)： $2469 \sim 2475\text{Ma}$ (单颗粒锆石U-Pb法)

河北东坪金矿：

- 莫测辉(1997)： $103 \pm 8\text{Ma}$ (流体包裹体Rb-Sr法)
- 江思宏(2000)： $172 \sim 188\text{Ma}$ (石英Ar-Ar法)
- 李惠民(1997)： $350.9 \pm 0.9\text{Ma}$ (热液锆石U-Pb法)

金属矿床年代学数据的不一致性

错误年龄造成的原因

两期成矿流体的混合

Sm-Nd 等时线

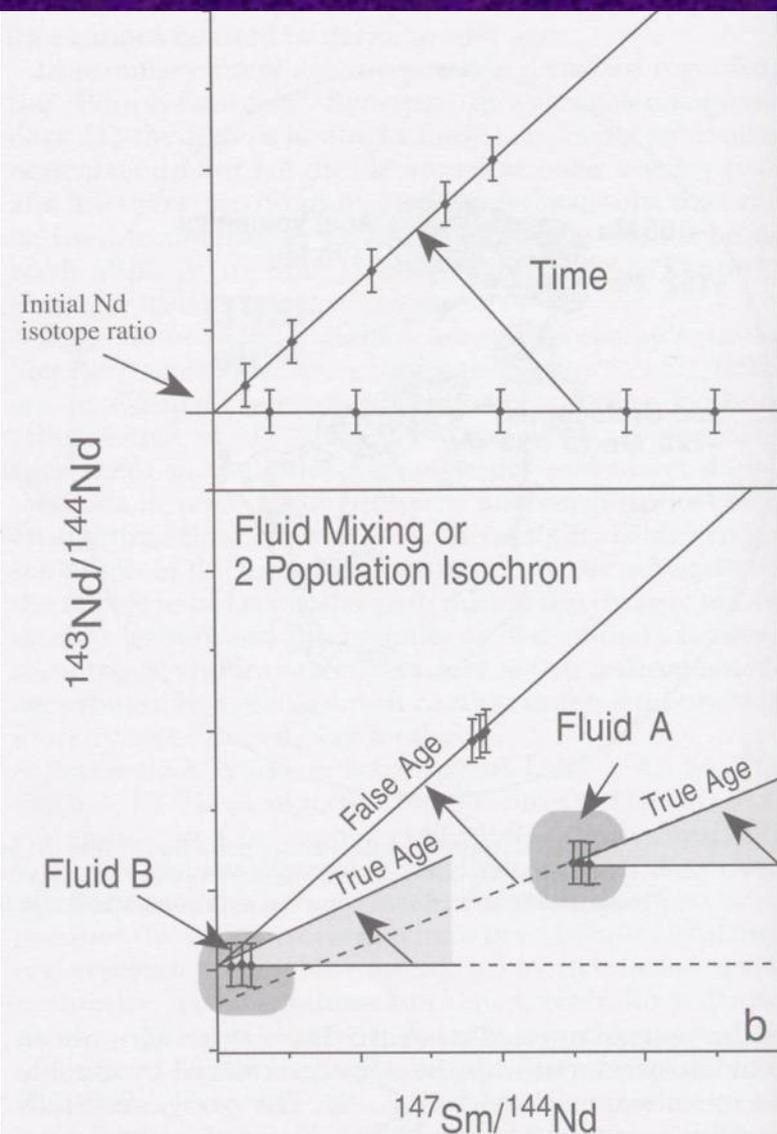
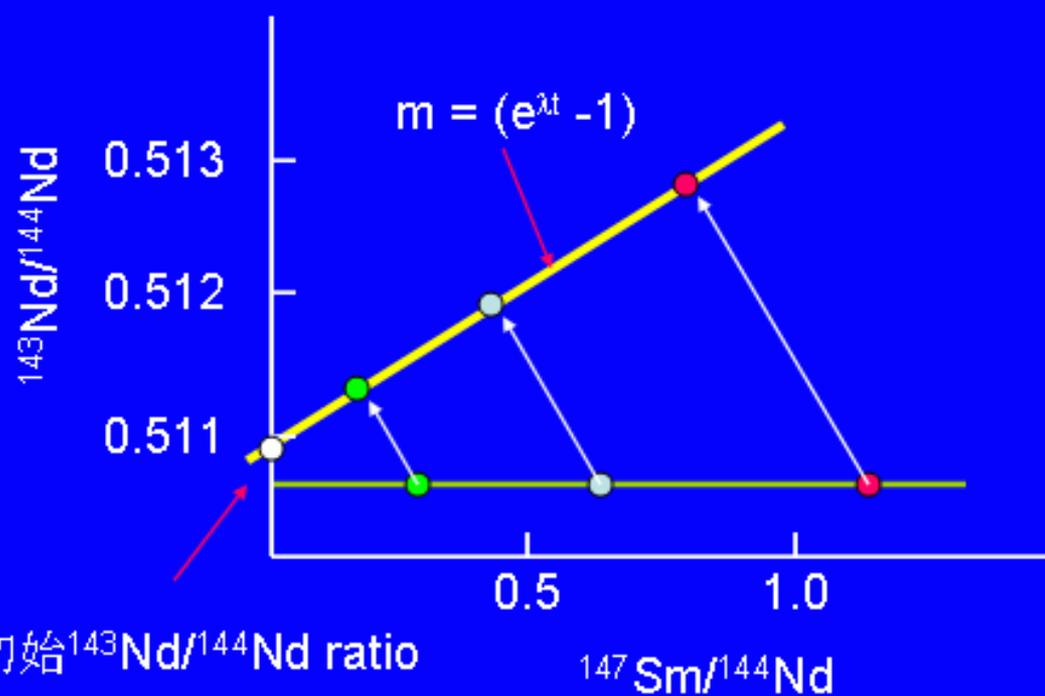


FIG. 20. Synthetic $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ isochron diagrams. a. Single stage fluorite formation and growth over time. b. Fluid mixing with two different Sm/Nd fluid populations with different $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ initials. After time regression of both populations may give false age. Independent regression of the different sample population will give different ages than single regression.

金属矿床年代学数据的不一致性

矿物封闭温度与年代学测定

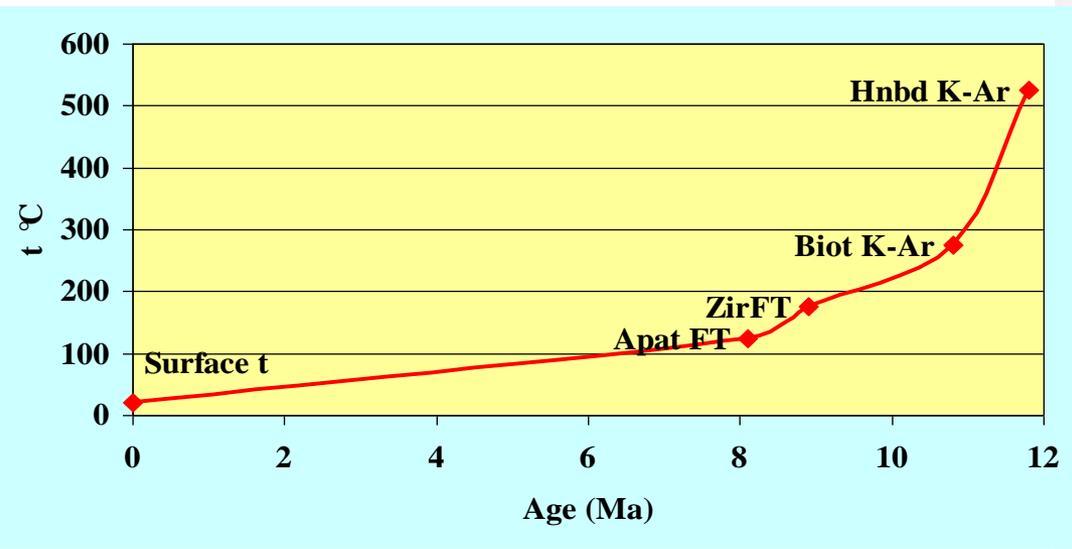
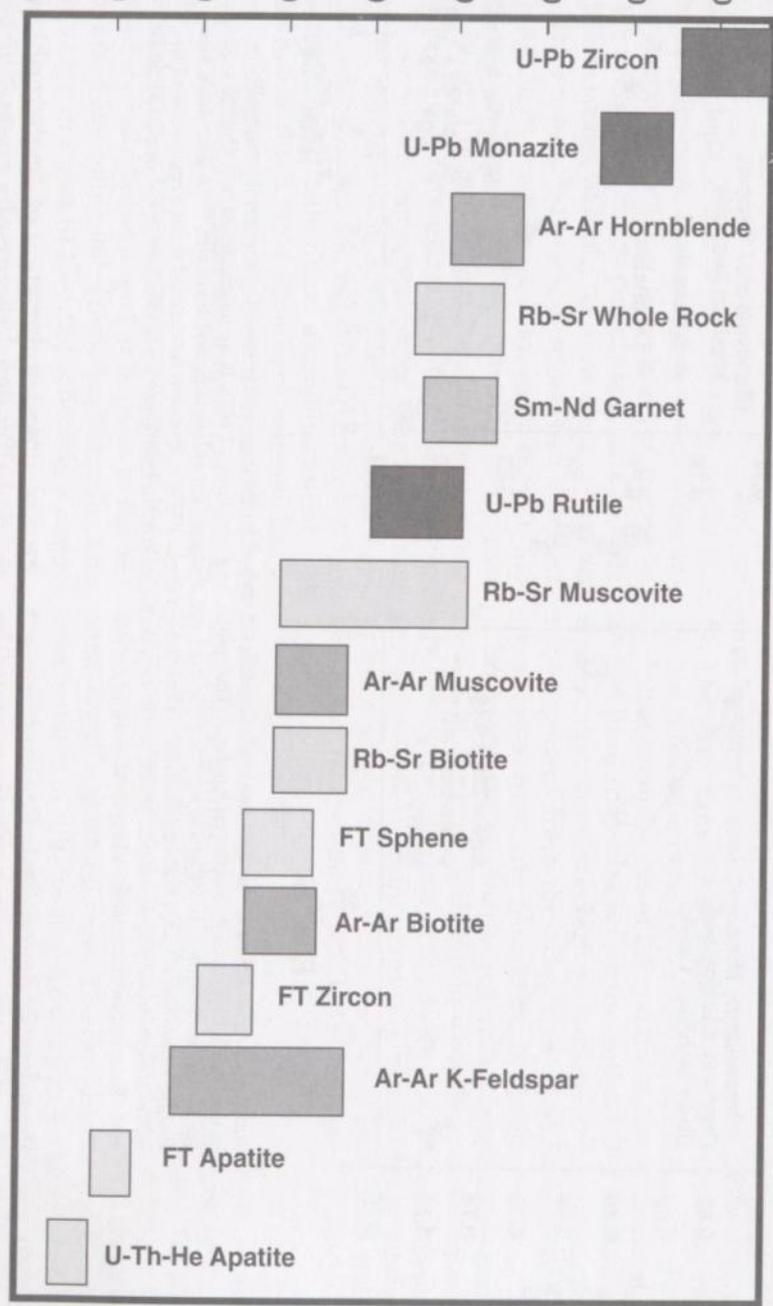


Fig. 3. Generally accepted range of closure temperatures for common minerals and isotopic systems. See text for details and references (FT = Fission Track).



金属矿床同位素定年：目前无公认成熟方法

- (1) 许多金属矿床常缺乏适合于传统同位素定年的测试对象；
- (2) 由于成矿过程中热液流体与围岩间的强烈相互作用，流体与流经物源区发生物质交换，流体活动产物受多种物源区的影响，经常达不到同位素平衡和同位素均一化，导致热液蚀变矿物既可能有成矿流体同位素特征，又保持了一定的原岩同位素特征；
- (3) 成矿后的岩浆—构造热事件有可能导致蚀变矿物或矿石矿物中同位素体系的扰动，使得放射成因同位素部分或全部丢失，此时获得的同位素年龄可能与实际的成矿年龄差别很大；
- (4) 某些元素在矿石或脉石矿物中的含量非常低，现有质谱仪的灵敏度、精确度和实验室条件(本底)难以精确测定样品中这些元素的同位素组成；
- (5) 热液矿物中Rb-Sr、Sm-Nd等元素的存在形式不清楚，使人们对所测年龄的地质意义存在一定的多解性。

金属矿床成矿年龄的确定是一件十分重要但是难度又很大的工作。针对一个具体的矿床，在进行成矿年代学研究时，要尽可能地采取不同的测定方法，使得出的结果在测试误差范围内相一致，如果产生明显的矛盾，则要对年龄数据本身及确定的相对地质事件序列进行重新研究，应尽量避免根据一、二个年龄数据妄下结论的做法。

在成矿年代学研究工作中除实验数据准确无误外，极为重要的一点是要建立在翔实的室内外观察和研究工作基础之上。

谢谢, 请指正

