

文章编号:1004-5589(2003)01-0057-07

# 铅锌矿床定年方法评述

李发源<sup>1,2</sup> 顾雪祥<sup>2</sup> 付绍洪<sup>1,2</sup> 章明<sup>1,2</sup> 司荣军<sup>2</sup>

1. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059; 2. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放实验室, 贵阳 550002

**摘要** 矿床成矿时代的界定对于矿床成因的认识、成矿事件时间维的标定及找矿方向的确定具有十分重要的理论意义和实际意义。MVT 铅锌矿床的精确定年更是建立可靠的成矿模式所必须解决的问题。本文评述了几种常用的 MVT 铅锌矿床的定年方法, 如古地磁法、<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 法、U-Pb 法、Rb-Sr 法、Sm-Nd 法和裂变径迹法; 阐明了精确定年在研究 MVT 矿床成因中的作用。随着实验技术和测试手段的不断发展和提高, <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 法、Rb-Sr 法和 Sm-Nd 法将在 MVT 矿床精确定年中得到广泛应用。

**关键词** MVT 铅锌矿床; 成矿年龄; 精确定年; 定年方法

**中图分类号**: P597.1

**文献标识码**: A

## 1 概述

矿床是地球物质演化过程中特定阶段的产物, 其成矿时代的界定对于矿床成因的认识、成矿过程各种事件时间维的标定及找矿方向的确定具有十分重要的理论意义和实际意义。如果对一个矿床成矿时代的认识发生了改变, 必然导致与成矿过程相联系的地质事件、成矿地质环境条件、成矿作用机制、控矿因素和成矿规律等方向的认识和看法的不同, 也直接影响到找矿勘查的实践和找矿靶区的预测<sup>[1]</sup>。如人们以前认为美国中部及东部 MVT 矿床的形成是 330 ~ 250 Ma 前的晚古生代阿勒格尼运动所引起的大规模流体运移的结果<sup>[2]</sup>, 但 Nakai 等 Rb-Sr 同位素定年的结果(377 ± 29 Ma) 证明了矿床与阿勒格尼运动无任何成因联系, 并提出了新的盆地压实成矿的模式<sup>[3]</sup>。又如华北地台周缘产在太古代古老变质岩系中的众多金矿床, 尽管其赋矿岩系为太古代变质岩, 矿床特征也在一定程度上能与国外老变质岩中的变质热液型矿床对比, 但种种现象又表明许多这类矿床与区内中生代的岩浆活动有关。因此对其成因一直有变质热液和岩浆热液之争, 相应的找矿思路、靶区预测也大相径庭。

密西西比河谷型(简称 MVT) 铅锌矿床是一类主要赋存于白云岩中的以铅锌为主要矿产的后生热液矿床。由于其广泛的分布和较高的金属含量, MVT 铅锌矿床已成为世界上铅锌的主要来源之一。它成群出现、赋矿层位多且主岩成岩时间跨度相当大的特点决定了确定其成矿年代是建立可靠的成矿模式所必须解决的问题<sup>[4,5]</sup>。Sangester 也曾指出只有找到准确测定成矿年龄的方法后, 对 MVT 矿床的认识才会取得实质性的进展<sup>[6]</sup>。但大多数 MVT 矿区在构造上相对稳定, 因此很少出现用来限定矿化年龄范围的成矿后事件, 而且 MVT 矿床一般缺少适用于直接同位素测年的矿物<sup>[7]</sup>, 这就为 MVT 矿床的定年研究带来了相当的难度。

## 2 主要定年方法及应用

随着高精度高分辨率质谱仪和高级超净实验室技术的发展, 人们对矿床定年方法的研究不断深入, 各种放射性同位素定年方法有了更广的实用性, 许多 MVT 矿床的成矿时代问题得到了较为满意的答案(表 1)。各种测年方法既有一定的适用范围, 也存在各自的局限性, 故了解每一种方法的优缺点将有利于对成矿时代的研究。下面就对几种主要的定

收稿日期: 2002-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(49872038)和中国科学院“百人计划”项目“分散元素成矿机制”资助。

作者简介: 李发源(1978-), 男, 四川盐源人, 硕士研究生, 主要从事层控矿床的研究。

表 1 世界部分重要 MVT 铅锌矿床(区)年龄(Ma)一览表  
Tab.1 Age data for some important MVT Pb - Zn deposits(districts)

矿区	区域	主岩	古地磁年龄(Ma)	放射性年龄(Ma)	定年方法/矿物	造山运动	参考文献
中密苏里(重晶石)	奥扎克	∈ <sub>3</sub> -下宾夕法尼亚系	303 ± 17(宾夕法尼亚期)			阿勒格尼	11
密苏里东南	奥扎克	∈		302 ± 2(D)	Rb - Sr/方铅矿		31
密苏里东南	奥扎克	∈		549 ± 20(P <sub>3</sub> -E <sub>1</sub> )	Ar - Ar/黄铁矿		8
密苏里东南	奥扎克	∈		50 ~ 250(P <sub>2</sub> -E <sub>2</sub> )	裂变径迹/磷灰石		8
中田纳西	纳什维尔	∈ <sub>3</sub> -O <sub>1</sub>	245 ± 10(P <sub>2</sub> -T <sub>1</sub> )			阿勒格尼	32
中田纳西	纳什维尔	∈ <sub>3</sub> -O <sub>1</sub>		260 ± 42(P <sub>2</sub> )	Th - Pb/方解石	阿勒格尼	33
东田纳西	阿巴拉契亚山脉南部	O <sub>1</sub>	286 ± 20(晚宾夕法尼亚期-P <sub>1</sub> )			阿勒格尼	34
东田纳西	阿巴拉契亚山脉南部	O <sub>1</sub>	316 ± 8(早宾夕法尼亚期)			阿勒格尼	14
东田纳西	阿巴拉契亚山脉南部	O <sub>1</sub>		377 ± 29(D)	Rb - Sr/锆石	阿卡迪亚	3
东田纳西	阿巴拉契亚山脉南部	O <sub>1</sub>		347 ± 20(密西西比纪)	Rb - Sr/锆石	阿卡迪亚	3,7
克拉科夫-西里西亚	波兰	D <sub>3</sub> -T <sub>2</sub>	46 ± 20(K <sub>2</sub> -E <sub>3</sub> )			阿尔卑斯/喀尔巴阡	35
塞文山	法国南部	∈ <sub>3</sub> -J	40 ~ 60 (E <sub>1</sub> -E <sub>2</sub> )			比利牛斯山	36
塞文山	法国南部	∈ <sub>3</sub> -J		25 ~ 80(K <sub>2</sub> -E <sub>3</sub> )	U - Pb, Th - Pb, Sm - Nd/萤石	比利牛斯山	8
盖斯河	阿巴拉契亚山脉北部	密西西比系(韦克阶)	300 ~ 320(宾夕法尼亚期)			阿勒格尼	17
盖斯河	阿巴拉契亚山脉北部	密西西比系(韦克阶)		297 ± 27(宾夕法尼亚期-P)	Ar - Ar/黑云母	阿勒格尼	19
伦纳德大陆架	澳大利亚	D <sub>3</sub>		357 ± 3(早密西西比纪)	Rb - Sr/锆石	坎宁盆地的拉张	5
Monarch - Kicking Horse	加拿大西部盆地	∈ <sub>3</sub>	100 ± 12(K)			Laramide	37
Nanisivik	加拿大北端	P <sub>1</sub>	1 095 ± 10 (P <sub>2</sub> )			Beloit 超群裂片	38
纽芬兰岛	阿巴拉契亚山脉北部	O <sub>1</sub>	380 ± 7(D)			阿卡迪亚	39
纽芬兰岛	阿巴拉契亚山脉北部	O <sub>1</sub>		360 ± 10(D <sub>3</sub> -早密西西比纪)	Ar - Ar/自生长石	阿卡迪亚	8
上密西西比河谷	美国中部	O <sub>2</sub>		270 ± 4(P <sub>1</sub> )	Rb - Sr/锆石	阿勒格尼/沃希托河	27
阿肯色州北部	奥扎克	O <sub>1,2</sub>	265 ± 20(P)			阿勒格尼/沃希托河	16
阿肯色州、三州交界以北	奥扎克	密西西比系-宾夕法尼亚系		> 183(>J <sub>1</sub> )	裂变径迹/磷灰石		40
Polaris	加拿大北端	O <sub>2,3</sub>	367 ± 7(D <sub>3</sub> )			Ellesmerian	41
Polaris	加拿大北端	O <sub>2,3</sub>		366 ± 15(D <sub>2</sub> -早密西西比纪)	Rb - Sr/锆石	Ellesmerian	4
派因波因特	加拿大西部盆地	D <sub>2</sub>	71 ± 13(K <sub>2</sub> -E <sub>1</sub> )			拉腊米	42
派因波因特	加拿大西部盆地	D <sub>2</sub>		361 ± 13(D <sub>3</sub> -早密西西比纪)	Rb - Sr/锆石	安特勒	7
派因波因特	加拿大西部盆地	D <sub>2</sub>		50 ~ 60(E <sub>1</sub> )	裂变径迹/磷灰石		30
天宝山	川滇黔交界	Z <sub>6a</sub>		270.693 ~ 774.1 2.30	U - Pb/方铅矿		10
大梁子	川滇黔交界	Z <sub>6a</sub>		91 ~ 439	U - Pb/方铅矿		9

年方法加以简要评述。

## 2.1 古地磁法

古地磁法是通过比较矿体和远离矿体的围岩之间原生剩磁方向的异同来判断矿体与围岩之间的生成关系,进而确认矿床的形成时代。常用的比较剩磁方向是否相同的方法有三种:一是视极移曲线法;二是置信圆比较法,即将直接将矿脉与围岩的原生剩磁方向在 95% 置信水平上进行比较,若围岩与矿脉方向矢量差小于矿脉剩磁方向的置信圆锥半顶角  $\alpha_{95}$ ,则认为它们有共同的原生剩磁方向,即矿体与围岩几乎同时形成或同时遭受后期重磁化作用的影响;第三是 McFaddeea 计算方法,该方法是从理论上通过数学公式的计算来比较围岩与矿脉原生剩磁方向的异同,常用公式为:

$$\frac{[R_1 + R_2 - R^2 / (R_1 + R_2)] / 2(N - R_1 - R_2) > (1/P)^{1/(N-2)} - 1}$$

$R_1$  和  $R_2$  分别是围岩和矿体剩磁矢量的长度,  $R$  是  $R_1$  和  $R_2$  的矢量和,  $N$  是围岩和矿体的样品数之和,  $P$  是概率值,通常取  $P$  为 0.05,即 95% 概率水平,不等式右边对给定的  $N$  值可直接查表。若计算结果使不等式不成立,则表明二者具有相同的剩磁方向,这意味着矿体与围岩同时形成或者围岩(或围岩与矿体同时)遭受后期重磁化。

古地磁法在地层的对比与划分、地质年代的建立、重建构造运动发展史、板块的演化史等多方面有着广泛的应用,但也存在一些问题, Sangester 就曾指出由于其理论的不完善,难以确定矿石中的磁性特征是继承成矿前的还是成矿后的,抑或成矿期的,以及在古地磁磁极解释上的不确定性,其结论仍缺乏说服力<sup>[6]</sup>。另外,古地磁法是通过判断矿体与围岩之间的关系来讨论其成矿时代,无法对某个矿床进行精确的定年,还有目前已建立的视极移曲线有待进一步完善,这就限制了该方法在 MVT 矿床准确定年中的应用。

Symons 和 Sangester 利用古地磁方法确定中密苏里矿区重晶石矿床的成矿时代为晚宾夕法尼亚纪一早二叠纪<sup>[11]</sup>,该结论有力地支持了 Leach 和 Rowan 提出的本区 MVT 矿床构造抬升的成矿模式<sup>[12]</sup>,但与 Cathles 和 Smith 提出的由压实作用引起的盆地间歇性排水的成矿模式相背<sup>[13]</sup>。Symons 和 Stratakos 用该方法测定了曼斯柯特—杰斐逊城

地区 MVT 矿床的成矿年龄为  $314 \pm 6$  Ma,并且认为矿床的形成是晚古生代阿勒格尼运动所引起的大规模流体运移的结果<sup>[14]</sup>。此外 Wisniowiecki、Pan 等都用古地磁法对 MVT 矿床进行过定年研究<sup>[15-17]</sup>。

## 2.2 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 法

含钾热液矿物的  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  法定年是几十年来使用最为广泛的热液成矿定年手段<sup>[18]</sup>,其测定对象主要包括碱性长石、云母类、角闪石类、伊利石和石英等。 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  要求样品满足“同时形成”和具有相同的“ $^{40}\text{Ar}$ - $^{36}\text{Ar}$ ”初始比,那么有

$$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar} = a \cdot ^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar} + b$$

式中  $a = ^{40}\text{Ar}^i / ^{36}\text{Ar}$ ,为样品形成时  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  的初始比,正常情况下  $a = 295.5$ ,  $b = (e^{\lambda t} - 1) / j$ ,对于某一样品的一次实验  $b$  为常量; $^{40}\text{Ar}$ 、 $^{39}\text{Ar}$ 、 $^{36}\text{Ar}$  为快中子照射后,样品中经过 K、Ca 和 Cl 校正的 Ar 同位素的含量; $^{40}\text{Ar}^i$  为样品形成时  $^{40}\text{Ar}$  的初始含量; $t$  为样品形成年龄; $\lambda$  为  $^{40}\text{K}$  衰变常数; $j$  为照射参数。

上式是  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  关于  $^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  的直线方程,直线的斜率为  $a$ ,代表样品  $^{40}\text{Ar}$ - $^{36}\text{Ar}$  的初始值;在  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  轴的截距为  $b$ ,为样品的等时线年龄,通过最小二乘法即可求得  $a$  和  $b$ 。

$^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  法具有多项其它方法所没有的优势:①分段加热得到的年龄谱上的坪年龄往往能反应出该矿物的热演化历史,这是其它方法无可比拟的;②  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄比  $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$  年龄精确。 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  等时线也比  $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$  等时线可信,而且  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  法等时线无须作大气氩的校正。即使样品中含有过剩氩,只要根据递增加热释放气体中的一系列测定值就能求出样品的年龄和外来氩的  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值;③样品用量小,由样品不均一性引起的问题也相对较小。

但是,  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  法存在的最大问题在于中子照射过程中某些样品会有  $^{39}\text{Ar}$  的反冲丢失。不过在此方面有所突破,采用了显微密封技术来克服辐射过程中因  $^{39}\text{Ar}$  反冲而引起的问题<sup>[43]</sup>。另外,氩是一种惰性气体,含钾矿物粒径对  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  法有一定的制约,氩不会固定地占据矿物晶格中的某一位置,由钾蜕变生成的氩很容易逃逸出去造成氩的丢失,一些后期地质作用如应力应变(矿物变形)、机械破碎、化学风化、热液蚀变、重结晶和

热动力变质等也会造成氩的丢失。其次,测定石英流体包裹体 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 年龄存在着次生包裹体的影响。Sherlek 通过测定同一样品上的矿物白云母的 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 年龄和 Rb-Sr 年龄,认为高压地区矿物的 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 年龄可能存在不可靠性<sup>[20]</sup>。

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法在 MVT 矿床定年中最典型的实例是 Kontak 等所做的实验,他们通过测量与盖斯河 MVT 矿床形成有关的变沉积碎屑的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄而得到较准确的成矿年龄为  $297 \pm 27 \text{ Ma}$ <sup>[19]</sup>,这与 Pan 等古地磁测龄的结果(300~320 Ma)是一致的<sup>[17]</sup>,说明矿床形成于古生代宾夕法尼亚期,与阿勒格尼运动有成因联系。

### 2.3 U-Pb 法

过去统称的 U-Th-Pb 法由于 U-Pb 和 Th-Pb 年龄的不一致而被 U-Pb 法所代替。U-Pb 法包括微量矿物法、单颗粒矿物 U-Pb 化学法、Pb-Pb 蒸发法和高分辨率高灵敏度离子探针质谱技术(SHRIMP)。就成矿时代而言,主要利用单颗粒矿物 U-Pb 法测定蚀变带或矿体中热液成因含铀矿物,如锆石、金红石、独居石、褐帘石、榍石和磷灰石等。铀有两个放射性同位素 $^{238}\text{U}$ 和 $^{235}\text{U}$ ,分别衰变为 $^{206}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}$ ,通过对这两个衰变系列 U、Pb 同位素的测定,可以获得三个年龄值( $^{207}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}$ - $^{235}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}$ - $^{238}\text{U}$ )。这些年龄值的差异大小可指示在同位素平衡以后体系所受扰动的程度,因而在地质上应用极广。但在成矿过程中形成的适合 U-Pb 测年法的含铀矿物较少,所以除独居石、褐帘石、磷灰石等少量 U-Pb 数据外,这种方法在研究成矿时代时不如 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 、Rb-Sr 和 Sm-Nd 体系等测年方法普遍。另外,由蚀变作用、射气作用、淋滤作用等造成的母体或子体同位素的丢失也会造成 U-Pb 年龄值的偏差。U-Pb 法的一个新进展就是铅的 $^{207}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}$ 等时线年龄越来越引起人们的关注<sup>[21]</sup>,尤其是当系统具有高的 U/Pb 比值,亦即含有足够高的放射成因铅同位素时,由于 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值在所有地球物质中是一个常数 1/137.8,因此 $^{206}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}$ 年龄可以不必求出矿物中铀的含量就能计算出来。

许多学者都用 U-Pb 法对 MVT 矿床进行过定年<sup>[6,9,10,22,33]</sup>。Sangster 计算过派因波因特、上西里西亚和东阿尔卑斯三个矿区各自的模式铅年龄分别为 314、184 和 345 Ma,其中前面两个与已知地质证据符合,而后一个却与地质事实大相径庭,可见其

局限性<sup>[6]</sup>。Brannon 等测得东堪萨斯和坎宁盆地 MVT 矿床脉石矿物方解石 $^{232}\text{Th}$ - $^{208}\text{Pb}$ 和 $^{238}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}$ 年龄为  $351 \pm 15 \text{ Ma}$ <sup>[22]</sup>,结果与 Christensen 等闪锌矿 Rb-Sr 年龄( $357 \pm 3$ )一致<sup>[5]</sup>,验证了 Christensen 等提出的大规模地壳流体运移及盆地间歇式排水的成矿模式。

### 2.4 Rb-Sr 法

Rb-Sr 法已被证明是一种有效的直接测定 MVT 矿床矿化年龄的方法<sup>[3,5]</sup>。Nakai 首次报道了东田纳西矿区 Coy 矿床的闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄( $377 \pm 29 \text{ Ma}$ ),该结果否定了以前人们所认为的美国中部及东部 MVT 矿床与 330~250 Ma 前的晚古生代阿勒格尼运动有成因联系的看法,并提出了新的盆地压实成矿的模式<sup>[3]</sup>。Nakai 又测定了东田纳西矿区 Immel 矿床的闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄( $347 \pm 20 \text{ Ma}$ ),这与 Coy 矿床的成矿时代是一致的<sup>[7]</sup>,证明了该区矿床形成时间在 350~380 Ma 之间,与中古生代的阿卡迪亚运动有成因联系。Brannon 等运用 Rb-Sr 法得出上密西西比河地区闪锌矿的年龄为  $269 \pm 6 \text{ Ma}$ 和  $270 \pm 4 \text{ Ma}$ <sup>[23]</sup>,这与 Nakai 的结果( $377 \pm 29 \text{ Ma}$ )<sup>[3]</sup>形成了鲜明的对比。但 Brannon 认为北美两个不同的成矿区迥异的年龄结果说明该区 MVT 矿床的形成是多期次的,至少有两个不同成矿期,而且它们都与同时期主要构造运动有关。

众所周知,Rb-Sr 等时线定年的基本前提是:在同一热液成矿阶段内从同一热液中基本同时沉淀的一组共生热液矿物及其中的原生包裹体溶液具有一致的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,但有不同的 Rb/Sr 比值;其次,该组矿物对于其初始 Rb-Sr 系统保持封闭到现在。由于在包裹体溶液的提取过程中很难排除次生包裹体的影响,所以一些学者对此方法还是抱有怀疑的态度。显然,要提高测量的精度,必须在去除次生包裹体方面多做工作,且在野外采样时要尽量采新鲜的未风化标本。刘建明还提出了用热液矿物组合的 Rb-Sr 等时线法来代替单一矿物的 Rb-Sr 等时线法以避免流体包裹体等时线法的先天性缺陷<sup>[1]</sup>。

### 2.5 Sm-Nd 法

这也是一种比较新的有效定年方法,但在 MVT 矿床定年方面的应用还比较少。Halliday 等报道了 Sm-Nd 法在英格兰北部奔宁矿区 MVT 矿床成因研究中的应用<sup>[24]</sup>,他们虽然没有得出确切的

成矿年龄,但是通过与 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 、 $\text{Rb}$ - $\text{Sr}$  年龄的对比限定了成矿时间在 200 Ma 左右,且与发生在石炭纪到侏罗纪之间的区域构造运动有成因联系。Chesley 等通过对伊利诺斯-肯塔基地区 MVT 矿床中萤石的 Sm-Nd 同位素的分析得出该区成矿年龄为  $277 \pm 16 \text{ Ma}$ <sup>[25]</sup>,并由此推断矿床的形成是阿勒格尼-沃希托河运动引起的大规模流体运移的结果。

Sm-Nd 法存在的问题主要有:Sm、Nd 丰度普遍很低,适合测试的矿物比较少;Sm、Nd 的化学性质相似,在矿石、矿物生成过程中的化学分异作用很小,从而使样品中 $^{143}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  比值的变化范围很小,再加上 $^{147}\text{Sm}$  半衰期较长,致使 Sm-Nd 等时线年龄分辨率一般小于 20Ma,不能测定年轻样品;在热液活动过程中 Sm 和 Nd 常处于一种开放体系,造成 Sm、Nd 各种参数的失常,这就使有时在实践工作中很难得到科学的、合理的等时线年龄。

### 2.6 裂变径迹法

裂变径迹法具有简便易行、灵敏度高、测定对象广泛等优点,尤其适于测定年轻样品。这一定年方法自 60 年代初开始使用,最常测定的矿物有磷灰石、锆石、榍石、石榴石、辉石、云母等。定年时间范围大致为 1~1 800 Ma。应用裂变径迹法的前提是样品对铀和裂变径迹都应是一个封闭系统,这样可按下式计算年龄:

$$T = I/\lambda_f \times \sigma \times \varphi \times \rho_s/\rho_t$$

式中  $T$  为裂变径迹年龄, $I$  为 $^{235}\text{U}$  和 $^{238}\text{U}$  的丰度比, $\lambda_f$  为 $^{238}\text{U}$  的自发裂变衰变常数, $\sigma$  为 2 200 m/s 的中子引起 $^{235}\text{U}$  裂变的截面  $634 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ , $\varphi$  为辐照样品接受的热中子积分通量, $\rho_s$  为自发裂变径迹密度, $\rho_t$  为诱发径迹密度。近年来,由于测定矿物的范围越来越广,尤其是石英蚀刻技术的发展,裂变径迹法在成矿定年中的应用日益受到关注<sup>[27]</sup>。

应该注意的是在裂变径迹定年研究中一般都假设被测矿物的退火是与矿化有联系的,然而,矿物退火作用有可能发生在成矿前或只与矿化无关的热事件有联系,在这样的前提下得出的年龄必然与实际不符,所以在野外采样时就应特别留心于此。石英的裂变径迹法中由于石英的铀含量低,分布不均匀,而且石英的最佳蚀刻条件未完全清楚,给测年带来很大的困难。同时,后期地质事件容易对古径迹产生影响,这就提醒我们在应用裂变径迹定年时必须慎而为之。近几年召开的国际核径迹会议,如 1996

年于埃及、1998 年于法国召开的国际固体核径迹会议,1996 年于比利时召开的国际裂变径迹会议中,一些与会专家提出有些裂变径迹的测试结果存在较大的误差,需要提高实验技术和手段才能得以解决。

Arne 用磷灰石裂变径迹方法研究了派因波因特地区的热历史<sup>[28]</sup>,指出该区矿床的形成是白垩纪地层下降埋藏而引起的区域性升温的结果,他还否定了 Mac Queen 和 Powell 在有机质成熟度研究的基础上提出的派因波因特地区地层古温度没有超过  $60^\circ\text{C}$  的结论<sup>[29]</sup>。Ravenhurst 用磷灰石裂变径迹法测得加拿大 Nova Scotia 地区铅锌、重晶石矿床的矿化年龄为 300~320 Ma<sup>[30]</sup>,并据此认为同时期构造运动引起盆地卤水的迁移是矿床形成的主要原因。

### 3 小结

通过以上对各种常用的定年方法的评述不难看出,越来越多的实验已经摒弃了人们以前所认为的密西西比型铅锌矿床不适合定年的观点。但究竟哪一种方法是最适合该类型矿床定年的呢? 各国学者对此还没有一致的观点。笔者认为,随着实验技术和测试手段的不断发展和提高,现在看来很有前景的几种定年方法,如 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  法、 $\text{Rb}$ - $\text{Sr}$  法、Sm-Nd 法定会克服目前所存在的缺陷和测试难点,得到广泛的应用。

对 Sm-Nd 法而言,彭建堂指出对 REE 含量较高,MREE 和 HREE 相对富集,LREE 相对亏损,且自形成后保持 Sm-Nd 封闭状态的方解石,可以用 Sm-Nd 法进行精确定年<sup>[26]</sup>。方解石在 MVT 矿床中普遍存在,因此总可以找到符合上述条件的方解石,采用 Sm-Nd 法加以精确定年。另外,我们不妨用热液矿物组合的 Rb-Sr 等时线法来代替单一矿物的 Rb-Sr 等时线法,以满足等时线法被测矿物应具有不同的 Rb/Sr 比值的前提并克服某些缺陷<sup>[1]</sup>,从而达到令人信服和满意的结果。这些实验技术的发展必将对 MVT 矿床成矿理论的研究起到极大的促进作用。总之,在实际工作中我们应结合研究区的地质特征选择适合的定年方法,在经费和时间允许的情况下不妨用多种方法进行研究,互相对比、制约以得出令人满意的结果。

此外,MVT 铅锌矿床的定年仍有许多工作待做。就我国而言,在川滇黔成矿带分布着大小百余个矿床,而目前人们对这些矿床精确定年的研究几

近空白,这不仅有资金和人力方面的限制,定年手段的制约也是一个重要的影响因素。相信随着研究的深入,这些问题都会迎刃而解的。

### 参考文献

- 1 刘建明,沈洁,赵善仁等,1998,金属矿床同位素精确定年的方法和意义. *有色金属矿产与勘查*, **7**(2):107~113
- 2 Oliver J, 1986, Fluids expelled tectonically from orogenic belts: Their role in hydrocarbon migration and other geological phenomena. *Geology*, **14**:99~102
- 3 Nakai S, Halliday A N, Kesler S et al., 1990, Rb-Sr dating of sphalerites from Tennessee and the genesis of Mississippi Valley-Type Ore deposits. *Nature*, **346**:354~357
- 4 Christensen J N, Halliday A N, 1995, Direct dating of sulfides by Rb-Sr: A critical test using the Polaris Mississippi Valley-Type Zn-Pb deposit. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **59**(24):5191~5197
- 5 Christensen J N, Halliday A N, Vearncombe J R et al., 1995, Testing models of large-scale crustal fluid flow using direct dating of sulfides: Rb-Sr evidence for early dewatering and formation of Mississippi Valley-Type deposits. Canning Basin, Australia. *Economic Geology*, **90**:877~884
- 6 Sangester D F, 1985, 密西西比河谷型铅锌矿床是一类地质特点差异很大的矿床. *国外地质科技*, **5**:25~36
- 7 Nakai S, Halliday A, Kesler S et al., 1993, Rb-Sr dating of sphalerites from Mississippi Valley-Type Ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **57**:417~427
- 8 Leach D L, Dwight Bradley and Lewchik M T et al., 2001, Mississippi Valley-type lead-zinc deposit through geological time: implications from recent age-dating research. *Mierarium Deposita*, **36**:711~740
- 9 王小春, 1991, 大梁子铅锌矿床的成因分析. *矿产与地质*, **5**(3):151~156
- 10 王小春, 1992, 天宝山铅锌矿床成因分析. *成都地质学院学报*, **19**(3):10~20
- 11 Symons D T A, Sangester D F, 1991, Paleomagnetic age of the Central Missouri Barite deposits and its genetic implications. *Economic Geology*, **86**(1):1~12
- 12 Leach D L, Rowan E L, 1986, Genetic link between Ouachita fold belt tectonism and the Mississippi Valley-type lead-zinc deposits of the Ozarks. *Geology*, **14**:931~935
- 13 Cathles L M, Smith A T, 1983, Thermal constraints on the formation of Mississippi Valley-type lead-zinc deposits and their implications for episodic basion dewatering and deposit genesis. *Economic Geology*, **78**:983~1002
- 14 Symons D T A, Stratakos K K, 2000, Paleomagnetic dating of dolomitization and Mississippi Valley-type zinc mineralization in the Mascot-Jefferson City district of eastern Tennessee: a preliminary analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, **69~70**:373~376
- 15 Wisniowiecki M J, Van der Voo R, McCabe C et al., 1983, A Pennsylvanian paleomagnetic pole from the mineralized Late Cambrian Bonnetterre Formation, SE Missouri. *Geophysical Research*, **88**:6540~6548
- 16 Pan H, Symons D T A, Sangester D F, 1990, Mississippi Valley-type ore and host rocks in the northern Arkansas and Tri-State districts. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **27**:923~931
- 17 Pan H, Symons D T A, Sangester D F, 1993, Paleomagnetism of the Gays River Zn-Pb deposit, Nova Scotia: Pennsylvanian ore genesis. *Geophysical Research Letters*, **20**:1159~1162
- 18 陈好寿, 1994, 成矿作用年代学及同位素地球化学. 北京:地质出版社, 242
- 19 Kontak D J, McBride S, Farrer E, 1994,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of fluid migration in a Mississippi Valley-type deposit: Gays River Zn-Pb deposit, Nova Scotia. *Economic Geology*, **89**:1501~1517
- 20 Sherlock S C, Nicolas O A, 1999, Flat plateau and impossible isochrons: Apparent  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  geochronology in a high pressure terrain. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **63**(18):2835~2838
- 21 邱华宁等, 1997, 东川铜矿床同位素地球化学研究(II): Pb-Pb,  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  法成矿年龄测定. *地球化学*, **26**(2):39~45
- 22 周朝宪, 魏春生, 叶造军, 1997, 密西西比河谷型铅锌矿床. *地质地球化学*, **1**:65~75
- 23 Brannon J C, 1992, Alleghenian age of the Upper Mississippi Valley zinc-lead deposits determined by Rb-Sr dating of sphalerite. *Nature*, **356**:509~511
- 24 Halliday A N, Shepherd T J, Dickin A P et al., 1990, Sm-Nd evidence for the age and origin of a Mississippi Valley-type ore deposit. *Nature*, **344**:54~56
- 25 Chesley J T, Halliday A N, Kyser T K et al., 1994, Direct dating of Mississippi Valley-Type mineralization: use of Sm-Nd in fluorite. *Economic Geology*, **89**:1192~1199
- 26 彭建堂, 胡瑞忠, 林源贤等, 2002, 锡矿山锑矿床热液方解石的 Sm-Nd 同位素定年. *科学通报*, **47**(10):789~792
- 27 Dran J C, 1977, Fission track dating of quartz grains from OKIO Uranium ore deposit. *Nuclear Instruments and Methods*, **147**:101~1

- 28 Arne D C, 1991, Regional thermal history of the Pine Point area, NW Territories, Canada, from apatite fission track analysis. *Economic Geology*, **86**(2): 428 ~ 435
- 29 MacQueen R W, Powell T G, 1983, Organic geochemistry of the Pine Point lead-zinc ore field and region, NW Territories, Canada. *Economic Geology*, **78**: 1 ~ 25
- 30 Ravenhurst C E, Reynolds P H, 1989, Formation of Carboniferous Pb-Zn and Brite mineralization from Basin-Driven fluids, Nova Scotia, Canada. *Economic Geology*, **84**(6): 1471 ~ 1488
- 31 Lange S, Chaudhuri S, Clauer N, 1983, Strontium isotopic evidence for the origin of barites and sulfides from the Mississippi Valley-type ore deposits in southeast Missouri. *Economic Geology*, **78**: 1255 ~ 1261
- 32 Lewchuk M T, Symons D T, 1996, Paleomagnetism and Mississippi Valley-type ore genesis in the Ordovician Knox Supergroup of Central Tennessee. In: Sangester D F (ed) Carbonate-hosted lead-zinc deposit. *Soc. Economic Geology Spec. Public.*, **4**: 567 ~ 576
- 33 Brannon J C, Close S C, Podosek F A et al., 1996, Th-Pb and U-Pb dating of ore-stage and Paleozoic fluid flow. *Science*, **271**: 491 ~ 493
- 34 Bachtadse V, Vander V R, Haynes F M et al., 1987, Late Paleozoic magnetism of mineralized and unmineralized Ordovician carbonates from East Tennessee: evidence for post-ore chemical event. *Geophysics Research*, **92**: 14165 ~ 14176
- 35 Symons D T A, Sangester D F, 1995, A Tertiary age from paleomagnetism for Mississippi Valley-Type zinc-lead mineralization in Upper Silesia, Poland. *Economic Geology*, **90**: 782 ~ 794
- 36 Lewchuk M T, Al-Aasm I S, Symons D T A et al., 1998, Dolomitization of Mississippian carbonates in the Shell Wateron gas field, southwestern Alberta: insights from paleomagnetism, petrography and geochemistry. *Can. Soc. Petrol. Geol. Bull.*, **46**: 387 ~ 410
- 37 Symons D T A, Lewchuk M, Sangester D F, 1998, Laramide orogenic fluid flow into the Western Canada Sedimentary Basin: evidence from paleomagnetic dating of the Kicking Horse Mississippi Valley-Type deposits. *Economic Geology*, **93**: 68 ~ 83
- 38 Symons D T, Symons T B, Sangester D F, 2000, Paleomagnetism of the Society Cliffs dolostone and the age of the Nanisivik zinc deposits, Baffin Island, Canada. *Meteorium Deposita*, **35**: 412 ~ 459
- 39 Pan H, Symons D T A, 1993, Paleomagnetic of the Mississippi Valley-Type Newfoundland zinc deposit: evidence for Devonian mineralization in the northern Appalachians. *Journal of Geophysical Research*, **98**: 22415 ~ 22427
- 40 Arne D C, 1992, Evidence from apatite fission-track analysis for regional Cretaceous cooling in the Ouachita mountain fold belt and Arkoma basin of Arkansas. *Ame. Petrol. Geol. Bull.*, **76**: 392 ~ 402
- 41 Symons D T A, Sangester D F, 1992, Late Devonian paleomagnetic age for the Polaris Mississippi Valley-type Zn-Pb deposit, Canadian Arctic Archipelago. *Can. J. Earth Sci.*, **29**: 15 ~ 25
- 42 Symons D T A, Pan H, Sangester D F et al., 1993, Paleomagnetism of the Pine Point Zn-Pb deposits. *Can. J. Earth Sci.*, **30**: 1028 ~ 1036
- 43 Smith P E, Evensen N M, York D et al., 1993, First successful  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating of glauconies. *Geology*, **21**: 41 ~ 44

### Dating Methods for MVT Pb-Zn Deposits: a Review

Li Fa-yuan<sup>1,2</sup>, Gu Xue-xiang<sup>2</sup>, Fu Shao-hong<sup>1,2</sup>, Zhang Ming<sup>1,2</sup>, Si Rong-jun<sup>2</sup>

1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

**Abstract** Metallogenic age restriction of ore deposit is of great significance both in theory and in practice, which is helpful to understanding the origin of ore deposit and demarcating of temporal dimension on mineralization event to the exploration of deposits. Precision dating is critical for establishing a reliable metallogenic model of MVT Pb-Zn deposits. In this paper, we review some major dating methods that are after used, such as paleomagnetic  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ , U-Pb, Rb-Sr, Sm-Nd, fission track methods, and illuminate the role of precision dating in investigating the genesis of MVT deposit. Following the development of experimentation and testing technique, methods of  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ , Rb-Sr, Sm-Nd applied in precision dating of MVT Pb-Zn deposits.

**Key words** MVT Pb-Zn deposits, metallogenic age, precision dating, dating methods