

关于硫化物 Re-Os 同位素定年的一些思考

黄小文, 漆亮*, 高剑峰, 孟郁苗

中国科学院 地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

摘要: 随着 Re-Os 同位素分析技术的不断改进和完善, 低 Re 含量的普通硫化物(黄铁矿、毒砂、黄铜矿等)广泛应用于各类金属矿床的年代学研究。但是由于对不同成因硫化物 Re-Os 同位素体系及定年体系基本条件认识不足, 常常导致无地质意义的年龄或者等时线年龄构建的失败。本文对这些问题进行了梳理和分析, 总结了硫化物 Re-Os 同位素定年需要注意的问题, 提出了未来发展趋势。

关键词: 硫化物; Re-Os 同位素; 研究现状; 存在问题; 发展趋势

中图分类号: P597+.3 文章编号: 1007-2802(2016)03-0432-09 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2016.03.004

Some Thoughts on Sulfide Re-Os Isotope Dating

HUANG Xiao-wen, QI Liang*, GAO Jian-feng, MENG Yu-miao

State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry,
Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

Abstract: With the constant development and improvement of analytical techniques in Re-Os isotopes, common sulfides with low Re contents such as pyrite, arsenopyrite and chalcopyrite are widely used to constrain the timing of metallogeny of various deposits. However, insufficient understanding on the Re-Os isotope systems of different sulfides and the basic prerequisites for dating has commonly resulted in that either the obtained ages are geological meaningless or the isochron ages were failure to be constructed. This paper has reviewed these issues and proposed some items needed to be paid attention and the future development of the sulfide Re-Os isotope dating.

Key words: sulfides; Re-Os isotopes; current research; problems; future study

1 研究现状

Re、Os 具有亲铁和亲铜性而富集在硫化物中。辉钼矿具有非常高的 Re (达 $\mu\text{g/g}$ 级) 而几乎不含普通 Os, 是最早用来 Re-Os 同位素定年的硫化物 (Morgan *et al.*, 1968; Stein *et al.*, 2001)。随着辉钼矿 Re-Os 同位素分析技术的不断改进 (杜安道等, 1994, 2009; Markey *et al.*, 1998; Stein *et al.*, 1998; 屈文俊等, 2000; 屈文俊和杜安道, 2003; Sun *et al.*, 2010) 及国际和实验室内部辉钼矿 Re-Os 同位素标样 (Stein *et al.*, 1997; Markey *et al.*, 1998; Du *et al.*, 2004), 该定年技术已广泛应用于斑岩型 Mo、Cu-Mo、Cu-Au-Mo、W-Mo 等矿床的年代学研究。但

是含有辉钼矿的矿床类型非常有限, 该方法的应用受到了一定的限制。与辉钼矿相比, 其他类型硫化物如黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、黄铜矿、斑铜矿、闪锌矿和方铅矿等相对普遍, 笔者将这类硫化物称为普通硫化物。随着 Re-Os 同位素分析技术的不断改进 (Qu *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2001; Du *et al.*, 2004; 李杰等, 2005; 漆亮等, 2006; 李超等, 2009; Qi *et al.*, 2010; 靳新娣等, 2010; 黄小文等, 2012; 漆亮和黄小文, 2013; Chu *et al.*, 2015) 和铜镍硫化物 Re-Os 同位素标样 (屈文俊等, 2010, 2011) 的完善, 具有相对较低 Re 含量 (ng/g 级) 的普通硫化物也用来进行 Re-Os 同位素定年, 涉及的矿床类型包括金矿床、铁(铜)矿床、矽卡岩-斑岩型铜矿床、沉积型

收稿日期: 2016-02-25 收到, 2016-03-03 改回

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2012CB416804); 国家自然科学基金项目 (41373064, 41430315, 41503039)

第一作者简介: 黄小文 (1985-), 男, 助理研究员, 研究方向: Re-Os 同位素及矿物原位微量元素研究. E-mail: huangxiaowen@vip.gyig.ac.cn.

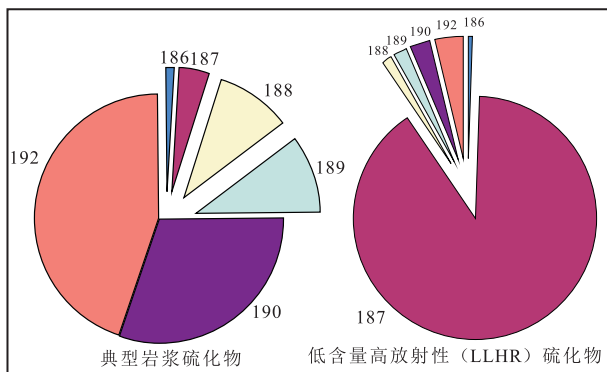
* 通讯作者简介: 漆亮 (1964-), 男, 研究员, 研究方向: 铂族元素及 Re-Os 同位素研究. E-mail: qilianghku@hotmail.com.

铜矿床、铜镍硫化物矿床、铅锌矿床、钼矿床、稀土元素矿床、锡多金属矿床等。由此可见,硫化物 Re-Os 同位素体系已成为金属矿床年代学研究的一个重要手段。尽管如此,大多数研究只关注单个矿床的年代学研究,对于硫化物 Re-Os 同位素体系的理解仍然不足,以至于对年龄所代表的地质意义认识比较模糊。因此有必要对硫化物 Re-Os 同位素体系定年的基本条件及需要注意的问题进行深入的探讨。

2 研究存在的问题

2.1 对不同成因硫化物 Re-Os 同位素体系认识不足

不同的硫化物由于 Re、Os 含量的差别,Re、Os 同位素组成也不同。具有不同 Re-Os 同位素特征的硫化物所牵涉到的等时线投图、模式年龄计算方法等也并不相同。Stein 等(2000)根据 Os 同位素组成对硫化物进行了分类,将其分为岩浆硫化物和低含量高放射性(LLHR)硫化物(图 1)。前者具有较高的普通 Os 比例,较低的放射性 ^{187}Os 比例;后者刚好相反,具有较高的放射性 ^{187}Os 比例。由于 LLHR 硫化物的 Os 含量较低,所以空白校正对于 Os 同位素组成结果至关重要。大多数热液矿床的硫化物属于 LLHR 硫化物,由于辉钼矿几乎不含普通 Os,是 LLHR 硫化物的极端情况。



典型岩浆硫化物具有较高的普通 Os 比例,较低的放射性 ^{187}Os 比例,与实验室典型空白的 Os 同位素组成相似。低含量高放射性(LLHR)硫化物刚好与典型岩浆硫化物相反,具有非常高的放射性 ^{187}Os 比例

图 1 硫化物的 Os 同位素组成分类

(据 Stein *et al.*, 2000 修改)

Fig.1 Os isotope composition classification of sulfides(modified from Stein *et al.*, 2000)

对于具有不同 Re-Os 同位素组成的硫化物,等时线投图也是不一致的。Stein 等(2000)提出了 3

种投图方法(图 2)。传统的 Re-Os 等时线投图是以 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 为横坐标, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 为纵坐标(图 2a),这种投图适用于具有较低 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 同位素比值($< \sim 5000$)的岩浆硫化物、氧化物以及黑色页岩等,由于普通 Os 含量较高,可以准确测定,X 和 Y 轴数值的相关误差较小,可以忽略。第 2 种等时线投图与传统的投图类似(图 2b),用于具有高 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 同位素比值($< \sim 300\,000$)LLHR 样品(如热液硫化物)投图。由于样品中的 Os 主要以放射性 ^{187}Os 为主,普通 Os 非常低,以至于普通 Os 很难准确测定,造成了 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 与 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 之间较大的相关误差(ρ),对于计算 Re-Os 同位素年龄不可忽视。这种误差可以通过公式计算(Ludwig, 1980):

$$\rho = \frac{\left(\frac{\sigma(^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os})}{^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})}{^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma(^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})}{^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re}} \right)^2}{2 \times \frac{\sigma(^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os})}{^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}} \times \frac{\sigma(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})}{^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}}}$$

第 3 种等时线投图是以 ^{187}Re 为横坐标, ^{187}Os 为纵坐标(图 2c),适用于基本不含普通 Os 或者普通 Os 相对于放射性 Os 可以忽略不计的硫化物(如辉钼矿)。

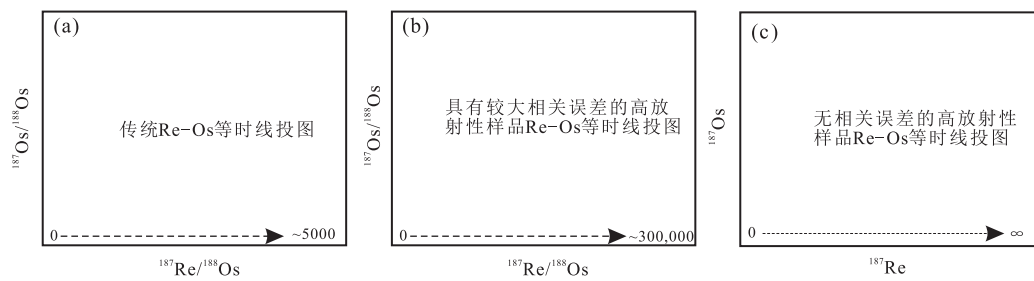
由于不同硫化物未必形成于同一体系,因此不能简单地将同一矿床不同硫化物混合投图。比如黄铁矿和黄铜矿混合投图可能得出不准确的结果,而单独投图能得到有地质意义的年龄(Barra *et al.*, 2003)。在一些研究中,将硫化物和氧化物同时投图(Mathur *et al.*, 2002),这种做法也是不可取的,因为硫化物和氧化物的 Re-Os 同位素组成相差很大,且无法保证同源同时性。比如对于新疆东天山沙泉子铁矿床来说,尽管黄铁矿和共生的磁铁矿得到的 Re-Os 同位素年龄在误差范围内是一致的,但是黄铁矿和磁铁矿的 Re-Os 同位素特征完全不同,黄铁矿具有高的 ^{187}Os 比例,非常高的 Re/Os 同位素比值(约 1300 ~ 29 000)(Huang *et al.*, 2013a),与 LLHR 硫化物类似,而磁铁矿具有低的 ^{187}Os 比例,低的 Re/Os 同位素比值(约 50 ~ 8000)(Huang *et al.*, 2014; 黄小文等, 2014),与岩浆硫化物类似,因此不能将它们进行混合投图,必须单独投图才能得到有地质意义的年龄。

对于具有不同成因的硫化物,模式年龄的计算方法也是不一致的。模式年龄的计算公式为:

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

式中: ^{187}Os 为放射成因 ^{187}Os 的含量, ^{187}Re 衰变常数 $\lambda = 1.666 \times 10^{-11}$ (Smoliar *et al.*, 1996)。

该公式的前提条件是假设样品中无普通 Os 或

图 2 3 种不同类型的等时线投图(据 Stein *et al.*, 2000 修改)Fig.2 Three types of Re-Os isochron plots(modified from Stein *et al.*, 2000)

者说普通 Os 与放射性 Os 相比可以忽略不计。对于岩浆硫化物来说,普通 Os 含量接近或者大于放射性 Os 含量,因此无法计算模式年龄。对于一些热液硫化物来说,存在不可忽略的普通 Os,它们具有较高的 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 值(>5000),必须先通过 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os} - ^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 等时线投图,得出初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 组成,计算出初始 ^{187}Os 含量,用总 ^{187}Os 含量扣除初始 ^{187}Os 含量得到放射性 ^{187}Os 含量,然后再根据衰变公式计算即可。对于辉钼矿,由于基本不含普通 Os,所以直接用 ^{187}Os 和 ^{187}Re 含量计算模式年龄即可。但是随着研究的不断深入,发现有些辉钼矿也会含有一定的普通 Os,当 ^{187}Os 总量(放射成因 ^{187}Os 与普通 ^{187}Os)与普通 Os 比值小于 20 时,需要考虑普通 Os 对模式年龄的影响(李超等, 2012),对于这类辉钼矿,必须先通过 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os} - ^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 等时线投图,得出初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 组成,扣除初始 ^{187}Os 含量,再进行模式年龄计算。

2.2 对硫化物 Re-Os 同位素体系定年基本条件理解不足

任何用于同位素定年的体系在理论上都必须满足 3 个条件:①待测样品具有相同的来源,即具有相同的初始同位素组成;②待测样品必须同时形成;③样品形成后同位素体系必须保持封闭。但在实际地质样品中这 3 个定年的基本条件是很难判定的。

①待测样品相同的来源。在野外采集地质样品时是无法知道这些样品是否具有相同的来源,因此必须详细查明矿体的产状、矿石类型及矿物组合关系以确定矿物形成的先后顺序及成矿阶段。要保证样品的同源性,必须选择同一成矿阶段的同种硫化物,或者说同一矿石类型的硫化物。例如,对于金矿床来说,通常存在着成矿前和成矿期黄铁矿,成矿前黄铁矿通常为地层中的沉积黄铁矿,具有明显的鲕状结构,它们几乎不含 Re、Os;而成矿期黄铁矿通常具有热液交代结构,它们含有 ng/g 级的

Re、Os 含量。因此要准确厘定金矿化的年龄,必须选择具有相同来源的成矿期黄铁矿。对于某些矿床来说,同一矿石类型可能代表了相同的来源。比如 Huang 等(2013b)在研究云南东川铜矿床时发现,该矿床存在着 2 种不同类型的矿石:层状矿石和块状(脉状)矿石。层状矿石表现为硫化物沿着白云岩的层理生长,呈纹层状或者条带状;块状(脉状)矿石表现为硫化物为块状集合体或者呈网脉状。这 2 类矿石具有明显不同的 Re-Os 同位素特征,层状矿石具有低 Re 和高普通 Os 特征,块状矿石具有高 Re 和低普通 Os 特征,Re/Os 值差异明显,结合稳定同位素(S-C-O)组成,推断两类矿石形成于不同的时期,且具有不同的物质来源。因此要想成功得到等时线或者说得到有地质意义的年龄,野外工作确定待测样品的同源性是至关重要的。如果在野外无法通过地质现象判断样品是否具有同源性,可以采用其他地球化学手段(如硫化物的微量和稀土元素组成、硫同位素组成等)间接判断。

②待测样品必须具有同时性。样品的同时性可以分为不同尺度,比如在矿床尺度同时形成,在矿体尺度同时形成,在矿石尺度同时形成,在矿物颗粒尺度同时形成,因此针对不同类型矿床,正确把握样品的同时性对于获得有地质意义的年龄至关重要。例如:对于岩浆热液铁矿床来说,矿床的形成是一次性完成的,硫化物只在硫化物阶段形成,要略晚于磁铁矿,但在 Re-Os 同位素定年技术的误差范围内是无法将这种先后区分开来的(Huang *et al.*, 2014; 黄小文等, 2014),硫化物的形成年龄能代表铁矿床的形成年龄,因此在矿床尺度上采集硫化物便能得到有地质意义的年龄。而对于大多数矿床来说,并不是一次就能形成的,经历了多个阶段成矿作用,硫化物存在于成矿的各个阶段,因此要将每个阶段的硫化物区分开来,才能保证样品的同时性。例如,如前所述云南东川铜矿床就经历两次不同的硫化物矿化作用,Re-Os 同位素定年表

明层状矿石形成于 ~ 1.7 Ga, 块状矿石形成于 ~ 1.3 Ga (Huang *et al.*, 2013b), 如果将两期硫化物混为一谈, 得出的年龄将是无意义的年龄。斑岩铜矿的形成通常也不是一次地质过程的产物, 例如, 对智利 El Salvador 斑岩型 Cu-Mo 矿床的精细 Re-Os 同位素研究表明, 该矿床经历了多次岩浆活动, 并导致不同程度的硫化物矿化, 早期弱矿化时代为 44 ~ 42.5 Ma, 中期强矿化为 41.8 ~ 41.2 Ma, 晚期弱矿化为 ~ 41 Ma, 分别与不同时代的侵入体相对应 (Zimmerman *et al.*, 2014)。因此正确划分成矿阶段, 保证样品的同时性, 才能有效限定整个成矿过程。

③样品形成后同位素体系必须保持封闭。这涉及到 2 个关键问题, 一是不同硫化物 Re-Os 同位素体系的封闭温度; 二是样品形成后是否受后期地质作用的影响而导致体系不封闭。对某一同位素体系来说, 并不是在矿物、岩石形成的那一瞬间就开始计时, 当温度降低到能使该计时体系达到封闭状态时, 即子体由于热扩散导致的丢失量可以忽略不计, 子体才开始积累, 这个开始计时的温度就是封闭温度。目前有关硫化物 Re-Os 同位素体系封闭温度的理论研究比较少 (Brenan *et al.*, 2000), 大多数通过其他同位素体系或者地质事件进行推断 (表 1)。辉钼矿和黄铁矿的封闭温度一般认为高于 500℃, 毒砂大约为 400℃, 黄铜矿和斑铜矿高于 300℃, 磁黄铁矿低于 300℃ (表 1)。方铅矿和闪锌矿的封闭温度目前并未有报道。由于磁黄铁矿具有较低的封闭温度, 与黑云母的 K-Ar 和 Rb-Sr 体系相当, 所以该矿物的 Re-Os 同位素体系通常表现出开放行为 (Morelli *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2013c)。Os 同位素扩散实验表明, 在高于 400℃ 时, 对于颗粒半径为 500 μm 的磁黄铁矿来说, 表面和核部 Os 同位素发生交换只需要 0.5 Ma; 而对于同样颗粒大小的黄铁矿来说, 在 500℃ 时表面和核部 Os 同位素发生交换 (以最大的扩散速度计算) 需要至少 10 Ma (Brenan *et al.*, 2000)。磁黄铁矿中 Os

同位素扩散行为很好地解释了 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床中块状硫化物矿石能得到真实的地质年龄, 而浸染状或网脉状硫化物矿石得到的是假年龄 (Yang *et al.*, 2008; Gao *et al.*, 2012; 屈文俊等, 2012)。因为对于块状矿石来说, 虽然硫化物熔体在形成的时候发生了 Os 扩散, 但是在硫化物熔离时 Os 能够达到重新平衡, 所以能得到真实年龄; 而对于浸染状或网脉状矿石来说, 由于 Os 在硅酸盐熔体和硫化物熔体之间分配系数的巨大差异, Os 几乎全部进入到硫化物熔体中, 硅酸盐熔体则成为 Os 的“真空地带”, 因此硅酸盐矿物是 Os 扩散的屏障 (Burton *et al.*, 1999)。

除了具有较高的封闭温度之外, 矿物形成后不受后期地质作用影响对于体系的封闭也至关重要。辉钼矿 Re-Os 同位素体系被认为是最不容易受变形、变质或者后期地质事件影响的体系 (Stein *et al.*, 1998; Raith and Stein, 2000; Stein *et al.*, 2001; Selby *et al.*, 2002; Bingen and Stein, 2003), 但是一些研究认为辉钼矿也会表现出开放行为 (Luck and Allègre, 1982; McCandless *et al.*, 1993; Suzuki *et al.*, 2000; Suzuki *et al.*, 2001), 尽管也有人认为这种开放行为是由于样品准备过程造成的 (Stein *et al.*, 2001)。除了辉钼矿, 黄铁矿的 Re-Os 同位素体系也被认为是相对封闭的, 不容易受变质、变形作用影响 (Stein *et al.*, 1998; Morelli and Creaser, 2006; Selby *et al.*, 2009), 但是黄铁矿也会受到成矿后热液作用的影响而表现出开放行为 (Mathur *et al.*, 1999; Huang *et al.*, 2013c, 2015)。黄铜矿 Re-Os 同位素体系也偶尔表现出开放行为 (Barra *et al.*, 2003; Stein *et al.*, 2003; Tristá-Aguilera *et al.*, 2006)。例如当黄铜矿与辉钼矿共生时, 辉钼矿中的 ^{187}Os 会以表面吸附或者扩散方式进入黄铜矿, 而导致黄铜矿 Re-Os 同位素体系重置 (Stein *et al.*, 2003)。对于方铅矿和闪锌矿来说, 目前很少得到其 Re-Os 同位素年龄 (Terakado, 2001; Mathur *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2015), 部分原因是由于其较低

表 1 不同硫化物 Re-Os 同位素体系的封闭温度

Table 1 Closure temperatures of Re-Os isotope systems of different sulfides

	辉钼矿		毒砂	黄铁矿		磁黄铁矿		黄铜矿、斑铜矿
封闭温度/℃	~ 500	>710	~ 400	>500		$300 \sim 400$	$<300 \sim 350$	>300
获得方法	A	B	B	C	B	C	B	B
参考文献	Suzuki 等 (1996)	Bingen 和 Stein (2003)	Morelli 等 (2010)	Brenan 等 (2000)	Nozaki 等 (2010)	Brenan 等 (2000)	Morelli 等 (2010)	Selby 等 (2002); Nozaki 等 (2010); Coggon 等 (2012)

注: A-与 K-Ar 和 Rb-Sr 同位素体系对比; B-与区域变质事件和 (或) 岩浆事件对比; C-扩散实验研究和理论计算。

的 Re 含量 (Stein *et al.*, 2000)。但方铅矿和闪锌矿的 Re 含量较高时, 也会表现出开放行为 (Morelli *et al.*, 2004), 可能是较低的封闭温度或者混合流体来源导致的 (Spry *et al.*, 2014)。硫化物 Re-Os 同位素体系的封闭行为主要是和硫化物的稳定性有关, 实验研究表明低温 (<200℃) 热液交代作用不会造成硫化物 Re-Os 同位素体系重置, 只要在低氧逸度条件下硫化物是稳定的; 体系重置是由于高温 (>400℃)、高氧逸度的流体作用, 而与流体 pH 无关 (Xiong *et al.*, 2006)。

3 注意事项

如前所述, 硫化物 Re-Os 同位素定年技术的应用已比较成熟, 但是硫化物样品如果不能满足 Re-Os 同位素定年基本条件, 将导致定年的失败或者得出无地质意义的年龄, 因此有必要对硫化物定年需注意的一些事项进行阐述。

3.1 野外工作

样品采集是 Re-Os 同位素定年成功的前提。详细查明地质构造、矿体形态、与围岩的接触关系、围岩蚀变特征、矿物共生组合、矿石结构构造, 根据定年需求系统采集各种矿石标本。根据接触关系, 在野外划分出成矿期次, 采集同一成矿阶段或者同一成矿期次的硫化物矿石 (矿化) 样品, 以保证样品的同源性和同时性。采集新鲜样品, 避免后期蚀变及外部污染, 尽量不要选择有后期脉穿插的样品。用于 Re-Os 同位素定年的每件样品一定要单独分装, 以避免交叉污染。

3.2 室内工作

室内工作主要包括显微观察、矿物分选和 Re 含量初测。

显微观察的目的是为了查明矿物的共生组合、矿物结构、矿物颗粒大小、以便进行矿物分选。很多矿床中硫化物 (尤其是黄铁矿) 通常具有环带结构或者交代结构, 它们通常代表着多期次流体作用的结果, 此类矿物是不适合 Re-Os 同位素定年。具有这些结构的矿物定年结果是平均年龄或者混合年龄, 没有真正的地质意义。所以在选择定年矿物时, 尽量选择结构简单的硫化物。

在进行显微观察之后就是对矿物进行分选。根据镜下观察估计硫化物颗粒的大小, 从而选择合理分选目数。矿物分选最好采用人工分选, 如果颗粒太细, 则先采用机选, 再用人工镜下检查。对于结构比较复杂的矿石, 可以借助微钻取样 (辉钼矿除外)。矿物分选要注意的是: ①将不同产状硫化

物分开, 即使是同一矿石, 如果存在多期硫化物, 也要将其分开。②在分选同时含辉钼矿和其他硫化物的矿石样品时, 一定要避免交叉污染。③尽量少使用铁质器械, 防止对样品的污染。研究表明, 颚式破碎机钢片具有较高的 Re 和 Os 含量 (分别为 ~50 ng/g 和 ~2 ng/g), $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值分别为 ~130 和 ~5 (Davies, 2010), 与一些岩浆硫化物的 Re-Os 同位素组成相似。由于较高的 Re 和 Os 含量, 少量铁质的混入将影响硫化物的 Re-Os 同位素组成。④辉钼矿分选后磨成粉末以消除失耦效应 (见后文), 其他硫化物分选后无需磨成粉末, 保持矿物颗粒即可, 因为颗粒之间 Re-Os 同位素组成的差异有助于等时线的构建 (Freydier *et al.*, 1997)。

在所有的硫化物分选过程中, 辉钼矿的分选对于实验结果的成败显得尤其重要, 因为辉钼矿颗粒内部存在微米级的 Re-Os 失耦 (Stein *et al.*, 2003; 杜安道等, 2007; Selby *et al.*, 2007)。而且, 失耦程度随矿物颗粒增大, 年龄变老及 Re 含量变低而变得更加明显。图 3 所示是某钨矿床中同一件矿石样品不同辉钼矿分离体 Re-Os 同位素定年的结果, 样品点分散, 但是都沿着等时线分布, 很明显是由于样品准备过程造成的, 而不是后期热液作用造成的。因为该等时线年龄与其他同位素手段获得的年龄一致, 尽管具有非常大的误差。因此对辉钼矿分选的建议是: 分选完整颗粒, 磨成粉末; 年轻的辉钼矿 (<1 Ga), 一般取样量为 1~10 mg; 年老的辉钼矿 (>1 Ga), 取样量达到 40 mg, 实际的取样量还得根据 Re 含量调整以满足测试精度。正因为辉钼矿的亚晶粒失耦效应, 所以如果采取微钻取样, 得选取整个辉钼矿颗粒, 而不能选取大颗粒的一部分。辉钼矿除了矿物内部 Re-Os 失耦外, 当与其他硫化物共生时, 会因为 Re 和 Os 的不一致扩散造成辉钼矿

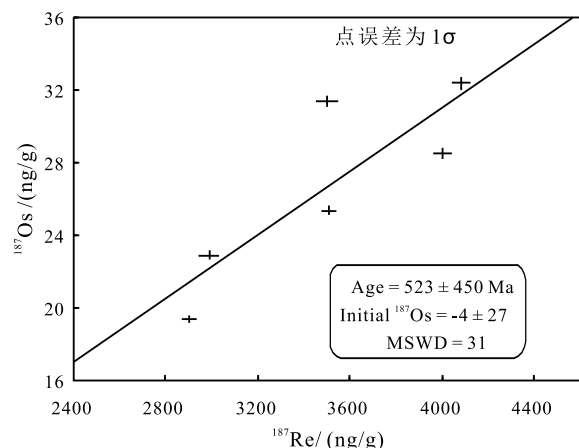


图 3 某钨矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄

Fig.3 Re-Os isochron age of molybdenite from a tungsten deposit

和其他硫化物 Re-Os 失耦。例如,当辉钼矿与黄铜矿共生时,辉钼矿中¹⁸⁷Os 迁移进入黄铜矿会造成黄铜矿 Re-Os 失耦而该过程对辉钼矿的影响不大 (Stein *et al.*, 2003),因此当辉钼矿与其他硫化物共生时,只选择辉钼矿定年而不用其他硫化物。研究表明,磁黄铁矿中的 Os 也具有非常大的扩散速度,也会造成晶粒级的 Re-Os 失耦 (Brenan *et al.*, 2000),因此不适合 Re-Os 同位素定年。

4 硫化物 Re-Os 同位素定年未来的发展趋势

4.1 普通硫化物标样研制

国际上现有的 Re-Os 同位素硫化物标样为辉钼矿标样和铜镍硫化物标样(表 2)。辉钼矿标样具有很高的 Re 及放射性成因 Os,通常只用于辉钼矿样品的 Re-Os 同位素分析时的监控样;铜镍硫化物标样虽然具有中等的 Re 和 Os 含量(ng/g),但是具有极低的放射性¹⁸⁷Os 和较高的普通 Os,不满足模式年龄计算的要求,只有 Os 同位素组成而没有 Re-Os 同位素模式年龄。大多数热液硫化物通常具有非常低的普通 Os 含量(pg/g)和较高的放射性成因 Os,现有的硫化物标样无法进行有效监控。因此,急需建立低 Re(ng/g)、Os(pg/g)含量的硫化物标样,如黄铁矿和黄铜矿标样等,以满足普通硫化物 Re-Os 同位素定年的需求。

4.2 不同硫化物 Re-Os 同位素体系封闭性

如前所述,不同硫化物具有不同的 Re-Os 同位素体系封闭温度,了解了封闭温度和矿物在特定矿床中的形成温度,就可以判断体系的封闭性。但是目前模拟实验和理论计算只给出了黄铁矿和磁黄铁矿的封闭温度 (Brenan *et al.*, 2000),其他一些硫化物的封闭温度都是通过变质事件或者岩浆事件的地质温度计推测得来的(表 1),具有一定的局限性。例如,铅锌矿床的定年是世界难题,很多学者

尝试用方铅矿和闪锌矿来进行 Re-Os 同位素定年,结果均不太理想。大多数矿床中 Pb-Zn 硫化物分析结果表明 Re-Os 同位素体系表现出开放行为 (Morelli *et al.*, 2004; Spry *et al.*, 2014),这种行为是由于本身封闭温度过低导致还是其他地质过程所致,目前并不清楚。因此,硫化物的封闭性研究是亟待解决的问题。

4.3 硫化物 Re 的赋存状态

不同类型硫化物具有不同的 Re 含量,即使同一类型硫化物甚至同一颗粒 Re 含量也相差极大,硫化物中 Re 是以什么样的形式赋存以及受什么因素控制目前并不清楚。辉钼矿的 Re 含量通常为 μg/g 级,而其他硫化物通常为 ng/g 级。辉钼矿中较高的 Re 含量通常解释为结晶结构控制,因为 Re 与 Mo 具有相似的地球化学性质,且 Re⁴⁺与 Mo⁴⁺的离子半径接近,Re 能够类质同象替代辉钼矿中的 Mo 而进入辉钼矿 (Stein *et al.*, 2001, 2003)。Re 在其他硫化物中是以类质同象替代、纳米颗粒还是包裹体的形式存在目前并不清楚。

4.4 不同硫化物 Re 含量变化的制约因素

辉钼矿的 Re 含量在不同类型矿床变化很大,与磁铁矿系列花岗岩(I 型花岗岩)有关的 Mo、Cu-Mo 矿床中辉钼矿 Re 含量较高(几十到几百 μg/g),而与钛铁矿系列花岗岩(S 型花岗岩)有关的 W-Sn 矿床中辉钼矿 Re 含量较低(几十 ng/g 到几个 μg/g),据此推断辉钼矿 Re 含量与岩浆源区有关,地幔来源岩浆较地壳来源岩浆的辉钼矿 Re 含量要高 (Ishihara, 1988; Mao *et al.*, 1999)。但是随着研究的深入,认为岩浆来源并不是 Re 含量控制的唯一因素,斑岩型 Cu-Mo 矿床辉钼 Re 含量与母岩浆组成与分异、金属来源、矿物结晶时的物理化学条件都有关系 (Berzina *et al.*, 2005)。例如,辉钼矿 Re 含量与矿物组合之间有一定的关系,与白钨矿(或黑钨矿)和(或)方铅矿、闪锌矿、自然金和自然银共

表 2 不同硫化物标样的 Re-Os 同位素组成

Table 2 Re-Os isotope composition of different sulfide standard materials

编号	样品类型	Re/(μg/g)		¹⁸⁷ Os/(ng/g)		年龄/Ma		参考文献
		推荐值	不确定度	推荐值	不确定度	推荐值	不确定度	
JDC	辉钼矿	17.39	0.32	25.46	0.60	139.6	3.8	Du 等 (2004)
HLP	辉钼矿	283.8	6.2	659	14	221.4	5.6	Du 等 (2004)
8599/RIF	辉钼矿	11.08	0.04	3.21	0.01			
8599/AIRIE	辉钼矿	11.30	0.03	3.27	0.01	27.656	0.022	Selby 等 (2007)
编号	样品类型	Re/(ng/g)		Os/(ng/g)		¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os		参考文献
		推荐值	不确定度	推荐值	不确定度	推荐值	不确定度	
JCBY	铜镍硫化物	38.61	0.54	16.23	0.17	0.3363	0.0029	屈文俊等 (2011)

生时辉钼矿 Re 含量最低(几到几十 $\mu\text{g/g}$);与黄铜矿和(或)磁铁矿(或磁黄铁矿)共生时辉钼矿 Re 含量最高(几十到几百 $\mu\text{g/g}$)(杨宗锋等, 2011)。因此,辉钼矿中 Re 含量具有比较复杂的控制因素。

黄铁矿 Re 含量在不同类型矿床中的变化也很大($0\sim 3\ \mu\text{g/g}$)(Huang *et al.*, 2013a),即使在同一矿床中也变化极大,比如安徽新桥铜铁矿床黄铁矿的 Re 含量从 $\sim 18\ \text{ng/g}$ 变化到 $\sim 3\ \mu\text{g/g}$ (Guo *et al.*, 2011)。黄铜矿含量也变化很大,目前报道的黄铜矿 Re 含量高达 $14\ \mu\text{g/g}$ (张正伟等, 2011),指示黄铜矿和黄铁矿同样具有容纳高含量 Re 的能力。但是在很多矿床中,黄铁矿和黄铜矿的 Re 含量很低,低至检测限水平。赋存在碳酸盐岩中的层控矿床中硫化物通常具有较高的 Re 含量,如美国阿拉斯加州 Ruby Creek 铜多金属矿床和西昆仑阿巴列克铜铅多金属矿床(Selby *et al.*, 2009; 张正伟等, 2011),这些矿床的形成温度相对较低且围岩富含高 Re 有机质(如碳沥青),硫化物中 Re 富集可能与流体-有机质之间的相互作用有关。相似的解释也曾用于云南东川铜矿床块状富矿石硫化物中 Re 富集的原因(Huang *et al.*, 2013b),具有较高 Re 含量的碳质板岩围岩是硫化物富集 Re 的一个重要因素。此外,硫化物 Re 含量与矿物组合也有一定关系:与 Cu/Fe 矿物共生的黄铁矿 Re 含量较高,而与 W/Pb/Zn/Au/Ag 矿物共生的黄铁矿 Re 含量较低,与辉钼矿中 Re 的富集规律相似(Huang *et al.*, 2013a)。这种相关关系可能反应了物质来源、流体组成、成矿物理化学条件等方面的差异,但是哪一种因素起了关键作用,还有待于进一步研究。

5 结论

硫化物 Re-Os 同位素体系已广泛应用于金属矿床的年代学研究,但多数研究只关注年龄及其代表的地质意义,对不同成因硫化物的 Re-Os 同位素体系及其定年基本条件理解不够。成功的等时线年龄或者说有地质意义的年龄是在细致的野外工作(定年样品的选择)和室内工作(单矿物的分选)前提下得到的。硫化物 Re-Os 同位素定年未来的发展趋势包括普通硫化物标样研制、不同硫化物 Re-Os 同位素体系封闭性、硫化物 Re 的赋存状态及硫化物 Re 含量控制因素几个方面。

参考文献 (References):

Barra F, Ruiz J, Mathur R, Titley S. 2003. A Re-Os study of sulfide minerals from the Bagdad porphyry Cu-Mo deposit, northern

- Arizona, USA. *Mineralium Deposita*, 38(5): 585-596
- Berzina A N, Sotnikov V I, Economou-Eliopoulos M, Eliopoulos D G. 2005. Distribution of rhenium in molybdenite from porphyry Cu-Mo and Mo-Cu deposits of Russia (Siberia) and Mongolia. *Ore Geology Reviews*, 26: 91-113
- Bingen B, Stein H. 2003. Molybdenite Re-Os dating of biotite dehydration melting in the Rogaland high-temperature granulites, S Norway. *Earth and Planetary Science Letters*, 208: 181-195
- Brenan J M, Cherniak D J, Rose L A. 2000. Diffusion of osmium in pyrrhotite and pyrite: Implications for closure of the Re-Os isotopic system. *Earth and Planetary Science Letters*, 180(3-4): 399-413
- Burton K W, Schiano P, Birck J L, Allègre C J. 1999. Osmium isotope disequilibrium between mantle minerals in a spinel-lherzolite. *Earth and Planetary Science Letters*, 172(3-4): 311-322
- Chu Z Y, Yan Y, Chen Z, Guo J H, Yang Y H, Li C F, Zhang Y B. 2015. A comprehensive method for precise determination of Re, Os, Ir, Ru, Pt, Pd concentrations and Os isotopic compositions in geological samples. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 39(2): 151-169
- Coggon J A, Nowell G M, Pearson D G, Oberthür T, Lorand J P, Melcher F, Parman S W. 2012. The $^{190}\text{Pt}-^{186}\text{Os}$ decay system applied to dating platinum-group element mineralization of the Bushveld Complex, South Africa. *Chemical Geology*, 302-303: 48-60
- Davies J. 2010. Re-Os geochronology of oxide minerals. Master Thesis. Edmonton: University of Alberta, 1-155
- Du A D, Wu S Q, Sun D Z, Wang S X, Qu W J, Markey R, Stein H, Morgan J, Malinovskiy D. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenites HLP and JDC. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(1): 41-52
- Freydier C, Ruiz J, Chesley J, McCandless T, Munizaga F. 1997. Re-Os isotope systematics of sulfides from felsic igneous rocks: Application to base metal porphyry mineralization in Chile. *Geology*, 25(9): 775-778
- Gao J F, Zhou M F, Lightfoot P C, Qu W J. 2012. Heterogeneous Os isotope compositions in the Kalatongke sulfide deposit, NW China: The role of crustal contamination. *Mineralium Deposita*, 47(7): 731-738
- Guo W M, Lu J J, Jiang S Y, Zhang R Q, Qi L. 2011. Re-Os isotope dating of pyrite from the footwall mineralization zone of the Xinqiao deposit, Tongling, Anhui Province: Geochronological evidence for submarine exhalative sedimentation. *Chinese Science Bulletin*, 56(35): 3860-3865
- Huang X W, Qi L, Gao J F, Zhou M F. 2013a. First reliable Re-Os ages of pyrite and stable isotope compositions of Fe(-Cu) deposits in the Hami region, Eastern Tianshan Orogenic Belt, NW China. *Resource Geology*, 63(2): 166-187
- Huang X W, Zhao X F, Qi L, Zhou M F. 2013b. Re-Os and S isotopic constraints on the origins of two mineralization events at the Tangdan sedimentary rock-hosted stratiform Cu deposit, SW China. *Chemical Geology*, 347: 9-19
- Huang X W, Zhou M F, Qi L, Gao J F, Wang Y W. 2013c. Re-Os isotopic ages of pyrite and chemical composition of magnetite from the Cihai magmatic-hydrothermal Fe deposit, NW China. *Mineralium*

- Deposita, 48(8): 925–946
- Huang X W, Qi L, Wang Y C, Liu Y Y. 2014. Re-Os dating of magnetite from the Shaquanzi Fe-Cu deposit, eastern Tianshan, NW China. *Science China Earth Sciences*, 57(2): 267–277
- Huang X W, Gao J F, Qi L, Zhou M F. 2015. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite and Re-Os dating of pyrite: The Tianhu hydrothermally remobilized sedimentary Fe deposit, NW China. *Ore Geology Reviews*, 65(Part 4): 900–916
- Ishihara S. 1988. Rhenium contents of molybdenites in granitoid-series rocks in Japan. *Economic Geology*, 83(5): 1047–1051
- Liu Y Y, Qi L, Gao J F, Ye L, Huang Z L, Zhou J X. 2015. Re-Os Dating of Galena and Sphalerite from Lead-Zinc Sulfide Deposits in Yunnan Province, SW China. *Journal of Earth Science*, 26(3): 343–351
- Luck J M, Allègre C J. 1982. The study of molybdenites through the ^{187}Re – ^{187}Os chronometer. *Earth and Planetary Science Letters*, 61(2): 291–296
- Ludwig K R. 1980. Calculation of uncertainties of U-Pb isotope data. *Earth and Planetary Science Letters*, 46(2): 212–220
- Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H, Du A D. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W(Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(11–12): 1815–1818
- Markey R, Stein H, Morgan J. 1998. Highly precise Re-Os dating for molybdenite using alkaline fusion and NTIMS. *Talanta*, 45(5): 935–946
- Mathur R, Gold D P, Ellsworth C J, Doden A G, Wilson M, Ruiz J, Scheetz B. 2010. Re-Os evidence used to link regional mineralization processes to the Chesapeake Bay Bolig's impact in the northeastern United States. 15pp. Unpublished report
- Mathur R, Ruiz J, Tornos F. 1999. Age and sources of the ore at Tharsis and Rio Tinto, Iberian Pyrite Belt, from Re-Os isotopes. *Mineralium Deposita*, 34(8): 790–793
- Mathur R, Marschik R, Ruiz J, Munizaga F, Leveille R A, Martin W. 2002. Age of mineralization of the Candelaria Fe oxide Cu-Au deposit and the origin of the Chilean iron belt, based on Re-Os isotopes. *Economic Geology*, 97(1): 59–71
- McCandless T E, Ruiz J, Campbell A R. 1993. Rhenium behavior in molybdenite in hypogene and near-surface environments: Implications for Re-Os geochronometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(4): 889–905
- Morelli R M, Creaser R A, Selby D, Kelley K D, Leach D L, King A R. 2004. Re-Os sulfide geochronology of the red dog sediment-hosted Zn-Pb-Ag deposit, brooks range, alaska. *Economic Geology*, 99(7): 1569–1576
- Morelli R M, Creaser R A. 2006. Re-Os geochronology of low-level sulfide minerals: Applications and limitations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18S): A429
- Morelli R M, Bell C C, Creaser R A, Simonetti A. 2010. Constraints on the genesis of gold mineralization at the Homestake Gold Deposit, Black Hills, South Dakota from rhenium-osmium sulfide geochronology. *Mineralium Deposita*, 45(5): 461–480
- Morgan J W, Lovering J F, Ford R J. 1968. Rhenium and non-radiogenic osmium in Australian molybdenites and other sulphide minerals by neutron activation analysis. *Journal of the Geological Society of Australia*, 15(2): 189–194
- Nozaki T, Kato Y, Suzuki K. 2010. Re-Os geochronology of the Iimori Besshi-type massive sulfide deposit in the Sanbagawa metamorphic belt, Japan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(15): 4322–4331
- Qi L, Zhou M F, Gao J F, Zhao Z. 2010. An improved Carius tube technique for determination of low concentrations of Re and Os in pyrites. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 25(4): 585–589
- Qu W J, Du A D, Zhao D M. 2001. Determination of ^{187}Os in molybdenite by ICP-MS with neutron-induced ^{186}Os and ^{188}Os spikes. *Talanta*, 55(4): 815–820
- Raith J G, Stein H J. 2000. Re-Os dating and sulfur isotope composition of molybdenite from tungsten deposits in western Namaqualand, South Africa: Implications for ore genesis and the timing of metamorphism. *Mineralium Deposita*, 35(8): 741–753
- Selby D, Creaser R A, Hart C J R, Rombach C S, Thompson J F H, Smith M T, Bakke A A, Goldfarb R J. 2002. Absolute timing of sulfide and gold mineralization: A comparison of Re-Os molybdenite and Ar-Ar mica methods from the Tintina Gold Belt, Alaska. *Geology*, 30(9): 791–794
- Selby D, Creaser R A, Stein H J, Markey R J, Hannah J L. 2007. Assessment of the ^{187}Re decay constant by cross calibration of Re-Os molybdenite and U-Pb zircon chronometers in magmatic ore systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(8): 1999–2013
- Selby D, Kelley K D, Hitzman M W, Zieg J. 2009. Re-Os sulfide(bornite, chalcopyrite, and pyrite) systematics of the carbonate-hosted copper deposits at Ruby Creek, southern Brooks range, Alaska. *Economic Geology*, 104(3): 437–444
- Smoliar M I, Walker R J, Morgan J W. 1996. Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA, and IVB iron meteorites. *Science*, 271(5252): 1099–1102
- Spry P G, Mathur R D, Bonsall T A, Voudouris P C, Melfos V. 2014. Re-Os isotope evidence for mixed source components in carbonate-replacement Pb-Zn-Ag deposits in the Lavrion district, Attica, Greece. *Mineralogy and Petrology*, 108(4): 503–513
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Du A, Sun Y. 1997. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt, Shaanxi Province, China. *Economic Geology*, 92(7–8): 827–835
- Stein H J, Sundblad K, Markey R J, Morgan J W, Motuza G. 1998. Re-Os ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuittila-Kivisuo, Finland and Proterozoic molybdenite, Kabeliai, Lithuania: Testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting. *Mineralium Deposita*, 33(4): 329–345
- Stein H J, Morgan J W, Scherstén A. 2000. Re-Os dating of Low-Level Highly Radiogenic (LLHR) sulfides: The Hamås gold deposit, southwest Sweden, records continental-scale tectonic events. *Economic Geology*, 95(8): 1657–1671
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Hannah J L, Scherstén A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it

- works. *Terra Nova*, 13(6): 479-486
- Stein H, Scherstén A, Hannah J, Markey R. 2003. Subgrain-scale de-coupling of Re and ^{187}Os and assessment of laser ablation ICP-MS spot dating in molybdenite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(19): 3673-3686
- Sun Y L, Zhou M F, Sun M. 2001. Routine Os analysis by isotope dilution-inductively coupled plasma mass spectrometry: OsO_4 in water solution gives high sensitivity. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 16(4): 345-349
- Sun Y L, Xu P, Li J, He K, Chu Z Y, Wang C Y. 2010. A practical method for determination of molybdenite Re-Os age by inductively coupled plasma-mass spectrometry combined with Carius tube- HNO_3 digestion. *Analytical Methods*, 2(5): 575-581
- Suzuki K, Shimizu H, Masuda A. 1996. Re-Os dating of molybdenites from ore deposits in Japan: Implication for the closure temperature of the Re-Os system for molybdenite and the cooling history of molybdenum ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(16): 3151-3159
- Suzuki K, Kagi H, Nara M, Takano B, Nozaki Y. 2000. Experimental alteration of molybdenite: Evaluation of the Re-Os system, infrared spectroscopic profile and polytype. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(2): 223-232
- Suzuki K, Feely M, O'Reilly C. 2001. Disturbance of the Re-Os chronometer of molybdenites from the late-Caledonian Galway Granite, Ireland, by hydrothermal fluid circulation. *Geochemical Journal*, 35(1): 29-35
- Terakado Y. 2001. Re-Os dating of the Kuroko ores from the Wanibuchi mine, Shimane Prefecture, southwestern Japan. *Geochemical Journal*, 35(3): 169-174
- Tristá-Aguilera D, Barra F, Ruiz J, Morata D, Talavera-Mendoza O, Kojima S, Ferraris F. 2006. Re-Os isotope systematics for the Lince-Estefanía deposit: Constraints on the timing and source of copper mineralization in a stratabound copper deposit, Coastal Cordillera of Northern Chile. *Mineralium Deposita*, 41(1): 99-105
- Xiong Y, Wood S, Kruszewski J. 2006. Hydrothermal transport and deposition of rhenium under subcritical conditions revisited. *Economic Geology*, 101(2): 471-478
- Yang S H, Qu W J, Tian Y L, Chen J F, Yang G, Du A D. 2008. Origin of the inconsistent apparent Re-Os ages of the Jinchuan Ni-Cu sulfide ore deposit, China: Post-segregation diffusion of Os. *Chemical Geology*, 247(3-4): 401-418
- Zimmerman A, Stein H J, Morgan J W, Markey R J, Watanabe Y. 2014. Re-Os geochronology of the El Salvador porphyry Cu-Mo deposit, Chile: Tracking analytical improvements in accuracy and precision over the past decade. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 131: 13-32
- 杜安道, 何红蓼, 殷宁万, 邹晓秋, 孙亚利, 孙德忠, 陈少珍, 屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究. *地质学报*, 68(4): 339-347
- 杜安道, 屈文俊, 王登红, 李厚民, 丰成友, 刘华, 任静, 曾法刚. 2007. 辉钼矿亚晶粒范围内 Re 和 ^{187}Os 的失耦现象. *矿床地质*, 26(5): 572-580
- 杜安道, 屈文俊, 李超, 杨刚. 2009. 铼-钨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
- 黄小文, 漆亮, 刘莹莹, 王怡昌. 2012. 黄铁矿 Re-Os 同位素定年化学前处理若干条件初探. *地球化学*, 41(4): 380-386
- 黄小文, 漆亮, 王怡昌, 刘莹莹. 2014. 东天山沙泉子铜铁矿床磁铁矿 Re-Os 定年初探. *中国科学: 地球科学*, 44(4): 605-616
- 靳新娣, 李文君, 吴华英, 张连昌, 杜安道. 2010. Re-Os 同位素定年方法进展及 ICP-MS 精确定年测试关键技术. *岩石学报*, 26(5): 1617-1624
- 李超, 屈文俊, 杜安道, 孙文静. 2009. 铼-钨同位素定年法中丙酮萃取铼的系统研究. *岩矿测试*, 28(3): 233-238
- 李超, 屈文俊, 杜安道, 周利敏. 2012. 含有普通钨的辉钼矿 Re-Os 同位素定年研究. *岩石学报*, 28(2): 702-708
- 李杰, 许继峰, 梁细荣. 2005. Re-Os 同位素分析测试技术进展. *质谱学报*, 26(3): 175-181
- 漆亮, 周美夫, 严再飞, 皮道会, 胡静. 2006. 改进的卡洛斯特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(6): 667-674
- 漆亮, 黄小文. 2013. 地质样品铂族元素及 Re-Os 同位素分析进展. *矿物岩石地球化学通报*, 32(2): 171-189
- 屈文俊, 杜安道, 高洪涛. 2000. ^{186}Re 和 ^{188}Re 双同位素稀释法在辉钼矿铼-钨测年中的应用. *岩矿测试*, 19(4): 241-244
- 屈文俊, 杜安道. 2003. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-钨地质年龄. *岩矿测试*, 22(4): 254-257, 262
- 屈文俊, 杜安道, Yang G, 李超, Stein H J, Hannah J L. 2010. 铜镍硫化物和海山富钴结壳的 Re-Os 标准物质研制. *矿床地质*, 29(增刊): 831-832
- 屈文俊, 李超, 杜安道. 2011. 铜镍硫化物铼-钨标准物质定值的溯源性讨论及总不确定度评估. *岩矿测试*, 30(6): 664-668
- 屈文俊, 陈江峰, 杜安道, 李超, 王礼兵. 2012. Re-Os 同位素定年对岩浆型 Cu-Ni 硫化物矿床成矿时代的制约. *矿床地质*, 31(1): 151-160
- 杨宗锋, 罗照华, 卢欣祥, 程黎鹿, 黄凡. 2011. 关于辉钼矿中 Re 含量示踪来源的讨论. *矿床地质*, 30(4): 654-674
- 张正伟, 漆亮, 沈能平, 游富华, 张中山, 周灵洁. 2011. 西昆仑阿巴列克铜铅矿床黄铜矿 Re-Os 定年及地质意义. *岩石学报*, 27(10): 3123-3128

(本文责任编辑: 刘莹)