

大兴安岭南段早白垩世早期后碰撞构造环境 ——来自林西县兰家营子辉长闪长岩的证据

车亚文, 刘建峰, 赵 硕, 葛茂卉, 吕前露

CHE Yawen, LIU Jianfeng, ZHAO Shuo, GE Maohui, LYU Qianlu

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

摘要:对大兴安岭南段林西县以北兰家营子辉长闪长岩开展了系统的岩石学、锆石年代学和地球化学分析,以揭示该岩体的成因,并探讨大兴安岭南段早白垩世大地构造背景。锆石 U-Pb 定年结果表明,该岩体的形成时代为 145.6 ± 0.6 Ma,为早白垩世早期侵入体。地球化学分析结果表明,该岩体 SiO_2 含量为 53.38%~54.45%, K_2O 含量为 1.34%~1.43%, Na_2O 含量为 3.85%~4.05%, 铝饱和指数 A/CNK 值介于 0.8~0.9 之间,属于钙碱性偏铝质岩浆岩。岩石的 MgO 和 TFe_2O_3 含量分别为 5.44%~5.73% 和 7.53%~8.33%, 相应的 $\text{Mg}^\#$ 值介于 36.96~38.24 之间,结合斜长石的环带和辉石的包橄结构,认为岩石是幔源原始岩浆经历分离结晶作用的产物。岩石相对富集 Rb、Ba 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta 等高场强元素,锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 5.4~9.0 之间,指示岩浆起源于亏损的受俯冲流体交代过的岩石圈地幔。兰家营子辉长闪长岩与林西地区同时代 A 型花岗岩构成双峰式岩浆岩组合,指示它们是伸展环境的产物。综合区域地质资料,认为大兴安岭南段早白垩世早期岩浆岩的形成与蒙古-鄂霍茨克洋闭合引起的碰撞后伸展背景有关。

关键词:大兴安岭南段;辉长闪长岩;早白垩世;地球化学;岩石成因

中图分类号:P588.12;P534.53 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)01-0152-12

Che Y W, Liu J F, Zhao S, Ge M H, Lyu Q L. Early early-Cretaceous post-collisional tectonic setting of the southern segment of the Great Xing'an Range: Evidence from the Lanjiayingzi gabbro-diorite in Linxi area. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(1): 152-163

Abstract: Based on the systematic petrology, zircon chronology and geochemistry analysis of the Lanjiayingzi gabbrodiorite pluton in the north of Linxi County in southern Great Khingan Range, genesis of the pluton and the Early Cretaceous tectonic setting are discussed. Zircon U-Pb dating reveals that the pluton was formed in Early Cretaceous (145.6 ± 0.6 Ma). Geochemistry of the pluton is characterized by 53.38%~54.45% of SiO_2 contents, 1.34%~1.43% of K_2O contents and 3.85%~4.05% of Na_2O contents, with 0.8~0.9 of A/CNK, which indicates that the pluton belongs to a calc-alkaline metaluminous magmatic rock. Its MgO and TFe_2O_3 contents vary from 5.44%~5.73% and 7.53%~8.33% respectively, with 36.96 to 38.24 of $\text{Mg}^\#$ values. Combined with the girdle of plagioclase and the poikilitic texture of olivine in clinopyroxene, it is suggested that the pluton was the product of the fractional crystallization of mantle-derived primary magma. In addition, the pluton is relatively rich in LILEs such as Rb and Ba, and depletion in HFSEs such as Nb and Ta, with +5.4 to +9.0 of zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values, which indicates that the pluton was derived from a depleted lithospheric mantle that experienced metasomatism from the subduction fluid. The Lanjiayingzi gabbrodiorite and coeval A-type granites

收稿日期:2020-06-15;修订日期:2020-08-16

资助项目:国家重点研发计划项目《北方东部复合造山带岩石圈三维架构与成矿地质背景》(编号:2017YFC0601301)、国家自然科学基金项目《内蒙古东南部早一中三叠世镁铁质火山岩的成因及地质意义》(批准号:41472055)和中国地质调查局项目《北方山系西拉木伦与贺根山基础地质调查》(编号:DD20190004)和《兴安造山带关键地区构造格架与廊带地质调查》(编号:DD20160201-01)

作者简介:车亚文(1995-),男,在读硕士生,地球化学专业。E-mail:1824186650@qq.com

通信作者:刘建峰(1981-),男,博士,研究员,从事岩石地球化学和区域大地构造研究。E-mail:wenjv@aliyun.com

in Linxi area constitute the bimodal magmatic assemblage, which suggests that they were formed in an extensional setting. Combined with regional geology, it is suggested that the formation of the Early Cretaceous magmatic rocks in southern Great Khingan Range has relation with the post-collision extensional setting resulting from closure of the Mongol-Okhotsk Ocean.

Key words: Southern Great Khingan Range; gabbrodiorite; Early Cretaceous; geochemistry; petrogenesis

大兴安岭是中国东北地区北东东向的巨型山脉,北起黑龙江,南至西拉木伦河上游谷地,全长约 1400 km,宽约 200 km。大兴安岭山脉的西侧为蒙古高原,东侧为松辽盆地,其与南部的太行山、巫山、雪峰山共同构成中国地势的第二、三阶梯的分界线。大地构造位置上,大兴安岭位于巨大的中亚造山带东段(图 1-a),自古生代以来,该地区先后经历了古亚洲洋、蒙古-鄂霍茨克洋和环太平洋构造体系的叠加改造,发育大规模的构造岩浆活动^[2, 13-16]。其中,早白垩世岩浆活动最强烈,构成了大兴安岭的主体。伴随着该期岩浆活动,大兴安岭南段地区发育了大规模斑岩型铜钼矿、岩浆热液型

银铅锌矿、矽卡岩型银铅锌矿和铁锡矿等成矿作用,成为中国北方一个重要的多金属成矿区^[17-20]。因而,大兴安岭南段早白垩世岩浆活动和成矿地质背景一直是研究的热点和焦点之一^[20-23]。

对于大兴安岭早白垩世岩浆活动形成的地质背景,长期以来,一直存在较大的认识分歧。一些学者认为,大兴安岭处于东北亚地幔柱影响范围内,中生代岩浆活动与地幔柱上涌有关^[3, 24-26];另一些学者认为,太平洋板块的俯冲引起欧亚大陆东侧岩石圈加厚,大兴安岭岩浆活动与加厚的岩石圈的拆沉作用有关^[21, 27-30];还有一些学者认为,大兴安岭岩浆活动与北侧鄂霍茨克洋的闭合引起的造山带

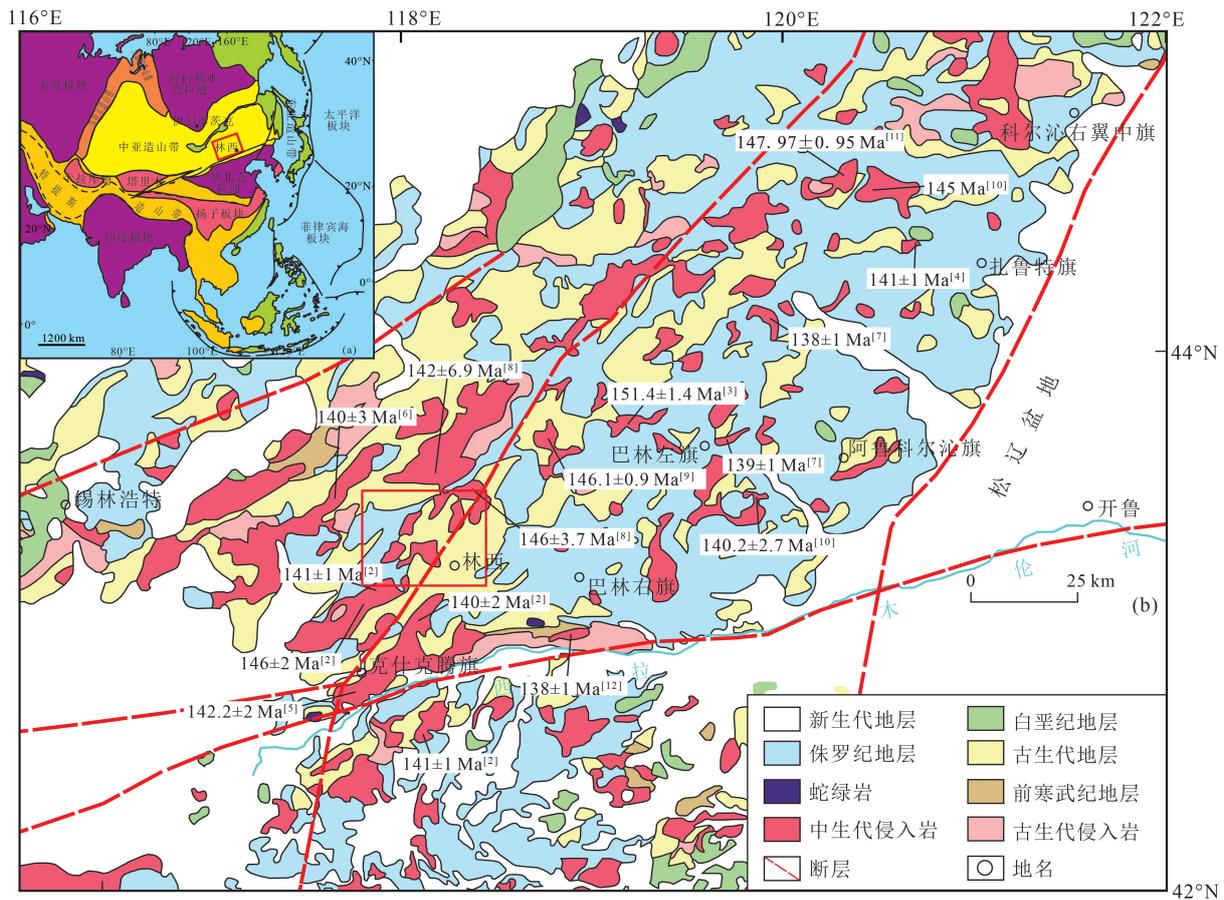


图 1 中亚造山带构造分区^[1](a)和大兴安岭南段地区地质简图^①(b)(年龄数据据参考文献[2-12])

Fig. 1 Tectonic division of Central Asian Orogenic belt (a) and simplified regional geological map of Southern Great Khingan Range (b)

的后碰撞伸展有关^[30-33]。此外,还有一些学者认为,大兴安岭岩浆活动具有双峰式特征,形成于大陆裂谷环境^[34-36]。

在以往的工作中,前人对大兴安岭早白垩世构造背景的研究主要集中在区内分布较广的火山岩和花岗岩^[3-4, 34, 36-39]。作为深部来源的岩石探针,尽管中、基性岩浆岩在大兴安岭地区出露较少,但它们对于揭示岩石圈地幔的性质及深部动力学过程具有重要意义^[15, 40-41]。本文通过对位于大兴安岭南段内蒙古林西县兰家营子地区早白垩世辉长闪长岩开展详细的岩石学、年代学和地球化学研究,揭示岩体的成因,并结合区域地质资料探讨大兴安岭南段地区早白垩世岩浆岩形成的构造背景。

1 区域地质背景与岩石学特征

大兴安岭南段位于中亚造山带东南部(图1-a)。该地区在古生代经历了与古亚洲洋演化相关的地质作用,发育贺根山、林西、西拉木伦河等多条古生代蛇绿岩带、晚古生代岛弧及增生杂岩带^[42-47]。中生代以来,该地区先后经历了蒙古-鄂霍茨克洋的闭合与西太平洋俯冲等作用的叠加改造,发育广泛的火山岩、花岗岩、沉积盆地等。新生代以来,主要发育陆内伸展有关的幔源玄武岩^[13, 48]。

研究区位于大兴安岭南段西拉木伦河以北的林西地区(图1-b)。该区出露最古老的地层单元为

早二叠世大石寨组安山岩和熔结凝灰岩,被晚二叠世—早三叠世林西组粉砂质板岩及砂岩覆盖。研究区缺失中、晚三叠世—早侏罗世地层沉积,晚侏罗世—早白垩世陆相火山-沉积岩地层不整合覆盖在上述地层之上(图2)。侵入岩方面,林西地区发育早三叠世花岗闪长岩、二长花岗岩,以及早白垩世钾长花岗岩、花岗斑岩等^[8, 16, 40, 49-51]。早白垩世辉长闪长岩和闪长岩在林西地区多以小岩株或岩脉的形式呈北东向分布。其中,兰家营子岩体位于内蒙古林西县的西北约10 km,岩体南侧侵入林西组,北侧和西侧与中生代花岗岩呈构造接触,中部和东侧被第四系北西向冲沟切割(图2)。

辉长闪长岩风化面呈红褐色,新鲜面为灰黑色,致密块状构造(图3-a)。岩石主要由斜长石和单斜辉石组成,呈半自形粒状结晶结构(图3-b)。斜长石呈较自形板条状,长0.5~1.5 mm,宽0.2~0.5 mm,含量70%~75%,发育聚片双晶和环带结构(图3-c);辉石呈短柱状和粒状,粒径约0.5 mm,含量25%~30%,部分较大的单斜辉石中含不规则的橄榄石,构成典型的包橄结构(图3-d)。此外,岩石中可见少量锆石、磷灰石等副矿物。

2 分析方法

2.1 全岩元素地球化学

岩石化学分析样品的制备在河北省区域地质

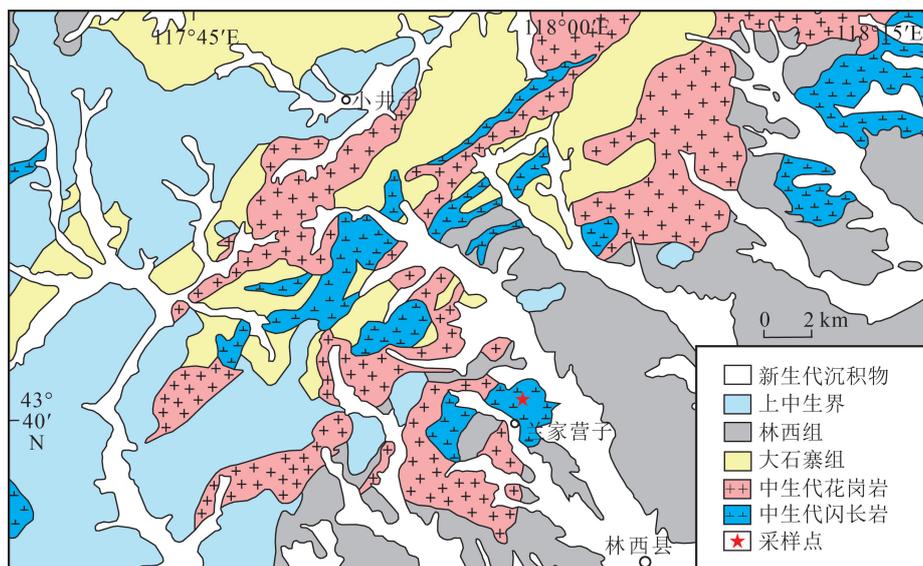


图2 林西地区地质图和采样位置^②

Fig. 2 Geological map with the sampling location of the Linxi area

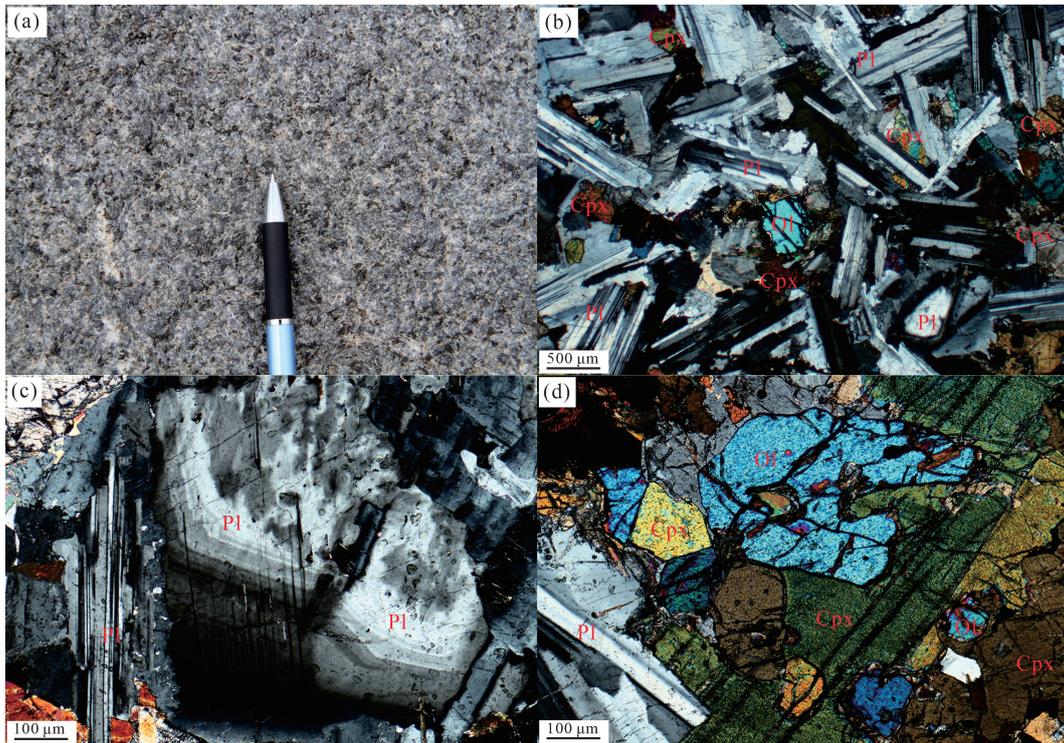


图 3 兰家营子地区辉长闪长岩结构构造和矿物组成

Fig. 3 Texture, structure and mineral assembly of the gabbrodiorite pluton in the Lanjiayingzi area
a—辉长闪长岩块状构造; b—辉长闪长岩主要组成矿物(正交偏光); c—斜长石环带结构;
d—单斜辉石包橄结构; PI—斜长石; Cpx—单斜辉石; Ol—橄榄石

矿产调查研究所实验室完成。经薄片显微镜下鉴定后,选择新鲜样品用于地球化学分析,首先将岩石样品在颚式破碎机上进行粗碎,然后在玛瑙钵体的研磨机上研磨至 200 目以下,样品加工过程均在无污染设备中进行。主量和微量元素分析测试在武汉上谱分析科技有限公司完成。其中,主量元素分析测试是利用日本理学 ZSX Primus II X 射线荧光光谱仪(XRF)完成的,测定精度均可达 0.2%,分析误差一般优于 5%。微量元素利用 Agilent 7500a ICP-MS 分析完成,对美国地质调查局(USGS)标准参考物质 BCR-2、BHVO-2 和 AGV-a 的分析结果表明,微量元素的分析精度和准确度一般优于 5%,详细的样品处理和分析流程见 Liu 等^[52]。

2.2 锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析

锆石分选在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。在锆石分选过程中,将挑选出裂隙相对较少,表面干净,透明度较高的锆石制作环氧树脂样品靶,经过打磨和抛光后,在自然资源部大陆构造与动力学重点实验室 Nova Nano SEM 450 场

发射扫描电子显微镜上进行阴极发光(CL)图像采集。锆石定年在武汉上谱分析科技有限责任公司进行,采用激光剥蚀等离子质谱体分析技术(LA-ICP-MS),应用 GeoLas2005 准分子激光剥蚀系统和 Agilent 7500a 型 ICP-MS 进行锆石 U-Pb 测定,激光束斑直径为 32 μm 。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正,详细的实验原理和流程见参考文献[48]。对分析数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal^[52-53]完成。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算均采用程序 Isoplot(ver 3.00)^[54]完成。

锆石原位 Hf 同位素分析测试在锆石 U-Pb 定年基础上进行,测试工作在中国地质科学院矿产资源研究所 Finnigan Neptune 型多接收等离子质谱(MC-ICP-MS)和 Newwave UP213 激光剥蚀系统上完成。分析过程中采用的激光束斑直径为 44 μm ,使用锆石国际标样 GJ1 为参考物质,分析点在 U-Pb 定年分析点的相同位置或附近。仪器的运行条件、详细的分析过程和数据处理见侯可军等^[55]。

表1 兰家营子地区辉长闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 分析数据
Table 1 U-Th-Pb age of LA-ICP-MS zircon from the Lanjiayingzi gabbroiorite

点号	含量/ 10^{-6}		同位素比值										年龄/Ma			
	Pb	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	^{238}U	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
DX03-1-01	39.1	1043	1370	0.76	0.0492	0.0017	0.1536	0.0051	0.0226	0.0002	154	77.8	145	4.5	144	1.4
DX03-1-02	34.7	808	1264	0.64	0.0472	0.0017	0.1498	0.0055	0.0228	0.0002	61.2	81.5	142	4.8	145	1.6
DX03-1-03	40.4	1088	1414	0.77	0.0491	0.0016	0.1561	0.0050	0.0229	0.0002	150	80.5	147	4.4	146	1.4
DX03-1-04	41.2	1040	1471	0.71	0.0492	0.0016	0.1555	0.0052	0.0226	0.0002	167	77.8	147	4.6	144	1.4
DX03-1-05	72.6	2424	2393	1.01	0.0485	0.0014	0.1545	0.0042	0.0228	0.0002	124	66.7	146	3.7	145	1.2
DX03-1-06	53.6	1870	1729	1.08	0.0488	0.0016	0.1553	0.0050	0.0228	0.0002	139	77.8	147	4.4	145	1.4
DX03-1-07	38.5	920	1372	0.67	0.0477	0.0017	0.1536	0.0056	0.0230	0.0002	83.4	85.2	145	4.9	146	1.6
DX03-1-08	21.32	472	788	0.60	0.0456	0.0019	0.1460	0.0060	0.0230	0.0003			138	5.3	146	1.6
DX03-1-09	27.90	587	999	0.59	0.0495	0.0018	0.1592	0.0054	0.0232	0.0002	172	83.3	150	4.7	148	1.5
DX03-1-10	58.1	1710	1993	0.86	0.0471	0.0014	0.1502	0.0044	0.0228	0.0002	57.5	66.7	142	3.9	146	1.3
DX03-1-11	38.6	1139	1271	0.90	0.0480	0.0017	0.1559	0.0051	0.0233	0.0002	98.2	88.0	147	4.5	148	1.5
DX03-1-12	49.4	1292	1772	0.73	0.0493	0.0016	0.1542	0.0051	0.0224	0.0002	161	77.8	146	4.4	143	1.4
DX03-1-13	213	10678	5844	1.83	0.0494	0.0012	0.1583	0.0038	0.0229	0.0002	169	62.0	149	3.4	146	1.3
DX03-1-14	144.0	5856	4321	1.36	0.0491	0.0013	0.1568	0.0039	0.0229	0.0002	154	56.5	148	3.4	146	1.3
DX03-1-15	16.84	429	578	0.74	0.0491	0.0021	0.1567	0.0064	0.0230	0.0003	150	100	148	5.7	146	1.7
DX03-1-16	29.5	798	1026	0.78	0.0492	0.0020	0.1548	0.0062	0.0225	0.0002	167	99.1	146	5.5	144	1.5
DX03-1-17	18.31	551	638	0.86	0.0493	0.0023	0.1563	0.0075	0.0226	0.0003	165	139	147	6.6	144	1.6
DX03-1-18	30.5	889	1037	0.86	0.0496	0.0020	0.1566	0.0061	0.0228	0.0003	176	125.0	148	5.4	146	1.7
DX03-1-19	25.93	538	955	0.56	0.0485	0.0021	0.1562	0.0067	0.0231	0.0003	120	100	147	5.9	147	1.7
DX03-1-20	35.5	779	1276	0.61	0.0476	0.0017	0.1518	0.0055	0.0229	0.0002	79.7	85.2	143	4.9	146	1.6
DX03-1-21	40.3	1100	1395	0.79	0.0486	0.0016	0.1538	0.0049	0.0228	0.0002	132	77.8	145	4.3	145	1.5
DX03-1-22	23.04	486	826	0.59	0.0481	0.0019	0.1546	0.0061	0.0230	0.0002	102	92.6	146	5.4	147	1.6
DX03-1-23	59.2	2051	1903	1.08	0.0485	0.0016	0.1563	0.0048	0.0232	0.0003	124	71.3	147	4.2	148	1.7
DX03-1-24	62.4	2556	1915	1.34	0.0492	0.0014	0.1548	0.0044	0.0226	0.0002	167	73.1	146	3.9	144	1.4

表 2 兰家营子辉长闪长岩主量、微量和稀土元素含量

Table 2 Contents of major and trace elements, as well as REE of the Lanjiayingzi gabbrodiorite

样品号	DX03-1	DX03-2	DX03-3	DX03-4	DX03-5	样品号	DX03-1	DX03-2	DX03-3	DX03-4	DX03-5
SiO ₂	54.09	53.7	53.38	54.45	53.45	Cr	84.4	94.3	109	83.1	84.2
TiO ₂	0.99	1.05	1.23	1.15	1.16	Hf	2.82	2.88	2.94	2.71	2.81
Al ₂ O ₃	18.49	18.18	17.95	18.61	18.23	Cs	3.09	3.23	2.8	2.19	2.22
TFe ₂ O ₃	7.95	8.21	8.33	7.53	8.13	Sc	13.6	14.6	15.9	13.8	13.8
MnO	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	Ta	0.3	0.32	0.37	0.34	0.33
MgO	5.54	5.7	5.73	5.44	5.56	Co	29.4	31.4	31.5	27.2	31.3
CaO	7.63	7.66	7.81	7.59	7.73	U	0.86	0.96	0.83	1	0.89
Na ₂ O	3.97	3.92	3.85	4.05	3.9	Sn	1.17	1.11	1.18	1.1	1.04
K ₂ O	1.43	1.34	1.35	1.41	1.35	La	32.9	18.7	102	17	14.8
P ₂ O ₅	0.22	0.24	0.23	0.26	0.29	Ce	54.7	37.1	140	36	33.6
烧失量	0.08	0.21	0.05	0.16	0.31	Pr	5.88	4.52	12.5	4.53	4.44
总计	100.58	100.39	100.1	100.83	100.29	Nd	22.5	18.9	41	19.2	19.2
A/CNK	0.84	0.83	0.82	0.85	0.83	Sm	4.08	3.89	5.36	4	4.08
Ba	461	452	467	455	444	Eu	1.51	1.48	1.72	1.53	1.47
Rb	27.8	27.7	26.9	28.5	25.9	Gd	3.54	3.43	4.06	3.66	3.68
Sr	818	828	842	839	820	Tb	0.49	0.51	0.55	0.52	0.55
Y	14.8	15.9	16.1	15.7	16.1	Dy	2.8	2.93	3.2	3.09	3.17
Zr	118	115	114	106	111	Ho	0.53	0.55	0.58	0.57	0.57
Nb	4.41	4.71	5.6	5.03	5.02	Er	1.39	1.47	1.45	1.45	1.46
Th	2.57	2.69	4.17	2.78	2.38	Tm	0.21	0.21	0.22	0.22	0.22
Pb	6.62	6.45	6.66	6.84	6.75	Yb	1.19	1.37	1.32	1.32	1.32
Ga	20.6	20.4	21	20.8	20.5	Lu	0.17	0.19	0.2	0.2	0.2
Zn	76.5	83.5	85.2	75.7	84	Mg [#]	37.39	37.31	37.09	38.24	36.96
Cu	11.8	9.51	10.7	9.93	13.9	δEu	1.21	1.24	1.13	1.22	1.16
Ni	30.2	32.1	32.6	25.2	31.2	(La/Yb) _N	18.64	9.20	52.10	8.68	7.56
V	140	147	169	157	150						

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

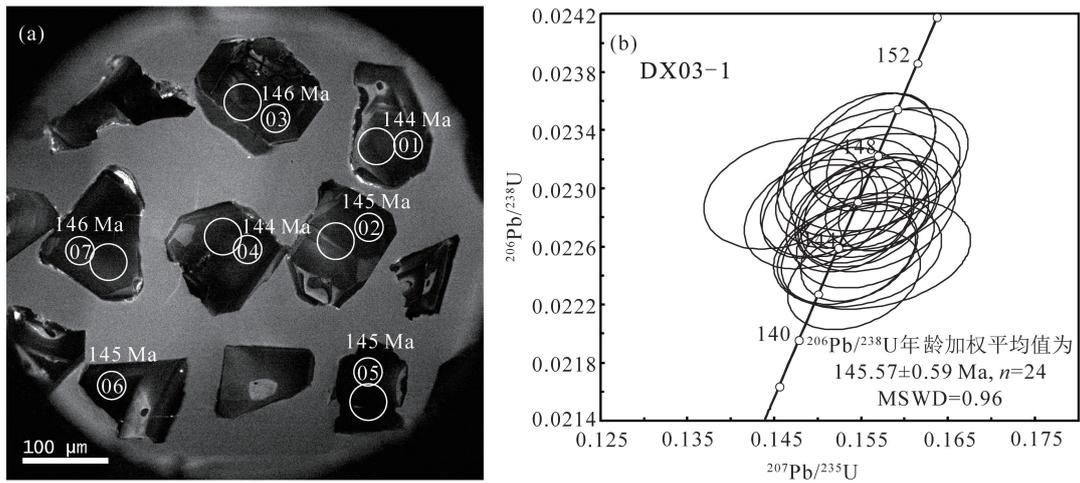


图 4 兰家营子辉长闪长岩部分锆石阴极发光 (CL) 图像 (a) 和年龄谱和图 (b) (小圆圈为 U-Pb 定年位置,大圆圈为 Hf 同位素分析位置)

Fig. 4 Representative CL images (a) and U-Pb concordia diagram (b) of zircons from the Lanjiayingzi gabbrodiorite

表3 兰家营子辉长闪长岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果
Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic data of the Lanjiayingzi gabbrodiorite

测点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM1}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
DX03-1-01	144	0.025142	0.000640	0.282888	0.000019	4.1	7.2	0.7	512	-0.98
DX03-1-02	145	0.021711	0.000557	0.282890	0.000016	4.2	7.3	0.6	508	-0.98
DX03-1-03	146	0.017745	0.000402	0.282911	0.000016	4.9	8.1	0.6	476	-0.99
DX03-1-04	144	0.036712	0.000868	0.282895	0.000019	4.3	7.4	0.7	505	-0.97
DX03-1-05	145	0.066984	0.001591	0.282905	0.000020	4.7	7.7	0.7	500	-0.95
DX03-1-07	146	0.022079	0.000523	0.282887	0.000017	4.1	7.2	0.6	512	-0.98
DX03-1-08	146	0.020129	0.000501	0.282886	0.000015	4.0	7.2	0.5	512	-0.98
DX03-1-09	148	0.021605	0.000490	0.282877	0.000017	3.7	6.9	0.6	525	-0.99
DX03-1-10	146	0.031634	0.000729	0.282886	0.000021	4.0	7.2	0.8	515	-0.98
DX03-1-11	148	0.053899	0.001231	0.282904	0.000019	4.7	7.8	0.7	497	-0.96
DX03-1-12	143	0.032645	0.000768	0.282902	0.000017	4.6	7.7	0.6	494	-0.98
DX03-1-13	146	0.027665	0.000595	0.282911	0.000019	4.9	8.1	0.7	479	-0.98
DX03-1-14	146	0.053093	0.001158	0.282896	0.000018	4.4	7.5	0.6	507	-0.97
DX03-1-15	146	0.033945	0.000623	0.282898	0.000024	4.5	7.6	0.9	497	-0.98
DX03-1-16	144	0.042239	0.000877	0.282923	0.000019	5.3	8.4	0.7	466	-0.97
DX03-1-17	144	0.031130	0.000635	0.282908	0.000026	4.8	7.9	0.9	483	-0.98
DX03-1-18	146	0.045799	0.000869	0.282938	0.000025	5.9	9.0	0.9	443	-0.97
DX03-1-19	147	0.015344	0.000297	0.282887	0.000021	4.1	7.3	0.7	509	-0.99
DX03-1-20	146	0.019434	0.000419	0.282877	0.000020	3.7	6.9	0.7	524	-0.99
DX03-1-22	147	0.040944	0.000848	0.282900	0.000021	4.5	7.7	0.8	497	-0.97
DX03-1-23	148	0.037534	0.000781	0.282914	0.000026	5.0	8.2	0.9	477	-0.98
DX03-1-24	144	0.056441	0.001153	0.282838	0.000029	2.3	5.4	1.0	590	-0.97

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 同位素年龄

测年样品采自兰家营子岩体中部,地理坐标为北纬 43°40′45.6″、东经 117°56′23.3″(图 2)。所测锆石均为无色-浅褐色,晶体为短柱状和粒状晶体,长宽比介于 1:1~2:1 之间,粒径为 0.1~0.2 mm。在阴极发光图像(图 4-a)上,锆石阴极发光特征较暗,可能与锆石中 Th 和 U 含量较高有关^[56](表 1);发育较宽的韵律环带,显示基性岩浆岩中锆石的特征;锆石的 Th/U 值多介于 0.56~1.83 之间,反映典型岩浆成因的特征^[57-58]。24 个分析点均分布在谐和线上,锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 145.6±0.6 Ma($n=24$),MSWD=0.96(1 σ)(图 4-b),表明岩体形成于早白垩世早期。

3.2 地球化学特征

兰家营子辉长闪长岩的主量、微量和稀土元素分析结果见表 2。

3.2.1 主量元素

从表 2 可以看出,辉长闪长岩的 SiO₂ 含量为 53.38%~54.45%,MgO 和 TFe₂O₃ 含量分别为 5.44%~5.73%和 7.53%~8.33%,Mg[#]值介于 36.96~38.24 之间。岩石的 Al₂O₃ 含量为 17.95%~18.49%,CaO 含量为 7.59%~7.81%,Na₂O 含量为 3.85%~4.05%,K₂O 含量为 1.34%~1.43%,A/CNK 值为 0.82~0.85,属于偏铝质岩石。在侵入岩 TAS 图解(图 5-a)中,样品点均落在辉长岩和闪长岩之间,属于偏基性岩石;在 SiO₂-K₂O 图解中,显示钙碱性系列岩浆岩的特征(图 5-b)。

3.2.2 微量和稀土元素

辉石闪长岩的稀土元素总量(ΣREE)为 88.76×10⁻⁶~136.21×10⁻⁶, (La/Yb)_N 值在 7.56~18.64 之间。在稀土元素配分图中,表现为轻稀土元素相对富集,重稀土元素相对平坦的右倾型特征(图 6-a),没有或显示轻微的正 Eu 异常($\delta\text{Eu}=1.13\sim1.24$)。微量元素表现为相对富集 Ba、Sr 等大离子亲石元

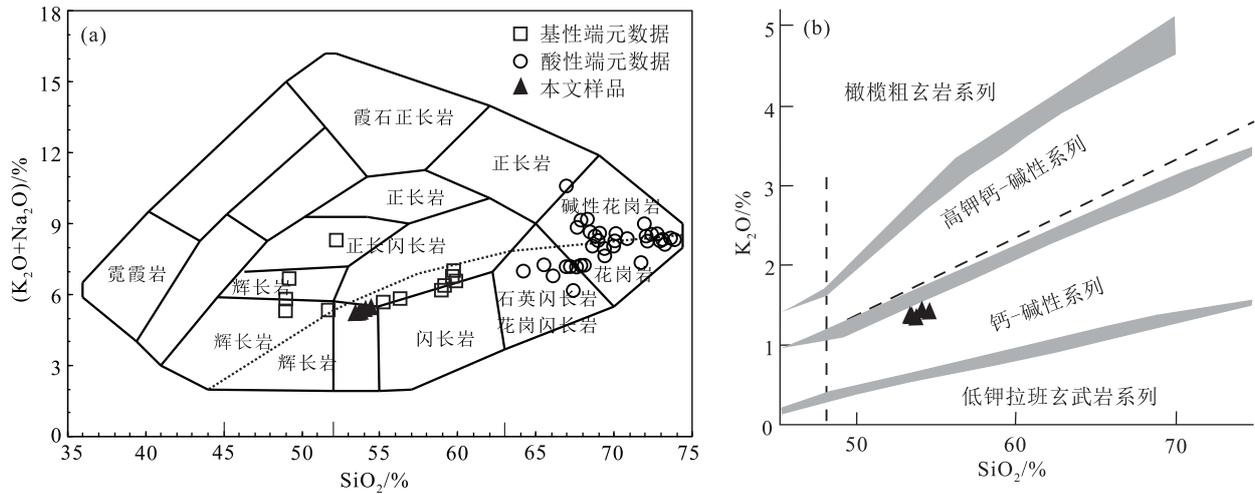


图 5 大兴安岭南段早白垩世早期侵入岩 TAS 图解^[62-63](a, 数据据参考文献[8, 12, 26, 59-61]) 和兰家营子辉长闪长岩 SiO₂-K₂O 图解^[64](b)

Fig. 5 TAS diagram of Early Cretaceous intrusive in Southern Great Khingan Range (a) and SiO₂-K₂O diagram of the Lanjiayingzi gabbrodiorite (b)

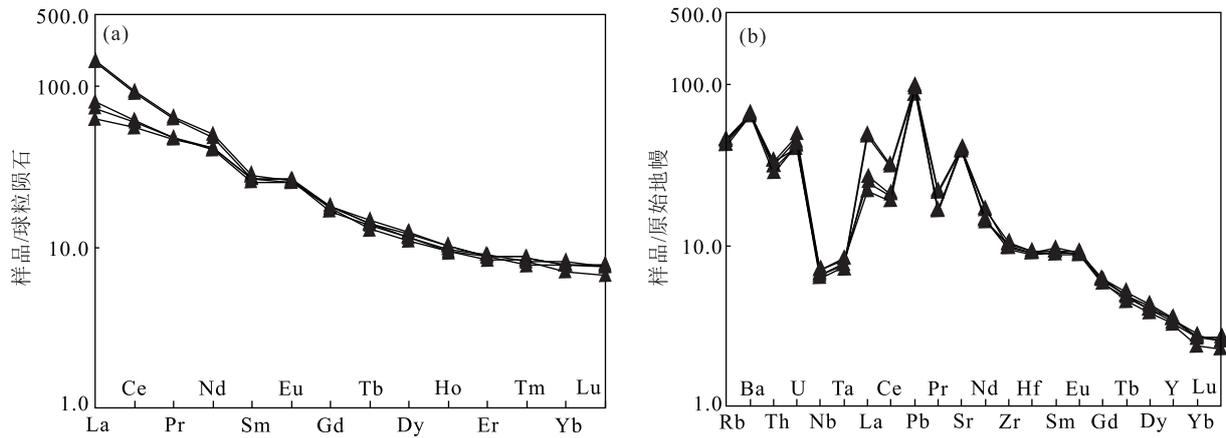


图 6 辉长闪长岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图^[65](a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图^[66](b)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) of the Lanjiayingzi gabbrodiorite

素, 亏损 Nb、Ta 等高场强元素的特征(图 6-b)。

3.3 锆石 Hf 同位素特征

兰家营子岩体锆石 Hf 同位素分析测试结果见表 3。从表 3 可以看出, 锆石 Hf 同位素组成均一, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值介于 0.282838~0.282923 之间, 对应的 ε_{Hf}(t) 值介于 +5.4~+9.0 之间, 加权平均值为 7.52±0.25。锆石的亏损地幔模式年龄(T_{DM})介于 443~590 Ma 之间, 与兴蒙造山带东段显生宙以来的岩浆岩锆石 Hf 同位素组成特征类似^[67](图 7)。

4 讨论

4.1 兰家营子辉长闪长岩成因

兰家营子辉长闪长岩主要由斜长石和辉石组成, SiO₂ 含量介于 53.38%~54.45% 之间, 属于中基性岩浆岩(图 3-b)。对于中基性岩浆岩的成因, 一般有如下几种观点: 玄武质岩石部分熔融、幔源原始岩浆的同化混染和分离结晶作用(AFC)或岩浆混合作用^[68-69]。宏观上, 兰家营子辉长闪长岩的岩

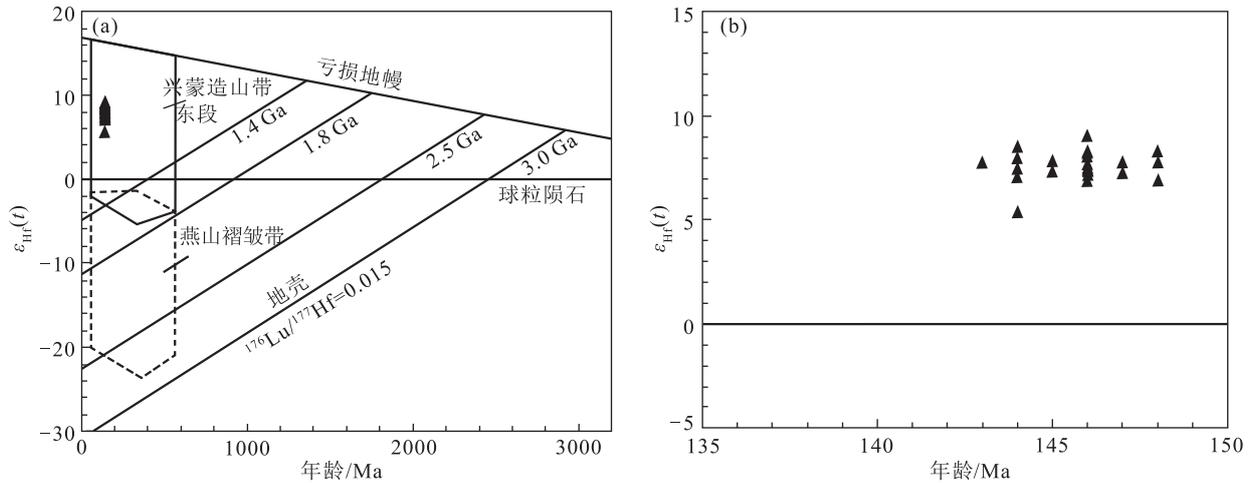


图7 兰家营子辉长闪长岩锆石 Hf 同位素演化图解

(图 a 中兴蒙造山带东段和燕山褶皱带岩浆岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 范围据参考文献[67];图 b 为图 a 的局部放大)

Fig. 7 Zircon Hf isotope data evolution diagrams of the Lanjiayingzi gabbrodiorite

性较均一,缺少指示岩浆混合作用的暗色微粒包体;微观上,作为主要造岩矿物的斜长石发育成分环带,单斜辉石发育包橄结构,指示岩石是由更基性的岩浆经历基性斜长石、橄榄石等矿物分离结晶作用的产物,而非岩浆混合作用成因。同时,橄榄石和基性斜长石的存在指示原始岩浆的成分应为玄武质,代表其应为地幔部分熔融的产物。

从地球化学特征看,岩石相对富集 Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素(LILE),亏损 Nb、Ta 等高场强元素(HFSE),具有俯冲带岩浆岩的地球化学特征^[70-71],指示岩浆形成过程中可能受到地壳混染,或者地幔源区遭受了俯冲板片熔流体的交代作用。如果岩浆在形成过程中受到地壳的混染,在岩石学特征上,辉长闪长岩中可能含有长英质捕虏体,而在岩体中目前未见捕虏体;在地球化学特征上,岩浆表现为相对富集 Zr 和 Hf 元素^[72-73]和相对亏损 Eu 元素的特征,但在本文的原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 6-b)上,辉长闪长岩并未表现出明显 Zr 和 Hf 元素的正异常,也不存在负 Eu 异常,甚至表现为轻微的正 Eu 异常,也暗示其受到地壳混染的可能性很小。从模式年龄(图 7)看,锆石的 T_{DM} 介于 443~590 Ma 之间,与古亚洲洋俯冲相关的大多数岩浆岩年龄一致。前人研究表明,古亚洲洋在晚二叠世—早三叠世已经闭合。结合岩石地球化学特征,笔者认为,兰家营子岩体的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值反映的是古亚洲洋闭合之前或过程中遭受流体交代

作用形成的岩石圈地幔在早白垩世发生部分熔融的结果。

大地构造位置上,研究区位于中亚造山带东南部(图 1-a)。在古生代该区经历了古亚洲洋的持续俯冲增生,发育多期与俯冲相关的岩浆活动^[40,74-78]。考虑到岩体的岩石地球化学和锆石 Hf 同位素组成特征,笔者认为,兰家营子辉长闪长岩源于古生代受俯冲流体交代形成的亏损岩石圈地幔的部分熔融,而后经历了基性斜长石和橄榄石分离结晶作用。

4.2 大兴安岭南段早白垩世早期岩浆岩组合及构造环境

除兰家营子辉长闪长岩外,大兴安岭南段地区早白垩世早期还广泛发育辉长岩、石英闪长岩、碱长花岗岩、正长花岗岩、二长花岗岩、花岗斑岩等侵入岩^[8,26,40,59-61],以及玄武质安山岩、英安岩、流纹岩等火山岩^[32,35-36]。在 TAS 图解(图 5-a)中,显示类似双峰式岩石组合的特征^[79],其中,敖伦敖包二长花岗岩、龙头山碱长花岗岩、敖包吐正长花岗岩等具有 A 型花岗岩的地球化学特征^[8,26,59]。

双峰式岩浆活动可形成于大陆裂谷、后碰撞、弧后盆地等构造环境^[80-81],但不同构造环境下,双峰式岩浆岩具有不同的岩石组合和地球化学特征。首先,大兴安岭南段早白垩世不存在海相沉积环境,可以排除弧后盆地的可能。对于大陆裂谷环境而言,基性端元通常包括富碱质的拉斑-碱性玄武

岩、 SiO_2 不饱和的碧玄岩、霞石岩和超钾质的白榴岩、碳酸岩等;酸性端元包括偏碱质的粗面岩、响岩、碱性流纹岩、花岗岩等^[80]。大兴安岭南段早白垩世早期双峰式组合的基性端元包括玄武质安山岩、辉长闪长岩等,属于钙碱性系列岩石;基性端元包括流纹岩、碱长花岗岩、二长花岗岩等,属于钙碱性-钾玄岩系列岩石,与典型的裂谷环境下双峰式组合不同,且本文辉长闪长岩的地球化学特征表明其形成于岩石圈地幔的部分熔融,而裂谷环境下双峰式火山岩的基性端元具有软流圈地幔的特征,故也可以排除它们属于大陆裂谷环境下的双峰式岩浆活动。后碰撞环境岩浆岩的基性端元表现为相对富集 HFSE 与 LREE, Th/Ta 值高(大于5),相对亏损 Nb、Ti 等元素,与本文辉长闪长岩的地球化学特征相似;酸性端元具有过碱性花岗岩、碱性花岗岩与钙碱性花岗岩共生,且具有与 A 型花岗岩相似的地球化学特征的特点^[80],也与该地区早白垩世花岗岩岩石组合及地球化学特征相似^[8, 26, 32, 36]。因此,大兴安岭南段在早白垩世早期的双峰式岩浆活动可能与后碰撞的构造环境有关。

前人研究表明,蒙古-鄂霍茨克洋闭合的时间在中一晚侏罗世^[82-87],该洋盆的闭合造成中国东北的碰撞造山和隆升^[13]。在时间上,辉长闪长岩的形成时间稍晚于鄂霍茨克洋的闭合时间;在空间上,大兴安岭南段早白垩世早期岩浆活动呈北东东向展布(图1-b),平行于蒙古-鄂霍茨克洋缝合带,且与太平洋俯冲带呈大角度斜交。综上所述,笔者认为,大兴安岭南段早白垩世早期岩浆活动与蒙古-鄂霍茨克洋闭合引起的碰撞后伸展背景有关。

5 结 论

(1)大兴安岭南段兰家营子辉长闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为 145.6 ± 0.6 Ma,属于早白垩世早期侵入体。

(2)辉长闪长岩起源于受俯冲流体交代的亏损岩石圈地幔,并经历了橄榄石和斜长石的分离结晶作用。

(3)大兴安岭南段早白垩世早期岩浆岩具有双峰式特征,可能形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合引起的碰撞后伸展环境。

致谢:写作过程中得到中国地质科学院地质研

究所张进研究员和曲军峰副研究员的指导和帮助,分析测试得到武汉上谱分析科技有限公司和中国地质科学院矿产资源研究所实验室老师的帮助,审稿专家对本文也提出了宝贵的意见,在此一并表示由衷的感谢。

参考文献

- [1] Windley B F, Xiao W J. Ridge subduction and slab windows in the Central Asian Orogenic Belt: tectonic implications for the evolution of an accretionary orogen[J]. *Gondwana Res.*, 2018, 61: 73-87.
- [2] 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): 1-30.
- [3] 李鹏川,李世超,刘正宏,等.内蒙古林西地区满克头鄂博组火山岩形成时代及构造环境[J]. *世界地质*, 2016, 35(1): 77-88.
- [4] 王建国,和钟铨,许文良.大兴安岭南段钠闪石流纹岩的岩石成因:年代学和地球化学证据[J]. *岩石学报*, 2013, 29(3): 853-863.
- [5] 覃锋,刘建明,曾庆栋,等.内蒙古克什克腾旗小东沟斑岩型铜矿床成岩成矿机制探讨[J]. *岩石学报*, 2009, 25(12): 3357-3368.
- [6] 刘翼飞.内蒙古克什克腾旗拜仁达坝银多金属矿床成因研究[D]. 中国地质科学院硕士学位论文, 2009.
- [7] 杨奇获,郭磊,王涛,等.大兴安岭中南段甘珠尔庙地区晚中生代两期花岗岩的时代、成因、物源及其构造背景[J]. *岩石学报*, 2014, 30(7): 1961-1981.
- [8] 刘伟,潘小菲,谢烈文,等.大兴安岭南段林西地区花岗岩类的源岩:地壳生长的时代和方式[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 441-460.
- [9] 江思宏,梁清玲,刘翼飞,等.内蒙古大井矿区及外围岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及其对成矿时间的约束[J]. *岩石学报*, 2012, 28(2): 495-513.
- [10] 王迪,赵国春,苏尚国,等.大兴安岭南段晚中生代侵入岩时空分布及主脊与东坡岩体特征对比[J]. *现代地质*, 2020, 34(3): 466-482.
- [11] 李雪菲,赵庆英,王晓志,等.内蒙古扎鲁特地区毛伊勒吐岩体形成时代及构造环境[J]. *地质与资源*, 2012, 21(2): 194-199.
- [12] Li S, Wilde A, Wang T, et al. Incremental growth and origin of the Cretaceous Renjiayingzi pluton, southern Inner Mongolia, China: Evidence from structure, geochemistry and geochronology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 75: 226-242.
- [13] 李锦轶,刘建峰,曲军峰,等.中国东北地区主要地质特征和地壳构造格架[J]. *岩石学报*, 2019, 35(10): 2989-3016.
- [14] 许文良,王枫,裴福萍,等.中国东北中生代构造体制与区域成矿背景:来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J]. *岩石学报*, 2013, 29(2): 339-353.
- [15] 刘永江.东北地区晚古生代区域构造演化[J]. *中国地质*, 2010, 4: 943-951.
- [16] 徐备,王志伟,张立杨,等.兴安陆内造山带[J]. *岩石学报*, 2018, 34(10): 2819-2844.
- [17] 祝洪臣,张炯飞,权恒.大兴安岭中生代两期成岩成矿作用的元素、同位素特征及其形成环境[J]. *吉林大学学报*, 2005, 35(4):

- 436-442.
- [18] 潘小菲, 郭利军, 王硕, 等. 内蒙古维拉斯托铜锌矿床的白云母 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 年龄探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28(5): 473-479.
- [19] 邵积东, 王守光, 赵文涛, 等. 大兴安岭地区成矿地质特征及找矿前景分析[J]. 地质与资源, 2007, (4): 252-262.
- [20] 曾庆栋, 刘建明, 褚少雄, 等. 大兴安岭南段多金属矿成矿作用和找矿潜力[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(4): 1100-1123.
- [21] Zhang J H, Ge W C, Wu F Y, et al. Large-scale Early Cretaceous volcanic events in the northern Great Xing'an Range, Northeastern China[J]. *Lithos*, 2008, 102: 138-157.
- [22] 赵辉, 李舳, 王涛, 等. 大兴安岭南段黄岗梁地区早白垩世岩浆作用的年代, 成因及其构造意义[J]. 地质通报, 2015, 34(12): 2203-2218.
- [23] Zeng Q D, Liu J M, Chu S X, et al. Mesozoic molybdenum deposits in the East Xingmeng orogenic belt, northeast China: characteristics and tectonic setting[J]. *International geology review*, 2012, 54(16): 1843-1869.
- [24] 葛文春, 林强, 孙德有, 等. 大兴安岭中生代玄武岩的地球化学特征: 壳幔相互作用的证据[J]. 岩石学报, 1999, 15(3): 396-407.
- [25] 林强, 葛文春, 孙德有, 等. 东北地区中生代火山岩的大地构造意义[J]. 地质科学, 1998, 33(2): 129-139.
- [26] 姚百赫, 来林, 徐文坦, 等. 内蒙古敖伦坎包早白垩世 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 地质学刊, 2018, 42(2): 264-276.
- [27] 吴福元, 孙德有, 林强. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生[J]. 岩石学报, 1999, 15(2): 181-189.
- [28] 吴福元, 孙德有. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J]. 长春科技大学学报, 2000, 4(1): 313-318.
- [29] Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(1/2): 103-119.
- [30] 程银行, 刘永顺, 滕学建, 等. 内蒙古莫合尔图中—晚侏罗世火山岩年代学、地球化学研究及其意义[J]. 地质学报, 2013, 87(7): 943-956.
- [31] 陈志广, 张连昌, 周新华, 等. 满洲里新右旗火山岩剖面年代学和地球化学特征[J]. 岩石学报, 2006, 22(12): 2971-2986.
- [32] 郝彬, 宋江, 李朝柱, 等. 赤峰地区晚中生代火山岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(6): 1261-1274.
- [33] Wang F, Zhou X H, Zhang L C, et al. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an Range (NE China): Timing and implications for the dynamic setting of NE Asia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 251(1/2): 179-198.
- [34] 张鹏, 和钟铎, 隋振民, 等. 内蒙古索伦地区花岗斑岩岩石成因及构造背景[J]. 世界地质, 2019, 38(1): 46-57.
- [35] 王春林, 孟明亮, 鲁孝军, 等. 内蒙古多伦晚中生代酸性火山岩岩石地球化学特征及构造环境分析[J]. 地质与勘探, 2018, 5(10): 988-1000.
- [36] 郭锋, 范蔚茗, 王岳军, 等. 大兴安岭南段晚中生代双峰式火山作用[J]. 岩石学报, 2001, 17(1): 161-168.
- [37] 葛文春, 林强, 孙德有, 等. 大兴安岭中生代两类流纹岩成因的地球化学研究[J]. 地球科学, 2000, 25(2): 172-178.
- [38] 葛文春, 吴福元, 周长勇, 等. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 749-762.
- [39] 李益龙. 华北-西伯利亚板块对接带早白垩纪的裂解: 来自西拉木伦断裂带中性岩墙群的锆石 U-Pb 年龄及地球化学数据[J]. 中国地质大学学报, 2010, 35(6): 921-932.
- [40] 李舳. 北山—内蒙古地区三叠纪花岗岩及其构造意义[D]. 中国地质科学院博士学位论文, 2013.
- [41] 王成文, 金巍, 张兴洲, 等. 东北及邻区晚古生代大地构造属性新认识[J]. 地层学杂志, 2008, 2: 119-136.
- [42] Xu B, Charvet J, Chen Y, et al. Middle Paleozoic Convergent Orogenic Belts In Western Inner Mongolia (China): Framework, Kinematics, Geochronology And Implications For Tectonic Evolution Of The Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1342-1364.
- [43] Jian P, Liu D, Kröner A, et al. Time scale of an early to mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China: Implications for continental growth[J]. *Lithos*, 2008, 101(3/4): 233-259.
- [44] Li S, Wilde S A, Wang T, et al. Latest Early Permian granitic magmatism in southern Inner Mongolia, China: Implications for the tectonic evolution of the southeastern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 2016, 29(1): 168-180.
- [45] Jian P, Liu D Y, Kröner A, et al. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia[J]. *Lithos*, 2010, 118: 169-190.
- [46] Xiao W, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 2003, 22(6): 288-308.
- [47] Zhang W, Wu T, Zheng R, et al. Post-collisional Southeastern Beishan granites: Geochemistry, geochronology, Sr-Nd-Hf isotopes and their implications for tectonic evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 58: 51-63.
- [48] 王瑜, 李春风, 陈洪洲. 中国东北地区新生代火山活动的构造背景[J]. 地质论评, 1999, 45(增): 180-189.
- [49] 李锦铭, 高立明, 孙桂华, 等. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J]. 岩石学报, 2007, (3): 565-582.
- [50] 刘建峰, 迟效国, 张兴洲, 等. 内蒙古西乌旗南部石炭纪石英闪长岩地球化学特征及其构造意义[J]. 地质学报, 2009, 83(3): 365-376.
- [51] 刘建峰, 迟效国, 赵芝, 等. 内蒙古巴林右旗建设屯埃达克岩锆石 U-Pb 年龄及成因讨论[J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 827-839.
- [52] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [53] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1535-1546.
- [54] Ludwig K R. *Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*[M]. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, California, 2003.
- [55] 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的

- 分析方法及地质应用[J].岩石学报,2007,(10):2595-2604.
- [56] 吴元保,郑永飞.锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J].科学通报,2004,(16):1589-1604.
- [57] Koschek G. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon[J]. Journal of Microscopy, 1993, 171(3): 223-232.
- [58] Belousova E, Griffin W, O' Reilly S, et al. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143(5): 602-622.
- [59] Yuan L L, Zhang X H, Yang Z L. Early Cretaceous gabbro-granite complex from central Inner Mongolia: Insights into initial rifting and crust-mantle interaction in the northern China-Mongolia basin-range tract[J]. Lithos, 2019, 324/325: 859-876.
- [60] 刘峰岩, 和钟铎, 高龙飞, 等. 内蒙古索伦地区黄土达坂花岗岩形成时代、地球化学特征及构造背景[J]. 世界地质, 2018, 37(3): 761-776.
- [61] 龙舟, 来林, 张学斌, 等. 内蒙古苏尼特右旗白垩纪 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 地质与勘探, 2017, 53(6): 1115-1128.
- [62] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock System[J]. Earth Science Reviews, 1994, 37: 215-224.
- [63] Irvinn T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rock[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1971, 8: 523-548.
- [64] Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 1989, 22(4): 247-263.
- [65] Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies [C]//Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [66] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [67] Yang J H, Wu F Y, Shao J A, et al. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 246(3/4): 336-352.
- [68] 豆孝芳, 陈鑫, 郑有业, 等. 西藏班戈寒武纪辉长闪长岩体的发现及其构造意义[J]. 地球科学, 2020, 45(6): 2091-2102.
- [69] 董春艳, 王晨, 颜强, 等. 冀东新太古代晚期界岭口闪长岩成因: U-Pb-Nd-Hf-O 同位素研究[J]. 岩石学报, 2018, 34(9): 2793-2810.
- [70] Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1973, 19(2): 290-300.
- [71] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 1977, 20: 325-343.
- [72] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [C]//Holland H D, Turekian K K. Treatise on Geochemistry, 2003, 3: 1-64.
- [73] Zhao J H, Zhou M F. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): Implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle[J]. Precambrian Research, 2007, 152(1/2): 27-47.
- [74] 刘建峰. 内蒙古林西—东乌旗地区晚古生代岩浆作用及其对区域构造演化的制约[D]. 吉林大学博士学位论文, 2009.
- [75] 刘建峰, 李锦轶, 迟效国, 等. 内蒙古东南部早三叠世花岗岩带岩石地球化学特征及其构造环境[J]. 地质学报, 2014, 88(9): 1677-1690.
- [76] 鲍庆中, 张长捷, 吴之理, 等. 内蒙古白音高勒地区石炭纪石英闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及其意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(1): 15-23.
- [77] 鲍庆中, 张长捷, 吴之理, 等. 内蒙古东南部晚古生代裂谷区花岗岩质岩石锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 2007, 34(5): 790-798.
- [78] 陈斌, 赵国春. 内蒙古苏尼特左旗南两类花岗岩同位素年代学及其构造意义[J]. 地质论评, 2001, 47(4): 361-367.
- [79] Daly R A. The geology of Ascension Island [J]. Proc. Amer. Acad. Arts Sci., 1925, 60: 180.
- [80] 王焰, 钱青, 刘良, 等. 不同构造环境中双峰式火山岩的主要特征[J]. 岩石学报, 2000, (2): 169-173.
- [81] 邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 等. 火成岩组合与构造环境: 讨论[J]. 高校地质学报, 2007, (3): 392-402.
- [82] Ringwood A E. Slab-mantle interactions: Petrogenesis of intraplate magmas and structure of the upper mantle [J]. Chemical Geology, 1990, 82: 187-207.
- [83] Sorokin A A, Sorokin A P, Ponomarchuk V A, et al. The age and geochemistry of volcanic rocks on the eastern flank of the Umlekan-Ogodzha volcanoplutonic belt (Amur region) [J]. Russian Geology and Geophysics, 2010, 51(4): 369-379.
- [84] 李锦轶. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识[J]. 地质论评, 1998, 44(4): 339-347.
- [85] 李锦轶, 张进, 杨天南, 等. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(4): 584-605.
- [86] 李锦轶, 曲军峰, 张进, 等. 中国北方造山区显生宙地质历史重建与成矿地质背景研究进展[J]. 地质通报, 2013, 32(2/3): 207-219.
- [87] 黄始琪, 董树文, 胡健民, 等. 蒙古-鄂霍次克构造带的形成与演化[J]. 地质学报, 2016, 90(9): 2192-2205.
- ①中国地质调查局发展研究中心, 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院等. 中华人民共和国 1: 250 万地质图. 2002.
- ②内蒙古自治区地质调查局. 林西县刘家营子地区 1: 20 万地质图. 1968.