

编号: 0258-7106(2012)01-0119-10

# 内蒙古苏尼特左旗准苏吉花钼矿床成岩成矿年代学及其地质意义\*

刘翼飞<sup>1</sup>, 聂凤军<sup>1</sup>, 江思宏<sup>1</sup>, 侯万荣<sup>1</sup>, 梁清玲<sup>1</sup>, 张可<sup>1,2</sup>, 刘勇<sup>1,2</sup>

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

**摘要** 通过辉钼矿 Re-Os 及锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年代学的研究, 测得辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为  $(298.1 \pm 3.6)$  Ma, 赋矿似斑状花岗岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为  $(298.2 \pm 3.1)$  Ma, 确定准苏吉花斑岩型钼矿床成岩成矿时代为早二叠世。辉钼矿中 Re 的含量指示成矿物质可能为壳幔混合来源。结合区域内其他斑岩型矿床的成矿年代, 可以将区内斑岩型矿化时代划分为 4 个阶段, 即晚泥盆世成矿阶段、早二叠世成矿阶段、三叠纪成矿阶段及白垩纪成矿阶段。根据这些斑岩型矿床矿化形式在不同地质历史时期的演化, 可以将其划分为 2 期, 即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。早二叠世斑岩型钼矿化可能与板块俯冲过程中弧后伸展作用岩浆作用有关, 而三叠纪及白垩纪期间斑岩型钼矿化则是西伯利亚板块与华北板块拼接后多期伸展作用的产物。中蒙边境中东部地区的这些斑岩型矿床矿化形式上的差异是该区域内成矿环境变化的反映。

**关键词** 地球化学; Re-Os 同位素定年; 斑岩钼矿床; 伸展作用与钼矿化; 准苏吉花; 苏尼特左旗; 内蒙古  
**中图分类号**: P618.65 **文献标志码**: A

## Geochronology of Zhunsujihua molybdenum deposit in Sonid Left Banner, Inner Mongolia, and its geological significance

LIU YiFei<sup>1</sup>, NIE FengJun<sup>1</sup>, JIANG SiHong<sup>1</sup>, HOU WanRong<sup>1</sup>, LIANG QingLing<sup>1</sup>, ZHANG Ke<sup>1,2</sup> and LIU Yong<sup>1,2</sup>

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;

2 School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology of Beijing, Beijing 100083, China)

### Abstract

A precise Early Permian Re-Os isochron age of  $(298.1 \pm 3.6)$  Ma for the molybdenite and a zircon SHRIMP U-Pb age of  $(298.2 \pm 3.1)$  Ma for the ore-bearing granite from the Zhunsujihua porphyry molybdenum deposit in Sonid Left Banner of Inner Mongolia provide new information for the ore-forming epoch of the Zhunsujihua porphyry molybdenum deposit. The rhenium content of molybdenite suggests a crust-mantle mixed source for the ore-forming substance. Combined with the mineralization ages of the porphyry deposits in northern central Inner Mongolia and the adjacent Mongolia from the literature, the authors recognized four metallogenic episodes, i. e., Late Devonian, Early Permian, Triassic and Cretaceous. On the basis of the metallogenic evolution, the porphyry mineralization type is divided into the Late Devonian copper ore-forming stage in

\* 本文得到地质大调查项目(编号: 1212010911029)及基本业务费项目(K1012)的联合资助

第一作者简介 刘翼飞, 男, 1981年生, 在读博士, 主要从事金属矿床地质的研究。Email: lyfsky@126.com

收稿日期 2010-09-29; 改回日期 2011-11-19。秦思婷编辑。

an arc tectonic setting and the Early Permian and subsequent molybdenum ore-forming stage in an extensional tectonic setting. The difference and evolution of mineralization types in geohistory indicate variation of tectonic setting, which gradually changed from the subduction accretion related tectonic setting through the subduction related back arc spreading tectonic setting to the continental extensional setting. These data also provide great potential for exploration of molybdenum deposits hosted in the extensional setting.

**Key words:** geochemistry, Re-Os dating, porphyry molybdenum deposit, molybdenum mineralization in extensional tectonic setting, Zhunsujihua, Sonid Left Banner, Inner Mongolia

自2006年以来,在内蒙古中北部地区陆续发现了一系列钼矿床(点),如乌兰德勒(大型)、达莱敖包(中型)、乌花敖包(大型)、宝格达乌拉(大型)、准苏吉花(小型)、乌日尼图(小型)(图1),使得该区有望成为中国继东秦岭钼矿带、燕辽钼矿带及西拉沐伦钼矿带之后的又一条重要钼矿带。该钼矿带东西长184 km,南北宽120~160 km,钼矿床(点)主要为斑岩型,含矿岩体以高钾钙碱性花岗质岩石为主。已有不少研究者对其进行了报道,并对其地质特征、成岩成矿年代学及成矿规律进行了初步的研究、探讨和总结(邵积东等,2009;陶继雄等,2009,2010),但是由于该钼矿带发现的时间短,不少矿床(点)的研究程度还较为薄弱,从而制约了对该区钼矿床形成

机理及成矿规律的进一步认识。

准苏吉花斑岩型钼矿床及其外围地质调查活动始于20世纪50年代,主要完成了1:100万的区调及航空物探工作,70年代建字00911部队进行了1:20万的水文地质普查及水文钻探;1980年,内蒙古自治区地质局第一区域地质调查队进行了区域地质矿产调查工作,编制了1:20万区域地质矿产图,并提交了1:20万区域地质调查报告,对区域地层、岩浆岩、构造进行了划分和论述。2003~2005年,内蒙古自治区地质调查院开展了1:5万矿调工作,对本区花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩的含矿性作了详细研究。2006年,内蒙古自治区地质调查院进行了物化探异常查证及钻孔验证,发现了达工业要求的钼

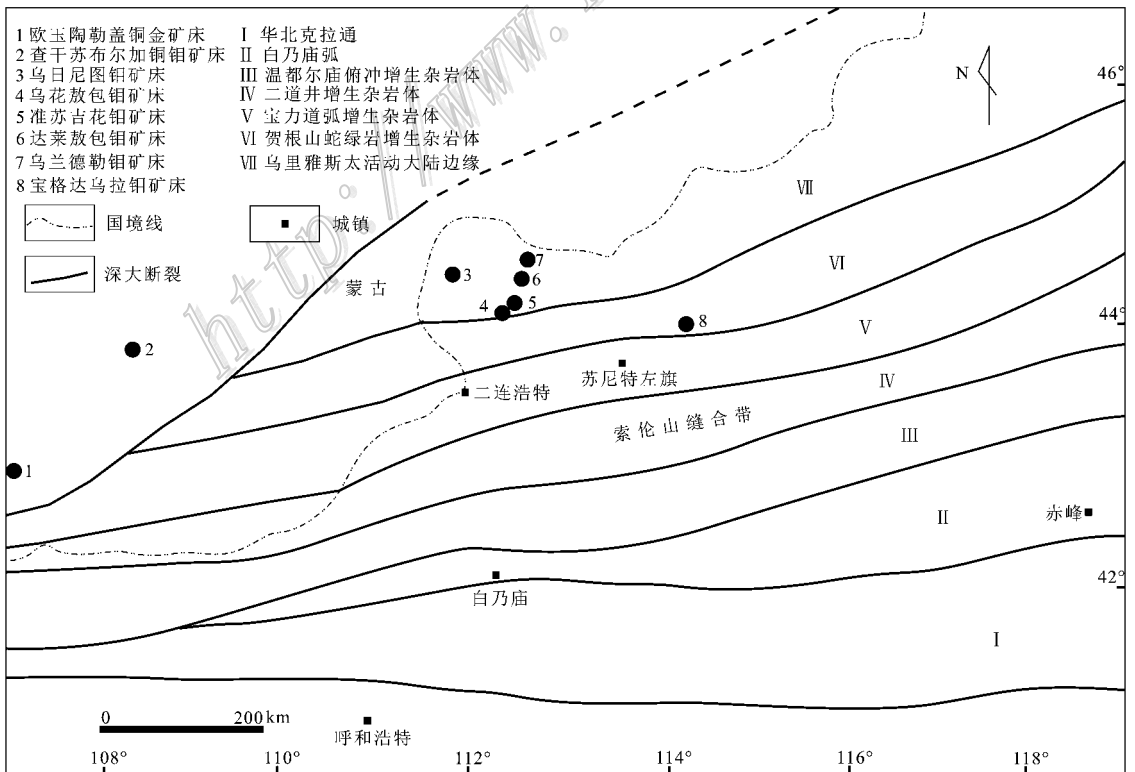


图1 准苏吉花斑岩型钼矿床构造区位图(据 Xiao et al., 2003 修改)

Fig. 1 Tectonic setting of the Zhunsujihua molybdenum deposit (after Xiao et al., 2003)

矿体,并于 2007 年开始对准苏吉花矿床进行了系统的勘查工作,目前获得钼金属量 6 千余吨(平均品位 0.113%),并显示出进一步的找矿勘查前景。

本文在前人研究的基础上,对新发现的准苏吉花钼矿床开展了系统的年代学研究,选取矿石中的辉钼矿进行  $\text{Re-Os}$  同位素定年,赋矿的似斑状花岗岩进行锆石 SHRIMP U-Pb 同位素定年,以确定其成岩成矿时代,并结合区内其他斑岩型矿床成矿年代学研究成果,进一步探讨了矿床成矿地质背景。

## 1 区域地质背景

研究区位于内蒙古苏尼特左旗,地理坐标范围为东经  $112^{\circ}41'00'' \sim 112^{\circ}45'00''$ ,北纬  $44^{\circ}30'00'' \sim 44^{\circ}32'00''$ 。大地构造上处于华北板块与西伯利亚板块之间的显生宙造山带内(中亚造山带东段),古生代属西伯利亚板块南缘俯冲增生带,是中蒙边境巨型成矿带的组成部分(聂凤军等, 2007)(图 1)。古生代至中生代期间,发生了明显的碰撞造山过程、碰撞后伸展作用及其间的构造大转换阶段(Xiao et al., 2003; Meng, 2003; 毛景文, 2005)。因此,该区古生界和中生界分布广泛,海西期、印支期和燕山期岩浆岩发育,各种构造形迹复杂,矿床(点)分布广泛(内蒙古自治区地质矿产局, 1991; 芮宗瑶等, 1994; 赵一鸣等, 1997; 聂凤军等, 2007; 邵积东等, 2009)。

区域内地层主要为古生界及中生界。古生界主要为奥陶系和石炭系-二叠系变质砂岩、细砂岩、粉砂岩、杂砂岩及板岩,中酸性火山碎屑岩,安山玢岩等。中生界主要为侏罗系和白垩系安山岩、粗面岩类以及陆相碎屑岩。区域岩浆活动强烈,自海西期至燕山晚期,均有岩浆侵入。海西期侵入体主要为闪长岩、花岗闪长岩、辉绿岩、闪长玢岩及花岗斑岩;印支期、燕山期侵入体主要为花岗岩、闪长玢岩、花岗斑岩、石英二长斑岩及细晶岩等。区内断裂构造发育,并明显受区域大地构造格局控制,主要断裂呈北东-北东东向,控制主要岩体的展布方向,次级断裂主要呈北西-北西西向,常见后期岩脉充填其中。

## 2 矿床地质特征

准苏吉花钼矿区地层主要为奥陶系巴彦呼舒组变质碎屑岩及石炭系-二叠系宝力高庙组碎屑岩段的变质粉砂岩。岩浆岩出露面积占全区面积的四分

之三以上,其中准苏吉花岗岩体为矿床的赋矿岩体,侵入于石炭系-二叠系宝力高庙组变质粉砂岩、凝灰质粉砂岩、凝灰质长石砂岩、安山玢岩岩段,另有燕山期花岗岩体分布于矿区的外围,少量的辉绿玢岩、细晶岩和石英脉产于花岗岩体内。矿区地层和岩浆岩大体呈北东向展布,而脉岩类及矿体则主要呈北西向产出(图 2)。

准苏吉花岗岩体侵位于石炭系-二叠系宝力高庙组内。岩性主要为似斑状黑云母花岗岩,斑晶为斜长石、钾长石及少量黑云母,基质主要为石英、钾长石、斜长石及黑云母。岩石化学具有过铝质高钾钙碱性的特点,有明显分异特征( $\text{DI} = 96.55 \sim 97.94$ )(表 1,图 3)。岩体与围岩之间呈侵入接触关系,接触面不规则,岩体常以舌状侵入于围岩中。侵入接触部位具有较为明显的热液蚀变,岩体一侧主要为硅化、绿帘石化、黄铁矿化和云英岩化,石英细脉也较为发育,矿化明显。外侧主要为绿泥石化和黄铁矿化,石英脉发育程度较低,偶见矿化。

准苏吉花斑岩钼矿床矿体形态由钻孔岩芯的最低品位圈定,呈透镜状产出。矿体具尖灭再现现象(图 4),最大延长达 800 余 m,一般在 300 m 左右,延深数十至 400 余 m,厚度一般在 1 m 至十余 m 之间,平均 3.36 m。矿石钼品位一般在 0.06%~0.35%,最高值为 3.93%,平均值为 0.138%。

准苏吉花斑岩矿床矿化作用可以分为 3 个阶段:云英岩化阶段、硅化阶段和绢云母化阶段。其中云英岩化阶段和硅化阶段与钼矿化具有密切的联系,是钼的主要生成阶段。硅化阶段和绢云母化阶段有少量的磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、白钨矿等形成。

矿石主要呈细脉浸染状、网脉状和细脉状,辉钼矿常以细小鳞片状产于石英细脉、网脉的外侧,少数产于细脉的内部。细脉两侧常见硅化、绢云母化,偶见绿泥石化、绿帘石化、泥化等蚀变。金属矿物主要为辉钼矿,并有少量的黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、白钨矿等。脉石矿物主要为石英,其次有少量的绢云母、黑云母、绿泥石、萤石、绿帘石、碳酸盐等。

## 3 样品的采集及同位素测年方法

本次  $\text{Re-Os}$  同位素地质年代学研究选取的 8 件辉钼矿样品采于矿体的不同部位,主要选取云英岩



图2 准苏吉花斑岩型钼矿床地质简图

1—第四系；2—石炭系-二叠系宝力高庙组碎屑岩及火山碎屑岩；3—奥陶系巴彦呼舒组变质碎屑岩；4—海西期花岗闪长岩体；5—海西晚期准苏吉花斑岩体；6—燕山期花岗岩体；7—后期岩脉；8—断层

Fig. 2 Simplified geological map of the Zhunsujihua porphyry molybdenum deposit

1—Quaternary; 2—Carboniferous-Permian Baoligaomiao Formation clastic and volcanoclastic rocks; 3—Ordovician Bayanhushu Formation metamorphic clastic rocks; 4—Hercynian granodiorites; 5—Late Hercynian Zhunsujihua granite porphyry; 6—Yanshanian granite; 7—Dyke; 8—Fault

表1 准苏吉花赋矿花岗岩主量元素分析结果

Table 1 Major elements data of ore-bearing granite from the Zhunsujihua molybdenum deposit

组分	似斑状黑云母花岗岩		
	ZJ-1	ZJ-2	ZJ-3
	wt(B)/%		
SiO <sub>2</sub>	78.00	78.20	77.65
TiO <sub>2</sub>	0.08	0.08	0.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.69	12.04	12.23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.70	0.41	0.63
FeO	0.16	0.14	0.14
MnO	0.01	<0.01	<0.01
MgO	0.03	0.06	<0.01
CaO	0.16	0.42	0.14
Na <sub>2</sub> O	3.52	3.18	2.93
K <sub>2</sub> O	5.04	5.12	5.32
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	<0.01	0.02
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.44	0.02	0.40
CO <sub>2</sub>	0.26	0.34	0.26
LOI	0.58	0.37	0.46
总量	99.65	100.01	99.76
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	8.56	8.30	8.25
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O <sup>*</sup>	1.43	1.61	1.82
Λ/CNK <sup>*</sup>	1.01	1.04	1.13
DI <sup>*</sup>	97.94	96.55	96.92

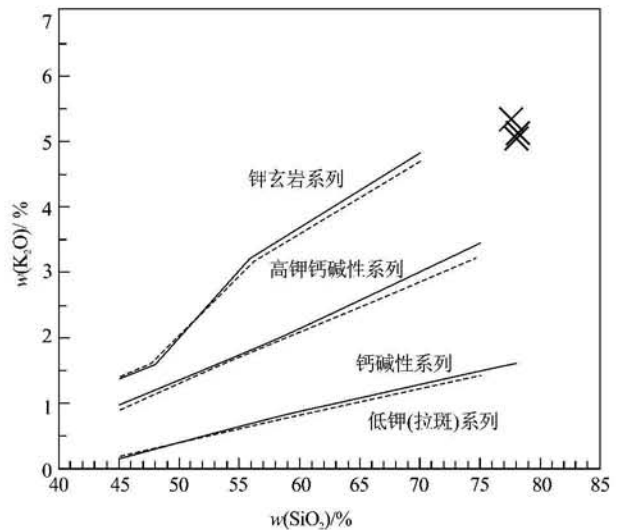


图3 准苏吉花赋矿似斑状花岗岩 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图解

Fig. 3 K<sub>2</sub>O versus SiO<sub>2</sub> diagram for granite from the Zhunsujihua porphyry deposit

注:分析数据由中国地质科学院国家测试中心通过X荧光光谱仪测定。\*单位为1。

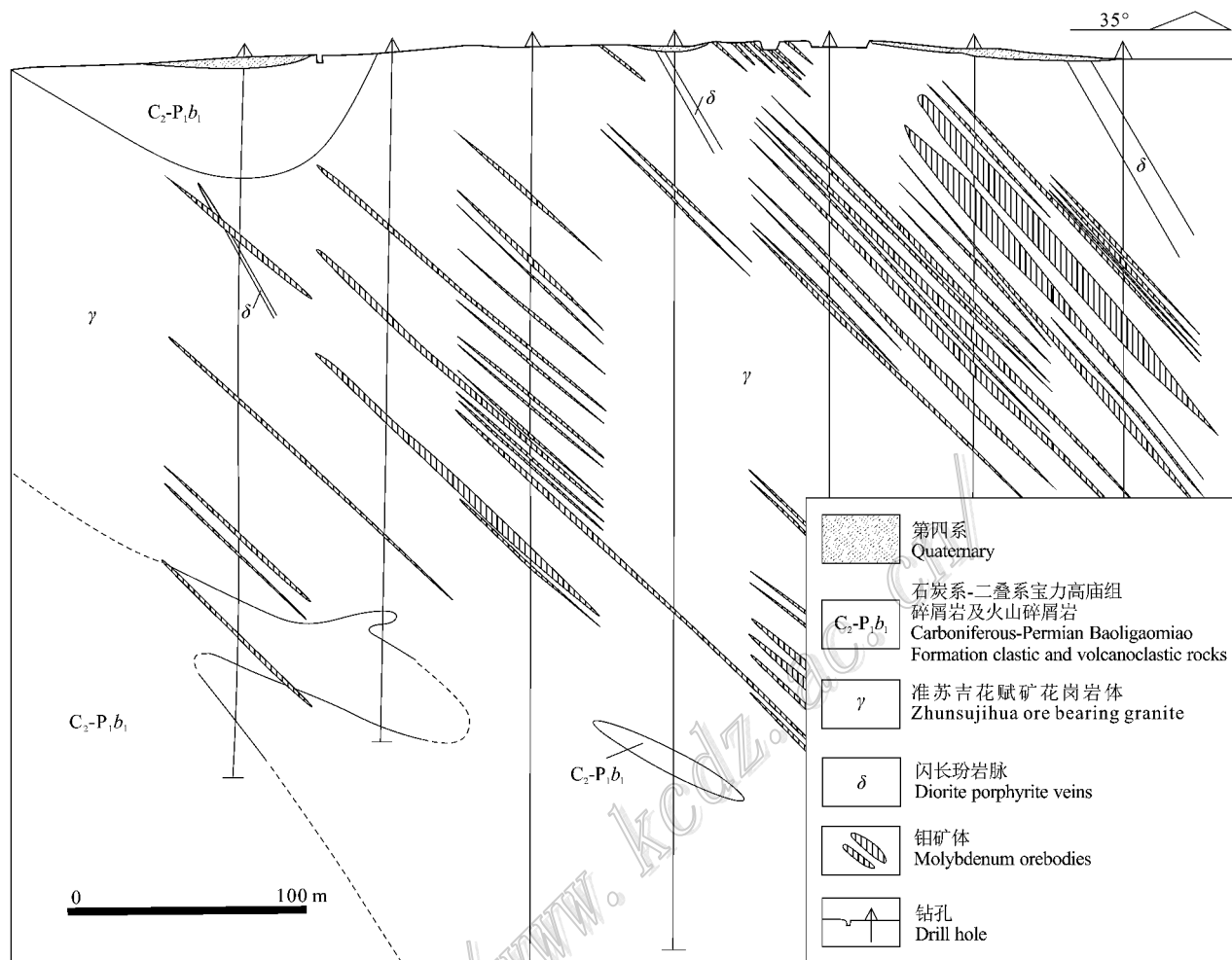


图 4 准苏吉花斑岩型钼矿床 8 号勘探线剖面图

Fig. 4 Geological section along No. 8 exploration line of the Zhunsujihua molybdenum deposit

化阶段的细脉状辉钼矿石,辉钼矿含量较高,呈细小鳞片集合体嵌布于石英细脉中,部分样品中辉钼矿与黄铁矿、黄铜矿呈共生关系。用于锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年代学研究的样品(ZJ-2)选取于含矿似斑状花岗岩,岩石较为新鲜,轻微蚀变。

### 3.1 Re-Os 同位素测年方法

将野外采集的矿石样品置于双目镜下,手工挑选出辉钼矿单矿物,辉钼矿无氧化、无污染,纯度大于 98%。辉钼矿样品 Re-Os 同位素测试工作在中国地质科学院国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室完成。样品的处理流程及分析方法详见 Du 等(2004)及杜安道等(1994, 2001)现简述如下:

首先准确称取待分析样品,将其加入到 Carius 管底部,并在低温下(-50~-80℃)将超纯浓 HCl 加入准确称取的<sup>185</sup>Re 和<sup>190</sup>Os 混合稀释剂,然后再依

次加入适量 HNO<sub>3</sub> 和浓度为 30% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>。当 Carius 管底溶液冻实后,加温至 200℃ 并保持 24 小时以分解样品。样品分解以后,将 Carius 管回温使内容物完全融化,转入蒸馏瓶中,加热微沸 30 min,用水吸收蒸馏出的 OsO<sub>4</sub>。将蒸馏残液转入 Teflon 烧杯中,在电热板上烧干,加水并重复两次以降低酸度,然后加入适量的 NaOH,稍微加热,随后转入 Teflon 离心管中并加入适量的丙酮以萃取 Re。Re、Os 同位素的测定在美国 TJA 公司生产的电感耦合等离子体质谱仪 TJA X-series ICP-MS 上进行。对于 Re 选择质量数为 185、187,用 190 监测 Os。对于 Os 选择质量数为 186、187、188、189、190、192,用 185 监测 Re。测试中 Re、Os 和<sup>187</sup>Os 的空白水平分别为(0.067 0 ± 0.002 3 ~ 0.068 1 ± 0.000 6) ng、(0.000 0 ~ 0.000 2 ± 0.000 1) ng、(0.000 1 ~ 0.000 5) ng。测

试样品的同时,也对实验标准物质 GBW04435(HLP) 中的 Re 和 Os 进行了测定,以检验并保证样品测试结果的可靠程度,计算过程中采用的衰变常数( $^{187}\text{Re}$ )  $= 1.666 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$  (Smoliar et al., 1996)。

### 3.2 锆石 SHRIMP 同位素测年方法

将用于定年研究的新鲜样品破碎达到合适粒度后,用常规方法分选出其中的锆石。在双目镜下挑选完整且透明度好的锆石颗粒用于测年。将挑选出的锆石颗粒与标准锆石一起置于环氧树脂制成的样品靶中,将样品靶打磨抛光至锆石中心部位暴露出来。对样品靶上的锆石进行透射光、反射光和阴极发光照相(图5),以便在进行 SHRIMP 测定时选取合适的分析部位,并在测定完成后进行合理的数据解释。锆石阴极发光和锆石微区原位 U-Th-Pb 同位素分析在北京离子探针中心进行。分析过程中,用标准锆石 TEM( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $(416.8 \pm 1.3) \text{Ma}$  [Black et al., 2003] 的测定值进行  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  比值的校正;用 M257( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $(561.3 \pm 0.3) \text{Ma}$ ),  $w(\text{U})$  为  $840 \times 10^{-6}$  (Nasdala et al., 2008) 进行 U 含量校正。测试按照宋彪等(2002)描述的流程进行,测定时标准样品和未知样品按 1:4 的比例交替进行。测试过程中,尽量选择无包裹体及无裂纹的部位作为一次离子流斑点的目

标位置。数据处理及 U-Pb 谐和图绘制采用 Squid 程序和 Isoplot 程序完成。单个测试点的误差均为  $1\sigma$ , 加权平均值的误差为 95% 的置信度误差。

## 4 分析结果

### 4.1 Re-Os 同位素测年结果

准苏吉花钼矿床 8 件辉钼矿样品测试结果列于表 2, 从表中可以看出, 8 件辉钼矿样品中  $w(\text{Re})$  及  $w(^{187}\text{Os})$  分别变化于  $(24.90 \pm 0.21) \times 10^{-6} \sim (68.10 \pm 0.83) \times 10^{-6}$  及  $(79.28 \pm 0.67) \times 10^{-9} \sim (214.20 \pm 2.30) \times 10^{-9}$  之间,  $w(\text{Re})$  平均为  $50.51 \times 10^{-6}$ , 由于普通 Os 相对 Re 含量非常低, 因此可以认为样品辉钼矿中 Os 几乎为放射性成因 (Stein et al., 2001)。各个样品的 Re-Os 模式年龄相近, 变化范围为  $(298.6 \pm 4.3) \sim (303.3 \pm 4.3) \text{Ma}$ , 加权平均值为  $(300.5 \pm 1.5) \text{Ma}$  ( $2\sigma$ )。所有辉钼矿样品数据拟合合成一条良好的  $^{187}\text{Re}-^{187}\text{Os}$  等时线(图6), 采用 Isoplot 软件 (Ludwig, 2003) 计算的等时线年龄为  $(298.1 \pm 3.6) \text{Ma}$  ( $2\sigma$ ),  $\text{MSWD} = 0.31$ ,  $^{187}\text{Os}$  初始值为  $(1.1 \pm 1.6)$ , 所得的等时线年龄与加权平均模式年龄较为接近。

### 4.2 锆石 SHRIMP 同位素测年结果

本次研究在样品 ZJ-2 上一共测定了 10 个锆石颗粒, 获得了 10 个数据。测点位置见图 5, U、Th、Pb 含量及其同位素比值和误差等分析数据见表 3。锆石中 U 和 Th 含量变化范围较大, 分别介于  $117 \times 10^{-6} \sim 1165 \times 10^{-6}$  之间和  $49 \times 10^{-6} \sim 676 \times 10^{-6}$  之间, 平均值为  $546 \times 10^{-6}$  和  $287 \times 10^{-6}$ , Th/U 变化于 0.30~0.77 之间, 平均为 0.51, Th 与 U 的含量具明显的线性关系, 有岩浆成因锆石特征, 可以认为准苏吉花钼矿赋矿花岗岩中锆石主要是岩浆成因的 (Pidgeon et al., 1998)。10 个测点所测得数据总体较为稳定, 构成一个相关年龄组, 且集中分布, 比较谐和(图7), 显示所测年龄是可靠的。因所测定样品为年轻锆石, 故年龄值采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄, 其加权平均年龄为  $(298.2 \pm 3.1) \text{Ma}$  ( $\text{MSWD} = 0.79$ )。

## 5 讨论

### 5.1 准苏吉花钼矿床成矿时代

准苏吉花钼矿床主要赋存于似斑状高钾钙碱性

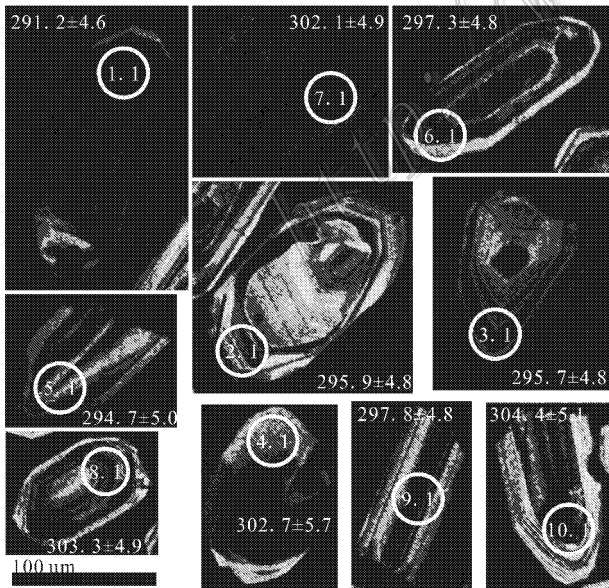


图 5 准苏吉花钼矿赋矿花岗岩中锆石阴极发光图像

Fig. 5 CL images of zircons from ore-bearing granite in the Zhunsujihua molybdenum deposit



表 2 准苏吉花钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测定结果

Table 2 Re-Os isotopic analytical results of molybdenite separates from the Zhunsujihua molybdenum deposit

样品号	$m/g$	$\alpha(\text{Re})(\mu\text{g}/\text{g})$	$\alpha(\text{Os})(\text{ng}/\text{g})$	$\alpha(^{187}\text{Re})(\mu\text{g}/\text{g})$	$\alpha(^{187}\text{Os})(\text{ng}/\text{g})$	模式年龄/Ma
ZJ-4	0.02112	66.90 ± 0.55	0.0933 ± 0.0191	42.05 ± 0.35	211.10 ± 1.70	300.6 ± 4.2
ZJ-6	0.01998	50.03 ± 0.43	0.1383 ± 0.0602	31.44 ± 0.27	156.80 ± 1.30	298.6 ± 4.3
ZJ-8	0.02011	50.39 ± 0.47	0.1177 ± 0.0799	31.67 ± 0.29	158.90 ± 1.40	300.4 ± 4.6
ZJ-12	0.02109	55.79 ± 0.48	0.1122 ± 0.0572	35.06 ± 0.30	176.30 ± 1.50	301.1 ± 4.3
ZJ-15	0.02063	54.29 ± 0.43	0.2122 ± 0.0390	34.12 ± 0.27	170.90 ± 1.70	299.9 ± 4.5
ZJ-17	0.05057	68.10 ± 0.83	0.1468 ± 0.0353	42.81 ± 0.52	214.20 ± 2.30	299.6 ± 5.4
ZJ-18	0.02064	33.68 ± 0.25	0.1342 ± 0.0390	21.17 ± 0.16	106.10 ± 0.90	300.2 ± 4.2
ZJ-19	0.02226	24.90 ± 0.21	0.1420 ± 0.0540	15.65 ± 0.13	79.28 ± 0.67	303.3 ± 4.3

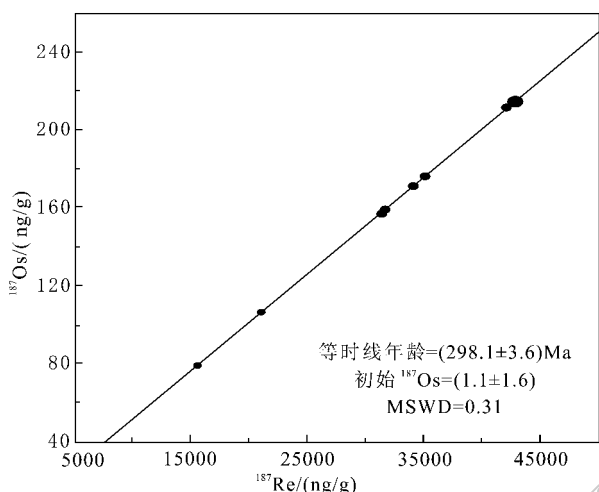


图 6 准苏吉花斑岩型钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素等时线图

Fig. 6 Re-Os isochron plot for molybdenite samples from Zhunsujihua porphyry molybdenum deposit

花岗岩及其围岩石炭系-二叠系宝力高庙组碎屑岩中, 矿石呈细脉浸染状、网脉状及细脉状产出, 矿体与围岩间为过渡关系, 具有一致的岩性, 显示矿体与花岗岩有密切的空间及成因联系。本次研究选取的 8 件辉钼矿样品的 Re-Os 同位素等时线年龄为  $(298.1 \pm$

3.6) Ma, 可以认为代表了该矿床中辉钼矿矿化时间, 该年龄与赋矿花岗岩的成岩年龄  $(298.2 \pm 3.1)$  Ma 在误差范围内一致, 显示该矿床成矿作用发生于早二叠世。

## 5.2 辉钼矿中 Re 的含量

斑岩型矿床中辉钼矿 Re 含量的地质意义, 已有不少学者进行过研究和探讨, 存在较大的争议。不少学者 (Stein et al., 2001; Xiong et al., 2002; Sotnikov et al., 2003) 认为成矿流体的性质是影响斑岩型矿床中辉钼矿 Re 含量的重要因素, 如成矿作用的温度、成矿流体中 Re 的浓度、成矿流体的氧化状态及成矿流体的酸碱度等。Stein 等 (2001) 认为, 辉钼矿中 Re 的含量与质量平衡有关, 因此钼品位较低的斑岩铜矿相比钼含量更高的斑岩钼矿其辉钼矿的 Re 含量更高。也有学者 (Mao et al., 1999; Stein et al., 2001; Berzina et al., 2005) 认为辉钼矿中 Re 的含量指示了成矿物质的来源, 是壳源、幔源或者壳幔混合来源的反映。据最新的统计研究表明 (Berzina et al., 2005), 总体上, 若辉钼矿中 Re 含量较高则其  $\delta^{34}\text{S}$  值及含矿斑岩体的初始 Sr 同位素比值均较低, 显示其对指示成矿物质来源具重要意义。

表 3 准苏吉花钼矿赋矿花岗岩锆石 SHRIMP U-Th-Pb 测年分析结果

Table 3 SHRIMP U-Th-Pb dating results of zircon from ore-bearing granite in the Zhunsujihua molybdenum deposit

分析点号	$^{206}\text{Pb}/\%$	$\text{U}/10^{-6}$	$\text{Th}/10^{-6}$	$\text{Th}/\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/10^{-6}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^* \pm \%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U} \pm \%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U} \pm \%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma			
1.1	—	1165	676	0.58	46.2	0.05356	1.4	0.3413	2.2	0.04621	1.6	291.2 ± 4.6
2.1	0.16	525	159	0.30	21.2	0.0511	2.3	0.3307	2.8	0.04698	1.7	295.9 ± 4.8
3.1	—	538	244	0.45	21.7	0.05320	1.3	0.3443	2.1	0.04694	1.6	295.7 ± 4.8
4.1	0.53	117	49	0.42	4.84	0.0502	7.9	0.3330	8.2	0.04807	1.9	302.7 ± 5.7
5.1	0.43	260	145	0.56	10.5	0.0492	6.0	0.3170	6.2	0.04677	1.7	294.7 ± 5.0
6.1	—	522	262	0.50	21.1	0.05339	1.8	0.3474	2.5	0.04720	1.7	297.3 ± 4.8
7.1	0.98	541	167	0.31	22.5	0.0494	3.6	0.3270	4.0	0.04798	1.7	302.1 ± 4.9
8.1	0.46	541	418	0.77	22.5	0.0488	4.0	0.3240	4.4	0.04817	1.7	303.3 ± 4.9
9.1	0.44	800	520	0.65	32.7	0.0491	2.2	0.3200	2.7	0.04729	1.6	297.8 ± 4.8
10.1	0.72	446	228	0.51	18.7	0.0476	4.0	0.3170	4.3	0.04835	1.7	304.4 ± 5.1

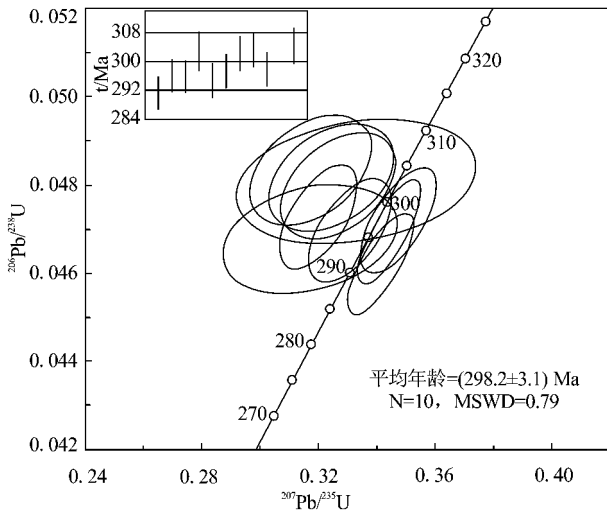


图7 准苏吉花赋矿花岗岩锆石 U-Pb 谐和图及平均年龄  
Fig. 7 Zircon U-Pb concordia diagram and average age of ore-bearing granite from the Zhunsujihua molybdenum deposit

准苏吉花斑岩型钼矿床中辉钼矿的  $w(\text{Re})$  在  $24.90 \sim 68.10 \mu\text{g/g}$  之间, 平均为  $50.51 \mu\text{g/g}$ , 与世界范围内斑岩型钼(铜)矿床中辉钼矿的平均值( $42 \times 10^{-6}$ )相似(19个矿床统计结果)(Berzina et al., 2005)。内蒙古中北部钼矿床中辉钼矿的 Re 含量见表4, 该区斑岩型钼矿床中  $w(\text{Re})$  平均变化于  $6.71 \sim 75.16 \mu\text{g/g}$  间, 平均为  $44.13 \mu\text{g/g}$ , 其海西晚期-印支期斑岩型钼矿床中的 Re 含量比世界范围内平均值稍高。从准苏吉花钼矿床辉钼矿中 Re 含量来看, 成矿物质可能来源于壳幔混合源区(Mao et al., 1999)。

### 5.3 成矿地球动力学背景探讨

内蒙古中北部及邻近的蒙古国地区, 从古生代以来由北向南增生、碰撞及伸展的作用过程中也伴

随着大量的斑岩型矿床的形成。按形成的地质时代由老至新有: 蒙古国的欧玉陶勒盖(Oyu Tolgoi)铜-金矿床, 该矿床的两个辉钼矿 Re-Os 模式年龄分别为  $(372 \pm 1.2) \text{Ma}$  和  $(373 \pm 1.2) \text{Ma}$  (Khashgerel et al., 2006), 显示二者为晚泥盆世岩浆活动的产物; 蒙古国的查干苏布尔加(Tsagaan Suvarga)铜-钼矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为  $(370 \pm 5.9) \text{Ma}$  (Watanabe et al., 2000; 侯万荣等, 2010); 本次研究显示, 准苏吉花钼矿床为早二叠世高钾钙碱性岩浆活动的产物; 从宝格达乌拉钼-钨矿床获取的赋矿斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和辉钼矿 Re-Os 等时线年龄显示其成岩成矿作用发生于三叠纪、印支期  $(238.1 \pm 1.8) \text{Ma}$  (待发表数据); 乌兰德勒钼-铜多金属矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素定年结果为  $(131.4 \pm 1.6) \text{Ma}$ , 锆石 SHRIMP U-Pb 同位素定年结果为  $(131.3 \pm 1.6) \text{Ma}$ , 显示该矿床成岩成矿作用发生于早白垩世, 属于燕山期构造-岩浆活动的产物(陶继雄等, 2009, 2010)(表4)。对比以上斑岩型矿床的形成时代, 显示中蒙边境西伯利亚板块南缘内斑岩型铜-钼成矿事件具有多期、多阶段的特点, 以上这些斑岩型矿床, 从地质历史分布上来看, 可划分为晚泥盆世成矿阶段、早二叠世成矿阶段、三叠纪成矿阶段及白垩纪成矿阶段, 而从矿化特点来看, 可将中蒙边境西伯利亚板块南缘斑岩型矿床划分为2期, 即晚泥盆世成矿期, 以斑岩型铜矿化为主, 矿床中钼的含量较低, 而后的斑岩型矿化则主要以钼矿化为主, 矿床中铜的含量较低, 前后2个成矿期矿化特征具明显差异, 这显示了前后2个成矿阶段的大地构造背景及成矿机理存在较明显的差异。

表4 内蒙中北部及邻区斑岩型矿床成矿年龄及其辉钼矿  $w(\text{Re})$  统计表

Table 4 Ore chronology and Re content of molybdenite of porphyry deposits in northern central Inner Mongolia and its neighboring area

矿床名称	数据量	最大值/ $(\mu\text{g/g})$	最小值/ $(\mu\text{g/g})$	平均值/ $(\mu\text{g/g})$	辉钼矿 Re-Os 年龄	数据来源
准苏吉花钼矿床	8	68.10	24.90	50.51	$(298.2 \pm 3.1) \text{Ma}$ (等时线年龄)	本文
宝格达乌拉钼-钨矿床	7	120.70	33.31	75.16	$(238.1 \pm 1.8) \text{Ma}$ (等时线年龄)	待发表数据
乌兰德勒钼-铜矿床	5	14.36	0.64	6.71	$(134.0 \pm 4.2) \text{Ma}$ (等时线年龄)	陶继雄等, 2010
蒙古国欧玉陶勒盖铜-金矿床	2	-	-	-	$(372 \pm 1.2) \text{Ma}$ $(373 \pm 1.2) \text{Ma}$ (模式年龄)	Khashgerel et al., 2006
蒙古国查干苏布尔加铜-钼矿床	5	122.1	9.76	74.9	$(370.0 \pm 5.9) \text{Ma}$ (等时线年龄)	侯万荣等, 2010 Watanabe et al., 2000



准苏吉花钼矿床所在地区在古生代属西伯利亚板块的南缘,由北向南逐渐增生并于二叠纪末期与其南侧的华北板块碰撞于索伦山缝合带(王荃等,1991;徐备等,1997;Badarch et al.,2002;Xiao et al.,2003;李锦轶,2009)。自晚古生代以来,该区经历了重要的伸展作用(邵济安等,1994;童英等,2010),分布有大量富钾或 A 型花岗岩(姚玉鹏,1997;邵济安等,1999;吴福元等,1999;施光海等,2004;童英等,2010)。近些年的研究显示,该区部分斑岩型钼矿床与这些高钾钙碱性-碱性花岗岩具有密切的时空成因联系。虽然规模较小,但准苏吉花钼矿床是中蒙边境西伯利亚板块南缘内成矿年龄较老并以钼矿化为主的斑岩型矿床,与其北侧的欧玉陶勒盖及查干苏布尔加斑岩铜矿床具明显差别。它的形成对区域成矿环境具有重要的指示意义,暗示成矿背景在准苏吉花矿床形成期间可能已经发生较为明显的改变。而之后的三叠纪及白垩纪斑岩型钼矿化则可能是西伯利亚板块与华北板块拼合后地壳伸展作用的产物(Westra et al.,1981;Sinclair,2007),与其南部邻近的蒙古国晚泥盆世与挤压构造体制下岛弧岩浆作用有关的斑岩型铜矿化(Perello et al.,2001;Khashgerel et al.,2006;侯万荣等,2010)形成明显的对比。西伯利亚板块南缘的斑岩矿化在地质历史上的差别及演化(由铜矿化逐渐过渡到钼矿化)也是构造环境演化的结果,记录了该地区由西伯利亚板块南缘俯冲增生体制逐渐向两大板块拼贴后伸展构造体制的转变。这种转变也显示了区内二叠纪及其后的高钾钙碱性高分异型花岗岩岩浆侵入活动与斑岩型钼矿化具有重要的成因联系,因此该地区在寻找与高分异型花岗岩相关的钼矿床(点)方面存在巨大的潜力。

## 6 结 论

(1)通过对辉钼矿 Re-Os 同位素年代学的研究,确定准苏吉花斑岩型钼矿床成矿时代为(298.1±3.6)Ma,赋矿花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(298.2±3.1)Ma,成岩成矿年龄在误差范围内吻合较好,属早二叠世。Re 的含量显示矿床成矿物质可能来源于壳幔混合源区。

(2)根据矿化形式的不同,可将该地区斑岩矿化分为 2 个成矿阶段,即晚泥盆世时期与弧岩浆作用相关的斑岩型铜矿化阶段和早二叠世及其后的斑

岩型钼矿化阶段。根据矿化时代的不同,可将区域内斑岩型钼矿床划分为 4 个成矿期,即晚泥盆世成矿期、早二叠世成矿期、三叠纪成矿期和白垩纪成矿期。

(3)区域内斑岩型矿化形式的差异及演化是构造体制转变的结果。晚泥盆世时期斑岩型铜矿化可能与俯冲增生构造体制下弧岩浆作用有关,早二叠世准苏吉花钼矿床的形成暗示早二叠世时期矿床形成的构造环境已经发生了较为明显的改变,而三叠纪及白垩纪斑岩型钼矿化则可能是两大板块拼接后多期伸展作用的产物。

志 谢 本次研究过程中得到了内蒙古九勘院同行的大力协助,在此深表感谢!

## 参考文献/References

- 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-钼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-钼同位素地质年龄[J]. 岩矿测试,20(4):247-252.
- 侯万荣,聂凤军,江思宏,白大明,刘妍,云飞,刘翼飞. 2010. 蒙古国查干苏布尔加大型铜-钼矿床地质特征及成因[J]. 地球学报,31(3):307-320.
- 李锦轶. 2009. 中国大陆地质历史的旋回与阶段[J]. 中国地质,36(3):524-527.
- 毛景文,谢桂青,李晓峰,张作衡,王义天,王志良,赵财胜,杨富全,李厚民. 2005. 大陆动力学演化与成矿研究:历史与现状——兼论华南地区在地质历史演化期间大陆增生与成矿作用[J]. 矿床地质,24(3):193-205.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京:地质出版社.
- 聂凤军,江思宏,张义,白大明,胡朋,赵元艺,张万益,刘妍. 2007. 中蒙边境中东段金属矿床成矿规律和找矿方向[M]. 北京:地质出版社.
- 芮宗瑶,施林道,方如恒. 1994. 华北陆块北缘及邻区有色金属矿床地质[M]. 北京:地质出版社,1-576.
- 邵济安,藏绍先,牟保磊,李晓波,王冰. 1994. 造山带的伸展构造与软流圈隆起——以兴蒙造山带为例[J]. 科学通报,39(6):533-537.
- 邵济安,张履桥,牟保磊. 1999. 大兴安岭中生代伸展造山过程中的岩浆作用[J]. 地学前缘,4(4):339-346.
- 邵积东,陶继雄,李四娃,尚恒胜,武利文,巩智镇,李甫. 2009. 大兴安岭成矿带找矿工作新进展[J]. 地质通报,28(7):955-962.
- 施光海,苗来成,张福勤,简平,范蔚茗,刘敦一. 2004. 内蒙古锡林浩特 A 型花岗岩的时代及区域构造意义[J]. 科学通报,49

- (4) 384-389.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 48(增刊): 26-30.
- 陶继雄, 王弢, 陈郑辉, 罗忠泽, 许立权, 郝先义, 崔来旺. 2009. 内蒙古苏尼特左旗乌兰德勒铂铜多金属矿床辉钼矿铼-钨同位素定年及其地质特征[J]. 岩矿测试, 28(3): 249-253.
- 陶继雄, 钟仁, 赵月明, 郑宝军. 2010. 内蒙古苏尼特左旗乌兰德勒铂矿床地质特征及找矿标志[J]. 地球学报, 31(3): 413-422.
- 董英, 洪大卫, 王涛, 史兴俊, 张建军, 曾涛. 2010. 中蒙边界中段花岗岩时空分布特征及构造、找矿意义[J]. 地球学报, 31(3): 395-412.
- 王荃, 刘雪亚, 李锦轶. 1991. 中国内蒙古中部的古板块构造[J]. 中国地质科学院院报, 22: 1-15.
- 吴福元, 孙德有, 林强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生[J]. 岩石学报, 15(2): 181-189.
- 徐备, 陈斌. 1997. 内蒙古北部华北板块与西伯利亚板块之间中生代造山带的结构及演化[J]. 中国科学(D辑), 27(3): 227-232.
- 姚玉鹏. 1997. 国际地质对比计划 IGCP420 项目“显生宙大陆增生: 东-中亚地区的证据”简介[J]. 科学通报, 42(10): 1119-1120.
- 赵一鸣, 张德全等. 1997. 大兴安岭及其邻区铜多金属矿床成矿贵了与远景评价[M]. 北京: 地震出版社.
- Badarch G, Cunningham W D and Windley B F. 2002. A new terrane subdivision for Mongolia: Implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 21(1): 87-110.
- Berzina A N, Sotnikov V I, Eliopoulos M E and Eliopoulos D G. 2005. Distribution of rhenium in molybdenite from porphyry Cu-Mo and Mo-Cu deposits of Russia (Siberia) and Mongolia[J]. Ore Geology Reviews, 26: 91-113.
- Black L P, Kamo S L, Allen C M, Aleinikoff J N, Davis D W, Korsch R J and Foudoulis C. 2003. Temora 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. Chemical Geology, 200: 155-170.
- Du A D, Wu S Q, Sun D Z, Wang S X, Qu W J, Richard M, Holly S, John M and Dmitry M. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials Molybdenite HLP and JDC[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 28(1): 41-52.
- Khashgerel B E, Rye R O, Hedenquist J W and Kavalieris I. 2006. Geology and reconnaissance stable isotope study of the Oyu Tolgoi porphyry Cu-Au system, south Gobi, Mongolia[J]. Econ. Geol., 101(3): 503-522.
- Ludwig K. 2003. Isoplot/Ex 3.0. A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, CA, USA, Special Publication No. 4.
- Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H and Du A D. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(11/12): 1815-1818.
- Meng Q R. 2003. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract[J]? Tectonophysics, 369: 155-174.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, Mattinson J M, Corfu F, Dorr W, Kamo S L, Kennedy A K, Kronz A, Reiners P W, Frei D, Kosler J, Wan Yu-sheng, Gotze J, Hager T, Kroner A and Valley J W. 2008. Zircon M257-a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 32(3): 247-265.
- Perelló J, Cox D, Garamjav D, Sanjdorj S, Diakov S, Schissel D, Munkhbat T and Gonchig O. 2001. Oyu Tolgoi, Mongolia: Siluro-Devonian porphyry Cu-Au (Mo) and high-sulfidation Cu mineralization with a Cretaceous chalcocite blanket[J]. Econ. Geol., 96: 1407-1428.
- Pidgeon R T, Nemchin A A and Hitchen G J. 1998. Internal structures of zircons from Archaean granites from the Darling Range batholith: implications for zircon stability and the interpretation of zircon U-Pb ages[J]. Contrib. Mineral Petrol., 132: 288-299.
- Shao J A, Zang S X, Mu B L, Li X B and Wang B. 1994. Extension of orogenic belts and upwelling of asthenosphere: The example of Hinggan-Mongolian orogenic belt[J]. Chinese Science Bulletin, 40(1): 50-56.
- Sinclair W D. 2007. Porphyry deposits[A]. In: Goodfellow W D, ed. Mineral deposits of Canada: A Synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods[C]. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 5: 223-243.
- Smoliar M I, Walker R J and Morgan J W. 1996. Re-Os ages of group II A, III A, IV A and V B iron meteorites[J]. Science, 271: 1099-1102.
- Sotnikov V I, Berzina A N, Berzinab A P, Ponomarchuk V A and Gimon V O. 2003. Fluorine and chlorine in magmatic and metasomatic ore processes in the Cu-Mo porphyry deposits of Siberia and Mongolia[J]. Petrology, 11: 301-304.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Hannah J L and Schersten A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works[J]. Terra Nova, 13(6): 479-486.
- Watanabe Y and Stein H J. 2000. Re-Os ages for the Erdenet and Tsagaan Suvarga porphyry Cu-Mo deposits, Mongolia, and tectonic implications[J]. Econ. Geol., 95: 1537-1542.
- Westra G and Keith S B. 1981. Classification and genesis of stockwork molybdenum deposits[J]. Econ. Geol., 76: 844-873.
- Xiao W J, Windley B F, Hao J and Zhai M G. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. Tectonics, 22: 1484-1505.
- Xiong Y and Wood S. 2002. Experimental determination of the hydrothermal solubility of Re<sub>2</sub>S<sub>7</sub> and the Re-ReO<sub>2</sub> buffer assemblage and transport of rhenium under supercritical conditions[J]. Geochemical Transactions 3: 1-10.