

Re-Os 同位素体系在金属矿床中的应用

张苏坤¹, 郑有业^{2,3}, 孙祥², 郭俊卫³

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

3. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074)

摘要: Re-Os 同位素体系已成为金属矿床定年和示踪的重要手段之一。文章在简述 Re-Os 同位素体系基本原理基础上, 综述了国内外的最新研究成果, 认为 Re-Os 同位素测试对象不再局限于辉钼矿和铜镍硫化物矿石, 黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿、镍黄铁矿、闪锌矿等也常作为测试对象用于金矿床、铅锌矿床、沉积喷流型钴(金)等矿床的定年。地壳岩石与原始地幔相比, 具有较高的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值、 γ_{Os} 值以及 Re/Os 比值, 因此, 硫化物或矿石的 Re-Os 同位素组成和普通 Os-Re/Os 比值图解可以揭示斑岩矿床、金矿、铅锌矿以及铜镍硫化物矿的成矿物质来源。辉钼矿则可以通过 Re 含量来示踪成矿物质来源。Re-Os 同位素也可与其他同位素结合(如 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ — $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 共同判明不同端元组分对成矿的贡献。

关键词: Re-Os 同位素体系; 金属矿床; 成矿时代; 成矿物质来源

中图分类号: P597; P618.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2012)04-0491-07

0 引言

金属矿床的定年和示踪一直是矿床学研究的热点, 迅速发展的 Re-Os 同位素体系为解决这些科学问题提供了一种新的、可行的办法。负离子—表面热电离质谱(N-TIMS)^[1] 的应用以及新的富集、纯化流程和洁净实验室的建立, 使 Re-Os 同位素得到了广泛应用。20 世纪 80 年代后, Re-Os 同位素开始真正应用于地球科学的研究^[2]。国内杜安道等^[3]、黄典豪等^[4] 最早对辉钼矿进行了 Re-Os 同位素研究。本文通过综述国内外 Re-Os 同位素研究的最新成果, 总结可用的测试对象及在金属矿床研究中的应用; 通过 Re-Os 同位素与 Rb-Sr 等同位素的联用实例, 总结其联用的可行性及其效果。

1 Re-Os 同位素体系的基本原理

Re 有 2 种同位素 (^{185}Re 和 ^{187}Re), 其中 ^{187}Re 是放

射性同位素。Os 有 7 种同位素 (^{184}Os , ^{186}Os , ^{187}Os , ^{188}Os , ^{189}Os , ^{190}Os 和 ^{182}Os)。 ^{186}Os 和 ^{187}Os 为放射性衰变产物, ^{190}Pt 通过 α 衰变形成 ^{186}Os , ^{187}Re 通过 β 衰变形成 ^{187}Os 。早期人们习惯用 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 讨论问题, 后来研究发现, ^{186}Os 还可通过 ^{190}Pt 的 α 衰变产生, 尽管所形成的含量一般较低, 但为了避免引起不必要的误差, 现多改用 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 讨论问题^[5]。由 Re-Os 同位素衰变方程, 可列出定年公式:

$$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = (^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i + ^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}(e^{\lambda t} - 1) \quad (1)$$

式中, $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i$ 代表分析样品形成时体系的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值; $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 和 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 为体系的现在值; λ 为 ^{187}Re 的衰变常数; t 为体系对 Re, Os 保持封闭以来所经历的时间。

Re 为中等不相容元素, Os 为相容元素, 在地幔岩石的部分熔融过程中, Os 倾向于富集在地幔残留相中, Re 倾向于富集在熔体相中。这导致地幔与地壳的 Re/Os 比值存在较大差异。地幔 Re/Os 比值 < 0.13 , 地壳的 Re/Os 比值 > 1 , 而大陆地壳的 Re/

收稿日期: 2012-10-04; 责任编辑: 余和勇

作者简介: 张苏坤(1988-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事矿床学方面的研究工作。E-mail: zhangsukun091128@vip.qq.com

Os 比值 $<4^{[6]}$ 。由于地壳相对富 Re,混入越多的地壳物质则产生放射性 ^{187}Os 的含量就越高,相应地 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值也发生变化 $^{[7]}$,所以,初始 Os 同位素组成是判断幔源岩石和壳源岩石的有力依据 $^{[6]}$ 。 γ_{Os} 是指地壳物质加入成矿体系的一个重要参数 $^{[8-9]}$,地壳组分加入岩浆体系或成矿体系越多, γ_{Os} 值越表现为大的正值,而 Re 的亏损引致 γ_{Os} 为负值 $^{[7]}$ 。 γ_{Os} 的计算公式如下:

$$\gamma_{\text{Os}} = \left[\frac{(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{样品}(t)}}{(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{球粒陨石}(t)}} - 1 \right] \times 100 \quad (2)$$

式中, $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{样品}(t)}$ 和 $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{球粒陨石}(t)}$ 分别为 t 时间样品和球粒陨石或地幔的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值。

2 Re-Os 同位素体系在金属矿床定年方面的应用

Re-Os 同位素测年法是一种可以通过单矿物或矿石样品直接测定金属矿床年龄的方法,它不仅能够对十分古老的,而且能对十分年轻的金属矿床进行精确的成矿年龄确定 $^{[10]}$ 。Re-Os 同位素最早广泛应用于各类型钼矿、斑岩矿床 $^{[4,11-20]}$,这些矿床一般发育有富 Re(10^{-6} 级)且几乎不含 ^{188}Os 的辉钼矿。Re-Os 同位素对铜镍硫化物矿床的定年应用也较广泛,它主要通过其矿石进行定年 $^{[7,21-27]}$,通过硫化物单矿物对铜镍硫化物矿床定年也取得了一些成果 $^{[28-29]}$ 。随着 N-TIMS $^{[1]}$ 测试法和 Carius 管熔样法 $^{[30]}$ 的使用以及新的富集、纯化流程和洁净实验室的建立,一些贫 Re(10^{-9} 级)硫化物(黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿与镍黄铁矿等)的 Re-Os 同位素定年也取得了成功。这为金矿床、铅锌矿床等矿床定年提供了一种新的测年方法。

2.1 金矿床的 Re-Os 同位素定年

目前,金矿的测年方法主要有矿石全岩的 Rb-Sr 法和 Sm-Nd 法 $^{[31-32]}$ 、石英流体包裹体的 Rb-Sr 法 $^{[33]}$ 以及蚀变矿物的 Ar-Ar 法 $^{[34-35]}$,但全岩的 Rb-Sr 法和 Sm-Nd 法不能排除蚀变矿物的影响,流体包裹体的 Rb-Sr 法不能完全排除次生包裹体的影响 $^{[36]}$ 。虽然蚀变矿物的 Ar-Ar 法测年效果较好,但很多金矿(卡林型、浅成低温热液型)蚀变矿物并不发育,且金矿成矿的多期叠加性使得蚀变矿物并不能完全反映成矿时代。此外,这些同位素体系涉及元素皆为亲石元素,严格来说它们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 $^{[37]}$ 。Re-Os 体系测定的是与金矿成因密切相关的硫化物的年龄,它为金矿床的年龄测定以及叠加成矿作用的研究提供了一种可信的方法。除通过辉钼矿的 Re-Os 同位素对一些金(铜、钼)矿定年外,国内外学者对金矿中的贫 Re 硫化物也进行了 Re-Os 同位素定年的研究。如:芬兰 Kuittila 金矿 3 个黄铁矿的 Re-Os 平均年龄为 $(2\ 770 \pm 120)$ Ma,与同一矿区的辉钼矿 Re-Os 年龄一致 $^{[38]}$;辽东猫岭金矿中含金毒砂 Re-Os 等时线年龄为 $(2\ 316 \pm 140)$ Ma $^{[39]}$;贵州贞丰烂泥沟卡林型金矿中含砷黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为 (193 ± 13) Ma $^{[40]}$;铜陵地区朝山夕卡岩型金矿含金磁黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为 (141.7 ± 9.9) Ma,与白芒山辉长岩锆石 U-Pb 年龄和铜陵矿集区 Cu-Mo 矿床的辉钼矿 Re-Os 年龄相近 $^{[41]}$ 。

2.2 铅锌矿床的 Re-Os 同位素定年

对于铅锌矿床,目前常用的测年方法有热液白云母 Ar-Ar 法 $^{[42]}$ 、方解石 U-Th-Pb 法 $^{[43]}$ 、闪锌矿及其中流体包裹体的 Ar-Ar 法和 Rb-Sr 法 $^{[44-45]}$,含钙矿物(萤石、方解石等)的 Sm-Nd 法 $^{[46]}$ 以及磁性矿物的古地磁定年。古地磁定年法是一种较为可靠的定年方法,这种方法在国外已经被大量地应用于矿床成矿时代的研究,用以检验放射性同位素定年结果的可靠性 $^{[47-48]}$,但它只能应用于古地磁资料较为完备的地区 $^{[49]}$ 。Re-Os 同位素对铅锌矿床的定年不仅可以通过辉钼矿进行 $^{[50]}$,而且可以通过贫 Re 硫化物进行,这更促进了 Re-Os 同位素体系在铅锌矿床的应用。Morelli 等 $^{[51]}$ 对 Red Dog 铅锌矿中块状和脉状硫化物中的黄铁矿进行了 Re-Os 测年,获得 4 个样品 10 个点的等时线年龄为 (338.3 ± 5.8) Ma,认为代表了主成矿期的年龄,并证明块状和脉状矿石是同时形成的,是同一成矿流体活动的产物。薛春纪等 $^{[52]}$ 获得了金顶超大型铅锌矿床黄铁矿的 Re-Os 同位素等时线年龄为 (72 ± 4.4) Ma,与石英 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄基本一致。

除金矿床、铅锌矿床外,Re-Os 同位素定年还可用于喷流沉积型钴(金)矿床 $^{[53]}$ 、锡多金属矿床 $^{[54]}$ 等矿床贫 Re 硫化物的定年。刘玉龙等 $^{[55]}$ 对白云鄂博矿床晚期矿化产物黄铁矿作了 Re-Os 测年,可能由于 ICP-MS 的精度较低,得出了误差较大的年龄结果 (439 ± 86) Ma。

3 Re-Os 同位素体系对成矿物质来源的示踪

Re-Os 同位素体系是硫化物矿床形成强有力的示踪剂和成矿过程中地壳物质混入程度高度灵敏的指示剂^[25]。对于含有 Os_普 的样品,可以通过 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 初始比值和 γ_{Os} 值进行成矿物质来源示踪,在运用过程中,可结合 ¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os 初始比值和 Os 含量综合判断成矿物质来源。

广西铜坑锡多金属矿中黄铁矿的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 初始值为 0.56±0.12,明显高于地幔的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 初始值(0.12~0.13)的范围,但低于大陆地壳平均值(3.63),反映出成矿物质应该为壳幔混合来源^[54];罗马尼亚 Bolcana 斑岩铜(金)矿床黄铁矿和黄铜-黄铁矿组合的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 初始值为 0~0.37,这个范围与地壳 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 初始值相比更接近典型的地幔 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 初始值,可能暗示其成矿金属主要来源于地幔^[56]。毛景文等^[7]得出新疆黄山东铜镍硫化物矿床的矿石 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸O 初始值为 0.24±0.04, γ_{Os} 平均值为 99,认为在成矿过程及岩浆侵位期间有不少地壳物质混入成岩成矿系统;毛景文等^[21]还对宝坛地区铜镍硫化物矿石进行了 γ_{Os} 计算和 Re/Os 对比研究,认为这套铜镍硫化物矿及其镁铁质-超镁铁质岩浆源于 Re 亏损地幔,在侵入过程中混染有一定的地壳组分。韩春明等^[24]得出新疆喀拉通克铜镍硫化物矿石的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 初始值 0.352±0.04, γ_{Os} 平均值为 183,说明在成矿过程中仅有少量地壳物质混入成矿系统之中。李月臣等^[29]得出了新疆香山铜镍硫化物矿床镍黄铁矿的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 初始值 0.682±0.032, γ_{Os} 平均值为 444,表明在成矿过程及岩浆侵位期间有地壳物质加入成矿系统中。此外,辽东猫岭金矿中含金毒砂的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 比值为 1.32±0.48,显然高于地幔 Os 的比值范围,指示猫岭金矿主要是地壳来源^[39];贵州贞丰烂泥沟卡林型金矿含砷黄铁矿的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 初始比值为 1.127±0.043,并且具有非常低的 Os 和很高的 ¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os 比值,指示其成矿物质来源于地壳而不是地幔^[40]。

此外,也可以通过 Re/Os-Os_普 图解与典型地幔(或地壳)进行比较,来示踪成矿物质来源。Lambert 等^[27]对 Voisey' Bay 超大型铜镍硫化物矿床作了 Re-Os 同位素研究,并对比了 Kambalda, Duluth,

sudbury, Noril'sk-Talnakh, J-M Reef 等矿床以及地幔包体、科马提岩、地幔熔体、球粒陨石、富硫沉积物和下地壳。将它们 Re-Os 组成表示在 Re/Os-Os_普 图解(图 1)中。国内学者研究的新疆黄山东铜镍硫化物矿床矿石、广西宝坛地区铜镍硫化物矿床贯入型和熔离型矿石、广西铜坑锡多金属矿床毒砂、新疆喀拉通克铜镍硫化物矿石以及新疆香山铜镍硫化物矿床镍黄铁矿的普通 Os 对 Re/Os 比值图解(图 1)也分别印证了各自矿床成矿物质来源的结论^[7,21,24,29,54]。

不含 Os_普 的辉钼矿,其 Re 含量提供了矿床成因的一个线索,与地幔、交代作用以及镁铁质-超镁铁质岩石熔融有关的辉钼矿,含有过量的 Re;而中间地壳岩石及贫有机物的沉积岩中的辉钼矿,其 Re 含量低^[57-58]。毛景文等^[12]在综合分析、对比了中国各类型矿床中辉钼矿的 Re 含量后认为,从地幔到壳幔混源再到地壳,矿石中的 Re 含量呈数量级下降,与幔源、I 型到 S 型花岗岩有关的矿床,其 Re 含量从 $n \times 100 \times 10^{-6} \rightarrow n \times 10 \times 10^{-6} \rightarrow n \times 10^{-6}$ 变化。近年来,我国积累的大量与中酸性侵入岩浆作用有关的铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素地质测试数据^[4,11-20],也印证了以上结论。但是,笔者发现

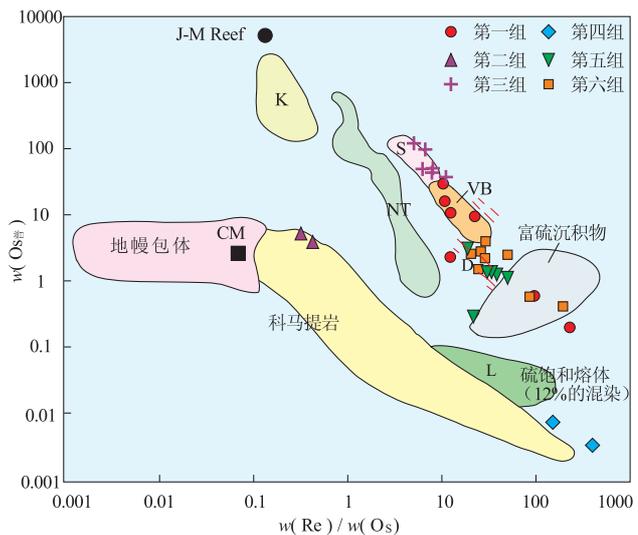


图 1 Re/Os-Os_普 图解(据文献^[27])

Fig. 1 Re/Os vs Os(common) diagram

第 1 组:新疆黄山东矿石;第 2 组:广西宝坛贯入型矿石;第 3 组:广西宝坛熔离型矿石;第 4 组:广西铜坑毒砂;第 5 组:新疆喀拉通克矿石;第 6 组:新疆香山镍黄铁矿
D. Duluth 硫化物矿石;S. sudbury 硫化物矿石;K. Kambalda 硫化物矿石;NT. Noril'sk-Talnakh 硫化物矿石;VB. Voisey Bay 硫化物矿石;CM. 球粒陨石地幔;L. Lewisian 下地壳

西藏冈底斯斑岩铜矿带的辉钼矿 Re-Os 测试结果中,Re 含量整体相对较高,例如甲马铜多金属矿中辉钼矿 Re 含量为 $382 \times 10^{-6} \sim 2\,231 \times 10^{-6}$ [18],西藏曲水鸡公村钼矿床的 Re 含量为 $1\,410 \times 10^{-6} \sim 1\,691 \times 10^{-6}$ (张刚阳等,待刊资料),造成这一现象的原因还有待探究。

4 Re-Os 同位素体系展望

Os-Os 测年法 [59] 是 Re-Os 同位素体系的另一测年方法,与 Re-Os 法相比,无需添加稀释剂和测定 Re 同位素组成,所以,没有混合不均匀的问题,对本底的影响也很小,而且可以获得 ^{186}Os 和 ^{188}Os 两个相互独立、可进行比较的年龄,以验证结果的可靠性。可能因为放射性防护的问题,Os-Os 法在国内外应用并见诸报道的比较少 [60],若能解决放射性防护的问题,将会极大地促进 Os-Os 法的应用,推动 Re-Os 体系的发展。尽管 Re-Os 同位素体系在矿床学中的应用得到了迅速的发展,但是分析测试技术和测试样品的不广泛仍然限制其在矿床学中发挥更大的作用,今后需继续提高分析测试水平,拓展其测试样品种类是 Re-Os 同位素体系发展努力的方向之一。将 Re-Os 同位素体系与其他元素或同位素比值结合,或与 Pt-Os 以及其他常规同位素体系 (Rb-Sr 等) 联用,也是今后发展的方向。

将 Os 同位素与其他元素或同位素比值结合起来,有时可以更有效地判明不同端元组分的混合作用。Sproule 等 [61] 通过对西澳 Sally Malay Ni-Cu-Co 矿床的 Nd 和 Os 同位素研究,认为该矿床可能是由幔源玄武岩浆 ($\epsilon_{\text{Nd}} = +4.5, \gamma_{\text{Os}} = 0$) 与 5%~20% 年龄为 3.6 Ga~2.7 Ga 的地壳物质混染形成的。如果幔源岩浆来源于富集岩石圈地幔 ($\epsilon_{\text{Nd}} = +2, \gamma_{\text{Os}} = 10$), 则混染的地壳物质份额只有 4%~8%。Frank 等 [62] 对刚果 Kipushi 矿床中的硫化物 (闪锌矿、斑铜矿、硫砷铁锌锗矿) 进行了 Re-Os, Rb-Sr 和 Pb-Pb 同位素研究,得到 Rb-Sr 和 Re-Os 等时线的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 的初始比值分别为 $0.708\,97 \pm 2$ 和 0.74 ± 0.23 , 硫化物的 Pb 同位素数据表明,地壳物质是金属物质的主要来源,排除了地幔物质对 Kipushi 矿体的贡献。

将 Re-Os 同位素体系与其他同位素体系联用,可以更合理地示踪成矿物质来源。Shena 等 [63] 对 7 件与台湾金瓜石金铜矿床有关的硫化物样品 (黄铁

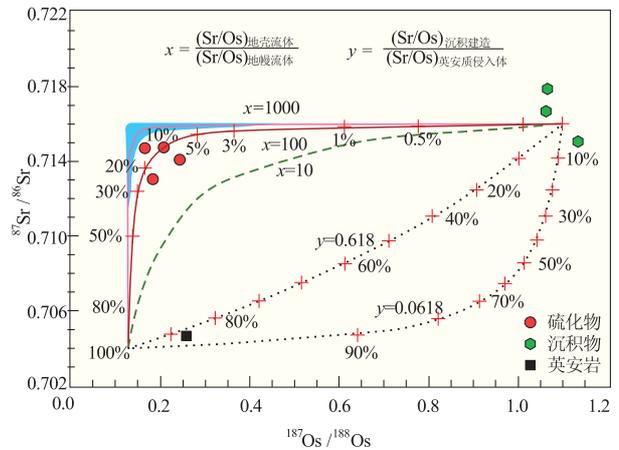


图 2 金瓜石金铜矿 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解 (引自 Shena 等, 2004)

Fig. 2 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ VS $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plot of the Chinkuashih Au-Cu deposits

下方两条虚线为原始英安岩 (Sr 浓度为 340×10^{-6} , Os 浓度分别为 1×10^{-12} 和 10×10^{-12}) 与沉积建造 (Sr 浓度为 210×10^{-6} , Os 浓度为 10×10^{-12}) 的混合曲线; 阴影区为沉积建造与地幔橄榄岩 (Sr 浓度为 $0.3 \sim 10 \times 10^{-6}$, Os 浓度为 $0.2 \sim 1 \times 10^{-9}$) 的混合区域; 折线为地壳流体与幔源岩浆流体的混合曲线; 地壳组分的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值以沉积建造的数据为标准, 而幔源岩浆流体的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值则设定为 0.13 和 0.704。岩浆流体中 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的波动对混合曲线的轨迹影响不大。

矿、闪锌矿、硫砷铜矿、块状硫砷铜矿) 以及 5 件与矿化相关的岩石样品 (4 件来自沉积地层, 1 件来自英安岩) 作了 Re-Os 同位素和 Sr 同位素分析, 并利用金瓜石硫化物的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值对岩浆流体中 Os 和 Sr 的含量进行了评价。文中 [63] 模型以受控于出露地表的沉积建造的河水中 Os, Sr 浓度代替地壳流体的 Os, Sr 浓度, 有限的数据显示金瓜石地区河流的 Os 浓度为 $0.026 \times 10^{-12} \sim 0.005 \times 10^{-12}$, 为了取得岩浆流体的最低 Os 浓度值, 选取 0.005×10^{-12} 作为地壳流体的 Os 浓度, 计算得到了岩浆流体 Os 浓度为 $\sim 0.65 \times 10^{-12}$ 。由于金瓜石硫化物的 Sr 浓度无法得到, 岩浆流体的 Sr 浓度无法用同样的方法计算, Shena 等 [63] 采用了一个替代方法, 即比较金瓜石硫化物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 图 (图 2) 中壳幔混合线, 混合线的轨迹受 2 个混合端元的 Sr/Os 丰度比控制。根据前面的模型, 地壳流体和岩浆流体的 Os 浓度分别为 0.005×10^{-12} 和 0.65×10^{-12} , 台湾河水的 Sr 浓度约为 100×10^{-9} , 那么地壳流体的 Sr/Os 为 2×10^7 。在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 图中, 要拟合成一条适于金瓜石硫化物

的混合曲线,另一端元(岩浆流体)的 Sr/Os 比值应为 $\sim 2 \times 10^5$ 。已知岩浆流体的 Os 浓度为 0.65×10^{-12} , Sr/Os 为 $\sim 2 \times 10^5$, 岩浆流体的 Sr 浓度则为 $\sim 130 \times 10^{-9}$, 这个浓度与英安质岩浆的 Sr 浓度 ($\sim 350 \times 10^{-6}$) 低了 3 个数量级。通过模型 Shena 等^[63] 得出了 2 个重要结论:其一,岩浆流体系化过程中, $D_{Os(\text{岩浆流体/岩浆})}/D_{Sr(\text{岩浆流体/岩浆})}$ 的比值约为 1 600, Os 比 Sr 更优先分离出岩浆流体;其二,与地壳流体相比,岩浆流体中富含 Os(相对于 Sr 元素来说), $(Os/Sr)_{\text{岩浆流体}}/(Os/Sr)_{\text{地壳流体}}$ 比值约为 100。岩浆流体中 Os 元素的富集可能也伴随有 PGE 元素以及 Au 元素的富集,这暗示了金瓜石金铜矿的 Au 可能来源于地幔。

5 结论

(1)随着实验仪器精度的不断提高和实验室条件的不断改善,Re-Os 同位素体系测试对象不再局限于辉钼矿和铜镍硫化物矿石,黄铁矿、黄铜矿、毒砂等硫化物也经常作为 Re-Os 同位素分析的对象,应用于矿床学的定年和示踪研究中。尤其是黄铁矿和毒砂,它们普遍存在于与金铜相关的矿化中,对黄铁矿和毒砂直接进行 Re-Os 法定年和成矿物质来源示踪有着很广阔的应用前景。

(2)对于大多数硫化物矿物和铜镍硫化物矿石含有的普通 Os,可以通过 Re-Os 等时线的初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值和 γ_{Os} 值来进行示踪成矿物质来源;不含 $Os_{\text{普}}$ 的辉钼矿可以通过 Re 含量来解释成矿物质来源。近年来,随着其他同位素体系在矿床学中的广泛应用,有学者已经将 Re-Os 同位素体系与其他同位素体系联用,来共同揭示成矿物质来源,以期获得更为真实合理的地质事实。

参考文献:

- [1] Walczyk T, Hebeda E H, Heumann K G. Osmium isotope ratio measurements by negative thermal ionization mass spectrometry (NTIMS)[J]. Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 1991, 341: 537-541.
- [2] Luck J M, Bircik J L, Allegre C J. ^{187}Re - ^{187}Os systematics in meteorites: Early chronology of the solar system and the age of the galaxy[J]. Nature, 1980, 283: 156-159.
- [3] 杜安道,何红蓼,殷万宁,等. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究[J]. 地质学报, 1994, 68(40): 339-347.
- [4] 黄典豪. 东秦岭地区钼矿床的铼-钨同位素年龄及其意义[J]. 矿床地质, 1994, 13(3): 221-230.
- [5] 吴福元,孙德有. Re-Os 同位素体系理论及其应用[J]. 地质科技情报, 1999, 18(3): 43-46.
- [6] 杜安道,屈文俊,李超,等. 铼-钨同位素定年方法及分析测试技术的进展[J]. 岩矿测试, 2009, 28(3): 288-304.
- [7] 毛景文,杨建民,屈文俊,等. 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[J]. 矿床地质, 2002, 21(4): 323-330.
- [8] Walker R J, Carlson R W, Shirey S B, et al. Os, Sr, Nd and Pb isotope systematics of southern African peridotite xenoliths: Implications for the chemical evolution of subcontinental mantle[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1989, 53: 1583-1595.
- [9] Walker R J, Morgan J W, Horan M F, et al. Re-Os isotopic evidence for an enriched-mantle source for the Noril'sk-type, ore-bearing intrusions, Siberia[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1994, 58: 4179-4197.
- [10] 蒋少涌,杨竞红,赵葵东,等. 金属矿床 Re-Os 同位素示踪与定年研究[J]. 南京大学学报:自然科学, 2000, 36(6): 669-677.
- [11] 杨梅珍,曾键年,覃永军,等. 大别山北缘千鹅冲斑岩型钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年代学及其地质意义 [J]. 地质科技情报, 2010, 29(5): 35-45
- [12] 毛景文,张作横,张招崇,等. 北祁连山小柳沟钨钼矿床 Re-Os 同位素测年及其意义[J]. 地质论评, 1999, 45(4): 412-417.
- [13] 毛景文, Holly Stein, 杜安道,等. 长江中下游地区铜金-钼矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示[J]. 地质学报, 2004, 78(1): 121-131.
- [14] 侯增谦,曲晓明,王淑贤,等. 西藏高原冈底斯斑岩铜矿带辉钼矿 Re-Os 年龄: 成矿作用时限与动力学背景应用 [J]. 中国科学: D 辑, 2003, 33: 609-618.
- [15] 郑有业,薛迎喜,程力军,等. 西藏驱龙超大型斑岩铜(钼)矿床:发现、特征及意义[J]. 地球科学, 2004, 29(1): 103-108.
- [16] 郑有业,张刚阳,许荣科,等. 西藏冈底斯朱诺斑岩铜矿床成岩成矿时代约束[J]. 科学通报, 2007, 52(21): 2542-2548.
- [17] 张刚阳,郑有业,龚福志,等. 西藏吉如斑岩铜矿:与陆陆碰撞过程相关的斑岩成岩成矿时代约束[J]. 岩石学报, 2008, 24(3): 473-479.
- [18] 应立娟,王登红,唐菊兴,等. 西藏甲玛铜多金属矿辉钼矿 Re-Os 定年及其成矿意义[J]. 地质学报, 2010, 84(8): 1165-1174.
- [19] 曾普胜,侯增谦,高永峰,等. 印度-亚洲碰撞带东段喜马拉雅期铜-钼-金矿床 Re-Os 年龄及成矿作用[J]. 地质论评, 2006, 52(1): 72-84.
- [20] 谢桂青,毛景文,李瑞玲,等. 鄂东南地区 Cu-Au-Mo(W)矿床的成矿时代及其成矿地球动力学背景探讨:辉钼矿 Re-Os 同位素年龄[J]. 矿床地质, 2006, 25(1): 43-52.
- [21] 毛景文,杜安道. 广西宝坛地区铜镍硫化物矿石 982 Ma Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 中国科学, 2001, 31(12): 992-998.

- [22] 王瑞廷,赫英,王东生,等. 略阳煎茶岭铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质评论, 2003, 49(2): 205-211.
- [23] 杨胜洪,陈江峰,屈文俊,等. 金川铜镍硫化物矿床的 Re-Os “年龄”及其意义[J]. 地球化学, 2007, 36(1): 27-36.
- [24] 韩春明,肖文交,赵国春,等. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素研究及其地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 103-170.
- [25] Foster J G, Lambert D D, Frick L R, et al. Re-Os isotopic evidence for genesis of Archean nickel ores from uncontaminated komatiites[J]. Nature, 1996, 382: 703-706.
- [26] Walker R J, Morgan J W, Naldrett A J, et al. Re-Os isotope systematics of Ni-Cu sulfide ores, Sudbury igneous complex, Ontario: evidence for a major crustal component[J]. Earth Planet Sci Lett, 1991, 105: 416-429.
- [27] Lambert D D, Foster J G, Frick L R, et al. Re-Os isotopic systematics of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co magmatic ore system, Labrador, Canada [J]. Lithos, 1999, 47: 69-88.
- [28] Beneteau S B, Richardson J M. Rhenium-Osmium isotope ratio determination by ICP-MS [J]. Atomic Spectroscopy, 1992, 13(4): 118-122.
- [29] 李月臣,赵国春,屈文俊,等. 新疆香山铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 245-251.
- [30] Shirey S B, Walker R J. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis [J]. Anal Chem, 1995, 67: 2136-2141.
- [31] 李华芹,陈富文. 中国新疆区域成矿作用年代学[M]. 北京: 地质出版社, 2004:1-390.
- [32] 敖贵武,刘智明,薛明轩,等. 黑龙江东安金矿床成矿机理[J]. 黄金地质, 2004, 10(1): 15-19.
- [33] 周燕,郑培玺,王铁夫,等. 招平断裂带上盘金矿床石英流体包裹体同位素组成特征及地质意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(9): 2274-2278.
- [34] 李光明,沈远超,刘铁兵,等. 新疆阿尔泰山缘托库孜巴依金矿成矿演化: 石英脉系、同位素地球化学及其 Ar-Ar 年代学证据[J]. 矿床地质, 2007, 26(1): 15-32.
- [35] 孙晓明,熊德信,石贵勇,等. 云南哀牢山金矿带大坪韧性剪切带型金矿⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年[J]. 地质学报, 2007, 81(1): 88-92.
- [36] 刘建明,沈洁,赵善仁,等. 金属矿床同位素精确定年的方法和意义[J]. 有色金属矿产与勘查, 1998, 7(2): 107-113.
- [37] 谢桂青,胡瑞忠. 金矿床测年方法的某些进展[J]. 地质地球化学, 2001, 29(1): 57-62.
- [38] Stein H J, Sundblack K, Markey R J, et al. Re-Os ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuttilla, Finland and Proterozoic molybdenite, Kabeliai, Lithuania: testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting[J]. Mineral Deposit, 1998, 33: 329-345.
- [39] 喻钢,杨刚,陈江峰,等. 辽东猫岭金矿中含金毒砂的 Re-Os 年龄及地质意义[J]. 科学通报, 2005, 50(12): 1248-1252.
- [40] 陈懋弘,毛景文,屈文俊,等. 贵州贞丰烂泥沟卡林型金矿床含砷黄铁矿 Re-Os 同位素测年及地质意义[J]. 地质评论, 2007, 53(5): 371-382.
- [41] Wang Jian Zhong, Li De Wei, Zhao Xin Fu, et al. Re-Os Dating of Pyrrhotite from the Chaoshan Gold Skarn, Eastern Yangtze Craton, Eastern China [J]. International Geology Review, 2008, 50: 392-406.
- [42] Melanie B W, Paul W L, Rainer J N. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of Zn-Pb-Ag mineralization in the northern Brooks Range, Alaska [J]. Economic Geology, 2004, 9: 1323-1343.
- [43] Page R W, Conor C H H, Stevens B P J, et al. Correlation of Olyary and Broken Hill Domains, Curnamona Province: Possible Relationship to Mount Isa and Other North Australian Pb-Zn-Ag-Bearing Successions [J]. Economic Geology, 2005, 100: 663-676.
- [44] 蒋映德,邱华宁,肖慧娟,等. 闪锌矿流体包裹体 Ar-Ar 定年研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(2): 198-199.
- [45] 张长青,李向辉,余金杰,等. 四川大梁子铅锌矿床单颗粒闪锌矿铷-锶测年及地质意义[J]. 地质评论, 2008, 54(4): 532-538.
- [46] 黄智龙,李文博,张振亮,等. 云南会泽超大型铅锌矿床成因研究中的几个问题[J]. 矿物学报, 2004, 24(2): 105-111.
- [47] Symons D T A, Arne D C. Paleomagnetic constraints on Zn-Pb ore genesis of the Pillara Mine, Lennard-Shelf, Western Australia [J]. Mineralium Deposita, 2005, 39: 944-959.
- [48] Leach D L, Sangster D F, Kelley K D, et al. Sediment-hosted lead-zinc deposits: A global perspective [C] // Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J, et al. Economic Geology 100th Anniversary Volume, 2005: 561-607.
- [49] 张伦尉,黄智龙,李晓彪,等. 铅锌矿床定年研究现状[J]. 矿物学报, 2007(增刊): 322-323.
- [50] 雷泽恒,陈富文,陈郑辉,等. 黄沙坪铅锌多金属矿成矿年龄测定及地质意义[J]. 地球学报, 2010, 31(4): 532-540.
- [51] Morelli R M, Creaser R A, Selby D, et al. Re-Os sulfide geochronology of the Red Dog sediment-hosted Zn-Pb-Ag deposit, Brooks Range, Alaska [J]. Economic Geology, 2004, 99: 1569-1576.
- [52] 薛春纪,陈毓川,王登红,等. 滇西北金顶和白秧坪矿床: 地质和 He, Ne, Xe 同位素组成及成矿时代[J]. 中国科学: D 辑, 2003, 33(4): 315-322.
- [53] 丰成友,张德全,屈文俊,等. 青海格尔木驼路沟喷流沉积型钴(金)矿床的黄铁矿 Re-Os 定年[J]. 地质学报, 2006, 80(4): 571-576.
- [54] 梁婷,王登红,屈文俊,等. 广西铜坑锡多金属矿黄铁矿的 Re-Os 同位素组成及成矿物质来源示踪[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(3): 230-235.
- [55] 刘玉龙,杨刚,陈江峰,等. 白云鄂博超大型稀土-铌-铁矿床黄铁矿 Re-Os 定年[J]. 科学通报, 2005, 50(2): 172-175.
- [56] Cardon O, Reisberg L, Anne-sylvie, et al. Re-Os systematics of pyrite from the Bolcana porphyry copper deposit, Apuseni Mountains, Romania [J]. Economic Geology, 2008, 103:

- 1695-1702.
- [57] Stein H J, Scherst' en A, Hannah J L, et al. Subgrainscale decoupling of Re and ^{187}Os and assessment of laser ablation ICP-MS spot dating in molybdenite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(19): 3673-3686.
- [58] Stein H J, Markey R J, Morgan J W, et al. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: how and why it works [J]. *Terra Nova*, 2001, 13(6): 479-486.
- [59] Yin Q Z, Jagoutz E, Vrkhovskiy A B, et al. $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ and $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ method of dating: An introduction[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57: 4119-4128.
- [60] 谢智, 陈江峰. Os-Os 法定年在金属矿床年代学中的应用 [J]. *地学前缘*, 2000, 7(2): 604-604.
- [61] Sproule R A, Lambert D D, Hoatson D M. Re-Os isotopic constraints on the genesis of the Sally Malay Ni-Cu-Co deposit, East Kimberley, Western Australia [J]. *Lithos*, 1999, 47: 89-106.
- [62] Frank J S, Brauns M M. Concordant ages for the giant Kipushi base metal deposit (DR Congo) from direct Rb-Sr and Re-Os dating of sulfides [J]. *Miner Deposita*, 2007, 42: 791-797.
- [63] Shena Jason Jiun-San, Yang H J. Sources and genesis of the Chinkuashih Au-Cu deposits in northern Taiwan: constraints from Os and Sr isotopic compositions of sulfides [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 222: 71-83.

Applications of the Re-Os isotope system to metal deposits

ZHANG Su-kun¹, ZHENG You-ye², SUN Xiang², GUO Jun-wei³

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Re-Os isotope system has become one of the most important age dating and tracing methods of metal deposits. The principle of Re-Os isotope system and the basic chemical properties of rhenium and Osmium are briefly sketched and new research results at home and abroad are systemically reviewed. Now Re-Os isotope analysis is not confined to date molybdenite and Cu-Ni sulfide ore and the analysis Re-Os isotope analysis of pyrite, arsenopyrite, pyrrhotite, pentlandite and sphalerite are often used to date gold deposits, lead-zinc deposits and Sedex cobalt (gold) deposits. Compared with primitive mantle, the crust rocks have higher $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$, γ_{Os} and Re/Os values, so the Re-Os isotopic compositions of sulfides or ores and the Os-Re/Os diagram can be used to trace the origins of ore-forming materials in porphyry deposits, gold deposits, lead-zinc deposits and Cu-Ni sulfide deposits while rhenium content of molybdenite could trace the ore-forming materials sources. Combined with other isotopic analysis ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ — $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) Re-Os isotope systems could discriminate the contribution of different end-member components in the ore-forming materials.

Key Words: Re-Os isotope system; metal deposits; ore-forming times; source of ore-forming material