

文章编号: 0258-7106(2013)03-0489-12

吉林汪清夹皮沟斑岩型钼矿床的形成时代 与成矿构造背景*

王 辉¹, 任云生^{1**}, 孙振明¹, 郝宇杰¹, 李 超²

(1 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘 要 夹皮沟钼矿床是吉林省汪清县近年来发现的一个中型斑岩型钼矿床。矿体赋存在受北东向断裂控制的似斑状黑云母二长花岗岩内。含矿岩体中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 加权平均年龄为(193.1 ± 1.0) Ma (MSWD = 1.02), 矿石中辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为(188.6 ± 4.7) Ma (MSWD = 0.41) 表明夹皮沟钼矿床形成于早侏罗世, 与区域内其他斑岩型钼矿床(成岩成矿时代介于 190~160 Ma)同属于燕山早期大规模构造-岩浆-成矿事件的产物。似斑状黑云母二长花岗岩具有高硅($w(\text{SiO}_2) = 72.29\% \sim 72.81\%$)、富碱($w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) = 7.62\% \sim 7.71\%$)的特点, 属于弱过铝质的高钾钙碱性岩石系列; 稀土元素分布型式呈明显的右倾型, 轻、重稀土元素分馏明显(LREE/HREE 为 6.41~7.34), Eu 异常中等($\delta\text{Eu} = 0.33 \sim 0.40$)。微量元素组成上表现为富集大离子亲石元素(LILE), 亏损高场强元素(HFSE)。似斑状黑云母二长花岗岩属于 I 型花岗岩, 矿床成岩成矿物质可能源于俯冲背景下增厚的下地壳。结合区域地质构造演化, 认为夹皮沟钼矿形成于古亚洲洋构造体制与环太平洋构造体制叠加与转换的构造背景下, 成岩成矿作用与燕山早期古太平洋板块的俯冲作用关系密切。

关键词 地球化学, 锆石 U-Pb 年龄, 辉钼矿 Re-Os 年龄, 成矿构造背景, 夹皮沟钼矿, 吉林汪清
中图分类号: P618.65; P597.3 文献标识码: A

Metallogenic epoch and tectonic setting of Jiapigou porphyry molybdenum deposit in Wangqing area, Jilin Province

WANG Hui¹, REN YunSheng¹, SUN ZhenMing¹, HAO YuJie¹ and LI Chao²

(1 College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, 130061, Jilin, China;

2 National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China)

Abstract

Located in Wangqing area of Jilin Province, the Jiapigou molybdenum deposit is one of the newly discovered porphyry deposits. The molybdenum ore bodies are hosted in the porphyreous biotite monzogranite which is controlled by NE-trending faults. The weighted mean LA-ICP-MS U-Pb age of zircons separated from ore-bearing rock is (193.1 ± 1.0) Ma (MSWD = 1.02), and the Re-Os isochron age of molybdenites collected from ores is (188.6 ± 4.7) Ma (MSWD = 0.41). The results indicate that the Jiapigou deposit was formed in early Jurassic period. It resulted from large-scale tectonic-magmatic-metallogenic event in early Yanshanian period together with other porphyry molybdenum deposits having isotopic ages of 190~160 Ma. The porphyreous biotite monzogranite is characterized by high silica ($\text{SiO}_2 = 72.29\% \sim 72.81\%$) and alkali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7.62\% \sim$

* 本文为国家 973 项目(2013CB429802 课题)和中国地质调查局项目(1212011085485)资助成果

第一作者简介 王 辉,男,1987 年生,硕士研究生,矿产普查与勘探专业。Email: wang-hui2007@qq.com

** 通讯作者 任云生,男,1969 年生,教授,博士生导师,主要从事矿床地质学与区域成矿规律研究。Email: renys@jlu.edu.cn

收稿日期 2012-08-15; 改回日期 2012-11-13。张绮玲编辑。

7.71%) belonging to the weakly peraluminous and the high-K calc-alkaline series. The REE patterns are right-oblique with significant fractionation between LREE and HREE ($LREE/HREE = 6.41 \sim 7.34$) and medium negative Eu anomalies ($\delta Eu = 0.33 \sim 0.40$). Trace elements are on the whole characterized by relative enrichment of large ion lithophile elements (LILEs) and depletion of high field strength elements. The rock geochemical characteristics imply that the granite belongs to I-type granite, and the rock-forming and ore-forming materials probably resulted from the melting of the lower part of the compressional and thickened crust. In combination with the regional tectonic evolution, the authors have reached the conclusion that the Jipigou molybdenum deposit was formed under the setting of transition and superimposition of tectonic regime, and the rock-forming and ore-forming processes were widely influenced by the subduction of the Paleo-Pacific plate.

Key words: geochemistry, zircon U-Pb age, molybdenite Re-Os age, metallogenic tectonic setting, Jiapigou molybdenum deposit, Wangqing area in Jilin Province

小兴安岭-张广才岭钼矿带是中国东北地区著名的钼矿集中区,截止2008年,已探明钼资源储量约为180.25万吨,为仅次于东秦岭钼矿带的第二大钼矿带(罗铭玖等,1991;黄凡等,2011)。该钼矿带近南北向展布,与兴蒙造山带东段的侏罗纪花岗岩带(孙德有,2001;张艳斌等,2002;苗来成等,2003; Zhang et al., 2004; Wu et al., 2011)在空间分布上高度一致。矿床的形成与侏罗纪中酸性浅成侵入体关系密切,多受北东向、北北东向和东西向深大断裂及其次级断裂的控制。矿床类型主要为斑岩型,少量为矽卡岩型、热液脉型等。近年来,随着区内钼矿的找矿勘探和成矿理论研究的不断深入,钼矿的成岩成矿构造背景受到了越来越多的关注。但总体来看,此方面的研究工作主要集中在钼矿带北部的翠宏山、霍吉河、鹿鸣、翠岭等几个矿床(孙珍军,2010;陈静,2011;杨言辰等,2012;孙景贵等,2012),而南部除大黑山、东风(葛文春等,2007;孙景贵等,2012)等矿床外,相关研究较少且不够深入。

夹皮沟钼矿床地处小兴安岭-张广才岭钼矿带东南缘,位于吉林省东部的汪清县城东北5 km处。由于发现较晚,系统的科研工作较少。张忠光等(2011)总结了该矿床的地质特征,并初步将矿床成因定为斑岩型。但该矿床的成矿岩体、成岩成矿时代等问题均需系统研究。鉴于此,本文在该矿床地质特征研究的基础上,利用辉钼矿 Re-Os 和锆石 U-Pb 同位素测年的手段,厘定了矿床的成岩成矿时代,通过成矿岩体的元素地球化学特征研究,结合区域构造背景演化,讨论了该矿床的成矿构造背景,为全面研究小兴安岭-张广才岭钼矿带的区域成矿模式和成矿动力学背景提供了数据。

1 矿床地质特征

汪清夹皮沟钼矿位于松嫩地块东南部,北东向鸭绿江断裂的南侧(图1B)。矿区及外围出露的地层主要为下二叠统柯岛组和上白垩统屯田营组(图1A)。柯岛组分布于矿区南侧及东南侧,为一套浅海相碎屑沉积变质岩,由板岩、变质砂岩、砾岩组成,夹大理岩、长英质片麻岩。屯田营组分布于矿区的北东侧,为一套陆相火山岩,由安山岩、凝灰岩、安山集块岩、安山角砾岩等组成。矿区处于北东向两江-罗子沟断裂带与东西向敦化-大北城断裂带的交汇部位,北东向断裂是矿区主要的控岩和控矿构造。

矿区侵入岩分布广泛,海西晚期岩体呈岩基状分布,岩性为花岗闪长岩,燕山早期岩体具有多期次复式侵入的特点,岩性包括似斑状黑云母二长花岗岩、花岗斑岩及正长花岗岩,呈岩株状侵入于海西晚期花岗岩及柯岛组中(图1A),其中似斑状黑云母二长花岗岩是夹皮沟钼矿的主要赋矿岩石,北东向展布。新鲜岩石呈灰白色或肉红色(图2A),似斑状结构、块状构造,矿物成分主要为石英(30%~35%)、斜长石(30%~35%)、碱性长石(微斜长石、条纹长石等)(20%~25%)、黑云母(8%~10%)以及少量的角闪石,副矿物有锆石、榍石等。岩体内热液蚀变作用明显,具有斑岩型矿床典型的分带特征,从中心向外可分为钾化带、石英-绢云母化带和青磐岩化带。蚀变矿物为钾长石(图2A)、石英、黑云母(图2B)、绢云母、方解石、绿帘石(图2C)、绿泥石(图2D)等。钾化带内伴随着强烈的钼矿化,二者空间上关系密切,矿化强度向外逐渐减弱。

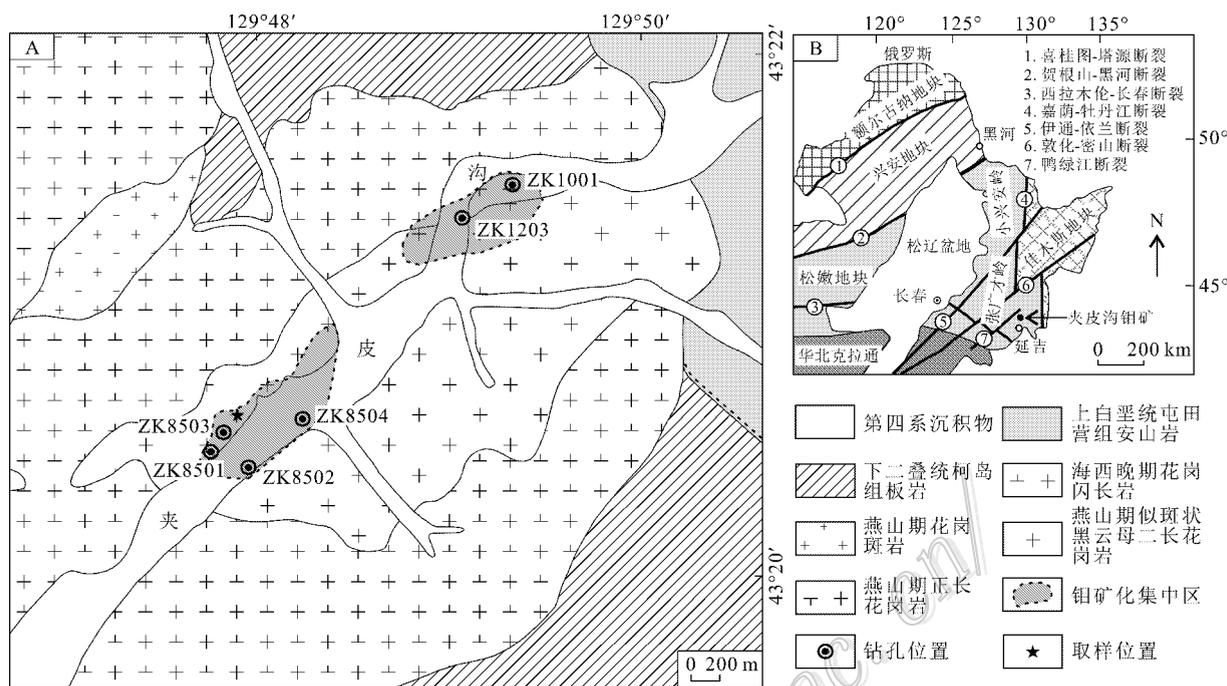


图 1 夹皮沟钼矿床地质简图(A)及大地构造位置图(B,据 Wu et al., 2007 修改)

Fig. 1 Simplified geological map (A) and tectonic map of the Jiapigou molybdenum deposit (B, modified after Wu et al., 2007)

在夹皮沟矿区目前探明 12 条矿体,明显受北东向断裂构造控制,呈似层状或透镜状,倾向南西,倾角 $5 \sim 26^\circ$,厚度 $2 \sim 32.6$ m,平均品位为 0.095%。矿化类型以细脉浸染状为主,边部少量呈网脉状。矿石中金属矿物主要为辉钼矿,其次为黄铜矿和黄铁矿。显微观察发现,辉钼矿多呈弯曲的鳞片状集合体(图 2E),黄铜矿形成稍晚,呈细小的叶片状充填于辉钼矿的裂隙中(图 2F)。围岩蚀变及矿化特征表明夹皮沟钼矿床为典型的斑岩型矿床。

2 样品采集与分析方法

用于锆石 U-Pb 定年和主量、微量元素测试的 4 件似斑状黑云母二长花岗岩样品均取自矿区地表,样品新鲜无明显蚀变。用于辉钼矿 Re-Os 同位素定年的 6 件矿石样品采自钻孔 ZK8503 及 ZK8501 的岩芯中,样品钾化明显,辉钼矿含量较高。锆石和辉钼矿的分选均在河北省廊坊市诚信地质服务公司完成,并在双目镜下反复挑选,选出的锆石晶型尽量完好,含包体、裂隙少,辉钼矿纯度达 99%。

锆石制靶及 CL 图像采集在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,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,采用仪器为激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005,ICP-MS 为 Agilent 7500a。采用激光束斑直径 $32 \mu\text{m}$,每个分析数据包括大约 $20 \sim 30$ s 的空白信号和 50 s 的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal(Liu et al., 2008; 2010)完成,并按照 Andersen(2002)的 ComPb# 3-151 程序进行了普通铅校正。加权平均年龄计算及谐和图绘制采用 Isoplot/Ex-ver3(Ludwig, 2003)完成。

辉钼矿 Re-Os 同位素分析在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室完成,采用仪器为 TJA X-series 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo 公司),详细流程见 Shirey 等(1995)和杜安道等(2009)。实验采用国家标准物质 GBW04436(JDC)为标样,给出的模式年龄分别为 (141.1 ± 2.1) Ma 和 (139.3 ± 2.0) Ma。空白样 $\epsilon(\text{Re})$ 为 0.0029 ng 和 0.0040 ng, $\epsilon(\text{Os})$ 为 0.0001 ng 和 0.0004 ng。模式年龄计算采用公式 $t = [\ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})]/\lambda$, 其中 $\lambda(^{187}\text{Re} \text{ 衰变常数}) = 1.666 \times 10^{-11}/\text{a}$ (Smoliar

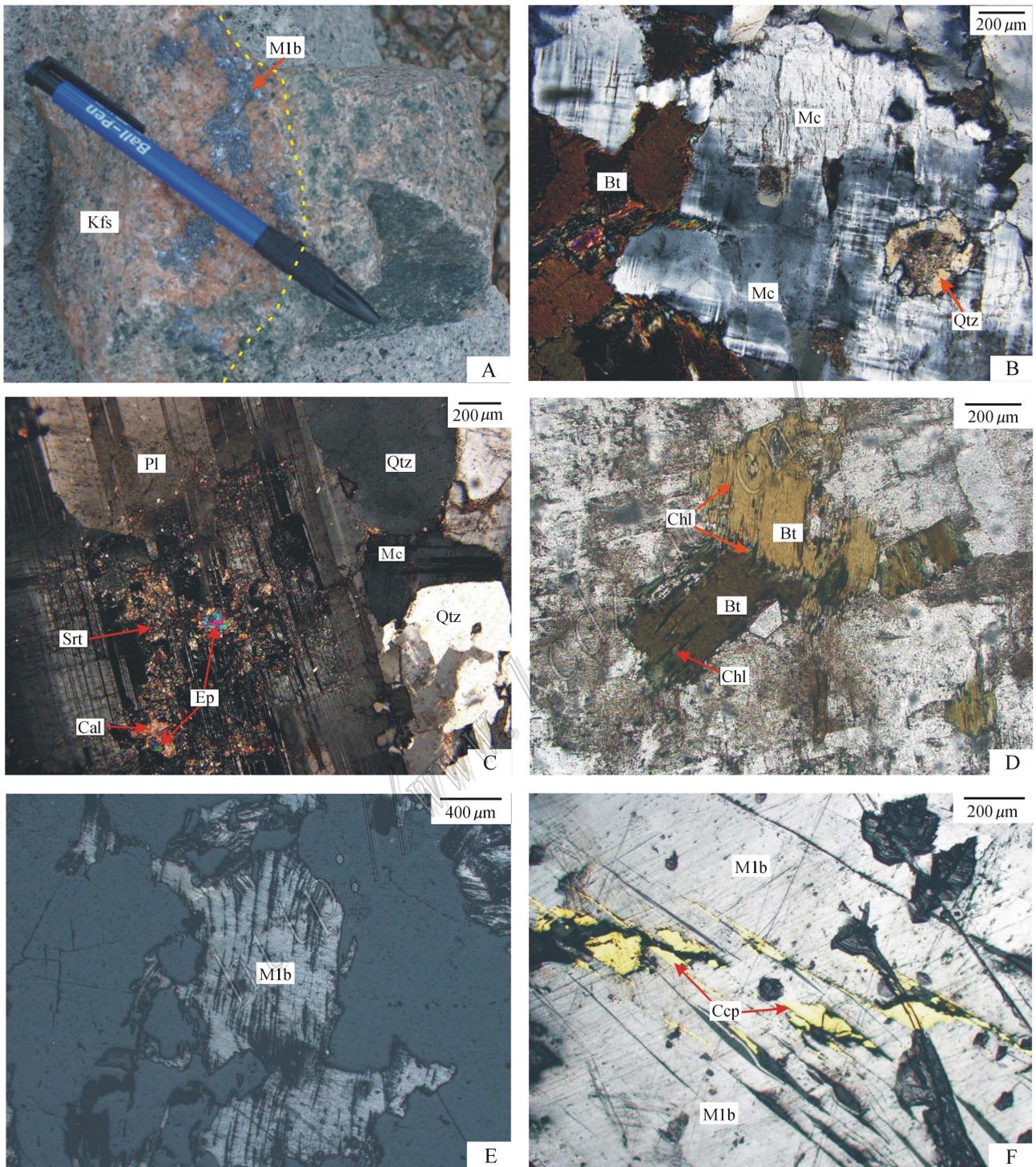


图2 似斑状黑云母二长花岗岩蚀变和矿化照片

A. 钾化钼矿石; B. 微斜长石发生黑云母化、硅化; C. 斜长石发生绢云母化、碳酸盐化、绿帘石化; D. 黑云母发生绿泥石化; E. 辉钼矿呈鳞片状集合体; F. 黄铜矿交代辉钼矿; 矿物代码: Qtz—石英; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Mc—微斜长石; Bt—黑云母; Srt—绢云母; Cal—方解石; Ep—绿帘石; Chl—绿泥石; Mlb—辉钼矿; Ccp—黄铜矿

Fig. 2 Alteration and mineralization photographs of porphyraceous biotite monzogranite

A. Potassic molybdenum ore; B. Biotitization and silicification in microcline; C. Sericitization, carbonation and epidotization in plagioclase; D. Chloritization in biotite; E. Assemblage of molybdenite flakes; F. Molybdenite replaced by chalcopyrite; Qtz—Quartz; Pl—Plagioclase; Kfs—Kfeldspar; Mc—Microcline; Bt—Biotite; Srt—Sericite; Cal—Calcite; Ep—Epidote; Chl—Chlorite; Mlb—Molybdenite; Ccp—Chalcopyrite

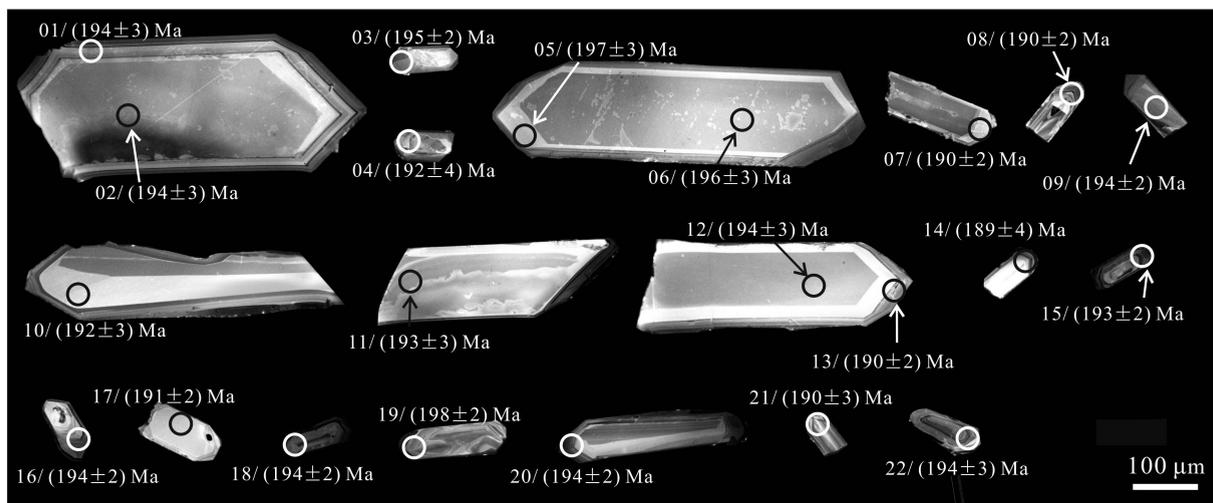


图3 似斑状黑云母二长花岗岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from porphyreous biotite monzogranite

et al., 1996)。加权平均年龄计算及谐和图绘制采用 Isoplot/Ex_ver3(Ludwig, 2003)完成。

样品主量和微量元素在中国科学院矿床地球化学国家重点实验室测定。主量元素分析采用 Axios PW4400 型 X 射线荧光光谱仪(XRF), 分析精度优于 3%。实验流程如下: 选取具有代表性的样品, 粉碎至 200 目, 然后称样品 0.7 g, XRF 分析专用熔剂(复合溶剂: $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, LiBO_2 , LiF) 7 g, 搅拌均匀之后倒入白金坩锅中, 进入熔样机高温熔融烧制熔片, 然后将制备的熔片放入 XRF 仪器上, 进行测试; 微量元素分析采用电感耦合等离子体质谱仪(ELAN DRC-e 型)完成, 分析精度优于 5%。具体的实验流程同 Qi 等(2000)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

似斑状黑云母二长花岗岩中的锆石按粒度可分为 2 类: I 类锆石粒径 $80 \sim 120 \mu\text{m}$, 为短柱状, 多数晶型完好, 具有韵律环带; II 类锆石粒径可达 $400 \sim 500 \mu\text{m}$, 长柱状, 边部韵律环带明显(图 3)。同时, 22 个数据点 Th/U 比值介于 $0.31 \sim 0.92$ (表 1), 明显大于变质锆石的 Th/U 比值(一般 < 0.1), 具有岩浆成因锆石的特征。

似斑状黑云母二长花岗岩两类锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中分布在 $(189 \pm 4) \sim (198 \pm 2) \text{Ma}$ 之间(表 1), 22 个数据点均分布在谐和线或其附近

(图 4), 得到 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(193.1 \pm 1.0) \text{Ma}$ (MSWD = 1.02), 表明岩体侵位于早侏罗世。

3.2 辉钼矿 Re-Os 年龄

6 件辉钼矿样品 Re-Os 同位素测试结果见表 2。获得的模式年龄介于 $(188.2 \pm 2.9) \text{Ma} \sim (189.5 \pm 3.2) \text{Ma}$; 等时线年龄为 $(188.6 \pm 4.7) \text{Ma}$ (MSWD = 0.41)(图 5A); 加权平均年龄为 $(188.8 \pm 1.2) \text{Ma}$ (MSWD = 0.108)(图 5B)。6 件不同位置的辉钼矿样品模式年龄十分接近, 等时线年龄与加权平均年龄基本一致, 且 MSWD 值较小, 说明本次实验测定的年龄是可靠的。因此, 等时线年龄 (188.6 ± 4.7)

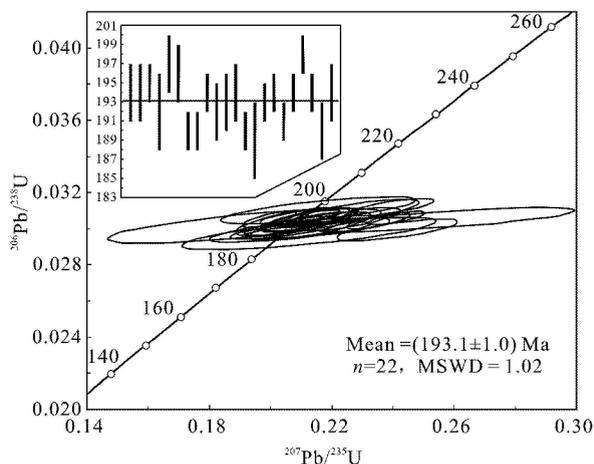


图4 似斑状黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 Zircons U-Pb concordia diagram of porphyreous biotite monzogranite

表 1 似斑状黑云母二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results of porphyreous biotite monzogranite

样品号	$\omega(B) \times 10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
YB010-2-01	115.06	158.65	0.73	0.2131	0.01029	0.03050	0.00041	196	9	194	3
YB010-2-02	71.38	194.91	0.37	0.2259	0.01106	0.03052	0.00042	207	9	194	3
YB010-2-03	141.57	424.46	0.33	0.2095	0.00867	0.03067	0.00028	193	7	195	2
YB010-2-04	157.67	505.68	0.31	0.1916	0.02955	0.03017	0.00063	178	25	192	4
YB010-2-05	64.78	141.90	0.46	0.2155	0.02107	0.03103	0.00049	198	18	197	3
YB010-2-06	83.65	117.39	0.71	0.2278	0.01372	0.03092	0.00047	208	11	196	3
YB010-2-07	186.60	333.73	0.56	0.2042	0.01149	0.02991	0.00031	189	10	190	2
YB010-2-08	590.75	645.29	0.92	0.2117	0.01402	0.02992	0.00032	195	12	190	2
YB010-2-09	313.09	383.82	0.82	0.2114	0.00769	0.03059	0.00029	195	6	194	2
YB010-2-10	38.26	80.01	0.48	0.2131	0.01310	0.03016	0.00052	196	11	192	3
YB010-2-11	35.61	79.77	0.45	0.2071	0.01237	0.03041	0.00052	191	10	193	3
YB010-2-12	98.67	130.93	0.75	0.2121	0.00989	0.03050	0.00045	195	8	194	3
YB010-2-13	67.53	149.84	0.45	0.2415	0.01301	0.02994	0.00039	220	11	190	2
YB010-2-14	106.54	258.48	0.41	0.2128	0.02751	0.02975	0.00059	196	23	189	4
YB010-2-15	288.71	495.74	0.58	0.2354	0.00689	0.03044	0.00029	215	6	193	2
YB010-2-16	261.31	585.82	0.45	0.1996	0.00580	0.03053	0.00028	185	5	194	2
YB010-2-17	251.15	288.10	0.87	0.2067	0.01029	0.03013	0.00037	191	9	191	2
YB010-2-18	249.70	349.99	0.71	0.2151	0.00831	0.03050	0.00028	198	7	194	2
YB010-2-19	154.80	342.56	0.45	0.2393	0.00939	0.03119	0.00032	218	8	198	2
YB010-2-20	333.83	789.77	0.42	0.2411	0.00613	0.03060	0.00025	219	5	194	2
YB010-2-21	142.25	176.76	0.80	0.2097	0.01947	0.02994	0.00044	193	16	190	3
YB010-2-22	256.37	385.43	0.67	0.2559	0.02877	0.03051	0.00044	231	23	194	3

表 2 夹皮沟钼矿辉钼矿床 Re-Os 同位素测试结果

Table 2 Re-Os isotopic data of molybdenites from the Jiapiyou molybdenum deposit

样品编号	m/g	$\text{Re} \pm 2\sigma (\mu\text{g}/\text{g})$	普 Os $\pm 2\sigma (\text{ng}/\text{g})$	$^{187}\text{Re} \pm 2\sigma (\mu\text{g}/\text{g})$	$^{187}\text{Os} \pm 2\sigma (\text{ng}/\text{g})$	模式年龄/Ma
YB010-1	0.02108	78.43 ± 0.73	0.0698 ± 0.0571	49.29 ± 0.46	154.8 ± 1.4	188.2 ± 2.9
YB010-2	0.02012	80.76 ± 0.81	0.0729 ± 0.0596	50.76 ± 0.51	160.2 ± 1.4	189.2 ± 2.9
YB010-3	0.02382	63.89 ± 0.73	0.0494 ± 0.0508	40.15 ± 0.46	126.7 ± 1.2	189.0 ± 3.2
YB010-4	0.02008	57.06 ± 0.66	0.1178 ± 0.0299	35.86 ± 0.42	113.4 ± 1.1	189.5 ± 3.2
YB010-5	0.02058	55.33 ± 0.47	0.0854 ± 0.0725	34.77 ± 0.30	109.3 ± 0.9	188.4 ± 2.7
YB010-6	0.02118	66.50 ± 0.89	0.0270 ± 0.0570	41.80 ± 0.56	131.7 ± 1.0	188.8 ± 3.3

Ma 可以代表夹皮沟钼矿辉钼矿的结晶时间。

3.3 地球化学特征

取自夹皮沟矿区地表的 4 件似斑状黑云母二长花岗岩样品的主量和微量元素分析结果如表 3 所示。

3.3.1 主量元素

似斑状黑云母二长花岗岩样品的 $\omega(\text{SiO}_2)$ 为 72.29% ~ 72.81% ,全碱含量 $\omega(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为 7.62% ~ 7.71% , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 介于 1.54 ~ 1.69 ,里特曼指数 σ 在 1.96 ~ 2.01 之间 ,在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图上落入高钾钙碱性系列(图 6A) ; $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 12.61% ~ 13.08% ,铝指数 A/CNK 介于 1.03 ~ 1.06 ,属于弱过铝质岩石(图 6B)。

3.3.2 微量元素

似斑状黑云母二长花岗岩稀土元素总质量分数介于 $110.13 \times 10^{-6} \sim 154.39 \times 10^{-6}$ 。轻、重稀土元素分馏明显 ,轻稀土元素相对富集 , LREE/HREE 为 6.41 ~ 7.34 , $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 6.88 ~ 9.12 , $\delta\text{Eu} = 0.33 \sim 0.40$ 。球粒陨石标准化稀土元素配分曲线总体右倾 ,与张广才岭-小兴安岭地区典型钼矿(大黑山、霍吉河、鹿鸣、翠岭)成矿期花岗岩的稀土元素配分曲线型式基本一致(图 6C) ,但 Eu 负异常更加明显 ,指示斜长石分离结晶作用更加强烈。原始地幔标准化微量元素蛛网图指示黑云母二长花岗岩总体富集大离子亲石元素(LILE)及轻稀土元素(LREE) ,亏损高场强元素(HFSE) (Ti、P、Nb 等) ,这与区内典型钼矿成矿期花岗岩的微量元素含量总体趋势一致(图 6D) ,Ta 和 Hf 含量稍高。大离子亲石

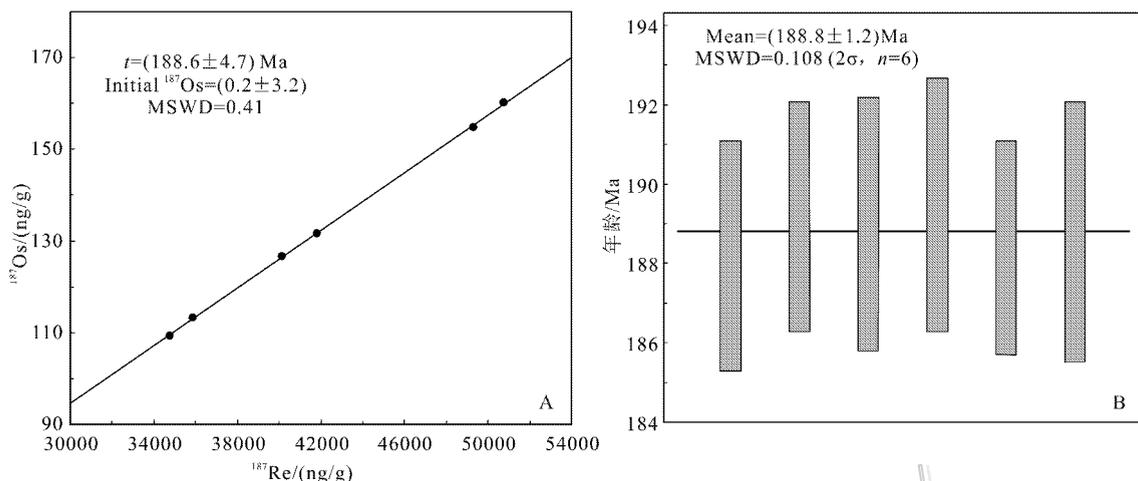


图 5 夹皮沟钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素等时线图 (A) 与加权平均年龄图 (B)

Fig. 5 Re-Os isochron (A) and weighted mean of Re-Os model ages (B) of molybdenites from the Jiapigou molybdenum deposit

表 3 似斑状黑云母二长花岗岩主量元素 ($w_B/\%$)、微量和稀土元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果及参数

Table 3 Compositions and parameters of major elements ($w_B/\%$) and trace and rare earth elements ($w_B/10^{-6}$) of porphyreous biotite monzogranite

组分	YB010-2-1	YB010-2-2	YB010-2-3	YB010-2-4	组分	YB010-2-1	YB010-2-2	YB010-2-3	YB010-2-4
SiO ₂	72.29	72.52	72.46	72.81	Dy	5.04	3.89	3.85	4.37
Al ₂ O ₃	13.05	13.08	12.98	12.61	Ho	1.06	0.86	0.88	0.95
Fe ₂ O ₃	2.46	2.41	2.43	2.30	Er	2.96	2.40	2.39	2.63
MgO	0.65	0.59	0.64	0.68	Tm	0.42	0.37	0.35	0.41
CaO	1.32	1.24	1.25	1.28	Yb	2.84	2.52	2.47	2.74
Na ₂ O	3.00	2.97	2.95	2.84	Lu	0.44	0.39	0.41	0.42
K ₂ O	4.62	4.74	4.68	4.81	Y	31.30	25.70	25.70	27.90
MnO	0.05	0.05	0.05	0.05	ΣREE	154.39	117.12	110.13	137.39
P ₂ O ₅	0.06	0.06	0.06	0.05	LREE	135.89	101.93	95.26	120.74
TiO ₂	0.28	0.26	0.27	0.25	HREE	18.50	15.19	14.87	16.64
LOI	0.71	0.76	0.85	0.88	LREE/HREE	7.34	6.71	6.41	7.25
总和	98.49	98.68	98.62	98.56	(La/Yb) _N	9.12	7.49	6.88	8.35
K ₂ O/Na ₂ O	1.54	1.59	1.59	1.69	δEu	0.33	0.39	0.40	0.36
A/NK	1.31	1.30	1.31	1.28	δCe	0.97	0.98	1.00	0.97
A/CNK	1.06	1.06	1.06	1.03	Rb	174	201	200	194
σ	1.98	2.01	1.98	1.96	Ba	330	328	328	352
La	36.10	26.30	23.70	31.90	Th	33.40	28.10	30.20	30.10
Ce	65.60	49.10	45.80	58.30	U	12.60	9.73	15.10	10.40
Pr	6.54	5.04	4.75	5.78	Nb	16.20	13.00	13.90	13.70
Nd	22.30	17.20	16.80	19.90	Ta	2.32	1.83	1.98	1.77
Sm	4.82	3.79	3.71	4.34	Pb	27.31	26.86	27.31	47.53
Eu	0.53	0.50	0.50	0.52	Sr	122	121	125	117
Gd	4.87	4.04	3.82	4.36	Zr	110	115	115	108
Tb	0.88	0.71	0.71	0.76	Hf	3.76	4.05	3.88	3.70

注：比值单位为 1。

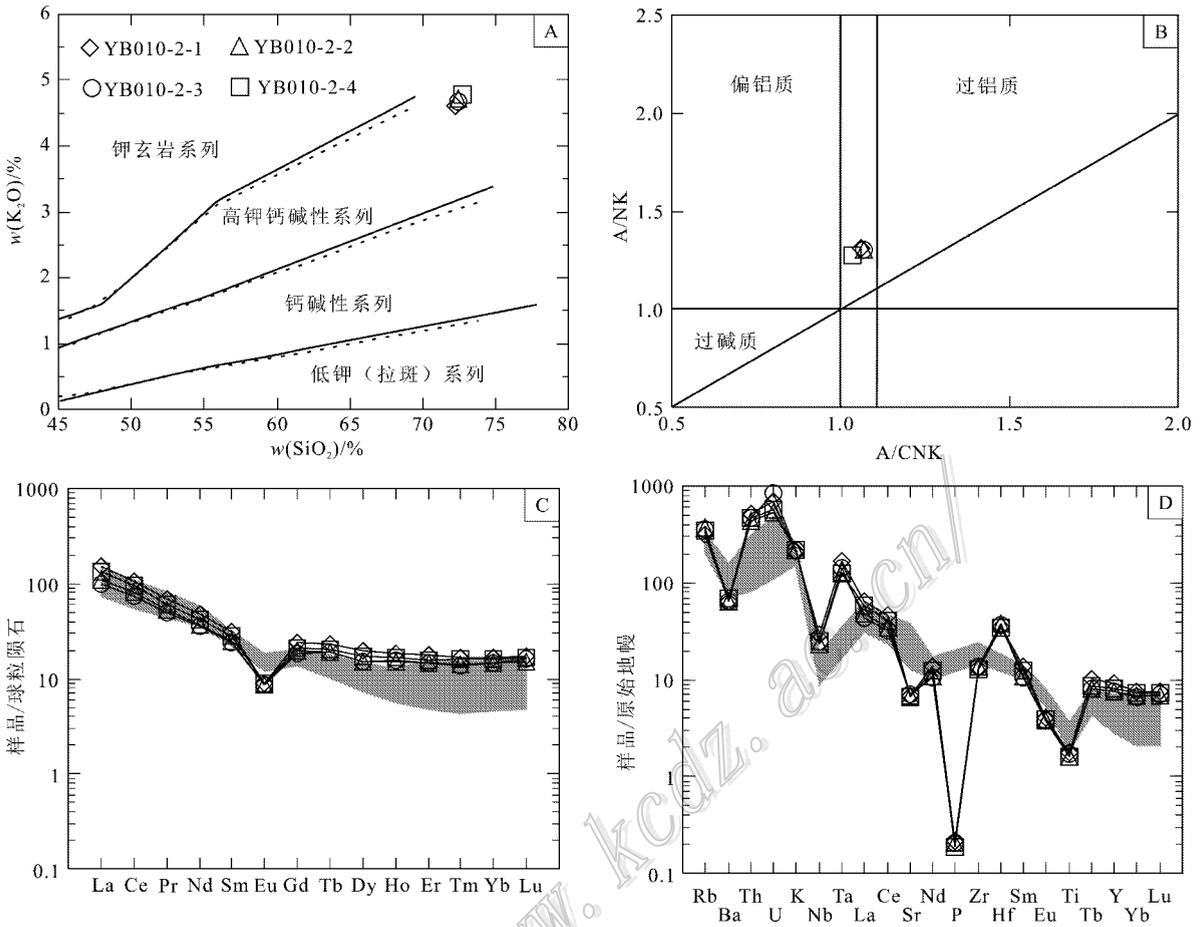


图6 似斑状黑云母二长花岗岩主量和微量元素特征

A. $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图(底图据 Rickwood, 1989); B. A/CNK-A/NK 图解(底图据 Peccerillo et al., 1976); C. 球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图; D. 原始地幔标准化微量元素蛛网图。球粒陨石和原始地幔值据 Sun et al., 1989; 图C和D中阴影区所用数据为大黑山钼矿花岗闪长斑岩和二长花岗岩斑岩(葛文春等, 2007)、翠岭钼矿花岗闪长斑岩和石英二长岩、鹿鸣钼矿花岗岩斑岩和二长花岗岩以及霍吉河钼矿二长花岗岩(杨宇辰等, 2012)

Fig. 6 Characteristics of major elements and trace elements of porphyreous biotite monzogranite

A. $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ diagram (after Rickwood, 1989); B. A/CNK-A/NK diagram (after Peccerillo et al., 1976); C. Chondrite-normalized REE patterns; D. Primitive mantle normalized spider diagram. Chondrite and primitive-mantle values from Sun et al., 1989; The data of shadow area in Fig. C and D are as follows: granodiorite porphyry and monzonitic granite-porphyry from the Daeishan molybdenum deposit (after Ge et al., 2007); granodiorite porphyry and adamellite from the Cuiling molybdenum deposit; granite-porphyry and monzonitic granite from the Luming molybdenum deposit; monzonitic granite from the Huojihe molybdenum deposit (after Yang et al., 2012)

元素(LILE)中 Ba 、 Sr 相对亏损更加明显, 同样与斜长石的分离结晶作用有关。P 强烈亏损, 可能是岩浆演化过程中磷灰石大量的分离结晶造成的。

4 讨论

4.1 成岩成矿时代

夹皮沟矿区钼矿体产于似斑状黑云母二长花岗岩内, 二者明显受北东向构造的控制; 矿化以细脉浸染型为主, 伴随明显的热液蚀变作用; 而在同期形成

的花岗斑岩及正长花岗岩中未见蚀变与矿化现象, 表明似斑状黑云母二长花岗岩与夹皮沟钼矿具有密切的时空及成因联系。岩体中锆石 U-Pb 加权平均年龄为 $(193.1 \pm 1.0) \text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.02$), 矿石中辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 $(188.6 \pm 4.7) \text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.41$), 表明成岩成矿作用发生于早侏罗世, 成矿滞后于成岩约 4.5 Ma。

大量研究结果表明, 中国东部钼矿明显有以下几个典型成矿期, 即印支晚期 (240~220 Ma)、燕山早期 (190~160 Ma) 和燕山晚期 (150~110 Ma), 如东

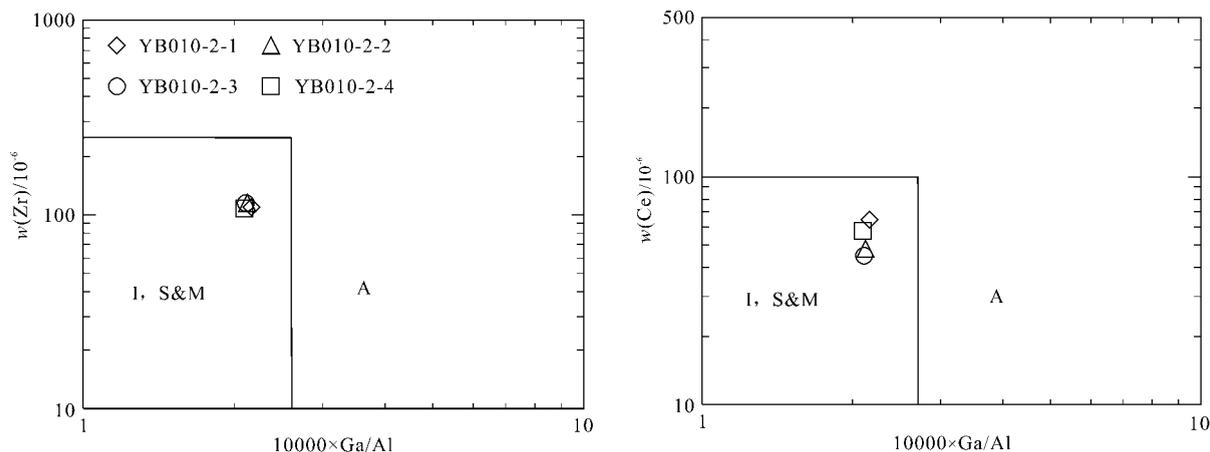


图 7 似斑状黑云母二长花岗岩 $Zr-10\ 000 \times (Ga/Al)$ 和 $Ce-10\ 000 \times (Ga/Al)$ 岩石类型判别图(底图据 Whalen et al., 1987)

Fig. 7 $Zr-10\ 000 \times (Ga/Al)$ and $Ce-10\ 000 \times (Ga/Al)$ diagrams for rock type discrimination of porphyroclastic biotite monzogranite (after Whalen et al., 1987)

秦岭钼矿带内钼矿主要形成于晚三叠世(233~221 Ma)和晚侏罗世—早白垩世(148~112 Ma)(Mao et al., 2011);西拉木伦钼矿带具有早、中三叠世(248~236 Ma)和晚侏罗世—早白垩世(154~131 Ma)两期钼成矿作用(曾庆栋等, 2011);燕辽钼矿带铜钼成矿作用主要发生于 185 Ma 和 140 Ma 左右(代军治等, 2006)。近年来小兴安岭-张广才岭钼矿带与钼矿相关的成岩成矿年代学数据表明(李立兴等, 2009;王成辉等, 2009;陈静, 2011;王辉等, 2011;鞠楠等, 2012),该带钼矿的形成时代为燕山早期(190~160 Ma),这与区内近南北向分布的侏罗纪花岗岩带关系密切。

4.2 岩石成因类型

在矿物组成上,夹皮沟钼矿床的似斑状黑云母二长花岗岩含有黑云母、角闪石、锆石、榍石等,未见白云母、堇青石、石榴子石等富铝矿物,表现出 I 型花岗岩矿物组合特征。在 Zr 、 $Ce-10\ 000 \times (Ga/Al)$ 岩石类型判别图上,4 件花岗岩样品均落在 I 型、S 型和 M 型花岗岩区(图 7)。夹皮沟钼矿似斑状黑云母二长花岗岩属于弱过铝质的高钾钙碱性系列; A/CNK 为(1.03~1.06)小于 1.1,区别于 S 型花岗岩(A/CNK 大于 1.1)(Chappell et al., 1974;邱家骥, 1991);稀土元素配分型式呈明显的右倾型,轻、重稀土元素分馏明显(LREE/HREE 为 6.41~7.34),Eu 异常中等;总体上富集大离子亲石元素(LILE),亏损高场强元素(HFSE),这些与区域上典型的早侏

罗世 I 型花岗岩(Wu et al., 2003a, 2003b, 2004;葛文春等, 2007;曾涛等, 2011;陈静, 2011;杨言辰等, 2012)的地球化学特征相近。综上,可以判定夹皮沟钼矿似斑状黑云母二长花岗岩属于 I 型花岗岩。

4.3 成岩成矿物质来源

Sr 和 Yb 的含量在一定条件下对于判断花岗岩源区深度可能有一定的参考意义(张旗等, 2005; 2006; 陈志广等, 2008)。按照张旗等(2006)对花岗岩的分类,夹皮沟钼矿的似斑状黑云母二长花岗岩应属于低 Sr 高 Yb 型[以 $\alpha(Sr) = 400 \times 10^{-6}$ 、 $\alpha(Yb) = 2 \times 10^{-6}$ 为界划分],此类花岗岩形成时压力条件较低(<0.8 GPa 或 1 GPa),可能是正常地壳厚度下形成的,属壳源环境。Wu 等(2004)对张广才岭南部的东清岩体(160 Ma)的地球化学特征及 Sr-Nd 同位素的研究发现,其岩浆起源于新生地壳的部分熔融作用;区域上同属于东北地区侏罗纪花岗岩带的小兴安岭西北部的新开岭岩体(188~164 Ma)形成于挤压增厚地壳下部的熔融作用(曾涛等, 2011);大兴安岭东北部的正棋村[(190±1)Ma]、韩家院子[(188±1)Ma]、兴华-翻身屯[(178±1)Ma]等岩体、鸡尾甸子岩体(176~181 Ma)和黑花山岩体[(171±2)Ma]也表现出类似的壳源属性(隋振民等, 2007)。

辉钼矿中的 $w(Re)$ 从 $n \times 10^{-4} \sim n \times 10^{-5} \sim n \times 10^{-6}$,可能反映了成矿物质从地幔来源到壳幔混源再到地壳来源(Mao et al., 1999)。夹皮沟钼矿辉

钼矿中 $\epsilon(^{187}\text{Re})$ 介于 $34.77 \sim 50.76 \mu\text{g/g}$,指示成矿物质可能来源于壳幔混源,并以壳源为主。结合前人关于东北地区侏罗纪花岗岩带内典型岩体的研究,初步推断夹皮沟钼矿成岩成矿物质来源于增厚下地壳,与部分熔融作用有关。

4.4 成岩成矿构造背景

中国东北地区位于西伯利亚板块、华北板块和古太平洋板块之间,包括佳木斯地块、松嫩地块、兴安地块和额尔古纳地块等多个中、小块体在晚古生代之前已经完成拼合,形成了统一的佳-蒙地块(王成文等,2008;周建波等,2009;刘永江等,2010)。古亚洲洋洋壳向北侧佳蒙地块之下持续俯冲,并于晚二叠世末(250 Ma左右)沿西拉木伦-长春缝合线最终碰撞拼贴(Xiao et al., 2003;孙德有等,2004a;刘永江等,2010),进入陆内演化阶段。从侏罗纪开始,古太平洋板块的俯冲作用对东北地区的构造、岩浆及成矿作用起着明显的控制作用(孙晓猛等,2008;Wu et al., 2007, 2011)。

夹皮沟钼矿似斑状黑云母二长花岗岩总体上富集大离子亲石元素(LILE),亏损高场强元素(HFSE),显示其具有岛弧或活动大陆边缘岩浆岩的特征(Gill, 1981; Grove et al., 1986; Eiler et al., 2000; 卢良兆等, 2004; Wang et al., 2011)。在Nb-Y和Rb-(Y+Nb)构造环境判别图解上,4件样品均落入火山弧花岗岩区(图8)。综合岩体侵位时代与构造背景,可以判定其为与俯冲作用相关的大陆边

缘岩浆弧区的产物。

夹皮沟钼矿成岩成矿作用发生于早侏罗世,为古亚洲洋构造体制与环太平洋构造体制叠加与转换的重要时期。构造体制的转换常常是大规模成矿作用最重要的背景(翟裕生等,2002)。小兴安岭-张广才岭地区存在的A型花岗岩大多数形成于(230~210)Ma间,少量形成于早侏罗世(200~180)Ma(Wu et al., 2002;孙德有等,2004b,2005),指示古亚洲洋构造体制下的造山后伸展作用的逐渐减弱,显然区内侏罗纪花岗岩及其伴生的大规模钼成矿作用与古太平洋板块的俯冲作用关系更加密切。板块俯冲产生的挤压造山作用导致地壳增厚,在地壳一定深度上源区岩石发生重熔形成的中酸性含钼岩浆,沿构造裂隙上升侵位,随着温度、压力下降在地壳浅部成矿物质析出进而富集成矿。关于源区内岩石形成过程中与幔源物质的关系等问题需进一步研究。

5 结论

通过对汪清夹皮沟钼矿床的成岩成矿时代及成矿岩体元素地球化学特征的研究,获得以下认识:

(1)夹皮沟钼矿床为典型的斑岩型钼矿床,赋矿似斑状黑云母二长花岗岩与夹皮沟钼矿具有密切的时空及成因关系。岩体锆石U-Pb加权平均年龄为 $(193.1 \pm 1.0) \text{Ma}$ (MSWD=1.02),矿石中辉钼矿

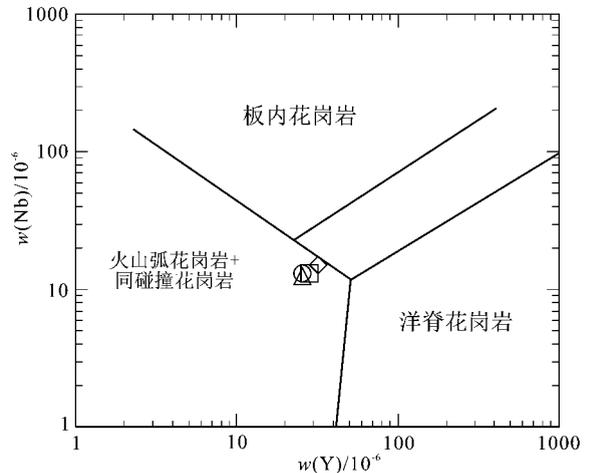
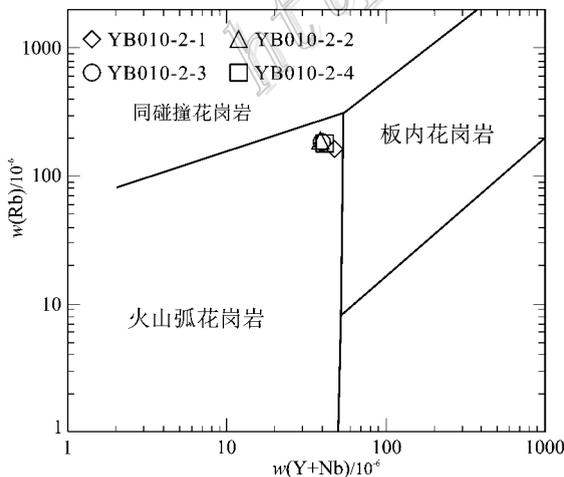


图8 似斑状黑云母二长花岗岩 Nb-Y 和 Rb-(Y+Nb) 构造环境判别图解(底图据 Pearce et al., 1984)

Fig. 8 Nb-Y and Rb-(Y+Nb) diagrams for tectonic settings of porphyreous biotite monzogranite(after Pearce et al., 1984)

Re-Os 等时线年龄为 (188.6 ± 4.7) Ma(MSWD = 0.41),成岩成矿作用发生于早侏罗世。小兴安岭-张广才岭钼矿带的钼矿床主要形成于燕山早期(190~160 Ma),与区内近南北向分布的侏罗纪花岗岩带关系密切;

(2)与钼矿有关的似斑状黑云母二长花岗岩属于弱过铝质的高钾钙碱性岩石系列,元素地球化学特征与区内典型钼矿成矿期花岗岩有可比性,属于I型花岗岩。矿床成岩成矿物质可能源于俯冲背景下增厚下地壳的部分熔融作用;

(3)夹皮沟钼矿床形成于古亚洲洋构造体制与古太平洋构造体制叠加与转换的背景下,成岩成矿作用与古太平洋板块的俯冲作用关系密切。板块俯冲产生的挤压造山作用导致地壳增厚,在地壳一定深度上源区岩石发生重熔形成的中酸性含钼岩浆,沿构造裂隙上升侵位,随着温度、压力下降在地壳浅部成矿物质析出进而富集成矿。

参考文献/References

陈 静. 2011. 黑龙江小兴安岭区域成矿背景与有色、贵金属矿床成矿作用[博士学位论文][D]. 导师:孙丰月. 长春:吉林大学. 150页.

陈志广,张连昌,万 博,张玉涛,吴华英. 2008. 内蒙古乌奴格吐山斑岩钼矿床低 Sr-Yb 型成矿斑岩地球化学特征及地质意义[J]. 岩石学报, 24(1):115-128.

代军治,毛景文,杨富全,叶会寿,赵财胜,谢桂青,张长青. 2006. 华北地台北缘燕辽钼(铜)成矿带矿床地质特征及动力学背景[J]. 矿床地质, 25(5):598-612.

杜安道,屈文俊,李 超,杨 刚. 2009. 铼-钨同位素定年方法及分析测试技术的进展[J]. 岩矿测试, 28(3):288-304.

葛文春,吴福元,周长勇,张吉衡. 2007. 兴蒙造山带东段斑岩型 Cu-Mo 矿床成矿时代及其地球动力学意义[J]. 科学通报, 52(20):2407-2417.

黄 凡,陈毓川,王登红,袁忠信,陈郑辉. 2011. 中国钼矿主要矿集区及其资源潜力探讨[J]. 中国地质, 38(5):1111-1134.

鞠 楠,任云生,王 超,王 辉,赵华雷,屈文俊. 2012. 吉林敦化大石河钼矿床成因与辉钼矿 Re-Os 同位素测年[J]. 世界地质, 31(1):68-76.

李立兴,松权衡,王登红,王成辉,屈文俊,汪志刚,毕守业,于 城. 2009. 吉林福安堡钼矿中辉钼矿铼-钨同位素定年及成矿作用探讨[J]. 岩矿测试, 28(3):283-287.

刘永江,张兴洲,金 巍,迟效国,王成文,马志红,韩国卿,温泉波,赵英利,王文弟,赵喜峰. 2010. 东北地区晚古生代区域构造演化[J]. 中国地质, 37(4):943-951.

卢良兆,林 强,刘招君. 2004. 成因岩石学[M]. 长春:吉林大学出版社. 1-420.

罗铭玖,张辅民,董群英,许永仁,黎世美,李昆华. 1991. 中国钼矿床[M]. 郑州:河南科学技术出版社. 1-447.

苗来成,范蔚茗,张福勤,刘敦一,简 平,施光海,陶 华,石玉若. 2003. 小兴安岭西北部新开岭-科洛杂岩锆石 SHRIMP 年代学研究及其意义[J]. 科学通报, 48(22):2315-2323.

邱家骥. 1991. 应用岩浆岩石学[M]. 武汉:中国地质大学出版社. 1-414.

孙德有. 2001. 张广才岭中生代花岗岩成因及其地球动力学意义(博士学位论文)[D]. 导师:林强,吴福元. 长春:吉林大学. 112页.

孙德有,吴福元,张艳斌,高 山. 2004a. 西拉木伦河-长春-延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 34(2):174-181.

孙德有,吴福元,高 山. 2004b. 小兴安岭东部清水岩体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定[J]. 地球学报, 25(2):213-218.

孙德有,吴福元,高 山,路孝平. 2005. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世二期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约[J]. 地学前缘, 12(2):263-275.

孙景贵,张 勇,邢树文,赵克强,张增杰,白令安,马玉波,刘勇胜. 2012. 兴蒙造山带东缘内生钼矿床的成因类型、成矿年代及成矿动力学背景[J]. 岩石学报, 28(4):1317-1332.

孙晓猛,刘永江,孙庆春,韩国卿,王书琴,王英德. 2008. 敦密断裂带走滑运动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 38(6):965-972.

孙珍军. 2010. 小兴安岭石林公园钼-钨-成矿作用及地球化学特征(硕士学位论文)[D]. 导师:孙国胜. 长春:吉林大学. 66页.

隋振民,葛文春,吴福元,张吉衡,徐学纯,程瑞玉. 2007. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗岩类岩石的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 23(2):461-480.

王成辉,松权衡,王登红,李立兴,于 城,汪志刚,屈文俊,杜安道,应立娟. 2009. 吉林大黑山超大型钼矿辉钼矿铼-钨同位素定年及其地质意义[J]. 岩矿测试, 28(3):269-273.

王成文,金 巍,张兴洲,马志红,迟效国,刘永江,李 宁. 2008. 东北及邻区晚古生代大地构造属性新认识[J]. 地层学杂志, 32(2):119-136.

王 辉,任云生,赵华雷,鞠 楠,屈文俊. 2011. 吉林安图刘生店钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义[J]. 地球学报, 32(6):707-715.

杨言辰,韩世炯,孙德有,郭 嘉,张苏江. 2012. 小兴安岭-张广才岭成矿带斑岩型钼矿床岩石地球化学特征及其年代学研究[J]. 岩石学报, 28(2):379-390.

曾庆栋,刘建明,褚少雄,付国立,于文斌,李泽明,高玉友,李元九,孙 燕,周伶俐,段晓侠,张 松,王永彬. 2011. 西拉木伦成矿带中生代花岗岩类活动与钼成矿作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(6):1705-1725.

曾 涛,王 涛,郭 磊,董 英,张建军,史兴俊,张 磊,李永飞. 2011. 东北新开岭地区晚中生代花岗岩类时代、成因及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(6):1881-1900.

张 旗,李承东,王 焰,王元龙,金惟俊,贾秀勤,韩 松. 2005. 中国东部中生代高 Sr 低 Yb 和低 Sr 高 Yb 型花岗岩对比及其地质意义[J]. 岩石学报, 21(6):1527-1537.

- 张旗,王焰,李承东,王元龙,金惟俊,贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(9):2249-2269.
- 张艳斌,吴福元,李惠民,路孝平,孙德友,周红英. 2002. 吉林黄泥河岭花岗岩体的单颗粒锆石 U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 18(4):475-481.
- 张忠光,朴英姬,姜福平. 2011. 吉林省汪清县夹皮沟钼矿床特征及成因[J]. 吉林地质, 30(4):29-43.
- 翟裕生,吕古贤. 2002. 构造动力体制转换与成矿作用[J]. 地球学报, 23(2):97-102.
- 周建波,张兴洲,马志红,刘立,金魏,张梅生,王成文,迟效国. 2009. 中国东北地区的构造格局与盆地演化[J]. 石油与天然气地质, 30(5):530-538.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 192:59-79.
- Chappell B W and White A J R. 1974. Two contrasting granite types[J]. Pacific Geology, 8:173-174.
- Eiler J M, Grawford A J, Elliott T R, Farley K A, Valley J W and Stolper E. 2000. Oxygen isotope geochemistry of oceanic arc lavas[J]. Journal of Petrology, 41:229-256.
- Gill J B. 1981. Orogenic andesites and Plate tectonics[M]. New York: Springer Verlag. 1-385.
- Grove T L and Donnelly N M. 1986. The evolution of young silicic lavas at Medicine Lake Volcano, California: Implications for the origin of compositional gaps in calcalkaline series lavas[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 92:281-302.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G and Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 257:34-43.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q and Wang D. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 51:537-571.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for isoplot 3.1, A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Geochronology Center Special Publication. 4:25-32.
- Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H and Du A D. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou (Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 63(11-12):1815-1818.
- Mao J W, Pirajno F, Xiang J F, Gao J J, Ye H S, Li Y F and Guo B J. 2011. Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinling-Dabie orogenic belt: Characteristics and tectonic settings[J]. Ore Geology Reviews, 43:464-293.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G, 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 25:956-983.
- Peccerillo R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58(1):63-81.
- Qi L, Hu J D and Conrad G. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Talanta, 51:507-513.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagram which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 22(4):247-263.
- Smoliar M I, Walker R J and Morgan J W. 1996. Re-Os ages of Group IIA, IIIA, IVA, and IVB iron meteorites[J]. Science, 271:1099-1102.
- Shirey S B and Walker R J. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis[J]. Analytical Chemistry, 67:2136-2141.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. In: Saunders A D and Norry M J, eds. Magmatism in the Ocean Basins[C]. London: Geological Society of Special Publication. 42:313-345.
- Wang F, Xu W L, Meng E, Cao H H and Gao F H. 2011. Early Paleozoic amalgamation of the Songnen-Zhangguangcai Range and Jiamusi massifs in the eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt: Geochronological and geochemical evidence from granitoids and rhyolites[J]. Journal of Asian Earth Sciences 49, 234-248.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 95:407-419.
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, Jahn B M, Simon A and Wilde S A. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. Chemical Geology, 187:143-173.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, Lo C H, Yui T F, Lin Q, Ge W C and Sun D Y. 2003a. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis[J]. Lithos, 66:241-273.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, Lo C H, Yui T F, Lin Q, Ge W C and Sun D Y. 2003b. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic[J]. Lithos, 67:191-204.
- Wu F Y, Sun D Y, Jahn B M and Wilde S A. 2004. A Jurassic garnet-bearing granitic pluton from NE China showing tetrad REE patterns[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 23:731-744.
- Wu F Y, Zhao G C, Sun D Y, Wilde S A and Yang J H. 2007. The Hulan Group: Its role in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 30:542-556.
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, Zhang Y B, Grant M L, Wilde S A and Jahn B M. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 41:1-30.
- 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(6):1-20.
- Zhang Y B, Wu F Y, Zhai M G and Lu X P. 2004. The tectonic attributes of the Helong block and the eastern borderline of the north margin of North China[J]. Science in China (Series D), 34(9):475-481.