

锆石 U-Pb 和 Re-Os 定年的原理及金矿中的应用

杜文彪

(河北地质大学 地球科学学院, 河北 石家庄 050000)

【摘要】金成矿的定年问题,已成为金矿床研究的重点研究问题,多年来,不同的研究者对同一矿床采用不同的定年方法得出的成岩成矿年龄往往不同,甚至年龄差相差悬殊。为此本文对锆石 U-Pb 定年法和 Re-Os 定年法的原理,测试对象,测试仪器,应用等进行了分析,认为锆石 U-Pb 定年法目前技术成熟,因为要选取锆石,因此适合于岩浆成因的矿床,对石英脉型、沉积型金矿等不太适用;而 Re-Os 定年法由于其地球化学特性,可以直接对载金矿物进行分析定年,因此只要挑选好矿物,比较适合用于金矿定年,但是目前该方法不是特别成熟,因此对于金矿定年,要根据成矿地质背景,矿床特征,载金矿物等等来选取最为合适的定年方法。

【关键词】金矿床;成岩成矿年代;锆石 U-Pb; Re-Os

引言

随着时代的进步,地质工作者们早期采用间接的地质推断方法来获取近似的相对成矿年代。主要是根据地层、侵入岩(岩体、脉岩、岩墙等)及矿体间的穿插关系来确定不同地质体之间相对早晚关系,间接推断成岩、成矿年龄(魏俊浩等,2003)。近年来,相关的地质理论和方法日益成熟。而同位素地质年代学已经成为探索地质体时、空演化及大陆动力学等问题的基础工具(杨果林等,2006)。矿床的成岩成矿时代测定是矿床学研究和对标的基础,而在特定的成矿区域,一定的时间段内,某一种金属或是一组金属强烈富集,那么该特定的时间即称为成矿时代(王义文,1994)。本文以锆石 U-Pb 同位素定年和 Re-Os 同位素定年开展其对金矿的成矿年龄应用。

一、锆石 U-Pb 定年原理

锆石属于岛状硅酸盐矿物,化学组成为 $Zr[SiO_4]$,其中 ZrO 含量为 67.22%, SiO_2 含量为 32.78%,常含 Hf, Th, U, TR 等类质同象组分和水等混入物。结构为四方晶系,常为四方双锥状,柱状,可依 {011} 成膝状双晶。颜色多变,与其成分多变有关;玻璃至金刚光泽,断口油脂光泽;透明至半透明。解理不完全;端口不平坦或贝壳状。

硬度 7.5-8。在封闭体系中,岩石、矿物按照放射性衰变的定律,母体衰变,子体积累,不断地记录下时间参数,这就是同位素地质年龄测定的基本原理,U-Pb 定年法通常测得矿物是锆石、斜锆石、独居石、磷灰石、榍石、石榴石、钙铁矿、金红石、钛铁矿、锡石、方解石等。其中,锆石作为 U-Pb 定年法的常用矿物的原因为:其中含有放射性元素 U 和 Th,有极高的封闭温度($>900^{\circ}C$),不容易受外界的影响而发生变质等特点,U 主要有两种放射性同位素母体 ^{238}U 和 ^{235}U ,经过一系列衰变最终衰变成稳定的 Pb 同位素。

锆石 U-Pb 法是目前应用非常广泛的方法。锆石 U-Pb 体系的特点为研究地质体的形成时代提供了方便,使得地质相关的研究飞速发展。并且这个体系还可以获得与后期作用有关的变质信息,为地质学者更好的厘清地质事件提供帮助。根据测试仪器和测试精度的不同,主要有以下几种测试方法:LA-ICP-MS、SHRIMP、CAMECA 等。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都是不稳定的放射性同位素,其寿命很短可以忽略,因此可将 ^{207}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{208}Pb 视为由 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{232}Th 直接衰变形成。

通过测定样品中的 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{207}Pb 和 ^{206}Pb 含量, 一个样品可以同时获得 3 个独立的年龄, 即 $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$ 年龄、 $^{207}\text{Pb} / ^{235}\text{U}$ 年龄和 $^{207}\text{Pb} / ^{206}\text{Pb}$ 年龄 (魏俊浩等, 2003; 韩玥等, 2012; 高少华等, 2013), 得到的年龄数据通过计算, 如果锆石体系对 U 和 Pb 封闭, 则样品中的 $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$ 、和 $^{207}\text{Pb} / ^{235}\text{U}$ 值必定落在该曲线上, 由此可获得一致年龄。若样品在形成以后发生发生了 U 和 Pb 的丢失, 则将得到不一致的年龄, 且其数据点落在一致曲线下方的一条直线上, 该和曲线有两个交点, 曲线上的和下交点分别可得到锆石的结晶年龄和铅丢失的年龄 (Wetherill, 1956a)。结合锆石的 CL 图像呈现出的内部环带结构等, 进行锆石年龄解译, 尤其对具有多个年龄群体的结果, 需要进一步结合锆石的微量元素、研究区的相关地质事件等判断其是成岩年龄、捕获年龄还是变质年龄, 亦或者只是无地质意义的年龄数据。

二、Re-Os 同位素定年原理

Re-Os 同位素定年体系是地质年代学研究的一种新方法。它是认为唯一能够应用于矿石 (硫化物和氧化物) 直接测定矿化年龄的同位素测年方法。Re 为中等不相容元素, Os 为相容元素, Re 在地壳中相对富集, 而 Os 在地幔中相对富集, Re 和 Os 主要富集在地核中, Re-Os 在硅酸盐相中含量很低, Re 和 Os 为高度亲硫元素, Re 和 Os 在硫化物中相对富集, 例如, 辉钼矿、黄铜矿、辉铜矿、磁黄铁矿, 黑色页岩、热液沉积物也可以定年和示踪。该同位素体系的特点是 Re 和 Os 分别为亲铜、亲铁元素, 而其他几种金矿的定年方法所用的同位素体系及母体元素 (Rb, K, Sm, U) 皆为亲石元素测试对象都是硅酸盐矿物和含铀、钍矿物的结晶年龄 (魏俊浩等, 2003; 郑海飞等, 2007; 韩玥等, 2012)。

自然界中铼有两个同位素: ^{185}Re (37.40%) 和 ^{187}Re (62.60%), 经过 β 衰变成为 ^{187}Os (式 8) 具有七种同位素: ^{184}Os (0.02%)、 ^{186}Os (1.58%)、 ^{187}Os (1.60%)、 ^{188}Os (13.3%)、 ^{189}Os (16.1%)、 ^{190}Os (26.4%)、 ^{192}Os (41.0%), 其中 ^{187}Os 的衰变常数为 $1.666 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$, 半衰期为 41.6Ga。与

其他测定年龄的方法类似, Re-Os 法也可以使用等时线方法, 计算公式为:

和其它等时线一样, Re-Os 等时线也必须满足等时、同源和封闭等条件。该方法目前还未完全成熟, 测试仪器有: 共振离子质谱、电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS)、加速器质谱、负离子热表面电离质谱 (NTIMS) 等。

三、锆石 U-Pb 定年法应用

Wei 等人 (2018) 对张家口东坪金矿的斑状花岗岩样品进行锆石 U-Pb 定年, 得出的两组一致年龄为 $373.0 \pm 3.5 \text{Ma}$ (MSWD=1.5) 和 $142.0 \pm 1.2 \text{Ma}$ (MSWD=1.5), 表明其可能代表了水泉沟残余岩浆和斑状花岗岩的成矿年龄。Li 等人 (2010) 在东坪金矿 1 号脉中的钾长石石英脉中选取保留 U-Pb 封闭体系的锆石及未被交代的锆石得到的年龄为 $(380.5 \pm 2.6) \text{Ma}$, 认为水泉沟碱性杂岩体的主体侵位时代为晚泥盆世, 而通过 Th, U 含量和 Th/U 比值中岩浆锆石明显增高的热液锆石得出的年龄为 $(140.2 \pm 1.3) \text{Ma}$, 其成岩与成矿年龄相差近 240Ma, 因此, 以正长岩为主的围岩与金矿床的形成并无直接联系。可能与该区晚侏罗世-早白垩世期间的火山活动有关或隐伏岩体的热液活动有关 (Li et al., 2010)。张炯飞等对内蒙古白音宝力道的花岗斑岩进行锆石 U-Pb 定年, 认为 $(439 \pm 4.3) \text{Ma}$ 为花岗斑岩的成岩时代, 而 $(411 \pm 3) \text{Ma}$ 为该矿床的成矿年龄。鲍晓明等对安徽省霍山县东溪-南关岭金矿, 该金矿矿体主要赋存于毛坦厂组火山岩中, 核部具有震荡环带的年龄为 345Ma, 而其热液锆石的年龄为 $128.6 \pm 3.9 \text{Ma}$ 作为东溪金矿的成矿年龄。

对于金矿成岩成矿定年的同时需要加强成矿背景的研究, 基于成矿背景选取合适的定年方法, 而且对矿床成矿年龄的测定必须重视 3 个内容: (1) 样品是否为金矿时或者代表金矿化作用; (2) 测试样品是否与金成矿同期形成; (3) 测试样品是否可以确定金矿成矿时间的年龄 (石贵勇等, 2012)。锆石 U-Pb 法的应用已经非常成熟, 技术手段也日益进步, 对地质体定年, 得到了许多地质学家的认可, 但是对金矿的成矿年龄测定仍存

在问题, 金矿中的含金石英脉中很难发育锆石, 即使有锆石, 也有可能是捕获的, 而非本身所发育的锆石。

四、Re-Os 同位素定年法应用

该方法最常用的测试矿物为辉钼矿, 随着仪器测试灵敏度的提高, 其他的金属硫化物也可以进行直接定年。张建等对豫西南高庄金矿矿石中的主要载金矿物磁黄铁矿进行了 Re-Os 同位素定年, 其构成的等时线年龄为 (137 ± 2) Ma, 张朋等 (2016) 对辽东裂谷白云金矿中的载金黄铁矿进行 Re-Os 定年 (225.3 ± 7.0) Ma, 为白云金矿的成矿年龄。魏俊浩等 (2003) 测定五龙 金矿主成矿阶段石英流体包裹体获得 Rb-Sr 等时线年龄为 120 Ma; 刘国平和艾永富 (2000) 采用 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 阶段加热法测定小佟家堡子变粒岩型金矿石中绢云母得出成矿年龄为 167 Ma, 薛春纪等 (2003) 对小佟家堡子金矿含金硅化岩进行全岩 Rb-Sr 法定年获得 233 Ma 年龄, 而采用 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 快中子活化法测定含石英获得 239 Ma; 对高家堡子银矿进行石英流体包裹体 Rb-Sr 法定年获 234 Ma, 采用 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 快中子活化法测年获得 240 Ma。Re-Os 法定年是直接对金矿中的载金矿物 (辉钼矿、黄铜矿、辉铜矿、磁黄铁矿等) 进行实验分析, 所测出的成矿年龄较为准确, Re 和 Os 分别为亲铜、亲铁元素, 均可进入金属硫化物晶格中, 通常这些矿物是金的载金矿物, 因此次方法越来越适用于金矿中的定年, 但是也得考虑后期热液交代作用等, 破坏 Re - Os 封闭体系。

五、结论

综上所述, 锆石 U-Pb 定年法目前技术成熟, 适合于岩浆岩密切共生的金矿床, 不太适合于石英脉型等金矿床。

Re-Os 定年法适用于含有金属硫化物的金矿中, 且得出的年龄基本为成矿年龄, 但也要选取适合的样品, 避免封闭体系破坏 Re 丢失等。

参考文献:

[1] Li, C.M.; Deng, J.F.; Su, S.G.; Li, H.M.; Liu, X.M. Two-stage zircon chronology and its significance in

potash altered rocks in Dongping Gold deposit, Hebei Province. *J. Earth Sci.* 2010, 31, 843 - 852.

[2] Wetherill G W. 1956 a. An interpretation of the Rhodesia and Witwatersrand age patterns. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 9 : 290 ~ 292

[3] 高少华, 赵红格, 鱼磊等. 锆石 U-Pb 同位素定年的原理、方法及应用 [J]. 江西科学, 2013, 31(03): 363-368+408.

[4] 韩玥. 金矿成矿年代学测定方法概述 [J]. 中国矿业, 2012, 21(S1): 446-448.

[5] 李强之, 陈衍景, 钟增球等. 小秦岭东沟金矿成矿作用的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代学研究 [J]. 地质评论, 2002, 48 (增刊): 122-126.

[6] 刘国平, 艾永富. 辽宁白云金矿成矿时代探讨 [J]. 岩石学报, 2000, 16(4): 627 - 632.

[7] 石贵勇, 孙晓明, 潘伟坚等. 云南哀牢山金矿带镇沅超大型金矿载金黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义. 科学通报, 2012, 57(26): 2492 - 2500.

[8] 王义文. 金矿床定年方法进展及中国金矿床成矿时代 [J]. 地质科技情报, 1994, 13(2): 53-57

[9] 魏俊浩, 刘丛强, 刘国春. 金矿测年方法讨论及定年中存在的问题 [J]. 地学前缘, 2003, (02): 319-326.

[10] 薛春纪, 陈毓川, 路远发等. 辽东青城子矿集区金、银成矿时代及地质意义 [J]. 矿床地质, 2003, (02): 177-184.

[11] 杨崇辉. 河南高庄金矿床成矿作用地球化学特征及成矿演化过程 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 1996(4): 5.

[12] 杨果林, 杨立伟. 隧道施工地质超前预报方法与探测技术研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2006(4): 627-630

[13] 姚军明, 赵太平, 李晶等. 河南祁雨沟金成矿系统辉钼矿 Re-Os 年龄和锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素地球化学 [J]. 岩石学报, 2009, 25(02): 374-384.

[14] 张朋, 李斌, 李杰, 等. 辽东裂谷白云金矿载金黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义 [J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(4): 8.

[15] 郑海飞, 郝瑞霞等. 普通地球化学 [M]. 2007.