

内蒙东部白土营子钼铜矿田的矿床地质特征、辉钼矿 Re-Os 年龄及其意义^{*}

孙燕^{1,2} 刘建明¹ 曾庆栋¹ 褚少雄¹ 周伶俐^{1,2} 吴冠斌^{1,2} 高玉友³ 沈文君³

SUN Yan^{1,2}, LIU JianMing¹, ZENG QingDong¹, CHU ShaoXiong¹, ZHOU LingLi^{1,2}, WU GuanBin^{1,2}, GAO YuYou³ and SHEN WenJun³

1. 中国科学院矿产资源研究重点实验室 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

2. 中国科学院大学,北京 100049

3. 核工业 243 大队,赤峰 024006

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. No. 243 Geological Party of Nuclear Industry, Chifeng 024006, China

2012-10-08 收稿, 2012-12-14 改回.

Sun Y, Liu JM, Zeng QD, Chu XS, Zhou LL, Wu GB, Gao YY and Shen WJ. 2013. Geological characteristics and molybdenite Re-Os ages of the Baituyingzi Mo-Cu field, eastern Inner Mongolia and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1):241–254

Abstract The recently discovered Baituyingzi porphyry-quartz vein type Mo-Cu orefield from the Xilamulun Mo belt in the north margin of the North China Plate, is genetically related to magmatic hydrothermal activity. On the basis of detailed geologic research, molybdenite samples were selected from the three important Mo-Cu deposits for Re-Os isotopic analysis, and results are: 1) molybdenite samples from Baituyingzi porphyry ores yield an isochron age of $248.0 \pm 10\text{Ma}$ (MSWD = 0.52, 2σ); 2) samples from Baimashigou quartz vein ores yield an isochron age of $248.6 \pm 6.7\text{Ma}$ (MSWD = 1.06, 2σ); 3) samples from Kuluqu quartz vein type Mo-Cu deposit yield an isochron age of $245.0 \pm 4.3\text{Ma}$ (MSWD = 0.71, 2σ). These ages indicate that the Mo-Cu mineralization in Baituyingzi area occurred in Early Triassic. The Baituyingzi mineralization system was formed during the late stage of continental collision between North China Plate and Siberian Plate in Early Triassic, and the ore-forming fluids originated from the monzogranite porphyry, as indicated by UST (Unidirectional Solidification Texture). The Early Triassic Mo-Cu mineralizations extensively occurred in the northern margin of the North China Plate and its adjacent areas, and are potential for future exploration.

Key words Molybdenite Re-Os dating; Porphyry-quartz vein type Mo-Cu deposit; Metallogenic regularities; Baituyingzi Mo-Cu field; Xilamulun molybdenum belt

摘要 白土营子斑岩型-石英脉型钼铜矿田是华北板块北缘西拉沐沦钼矿带南部新近发现的与岩浆热液活动密切相关的钼铜成矿系统。本文在矿床地质特征研究的基础上,对矿田内三个重要钼铜矿床开展了辉钼矿 Re-Os 同位素定年,初步获得: 1) 白土营子斑岩型钼铜矿床的成矿年龄为 $248.0 \pm 10\text{Ma}$ (MSWD = 0.52, $n = 6$); 2) 白马石沟石英脉型钼铜矿的成矿年龄为 $248.6 \pm 6.7\text{Ma}$ (MSWD = 1.06, $n = 4$); 3) 库里吐石英脉型钼铜矿的成矿年龄为 $245.0 \pm 4.3\text{Ma}$ (MSWD = 0.71, $n = 5$); 这一结果揭示该矿集区的钼铜矿化发生在早三叠世。该成矿系统的形成正值早三叠世西伯利亚板块与华北板块碰撞造山过程的晚期,二长花岗斑岩的 UST 结构证明含矿流体来自岩浆作用。早三叠世钼铜成矿作用在华北板块北缘及邻区有一定的普遍性,找矿前景可观。

关键词 辉钼矿 Re-Os 年代学;斑岩型-石英脉型钼铜矿床;成矿规律;白土营子钼铜矿田;西拉沐沦钼矿带

中图法分类号 P597.3; P618.41; P618.65

* 本文受国家 973 项目(2013CB429800)和国家自然科学基金项目(40972065)联合资助。

第一作者简介: 孙燕,女,1985 年生,博士生,矿床学专业,E-mail: yansun850121@163.com

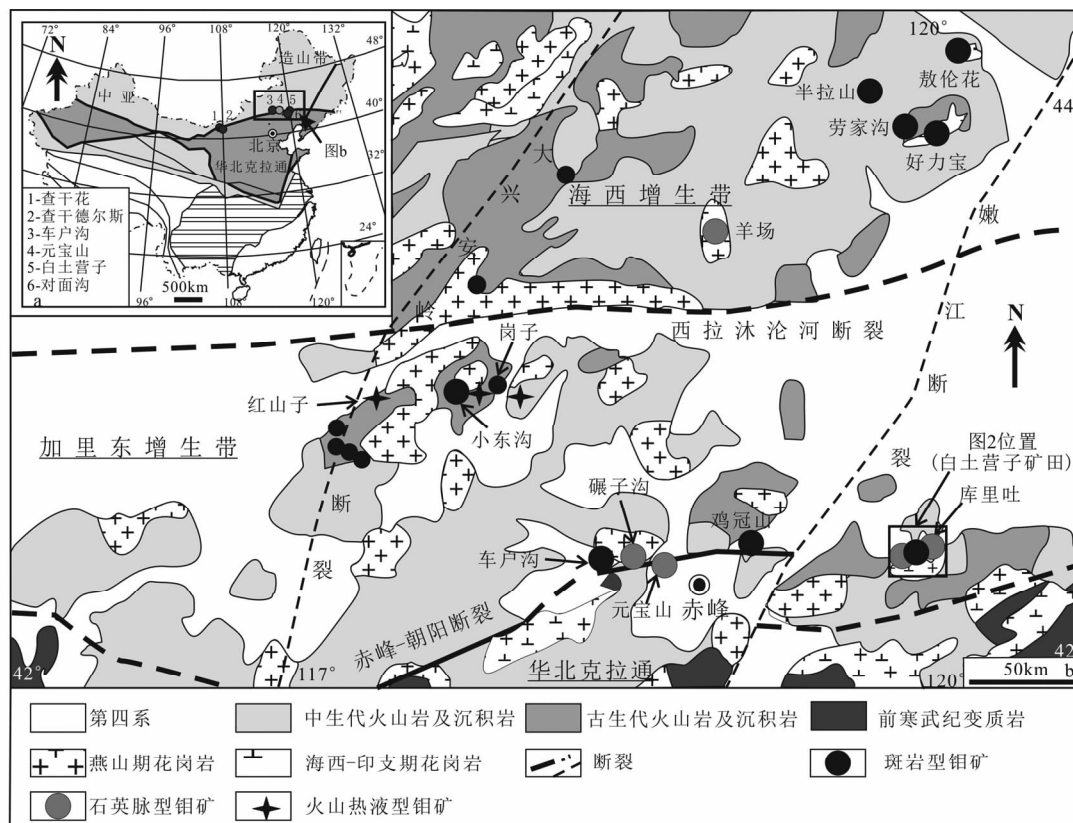


图1 华北克拉通北缘西拉沐沦钼矿带大地构造位置图(a, 据曾庆栋等, 2012 修改)和地质图(b, 据 Zeng *et al.*, 2011a 修改)

Fig. 1 Tectonic location map (a, modified after Zeng *et al.*, 2012) and geological map (b, modified from Zeng *et al.*, 2011a) of Xilamulun molybdenum metallogenic belt in the northern margin of the North China Craton

1 引言

近年来,在华北板块北缘西拉沐沦河断裂带两侧发现了十几个与晚古生代-中生代酸性岩浆作用有密切时空关系的斑岩型、石英脉型和次火山岩型钼多金属矿床(图1);且大量的年代学研究揭示区内钼矿成矿主要发生在早印支期(248~235Ma,如车户沟斑岩钼铜矿, Zeng *et al.*, 2012)、中燕山期(160~150Ma,如碾子沟石英脉型钼矿,张作伦等, 2009)和晚燕山期(140~120Ma,如小东沟斑岩钼矿,覃锋等, 2009);并且认为后两期钼矿可能分别形成于古亚洲洋向古太平洋构造体系转折和陆内岩石圈减薄等伸展过程,成矿物质主要来源于新生的地壳(Zhang *et al.*, 2009; Zeng *et al.*, 2011a),而对早印支期(即早三叠世)的钼矿成矿规律总结稍显有些不足,目前仅对车户沟钼铜矿床开展了较深入的年代学(Wan *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2010; Zeng *et al.*, 2012)、地球化学(Wan *et al.*, 2009; Zeng *et al.*, 2012)以及流体包裹体(褚少雄等, 2010; Zeng *et al.*, 2011b)研究。

白土营子钼铜矿田位于西拉沐沦钼矿带南侧,矿田内发育三个钼铜矿床,即:库里吐(也称鸭鸡山)石英脉型钼铜矿、

白土营子斑岩型钼铜矿和白马石沟石英脉型钼铜矿,三个矿床同产于一个花岗质杂岩基内,应属于统一的岩浆热液成矿系统(图2)。但迄今为止,对该矿田的研究主要集中在库里吐石英脉型钼铜矿(刘建民, 2007^①; 于泽新和龙军, 2007; 吴华英等, 2008; Zhang *et al.*, 2009; 李碧乐等, 2010),获得成矿时代为 236 ± 3.3 Ma (Zhang *et al.*, 2009),矿田内其它两个矿床没有相关研究工作。

本文在详细的矿床地质特征研究基础上,对白土营子钼铜矿田内三个矿床开展了辉钼矿 Re-Os 同位素定年,并结合前人资料探讨了矿田内钼铜成矿时限、成矿地球动力学背景以及华北北缘及邻区早三叠世钼铜成矿规律和找矿方向。

2 成矿地质背景

白土营子钼铜矿田位于西拉沐沦钼矿带南侧敖汉旗新惠镇境内,距华北板块北缘的赤峰-朝阳断裂不到20km,地处中亚造山带东端温都尔庙-翁牛特加里东增生带与大兴安岭

① 刘建民等. 2007. 内蒙古赤峰地区钼矿成矿年龄的确定及地质意义. 2007年全国岩石学与地球动力学研讨会报告

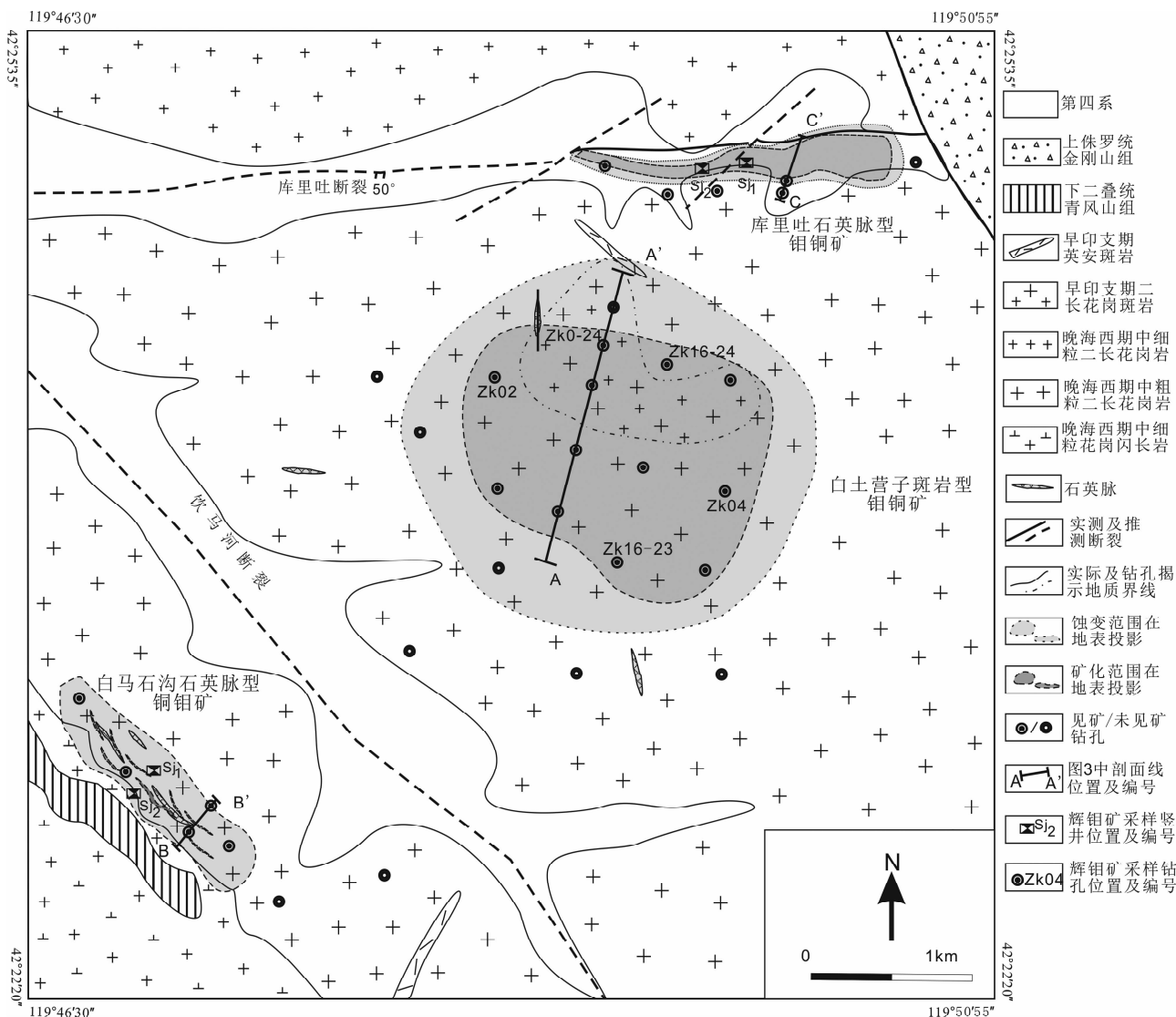


图2 白土营子铜钼矿田地质图(据朝阳金达集团实业有限公司,2006^①;赤峰市天恩矿业有限公司,2006^②;核工业243大队^③,2010资料修编)

Fig. 2 Geologic map of the Baituyingzi Mo-Cu orefield

中生代岩浆带叠加的部位(图1)(Xiao *et al.*, 2009; 赵越等, 2010)。

区域地壳演化经历了古生代华北板块与西伯利亚克拉通之间的古亚亚洲洋/鄂霍茨克洋的消减(构造线为NEE向)和中新生代的太平洋俯冲(构造线为NNE向),构造岩浆活动十分强烈(刘建明等,2004; Wu *et al.*, 2007)。全区出露的地层主要是古生代(主体是二叠纪)浅变质岩和中生代火山沉积岩;NEE向较大的断裂有赤峰-朝阳断裂和西拉沐沦河

断裂,NNE向断裂主要为大兴安岭断裂和嫩江断裂;广泛发育着海西-印支期和燕山期花岗岩杂岩;矿化以钼矿最为发育,主要类型为斑岩型(如车户沟铜钼矿和小东沟钼矿)、石英脉型(如碾子沟钼矿和库里吐钼矿)和次火山岩型(如红山子钼铜矿),在时空上均与岩浆活动密切相关,并在一定程度上受各主干断裂的次级断裂控制(吴华英等,2008;覃锋等,2009;张作伦等,2009; Zhang *et al.*, 2009; Zeng *et al.*, 2011a, b, 2012)。

① 朝阳金达集团实业有限公司. 2006. 内蒙古敖汉旗鸭鸡山钼铜矿普查地质报告. 内部资料

② 赤峰市天恩矿业有限公司. 2006. 内蒙古自治区敖汉旗白石沟矿区铜矿详查报告. 内部资料

③ 核工业243大队. 2010. 内蒙古自治区敖汉旗白土营子多金属矿普查报告. 内部资料

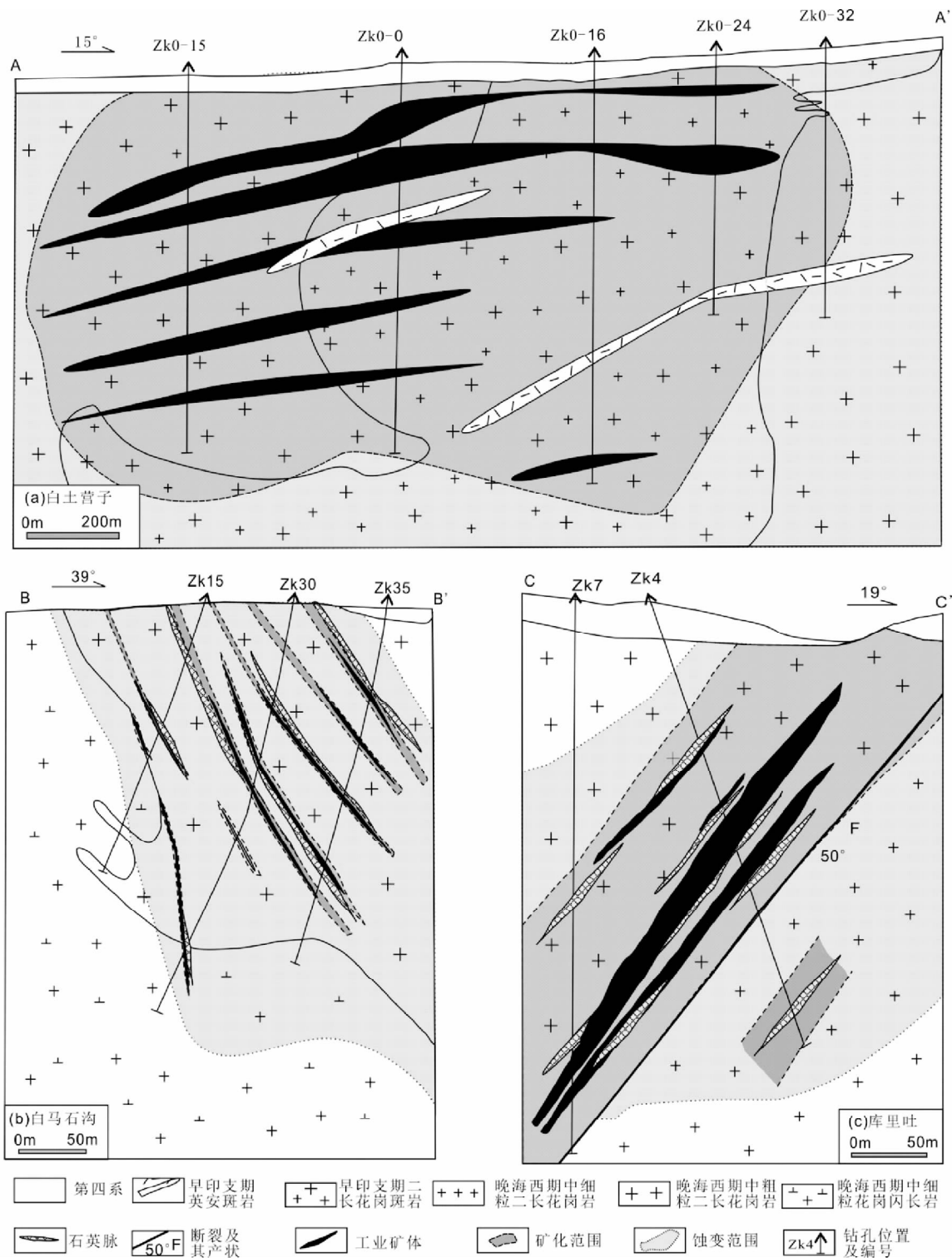


图3 白土营子钼铜矿田内三个矿床代表性地质剖面图

(a)-白土营子斑岩型钼铜矿0号勘探线地质剖面图(据核工业243大队2011年钻孔资料编);(b)-白马石沟石英脉型钼铜矿床9号勘探线地质剖面图(据赤峰市天恩矿业有限公司,2006修改);(c)-库里吐石英脉型钼铜矿床地质剖面图(据王猷和陈绍起,1983^①修改)

Fig. 3 Representative geological sections of the three deposits in the Baituyingzi Mo-Cu ore field

(a)-Line 0 prospecting profile of Baituyingzi porphyry Mo-Cu deposit; (b)-Line 9 prospecting profile of Baimashigou quartz vein type Cu-Mo deposit; (c)-prospecting line profile of Kulitu quartz vein type Mo-Cu deposit

① 王猷,陈绍起. 1983. 昭乌达盟矿产志. 内部资料

3 矿区地质

3.1 地质概况

白土营子矿田范围为:北纬 $119^{\circ}46'30''$ 至 $119^{\circ}50'55''$, 东经 $42^{\circ}22'20''$ 至 $42^{\circ}25'35''$ (图 2)。矿田内出露的地层为下二叠统青风山组中上段酸性火山岩、火山碎屑岩和上侏罗统金刚山组酸性火山碎屑岩。

区内断裂以 EW 向、NW 向和 NE 向最为发育, 次为近 SN 向。库里吐断裂为区内规模最大的 EW 向断裂(长约 2km, 宽约 10~20m, 向南倾, 倾角约 50°), 与其上盘的 NE 向次级断裂一起控制了库里吐矿床的产出(于泽新和龙军, 2007); NW 向的饮马河断裂及其下盘 NW 向次级断裂则一定程度上控制了白马石沟矿床的矿化。

侵入岩发育, 以花岗杂岩岩基产出为主, 少量呈岩株或岩脉产出, 依据野外接触关系和锆石 U-Pb 定年结果(作者未发表数据), 其侵入次序从早到晚依次为: 1) 晚海西期中细粒花岗闪长岩岩基, 基本无矿化和蚀变; 2) 晚海西期中粗粒二长花岗岩岩基(白马石沟岩体), 与二长花岗斑岩接触或遇断裂破碎带时发育较强的矿化和蚀变; 3) 晚海西期中细粒二长花岗岩岩基, 与断裂接触处发育弱蚀变; 4) 隐伏的早印支期二长花岗斑岩岩基(锆石 U-Pb 年龄为 $249.1 \pm 1.3\text{Ma}$), 钻孔已揭露面积约 1km^2 , 呈走向 NW 的椭圆状, 岩体外侧与围岩接触处蚀变矿化强烈; 5) 各种走向的英安斑岩岩脉, 明显切矿化。

需要补充说明, 虽然刘建民等(2007)测得白马石沟岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $229.4 \pm 4.3\text{Ma}$, 但作者对两个样品的锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年结果分别为 $255.6 \pm 1.4\text{Ma}$ 和 $253.6 \pm 1.5\text{Ma}$, 反映该岩体为晚海西期产物; 而且, 笔者在野外工作中发现中细粒二长花岗斑岩中含有白马石沟岩体的捕虏体, 表明白马石沟岩体侵入应早于中细粒二长花岗斑岩。另外, 矿田范围内还见各种走向的石英脉, 受断裂控制明显, 脉宽 0.5~2m, 长 2~100m, 部分石英脉与库里吐和白马石沟矿床矿化密切相关(图 3)。

3.2 矿床地质

矿田内库里吐石英脉型铜钼矿、白土营子斑岩型铜钼矿和白马石沟石英脉型铜钼矿呈 NE-SW 排列, 它们各自的地质特征如下。

3.2.1 白土营子斑岩型铜钼矿床

该矿床为典型的隐伏斑岩型铜钼矿床, 含矿二长花岗斑岩和矿化蚀变范围全由钻孔所揭示, 以钼矿化为主, 伴生铜未达工业指标, 矿床 Mo 品位为 0.08%~0.18% (核工业 243 大队, 2010)。矿体受花岗斑岩与白马石岩体的接触带形态控制, 呈不规则的层状, 单矿体厚 1~50m, 倾角多不超过 20° (图 3a); 已控制的矿化范围主要集中在斑岩体南部, 地表投影呈面积超过 1km^2 的椭圆状(图 2)。

矿化以细脉状(图 4a)和网脉状(图 4b)为主, 其次是浸染状和角砾状。金属矿物主要为辉钼矿和黄铁矿, 局部含少量的黄铜矿, 其中辉钼矿多呈细小鳞片状, 直径 0.05~0.5cm; 非金属矿物以石英、钾长石、绢云母和白云母为主, 少量的伊利石、绿泥石、赤铁矿、萤石、玉髓。

围岩蚀变具有斑岩型矿床典型的面状蚀变特征, 钻孔揭示的蚀变范围在地表投影呈面积大于 4km^2 的椭圆状(且北边边界还未完全控制)(图 2), 空间上由二长花岗斑岩向外依次发育钾化带、绢云母化带和青磐岩化带: 1) 钾化带蚀变表现为钾长石化、硅化和赤铁矿化; 2) 绢云母化带蚀变包括绢云母化、硅化、白云母化和伊利石化; 3) 青磐岩化带蚀变类型有绿泥石化、绿帘石化和赤铁矿化。晚期少量萤石化、方解石化和玉髓化叠加在上述蚀变带上。钼矿化与钾化、硅化、绢云母或白云母化、赤铁矿化密切相关。

根据脉系穿切关系和蚀变晕发育情况, 该矿床流体演化可划分为五个阶段: 岩浆-热液过渡阶段、钾化阶段、钾化向绢云母化过渡阶段(钼和铜主矿化阶段)、绢云母化阶段和热液活动晚期阶段(表 1)。

3.2.2 白马石沟石英脉型铜钼矿床

为部分矿体出露地表的矿床, 以铜矿化为主, 局部伴生钼矿化, 矿床 Cu 平均品位 0.49%, 伴生 Mo 平均品位 0.035% (赤峰市天恩矿业有限公司, 2006)。矿体受 NW 向断裂控制, 呈倾向 NE 的平行脉状产出, 90% 的矿体产于白马石岩体内; 单矿体厚 1~7m, 长 50~300m, 倾角 60° ~ 85° (图 3b)。

矿化以石英大脉状(宽 0.1~1m)为主(图 4c), 大脉两侧发育少量的石英细脉状(宽 0.5~2cm)(图 4d)和浸染状矿化。金属矿物主要为黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿和辉钼矿, 其中黄铜矿和斑铜矿呈他形粒状(常和黄铁矿形成固溶体结构), 辉钼矿多为大片状(直径 0.3~1cm), 局部受构造挤压呈粉末状; 非金属矿物以石英、钾长石、黑云母为主(部分绿泥石化), 少量的萤石、赤铁矿、角闪石、方解石。

围岩蚀变呈 NW 向线状发育, 钻孔已控制蚀变带在地表投影长约 1300m, 宽 500~700m(图 2)。与铜钼矿化密切相关的蚀变类型有钾长石化、黑云母化、赤铁矿化和硅化, 大部分呈线状分布于石英 ± 硫化物脉两侧, 少量呈弥散状分布; 热液活动晚期主要发育绿泥石化、绿帘石化、绢云母化、高岭土化、碳酸盐化, 均沿断裂发育, 并一定程度破坏了早期矿化和蚀变。

根据脉系穿切关系和蚀变晕发育情况, 该矿床流体活动主要发育以下四个阶段: 钾化阶段、钾化和绢云母化过渡阶段(钼和铜主矿化阶段)、绢云母化阶段、热液活动晚期阶段, 与白土营子对比, 铜和钼主矿化阶段完全相同(表 1)。

3.2.3 库里吐石英脉型铜钼矿床

该矿床大部分被第四系覆盖, 以钼矿化为主, 局部铜达工业价值, Mo 平均品位 0.09%, Cu 平均品位 0.4% (曾庆栋等, 2012)。矿体受 EW 向库里吐断裂及其上盘 NE 向次级断

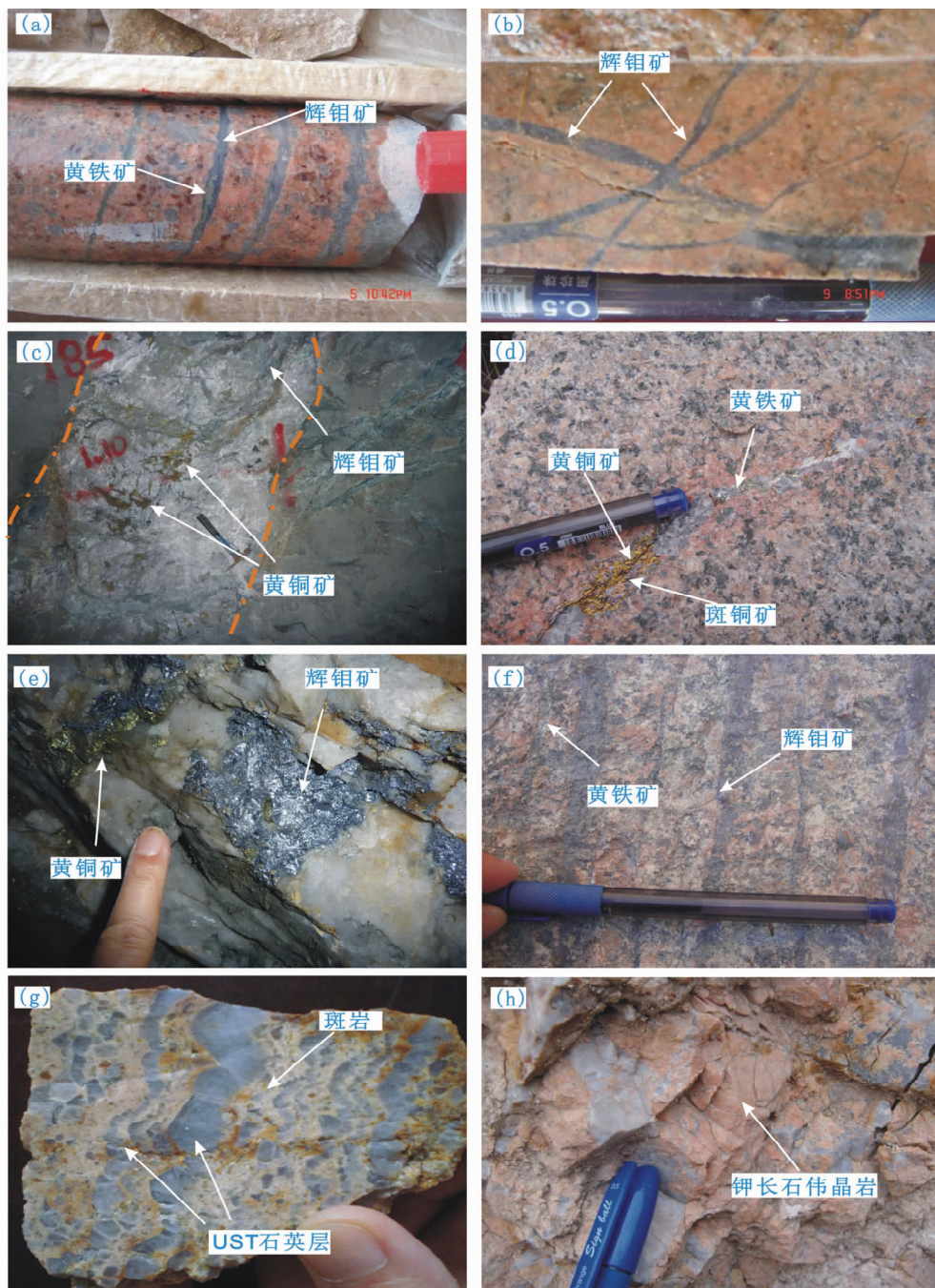


图4 白土营子钼铜矿田内三个矿床主要的矿化类型(a-f)以及岩浆-热液过渡的证据(g,h)相关的典型照片
 (a,b)-白土营子矿化类型:细脉状矿化(a)和网脉状矿化(b);(c,d)-白马石沟矿化类型:石英大脉状矿化(c)和石英细脉状矿化(d);(e、f)-库里吐矿化类型:石英大脉状矿化(e)和石英细脉状矿化(f);(g)-白土营子二长花岗斑岩出溶的UST(单相固结结构)石英,是岩浆出溶流体最直接的证据;(h)-白土营子二长花岗斑岩边上发育大量钾长石-石英伟晶岩,表明斑岩晚期富含挥发份

Fig. 4 Representative photographs of the three deposits in the Baituyingzi Mo-Cu orefield, showing main mineralization styles and evidences of magma-hydrothermal transition

(a, b)-mineralization style of Baituyingzi: veilet (a) and stockwork (b) type; (c, d)-mineralization style of Baimashigou: quartz vein (c) and quartz veilet (d) type; (e, f)-mineralization style of Kulitu: quartz vein (e) and quartz veilet (f) type; (g)-unidirectional solidification texture quarts in monzonite granite porphyry, which are the direct evidences of fluid exsolution from monzonite granite porphyry; (h)-K-feldspar-quartz pegmatite from monzonite granite porphyry, demonstrating that monzonite granite porphyry was rich in volatiles at late stage of evolution

表 1 白土营子钼铜矿田内三个矿床流体演化过程及对应的脉体和钼铜矿化情况

Table 1 Fluid evolution and corresponded vein types and Mo-Cu mineralization of the three deposits in Baituyingzi Mo-Cu orefield

流体演化阶段及对应的脉体特点		矿床名称								
		白土营子斑岩型钼铜矿		白马石沟石英脉型钼铜矿		库里吐石英脉型钼铜矿				
		脉体种类	钼铜矿化	脉体种类	钼铜矿化	脉体种类	钼铜矿化			
岩浆-热液过渡	流体(近)饱和的岩浆	UST 石英脉和钾长石伟晶岩(图 4g, h)	—	—	—	—	—			
钾化	A 脉系列(脉壁不规则,含有钾长石或黑云母晕、石英为等粒状)	石英 ± 辉钼矿 ± 黄铁矿 ± 黄铜矿细脉,脉宽 1 ~ 10mm,钾长石晕	较强	弱	石英 ± 辉钼矿 ± 黄铁矿 ± 黄铜矿脉、石英-黄铜矿(或斑铜矿)-黄铁矿 ± 辉钼矿脉、黄铜矿(或斑铜矿)脉,脉宽 0.5 ~ 50mm,黑云母晕	较强	较强	石英 ± 辉钼矿 ± 黄铁矿 ± 黄铜矿(或斑铜矿)脉,脉宽 1 ~ 50mm,钾长石晕	弱	较强
钾化-绢云母化过渡	B 脉系列(脉壁平直,蚀变晕不明显,石英为梳状)	石英-辉钼矿 ± 黄铜矿 ± 黄铁矿脉,宽 1 ~ 20mm	主阶段	主阶段	石英-辉钼矿 ± 黄铜矿(或斑铜矿) ± 黄铁矿脉、石英-黄铜矿(或斑铜矿)-黄铁矿 ± 辉钼矿脉,宽 1 ~ 150cm	主阶段	主阶段	石英-辉钼矿 ± 黄铁矿 ± 黄铜矿(或斑铜矿)脉、石英-黄铜矿(或斑铜矿)-黄铁矿 ± 辉钼矿脉,宽 0.5 ~ 120cm	主阶段	主阶段
绢云母化	D 脉系列(宽大、绢云母晕、黄铁矿多)	石英-黄铁矿 ± 辉钼矿脉 ± 黄铜矿,宽 4 ~ 50mm	弱	弱	石英-黄铁矿 ± 黄铜矿(或斑铜矿) ± 辉钼矿脉,宽 2 ~ 150cm	弱	弱	石英-黄铁矿 ± 辉钼矿 ± 黄铜矿(或斑铜矿)脉,宽 1 ~ 120cm	较强	弱
热液晚期	低温脉系(无硫化物沉淀)	萤石、方解石、玉髓脉	—	—	宽大石英脉、方解石脉	—	—	宽大石英脉、方解石脉	—	—

裂控制,呈向南倾斜的平行脉状、扁豆状、透镜状产出,90%的矿体产于白马石岩体内;单矿体厚 1 ~ 5m,平均厚 3.6m,最厚达 27m,倾角 40° ~ 60°(图 3c)。

与白马石沟类似,矿化以石英大脉状(图 4e)为主,大脉两侧发育石英细脉状(图 4f)和浸染状矿化,靠近断裂边部局部发育蚀变岩型矿化。金属矿物主体为辉钼矿、黄铜矿、斑铜矿和黄铁矿,其中辉钼矿多呈片状(直径 0.1 ~ 0.8cm),黄铜矿和斑铜矿呈他形粒状;非金属矿物包括石英、钾长石、白云母、绢云母,少量的绿泥石、方解石、伊利石、赤铁矿。

该矿床围岩蚀变呈 EW 向线状发育,钻孔已控制蚀变范围在地表投影宽 10 ~ 100m,长约 1.5km(图 2)。蚀变类型与白土营子类似,以钾长石化、硅化、绢云母或白云母化、伊利石化、绿泥石化、赤铁矿化和碳酸盐化为主,其中钾长石化、硅化、绢云母或白云母化、赤铁矿化与钼铜矿化关系密切,而伊利石、绿泥石化以及碳酸盐化多为晚期沿断裂叠加产生。

根据脉系穿切关系和蚀变晕发育情况,该矿床流体活动主要发育以下四个阶段:钾化阶段、钾化和绢云母化过渡阶段(钼和铜主矿化阶段)、绢云母化阶段、热液活动晚期阶段,与白土营子、白马石沟矿床的铜和钼主矿化阶段完全相同(表 1)。

4 样品及测试

为查明矿田内三个矿床的钼铜成矿年龄,本次系统采集了 15 件辉钼矿样品进行 Re-Os 同位素年龄测定,其中白土营子矿床 6 件、白马石沟矿床 4 件、库里吐矿床 5 件。样品平面分布位置见图 2,具体特征描述见表 2,样品涵盖了各矿床的主要矿化类型及钼铜矿化期次。

辉钼矿单矿物样品分离是在河北省区域地质矿产调查研究所完成,矿石样品经粉碎、分离、粗选和精选,获得了纯度 >99% 的辉钼矿单矿物。样品辉钼矿的 Re-Os 同位素组成在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素年代学实验室测试完成,Re、Os 化学分离步骤和质谱测定主要包括分解样品、蒸馏分离 Os、萃取分离 Re、质谱测定四步,分析流程和方法详见相关文献(Shirey and Walker, 1995; Du *et al.*, 2004)。实验过程中采用国家标准物质 GBW04436(JDC)测定结果来监控化学流程和分析数据的可靠性,质谱测定是在电感耦合等离子体质谱仪 TJA X-series ICP-MS 上进行的,然后利用 Smoliar *et al.* (1996) 的公式计算 Re-Os 模式年龄(t): $t = [\ln(1 + \frac{^{187}\text{Os}}{^{187}\text{Re}})] / \lambda$, 其中 $\lambda(^{187}\text{Re 衰变常数}) = 1.666 \times 10^{-11} \text{yr}^{-1}$ 。

表2 白土营子钼铜矿田辉相矿 Re-Os 同位素测年样品及数据

Table 2 Re-Os isotopic dating specimens and data for molybdenum from the Baituyingzi Mo-Cu orefield

样品号	采样位置	样品描述	样重(g)	Re(±2σ) (×10 ⁻⁶)	¹⁸⁷ Re(±2σ) (×10 ⁻⁶)	¹⁸⁷ Os(±2σ) (×10 ⁻⁹)	模式年龄 (±2σ)(Ma)
白土营子							
T-162	Zk04-290m	宽3mm的石英-辉钼矿-黄铁矿脉(钾化晕)	0.05036	45.99±0.43	28.91±0.27	118.7±1.1	246.0±3.8
T-182	Zk02-550m	宽3mm的石英-辉钼矿脉(无蚀变晕)	0.05088	56.67±0.80	35.62±0.51	146.6±1.2	246.6±4.5
T-195	Zk16-23-104m	宽4mm的石英-黄铜矿-辉钼矿-黄铁矿脉(无蚀变晕)	0.05092	54.79±0.52	34.44±0.33	142.1±1.3	247.2±3.8
T-202	Zk16-24-205m	宽3mm的石英-辉钼矿-黄铁矿脉(钾化晕)	0.05025	47.22±0.53	29.68±0.33	123.1±1.0	248.4±3.9
T-208	Zk7-0-211m	含稠密浸染状辉钼矿的钾化斑岩	0.05022	40.33±0.45	25.33±0.28	104.9±0.9	248.2±4.1
T-214	Zk16-23-284m	宽2~3mm的石英-辉钼矿脉(无蚀变晕)	0.05093	39.60±0.37	24.90±0.23	102.1±0.9	245.7±3.8
白马石沟							
BMS-2	竖井1	宽3cm的石英-黄铜矿-辉钼矿-黄铁矿脉(钾长石晕)	0.01059	25.69±0.23	16.15±0.15	67.2±0.6	249.2±3.6
BMS-4	竖井1	宽1m的石英-辉钼矿-黄铜矿-黄铁矿脉(无蚀变晕)	0.01043	37.55±0.28	23.60±0.18	97.5±1.1	247.4±3.9
BMS-5	竖井2	宽3cm的石英-辉钼矿脉(无蚀变晕)	0.10016	38.24±0.34	24.03±0.22	99.3±0.8	247.5±3.6
BMS-6	竖井2	宽10cm的石英-黄铜矿-辉钼矿-黄铁矿脉(黑云母晕)	0.01084	22.69±0.20	14.26±0.12	58.6±0.5	246.0±3.5
库里吐							
KLT-1	竖井1	宽0.5cm的石英-辉钼矿(弱绢云母蚀变晕)	0.01037	82.86±0.67	52.08±0.42	213.2±1.8	245.3±3.5
KLT-2	竖井1	宽1cm的石英-辉钼矿-黄铁矿脉(无蚀变晕)	0.10072	36.46±0.51	22.91±0.32	94.5±0.8	247.1±4.5
KLT-3	竖井2	宽4cm的石英-黄铜矿-辉钼矿-黄铁矿脉(绢云母晕)	0.01045	76.48±0.69	48.07±0.44	197.9±1.7	246.5±3.6
KLT-4	竖井2	宽10cm的石英-辉钼矿脉(无蚀变晕)	0.01066	38.10±0.31	23.94±0.19	98.1±0.9	245.5±3.6
KLT-5	竖井2	宽1cm的石英-辉钼矿-黄铁矿脉(绢云母晕)	0.01004	56.03±0.54	35.22±0.34	143.4±1.3	243.9±3.7

注:1)辉相矿 Re-Os 定年实验误差是2σ;2)Re、Os含量的不确定度包括样品和稀释剂的称量误差、稀释剂的标定误差、质谱测量的分馏校正误差、待分析样品同位素比值测量误差;3)模式年龄的不确定度包括衰变常数的不确定度(1.02%)

5 测试结果

15件辉钼矿样品 Re-Os 同位素测试结果见表2。白土营子矿床6件辉钼矿样品的 Re 含量介于 $39.60 \times 10^{-6} \sim 56.67 \times 10^{-6}$ 之间, Re 与 ¹⁸⁷Os 含量变化协调。采用 Isoplot 软件(Ludwig, 2003) 计算得到等时线年龄和加权平均年龄分别为 $248.0 \pm 10\text{Ma}$ (MSWD = 0.52, 2σ) (图5a)、 $247.0 \pm 1.6\text{Ma}$ (MSWD = 0.31, 2σ) (图5a'), 比较吻合。该矿床6件辉钼矿的 Re-Os 同位素数据的等时线年龄(图5a) MSWD 值较小, 说明等时线年龄可靠; 由等时线获得的 ¹⁸⁷Os 初始值为 $-0.5 \pm 5.0 \times 10^{-9}$, 接近于0, 表明辉钼矿形成时几乎不含 ¹⁸⁷Os, 辉钼矿中的 ¹⁸⁷Os 系由 ¹⁸⁷Re 衰变形成, 符合 Re-Os 同位素体系模式年龄计算条件。总之, 白土营子斑岩型钼铜矿床

辉钼矿的结晶年龄为 $248.0 \pm 10\text{Ma}$ 。

白马石沟矿床4件辉钼矿样品的 Re 含量介于 $22.69 \times 10^{-6} \sim 38.24 \times 10^{-6}$ 之间, Re 与 ¹⁸⁷Os 含量变化协调。采用 Isoplot 软件(Ludwig, 2003) 计算得到等时线年龄和加权平均年龄分别为 $248.6 \pm 6.7\text{Ma}$ (MSWD = 1.06, 2σ) (图5b)、 $247.5 \pm 1.8\text{Ma}$ (MSWD = 0.54, 2σ) (图5b'), 比较接近。该矿床4件辉钼矿的 Re-Os 同位素数据的等时线年龄(图5b) MSWD 值较小, 说明等时线年龄可靠; 由等时线获得的 ¹⁸⁷Os 初始值为 $-0.4 \pm 2.0 \times 10^{-9}$, 接近于0, 表明辉钼矿形成时几乎不含 ¹⁸⁷Os, 辉钼矿中的 ¹⁸⁷Os 系由 ¹⁸⁷Re 衰变形成, 符合 Re-Os 同位素体系模式年龄计算条件。因此, 白马石沟石英脉型铜钼矿床辉钼矿的结晶年龄为 $248.6 \pm 6.7\text{Ma}$ 。

库里吐矿床5件辉钼矿样品的 Re 含量介于 $36.46 \times 10^{-6} \sim 82.86 \times 10^{-6}$ 之间, Re 与 ¹⁸⁷Os 含量变化协调。采用

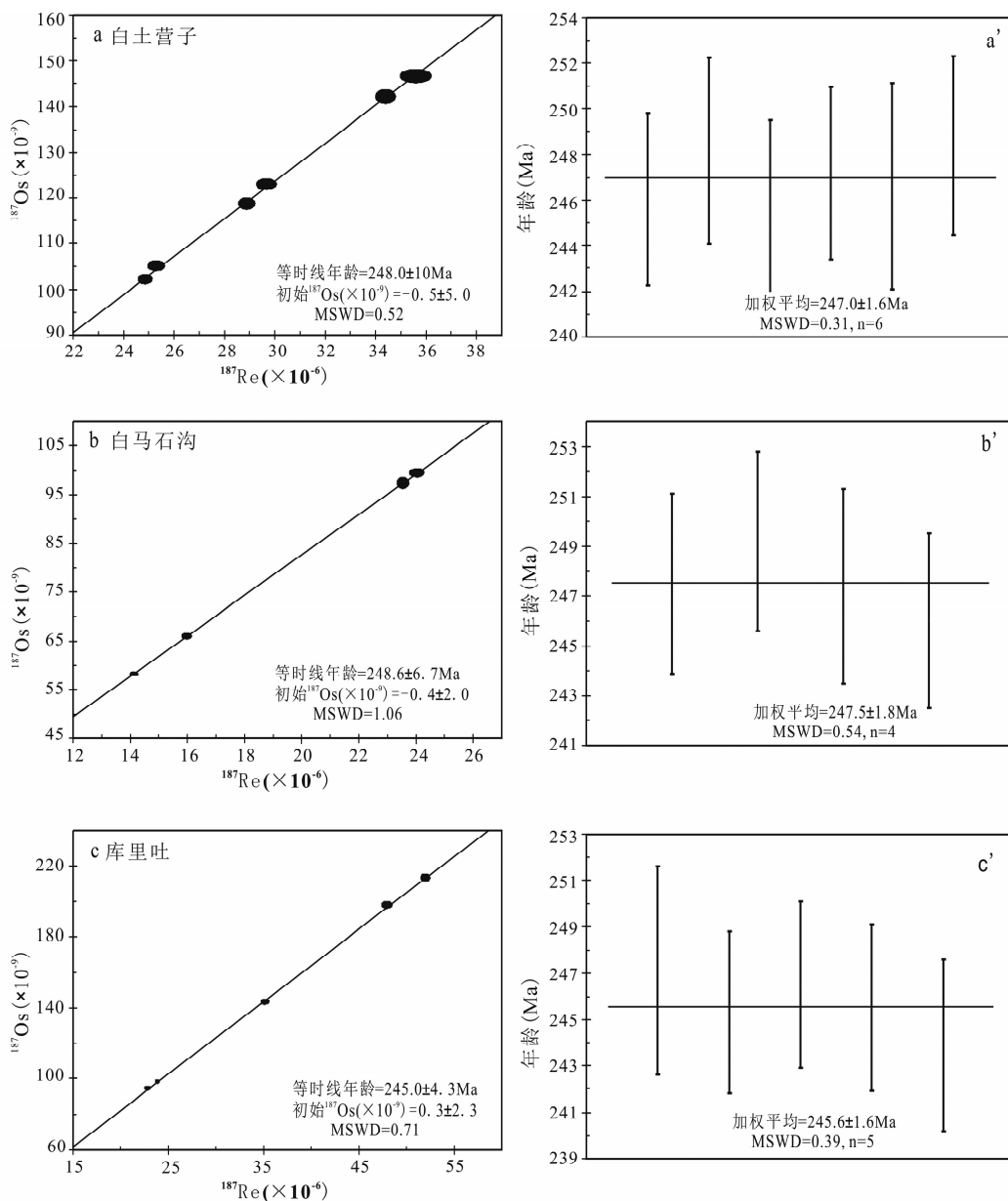


图5 白土营子斑岩型铜钼矿(a、a')、白马石沟石英脉型铜钼矿(b、b')和库里吐石英脉型铜钼矿(c、c')的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄以及加权平均年龄

Fig. 5 Re-Os isochron diagrams and weighted average model age diagrams for molybdenite samples from the Baituyingzi porphyry Mo-Cu deposit (a, a'), Baimashigou quartz vein type Cu-Mo deposit (b, b') and Kuliutu quartz vein type Mo-Cu deposit (c, c'), respectively

Isoplot 软件 (Ludwig, 2003) 计算得到等时线年龄和加权平均年龄分别为 $245.0 \pm 4.3 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.71, 2\sigma$) (图 5c)、 $245.6 \pm 1.6 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.39, 2\sigma$) (图 5c'), 基本相同。该矿床 5 件辉钼矿的 Re-Os 同位素数据的等时线年龄 (图 5c) MSWD 值较小, 说明等时线年龄可靠; 由等时线获得的 ^{187}Os 初始值为 $-0.3 \pm 2.3 \times 10^{-9}$, 接近于 0, 表明辉钼矿形成时几乎不含 ^{187}Os , 辉钼矿中的 ^{187}Os 系由 ^{187}Re 衰变形成, 符合 Re-Os 同位素体系模式年龄计算条件。以上分析表明库里吐石英脉型铜钼矿床辉钼矿的结晶年龄为 $245.0 \pm 4.3 \text{ Ma}$ 。

6 讨论

6.1 白土营子矿田钼铜成矿时限和期次

白土营子矿田内有多期岩浆活动, 三个矿床都产在不同期次岩体的接触带附近, 且蚀变矿化特点显示矿床形成与岩浆热液活动密切相关。那么, 矿田内究竟存在几次钼铜成矿事件? 分别与哪期岩浆活动有关?

前人对矿田的成矿年代学研究仅集中在库里吐石英脉型钼铜矿床, 获得其辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 $236 \pm 3.3\text{Ma}$ (Zhang *et al.*, 2009), 反映该矿床形成于早-中三叠世。本文通过辉钼矿 Re-Os 同位素测年分别获得白土营子斑岩型钼铜矿床辉钼矿结晶年龄为 $248.0 \pm 10\text{Ma}$ 、白马石沟石英脉型钼铜矿床辉钼矿的结晶年龄为 $248.6 \pm 6.7\text{Ma}$ 、库里吐石英脉型钼铜矿床辉钼矿的结晶年龄为 $245.0 \pm 4.3\text{Ma}$, 在误差范围内相互吻合, 三个年龄不仅 MSWD 值均很小 ($0.52 \sim 1.06$), 还与各自的加权平均年龄吻合很好。结合矿床地质特征部分可知, 三个矿床中铜和钼矿化紧密共生且主矿化期一致(表 1)。因此认为: 1) 三个矿床均属早三叠世成矿 ($248 \sim 245\text{Ma}$); 2) 矿田内岩浆作用频繁, 期次较多, 但钼铜成矿事件只与一期岩浆热液活动有关, 斑岩型和石英脉型钼铜成矿隶属统一的岩浆-热液钼铜成矿系统; 3) 库里吐矿床的 Re-Os 年龄较其他两个矿床稍年轻, 可能缘于辉钼矿样品是钾化阶段之后的产物, 而其他两个矿床包含较多钾化阶段辉钼矿样品(表 2)。

基于库里吐石英脉型钼铜矿床主体产于白马石沟岩体内, 前人多认为该岩体是库里吐矿床的成矿母岩(如吴华英等, 2008), 但刘建民等(2007)测得一个样品的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $229.4 \pm 4.3\text{Ma}$, 晚于本文获得的辉钼矿 Re-Os 年龄, 与野外地质现象不相符。前文已经介绍, 笔者研究证实该岩体应是晚海西期产物, 其侵入时间早于二长花岗斑岩和中细粒二长花岗岩, 而后两者都是含矿围岩, 因此白马石沟岩体很有可能不是库里吐矿床的成矿母岩。

结合野外地质现象和作者未发表的锆石 U-Pb 定年结果, 本文认为矿田中部隐伏的二长花岗斑岩侵位伴随的流体活动最为可能导致了三个矿床钼铜成矿事件, 具体证据如下: 1) 二长花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄为 $249.1 \pm 1.3\text{Ma}$ (作者未发表数据), 与三个矿床辉钼矿 Re-Os 年龄在误差范围内非常接近, 且该年龄稍微大于辉钼矿结晶年龄也符合岩浆岩结晶温度高于辉钼矿结晶温度的地质事实; 2) 二长花岗斑岩西北边缘与围岩接触处发育大量 UST 结构石英、伟晶岩等(图 4g, h)(一般认为 UST 是岩浆-热液过渡阶段的产物, 其中石英层代表了流体, 而斑岩代表了岩浆, Harris *et al.*, 2004; Seedorff *et al.*, 2005), 是其出溶或从深部岩浆房带来流体的直接证据; 3) 白土营子斑岩型钼铜矿床矿化和蚀变围绕二长花岗斑岩发育直接表明二长花岗斑岩是该矿床的成矿母岩; 4) 从目前钻孔揭示情况来看, 二长花岗斑岩东北边界未完全控制, 表明其距库里吐矿床应小于图 2 所示的约 1km, 该斑岩还向 SW 侧伏(如图 3a, 深部 SW 边界未完全控制), 反映其深部距白马石矿床应小于 2.3km, 且库里吐和白马石矿床均受向斑岩倾斜的断裂控制, 因此, 二长花岗斑岩完全有可能在深部为库里吐和白马石矿床提供成矿流体; 5) 二长花岗斑岩岩株是矿田内钼铜矿化影响的最年轻岩浆岩; 6) 库里吐北边出露的中细粒二长花岗岩侵位时间稍早于二长花岗斑岩, 但蚀变和矿化非常弱。

6.2 白土营子矿田早三叠纪钼铜成矿地球动力学背景及意义

世界上目前识别的斑岩钼(铜)矿产出的构造背景主要有两类: 一是与陆缘弧后伸展、陆内裂谷以及造山后伸展有关的伸展背景, 如 Climax 和 Henderson 钼矿产在弧后 Rio Grande 裂谷(Westra and Keith, 1981; Carten *et al.*, 1993), 中国大部分的斑岩型钼矿形成于燕山期($190 \sim 130\text{Ma}$), 构造背景为大陆碰撞后的陆内伸展环境(李永峰等, 2005; 毛景文等, 2005; Zhang *et al.*, 2009; Zeng *et al.*, 2011a), 由挤压向伸展的过渡阶段是形成这类矿床的有利时间(陈衍景和富士谷, 1992; Chen *et al.*, 2000, 2007; 毛景文等, 2005; 李诺等, 2007; 侯增谦和杨志明, 2009; Li *et al.*, 2012, 2013); 二是与板块俯冲有关的挤压背景, 如 Endako 钼铜矿形成于陆缘弧环境(Steve *et al.*, 2009), 秦克章等(2008)发现西藏冈底斯的沙让斑岩钼矿明显形成于大陆碰撞环境, 但该环境下形成的斑岩钼矿在规模及数量上远较伸展背景小(孙燕等, 2012)。

近几年来, 研究者们陆续在华北地台北边缘及邻区(如燕辽钼矿带、西拉沐沦钼矿带、内蒙古中部地区)获得了一批代表三叠纪钼铜成矿事件的年代学信息, 年龄集中在 $248 \sim 222\text{Ma}$ (如表 3)。对于这类矿床形成的构造背景, 多数学者将其归于碰撞后的伸展环境(如代军治等, 2007; Wan *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2009), 但 Zeng *et al.* (2012) 则认为车户沟斑岩型钼铜矿床形成于同碰撞环境。最近, 曾庆栋等(2012)指出: 由于西伯利亚板块与华北板块碰撞发生在二叠纪中晚期且有可能持续到三叠纪中期, 之后进入后碰撞伸展过程(如 Wu *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2009), 那么 $248 \sim 236\text{Ma}$ (早印支期)的钼矿应该形成于西伯利亚板块与华北板块同碰撞构造环境, $236 \sim 222\text{Ma}$ (中印支期)的钼成矿产生于碰撞后伸展构造环境。本文研究的白土营子矿田钼铜成矿作用发生在早三叠世($245 \sim 248\text{Ma}$), 显然属于曾庆栋等(2012)划分的 $248 \sim 236\text{Ma}$ (早印支期)钼成矿期, 表明该矿田钼铜矿化应该形成于西伯利亚板块与华北板块同碰撞造山过程, 且该期钼矿化在华北北缘附近具有普遍性。

值得提及的是, 华北板块南缘及邻区三叠纪钼矿化主要发生在 $226 \sim 210\text{Ma}$, 形成于扬子板块与华北板块同碰撞造山过程(陈衍景等, 2009; 陈衍景, 2010; 曾庆栋等, 2012)。由此看来, 不仅斑岩型钼矿床可形成于同碰撞的构造环境(秦克章等, 2008; Zeng *et al.*, 2012), 同碰撞造山背景下钼矿化可能还有一定的普遍性, 值得引起关注。

6.3 华北板块北缘及邻区早三叠世钼铜成矿规律及意义

就目前华北板块北缘及邻区来看, 已发现的形成于早三叠世的钼铜矿床自西向东依次为: 查干花斑岩型钼铜矿、查干德尔斯斑岩型钼铜矿床、车户沟斑岩-石英脉型钼铜矿床、元宝山石英脉型钼矿床、金厂沟梁对面沟斑岩型钼铜床以及

表 3 华北板块北缘及邻区早三叠纪钼多金属矿床一览表

Table 3 The Early Triassic molybdenum polymetallic ore deposits in northern margin of the North China Plate and its adjacent areas

矿床名称	矿化类型	成矿元素组合	地理位置	Re-Os 等时线年龄 (Ma)	资料来源
查干花	斑岩型	Mo-Cu	乌拉特后旗	242.7 ± 3.5	蔡明海等, 2011a
查干德尔斯	斑岩型	Mo-Cu	乌拉特后旗赛乌素镇	243.0 ± 2.2	蔡明海等, 2011b
车户沟	斑岩-石英脉型	Mo-Cu	赤峰市松山区	245 ± 5	Zeng <i>et al.</i> , 2012
元宝山	石英脉型	Mo	赤峰市元宝山区	248 ± 3	Liu <i>et al.</i> , 2010
对面沟	斑岩型	Mo-Cu	赤峰市敖汉旗	244.7 ± 2.5	江思宏等, 2011
白土营子	斑岩-石英脉型	Mo-Cu	赤峰市敖汉旗	248 ~ 245	本文

本文研究的白土营子斑岩-石英脉型铜钼矿田(图 1、表 3)。那么,该期形成于同碰撞环境的铜钼矿床有何特殊之处? 结合前人研究成果,笔者对区域早三叠世铜钼成矿规律进行了初步总结:

1) 空间分布: 从图 1 来看这些矿床均分布在华北板块北缘,呈 EW 向的带状分布;

2) 矿化类型: 斑岩型矿化和石英脉型矿化均较发育(表 3);

3) 成矿时代及应力状况: 上述矿床成矿时代在误差范围内基本一致(243 ~ 248Ma), 由于西伯利亚板块与华北板块碰撞发生在二叠纪中晚期且有可能持续到三叠纪中期,之后进入后碰撞伸展过程(如 Wu *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2009), 这些矿床应形成于碰撞造山晚期挤压向碰撞后伸展过渡的应力环境(陈衍景等, 2009), 与伸展背景下钼矿形成所处的应力形式相似(毛景文等, 2005; 侯增谦和杨志明, 2009);

4) 成矿元素组合及意义: 除了元宝山钼矿外, 这些矿床都是铜钼共生(表 3)。而区内已发现的早三叠纪之后形成的钼矿床多为单钼矿床, 如小东沟(覃峰等, 2009)、碾子沟(张作伦等, 2009)、敖伦花(马星华等, 2009)、鸡冠山(陈伟军等, 2010)、半拉山钼矿(张晓静等, 2010)等。这与陈衍景等(2012)对东北地区钼矿成矿规律总结后得出的结论一致, 即该区单钼矿床或以钼为主的矿床始现于三叠纪(< 250Ma), 以铜为主的铜钼矿床整体年龄偏老。

笔者认为造成上述差异的因素与剥蚀的关系不大, 而主要受构造背景和岩浆演化方式控制。从全球主要矿床来看, 在大洋俯冲-大陆碰撞-碰撞后(造山后)-板内(陆内)旋回中, 斑岩铜矿多形成于俯冲和碰撞阶段的应力转换期, 环境偏挤压性质, 应力调整比较迅速, 有利于岩浆快速熔融和上升; 斑岩钼矿倾向形成于旋回起始和结束阶段偏伸展的环境, 应力比较稳定, 有利于岩浆长时间结晶分异(孙燕等, 2012)。

本区在二叠-早三叠世时属于大陆同碰撞阶段(Wu *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2009; 陈衍景等, 2009), 岩浆演化以部分熔融占优势(如好力宝铜钼矿、车户沟钼铜矿、库里吐钼铜矿; 张连昌等, 2010), 因此形成的钼矿含铜比较高; 而在 160Ma 之后本区完全属于板内伸展环境(Wu *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2009), 岩浆以分离结晶作用为主(如小东沟钼矿; 张连昌等, 2010), 利于形成单钼矿化。刘翼飞等(2012)

也认为内蒙中部苏尼特左旗地区晚泥盆世时期以铜为主的斑岩型矿化和早二叠世及其后的以钼为主的斑岩型矿化是该区成矿环境变化的反映。

由此看来, 华北板块北缘及邻区各时代斑岩型铜钼和钼铜矿床铜/钼比例的变化一定程度示踪了该区的构造演化历史, 表明该区在大规模钼矿化之前有产生造山环境铜矿化的迹象。但由于斑岩铜矿床一般产于碰撞造山带或岛弧环境地下 2 ~ 4km, 斑岩钼矿多产于地下 3 ~ 6km(Sillitoe, 2010), 华北克拉通北缘及邻区已经发现了如此大量的钼矿, 反映该区矿床的剥蚀程度较深, 这可能是该区较少发现世界级斑岩铜矿床的重要原因之一。

越来越多早三叠世及之前的斑岩型铜钼矿床的发现, 显示该区寻找相应时期与钼伴生的铜矿资源还具有较大的潜力。鉴于这些矿床主要分布在古板块边缘、石英脉和斑岩型矿化均发育、具有铜钼共伴生的特点、且时控性明显(早三叠世之前), 以后该区找矿勘查过程中应该注意以上规律。

7 结论

(1) 白土营子钼铜矿田中白土营子斑岩型钼铜矿床、白马石沟石英脉型钼铜矿以及石英脉型钼铜矿床在成矿元素组合、铜和钼主矿化阶段、流体演化及脉系发育情况上大体相似, 矿床形成都与岩浆热液作用密切相关。

(2) 对白土营子斑岩型钼铜矿床、白马石沟石英脉型钼铜矿以及石英脉型钼铜矿床中的 15 件辉钼矿进行了 Re-Os 同位素分析, 分别获得了 248.0 ± 10Ma、248.6 ± 6.7Ma、和 245.0 ± 4.3Ma 的等时线年龄, 表明矿田的钼铜矿化均发生在早三叠世(248 ~ 245Ma), 隶属统一的岩浆-热液成矿系统, 其大规模含钼流体的形成可能与出溶 UST 石英的二长花岗斑岩岩浆作用有关。

(3) 白土营子钼铜矿化系统形成于早三叠世西伯利亚板块与华北板块同碰撞造山过程晚期, 该期钼铜成矿作用在华北板块北缘及邻区具有一定的普遍性、钼铜共伴生的特点明显、沿板块边缘分布, 找矿前景可观。

致谢 野外工作中得到了赤峰市敖汉旗国土局、核工业 243 大队、敖汉旗聚鑫矿业等单位的大力支持和帮助; 辉钼矿样品 Re-Os 同位素测定过程中国家地质实验测试中心 Re-Os

同位素年代学实验室杜安道、屈文俊和李超等人员付出了辛勤劳动;论文审理期间两名匿名审稿人提出了宝贵的意见;在此一并致以衷心的感谢!

References

- Cai MH, Zhang ZG, Qu WJ, Peng ZA, Zhang SQ, Xu M, Chen Y and Wang XB. 2011a. Geological characteristics and Re-Os dating of the Chaganhua molybdenum deposit in Urad Rear Banner, western Inner Mongolia. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(1): 64–68 (in Chinese with English abstract)
- Cai MH, Peng ZA, Qu WJ, He ZY, Feng G, Zhang SQ, Xu M and Chen Y. 2011b. Geological characteristics and Re-Os dating of molybdenites in Chagandeersi molybdenum deposit, western Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 30(3): 377–384 (in Chinese with English abstract)
- Carten RB, White WH and Stein HJ. 1993. High-grade granite-related molybdenum systems: Classification and origin. In: Kirkham RV, Sinclair WD, Thorpe RI and Duke JM (eds.). *Mineral Deposit Modeling*. Geological Association of Canada, Special Papers, 40: 521–554
- Chen WJ, Liu JM, Liu HT, Sun XG, Zhang RB, Zhang ZL and Qin F. 2010. Geochronology and fluid inclusion study of the Jiguanshan porphyry Mo deposit, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1423–1436 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ and Fu SG. 1992. *Gold Mineralization in West Henan*. Beijing: Seismological Press, 1–234 (in Chinese)
- Chen YJ, Li C, Zhang J, Li Z and Wang HH. 2000. Sr and O isotopic characteristics of porphyries in the Qinling molybdenum deposit belt and their implication to genetic mechanism and type. *Science in China (Series D)*, 43(Suppl. 1): 82–94
- Chen YJ, Chen HY, Zaw K, Pirajno F and Zhang ZJ. 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview. *Ore Geology Reviews*, 31(1–4): 139–169
- Chen YJ, Zhai MG and Jiang SY. 2009. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2695–2726 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ. 2010. Indosinian tectonic setting, magmatism and metallogenesis in Qinling Orogen, Central China. *Geology in China*, 37(4): 854–865 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Zhang C, Li L, Yang YF and Deng K. 2012. Geology of the Mo deposits in Northeast China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(5): 1223–1268 (in Chinese with English abstract)
- Chu SX, Zeng QD, Liu JM, Zhang WQ, Zhang ZL, Zhang S and Wang ZC. 2010. Characteristics and its geological significance of fluid inclusions in Chehugou porphyry Mo-Cu deposit, Xilamulun molybdenum metallogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2465–2481 (in Chinese with English abstract)
- Dai JZ, Xie GQ, Duan HC, Yang FQ and Zhao CS. 2007. Characteristics and evolution of ore-forming fluids from the Sadaigoumen porphyry molybdenum deposit, Hebei. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2519–2529 (in Chinese with English abstract)
- Du AD, Wu SQ, Sun DZ, Wang SX, Qu WJ, Markey R, Stain H, Morgan J and Malinovsky D. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenites HLP and JDC. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(1): 41–52
- Harris AC, Kamenetsky VS, White NC and Steele DA. 2004. Volatile phase separation in silicic magmas at Bajo de la Alumbrera porphyry Cu-Au deposit, NW Argentina. *Resource Geology*, 54(3): 341–356
- Hou ZQ and Yang ZM. 2009. Porphyry deposits in continental settings of China: Geological characteristics, magmatic-hydrothermal system, and metallogenic model. *Acta Geologica Sinica*, 83(12): 1779–1817 (in Chinese with English abstract)
- Jiang SH, Nie FJ, Bai DM, Liu YF and Liu Y. 2011. Geochronological evidence for Indosinian mineralization in Baiyinnuoer Pb-Zn deposit of Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 30(5): 787–798 (in Chinese with English abstract)
- Li BL, Zhang J, Zhang H, Xu QL and Yu ZX. 2010. Ore-forming fluid features and metallogenesis of Yajishan molybdenum-copper deposit, Chifeng area, Inner Mongolia. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(1): 61–72 (in Chinese with English abstract)
- Li N, Chen YJ, Zhang H, Zhao TP, Deng XH, Wang Y and Ni ZY. 2007. Molybdenum deposits in East Qinling. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 186–198 (in Chinese with English abstract)
- Li N, Chen YJ, Pirajno F, Gong HJ, Mao SD and Ni ZY. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, trace element and Hf isotope geochemistry of the Heyu granite batholith, eastern Qinling, Central China: Implications for Mesozoic tectono-magmatic evolution. *Lithos*, 142–143: 34–47
- Li N, Chen YJ, Pirajno F and Ni ZY. 2013. Timing of the Yuchiling giant porphyry Mo system, and implications for ore genesis. *Mineralium Deposita*, doi: 10.1007/s00126-012-0441-4
- Li YF, Mao JW, Hu HB, Guo BJ and Bai FJ. 2005. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic molybdenum deposits in East Qinling area. *Mineral Deposits*, 22(3): 292–304 (in Chinese with English abstract)
- Liu JM, Zhang R and Zhang QZ. 2004. The regional metallogeny of Da Hinggan Ling, China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 269–277 (in Chinese with English abstract)
- Liu JM, Zhao Y, Sun YL, Li DP, Liu J, Chen BL, Zhang SH and Sun WD. 2010. Recognition of the Latest Permian to Early Triassic Cu-Mo mineralization on the northern margin of the North China block and its geological significance. *Gondwana Research*, 17(1): 125–134
- Liu YF, Nie FJ, Jiang SH, Hou WR, Liang QL, Zhang K and Liu Y. 2012. Geochronology of Zhunshujihua molybdenum deposit in Sonid Left Banner, Inner Mongolia, and its geological significance. *Mineral Deposits*, 31(1): 119–128 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig K. 2003. *Isoplot/Ex 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, CA, USA
- Ma XH, Chen B, Lai Y and Lu YH. 2009. Petrogenesis and mineralization chronology study on the Aolunhua porphyry Mo deposit, Inner Mongolia, and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2939–2950 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Zhang ZH, Li XF, Wang YT, Zhang CQ and Li YF. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169–188 (in Chinese with English abstract)
- Qin F, Liu JM, Zeng QD and Luo ZH. 2009. Petrogenetic and metallogenic mechanism of the Xiaodonggou porphyry molybdenum deposit in Hexigten Banner, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3357–3368 (in Chinese with English abstract)
- Qin KZ, Li GM, Zhao JX, Li JX, Xue GQ, Yan G, Su DK, Xiao B, Chen L and Fan X. 2008. Discovery of Sharang large-scale porphyry molybdenum deposit, the first single Mo deposit in Tibet and its significance. *Geology in China*, 35(6): 1101–1112 (in Chinese with English abstract)
- Seedorff E, Dilles JH, Proffett JM, Einaudi MT, Zurcher L, Stavast WJA, Johnson DA and Barton MD. 2005. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume: 251–298
- Shirey SB and Walker RJ. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis. *Analytical Chemistry*, 67(13): 2136–2141
- Sillitoe RH. 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41
- Smoliar MI, Walker RJ and Morgan JW. 1996. Re-Os ages of group IIA,

- IIIA, IVA, and IVB iron meteorites. *Science*, 271(5252): 1099 – 1102
- Steve L and Plumlee GS. 2009. Climax-type porphyry molybdenum deposits. U. S. Geological Survey Open-File Report, 2009 – 1215: 16
- Sun Y, Liu JM and Zeng QD. 2012. An approach to the metallogenesis mechanism of porphyry copper (molybdenum) deposits and porphyry molybdenum (copper) deposits: Influence of evolving processes of ore-forming fluids and tectonic settings. *Earth Science Frontiers*, 19(6): 179 – 193 (in Chinese with English abstract)
- Wan B, Ernst H, Zhang LC, Rocholl A, Chen ZG, Wu HY and Chen FK. 2009. Rb-Sr geochronology of chalcopyrite from the Chehugou porphyry Mo-Cu deposit (Northeast China) and geochemical constraints on the origin of hosting granites. *Economic Geology*, 104(3): 351 – 363
- Westra G and Keith SB. 1981. Classification and genesis of stockwork molybdenum deposits. *Economic Geology*, 76(4): 844 – 873
- Wu FY, Zhao GC, Sun DY, Wilde SA and Yang JH. 2007. The Hulan Group: Its role in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(3–4): 542 – 556
- Wu HY, Zhang LC, Chen ZG and Wan B. 2008. Geochemistries, tectonic setting and mineralization potentiality of the ore-bearing monzogranite in the Kulitu molybdenum (copper) deposit of Xar moron metallogenic belt, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 867 – 878 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Windley BF, Huang BC, Han CM, Yuan C, Chen HL, Sun M, Sun S and Li JL. 2009. End-Permian to Mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altai; Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1189 – 1217
- Yu ZX and Long J. 2007. Geological characteristics and exploration of the Yajishan copper and molybdenum deposit. *Non-ferrous Mining and Metallurgy*, 23(3): 1 – 4, 8 (in Chinese with English abstract)
- Zeng QD, Liu JM, Zhang ZL, Chen WJ and Zhang WQ. 2011a. Geology and geochronology of the Xilamulun molybdenum metallogenetic belt in eastern Inner Mongolia, China. *International Journal of Earth Sciences*, 100(8): 1791 – 1809
- Zeng QD, Liu JM, Zhang ZL, Zhang WQ, Chu SX, Zhang S, Wang ZC and Duan XX. 2011b. Geology, fluid inclusion, and sulfur isotope studies of the Chehugou porphyry molybdenum-copper deposit, Xilamulun metallogenetic belt, NE China. *Resource Geology*, 61(3): 241 – 258
- Zeng QD, Yang JH, Liu JM, Chu SX, Duan XX, Zhang ZL, Zhang WQ and Zhang S. 2012. Genesis of the Chehugou Mo-bearing granitic complex on the northern margin of the North China Craton: Geochemistry, zircon U-Pb age and Sr-Nd-Pb isotopes. *Geological Magazine*, 149(5): 753 – 767
- Zeng QD, Liu JM, Xiao WJ, Chu SX, Wang YB, Duan XX, Sun Y and Zhou LL. 2012. Mineralizing types, geological characteristics and geodynamic background of Triassic molybdenum deposits in the northern and southern margins of North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 357 – 371 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LC, Wu HY, Wan B and Chen ZG. 2009. Ages and geodynamic settings of Xilamulun Mo-Cu metallogenetic belt in the northern part of the North China Craton. *Gondwana Research*, 16(2): 243 – 254
- Zhang LC, Wu HY, Xiang P, Zhang XJ, Chen ZG and Wan B. 2010. Ore-forming processes and mineralization of complex tectonic system during the Mesozoic: A case from Xilamulun Cu-Mo metallogenetic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1351 – 1362 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XJ, Zhang LC, Jin XD, Wu HY, Xiang P and Chen ZG. 2010. U-Pb ages, geochemical characteristics and their implications of Banlashan molybdenum deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1411 – 1422 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZL, Zeng QD, Qu WJ, Liu JM, Sun XG, Zhang RB, Chen WJ and Qin F. 2009. The molybdenite Re-Os date from the Nianzigou Mo deposit, Inner Mongolia and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 212 – 218 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Y, Chen B, Zhang SH, Liu JM, Hu JM, Liu J and Pen JL. 2010. Pre-Yanshanian geological events in the northern margin of the North China Craton and its adjacent areas. *Geology in China*, 37(4): 900 – 915 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 蔡明海, 张志刚, 屈文俊, 彭振安, 张诗启, 徐明, 陈艳, 王显彬. 2011a. 内蒙古乌拉特后旗查干花钼矿床地质特征及 Re-Os 测年. *地球学报*, 32(1): 64 – 68
- 蔡明海, 彭振安, 屈文俊, 贺钟银, 冯罡, 张诗启, 徐明, 陈艳. 2011b. 内蒙古乌拉特后旗查干德尔斯钼矿床地质特征及 Re-Os 测年. *矿床地质*, 30(3): 377 – 384
- 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. *岩石学报*, 26(5): 1423 – 1436
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 北京: 地震出版社, 1 – 234
- 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 2009. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题. *岩石学报*, 25(11): 2695 – 2726
- 陈衍景. 2010. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用. *中国地质*, 37(4): 854 – 865
- 陈衍景, 张成, 李诺, 杨永飞, 邓轲. 2012. 中国东北钼矿床地质. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(5): 1223 – 1268
- 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. *岩石学报*, 26(8): 2465 – 2481
- 代军治, 谢桂青, 段焕春, 杨富全, 赵财胜. 2007. 河北撒岱沟门斑岩型钼矿床成矿流体特征及其演化. *岩石学报*, 23(10): 2519 – 2529
- 侯增谦, 杨志明. 2009. 中国大陆环境斑岩型矿床: 基本地质特征、岩浆热液系统和成矿概念模型. *地质学报*, 83(12): 1779 – 1817
- 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. *矿床地质*, 30(5): 787 – 798
- 李碧乐, 张娟, 张哈, 许庆林, 于泽新. 2010. 内蒙古赤峰市鸭鸡山钼铜矿成矿流体特征及矿床成因. *吉林大学学报(地球科学版)*, 40(1): 61 – 72
- 李诺, 陈衍景, 张辉, 赵太平, 邓小华, 王运, 倪智勇. 2007. 东秦岭斑岩钼矿带的地质特征和成矿构造背景. *地学前缘*, 14(5): 186 – 198
- 李永峰, 毛景文, 胡华斌, 郭保健, 白凤军. 2005. 东秦岭钼矿类型、特征、成矿时代及其地球动力学背景. *矿床地质*, 22(3): 292 – 304
- 刘建明, 张锐, 张庆洲. 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征. *地学前缘*, 11(1): 269 – 277
- 刘翼飞, 聂凤军, 江思宏, 侯万荣, 梁清玲, 张可, 刘勇. 2012. 内蒙古苏尼特左旗准苏吉花钼矿床成矿年代学及其地质意义. *矿床地质*, 31(1): 119 – 128
- 马星华, 陈斌, 赖勇, 鲁颖淮. 2009. 内蒙古敖伦花斑岩钼矿床成矿

- 成矿年代学及地质意义. 岩石学报, 25(11): 2939 - 2950
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景. 岩石学报, 21(1): 169 - 188
- 覃峰, 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. 岩石学报, 25(12): 3357 - 3368
- 秦克章, 李光明, 赵俊兴, 李金祥, 薛国强, 严刚, 粟登奎, 肖波, 陈雷, 范新. 2008. 西藏首例独立钼矿——冈底斯沙让大型斑岩钼矿的发现及其意义. 中国地质, 35(6): 1101 - 1112
- 孙燕, 刘建明, 曾庆栋. 2012. 斑岩型铜(钼)矿床和斑岩型钼(铜)矿床的形成机制探讨: 流体演化及构造背景的影响. 地学前缘, 19(6): 179 - 193
- 吴华英, 张连昌, 陈志广, 万博. 2008. 内蒙古西拉木伦成矿带库里吐钼(铜)矿区二长花岗岩地球化学、构造环境及含矿性分析. 岩石学报, 24(4): 867 - 878
- 于泽新, 龙军. 2007. 鸭鸡山铜钼矿床地质特征及找矿前景. 有色矿冶, 23(3): 1 - 4, 8
- 曾庆栋, 刘建明, 肖文交, 褚少雄, 王永彬, 段晓侠, 孙燕, 周伶俐. 2012. 华北克拉通南北缘三叠纪钼矿化类型、特征及地球动力学背景. 岩石学报, 28(2): 357 - 371
- 张连昌, 吴华英, 相鹏, 张晓静, 陈志广, 万博. 2010. 中生代复杂构造体系的成矿过程与成矿作用——以华北大陆北缘西拉木伦钼铜多金属成矿带为例. 岩石学报, 26(5): 1351 - 1362
- 张晓静, 张连昌, 靳新娣, 吴华英, 相鹏, 陈志广. 2010. 内蒙古半砬山钼矿含矿斑岩 U-Pb 年龄和地球化学及其地质意义. 岩石学报, 26(5): 1411 - 1422
- 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. 岩石学报, 25(1): 212 - 218
- 赵越, 陈斌, 张拴宏, 刘建民, 胡健民, 刘健, 裴军令. 2010. 华北克拉通北缘及邻区前燕山期主要地质事件. 中国地质, 37(4): 900 - 915