

文章编号:1008-0244(2001)-01-57-06

# 金矿床测年方法的某些进展

谢桂青 胡瑞忠

(中科院地球化学研究所矿床开放实验室,贵阳,550002)

**摘要** 本文系统地阐述了国内外有关金矿床同位素定年方面的最新进展和古地磁法、天然裂变径迹法的基本原理,并对常用同位素定年法的适用性和局限性进行了评述。

**关键词** 金矿床 成矿时代 同位素年代学

**中图分类号**: 618.51;P597

**文献标识码**: A

成矿时代一直是矿床学研究的关键问题之一。对金矿床形成时代的确定,不仅具有深入讨论矿床成因的理论意义,同时对在区域上寻找同类型的金矿床具有实际意义。成矿年代学是研究金属成矿省地质历史演化的钥匙<sup>[1]</sup>,因此成矿年代学研究尤为重要。然而由于地质作用的复杂性,加上各种同位素测年方法的局限性,即使在一些研究程度较高的地区,对某些矿床的成矿年龄仍有不同的甚至截然相反的认识<sup>[2,3]</sup>。致使金矿床准确定年一直被认为是矿床学研究的国际性难题。尽管如此,由于高分辨率质谱开发和超净实验室相继建立,使得金矿成矿年代学方面取得了较大的进展。笔者综述了金矿床的同位素定年方面的最新进展和古地磁法、天然裂变径迹法的基本原理。

## 1 金矿床定年方法

确定金矿床成矿时代的方法主要有同位素定年法和古地磁法,前者占主导地位,包括 U-Pb 法、<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 法、Rb-Sr 法、Sm-Nd 法、Re-Os 法以及裂变径迹法等。

### 1.1 U-Pb 法

U-Pb 法本身有多种测定技术,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 (SHRI-

MP),后者是目前国外对成矿作用最高水平的研究方法<sup>[4]</sup>。就成矿时代而言,主要利用高精度的单颗粒矿物 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。测定含金石英脉中的热液锆石年龄是直接确定成矿时代的方法。Claoue-Long 等<sup>[5]</sup>成功地利用热液锆石年龄确定了加拿大 Val d'Or 地区金矿床的成矿时代。国内李俊健等<sup>[2]</sup>、李惠民等<sup>[6]</sup>对夹皮沟金矿和东坪金矿含金石英脉中水热锆石进行了积极的探索。最近,国外成功地利用逐步铅淋滤法获得津巴布韦太古宙的剪切带中热液作用形成的含金磁黄铁矿的 Pb-Pb 等时线年龄,提供了成矿时代的信息<sup>[7]</sup>。大型离子探针质谱 SHRIMP II 对南非巴伯顿等地区的一些金矿的成矿作用年代学的研究中均有十分成功的范例<sup>[8]</sup>。

含金石英脉中热液锆石 U-Pb 法存在一些问题:(1)石英脉中的锆石群肯定具有多来源、多成因,并且继承锆石、岩浆锆石和热液锆石一样均呈单个透明的自形晶出现,不易区分各种类型的锆石,给定年挑选矿物带来很大的困难。(2)含金石英脉中锆石的含量一般很少,1kg 样品约含 1 粒锆石,因而给分选带来了困难。

### 1.2 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 法

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。自从 Kelly<sup>[9]</sup>等首次报道了利用真空击碎技术进行石英流体包裹体 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 法的分析,国内不少研究者在此方面作了大量的工作<sup>[10-13]</sup>。邱华宁<sup>[10,11]</sup>等自己设计超高真空碎样装置,利用石英流体包裹体 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar

收稿日期:2000-07-10;修回日期:2000-07-29

基金项目:云南省院科技合作(YK98008-3)项目;国家重点研究发展规划(G1999043200)项目

第一作者简介:谢桂青 (1975-) 男 博士研究生 地球化学专业

真空击碎法成功地测定了滇西上芒岗金矿的成矿时代,并总结了石英流体包裹体 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法定年研究成果。

实验表明,石英在其结晶生长期间可有部分Si被Al呈类质同象替代,低温浅成或较年轻的石英,K含量较高。而石英中常含有较高的过剩氩,石英马鞍形年龄谱最低坪年龄可能接近矿物的结晶年龄<sup>[13,14]</sup>,如:对张家口-宣化金矿区的五个典型含金石英脉中石英进行了 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 阶段加热法年龄测定,结果认为本区金矿床经历了四期的成矿作用<sup>[14]</sup>。与金矿化相关的蚀变矿物的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法是很重要的确定成矿时代的方法之一,也是近几年国内外确定金矿床成矿时代的主要方法<sup>[15-20]</sup>。例如:Kent等<sup>[16]</sup>分别对西澳大利亚的Kalgoortie金矿区的三个矿床中阳起石、白云母进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定,再结合穿切矿脉的岩体年龄,最终确定了该矿区金矿的成矿年龄。Groff等<sup>[17]</sup>根据矿物共生关系,通过对黑云母、钾长石、绢云母及脉冰长石等十五个样品做 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段加热分析确定了内华达金矿的成矿时代。

总之, $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法确定金矿的成矿时代具有很多的优点:(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。不过仍存在一些不足:(1)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,特别是对于多期次的金矿床,后期的构造热事件使得氩同位素有一定程度的带进或带出,不同形态的矿物其扩散方程不完全相同<sup>[13]</sup>,如果样品中有效保存着其中的氩,并存在着过剩的氩,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 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄存在着次生包裹体的影响;(3)在中子照射过程中,某些样品如伊利石会存在 $^{39}\text{Ar}$ 反冲而丢失,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>[21]</sup>;(4)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>[22]</sup>。

近几年来,人们尝试用连续激光探针来获得矿物晶体内的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 的坪年龄谱<sup>[23-25]</sup>,并且其精度比一般微量样品的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄高<sup>[25]</sup>。同时可以利用激光探针做单矿物微区的 $^{40}\text{Ar}-$

$^{39}\text{Ar}$ 法定年,主要通过选择制成光片的待测样品4~5个微区进行激光质谱全熔融分析,得到各测点 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 的全熔融视年龄,并利用 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 同位素比值获得等时线年龄<sup>[26]</sup>。但是后者存在不少问题,在技术上尚有待于进一步改进。

### 1.3 Rb-Sr法

通过全岩、单矿物和其中流体包裹体的Rb-Sr等时线年龄测定,被广泛地应用于间接或直接确定成矿时代。全岩Rb-Sr等时线法多用于划分成矿围岩的时代,以间接确定成矿时代。测定矿床中与成矿有关的蚀变矿物是直接确定成矿时代的重要方法。内生金矿床普遍发育中低温热液蚀变矿物,一般颗粒较小,但是对Rb-Sr和K-Ar具有很好的保存性。骆万成和伍勤生<sup>[27]</sup>成功地利用Rb-Sr等时线法测得胶东金矿区的微细水白云母的年龄,与蚀变矿物组合Rb-Sr等时线法年龄<sup>[28]</sup>基本一致。

通过测定矿石中的矿物和其中的包裹体Rb-Sr等时线年龄来确定矿床的成矿时代。自Shepherd等<sup>[29]</sup>首先进行了石英流体包裹体Rb-Sr法定年研究以来,国外相继利用流体包裹体来确定矿床的成矿时代。但是当Pettke and Diamond<sup>[30]</sup>从实验角度证实该方法的原理可能存在问题后,很少有人继续利用流体包裹体Rb-Sr法来确定矿床的成矿时代。国内不少学者对石英流体包裹体的Rb-Sr法开展了一些研究工作,李华芹<sup>[31,32]</sup>等在我国建立了全岩和流体包裹体Rb-Sr法的测定实验技术流程,随后利用此方法讨论一些金矿床的成矿时代。

Rb-Sr法存在一些问题:(1)测定年龄的样品量较大;(2)测定包裹体的年龄时,难以排除次生包裹体的影响,并且原生包裹体可能存在不同时代的包裹体,测定的结果可能为混合年龄;(3)样品前处理中存在一些较难以克服的问题,如吸附反应导致Rb、Sr分馏,进而影响Rb、Sr同位素体系的封闭;(4)等时线理论要求样品同源、具有相近的同位素初始值和形成后处于封闭体系,这些就决定了实践工作中很难得到科学的、合理的等时线年龄。

### 1.4 Sm-Nd法

Sm-Nd法也被应用于间接和直接测定成矿时代。矿石中的矿物及其包裹体等时线可用于

直接确定金矿的成矿时代。利用 Sm-Nd 法确定金矿床的成矿时代的文献比较少。利用矿脉中与金矿化相关的白钨矿 Sm-Nd 等时线年龄来确定加拿大的 Hollinger-Mcintyre-Conianrum 金矿的成矿时代国外有成功的例子<sup>[33]</sup>。国内利用 Sm-Nd 等时线法测定矿石中磁铁矿和黄铁矿的年龄成功地确定了天山康古尔金矿床的成矿时代<sup>[34]</sup>。

Whitehouse<sup>[35]</sup>利用  $\epsilon_{t(Nd)}$  和相应关系来判断同位素是否具有均一性,对不合格的样品进行剔除。陆松年<sup>[36]</sup>等根据等时线的三个基本条件提出同位素参数  $I_{t(Nd)}$ 、 $T_{DM}$ 、 $\epsilon_{t(Nd)}$  来判断等时线的合理性。李献华<sup>[37]</sup>曾详细论述过该方法定年的适用性和局限性,以及如何获得合理等时线、判断混合线和误差线问题。

Sm-Nd 法存在的问题:(1)由于 Sm-Nd 丰度普遍很低,适合的矿物比较少。再加上 Sm 和 Nd 化学性质太相似,<sup>147</sup>Sm 半衰期较长,因此等时线年龄分辨率一般小于 20Ma,不能测定年轻样品;(2)在热液活动过程中 Sm 和 Nd 似乎常处于一种开放体系,造成 Sm、Nd 各种参数的失常,以致无法获得合理的等时线年龄;(3)等时线理论要求样品同源、具有相近的同位素初始值和形成后处于封闭体系,这些就决定了实践工作中很难得到科学的、合理的等时线年龄。

### 1.5 Re-Os 法

迄今为止所用的同位素体系涉及的母体元素(K、Rb、Sm、U)皆为亲石元素,因此利用这些体系严格来说只能给出硅酸盐矿物和铀、钍矿物的冷却年龄,对于金矿床的定年而言有一定的局限性。部分研究者对热液矿床做了探索性工作表明<sup>[38]</sup>:在硫化物的沉淀过程中 Re/Os 比值的分异十分显著,而且 Re 和 Os 分别为亲铜、亲铁元素,均可以进入金属硫化物晶格中,为含金属硫化物的矿床定年提供了可能。Luck 和 Allégre 最初成功地测定了辉钼矿的年龄;Suzuki 等(1991)<sup>①</sup>成功地解决了样品和稀释剂中钼的同位素平衡问题。通过 Re-Os 法测定矿床中辉钼矿来确定金矿化年龄已成为当代国际上研究的热点。但是辉钼矿的 Re-Os 年龄比其他同位素方法测定稍微老些,精确地确定成矿年龄的关键在于用硫化物直接定年<sup>[39]</sup>。黄铁矿为与金矿化相关的普遍存在的硫化物,若能对黄铁矿直接进行 Re-Os 法定年将

有很广阔的应用前景。Freydier<sup>[40]</sup>对 Chile 斑岩型贱金属矿床进行了有益探讨。结论认为:可以利用 Re-Os 法测定包括黄铁矿、闪锌矿等常见的硫化物来讨论热液矿床成矿年龄。

### 1.6 天然裂变径迹法

天然裂变径迹法适用于测年轻样品。常用的矿物有磷灰石、榍石、锆石、石英等。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 <sup>235</sup>U 和 <sup>238</sup>U 的丰度比,  $\lambda_f$  为 <sup>238</sup>U 的自发裂变衰变常数,  $\sigma$  为 2200m/s 的中子引起 <sup>235</sup>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。石英的铀含量不仅低,而且分布不均匀。张峰等<sup>[41]</sup>探索出石英的最佳蚀刻条件(采用 40% HF, 25℃, 13m),通过大面积的连续统计石英晶体的古径迹,并用总体法进行测量,解决了对含铀量低的细颗粒矿物作径迹测定的难题。并测定了百地和烂泥沟金矿的成矿时代。胡瑞英<sup>[42]</sup>等通过改进石英蚀刻技术,选用  $\omega(\text{NaOH}) = 65\%$  作为蚀刻剂,并测得含金石英的裂变径迹年龄。

石英的裂变径迹法虽然在确定金矿床的成矿时代方面取得一些成果,但是还存在一些问题:(1)石英的铀含量不仅低,而且分布不均匀,给测年带来很大的困难;(2)石英的最佳蚀刻条件未完全清楚;(3)后期的地质事件容易对其古径迹产生影响。

### 1.7 古地磁法

绝大多数矿床含有磁铁矿、磁黄铁矿等,这些矿物可以保存矿化时的磁性记录,其磁化强度和方向可以随温度和化学条件的变化而变化。因此,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,可以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<sup>[43]</sup>:第一种方法是视极移曲线法。适用于古地磁研究程度比较高的地块内。第二种方法是置信圆比较法。该方法是直接将矿脉与围岩的原生剩磁方向在 95% 置信

① 中科院地球化学研究所博士后流动站编,第七届国际地质年代学宇宙年代学同位素地质学大会论文摘要选集,1991, 102~103。

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。第三种方法是 McFaddea 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:

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

$R_1$  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。三种方法在工作中可以单独使用,也可联合使用。

国外曾利用古地磁法来讨论 MVT 型矿床的成矿时代的问题<sup>[44]</sup>。国内王官福<sup>[43]</sup>等利用上述第一种方法和第一、三种方法分别对河南熊耳山地区北岭的蚀变岩型金矿、鸡冠山的石英脉型金矿和店房的角砾型金矿的成矿时代进行了讨论。古地磁法确定金矿床的成矿时代研究不多,其中存在一些问题:(1)古地磁法理论上不成熟,给解释带来很多不确定因素;(2)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;(3)判断古地磁数据是否可靠需要清楚地知道金矿床所在地区的大地构造背景和地层时代等一些基础地质问题<sup>[45]</sup>。这对于其基础地质问题存在争议的金矿床无法讨论其成矿时代。

## 2 问题与讨论

近二十年以来,出现了多种金矿床测年方法,并成功地确定出部分金矿床的成矿时代。尽管如此,各种方法仍存在一些需要解决的问题,概括起来主要有以下几个方面:

(1)同位素定年:有关矿物粒径对各种同位素定年方法的制约考虑较少,实际上对于内生金矿床,后期较弱的构造热事件可能使得某些细小矿物中放射性子体发生扩散丢失,以致无法获得有意义的年龄。就同位素体系来说,U-Pb 法应该是最好的方法,因为 U 有两个同位素衰变成 Pb

的两个同位素,可获得两个年龄值。这些年龄值的差异可指示在同位素平衡之后,该体系受到干扰的程度。含金石英脉中热液锆石 U-Pb 法有可能成为确定矿床形成的较为精确可靠的方法,但是热液锆石的成因是有争论的,一些人认为必需从深部碱性岩浆带来富 Zr、Hf 的岩浆流体才有可能形成热液锆石,其年龄能代表成矿时代<sup>[46]</sup>;而另一些人则认为含金石英脉中锆石并非是热液锆石,而是继承锆石,其年龄不能代表成矿时代<sup>[47]</sup>。热液锆石成因矿物学 and 如何确定锆石与金矿之间关系的研究还有待于进一步完善。通过测定含金石英脉中石英或与金矿密切相关石英的  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  和 Rb-Sr 流体包裹体年龄来确定金矿的成矿时代是一种比较可靠的方法,不过在测定之前,需要检查并确认石英中流体包裹体主要是以原生包裹体为主。蚀变矿物  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  阶段加热法和 Rb-Sr 等时线法可以确定金矿床的成矿时代,但需要做大量的工作证明蚀变矿物与金矿是同时形成的,并且不受后期的热液事件的影响。同时必须考虑到大多数金矿床蚀变矿物较小,分选单矿物具有很大的困难。此时可利用含钾矿物激光  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  定年法,故激光  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  定年法是一种很有发展前景的研究方法。但是石英和含钾矿物中氩释放机制还需要进一步研究,也是近几年国内外研究热点。Sm-Nd 法不能测定年轻样品,大大影响其广泛使用。能否利用载金矿物黄铁矿 Re-Os 法来确定金矿的成矿时代是值得进一步研究的。石英天然裂变径迹法是一种确定金矿床的方法,但是要统计古径迹则人为因素比较大,并易受到后期热液事件的影响,对比较年轻的样品来说可能可靠性要大些。

(2)古地磁法:由于其理论的不完善,现在难以确定矿石中矿物的磁性特征是继承成矿前,还是成矿后的,或者是成矿期的,同时在古地磁解释上存在较多的不确定性。故有必要进一步进行研究。能否将古地磁法和同位素法结合起来研究金矿床的成矿时代,是一个有待于探讨的问题。

综上所述,具体每一种确定金矿床的定年方法都存在一定的局限性,必须依靠多种定年方法同时进行研究,相互约束方可对某一金矿床的成矿时代进行较为准确的定年。

**致谢:**感谢彭建堂副研究员为本文提出的建设性意见。

## 参 考 文 献

- [1] 裴荣富、吴良士,金属成矿省的历史演化和成矿年代学研究进展。矿床地质,1993,3:285~286。
- [2] 李俊健、沈保丰、牛德宽等,吉林夹皮沟金矿成矿时代的研究。地质学报,1996,(4):335~341。
- [3] 孙忠实、冯亚民,吉林夹皮沟金矿床主成矿时代的确定及找矿方向。地球学报,1997(4):365~372。
- [4] Robert F., Dating old gold deposits. *Nature*, 1990, 346:792~793.
- [5] Claore-long J. C., King K. W., Kerrich R. et al., Archean hydrothermal zircon in the Abitibi greenstone belt: Constraints on the timing of gold mineralization. *Earth and Planetary Science Letter*, 1990, 98:109~128
- [6] 李惠民、李怀坤、陆松年等,用矿脉中热液锆石的 U-Pb 定年确定东坪金矿的成矿时代。地球学报,1997,18(增刊):176~178。
- [7] Frei R. and Pettke T., Mono-sample Pb-Pb dating of pyrrhotite and tourmaline: Proterozoic vs Archean intracratonic gold mineralization in Zimbabwe. *Geology*, 1996, 24(9): 823~826.
- [8] de Ronde C. E. J., Kamo S., Davis D. W. et al., Field geochemical and U-Pb isotopic constraints from hypabyssal intrusions within the Barberton greenstone belt, South Africa: implications for tectonics and the timing of gold mineralization. *Precambrian Research*, 1991, 49:261~280
- [9] Kelley S., Turner G., Butterfield A. W. et al., The source and significance of argon isotopes in fluid inclusions from areas of mineralization. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 79:303~318.
- [10] 邱华宁、戴檀漠、李朝阳等,滇西上芒岗金矿床石英流体包裹体成矿年龄测定。科学通报,1994,39(3):257~260。
- [11] Hua-Ning Qiu,  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating of the quartz samples from two mineral deposits in western Yunnan (SW China) by crushing in vacuum. *Chemical Geology*, 1996, 127:211~222.
- [12] 薛良伟、庞继群、王祥国等,小秦岭 303 号石英脉流体包裹体成矿年龄测定。地球化学,1999,28(5):473~478。
- [13] 邱华宁、彭良, $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年代学与流体包裹体定年。合肥:中国科学技术大学出版社,1997。
- [14] 胡达骥、罗桂玲,河北张-宣金矿区含金石英脉 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄。地质科学,1994,29(2):151~158。
- [15] Kontak D. J., Smith P. K. and Reynolds P. H., Geology and  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  geochronology of the Beaver Dam Gold deposit Meguma Terrane, Novascotia, Canada; evidence for mineralization at 370Ma. *Economic Geology*, 1993, 88: 139~170
- [16] Kent A. J. R. and Modougali I.,  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  and U-Pb age constraints on the timing of gold mineralization in the Kalgoorlie gold field, Western Australia. *Economic Geology*, 1995, 90:845~859.
- [17] Groff J. A., Heizler M. T., McIntosh C. W. et al.,  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating and mineral paragenesis for Carlin-type gold deposits along the Getchell trend, Nevada; Evidence for Cretaceous and tertiary gold mineralization. *Economic Geology*, 1997, 92:601~622
- [18] David A. L., Alan H. C. and Hodgson C. J., The timing of adularia-sericite-type mineralization and alunite-kaolinite-type alteration, Mount Skukum epithermal gold deposit, Yukon Territory, Canada:  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  and U-Pb Geochronology *Economic Geology*, 1998, 93:437~462.
- [19] Lu J., Seccombe P. K., Foster D. et al., Timing of mineralization and source of fluids in a slate-belt auriferous vein system, Hill End gold field, NW, Australia: Evidence from  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating and O and H-isotopes. *Lithos*, 1996, 38: 147~165.
- [20] 庞奖励、裘愉卓,二道沟矿床绢云母的 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄及其地质意义。矿物学报,1997, 17(4):442~447。
- [21] Smith P. E., Evensen N. M., York D. et al., First successful  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating of glauconites *Geology*, 1993, 21:41~44.
- [22] Sherlock S. C. and Nicolas O. A., Flat plateau and impossible isochrons: Apparent  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  geochronology in a high-pressure terrain *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(18): 2835~2838.
- [23] York D., Hail C. M., Yanase Y. et al.,  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating of terrestrial minerals with a continuous laser. *Geophysical Research Letters*, 1981, 8(11):1136~1138.
- [24] Smith P. E., Evensen N. M., York D. et al., Single-grain  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  age of glauconites. *Science*, 1998, 279:1517~1519.
- [25] 刘建明、赵善仁、沈洁等,成矿流体活动的同位素定年方法评述。地球物理学进展,1991,3:46~55。
- [26] 任胜利、周新华、戴檀漠等,浙江矾山明矾石矿床激光微区 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  等时线年龄测定。科学通报,1998,43(13):1443~1445。
- [27] 骆万成、伍勤生,应用蚀变矿物测定胶东金矿的成矿年龄。科学通报,1987,(16):1245~1248。

- [28] 张振海、张景鑫、叶素芝, 胶东金矿同位素年龄的厘定。北京:地震出版社, 1994。
- [29] Shepherd T. J. and Darbyshire D. P. F., Fluid inclusion Rb-Sr isochrons for dating mineral deposits. *Nature*, 1981, 290 (16): 578-579.
- [30] Pettke T. and Diamond L. W., Rb-Sr isotopic analysis of fluid inclusions in quartz: Evaluation of bulk extraction procedures and geochronometer system using synthetic fluid inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 4009-4027.
- [31] 李华芹、刘家齐、魏林, 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, 1993。
- [32] 李华芹、陈富文、蔡红, 新疆西准噶尔地区不同类型金矿床同位素年代研究。地质学报, 2000, 74(2): 181-192。
- [33] Keith B., Anglin C. D. and Franklin J. M., Sm-Nd and Rb-Sr isotope systematics of scheelites: Possible implications for the age and genesis of vein-hosted gold deposits. *Geology*, 1989, 17: 500-504.
- [34] 姬金生、李华芹、张连昌等, 东天山晚古生代火山岩区磁铁矿绿泥石建造金矿床的同位素年龄。科学通报, 1999, 44 (4): 439-445。
- [35] Whitehouse M. J., Granulite facies Nd-isotopic homogenization in the Lewisian complex of northwest Scotland. *Nature*, 1988, 331: 705-707.
- [36] 陆松年, Sm-Nd 等时线年龄合理性的判别。中国区域地质, 1994, 2: 148-158。
- [37] 李献华, Sm-Nd 模式年龄和等时线年龄的适用性与局限性。地质科学, 1996, 1: 97-104。
- [38] Walker R. J., Shirey S. B., Hanson G. N. et al., Re-Os, Rb-Sr and O isotopic systematics of the Archean Kolar Schist Belt, Karnataka, India. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, (53): 3005-3013.
- [39] Stein H. J., Markey R. J. and Morgan J. W., Highly precise and accurate Re-Os age for molybdenite from the East Qinling molybdenum Belt, Shanxi Province, China. *Economic Geology*, 1997, 92: 827-835.
- [40] Freyrier C., Ruiz J., Chesley J. et al., Re-Os isotope systematics of sulfides from felsic igneous rocks application to base metal porphyry mineralization in Chile. *Geology*, 1997, 25(9): 775-778.
- [41] 张峰、杨科佑, 黔西南微细浸染金矿裂变径迹成矿时代研究。科学通报, 1992, 37(17): 1593-1595。
- [42] 胡瑞英、程景平、郭士伦等, 裂变径迹法在金矿研究中的应用。地球化学, 1995, 24(2): 188-191。
- [43] 王官福、陈志宏、丁士应等, 河南熊耳山地区金矿成矿时代的古地磁研究。地质学报, 1995, 69(3): 255-265。
- [44] Symons D. T. A. and Sangster D. F., Paleomagnetic age of the Central Missouri barite deposits and its genetic implications. *Economic Geology*, 1991, 86(1): 1-12.
- [45] 程国良, 古地磁数据可靠性的试用判据。地球物理学报, 1993, (1): 121-123。
- [46] Kerrich R. and Cassidy S. F., Temporal relationships of lode gold mineralization to accretion, magmatism, metamorphism and deformation-Archean to present: a review. *Ore Geology Review*, 1994, 9: 263-310.
- [47] Corfu F. and Davis D. W., Comment on "Archean hydrothermal zircon in the Abitibi greenstonebelt: constraints on the timing of gold mineralization". *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104: 542-552.

## SOME PROGRESS IN GEOCHRONOLOGY OF GOLD ORE DEPOSITS

Xie Guiqing Hu Ruizhong

(Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002)

### Abstract

This paper discusses systematically the newly made progress in isotopic geochronology of gold ore deposits both at home and abroad, as well as the fundamental principle of fission-track and paleomagnetic dating. In addition, various dating methods are described in terms of their applicability and limitation. And finally, the dating methods for gold deposits are reviewed.

**Key words:** ore-forming age; isotopic geochronology; gold deposit