

编号: 0258-7106(2011)04-0616-19

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*

闫 聪, 孙 艺, 赖 勇** , 马星华

(造山带与地壳演化教育部重点实验室; 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘 要 内蒙古阿鲁科尔沁旗半拉山钼矿床位于大兴安岭南段, 是新发现的中型爆破角砾岩型钼矿床。半拉山钼矿区内流纹岩围岩和花岗斑岩岩脉的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别是 $(157.5 \pm 3.3) \text{ Ma}$ 和 $(126.3 \pm 2.1) \text{ Ma}$, 而辉钼矿样品的 Re-Os 同位素等时线年龄为 $(136.1 \pm 6.6) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.42$), 表明成矿作用与流纹岩或花岗斑岩岩脉没有直接的成因联系, 成矿侵入体在矿区深部, 这一认识与野外地质考察结果一致。本文研究结果和大兴安岭南段岩浆热液矿床的成矿年代学资料显示大规模成岩成矿作用发生在 $150 \sim 130 \text{ Ma}$, 即晚侏罗世与早白垩世之交, 构造背景是中亚造山带古生代地壳增生和三叠纪—侏罗纪碰撞加厚之后的太平洋板块俯冲有关的弧后伸展。半拉山钼矿床爆破角砾岩矿床类型的确定表明, 爆破角砾岩型钼矿化之下可能存在斑岩型钼矿化, 值得进一步勘查。

关键词 地球化学, 爆破角砾岩型钼矿床, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄, 辉钼矿 Re-Os 同位素, 半拉山钼矿, 西拉沐沦钼多金属成矿带

中图分类号: P618.65

文献标志码: A

LA-ICP-MS zircon U-Pb and molybdenite Re-Os isotope ages and metallogenic geodynamic setting of Banlashan Mo deposit, Inner Mongolia

YAN Cong, SUN Yi, LAI Yong** and MA XingHua

(Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract

Located in the southern part of the Da Hinggan Mountains, the newly discovered Banlashan Mo deposit in Ar Horqin Banner of Inner Mongolia is a medium-size explosive breccia-type Mo deposit. The rhyolite host rocks and post-ore granite-porphyry dikes yield LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of $(157.5 \pm 3.3) \text{ Ma}$ and $(126.3 \pm 2.1) \text{ Ma}$, respectively. Five Re-Os isotopic analyses of molybdenite separates yield an isochron age of $(136.1 \pm 6.6) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.42$). These ages show that both the rhyolite rocks and the granite-porphyry dikes have no genetic relation with the Mo-mineralization, which has been proved by field investigation, and that the mineralization-related intrusion that resulted in hydraulic brecciation of the rhyolite was possibly seated in the depth. These new data, together with the published isotope ages for the mineralizations and their related intrusions in southern Da Hinggan Mountains, suggest that the majority of the intrusion-related mineral systems (comprising porphyry, skarn and veins) were formed in the period of $150 \sim 130 \text{ Ma}$, i. e., the transition from Late Jurassic

* 本文得到中国地质调查局项目(1212010813045)资助

第一作者简介 闫 聪,男,1987 生,硕士研究生,矿床学专业,主要从事矿床学和矿床地球化学研究。Email: yancong@pku.edu.cn

** 通讯作者 赖 勇,副教授,Email: yonglai@pku.edu.cn

收稿日期 2011-04-30; 改回日期 2011-06-10。张绮玲编辑。

to Early Cretaceous. This major metallogenic event occurred in a back-arc extensional regime related to Pacific plate subduction, following Paleozoic subduction-related accretion and Triassic-Jurassic collision-related crustal thickening of the Central Asian Orogenic Belt. The definition of the Banlashan explosive breccia-type molybdenum deposit indicates that a porphyry-type Mo mineralization possibly exists below the breccia-type Mo-mineralization, which is of significance for future exploration in the Banlashan Mo deposit.

Key words: geochemistry, explosive breccia-type molybdenum deposit, LA-ICP-MS, zircon U-Pb dating, molybdenite Re-Os isotope, Banlashan Mo deposit, Xilamulun molybdenum metallogenic belt

汇聚大陆边缘是地球上岩浆和构造活动最剧烈的地区,也是大陆地壳生长和成矿物质聚集的焦点地区,其形成和演化过程一直是固体地球科学最关注的主题之一(张晓晖等,2010)。华北北缘地处华北克拉通与中亚造山带(东段)的过渡带,又是古生代亚洲构造域与中生代西太平洋构造域的交汇部位,古亚洲洋的裂解-扩展-消亡和汇聚大陆边缘的俯冲-碰撞-伸展,造成了华北克拉通北缘造山带复杂的岩浆-构造-成矿体系(芮宗瑶等,1984;任纪舜等,1988,1999;赵一鸣等,1994,1997;张晓晖等,2010;张连昌等,2010;Zhang et al.,2009)。近年来,随着研究工作的深入,该区域内发现了一批新的重要的斑岩型、石英脉型、花岗岩型和火山热液型铜钼矿床,引起了众多专家学者的关注(张德全等,1993;裴荣富等,1998;盛继福等,1999;聂凤军等,2007b;吴华英等,2008,2010;Wan et al.,2009;Zhang et al.,2009;Liu et al.,2010)。作为矿床学研究的重要问题之一,成岩成矿的准确测年工作一直是学者们研究的热点。随着锆石 U-Pb 同位素和辉钼矿 Re-Os 同位素定年技术的成熟,在华北北缘获得了一批铜(钼)矿床的成岩成矿年龄,为进一步明确其对应的大地构造与地球动力学背景提供了条件(聂凤军,2007a;覃锋等,2008;马星华等,2009;舒启海等,2009;曾庆栋等,2009a,2009b;Zhang et al.,2009;Liu et al.,2010)。

西拉沐沦铜钼多金属成矿带是目前华北北缘岩浆-构造-成矿体系内找矿工作的一大突破,其优越的成矿条件与巨大的成矿潜力使其有望成为中国继东秦岭钼矿带之后的第二大钼成矿带(曾庆栋等,2009a)。然而,目前对于该成矿带的研究多集中在西拉沐沦成矿带南侧,前人已对小东沟钼矿床(聂凤军等,2007a;覃锋等,2008)、碾子沟钼矿(张作伦等,2009)、鸡冠山铜钼矿(曾庆栋等,2009a;陈伟军等,2010)、车户沟铜钼矿(Wan et al.,2009;Liu et al.,2010;Zeng et al.,2010)、库里吐钼矿(Zhang et al.,

2009;Liu et al.,2010)和元宝山钼矿(Liu et al.,2010)的成岩成矿年龄进行了相关报道,而对于该成矿带北侧的研究,则相对薄弱,仅见敖伦花钼矿的成岩成矿年龄(马星华等,2009;舒启海等,2009)和半拉山钼矿的成岩年龄(张晓静等,2010)报道。

内蒙古阿鲁科尔沁旗(简称阿旗)半拉山钼矿床位于大兴安岭主峰南段的西拉沐沦成矿带东北缘,是新近发现的爆破角砾岩型钼矿床。本文在前人研究的基础上,用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年和 ICP-MS 辉钼矿 Re-Os 测年方法,对半拉山钼矿床的成岩、成矿进行了系统的年代学研究。结合野外矿床地质特征、矿石矿物特征以及矿区钻探资料,探讨了半拉山钼矿矿床类型、成因及其形成的地球动力学背景。

1 区域地质

西拉沐沦成矿带位于大兴安岭南段北东向晚古生代增生造山带,北侧为二连-贺根山断裂,南侧为西拉沐沦河断裂,东、西两侧分别为嫩江断裂与大兴安岭主脊断裂(图1)。矿带地处华北板块与西伯利亚板块的结合部位,大地构造上位于中朝古板块与西伯利亚板块之间的乌拉尔-蒙古-鄂霍茨克显生宙地槽褶皱区,并在中-新生代作为欧亚板块东缘一部分。其后受库拉(太平洋)板块的影响,成为滨太平洋大陆边缘构造带的一部分,发生强烈的火山-深成岩浆活动(赵一鸣等,1994;刘建明等,2004)。由于受到东西向古生代古亚洲构造-成矿域与北北东向中生代滨太平洋构造-成矿域的强烈叠加、复合、转换作用(刘建明等,2004;陈衍景等,2009a,2009b;曾庆栋等,2009a),本区发育铜、钼、铅锌等多金属成矿作用(赵一鸣等,1994)。

自晚古生代以来,区内经历多期构造变动,主要发育 NE 向、EW 向、SN 向线性构造。NE 向大兴安岭主脊断裂、嫩江断裂为区内重要的区域性 NE 向

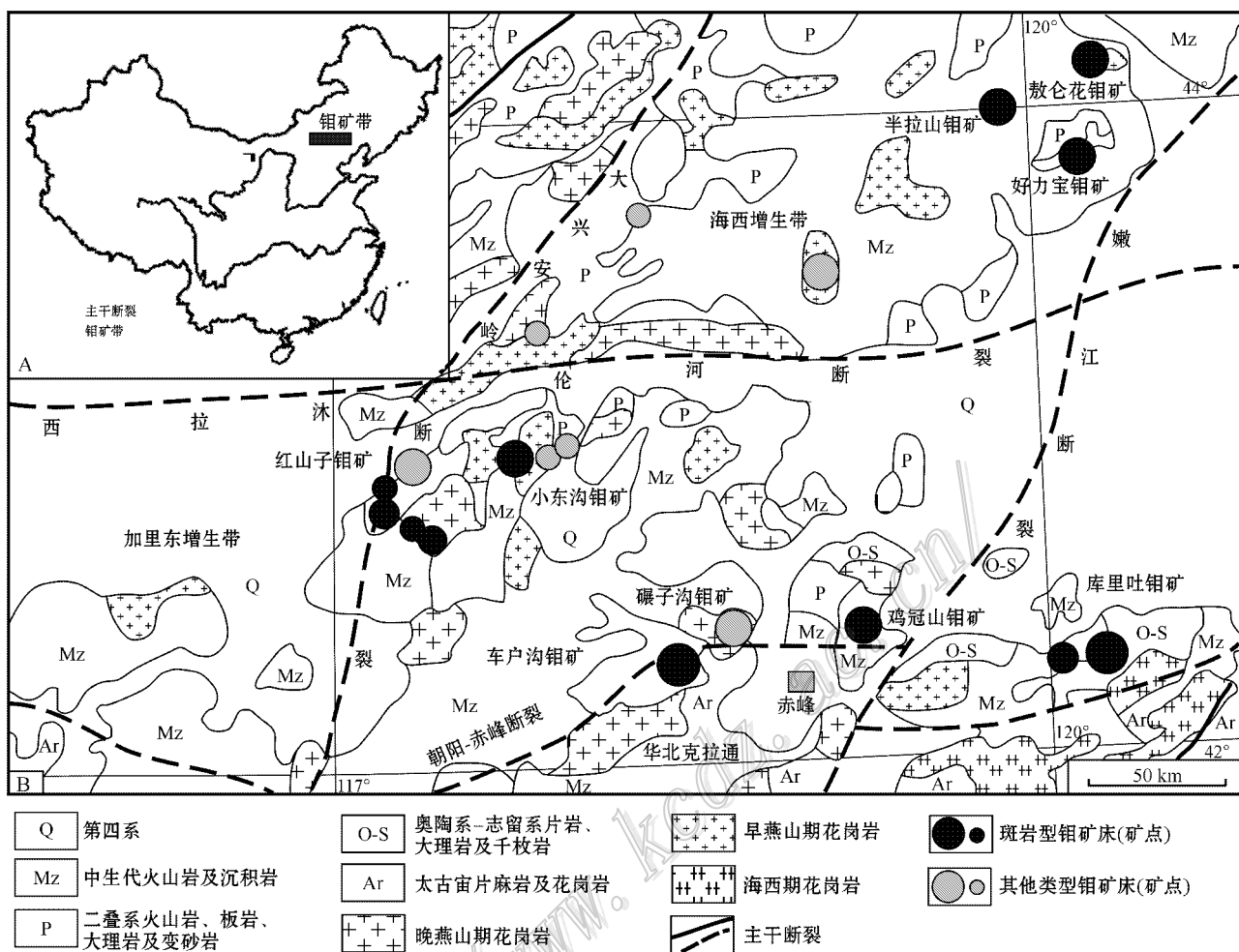


图 1 华北克拉通北缘西拉沐沦钼矿带地质略图(据曾庆栋等, 2009a)

Fig. 1 Schematic geological map of the Xilamulun molybdenum polymetallic ore-forming belt on the northern margin of the North China Craton (from Zeng et al., 2009a)

断裂构造,控制了大兴安岭成矿带自北向南闹牛山、莲花山、孟恩陶勒盖、布敦花等 Ag-Pb-Zn-Cu-Mo 多金属矿床的分布。而近 EW 向分布的西拉沐沦河、朝阳-赤峰区域断裂,则自西向东控制了红山子、小东沟、车户沟、碾子沟、鸡冠山、库里吐等 Cu-Mo-U 多金属矿床的分布。半拉山钼矿位于两组构造的交汇部位,因此具有较好的成岩成矿条件。

除面积较少的早古生代地层外,区内广泛发育中生代陆相火山岩、火山碎屑岩和沉积岩地层,局部出露晚古生代中酸性凝灰熔岩、泥质岩等海陆交替的火山沉积岩相地层。区内出露地层主要为下二叠统青风山组上段和上侏罗统上兴安岭组。下二叠统青风山组主要分布在研究区的西南侧,岩性以安山岩为主,次为中酸性熔岩、凝灰熔岩夹凝灰砂岩。上侏罗统上兴安岭组下部以灰色、灰绿色晶屑岩屑凝

灰岩、凝灰砂岩、凝灰角砾岩和酸性凝灰熔岩为主;上部为流纹岩、流纹斑岩、酸性熔岩、角砾熔岩等。

区域内岩浆活动以海西晚期—印支早期和燕山期为主。海西晚期—印支早期代表岩体有元宝山石英二长斑岩(269 Ma, 锆石 U-Pb, Liu et al., 2010)、孟恩陶勒盖斜长花岗岩(246 Ma, Rb-Sr 等时线,盛继福等, 1999)、车户沟二长花岗斑岩(245 Ma, 锆石 U-Pb, Zeng et al., 2010)、库里吐似斑状二长花岗岩(236 Ma, 锆石 U-Pb, Zhang et al., 2009)以及小坝梁辉绿辉长岩(242 Ma, Rb-Sr 等时线,张德全等, 1993)。燕山期侵入岩以花岗岩为主,从早到晚具有中酸性—酸性演化的特征,包括燕山早期的花岗闪长岩、钾长花岗岩、二长花岗岩和燕山晚期的花岗岩、花岗斑岩。代表性岩体有白音诺尔花岗闪长斑岩(171 Ma, Rb-Sr 等时线,张德全等, 1993)、布敦花

花岗闪长斑岩(170 Ma ,全岩 K-Ar ,据 115 地质队)、
闹牛山闪长玢岩(161 Ma ,Rb-Sr ,盛继福等 ,1999)、
莲花山斜长花岗岩(161.8 Ma ,锆石 U-Pb ,邵济安
等 2007)、敖仑花二长花岗斑岩(134 Ma ,锆石 U-
Pb ,马星华等 ,2009)和半拉山花岗斑岩(126 Ma ,锆
石 U-Pb ,本文)。

2 矿床地质

半拉山钼矿床位于内蒙古阿旗新民乡境内。区
域构造上位于东西向西拉沐沦河断裂北缘衍生断裂
和北东向嫩江断裂西缘衍生断裂的交汇处 ,在燕山
期构造分区上属南兴安岭火山断陷带 ,为北东向张
剪性断裂控制的火山断陷盆地(张德全等 ,1993)。
矿区出露的地层主要为下二叠统青凤山组中酸性熔
岩和上侏罗统上兴安岭组含角砾酸性熔岩、流纹岩 ,
其中青凤山组主要分布于矿区西部 ,上兴安岭组分
布于矿区东部。矿区出露的岩浆岩均为燕山期的侵
入岩体和杂岩脉 ,主要岩石类型包括流纹岩、流纹
斑岩、花岗斑岩和闪长玢岩。其中花岗斑岩和流纹
斑岩主要以脉体形式侵入 ,脉体走向为 NNE ,均切穿
矿体 ,为成矿后侵位。矿区内主要控矿构造为
NW220°~230° ,以张性构造带为主 ,构造带内角砾
以流纹岩、流纹斑岩和角砾熔岩为主。赋矿围岩以
上侏罗统的流纹岩、流纹斑岩为主 ,流纹岩在矿区内
广泛发育 ,流纹斑岩沿 NW 向张性构造带侵入到流
纹岩中(图 2)。辉钼矿、黄铁矿等金属矿物以胶结物
形式赋存于角砾岩化的流纹岩、流纹斑岩中。

半拉山矿床(图 2)主要赋存于上兴安岭组含
砾酸性熔岩和流纹岩、流纹斑岩内。初步估算总资
源量(金属量)钼 11.249 kt^①。由于重型山地工程
(竖井、坑道等)少 ,矿体基本依据钻孔控制 ,根据钻
孔岩芯数据 ,得到半拉山主矿体的三维立体分布图(图
3)。由图 3 可见 ,整个主矿体呈北略向西倾伏的板状
次囊状产出 ,最厚处为 40 m ,在地表出露为走向东
西的线状分布 ,矿体被花岗斑岩和闪长玢岩所改造。

区内矿石类型主要为含辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿
等金属硫化物的角砾岩型(图 4) ,其中角砾成分为流
纹岩质、凝灰岩质等(图 4C、4D)。矿石矿物为辉钼
矿 ,伴生矿物以黄铁矿为主 ,次为黄铜矿、方铅矿、闪

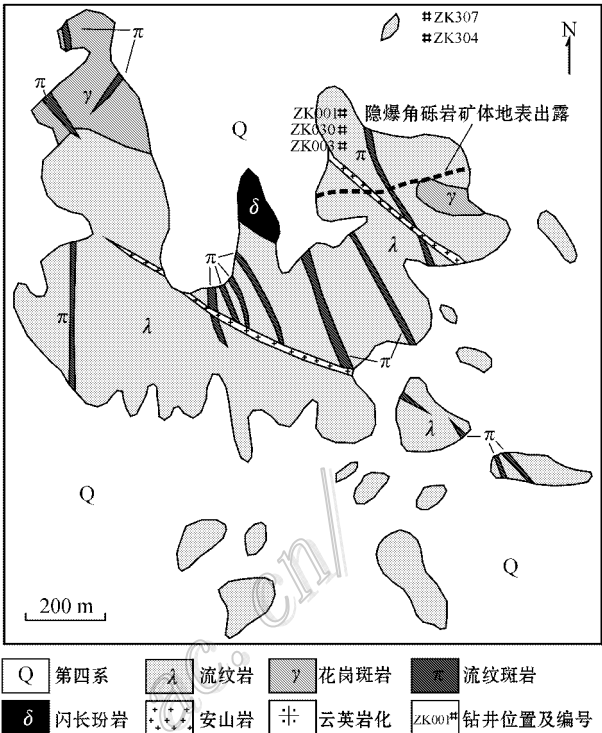


图 2 半拉山钼矿矿区地质图(据内蒙古第九地质
矿产勘查开发院^①)

Fig. 2 Geological map of the Banlashan Mo deposit ,
Inner Mongolia

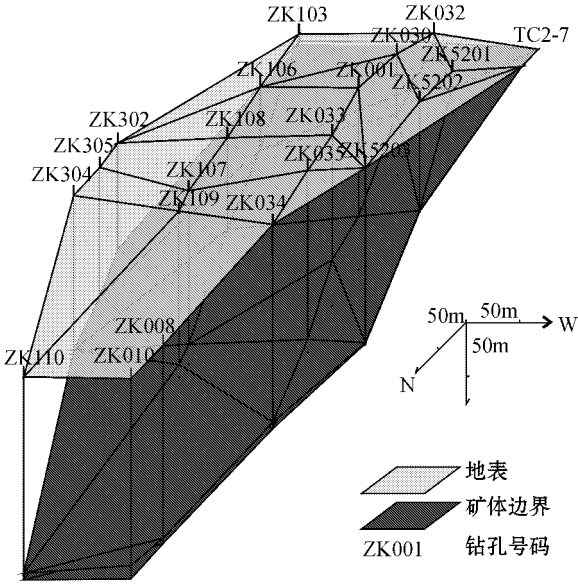


图 3 矿区主隐爆角砾岩矿体分布示意图

Fig. 3 Distribution of main breccia ore bodies in the
Banlashan Mo deposit , Inner Mongolia

① 内蒙古第九地质矿产勘查开发院. 2007. 内蒙古阿鲁科尔沁旗半拉山铅锌多金属矿普查报告.

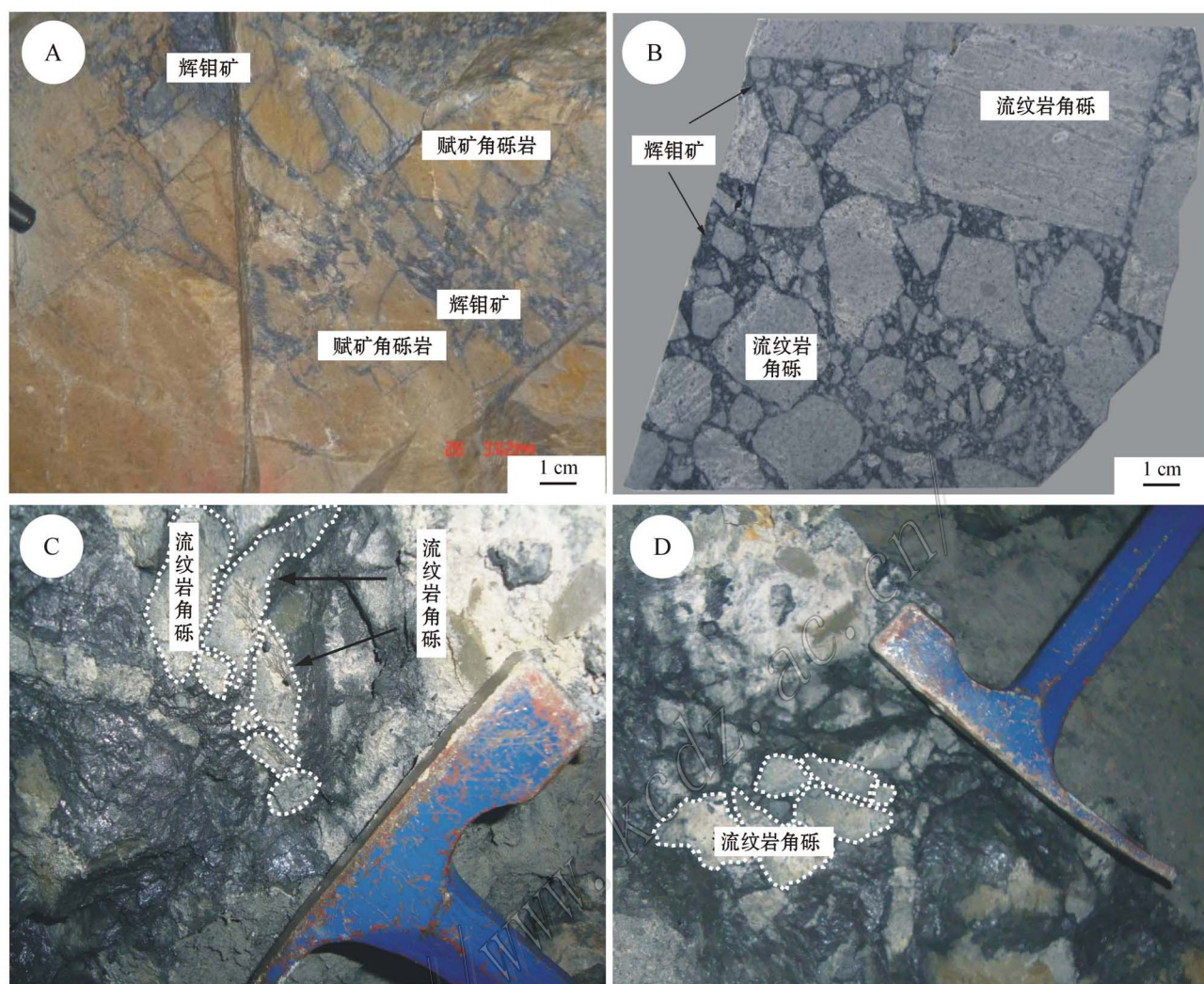


图 4 半拉山钼矿床角砾岩型矿石照片

A. 角砾岩型矿石, 辉钼矿充填于赋矿角砾之间; B. 角砾岩型矿石, 角砾成分以流纹岩为主, 大小不一, 且无定向特征;

C、D. 角砾岩型矿石, 角砾大小不一, 从几个毫米到十几个厘米均有分布

Fig. 4 Photographs of explosive breccia in the Banlashan Mo deposit, Inner Mongolia

A. Explosive breccia-type ore, with Mo filling in the gaps of breccias; B. Explosive breccia-type ore, with breccias being mainly

rhyolite, characterized by non-uniform sizes and nondirective arrangement; C, D. Explosive breccia-type ore, with breccias being of different sizes, from a few micrometers to more than ten centimeters

锌矿、自然铁、毒砂等。脉石矿物以斜长石、钾长石、石英、绢云母为主, 其次为方解石、萤石、黑云母、角闪石、绿泥石、绿帘石、高岭石等。副矿物主要有磷灰石、锆石、金红石等。不同矿物组合在矿区内不同地点发育程度会有一定的变化, 显示出成矿条件的局部差异性。矿石主要发育自形-半自形粒状结构、叶片状结构, 伴随少量交代、充填、破裂、包含结构; 矿石构造主要有角砾状、浸染状、网脉状、细脉状以及毛发状等。

辉钼矿赋存方式主要有 3 种: a. 呈自形-半自

形粒状、叶片状赋存在流纹岩围岩中(图 5B); b. 呈细粒浸染状赋存于角砾岩胶结物中, 或赋存于闪长玢岩中; c. 呈鳞片状辉钼矿集合体分布于流纹岩中, 且与黄铁矿等金属硫化物伴生(图 5A)。

黄铁矿主要有 4 种产状: a. 呈中-粗粒团块状产于流纹岩围岩中, 部分被后期钛铁矿等矿物交代(图 5C); b. 呈中-细粒半自形-自形晶分布于流纹(斑)岩、闪长玢岩中; c. 呈细粒稀疏浸染状零星分布于围岩中, 与磁铁矿等伴生(图 5D); d. 呈环状分布于流纹岩等围岩中, 与毛发状辉钼矿伴生(图 5A)。

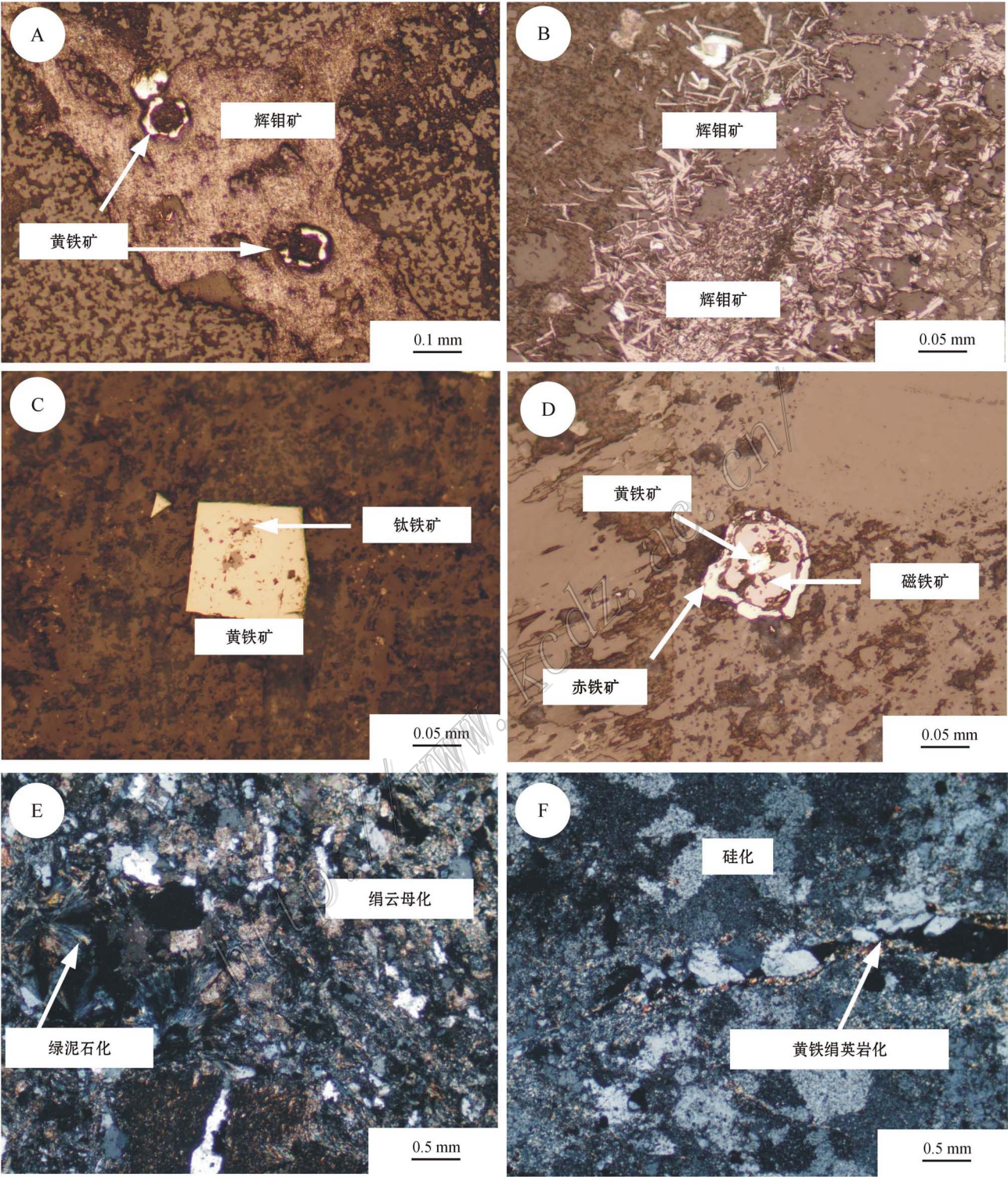


图 5 半拉山钼矿床矿化与蚀变特征

A. 毛发状辉钼矿与环状黄铁矿共生；B. 叶片状自形-半自形辉钼矿；C. 块状自形黄铁矿，被钛铁矿交代；D. 黄铁矿、磁铁矿与赤铁矿；E. 绢云母化、绿泥石化；F. 硅化、黄铁绢英岩化

Fig. 5 Geological characteristics of the Banlashan Mo deposit, Inner Mongolia

A. Hairline molybdenite and circular pyrite; B. Foliated automorphic-hypidiomorphic molybdenite; C. Massive automorphic pyrite, partly replaced by ilmenite; D. Pyrite, magnetite and hematite; E. Sericitization and choritization; F. Silicification and pyritization-sericitization

矿区主要围岩蚀变类型有黄铁绢英岩化(图 5E)、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化(图 5E)、硅化(图 5F)、碳酸盐化、青磐岩化、高岭土化等,局部有绿帘石化和褐铁矿化。

根据矿物共生组合、矿石结构、矿化蚀变关系,可将半拉山钼矿床成矿过程从早到晚划分为 3 个阶段,各阶段矿物组合如下:

(1) 石英-钾长石-磁铁矿-黄铁矿阶段:该阶段磁铁矿含量较高,且破碎严重,矿石中可见少量的石英细脉,含矿角砾岩伴随有钾长石化、硅化和弱的绢云母化、绿泥石化蚀变,并有少量的铜、钼生成;

(2) 多金属硫化物阶段:主成矿阶段,主要矿物组合有石英、绢云母以及辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等,辉钼矿、黄铁矿等金属硫化物多以浸染状、网脉状构造产出,黄铜矿形成稍晚,且含量较少,主要分布在黄铁矿晶隙或晶体周围;主要蚀变类型为硅化、绢云母化与黄铁绢英岩化;

(3) 黄铁矿-碳酸盐阶段:以发育黄铁矿-方解石-萤石等碳酸盐细脉为特征,主要矿物组合为黄铁矿、萤石、方解石;局部有硅化、碳酸盐化蚀变。

3 锆石 LA-ICP-MS 年代学研究

3.1 样品的采集与分析方法

用于锆石激光剥蚀熔融等离子质谱(LA-ICP-MS)U-Pb 同位素分析的样品分别为赋矿围岩流纹岩(BLS09)与花岗斑岩岩脉(ZK030)。锆石分选工作在河北区域地质矿产调查院完成,分别在 2 件样品中挑出了 150 颗和 200 颗锆石。制靶工作在中国地质科学院地质研究所离子探针中心进行,阴极发光(CL)图像在北京大学物理学院电镜室完成,激光剥蚀熔融等离子质谱(LA-ICP-MS)锆石 U-Pb 同位素及锆石微量元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。

锆石的 U-Th-Pb 同位素和稀土元素含量分析是将美国相干公司(Coherenc)的 ComPex 102 ArF 准分子激光器(工作物质 ArF,波长 193 nm)与 Agilent 7500ce 型 ICP-MS 以及 MicroLas 公司的 GeoLas 200M 光学系统连接,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最优化,采用 91500 标准锆石外部校正法进行锆石原位 U-Pb 分析,采用 TEM 锆石标样,用 He 气做为剥蚀物质的载气。分析中采用的激光束

斑直径为 32 μm ,激光剥蚀深度为 30~40 μm ,频率为 5 Hz,能量密度为 15 J/cm²。数据采集为 15 s 气体空白和 50 s 激光剥蚀。同位素比值数据处理和 U-Pb 表观年龄计算采用 Glitter 程序进行,普通铅校正采用 Andersen(2002;2005)的方法,后期数据处理、年龄谐和曲线及加权平均值采用 Ludwig(2003)的 isoplot(ver3.0)软件进行。

3.2 锆石 U-Pb 定年结果

镜下观察表明,流纹岩与花岗斑岩中的锆石均为无色透明长柱状—短柱状,粒径为 30~130 μm ,自形程度高,CL 图像呈内暗外亮现象,且具有明显的岩浆锆石振荡环带(图 6)。部分岩浆锆石中可见继承锆石残余核,此类锆石年龄可能受继承锆石影响而变老,因此实验过程中没有选用。部分岩浆锆石外围有一明显的窄亮边,应为锆石后期遭受变质或重结晶作用影响的结果。

对流纹岩中 33 个锆石点进行了 LA-ICP-MS 测试分析,测试结果见表 1。对小于 1 Ga 的年轻锆石,所测锆石的 ²⁰⁷Pb 和 ²³⁵U 含量低,²⁰⁷Pb/²³⁵U 以及 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 的比值精度较差,因此采用 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄较为合适(Griffin et al., 2004)。因此,对上述锆石样品中的 29 个有效数据点进行了 ²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U 谐和曲线投影(图 7 上),并对 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄进行了加权平均。结果显示,半拉山流纹岩中锆石的谐和年龄为(157.5±3.3) Ma,²⁰⁶Pb/²³⁸U 的加权平均年龄为(156.3±2.1) Ma(MSWD=5.4)。

花岗斑岩中的 46 个锆石点测试结果见表 2,对本样品中 42 个有效数据点进行了 ²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U 谐和曲线投影(图 7 下),并对 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄进行了加权平均。结果显示,半拉山花岗斑岩中锆石的谐和年龄为(126.3±2.1) Ma,²⁰⁶Pb/²³⁸U 的加权平均年龄为(126.0±1.8) Ma(MSWD=5.0)。

3.3 锆石微量元素地球化学特征

表 3 为流纹岩中锆石微区微量元素的测试结果,测试表明锆石 $\omega(\text{Th})$ 为 $19.08 \times 10^{-6} \sim 207.89 \times 10^{-6}$, $\omega(\text{U})$ 为 $29.54 \times 10^{-6} \sim 205.68 \times 10^{-6}$,Th/U 比值介于 0.59~1.16 之间。结合稀土元素配分曲线(图 8A)可见,上述锆石的稀土元素具有明显的 Ce 正异常,Pr 的负异常和 Eu 的弱负异常, ΣREE 含量较高($\Sigma\text{REE} = 573.31 \times 10^{-6} \sim 1\,790.29 \times 10^{-6}$,平均 $1\,084.09 \times 10^{-6}$),HREE 富集,配分曲线与岩浆锆石稀土元素特征一致,表明其为典型的岩浆锆石(Hoskin et al., 2000)。

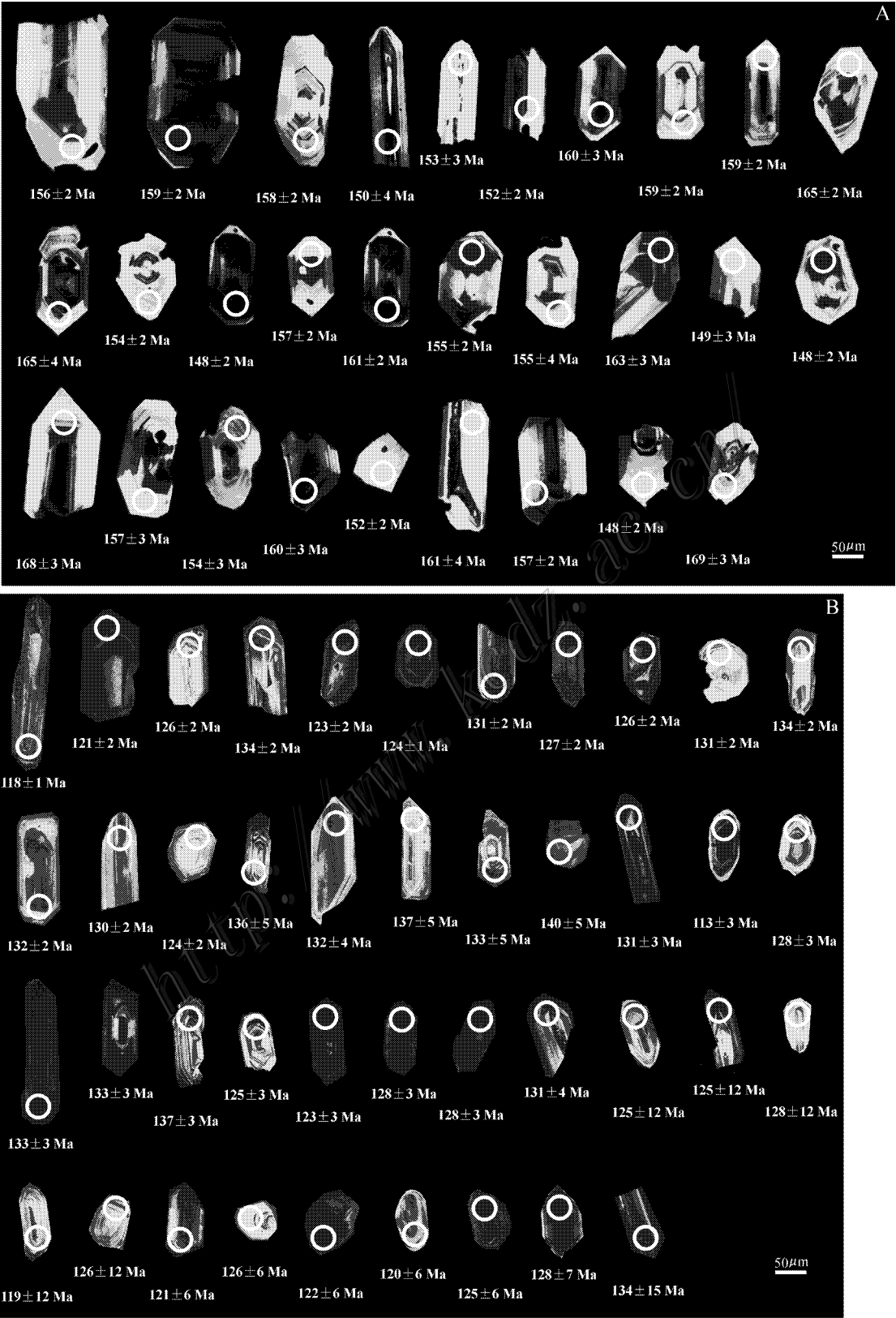


图 6 半拉山流纹岩(A)和花岗斑岩(B)中锆石阴极发光图

Fig. 6 Cathodoluminescence images of representative zircons from rhyolite (A) and granite-porphyry (B) of the Banlashan Mo deposit , Inner Mongolia

表 1 半拉山流纹岩中锆石 U-Pb 同位素数据

Table 1 U-Pb isotopic compositions of zircons from the rhyolite of Banlashan Mo deposit

点号	同位素比值						年龄/Ma					
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
9-02	0.0529	0.00257	0.17815	0.0085	0.02444	0.00035	325	82	166	7	156	2
9-03	0.04995	0.00232	0.17181	0.00782	0.02496	0.00035	193	80	161	7	159	2
9-04	0.05972	0.00266	0.20465	0.0089	0.02487	0.00036	593	69	189	8	158	2
9-06	0.06471	0.00677	0.20949	0.02135	0.0235	0.00064	765	170	193	18	150	4
9-07	0.07511	0.00498	0.24882	0.01602	0.02404	0.00047	1071	98	226	13	153	3
9-08	0.05965	0.00223	0.19647	0.00716	0.0239	0.00032	591	56	182	6	152	2
9-09	0.05058	0.00415	0.17573	0.01421	0.02521	0.00045	222	150	164	12	160	3
9-11	0.06618	0.00332	0.22748	0.01114	0.02494	0.00038	812	77	208	9	159	2
9-12	0.04999	0.00164	0.17156	0.00551	0.0249	0.0003	195	52	161	5	159	2
9-13	0.06042	0.00232	0.21533	0.00809	0.02586	0.00035	619	58	198	7	165	2
9-15	0.09893	0.00734	0.35339	0.02521	0.02592	0.00062	1604	97	307	19	165	4
9-16	0.05695	0.00226	0.19038	0.0074	0.02425	0.00032	490	62	177	6	154	2
9-17	0.05704	0.00351	0.18317	0.01103	0.0233	0.00038	493	104	171	9	148	2
9-19	0.06482	0.00298	0.2203	0.00986	0.02465	0.00037	768	69	202	8	157	2
9-21	0.05066	0.00179	0.17696	0.00613	0.02534	0.00032	225	57	165	5	161	2
9-22	0.04951	0.00177	0.16601	0.00584	0.02432	0.0003	172	59	156	5	155	2
9-23	0.09131	0.00738	0.30654	0.02388	0.02435	0.00061	1453	110	271	19	155	4
9-24	0.06953	0.00463	0.24597	0.01604	0.02566	0.00046	915	105	223	13	163	3
9-25	0.07347	0.00461	0.2361	0.01437	0.02331	0.00044	1027	93	215	12	149	3
9-26	0.07425	0.0022	0.23751	0.00685	0.0232	0.00029	1048	38	216	6	148	2
9-27	0.08722	0.00548	0.31667	0.01921	0.02633	0.00053	1365	86	279	15	168	3
9-28	0.08938	0.00462	0.30359	0.01515	0.02463	0.00043	1412	69	269	12	157	3
9-29	0.08687	0.00448	0.29021	0.01447	0.02423	0.00042	1358	69	259	11	154	3
9-30	0.06982	0.00523	0.24268	0.0178	0.02521	0.00047	923	121	221	15	160	3
9-31	0.05163	0.00173	0.17022	0.00561	0.02391	0.00029	269	53	160	5	152	2
9-32	0.10007	0.00795	0.34847	0.02668	0.02525	0.00063	1625	105	304	20	161	4
9-33	0.05079	0.00195	0.17287	0.00652	0.02468	0.00031	231	64	162	6	157	2
9-34	0.05421	0.00213	0.17313	0.00668	0.02316	0.0003	380	63	162	6	148	2
9-35	0.07312	0.00434	0.26824	0.01554	0.0266	0.00046	1017	89	241	12	169	3

表 4 为花岗斑岩中锆石微区微量元素的测试结果,图 8B 为其稀土元素的配分曲线,与流纹岩中的锆石相同,花岗斑岩绝大多数锆石的稀土元素也具有明显的 Ce 正异常,Pr 负异常和 Eu 弱负异常,∑REE 含量高,HREE 逐步富集等特征。而少部分锆石可能遭受后期变质或热液蚀变的影响,呈现轻、重稀土元素分异不明显,Ce、Pr、Eu 的异常不突出的特征。

4 辉钼矿 Re-Os 同位素定年

4.1 样品的采集与分析方法

用于铼-钨同位素年龄测试的 5 件辉钼矿样品采自半拉山钻孔岩芯以及斜井中,辉钼矿呈细粒浸染状分布于流纹斑岩、角砾岩胶结物中。角砾岩胶

结物中辉钼矿颗粒极细,相对不易分离,因此在选样过程中,首先将矿石粉碎至 30 目左右,进行粗分离,避开石英等与辉钼矿连生的晶体颗粒,挑选出单矿物辉钼矿;之后继续粉碎至 60~80 目,在双目镜下挑选出更纯的辉钼矿晶体,使纯度达到 99% 以上,最后置入玛瑙研钵中粉碎至 200 目,以增加样品的均匀性,克服失耦现象对准确定年的影响(杜安道等,2007)。

辉钼矿样品的铼-钨同位素分析在国家地质实验测试中心铼-钨同位素年代学实验室完成,采用美国 TJA 公司生产的 TJA X-series ICPMS 测定同位素比值。对于 Re,选择质量数 185、187,用 185 监测 Re;对于 Os,选择质量数 186、187、188、189、190、192,用 190 监测 Os。样品的化学处理流程和质谱测定

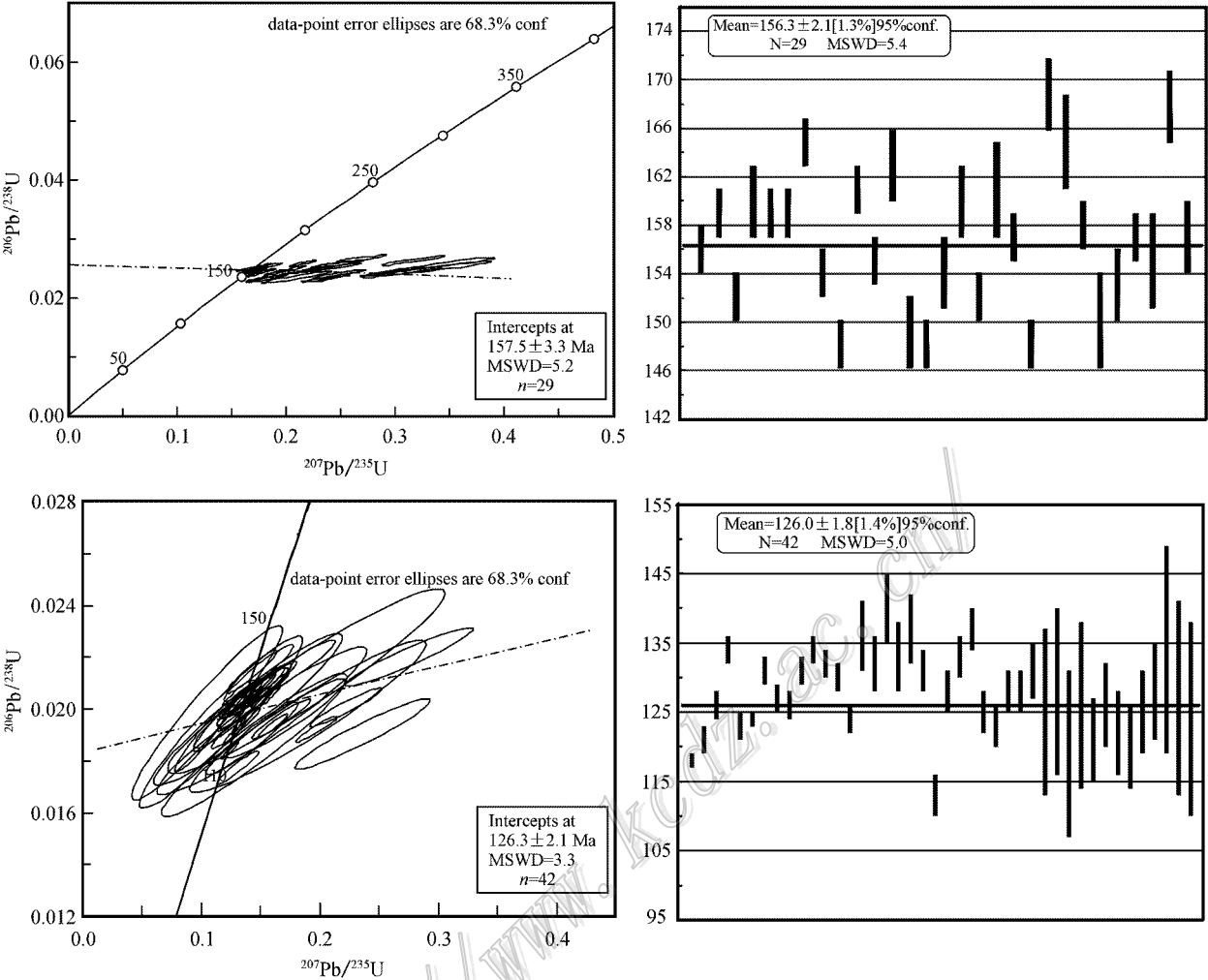


图 7 半拉山流纹岩(上)和花岗斑岩(下)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 7 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams for rhyolite(upper) and granite-porphyry(lower) of the Banlashan Mo deposit , Inner Mongolia

技术参数详见文献(杜安道等 ,1994 ;2001 ; Du et al. 2004)。

4.2 辉钼矿 Re-Os 测试结果

5 件辉钼矿 Re、Os 同位素测试结果见表 5。计算结果显示 ,Re-Os 的模式年龄为(131.8 ± 7.6) Ma ~ (138.0 ± 4.0) Ma。在 ¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os-¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 同位素比值等时线图(图 9)中 ,5 件辉钼矿样品均排列在一条直线上 ,构成一条理想的等时线 ,获得同位素比值等时线年龄为(136.1 ± 6.6) Ma ,MSWD 为 0.42。因此 5 件辉钼矿样品(同源、同期、封闭体系) 同位素测试所获得的等时线年龄能够代表半拉山钼矿形成的年龄 ,所以认为(136.1 ± 6.6) Ma 为半拉山钼矿床的成矿年龄。

5 讨 论

5.1 成岩成矿时代和构造背景

半拉山流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄数据表明 ,赋矿围岩流纹岩结晶年龄为(156.3 ± 2.1) Ma ,为燕山早期岩浆活动的产物 ;花岗斑岩岩脉的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(126.0 ± 1.8) Ma ,为燕山晚期酸性侵入活动的产物。辉钼矿 Re-Os 同位素年龄显示钼的成矿作用发生于(136.1 ± 6.6) Ma。花岗斑岩的结晶年龄明显晚于成矿年龄 ,这与野外花岗斑岩以 NNE 向脉体形式切穿辉钼矿矿体的观测结果相吻合。因此 ,厘定半拉山钼矿床的成岩成矿

表 2 半拉山花岗斑岩中锆石 U-Pb 同位素数据

Table 2 U-Pb isotopic compositions of zircons from the granite-porphyry of Banlashan Mo deposit

点号	同位素比值						年龄/Ma					
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
ZK030-01	0.04892	0.00184	0.12424	0.00455	0.01842	0.00022	144	63	119	4	118	1
ZK030-02	0.04825	0.00205	0.1263	0.00525	0.01899	0.00024	112	72	121	5	121	2
ZK030-04	0.05132	0.00183	0.13957	0.00486	0.01972	0.00024	255	58	133	4	126	2
ZK030-05	0.05693	0.00208	0.16524	0.0059	0.02105	0.00026	489	57	155	5	134	2
ZK030-06	0.07433	0.00446	0.19707	0.01154	0.01922	0.00033	1050	90	183	10	123	2
ZK030-07	0.04912	0.00156	0.13115	0.00412	0.01936	0.00023	154	51	125	4	124	1
ZK030-08	0.05592	0.00197	0.15847	0.00551	0.02054	0.00026	449	55	149	5	131	2
ZK030-09	0.05043	0.00166	0.13891	0.00452	0.01997	0.00024	215	53	132	4	127	2
ZK030-10	0.04438	0.0019	0.12094	0.00514	0.01976	0.00026	—	64	116	5	126	2
ZK030-11	0.05077	0.00191	0.1433	0.00537	0.02046	0.00027	230	62	136	5	131	2
ZK030-12	0.05178	0.00304	0.14974	0.00871	0.02096	0.00032	276	106	142	8	134	2
ZK030-13	0.04619	0.00314	0.13147	0.00888	0.02063	0.00033	8	116	125	8	132	2
ZK030-14	0.04768	0.00277	0.13396	0.00773	0.02037	0.00032	83	98	128	7	130	2
ZK030-15	0.06003	0.0031	0.16036	0.00824	0.01936	0.0003	605	84	151	7	124	2
ZK030-16	0.05033	0.00667	0.14842	0.01938	0.02139	0.00072	210	231	141	17	136	5
ZK030-17	0.05142	0.00694	0.14667	0.01943	0.02069	0.0007	260	236	139	17	132	4
ZK030-18	0.09075	0.01208	0.27537	0.03585	0.02201	0.00075	1441	199	247	29	140	5
ZK030-19	0.05229	0.00718	0.14977	0.02006	0.02077	0.00072	298	238	142	18	133	5
ZK030-20	0.05927	0.00858	0.1758	0.02474	0.02151	0.00077	577	248	164	21	137	5
ZK030-21	0.04923	0.00456	0.13945	0.01259	0.02054	0.00049	159	158	133	11	131	3
ZK030-22	0.05345	0.00489	0.13072	0.01165	0.01774	0.00042	348	159	125	10	113	3
ZK030-23	0.08027	0.00739	0.22211	0.01993	0.02007	0.00049	1204	139	204	17	128	3
ZK030-24	0.05217	0.00487	0.14979	0.01365	0.02082	0.00051	293	161	142	12	133	3
ZK030-25	0.04825	0.00487	0.14268	0.01407	0.02145	0.00055	112	172	135	13	137	3
ZK030-26	0.0618	0.0061	0.16709	0.01612	0.01961	0.0005	667	164	157	14	125	3
ZK030-27	0.04855	0.00522	0.12892	0.01356	0.01926	0.00052	126	184	123	12	123	3
ZK030-28	0.04932	0.00513	0.13622	0.01386	0.02003	0.00053	163	179	130	12	128	3
ZK030-29	0.04896	0.00518	0.13487	0.01396	0.01998	0.00054	146	181	128	12	128	3
ZK030-30	0.04903	0.00564	0.1387	0.01563	0.02052	0.00058	149	199	132	14	131	4
ZK030-31	0.05613	0.02202	0.15111	0.05831	0.01954	0.00188	458	572	143	51	125	12
ZK030-32	0.05065	0.0194	0.13945	0.05233	0.01999	0.00193	225	508	133	47	128	12
ZK030-34	0.05651	0.02073	0.1449	0.05169	0.01862	0.00182	472	522	137	46	119	12
ZK030-35	0.06992	0.02507	0.18981	0.06594	0.01971	0.00194	926	555	176	56	126	12
ZK030-37	0.03891	0.00621	0.10143	0.01551	0.0189	0.00087	—	222	98	14	121	6
ZK030-38	0.04495	0.00736	0.12238	0.01926	0.01975	0.00092	—	214	117	17	126	6
ZK030-39	0.08996	0.0149	0.23598	0.03768	0.01904	0.0009	1425	238	215	31	122	6
ZK030-41	0.05496	0.00998	0.1427	0.02536	0.01886	0.00093	411	305	135	23	120	6
ZK030-44	0.06344	0.01245	0.17171	0.03338	0.01964	0.00101	723	336	161	29	125	6
ZK030-45	0.04829	0.00962	0.13343	0.02646	0.02004	0.00103	114	290	127	24	128	7
ZK030-48	0.06497	0.02729	0.18862	0.07713	0.02108	0.00235	773	630	175	66	134	15
ZK030-49	0.03834	0.01574	0.10489	0.04188	0.01986	0.00222	—	450	101	38	127	14
ZK030-50	0.04337	0.01739	0.11648	0.04537	0.01949	0.00219	—	445	112	41	124	14

表 3 半拉山流纹岩 LA-ICP-MS 锆石稀土元素分析结果
Table 3 LA-ICP-MS zircon REE compositions of rhyolite of Banlashan Mo deposit

样品号	$\mu(B) \times 10^{-6}$													
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
9-02	0.0108	27.29	0.115	2.56	6.14	1.969	33.56	12.22	148.01	56.96	244.24	52.33	508.03	87.55
9-03	0.245	26.41	0.177	2.42	5.58	1.901	31.57	11.42	136.43	51.76	225.89	47.95	475.17	80.89
9-04	0.142	34.76	0.187	3.33	7.29	2.272	38.08	13.47	157.13	59.87	260.05	54.22	522.02	91.13
9-05	15.63	53.46	4.57	22.16	9.69	2.57	29.42	9.55	104.14	37.5	165.24	34.45	337.11	60
9-06	0.0101	22.85	0.117	2.07	5.94	2.48	32.19	10.7	123.31	44.99	191.5	39.44	376.53	63.17
9-07	0.0134	25.68	0.183	4.12	9.37	3.9	46.54	14.82	165.79	59.01	246.01	49.85	476.95	78.42
9-08	0.241	57.1	0.273	4.53	10.47	3.07	52.06	18.24	217.88	81.28	350.27	74.23	707.93	117.81
9-09	0.0236	19.58	0.237	1.33	3.05	1.282	17.04	5.9	71.58	26.66	117.4	25.45	254.96	43.97
9-10	0.364	20.57	0.317	3.97	5.75	2.58	23.4	7.57	83.49	30.39	128.75	28.34	277.65	48.11
9-11	<0.0105	30.89	0.101	1.73	4.36	1.661	23.03	8.37	99.16	37.16	165.27	35.56	348.19	59.88
9-12*	15.91	83.38	6.01	32.54	14.6	3.16	48.21	16.35	192.19	71.07	308.65	65.23	628.84	105.23
9-13	0.084	32.69	0.209	3.69	7.85	2.55	41.92	15.09	176.31	66.29	282.92	61.07	594.14	97.38
9-14	0.0197	20.96	0.081	1.42	3.7	1.636	19.8	7.31	86.98	33.23	146.35	31.72	319.09	54.93
9-15	0.05	19.76	0.07	0.93	2.85	1.241	15.74	5.64	67.53	26.09	115.46	24.59	249.46	43.9
9-16	0.0134	40.12	0.146	2.39	5.39	1.886	29.08	10.59	127.06	47.6	203.78	42.59	411.4	68.13
9-17	2.99	37.84	1.295	8.43	6.4	2.114	28.07	9.88	117.61	44.32	195.74	42.02	418.78	71.43
9-18	1.139	29.66	3.38	47.72	78.56	36.24	222.05	56.95	397.77	99.02	334.6	60.66	529.62	87.38
9-19	0.077	49.27	0.739	9.35	16.87	6.9	57.93	18.18	199	66.52	279.19	59.05	574.23	95.75
9-21	0.0205	60.58	0.156	3.73	8.88	2.85	46.43	16.79	204.68	78.32	336.98	71.67	694.34	116.19
9-22	<0.0099	68.9	0.156	3.59	8.05	2.83	44.22	16.03	195.59	71.09	300.1	63.35	601.34	97.42
9-23	0.028	21.95	0.087	1.41	3.79	1.71	21.27	7.57	90.73	34.55	152.01	33.33	326.93	57.8
9-24	0.0113	18.29	0.0673	1.451	3.14	1.314	16.81	6.16	75.31	28.73	128.71	27.95	279.93	48.59
9-25	0.228	28.86	0.29	3.11	5.56	2.31	26.54	9.25	108.88	40.91	178.02	37.98	376.27	65.65
9-26	0.557	85.71	0.601	7.94	13.1	4.84	64.23	20.96	241.36	86.54	365.49	74.85	707.55	116.56
9-27	0.629	22.71	0.19	2.04	3.35	1.507	18.1	6.32	74.86	28	127.27	26.9	268.77	46.42
9-28	0.149	21.96	0.228	2.64	4.66	2.207	23.27	7.42	89.42	32.66	145.1	31.03	305.73	52.98
9-29	0.202	23.22	0.677	8.03	11.88	4.92	38.65	11.28	113.94	38.83	162.56	34.6	342.26	57.36
9-30	0.05	19.14	0.0955	1.415	3.23	1.383	17.96	6.49	77.23	29.53	132.39	28.99	289.61	49.79
9-31	0.238	68.08	0.257	3.62	7.69	2.77	43.53	15.6	188.24	70.06	298.71	62.78	597.69	96.85
9-32	<0.0128	17.95	0.0375	0.99	2.81	1.285	16.88	5.83	72.9	27.34	124.52	27.11	268.56	46.89
9-33	0.293	53	0.233	3.12	6.53	2.298	36.51	13.68	169.55	65.58	297.27	63.93	635.18	108.48
9-34	2.8	63.78	1.203	9.06	9.14	3.14	44.77	15.74	187.27	68.48	291.22	62.07	593.19	97.21
9-35	0.527	25.11	0.262	2.55	4.05	1.638	20.69	7.47	92.03	34.66	151.94	33.35	329.12	55.9

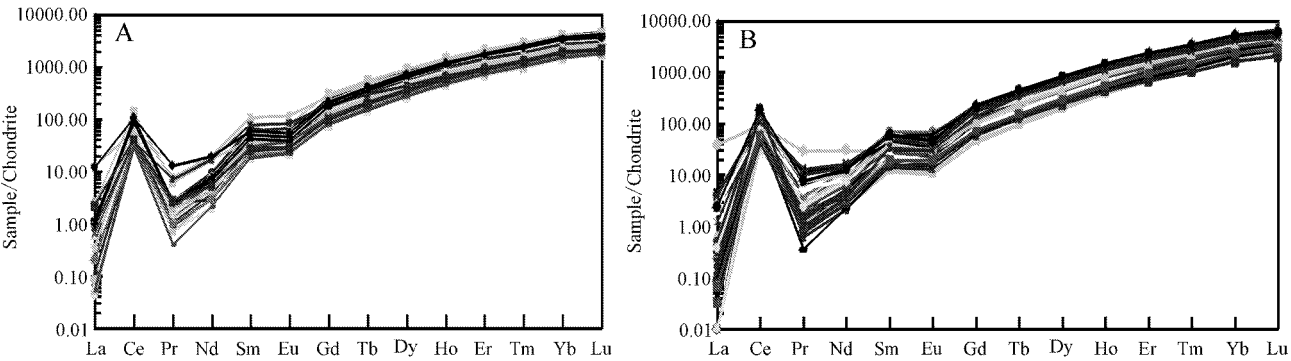


图 8 半拉山流纹岩 (A) 和花岗斑岩 (B) 中锆石稀土元素对球粒陨石标准化配分曲线

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of zircon grains in rhyolite (A) and granite-porphyry (B) of Banlashan

表 4 半拉山花岗岩斑岩 LA-ICP-MS 锆石稀土元素分析结果

Table 4 LA-ICP-MS zircon REE compositions of granite-porphyry of Banlashan Mo deposit

样品号	$\mu(B)10^{-6}$													
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
ZK030-01	0.00	54.84	0.101	2.21	4.4	1.979	26.06	9.68	120.96	48.58	225.72	50.47	516.27	100.11
ZK030-02	0.0079	46.88	0.243	4.26	6.31	2.96	33.21	12.09	146.17	57.97	267.87	60.03	599.07	118.98
ZK030-04	0.00	58.68	0.084	1.53	3.22	1.43	19.13	7.1	95.92	41.2	216.42	53.96	599.03	127.05
ZK030-05	0.288	41.06	0.11	1.07	1.8	0.615	8.79	3.72	51.26	23.36	119.87	30.36	346.11	72.88
ZK030-06	0.559	22.64	0.172	2.18	3.95	2.19	22.57	7.81	94.93	36.67	167.01	37.91	375.35	75.98
ZK030-07	0.00	92.18	0.078	1.8	3.27	1.271	21	8.44	113.94	50.37	260.46	64.51	720.17	149.93
ZK030-08	0.0142	112.29	0.16	4.18	9.82	3.5	46.99	17.3	203.22	76.72	332.54	70.37	673.74	124.18
ZK030-09	0.272	73.27	0.401	3.51	3.67	1.265	18.99	7.24	90.52	36.96	178.8	41.94	448.62	87.49
ZK030-10	0.0148	57.06	0.125	1.28	3.73	1.303	18.69	7.41	94.13	40.08	193.44	44.17	471.27	90.76
ZK030-11	0.0173	68.94	0.105	1.37	3.16	1.234	19.77	7.19	94.58	39.35	196.04	46.09	489.8	97.1
ZK030-12*	63.65	194.33	25.26	121.99	33.61	3.89	58.24	15.79	163.12	55.56	231.23	46.72	434.57	76.63
ZK030-13	0.035	18.49	0.323	5.73	10.08	2.75	43.79	14.21	157.43	56.39	236.36	48.5	454.83	80.41
ZK030-14	0.00	21.88	0.254	4.07	6.75	2.65	26.69	9.03	103.27	38.49	171.24	37.34	382.7	72.58
ZK030-15	0.032	22.1	0.269	4.26	7.54	3.07	30.17	9.58	104.34	38.66	168.11	36.26	362.66	71.14
ZK030-16	9.34	60.22	2.86	14.6	4.26	1.292	13.48	4.62	56.01	23.02	112.46	27.03	295.39	59.97
ZK030-17	0.00	54.45	0.093	2.07	3.86	1.503	21.23	7.72	101.79	39.09	182.84	40.65	424.4	79.99
ZK030-18	<0.0165	94.88	0.083	1.27	3.49	1.05	21.25	9.66	139.85	63.49	333.18	81.11	888.75	172.86
ZK030-19	0.0214	79.92	0.101	1.75	4.34	1.564	22.47	8.89	113.72	46.02	220.1	50.13	534.21	101.49
ZK030-20*	48.15	157.93	20.22	96.26	21.61	1.877	30.33	7.52	80.15	29.36	134.9	30.01	302.44	58
ZK030-21	0.769	47.84	0.195	1.46	1.97	0.653	10.39	3.84	52.06	23.84	127.94	32.02	367.9	75.8
ZK030-22	0.15	61.5	0.197	1.64	3.31	0.962	18.12	7.21	100.24	43.32	230.64	59.57	697.36	143.58
ZK030-23	0.11	109.49	0.175	1.93	4.1	1.492	25.92	10.5	148.1	65.05	330.45	78.35	835.43	162.77
ZK030-24	0.0237	54.6	0.057	0.98	2.2	0.759	12.07	4.76	64.31	27.51	140.25	33.77	377.47	74.14
ZK030-25	0.057	49.4	0.356	6.04	10.97	4.03	41.43	13.3	153.04	54.95	248.07	54.27	542.96	101.45
ZK030-26	0.609	83.6	0.625	5.68	8.53	3.56	43.14	15.83	192.77	74.36	336.99	75.55	753.69	139.99
ZK030-27	0.0165	34.37	0.18	3.78	7.13	3.04	30.35	10.38	124.93	48.5	224.11	49.83	515.99	102.01
ZK030-28	0.0229	40.43	0.0337	1.03	2.26	0.917	13.16	4.99	62.76	26.37	130.29	31.8	351.29	70.43
ZK030-29	<0.0120	47.62	0.143	2.54	5	2.29	25.42	9.32	116.7	45.72	212.92	48.28	493.17	92.31
ZK030-30	<0.0181	27.33	0.071	1.32	2.68	1.366	15.19	5.32	62.76	25.02	116.35	26.63	277.19	53.56
ZK030-31	0.12	105.69	0.159	1.85	4.76	1.74	25.01	10.47	152.05	67.59	348.41	85.59	944.77	180.06
ZK030-32	0.0325	127.33	0.129	2.46	7.06	2.29	42.67	16.97	218.71	86.55	393.33	85.64	832.33	145.11
ZK030-33	0.0241	52.81	0.376	6.27	14	6.61	58.27	19.26	222.22	80.85	356.06	76.82	759.05	138.5
ZK030-34	1.032	72.68	1.144	6.99	6.47	2.08	26.89	10.37	128.52	48.86	227.55	49.43	495	91.14
ZK030-35	0.495	51.11	0.511	3.62	3.69	1.129	17.3	6.9	93.1	40.52	215.31	54.46	613.03	124.18
ZK030-37	0.076	62.77	0.084	1.27	2.4	0.955	13.79	5.34	71.78	32.39	174.12	44.85	525.25	107.55
ZK030-38	0.051	46.77	0.215	2.95	5.09	1.85	24.26	9.01	111.44	44.94	215.96	51.32	551.64	103.83
ZK030-39	1.034	69.9	0.975	6.85	9.19	2.2	35.1	13.38	169.74	68.34	332.59	78.21	832.18	153.76
ZK030-40	1.056	32.37	1.188	7.3	7.17	2.74	25.86	8.8	102.16	37.13	161.15	35.79	366.09	65.52
ZK030-41	0.09	57.78	0.23	3.64	6.18	1.789	30.96	10.87	135.52	55.6	267.71	63.38	664.17	120.98
ZK030-42	1.016	21.44	1.119	7.43	5.13	1.877	17.92	6.36	75.62	29.06	141.48	33.12	355.71	66.97
ZK030-44	0.0158	35.01	0.096	1.56	2.94	1.15	16.1	6.01	81.19	32.64	161.71	38.42	416.38	76.53
ZK030-45	0.686	74.39	0.698	4.95	5.76	1.9	22.22	9.15	117.12	49.23	247.52	59.79	643.95	118.43
ZK030-46	0.181	7.22	0.262	2.62	3.29	1.59	11.63	3.72	42.49	15.37	68.78	15.79	171.92	33.5
ZK030-48	0.903	66.65	1.258	7.92	9.19	2.79	36.18	13.69	164.07	63.53	294.89	67.23	702.87	125.02
ZK030-49	0.045	104.78	0.096	1.7	5.19	1.765	29.72	13.18	177.53	72.9	343.63	79.59	817.34	140.69
ZK030-50	0.566	117.31	0.752	6.14	9.49	2.7	46.35	17.51	218.9	86.42	395.17	91.11	930.33	160.19

表 5 内蒙古半拉山钼矿床辉钼矿铼-钨同位素测年数据
Table 5 Re-Os isotopic analyses of molybdenite separates from the Banlashan Mo deposit , Inner Mongolia

样号	m/g	Re/ng/g		普 Os/ng/g		¹⁸⁷ Re/ng/g		¹⁸⁷ Os/ng/g		模式年龄/Ma		¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os		¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os	
		测定值	σ	测定值	σ	测定值	σ	测定值	σ	测定值	σ	测定值	σ	测定值	σ
ZK108A	0.02446	2988	27	0.2966	0.0088	1878	17	4.383	0.040	139.9	2.1	48647	1507	113.6	3.5
ZK001	0.10074	117	2	0.0434	0.0040	74	1	0.185	0.003	150.3	3.5	13025	1215	32.66	3.03
ZK003	0.05118	971	10	0.4313	0.0043	610	6	1.610	0.015	158.2	2.6	10875	158	28.69	0.39
ZK108B	0.10016	895	10	0.1121	0.0077	562	6	1.328	0.012	141.6	2.4	38564	2673	91.08	6.28
ZK109	0.02124	592	8	0.0411	0.0173	372	5	0.879	0.015	141.7	3.3	69558	29286	164.4	69.2

样号	¹⁸⁸ Os 普/ng/g		初始 ¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os		¹⁸⁷ Os _{初始} /ng/g		¹⁸⁷ Re/ng/g		¹⁸⁷ Os _总 - ¹⁸⁷ Os _{初始} /ng/g		模式年龄*/Ma	
	测定值	σ	计算值	σ	测定值	σ	测定值	σ	测定值	σ	测定值	σ
ZK108A	0.0388	0.0011	4.000	1.400	0.1552	0.055	1878	17	4.228	0.067	135.0	3.0
ZK001	0.0057	0.0005	4.000	1.400	0.0227	0.008	73.63	1.25	0.162	0.009	131.8	7.6
ZK003	0.0564	0.0006	4.000	1.400	0.2257	0.079	610.3	6.5	1.385	0.080	136.0	8.2
ZK108B	0.0147	0.0010	4.000	1.400	0.0586	0.021	562.3	6.4	1.269	0.024	135.4	3.5
ZK109	0.0054	0.0023	4.000	1.400	0.0215	0.012	372.0	4.9	0.858	0.019	138.2	4.0

* 为扣除¹⁸⁷Os 初始的年龄。

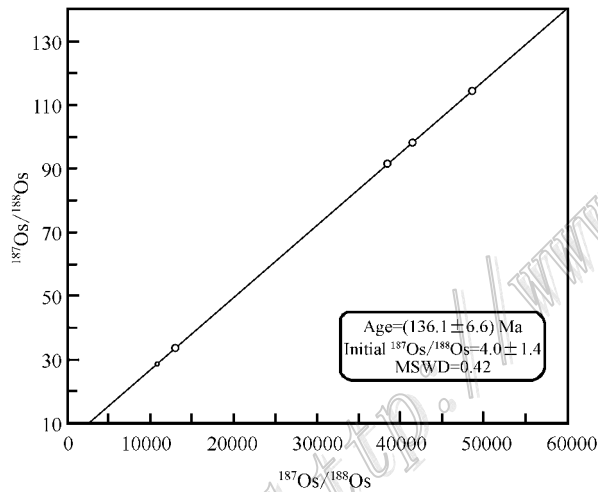


图 9 内蒙古半拉山钼矿床辉钼矿铼-钨同位素
比值等时线图

Fig. 9 Re-Os isotopic isochron of molybdenite from the
Banlashan Mo deposit , Inner Mongolia

序列为 晚侏罗世 (156 Ma) 形成流纹岩等酸性熔岩 , 为后期的成矿作用提供了赋矿围岩 ; 之后在早白垩世 (136 Ma 左右) 本区域内发生了辉钼矿大规模成矿作用 , 形成了半拉山爆破角砾岩型钼矿。而花岗斑岩的侵位 , 则形成于成矿作用之后约 10 Ma , 并切穿辉钼矿矿体。

对大兴安岭中南段及西拉沐沦成矿带矿床的成岩成矿特征已有不少的学者作过讨论(张德全等 , 1993 ; 邵济安 , 1991 ; 邵济安等 , 2007 ; 裴荣富等 ,

1998 ; 盛继福等 , 1999 ; Wan et al. , 2009 ; 马星华等 , 2009 ; Zhang et al. , 2009 ; Liu et al. , 2010) 。该区域内中生代以中酸性侵入岩为主 , 发育花岗闪长岩、钾长花岗岩、二长花岗岩与花岗斑岩。成矿元素组合从燕山早期到晚期则具有 Cu-Pb-Zn、Pb-Zn-Mo、Sn-Pb-Zn-Mo-Ag-REE 的演化序列 , 其中铜主要在燕山早期成矿 , 铅锌在燕山早期到晚期皆有成矿 , 钼主要集中在燕山中晚期 , 而锡和稀有金属在晚期成矿(王长明等 , 2006) 。成矿带内中生代以来主要的金属矿床包括以钼为主的碾子沟钼矿(张作伦等 , 2009) 、鸡冠山钼矿(吴华英等 , 2010) 、敖伦花钼矿(马星华等 , 2009 ; 舒启海等 , 2009) 、小东沟钼矿(聂凤军等 , 2007b) 和半拉山钼矿(本文) ; 以铜矿化为主的布敦花铜-金矿(赵一鸣等 , 1994) 、台布呆铜-银矿床(赵一鸣等 , 1997) ; 以锡为主的黄岗锡-铁矿床(赵一鸣等 , 1994) 、大井锡-铜-铅-锌-银矿等 ; 以铅锌为主白音诺尔铅-锌-铜-锡矿(张德全等 , 1993) 、浩布高铅-锌-铜矿(赵一鸣等 , 1997) 等 ; 以稀土元素为主的巴尔哲超大型稀土稀有金属矿床(邵济安等 , 2007) 。

本文汇总了该区域内已有的成岩成矿数据 , 并进行了统计分析(图 10) 。利用 isoplot (ver3.0) 软件对该区域内已发表的 73 个成岩和成矿年代学数据进行统计分析(图 10) , 结果显示区域内存在 150 ~ 130 Ma 高峰期 , 显示了本区在燕山期存在强烈的构造-岩浆-成矿事件。

大兴安岭南段的燕山期铜钼矿床曾被解释为太

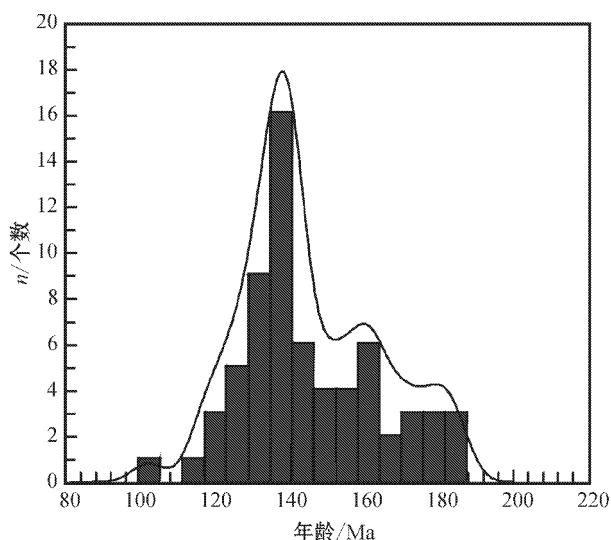


图 10 大兴安岭南段中生代成岩成矿年龄直方图

Fig. 10 Histograms of ages for the diagenesis and mineralization in southern Da Hinggan Mountains

平洋板块俯冲的产物(张德全等, 1990; 赵一鸣等, 1997; 张炯飞等, 2001)。然而, 一般岩浆弧距离俯冲带 < 300 km (Chen et al., 2007b), 而半拉山矿床距离日本岛东岸的中生代缝合带达 2 000 km, 且自东向西间隔着日本海、松辽盆地、太行山-嫩江断裂等重要构造带, 远非岩浆弧的宽度所能到达 (Chen et al., 2007b; 郝进平等, 2005; 李诺等, 2007a; 2007b), 如此分析, 半拉山矿床的形成很难与太平洋板块作用直接联系。

中亚造山带经历了古亚洲洋板块的消减和陆缘岩浆弧增生, 古亚洲洋于二叠纪—三叠纪之交彻底闭合 (Sengör et al., 1996; Chen et al., 2007b), 于三叠纪—侏罗纪发生陆-陆碰撞, 地壳挤压、缩短、加厚。侏罗纪末或白垩纪初, 古太平洋板块向欧亚大陆俯冲, 造成强烈的弧后伸展, 诱发大规模陆壳或岩石圈地幔部分熔融, 形成巨量燕山期花岗岩、火山岩以及相关矿床 (Chen et al., 2007b)。总之, 笔者认为半拉山成矿系统与中亚造山带东段的后碰撞环境有关, 并受到与太平洋板块俯冲有关的弧后伸展的影响。

5.2 矿床类型、成因及找矿潜力探讨

对于半拉山钼矿的矿床类型, 目前尚存在争议。一般认为爆破角砾岩型矿床是指与次火山筒状爆破或构造角砾岩有成因联系的矿床, 是浆控高温热液型矿床的常见类型之一 (Sillitoe, 1985; 陈衍景等, 2007b)。自 1960 年以来, 在中国相继发现了承德磴

上, 广东海南岛梅岭, 甘肃年木耳, 北京大庄科, 吉林通化二密, 辽东望宝山 (芮宗瑶等, 1984; 赵一鸣等, 1994; 1997), 河南祁雨沟 (谢奕汉等, 1991; 范宏瑞等, 2000; Chen et al., 2007b), 罗村 (陈衍景等, 1992), 黑龙江金厂金矿 (张宇等, 2008), 山东五莲七宝山 (王永等, 2008), 内蒙古好力宝 (沈光银, 2008) 等一系列爆破角砾岩型铜-钼-金矿床或矿体。与斑岩型矿床相比, 爆破角砾岩型矿床具有以下几个鉴别特征: ① 爆破角砾岩的角砾成分相对复杂, 包含斑岩、围岩地层等, 而斑岩型矿床的角砾成分主要是具有斑状结构的斑岩, 例如祁雨沟金矿 2 号角砾岩筒中可见大量的太华超群变质岩角砾和熊耳群安山岩角砾 (陈衍景等, 2007a; Li et al., 2011), 黑龙江金厂金矿 J0 矿体角砾岩体的角砾成分复杂, 可见花岗闪长岩、花岗岩与闪长岩 (张宇等, 2008); ② 爆破角砾岩型矿床的成矿岩体类型主要为爆破角砾岩, 而斑岩型矿床的成矿物质则主要以不规则网脉浸染状赋存于含矿斑岩体中。野外地质观察表明, 半拉山爆破角砾岩的角砾成分复杂, 包含流纹岩、流纹斑岩、含角砾酸性熔岩、熔凝灰角砾岩等, 角砾大小极不均匀, 从 1 mm 至 10 cm, 且分布不均 (图 4A、4B); 此外, 通过对 ZK003、ZK030、ZK304、ZK307 等见矿钻孔岩芯样的观察, 半拉山钼矿主要分布在角砾岩 (图 4B) 中, 而在斑岩中难以看到网脉浸染状类型的矿石。基于以上两点地质观察, 以及穿插矿体的花岗斑岩 (年龄 126.3 Ma) 明显晚于成矿 (年龄 136.6 Ma) 的实验证据, 笔者认为, 半拉山钼矿为一典型的爆破角砾岩型钼矿。

角砾岩化作用的形成机制复杂多样, 包括富水岩浆房在二次沸腾时释放岩浆-流体的过程, 地下水与岩浆蒸汽的相互作用过程, 断层等构造活动的破坏作用, 岩浆运动对围岩的机械破坏, 岩浆房顶部压力降低导致岩浆-热液的爆破, 蒸发岩围岩的化学分解作用等 (Sillitoe, 1985; Jébrak, 1997; Guillou-Frotire et al., 2003; Cooke et al., 2005)。与北东向 50 km 处的敖伦花斑岩钼矿床 (马星华等, 2009; 2010; 舒启海等, 2009) 相比, 半拉山钼矿成矿金属元素以钼为主, 基本不含铜, 成矿元素比较单一。与斑岩成矿不同的是, 爆破角砾岩型矿床的热液系统演化至地壳浅部附近时, 其受围岩性质 (岩性、厚度)、构造属性 (脆韧性、规模)、浅层流体 (循环天水等) 等因素的影响更明显, 温压变化幅度更为剧烈, 促发流体的物理化学条件在特定边界层附近发生剧变从而诱发

金属成矿。由于半拉山钼矿床的上覆围岩为流纹质、凝灰质等一套火山岩地层,一定程度上限制了流体的上涌和逃逸,可能是导致半拉山发生隐爆成矿的原因,这一点也得到早期成矿流体具有高温高盐性质的辅证[成矿早阶段流体包裹体均一温度可达 445.0℃ 以上,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 45.21% ~ 66.87%,作者未刊数据]。此外,半拉山钼矿主要矿石中无论是矿石矿物还是脉石矿物,其结晶粒度都非常细小(图 4A、B),表明含矿热液的演化是一个快速、骤冷的过程,由于温度梯度过大而快速沉淀结晶,矿物颗粒极细小。推断半拉山钼矿的成矿过程为:含矿岩浆上涌侵位至晚期,成矿热液逐渐形成规模,流体内部压力持续增高,当压力大于围岩束缚力时流体将会在构造薄弱带发生隐爆作用,由于突破围限压力流体将快速沸腾、冷却,因此流体没有充足的时间进行演化,最终导致金属快速析出成矿。

爆破角砾岩型矿床是寻找斑岩型矿床的重要标志之一。前人的研究表明,河南祁雨沟金矿 16 号角砾岩筒的深部可见花岗斑岩体(姚军明等,2009);河南银家沟矿床,顶部发育爆破角砾岩型钼金矿床,侵入岩体内部则是斑岩型钼矿体(陈衍景等,1992; Chen et al., 2007b)。此外,半拉山成矿之后存在 126 Ma 花岗斑岩岩脉侵位事件,反映区内岩浆热液活动持续的时间较长,利于成矿叠加或成大矿。综上所述,笔者认为半拉山角砾岩型钼矿体的底部,可能存在具有一定经济品位的斑岩型矿体,即半拉山钼矿可能具有较好的深部找矿潜力。半拉山与敖伦花钼矿的相继发现,进一步说明了大兴安岭南段除富含大量以 Cu-Sn-Pb-Zn 为主的矿床外,在寻找以 Mo 为主的金属矿床方面也具有较大的前景。同时,与西拉沐沦河南侧的小东沟、碾子沟、车户沟、鸡冠山、库里吐铜钼矿相对比,西拉沐沦河断裂北侧同样具有巨大的寻找钼矿的潜力。

6 结 论

(1) 半拉山钼矿床是中型爆破角砾岩型钼矿床。半拉山赋矿流纹岩的形成年龄为 (157.5 ± 3.3) Ma, 切穿矿体的花岗斑岩形成年龄为 (126.3 ± 2.1) Ma。辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 (136.1 ± 6.6) Ma, 表明半拉山钼矿成矿作用发生在早白垩世。

(2) 大兴安岭南段与华北北缘西拉沐沦成矿带

200 Ma 以来的成岩成矿数据统计显示,区域内存在 150~130 Ma 的成岩成矿高峰期,显示了区域内燕山期大规模的构造-岩浆-成矿高峰。

志 谢 野外地质工作得到阿鲁科尔沁旗厚德矿业公司张文华总工程师、张晶技术员的大力支持和帮助。北京大学陈衍景教授,李诺、徐佳佳、邓小华、舒启海等博士生对本文提供了帮助和建议。在此一并表示感谢。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59-79.
- Andersen T. 2005. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: Limiting conditions from statistics and numerical simulation [J]. *Chemical Geology*, 216: 249-270.
- 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).
- Chen Y J and Fu S G. 1992. Gold mineralization in west Henan, China [M]. Beijing: Chinese Seismological Press. 1-234 (in Chinese).
- Chen Y J, Ni P, Fan H R, Pirajno F, Lai Y, Su W C and Zhang H. 2007a. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2085-2108 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Chen H Y, Zaw K, Pirajno F and Zhang Z J. 2007b. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: an overview [J]. *Ore Geology Reviews*, 31: 139-169.
- Chen Y J and Li N. 2009a. Nature of ore-fluid of intracontinental intrusion-related hypothermal deposits and its difference from those in island arcs [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2477-2508 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Zhai M G and Jiang S Y. 2009b. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2695-2726 (in Chinese with English abstract).
- Cooke D R and Davies A G S. 2005. Breccias in epithermal and porphyry deposits: The birth and death of magmatic hydrothermal system [C]. Presentation at the 8th SGA Meeting, Beijing. (unpublished)
- Du A D, He H L, Yin N W, 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(1): 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, Richard M, Holly S,

- John M and Dmitry Ma. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenite HLP and JDC[J]. *Geo-standard and Geoanalytical Research*, 28(1): 41-52.
- Du A D, Qu W J, Wang D H, Li H M, Feng C Y, Liu H, Ren J and Zeng F G. 2007. Subgrain-size decoupling of Re and ^{187}Os within molybdenite[J]. *Mineral Deposits*, 26(5): 572-580 (in Chinese with English abstract).
- Fan H R, Xie Y H, Zheng X Z and Wang Y L. 2000. Ore-forming fluids in hydrothermal breccias-related gold mineralization in Qiyugou, Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4): 559-563 (in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Belousova E A and Shee S R. 2004. Crustal evolution in the northern Yilarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircon[J]. *Precambrian Research*, 131(3-4): 231-282.
- Guillou-Frottire L and Burov E. 2003. The development and fracturing of plutonic apices: Implications for porphyry ore deposits[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 214: 341-356.
- Hoskin P W O and Ireland T R. 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator[J]. *Geology*, 28(7): 627-630.
- Jebrak M. 1997. Hydrothermal breccias in vein-type ore deposits: A review of mechanisms, morphology and size distribution[J]. *Ore Geology Reviews*, 12: 111-134.
- Li N, Chen Y J, Lai Y and Li W B. 2007a. Fluid inclusion study of the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2177-2188 (in Chinese with English abstract).
- Li N, Sun Y L, Li J and Li W B. 2007b. Molybdenite Re-Os isochron age of the Wunugetu Shan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia and its implication for metallogenic geodynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2881-2888 (in Chinese with English abstract).
- Li N, Carranza E J M, Ni Z Y and Guo D S. 2011. The CO_2 -rich magmatic-hydrothermal fluid of the Qiyugou breccia pipe, Henan Province, China: Implication for breccia genesis and gold mineralization[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, and Analysis*, (in press).
- Liu J M, Zhang R and Zhang Q Z. 2004. The regional metallogeny of Da Hinggan Ling, China[J]. *Earth Science Frontiers* (China University of Geosciences, Beijing), 11(1): 269-277 (in Chinese with English abstract).
- Liu J M, Zhao Y, Sun Y L, Li D P, Liu J, Chen B L, Zhang S H and Sun W D. 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[J]. *Gondwana Research*, 17(1): 125-134.
- Ludwig K R. 2003. Isoplot3.0-A geochronological toolkit for Micro-soft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication. (4): 1-70.
- 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).
- Ma X H, Chen B, Lai Y, Dou J L and Zou T. 2010. Fluid exsolution, evolution and mineralization in porphyry Cu-Mo deposit: A case study from the Aolunhua deposit, southern Da Hinggan Mts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1397-1410 (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).
- Pei R F, Lv F X and Fan J Z. 1998. Metallogenetic series and exploration of the metal deposits in North Margin of the North China Massif and its north side[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-237 (in Chinese).
- Qi J P, Chen Y J and Pirajno F. 2005. Geological characteristics and tectonic setting of the epithermal deposits in the northeast China[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology* (Kuangwu Yanshi), 25(2): 47-59 (in Chinese with English abstract).
- Qin F, Liu J M, Zeng Q D and Zhang R B. 2008. The metallogenic epoch and sources of ore-forming materials of the Xiaodonggou porphyry molybdenum deposit, Inner Mongolia[J]. *Geoscience*, 22: 173-180 (in Chinese with English abstract).
- Ren J S, Chen T Y, Niu B G, Liu Z G and Liu F R. 1988. Tectonic evolution and metallogenic of East China and its Adjacent Area[M]. Beijing: Science Press. 1-205 (in Chinese).
- Ren J S, Niu B G and Liu Z G. 1999. Soft collision, multiple orogenesis, and poly-suturing[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 85-93 (in Chinese with English abstract).
- Rui Z Y, Huang C K, Qi G M, Xu J and Zhang H T. 1984. Porphyry copper (molybdenum) deposits of China[M]. Beijing: Geol. Publ. House. 1-350 (in Chinese).
- Sengör A M C and Natal'in B A. 1996. Paleotectonics of Asia: Fragments of synthesis[A]. In: Yin A and Harrison T M, eds. *The tectonic evolution of Asia*[M]. Cambridge: Cambridge University Press. 1-640.
- Shao J A. 1991. Crustal Evolution of the Middle Segment of the Sino-Korean Plate[M]. Beijing: Peking University Press. 1-136 (in Chinese with English abstract).
- Shao J A, Zhang L Q, Mu B L and Han Q J. 2007. Upwelling of Da Hinggan Mountains and its geodynamic background[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-250 (in Chinese).
- Shen G Y. 2008. Geological characteristics and prospecting direction of Haolibao Cu-Mo deposit in Arhorqin, Inner Mongolia[J]. *Geology and Resources*, 17(4): 273-277 (in Chinese with English abstract).
- Sheng J F, Fu X Z and Li H N. 1999. The metallogenic setting and copper-polymetallic geological character of the middle segment of the Da Hinggan Mountain[M]. Beijing: Seismological Press. 1-216 (in Chinese).
- Shu Q H, Jiang L, Lai Y and Lu Y H. 2009. Geochronology and fluid inclusion study of the Aolunhua porphyry Cu-Mo deposit in Arhorqin Area, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2601-2614 (in Chinese with English abstract).

- Sillitoe R H. 1985. Ore-related breccias in colcanoplutonic arcs[J]. *Econ. Geol.*, 80: 1467-1514.
- Wan B, Ernst H, Zhang L C, Alexander R, Chen Z G, Wu H Y and Chen F K. 2009. Rb-Sr geochronology of chalcopryrite from the Cheugou porphyry Mo-Cu deposit (Northeast China) and geochemical constraints on the origin of hosting granites[J]. *Econ. Geol.*, 104: 351-363.
- Wang C M, Zhang S T and Deng J. 2006. The metallogenic space-time structure of copper-polymetallic deposit in the southern segment of Da Hinggan Mountains, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*, 33(5): 478-484 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Fan H R, Hu F F and Lan T G. 2008. Ore-forming fluids and metallogenesis of the Qibaoshan Cu-Au deposit in the Wulian county, Shandong Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2029-2036 (in Chinese with English abstract).
- Wu H Y, Zhang L C, Chen Z G 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[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 867-878 (in Chinese with English abstract).
- Wu H Y, Zhang L C, Chen Z G, Wan B, Xiang P and Zhang X J. 2010. Hypersaline, high-oxygen fugacity and F-rich fluid inclusions in Jiguanshan porphyry molybdenum deposit, Xilamulun metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1363-1374 (in Chinese with English abstract).
- Xie Y H, Fan H R, Li R M and Wang Y L. 1991. Fluid inclusion studies of Qiyugou explosion breccias-type gold deposit, Henan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 11(4): 370-376 (in Chinese).
- Yao J M, Zhao T P, Li J, Sun Y L, Yuan Z L, Chen W and Han J. 2009. Molybdenite Re-Os age and zircon U-Pb age and Hf isotope geochemistry of the Qiyugou gold system Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 374-384 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Q D, Liu J M, Zhang Z L, Qin F, Chen W J, Zhang R B, Yu C M and Ye J. 2009a. Ore-forming time of the Jiguanshan porphyry molybdenum deposit, northern margin of North China Craton and the Indosinian mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 393-398 (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. 2009b. 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(2): 1225-1238 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Q D, Liu J M, Zhang Z L, Chen W J and Zhang W Q. 2010. Geology and geochronology of the Xilamulun molybdenum metallogenic belt in eastern Inner Mongolia, China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, DOI: 10.1007/S00531-010-0617-z.
- Zhang D Q and Bao X W. 1990. A study on the petrology, geochemistry and genesis of the Bayan Nur intermediate-acidic volcanoplutonic complex in eastern Inner Mongolia[J]. *Geological Review*, 36(4): 289-297 (in Chinese with English abstract).
- Zhang D Q and Zhao Y M. 1993. Proceedings of copper-polymetallic deposits in the Da Hinggan Mountains and its adjacent area[C]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-161 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J F, Wang X Z, Quan H, Wu G and Zhu H C. 2001. The forming conditions of nonferrous and precious metal deposits in the north of Derbugan metallogenic province[J]. *Geology and Resource*, 10(4): 220-224 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L C, Wu H Y, Wan B and Chen Z G. 2009. Ages and geodynamic settings of Xilamulun Mo-Cu metallogenic belt in north of North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 16: 243-254.
- Zhang L C, Wu H Y, Xiang P, Zhang X J, Chen Z G and Wan B. 2010. Ore-forming processes and mineralization of complex tectonic system during the Mesozoic: A case from Xilamulun Cu-Mo metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1351-1362 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X H and Zhai M G. 2010. Magmatism and its metallogenetic effects during the Paleozoic continental crustal construction in northern North China: An overview[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1329-1341 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X J, Zhang L C, Jin X D, Wu H Y, Xiang P and Chen Z G. 2010. U-Pb ages, geochemical characteristics and their implications of Banlashan molybdenum deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1411-1422 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y, Lai Y, Qing M, Wang Y Z and Xu J J. 2008. Ore-fluid geochemistry of the J0 orebody, Jinchang gold deposit, Heilongjiang Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 1131-1144 (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).
- Zhao Y M, Wang D W, Zhang D Q, Fu X Z, Bao X P, Li H N and Ai Y F. 1994. Geological setting and exploration model for the polymetallic deposits occurring in the southeastern Panr of Inner Mongolia[M]. Beijing: Seismologic Press. 1-234 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M and Zhang D Q. 1997. Metallogeny and prospective evaluation of copper-polymetallic deposits in the Da Hinggan Mountains and its adjacent region[M]. Beijing: Seismologic Press. 1-318 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 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.
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律[M]. 北京: 地震出版社. 1-234.
- 陈衍景, 倪 培, 范宏瑞, Firajno F, 赖 勇, 苏文超, 张 辉. 2007a. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 23(9): 2085-2108.

- 陈衍景,李 诺. 2009a. 大陆内部将空高温热液矿床成矿流体性质及其与岛弧同类矿床的差异[J]. 岩石学报, 25(10): 2477-2508.
- 陈衍景,翟明国,蒋少涌. 2009b. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题[J]. 岩石学报, 25(11): 2695-2726.
- 杜安道,何红蓼,殷宁万,邹晓秋,孙亚利,孙德忠,陈少珍,屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究[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. Carius 管溶样和负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-钨同位素地质年龄[J]. 岩矿测试, 20(4): 247-252.
- 杜安道,屈文俊,王登红,李厚民,丰成友,刘 华,任 静,曾法刚. 2007. 辉钼矿亚晶粒范围内 Re 和 ^{187}Os 的失耦现象[J]. 矿床地质, 26(5): 572-580.
- 范宏瑞,谢奕汉,郑学正,王英兰. 2000. 河南祁雨沟热液角砾岩体型金矿床成矿流体研究[J]. 岩石学报, 16(4): 559-563.
- 李 诺,陈衍景,赖 勇,李文博. 2007a. 内蒙古乌努格吐山斑岩铜钼矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 23(9): 2177-2188.
- 李 诺,孙亚莉,李 晶,李文博. 2007b. 内蒙古乌努格吐山斑岩铜钼矿床辉钼矿铼-钨等时线年龄及其成矿地球动力学背景[J]. 岩石学报, 23(11): 2881-2888.
- 刘建明,张 锐,张庆洲. 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征[J]. 地质前缘, 11(1): 269-277.
- 马星华,陈 斌,赖 勇,鲁颖淮. 2009. 内蒙古敖伦花斑岩钼矿床成岩成矿年代学及地质意义[J]. 岩石学报, 25(11): 2939-2950.
- 马星华,陈 斌,赖 勇,窦金龙,邹 滔. 2010. 斑岩铜钼矿床成矿流体的出溶、演化与成矿: 以大兴安岭南段敖伦花矿床为例[J]. 岩石学报, 26(5): 1397-1410.
- 聂凤军,张万益,杜安道,江思宏,刘 妍. 2007a. 内蒙古小东沟斑岩钼矿床铼-钨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.
- 裴荣富,吕凤翔,范继璋. 1998. 华北地块北缘及其北侧金属矿床成矿系列与勘查[M]. 北京: 地质出版社. 1-237.
- 祁进平,陈衍景, Franco Pirajno. 2005. 东北地区浅成低温热液矿床的地质特征和构造背景[J]. 矿物岩石, 25(2): 47-59.
- 覃 锋,刘建明,曾庆栋,张瑞斌. 2008. 内蒙古小东沟斑岩型钼矿床的成矿时代及成矿物质来源[J]. 现代地质, 22(2): 173-180.
- 任纪舜,陈廷愚,牛宝贵,刘志刚,刘凤仁. 1988. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社. 1-205.
- 任纪舜,牛宝贵,刘志刚. 1999. 软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合作[J]. 地质前缘, 6(3): 85-93.
- 芮宗瑶,黄崇轲,齐国明,徐 珏,张洪涛. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床[M]. 北京: 地质出版社. 1-350.
- 邵济安. 1991. 中朝板块北缘中段地壳演化[M]. 北京: 北京大学出版社. 1-136.
- 邵济安,张履桥,牟保磊,韩庆军. 2007. 大兴安岭的隆起与地球动力学背景[M]. 北京: 地质出版社. 1-250.
- 沈光银. 2008. 内蒙古阿鲁科尔沁旗好力宝铜钼矿床地质特征及找矿方向[J]. 地质与资源, 17(4): 273-277.
- 盛继福,付先政,李鹤年. 1999. 大兴安岭中段成矿环境与铜多金属矿床地质特征[M]. 北京: 地震出版社. 1-216.
- 舒启海,蒋 林,赖 勇,鲁颖淮. 2009. 内蒙古阿鲁科尔沁旗敖伦花斑岩铜钼矿床成矿时代和流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 25(10): 2601-2614.
- 王长明,张寿庭,邓 军. 2006. 大兴安岭南段铜多金属成矿时空结构[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 33(5): 478-484.
- 王 永,范宏瑞,胡芳芳,蓝廷广. 2008. 山东五莲七宝山 Cu-Au 矿床成矿流体特征及成矿作用[J]. 岩石学报, 24(9): 2029-2036.
- 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钨(铜)矿区二长花岗岩地球化学、构造环境及含矿性分析[J]. 岩石学报, 24(4): 867-878.
- 吴华英,张连昌,陈志广,万 博,相 鹏,张晓静. 2010. 西拉木伦多金属成矿带鸡冠山斑岩钼矿富氟高盐度高氧逸度流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 26(5): 1363-1374.
- 谢奕汉,范宏瑞,李若梅,王英兰. 1991. 河南祁雨沟爆破角砾岩型金矿床包裹体研究[J]. 矿物学报, 11(4): 370-376.
- 姚军明,赵太平,李 晶,孙亚莉,原振雷,陈 伟,韩 军. 2009. 河南祁雨沟金成矿系统辉钼矿 Re-Os 年龄和锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素地球化学[J]. 岩石学报, 25(2): 374-384.
- 曾庆栋,刘建明,张作伦,覃 锋,陈伟军,张瑞斌,于昌明,叶 杰. 2009a. 华北克拉通北缘鸡冠山斑岩钼矿床成矿年代及印支期成矿事件[J]. 岩石学报, 25(2): 393-398.
- 曾庆栋,刘建明,张作伦,陈伟军,覃 锋,张瑞斌,于文斌,张晓辉,翟明国. 2009b. 华北克拉通北缘西拉沐沦铜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, 25(5): 1225-1238.
- 张德全,鲍修文. 1990. 内蒙古白音诺中酸性火山深成杂岩体的岩石学、地球化学与成因研究[J]. 地质论评, 36(4): 289-297.
- 张德全,赵一鸣. 1993. 大兴安岭及邻区铜多金属矿床论文集[C]. 北京: 地质出版社. 1-161.
- 张炯飞,王显忠,权 恒,武 广,祝洪臣. 2001. 得尔布干成矿区(北片)成矿条件初步研究[J]. 地质与资源, 10(4): 220-224.
- 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铜多金属成矿带为例[J]. 岩石学报, 26(5): 1351-1362.
- 张晓晖,翟明国. 2010. 华北北部古生代大陆地壳增生过程中的岩浆作用与成矿效应[J]. 岩石学报, 26(5): 1329-1341.
- 张晓静,张连昌,靳新娣,吴华英,相 鹏,陈志广. 2010. 内蒙古半拉山钼矿含矿斑岩 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 26(5): 1411-1422.
- 张 宇,赖 勇,卿 敏,王艳忠,徐佳佳. 2008. 黑龙江省金厂金矿 J0 矿体流体地球化学研究[J]. 岩石学报, 24(5): 1131-1144.
- 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,傅先政,鲍修坡,李鹤年,艾永富. 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.
- 赵一鸣,张德全. 1997. 大兴安岭及其邻区铜多金属矿床成矿规律与远景评价[M]. 北京: 地震出版社. 1-318.