

成矿过程多元同位素体系的时代信息^①

陆松年 李惠民 李怀坤 杨春亮

(中国地质科学院)

提 要 成矿过程时间维的确定是一项重要而复杂的研究任务。尽管我国许多矿床已经测得了大量同位素年龄资料,但这决不等于这些年龄数据均能标定成矿过程中某一地质事件发生的时代。作者通过实例分析指出,矿床同位素地质年代学的研究必须建立在扎实的野外地质背景研究基础之上;在测年方法上,应采用多元同位素体系,但要更多地关注单矿物、乃至矿物微区的 U-Pb、Ar-Ar 和 Re-Os 测年方法;在使用等时线法时,必须首先对其合理性进行科学判别。

关键词 成矿过程 时间维 多元同位素体系

0 前 言

矿床是地壳演化过程中特定阶段的产物,其定位时代对于矿床成因的确定、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和实际意义。目前,成矿时代的研究已成为矿床学、区域地质学和大地构造学中不可缺少的内容。然而,由于矿床形成的复杂性、多期性和测年方法及测定对象的局限性,往往对成矿时代产生很大争议。例如对我国著名的白云鄂博超大型铁、稀土矿床历来有同生和后生之分歧。袁忠信等(1991)坚持同生成因说,认为该矿床与海底火山喷气作用有关,成矿时代为中元古代。而赵景德等通过对交代矿物 U-Pb 和 Ar-Ar 年龄的测定,提出了成矿作用的时间顺序,认为该区热液活动始于 1.2Ga,稀土矿化则主要发生在 0.6~0.4Ga 之间,支持白云鄂博矿床属于后生热液交代成因。

对广泛分布于华北地台前寒武纪变质基底中的金矿成矿时代更是众说纷纭,概括起来有两种倾向意见:一种意见认为金矿与中生代花岗岩有关,成矿时代为燕山期;另一种意见认为除燕山期为重要成矿期外,太古宙末(~2.5Ga)和早元古代末期(~1.8Ga)也是重要成矿时期,如夹皮沟、小营盘、金厂峪和排山楼等大型金矿均可能在前寒武纪已基本成型。

裴荣富等(1993)在阐述成矿年代学重要性时指出:它是研究金属成矿省历史演化的钥匙,只有通过它才能打开金属成矿省演化规律。然而成矿年代研究本身又受到诸多因素的制约,虽然我国近年来获得了许多矿床的成矿时代信息,对年龄数据,不同的学者又有不同的地质解释。本文试图通过对成矿时代实际资料的解剖和分析,讨论各种测年方法的适用性及局限性,

^① 收稿日期 1995.5.2 改回日期 1995.6.29

强调运用多元同位素体系来了解成矿过程的年代信息。

1 当代成矿时代研究方法的重要进展

近年来,测年技术飞速发展,新技术新方法不断涌现,并被迅速应用于矿床成矿时代的研究中。传统的利用与矿体有关的地质体(如地层、岩体等)间接测定成矿时代的方法,已趋向被更准确、直接地测定与矿石共生的矿物年龄的测年方法所取代(毛德宝,1992)。目前,应用的测年方法很多,如测定蚀变或矿石矿物(如热液锆石、金红石、榍石、白钨矿、白云母、辉钼矿等)的 U-Pb、K-Ar、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 、Rb-Sr、Sm-Nd 和 Re-Os 年龄及流体包裹体的 Rb-Sr 年龄等(李华芹等,1993)。

在测年技术方法方面,西方发达国家,如澳大利亚、美国、加拿大等处于领先地位。澳大利亚离子探针质谱仪 SHRIMP、SHRIMP II 问世以后,现正在研制一台分辨率和灵敏度均极高的名叫 SHRIMP7000 的离子探针;在美国激光探针 ^{40}Ar - ^{39}Ar 测年技术发展迅速,已推广至各个地质领域的年代学研究中;在加拿大 U-Pb 稀释法测年技术水平极高,可以将相差 10Ma 的地质事件区分开。目前,国外对成矿作用时代的高水平的研究多采用的是 U-Pb 法,测定矿体中的热液成因矿物如锆石、榍石、金红石、锐钛矿等。甚至通过不同世代的与矿石矿物共生的矿物的年龄的测定,能够比较精确地给出矿化作用持续的时间。这在南非巴布顿地区、加拿大阿比提比等地区的一些重要金矿的成矿作用年代学的研究中均有十分成功的范例(J. C. Claore-Long, et al., 1990; C. E. J. de Ronde, et al., 1991)。国外同行除了对测年技术本身的提高十分重视外,他们对测年对象如锆石、榍石、金红石等的成因研究也已取很多成果。如 H. H. Bostock 等(1994)利用扫描电镜对岩浆锆石、变质锆石进行微观结构研究,发现一些锆石的内部微观结构是比较复杂的,岩浆结晶锆石显示对称的环带、变形作用过程中形成的锆石显示复杂的环带、剪切作用过程中形成的锆石显示不规则状环带,而有的锆石则是由内部具环带的核和外部透明的、无环带的变质重结晶生长边组成的。A. P. G. Abraham 等(1994)最近对不同成因的榍石进行了较深入的地球化学特征研究,发现岩浆成因、变质成因和热液成因的榍石,在 Th/U 比值、REE 及微量元素特征等方面均有明显的差别。所有这些针对测年矿物的微观结构及地球化学特征等方面的富有成果的研究工作,对于测年数据作出合理的地质解释均是十分必要和有效的。

近年来我国同位素测年技术发展亦很快, ^{40}Ar - ^{39}Ar 、Rb-Sr、Sm-Nd 等测年技术均具有较高的水平,单颗粒锆石 U-Pb 化学法和 Pb-Pb 蒸发法测年技术颇受行家青睐。目前我国应用于成矿时代的研究方法主要是测定矿化过程中形成的含钾矿物如白云母、金云母、绢云母等的 K-Ar 法、Ar-Ar 法,含铀矿物独居石、磷灰石等的 U-Pb 法。李华芹从法国引进的石英包裹体 Rb-Sr 等时线法也已逐步应用。此外,Sm-Nd 和 Rb-Sr 等时线法的年龄数据在文献中陆续有所报导,另据作者所知,直接测定矿石矿物,如辉钼矿的 Re-Os 法也已问世。最近二年作者等也尝试利用 U-Pb 法测定含金石英脉中的单颗粒锆石年龄来确定金矿的成矿时代,但这仅仅是一个开端,正如下文指出还有一些关键问题需要解决。

2 同位素测年方法的局限性

各种测年方法对于所需解决问题既有一定的适用性,也有一定局限性。了解每一种方法的适用性和局限性,将有利于对成矿时代的研究。对于已引起广大地质同行注意的同位素测年方法局限性问题,如云母类和长石矿物封闭温度较低,K-Ar体系易受扰动,一般不适宜测定前寒武纪已变质矿床等问题本文不再赘述。作者仅在此强调国内应用较广的 Rb-Sr、Sm-Nd 和 U-Pb 法所存在的局限性,以引起同行在工作中的注意。

2.1 Rb-Sr 法

Rb-Sr 等时线法在运用于成矿时代研究时多测定全岩、矿物和石英包裹体。全岩 Rb-Sr 等时线法多解决成矿围岩的时代,是间接应用于成矿时代的研究方法,而测定蚀变矿物或蚀变带、矿体中石英包裹体的 Rb-Sr 等时线法则直接测定成矿时代。陈好寿、李华芹(1991)、张振海等(1993)均报导过这方面的测定结果。

Rb-Sr 矿物或包裹体等时线法象所有等时线方法一样,要求样品同源、具有相近的同位素初始比值和形成后处于封闭体系,否则可能给出错误的混合或人为等时线年龄数据。作者曾以 Sm-Nd 法为例做过详细分析(陆松年,1994)。实际上 Rb-Sr 等时线法也存在合理判别问题,即如何科学地判定等时线上的样品应被剔除或被保留的问题。

判别样品是否同源或在长期的地史过程中能否保持封闭体系,同位素初始比值 I_{Sr} 是一个重要的判别函数,而锶模式年龄 T_{Sr} 与 I_{Sr} 具有密切的相关关系,所以 T_{Sr} 也是一个重要的判别函数。正象作者已指出的那样(1994),只要通过 T_{Sr} 的计算,运用密集点群的判别方法即可较合理地筛选等时线上的各个样品。被保留样品组成的等时线即为合理的等时线,其年龄可视为矿物或包裹体形成或经历一次热事件后 Rb-Sr 均一化的时代。

由于矿床的形成一般都经历过多次矿化阶段或多期成矿作用的叠加,如何保证被测试样品基本符合等时线的理论要求是一个难题。除去在野外或通过室内详细研究成矿过程中的多期性和阶段性,仔细挑选属于同一成矿期次的蚀变矿物或石英包裹体,认真进行矿物共生和矿物共生组合的研究外,作者重申必需对组成等时线上的样品进行科学的而不是人为的筛选过程。在下文实例分析中读者将会注意到人为的或混合等时线所造成的问题。

2.2 Sm-Nd 法

象 Rb-Sr 法一样,Sm-Nd 法也被应用于间接或直接测定成矿时代。Sm-Nd 全岩等时线法主要应用于测定前寒武纪时期铁镁质火山岩和侵入岩的形成时代,同时 Nd 同位素地球化学也广泛应用于物源的示踪。矿石和矿石中矿物的 Sm-Nd 等时线年龄可用于直接测定成矿时代,但目前报导的数据远比 Rb-Sr 年龄少。虽然 Sm 和 Nd 在地质演化中抗拒各种地质事件影响的能力较强,但在热液活动过程中 Sm 和 Nd 似乎常处在一种开放体系,造成各种 Sm-Nd 参数的失常,以致无法获得合理的等时线年龄。

合理的选择测定样品需在详细的地质研究基础上进行,同时对测定结果需要经过密集点群的判别,否则会给出错误的年龄信息。

上述 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线都是一种严格的定年方法,而不是简单地仅由几个测定结果给出的一个年龄数据。方法本身要求样品同源、具有相近的同位素初始比值和处在封闭体系,理论上的这种严格的制约就决定了实践工作中往往很难得到一条科学的合理的等时线年龄。在进行成矿时代研究时,运用等时线方法必须强调有坚实的地质基础,特别是对成矿过程期次的划分和矿物组合特征有详细的了解。对同一世代矿物进行等时线测年时要有精确的实验测定结果,并对测试结果进行合理的判别后才可能获得一条有用的等时线年龄数据。

2.3 U-Pb 法或 Th-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。Th-Pb 年龄数据很少,文献中极少使用这类方法测定成矿时代,但在某些特殊矿区在含铀少而钍多的矿物中也有使用 Th-Pb 年龄的情况。

U-Pb 法由于测定对象主要是含铀矿物,且铀有二个放射性同位素 ^{238}U 和 ^{235}U ,分别衰变成两个铅同位素子体 ^{206}Pb 和 ^{207}Pb 。通过这两个衰变系列,可获得三个年龄值($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$),这些年龄值的差异可指示在同位素平衡以后,该体系受到干扰的程度,因而在地质上应用极广。但在成矿过程中形成的含铀矿物较少,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反不如 K-Ar、Rb-Sr 和 Sm-Nd 体系等测年方法普遍。

U-Pb 法本身已有多种测定方法,包括微量矿物法、颗粒矿物 U-Pb 化学法和 Pb-Pb 蒸发法以及高精度离子探针方法。对各种方法的优缺点作者已做过详细说明(陆松年,1995),在此不再赘述。目前看来利用高精度的单颗粒矿物 U-Pb 法测定蚀变带或矿体中含铀矿物如锆石、金红石、独居石、褐帘石、榍石、锐钛矿、磷灰石等的年龄对于研究成矿时代是一种有前途的测年方法。

作者等近年来已测得一些矿区含金石英脉中的锆石 U-Pb 年龄,其中包括张家口小营盘、冀东金厂峪、胶东玲珑、马家窑和河南小秦岭等金矿(资料尚未发表)。根据作者的实践,有两个问题应引起注意。第一,含金石英脉中锆石的含量一般很少,从无到微量,多数 1~5 粒锆石/1kg 样品。由于数量少,分选困难将难于普遍推广使用。因此作者已转向选取金红石等热液矿物;第二,如何证明锆石是与金矿同期形成,而不是从围岩中捕获?对此作者等已从地质背景和锆石成因的研究中着手解决这一问题,此成果不久将同石英脉中锆石年龄资料一起公诸于众。实践提示我们不能将含金石英脉中锆石 U-Pb 年龄简单地视为成矿年龄,必须做深入细致的配套研究工作。

3 实例分析

在实例分析中,我们将会看到运用同位素测年方法研究成矿时代的复杂性、局限性和对年龄资料解释的艰巨性。

3.1 白云鄂博铁-稀土矿床

对我国超大型白云鄂博铁-稀土矿床的研究已有一系列专著和论文问世。继地化所等以后

90年代以来对白云鄂博矿床成矿时代又形成了一个新的热潮,袁忠信(1991)、张宗清(1991、1994)、赵景德等(1992)和任英忱等(1994)都做了有益的探索。

白云鄂博矿床成矿时代不仅研究时间长、资料多,而且使用的方法也多,体现了多元同位素体系在研究复杂成矿过程时的重要性。同位素年龄资料已愈来愈证实白云鄂博群成矿围岩的时代为中元古代而不是古生代。

白云鄂博矿床经受的重大热-构造事件,依据大量的同位素数据集中在4个年龄段,即 $1.2\sim 1.8\text{Ga}$ 、 $0.7\sim 0.9\text{Ga}$ 、 $0.4\sim 0.6\text{Ga}$ 和 $0.2\sim 0.3\text{Ga}$ 。前人长期研究结果表明白云鄂博矿床的形成经历过长期复杂的演化过程,绝非一、二种测年方法和一、二个年龄数据就能够确定该矿床的形成时代。应用多元同位素体系的测定确定的重大热-构造事件已经粗略勾划出白云鄂博矿床演化的时间轨迹,但目前从已发表的资料分析仍有几个重大地质问题需要进一步研究:

3.1.1 含矿层时代的确定 白云鄂博群尖山组是成矿的主要围岩,作者曾在尖山组含矿层顶部玄武质岩石中获得过 $1728\pm 5\text{Ma}$ 的单颗粒锆石 U-Pb 年龄(王楫、陆松年等,1995),地化所报导过独居石、磷灰石的 Th-Pb 和 U-Pb 年龄分别为 $1500\pm 100\text{Ma}$ 和 1588Ma (1988)。袁忠信报导的 Sm-Nd 全岩等时线年龄为 $1580\pm 360\text{Ma}$ (1991),即前人报导的同位素年龄数据集中在 $1500\sim 1728\text{Ma}$ 区间。似表明尖山组形成于中元古代早期。但最新的矿石 Sm-Nd 分析资料又报导了 $\sim 1.3\text{Ga}$ 的成矿年龄(见下文),因此又引出了新的问题。是已测定的尖山组地层年龄偏老,还是在地层形成以后于 $\sim 1.3\text{Ga}$ 又有稀土矿化的叠加?因此对 $\sim 1.3\text{Ga}$ 的年龄资料需加以剖析。

3.1.2 稀土矿化时代的确定 表1中列出了最新的稀土矿石 Sm-Nd 测定结果及计算的同位素参数。5条等时线包含了34个样品。从同位素参数 I_{hd} 和 T_{DM} 等参数的对比中,除第四条等时线有两个样品(68-3、68-4)出现较大的偏离而应予剔除外,其它四条等时线年龄应是可予利用的。其中第1、2、5条给出了 $1580\pm 360\text{Ma}$ 、 $1288\pm 19\text{Ma}$ 和 $1314\pm 41\text{Ma}$ 的等时线年龄。由于样品采自同一矿区,测定单位均地矿部地质研究所,三条等时线的样品的钆同位素初始比相近,因此将所有26个样品的测定数据作为一条等时线的数据计算了年龄,其数值为 $1361.6\pm 95.3\text{Ma}$,矿体中所测样品的 T_{DM} 均值为 1.658Ga 、 T_{CHUR} 为 1.301Ga 。样品的等时线年龄接近球粒陨石模式年龄 T_{CHUR} ,而明显低于亏损地幔模式年龄 T_{DM} 的现象已引起了前人的注意。张宗清等(1944)认为该区亏损地幔模式年龄和球粒陨石模式年龄(与等时线年龄相近),代表了两次地质事件的同位素示踪信息,即在 1658Ma 左右,从变质(交代)亏损地幔中分离出富 CO_2 、F、碱金属和稀土元素流体,而在 1300Ma 前后上升成矿。

模式年龄是用不同参数计算的数值,所有样品都存在 T_{DM} 和 T_{CHUR} 数值的差别。等时线年龄接近某一种模式年龄均值,或介于二者之间,甚至偏离两类模式年龄都是可能出现的情况,其地质意义还需结合地质背景的研究。白云鄂博稀土矿 Sm-Nd 分析资料所出现的年龄状态可能有下列原因造成:

(1)如同张等指出是两次地质事件,一次发生于地幔交代,一次是壳-幔分离;

(2)也可能是另外两次地质事件的结果,在 1658Ma 时期,出现了富稀土碳酸盐岩浆的地壳添加,该岩浆以侵入体的形式垫托于下地壳(记录了早期亏损地幔的模式年龄),而在 1360Ma 左右岩浆板垫重新活化上侵喷出(等时线年龄记录了钇钆的重新均一化)。

(3)所有三种钐钕年龄仅有一个地质含义,即在 1360Ma 左右富稀土热液的活动。而此时地幔性质不属于亏损地幔,而是基本未亏损的地幔。因此计算的亏损地幔模式年龄偏大,没有地质意义。

表 1 白云鄂博矿区 Sm-Nd 同位素分析结果

Table 1 Sm-Nd isotope data from orebodies in Bayan Obo

编号	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	Sm/Nd	^{147}Sm / ^{144}Nd	^{143}Nd / ^{144}Nd	ϵ_{Nd}	ϵ_{Nd}^t	T_{DM}	等时线 年龄(Ma)	T_{CHUR}	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}^t$	资料 来源	重新计算的 等时线年龄(Ma)
By-1	3.3910	3.1100	1.0904	0.065960	0.511570	-20.833	6.428	1.627	1580±360	1.244	0.510865	-0.6647	(1)
By-2	7.7400	1.2500	6.1920	0.037460	0.511300	-26.100	6.494	1.597		1.279	0.510907	-0.8096	
By-4	1.0720	1.3450	0.7970	0.048210	0.511378	-24.579	6.424	1.629		1.292	0.510862	-0.7549	
By-5	1.1940	1.2310	0.9699	0.058670	0.511535	-21.516	6.520	1.585		1.217	0.510924	-0.7017	
By-9	2.5510	2.8590	0.8923	0.053970	0.511480	-22.589	6.598	1.590		1.236	0.510916	-0.7256	
By-14	2.9860	3.6870	0.8099	0.048990	0.511373	-24.676	6.397	1.641		1.304	0.510844	-0.7509	
B9113	402.7000	2596.0000	0.1551	0.093830	0.511762	-17.088	6.136	1.760	1286±91	1.297	0.510676	-0.5230	1361.6±95.3
B9114	262.2000	3313.0000	0.0791	0.047870	0.511353	-25.066	6.382	1.648		1.315	0.510834	-0.7566	
B9116	134.2000	1434.0000	0.0936	0.056610	0.511449	-23.194	6.384	1.647		1.292	0.510836	-0.7122	
B9118	64.5000	604.6000	0.1067	0.064530	0.511521	-21.789	6.354	1.627		1.287	0.510816	-0.6719	
B9119	28.3600	202.5000	0.1400	0.084690	0.511672	-18.844	6.176	1.742		1.313	0.510702	-0.5694	
B9120	412.9000	4464.0000	0.0925	0.055950	0.511431	-23.545	6.361	1.657		1.306	0.510821	-0.7156	
B9121	258.2000	2518.0000	0.1025	0.062930	0.511528	-21.653	6.428	1.627		1.255	0.510865	-0.6846	
B9122	448.6000	5070.0000	0.0885	0.053520	0.511447	-23.233	6.149	1.617		1.267	0.510878	-0.7279	
B9123	167.2000	2608.0000	0.0641	0.038780	0.511308	-25.944	6.483	1.602		1.282	0.510900	-0.8028	
B9124	662.3000	9227.0000	0.0718	0.043420	0.511297	-26.159	6.366	1.655		1.332	0.510825	-0.7793	
B9125	712.5000	8051.0000	0.0885	0.053530	0.511443	-23.311	6.441	1.621		1.271	0.510873	-0.7279	
B9141	816.7000	1071.0000	0.7626	0.048580	0.511393	-26.042	6.266	1.701		1.372	0.510760	-0.7530	
B9145	0.134.0000	0.112.0000	0.1768	0.106900	0.511893	-14.533	6.073	1.789		1.263	0.510635	-0.4565	
B9155	22.9900	157.2000	0.1462	0.088420	0.511623	-19.800	5.934	1.852		1.427	0.510545	-0.5505	
B9156A	14.8100	99.6400	0.1486	0.092710	0.511673	-18.824	5.928	1.855		1223±65	1.412	0.510541	
B9156B	1010.9000	1516.0000	0.6662	0.040280	0.511250	-27.076	6.342	1.666	1.351	0.510809	-0.7952	(2)	
68-1	7032.0000	8996.0000	0.7817	0.047280	0.511393	-24.286	6.474	1.606	422±18	1.269	0.510894	-0.7596	(2)
68-2	6296.0000	7790.0000	0.8082	0.048890	0.511395	-24.189	6.450	1.617		1.277	0.510878	-0.7514	
68-3	35.5600	161.1000	0.2207	0.133500	0.511626	-19.741	3.674	2.878		2.429	0.509089	-0.3213	
68-4	14.8700	71.2200	0.2088	0.126300	0.511616	-19.936	4.156	2.660		2.204	0.509399	-0.3579	
68-5	0.6236	5.2390	0.1190	0.072000	0.511462	-22.940	6.026	1.311		1.435	0.510604	-0.6340	
8B7				0.042410	0.511291	-26.471	6.357	1.659		1.339	0.510818	-0.7844	
277				0.041390	0.511279	-26.510	6.374	1.651		1.332	0.510830	-0.7896	
496-330				0.044170	0.511254	-26.998	6.267	1.701		1.381	0.510760	-0.7754	
9204				0.046320	0.511312	-25.866	6.334	1.670	1313±41	1.342	0.510803	-0.7645	(3)
9207				0.040170	0.511269	-26.705	6.380	1.649		1.331	0.510834	-0.7958	
9208				0.071430	0.511530	-21.614	6.200	1.731		1.346	0.510717	-0.6369	
9209				0.041960	0.511277	-26.549	6.365	1.656		1.336	0.510823	-0.7882	

资料来源:(1)张宗清等(1991) (2)张宗清等(1994) (3)任英忱等(1994)

参数意义及计算公式参考陆松年(1994)

从现有的 Sm-Nd 资料分析,稀土矿石 Sm-Nd 等时线年龄似代表 1360Ma 前后的一次强烈的稀土矿化,稀土物质来源于地幔,但这次成矿是与白云鄂博群尖山组同时形成,还是时代上滞后,由于缺少尖山组地层多元同位素体系的信息(虽然作者获得了 1728Ma 的锆石 U-Pb 年龄),还难于定论。显然,白云鄂博群的同位素测年还有待进一步深入。

3.1.3 加里东期多元同位素时代信息的地质意义 近年来获得了越来越多的加里东时期的年代信息,除宽沟碳酸盐岩脉 433Ma 的 Rb-Sr 年龄(白鸽等,1985),尚有 473±2Ma 的独居石 Th-Pb、425Ma 的碱性角闪石 Ar-Ar 和 438±25Ma 的易解石 Th-Pb 年龄数据(赵景德,1991)。任英忱(1994)也报导了主矿北和都拉哈拉独居石的 461±2Ma 和 445±11Ma 的 Th-Pb

年龄。前人均认为这一时期的年龄代表了稀土矿化的时代,然而不同的研究者对其重要性认识却有差别。有的强调该期是白云鄂博稀土主矿化期,有的则认为是叠加在元古成矿作用上的第二期稀土矿化期。

从上述多元同位素体系年龄资料的分析中,使我们看到了象白云鄂博这样的矿床成矿过程是何等复杂和漫长,也使我们看到利用多元同位素体研究成矿过程的潜力和已取得的长足进展。虽然有些重大问题仍需继续研究,但白云鄂博成矿过程的轨迹越来越清晰。

3.2 胶东金矿密集区

胶东为我国金矿储量最大的密集区,按李兆龙等(1993)意见分为招掖、蓬莱-栖霞、牟平-乳山和文登-荣成等四个金矿成矿带,其中以招掖储量最大,占有胶东金矿储量的86.3%。虽然本区金矿地质研究程度高,但有关成矿时代的资料并不很多,主要测定对象为云母类蚀变矿物,方法以K-Ar和Rb-Sr为主。究其原因可能是:第一,许多大型金矿产于中生代花岗岩体中,对金矿形成于燕山期的意见争论不大;第二,在石英脉型和破碎蚀变岩型矿中,除云母类等含钾矿物外,可用于测年的矿物类型少。根据作者的研究,本区除以燕山期为主要成矿期外,可能还存在前寒武时期的成矿作用。同时,仅根据一种同位素体系的一个或少数年龄数值划定成矿期的做法值得商榷。

3.2.1 多期成矿的铅同位素信息 在同位素体系中,以Pb体系最复杂,由于做为窥视铅源特征的方铅矿、黄铁矿等低铀矿物中除普通铅外,还可能包含有异常铅,同时在地史演化过程中由于放射性U-Pb体系的加入,因此除单阶段演化模式外,又产生了两阶段及多阶段演化模式。数据分析的复杂性和计算过程的繁琐性,常使地质人员如坠云雾。有的学者断言铅模式年龄无地质意义,有的则完全依据模式年龄推断铅来源的层位。作者认为低铀矿物($U/Pb \approx 0$)铅同位素数值可能反映铅储源特征、与成矿有关的时代信息、矿床成因信息及演化过程中受到的混染等,因此不能简单地运用单阶段模式年龄做为成矿时代,但这并不等于在Pb同位素体系中丝毫不包含时代的烙印。有关Pb同位素的制约及其应用,作者将另文阐述。本文仅就胶东金矿矿石铅同位素资料揭示的成矿时代信息做一简略分析。

胶东金矿大多数为燕山期成矿,Pb同位素数值也显示这一时代金矿的几乎一致的特征。但马家窑等矿区(表2)三个铅同位素比值明显低于其它各矿床,也明显低于中生代岩体中钾长石的Pb同位素数值,同时,本矿区方铅矿、黄铁矿中,根据Pb同位素计算的模式年龄高于其它矿区, μ 值则低于其它矿区,表明铅来源于一个较老的低放射性铀区。不应排除马家窑矿床的形成时代较老。由于在大量分析的矿石铅同位素资料中,异常铅存在的判别并不很困难,因此根据有利用价值的普通铅资料即可看出胶东各金矿床Pb同位素的异同。马家窑等金矿床与多数金矿床Pb同位素的差异不能排除时代的烙印,因此该区就存在多期成矿的可能性。目前作者已从马家窑金矿含金石英脉中获得了锆石U-Pb年龄,但由于前述原因,研究工作尚在进行中。但铅同位素显示的差异是值得重视的。

3.2.2 招掖成矿带成矿期划分讨论 招掖成矿带中有关成矿围岩玲珑、郭家岭和栾家河花岗岩的形成时代已有大量的同位素年龄数据,但关于成矿作用的年代资料较少。张振海等(1993)做了积极的探索。他们通过对蚀变带中绢云母、钾长石、铬云母和粘土矿物的Rb-Sr研究,获得了有意义的地球化学信息。本文作者利用前人在玲珑金矿、灵山沟金矿和界河金矿的

原始测定资料进行了 Rb-Sr 同位素参数的计算(表 3),发现该区金矿蚀变带中的矿物除绢云母外,其它各类矿物锶的初始比值离散度很大,这或许表明在热液蚀变过程中形成的矿物有老的物质的混入,或处于开放体系,未能实现锶的均一化。因此,根据表 3 的结果,经过密集点群的微机程序判别,灵山沟和界河金矿所测样品不能构成密集点群,也不能构成合理的等时线,现给出的等时线年龄值得商榷。但玲珑金矿所测 8 个样品的资料,经判别后剔除了其中锶初始比异常的 LET04A 和 LET02A 等两个样品,由其它 6 个样品组成了 $108.3 \pm 0.6\text{Ma}$ 的等时线, I_{sr} 为 0.708933,相关系数 0.99993。该等时线年龄近似地代表了玲珑金矿的成矿年代。

根据作者对招掖金矿 Rb-Sr 等时线年龄的判别,不能认为招掖成矿带存在 $\sim 188\text{Ma}$ 、 $\sim 100\text{Ma}$ 和 $\sim 46\text{Ma}$ 三个成矿期的结论。根据目前资料,仅有玲珑金矿 $108.3 \pm 0.6\text{Ma}$ 的 Rb-Sr 等时线年龄是可以接受的,该资料与区域年代学研究成果吻合。

表 2 马家窑金矿 Pb 同位素特征

Table 2 Pb isotope date of Majiayao gold mine

编号	测试对象	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ	μK	Th/U
S-01	方铅矿	16.421	15.177	37.071	8.925	39.024	4.232
S-02	方铅矿	16.413	15.227	37.338	9.037	41.112	4.403
S-03	方铅矿	16.389	15.191	37.224	8.964	40.266	4.347
S-04	方铅矿	16.504	15.246	37.102	9.054	39.320	4.203
S-05	方铅矿	16.423	15.402	37.040	9.430	41.486	4.258
M-21	黄铁矿	16.483	15.211	37.059	8.984	38.362	4.187
M-23	黄铁矿	16.649	15.279	37.244	9.091	39.322	4.186
M-26	黄铁矿	16.476	15.314	37.567	9.213	42.888	4.505

原始数据摘自李兆龙等(1993)

表 3 胶东招掖金矿带玲珑、灵山沟、界河金矿 Rb-Sr 分析资料

Table 3 Rb-Sr data of Linglong, Lingshangou and Jiehe gold deposits

样品编号	样品名称	Rb($\times 10^{-6}$)	Sr($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Tsr(Ga)	I _{sr}
LTO6	绢云母	253.682	6.54	113.8780	.886080 \pm .000036	.1121580	.7045645
LET04D	绢云母	285.411	35.07	23.5853	.745402 \pm .000024	.1218728	.7045496
LET04B	绢云母	235.634	44.13	15.4572	.734222 \pm .000031	.1351256	.7045352
LET04C	绢云母	188.439	94.41	5.7701	.719927 \pm .000019	.1884333	.7044669
LET03	绢云母	73.156	52.99	3.9902	.717272 \pm .000039	.2264574	.7044199
LET04E	绢云母	223.044	310.55	2.0753	.715094 \pm .000020	.3671546	.7042460
LET04A	绢云母	165.572	341.46	1.4010	.713996 \pm .000019	.4964089	.7040855
LET02A	绢云母	167.225	362.41	1.3332	.714600 \pm .000063	.5571794	.7040101
LT04	钾长石	229.331	535.32	1.2278	.714582 \pm .000033	.6073419	.7039475

续表 3

样品编号	样品名称	Rb($\times 10^{-6}$)	Sr($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Tsr(Ga)	Isr
LT07	钾长石	186.310	556.61	0.9671	.713633 \pm .000024	.7111032	.7038181
LT05B	铬云母	220.270	1559.89	0.4080	.712104 \pm .000024	1.605373	.7026963
LT05A	铬云母	81.783	1901.25	0.1243	.711463 \pm .000012	11.70536	.6889860
JT13	粘土矿物	337.922	145.02	6.7341	.716451 \pm .000046	.124375	.7045475
JT04	钾长石	337.303	407.26	2.3928	.713408 \pm .000036	.265442	.7043718
JT10	钾长石	128.808	603.89	0.6162	.712575 \pm .000024	1.04004	.7034071
JT09	矿化蚀变	88.993	648.36	0.3965	.711990 \pm .000043	1.63899	.7026538
JT08	的郭家岭	58.108	463.09	0.3625	.712185 \pm .000038	1.88710	.7023399
JT05	花岗岩	43.035	71.02	0.1655	.712026 \pm .000020	6.27569	.6966004

原始数据据张振海等(1993)

4 结 语

成矿过程时间维的确定是一项重要而复杂的研究任务,尽管我国许多矿床已经获得了大量的同位素测年资料,但这绝不等于这些年龄数据都能够标定成矿过程中某一地质事件的时代。

同位素地质年代学必须建立在坚实的成矿地质背景和成矿作用的研究基础之上,同时对于获得的等时线年龄要经过精心的科学判别。在成矿过程时间维的研究工作中,作者倾向根据测定对象选择多元同位素体系的研究方法,且应更多地关注单矿物,乃至矿物微区的 U-Pb、Ar-Ar 和 Re-Os 年龄的测定。通过多元同位素体系的研究将能够较好地把握成矿过程主要地质事件的时代,为进一步地研究矿床成因、成矿规律和找矿方向提供重要的基础科学资料。

参考文献

- 1 中国科学院地球化学研究所. 白云鄂博矿床地球化学. 科学出版社,1988.1~550
- 2 毛德宝. 太古宙绿岩带金矿床研究的若干进展. 国外前寒武纪地质,1992,(4):42~53
- 3 王楫,陆松年,等. 内蒙中部变质岩群同位素年代构造格架. 中国地质科学院天津地质矿产研究所所刊,1995,(印刷中)
- 4 白鸽,袁忠信. 碳酸岩地质及矿产. 地质出版社,1985.107~140.
- 5 李兆龙,杨敏之. 胶东金矿床地质地球化学. 天津科学技术出版社,1993.1~300
- 6 任英忱,等. 白云鄂博稀土超大型矿床的成矿时代及其主要地质热事件. 地球学报,1994,(1~2):95~101
- 7 陈好寿,李华芹. 云开隆起金矿带流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄. 矿床地质,1991,(4):333~341
- 8 陆松年. Sm-Nd 等时线合理性的判别. 中国区域地质,1994,(2):148~159
- 9 陆松年. 大陆地壳演化时间维的确定及存在问题. 新疆地质,1995,(1):13~19
- 10 李华芹,等. 热液矿床流体包裹体年代学研究及其地质应用. 地质出版社,1993
- 11 张宗清,等. 白云鄂博稀土矿床的形成年代:Sm-Nd 同位素数据. 岩石矿物学杂志,1991,10(1):80~83

- 12 张宗清,等. 白云鄂博矿床形成年龄的新数据. 地球学报,1994,(1~2):85~94
- 13 孟庆润. 论白云鄂博铁矿含矿围岩——白云岩的沉积成因及其沉积环境. 地质论评,1982,28(5):481~489
- 14 张振海,等. 胶东招—掖金矿带金矿化蚀变带 Rb-Sr 等时线的研究及测定. 贵金属地质,1993,(1):26~34
- 15 袁忠信,等. 内蒙白云鄂博铌、稀土、铁矿床的成矿时代和矿床成因. 矿床地质,1991,(2):59~70
- 16 裴荣富,吴良士. 金属成矿省的地质历史演化和成矿年代学研究新进展. 矿床地质,1993,(3):285~286
- 17 赵景德,等. 以多种证据建立的白云鄂博稀土矿床成矿矿物的生成顺序. 地质找矿论丛,1992,(4):1~17
- 18 Abraham A P C, et al. Geochronological constraints on late Archean magmatism deformation and gold-quartz vein mineralization in the northwestern Anialik River greenstone belt and igneous complex, Slave Province, N. W. T. Can. J. Earth Sci. 1994,31,1365~1383
- 19 Bostock H H, et al. Ages of detrital and metamorphic zircons and monazites from a Pre-Taltson magmatic zone basin at the western margin of Rae province. Can. J. Earth Sci. ,1994,31,1353~1364
- 20 Claore-Long J C, et al. Archean hydrothermal zircon in the Abitibi greenstone belt: constraints on the timing of gold mineralization. Earth Planet. Sc. Lett. 1990,98,109~128
- 20 de Ronde C E J, et al. Field, geochemical and U-Pb isotopic constrains from hypabyssal felsic intrusion within the Barterton greenstone belt, Santh Africa; Implications for tectonics and the timing of gold mineralization. Precambrian Research, 1991,49,262~280

AGE CONSTRAINTS ON MINERALIZATION PROCESS IN POLY—ISOTOPIC—SYSTEMS

Lu Songnian Li Huimin Li Huaikun Yang Chunliang

(Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences)

Abstract

The determination of the time dimension of a mineralization process has been an important and complicated problem. A lot of isotopic age data of many significant ore deposits in China have been obtained, but a certain geologic event in the mineralization process can not be marked by them. Through example analyses, the authors indicate that the geochronological study of ore deposits must be carried out on the substantial basis of field study work of the geological setting. As to age-dating methods, the authors recommend that poly-isotopic-system methods be adopted, but more attention be paid to single mineral U-Pb, Ar-Ar and Re-Os methods and even further to mineral microarea U-Pb and Ar-Ar methods. In addition, if isochron age methods are employed, their reasonableness must be examined cautiously.