适合于稀有金属矿床的同位素定年方法及其应用

王倩,侯可军, 邹天人

中国地质科学院矿产资源研究所,自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京,100037

内容提要:同位素地质年代学是根据放射性同位素衰变规律,确定地质体形成和地质事件发生时代的新兴学科,也是研究成矿时代的主要手段。本文结合所在实验室研究团队和前人的工作,介绍几种可以直接确定稀有金属成矿时代的同位素地质年龄测定方法及其在稀有矿床中的应用,以期为相关学科研究提供参考。主要是:①Re-Os法,是目前应用最成熟的直接确定金属矿床成矿时代的方法,定年矿物除了辉钼矿,已扩展到黄铁矿、沥青铀矿等;②U-Pb法,是地质学研究应用最广泛的方法,目前的测定对象已不局限于锆石,一些含铀的矿石矿物如锡石、独居石、磷灰石、铌钽矿物的 U-Pb 年龄也可以直接测定,有助于直接确定金属矿床的成矿时代;③Ar-Ar法,测定对象广泛,理论上含钾矿物均可作为测定对象;④Rb-Sr法,应用广泛,近年来在成矿时代研究中有了长足进展,可以利用包裹体 Rb-Sr 等时线来确定成矿时代,也可以用同源的不同矿物组合来进行定年。

关键词:稀有金属;同位素地质年代学;分析技术;地质应用

金属矿床成矿时代是矿床学研究的重要内容, 也可为找矿勘查提供重要依据。对于成矿时代可以 采用地质学方法来判定,如内生矿床可以根据岩体 的产状、岩体与地层的接触关系、岩浆侵入的地层判 断岩浆和沉积岩层的形成顺序,从而得知岩体侵入 的年代;外生矿床可以根据矿床赋存和接触的地层 判断其形成时代;另外一个重要的手段是用同位素 地质年代学手段,根据成矿矿物中一些放射性元素 的衰变规律及其半衰期反推,计算得到矿床的成矿 年代。同位素地质年代学(isotopechronology)又称 同位素年代学,是同位素地质学分支之一,利用自然 界放射性衰变规律研究测定各种地质体的形成时代 的同位素记时方法,所涉及的同位素主要有 U-Th-Pb 体系、Sm-Nd 体系、Rb-Sr 体系、Ar-Ar 体系、Re-Os 体系、Lu-Hf 体系、¹⁴C 等。过去很长一段时间, 仅有辉钼矿 Re-Os 定年方法成为成熟的直接用于 确定成矿时代的方法。稀有金属元素主要包括锂、 铍、铷、铯、铌、钽、锆、铪、锶等,由于具备特殊的物理 化学性质,在国民经济建设和国防科技等领域得到 广泛的运用,是各国都高度重视的战略性储备资源 (Linnen et al., 2012)。稀有金属元素既可以形成 独立的矿床,也可以超常组合在一起形成多矿种的 稀有金属矿床,其矿床成矿机制和成矿作用研究也 一直受到了国际上的广泛关注;稀有金属矿床中最 为重要的就是与岩浆岩相关的内生金属矿床,与岩 浆岩相关的内生金属矿床主要包括与超基性岩、基 性岩相关的铂、钯、锇、铱、钛矿床,与碱性岩和花岗 岩相关的锆、铌、钽、钛矿床,与花岗伟晶岩相关的 铌、钜、针、铀、锆、铍、锂、铷、铯矿床,与矽卡岩相关 的铍、铈、铌、钽、锆、钛矿床以及与稀有金属资源相 关的热液矿床,我国最为重要的稀有金属矿床类型 是碱性岩型、花岗岩型和花岗伟晶岩型 3 大类型 (Zhou Zhenhua et al., 2016)。准确测定成矿年龄 可以初步判断附近岩体是否与成矿有关从而为矿床 成因和指导找矿提供理论依据,但由于稀有金属矿 床大多经历了多期多阶段的矿化,仅仅测定附近岩 体的年龄并不能真实地反映矿化时间。近年来,由 于分析技术手段的进步,除了传统的锆石 U-Pb、云

注:本文为国家重点研发计划项目(2017YFC0602705)和中央公益性科研院所基本科研业务费(JYYWF20180104,K1404 和 K1505)资助的成果。

收稿日期:2019-05-12;改回日期:2019-06-11;网络发表日期:2019-06-17;责任编辑:黄敏。

作者简介:王倩,女,1989年生,博士研究生,助理研究员,同位素地球化学专业。通讯作者:侯可军,男,1981年生。博士,副研究员,同位素地球化学专业。通讯地址:北京市西城区百万庄大街 26号,100037,中国地质科学院矿产资源研究所;Email:kejunhou@126.com。

引用本文:王倩,侯可军,邹天人. 2019. 适合于稀有金属矿床的同位素定年方法及其应用. 地质学报,, 93(6):1523~1532, doi: 10. 19762/j. cnki. dizhixuebao. 2019165.
 Wang Qian, Hou Kejun, Zou Tianren. 2019. Isotopic dating method suitable for rare-metal deposits and its application. Acta Geologica Sinica, 93(6):1523~1532.

母 Ar-Ar 和全岩 Rb-Sr 等定年方法,辉钼矿 Re-Os, 铌钽矿、独居石等矿物 U-Pb 定年也被应用到稀有 金属矿床定年,本文对这些常用的稀有金属矿床定 年方法进行了介绍,并介绍了这些方法在世界著名 稀有金属矿床可可托海 3 号伟晶岩研究中的应用, 为相关研究提供参考。

1 Re-Os 定年

1.1 Re-Os 定年基本原理

Re-Os 定年是基于放射性¹⁸⁷ Re 通过 β 衰变成为¹⁸⁷ Os 来计算地质年龄。其一般衰变方程为:

$${}^{87}\mathrm{Os} = {}^{187}\mathrm{Os}_{i} + {}^{187}\mathrm{Re} \times (\mathrm{e}^{\varkappa} - 1) \tag{1}$$

式中:¹⁸⁷Os、¹⁸⁷Re分别代表矿物或岩石样品中现在的含量,¹⁸⁷Os_i代表矿物或岩石形成时最初具有的¹⁸⁷Os的量,λ为¹⁸⁷Re的衰变常数,*t*是矿物或岩石形成后的年龄。因为¹⁸⁸Os不是放射性成因,样品中的含量与初始值一致,因此上述公式可改写为:

 $({}^{187}\text{Os}/{}^{188}\text{Os}) = ({}^{187}\text{Os}/{}^{188}\text{Os})_{i} + ({}^{187}\text{Re}/{}^{188}\text{Os}) \times (e^{\lambda} - 1)$ (2)

可以看出,当(¹⁸⁷ Os/¹⁸⁸ Os);和 t 为常数时, (¹⁸⁷ Os/¹⁸⁸ Os)与(¹⁸⁷ Re/¹⁸⁸ Os)成线性关系,对于一 个岩体或矿体在不同地点采集的不同样品,只要他 们具有相同的形成年龄和共同的(¹⁸⁷ Os/¹⁸⁸ Os);初 始值,那么样品的分析结果应该落在以(¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os)为纵坐标,以(¹⁸⁷ Re/¹⁸⁸ Os)为横坐标的直线上 (等时线),该直线在纵坐标的截距即为(¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os);初始值,斜率为(e^x -1),由此可以计算岩石 或者矿物的形成年龄 t。

纯辉钼矿中所含 Os 基本上为放射成因¹⁸⁷ Os,则公式(1)中¹⁸⁷ Os,近乎为零,则单个辉钼矿 Re-Os 模式年龄为:

$$t = 1/\lambda \ln(^{187} \text{Os}/^{187} \text{Re} + 1)$$
 (3)

利用同一组同时形成、且形成以后一直保持封闭体系的多个样品的¹⁸⁷ Re、¹⁸⁷ Os 含量可以得到一系列¹⁸⁷ Re-¹⁸⁷ Os 数值,进而拟合计算出辉钼矿 Re-Os 等时线年龄。

1.2 Re-Os 定年分析方法

Re-Os 定年分析流程包括样品消解,Re、Os 的 化学分离和质谱测试三个步骤。

目前 Re-Os 定年样品处理包括锍试金法、碱熔 法、Teflon 焖罐酸溶、Carius 管法、HPA-S 高压消解 等方法。Carius 管溶样法是目前 Re-Os 同位素分 析的主要方法(Carius,1860;Cohen et al.,1999;Du Andao et al.,2001;Qi Liang et al.,2006;Qu Wenjun et al.,2008)。Carius 管是一种耐高温高压 的厚壁高硼玻璃或石英管。采用王水或者逆王水作 为溶剂,根据岩石矿物的 Re、Os 含量高低、难溶程 度以及取样量的大小,Carius 管的内部容量、加热温 度可分别为 12~100mL、200~270℃(Du Andao et al.,2009)。

Re的分离目前常使用阴离子交换、丙酮或叔胺 萃取。阴离子交换具有广泛适用性,是大多数实验 室常用的分离方法,在当前所有 Re 溶剂萃取方法 中丙酮萃取法最简单快速且具有广泛的适用性。一 般使用常规蒸馏法、小型 Teflon 容器(Savillex 蒸馏 瓶)蒸馏法、微蒸馏技术、CHCl₃和 CCl₄或液溴萃 取。其中,常规蒸馏法是一种相对比较成熟和很有 效的方法(Luck and Allegre, 1982; Morgan and Walker, 1989; Du Andao et al., 2001),同时 Q Liang et al. (2010)报道了采用原位蒸馏分离 Os 的 方法,缩短了流程,提高了工作效率。

Re、Os 测定最常用的仪器是 N-TIMS 和 ICP-MS 或 MC-ICP-MS。N-TIMS 法,该方法质量分馏 小、稳定性好、仪器具有极高的灵敏度。通常 1pg Os 的测定精度可达到 0.3%,质量分馏<0.1%。 所以能够得到高精度、高准确度的同位素比值,适合 于测定超低含量的岩石样品;ICP-MS 测定,样品制 备简单,速度快,对同位素比值异常值高、分析精度 要求相对较低的辉钼矿、黑色页岩、毒砂、铜镍硫化 物等样品,Re-Os 定年比较合适。MC-ICP-MS 有更 高的分辨率、灵敏度和稳定性,由于采用双聚焦多道 测量技术,其同位素比值测量精度接近 N-TIMS 技 术,对 Re 的测量非常成功,但对 Os 的测量记忆效 应较为严重。

1.3 Re-Os 定年在稀有金属矿床研究中的应用

Re、Os具有高亲铁亲硫性。因此,将 Re-Os 同 位素直接应用于金属矿物定年,解决了长期无法解 决的内生金属矿床成矿年龄直接准确厘定问题,在 国内,国家地质实验测试中心率先开展了辉钼矿 Re-Os 同位素定年方法的建设和应用,研究者就将 其应用于对各种金属矿床形成时代的确定,为探讨 大规模成矿作用发生的时限、成矿的地球动力学背 景和成矿模型的建立以及成矿预测提供了理论依 据。这些矿床包括钨矿、金矿、铜镍矿、斑岩型钼 (铜)矿、钼矿(Mao Jingwen et al., 2002; Ye Huishou et al., 2006; Mao et al., 2008)等等。

由于辉钼矿属于高中温矿物,主要产于与花岗 质岩浆有关的高、中温热液体系。其 Re-Os 同位素 体系形成后很难被后期地质过程重置(Stein et al., 1998),Re-Os 定年的稀有金属矿床定年方面有特别 的优势,比如本实验室对产自可可托海 3 号脉 I 带 辉钼矿年龄进行了测定。3 件较细粒辉钼矿样品 (<1mm)位于蚀变伟晶岩中(内接触带),3 件粗粒 辉钼矿(一般 3~5mm)产于外接触蚀变带中,6 件 辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 208.8±2.4Ma、模式 加权平均年龄为 209.9±1.3Ma,二者在误差范围 内一致(图 1),它们的年龄可以代表 3 号脉最外带 的形成时代,与任宝琴等(2011)获得的 3^a 脉锆石年 龄(208Ma)非常接近,且与本次测定的阿拉尔黑云 母花岗岩成岩年龄接近(211.4±0.8Ma),认为可可 托海伟晶岩形成于中三叠世晚期,而非海西期成矿 (Liu et al., 2014)。

随着我国实验室建设水平和分析方法的不断改进,Re-Os 定年从 Os 含量数百 ppb 的辉钼矿扩大到 Os 含量仅有数十个 ppt 级别的黄铁矿等矿物,大

大扩展了 Re-Os 同位素定年在直接确定金属矿床 成矿时代的应用范围,近年来取得了众多重要研究 成果(Jiang Xiaojun et al., 2018; Cui Yubin et al., 2011; Duan Shigang et al., 2017)。

2 U-Pb 定年方法

2.1 U-Pb 定年方法原理

2

锆石等含 U 矿物因富含 U 和 Th,贫普通 Pb, 封闭温度较高,抗后期影响能力强,可利用其中的 U 和 Th 衰变成 Pb 进行定年。天然铀有²³⁴ U、²³⁵ U、 ²³⁸ U三种同位素,²³⁵ U 和²³⁸ U 以不同衰变速率分别 衰变成²⁰⁷ Pb 和²⁰⁶ Pb;²³² Th 衰变成²⁰⁸ Pb。衰变过程 中中间子体寿命很短可以忽略,因此可将²⁰⁷ Pb、 ²⁰⁶ Pb、²⁰⁸ Pb 视为由²³⁵ U、²³⁸ U、²³² Th 直接形成。衰 变方程为:

206
 Pb= 206 Pb_i+ 238 U(e ^{$\lambda 238t$} -1) (4)

07
 Pb= 207 Pb_i+ 235 U(e ^{λ 235t}-1) (5)



图 1 新疆阿尔泰稀有金属成矿省阿拉尔岩体的锆石 U-Pb 年龄和可可托海 3 号脉辉钼矿的 Re-Os 年龄(Liu et al. ,2014) Fig. 1 Zircon U-Pb age of the Aral granite and Re-Os age of molybdenite from Keketuohai pegmatite field

²⁰⁸ Pb=²⁰⁸ Pb_i+²³² Th(
$$e^{\lambda^{232t}}-1$$
) (6)

式中 λ 为衰变常数,t 为锆石形成时间,锆石等矿物 富含 U 和 Th,贫普通 Pb,可以认为形成时不含普 通 Pb,即测定的所有 Pb 都为 U 和 Th 衰变而成。 则上述方程(4)、(5)可简化为:

206
Pb=238U($e^{\lambda 238t}$ -1) (7)

207
Pb=235U($e^{\lambda 235t}$ -1) (8)

由于²³⁸ U/²³⁵ U = 137.88,式(8) 除以式(7) 可得:

207
 Pb/ 206 Pb=1/137.88($e^{\lambda 235t}$ -1)/($e^{\lambda 238t}$ -1) (9)

通过测定样品中的²³⁵ U、²³⁸ U、²⁰⁷ Pb 和²⁰⁶ Pb 含 量,由式(7)~式(9)可知,一个样品可以同时获得 3 个独立的年龄(即²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 年龄、²⁰⁷ Pb/²³⁵ U 年龄 和²⁰⁷ Pb/²⁰⁶ Pb 年龄)。如果这 3 个年龄在误差范围 内一致,说明矿物形成以来其 U-Pb 体系是封闭的, 其 U-Pb 同位素年龄是谐和的,这 3 个年龄中的任 何一个都可以代表矿物形成的年龄;否则说明矿物 形成以来其 U-Pb 体系是开放的,或由于普通铅扣 除不当,其 U-Pb 同位素年龄是不谐和的,需要进行 内部校正才能获得正确的矿物形成年龄,常用的普 通铅校正方法有²⁰⁴ Pb、²⁰⁷ Pb 和²⁰⁸ Pb 法校正(Zhou Hongying and Li Huimin, 2011; Chen Yuelong et al.,2005)。

在以²⁰⁷ Pb/²³⁵ U 为横坐标,²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 为纵坐标 的图上,给定一个时间 t,总对应一个²⁰⁷ Pb/²³⁵ U 和²⁰⁶ Pb/²³⁸ U,对于不同的时间 t,可以得到一条连续 的曲线,称为和谐线或一致曲线。对于同一封闭体 系,其²⁰⁷ Pb/²³⁵ U 和²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 两个年龄组必然相 同,且落在一致线上。若在 U-Pb 体系形成后,发生 过铅的丢失或铀的获得,其落点在一致线下方,在图 上会构成一条直线,称为不一致线。不一致线和一 致线有两 2 个交点,上交点代表了样品形成年龄,下 交点表示后期地质事件发生的时间(Chen Yuelong et al.,2005)。

2.2 U-Pb 定年测试方法

含 U 矿物 U-Pb 定年主要有三种方法:热电离 质谱稀释法(ID-TIMS),二次离子质谱法(SIMS)和 激光剥蚀等离子体质谱法(LA-ICP-MS)。

ID-TIMS 法是对锆石进行 U-Pb 同位素定年的 经典方法,原理是:用氢氟酸、盐酸和硝酸等将待测 矿物在适当的温压条件下溶解,溶解前需加入定量 的同位素稀释剂。矿物溶解后,用离子交换色谱将 U和 Pb 分别从样品溶液中分离出来,然后在热电 离质谱仪上进行 U和 Pb 的测定,经计算得到矿物 的 U-Pb 同位素年龄(Zhou Hongying and L Houmin,2011)。该方法优点是精度高、不需要标准 矿物做校正,缺点是处理流程长,实验环境要求高, 无法对具有复杂内部结构的矿物给出微区年龄 信息。

SIMS 法起源于 20 世纪 80 年代初,需将待测 矿物制作成样品靶,经抛光、镀金等制样处理,便可 进行矿物的微区原位年龄测定。测定原理是仪器产 生的一次离子(氧离子)轰击所选定的矿物微区,矿 物被轰击部分溅射出二次离子,经加速电压和电磁 场的分离,二次离子分别被离子计数器检测。根据 被测矿物与相应标准矿物的二次离子中 U-Pb 同位 素的强度关系,便可计算出被测矿物微区的 U-Pb 含量和 U-Pb 同位素年龄(Song Biao et al.,2002;L Qiuli,2015)。离子探针的取样特点是微区原位、样 品消耗量小、可长时间分析、可重复分析,缺点是仪 器数量少,分析成本相对较高。

LA-(MC-)ICP-MS 法是利用激光剥蚀取样系 统和等离子质谱仪(单四级杆或多接收等离子体质 谱)的联用。激光剥蚀是由激光能量产生的冲击波 对样品表面进行轰击,可使在设定束斑尺寸内的样 品形成纳米级颗粒,由运载气流以气溶胶状态被运 移到离子化系统。离子化系统有高频感应电流产生 的可达 8000℃高温,有利于难熔化合物的分解及元 素的激发,对大多数元素有很高的灵敏度,然后用质 谱仪对被电离的元素进行同位素比值测量结果, 进行有关元素含量及被测矿物同位素比值测量结果, 进行有关元素含量及被测矿物同位素比值测量结果, 进行有关元素含量及被测矿物同位素比值测量结果,

2.3 U-Pb 定年在金属矿床研究中的应用

近年来,除了锆石以外,大量与成矿有关的含U 副矿物被用来直接进行U-Pb定年,如锡石、独居 石、磷灰石、石榴子石、黑钨矿、铌钽矿等,对相关矿 床的研究有了更深入的认识。Yuan et al. (2012), Zhang et al. (2017)等开发建立了锡石U-Pb定年方 法,对钨锡矿床进行了直接的年代学研究;Yang et al. (2016)开发建立了氟碳铈矿U-Pb定年方法,对 牦牛坪稀土矿床进行了系统的年代学研究;Liu Zhichao et al. (2011)等建立了磷钇矿U-Pb定年方 法,对西华山钨矿进行了详细的年代学研究;Zhang Lizhong et al. (2018)建立了石榴石U-Pb定年方 法,并应用的金矿床研究中;Che et al. (2015)等建 立了铌钽铁矿的 U-Pb 定年方法。本文也对采自可 可托海 3 号脉 3^a 脉的铌钽铁矿进行了 U-Pb 年龄测 试,获得 205.6±2.6Ma 的年龄(表 1,图 2),与前述 锆石 3° 脉 U-Pb 年龄、3 号脉 I 带辉钼矿 Re-Os 年龄在误差范围内一致,可可托海伟晶岩形成于中三叠世晚期。

	表 1	新疆可可托	海 3 " 脉铌	钽铁矿 U-P	'b年龄测定	结果	
Fable 1	U-Pb a	nalytical resu	lts of Cota	n by LA-IC	P-MS from	No. 3 ^a pe	gmatite

	含量		同位素比值				同位素年龄(Ma)						
样号点号	${ m Pb} \ imes 10^{-6}$	${ m Th} \ imes 10^{-6}$	$U \\ imes 10^{-6}$	$^{207}{ m Pb}/^{206}{ m Pb}$	1σ	$^{207}{Pb}/^{235}{U}$	1σ	$^{207}{ m Pb}/^{206}{ m Pb}$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ
KKTH-3a-1	30	10	549	0.0549	0.0011	0.2524	0.0080	409.3	44.4	228.6	6.5	210.8	5.3
KKTH-3a-2	20	7	367	0.0546	0.0017	0.2506	0.0131	398.2	70.4	227.1	10.6	207.9	5.8
KKTH-3a-3	20	8	413	0.0510	0.0011	0.2235	0.0063	239.0	48.1	204.8	5.2	201.7	4.6
KKTH-3a-4	22	8	402	0.0547	0.0019	0.2408	0.0085	466.7	79.6	219.0	6.9	202.5	3.3
KKTH-3a-5	17	7	357	0.0514	0.0011	0.2306	0.0068	257.5	50.0	210.7	5.6	206.8	5.0
KKTH-3a-6	18	7	352	0.0537	0.0012	0.2433	0.0060	366.7	50.0	221.1	4.9	210.0	5.0
KKTH-3a-7	18	7	362	0.0540	0.0016	0.2384	0.0067	372.3	64.8	217.1	5.5	203.0	4.0
KKTH-3a-8	16	4	274	0.0539	0.0025	0.2379	0.0124	368.6	110.2	216.7	10.2	202.5	4.3
KKTH-3a-9	13	4	246	0.0509	0.0016	0.2261	0.0074	235.3	72.2	207.0	6.1	206.2	5.0
KKTH-3a-10	14	5	289	0.0506	0.0011	0.2286	0.0072	233.4	78.7	209.0	6.0	207.4	5.2
KKTH-3a-11	15	5	293	0.0541	0.0011	0.2420	0.0070	376.0	44.4	220.1	5.7	206.2	5.4
KKTH-3a-12	19	6	342	0.0562	0.0019	0.2526	0.0097	461.2	106.5	228.7	7.9	206.1	4.1
KKTH-3a-13	16	6	298	0.0528	0.0033	0.2442	0.0153	320.4	140.7	221.9	12.5	212.5	5.9



图 2 新疆可可托海 3^a 脉铌钽铁矿 U-Pb 年龄及谐和图 Fig. 2 Concordia plots and weighted mean ²⁰⁶ Pb/²³⁸ U age plots of Cotan from No. 3^a pegmatite

3 Ar-Ar 定年方法

3.1 Ar-Ar 定年方法原理

⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 法定年理论的是由 Sigurgeirsson 于 1962 年首次提出,并通过 Metrihue (1966)和 Mitehell(1968)等的不断努力得以发展。随着科学 理论和技术手段及实验仪器的不断改进,该理论与 方法得到了进一步的完善,特别是近年来,国内学者 Chen Wen(2011)、Zhang Jia et al. (2018)等也从实 验技术、理论方法等不同角度对其原理进行了总结 分析和补充,为⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 法定年原理和技术进一步 完善做出了卓越贡献。⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 法年龄测定基本原 理是实验测试样品中含钾矿物在核反应堆中用快中 子照射而形成³⁹ Ar 为基础的,即形成反应³⁹ K→ ³⁹ Ar,也就是说当所测试的含钾样品在核反应堆中 受中子照射时形成的³⁹ Ar。⁴⁰ Ar*则为从样品形成以 来,由⁴⁰ K 的衰变放射性成因⁴⁰ Ar*。Ar-Ar 定年的 年龄计算公式:

 $t = 1/\lambda \ln(J \times {}^{40} \operatorname{Ar}^* / {}^{39} \operatorname{Ar} + 1)$ (10)

公式中J为每次照射样品的照射参数,无量纲, 他的物理意义是种子通量检测器,可由每次同期照 射的年龄已知的标准样品获得,λ为总衰变常数。

3.2 Ar-Ar 定年测试方法

Ar-Ar 定年主要采用快中子活化法,常规的实

验方法(Chen Wen, 2011; McDougall and Harrison, 1999)是将分选出矿物颗粒并进行核反应照射,之后 在真空系统中对单矿物颗粒样品从 400~1400℃区 间分 10~20℃阶段进行升温加热,分步升温加热可 以采用加热炉,也可以采用连续激光做光源(Qiu Huaqing et al., 2009), 对每个温度点释放的氩气利 用稀有气体同位素质谱进行相对丰度的测试并校正 计算后得到40 Ar* /39 Ar, 然后进行年龄计算。在实 验过程中对于每一个加热阶段可测定一个对应的年 龄值,最终可得到一系列的年龄值,这个年龄则为表 观年龄。最初冷却至今一直保持 K 和 Ar 的封闭状 态下计算出来的这一系列年龄应该是一个常数。但 是通常矿物结晶后的时间过程中存在某一时刻的放 射性成因氯丢失,同温度下释放出来的气体中的40 Ar* /39 Ar 比值就会是变化的,因此也将产生一个由 一系列年龄组成的年龄谱图,在这个谱图中出现的 相对比较平坦的年龄值则为坪年龄。这个坪年龄则 是最终封闭体系建立以来的记录的年龄值。

类似 Re-Os、Rb-Sr 等时线, McDougall and Harrison(1999)实验中发现,未受扰动的样品逐阶 段释放气体的⁴⁰ Ar/³⁶ Ar-³⁹ Ar/³⁶ Ar 比值确定的系列 点可以拟合成一条直线,直线为斜率等于⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 的比值的等时线,与样品的年龄有关,而截距为非放 射性成因⁴⁰ Ar/³⁶ Ar 的比值,该值与现代大气氩同位 素比值 295.5 较为接近,因此可通过该比值对测试 数据的可靠性进行验证。但由于该等时线使用分析 精度较差的³⁶ Ar 做分母,导致计算的等时线年龄误 差偏高,也难以精确计算混染 Ar 同位素组成。为 此,科学家发展了³⁶ Ar/⁴⁰ Ar 和³⁹ Ar/⁴⁰ Ar 的相关图 解,被称为"反等时线",目前已广泛应用,基本取代 了传统等时线。

3.3 Ar-Ar 定年在金属矿床研究中的应用

Ar-Ar 定年测试对象广泛,理论上含钾矿物都 是 Ar-Ar 定年的对象,包括辉石、云母、闪石、长石 类矿物,同时适用时间域较宽等特点,已发展为同位 素地质年代学最主要的手段之一,也是矿床年代学 研究的主要技术上手段。国内科研人员利用云母 Ar-Ar 年代学方法对金矿床、铜钼铁多金属矿床 (Zhang Xiong et al.,2018; Liu Jun et al.,2013; 等);利用长石 Ar-Ar 年代学方法对金矿、银多金属 矿(Li Houmin et al.,2003; Li Houmin et al., 2008);利用石英包裹体 Ar-Ar 年代学方法对钨锡 矿床(Peng Jiantang et al.,2003)等开展了大量的 矿床学研究工作。

白云母等 Ar-Ar 定年也应用到了稀有矿床年 代学研究,如 Wang Denghong et al. (2003)通过对 伟晶岩型稀有金属矿床中白云母的 Ar-Ar 法同位 素定年研究,首次在阿尔泰中部的大喀拉苏大型稀 有金属矿床和小喀拉苏稀有金属矿床获得了新的同 位素年龄数据,其坪年龄分别为 248.42±2.11Ma 和 233.79±0.41Ma,从而证实了印支期稀有金属 成矿作用的存在,提出了伟晶岩型矿床形成于多个 时代,且稀有金属成矿作用主要发生在海西期造山 运动之后的看法。Chen et al. (2000)对可可托海 [带和V带中白云母进了 Ar-Ar 年龄测试,分别获 得⁴⁰ Ar-³⁹ Ar 等时线年龄 177.9±0.03 Ma、176.9± 1.8Ma,认为是由花岗质岩浆在地下深处封闭体系 中经过漫长的岩浆结晶分异形成,结晶分异过程大 致持续了 30Ma;Zhou et al. (2015)获得 Ⅱ、Ⅳ、Ⅵ带 白云母⁴⁰ Ar-³⁹ Ar 年龄 179.7 ± 1.1 Ma、182.1 ± 1.0Ma 和 181.8±1.1Ma,认为岩浆阶段、岩浆-热 液过渡阶段和热液阶段分别持续了 16Ma,9~ $11 Ma, 5 \sim 7 Ma_{\circ}$

近年来,激光显微探针技术和稀有气体同位素 质谱连用,更拓展了Ar-Ar定年的应用范围。激光 显微探针技术对某些地质样品有特殊的效果,如对 于分离和纯化很困难的细小的样品,可以用激光探 针技术直接在光片上测年;对于某些有过剩氩存在 的样品,用激光探针技术研究其组分的分布以便识 别和校正矿物中的过剩氩,从而准确地测定其年龄; 如果样品中含有同类矿物的不同期矿物颗粒,就可 以对各期矿物分别分析,分别得出其年龄值(陈文 等,2011)。

4 Rb-Sr 定年方法

4.1 Rb-Sr 定年方法原理

Rb-Sr 定年早已有成熟的理论体系(Faure, 1977)。该定年方法的基本前提是:①样品的同源 性,②样品的同时性,③样品初始 Sr 同位素组成的 均一性,④样品的封闭性,⑤样品 Rb/Sr 比值的差 异性。Rb-Sr 定年原理是基于⁸⁷ Rb 衰变形成⁸⁷ Sr, Rb-Sr 年龄的计算公式为:

 $({}^{87}
m Sr/{}^{86}
m Sr) = ({}^{87}
m Sr/{}^{86}
m Sr)_i + ({}^{87}
m Rb/{}^{86}
m Sr) \times (e^{\omega} - 1)$ (11)

式中,⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 和⁸⁷ Rb/⁸⁶ Sr 为样品中现在的 值,有实验测定;(⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr₎;为样品形成时或同位 素均一时的值(初始值);λ为⁸⁷ Rb的衰变常熟,t为 样品形成或 Sr 同位素均一化以来经历的时间。对 一组同源样品,该组样品在⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr-⁸⁷ Rb/⁸⁶ Sr 图 上应为一条直线,即等时线,有直线斜率可求出年 龄*t*,即等时线年龄,截距为初始 Sr 同位素组成 (⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr)_i。

4.2 Rb-Sr 定年测试方法

Rb-Sr 定年测试方法较为成熟,将待测粉末加 算消解后或待测包裹体流体相转入烧杯中蒸干,加 入⁸⁵Rb+⁸⁴Sr 混合稀释剂,用 HCl 溶解后缓慢注入 AG50W×12 阳离子交换树脂柱中,经 HCl 淋洗后 分别解吸 Rb 和 Sr,蒸干,采用热电离质谱仪分析 Rb-Sr 同位素组成(Yang Hongmei et al.,2017)。

4.3 Rb-Sr 定年在金属矿床研究中的应用

总体上, Rb-Sr 等时线法是当今同位素地质年 龄测定的重要方法之一。由于 Rb、Sr 所具有的独 特地球化学特征,在岩浆岩的定年研究中得到了广 泛的应用。在成矿地质事件的年代学研究中,应用 全岩 Rb-Sr 等时线法测定与成矿地质事件相关的地 质体或形成时间略晚于成矿作用的地质体的年龄, 以此可限定成矿事件发生的最早和最晚时间。成矿 体系为相对开放环境,且成矿过程中存在复杂的水-岩相互作用,样品很难满足 Rb-Sr 等时线定年的基 本前提条件。但仍有许多矿床学家和同位素地球化 学家对金属矿物开展直接 Rb-Sr 定年进行了尝试, 如铅锌矿床中的矿石矿物闪锌矿、黄铁矿和蚀变矿 物绢云母、钾长石;同时脉石矿物石英或石英包裹体 样品也可是常用的,并基本上可代表成矿年龄 (Nakai et al., 1990; Brannon et al., 1992; Zhang Ruibin et al., 2008, Li Huaqin et al., 2000).

Rb-Sr 定年也应用到稀有金属矿床年代学研究,如 Zhu Yongfeng et a. (2002)基于获得的可可 托海伟晶岩 I 带全岩和白云母 238Ma 的 Rb-Sr 等 时线年龄以及阿拉尔黑云母花岗岩的全岩 Rb-Sr、 黑云母 K-Ar 年龄(Liu et al.,1997)推断二者有成 因联系。Zhu et al.,(2006)获得了 3 号脉边缘带中 全岩、白云母和磷灰石样品的 Rb-Sr 等时线年龄 (218±5.8Ma)和阿拉尔黑云母花岗岩 248.8Ma 的 Rb-Sr 等时线年龄,认为黑云母花岗岩首先结晶,晚 期残余熔体在 30Ma 之后的构造岩浆活动过程中分 异结晶。

5 结论

稀有金属矿床成因是目前矿床学研究的热点, 成矿年代学是重要的研究内容,近年来建立起来的 高精度 Re-Os、U-Pb、Ar-Ar、Rb-Sr 高精度定年方 法的建立对于其成矿时代的研究积累了一定的资 料,为总结成矿规律、指导地质找矿发挥了积极的作 用。其中,世界著名的新疆可可托海三号脉通过等 多种方法的测定,均获得了成矿于中生代的新资料, 尤其是铌钽铁矿 U-Pb 法、辉钼矿 Re-Os 法等直接 定年获得较为一致的年龄新数据,进一步证明可可 托海形成于印支晚期到燕山早期的地球运动的转折 时期的认识,也为深入研究新疆北部阿尔泰、新疆南 部大红柳滩、四川西部甲基卡和石渠等地的伟晶岩 型稀有金属矿床为什么均形成于印支晚期-燕山早 期这一重大科学问题提供了切入点。同时,各类定 年方法也有一定的适用性,比如在对可可托海阿拉 尔黑云母花岗岩,可可托海3号脉I带成矿年龄等 不同方法获得的结果仍有较大差别,可能得原因是 伟晶岩的形成过程中会遭受较强的热液作用,造成 氩不同程度的丢失; Ar 同位素体系封闭温度不高 (全岩 Ar 同位素体系封闭温度 300℃),在后期动力 和流体作用下,温度超过 Ar 封闭体系温度时会导 致 Ar 位素体系完全重置(Liu et al., 2014), 这些都 可能是造成 K-Ar 和 Ar-Ar 测年数据变化很大的主 要原因;在复杂花岗伟晶岩的 Rb-Sr 同位素体系中, 不管是富 Rb 相还是贫 Rb 相都会因为伟晶岩中 ⁸⁷Sr的活动性存在同位素年龄的较大偏差(Clark, 1982),伟晶岩脉形成时较强的热液交代作用产生了 Rb、Sr 同位素的不平衡(Abart,1994)。所以在进行 年代学测定时,必须以野外地质为基础,明确同位素 测年的目的,综合考虑考虑矿物定年方法同位素体 系封闭温度、等时线法定年采用样品的同源性、后期 变质事件的影响的综合因素选取合适的样品、合适 的定年方法,从而获得准确的矿床成矿年龄。

References

- Abart R. 1994. Isotope disequilibrium during metasomatic vein formation. Mineral Magazine, 58A:1~2.
- Brannon J C, Podosek F A, McLimans R K. 1992. Alleghenian age of the Upper Mississippi Valley zinc-lead deposit determined by Rb-Sr dating of sphalerite. Nature, 356(6369): 509~511.
- Carius L. 1860. Uber die Elemental analyse organischer Verbindungen. Ann. Chem. Pharm,116: 1~30.
- Che Xudong, Wu Fuyuan, Wang Rucheng, Gerdes A, Ji Weiqiang, Zhao Zhenhua, Yang Jinhui, Zhu Zeying. 2015. In situ U-Pb isotopic dating of columbite-tantalite by LA-ICP-MS. Ore Geology Reviews, 65:979~989.
- Chen Wen, Wan Yusheng, Li Huaqin, Zhang Zongqing, Dai Tongmo, Shi Zeen, Sun Jingbo. 2011. Isotope geochronology: technique and application. Acta Geologica sinica, 85(11):1917 ~1947. (In Chinese with English abstract).
- Chen Yuelong, Yang Zhongfang, Zhaozhidan, et al. 2005 Isotope geochronology and geochemistry, Geological Publishing House, Beijing.
- Chen F W, Li H Q, Wang D H, Cai H and Chen W. (2000) New

chronological evidence for Yanshanian diagenetic mineralization in China's Altay orogenic belt. Chinese Sci. Bull, 45, 108 ${\sim}114.$

- Clark G S. 1982. Rudidium-Strontium isotope systematic of complex granitic pegmatites. In Cerny P, ed. Granitic pegmatites in science and industry. Winnipey, 347~371.
- Cohen A S, Coe A L, Bartlett J M and Hawkesworth C J. 1999. Precise Re-Os ages of organic-rich mudrocks and the Os isotope composition of Jurassic seawater. Earth Planet. Sci. Lett, 167: 159~173.
- Du Andao, Qu Wenjun, Li Chao, Yang gang. 2009. A Review on the Development of Re-Os Isotopic Dating Methods and Techniques[J]. Rock and Mineral Analysis, 28(3): 288~304.
- Du Andao, Zhao dunmin, Wang Shuxian, Sun Dezhong, Liu Dunyi. 2001. Precise Re-Os Dating for Molybdenite by ID-NTIMS with Carius Tube Sample Preparation. Rock and Mineral Analysis,20 (4):247~252.
- Faure G. 1986. Principles of Isotope Geology. New York: Wiley & Sons.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS [J]. Mineral Deposits28(4):481~492.
- Huang Fan, Wang Denghong, Lu Sanming, Chen Yuchuan, Wang Bohua, Li Chao. 2011. Molybdenite Re-Os isotopic age of Shapinggou Mo deposit in Anhui Province and Mesozoic Mo ore-forming stages in East Qinling-Dabie Mountain region. Mineral Deposits30(6):1039~1057.
- Li Houmin, Mao Jingwen, Shen Yuanchao, Zhang Lianchang. 2003. Ar-Ar Ages of K-feldspar and Quartz from Dongji Gold Deposit, Northwest Jiaodong, and Their Significance [J]. Mineral Deposits22(1):72~77.
- Li Houmin, Wang Denghong, Guo Baojian, Chen Yuchuan, Baifengjun, Qiu Jianjun. 2008.⁴⁰ Ar-³⁹ Ar Age of Potash Feldspar from the Banchang Ag-Cu-Pb-Zn-(Mo) Deposit in Henan and Its Geological Significance. Acta Geoscientica Sinica,29(2):154~160.
- Li Qiuli. 2015. Characteristics and analytical methods of the U-Pb dating system. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 34(3):491~500.
- Linnen R L, Van Lichtervelde M, Cerny P. 2012. Granitic pegematites as sources of strategic metals. Elements, 8: 275 \sim 280.
- Liu Feng, Zhang Zhixin, Li Qiang. 2014 New precise timing constraint for the Keketuohai No. 3 pegmatite in Xinjiang, China, and identification of its parental plution. Ore Geology Review, 56:209~219.
- Liu Jun, Wu Guang, Wang Feng, Luo Dafeng, Hu Yanqing. 2013. Geochronology and petrogeochemistry of Chalukou porphyry Mo deposit in northern Da Hinggan Mountains [J]. Mineral Deposits32(6):1093~1116.
- Liu W, Liu C Q and Masuda A. 1997. Complex trace-element effects of mixing-fractional crystallization composite processes: applications to the Altaer granite pluton, Altay Mountains, Xingjiang. Northwestern China[J]. Chem. Geol., 135: 103~ 124.
- Liu Zhichao, Wu Fuyuan, Guo Chunli, Yang Jinhui, Sun Jinfeng. 2011. In situ U-Pb dating of xenotime by laser ablation (LA)-ICP-MS. Chinese Sci Bull, 2011, 56: 2948~2956.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Bierlein F, Qu Wenjun, Du Andao, Ye Huishou, Pirajno F, Li Houmin, Guo Baojian, Li Yongfeng, Yang Zeqiang. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic Molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72(18):4607 ~4626.
- Mao Jingwen, Yang Jianmin, Qu Wenjun, Du Andao, Wang Zhiliang, Han Chunming. 2002. Re-Os Dating of Cu-Ni Sulfide Ores from Huangshandong Deposit in Xinjiang and Its Geodynamic Significance [J]. Mineral Deposits21 (4): 323 ~330.

- Merrihue C M, Turner G. Potassium-argon dating by activation with fast neutrons. Journal of Geophysical Research, 1966, 71: 2852 -2857.
- Nakai S, Halliday A N, Kesler S E, et al. Rb-Sr dating of sphalerites from Tennessee and the genesisi of Mississippi Valley type ore deposits. Nature, 1990, 346(6369): 354~357.
- Peng Jiantang, Hu Ruizhong, Zhao Junhong, Fu Yazhou, Lin Yuanxian. 2003. Scheelite Sm-Nd dating and quartz Ar-Ar dating for Woxi Au-Sb-W deposit, western Hunan. Chinese Science Bulletin, 48(10):1976~1981.
- Qi Liang, Zhou Meifu, Gao Jianfeng and Zhao Zifu. 2010. An improved Carius tube technique for determination of low concentrations of Re and Os in pyrites. JAAS, $25:585 \sim 589$.
- Qi Liang, Zhou Meifu, Yan Zaihui, Pi Daohui, Hu Jing. 2006. An improved Carius tube technique for digesting geologica samples in the determination of PGEs and Re by ICP-MS. Geochimica, 35 (4): $667 \sim 674$.
- Qiu Huaqing, Wu Heyong, Feng Zihui, Shi Hesheng, Yun Jianbing, Wang Qiang, Zhao Linghao2009. The puzzledom and feasibility in determining emplacement ages of oil/gas reservoirs by⁴⁰ Ar-³⁹ Ar techniques. Geochimica, 38(4): 405 ∼411.
- Qu Wenjun, Du Andao, Renjing. 2008. Influence of H_2O_2 on the signal intensity of Rhenium. Osmium and Re-Os age in the process of dissolution for pyrite. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 36(2): 223~226.
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng JianPing. 2002. Mount making SHRIMPdating. Geol. Re.,48(Supp.):26~30.
- Stein H J, Sundblad K, Markey R J, Morgan M J. 1998. Re-Os ages for Archahaean molybdenite and pyrite Kuittila-Kivisuo, Finland, and Proterozoic molybdenite, Lithuania: Testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting [J]. Mineralium Depisita, 33: 329~345.
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Zhigang. 2003. ⁴⁰ Ar-³⁹ Ar isotope dating on muscovites from indosinian raremetal deposits in centra Altay, northwestern China. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 34(3):491~500.
- Yan Qinghe, Qiu Zengwang, Wang He, Wang Min, Wei Xiaopei, Li Pei, Zhang Rongqing, Li Congying, Liu Jianping. 2018. Age of the Dahongliutan rare metal pegmatite deposit, West Kunlun, Xinjiang(NW China): Constraints from LA-ICP-MS U-Pb dating of columbite-(Fe) and cassiterite. Ore Geology Reviews,100:561~573.
- Yang Hongmei, Liu Chongpeng, Cai Hong, Duan Ruichun, Cai Yingxiong, Lu Shansong, Tan Juanjuan, Zhang Liguo, Li Huaqin. 2017. Preliminary Research on the Rb-Sr Dating Mechanism of Sphalerites with Diluted Acid Leachating. Geology and Mineral Resources of South China, 33 (4): 344 ~353.
- Ye Huishou, Mao Jingwen, Li Yongfeng, Guo Baojian, Zhang Changqing, Liu Yong, Wen Quanren, Liu Guoyin. 2006. SHRIMP Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Dating for the Superlarge Donggou Porphyry Mo Deposit in East Qinling, China, and Its Geological Implication[J]. Acta Geologica Sinica, 80(7):1078~1088.
- Yuan Shunda, Peng Jiantang, Hao Shuang, Li Huimin, Geng Jianzhen, Zhang Dongliang. 2011. In situ LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: New constraints on the timing of tin-polymetallic mineralization. Ore geology Reviews, 43(1):235~242.
- Zhang Jia, Liu Hanbin, Li Junjie, Jin Guishan, Han Juan, Zhang Jianfeng, Shi Xiao. 2018. Some Problem and Its Solution in Ar-Ar Dating Measurement for Quartz Sample. Uranium Geology, 34(3):159~165.
- Zhang Lizhong, Chen Lei, Wang Guoping, Deng Xiaodong, Li Jianwei. 2018. Garnet U-Pb dating constraints on the timing of breccia pipes formation and genesis of gold mineralization in Yixingzhai golddeposit, Shanxi Province. Earth Science, doi: 10.3799/dqkx.2018.547.

- Zhang Rongqing, Lu Jianjun, Lehmann B, Li Congying, Li Guanglai, Zhang Lipeng, Guo Jia, Sun Weidong. 2017. Combined zircon and cassiterite U-Pb dating of the Piaotang granite-related tungsten-tin deposit, southern Jiangxi tungsten district, China. Ore Geology Reviews,82:268~284.
- Zhang Ruibin, Liu Jianming, Ye Jie, Chen Fukun. Chalcopyrite Rb-Sr Isochron age dating and its' ore-forming significance in Shouwangfen copper deposit, Hebei Province. Acta Perologica Sinica, 24(6):1353~1358.
- Zhang Xiong, Zhao Xiaoyan, Yang Zhusen, Deng Xueguo. 2018. Ar-Ar dating on muscovite of Nianzhaorogenic gold deposit in Yurlung-Zangbo suture zone and its geological significance. Mineral Exploration, 9(5):825~835. (In Chinese with English abstract).
- Zhou Hongying, LiHuimin. 2011. U-Pb Isotope Dating Technique and Potential Prospects for Applying in Geology. Geological Survey and Research, 34 (1): 63 ~ 70. (In Chinese with English abstract).
- Zhou Qifeng, Qin Kezhang, Tang Dongmei, Tian Ye, Cao Mingjian, Wang Chunlong. 2015. Formation Age and Evolution Time Span of the Koktokay No. 3 Pegmatite, Altai, NW China: Evidence from U-Pb Zircon and ⁴⁰ Ar-³⁹ Ar Muscovite Ages. Resource Geology,65(3):210~231.
- Zhou Zhenhua, Che Hewei, Ma Xinhua, Gao Xu. 2016. A Preliminary discussion on some important advances of rare metal deposit. Geology and exploration, 52(4):614~626.
- Zhu Yongfeng, Zeng Yishan, Gu Libing. 2006. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altay Mountains, northwest China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 27: 61~77.
- Zhu Yongfeng, Zeng Yishan. 2002. Rb-Sr Isochron Age of Keketuohai No. 3 Pegmatite. Mineral Deposits, 21(S): 1110~ 1111. (In Chinese with English abstract).

参考文献

- 陈文,万渝生,李华芹,张宗青,戴橦谟,施泽恩,孙敬博.2011.同位 素地质年龄测定技术及应用,地质学报,85(11):1917~1947.
- 陈岳龙,杨忠芳,赵志丹等著.2005.同位素地质年代学与地球化学. 北京:地质出版社.
- 杜安道,屈文俊,李超,杨刚. 2009. 铼-锇同位素定年方法及分析测 试技术的进展,岩矿测试,28(3): 288~304.
- 杜安道,赵敦敏,王淑贤,孙德忠,刘敦一. 2001. Carius 管溶样-负离 子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-锇同位素地质年龄. 岩 矿测试,20(4):247~252.
- 侯可军,李延河,田有荣.2009.LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术.矿床地质,28(4):481~492.
- 黄凡,王登红,陆三明,陈毓川,王波华,李超. 2011. 安徽省金寨县 沙坪沟钼矿辉钼矿 Re-Os 年龄——兼论东秦岭-大别山中生 代 钼成矿作用期次划分. 矿床地质,30(6):1039~1057.
- 李厚民,毛景文,沈远超,张连昌.2003 胶西北东季金矿钾长石和石 英 Ar-Ar 年龄及其意义.矿床地质,22(1):72~77.
- 李厚民,王登红,郭保健,郭保健,陈毓川,白凤军,仇建军.2008.河 南板厂银多金属矿床钾长石氩-氩年龄及其地质意义.地球学

- 李秋立. 2015. U-Pb 定年体系特点和分析方法解析. 矿物岩石地球 化学通报. 34(3):491~500.
- 刘军,武广,王峰,罗大锋,胡妍青.2013.大兴安岭北段岔路口斑岩 钼矿床成矿年代学、岩石地球化学及其地质意义.矿床地质,32 (6):1093~1116.
- 刘志超,吴福元,郭春丽,等.磷钇矿 U-Pb 年龄激光原位 ICP-MS 测定.科学通报,2011,56(33):2772~2781.
- 毛景文,杨建民,屈文俊,杜安道,王志良,韩春明. 2002. 新疆黄山 东铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定及其地球动力学意义. 矿 床地质,21(4):323~330.
- 彭建堂,胡瑞忠,赵军红,符亚洲,林源贤.2003. 湘西沃溪 Au-Sb-W 矿床中白钨矿 Sm-Nd 和石英 Ar-Ar 定年.科学通报,48(10): 1976~1981.
- 漆亮,周美夫,严再飞,皮道会,胡静. 2006. 改进的 Carius 管溶样等 离子体质谱法测定地质样品中低含量铂族元素及铼的含量.地 球化学,35(4):667~674.
- 邱华宁,吴河勇,冯子辉,施和生,云建兵,王强,赵令浩. 2009 油气 成藏⁴⁰ Ar-³⁹ Ar 定年难题与可行性分析. 地球化学,38(4):405 ~411.
- 屈文俊,杜安道,任静. 2008. 过氧化氢在黄铁矿的溶解过程中对铼-锇信号强度及年龄的影响. 分析化学,36(2): 223~226.
- 宋彪,张玉海,万渝生,简平. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定 及有关现象讨论. 地质论评,48(增刊): 2~30.
- 王登红,陈毓川,徐珏,邹天人,薛春纪,罗君烈,骆耀南,伍广宇,李 志伟,余金杰,闫升好,杨建民,傅旭杰,付小方,傅德明,楚萤 石,魏琳,李晓焰.2005.中国新生代成矿作用.北京:地质出版 社,1~853.
- 王登红,陈毓川,徐志刚.2003.新疆阿尔泰印支期伟晶岩的成矿年 代学研究.矿物岩石地球化学通报,22:14~17.
- 杨红梅,刘重芃,蔡红,段瑞春,蔡应雄,卢山松,谭娟娟,张利国,李 华芹.2017.闪锌矿分相 Rb-Sr 体系定年机理初探. 华南地质与 矿产,33(4):344~353.
- 叶会寿,毛景文,李永峰,郭保健,张长青,刘用,闻全人,刘国印. 2006. 东秦岭东沟超大型斑岩铝矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼 矿 Re-Os 年龄及其地质意义.地质学报.80(7):1078~1088.
- 张佳,刘汉彬,李军杰,等. 2018. 石英样品 Ar-Ar 定年测试过程中的相关问题及解决方法.铀矿地质,34(3):159~165.
- 张立中,陈蕾,王国平,邓晓东,李建威.2018. 石榴石 U-Pb 定年对山 西义兴寨金矿床角砾岩筒时间的限定和金矿成因的指示.地球 科学, doi: 10.3799/dqkx.2018.547.
- 张瑞斌,刘建明,叶杰,陈福坤.2008.河北寿王坟铜矿黄铜矿铷锶同 位素年龄测定及其成矿意义.岩石学报,24(6):1353~1358.
- 张雄,赵晓燕,杨竹森,等. 2018. 雅鲁藏布江缝合带念扎造山型金矿 床白云母 Ar-Ar 年代学及其地质意义. 矿产勘查,9(5):825 ~835.
- 周红英,李惠民. 2011. U-Pb 同位素定年技术及其地质应用潜力. 地质调查与研究,34(1):63~70.
- 周振华,车合伟,马兴华,高旭.2016. 初论稀有金属矿床研究的一些 重要进展.地质与勘探,52(4):614~626.
- 朱永峰,曾贻善.2002.可可托海3号脉伟晶岩铷-锶同位素等时线年 龄.矿床地质,21(S):1110~1111.

报,29(2):154~160.

Isotopicdating method suitable for rare-metal deposits and its application

WANG Qian, HOU Kejun*, ZOU Tianren

MNR Key Laboratory of Metallogency and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037 * Corresponding author:kejunhou@126.com

Abstract

Isotope geochronology is a newly developed science which determines the geological body formation and geological event occurrence times according to the radioactive isotope decay law, and is also the main means of studying the metallogenic age. Combined with the work of our and previous study, this paper introduces several isotopic geological dating methods that can directly determine the mineralization age of rare metals and its applications, so as to provide references for related disciplines. The main methods are: ①Re-Os method, which is the most mature method to directly determine the metallogenic age of metal deposits at present. Besides molybdenite, the measurement objects have been expanded to pyrite and pitchblende, etc. ②U-Pb method, which is the most widely used method in geological research, is now not limited to zircon. U-pb age of some uranium-bearing ore minerals, such as cassiterite, monazite, apatite and niobium-tantalum, can also be directly determined, which is helpful to determine the metallogenic age of metal deposits. ③ Ar-Ar method, with wide rang of measurement objects, in princeple, all the K-bing mierals and rocks can be used for Ar-Ar isotopic dating; ④Rb-Sr method, which is widely used, has made great progress in the study of metallogenic age in recent years. It can be used to determine the metallogenic age using the Rb-Sr isochron of inclusions, or can be dated by using different mineral associations of the same origin.

Key words: rare metal; isotope geochronology; dating technique; geological application