

doi: 10.12029/gc20160619

张朋, 陈冬, 寇林林, 等. 辽东宽甸东北沟钼矿二长花岗岩年代学、地球化学及 Hf 同位素特征[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 2092–2103.

Zhang Peng, Chen Dong, Kou Linlin, et al. Chronology, geochemistry and Hf Isotope of monzonitic granite from the Dongbeigou molybdenum deposit in Kuandian, Liaoning Province[J]. Geology in China, 2016, 43(6): 2092–2103(in Chinese with English abstract).

辽东宽甸东北沟钼矿二长花岗岩年代学、地球化学及 Hf 同位素特征

张朋¹ 陈冬² 寇林林¹ 赵岩¹ 杨宏智¹

(1. 沈阳地质矿产研究所, 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018)

摘要: 东北沟钼矿是辽东宽甸地区近些年发现的大型隐爆角砾岩型钼矿床。文章首次对东北沟钼矿床赋矿围岩二长花岗岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 主量元素、微量元素和 Hf 同位素地球化学研究, 锆石 U-Pb 定年结果表明, 二长花岗岩形成年龄为 $(129.4 \pm 0.3) \text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.83$), 为燕山期构造岩浆活动产物。地球化学成分上, 岩石具有富硅 ($\text{SiO}_2=62.21\% \sim 83.21\%$)、高钾 ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=3.35 \sim 20.27$) 和富碱 ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=5.82\% \sim 12.23\%$) 的特点, 属于钾玄岩系列。岩石富集轻稀土元素 ($\text{LREE}/\text{HREE}=10.26 \sim 24.21$), 亏损重稀土元素, 具有弱负铈异常 ($\delta\text{Eu}=0.63 \sim 1.07$), 富集大离子亲石元素 (如 K、Rb、Pb) 和不相容元素 (如 Th、U) 的特征, 相对亏损高场强元素 (如 Nb、Ta、P、Ti)。锆石 Hf 同位素分析结果表明, 东北沟钼矿二长花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为介于 $-12.4 \sim -8.5$, 二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 介于 $442 \sim 1610 \text{Ma}$, 反映岩浆源区可能来源于中元古界古老地壳的再熔融。结合区域构造演化, 成岩成矿构造背景为早白垩世古太平洋板块向欧亚之下俯冲, 岩石圈减薄的构造环境。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 二长花岗岩; 东北沟钼矿; 辽东

中图分类号: P588.12; P618.65 文献标志码: A 文章编号: 100-3657(2016)06-2092-12

Chronology, geochemistry and Hf Isotope of monzonitic granite from the Dongbeigou molybdenum deposit in Kuandian, Liaoning Province

ZHANG Peng¹, CHEN Dong², KOU Lin-lin¹, ZHAO Yan¹, YANG Hong-zhi¹

(1. *Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Shenyang 110034, Liaoning, China;*

2. *Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, Jiangsu, China*)

Abstract: The Dongbeigou molybdenum deposit is a newly discovered large-sized cryptoexplosive breccia molybdenum deposit in Kuandian, Liaoning Province. In this study, the authors first carried out a comprehensive study including zircon U-Pb dating, petrogeochemical investigation and Hf isotope analysis of the monzonitic granite related to the Dongbeigou molybdenum deposit. LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology indicates that the monzonitic granite was emplaced at $(129.4 \pm 0.3) \text{Ma}$. Geochemically, the

收稿日期: 2015-10-16; 改回日期: 2016-01-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41502093)和中国地质调查局项目(12120114037801, DD20160049)联合资助。

作者简介: 张朋, 男, 1983年生, 博士生, 工程师, 主要从事矿物学、岩石学、矿床学研究; E-mail: geozhangpeng2010@163.com。

monzonitic granite has rich silicon ($\text{SiO}_2=62.21\%-83.21\%$), high potassium ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=3.35-20.27$), and rich alkali ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}=5.82\%-12.23\%$), belonging to shoshonite series peraluminous granite and characterized by LREE enrichment, HREE depletion, and weak negative Eu anomaly ($\delta\text{Eu}=0.63-1.07$). The monzonitic granite is enriched in LILEs such as K, Rb and Pb, and depleted in HFSEs such as Nb, Ta, P and Ti. According to zircon Hf isotope analyses, the $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of monzonitic granite are $-12.4 - -8.5$, and two-stage model ages (t_{DM2}) vary from 442 Ma to 1610 Ma. These characteristics suggest that the primary magma was derived from the remelting of the Mesoproterozoic crustal materials. In combination with metallogenic geological background, the authors hold that the monzonitic granite and the Dongbeigou molybdenum deposit were developed from the subduction of the Pacific Plate beneath Eurasia associated with Cretaceous lithospheric thinning.

Key words: zircon U-Pb age; Hf isotope; monzonitic granite; Dongbeigou molybdenum deposit; Liaodong

About the first author: ZHANG Peng, mail, born in 1983, doctor candidate, engineer, majors in mineralogy, petrology and mineral deposit geology; E-mail: geozhangpeng2010@163.com.

Fund support: National Natural Science Funds for Distinguished Young scholar(41502093)、China Geological Survey Program (12120114037801).

隐爆角砾岩型矿床是国内外许多大型-超大型矿床重要矿化类型之一,矿种包括金、银、铅锌、钼、钨、铁等等。随着研究深入,隐爆角砾岩筒可作为寻找斑岩型矿床的直接标志越来越多的被地学界认可^[1],伴随着越来越多的与岩浆隐爆有关的铅锌、金、银、钨钼等矿床的发现,对隐爆角砾岩筒的控矿作用,特别是隐爆角砾岩筒与斑岩型矿床的关系备受关注^[2-5]。

矽卡岩型矿床一直是辽宁宽甸地区主要矿床类型之一,随着找矿勘探工作的深入,先后发现了多处矽卡岩型矿床(点),如:万宝源铜钼矿,宽甸四平街铜矿、石柱山南山铜矿点等等。东北沟钼矿是近些年经过详细勘探发现的大型角砾岩型矿床,钼平均品位0.11%,其发现再次说明该地区具有较好的找矿远景。虽然近些年该地区典型矽卡岩型钼矿的控矿条件、矿化特征、成岩、成矿时代及动力学背景取得一些认识^[6-7],然而对新近发现的受角砾岩筒控制的东北沟钼矿研究几乎处于空白,其成矿时代、成矿物质来源和成矿构造背景缺乏系统研究,为此,本文对该矿床开展详细的岩相学和年代学研究,查明其成矿时代和形成构造背景,以丰富该地区成矿理论发展,同时为地质找矿提供理论基础。

1 成矿地质背景

东北沟钼矿大地构造位置位于华北克拉通北缘东段,辽东裂谷中央凹陷带与鸭绿江断裂交汇部位^[8],成矿区带属于营口—长白(次级隆起、Pt₁裂谷)

Pb-Zn-Fe-Au-Ag-U-B-菱镁矿-滑石成矿带。

区域出露地层主要有古元古界辽河群、新元古界青白口系、下寒武统、中寒武统、上寒武统、下奥陶统和下白垩统(图1)。辽河群岩性主要为里尔峪组变粒岩、浅粒岩夹斜长角闪岩、富镁大理岩,原岩为酸性火山岩夹中基性火山岩、凝灰岩、碎屑岩及碳酸盐;高家峪组黑色炭质泥砂质板岩夹含炭质方解石大理岩、云母片岩、千枚岩、炭质板岩;盖县组千枚岩、变质砂岩、石英岩、云母片岩等等。青白口系钓鱼台组和南芬组岩性分别为石英岩、石英砂页岩和泥灰岩;寒武系主要岩性为灰岩、页岩、砂岩;奥陶系主要岩性为含燧石结核灰岩;早白垩系主要为陆相的安山岩、安山质火山碎屑岩等等。

区内构造复杂,发育北东向的鸭绿江构造带和北西向的周家屯—万宝构造带,前者由一系列的平行断裂组成,控制区内岩浆岩、沉积岩和变质岩及矿产的分布,同时也制约着中生代火山的喷发;后者主要由曹家沟向斜和砬子沟—高家沟断裂、钓鱼台—大青沟断裂组成,控制区内脉岩、沉积岩的分布,同时对着铜、金、钼等矿产具有制约作用。

区内侵入岩为石柱山岩体,呈小岩基产出,侵入辽河群、青白口系及寒武系地层中,面积约100 km²,岩石类型为花岗闪长岩、二长花岗岩。岩体内有多条脉岩产出,主要为石英斑岩、闪长玢岩、煌斑岩、辉绿岩等。岩体与地层接触部位具有明显矿化蚀变、主要矿化有硅化、矽卡岩化、大理岩化等,蚀变与矿化关系密切,区内诸多矿产与该侵入岩关系

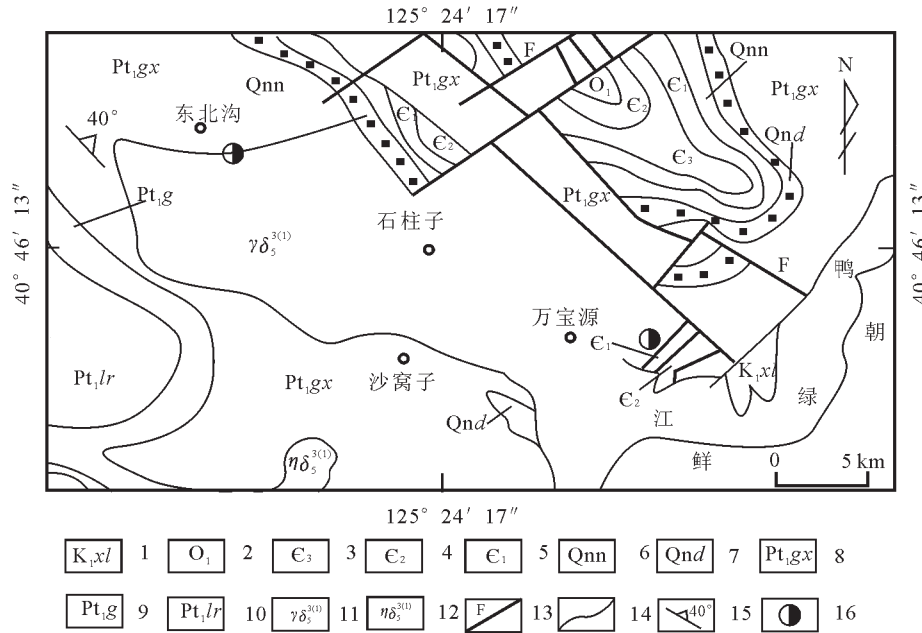


图1 东北沟钼矿区域地质图

1—下白垩统小岭组;2—下奥陶统;3—上寒武统;4—中寒武统;5—下寒武统;6—青白口系;7—青白口系钓鱼台组;8—辽河群盖县组;
9—辽河群高家峪组;10—辽河群里尔峪组;11—花岗闪长岩;12—二长花岗岩;13—断裂;14—地质界线;15—产状;16—铜钼矿

Fig. 1 Schematic regional geological map of the Dongbeigou Mo deposit

1—Lower Early Cretaceous Xiaoling Formation; 2—Lower Ordovician; 3—Upper Precambrian; 4—Middle Precambrian; 5— Lower Precambrian;
6—Qingbaikou System; 7— Diaoyutai Formation of Qingbaikou System; 8—Gaixian Formation of Liaoh Group;
9—Gaojiayu Formation of Liaoh Group; 10— Lieryu Formation of Liaoh Group; 11—Granodiorite; 12—Monzonitic granite;
13—Fault; 14—Geological boundary; 15—Attitude; 16—Cu—Mo deposit

密切,如万宝源砂卡岩型铜钼矿。

2 矿床地质特征

东北沟钼矿位于万宝村西北约9 km处,钼矿(体)化体主要赋存在石柱花岗岩闪长岩中与黑云二长花岗岩有一定关系的爆破角砾岩筒中。该岩筒位于矿区NW向与NE向两组断裂交汇部位,呈等轴状,面积约0.5 km²,中心为爆破角砾岩,向外为震裂二长花岗岩,花岗闪长岩,角砾成分主要为二长花岗岩,正长斑岩,胶结物为前两者的岩粉及其蚀变物。地表矿化微弱,经勘查查明钼矿体厚度在几米到100 m以上,向深部伴生金铜矿(矿化)体,且向深部金有增高趋势,铜矿体规模较小,仅局部见有几米大的铜矿体。东北沟钼矿矿石类型主要分为2种:一种为细脉浸染状类型,辉钼矿产于黑云二长花岗岩裂隙石英中,呈脉状、网脉状,脉宽1~20 mm不等,以辉钼矿化为主,伴有少量黄铁矿化(图2-a)。另一种矿石类型为角砾岩型,主要产于强烈破碎的构造角砾岩中,矿

石中正长斑岩棱角分明,磨圆度不高,硅化明显,辉钼矿呈浸染状分布强硅化脉中(图2-b),矿石金属矿物组合简单,主要有辉钼矿(图2-c),黄铁矿(图2-d),少量方铅矿和黄铜矿,非金属矿物主要为石英,偶见方解石,构造主要为细脉—网脉状构造、浸染状构造和角砾状构造,结构以半自形—他形结构为主,围岩蚀变有钾化、硅化带、绢云母化,青磐岩化等,铜矿化居浅部及边缘,常见于绢云母—石英化带和青磐岩化带内,蚀变强弱与矿化富集呈正相关关系,蚀变强的部位矿化和品位较好。

3 样品采集与测试方法

3.1 样品特征

本次测试黑云二长花岗岩采自东北沟钼矿采坑,采样时稀土、微量、全分析样品尽量采无矿化且新鲜的样品,岩石具块状构造(图3-a),花岗结构,岩石主要由斜长石、钾长石、石英组成,其次为一定量的黑云母及磁铁矿、锆石等副矿物。斜长石均呈

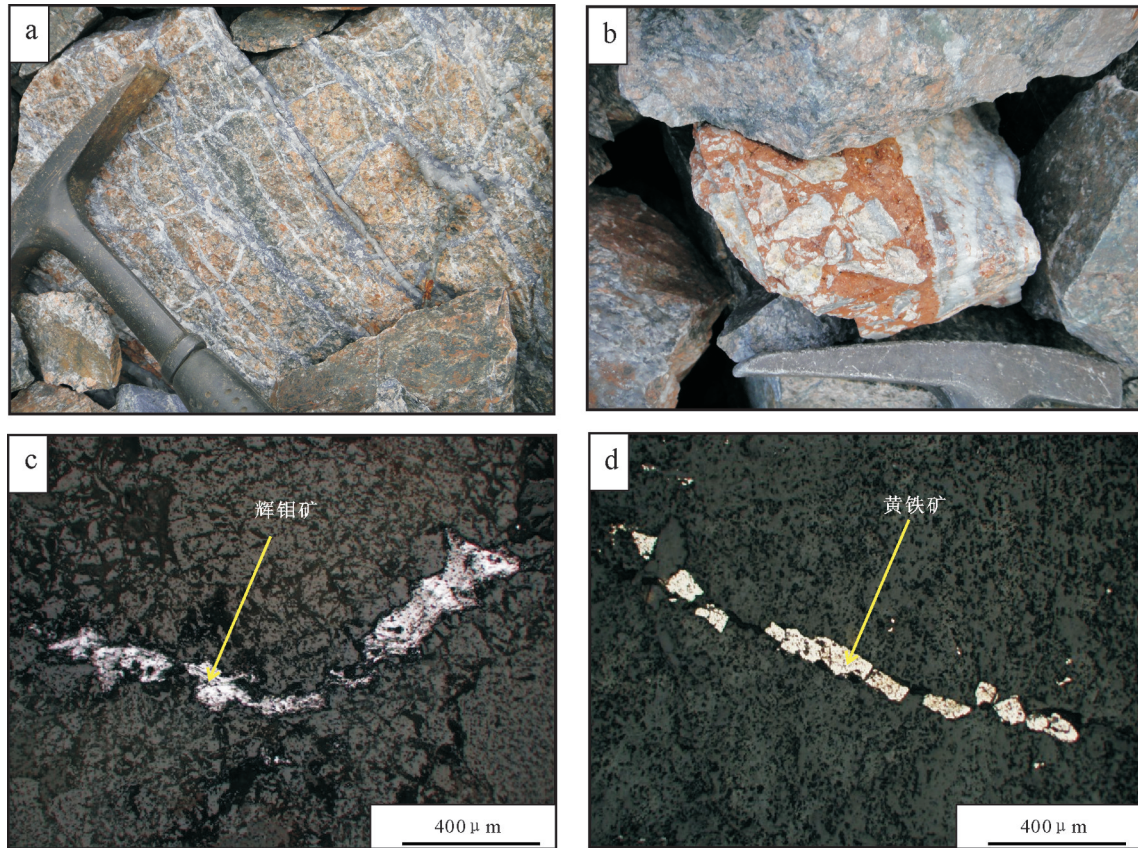


图2 东北沟钼矿手标本及镜下显微照片

a—细脉浸染状矿石;b—角砾状矿石;c—细脉状辉钼矿;d—细脉状黄铁矿

Fig. 2 Hand specimens and photomicrographs of the Dongbeigou Mo deposit
a- Veinlet-disseminated ore;b-Brecciated ore;c- Veinlet molybdenite;d- Veinlet pyrite

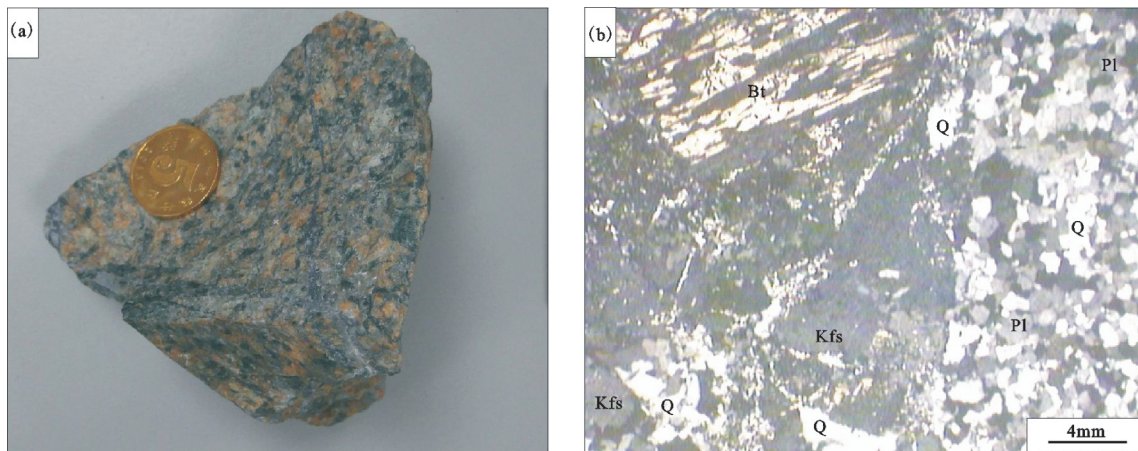


图3 东北沟钼矿二长花岗岩手标本(a)及镜下显微照片(b)

Bt—黑云母;Q—石英;Pl—斜长石;Kfs—钾长石

Fig.3 Hand specimen photograph (a) and microphotograph (b) of the monzonitic granite in the Dongbeigou molybdenum deposit

半自形板状、长板状晶形,表面不干净,发育有较强的高岭石化和局部的绢云母化,粒径1.25~1.5 mm;聚片双晶模糊,含量约为岩石的25%;钾长石多为正长石和条纹长石,呈半自形至他形晶,表面具有强烈高岭石化,局部绢云母化,正长石可见卡式双晶,条纹长石可见不明显的原生叶片状条纹构造。含量约为岩石的30%;石英明显有两种成因,一种是原生岩浆期石英,呈对较大颗粒充填于原生长石颗粒之间,第二种为后期硅化形成,呈团块状,脉状分布,单偏光镜下无色透明,表面干净,含量约为35%;黑云母含量较少,均呈半自形的鳞片状,明显被石英所交代,均蚀变为绿泥石,部分还保留原生黑云母的晶形,含量约为岩石的10%(图3-b)。

3.2 样品处理

用于挑选锆石的样品重量10 kg,样品破碎和挑选工作均在河北廊坊诚信地质服务公司进行,锆石单矿物分离采用常规方法,即将样品碎至300 μm ,经磁法和密度分选后淘洗、挑选出300粒锆石用环氧树脂固定于样品靶上,对样品进行抛光,然后进行反射光和透射光照相,锆石制靶和阴极发光照相在北京锆年领航科技有限公司进行。

3.3 测试方法

3.3.1 锆石U-Pb定年

锆石U-Pb定年在国土资源部天津地质矿产研究所完成。仪器为Neptune多接收电感耦合等离子质谱仪和193nm激光取样系统(LA-MC-ICP-MS)联机。实验过程中利用193 nmFX激光器对锆石进行剥蚀,激光束斑35 μm ,激光剥蚀物质以He为载气送入Neptune,利用动态变焦扩大色散使质量数相差很大的U-Pb同位素可以同时接收,从而进行U-Pb同位素测定,锆石标样采用TEMORA标准锆石。

3.3.2 岩石主量、微量和稀土元素分析

岩石主量、微量和稀土元素测试工作均在国土资源部沈阳地质矿产研究所进行,主量元素采用玻璃熔片大型X射线荧光光谱(XRF)分析,测试温度为24 $^{\circ}\text{C}$,湿度为45%,检测依据参照GB/T14506.28-93;微量元素和稀土元素采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)测定,测试温度为测试温度为25 $^{\circ}\text{C}$,湿度为65%,检测依据参照DZ/T0223-2001。

3.3.3 锆石Lu-Hf同位素分析

锆石完成U-Pb定年后,在原位用LA-MS-

ICP-MS进行Lu-Hf同位素测定,测试工作在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室进行,实验过程中采用He作为剥蚀物质载体,剥蚀直径为55 μm ,测定时使用锆石国际标样MT作为参考物质,分析点与锆石U-Pb定年分析点相同。分析过程中锆石标准MT的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为0.282008 \pm 0.000025(2 δ , $n=26$)。

4 测试结果

4.1 LA-MS-ICP-MS U-Pb 锆石定年结果

东北沟赋矿围岩黑云母二长花岗岩的锆石U-Pb定年结果见表1,阴极发光CL图像显示(图4),锆石晶型较好,主要呈长柱状,长宽比值较大,长轴长介于50~120 μm ,短轴宽40~50 μm ,均具有典型的环带结构,为典型的岩浆锆石^[9-11]。少数具有明显的核幔结构。本次选择23颗环带清楚的代表性锆石用于U-Pb年龄测试,23个分析点均位于U-Pb协和线或附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(129.4 \pm 0.3) Ma(MSWD=0.83)(图5),代表岩浆结晶年龄。

4.2 主量元素地球化学特征

黑云母二长花岗岩全分析结果见表2,其中SiO₂含量为62.21%~83.21%;Na₂O和K₂O分别介于0.33%~2.19%和4.79%~10.04%;K₂O/Na₂O=3.35~20.27;全碱含量介于5.82%~12.23%;铝饱和指数A/CNK=0.99~1.27。在SiO₂-(Na₂O+K₂O)图解中岩石样品除一点落入正长岩区,其余点均落入花岗岩区域(图6-a)。在SiO₂-K₂O图解中岩石样品均落入钾玄岩系列区域(图6-b)。

4.3 稀土元素和微量元素特征

黑云母二长花岗岩稀土总量 $\Sigma\text{REE}=35.45\times 10^{-6}$ ~159.41 $\times 10^{-6}$,平均为110.72 $\times 10^{-6}$,在稀土配分模式图上曲线近一致(图7-a)。呈现明显右倾,富集LREE,亏损HREE,轻重稀土元素分馏明显。 δEu 值为0.63~1.07,大体呈现具有负异常,指示岩浆演化过程中有少量斜长石结晶分异或源区有斜长石残留。

岩石原始地幔标准化微量元素蛛网图显示(图7-b),微量元素的配分模式近似一致。相对于原始地幔,微量元素表现出了富集大离子亲石元素(如K、Rb、Pb)和活泼的不相容元素(如Th、U)的特征,相对亏损高场强元素(如Nb、Ta、P、Ti)。

表1 东北沟钼矿二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of the monzonitic granite in the Dongbeigou molybdenum deposit

测点号	含量/ 10^{-6}		同位素比值				表面年龄/Ma						
	Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	1σ	1σ		
DBG-1	26	1108	0.0202	0.0002	0.1387	0.0033	0.0499	0.0011	129	132	3	189	53
DBG-2	7	287	0.0203	0.0002	0.1365	0.0066	0.0487	0.0023	130	130	6	132	112
DBG-3	6	278	0.0203	0.0002	0.1375	0.0076	0.0492	0.0027	129	131	7	156	129
DBG-4	7	297	0.0202	0.0002	0.1379	0.0055	0.0494	0.0019	129	131	5	167	90
DBG-5	3	145	0.0201	0.0005	0.1379	0.0310	0.0497	0.0113	128	131	29	183	528
DBG-6	4	194	0.0204	0.0002	0.1369	0.0081	0.0488	0.0029	130	130	8	136	138
DBG-7	5	227	0.0202	0.0002	0.1372	0.0117	0.0492	0.0042	129	131	11	158	198
DBG-8	4	184	0.0204	0.0004	0.1392	0.0244	0.0495	0.0086	130	132	23	172	408
DBG-9	3	158	0.0202	0.0003	0.1370	0.0386	0.0491	0.0142	129	130	37	152	677
DBG-10	5	225	0.0203	0.0002	0.1373	0.0133	0.0492	0.0047	129	131	13	155	225
DBG-11	5	213	0.0204	0.0002	0.1376	0.0109	0.0489	0.0038	130	131	10	142	183
DBG-12	13	543	0.0205	0.0002	0.1382	0.0045	0.0489	0.0015	131	131	4	143	74
DBG-13	5	221	0.0201	0.0003	0.1376	0.0274	0.0495	0.0098	129	131	26	173	461
DBG-14	5	202	0.0204	0.0003	0.1416	0.0390	0.0504	0.0141	130	134	37	214	647
DBG-15	4	168	0.0202	0.0002	0.1358	0.0099	0.0487	0.0035	129	129	9	133	169
DBG-16	9	372	0.0202	0.0002	0.1362	0.0048	0.0489	0.0017	129	130	5	145	79
DBG-17	6	260	0.0202	0.0002	0.1374	0.0067	0.0493	0.0024	129	131	6	160	113
DBG-18	8	358	0.0203	0.0002	0.1373	0.0051	0.0491	0.0018	129	131	5	152	85
DBG-19	5	207	0.0204	0.0002	0.1376	0.0106	0.0490	0.0037	130	131	10	148	179
DBG-20	4	174	0.0201	0.0002	0.1374	0.0111	0.0496	0.0040	128	131	11	175	187
DBG-21	6	248	0.0204	0.0002	0.1366	0.0081	0.0487	0.0029	130	130	8	133	138
DBG-22	5	201	0.0202	0.0002	0.1359	0.0214	0.0489	0.0076	129	129	20	141	367
DBG-23	4	178	0.0201	0.0002	0.1379	0.0134	0.0498	0.0049	128	131	13	184	230

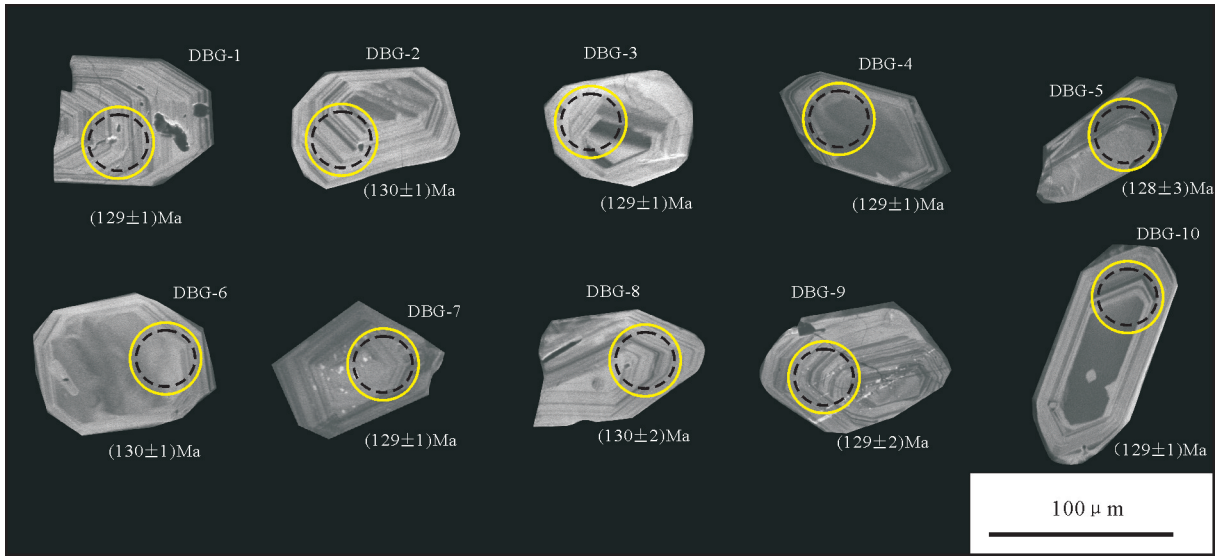


图4 东北沟钼矿二长花岗锆石阴极发光图像

(图中虚线圈代表Hf同位素测试点;实线圈代表锆石U-Pb测试点)

Fig. 4 Zircon CL images of monzonitic granite in the Dongbeigou molybdenum deposit (the broken circle and real coil stand for the test point of zircon Hf and U-Pb, respectively)

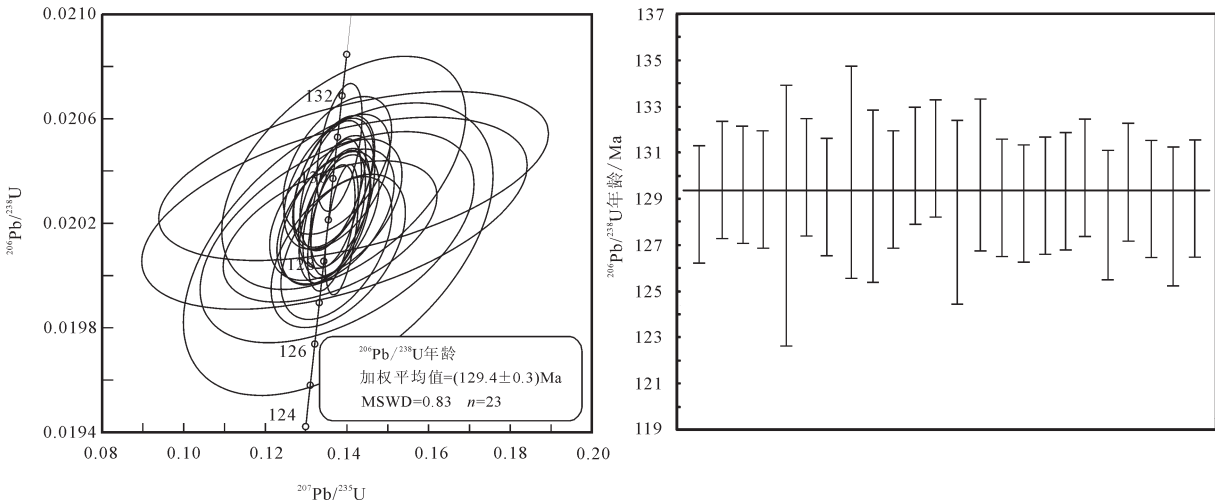


图5 东北沟钼矿二长花岗LA-MC-ICP-MS 锆石U-Pb年龄谱和图和加权平均年龄图谱

Fig. 5 Zircon U-Pb age concordia diagram and weighted average age of the monzonitic granite in the Dongbeigou molybdenum deposit

4.4 锆石 Hf 同位素特征

本次通过 LA-MS-ICP-MS 进行 Lu-Hf 同位素测定,测定结果见表3,所选测试点均在已经做过定年的锆石颗粒之上(图4)。对黑云母二长花岗岩 16 颗锆石进行了 Hf 同位素原位分析, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值变化范围为 0.282344~0.282457, 计算 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围

-12.4~-8.5, t_{DM2} 值变化范围为 1403~1610 Ma。

5 讨论

5.1 岩浆源区性质

在地球化学研究中,东北沟钼矿二长花岗岩属于钾玄岩系列, Al_2O_3 介于 8.14%~15.72%, $\text{Mg}^\#$ 值除

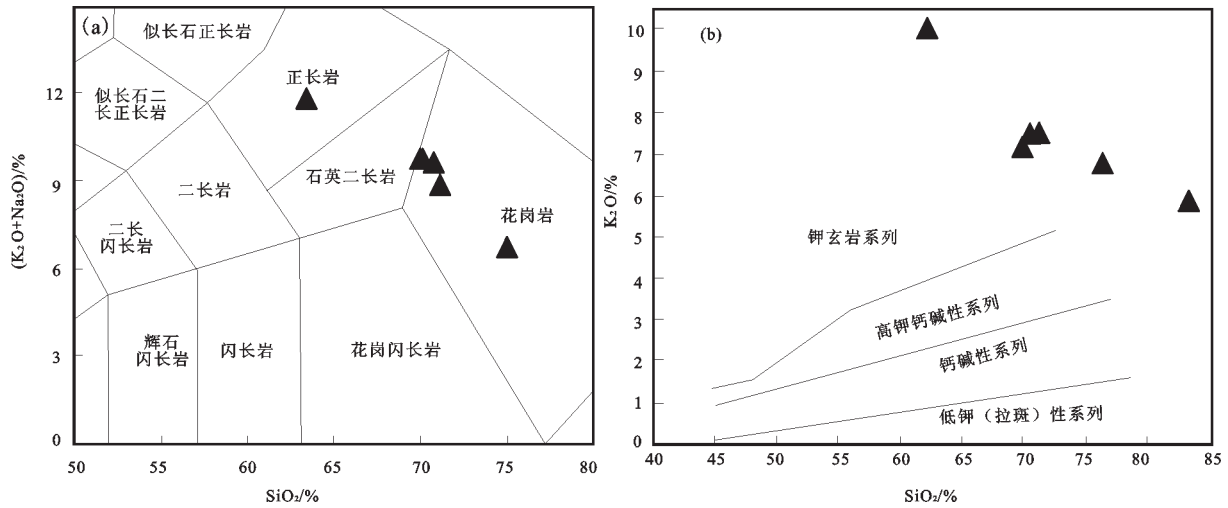


图6 东北沟钼矿二长花岗岩的SiO₂-(K₂O+Na₂O)图解(a)与SiO₂-K₂O图解(b)
(a 据文献[12], b 据文献[13])

Fig. 6 SiO₂-(K₂O+Na₂O and SiO₂-K₂O diagram of the monzonitic granite in the Dongbeigou molybdenum deposit (a after reference [12], b after reference [13])

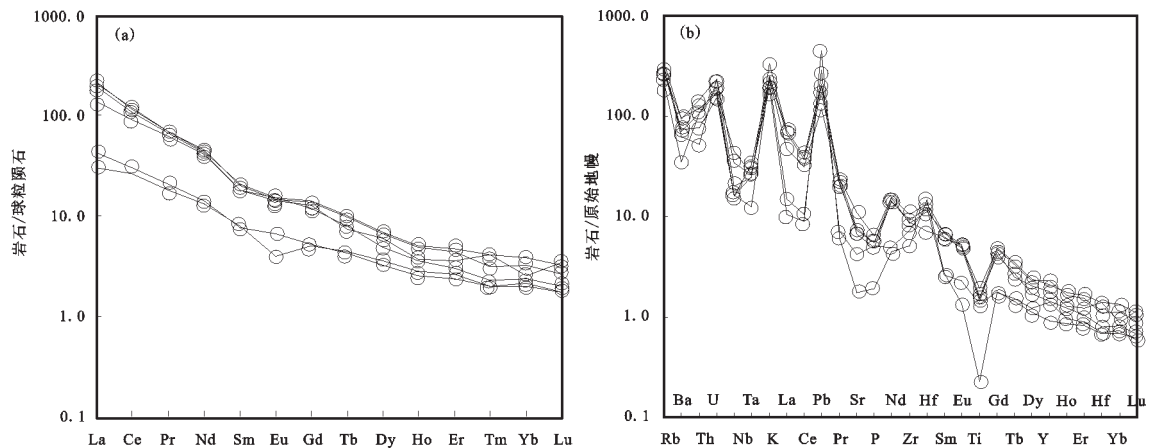


图7 东北沟钼矿二长花岗球粒陨石标准化稀土元素配分图(图a)和原始地幔标准化的微量元素蛛网图(图b)(球粒陨石标准化值[14];原始地幔标准化值据[15])

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace elements spider diagram (b) for the monzonitic granite in the Dongbeigou molybdenum deposit (normalization values after references [14-15])

一个值为8.22外,其他值均较高,介于37.94~46.27,他们表明岩石主要应来源于深部陆壳。 δEu 值0.63~1.07,中等异常^[16],暗示长石结晶分异不明显,岩石富集轻稀土元素,亏损重稀土元素,Nb和Ta等高场强元素明显亏损显示岩浆源区可能残留石榴子石。

研究表明,除Sr-Nd同位素对岩浆源区性质的探讨具有制约作用之外,锆石Hf同位素也能提供很

好的信息^[17-18],Amelin et al.^[19]认为岩浆来源于新生地壳的花岗岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$,接近于当时地幔值,而来源于古老的地壳重熔形成的花岗岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) < 0$ 。本次研究的东北沟钼矿二长花岗岩¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值介于0.282344~0.282457,且变化较小,表明锆石Hf同位素组成单一,指示岩浆源区单一。样品中岩浆锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-12.4~-8.5(均 < 0),平均值为-9.64,在 $t-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解中,样品均分布在亏损地幔演化线之

表2 东北沟钼矿二长花岗主量元素(%)、稀土元素和微量元素(10^{-6})组成

Table 2 Major elements (%), REE and trace elements (10^{-6}) composition of monzonitic granite in the Dongbeigou molybdenum deposit

样品号	DBG-8	DBG-9	DBG-10	DBG-11	DBG-12	DBG-13
Na ₂ O	1.26	0.33	2.19	2.12	1.03	1.67
MgO	0.90	0.59	1.46	1.29	0.05	1.14
Al ₂ O ₃	12.52	11.01	15.72	13.43	8.14	12.43
SiO ₂	70.97	76.29	62.21	69.83	83.21	70.34
P ₂ O ₅	0.11	0.11	0.14	0.12	0.04	0.12
K ₂ O	7.41	6.69	10.04	7.10	4.79	7.47
CaO	0.64	0.67	0.77	0.42	0.04	0.82
TiO ₂	0.31	0.29	0.41	0.34	0.05	0.33
MnO	0.04	0.02	0.05	0.04	0.01	0.05
Fe ₂ O ₃ ^T	3.44	1.71	5.53	3.49	1.38	3.39
LOI	2.00	1.95	1.13	1.49	1.01	1.92
Total	99.60	99.66	99.66	99.66	99.76	99.65
Mg [#]	37.94	44.70	38.03	46.27	8.22	43.88
Rb	195.01	199.74	216.87	169.80	138.62	177.20
Sr	139.99	89.01	230.65	154.63	37.03	161.08
Ba	510.20	432.71	654.84	672.67	242.19	490.16
Zr	98.51	81.86	117.61	102.22	56.87	95.82
Nb	11.44	24.38	14.32	11.64	31.76	11.51
Hf	2.22	3.78	4.11	3.80	4.50	3.43
Ta	1.01	1.06	1.01	0.52	1.10	1.34
Th	6.55	4.45	12.47	10.06	9.16	9.16
U	3.23	4.92	4.87	3.55	3.58	4.07
Ga	17.10	15.79	23.15	16.69	11.19	17.64
Pb	12.12	20.21	14.98	8.54	31.59	13.83
Y	8.12	4.20	10.45	6.57	6.40	9.60
La	46.07	10.18	49.61	32.14	7.23	49.65
Ce	66.20	18.43	71.44	55.62	15.89	70.91
Pr	6.20	1.98	6.61	5.80	1.68	6.59
Nd	19.57	6.59	21.36	19.05	6.07	20.77
Sm	2.77	1.16	3.00	2.74	1.20	3.11
Eu	0.82	0.39	0.84	0.88	0.23	0.87
Gd	2.66	1.07	2.82	2.43	1.04	2.93
Tb	0.27	0.16	0.36	0.30	0.16	0.37
Dy	1.50	0.83	1.67	1.25	0.90	1.74
Ho	0.21	0.14	0.27	0.20	0.16	0.29
Er	0.58	0.39	0.73	0.51	0.43	0.78
Tm	0.10	0.05	0.08	0.06	0.05	0.10
Yb	0.43	0.33	0.55	0.40	0.36	0.65
Lu	0.09	0.04	0.07	0.05	0.04	0.08
∑REE	147.47	41.73	159.41	121.42	35.45	158.85
LREE	141.62	38.72	152.87	116.22	32.31	151.90
HREE	5.85	3.01	6.55	5.20	3.15	6.95
LREE/HREE	24.21	12.85	23.36	22.35	10.26	21.86
(La/Yb) _N	76.32	21.89	64.16	57.06	14.44	54.60
δ Eu	0.92	1.07	0.88	1.04	0.63	0.89

下,在1.8 Ga地壳演化线附近(图8)。样品的二阶段模式年龄(t_{DM2})(1403~1610 Ma)均大于单阶段模式年龄(t_{DM2})(1106~1289 Ma)。上述特征表明,东北沟钼矿二长花岗岩的岩浆源区可能来源于中元古界古老地壳的再熔融。

5.2 成岩、成矿时代

成岩、成矿时代的确定是研究矿床成因和总结区域成矿规律的关键因素之一。本次研究获得东北沟钼矿赋矿岩石LA-ICP-MS 锆石U-Pb年龄为(129.4±0.3) Ma,这一结果与本人获得东北沟钼矿辉钼矿Re-Os等时线年龄为(128.10±5.10) Ma具有较好的一致性(作者待发表数据),说明东北沟钼矿成岩成矿作用均发生在早白垩世。

迄今为止,东北地区钼矿成岩、成矿年龄积累了海量数据,陈衍景等^[20],孙景贵等^[21]对这些数据进行了收集整理,本次在此基础上绘制东北地区主要钼矿床成矿年龄直方图(图9),得出东北地区主要钼矿成矿作用时间除多宝山(506±14) Ma、铜山(490±14) Ma矿床之外,几乎所用矿床成矿时代集中于中生代,同时由成矿年龄直方图可以看出,东北地区主要钼矿在中生代期间可以细分三叠纪(257~210 Ma)、早侏罗世(188~161 Ma)和晚侏罗世—早白垩世(146~111 Ma)。这与Zeng et al.^[122]认为兴蒙造山带东缘钼矿成矿时代存在3个高峰期即:早三叠世、侏罗世和早白垩世相一致,又与陈衍景等^[20]对东北地区钼矿成矿时代的认识相一致,因此东北沟钼矿成矿作用发生在早白垩世,隶属于东北地区主要钼矿3大成矿期的高峰期第3成矿期,该矿床成矿时代的确定也为该3大成矿期的划分提供佐证。

5.3 成矿动力学背景探讨

毛景文等^[23-24]认为中国东北地区中生代大规模成矿作用的地球动力学背景分别为后碰撞造山作用(200~160 Ma)、构造体制大转折(140 Ma左右)和岩石圈大规模快速减薄(约120 Ma)。陈衍景等^[20]认为东北地区显示了早侏罗世(190~160 Ma)和晚侏罗世—早白垩世(140~110 Ma)两期强烈的岩浆—成矿事件,成岩、成矿构造背景与古太平洋板块开始俯冲和俯冲高峰相对应,同时也与蒙古—鄂霍茨

表3 东北沟钼矿二长花岗锆石 Hf同位素分析结果

Table 3 LA-ICP-MS zircon Hf data of the monzonitic granite in the Dongbeigou molybdenum deposit

测点	t/Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	2σ	t _{DM1}	t _{DM2}	f _{Lu/Hf}
DBG-1	129	0.015164	0.000098	0.000562	0.000005	0.282391	0.000020	-13.5	-10.7	0.7	1202	1523	-0.98
DBG-2	130	0.015717	0.000206	0.000602	0.000008	0.282426	0.000018	-12.2	-9.4	0.6	1155	1459	-0.98
DBG-3	129	0.025656	0.000501	0.000955	0.000017	0.282421	0.000022	-12.4	-9.7	0.8	1174	1472	-0.97
DBG-4	129	0.020974	0.000122	0.000826	0.000004	0.282405	0.000020	-13.0	-10.2	0.7	1191	1499	-0.98
DBG-5	128	0.021072	0.000204	0.000806	0.000007	0.282437	0.000020	-11.8	-9.1	0.7	1146	1442	-0.98
DBG-6	130	0.012468	0.000115	0.000486	0.000006	0.282414	0.000021	-12.7	-9.9	0.7	1168	1481	-0.99
DBG-7	129	0.010622	0.000096	0.000417	0.000004	0.282457	0.000019	-11.1	-8.3	0.7	1106	1403	-0.99
DBG-8	130	0.015842	0.000138	0.000620	0.000005	0.282436	0.000023	-11.9	-9.1	0.8	1142	1442	-0.98
DBG-9	129	0.016723	0.000098	0.000617	0.000005	0.282413	0.000021	-12.7	-9.9	0.7	1174	1484	-0.98
DBG-10	129	0.034594	0.000436	0.001198	0.000014	0.282344	0.000022	-15.1	-12.4	0.8	1289	1610	-0.96
DBG-11	130	0.016836	0.000072	0.000676	0.000003	0.282453	0.000026	-11.3	-8.5	0.9	1120	1412	-0.98
DBG-12	131	0.016484	0.000215	0.000540	0.000007	0.282395	0.000022	-13.3	-10.5	0.8	1197	1516	-0.98
DBG-13	129	0.018756	0.000224	0.000733	0.000008	0.282429	0.000022	-12.1	-9.4	0.8	1155	1455	-0.98
DBG-14	130	0.014436	0.000181	0.000567	0.000008	0.282439	0.000023	-11.77	-9.0	0.8	1136	1436	-0.98
DBG-15	129	0.015259	0.000286	0.000603	0.000012	0.282452	0.000019	-11.3	-8.5	0.7	1119	1414	-0.98
DBG-16	129	0.019380	0.000216	0.000743	0.000008	0.282419	0.000018	-12.5	-9.7	0.7	1168	1473	-0.98

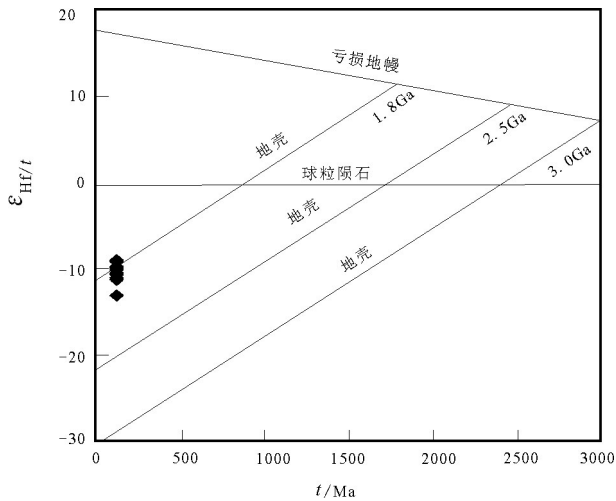


图8 东北沟钼矿二长花岗 t(Ma)-ε_{Hf}(t)图解
Fig. 8 Diagrams of t(Ma)-ε_{Hf}(t) for monzonitic granite in the Dongbeigou molybdenum deposit

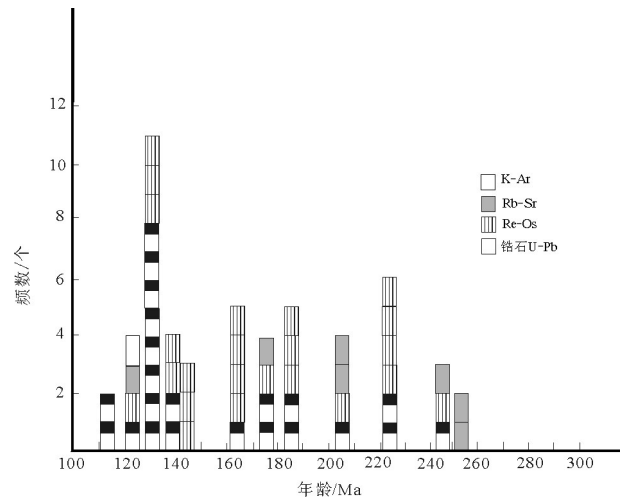


图9 东北地区主要钼矿床成矿年龄直方图
Fig. 9 Isotopic age distribution histogram of major Mo deposits in Northeast China

克洋板块的俯冲、消减、闭合事件相对应,还与中亚造山带东段自身的演化规律相一致,认为东北地区燕山期成矿事件是多个板块联合作用的结果。研究表明,东北地区在早侏罗世已经受到古太平洋板块向西俯

冲的影响^[25],大量的年代学和火成岩同位素地球化学显示在早—中侏罗世东北地区已经处于环太平洋构造体系背景^[26]。Wu et al.^[25]和 Yu et al.^[27]通过对小兴安岭—张广才岭早侏罗世花岗质和镁铁质岩研究

同样证实该地区在中生代期间同样处于太平洋板块向西俯冲的构造背景中。吴福元等^[28]将辽东半岛中生带花岗岩划分侏罗纪(180~156 Ma)和早白垩世(131~117 Ma)两个阶段,认为早白垩世花岗岩形成的热源与岩石圈减薄导致的软流圈上涌有关。侏罗纪的俯冲作用是华北东部岩石圈受到流体的强烈改造失去高应变性质,从而使早白垩世发生岩石圈拆沉,且这一岩石圈减薄发生在中国东部并与太平洋板块俯冲作用有关。Zhang et al.^[29]通过对同构造背景的吉林东部斑岩、矽卡岩型铜矿划分为5个成矿期,认为白垩世是最主要的成矿期,大部分铜矿在该期形成,其成岩、成矿与早白垩世岩石圈减薄密切相关。

本次获得的早白垩世二长花岗岩成岩时代及地球化学特征,结合前人的研究,我们认为该地区在早白垩世处于古太平洋板块向欧亚大陆俯冲,强烈的俯冲引起岩石圈应变性改变,使得区内NW向与NE向断裂交汇部位等构造薄弱地位成为热源、物源流体的通道和赋矿空间,即在早白垩世古太平洋板块向欧亚之下俯冲,岩石圈减薄的背景下形成东北沟钼矿。

6 结 论

(1)东北沟钼矿床赋矿围岩二长花岗岩的LA-ICP-MS 锆石年龄为(129.4±0.3) Ma,结合辉钼矿Re-Os等时线年龄(作者另文发表),确定东北沟钼矿成岩成矿时代为早白垩世,二者均为燕山期构造-岩浆-成矿作用的产物。

(2)主、微量元素研究表明,二长花岗岩为富硅($\text{SiO}_2=62.21\% \sim 83.21\%$)、高钾($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=3.35 \sim 20.27$)和富碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=5.82\% \sim 12.23\%$)的特点,属于钾玄岩系列。岩石富集轻稀土元素(LREE/HREE=10.26~24.21),亏损重稀土元素,具有弱负铕异常($\delta\text{Eu}=0.63 \sim 1.07$),富集大离子亲石元素(如K、Rb、Pb)和不相容元素(如Th、U)的特征,相对亏损高场强元素(如Nb、Ta、P、Ti)。

(3)锆石Hf同位素分析结果表明,东北沟钼矿二长花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为介于-12.4~-8.5,二阶段模式年龄(t_{DM_2})介于1403~1610 Ma,反映岩浆源区可能来源于中元古界古老地壳的再熔融。

(4)结合区域构造演化及本次研究成果,认为

东北沟钼矿成岩成矿构造背景为早白垩世古太平洋板块向欧亚之下俯冲,岩石圈减薄的构造环境。

致谢:天津地质矿产研究所耿剑珍在锆石U-Pb定年提供帮助,南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室卞霄鹏在锆石Hf同位素提供帮助,在此表示感谢!

参考文献(References):

- [1] Sillitoe R H, Hedenquist J W. Linkage between volcanotectonic setting, ore fluid compositions and epithermal precious metal deposits[J]. Soc. Econ. Geol. Spec. Publ, 2003, 10: 315-343.
- [2] 杨群,任云生,鞠楠,等. 延边天宝山矿集区新兴铅锌(银)矿床成矿岩体的年代学与地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 2015, 34(3): 295-308.
Yang Qun, Ren Yunsheng, Ju Nan, et al. Geochronology and geochemistry of the metallogenic intrusion in the Xinxing lead-zinc(silver) deposit in the Tiaobaoshan ore concentration area, Yanbian Prefecture[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2015, 34(3): 295-308(in Chinese with English abstract).
- [3] Sillitoe R H, Bonham Jr H F. Sediment-hosted gold deposits: Distal product of magmatic-hydrothermal systems[J]. Geology, 1990, 18: 157-161.
- [4] Pirajno F. Volcanic-hosted epithermal systems in northwest Turkey[J]. S. Afr. J. Geol., 1995, 98(1): 13-24.
- [5] 张会琼,王京彬,王玉柱. 山西灵丘支家地铅锌银矿床隐爆角砾岩筒的分带性研究及其勘查意义[J]. 地质论评, 2012, 58(6): 1046-1055.
Zhang Huiqiong, Wang Jingbin, Wang Yuzhu. A study on Lithofacies Zonation of Cryto-explosive Breccia Pipe in Zhijiadi Pb-Zn-Ag deposit, Lingqiu Country, Northeastern Shanxi Province, and its exploration significance[J]. Geological Review, 2012, 58(6): 1046-1055(in Chinese with English abstract).
- [6] 胡铁军,宋建潮,王恩德,等. 辽宁宽甸万宝源钼矿床地质特征及成因机制研究[J]. 矿产与地质, 2009, 23(2): 142-146.
Hu Tiejun, Song Jianchao, Wang Ende, et al. Geological characteristics and metallogenic mechanism of the Wanbaoyuan Mo deposit in Kuandian of Liaoning[J]. Mineral resources and geology, 2009, 23(2): 142-146(in Chinese with English abstract).
- [7] 宋建潮,胡铁军,王恩德,等. 辽宁宽甸万宝源钼矿地质特征集成成因机制[J]. 世界地质, 2010, 29(1): 45-50.
Song Jianchao, Hu Tiejun, Wang Ende, et al. Geological characteristics and ore-forming mechanism of Wanbaoyuan Mo deposit in Kuandian, Liaoning Province[J]. Global Geology, 2010, 29(1): 45-50(in Chinese with English abstract).
- [8] 陈荣度. 辽东裂谷的地质构造演化[J]. 中国区域地质, 1990, (4): 306-315.
Chen Rongdu. Tectonic evaluation of the Liaodong rift[J]. Regional Geology of China, 1990, (4): 306-315(in Chinese with English abstract).

- [9] Koschek G. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon[J]. *Journal of microscopy*, 1993, 171: 223–232.
- [10] 魏然, 王建国, 王义天, 等. 河北省撒岱沟门斑岩型铝矿床二长花岗岩的锆石U–Pb年龄及其意义[J]. *中国地质*, 2013, 40(6): 1736–1748.
Wei Ran, Wang Jianguo, Wang Yitian, et al. Zircon U–Pb dating of adamellite from the Sadaigoumen porphyry molybdenum deposit in Fengning, Hebei Province, and its significance[J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1736–1748(in Chinese with English abstract).
- [11] 王洪亮, 何世平, 陈隽璐, 等. 北秦岭西段胡店片麻状二长花岗岩LA–ICP–MS锆石U–Pb测年及其地质意义[J]. *中国地质*, 2007, 34(1): 17–25.
Wang Hongliang, He Shiping, Chen Junlu, et al. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating of the Hudian gneissic monzogranite in the western segment of the North Qinling and its geological significance[J]. *Geology in China*, 2007, 34(1): 17–25(in Chinese with English abstract).
- [12] Middlemost E A. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Review*, 1994, 37(3): 215–224.
- [13] Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 1989, 22(4): 247–263.
- [14] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth element: Meteorite studies[C]// Henderson P. Rareearth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 64–114.
- [15] Sun S S, McDonough W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implication for Mantle Composition and Processes. In: Saunder A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the Ocean Basins*[J]. Geological Society Special Publication, 1989, 2: 313–345.
- [16] 邹光富, 林仕良, 李再会, 等. 滇西路西邦木二长花岗岩SHRIMP锆石U–Pb年龄及其构造意义[J]. *中国地质*, 2011, 38(1): 77–85.
Zou Guangfu, Lin Shiliang, Li Zaihui, et al. SHRIMP Zircon U–Pb dating of Bangmu admellite in Luxi, western Yunnan, and its tectonic implications[J]. *Geology in China*, 2011, 38(1): 77–85(in Chinese with English abstract).
- [17] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N. Early–Middle Archean Crustal Evolution deduced from Lu–Hf and U–Pb isotope studies of single zircon grains[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(24): 4205–4225.
- [18] 刁艳, 李峰, 王蓉, 等. 滇西九顶山铜钼矿花岗岩成因: LA–ICP–MS锆石U–Pb年龄岩石地球化学和Sr–Nd–Hf同位素制约[J]. *中国地质*, 2015, 42(2): 134–148.
Dao Yan, Li feng, Wang Rong, et al. Petrogenesis of the granite porphyry related to the Jiudingshan Cu–Mo deposit in western Yunnan: Constraints from LA–ICP–MS zircon U–Pb chronology, Sr–Nd–Hf isotopes and petrogeochemistry[J]. *Geology in China*, 2015, 42(2): 134–148(in Chinese with English abstract).
- [19] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al. Nature of the earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons[J]. *Nature*, 1999, 399(6733): 252–255.
- [20] 陈衍景, 张成, 李诺, 等. 中国东北钼矿床地质[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(5): 1221–1266.
Chen Yanjing, Zhang Cheng, Li Nuo, et al. Geology of the Mo deposit in Northeast China[J]. *Journal of Jilin University(Earth science Edition)*, 2012, 42(5): 1221–1266(in Chinese with English abstract).
- [21] 孙景贵, 张勇, 邢树文, 等. 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*, 2012, 28(4): 1317–1332.
Sun Jinggui, Zhang Yong, Xing Shuwen, et al. Genetic types, ore-forming age and geodynamic setting of endogenic molybdenum deposits in the eastern edge of Xing–Meng orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(4): 1317–1332(in Chinese with English abstract).
- [22] Zeng Qingdong, Liu Jianming, Chu Saioxiong. Mesozoic molybdenum deposits in the East Xingmeng orogenic belt northeast China: characteristics and tectonic setting[J]. *International geology review*, 2012, 1: 1–27.
- [23] Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H, et al. Re–Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W(Mo)–deposit in the northern Qingling Mountains and its geological significance[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(1): 1815–1818.
- [24] 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其动力学背景[J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 169–188.
Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, et al. Mesozoic large–scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(1): 169–188(in Chinese with English abstract).
- [25] Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41: 1–31.
- [26] Xu W L, Ge W C, Pei F P, et al. Geochronology of Mesozoic Volcanic rocks from the NE China and tectonic implication[J]. *Bull Mineral Petro Geochem*, 2008, 27(suppl): 286–287.
- [27] Yu J J, Wang F, Xu W L, et al. Early Jurassic mafic magmatism in the Lesser Xing'an–Zhangguangcai Rang, NE China and its tectonic implications: constraints from zircon U–Pb chronology and geochemistry[J]. *Lithos*, 2012, 142–143, 256–266.
- [28] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1217–1238.
Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, et al. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1217–1238(in Chinese with English abstract).
- [29] Zhang Yong, Xing Shuwen, Song Quanheng et al. Re–Os and U–Pb geochronology of Porphyry and Skarn types copper deposit in Jilin Province, NE China[J]. *Resource Geology*, 2015, 65(4): 394–404.