

内蒙古中东部油房西 Pb-Zn-Ag 多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及地质意义*

蒋 喆¹, 聂凤军^{1*}, 刘翼飞¹, 曹 毅², 王丰翔¹, 张伟波³

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 五矿勘查开发有限公司, 北京 100010;

3 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037)

摘 要 油房西 Pb-Zn-Ag 多金属矿床为近年来在兴蒙造山带内发现的中型脉状矿床, 伴生 Cu 和 Mo。该矿床主要产出于潜火山机构外侧的断裂系统内, 与潜火山活动有明显的空间关系。成矿作用可以划分为 3 个阶段, 即: 早期钼矿化阶段; 主成矿期铅、锌和银矿化阶段, 伴生铜; 晚期碳酸盐化阶段。早期钼矿化阶段, 细脉浸染状钼矿化主要产出于潜火山相的花岗斑岩内, 矿化较弱, 伴随轻微的钾化和强烈的硅化和黄铁矿化, 后期叠加了强烈的泥化; 主成矿阶段, 主要形成脉状闪锌矿、方铅矿、黄铁矿以及次要的黄铜矿化, 以脉状充填产出于围岩裂隙内, 围岩蚀变主要为硅化, 局部有强烈的萤石化; 晚期碳酸盐化阶段, 主要发生绿泥石化和碳酸盐化。为进一步查明油房西矿化区成矿作用发生的时间, 文章对矿床早期钼矿化阶段形成的辉钼矿开展了 Re-Os 同位素分析, 4 件样品分析结果获得的模式年龄加权平均值为 (138.4 ± 1.2) Ma, MSWD 值为 0.63, 等时线年龄为 (136.4 ± 4.9) Ma。结果表明油房西地区 Pb-Zn-Ag 多金属矿床形成时间为早白垩世, 属燕山期构造-岩浆活动的产物。

关键词 地球化学; Re-Os 同位素年龄; Pb-Zn-Ag 多金属矿床; 潜火山成矿作用; 油房西; 内蒙古

中图分类号: P618.42; P618.43; P618.52

文献标志码: A

Re-Os isotopic dating of molybdenite separates from Youfangxi Pb-Zn-Ag polymetallic deposit, Inner Mongolia

JIANG Zhe¹, NIE FengJun¹, LIU YiFei¹, CAO Yi², WANG FengXiang¹ and ZHANG WeiBo³

(1 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Minmetals Exploration and Development Co., Ltd., Beijing 100010, China; 3 Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract

Located in the eastern segment of the CAOB, the Youfangxi deposit in the mid-east Inner Mongolia is a newly found medium-sized Pb-Zn-Ag polymetallic deposit. The orebodies mainly occur in the fracture system outside the subvolcanic edifice, and are closely related to the subvolcanic activity. The mineralization process can be divided into three stages: the early stage of molybdenum mineralization; the main mineralization stage of the lead, zinc and silver; and the late carbonate stage. The weak mineralization of veinlet-disseminated molybdenites at the early stage is mainly located within granite porphyry of subvolcanic facies and is associated with weak potassium alteration and strong silicification and pyritization. The main metallogenic stage is composed of vein-like chalcopyrite, sphalerite, galena and pyrite, and the alteration of the wall rock is mainly silicification with

* 本文受国家“973”重点基础研究发展计划(编号: 2013CB429805)资助

第一作者简介 蒋 喆, 男, 1991 年生, 硕士研究生, 构造地质学专业。Email: jiangzhejz2014@163.com

** 通讯作者 聂凤军, 男, 1956 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事金属矿床和地球化学研究。Email: nfjj@cei.gov.cn

收稿日期 2014-10-23; 改回日期 2015-12-24。苏 杭编辑。

minor intense fluoritization. The late stage consists of chloritization and carbonatization. Four molybdenite separates from the main orebody yielded a Re-Os weighted mean model age of (138.4 ± 1.2) Ma and an isochron age of (136.4 ± 4.9) Ma. These data indicate that the mineralization at the Youfangxi Pb-Zn-Ag deposit was associated with the Early Cretaceous intraplate granitoid magmatism.

Key words: geochemistry, Re-Os isotopic age, Pb-Zn-Ag polymetallic deposit, volcanic metallogeny, Youfangxi, Inner Mongolia

油房西矿床位于内蒙古自治区克什克腾旗经棚镇东南方 80 km 处,为兴蒙造山带内新发现的一处中型 Pb-Zn-Ag 多金属矿床,地处黄岗梁-甘珠尔庙 Pb-Zn-Cu-Sn 多金属成矿带与西拉沐伦钼矿化带的结合部位(赵一鸣等,1994;聂凤军等,2007a)。黄岗梁-甘珠尔庙 Pb-Zn-Cu-Sn 多金属成矿带位于兴蒙造山带大兴安岭南段,该区域古生代期间为华北板块北缘的俯冲增生带,在晚古生代期间经历了西伯利亚板块与华北板块的碰撞造山活动及其后的碰撞后伸展作用(赵一鸣等,1994)。目前,该区已发现 Pb、Zn、Cu、Sn 矿床近 200 处,从东部的孟恩陶勒盖(Ag-Pb-Zn,大型)、长春岭(Ag-Pb-Zn,中型)、布敦化(Cu-Ag,大型);向西南至甘珠尔庙附近浩布高(Cu-Pb-Zn,大型)、白音诺尔(Pb-Zn-Ag-Cu,大型)、黄岗梁(Sn-Fe-Zn,大型)、大井(Sn-Cu-Pb-Zn-Ag,大型)等一系列星罗棋布的矿床组成了一个长约 250 km,宽 50 km 的多金属成矿带(赵一鸣等,1994;白大明等,1996;周振华等,2010)。西拉沐伦钼矿带为近年来地质工作者发现的沿西拉沐伦河两侧分布的长 400 km、宽 300 km 的钼成矿带,其中分布有为数众多的大中型钼矿床,具有极大的钼成矿和找矿潜力(吕增尧,2012;覃锋等,2009;沈存利等,2010;曾庆栋等,2009)。

油房西矿床及外围的区域地质调查和找矿勘查工作始于 20 世纪 70 年代初期,80 年代初期华北地勘局通过 1:5 万分散流扫面发现了该矿床。2006 年华北地勘局综合勘查院在本区采用时间域中梯激发极化法(TDIP)与可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)相结合的方法进行了地球物理勘查,圈定地球物理异常区 7 个(冯晓君,2012;刘振山,2003),在物化探异常较高的区域内的勘查结果显示,油房西为一处与潜火山活动有密切时空联系的多金属成矿系统。

迄今为止,该矿床所提交的 Pb、Zn、Ag、Cu 和 Mo 的矿石量共计 940 万 t,其中 Pb-Zn-Ag 类矿石量总计 850 万 t,Pb 金属量 5 万 t,平均品位 0.59%;Zn

金属量 14 万 t,平均品位 1.6%,Ag 金属量 470 t,平均品位 60 g/t。Cu-Mo 矿石类矿石量 90 万 t,Cu 金属量 4000 t,平均品位 0.57%;Mo 金属量 260 t,平均品位 0.12%。

尽管地质工作者对油房西矿区地质特征、构造背景和形成机制等方面进行了初步研究(卢贺等,2010;吕增尧等,2004;吕增尧,2012;王国政等,2012),但是该矿床准确的成矿时间、成矿背景等尚不明。本文在前人工作基础上,初步总结油房西银多金属矿床的地质特征,选取代表性辉钼矿样品进行了 Re-Os 同位素测年,旨在精确厘定矿床的成矿年龄,并且对其形成机理及地球动力学条件进行探讨。

1 区域地质背景

矿区地处华北克拉通北缘温都尔庙-翁牛特旗早古生代构造-岩浆岩带东段,为华北克拉通与西伯利亚板块的碰撞对接带-西拉沐伦河深大断裂带与大兴安岭主脊-林西深大断裂的交汇部位,北距西拉沐伦河断裂带约 60 km(图 1)。

区域范围内出露的地层主要为古元古界、古生界和中新生代地层,古元古界宝音图群为区域上年代最老的地层,主要由变基性火山岩组成。古生界地层分布广泛(包括沿西拉沐伦河断裂带分布的二叠系浅变质火山碎屑沉积岩-中酸性火山岩系和沿少郎河断裂带分布的奥陶纪—志留纪—石炭纪浅变质碎屑岩-碳酸盐岩-火山岩系),中新生代陆相火山岩盖层在西拉沐伦河、少郎河断裂之间构成火山盆地。

区域性断裂构造发育,前中生代近 EW 向、NE 向构造和燕山期 NE 向、NW 向构造奠定了该区构造的基本格局。东西向展布的西拉沐伦深大断裂和南部的少郎河深断裂组成了该区的基底断裂构造,对区内矿产的分布有着明显的控制作用(图 1)。除断裂构造外,区域火山构造发育,沿二把伙-油房断裂发育一个裂隙-中心式火山喷发岩带,主要由二把

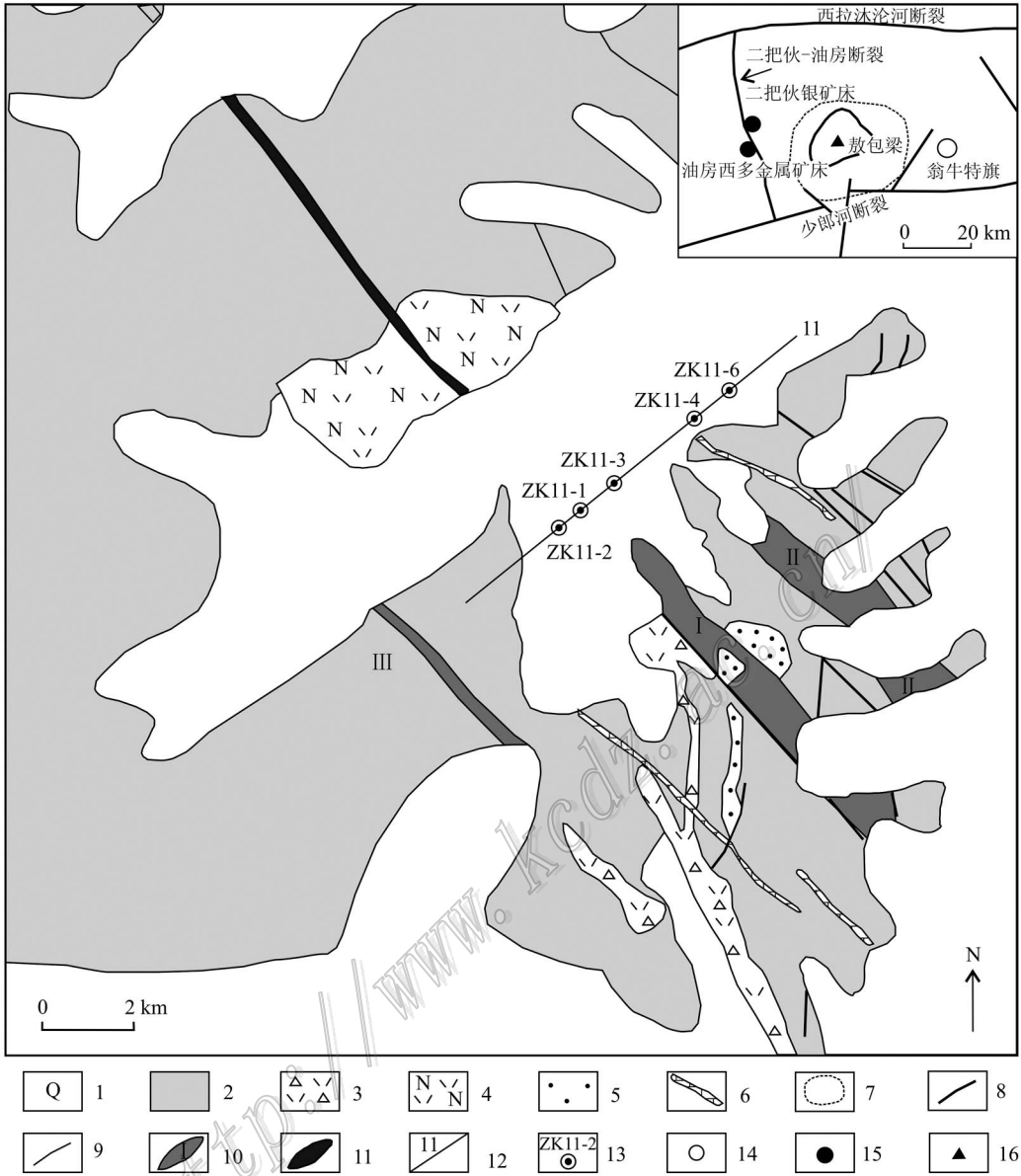


图 1 内蒙古克什克腾旗油房西银多金属矿床地质略图(据吕增尧,2012 和卢贺等,2010 修改)

1—第四系; 2—上侏罗统流纹岩; 3—流纹质角砾熔岩、凝灰岩; 4—钠闪石流纹岩; 5—流纹斑岩; 6—闪长玢岩; 7—破火山机构; 8—断裂; 9—地质界线; 10—矿化蚀变带及其编号; 11—矿(化)体; 12—勘探线及编号; 13—见钼矿化钻孔及其编号; 14—城市; 15—矿床; 16—山峰

Fig. 1 Simplified geological map of the Youfangxi silver polymetallic deposit, Hexigten Banner, Inner Mongolia (modified after Lü,2012 and Lu et al. , 2010)

1—Quaternary; 2—Upper Jurassic rhyolite; 3—Rhyolitic breccia lava, tuff; 4—Sodium amphibole rhyolite; 5—Rhyolite porphyry; 6—Diorite porphyry; 7—Caldera; 8—Fault; 9—Geological boundary; 10—Mineralization and alteration zone and its serial number; 11—Orebody; 12—Exploration line and its serial number; 13—Ore-intersecting drill hole and its serial number; 14—City; 15—Ore deposit; 16—Mountain peak;

伙复式火山、大座子山破火山等 7 个火山机构组成(吕增尧等,2004; 王国政等,2012)。

区域范围内燕山期火成岩分布广泛,该时期大规模的侵入活动形成了大量以中酸性钙碱性系列为

主的各种侵入岩,并与该区多金属矿床成矿关系最为密切(刘建明等,2004)。近期研究成果表明(曾庆栋等,2009; 褚少雄等,2010),研究区同时存在与成矿作用相关的印支期构造-岩浆活动。在所有的

中酸性侵入岩中,花岗岩、花岗斑岩与本区 Pb-Zn-Ag-Mo 多金属矿床的成矿关系密切。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质

2.1.1 地层

区内地层简单,包括上侏罗统满克头鄂博组酸性火山岩和第四系松散堆积物。满克头鄂博组主要岩石类型包括酸性熔岩、少量火山碎屑岩和中酸性熔岩,按岩石颜色和结构、构造大致可划分为气孔-杏仁状流纹岩、深灰色多斑流纹岩、紫红色-黄褐色少斑流纹岩、青灰色少斑流纹岩等及少量流纹质凝灰岩、流纹质火山角砾岩,其中紫红色-黄褐色少斑流纹岩遍布全区,是矿区最主要的岩石类型,该组地层厚度大于 500 m。在矿区深部有英安质角砾熔岩和粗面岩产出(王国政等,2012)。第四系沉积物出露面积约占矿区面积的一半,主要由洪积、坡积、残积岩块和砂、砾组成,分布于地势低洼处及沟谷、坡麓地带(图 1)。

2.1.2 构造

区内构造发育,多以断裂破碎带的形式产出,目前已圈定不同规模断裂破碎带共 30 余条,由 NE 向、NW 向和 NNW 至近 SN 向三种断裂构成菱形网格状断裂系统,与区域断裂系统一致。其中 NW 向断裂是区内最发育、亦是最重要的一组断裂,不仅其数量多,而且规模相对较大,是本区主要容矿构造。这些断裂(带)大致相互平行,走向 300~330°,主要倾向 SW,局部倾向 NE,倾角 60°至近直立。而部分 NE 向断裂切穿 NW 向断裂,对矿体有一定的破坏作用,局部可错断矿体,已知最大错距约 15 m(卢贺等;2010;吕增尧,2012)。

2.1.3 岩浆岩

区内及其附近无深成侵入体出露,仅见小规模超浅成侵入岩和少量脉岩。地表出露的超浅成侵入岩主要有流纹斑岩和钠闪石流纹岩,均呈小岩株状产出;在矿区中北部大范围覆盖区内的钻孔中还见到花岗斑岩、霏细斑岩、安山(玢)岩等。

2.2 矿体特征

矿区目前控制的 Pb、Zn、Ag、Cu 和 Mo 矿化范围长 4000 m,宽 300~1300 m,面积约 2.2 km²(冯晓君,2012)。可分为 I、II、III 三个矿化带(图 1),共圈定矿体 51 条(不包括低品位矿体)。单矿体长一般

数十米至数百米,厚数十厘米至数米,形态主要为脉状,少数为扁豆状、透镜状。矿体总体产状与破碎蚀变带一致,主要倾向南西,局部倾向北东,倾角 60~90°,控制矿体延深几十米至几百米。其中以 I 矿带中矿化最为集中,其资源储量占全区的 90% 以上,该矿带不仅矿体数量多,而且部分矿体规模较大,连续性较好,Ag、Pb、Zn 品位较高。矿带长 4000 m,宽 20~120 m,其中矿体呈单脉状或平行脉状产出,已圈出工业 Pb、Zn、Ag 矿体 14 条,单独的工业铜(钼)矿体数条。钼矿化主要出现于矿区中部 1 线~23 线间,该范围内共施工 26 个钻孔,其中 20 个钻孔见到了不同程度的钼矿化体或钼矿体,并最终圈出 12 层具有工业价值的钼矿(化)体,累计穿矿厚度 22.90 m,平均钼品位 0.116%。矿化与硅化、绢云母化、绿泥石化等热液蚀变关系密切,尤其是绢英岩(或黄铁绢英岩)是脉状矿体的主要围岩。成矿带内从浅至深,由陡倾的脉状、浸染状铅、锌、银矿化为主,渐变为以较平缓的铜、钼矿化为主,具有明显的分带特征,也即是铜、钼矿化与潜火山相的斑岩体相关,产出于深部,脉状铅、锌、银矿化产出于潜火山外侧浅部(图 2)。考虑到当前钻探结果显示深部近花岗斑岩体附近钼矿化强度具有明显增强趋势,因此矿床深部很可能具有较大规模的铜钼矿化体,具有良好的勘查开发远景。

详细的岩(矿)相学和矿物学研究结果表明,油房西 Pb、Zn、Ag 多金属矿床原生矿石中金属矿物主要有闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、辉钼矿、自然银、银黝铜矿、螺状硫银矿、深红银矿等,还有少量黄铁矿、白铁矿,其次为毒砂、磁黄铁矿、磁铁矿等。脉石矿物主要为石英、绢云母、碳酸盐矿物、绿泥石等,少量萤石、绿帘石、叶蜡石;次生矿物有褐铁矿、软锰矿、黄钾铁钒、赤铁矿等。

根据矿物共生组合及其生成顺序、矿石组构和脉体穿插关系,可以将油房西多金属矿床成矿作用从早到晚分为 3 个阶段,即:①早期钼矿化阶段,主要矿物为辉钼矿,产出于潜火山相流纹斑岩中或隐伏斑岩体的接触带附近、霏细斑岩中或其两侧,或产在切过潜火山岩的断裂破碎带中呈细脉状、浸染状或薄膜状产出,并伴生少量黄铁矿和黄铜矿,向外具有 Mo-Cu、Mo 的分带趋势,伴随轻微的钾化和强烈的硅化和黄铁绢英岩化,后期叠加了强烈的泥化(图 3a~c);②主成矿期铅、锌、银矿化阶段,矿物组合主要为方铅矿、闪锌矿、辉银矿、含银矿物(螺

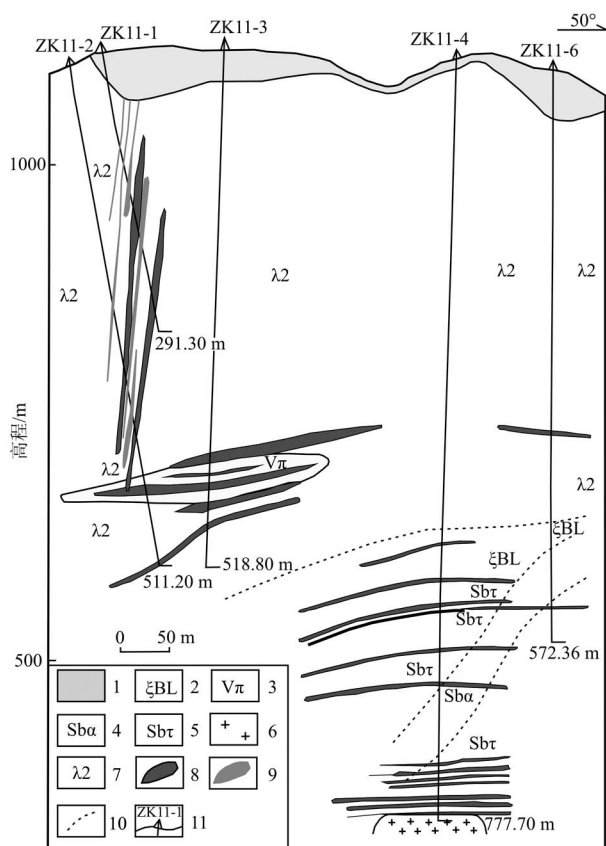


图2 油房西多金属矿床 11 号勘探线剖面图

(据吕增亮, 2012 修改)

1—第四系; 2—英安质角砾熔岩; 3—霏细岩; 4—蚀变安山岩; 5—蚀变粗面岩; 6—花岗岩; 7—紫红色少斑流纹岩; 8—钼(铜)矿体; 9—铅-锌矿体; 10—推测岩性界线; 11—钻孔及编号

Fig. 2 Cross-section along No. 11 exploration line of the Youfangxi polymetallic deposit (modified after Lü, 2012)

1—Quaternary; 2—Dacitic breccia lava; 3—Felsite; 4—Altered andesite; 5—Altered trachyte; 6—Granite porphyry; 7—Purple rhyolite; 8—Mo (Cu) orebody; 9—Pb-Zn orebody; 10—Inferred lithologic boundary; 11—Drill hole and its serial number

状硫银矿、深红银矿)和黄铜矿,呈裂隙充填结构、交代溶蚀结构、包含结构等分布于早期黄铁矿或脉石矿物中,形成脉状、稠密浸染状、角砾状、团块状及环带状构造,围岩蚀变主要为硅化,局部有强烈的萤石化(图 3d、e); ③晚期碳酸盐化阶段,以碳酸盐脉发育为特征,含有极少量的浸染状细粒黄铁矿,常切穿早阶段钼矿体和主成矿阶段的铅锌银矿石,并叠加了明显的绿泥石化、碳酸盐化,标志着成矿作用结束(图 3f)。

3 辉钼矿 Re-Os 同位素组成

3.1 样品的采集与处理

用于 Re-Os 同位素年龄测定的 5 件辉钼矿样品分别采自 11 号勘探线钼矿化中心地段的不同部位。采样位置分别为 ZK11-2 的 421 m 处和 ZK11-3 的 405 m、409 m、415 m、475 m 处。这里是矿体的厚度最大部位,同时也是钼含量相对较高和变化范围相对较小的地段。所采样品中辉钼矿大多呈脉状、薄膜状集合体或浸染状不均匀的散布在流纹斑岩中。需要提及的是,采样地段未见有强烈构造变形。辉钼矿样品是采用特制工具直接从手标本上获取的,并且在实体显微镜下进行了仔细检查,辉钼矿样品的纯度(体积分数)均大于 98%。

3.2 分析方法

辉钼矿样品的 Re-Os 同位素分析在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素年代学实验室完成,样品的化学处理流程和质谱测定技术简述如下(Du et al., 2004; 杜安道等, 1994; 2001):准确称取所要分析的样品,通过长细颈漏斗加入到 Carius 管底部,缓慢加液氮到装有半杯乙醇的保温杯中,调节温度到 $-50 \sim -80^{\circ}\text{C}$ 。把装好样品的 Carius 管放置到该保温杯中,通过长细颈漏斗把准确称取的 ^{185}Re 和 ^{190}Os 混合稀释剂加入到 Carius 管底部,再加入 4 mL 的 HCl ($c(\text{HCl})$ 为 10 mol/L), 4 mL 的 HNO_3 ($c(\text{HNO}_3)$ 为 16 mol/L)。当管底的溶液冰冻后,用丙烷氧气火焰加热封好 Carius 管的细颈部分,放入不锈钢套管内。轻轻放套管入鼓风烘箱内,待回到室温后,逐渐升温到 230°C ,保温 12 h。在底部冷冻的情况下,打开 Carius 管,并用 40 mL 的水将管中溶液转入蒸馏瓶中。蒸馏分离 Os 的过程大体如下:于 $105 \sim 110^{\circ}\text{C}$ 条件下蒸馏 50 min,用 10 mL 水吸收蒸出的 OsO_4 ,用于 ICP-MS(等离子体质谱仪)测定 Os 同位素比值。将蒸馏残液倒入 150 mL 烧杯中待分离 Re。萃取分离 Re 的过程如下:将第一次蒸馏残液置于电热板上,加热近干;加少量水,再加热到近干;重复 2 次以降低酸度;加入 10 mL 的 NaOH ($c(\text{NaOH})$ 为 5 mol/L),稍微加热,转为碱性介质;转入 50 mL 聚丙烯离心管中离心,取上清液转入 120 mL Teflon 溶液

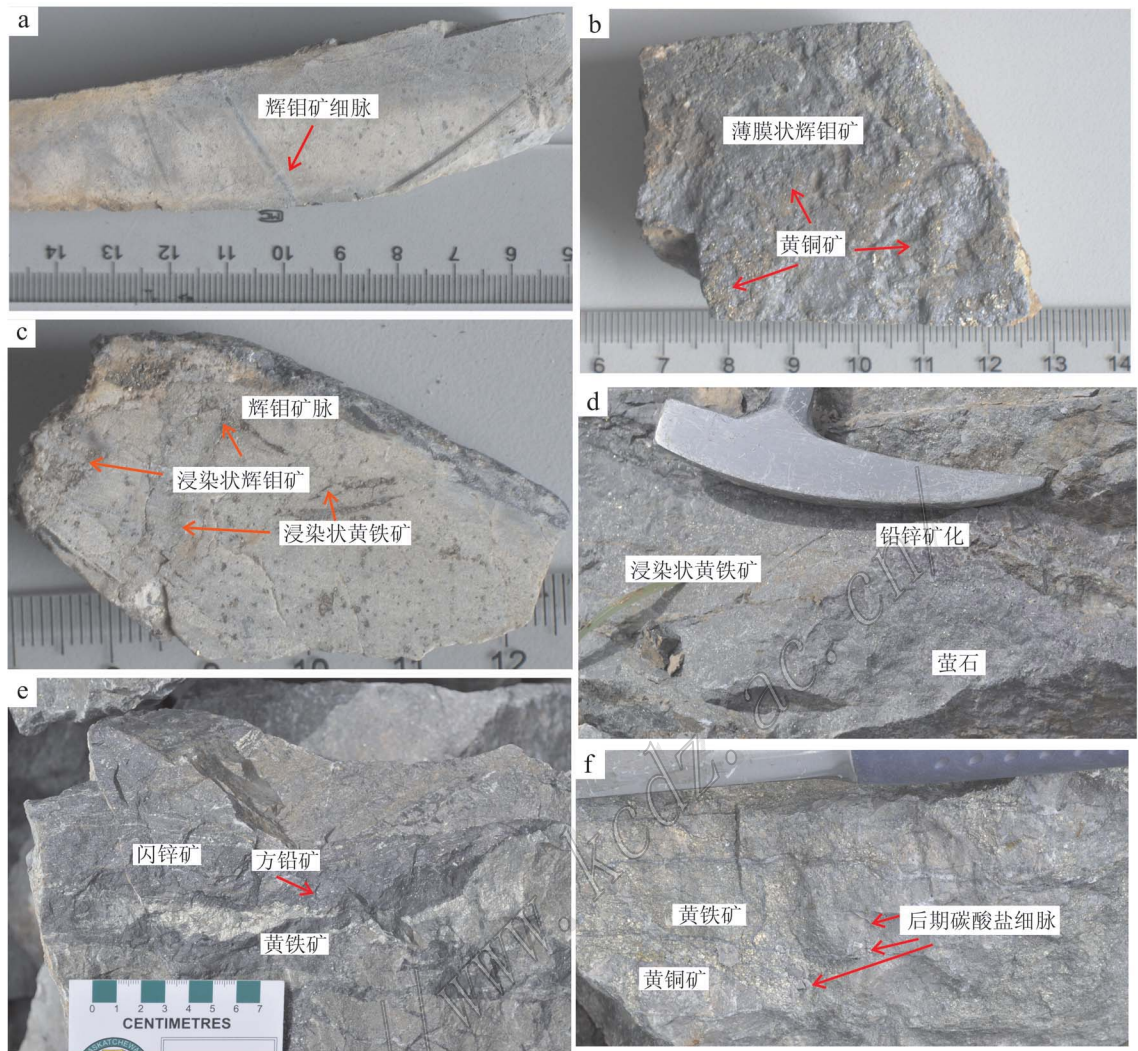


图 3 油房西多金属矿床典型矿石照片

a. 细脉状辉钼矿矿石；b. 薄膜状辉钼矿矿石；c. 浸染状辉钼矿矿石；d,e. 主成矿期充填状铅锌矿矿石；f. 矿石充填晚期碳酸盐细脉

Fig. 2 Ore photos of the Youfangxi polymetallic deposit

a. Veinlet Mo ore; b. Mo ore of thin film; c. Disseminated Mo ore; d&e. Ore of the main metallogenic stage; f. Ore filled with late stage carbonate veinlets

到分液的漏斗中，加入 10 mL 丙酮，振荡 5 min，萃取 Re，然后弃去水相。加 2 mL 的 NaOH ($c(\text{NaOH})$ 为 5 mol/L) 到分液漏斗中，振荡 2 min 洗去丙酮相中的杂质，弃去水相，排丙酮到 150 mL 已加有 2 mL 水的烧杯中，在电热板上 50℃ 加热以蒸发丙酮，加热溶液至干，然后加数滴浓硝酸和 30% 过氧化氢，加热蒸干以除去残存的 Os 用数毫升稀 HNO_3 溶解残渣，稀释到硝酸浓度为 2%，备 ICP-MS 测定 Re 同位素比值。如含 Re 溶液中盐量超过 1 mg/mL，需采用阳离子交换柱除去钠(屈文俊等，2003)。

采用美国 TJA 公司生产的 TJA PQ ExCell ICP-MS 仪测定同位素比值对于 Re 的测定，选择质量数 185、187，用 190 监测 Os。对于 Os 的测定，选择质量数为 186、187、188、189、190、192，用 185 监测 Re。最后，所获 Re-Os 同位素分析数据采用 Ludwig (1999) 计算机软件进行处理，并且获得同位素等时线年龄，计算过程中所采用的衰变常数为 $\lambda(^{187}\text{Re}) = 1.66 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Ludwig, 1999; Stein et al., 2001; 2003; Smoliar et al., 1996; Taylor, 1987)。

4 结果与讨论

4.1 实验结果

油房西矿床 11 号线钼矿体 5 件辉钼矿样品 Re-Os 同位素分析数据及其特征值列于表 1。模式年龄除 YFXMo3 年龄值为 181.1 Ma 外,全部分布在 137.1~139.9 Ma。YFXMo3 测试年龄数值相对离群的原因可能为该矿床存在 2 次或 2 次以上的钼多金属成矿作用,但由于本次实验测试数据有限,暂时不足以有效证明该推论,笔者将在该矿床的后续工作中寻找多期次成矿作用作为工作重点,进一步分析研究成矿机理,找出该数据较大误差的原因。剔除该样品后,利用 Isoplot 软件所获得的¹⁸⁷Os 对¹⁸⁷Re 图(图 4)中,所有 4 件辉钼矿样品分析数据均排列在一条直线上,等时线纵截距接近于 0,相关系数大于 0.995。该直线对应的等时线年龄值为(136.4±4.9)Ma,MSWD 值为 0.8,¹⁸⁷Os 初始值为(0±1)。模式年龄加权平均值为(138.4±1.2)Ma,MSWD 值为 0.63。可以看出,该等时线年龄与其模式年龄相当吻合,可进一步证实辉钼矿样品中基本不含初始普通 Os,并表明其模式年龄可以代表辉钼矿的形成时间。一般来讲,判别同位素等时线年龄是否具有地质意义的重要依据有 3 条,即所测样品是否同时期形成?所测样品是否具有同样物质来源?同位素体系是否处于封闭状态?(聂凤军等,2005 2007a 2011)在本次研究过程中,用于 Re-Os 同位素年代学研究的辉钼矿样品基本上可以满足上述条件,说明本次测试结果精度可信,具有地质意义。

此外,本次实验所使用的辉钼矿样品具有以下几个特点:① 所有 5 件辉钼矿样品均采自 11 号线

钼矿体中心地带;② 辉钼矿呈浸染状或薄膜状、脉状产出,并且与黄铁矿和黄铜矿呈共生结构关系(图 3a~c);③ 4 件辉钼矿样品 Re-Os 同位素模式龄值变化范围较小 137.2~139.6 Ma,平均值为 139.0 Ma;④ 采样地段未见强烈变形现象;⑤ 所获辉钼矿样品 Re-Os 同位素等时线年龄值,与矿区内火山岩 K-Ar 法年龄值((130.73±1.91)Ma~(147.80±2.48)Ma)(卢贺等,2010),潜火山相花岗斑岩的锆石 U-Pb 年龄一致((136±1)Ma,另文发表)。一般认为,同位素模式年龄的加权平均值代表了同位素与母体分离的时间,而等时线年龄则代表同位素体系最后均一化的时间。结合区域性 Mo 和 Mo-U 矿床(点)成矿时代对比研究结果,同时考虑到油房西矿床的具体地质情况,故将等时线年龄(136.4±4.9)Ma 看作为辉钼矿从含矿流体中沉淀与富集的时间。

4.2 成矿时代

本次研究对油房西辉钼矿 Re-Os 同位素进行测试并获得等时线年龄为(136.6±4.9)Ma,测试结果显示,辉钼矿从含矿流体中沉淀和富集的时间为早白垩世,属于燕山期构造-岩浆活动的产物。

近年来,直接对矿石矿物及富钾蚀变矿物进行同位素定年测试已经成为获取高精度成矿年龄的重要手段并且受到广泛应用。张炯飞等(2002)、周振华等(2010)、江思宏等(2011;2012)、马星华等(2009)和曾庆栋等(2009)研究分析结果表明,华北克拉通北缘西拉沐伦断裂带及黄岗梁-乌兰浩特周缘地区存在大规模燕山期构造岩浆活动,形成了大量的火山岩和侵入岩以及与其相关的众多金属矿床,其中 140 Ma 左右为该区主要成矿期之一,油房西矿床即产于该成矿期。在区域范围内,白音诺尔 Ag-Pb-Zn 多金属矿床花岗岩岩基锆石 U-Pb 同位素

表 1 内蒙古克什克腾旗油房西多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素数据结果
Table 1 Re-Os isotopic analyses of molybdenite separates from the Youfangxi polymetallic deposit, Hexigten Banner, Inner Mongolia

原样名	m/g	ε(Re)Y10 ⁻⁹		ε(普 Os)Y10 ⁻⁹		ε(¹⁸⁷ Re)Y10 ⁻⁹		ε(¹⁸⁷ Os)Y10 ⁻⁹		模式年龄/Ma	
		测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ
YFXMo5	0.02154	16869	153	0.034	0.028	10602	96	24.51	0.21	138.6	2.1
YFXMo1	0.00884	28271	349	0.042	0.086	17769	219	41.04	0.38	138.5	2.4
YFXMo4	0.00955	16388	365	0.096	0.118	10300	229	24.04	0.20	139.9	3.5
YFXMo3(剔除)	0.00910	57191	1385	0.017	0.016	35946	870	108.63	0.85	181.1	4.8
YFXMo6	0.01052	24126	341	0.076	0.121	15164	214	34.67	0.30	137.1	2.5

注:普 Os 是指普通 Os 的浓度,它是根据 Nier 值的 Os 同位素丰度,通过¹⁹²Os/¹⁹⁰Os 测量比计算得出 Re-Os 模式年龄按下列公式计算: $t = \ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})/\lambda$, $\lambda(^{187}\text{Re 衰变常数}) = 1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Smoliar et al., 1996),不确定值是 2σ。

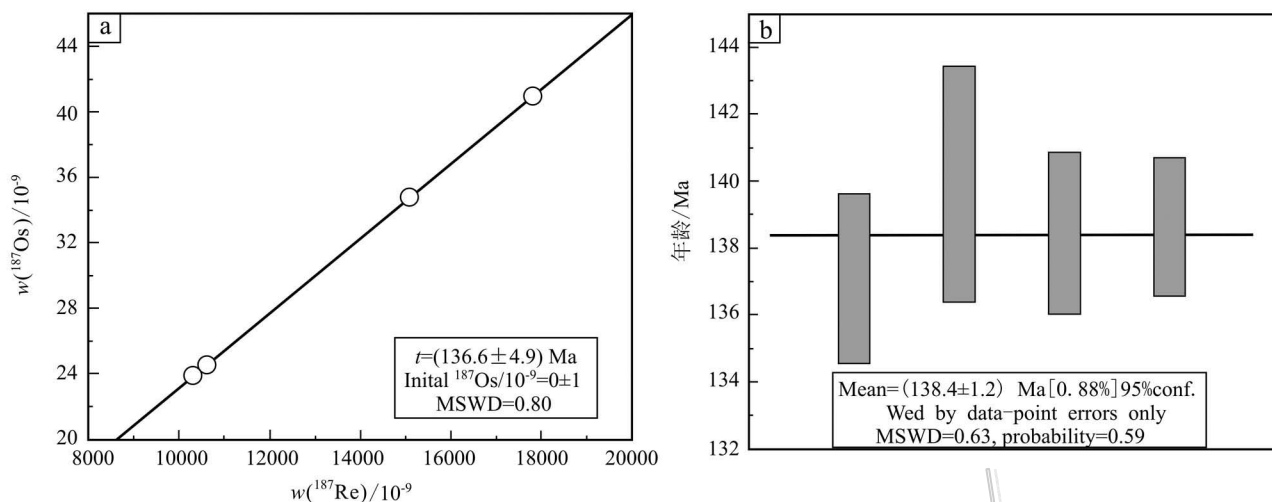


图 4 油房西多金属矿床钼矿体辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄图(a)和模式年龄加权平均值图(b)

Fig. 4 Re-Os isotopic isochron diagram (a) and weighted mean model age diagram (b) of the molybdenum orebody in the Youfangxi polymetallic deposit, Inner Mongolia

年龄为 $(134.8 \pm 1.2) \text{ Ma}$ (江思宏等, 2011); 拜仁达坝银多金属矿床北大山岩体锆石 U-Pb 同位素年龄为 $(140 \pm 3) \text{ Ma}$, 成矿期绢云母 Ar-Ar 同位素年龄为 133.5 Ma (刘翼飞, 2009); 浩布高银多金属矿床正长花岗岩 Rb-Sr 同位素年龄为 131 Ma (赵一鸣等, 1994); 大井 Sn-Cu 多金属矿床安山玢岩岩脉锆石 U-Pb 年龄为 $(133 \pm 0.7) \text{ Ma}$, 流纹质火山岩锆石 U-Pb 年龄为 $(143 \sim 146) \text{ Ma}$ (江思宏等, 2012); 小东沟钼矿床 Re-Os 等时线年龄为 $(135.0 \pm 1.5) \text{ Ma}$ (聂凤军等, 2007a); 红山子钼矿床全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $142 \sim 147 \text{ Ma}$ (曾庆栋等, 2009); 鸡冠山钼矿床 Re-Os 等时线年龄为 $(151.1 \pm 1.3) \text{ Ma}$ (陈伟军等, 2010); 碾子沟钼矿床 Re-Os 等时线年龄为 $(154.3 \pm 3.6) \text{ Ma}$ (张作伦等, 2009); 敖伦花钼矿床 Re-Os 等时线年龄为 $(132.0 \pm 1.0) \text{ Ma}$ (马星华等, 2009); 哈什吐钼矿床 Re-Os 等时线年龄为 $(148.8 \pm 1.6) \text{ Ma}$ (张可等, 2012); 半拉山钼矿床 Re-Os 等时线年龄为 $(136.1 \pm 6.6) \text{ Ma}$ (闫聪等, 2011); 羊场钼矿床 Re-Os 等时线年龄为 $(134.8 \pm 5.1) \text{ Ma}$ (Zeng et al., 2010)。可以看出, 区内 140 Ma 左右成岩成矿高峰期实例不断增加。油房西辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 $(136.4 \pm 4.9) \text{ Ma}$ 在此高峰期内, 进一步佐证了该区燕山期大规模构造-岩浆活动与多金属成矿作用的普遍性, 也表明了该区巨大的多金属矿床找矿远景。

4.3 物质来源讨论

研究表明, 由于 Re 倾向富集于地幔或基性-超

基性岩石中, 因此 Re-Os 同位素体系不仅可以精确的确定硫化物矿床形成的时间, 还可以示踪成矿物质来源以及指示成矿过程中不同来源物质混入的程度 (Stein et al., 2001)。对中国大量中酸性岩浆岩作用有关的钼(铜)矿床 Re-Os 同位素数据分析结果表明: 从地幔来源到壳-幔来源再到地壳来源, 矿石中 $w(\text{Re})$ 可呈数量级下降; 物质来源于地幔或以地幔物质为主的矿床, 其辉钼矿 $w(\text{Re})$ 多在 $(100 \sim 1000) \times 10^{-6}$ 范围内, 具有壳幔混合源的矿床, 每克辉钼矿 $w(\text{Re})$ 多为十几至几十微克; 而成矿物质完全来自壳源的矿床, 其辉钼矿 $w(\text{Re})$ 明显偏低, 常为 $(1 \sim n) \times 10^{-6}$ 或者更低 (Mao et al., 1999; 孟祥金等, 2007)。

从表 1 可见, 油房西辉钼矿 $w(\text{Re})$ 变化范围为 $(16.3 \sim 28.2) \times 10^{-6}$, 该数值与壳-幔来源的岩浆矿床接近。因此推断, 油房西多金属矿床钼矿体的成矿物质来源可能主要为上地壳, 但同时混有地幔物质。

4.4 成矿作用探讨

邵济安等 (1998; 2005)、聂凤军等 (2007a; 2007b)、曾庆栋等 (2009) 研究结果表明, 自中生代早期开始, 受库拉板块与欧亚大陆俯冲消减作用影响, 大兴安岭南段及邻区的主构造线方向开始从东西向转变为北东向或北北东向, 该区开始进入一个新的板内构造演化阶段-造山后伸展阶段, 该阶段是发生构造转折和岩石圈减薄的重要时期。强烈的中酸性

火山喷发作用可沿 NE 向断裂带或在断陷盆地内形成巨厚的火山-沉积地层,覆盖在前中生代基底构造层之上。早白垩世时期,库拉板块对欧亚大陆俯冲作用的强度明显减低,并且逐渐消失殆尽。受区域性地壳应力大幅度调整作用影响,西拉沐伦地区地壳处于拉张状态,油房西及其邻区处于地壳活动高峰期。其伸展环境为岩石圈的减薄和软流圈(层)物质上涌提供条件,导致基性岩浆的底侵,引发下地壳岩石的熔融,所形成花岗质岩浆携带成矿物质沿有利构造地带上升,同时部分熔融的地幔物质参与花岗岩和火山岩的形成过程(邵济安等,2005)。岩浆继续上升,沿二把伙-油房断裂带发生一系列裂隙-中心式火山喷发,在油房西地区形成一个层状火山构造。火山-潜火山活动之后,深熔花岗岩浆沿火山通道上侵,由于岩浆上拱作用及岩浆冷凝、收缩效应,在岩体和火山岩接触带附近形成以层状断裂、裂隙为主的构造系统,为含矿流体的上升、沉淀和富集创造了有利的条件。

矿床成矿元素在空间上沿矿体走向显示出规律性分带现象,具体表现为在深部斑岩体平缓似层状 Cu-Mo 矿化、至陡倾脉状、细脉状 Cu-Zn 矿化、Pb-Zn-Ag 矿化依次向外侧产出,随与岩体距离增大显示出 Cu(Mo)-Zn-Pb-Ag 矿化程度逐渐增强的现象,指示成矿物质与斑岩体具有密切成因关系(刘翼飞等,2012,2014)。花岗质岩浆上侵过程中,岩浆体系自身的结晶分异作用可促使大量的挥发性组分及 Pb、Zn、Ag、Cu、Mo 等成矿元素在岩浆房顶部及旁侧发生富集作用,进而形成含矿流体。矿化分带性的形成为含矿流体由高温高盐度至中低温低盐度依次分异演化的过程中,成矿元素在运移中不同部位选择性卸载的结果。在油房西矿床成矿流体演化的早期阶段,高温流体中的 Cu、Mo 元素通过岩体(层)粒间孔隙或原生冷凝细微裂隙进行扩散与运移,并在有利地段沉淀,形成浸染状辉钼矿或含黄铁矿、黄铜矿和辉钼矿的细脉、网脉。当含矿热液沿构造破碎带继续向地表方向运移过程中,富含 Pb、Zn、Ag 元素流体涌入张性构造环境中,温压条件的急剧变化导致了闪锌矿、方铅矿、辉银矿等矿物大量沉淀,进而形成脉状、网脉状、细脉状矿体,并伴随着强烈的硅化、绢云母化、和萤石化。成矿作用晚期阶段,成矿热液体系明显进入低温和低盐度流体演化阶段,方解石等碳酸盐矿物呈脉状出现,指示流体在演化晚期逐渐酸化。总体来看,在成矿体系上部脉状矿

体形成过程中,成矿流体主要由矿区中部沿南西向向外运移。因此,在油房西矿区斑岩体附近及西北侧还可能进一步找矿的空间。

5 结 论

(1)对内蒙古中东部油房西多金属矿床中的辉钼矿样品进行了 Re-Os 同位素分析,获得 (136.4 ± 4.9) Ma 的 Re-Os 等时线年龄,表明成矿发生于早白垩世,属燕山期构造-岩浆活动的产物。

(2)成矿作用可以划分为 3 个成矿阶段,即:早期钼矿化阶段,主成矿期铅、锌、银矿化阶段和晚期碳酸盐化阶段。

(3)辉钼矿中 $\omega(\text{Re}) = (16.3 \sim 28.2) \times 10^{-6}$,成矿物质来源主要为上地壳,同时混有少量地幔物质。

(4)油房西矿床形成于早白垩世时期后碰撞伸展阶段。在此阶段,西拉沐伦成矿带发生区域性构造调整、岩石圈减薄和热侵蚀作用。所形成花岗质岩浆携带成矿物质沿有利构造地带上升,并在在合适的地段成矿物质发生沉淀、富集,最终形成了油房西矿床。

志 谢 本文野外工作的顺利进行得益于油房西矿床工作人员大力支持,室内实验工作得到了中国地质科学院国家地质测试中心铼-钼同位素年代学实验室屈文俊研究员的指导与帮助,文章成稿与矿产资源研究所江思宏研究员及 3 位审稿专家的悉心审阅密不可分,在此深表谢忱!

References

- Bai D M, Liu G H. 1996. Regional integrated ore-prospecting model for the Huanggangliang-Ulanhot copper-polymetallic ore belt[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 20(6): 444-451(in Chinese with English abstract).
- Chen W J, Liu J M, Liu H T, Sun X G, Zhang R B, Zhang Z L and Qin F. 2010. Geochronology and fluid inclusion study of the Jiguanshan porphyry Mo deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1423-1436(in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M. 1997. Metallogeny and prospective evaluation of cop-

- per-polymetallic deposits in the Da Hinggan Mountains and its adjacent regions[J]. Beijing: Seismological Press. 1-318 (in Chinese).
- Du A D, He H L, Yin N F, Zou X Q, Sun Y L, Sun D Z, Chen S Z and Qu W J. 1994. A study on the Rhenium-Osmium geochronometry of molybdenites[J]. *Acta Geologica Sinica*, 68(4): 339-347 (in Chinese with English abstract).
- Du A D, Zhao D M, Wang S X, Sun D Z and Liu D Y. 2001. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with carius tube sample preparation[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 20(4): 247-252 (in Chinese with English abstract).
- Du A D, Wu S Q, Sun D Z, Wang S X, Qu W J, Stein R M H, Morgan J and Malinovskiy D. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenite HLP and JDC[J]. *Geostandard and Geoanalytical Research*, 28(1): 41-52.
- Feng X J. 2012. Application of combined geophysical prospecting method in Youfangxi polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 2012(S1): 26-29 (in Chinese).
- Jiang S H, Nie F J, Bai D M, Liu Y F and Liu Y. 2011. Geochronology evidence for indosinian mineralization in Baiyinnuoer Pb-Zn deposit of Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 30(5): 787-798 (in Chinese with English abstract).
- Jiang S H, Liang Q L, Liu Y F and Liu Y. 2012. Zircon U-Pb ages of the magmatic rocks occurring in and around the Dajing Cu-Ag-Sn polymetallic deposit of Inner Mongolia and constrains to the ore-forming age[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 495-513 (in Chinese with English abstract).
- Liu J M, Zhang R and Zhang Q Z. 2004. The regional metallogeny of Dahingganling, China[J]. *Earth Science Frontier*, 11(1): 269-277 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y F. 2009. Metallogenic study of Bairendaba Ag polymetallic deposit in Hexigten Banner, Inner Mongolia (dissertation for master degree)[D]. Supervisor: Jiang S H. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. 1-50 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y F, Nie F J, Jiang S H, Liu Y and Liang Q L. 2012. Bairendaba Pb-Zn-Ag polymetallic deposit in Inner Mongolia: The mineralization zoning and its origin[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 42(4): 1055-1068 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y F, Fan Z Y, Jiang H C, Nie F J, Jiang S H, Ding C W and Wang F X. 2014. Genesis of the Weilasituo-Bairendaba porphyry-hydrothermal vein type system in Inner Mongolia, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2373-2385 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z S. 2003. The geophysical characteristics of Youfangxi ore field and prospecting Sign [J]. *Mineral Resources and Geology*, 17(6): 700-704 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 1999. Isoplot/Ex, version 2.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[R]. *Geochronology Center*, 1-20.
- Lu H, Sun J Y, He H X, Ge Z L and Zhang Z Q. 2010. Ore mechanism and prospecting direction of Youfangxi silver polymetallic deposit in Inner Mongolia[J]. *Mineral Resources and Geology*, 24(2): 120-124 (in Chinese with English abstract).
- Lü Z Y, Wang H W and Zhao Y F. 2004. Polymetal ore-forming characteristics and ore-searching direction in Youfangxi Characteristics-Erbahuo area, Inner Mongolia[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 19(3): 185-190 (in Chinese with English abstract).
- Lü Z Y. 2012. Analysis of potential for molybdenum at Youfangxi area Keshenketengqi, Inner Mongolia[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 27(2): 174-179 (in Chinese with English abstract).
- Ma X H, Chen B, Lai Y and Lu Y H. 2009. Petrogenesis and mineralization chronology study on the Aolunhua porphyry Mo deposit, Inner Mongolia, and its geological implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2939-2950 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Zhang Z C and Zhang Z H. 1999. 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*, 163(11/12): 1815-1818.
- Meng X J, Hou Z Q, Dong G Y, Liu J G, Qu W J, Yang Z S, Zou L Y, Wan L J and Xiao M Z. 2007. The geological

- characteristics and Re-Os isotope age of molybdenite of the Xiongjiashan molybdenum deposit, Jiangxi Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 946-951(in Chinese with English abstract).
- Nie F J, Qu W J, Liu Y, Du A D and Jiang S H. 2005. Re-Os isotopic age dating of molybdenite separates from Elegen porphyry Mo (Cu) mineralized area, northwestern Alxa, western Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 24(6): 638-664(in Chinese with English abstract).
- Nie F J, Zhang W Y, Du A D, Jiang S H and Liu Y. 2007a. Re-Os isotopic dating on molybdenite separates from the Xiaodonggou porphyry mo deposit, Hexigten Qi, Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 898-905(in Chinese with English abstract).
- Nie F J, Zhang W Y, Jiang S H and Liu Y. 2007b. Geological features and origin of Xiaodonggou porphyry molybdenum deposit in Hexigten Banner, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 26(6): 609-620(in Chinese with English abstract).
- Nie F J, Sun Z J, Li C, Liu Y F, Lü K P, Zhang K and Liu Y. 2011. Re-Os isotopic dating of molybdenite separates from Chalukou porphyry Mo polymetallic deposit in Heilongjiang Province[J]. *Mineral Deposits*, 30(5): 829-836 (in Chinese with English abstract).
- Qin F, Liu J M, Zeng Q D and Luo Z H. 2009. Petrogenetic molybdenum and metallogenic mechanism of the Xiaodonggou porphyry deposit in Hexigten Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3357-3368(in Chinese with English abstract).
- Qu W J, Du A D. 2003. Highly precise Re-Os dating of molybdenite by ICP-MS with Carius tube sample digestion[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 22(4): 254-257(in Chinese with English abstract).
- Shao J A, Zhang L Q, Mu B L. 1998. Tectono-thermal evolution of middle-south section of the Da Hinggan Mountains [J]. *Science in China*, 28(3): 193-200(in Chinese with English abstract).
- Shao J A, Zhang L Q, Xiao Q H and Li X B. 2005. Rising of Da Hinggan Mts in Mesozoic: A possible mechanism of intracontinental orogeny[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 789-794(in Chinese with English abstract).
- Shen C L, Zhang M, Yu X Q, Chen W G, Gao W Y and Zhou W C. 2010. New progresses in exploration of molybdenum deposits and analysis of mineralization prospect in Inner Mongolia[J]. *Geology and Prospecting*, 46(4): 561-573(in Chinese with English abstract).
- Smoliar M I, Walker R J, Morgan J W. 1996. Re-Os ages of group II A, III A, IV A and VI B iron meteorites[J]. *Science*, 271(5252): 1099-1102.
- Stein H J, Schersten K, Hannah J L and Markey R. 2003. Subgrain scale decoupling of Re and ^{187}Os assessment of laser ablation ICP-MS spot dating in molybdenite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 92: 827-835.
- Stein H, Markey R, Morgan J W, Hannah J L and Schersten A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works[J]. *Terra Nova*, 13(6): 479-486.
- Taylor B E. 1987. Stable isotope geochemistry of ore-forming fluid[J]. *Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook*, 13: 337-445.
- Wang G Z, Zhang J L, Tian Z Z and Zou J W. 2012. Geological characteristics and genesis of silver polymetallic deposit in Youfangxi, Inner Mongolia[J]. *Mineral Resource and Geology*, 26(2): 101-108(in Chinese with English abstract).
- Yan C, Sun Y, Lai Yong and Ma X H. 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb and molybdenite Re-Os isotope ages and metallogenic geodynamic setting of Banlashan Mo deposit, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 30(4): 616-634(in Chinese with English abstract).
- Zeng Q D, Liu J M, Zhang Z L, Chen W J, Qin F, Zhang R B, Yu W B, Zhang X H and Zhai M G. 2009. Mineralizing types, geological characteristics and geodynamic background of molybdenum deposits in Xilamulun molybdenum polymetal metallogenic belt on northern margin of North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1225-1238 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Q D, Liu J M, Zhang Z L. 2010. Re-Os geochronology of porphyry molybdenum deposit in south segment of Da Hinggan Mountains, Northeast China[J]. *Journal of Earth Science*, 21: 392-401.

- Zhang J F, Zhu Q, Wu G, Shao J, Zhu H C and Jin C Z. 2002. On metallogenetic epoch of hydrothermal deposits in Da Hinggan area[J]. *Mineral Deposits*, 21(S1):309-311(in Chinese with English abstract).
- Zhang K, Nie F J, Hou W R, Li C and L Y. 2012. Re-Os isotopic age dating of molybdenite separates from Hashitu Mo deposit in Linxi County of Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 31(1): 129-138(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z L, Zeng Q D, Qu W J, Liu J M, Sun X G, Zhang R B, Chen W J and Qin F. 2009. The molybdenite Re-Os dating from the Nianzigou Mo deposit, Inner Mongolia and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 212-218(in Chinese with English abstract).
- Chu S X, Zeng Q D, Liu J M, Zhang W Q, Zhang Z L, Zhang S and Wang Z C. 2010. Characteristics and its geological significance of fluid inclusions in Chehugou porphyry Mo-Cu deposit, Xilamulun molybdenum metallogenetic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8):2465-2481(in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M, Wang D W and Zhang D Q. 1994. Geological setting and exploration model for the polymetallic deposits occurring in the southeastern part of Inner Mongolia[M]. Beijing: Seismological Press. 1-234(in Chinese).
- Zhou Z H, Feng J R, Lü L S, Li T and Yang Y J. 2010. Ore-forming mechanism and the temporal and spatial structure of the Huanggangliang-Wulanhaote tin-lead-zinc-copper-polymetallic metallogenetic belt, Inner Mongolia [J]. *China Mining Magazine*, 19(6): 100-104(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献
- 白大明, 刘光海. 1996. 黄岗梁-乌兰浩特铜多金属成矿带区域综合找矿模式[J]. *物探与化探*, 20(06): 444-454.
- 陈伟军, 刘建明, 刘红涛, 孙兴国, 张瑞斌, 张作伦, 覃锋. 2010. 内蒙古鸡冠山斑岩钼矿床成矿时代和成矿流体研究[J]. *岩石学报*, 26(5): 1423-1436.
- 褚少雄, 曾庆栋, 刘建明, 张伟庆, 张作伦, 张松, 汪在聪. 2010. 西拉沐伦钼矿带车户沟斑岩型钼-铜矿床成矿流体特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 26(8): 2465-2481.
- 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 Re-Os 同位素地质年龄测定方法研究[J]. *地质学报*, 68(4): 339-347.
- 杜安道, 赵敦敏, 王淑贤, 孙德忠, 刘敦一. 2001. Garius 管溶样和负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿 Re-Os 同位素地质年龄[J]. *岩矿测试*, 20(4): 247-252.
- 冯晓君. 2012. 内蒙古自治区克什克腾旗油房西银多金属矿联合勘探方法找矿应用[J]. *新疆有色金属*, 2012(增刊 1): 26-29.
- 江思宏, 聂凤军, 白大明, 刘翼飞, 刘妍. 2011. 内蒙古白音诺尔铅锌矿床印支期成矿的年代学证据[J]. *矿床地质*, 30(5): 787-798.
- 江思宏, 梁清玲, 刘翼飞, 刘妍. 2012. 内蒙古大井矿区及外围岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及其对成矿时间的约束[J]. *岩石学报*, 28(2): 495-513.
- 刘建明, 张锐, 张庆洲. 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征[J]. *地学前缘*, 11(1): 269-277.
- 刘翼飞. 2009. 内蒙古克什克腾旗拜仁达坝银多金属矿床成因研究(学位论文)[D]. 导师: 江思宏. 北京: 中国地质科学院, 1-50.
- 刘翼飞, 聂凤军, 江思宏, 刘妍, 梁清玲. 2012. 内蒙古拜仁达坝 Pb-Zn-Ag 矿床: 元素分带及其成因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(4): 1055-1068.
- 刘翼飞, 樊志勇, 蒋胡灿, 聂凤军, 江思宏, 丁成武, 王丰翔. 2014. 内蒙古维拉斯托-拜仁达坝斑岩-热液脉状成矿体系研究[J]. *地质学报*, 88(12): 2373-2385.
- 刘振山. 2003. 油房西矿区地球物理特征及找矿标志[J]. *矿产与地质*, 17(6): 700-704.
- 卢贺, 孙靖宇, 何红霞, 葛之亮, 张志强. 2010. 内蒙古油房西银多金属矿成矿机理及找矿方向[J]. *矿产与地质*, 24(2): 120-124.
- 吕增尧, 王会文, 赵英福. 2004. 内蒙古油房西-二把伏地区银多金属矿成矿地质特征及找矿方向[J]. *地质找矿论丛*, 19(3): 185-190.
- 吕增尧. 2012. 内蒙古克什克腾旗油房西矿区钼矿找矿潜力分析[J]. *地质找矿论丛*, 27(2): 174-179.
- 马星华, 陈斌, 赖勇, 鲁颖淮. 2009. 内蒙古敖伦花斑岩钼矿床成矿年代学及地质意义[J]. *岩石学报*, 25(11): 2939-2950.
- 孟祥金, 侯增谦, 董光裕, 刘建光, 屈文俊, 杨竹森, 左力艳, 万禄进, 肖茂章. 2007. 江西金溪熊家山钼矿床特征及其 Re-Os 年龄[J]. *地质学报*, 81(7): 946-951.
- 聂凤军, 屈文俊, 刘妍, 杜安道, 江思宏. 2005. 内蒙古额勒根斑岩型钼(铜)矿化区辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及地质意义[J]. *矿床地质*, 24(6): 638-664.
- 聂凤军, 张万益, 杜安道, 江思宏, 刘妍. 2007a. 内蒙古小东沟斑岩

- 型钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及地质意义[J]. 地质学报, 81(7): 898-905.
- 聂凤军, 张万益, 江思宏, 刘妍. 2007b. 内蒙古小东沟斑岩钼矿床地质特征及成因探讨[J]. 矿床地质, 26(6): 609-620.
- 聂凤军, 孙振江, 李超, 刘翼飞, 吕克鹏, 张可, 刘勇. 2011. 黑龙江岔路口钼多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 30(5): 829-836.
- 覃锋, 刘建明, 曾庆栋, 罗照华. 2009. 内蒙古克什克腾旗小东沟斑岩型钼矿床成岩成矿机制探讨[J]. 岩石学报, 2009(12): 3357-3368.
- 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 Re-Os 地质年龄[J]. 岩矿测试, 22(4): 254-257.
- 邵济安, 张履桥, 牟保磊. 1998. 大兴安岭中南段中生代的构造热演化[J]. 中国科学(D辑), 28(3): 193-200.
- 邵济安, 张履桥, 肖庆辉, 李晓波. 2005. 中生代大兴安岭的隆起——一种可能的陆内造山机制[J]. 岩石学报, 21(3): 789-794.
- 沈存利, 张梅, 于玺卿, 程文国, 高维裕, 周文川. 2010. 内蒙古钼矿找矿新进展及成矿远景分析[J]. 地质与勘探, 46(4): 561-573.
- 王国政, 张金良, 田振召, 邹佳伟. 2012. 内蒙古油房西钼多金属矿床地质特征及成因探讨[J]. 矿产与地质, 26(2): 101-108.
- 闫聪, 孙艺, 赖勇, 马星华. 2011. 内蒙古半拉山钼矿 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 与辉钼矿 Re-Os 年龄及其成矿动力学背景[J]. 矿床地质, 30(4): 616-634.
- 曾庆栋, 刘建明, 张作伦, 陈伟军, 覃锋, 张瑞斌, 于文斌, 张晓晖, 翟明国. 2009. 华北克拉通北缘西拉沐伦钼多金属成矿带钼矿化类型, 特征及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2009(5): 1225-1238.
- 张炯飞, 朱群, 武广, 邵军, 祝宏臣, 金成洙. 2002. 大兴安岭热液矿床成矿时代[J]. 矿床地质, 2002(增刊1): 309-311.
- 张可, 聂凤军, 侯万荣, 李超, 刘勇. 2012. 内蒙古林西县哈什吐钼矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 31(1): 129-138.
- 张作伦, 曾庆栋, 屈文俊, 刘建明, 孙兴国, 张瑞斌, 陈伟军, 覃锋. 2009. 内蒙碾子沟钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 25(1): 212-218.
- 赵一鸣, 王大畏, 张德全. 1994. 内蒙古东南部铜多金属成矿地质条件及找矿模式[M]. 北京: 地震出版社. 1-234.
- 周振华, 冯佳睿, 吕林素, 李涛, 杨永军. 2010. 内蒙古黄岗梁-乌兰浩特锡铅锌铜多金属成矿带成矿机制及时空架构[J]. 中国矿业, 19(6): 100-104.