

铼-钼同位素体系定年研究综述

覃 曼¹, 周瑶琪¹, 刘加召², 刘美晨²

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;

2. 山东省第八地质矿产勘查院, 山东 日照 276826)

摘要: 铼-钼(Re-Os)同位素体系以其特殊的地球化学性质为确定岩石的形成时间、演化过程及其地球动力学背景提供了重要参数。随着测试技术和超净化实验室的发展, Re-Os 同位素的应用领域不断扩大, 测试对象种类也随之扩展。然而, 不同测试对象的 Re-Os 同位素赋存形式、活动特征及其体系封闭性有所差异。文章总结了以辉钼矿、普通硫化物、地幔橄榄岩包体、富有机质沉积岩以及灰岩作为 Re-Os 同位素体系定年对象的基本原理和研究进展, 并对存在问题进行简要地评述, 最后对其未来的发展方向作了展望, 以期推动 Re-Os 同位素体系在地质科学中的研究和应用。

关键词: Re-Os 同位素; 放射性定年; 辉钼矿; 普通硫化物; 地幔橄榄岩包体

中图分类号: P597.3 **文献标识码:** A

0 引言

国内诸多学者曾对 Re-Os 同位素体系进行过综述, 但其切入点不同。如针对分析测试技术, 或地质应用的简要性概括、或示踪以及定年研究发展等^[1-3]。随着 Re-Os 同位素分析技术和实验室条件的发展, 其应用领域也愈加广泛。针对不同的测试对象, 其 Re、Os 同位素的赋存状态和体系的封闭性条件会有所差异。因此, 很有必要从 Re-Os 同位素体系定年不同测试对象的角度, 对定年的基本原理、研究现状以及解决具体地质问题时所需注意的事项和目前存在的问题进行总结。本文希望能起到抛砖引玉的作用, 从而推动我国 Re-Os 同位素体系在地质科学研究中的应用。

1 Re-Os 同位素体系定年研究

辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿等硫化物的 Re-Os 同

位素体系直接定年对成岩成矿作用研究具有重大意义。金属硫化物的 Re-Os 同位素不仅能对古老的金属矿床进行定年, 而且对十分年轻的金属矿床也可获得精确的成矿年龄^[4]。随着 Re-Os 同位素体系理论的不完善以及测试技术的不断发展, 高精度、低空白的 Re-Os 含量以及同位素分析成为可能^[2]。Re-Os 同位素体系在地幔橄榄岩、富有机质沉积岩以及灰岩等岩石样品的应用上也取得了较大的发展。

1.1 辉钼矿 Re-Os 同位素定年

辉钼矿中的 Re 含量较高, 基本不含初始 Os。由于 Re^{4+} 与 Mo^{4+} 的离子半径相近, ReS_2 和 MoS_2 都属于六方晶系, 故 Re 可以以类质同像的形式代替 Mo 的位置进入辉钼矿(MoS_2)的晶格中, 而 OsS_2 属于立方晶系, 很难进入辉钼矿中。再者矿床形成时矿液是还原性的, 如能把 Mo^{6+} 和 Mo^{7+} 还原到 Mo^{4+} 形成 MoS_2 , 就有可能把 Os^{4+} 还原到 +3 价或 0 价, 这样不仅会产生一个过大的阳离子不能适合辉钼矿阳离子的空间位置, 还会导致电荷不平衡^[2], 因此辉钼矿相对于 Os 尤其富集 Re。此外, 辉钼矿具有较好的 Re-Os 封闭性^[5], 且广泛存在于热液矿

收稿日期: 2016-07-04; 责任编辑: 王传泰

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号:41272123)资助。

作者简介: 覃曼(1990—), 女, 硕士研究生, 地球化学专业。通信地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号, 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院; 邮编: 266580; E-mail: qinman25@163.com

床中,所以辉钼矿一直是 Re-Os 同位素定年的最佳矿物^[5-6]。国内外辉钼矿 Re-Os 同位素体系应用于斑岩型、矽卡岩型及岩浆热液型钨、钼、铜金等矿床的定年上已经十分成熟^[7-9]。

Re-Os 同位素体系在辉钼矿中会发生失耦现象,即衰变成因的¹⁸⁷Os 在辉钼矿晶体中会发生微米级移动^[10],所以测试时最好取完整的辉钼矿颗粒并将其粉碎足够细且混合均匀^[11-12]。Re、Os 为亲铁亲硫元素,当辉钼矿中的 Os 发生移动时,很可能会进入与辉钼矿共生的其它硫化物中,这种微小的变化虽不会对辉钼矿 Re-Os 体系造成太大的影响,但会明显提高其它硫化物 Os 的含量,造成测年结果的不准确,因此建议不要采用辉钼矿周围与其密切共生的其它硫化物进行 Re-Os 测年^[13]。辉钼矿中的 Re 含量还与矿床矿石建造有关^[14-15],杨宗峰等^[15]汇总了近年来国内已发表的 744 个辉钼矿 Re-Os 同位素测年数据,发现辉钼矿与黄铜矿、黄铁矿和磁铁矿(或磁黄铁矿)共生在矽卡岩或碳酸岩中时,Re 含量高;辉钼矿与白钨矿(或黑钨矿、方铅矿、闪锌矿以及自然金、银)共生在长英质脉或花岗岩中时,Re 含量相对低。此外,Re 具有在地幔、地核中富集的趋势,幔源成因的矿床相对于壳源成因的矿床 Re 含量更高^[16]。其中,成矿物质来源为地幔物质、壳幔混合物、壳源物质时,其 Re 的含量(质量分数)分别集中在 10~1 000 $\mu\text{g/g}$ 、10 几到几十 $\mu\text{g/g}$ 、1~n $\mu\text{g/g}$ ^[17]。

尽管辉钼矿不利于 Os 进入矿物晶格内,但不能说明辉钼矿形成时完全不含钼^[10,18-19]。当热液中存在 Cl 和 F 时,可以形成 Os 的 Cl 和 F 络合物,从而造成 Os 的溶解度增大,迁移能力也增强^[20],在这种情况下,Os⁴⁺ 完全有可能直接替代 Mo⁴⁺ 进入辉钼矿中^[10]。因此,辉钼矿中普通 Os 问题值得进一步研究^[19,21],初始¹⁸⁷Os 的存在将对金属成矿物质来源的示踪产生较大的影响。作 Re-Os 等时线图时,存在¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os—¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 和¹⁸⁷Re/¹⁸⁷Os 两种图解;Stein 等^[22]认为¹⁸⁷Re/¹⁸⁷Os 图解具有较小的分析不确定性和较低的校正误差;Barra 等^[23]则通过 Re-Os 测年结果与其他放射性同位素体系测年结果对比,发现¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os—¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 等时线图获得的结果与其他方法获得的结果更为吻合。目前关于等时线图选择很难得到统一的标准。

1.2 普通硫化物 Re-Os 同位素定年

除辉钼矿之外,各种普通硫化物(如黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、毒砂等)的 Re-Os 同位素体系定年

也得到了广泛的应用。当 Re 含量比较低,¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os 值大于 5000 时,初始¹⁸⁷Os 含量相对于放射成因¹⁸⁷Os 可以忽略不计,可以通过¹⁸⁷Re/¹⁸⁷Os 值获得模式年龄。这类热液成因硫化物被称为低含量、高放射成因硫化物(Low-Level Highly Radiogenic Sulfides: LLHR),适合应用于 Re-Os 同位素体系定年研究^[22]。LLHR 的成因有两种,一种是由于成矿流体来源于具有高 Re 低 Os 特征的地壳,硫化物继承了成矿流体的特征^[23];一种可能是由于氧逸度的改变使得成矿流体中的 Os 以金属合金或共沉淀形式从流体中分离出来,从而形成高 Re 低 Os 的流体,沉淀出 LLHR^[24]。Re-Os 定年在各种普通硫化物的选择方面主要是依据 Re、Os 元素的亲铁亲铜性质,目前对于 Re、Os 在普通硫化物中的富集机制研究不够深入^[25]。

黄铁矿、黄铜矿 Re-Os 同位素体系已经广泛应用于各种热水成因矿床,包括 VMS 型、斑岩型、浅成低温热液型矿床以及沉积岩型 Cu-Au 矿床、造山型 Au 矿床、铁氧化物 Cu-Au 矿床等^[26-30]。黄铁矿、黄铜矿 Re-Os 同位素体系在绿片岩变质相条件下仍保持体系封闭^[22, 27-28]。Acken^[30]等获得了天山西部造山带 LT-HP 榴辉岩中黄铁矿的 Re-Os 年龄,结果显示老于其他同位素体系(Rr-Sr, Sm-Nd, Ar-Ar 等)所获得年龄,因此推断黄铁矿 Re-Os 同位素体系在榴辉岩变质相条件下保持封闭,有望作为获得原岩信息的有效手段。毒砂与金矿密切共生,是常见的载金矿物,因此毒砂 Re-Os 同位素也常应用于金矿的定年,并取得较好的效果^[31-32]。目前关于磁黄铁矿的报道相对较少^[33],因为磁黄铁矿封闭温度相对较低,大约为 400℃^[34]。对于岩浆型 Cu-Ni 硫化物矿床,可以不挑选其中的单矿物,而是对 Cu-Ni 硫化物矿石直接定年。普通硫化物 Re-Os 同位素体系定年结果还能为矿床成因提供依据,年龄值与赋矿地层年龄一致时,可为喷流沉积成因矿床提供证据^[35];年龄值与岩体的年龄一致时,可为矿床(特别是与基性-超基性岩有关 Cu-Ni 的矿床)与岩浆活动相关提供证据^[36-37]。

普通硫化物 Re-Os 同位素体系定年仍存在着较多的理论和技术问题。等时线存在着一定的误差,可能是样品本身 Os 的同位素比值异常低,或者是受到后期矿物交代溶蚀^[38]。因此除了需要谨慎地进行野外取样和单矿物挑选外,还必须对矿物进行深入的岩石学、岩相学以及地球化学分析研究,才能获得较好的等时线年龄。铜镍硫化物矿床采用岩

石样品直接定年,由于分配系数的影响,熔融过程中,Os 几乎不进入硅酸盐矿物中,而是富集在硫化物熔体中,导致 Os 同位素无法达到同位素交换平衡。所以铜镍硫化物矿床 Re-Os 定年时给出的等时线可能是混合等时线^[39]。另外,不同类型矿床的同种硫化物或者同一矿床中不同硫化物 Re-Os 同位素含量和封闭性有所差异,选择合适的硫化物是定年成功与否的关键。

1.3 地幔橄榄岩包体 Re-Os 同位素体系定年

Re-Os 同位素与其它亲石元素形成的同位素体系不同的是 Re、Os 均为亲铁、亲硫元素,且在岩浆作用过程中,Re 表现为中等不相容元素,Os 表现为相容元素^[40]。原始地幔由未发生过部分熔融分异的地幔橄榄岩组成,根据上地幔橄榄岩包体测得的 Re-Os 同位素组成推算出原始地幔¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 值约为 0.1296^[41]。Re-Os 同位素体系具有相对较高的封闭温度,且受到后期交代作用的影响较弱^[42],因此,常被用作确定岩石圈地幔时代的有力工具。从地球化学角度来说,地球在演化过程中,原始地幔发生部分熔融分异出壳幔物质的时间,即为岩石圈地幔的形成年代。Re-Os 同位素是目前国际上公认的岩石圈地幔定年的最可靠的方法^[42-43]。除了常用的等时线年龄和模式年龄外,岩石圈地幔定年通常还采用铼亏损模式年龄和代理等时线年龄^[44]。地幔橄榄岩中的硫化物是 Re-Os 的主要赋存载体^[45]。

国外对金伯利岩中的地幔橄榄岩捕虏体进行 Re-Os 同位素定年研究,取得了较大的进展^[46-48]。国内对地幔橄榄岩 Re-Os 研究相对较晚,且研究区主要为华北克拉通岩石圈地幔,显生宙以来华北克拉通岩石圈地幔的年龄对华北克拉通岩石圈演化研究有着重要意义^[49-50],Gao 等^[50]对辽宁复县地幔橄榄岩样品进行 Re-Os 同位素定年,首次获得了华北克拉通地区古生代岩石圈地幔的年代。Wu 等^[51]和 Zhang 等^[52]对辽宁复县及山东蒙阴金伯利岩所携带的橄榄岩包体 Re-Os 同位素定年结果也佐证了该结论。目前,我国西部地区地幔包体 Re-Os 同位素研究程度较低。黄行凯等^[53]对云南马关地区新生代玄武岩包体进行 Re-Os 同位素研究发现该地区岩石圈地幔形成时代早于新元古代。

Walker 等^[54]认为岩石圈地幔受富硫化物流体的交代作用时,导致 Re 的加入,从而影响 Os 的同位素比值。俯冲带释放出来的流体在一定的程度上会改变其上方岩石圈地幔的 Os 同位素组成^[55]。Re 的活动性问题是 Re 亏损年龄解释过程中的一个重

要问题,目前可以通过 S 含量分析、铂族元素(PGE)测定克服 Re 的活动性对 Os 同位素岩石圈地幔定年的影响^[42]。虽然地幔橄榄岩 Re-Os 同位素研究仍存在不少问题,特别是在解释同位素数据方面,但是研究过程中结合其它数据,如橄榄岩全岩的强亲铁元素数据,将为地幔橄榄岩 Re-Os 同位素定年数据的解释提供很好的依据^[45]。

1.4 富有机质沉积岩和石油 Re-Os 同位素定年

Re-Os 同位素不仅具有高亲铁性,它的另外一种特殊的地球化学性质——亲有机性,一直被地质学家视为富有机质沉积地层定年的依据。Cohen 等^[56]提出海相沉积环境下,相对于亲铁性,Re、Os 表现出更明显的亲有机性。富有机质沉积岩形成的过程中,海水中容易迁移的 $[\text{ReO}]^{4-}$ 和 $[\text{HOsO}]^{5-}$ 会被还原成较难溶解的组分随着有机质的沉淀被有机物吸附下来^[57]。沉积岩形成过程也是 Re-Os 同位素富集的过程,沉积岩的 Os 初始比值就是沉积时海水的 Os 同位素比值,Re-Os 同位素体系保持封闭的条件下,Re-Os 同位素等时线年龄即为沉积岩的形成年龄^[58]。此外,Re-Os 同位素体系还可以作为石油直接测年的工具^[59]。

国内外已有不少学者通过对富有机质沉积岩进行 Re-Os 同位素研究,从而获得精确的沉积地层年龄^[56,60-64]。地层界线的确定以大洋缺氧和生物灭绝事件为特征时,可以通过对界线发育的黑色页岩 Re-Os 同位素研究获得地层界线的年龄^[64]。前人研究表明黑色页岩 Re-Os 同位素体系经后期熟化作用,低绿片岩相变质作用以及与岩浆侵入有关的热解作用仍能保持体系封闭^[60-61,64]。

Re 和 Os 来源于海水是黑色页岩 Re-Os 同位素成功定年最基本的前提条件。如果是含有陆源碎屑物的边缘海黑色页岩,陆源碎屑物中的 Re 和 Os 将会对测年的结果产生影响^[65]。国际地层年代表中采用的年龄数据均来自锆石 U-Pb 同位素年龄,没有任何地层年龄数据采用 Re-Os 同位素年龄^[58]。因此亟需加强沉积岩地层 Re-Os 同位素年龄和锆石 U-Pb 同位素年龄的对比。Mahdoui 等^[66]在实验室条件下模拟了自然环境下石油与地层水接触的实验,结果表明 Re 和 Os 大量且快速地从水溶相进入有机相中,会使石油中 Re-Os 同位素体系年龄重置。Jia 等^[67]对该实验提出了质疑,认为该平行实验之间缺乏数据的重现性以及误用“回收速率”这一参数,且严重低估了低丰度 Re 和 Os 在水-油体系达到热力平衡的时间。地质学家亟需进行更为深入

成熟的研究来统一关于 Re-Os 同位素体系能否对石油矿床进行准确定年的重大分歧。

1.5 灰岩 Re-Os 同位素体系定年

国际上利用放射性同位素对灰岩的绝对年龄进行研究的报道鲜见。我国李超等^[68]首先将 Re-Os 同位素体系应用于灰岩定年研究。其对青海玉树地区二叠系九十道班组底部的灰岩 Re-Os 同位素体系定年进行探索性研究,获得了与灰岩中的生物化石年龄相吻合的沉积年龄,并推断 Re、Os 主要赋存于灰岩的有机质中。赵鸿等^[69]在李超等^[68]研究的基础上对浙江长兴煤山二叠-三叠纪“金钉子”地层剖面中的灰岩进行 Re-Os 定年研究发现,只有在还原条件下沉积的灰岩才可获得 Re-Os 同位素等时线年龄。因为 Re、Os 只有在还原环境下才能被灰岩中的有机质富集,而氧化环境下 Re 几乎不被富集,Os 只会被灰岩中的自生矿物部分吸附富集^[70]。Re-Os 同位素体系在灰岩中定年的成功应用为区域地层对比与划分提供了一种新的工具,具有很广泛的应用前景。

2 结语

(1)Re-Os 同位素体系一直是地球化学研究的热点,在地球科学研究中意义重大。目前存在着几个亟待解决的问题:Re-Os 同位素在矿物岩石中的赋存状态、活动特征以及封闭条件不够明确;Re-Os 等时线的解释以及影响等时线适用性、准确性的多方面因素有待深入研究;辉钼矿中可能含有较高的初始钼,初始¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 值能否示踪成矿物质来源值得研究;自然条件下 Re 和 Os 同位素能否从水溶相进入有机相使石油 Re-Os 同位素年龄发生重置存在意见分歧。

(2)将 Re-Os 同位素体系与常量微量元素特征以及其它常规同位素体系的应用结合起来,或者通过更深入地研究 Re-Os 同位素在矿物或岩石中的赋存状态和特征,寻找解决特定地质问题更有效的测年对象以及如何将其应用于新领域的研究,将是今后发展的主要方向。另外,我国首先将 Re-Os 同位素体系应用于灰岩定年,为沉积地层定年的提供一种有效方法,在地层年代学领域具有极大的潜力。可以预见,随着 Re-Os 同位素体系理论基础和测试技术的日趋成熟以及更高标准的超净化实验室的建立,Re-Os 同位素地球化学将取得长足的发展。

参考文献:

- [1] 蒋少涌. 铼-钼同位素地球化学进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000(4): 421-422.
- [2] 杜安道, 屈文俊, 李超, 等. 铼-钼同位素定年方法及分析测试技术的进展[J]. 岩矿测试, 2009(3): 288-304.
- [3] 靳新娣, 李文君, 吴华英, 等. Re-Os 同位素定年方法进展及 ICP-MS 精确定年测试关键技术[J]. 岩石学报, 2010(5): 1617-1624.
- [4] 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: 自然科学版, 2000(6): 669-677.
- [5] 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.
- [6] Stein H J, Markey R J, Morgan J W, et al. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt, Shaanxi Province, China [J]. Economic Geology, 1997, 92(7-8): 827-835.
- [7] Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, et al. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(18): 4607-4626.
- [8] Ootes L, Goff S, Jackson V A, et al. Timing and thermochemical constraints on multi-element mineralisation at the Nori/RA Cu-Mo-U prospect, Great Bear magmatic zone, Northwest Territories, Canada [J]. Mineralium Deposita, 2010, 45(6): 549-566.
- [9] Wang J, Nie F J, Zhang X, et al. Molybdenite Re-Os, zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotopic analysis of the Xiaerchulu Au deposit, Inner Mongolia Province, China [J]. Lithos, 2016, 261: 356-372.
- [10] Stein H, Scherstén A, Hannah J, et al. Subgrain-scale decoupling of Re and ¹⁸⁷Os and assessment of laser ablation ICP-MS spot dating in molybdenite [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, 67(19): 3673-3686.
- [11] 杜安道, 屈文俊, 王登红, 等. 辉钼矿亚晶粒范围内 Re 和 ¹⁸⁷Os 的失耦现象[J]. 矿床地质, 2007(5): 572-580.
- [12] 李超, 屈文俊, 杜安道. 大颗粒辉钼矿 Re-Os 同位素失耦现象及 ¹⁸⁷Os 迁移模式研究[J]. 矿床地质, 2009(5): 707-712.
- [13] 李晶, 孙亚莉, 何克, 等. 辉钼矿 Re-Os 同位素定年方法的改进与应用[J]. 岩石学报, 2010(2): 642-648.
- [14] 李逸群, 颜晓钟. 中国南岭及邻区钨矿床矿物学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 181-186, 368-370.
- [15] 杨宗锋, 罗照华, 卢欣祥, 等. 关于辉钼矿中 Re 含量示踪来源的讨论[J]. 矿床地质, 2011(4): 654-674.
- [16] Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H, et al. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(11): 1815-1818.

- [17] 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(8): 1165 - 1174.
- [18] Takahashi Y, Uruga T, Suzuki K, et al. An atomic level study of rhenium and radiogenic osmium in molybdenite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71 (21): 5180 - 5190.
- [19] 李超, 屈文俊, 杜安道, 等. 含有普通钼的辉钼矿 Re-Os 同位素定年研究[J]. 岩石学报, 2012(2): 702 - 708.
- [20] Xiong Y, Wood S A. Experimental determination of the solubility of ReO_2 and the dominant oxidation state of rhenium in hydrothermal solutions [J]. *Chemical Geology*, 1999, 158 (3): 245 - 256.
- [21] 王瑞廷, 毛景文, 赫英, 等. Re-Os 同位素体系在矿床地球化学中的应用[J]. 地质与勘探, 2005(1): 80 - 84.
- [22] Stein H J, Morgan J W, Scherstén A. Re-Os dating of low-level highly radiogenic (LLHR) sulfides: The Harnäs gold deposit, southwest Sweden, records continental-scale tectonic events [J]. *Economic Geology*, 2000, 95 (8): 1657 - 1671.
- [23] Barra F, Ruiz J, Mathur R, et al. A Re-Os study of sulfide minerals from the Bagdad porphyry Cu-Mo deposit, northern Arizona, USA [J]. *Mineralium Deposita*, 2003, 38(5): 585 - 596.
- [24] 李超, 裴浩翔, 王登红, 等. 山东孔辛头铜钼矿成矿时代及物质来源: 来自黄铜矿、辉钼矿 Re-Os 同位素证据[J]. 地质学报, 2016(2): 240 - 249.
- [25] 黄小文, 漆亮, 刘莹莹. 磁铁矿 Re-Os 定年的可行性探讨[J]. 矿床地质, 2010(S1): 825 - 826.
- [26] Arne D C, Bierlin F P, Morgan J W, et al. Re-Os dating of sulfides associated with gold mineralization in central Victoria, Australia [J]. *Economic Geology*, 2001, 96(6): 1455 - 1459.
- [27] Selby D, Kelley K D, Hitzman M W, et al. Re-Os sulfide (bornite, chalcopryrite, and pyrite) systematics of the carbonate-hosted copper deposits at Ruby Creek, southern Brooks Range, Alaska [J]. *Economic Geology*, 2009, 104(3): 437 - 444.
- [28] Zhu Z M, S Y L. Direct Re-Os dating of chalcopryrite from the Lala IOCG deposit in the Kangdian Copper Belt, China [J]. *Economic Geology*, 2013, 108(4): 871 - 882.
- [29] Hnatyshin D, Creaser R A, Wilkinson J J, et al. Re-Os dating of pyrite confirms an early diagenetic onset and extended duration of mineralization in the Irish Zn-Pb ore field [J]. *Geology*, 2015, 43(2): 143 - 146.
- [30] Acken D, Su W, Gao J, et al. Preservation of Re-Os isotope signatures in pyrite throughout low-T, high-P eclogite facies metamorphism [J]. *Terra Nova*, 2014, 26(5): 402 - 407.
- [31] Morelli R, Creaser R A, Seltmann R, et al. Age and source constraints for the giant Muruntau gold deposit, Uzbekistan, from coupled Re-Os-He isotopes in arsenopyrite [J]. *Geology*, 2007, 35(9): 795 - 798.
- [32] Chen M, Mao J, Li C, et al. Re-Os isochron ages for arsenopyrite from Carlin-like gold deposits in the Yunnan-Guizhou-Guangxi "golden triangle", southwestern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 64: 316 - 327.
- [33] 黄小文, 漆亮, 王怡昌, 等. 东天山沙泉子铜铁矿床磁铁矿 Re-Os 定年初探[J]. 中国科学: 地球科学, 2014(4): 605 - 616.
- [34] Yang S H, Qu W J, Tian Y L, et al. Origin of the inconsistent apparent Re-Os ages of the Jinchuan Ni-Cu sulfide ore deposit, China: Post-segregation diffusion of Os [J]. *Chemical Geology*, 2008, 247(3): 401 - 418.
- [35] 郭维民, 陆建军, 蒋少涌, 等. 安徽铜陵新桥矿床下盘矿化中黄铁矿 Re-Os 同位素定年: 海底喷流沉积成矿的年代学证据[J]. 科学通报, 2011, 36: 3023 - 3028.
- [36] Mao J W, Yang J M, Qu W J, et al. Re-Os Age of Cu-Ni Ores from the Huangshandong Cu-Ni Sulfide Deposit in the East Tianshan Mountains and Its Implication for Geodynamic Processes [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2003, 77(2): 220 - 226.
- [37] Han C M, Xiao W J, Zhao G C, et al. In-situ U-Pb, Hf and Re-Os isotopic analyses of the Xiangshan Ni-Cu-Co deposit in Eastern Tianshan (Xinjiang), Central Asia Orogenic Belt: constraints on the timing and genesis of the mineralization [J]. *Lithos*, 2010, 120(3): 547 - 562.
- [38] 唐永永, 毕献武, 武丽艳, 等. 金顶铅锌矿黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 矿物学报, 2013(3): 287 - 294.
- [39] 袁超. Re-Os 同位素不平衡现象及其对定年和示踪影响研究新进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015(5): 946.
- [40] Shirey S B, Walker R J. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1998, 26(1): 423 - 500.
- [41] Meisel T, Walker R J, Irving A J, et al. Osmium isotopic compositions of mantle xenoliths: a global perspective [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(8): 1311 - 1323.
- [42] 吴福元, 杨进辉, 储著银, 等. 大陆岩石圈地幔定年[J]. 地学前缘, 2007(2): 76 - 86.
- [43] Rudnick R L, Walker R J. Interpreting ages from Re-Os isotopes in peridotites [J]. *Lithos*, 2009, 112: 1083 - 1095.
- [44] 支霞臣, L Reisberg, 彭子成, 等. 扬子克拉通东北缘岩石圈地幔的 Re-Os 同位素地球化学: 大陆岩石圈地幔的形成和演化的制约[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001(4): 248 - 250.
- [45] 刘传周. Re-Os 同位素研究进展与大陆岩石圈地幔定年 [C]//中国矿物岩石地球化学学会. 中国矿物岩石地球化学学会第14届学术年会论文摘要专辑, 2013: 2.
- [46] Pearson D G, Carlson R W, Shirey S B, et al. Stabilisation of Archaean lithospheric mantle: A Re-Os isotope study of peridotite xenoliths from the Kaapvaalcraton [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 134(3): 341 - 357.
- [47] Irvine G J, Pearson D G, Kjarsgaard B A, et al. A Re-Os isotope and PGE study of kimberlite-derived peridotite xenoliths from Somerset Island and a comparison to the Slave and

- Kaapvaalcratons [J]. *Lithos*, 2003, 71(2): 461–488.
- [48] Ionov D A, Carlson R W, Doucet L S, et al. The age and history of the lithospheric mantle of the Siberian craton: Re-Os and PGE study of peridotite xenoliths from the Obnazhenayakimberlite [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 428: 108–119.
- [49] 周新华, 张宏福, 郑建平, 等. 新世纪十年地幔地球化学研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2013(4): 379–391.
- [50] Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, et al. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 198(3): 307–322.
- [51] Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, et al. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(19): 5013–5034.
- [52] Zhang H F, Goldstein S L, Zhou X H, et al. Evolution of subcontinental lithospheric mantle beneath eastern China: Re-Os isotopic evidence from mantle xenoliths in Paleozoic kimberlites and Mesozoic basalts [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2008, 155(3): 271–293.
- [53] 黄行凯, 莫宣学, 喻学惠, 等. 云南马关地区岩石圈地幔组成和年龄: 地幔橄榄岩包体的 Re-Os 同位素限制[J]. *岩石学报*, 2011(9): 2646–2654.
- [54] Walker R J, Prichard H M, Ishiwatari A, et al. The osmium isotopic composition of convecting upper mantle deduced from ophiolite chromites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(2): 329–345.
- [55] Widom E, Kepezhinskas P, Defant M. The nature of metasomatism in the sub-arc mantle wedge: evidence from Re-Os isotopes in Kamchatka peridotite xenoliths [J]. *Chemical Geology*, 2003, 196(1): 283–306.
- [56] Cohen A S, Coe A L, Bartlett J M, et al. Precise Re-Os ages of organic-rich mudrocks and the Os isotope composition of Jurassic seawater [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 167(3): 159–173.
- [57] Yamashita Y, Takahashi Y, Haba H, et al. Comparison of reductive accumulation of Re and Os in seawater-sediment systems [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(14): 3458–3475.
- [58] 李超, 屈文俊, 王登红, 等. Re-Os 同位素在沉积地层精确定年及古环境反演中的应用进展[J]. *地球学报*, 2014(4): 405–414.
- [59] Selby D, Creaser R A. Direct radiometric dating of hydrocarbon deposits using rhenium-osmium isotopes [J]. *Science*, 2005, 308(5726): 1293–1295.
- [60] Creaser R A, Sannigrahi P, Chacko T, et al. Further evaluation of the Re-Os geochronometer in organic-rich sedimentary rocks: A test of hydrocarbon maturation effects in the Exshaw Formation, Western Canada Sedimentary Basin [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(19): 3441–3452.
- [61] Kendall B S, Creaser R A, Ross G M, et al. Constraints on the timing of Marinoan “Snowball Earth” glaciation by ^{187}Re - ^{187}Os dating of a Neoproterozoic, post-glacial black shale in Western Canada [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 222(3): 729–740.
- [62] Selby D, Creaser R A. Direct radiometric dating of the Devonian-Mississippian time-scale boundary using the Re-Os black shale geochronometer [J]. *Geology*, 2005, 33(7): 545–548.
- [63] Jiang S Y, Yang J H, Ling H F, et al. Extreme enrichment of polymetallic Ni-Mo-PGE-Au in Lower Cambrian black shales of South China: an Os isotope and PGE geochemical investigation [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 254(1): 217–228.
- [64] Rooney A D, Selby D, Houzay J P, et al. Re-Os geochronology of a Mesoproterozoic sedimentary succession, Taoudeni basin, Mauritania: implications for basin-wide correlations and Re-Os organic-rich sediments systematics [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 289(3): 486–496.
- [65] 杨竞红, 蒋少涌, 凌洪飞, 等. 黑色页岩与大洋缺氧事件的 Re-Os 同位素示踪与定年研究[J]. *地学前缘*, 2005(2): 143–150.
- [66] Mahdoui F, Michels R, Reisberg L, et al. Behavior of Re and Os during contact between an aqueous solution and oil: consequences for the application of the Re-Os geochronometer to petroleum [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, 158: 1–21.
- [67] Wu J, Li Z, Wang X. Comment on “Behavior of Re and Os during contact between an aqueous solution and oil: Consequences for the application of the Re-Os geochronometer to petroleum” [Geochim. Cosmochim. Acta 158 (2015) 1–21] [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 186: 344–347.
- [68] 李超, 屈文俊, 王登红, 等. 石灰岩铼-钌同位素分析方法研究及应用初探[J]. *岩矿测试*, 2011(3): 259–264.
- [69] 赵鸿, 李超, 江小均, 等. Re-Os 同位素精确厘定长兴“金钉子”灰岩沉积年龄[J]. *科学通报*, 2015, 23: 2209–2215.
- [70] 赵鸿, 李超, 江小均, 等. 浙江长兴“金钉子”灰岩 Re-Os 富集机制研究[J]. *地质学报*, 2015(10): 1783–1791.

Review of Re-Os geochronology

QIN Man¹, ZHOU Yaoqi¹, LIU Jiazhao², LIU Meichen²

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China;

2. The 8th institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong province, Rizhao 276826, Shandong, China)

Abstract: The Re-Os isotopic system can provide unique insight in dating and evolution of rocks and parameters of regional geodynamic background as they are highly siderophile compared to other long-lived radiogenic isotopic systems. With the advances in both chemical separation procedures and chemical clean room, the Re-Os isotopic system is applied to a wider field. However, study suggests that occurrence, active characteristics and closure temperature of Re-Os system are varied. In this paper are summed up the principles of the Re-Os dating, progress recently made and the problems remained on basis of its application to molybdenite, sulfides, mantle-derived peridotitic inclusions, organic-rich sedimentary rocks and limestone. Then is put forward the development direction.

Key Words: Re-Os isotopic system; dating; molybdenite; sulfides; mantle-derived peridotitic inclusion