

蒙古巴音苏赫图钨矿床正长斑岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

郭志华¹⁾, 张宝林²⁾, 党永岐³⁾, 郭勃巍¹⁾, 高磊⁴⁾, 侯金亮¹⁾, 张丽春¹⁾

- 1) 华北理工大学矿业工程学院地质系, 河北唐山, 063009;
- 2) 中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究重点实验室, 北京, 100029;
- 3) 河北省地矿局第五地质大队, 河北唐山, 063000;
- 4) 造山带与地壳演化教育部重点实验室; 北京大学地球与空间科学学院, 北京, 100871

内容提要: 正长斑岩是中蒙边界中生代重要的岩浆记录, 其花岗岩年龄和地球化学特征对于揭示该时期的构造格局与演化历史具有重要意义。本文对蒙古国东南部出露的正长斑岩进行锆石的 LA-ICP-MS 定年, 获得锆石 U-Pb 年龄为 (170.6 ± 1.7) Ma, 表明该花岗岩形成于中—晚侏罗世。花岗岩的元素地球化学研究表明: 该花岗岩属高钾钙碱性 S 型花岗岩; 花岗岩具高硅特征, 其 SiO_2 质量分数为 73.99% ~ 74.28%, Al_2O_3 为 12.36% ~ 14.30%, MgO 为 0.17% ~ 0.45%, 过铝质; 稀土元素总量为 51.92×10^{-6} ~ 58.32×10^{-6} , 稀土元素分布型式为具有明显负铈异常的“燕型”曲线; 在原始地幔标准化的微量元素蛛网图中, Rb、Th、U、K、Zr、Hf 和轻稀土元素 (如 La、Ce、Nd 和 Sm 等) 富集, Ba、Sr、P 和 Ti 等元素强烈亏损, Nb 和 Ta 具有中等—弱亏损特点; $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$ 初始比值较高 (0.512320 ~ 0.512451), 平均为 0.512404; $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -4.6 ~ -2.3, 均为负值。主量、微量元素和同位素特征表明, 该正长斑岩形成于同碰撞向后造山构造体制转换过渡的伸展大地构造环境背景之下。地壳加厚作用和地壳物质部分熔融, 很可能是形成本区花岗岩的两个最主要的动力机制。

关键词: 蒙古国; 正长斑岩; 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学; 构造意义

研究区位于西伯利亚板块与华北板块之间的蒙古—兴安造山带, 中亚—蒙古巨型构造带的东段。中亚造山带的构造演化, 经历了由板块俯冲到碰撞拼合, 再到后造山构造塌陷和拉张等若干阶段, 其岩浆活动相应地由俯冲型到碰撞型, 最后变为拉张型。因此, 正确识别不同造山过程的岩石记录, 了解其形成机理及其产出的地球动力学背景, 对于认识大陆造山带特征、再造山过程具有十分重要的意义。南蒙古的地质特征和东南戈壁区的特殊性质记录了古亚洲洋北部边缘从奥陶纪到白垩纪的演化过程, 伴随着岛弧增长、弧后断裂和构造演化的一系列阶段 (Badarch et al., 2002; Windley et al., 2007)。中蒙边境地区蒙古国一侧铜、锌、金和钼矿产资源分布广泛, 是实施我国“两种资源, 两个市场”全球矿产资源战略的最佳选区。自 21 世纪初, 加拿大艾文豪矿业公司在中蒙边境蒙古一侧 80 km 处发现欧玉陶勒盖巨型铜—金矿床以来, 中蒙边境地区铜多金属矿

床的成矿理论研究和找矿勘查工作就一直是人们关注的“热点”问题 (Perello et al., 2001)。但是兴蒙造山带东段找矿进展缓慢, 而中西段却大矿聚集, 原因是东段基础地质研究薄弱, 很多重要地质问题认识不清, 制约了找矿工作的战略部署。迄今为止, 在东南戈壁成矿带内还没有报道最基础的地质演化和原始岩浆的年龄数据 (Yarmoyuk et al., 2008)。

大量岩浆侵入体的存在是一系列构造带内大陆增生的重要特征。蒙古国境内广泛发育的中生代花岗岩的主导作用是不容忽视的 (Jahn et al., 2001)。兴蒙造山带东段以广泛发育显生宙花岗岩为其主要特征。近年来, 高精度锆石 U-Pb 年代学资料表明 (秦克章等, 1999), 东北地区显生宙花岗岩以中生代为主, 并初步确定了其年代学格架, 这深化了人们对东北地区中生代花岗岩及构造演化的认识, 但目前对该构造带蒙古境内的花岗岩尚缺乏系统的研究。

注: 本文为“十一五”科技支撑计划重大项目 (编号: 2006BAB01A02); 校级博士科研启动基金项目 (编号: 20164043) 的成果。

收稿日期: 2016-11-03; 改回日期: 2017-06-23; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.05.017

作者简介: 郭志华, 女, 1983 年生。副教授。主要从事隐伏矿床定位预测等方面研究。Email: huazifighting@163.com。

近年来,笔者在蒙古国东南部苏赫巴托尔省额尔德尼查干地区开展地质调查工作时,对发育于该地区的花岗岩类进行了较为系统的岩石学、地球化学、同位素年代学等研究,获得了大量资料。笔者主要通过对该区正长斑岩特征的研究,为认识本区中生代大地构造演化历史提供新的证据。

1 研究区地质概况与样品采集

研究区位于位于华北板块与西伯利亚板块之间的中亚古生代造山带之东段,查干敖包—五叉沟深大断裂北侧,得尔布干断裂南侧,属于西伯利亚板块东南缘伊尔施古生代构造—岩浆岩带与大兴安岭中生代构造—岩浆岩带南段相叠加的部位(图1)(Badarch et al., 2002; Ren et al., 1999; Zeng Qingdong et al., 2011; 林强等, 2003; 聂凤军等, 2007; 张德全, 1993; 周建波等, 2009)。该区范围内古生代—沉积岩分布广泛,深大断裂带(层)纵横交错,各类侵入岩十分发育和金属矿床(点)数量众多,为中亚巨型造山带和金属成矿带的重要组成部分(图1)。

巴音苏赫图钨矿区内出露地层主要有志留系、泥盆系、石炭系、白垩系、第四系。矿区断裂比较发育,主要有 NNE 断层、NW 向断层、EW 向断层。区内所发现的石英脉走向也有所体现,它们主要呈北东向、近南—北向和近东—西向分布。矿区内岩浆活动强烈,出露有黑云母花岗岩、斜长花岗岩、二长花岗岩、石英斑岩、正长斑岩和花岗闪长岩等侵入岩、火山岩和脉岩等(图2)。

2 野外地质产状及岩相学特征

正长斑岩是研究区内最晚形成的岩浆岩,出露面积约为 0.3 km²(图2)。侵入砂岩地层中,在正长斑岩周围分布硅质蚀变砂岩,局部有砂岩残留体。岩石呈肉红色,似斑状结构,块状构造,斑晶主要是肉红色正长石,基质为细粒红色正长石和少量的深色矿物,多已绿色蚀变。该岩石在不同部位蚀变程度有所不同,颜色上也有所不同,有浅绿色、绿色、浅褐色等。在岩石中常常能看到四周具浅色蚀变而中间仍然保留原肉红色正长斑岩的特征。

镜下观察该岩体的矿物均为隐晶质斑状结构,斑晶为正长石,折光率低于树胶,有微细格子状双晶,负光性,光轴角小,有时为放射状集合体构成,干涉色极低。黑云母有时也呈斑晶,多色性极强。基质中长石主要是钠长石及更长石,有聚片双晶,有放

射状的球粒构造,斜长石空隙处填充有黑云母、褐铁矿及绿泥石等形成的间隐结构;角闪石呈绿色柱状分散在基质中,绿帘石突起甚高,量很少(图3)。

3 测试方法

3.1 锆石 U-Pb 年龄

花岗岩的锆石分选在河北省区域地质矿产调查研究所完成。将大约 5 kg 的样品(Z01)破碎到 60~80 目,经过常规浮选和磁选后,在双目显微镜下进行挑纯。将挑纯的锆石颗粒粘在双面胶上,然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后抛磨至粒径的大约 1/2,使锆石内部充分暴露,进行锆石显微照相(反射光、透射光和 CL 图像)。锆石的阴极发光(CL)图像在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室扫描电镜上完成。根据 CL 图像的形态判断,所挑选出的锆石均为典型的岩浆锆石(图4),锆石普遍呈短柱状或板状,长宽比多数为 2:1~4:1,发育震荡环带。锆石 U—Th—Pb 年龄分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成,分析仪器为美国 NewWave Research Inc. 公司生产的激光剥蚀进样系统(UP193SS)和美国 AGILENT 科技有限公司生产的 Agilent 7500 a 型四级杆等离子体质谱仪联合构成的激光等离子质谱仪(LA-ICP-MS)。激光等离子质谱仪分析的工作原理见袁洪林等(2003)。本次分析激光器工作频率为 10 Hz,剥蚀物质载气为高纯度 He 气,流量为 0.5 L/min; Angilent 等离子质谱仪工作条件为:冷却器流量 15 L/min,辅助气(Ar)流量 1.2 L/min,采集时间 20 ms。元素含量校准标样为 NIST612,锆石 U/Pb 值及年龄校准用标准锆石 91500;数据处理用 Glitter4.4。单个数据点误差均为 1 σ ,加权平均值误差为 2 σ 。

3.2 岩石地球化学

对肉眼观察新鲜、镜下观察无蚀变正长斑岩的 3 件样品磨碎至 200 目后,进行了主量、微量和稀土元素的分析测试。主量、微量和稀土元素在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室完成。主量元素使用 X-射线荧光光谱仪(XRF-1500)测试完成,分析误差优于 5%。微量元素及稀土元素利用酸溶法制备样品,使用 ICP-MS(Element II)上测试完成,分析精度为:当元素质量分数大于 10 $\times 10^{-6}$ 时,精度优于 5%;当质量分数小于 10 $\times 10^{-6}$ 时,精度优于 10%。

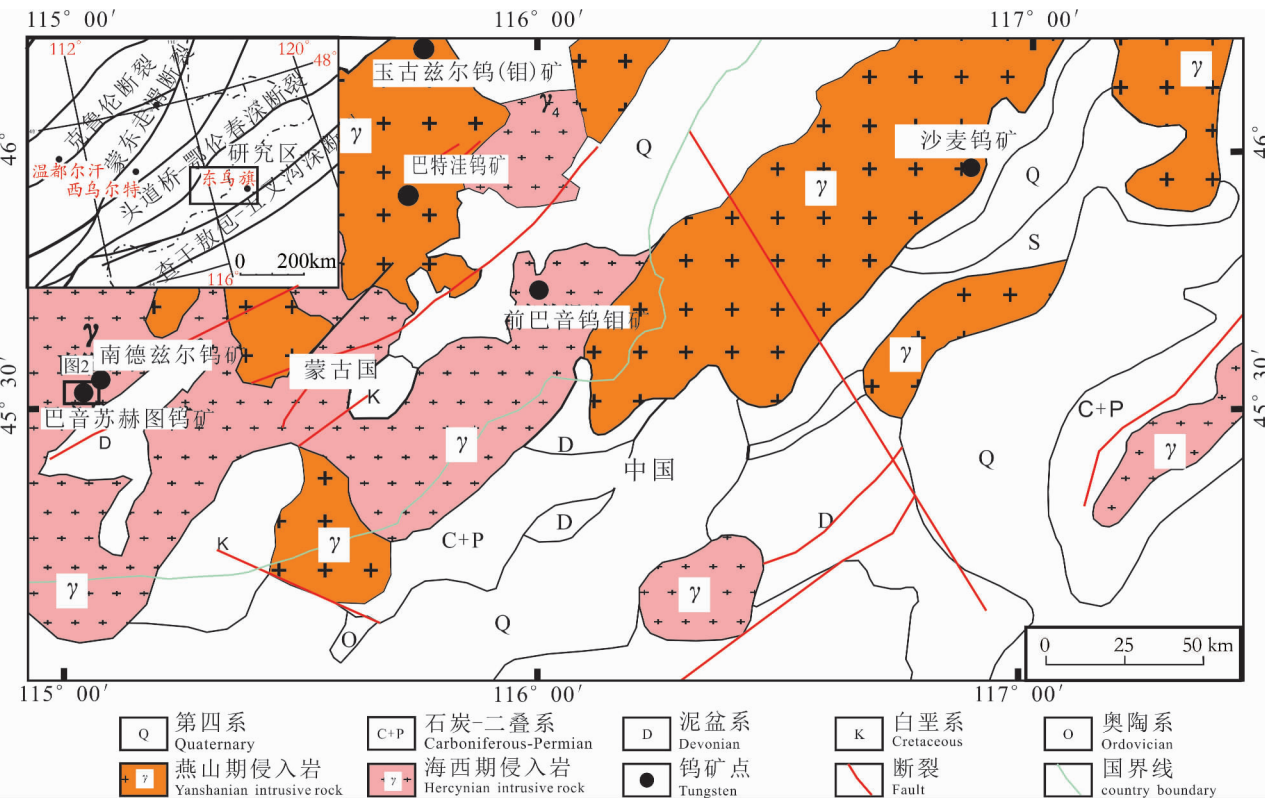


图 1 中蒙边境钨—钼矿化集中区区域地质简图(根据聂凤军等, 2007, 资料改编)

Fig. 1 Simplified regional geological map of the W—Mo mineralized district along the Sino-Mongolian border (modified from Nie Fengjun et al. , 2007&)

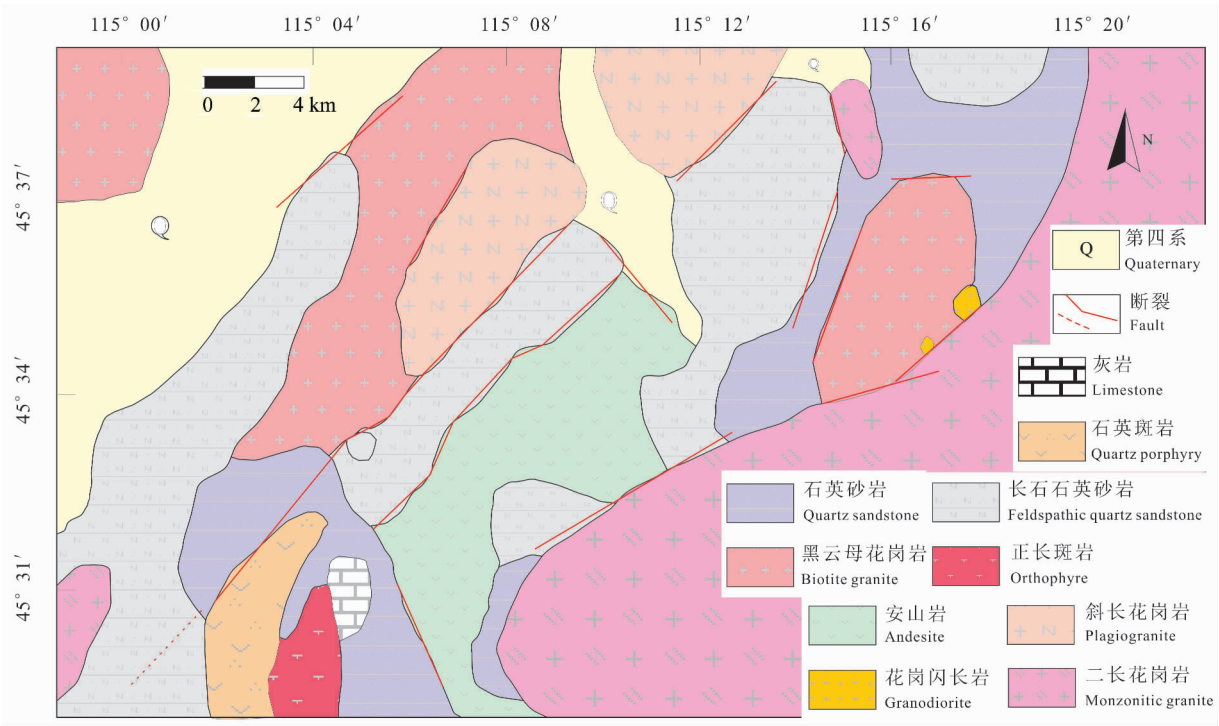


图 2 蒙古巴音苏赫图地区地质简图

Fig. 2 The photograph of the geological sketch in Bayinsukhtu ore district, Mongolia

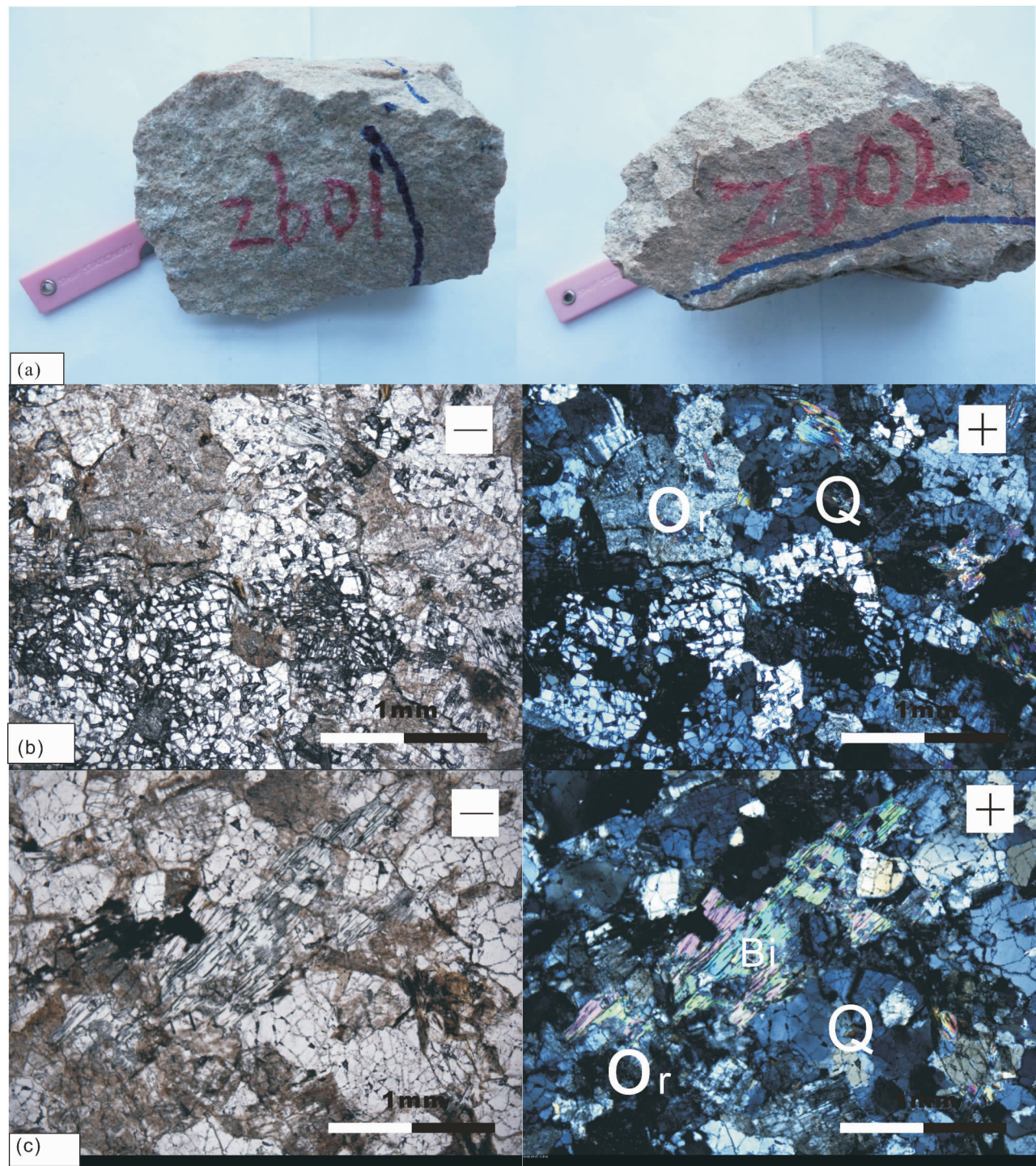


图 3 蒙古巴音苏赫图钨矿床正长斑岩的野外露头 and 镜下特征

Fig. 3 The field outcrops and the histological features of the syenite porphyry in Bayinsukhtu ore district, Mongolia

(a) 花岗岩的手标本; (b) 黑云母发生蚀变; (c) 聚片双晶, 斜长石发生绢云母化和绿泥石化。图中“-”、“+”分别表示显微照片为单偏光和正交偏光。Or—正长石; Bi—黑云母; Q—石英

(a) Granite hand specimens; (b) Alterationed biotite; (c) polysynthetic twin, sericitization and chloritization in plagioclase. The “-”, “+” in fig. s indicate the microphotos are in polarized Light and crossed polarized light. Or—Orthoclase; Bi—Biotite; Q—Quartz

3.3 岩石 Sr—Nd 同位素

本次工作选取 3 件新鲜样品进行 Sr—Nd 同位

素分析。该分析在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室完成。Sm 和 Nd 的

分离使用常规的两次离子交换技术,质谱分析使用 7 个接收器的 Finnigan MAT-262 质谱仪, Sr 采用静态模式而 Nd 则采用动态模式。Nd 同位素比值测定以 $n(^{146}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})=0.7219$ 进行标准化; Sr 同位素比值测定采用 $n(^{86}\text{Sr})/n(^{88}\text{Sr})=0.1194$ 进行质量分馏校正, Sr 同位素标准为 NBS607, $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})=1.200\ 35\pm1(2\sigma, n=6)$ 。实验室全流程本底: Rb、Sr 为 $10^{-10}\sim10^{-11}\text{ g}$, Sm、Nd 为 $10^{-11}\sim10^{-12}\text{ g}$ 。Sr—Nd 同位素数据测试在德国 Finnigan 公司 MAT-262 热电离质谱计(TIMS)上完成,化学流程和同位素比值测试可参见高剑峰等(高剑峰等,2003)。

4 分析结果

4.1 正长斑岩锆石 U-Pb 年龄

蒙古国正长斑岩体尚未进行过年代学研究。笔者对其进行了锆石 LA-ICP-MS 法 U-Pb 测年,分析结果列于表 1。

林强(2003)研究表明, ^{238}U 和 ^{235}U 的半衰期及其丰度存在差异,年轻的锆石中放射成因 ^{207}Pb 的丰度比放射成因 ^{206}Pb 的丰度约低 20 倍,使前者的测量精度较差,导致 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值往往不能反映岩体形成的真实年龄。对于放射成因组分积累较少的年轻锆石来说, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄比 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄更能反映锆石的结晶时间。由此可见, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值 $(170.6\pm1.7)\text{ Ma}$ 应较好地代表了锆石的结晶年龄。锆石阴极发光图像显示,正长斑岩 Z01 样品中大多数锆石晶体形态较好,呈单锥或双锥状,具清楚的生长韵律环带(图 4),表明其为岩浆成因锆石。在一致曲线图(图 5)中,Z01 样品的 14 个数据点集中分布,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 $(170.6\pm1.7)\text{ Ma}$,MSWD 为 1.6,表明年龄的可信度较高。因此,该正长斑岩体形成于中侏罗世。

4.2 元素地球化学特征

4.2.1 主量元素特征

岩体的主量元素分析结果见表 2。正长斑岩的岩石化学成分变化较小:高硅(SiO_2 质量分数 $73.99\%\sim74.28\%$),高铝(Al_2O_3 质量分数为 $12.36\%\sim14.30\%$),富碱(Na_2O 含量为

表 1 蒙古巴音苏赫图钨矿床正长斑岩的锆石 LA-ICP MS 法 U-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP MS zircon U-Pb dating data of the syenite porphyry in Bayinsukhtu ore district, Mongolia

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)						谐和度 (%)			
	Pb	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{Pb})$			$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{Pb})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{Pb})$				$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{Pb})$		
					1 σ	测值	1 σ	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ		测值	1 σ	
Z01-5	5.86	133.59	150.6	0.89	0.0025	0.0467	0.1746	0.009	0.0271	0.0003	35	93	163	8	172	2	97			
Z01-7	9.98	182.94	237.88	0.77	0.0058	0.0528	0.1905	0.0086	0.0261	0.0005	322	207	177	18	166	3	88			
Z01-8	88.51	389.11	535.73	0.73	0.0053	0.0531	0.1923	0.0089	0.0263	0.0004	332	192	179	16	167	3	89			
Z01-13	4.33	49.78	58.74	0.85	0.0052	0.0518	0.1886	0.0085	0.0264	0.0004	277	227	175	16	168	3	89			
Z01-14	38.22	320.45	585.17	0.55	0.0059	0.0533	0.1955	0.0095	0.0266	0.0004	340	219	181	18	169	3	91			
Z01-15	3.25	58.35	78.22	0.75	0.0051	0.0529	0.1892	0.0078	0.0259	0.0004	324	183	176	15	165	3	87			
Z01-22	5.22	98.81	130.13	0.76	0.0047	0.0542	0.1979	0.007	0.0265	0.0004	379	167	183	14	168	3	89			
Z01-24	35.22	468.89	654.16	0.72	0.0041	0.0516	0.1901	0.0105	0.0267	0.0003	269	156	177	13	170	2	95			
Z01-25	13.36	338.59	334.61	1.01	0.0064	0.0469	0.1744	0.0136	0.027	0.0005	44	240	163	20	172	3	97			
Z01-26	3.87	52.56	70.78	0.74	0.0042	0.0502	0.1876	0.0054	0.0271	0.0003	204	162	175	13	172	2	97			
Z01-27	18.82	342.99	380.27	0.90	0.00523	0.0523	0.1902	0.0094	0.0264	0.0003	297	95	177	8	168	2	89			
Z01-30	8.84	176.94	187.22	0.95	0.0042	0.0512	0.1926	0.0054	0.0273	0.0004	249	158	179	13	174	2	100			
Z01-32	137.06	585.42	973.25	0.60	0.0046	0.05	0.1861	0.007	0.027	0.0004	194	180	173	15	172	2	97			
Z01-33	25.45	278.65	580.01	0.48	0.0026	0.0508	0.1935	0.0095	0.0276	0.0003	234	95	180	8	175	2	99			

表 1 蒙古巴音苏赫图钨矿床正长斑岩的锆石 LA-ICP MS 法 U-Pb 分析结果

Table 1 LA-ICP MS zircon U-Pb dating data of the syenite porphyry in Bayinsukhtu ore district, Mongolia

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)								谐和度 (%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{Pb})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{Pb})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{Pb})$				
					测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ			
Z01-5	5.86	133.59	150.6	0.89	0.0467	0.0025	0.1746	0.009	0.0271	0.0003	35	93	163	8	172	2	97		
Z01-7	9.98	182.94	237.88	0.77	0.0528	0.0058	0.1905	0.0086	0.0261	0.0005	322	207	177	18	166	3	88		
Z01-8	88.51	389.11	535.73	0.73	0.0531	0.0053	0.1923	0.0089	0.0263	0.0004	332	192	179	16	167	3	89		
Z01-13	4.33	49.78	58.74	0.85	0.0518	0.0052	0.1886	0.0085	0.0264	0.0004	277	227	175	16	168	3	89		
Z01-14	38.22	320.45	585.17	0.55	0.0533	0.0059	0.1955	0.0095	0.0266	0.0004	340	219	181	18	169	3	91		
Z01-15	3.25	58.35	78.22	0.75	0.0529	0.0051	0.1892	0.0078	0.0259	0.0004	324	183	176	15	165	3	87		
Z01-22	5.22	98.81	130.13	0.76	0.0542	0.0047	0.1979	0.007	0.0265	0.0004	379	167	183	14	168	3	89		
Z01-24	35.22	468.89	654.16	0.72	0.0516	0.0041	0.1901	0.0105	0.0267	0.0003	269	156	177	13	170	2	95		
Z01-25	13.36	338.59	334.61	1.01	0.0469	0.0064	0.1744	0.0136	0.027	0.0005	44	240	163	20	172	3	97		
Z01-26	3.87	52.56	70.78	0.74	0.0502	0.0042	0.1876	0.0054	0.0271	0.0003	204	162	175	13	172	2	97		
Z01-27	18.82	342.99	380.27	0.90	0.0523	0.0027	0.1902	0.0094	0.0264	0.0003	297	95	177	8	168	2	89		
Z01-30	8.84	176.94	187.22	0.95	0.0512	0.0042	0.1926	0.0054	0.0273	0.0004	249	158	179	13	174	2	100		
Z01-32	137.06	585.42	973.25	0.60	0.05	0.0046	0.1861	0.007	0.027	0.0004	194	180	173	15	172	2	97		
Z01-33	25.45	278.65	580.01	0.48	0.0508	0.0026	0.1935	0.0095	0.0276	0.0003	234	95	180	8	175	2	99		

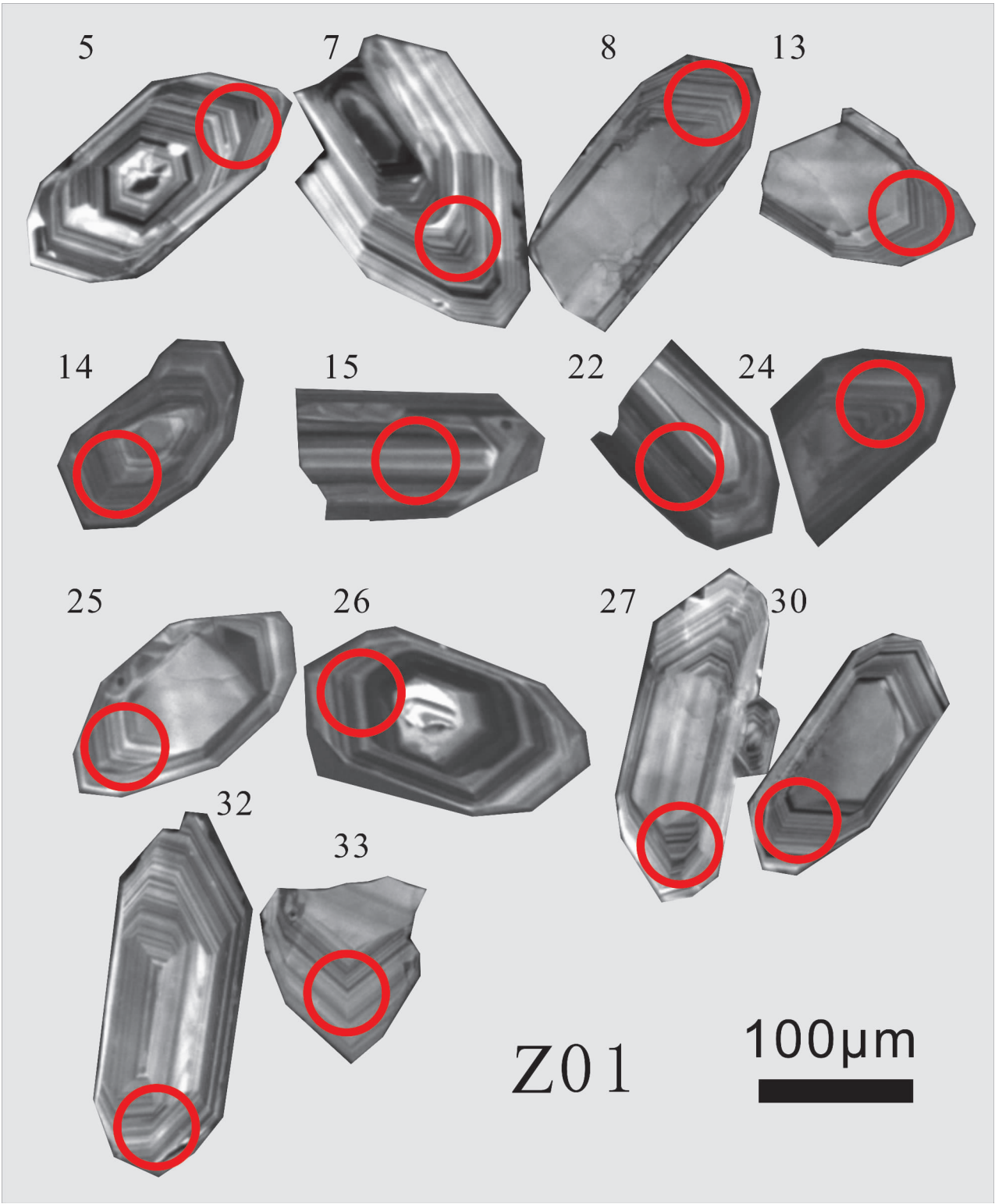


图 4 蒙古巴音苏赫图钨矿床正长斑岩中部分锆石的形态及分析点位图

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from the syenite porphyry in Bayinsukhtu ore district, Mongolia

2.78% ~3.33%, K_2O 含量为 2.35% ~5.13%), 富钾 $K_2O > Na_2O$ ($K_2O/Na_2O > 1$, 只有一件样品为 0.85, 可能是硅化蚀变所致), MgO (0.17% ~0.45

%), TFe_2O_3 含量为 0.86% ~2.64%, CaO 较低 (0.52% ~1.85%), 另具有较高的 TiO_2 (0.09% ~0.25%)。

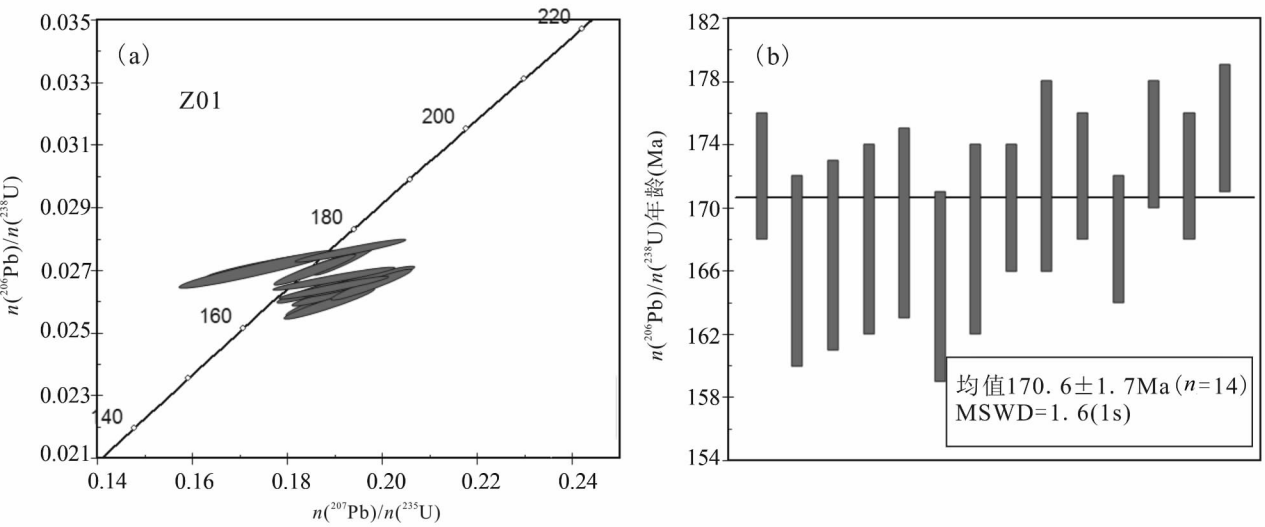


图5 蒙古巴音苏赫图钨矿床正长斑岩 (Z01) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和年龄图(a)和加权平均年龄(b)

Fig. 5 The Concordia age and weighted average age of LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of syenite porphyry (Z01) in Bayinsukhtu deposit, Mongolia

在 TAS 图解中,分析数据投在花岗岩区(图6)。在 SiO₂—K₂O 图解中显示主要为高钾钙碱系列(图7a)。在 Shand 指数图解中,样品都投在过铝质区域中(图7b)。

4.2.2 微量和稀土元素特征

正长斑岩的稀土元素配分曲线和微量元素蛛网图(图8a、b)可知,相对富集 Th、U、Hf、Ta 等高场强元素,而 Ba、Sr 等大离子亲石元素,Nb 等高场强元素相对亏损。共同具有的 Nb 负异常表明岩浆在上升过程中可能有地壳物质的加入。正长斑岩的 ΣREE 为 51.92 × 10⁻⁶ ~ 58.32 × 10⁻⁶之间,LREE/

HREE 值在 6.41 ~ 7.04 之间,具有较强的 Eu 的负异常,整体上呈现轻稀土(LREE)富集的右倾特征(图8)。

4.3 同位素地球化学特征

正长斑岩的 Sr—Nd 同位素测试结果见表3。由表3可以看出,正长斑岩的 [n(⁸⁷Sr)/n(⁸⁶Sr)]_i比值在 0.723600 ~ 0.733118 之间,平均值为 0.728113。n(¹⁴³Nd)/n(¹⁴⁴Nd)值较高(0.512320 ~ 0.512451),平均为 0.512404。ε_{Nd}(t)在 -4.6 ~ -2.3 之间,均为负值。Nd 模式年龄 T_{DM} 在 1366 ~ 1428Ma,二阶段 Nd 模式年龄 T_{2DM}

表2 蒙古国研究区正长斑岩主量元素(%)、稀土元素(×10⁻⁶)及微量元素(×10⁻⁶)分析结果

Table 2 The analyzed data of major(%), rare earth elements(×10⁻⁶) and trace elements(×10⁻⁶) of the syenite porphyry in Bayinsukhtu ore district, Mongolia

样品	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失	总量	A/CNK	A/NK	
EX09-139	74.03	0.25	12.36	2.64	0.07	0.45	1.85	2.78	2.35	0.07	3.38	100	1.18	1.74	
ZB02	73.99	0.1	14.3	0.86	0.01	0.19	0.52	3.28	5.13	0.25	0.86	99.99	1.2	1.31	
ZB01	74.28	0.09	14.28	0.89	0.03	0.17	0.53	3.33	5.12	0.22	0.88	100	1.19	1.3	
样品	Ga	Rb *	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba *	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	
EX09-139	19.53	137.13	50.7	38.69	205	13.48	12.99	297	42.7	80.4	10.1	37.9	7.28	0.78	
ZB02	21.3	295.16	77.2	10.2	64.01	15.06	34.27	308	10.9	23.1	2.87	10.9	2.85	0.51	
ZB01	17.22	205.52	70.6	9.25	57.1	12.65	14.93	260	10	19.9	2.56	9.45	2.52	0.42	
样品	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta *	Tl *	Pb	Bi *	Th	U
EX09-139	6.81	1.1	6.55	1.36	3.89	0.61	4.03	0.63	6.96	1.32	0.82	32.2	0.33	23.24	4.83
ZB02	2.75	0.42	2	0.33	0.82	0.11	0.7	0.11	2.5	2.9	1.83	37	0.53	6.77	4.36
ZB01	2.54	0.38	1.95	0.36	0.85	0.12	0.71	0.11	2.24	2.55	1.39	41.6	0.11	6.87	6

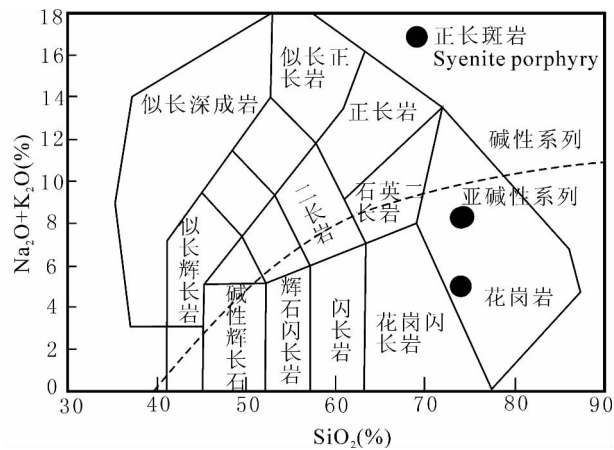


图 6 蒙古巴音苏赫图钨矿床正长斑岩 TAS 图解
(据聂凤军等, 2007)

Fig. 6 The TAS diagram of the syenite porphyry in Bayinsukhtu ore district, Mongolia (after Nie Fengjun et al. , 2007&)

在 1147 ~ 1336 Ma 之间, f_{Sm-Nd} 值均为负值, 变化范围不大(-0.36 ~ -0.19)。

5 讨论

5.1 成岩时代

样品 Z01 的 13 个有效测点结果得出一组年龄, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 $170.6 \pm 1.7 \text{ Ma}$, MSWD 为 1.6。因此, 该正长斑岩体形成于中—晚侏罗世, 这与矿区内发现的萤石矿的年龄 $158 \pm 23 \text{ Ma}$ (未发表) 基本一致, 结合两者的空间位置, 推

测两者为同期岩浆活动的产物。本文所测锆石具清楚的生长韵律环带, 结合稀土特征, 典型的 Ce 正异常、Eu 负异常, 重稀土富集, 可推测本次试验锆石为岩浆锆石, 本次所测的锆石年龄可以代表岩体侵入地层的时间。

5.2 岩石成因及物质来源

正长斑岩的 $\text{SiO}_2 > 58.62\%$, 暗示它们可能是陆壳岩石在特定条件下部分熔融产生的壳源中酸性岩石系列, 而不是地幔橄榄岩部分熔融的幔源岩浆系列(赖绍聪, 2003)。正长斑岩高 K_2O , 可能与壳源物质的熔融深度有关。前人研究表明, 在角闪—榴辉岩相转化带深度范围内, 局部熔融产生的熔体尽管通常是相对富 Na 的, 但随着压力的增加, 熔体中的钾钠比值会升高(Xiao and Clemens, 2006; Rapp et al. , 1999; Rapp et al. , 2002), 因而其熔体在压力较高的条件下形成时也可以相对富集 K。正长斑岩低 Y 和低 HREE, 是由于石榴子石有优选富集 Y 和 HREE 的特点, 暗示火成岩的源区物质在部分熔融时有石榴石矿物相的稳定存在, Nb、Ta 负异常的存在暗示了正长斑岩的壳源岩浆应源于陆壳物质部分熔融。因此, 这些特殊的岩石地球化学组成暗示巴音苏赫图中生代正长斑岩绝非正常的中酸性火成岩, 而与 Aidakite(高铯低钪中酸性岩, 或埃达克岩) 的岩石地球化学成分相当(Xiao L and Clemens, 2006)。

在古蒙古洋壳板块向华北增生板块俯冲碰撞过程中, 由于摩擦生热和去水作用以及远距离效应, 造

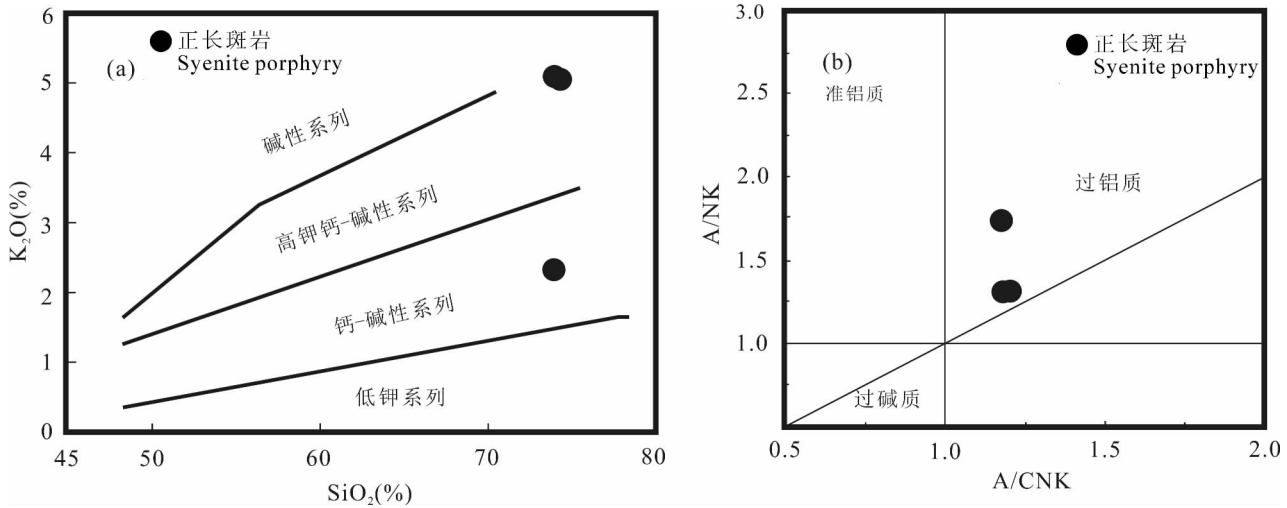


图 7 蒙古巴音苏赫图钨矿床正长斑岩 $w(\text{SiO}_2)$ — $w(\text{K}_2\text{O})$ 图解, Shand 指数图解

Fig. 7 The $w(\text{SiO}_2)$ — $w(\text{K}_2\text{O})$ diagram (a) and the Shand Index diagram (b) of the syenite porphyry in Bayinsukhtu ore district, Mongolia

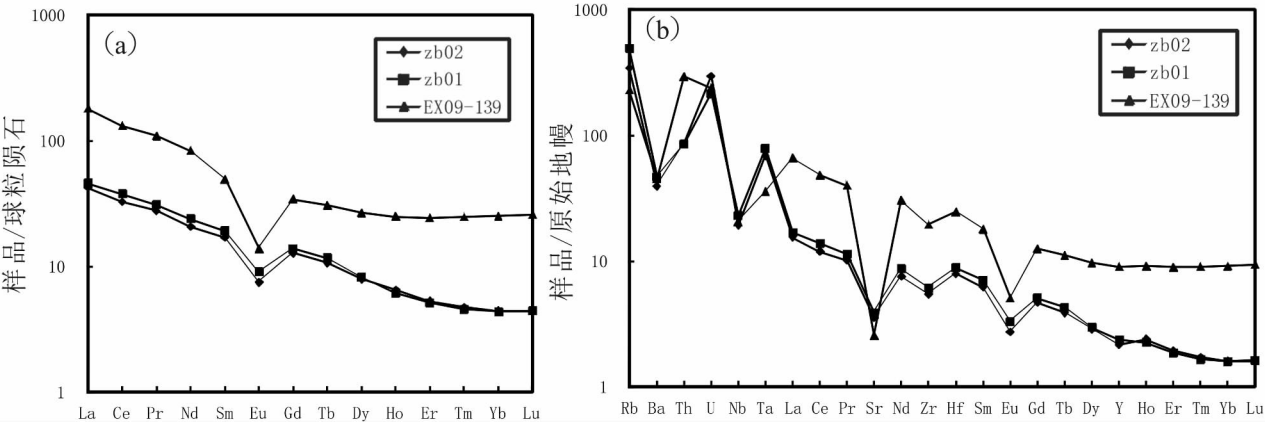


图 8 蒙古巴音苏赫图钨矿床正长斑岩稀土元素配分曲线(a)和微量元素蛛网图(b),其中球粒陨石标准化值据 Boynton,1984;原始地幔标准化值据 Sun and McDonough,1989

Fig. 8 Chondrite-normalized rare earth elements diagram (a) (Chondrite REE values from Boynton, 1984) and Primitive mantle normalized trace elements spider diagram(b) (Primitive mantle values from Sun and McDonough, 1989) of the syenite porphyry in Bayinsukhtu ore district, Mongolia

成在不同的构造部位产生不同类型的花岗岩类组合。一般认为:在主缝合线附近 I 型花岗岩较常见,远离主缝合线 S 型花岗岩较发育。本区正长斑岩具有 S 型花岗岩的特征,

且在 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(图 9)中,本区花岗岩样品落入 S 型花岗岩范围内,S 型花岗岩是一种以壳源沉积物质为源岩,经过部分熔融、结晶而产生的花岗岩。暗示该区在正长斑岩形成时期蒙古洋已经消失。

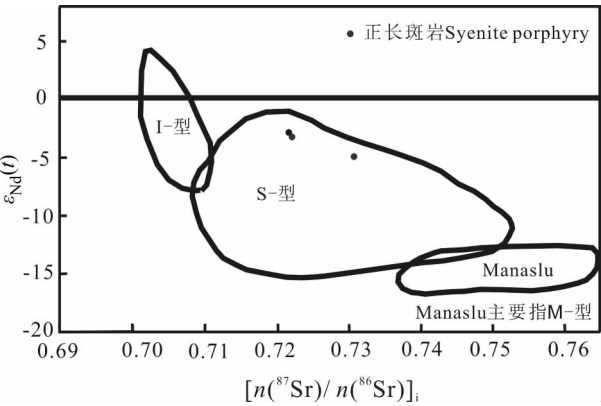


图 9 蒙古巴音苏赫图钨矿床正长斑岩 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 关系图

Fig. 9 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram of the syenite porphyry in Bayinsukhtu ore district, Mongolia

Green(1980)研究认为,东亚大陆是由西伯利亚板块和华北板块及其间一系列规模不等的陆块在古

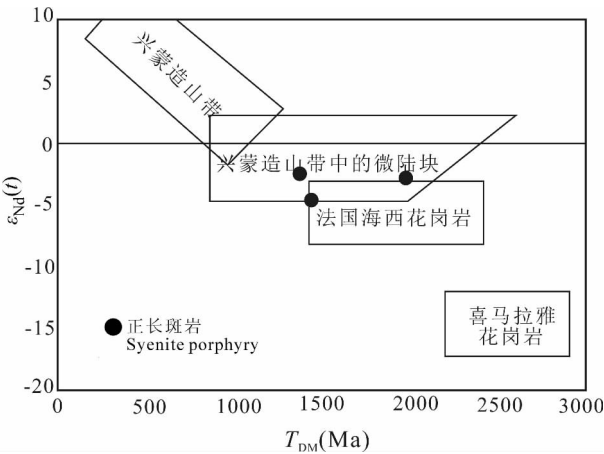


图 10 蒙古巴音苏赫图钨矿床正长斑岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-T_{\text{DM}}$ 关系图

Fig. 10 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-T_{\text{DM}}$ diagram of the syenite porphyry in Bayinsukhtu ore district, Mongolia

生代通过大洋岩石圈的俯冲和陆块间的碰撞拼贴而成,这种造山作用是洋壳和陆壳消减的软碰撞过程。该花岗岩体具有兴蒙造山带显生宙花岗岩类 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值普遍较高的特点,暗示没有古陆壳物质参与岩浆的形成过程。在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-T_{\text{DM}}$ 图解(图 10)中,本区花岗岩样品落入兴蒙造山带微地块范围内,暗示该区所在地块最初是在西伯利亚板块和华北板块之间的微陆块,而非华北板块和西伯利亚板块。

5.3 构造背景

岩浆岩组合和岩石成分与大地构造环境的密切关系已经为越来越多的地质学家所接受,判断岩浆

岩形成的构造环境,除从岩石地球化学入手外,还应结合区域构造的演化。这是因为钙碱性岩浆地球化学特征,不仅取决于形成的构造环境,有时还取决于源区。

该正长斑岩主量元素具有高硅、富碱、过铝质的特点,在 K_2O-SiO_2 图解中岩石样品落入高钾钙碱性系列范围。稀土元素具明显的铈负异常,配分模式为向右倾斜的曲线,与上地壳稀土配分曲线相似。微量元素表现出贫 Nb、Ta、Sr、P、Ti 等 HFSE 元素,而富集 Rb、Th、Pb 等 LILE 元素的特点,具有岛弧玄武岩微量元素分布的特点。在花岗岩微量元素构造环境判别图解中(图 11),研究区正长斑岩位于岛弧区。表明该正长斑岩形成于同碰撞向后造山构造体制转换过渡的伸展大地构造环境背景之下,其岩浆起源是由地壳加厚作用引起下部地壳物质部分熔融所致。因此,地壳加厚作用和地壳物质部分熔融,很可能是形成本区花岗岩的两个最主要的动力机制。

不同的年龄数据提供了区域构造演化的时间依据,该正长斑岩锆石 U-Pb 年龄为 (170.6 ± 1.7) Ma,形成于侏罗纪,该时期构造格局与二叠纪末期完全相似,基本处于陆内拉伸和裂陷状态,受区域性深大断裂再次复活和大陆内部热液值升高影响,研究区范围内古陆壳又开始出现明显活化的迹象,强烈的构造—岩浆活动可在先期形成的构造—地层单元内形成一系列产出形态各异和分布规模大小不等的富碱性(或碱性)镁铁质和花岗岩类侵入岩(聂凤军等,2007;洪大卫,1994;Ruzhentsev,2001)。本区所在兴蒙造山带,位于西伯利亚和华北中朝—塔里木地台之间,属于巨型中亚造山带的东端,为中亚造山带形成背景的古亚洲洋,大约在 900 Ma 前开始张开,大规模扩张在 750 ~ 700 Ma,而 700 ~ 600 Ma 达到扩张的高峰。其间还经历若干微陆块之间、微陆块与南北大陆之间的碰撞,直至石炭纪最终封闭。即使在其发育的鼎盛时期,也只具有小洋盆的性质,其间存在许多微陆块,呈现出一种多岛小洋盆的构造格局。即该年龄反映了本区蒙古洋闭合后在板块内部事件的年龄。由于陆内构造演化易产生挤压、剪切和摩擦生成热效应,进一步诱发小型对流体,地幔物质底辟上涌,产生拉张效应和弧后的微型扩张(李春昱,1986)。构造环境判别该区花岗岩形成于中生代岛弧环境下,同时又具有同碰撞花岗岩的特征,是中生代期间联合板块相对运动发展的岩浆记录。

表 3 蒙古国研究区正长斑岩 Sr、Nd 同位素分析结果

样品号	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$\frac{n(^{87}\text{Rb})}{n(^{86}\text{Sr})}$	$\frac{n(^{87}\text{Sr})}{n(^{86}\text{Sr})}$ (2 σ)	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})}$ (2 σ)	T_{DM}	$\left[\frac{n(^{87}\text{Sr})}{n(^{86}\text{Sr})}\right]_i$	$\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$T_{2\text{DM}}$
EJ10-139	106.7	38.98	7.962	0.752430 ± 0.000012	5.691	27.55	0.512320 ± 0.000009	1428	0.70203	-27.4	1.3	-0.38	1087
ZB01	267.4	72.15	10.78	0.753756 ± 0.000015	3.033	11.56	0.512441 ± 0.000007	1969	0.70294	-14.6	0.9	-0.34	1115
ZB02	225.7	72.62	9.03	0.745503 ± 0.000013	4.323	9.632	0.512451 ± 0.000009	1366	0.70592	27.75	0.3	-0.25	1170

注:表中各有关参数按 $t = 170.6\text{Ma}$ 计算。Nd 模式年龄采用二阶段模式进行计算,计算公式: $T_{\text{DM}} = \frac{1}{\lambda} \ln \left\{ \frac{\left[\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})} \right]_{\text{sample}} - \left[\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})} \right]_{\text{DM}}}{\left[\frac{n(^{147}\text{Sm})}{n(^{144}\text{Nd})} \right]_{\text{sample}} - \left[\frac{n(^{147}\text{Sm})}{n(^{144}\text{Nd})} \right]_{\text{DM}}} + 1 \right\}$; 式中: $\left[\frac{n(^{147}\text{Sm})}{n(^{144}\text{Nd})} \right]_e = 0.118$;

$\left[\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})} \right]_{\text{DM}} = 0.513151; \left[\frac{n(^{147}\text{Sm})}{n(^{144}\text{Nd})} \right]_{\text{DM}} = 0.21360; t = 170.6\text{Ma}。$

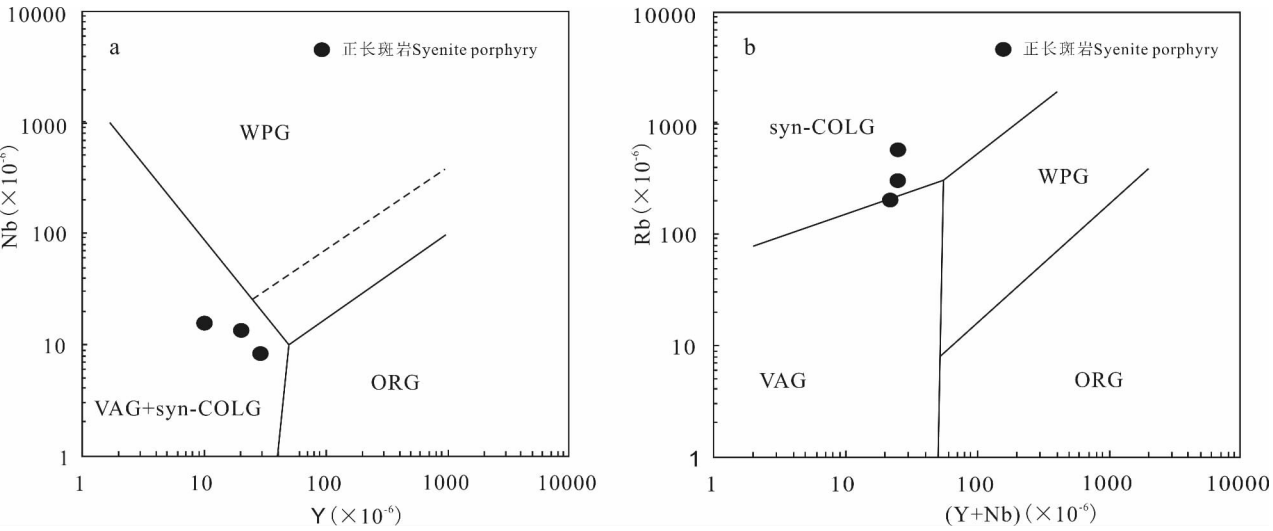


图 11 蒙古巴音苏赫图钨矿床正长斑岩微量元素构造环境判别图解

Fig. 11 The diagram of application of trace element tectonic background of the syenite porphyry in Bayinsukhtu ore district, Mongolia

VAG—火山弧花岗岩；ORG—洋脊花岗岩；WPG—板内花岗岩；S—COLG—同碰撞花岗岩

VAG—Volcanic arc granitoid；ORG—ocean ridge granites；WPG—intracontinental granites；S—COLG—Syn—collisional granite

6 结论

(1) 根据测得的锆石 U-Pb 年龄,正长斑岩的年龄为 170.6 ± 1.7 Ma,形成于中—晚侏罗世。这与矿区内发现的萤石矿的年龄 158 ± 23 Ma 基本一致,结合两者的空间位置,推测两者为同期岩浆活动的产物。

(2) 本区花岗岩可能形成于陆内伸展大地构造背景之下,其岩浆起源是由地壳加厚作用引起下部地壳物质部分熔融所致。因此,地壳加厚作用和地壳物质部分熔融,很可能是形成本区花岗岩的两个最主要的动力机制。

(3) 本区正长斑岩形成于弧盆构造体系,它是中生代板内作用的重要岩浆记录,对其进行深入研究,有助于更深刻、具体的揭示联合板块区域构造演化的历程和特点。

致谢:中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室的李禾和靳新娣在主微量实验的测试中给予了作者极大的帮助,储著银老师在 Sm-Nd 同位素分析实验中也给了细致指导。在此一并致谢。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a

“#” is in Chinese without English abstract)

高剑峰, 陆建军, 赖鸣远, 林雨萍, 濮巍. 2003. 岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析. 南京大学学报(自然科学), 39(6): 844~850.

洪大卫. 1994. 花岗岩研究的最新进展及发展趋势. 地学前缘, 1: 79~86.

赖绍聪. 2003. 青藏高原新生代埃达克岩的厘定及其意义. 地学前缘, 10(4): 407~415.

李春昱. 1986. 板块构造基本问题. 北京:地震出版社, 455~462.

林强, 葛文春, 曹林. 2003. 大兴安岭中生代双峰式火山岩的地球化学特征. 地球化学, 208~222.

聂海军, 张万益, 杜安道. 2007. 内蒙古朝不楞砂卡岩型铁多金属矿床辉钼矿铼—钨同位素年龄及地质意义. 地球学报, 28: 315~323.

秦克章, 李惠民, 李伟实. 1999. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床的成岩、成矿时代. 地质论评, 45(2): 181~185.

张德全. 1993. 大兴安岭南段不同构造环境中的两类花岗岩. 岩石矿物学杂志, 1~11.

周建波, 张兴洲, 马志红. 2009. 中国东北地区的构造格局与盆地演化. 石油与天然气地质, 30: 530~538.

Badarch G, Cunningham W D, Windley B F. 2002. A New Terrane Subdivision for Mongolia; Implications for the Phanerozoic Crustal Growth of Central Asia. Journal of Asian Earth Sciences, 21: 87~110.

Boynton A C, Zmud R W. 1984. An assessment of critical success factors. Sloan Management Review, 25: 17~27.

Gao Jianfeng, Lu Jianjun, Lai Mingyuan, Lin Yuping, Pu Wei. 2003&. Analysis of trace elements in rock samples using hr-icp-ms. Journal of Nanjing University, 39(6): 844~850.

Green T H. 1980. Island arc and continent-building magmatism: a review of petrogenic models based on experimental petrology and geochemistry. Tectonophysics, 63: 367~385.

Hong Dawei. 1994&. Recent developments in granite research. Geological Frontier, 1: 79 ~ 86. Jahn B M, Wu F Y, Chen B. 2001. Growth of Asia in the Phanerozoic——Nd isotopic evidence. Gondwana Research, 4: 640 ~ 642. Lai Shaocong. 2003&. The Qinghai – Tibet plateau Cenozoic Mr Tak rock set and its significance . Geological Frontier, 10(4) :407 ~ 415.

Li Chunyu. 1986#. Plate Tectonics Basic Problems. Beijing: Earthquake Publishing; 455 ~ 462.

Lin Qiang, Ge Wenchun, Cao Ling. 2003&. Geochemistry of Mesozoic volcanic in Da Hinggan Ling: the bimodal volcanic rocks. Geochimica; 208 ~ 222.

Nie Fengjun, Zhang Wanyi, Du Andao. 2007&. Re-Os isotopic age dating of molybdenite separates from the Chaobuleng skarn iron – polymetallic deposit, Inner Mongolia. Acta Geoscientica Sinica, 28: 315 ~ 323.

Perello J, Cox D, Garamjav D. 2001. Oyu Tologoi, Mongolia; Siluro – Devonian porphyry Cu—Au—(Mo) and high-sulfidation Cu mineralization with a Cretaceous chalcocite blanket. Economic Geology, 96;1407 ~ 1428.

Qin Kezhang, Li Huiming, Li Weishi. 1999. Diagenetic and metallogenetic age of the Wuluketushan porphyry copper – platinum deposit, Inner Mongolia. Geological Review, 45(2) :181 ~ 185.

Rapp R P, Shimizu N, Norman M D. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge; Experimental constraints at 3.8 GPa. Chem Geol, 160;335 ~ 356.

Rapp R P, Xiao L, Shimizu N. 2002. Experimental constraints on the origin of potassium-rich adakites in eastern China. Acta Petrologica Sinica, 18(3) :293 ~ 302.

Ren X D, Kiösses W B, Alexander schwartz M. 1999. Regulation of the small GTP - binding protein Rho by cell adhesion and the cytoskeleton. The EMBO journal , 18;578 ~ 585.

Ruzhentsev S. 2001. The Variscan belt of south Mongolia and Dzungaria. Tectonics, Magmatism, and Metallogeny of Mongolia; London, Routledge, 61 ~ 94.

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. Geological Society London Special Publications, 42(1) : 313 ~ 345.

Windley B F, Alexeiev D, Xiao W. 2007. Tectonic modes for accretion of the Central Asian orogenic belt. Journal of the Geological Society, 164: 31 ~ 47.

Xiao L, Clemens J D. 2006. Origin of potassic(C-type) adakite magmas: Experimental and field constraints. Lithos, (Doi: 10. 1016/j. lithos. 2006. 09. 002).

Yarmoyuk V V, Kovaenko V L, Salnikova E B. 2008. Geochronology of Igneous Rocks and Formation of the Late Paleozoic South Mongolian Active Margin of the Siberian Continent . Stratigraphy and Geological Correlation, 16;162 ~ 181.

Zeng Qingdong, Liu Jianming, Zhang Zuolun, Chen Weijun, Zhang Weiqing. 2011. Geology and geochronology of the Xilamulun molybdenum metallogenetic belt in eastern Inner Mongolia, China. International Journal of Earth Sciences , 100;1791 ~ 1809.

Zhang Dequan. 1993. The greater Hinggan mountains south of two kinds of different tectonic environment of granite . Acta Petrologica et Mineralogica, 1 ~ 11.

Zhou Jianbo, Liu Xingzhou, Ma Zhihong. 2009. Tectonic frame work and basin evolution in Northeast China , China. Oil & Gas Geology, 30;530 ~ 538.

Zircon U-Pb Ages and Its Significance of the Syenite Porphyry in Bayinsuhetu Tungsten Deposit, Mongolia

GUO Zhihua¹⁾, ZHANG Baolin²⁾, DANG Yongqi³⁾, GUO Bowei¹⁾, GAO Lei⁴⁾, HOU Jinliang¹⁾, ZHANG Lichun¹⁾

1) Department of Geology, Mining Engineering College, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei, 063009;

2) Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029;

3) Bureau of Geological Exploration and Mineral Development of Hebei Province, Tangshan. Hebei, 063000;

4) Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (Ministry of Education); School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, 100871

Objectives: The syenite porphyry is an important magmatism record of China—Mongolia border region in the period of Mesozoic Era. The formation age and geochemical characteristics of the adamellite are significant to reveal the tectonic framework and evolution history at that period.

Methods: Samples were crushed into granules of less than 200 mesh and then analyzed for major and trace elements. All analyses were conducted at the IGG’s State Key Laboratory of Lithospheric Evolution in Beijing, China. Major elements were determined by x-ray fluorescence spectrometry on fused glass disks using an Axios mineral separation tool, with analytical uncertainties ranging from 1% to 5%. Trace-element and rare-earth element concentrations were determined by ICP-MS with an ELEMENT system. According to Chinese national standards GSR-1 and GSR-2, the error was <5% for trace elements with concentrations of 10 × 10⁻⁶ and <10%

for trace elements with concentrations of $<10 \times 10^{-6}$.

Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotope analyses were performed at the Chinese Academy of Geological Sciences using a laser-ablation system (193 nanometers (nm), GeoLas 200M) coupled to a Neptune (Thermo Fisher) Multicollector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer (MC-ICP-MS). Zircon U Th Pb measurements were made on 32 nm diameter spots on single grains. NIST 612 was used as an internal standard for U, Th, and Pb analyses and zircon GJ-1 was used as the external calibration standard. Common lead was corrected using the method of Andersen (2002). Isotopic ratios and element concentrations were calculated using the ICP-MS Data Cal software. Ages were calculated using ISOPLOT 3.

Results: The granite was formed in the Middle—Late Jurassic period and the U-Pb age of zircon is 170.6 ± 1.7 Ma. The geochemical data of granite show that it is high-K calc-alkaline. Also the granite is characterized with high silicon, with SiO_2 (73.99% ~ 74.28%), Al_2O_3 (12.36% ~ 14.30%), and MgO (0.17% ~ 0.45%), peraluminous. The total content of REE is 51.92×10^{-6} to 58.32×10^{-6} . The REE distribution patterns demonstrate a significant negative Eu anomaly and a “swallow-type” shape. The spider diagrams of primitive mantle standardized trace elements show enrichment of Rb, Th, U, K, Zr, Hf, strong depletion of Ba, Sr, P, Ti and medium to slight depletion of Nb and Ta. The initial $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$ values are high (0.512320 ~ 0.512451), and the average value is 0.512404. The $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values are all negative (−4.6 ~ −2.3).

Conclusions: The characters of major elements, trace elements, and isotopes show that the syenite porphyry was formed at the transitional period from syn-collision to post-orogenic tectonic systems, with extensional geotectonic environment. The crustal thickening and the partial melting of crustal materials are possibly main dynamic mechanism to form the granite.

Keywords: Mongolia; syenite porphyry; zircon U-Pb age; geochemistry; tectonic significance.

Acknowledgements: This article was funded by the Ministry of Science and Technology of China (973 Project, 2006BAB01A02). We obtained specific guidance and assistance from LI He and JIN Xindi concerning analysis of trace element, and CHU Zhuying referring to Sm-Nd isotope analysis at the Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences.

First author: GUO Zhihua, female, born in 1983, Mainly engaged in genetic type of mineral deposits and geochemistry. Email: huazifighting@163.com

Manuscript received on: 2016-11-03; Accepted on: 2017-06-23; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.05.017