

东乌珠穆沁旗索纳嘎钼铅锌多金属矿床成岩成矿年代学

杨梅珍, 侯 坤, 陆建培, 蒋 凤, 付晶晶

中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

摘要: 索纳嘎钼铅锌多金属矿床是近些年继迪岩斑岩型钼矿床之后在二连—东乌珠穆沁旗多金属成矿带发现的又一个中型金属矿床, 其以花岗斑岩岩浆热液体系的细网脉斑岩型钼矿化和热液脉型铅锌矿化的矿化组合为特点。采用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 和辉钼矿 ICP-MS Re-Os 同位素精细测年技术, 对成矿相关索纳嘎花岗斑岩的锆石和 3 个细网脉浸染型钼矿石的辉钼矿样品进行了同位素年代学测定, 分别获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 $164.8 \pm 2.0\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.71$)、谐和曲线的交点年龄 $167.8 \pm 2.6\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=1.4$) 和 $^{187}\text{Re}-^{187}\text{Os}$ 模式年龄加权平均年龄 $166.9 \pm 2.3\text{ Ma}$ 。结果显示, 索纳嘎钼铅锌多金属矿床成岩成矿年龄在误差范围内相一致, 确立了二连—东乌珠穆沁旗成矿带早燕山期(167 Ma 左右)一次重要钼多金属成矿事件。该时限与内蒙古北部地区中生代早期大规模火山喷发作用时限相一致。综合分析认为, 东乌珠穆沁旗一带 167 Ma 和 140 Ma 左右的 2 次重要成矿事件与研究区乃至大兴安岭南部地区中生代 2 次大规模火山喷发和岩浆侵入作用密切相关。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; 辉钼矿 Re-Os 年龄; 成矿特征; 岩石学; 成矿预测; 矿床。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2012)06-1327-11

收稿日期: 2012-07-19

Chronology of Molybdenum-Lead-Zinc Polymetallic Deposit of Suo Naga, Dong Ujimqin Banner Region

YANG Mei-zhen, HOU Kun, LU Jian-pei, JIANG Feng, FU Jing-jing

Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Suo Naga molybdenum-lead-zinc ore deposit has been discovered in Erenhot-Dong Ujimqin Banner metal metallogenic belt in recent years following the discovery of Di Yan porphyry molybdenum deposit. It is characterized by vienlet-type porphyry molybdenum and vien-type lead-zinc mineralization. By using in situ zircon LA-ICP-MS U-Pb and molybdenite ICP-MS Re-Os highly precise dating techniques, one zircon sample from Suo Naga granite-porphyry related to mineralization, and three samples of molybdenum from Mo ores are determined. Zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Weighted mean age of $164.8 \pm 2.0\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.71$), concordant curve intercepts at $167.8 \pm 2.6\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=1.4$) Ma and molybdenite $^{187}\text{Re}-^{187}\text{Os}$ weighted mean age of $127.82 \pm 0.87\text{ Ma}$ are obtained respectively. The results show that the age of granitic magma intrusion corresponds to that of mineralization in the range of deviation. An important metallogenic event, which occurred during early Yanshanian($167\text{ Ma} \pm$) at Erenhot-Dong Ujimqin Banner metal metallogenic belt, was confirmed. The time limit corresponds to that of large scale volcanic eruption in northern region of Inner Mongolia at early stage during Mesozoic period. By comprehensive analysis, it is proposed that the two important metallogenic events are respectively related to twice large-scale volcanic eruptions and intrusions during Mesozoic period in Dong Ujimqin Banner region and even southern area of Hinggan mountains.

Key words: U-Pb age of zircon; Re-Os age of molybdenite; metallogenic characteristics; petrology; ore prospecting; ore deposits.

近些年, 内蒙北部东乌珠穆沁旗地区找矿工作不断取得突破, 区内相继发现迪岩、达赛脱、索纳嘎、巴彦乌拉、查干陶勒盖、吉林宝力格和阿尔哈达等多个钼铅锌银矿床, 成为滨太平洋成矿域(叠加在古亚

洲成矿域之上)大兴安岭成矿省东乌珠穆沁旗—嫩江晚古生代—中生代铁铜钼铅锌金银成矿带(余宏全等, 2009)的重要组成部分, 一直是重点勘查区域和研究的热点。不仅在找矿中有重大突破, 同时在地

壳演化、岩浆作用与成矿关系研究中获得了丰硕的研究成果(聂凤军等,2007a;张万益,2008;许立权等,2010)。值得注意的是,集中于东乌珠穆沁旗额仁高毕一带的迪岩、索纳嘎、巴彦乌拉、达赛脱等多个铅锌钼矿床(图 1),均显示脉状铅锌银矿化和内外接触带细脉浸染状钼矿化的特征,这种成矿特征在整个东乌珠穆沁旗地区及相邻地区具有鲜明特色。弄清楚研究区由脉状铅锌矿化和细脉浸染型钼矿化构成的多金属成矿体系的时代特征及空间分布规律,不仅有助于深入理解滨太平洋成矿域与古亚洲成矿域复杂叠加成矿关系,同时,对指导草原覆盖区开展找矿工作具有重要意义。特别是借助于脉状铅锌银矿化与细脉浸染状钼矿化互为找矿关系可以有效地推动该地区进一步的地质地球化学找矿勘探工作。本研究系统在对东乌珠穆沁旗一带多个金属矿床的野外考察基础上,选择最新发现和正在勘探的

索纳嘎钼铅锌矿床为典型代表,重点解剖与花岗质岩浆活动相关的钼铅锌多金属成矿体系的成矿作用特征、时空结构规律。锆石 U-Pb LA-ICP-MS 和辉钼矿 Re-Os ICP-MS 先进的精细测年技术其测试结果具有误差小、重现性好和可对比性强等优势,是当今广泛使用的成岩成矿有效定年方法。选择与成矿密切相关的岩体和辉钼矿矿石样品分别进行锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 同位素年代学研究,建立了东乌珠穆沁旗一带钼铅锌银矿床模型,确立了二连—东乌珠穆沁旗成矿带早燕山期(167 Ma 左右)一次重要钼多金属成矿事件。综合分析认为,东乌珠穆沁旗一带 167 Ma 和 140 Ma 左右的 2 次重要成矿事件与研究区乃至大兴安岭南部地区中生代 2 次大规模火山喷发和岩浆侵入作用密切相关。这些研究成果可为深入认识东乌珠穆沁旗一带钼铅锌银成矿系统的时空结构规律和弄清钼与铅锌银矿化之间的

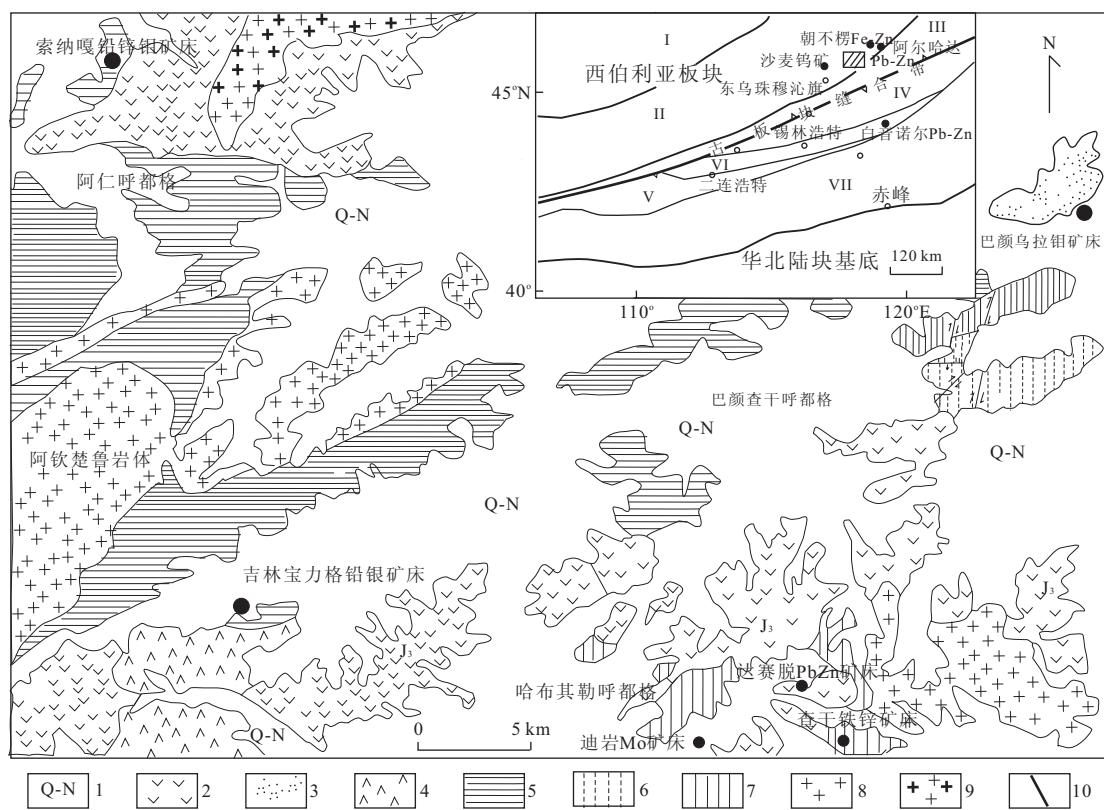


图 1 索纳嘎地区地质简图(据内蒙古地质局,中华人民共和国 1:200 000 巴颜毛都、塔日根敖包幅地质调查报告,1978 编制)

Fig. 1 Simplified geological map of Suo Naga district

- 第三—第四系;
 - 上侏罗统流纹岩和流纹质凝灰角砾岩、英安质晶屑岩屑凝灰岩;
 - 中下侏罗统阿拉坦合力群角岩化砂质板岩及变质砂砾岩;
 - 下二叠统宝力格庙组安山玢岩、安山质凝灰岩;
 - 上泥盆统安格尔音乌拉组泥质板岩夹砂质粉砂质火山碎屑岩、斑点板岩;
 - 上志留统板岩、变质砂岩夹结晶灰岩透镜体;
 - 中奥陶统多宝山组细碧角斑岩、板岩、大理岩及矽卡岩铁锌矿层及锰矿层;
 - 燕山早期黑云母花岗岩;
 - 花岗斑岩;
 - 断层。
- I. 南蒙古早古生带构造岩浆岩带;II. 奥尤特—朝不楞早古生带构造岩浆岩带;III. 东乌珠穆沁旗晚古生代构造—岩浆岩带;IV. 二连浩特—贺根山晚古生代蛇绿混杂岩带;V. 阿尔善图—查干淖尔晚古生代构造—岩浆岩带;VI. 艾力格庙—锡林浩特前寒武纪中间地块;VII. 白乃庙—温都尔庙前寒武纪—早古生代构造—岩浆岩带;图中方框示外框图的大致位置

空间关系和成因联系提供重要参考,为东乌旗草原覆盖区成矿要素推断和预测要素的确定以及找矿模型建立等提供重要地质信息。

1 地质概况

索纳嘎钼铅锌多金属矿床位于额仁高毕西约40 km处,地理坐标为 $117^{\circ}54'28''E, 46^{\circ}16'46''N$ 。其大地构造位置属西伯利亚板块南部边缘早古生代构造—岩浆岩带(图1),位于滨太平洋成矿域(叠加在古亚洲成矿域之上)大兴安岭成矿省东乌旗—嫩江晚古生代—中生代铁铜钼铅锌金银成矿带上(徐志刚,2004)。

区域出露的地层有早古生界中奥陶统和上志留统、晚古生界泥盆系和下二叠统、中生界侏罗系、白垩系以及第三—第四系沉积物(图1),以上侏罗统的流纹岩和流纹质凝灰角砾岩、英安质晶屑岩屑凝灰岩火山岩—火山碎屑岩系和上泥盆统安格尔音乌拉组泥质板岩夹砂质粉砂质火山碎屑岩、斑点板岩沉积碎屑岩系分布面积最广,其中上泥盆统安格尔音乌拉组地层为区域范围内重要的赋矿围岩。

区内岩浆活动强烈,其中以海西期大规模岩浆侵入和燕山期强烈的火山喷发为特征。根据最新的高精度年代学资料,海西期岩浆侵入作用延续时间较长,主要集中在314~284 Ma和237~218 Ma,前者以吉林宝力格北西5 km处的阿钦楚鲁大型花岗岩岩基(299~284 Ma)以及与成矿相关的吉林宝力格二长花岗岩小型岩株(314 Ma,张万益,2008)为代表;后者比较典型的有查干敖包斑状石英闪长岩(237 Ma,张万益,2008)和研究区外围北部的阿尔哈达安基尔乌拉黑云母花岗岩体(218 Ma,张万益,2008)及铅锌矿区花岗斑岩岩株(233 Ma,作者未发表)以及外围西部的沙麦花岗岩体(锆石U-Pb,225.9 Ma;辉钼矿Re-Os,224 Ma,聂凤军等,2010)。燕山期岩浆活动主要以火山喷发作用为主,伴随较小规模的岩浆浅成侵入作用,形成广泛分布的上侏罗统火山岩和火山碎屑岩以及众多小型斑岩岩株和岩脉,少数形成较大的花岗岩岩株,如外围的朝不楞花岗岩岩体(辉钼矿Re-Os:140.7 Ma,聂凤军等,2007b;锆石U-Pb:136.9 Ma,许立权等,2010)。研究区很多钼铅锌多金属成矿作用明显与燕山期酸性火山喷发作用相伴的浅成花岗质岩体侵入作用密切有关,如索纳嘎和迪岩钼铅锌多金属矿床,它们多与小型斑状花岗岩和花岗斑岩岩株有密切的

空间关系。

区内主干断裂为北东向贺根山—索伦山深断裂和查干敖包—东乌珠穆沁旗深大断裂,褶皱构造发育,褶皱轴向与区域主干断裂一致,表现为一系列的北东向复式背斜和向斜。

2 矿床地质特征

矿区基本为第三、第四系覆盖,覆盖层厚度最大达20~30 m,最薄的近10 m,极少量的基岩出露,为草原严重覆盖区。少量的基岩露头和钻孔揭露结果显示,上泥盆统安格尔音乌拉组泥质板岩和变质细砂岩为主要赋矿地层。矿区外围广泛分布上侏罗统火山岩—火山碎屑岩,与下伏地层呈喷发不整合接触关系。区内地层为单斜层构造,走向近东西,倾向北,倾角约50°左右。矿区侵入岩主要为小型花岗斑岩,其地表出露面积约0.016 km²,钻孔揭露结果显示其向下有变大趋势,为一小型花岗斑岩岩株。

索纳嘎钼铅锌多金属矿化在空间上具有一定规律性。钼矿化集中在岩体顶部及外接触带,为以隐伏的花岗斑岩体为中心的钼矿化体系,岩体顶部以稀疏—稠密浸染状辉钼矿矿化为特征,伴较强的硅化、绢云母化和黄铁矿化。岩体外接触带浅变质碎屑岩中似层状网状裂隙带发育,以辉钼矿石英细网脉状矿化为主,属典型的细网脉浸染型矿化(图2a)。细脉的密度受裂隙的发育程度影响,裂隙愈发育、脉体的密度愈大,钼矿化愈强。

铅锌脉状矿化明显受一组由近40条近于平行排列的北东走向断裂带控制。矿脉带主要集中发育于花岗斑岩体的外接触带围岩地层中,向深部到达岩体顶部。矿脉走向北东55°,倾向北西,倾角一般60°,长一般800 m左右,最大延深达505 m,平均宽度一般1.5 m左右。矿脉带中铅锌矿体一般呈脉状、透镜状。矿石品位Pb+Zn一般2%~5%,Ag品位变化较大,从几十~几百g/t,且银矿化强度与铅矿化呈相关关系。矿石具有块状构造、细脉浸染状构造以及角砾状构造。块状矿化的矿石其金属硫化物含量在80%以上,主要集中在矿脉带中间部位,是成矿流体沿着较大的张性空间充填的结果。角砾状矿化为金属硫化胶结破碎的围岩角砾形成的一种矿化,角砾棱角清楚(图2b),显示低温热液角砾岩的一般特点。这种类型矿化主要发育在块状矿化外侧,与细脉浸染状矿化呈渐变过渡关系。细脉浸染状主要是金属硫化物细脉状穿插于破碎的岩石裂隙中,

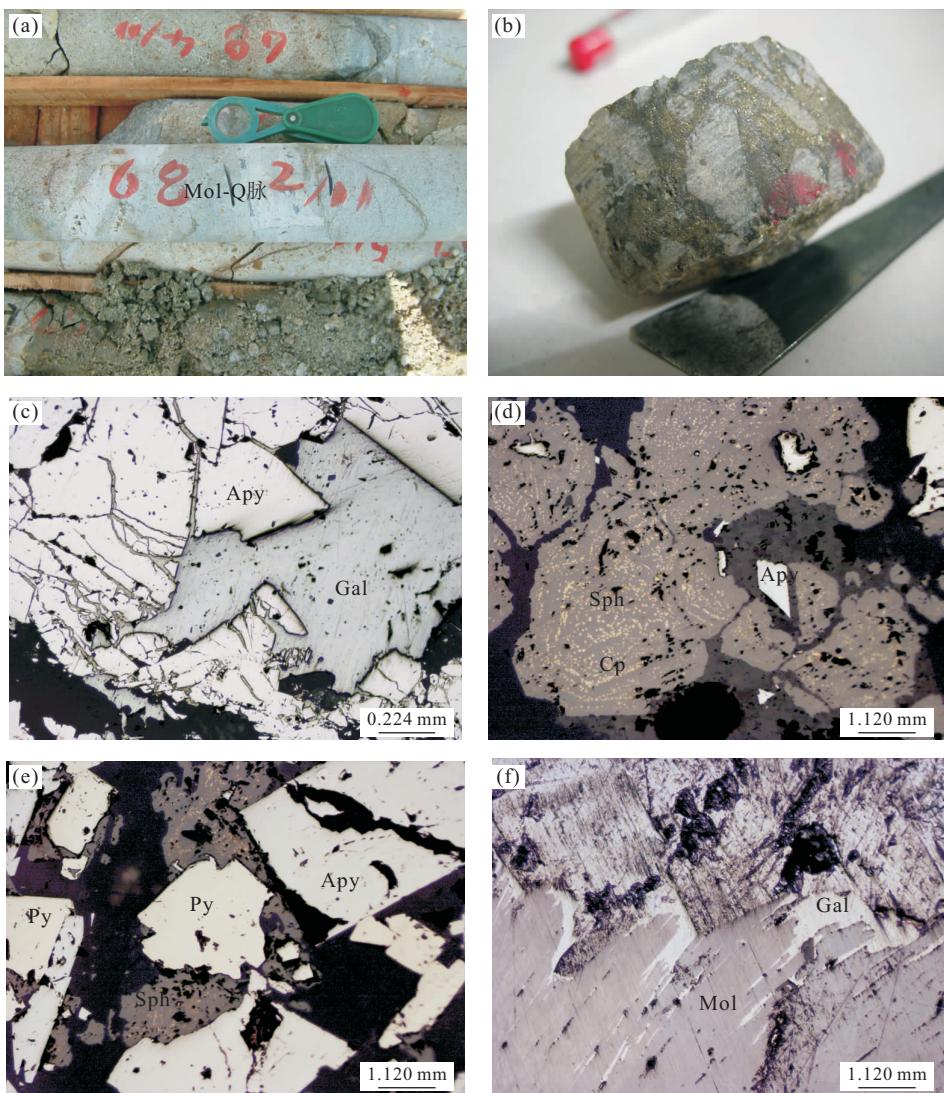


图2 索纳嘎钼铅锌矿床矿化特征

Fig. 2 Mineralization characters of Suo Naga Mo-Pb-Zn deposit

a. 角砾状铅锌矿石; b. 细脉状辉钼矿—石英细脉状矿化; c. 方铅矿(Gal)交代毒砂(Apy)形成的交代结构; d. 闪锌矿中黄铜矿(Cp)环状乳浊出溶结构; e. 闪锌矿交代黄铁矿(Py)和毒砂; f. 方铅矿沿着辉钼矿(Mol)解理交代

主要发育于矿脉带靠边部。矿脉带外围则出现星点状浸染状矿化。这种矿化类型的分带特点是受断裂构造岩的分带性控制,显示断裂构造性质具有成矿流体超压导致的液压致裂断裂构造的一般特点,其明显的方向性显示其迁就和利用了早期的断裂构造,是早先断裂在流体超压这种局部应力作用下重新活动的结果。

脉状铅锌矿化其围岩蚀变相对较弱,多伴随硅化和碳酸盐化。组成矿石的金属矿物主要有毒砂、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿,其次为黄铜矿,微量磁黄铁矿、砷黝铜矿等。非金属矿物主要为石英和方解石等。矿石具有自形粒状结构、各种交代结构(图2c, 2e)以及固溶体出溶结构(图2d)。与钼矿化相伴的

热液蚀变主要为硅化和绢云母化。矿石主要金属矿物为辉钼矿、少量黄铁矿、闪锌矿、方铅矿和微量毒砂等,非金属矿物主要为石英、绢云母、长石等。矿石具有鳞片状结构和交代结构(图2f)。根据辉钼矿—石英脉与铅锌硫化物石英方解石脉之间的穿插关系,热液成矿体系演化大致经历了相对较早的辉钼矿—石英脉阶段和铅锌多金属硫化物阶段以及方解石阶段。根据矿石结构特点,铅锌硫化物阶段经历了毒砂、黄铁矿—闪锌矿、黄铜矿、砷黝铜矿、磁黄铁矿一方铅矿的矿物结晶沉淀过程。

综合分析认为,索纳嘎钼铅锌矿床为典型的斑岩型钼矿化和热液脉型铅锌化的复合型矿床。

3 样品采集及分析方法

索纳嘎花岗斑岩样品(ZK204)取自ZK204钻孔200 m处。岩石为肉红色,斑状结构,块状构造。斑晶主要为石英、斜长石、钾长石和黑云母等,含量在65%左右。其中石英斑晶含量占12%,粒径最大7 mm,一般2 mm左右。长石为具聚片双晶的板状斜长石, $Np' \wedge (010) = 17^\circ$,为更一中长石,含量为30%,粒径1.0~2.5 mm,多不同程度绢云母化。钾长石含量约3%,粒径4 mm左右,为正条纹长石,有轻微高岭土化。黑云母一般0.4 mm×1.2 mm,含量约20%。多绿泥石化,并有铁氧化物析出。基质含量约35%,主要为石英,其次为斜长石,少量黑云母,具细粒—微粒结构。副矿物主要为微量的锆石等。

用于辉钼矿Re-Os同位素测定的3个辉钼矿样品分别采自索纳嘎钼铅锌矿床ZK204孔192 m,188 m和ZK601孔的154 m处,均为石英细脉浸染型辉钼矿矿石,辉钼矿呈鳞片状分布在石英脉中,辉钼矿长径一般在0.02~2.00 mm。

单矿物锆石样品制靶和锆石阴极发光照相以及锆石U-Pb同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。使用的激光剥蚀系统为德国Lamda Physik公司的GeoLas 2005深紫外(DUV)193 nm UArF准分子激光剥蚀系统,分析中采用的激光束斑直径为30 μm ,采用哈佛大学标准锆石91500作为外标校正,将分析未知点与标样交叉分析。使用的ICP-MS为Agilent 7500a型。同位素比值数据处理采用GLITTER(4.0版)软件。

锆石U-Pb同位素分析之前在显微镜下利用透射光和反射光系统观察锆石晶体形态并进行粒度统计。然后选择晶形好、包裹体和裂隙少的锆石颗粒重点进行阴极发光照相。索纳嘎花岗斑岩体中锆石多无色、透明度良好,多呈锥柱状,柱面发育,锥面部分晶体发育。对其中近30颗晶体完好的锆石统计,长一般在120~200 μm ,最大达280 μm ,宽60~90 μm ,长宽比一般在1.5:1.0~3.0:1.0之间,晶面完整、平直光滑。阴极发光(CL)图像(图3)均显示岩浆结晶锆石振荡环带的结构特征。样品测试过程中尽量选择生长环带明显、无包裹体和裂纹的锆石晶体或避开锆石中的裂纹和包裹体。由于岩体侵位时代较新,所测定锆石的 ^{207}Pb 和 ^{235}U 含量低, $^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值精度较差,因此,采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(Compston *et al.*, 1992)。普通铅根据实测的 ^{204}Pb 采用ComPb-Corr #3-151程序进行校正。加权平均年龄计算与谐和曲线绘制采用Isoplot3(Ludwig, 2003)程序完成。

辉钼矿Re-Os同位素测定是由国家地质实验测试中心Re-Os同位素年代实验室测试,由屈文俊、杜安道完成。采用Carius管封闭溶样分解样品。采用电感耦合等离子体质谱仪TJA X-series ICP-MS测试Re-Os同位素比值。Re-Os同位素分析的化学分离过程和分析方法见有关文献(Shirey and



图3 索纳嘎花岗斑岩(ZK204)锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL image of zircons of granite-porphyry from Suo Naga Mo-Pb-Zn deposit

Walker, 1995; 屈文俊和杜安道, 2003). 实验全流程空白 Re 约 1×10^{-11} g, 普通 Os 约 1×10^{-12} g, 远远低于所测样品中的 Re、Os 含量, 因此, 不会影响实验中 Re、Os 含量的准确测定。测试采用的标样为 GBW04436(JDC)。

4 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 同位素测年结果

索纳嘎花岗斑岩(样品 ZK204)锆石 U-Pb 测试结果见表 1。索纳嘎花岗斑岩锆石的 U、Th 含量一般变化于 $220 \times 10^{-6} \sim 657 \times 10^{-6}$ 和 $76 \times 10^{-6} \sim 377 \times 10^{-6}$, 少数较高者 U、Th 含量分别达到 1695×10^{-6} 和 2558×10^{-6} , 少数较低者 U、Th 仅在 100×10^{-6} 以下。除个别测试点显示较小的 Th/U (0.08) 外, 一般在 0.48~0.82 之间, 均大于 1, 显示岩浆锆石的成分特征(Belousova *et al.*, 2002)。17 个测试点, 除 ZK04-1 和 ZK204-13 给出较高的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄和 ZK204-17, ZK204-10 较低的谐和度(83% 和 54%) 外, 其他 13 个测试点在误差范围内基本给出一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 为 157~176 Ma, 集中分布在锆石 U-Pb 年龄谐和曲线上或附近(图 4)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 164.8 ± 2.0 Ma(MSWD = 0.71), 与谐和曲线的交点年龄(167.0 ± 2.6 Ma, MSWD = 1.4)基本一致。因此, 获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 164.8 ± 2.0 Ma 代表索纳嘎花岗斑岩的结晶和侵位年龄, 说明索纳嘎花岗斑岩形成于中侏罗世末期—晚侏罗世早期, 属早燕山期岩浆活动的产物。

辉钼矿以含 Re 和放射性成因的 ^{187}Os 以及极微量的普通 Os 为特征, 且普通 Os 中的 ^{187}Os 更微, 测定 $^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re}$ 比值可以获得准确的辉钼矿结晶年龄, 因此, 辉钼矿 Re-Os 同位素测定是当前广泛应用的有效的定年方法(屈文俊和杜安道, 2003)。为获得重现性好、相对准确的同位素年龄, 本次测试样品的取样量均在 0.5 g 以上, 同时对粒径较大的辉钼矿晶体反复研磨破碎至粉末状、粒度均匀, 避免出现 Re 与 ^{187}Os 的失耦(杜安道等, 2007)。因此, 3 件钼矿石样品的 Re-Os 同位素测试结果(表 2)重现性好, 获得的模式年龄在(165.4 ± 2.5)~(168.8 ± 2.4)Ma 范围内变化, 并获得了相关性很好的等时线(图 5), 说明基本不存在 Re 与 ^{187}Os 的失耦现象。对测试数据用 ISOPLOT3 程序进行处理, 获得

$^{187}\text{Re}-^{187}\text{Os}$ 模式年龄加权平均年龄为 166.9 ± 2.3 Ma, 置信度为 95%。该年龄结果与花岗斑岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄接近, 与谐和曲线的交点年龄(167.0 ± 2.6 Ma, MSWD = 1.4)基本一致。说明辉钼矿 Re-Os 同位素定年结果是可信、有效的。结果表明, 索纳嘎钼铅锌银矿床辉钼矿结晶沉淀的年龄约为 166.9 Ma, 代表矿床成矿年龄。

5 讨论

5.1 东乌珠穆沁旗一带钼铅锌多金属矿床模型与找矿

研究结果显示, 索纳嘎钼铅锌多金属矿床为斑岩型钼矿化与脉状铅锌矿化复合型矿床。除索纳嘎矿床外, 在东乌珠穆沁旗额仁高毕一带还存在多个类似的矿床(图 1), 如迪岩钼多金属矿床, 其细脉浸染状钼矿化集中于岩浆热液体系的靠下部, 赋存标高在 244~1 018 m 之间, 受成矿岩体顶部层状网状裂隙带控制, 其形态形似倒置的碗状。 Pb-Zn-Ag 矿化靠成矿岩浆热液体系上部, 出现在矿区东北部标高 980 m 以上, 相对远离成矿岩体, 受陡立的北西向小型断裂裂隙控制, 以热液角砾岩型和浸染状蚀变岩型的脉状矿化为特征。该矿床就是通过铅锌化探异常发现的。与迪岩钼矿床相距仅 5 km 的达赛脱铅锌矿床, 从目前勘探结果看, 主要揭露了铅锌脉状矿体, 其外围或深部是否同样存在钼矿化也值得关注。

钼矿化与脉状铅锌矿化空间上的密切时空关系和分带规律, 不仅在本研究区, 在我国的其他地区如东秦岭钼多金属成矿带也普遍存在(毛景文等, 2009)。其深层次原因很可能是由于岩浆热液体系本身具有的温度和物化条件梯度变化以及成矿元素地球化学性质差异, 造成成矿元素在热液体系中迁移方式及沉淀结晶的温度压力条件不同, 从而导致 Mo 与 Pb、Zn、Ag 等空间上分离(毛景文等, 2009)。钼矿化和铅锌矿化构成完整的热液成矿体系, 两者可以互为找矿的指示。因此, 重视地质研究和矿床模型的建立有助于推动草原覆盖区对这类矿床找矿勘查和评价。

5.2 东乌珠穆沁旗一带钼铅锌多金属成矿时代特征及动力学背景

对索纳嘎钼铅锌多金属矿床的成矿相关花岗斑岩岩体锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 同位素高精度测年结果显示, 两者年龄在误差范围内基本一致, 说明钼铅锌成矿热液体系与花岗斑岩之间的内在成因联

表1 索纳嘎花岗斑岩锆石LA-ICP-MS U-Pb年代学分析结果

Table 1 Zircon U-Pb dating data by LA-ICP-MS for granitic porphyry from Suo Naga Mo-Pb-Zn deposit

样号	组成(10^{-6})		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	^{232}Th	^{238}U	Th/U	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄(Ma)	$\pm 1\sigma$	年龄(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ	or
ZK204-01	279	345	0.81	0.053 5	0.001 8	0.402 0	0.015 8	0.055 2	0.001 3	0.019 4	0.000 3	343	11	346	8	388	7	99%		
ZK204-02	130	220	0.59	0.051 6	0.002 7	0.189 2	0.009 9	0.026 9	0.000 4	0.008 5	0.000 4	176	8	171	2	170	7	97%		
ZK204-03	377	457	0.82	0.051 9	0.002 5	0.173 3	0.007 5	0.024 6	0.000 3	0.007 4	0.000 2	162	6	157	2	149	4	96%		
ZK204-04	174	318	0.55	0.052 2	0.002 7	0.181 9	0.008 9	0.025 9	0.000 3	0.007 8	0.000 3	170	8	165	2	158	6	97%		
ZK204-05	197	348	0.56	0.051 7	0.002 9	0.183 6	0.010 4	0.026 2	0.000 4	0.007 4	0.000 3	171	9	166	2	148	5	97%		
ZK204-06	248	413	0.60	0.049 5	0.002 4	0.172 2	0.008 1	0.025 3	0.000 3	0.007 8	0.000 2	161	7	161	2	158	5	99%		
ZK204-07	309	528	0.59	0.049 7	0.002 2	0.179 3	0.008 0	0.026 1	0.000 3	0.008 0	0.000 2	167	7	166	2	162	4	99%		
ZK204-08	110	230	0.48	0.048 4	0.002 8	0.170 2	0.009 8	0.025 4	0.000 4	0.008 1	0.000 4	160	9	162	3	163	8	98%		
ZK204-09	2558	1695	1.51	0.052 8	0.001 6	0.188 7	0.005 6	0.025 6	0.000 2	0.007 8	0.000 2	176	5	163	2	157	4	92%		
ZK204-10	32.8	67	0.49	0.082 4	0.006 0	0.321 0	0.023 2	0.028 0	0.000 8	0.010 5	0.000 7	283	18	178	5	211	14	54%		
ZK204-11	265	492	0.54	0.043 1	0.002 4	0.155 8	0.008 3	0.026 4	0.000 3	0.008 0	0.000 3	147	7	168	2	161	6	96%		
ZK204-12	186	325	0.57	0.049 4	0.003 3	0.186 6	0.011 4	0.027 7	0.000 4	0.008 8	0.000 4	174	10	176	3	177	7	98%		
ZK204-13	107	1359	0.08	0.059 2	0.001 4	0.663 9	0.016 1	0.080 4	0.000 8	0.019 2	0.000 8	517	10	499	5	385	16	96%		
ZK204-14	237	486	0.49	0.048 1	0.002 2	0.182 1	0.008 1	0.027 4	0.000 4	0.008 2	0.000 3	170	7	175	3	164	6	97%		
ZK204-15	363	657	0.55	0.055 0	0.002 5	0.193 7	0.008 4	0.025 4	0.000 3	0.007 5	0.000 3	180	7	162	2	151	5	89%		
ZK204-16	227	356	0.64	0.053 1	0.003 4	0.187 1	0.011 8	0.025 4	0.000 4	0.007 3	0.000 3	174	10	162	3	147	6	92%		
ZK204-17	76	137	0.55	0.065 2	0.005 5	0.229 7	0.014 0	0.027 9	0.000 6	0.008 1	0.000 4	210	12	178	4	163	8	83%		

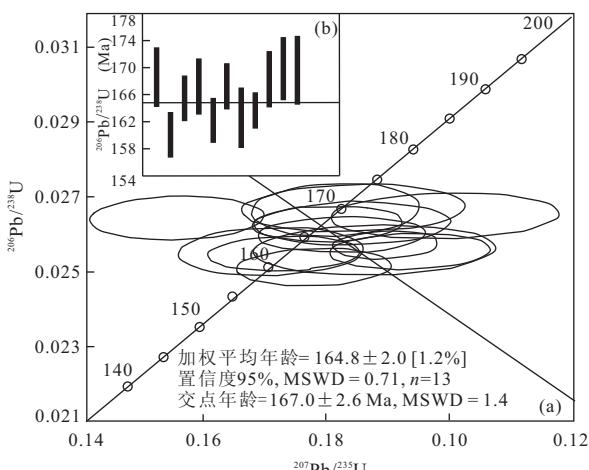


图 4 索纳嘎花岗斑岩锆石 U-Pb 谱和曲线(a)和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄(b)

Fig. 4 U-Pb concordant curve (a) and weighted mean age (b) plots of zircon of granitic porphyry from Suo Naga

系,这点也得到基础地质的支持.表明索纳嘎钼铅锌矿床成岩成矿时限大致为 167 Ma,相当于中侏罗世末—晚侏罗世初,属早燕山期.这一时限与迪岩钼矿床(辉钼矿 Re-Os 模式年龄 159.5 ± 2.5 Ma)(表 2)基本一致.东乌珠穆沁旗一带中生代火山岩分布广泛,属大兴安岭南部晚中生代火山岩带的重要组成部分.前人通过火山岩地球化学和高精度年代学系统研究,认为大兴安岭南部晚中生代的火山活动存在晚侏罗世($163 \sim 150$ Ma)和早白垩世($144 \sim 122$ Ma)2 个火山喷发期(Ying *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010; 李可等, 2012).因此,索纳嘎、迪岩钼铅锌多金属矿床成岩成矿时限与大兴安岭南部晚中生代火山岩带的早期火山喷发时限一致.由此可见,在东乌珠穆沁旗一带中生代大规模火山喷发期间存在一次与早燕山期花岗质岩浆活动有关的重要钼铅锌多金属成矿事件,这种成矿作用很可能与大规模火山喷发启动之前或间歇期小型的浅成花岗质岩体侵入作用有关.

二连浩特—东乌珠穆沁旗成矿带属古亚洲成矿域,其东部被滨太平洋成矿域叠加,呈现多期次成矿特点.综合前人高精度年代学研究成果,认为东乌珠穆沁旗一带主要存在 2 期 4 次主要成矿事件:

(1) 海西期.发生在 314 Ma 左右和 $244 \sim 218$ Ma 的 2 次重要成岩成矿事件.前者如吉林宝力格铅银矿床(锆石 U-Pb: 314 ± 8.8 Ma, 张万益, 2008);后者如阿尔哈达铅锌矿床(矿区花岗斑岩锆石 U-Pb : 233 Ma, 作者未发表;黑云母花岗岩锆石

U-Pb 218 ± 5 Ma, 张万益, 2008)、查干敖包铁锌矿床(锆石 U-Pb: 237 Ma, 张万益, 2008)、沙麦云英岩型 W(Mo)矿床($224 \sim 225$ Ma, 聂凤军等, 2010)以及西乌珠穆沁旗地区的白音诺尔铅锌矿床(花岗闪长岩锆石 U-Pb: 244.5 Ma, 江思宏等, 2011)等.海西期是中亚造山带演化的重要时期,古亚洲洋经历了晚石炭世(~ 310 Ma)之前的闭合碰撞、晚石炭世—早二叠世($\sim 310 \sim 276$ Ma)造山后伸展以及晚二叠—中三叠世($\sim 272 \sim 230$ Ma)缝合带最终缝合(李益龙等, 2012)的造山过程.东乌珠穆沁旗及邻区属中亚造山带,处在西伯利亚和华北板块之间.成岩成矿年代学证据显示,其海西期成岩成矿作用与古亚洲洋的俯冲闭合、南北两大板块汇聚碰撞的构造动力学过程相耦合.晚二叠—中三叠世($\sim 272 \sim 230$ Ma)中亚造山带南北两大板块的汇聚碰撞期间岩浆和成矿作用强烈,该时期的成岩成矿很可能与南北两陆块逐渐汇聚引发的陆缘弧岩浆活动有关,大致显示由二连浩特—贺根山板块缝合带向北出现主弧和内弧岩浆岩成矿带的分带性,其中前者为查干朝不楞一带与中基—中性岩浆作用有关的矽卡岩型铁锌多金属成矿带,后者为沙麦及其以北的蒙古境内与 S 型花岗岩有关的 W-Sn-Mo 云英岩石英脉型(聂凤军等, 2010)钼钨成矿带.因此,将东乌珠穆沁旗一带发生在 $244 \sim 218$ Ma 期间的成矿事件视为中亚造山带俯冲、聚合、碰撞及碰撞后伸展等连续造山过程的组成部分,比将其作为一次单独的印支期成矿作用(张万益, 2008)更为合适.

(2) 燕山期.发生在 167 Ma 左右和 140 Ma 左右的 2 次成岩成矿事件.前者如索纳嘎和迪岩钼铅锌矿床,后者如朝不楞细脉型钼矿化(辉钼矿 Re-Os, 140 Ma, 聂凤军等, 2010).古生代末期,随着古亚洲洋的消失,二连浩特—东乌珠穆沁旗一带及邻区各类古大洋盆地先后闭合,晚二叠—中三叠世缝合带最终缝合(李益龙等, 2012),华北陆块与西伯利亚板块最终结合为一个整体,此后全区由古亚洲构造域向滨太平洋构造体制转换(聂凤军等, 2007a; 李益龙等, 2010),受库拉板块与欧亚大陆多期次俯冲消减作用影响,研究区乃至整个中国东部中生代发生大规模的中酸性火山岩浆喷发,在本区形成晚侏罗世($163 \sim 150$ Ma)和早白垩世($144 \sim 122$ Ma) (Ying *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010; 李可等, 2012) 火山喷发岩带.因此东乌珠穆沁旗一带 167 Ma 和 140 Ma 左右的 2 次重要成矿事件与燕山期两次大规模的火山喷发及伴随的岩浆侵入作用密

表2 内蒙东乌旗索纳嘎和迪岩钼多金属矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素测试结果

Table 2 Re-Os isotopic age of molybdenite from Suo Naga and Diyan deposit

矿床	样号	样重(g)	Re($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)		普 Os($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$)		$^{187}\text{Re}(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$		$^{187}\text{Os}(\text{ng} \cdot \text{g}^{-1})$		模式年龄(Ma)	
			测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
索纳嘎	ZK601-1	0.020 45	12.78	0.10	0.013 2	0.059 1	8.032	0.065	22.33	0.19	166.7	2.4
	ZK601-2	0.050 06	13.57	0.13	0.088 1	0.029 6	8.530	0.085	24.02	0.19	168.8	2.5
	ZK204-1	0.050 46	27.45	0.25	0.032 4	0.012 3	17.260	0.160	47.63	0.43	165.4	2.5
迪岩	DY-SHK	0.050 53	17.68	0.17	0.003 6	0.020 3	11.120	0.110	29.57	0.27	159.5	2.5

注: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,置信度95%。Re-Os模式年龄t按下式计算: $t=1/\lambda(\ln(1+^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re}))$,其中 $\lambda(^{187}\text{Re衰变常数})=1.666\times 10^{-11}\text{a}^{-1}$ (Smolian *et al.*, 1996),模式年龄的不确定度还包括衰变常数的不确定度(1.02%),置信度95%。

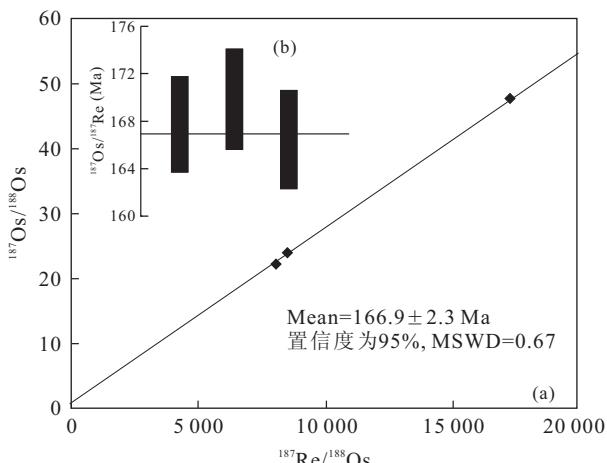


图5 索纳嘎钼铅锌多金属矿床辉钼矿 Re-Os 等时线(a)和加权平均年龄图(b)

Fig. 5 Re-Os isochron (a) and weighted average (b) of molybdenites from Suo Naga Mo-Pb-Zn deposit

切相关。

同一地区不同地质历史时期、不同构造环境,其成矿条件的差异必将在一定程度上造成其成因类型及元素组合的某些差异,具有较为鲜明的时代特征。索纳嘎、迪岩钼多金属矿床所代表的早燕山期的成矿作用以Mo-Pb-Zn成矿元素组合以及脉状铅锌、细脉浸染状钼矿化组合型式为特征,它们与海西中期吉林宝力格低温热液脉型Ag-Pb矿化、海西末期阿尔哈达、白音诺尔等单一的Pb-Zn脉状矿化(江思宏等,2011)、沙麦云英岩型Mo-W矿化(聂凤军等,2010)等明显不同。

6 结论

(1)通过对东乌珠穆沁旗地区索纳嘎钼铅锌矿床成矿地质背景和成矿作用特征系统分析,建立了斑岩型钼矿化与脉状铅锌矿化复合型的矿床模式,并指出斑岩型钼矿化和脉状铅锌矿化可以互为找矿

指示。

(2)借助于锆石U-Pb年代学和辉钼矿Re-Os高精度年代学研究手段,厘定索纳嘎矿床成岩成矿时限为167 Ma左右,相当于中侏罗世末—晚侏罗世初。首次确立了与中生代早期区域型大规模火山喷发及伴随的花岗质岩浆侵入作用相关的一次重要的钼多金属成矿事件。综合分析认为,东乌珠穆沁旗一带167 Ma和140 Ma左右的2次重要成矿事件与研究区乃至兴安岭南部地区中生代的2次大规模火山喷发和岩浆侵入作用密切相关。因此,中生代火山岩分布区小型花岗质侵入体及相关钼多金属成矿问题值得关注和研究,是未来找矿工作的重要方向。

致谢:本研究得到了中国地调局“覆盖区矿产综合预测—覆盖区矿产预测与示范验证”项目的资助。野外考察期间得到了内蒙古自治区第十一地质队张瀚夫和内蒙赤峰冶金地质队谭宏利、张月峰等同仁的帮助。样品测试期间得到了中国地质大学(武汉)地质过程重点实验室ICP-MS室胡兆初教授以及国家地质实验测试中心杜安道、屈文俊教授等的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢!

References

- Belousova, E. A., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602–622. doi: 10.1007/s00410-002-0364-7
- Compston, W., Williams, I. S., Kirschvink, J. L., et al., 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time scale. *Journal of the Geological Society*, 149: 171–184. doi: 10.1144/gsjgs.149.2.0171
- Du, A. D., Qu, W. J., Wang, D. H., et al., 2007. Subgrain-size decoupling of Re and ^{187}Os within molybdenite. *Mineral Deposits*, 26(5): 572–580 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S. H., Nie, F. J., Bai, D. M., et al., 2011. Geochronol-

- ogy evidence for Indosinian mineralization in Baiyinnuorhe Pb-Zn deposit of Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 30(5): 787—798 (in Chinese with English abstract).
- Li, K., Zhang, Z. C., Li, J. F., et al., 2012. Zircon SHRIMP U-Pb age and geochemical characteristics of the Mesozoic volcanic rocks in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 31(5): 671—685 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. L., Zhou, H. W., Xiao, W. J., et al., 2012. Superposition of Paleo-Asian and West-Pacific tectonic domains in the eastern section of the Solonker suture zone: insights from petrology, geochemistry and geochronology of deformed diorite in Xar Moron Fault Zone, Inner Mongolia. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(3): 434—450 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. L., Zhou, H. W., Zhong, Z. Q., et al., 2010. Extension of suture zone between North China and Siberia craton in Early Cretaceous: insights from geochronology and geochemistry of intermediate dykes from Xar Moron fault belt in Inner Mongolia. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(6): 921—932 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2003. User's manual for Isoplot 3.0: a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 4: 1—71.
- Mao, J. W., Ye, H. S., Wang, R. T., et al., 2009. Mineral deposit model of Mesozoic porphyry Mo and vein-type Pb-Zn-Ag ore deposits in the eastern Qinling, Central China and its implication for prospecting. *Geological Bulletin of China*, 28(1): 72—79 (in Chinese with English abstract).
- Nie, F. J., Jiang, S. H., Zhang, Y., 2007a. Metallogenic studies and prospecting orientation in central and eastern segments along China-Mongolia. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Nie, F. J., Zhang, W. Y., Du, A. D., et al., 2007b. Re-Os isotopic age dating of molybdenite separates from the Chaobuleng skarn iron-polymetallic deposit, Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(4): 315—323 (in Chinese with English abstract).
- Nie, F. J., Hu, P., Jiang, S. H., et al., 2010. Geological features, geochronology and origin of the tungsten and tungsten (molybdenum) deposits in the Shamai-Yuguzer mineralization concentrated camp along the Sino-Mongolian border. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(3): 383—394 (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. *Rock and Mineral Analysis*, 22(4): 254—262 (in Chinese with English abstract).
- Shirey, S. B., Walker, R. J., 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis. *Anal. Chem.*, 67: 2136—2141. doi: 10.1021/ac00109a036
- Smoliar, M. L., Walker, R. J., Morgan, J. W., 1996. Re-Os ages of group II A, III A, IV A, and VI B iron meteorites. *Science*, 271: 1099—1102. doi: 10.1126/science.271.5252.1099
- She, H. Q., Li, H. H., Li, J. W., et al., 2009. The metallogenetic characteristics and prospecting direction of the copper-lead-zinc polymetal deposits in the northern-central Daxing'anling Mountain, Inner Mongolia. *Acta Geoscientica Sinica*, 83(10): 1456—1472 (in Chinese with English abstract).
- Xu, L. Q., Chen, Z. Y., Chen, Z. H., et al., 2010. SHRIMP dating of medium-coarse-grained granite in Chaobuleng iron deposit, Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 29(2): 317—322 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. G., 2004. Discussion on division of metallogenic domains in China. *Mineral Deposits*, 23(Suppl.): 54—61 (in Chinese with English abstract).
- Ying, J. F., Zhou, X. H., Zhang, L. C., et al., 2010. Geochronological framework of Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an range, NE China, and their geological implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(6): 786—793. doi: 10.1016/j.jseaes.2010.04.035
- Zhang, W. Y., 2008. Magmatic activity and metallogeny of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. H., Gao, S., Ge, W. C., et al., 2010. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China: implications for subduction-induced delamination. *Chemical Geology*, 276(3—4): 144—165. doi: 10.1016/j.chemgeo.2010.05.013

附中文参考文献

- 杜安道,屈文俊,王登红,等,2007.辉钼矿亚晶粒范围内Re和¹⁸⁷Os的失耦现象.矿床地质,26(5):572—580.
- 江思宏,聂凤军,白大明,等,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.
- 李可,张志诚,李建锋,等,2012.内蒙古西乌珠穆沁旗地区中生代中酸性火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和地球化

- 学特征. 地质通报, 31(5): 671—685.
- 李益龙, 周汉文, 肖文交, 等, 2012. 古亚洲构造域和西太平洋构造域在索伦缝合带东段的叠加: 来自内蒙古林西县西拉木伦断裂带内变形闪长岩的岩石学、地球化学和年代学证据. 地球科学——中国地质大学学报, 37(3): 434—450.
- 李益龙, 周汉文, 钟增球, 等, 2010. 华北—西伯利亚板块对接带早白垩纪的裂解: 来自西拉木伦断裂带中性岩墙群的锆石 U-Pb 年龄及地球化学证据. 地球科学——中国地质大学学报, 35(6): 921—932.
- 毛景文, 叶会寿, 王瑞廷, 等, 2009. 东秦岭中生代钼铅锌银多金属矿床模型及其找矿评价. 地质通报, 28(1): 72—79.
- 聂凤军, 江思宏, 张义, 2007a. 中蒙边境中东段金属矿床成矿规律和找矿方向. 北京: 地质出版社.
- 聂凤军, 张万益, 杜安道, 等, 2007b. 内蒙古朝不楞矽卡岩型铁多金属矿床辉钼矿铼—锇同位素年龄及地质意义. 地球学报, 28(4): 315—323.
- 聂凤军, 胡朋, 江思宏, 等, 2010. 中蒙边境沙麦—玉古兹尔地区钨和钼(钼)矿床地质特征, 形成时代和成因机理. 地球学报, 31(3): 383—394.
- 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铼—锇地质年龄. 岩矿测试, 22(4): 254—262.
- 余宏全, 李红红, 李进文, 等, 2009. 内蒙古大兴安岭中北段铜铅锌金多金属矿床成矿规律与找矿方向. 地质学报, 83(10): 1456—1472.
- 许立权, 陈志勇, 陈郑辉, 等, 2010. 内蒙古东乌旗朝不楞铁矿区中粗粒花岗岩 SHRIMP 定年及其意义. 矿床地质, 29(2): 317—322.
- 徐志刚, 2004. 关于中国成矿域划分的讨论. 矿床地质, 23(增刊): 54—61.
- 张万益, 2008. 内蒙古东乌珠穆沁旗岩浆活动与金属成矿作用(博士学位论文). 北京: 中国地质科学院.