

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*

曾庆栋 刘建明 张作伦 覃锋 陈伟军 张瑞斌 于昌明 叶杰

ZENG QingDong, LIU JianMing, ZHANG ZuoLun, QIN Feng, CHEN WeiJun, ZHANG RuiBin, YU ChangMing and YE Jie

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

Key laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2008-08-27 收稿, 2008-10-18 改回.

Zeng QD, Liu JM, Zhang ZL, Qin F, Chen WJ, Zhang RB, Yu CM and Ye J. 2009. Ore-forming time of the Jiguanshan porphyry molybdenum deposit, northern margin of North China Craton and the Indosinian mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2):393–398

Abstract The Jiguanshan porphyry molybdenum deposit is one of the largest deposits of a poorly known Mesozoic Xilamulun Mo metallogenic belt in the northern margin of North China Craton. It is related to a succession of subvolcanic complex which is controlled by three group faults (NW-trending, NE-trending and NEE-trending). Zircon SHRIMP U-Pb data indicate that the last granite porphyry intrusive of the Jiguanshan complex, with molybdenum mineralization crystallized at 245 ± 2.7 Ma. This shows that the Mo mineralization occurred in Indosinian Orogeny or Triassic Period. Based on summarizing the available isotope ages, this paper suggests that a significant magmatism-mineralization event occurred in northern margin of North China Craton during Indosinian Orogeny.

Key words Indosinian mineralization; SHRIMP U-Pb dating; Jiguanshan porphyry molybdenum deposit; Xilamulun metallogenic belt; Northern margin of North China Craton

摘要 鸡冠山斑岩钼矿床是华北克拉通北缘少为人知的中生代西拉沐伦钼矿带中最大的钼矿床之一。它与鸡冠山次火山杂岩有关, 杂岩体受 NW 向、NE 向及 NEE 向三组断裂控制。锆石 SHRIMP U-Pb 定年表明, 发育钼矿化的矿区内最晚的花岗斑岩侵位于 245 ± 2.7 Ma。这表明, 鸡冠山钼矿化发生在印支期。结合已有资料分析, 认为华北克拉通北缘曾在印支期发生重要的岩浆-成矿事件。

关键词 印支期成矿作用; 锆石 SHRIMP U-Pb 定年; 鸡冠山斑岩钼矿床; 西拉沐伦成矿带; 华北克拉通北缘

中图法分类号 P618.65; P597.3

1 引言

近年来, 在华北克拉通北缘西拉沐伦河断裂两侧陆续勘探并发现了一批大中型钼矿床及众多的钼矿点或矿化点, 构成了一条东西长约 400km、南北宽 300km 的钼矿化带, 我们称之为西拉沐伦钼矿带。该钼矿带内钼矿床矿化类型复杂, 包括斑岩型、石英脉型、火山热液型、云英岩型等, 这些类型矿床成矿条件优越、成矿潜力巨大, 使得西拉沐伦钼矿带有望成为我国继小秦岭钼矿带之后的第二大钼成矿带。但是,

由于该钼矿带及其钼矿床勘探和发现较晚, 虽然进行了大量的勘探工作, 但对其进行的科学研究却较少, 目前仅见有对小东沟钼矿床的报导(刘志敏, 2005; 程小珍等, 2007a, b; 聂风军等, 2007a, b; 覃锋等, 2008)。其中对该成矿带成矿时代研究也仅见小东沟斑岩钼矿床形成于燕山晚期报导(聂风军等, 2007b; 覃锋等, 2008)。而成矿带上各类型钼矿床或相同类型钼矿床均形成于燕山晚期还是有更早的成矿时代, 由于研究工作较少, 一直没有明确定论。因此, 开展钼矿带成矿年代学研究具有重要意义。本文研究对象鸡冠山斑岩钼矿床位于内蒙古自治区赤峰市东北 35km, 是近年来在西拉沐

* 本文为国家 973 项目(2006CB403507)资助成果。

第一作者简介: 曾庆栋, 男, 1964 年生, 博士, 副研究员, 矿床学、构造地质学专业, E-mail: zqdong@sohu.com

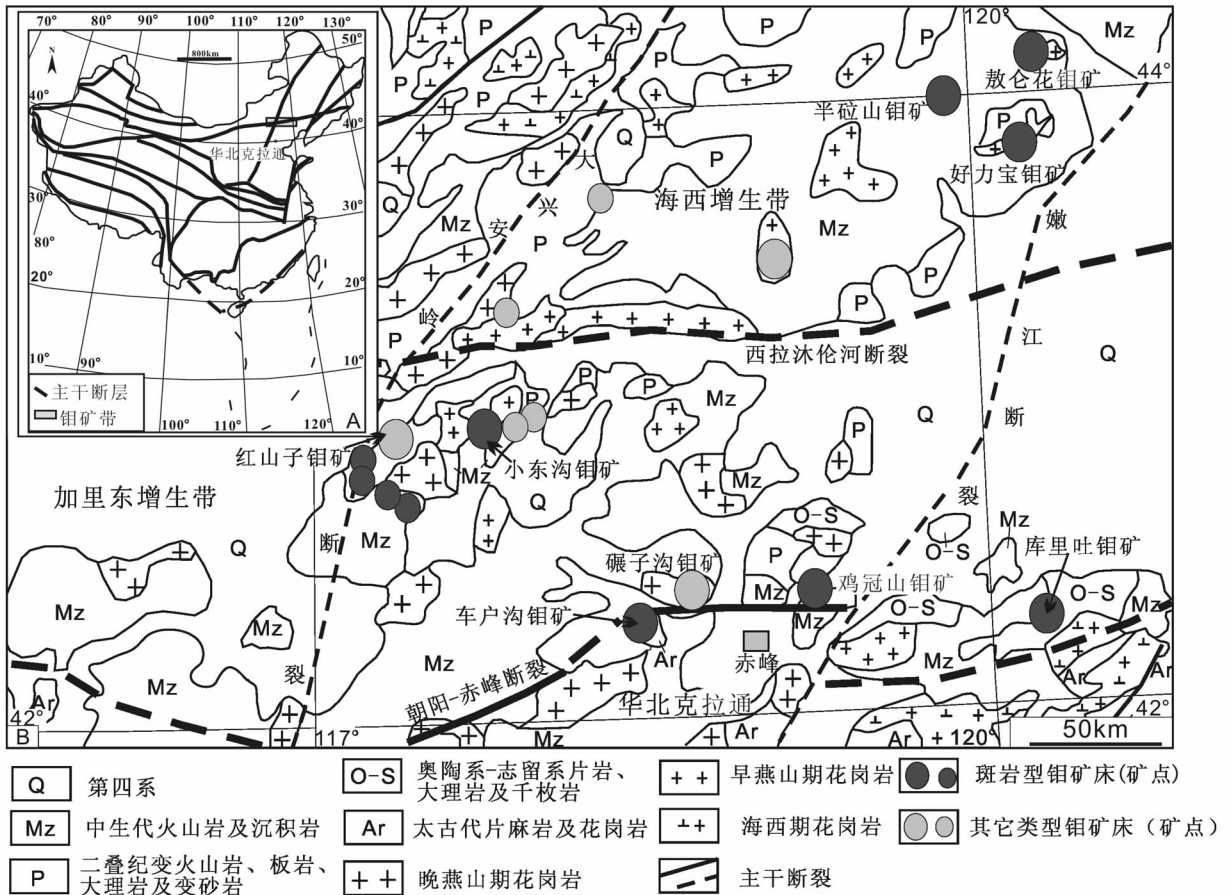


图1 西拉沐伦钼矿带大地构造位置图(A, 据陈衍景等简化, 2004)和华北克拉通北缘西拉沐伦钼矿带地质简图(B, 据内蒙古地质矿产局, 1991; 内蒙古地勘局地矿处研究中心, 2004^①; 李俊健等, 2005 修改)

Fig.1 A Sketch map of the tectonic division of China and the location of studied region (A, after Chen *et al.*, 2004) and Simplified geological map of Xilamulun metallogenic belt of northern margin of North China Craton (B, after BGMNRN, 1991; Li *et al.*, 2005)

伦钼矿带上发现的最大的钼矿床之一, 形成于何时, 其地球动力学背景是什么? 需要研究来确定。我们对鸡冠山钼矿床进行了详细地质、地球化学综合研究, 本文报道最新获得的矿床中花岗岩斑岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄结果, 并确定华北克拉通北缘西拉沐伦钼矿带存在印支期成矿事件。

2 区域地质背景

鸡冠山斑岩钼矿床位于华北克拉通北缘中部加里东增生带南侧(图1), 是西拉沐伦钼矿带重要的矿床组成之一。西拉沐伦钼矿带由西拉沐伦河断裂分为南北两部分, 南矿带产于加里东增生带内, 北矿带产于海西增生带内。赤峰—朝阳断裂将增生带与华北克拉通分开, 该断裂以南为华北克拉通, 结晶基底由太古宙片麻岩及片麻状花岗岩组成, 是重要的金矿分布区之一。加里东增生带地层出露局部, 为早古生代奥陶系—志留系片岩、大理岩及千枚岩, 多为晚古生代地层及中生代地层覆盖。海西增生带基底为晚古生代二叠系

地层, 盖层为中生代地层。南北两侧二叠系地层组成基本相同, 主要由板岩、变质粉砂岩、变质砂岩及变质火山岩组成。中生代地层主要为侏罗系、白垩系陆相火山岩、火山碎屑岩、碎屑岩及含煤系地层组成。

区内构造以断裂构造为主, 其中近东西向赤峰—朝阳断裂、西拉沐伦河断裂是重要的构造体分界线(内蒙古地矿局, 1991; 张振法, 1994)。NE 向大兴安岭断裂、嫩江断裂是区内最重要的区域性 NE 向断裂构造。它们边部的次级断裂是区内重要的控岩、控矿构造。

西拉沐伦钼矿带内岩浆活动发育, 根据内蒙古地矿局(1991)及内蒙古地勘局地矿处研究中心(2004^①)对该区区域地质研究, 区内岩浆活动主要包括: 晚古生代海西期石英闪长岩、花岗闪长岩及花岗岩侵入活动、燕山早期黑云母花岗岩—二长花岗岩侵入活动、燕山晚期花岗岩及花岗斑岩侵

① 内蒙古地质调查局地矿处研究中心, 2004. 内蒙古赤峰—翁牛特旗一带地质矿产图

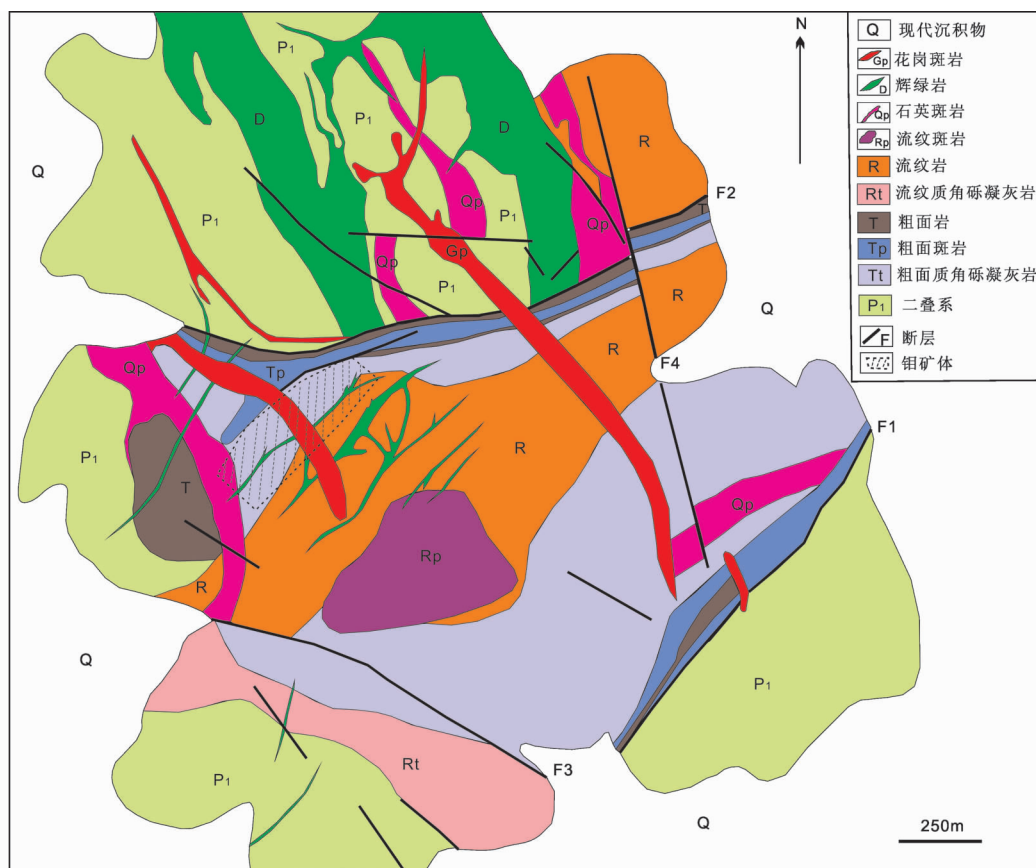


图2 鸡冠山钼矿区地质图(据赤峰金鑫矿业有限公司,2005^①)

Fig.2 Sketch map of the Jiguanshan molybdenum deposit

入活动。各侵入体呈岩基、岩株及岩脉状产出。区内已知钼矿化均与不同期次的花岗质岩浆热液活动密切相关,钼矿化发育于岩体内部及接触带附近。

3 鸡冠山钼矿床地质

鸡冠山钼矿区出露地层为早二叠纪板岩及变质凝灰岩、变质砂岩,分布于鸡冠山杂岩体外围(图2)。鸡冠山杂岩体的产出受三组构造控制,三组构造是NE向断裂(F1)、NW向断裂(F3)及NEE向断裂(F2),三组断裂交汇部位即控制了杂岩体的产出及分布(图2),也控制了斑岩型钼矿化的空间分布,矿化分布于三组断裂交汇区,其外侧则无分布。

鸡冠山杂岩体由两个系列及脉岩组成:早期系列为流纹质火山岩浆活动,包括流纹质角砾凝灰岩、流纹岩及流纹斑岩(据赤峰金鑫矿业有限公司,2005^①),流纹质角砾凝灰岩分布于杂岩体外侧,流纹岩及流纹斑岩主要分布于杂岩体相对中心部位;晚期系列为粗面质火山岩浆活动,包括粗面质角砾凝灰岩、石英粗面岩及粗面斑岩,沿三组断裂分布于杂岩体外侧;脉岩在矿区内极为发育,主要类型有石英斑岩、辉绿岩及花岗斑岩。按照它们的空间分布及其相互(穿插)关系,矿区内岩浆活动先后顺序由早到晚为:流纹质角砾凝灰

岩-流纹岩-流纹斑岩-粗面质角砾凝灰岩-石英粗面岩-粗面斑岩-石英斑岩-辉绿岩-花岗斑岩。

鸡冠山斑岩型钼矿体产于火山机构的NW侧,呈扁柱状,走向NE40°,倾向NW,倾角86°,长度大于860m,平均宽度170m,延深大于100m。钼矿化在区内大部分岩石类型中都有发育,主要赋存于粗面质角砾凝灰岩中,其次为辉绿岩、石英斑岩、花岗斑岩、流纹岩及流纹斑岩中。钼矿体钼平均品位在0.079%~0.111%,个别达0.5%~1%。矿石构造主要为细脉浸染状,主要矿石矿物为黄铁矿、辉钼矿,少量闪锌矿及黄铜矿,主要脉石矿物为石英、长石、绢云母、白云母。围岩蚀变类型有硅化、高岭土化、绢云母化、萤石化。根据矿物穿切关系及共生组合,可将矿区划为三个阶段:早期硅化阶段,主要形成硅帽,宽达百米,伴有绢云母化,有少量黄铁矿及磁铁矿形成;主矿化阶段,主要形成辉钼矿、石英、黄铁矿,岩石褪色明显;晚期石英-萤石阶段,主要形成细脉状萤石,伴有少量黄铁矿等金属矿物。钼矿化的分布及特点表明钼矿化与杂岩体岩浆-热液活动密切相关,具有斑岩型矿化的特点。

① 赤峰金鑫矿业有限公司. 2005. 内蒙古自治区赤峰市鸡冠山矿区铜钼矿详查报告

花岗斑岩是矿区内最晚的一次岩浆活动,且斑岩内也发育明显的钼矿化,并构成工业矿体。因此,选择了花岗斑岩进行年龄测定,以确定矿区内岩浆活动的时限,并以此限定矿化的时限。

4 锆石 SHRIMP 定年

4.1 样品采集与处理

本次锆石 U-Pb 同位素地质年代学研究所用样品采自坑道中新鲜花岗斑岩,样品重约 3kg,由河北地勘局廊坊实验室完成锆石样品挑选。然后,将挑选锆石和标样一起置于用环氧树脂胶做成的样品靶上,制成薄片并抛光至锆石颗粒厚度的近一半,拍摄正交偏光和阴极发光照片,清洁并渡上金膜。

SHRIMP 锆石 U-Pb 分析在北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成,测定原理见 Williams (1998)。选用 SL13 (572Ma) 和 Temora (427Ma) 作为标样标定样品的 U、Th、Pb 含量及年龄校正。Black *et al.* (2003) 对 SL13 和 TEMORA 标样已有论述。以锆石阴极发光图像为依据,选择不同部位进行测试。测试过程中,每测量 3~4 个点插入一次 TEMORA 测定。数据处理采用 SQUID 1.02 (Ludwig, 2001) 和 ISOPLOT 3.0 (Ludwig, 2003) 程序。普通铅根据实测的 ^{204}Pb 进行样正,同位素比值误差为 1σ ,加权平均年龄具 95% 的置信度。

4.2 分析结果

鸡冠山斑岩钼矿床含矿花岗斑岩中锆石的 U-Pb 同位素测定结果见表 1,11 个分析点的 U 和 Th 含量分别为 $822 \times 10^{-6} \sim 1439 \times 10^{-6}$ 和 $170 \times 10^{-6} \sim 312 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.14~0.30,均大于 0.1,可以确定是岩浆成因锆石;除分析点 2.1 和 3.1 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 $238.4 \pm 4.5\text{Ma}$ 、 $256.3 \pm 5.4\text{Ma}$,其余 9 个分析点的年龄为 $242.0 \pm 3.1 \sim 252.1 \pm 5.2\text{Ma}$ (表 1)。在谐合线中,除分析点 2.1 和 3.1 外的 9 个分析点构成一致的年龄组,给出经过校正的平均年龄为 $245.5 \pm 2.7\text{Ma}$ (95% 置信度,MSWD=0.51,图 3)。这一年龄解释为杂岩体花岗斑岩的侵入年龄。

5 讨论

5.1 鸡冠山杂岩体形成时代

鸡冠山杂岩体由多期活动即火山-次火山杂岩及脉岩组成,从早至晚为:流纹质砾凝灰岩-流纹岩-流纹斑岩-粗面质角砾凝灰岩-石英粗面岩-粗面斑岩-石英斑岩-辉绿岩-花岗斑岩,这一系列岩石形成于同一构造部位,其空间分布规律反映了这一系列岩石应属于同一时期、同一环境下的产物。鸡冠山花岗斑岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $245.5 \pm 2.7\text{Ma}$,代表了花岗斑岩的形成年龄。因此,鸡冠山杂岩体形成于印

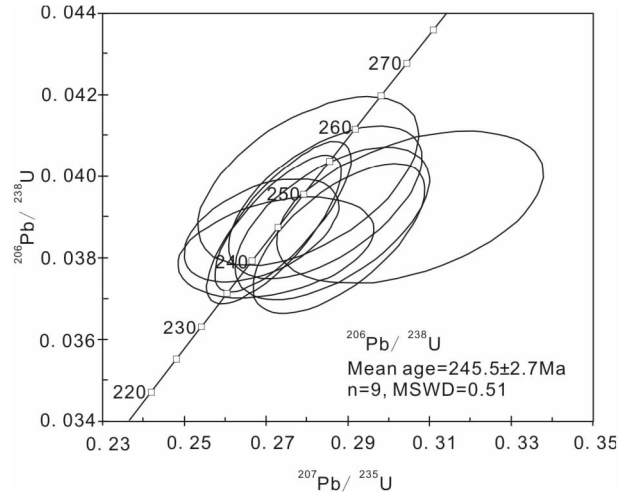


图 3 鸡冠山斑岩钼矿床花岗斑岩中锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 Zircon SHRIMP U-Pb concordia plot for granite from Jiguanshan porphyry molybdenum deposit

支期。

5.2 花岗斑岩年龄对成矿时代的限定

地质研究表明,鸡冠山钼矿床钼矿化分布与鸡冠山杂岩体有密切的空间关系,钼矿化发育于杂岩体西北部,含矿岩石包括角砾凝灰岩、流纹岩、辉绿岩、石英斑岩、花岗斑岩等多种岩石类型中,矿化均为细脉浸染状,而矿区内最晚期岩浆活动为花岗斑岩侵入,在花岗斑岩中发育较强的钼矿化,因此,成矿与花岗斑岩关系最为密切。

一些研究者 (Cathles, 1990; Cathles *et al.*, 1997) 提出,与单一侵入体有关的矿化其岩体侵位、热液循环和矿化作用发生在很短时间(小于 $< 10^6$ 年);但许多矿床是多期岩浆和热液事件的结果,许多研究者提出主成矿可能发生于围岩侵入体侵位以后几个或十几个百万年 (Geissman *et al.*, 1992; Reynolds *et al.*, 1998; Kendrick *et al.*, 2001; Selby and Creser, 2001)。鸡冠山钼矿发生了多期岩浆热液活动,因此,鸡冠山钼矿床钼矿化可能发生于最晚期花岗斑岩侵位后几个或十几个百万年。所以,鸡冠山钼矿床钼矿化作用也应该发生于印支期。

5.3 华北克拉通北缘印支期成矿事件

在华北克拉通北缘以往通常认为自古生代以来区内的主要岩浆活动有华里西期和燕山期两期。对于燕山期岩浆活动及其成矿作用已有研究,如西拉沐伦钼矿带西部小东沟钼矿,聂凤军等 (2007a, b)、覃锋等 (2008) 通过同位素年代学研究提出小东沟钼矿床形成于早白垩纪 (135~138Ma);对红山子钼矿核工业 243 地质队获得 Rb-Sr 等时线年龄为 142~147Ma;对蹶子沟钼矿我们获得辉绿矿 Re-Os 等时线年龄为

表 1 鸡冠山斑岩钼矿床花岗斑岩中锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果

Table 1 Zircon SHRIMP U-Pb data for granite porphyry from Jiguanshan porphyry molybdenum deposit

分析点	$^{206}\text{Pb}_e$ (%)	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ (Ma)	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$ $\pm \%$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$ $\pm \%$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$ $\pm \%$
JG-1.1	0.20	1308	306	0.24	43.6	244.7 \pm 4.6	0.05097 \pm 1.6	0.2720 \pm 2.5	0.03870 \pm 1.9
JG-2.1	0.43	1014	208	0.21	33.0	238.4 \pm 4.5	0.0518 \pm 3.0	0.2688 \pm 3.6	0.03767 \pm 1.9
JG-3.1	0.35	1078	227	0.22	37.7	256.3 \pm 5.4	0.0523 \pm 2.4	0.2928 \pm 3.2	0.04056 \pm 2.2
JG-4.1	0.26	930	181	0.20	31.9	252.1 \pm 5.2	0.0510 \pm 3.3	0.280 \pm 3.9	0.03988 \pm 2.1
JG-5.1	0.15	822	237	0.30	27.2	243.4 \pm 4.6	0.0543 \pm 2.3	0.2879 \pm 3.0	0.03848 \pm 1.9
JG-6.1	0.20	1439	199	0.14	48.3	246.7 \pm 4.7	0.05098 \pm 1.6	0.2742 \pm 2.5	0.03901 \pm 1.9
JG-7.1	0.62	965	234	0.25	32.8	248.9 \pm 4.7	0.0524 \pm 2.8	0.2845 \pm 3.4	0.03937 \pm 1.9
JG-8.1	0.77	1173	180	0.16	39.9	248.1 \pm 4.7	0.0564 \pm 3.9	0.305 \pm 4.4	0.03924 \pm 1.9
JG-9.1	0.37	1128	207	0.19	37.8	245.7 \pm 4.7	0.0534 \pm 2.8	0.2862 \pm 3.4	0.03885 \pm 2.0
JG-10.1	0.26	1263	312	0.26	42.1	244.6 \pm 3.2	0.0504 \pm 2.5	0.2689 \pm 2.9	0.03868 \pm 1.3
JG-11.1	0.27	1168	170	0.15	38.5	242.0 \pm 3.1	0.0517 \pm 3.3	0.2725 \pm 3.6	0.03826 \pm 1.3

注: 误差为 1σ , Pb_e 为普通铅, Pb^* 为放射性成因铅。误差的标准校正为 0.69% (上述误差不用标准校正, 只是在与其他数据比较时才需要进行标准校正)。普通铅采用测定的 ^{204}Pb 进行校正

154Ma (另文讨论)。表明钼矿带有多期岩浆热液活动及多期成矿作用。近年研究发现印支期岩浆活动也很重要, 我们近年在西拉沐伦钼矿带内的翁牛特旗官地发现的早三叠世堆晶辉长岩, 与早中生代大陆地壳的垂向增生有关, 其 Rb-Sr 等时线年龄为 234Ma, 为该区在早中生代已经结束块体拼合而进入造山后阶段提供了进一步的岩石学证据, 暗示着地幔物质的加入在本区后造山时期陆壳的垂向生长过程中起重要作用 (刘建明等, 2007^①)。西拉沐伦钼矿带西部克什克腾旗南部黄营子花岗闪长岩形成时代为 203Ma^②。本次研究中, 我们对区内鸡冠山斑岩钼矿床花岗斑岩开展锆石 SHRIMP U-Pb 定年的结果为 245Ma 左右。这些研究表明区内确实存在印支期岩浆活动及相关的金属成矿作用。前人对东秦岭钼矿带中黄龙铺钼铅矿床成矿时代的研究结果是 216~222Ma (黄典豪等, 1994; Stein *et al.*, 1997), 也显示了一次印支期的钼矿化。因此, 我们认为, 在华北克拉通北、南边缘可能都存在一期印支期的岩浆活动及与之相关的钼矿化, 且北缘略早于南缘。北缘成矿地球动力学背景为早印支期华北板块与西伯利亚板块碰撞造山后伸展阶段。

鸡冠山斑岩钼矿床 U-Pb 年龄确证了华北克拉通北缘西拉沐伦钼矿带在印支期发生过重要的成矿事件, 这对于区域成矿研究及区域找矿具有重要的理论与实践意义。同时, 西拉沐伦钼矿带还存在燕山期成矿事件, 但是目前所获得的成岩、成矿年龄较少, 因此, 需要更多的精确年龄以确定克拉通北缘矿化事件的时间范围。

6 结论

鸡冠山钼矿床成矿与花岗斑岩密切相关, 矿体规模大、品位低, 以细脉浸染状构造为特点, 围岩蚀变主要为硅化、绢云母化、萤石化, 呈面型分布。鸡冠山钼矿是一斑岩型钼矿

床。

鸡冠山矿区含矿花岗斑岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 245.5 \pm 2.7Ma, 反映了鸡冠山杂岩体形成于印支期。鸡冠山斑岩钼矿床与鸡冠山杂岩体关系密切, 因此, 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄也表明鸡冠山钼矿床成矿发生在印支期, 可能发生在 245.5Ma 以后几个或十几个 Ma。

鸡冠山斑岩钼矿床 U-Pb 年龄确证了华北克拉通北缘西拉沐伦钼矿带在印支期发生过重要的成矿事件, 印支期岩浆活动发育区是华北克拉通北缘今后重要的找矿区域。

致谢 本项研究是国家 973 项目 (2006CB403500) 部分研究成果, 项目首席科学家陈衍衡教授对研究工作给予指导, 并对论文初稿提出了修改意见。在野外工作期间, 得到赤峰金鑫矿业有限公司领导及技术人员提供的支持与无私帮助, 特致谢意。感谢两位匿名审稿者对本文提出的宝贵的修改意见。

References

- Black LP, Kamo SI, Aleikoff JN, Davis DW, Korsch RL and Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for phanerozoic U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 200(1-2), 155-170
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Neimongol Autonomous Region (BGMRNM). 1991. *Regional Geology of Neimongol Autonomous Region*. Beijing: Geological Publishing House, 532 (in Chinese)
- Cathles LM. 1990. Scales and effects of fluid flow in upper crust.

① 刘建明等. 2007. 大兴安岭中南段多金属成矿带的成矿环境、找矿方向及勘查技术方法研究成果报告. 内部资料

② 核工业 243 大队. 2005. 内蒙古自治区赤峰市红山子钼矿勘查报告. 内部资料

- Science, 248, 323 – 329
- Cathles, LM, Erendi AHJ and Barrie T. 1997. How long can a hydrothermal system be sustained by a single intrusive event? *Economic Geology*, 92, 766 – 771
- Chen YJ, Chen HY, ZAW K, Pirajno F and Zhang ZJ. 2004. The geodynamic setting of large-scale metallogenesis in mainland China, exemplified by skarn type gold deposits. *Earth Science Frontiers*, 11, 57 – 83 (in Chinese with English abstract)
- Cheng XZ, Song LY and Liang H. 2007a. Analysis on potential for ore prospecting in the peripheral region of Xiaodonggou molybdenum deposit. *Mineral Resources and Geology*, 21 (2): 131 – 135 (in Chinese with English abstract)
- Cheng XZ, Yang L and Zhang X. 2007b. Geological conditions of Xiaodonggou molybdenum deposit. *Geology and Prospecting*, 43 (5): 11 – 16 (in Chinese with English abstract)
- Geissman JW, Snee LW, Graaskamp GW, Carter RB and Gerahty, EP. 1992. Deformation and age of Red Mountain intrusive system (Urad-Henderson molybdenum deposits), Colorado: Evidence from palaeomagmatic and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 104: 1031 – 1047
- Huang DH, Wu CY, Du AD and He HL. 1994. Re-Os ages molybdenum deposits in east Qinling and their significance. *Mineral Deposits*, 13 (3): 221 – 230 (in Chinese with English abstract)
- Kendrick MA, Burgess R, Patrick RAD and Turner G. 2001. Halogen and Ar-Ar age determinations of inclusions within quartz veins from porphyry copper deposits using complementary noble gas extraction techniques. *Chem. Geol.*, 117, 351 – 370
- Li JJ, Yang CL, Shen BF, Chen AS, Luo H, Qin ZA, Cao XL and Yang ZC. 2005. Volume of mineral resource map in circum-Bohai Sea area. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 222 (in Chinese)
- Liu ZM. 2005. Discussion on geologic character and metallogenic mechanism and formation of Xiaodonggou molybdenum deposit. *Nonferrous Mining and Metallurgy*, 21 (4): 6 – 8 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2001. *Squid 1.02: A User's Manual*. Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 2, 15 – 35
- Ludwig KR. 2003. *User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 4, 70
- Nie FJ, Zhang WY, Jiang SH and Liu Y. 2007a. Geological features and origin of Xiaodonggou porphyry molybdenum deposit in Hexigten Banner, Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 26 (6): 609 – 620 (in Chinese with English abstract)
- Nie FJ, Zhang WY, Du AD, Jiang SH and Liu Y. 2007b. Re-Os isotopic dating on molybdenite separates from the Xiaodonggou porphyry Mo deposit, Hexigten Qi, Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 81 (7): 898 – 905 (in Chinese with English abstract)
- Qin F, Liu JM, Zeng QD and Zhang RB. 2008. The metallogenic Epoch and source of ore-forming materials of the Xiaodonggou porphyry molybdenum deposit, Inner Mongolia. *Geoscience*, 22 (2): 173 – 180 (in Chinese with English abstract)
- Reynolds P, Ravenhurst C, Zentilli M and Lindsay D. 1998. High-precision $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of two consecutive hydrothermal events in the Chuquicamata porphyry copper system, Chile. *Chemical Geology*, 148: 45 – 60
- Selby D and Creaser RA. 2001. Re-Os geochronology and systematics in molybdenite from the Endako porphyry molybdenum deposit, British Columbia, Canada. *Economic Geology*, 96: 197 – 204
- Stein HJ, Markey RJ, Morgan JW, Du A and Sun Y. 1997. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt, Shanxi Province, China. *Economic Geology*, 92: 827 – 835
- Williams IS. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: Mckibben MA, Shanks WCIII and Ridley WI (eds.). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*, *Rev. Economic Geology*, 7: 1 – 35
- Zhang ZF. 1994. Boundary of geosyncline and platform redivided according to deep geophysical data and old plate of structural framework. *Inner Mongolia Geology*, (1): 1 – 15 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈衍景, 陈华勇, Zaw K, Pirajno F, 张增杰. 2004. 中国陆区大规模成矿的地球动力学: 以夕卡岩型金矿为例. *地学前缘*, 11(1): 57 – 83
- 程小珍, 杨伦, 张骁. 2007a. 内蒙古小东沟钼矿外围找矿前景分析. *矿产与地质*, 21(2): 131 – 135
- 程小珍, 宋雷鹰, 梁晖. 2007b. 内蒙古小东沟钼矿成矿地质条件分析. *地质与勘探*, 43(5): 11 – 16
- 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 何红蓼. 1994. 东秦岭地区钼矿床的铼-钼同位素年龄及其意义. *矿床地质*, 13(3): 221 – 230
- 李俊健, 杨春亮, 沈保丰, 陈安蜀, 路辉, 覃志安, 曹秀兰, 杨兆才. 2005. 环渤海地区矿产资源图集. 天津: 天津科技出版社, 1 – 222
- 刘志敏. 2005. 小东沟钼矿床地质特征及矿床形成机制和矿床成因探讨. *有色矿冶*, 21(4): 6 – 8
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1 – 532
- 聂凤军, 张万益, 江思宏, 刘妍. 2007a. 内蒙古小东沟斑岩钼矿床地质特征及成因近探讨. *矿床地质*, 26(6): 609 – 620
- 聂凤军, 张万益, 杜安道, 江思宏, 刘妍. 2007b. 内蒙古小东沟斑岩钼矿床铼-钼同位素年龄及地质意义. *地质学报*, 81(7): 898 – 905
- 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. *现代地质*, 22(2): 173 – 180
- 张振法. 1994. 根据深部地球物理资料和古板块构造格架重新厘定槽台界线. *内蒙古地质*, (1): 1 – 15