

大兴安岭南段黄岗梁地区早白垩世岩浆作用的时代、成因及其构造意义

赵 辉^{1,2}, 李 舒^{2,3}, 王 涛^{2,4}, 王文志¹, 焦永艳¹

ZHAO Hui^{1,2}, LI Shu^{2,3}, WANG Tao^{2,4}, WANG Wenzhi¹, JIAO Yongyan¹

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

3. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011;

4. 三维地质调查研究中心/中国地质调查局, 北京 100037

1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

4. 3D Geological Research Center/China Geological Survey, Beijing 100037, China

摘要: 大兴安岭南段黄岗梁地区早白垩世碎斑熔岩和钾长花岗岩代表大兴安岭南段最广泛的一次岩浆活动产物,二者LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄都为 137.7 ± 1.2 Ma。该地区岩石大都具有高硅、钾,贫钙、镁,低铝的特点,体现了高度演化的高钾钙碱性-碱性系列特点;铝饱和指数显示其为准铝质-弱过铝质花岗岩。岩石稀土元素总量为 $116.98 \times 10^{-6} \sim 350.51 \times 10^{-6}$,具有强烈的负Eu异常,富集大离子亲石元素(如Rb、Ba、Th、U等)及高场强元素(如Nd、Zr、Hf等),亏损Ba、Sr、P、Ti、Nb等强不相容元素,显示出高分异I型花岗岩的特征。研究区早白垩世岩浆岩具有较高的全岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($-0.8 \sim +0.9$)和正的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($+1.9 \sim +18.3$),以及年轻的Nd模式年龄(993~855 Ma)和Hf模式年龄(888~561 Ma),表明其来源于新生的陆壳,可能有少量古老陆壳物质的参与。综合区域地质资料及大兴安岭南段的岩浆演化特征,这些早白垩世岩浆作用应形成于区域性伸展的构造背景,主体可能与蒙古-鄂霍茨克洋构造体系下的后造山伸展垮塌有关。

关键词: 大兴安岭南段; LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄; 岩浆演化; 早白垩世; 伸展

中图分类号:P534.53; P597'.3 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2015)12-2203-16

Zhao H, Li S, Wang T, Wang W Z, Jiao Y Y. Age, petrogenesis and tectonic implications of the Early Cretaceous magmatism in the Huanggangliang area, southern Da Hinggan Mountains. Geological Bulletin of China, 2015, 34(12):2203-2218

Abstract: The Early Cretaceous porphyroclastic lava and K-feldspar granite in the Huanggangliang area of southern Da Hinggan Mountains both yielded LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of 137.7 ± 1.2 Ma, which represent a widespread magmatic episode in the southern Da Hinggan Mountains. They are characterized by high content of SiO_2 , K_2O and low content of CaO , MgO , and Al_2O_3 indicating high evolution magma. ASI values of the studied rocks are from 1.06 to 1.33, suggesting that they are metaluminous-weakly peraluminous, and belong to the high-K calc-alkaline to alkaline series. The total rare earth elements (ΣREE) vary in the range of 116.98×10^{-6} to 350.51×10^{-6} , with strong negative Eu anomalies. The samples are enriched in large ion lithophile elements (LILE, e.g., Rb, Ba, Th, U) and high field strength elements (HFSEs, e.g., Nd, Zr, Hf), but depleted in incompatible elements, such as Ba, Sr, P, Ti and Nb. These characteristics indicate that they are mainly highly fractionated I-type granites. The Early Cretaceous magmatism

收稿日期:2015-01-20; 修订日期:2015-06-25

资助项目:国家自然科学基金项目(批准号:41402194)、中国地质调查局项目(编号:12120113013700、12120113013800)和中国博士后科学基金(编号:2015T81073)

作者简介:赵辉(1990-),男,在读硕士生,矿产普查与勘探专业。E-mail: zhaohuicugb@163.com

通讯作者:李舒(1983-),男,博士,助理研究员,从事花岗岩与造山带研究。E-mail: lishan428@163.com

has slightly high whole-rock $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values (-0.8 to +0.9) and positive zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (+1.9 to +18.3), with the young Nd modal ages (TDM=993–855Ma) and Hf modal ages (TDM2=888–561Ma), indicating that they were probably derived from juvenile crust, with minor old crustal materials. In view of the regional geology and the magmatic evolution in the southern Da Hinggan Mountains, the authors hold that these Early Cretaceous magmatic activities took place in a regional extensional setting. They were possibly related to the post-orogenic extension under the Mongolia–Okhotsk tectonic regime.

Key words: Southern Da Hinggan Mountains; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; magma evolution; Early Cretaceous; Extension

中亚造山带以显生宙新生壳源花岗岩发育为显著特征。位于中亚造山带南缘的大兴安岭南段地区记录了古亚洲洋闭合和中亚造山带的最终形成,以及蒙古–鄂霍茨克洋的俯冲和叠加改造作用^[1–5]。大兴安岭南段地区以发育大规模NNE向展布的晚侏罗世—早白垩世岩浆岩为特征,这些岩浆岩是构造运动很好的深部岩浆响应,其成因和地质动力学吸引了广泛关注^[1, 6–8]。晚中生代的岩浆作用叠加在EW—NE向古生代构造岩浆之上,同时伴随一系列强烈的构造作用、成矿大爆发及大型盆地的形成,使得该地区自晚中生代以来呈现出复杂的地质构造格局^[9–13]。

内蒙古索伦–西拉木伦缝合带记录了古亚洲洋的最后缝合,自晚三叠世以来进入板内演化阶段^[9,14–17]。前人对该区古生代与俯冲–增生作用和三叠纪碰撞相关的构造岩浆活动研究较多,但对增生后板内晚中生代的岩浆作用研究较弱,制约了对该区构造岩浆演化的完整认识^[2–3,18],且大多数研究以找矿为目的,围绕容矿花岗岩和围岩开展工作^[19–25]。尽管该地区晚中生代花岗岩U–Pb年龄数据已有报道,但缺少对岩浆演化和成因的系统研究^[8]。研究区又处于西拉木伦河缝合带上,大面积早白垩世岩浆岩的发育,对于探讨该区板内岩浆的演化具有重要意义,并为揭示该区复杂的晚中生代构造演化提供有价值的参考。本文以内蒙古黄岗梁地区的岩浆岩为研究对象,通过锆石LA-ICP-MS定年、岩石学和地球化学研究,确定岩石类型,初步探讨花岗岩的成因及构造意义,对进一步开展大兴安岭南段中生代构造演化和岩浆活动研究具有重要意义。

1 区域地质背景

研究区位于内蒙古中部赤峰市林西县—克什克腾旗境内,西拉木伦河断裂以北,从南到北主要由南部造山带(也称白乃庙岛弧带)、索伦缝合带、北部造山带组成^[14–15,17,26](图1)。南部造山带和华北克拉通以赤峰断裂为界,主要以发育早—中古生代

俯冲杂岩(497~477Ma)和岛弧岩浆岩(488~438Ma)为特征^[3,26,28];北部造山带是一个北向的逆冲断裂带,主要由晚石炭世宝力道弧和相关的前寒武纪微陆块组成(如锡林郭勒变质杂岩)。古亚洲洋俯冲导致华北克拉通和西伯利亚克拉通碰撞,从而在二叠纪形成了索伦缝合带^[15–16,29–30],发育著名的索伦–西拉木伦蛇绿岩带,记录了古亚洲洋最终闭合和中亚造山带南部演化的终结位置,以及由板块汇聚所引发的一系列晚二叠世—早三叠世的构造岩浆事件,继而导致该地区晚三叠世以来后造山运动^[2,9,14]。该区陆壳在早侏罗世开始抬升,导致早侏罗世沉积物缺失。在中侏罗世晚期—晚侏罗世早期阶段,中国–蒙古陆块沿蒙古–鄂霍茨克带的碰撞,导致一些中生代盆地内发生NE—SW的逆冲断裂作用、地壳增厚作用和一些倒转构造^[11,31–32]。这些伸展事件包括裂谷盆地、碱性和过碱性花岗岩,以及一些晚侏罗世—早白垩世变质核杂岩,这可能与蒙古–鄂霍茨克带碰撞后的伸展坍塌有关,进而也受到环太平洋向西俯冲的影响^[31,33–36]。裂谷盆地从大量的火山喷发开始,在早白垩世达到顶峰^[6,11]。

区域地层以二叠系和陆相侏罗系最发育,其次还有少量陆相白垩系和新近纪玄武岩、第四系砂砾岩。研究区范围内岩浆作用强烈,晚古生代—晚中生代都有发育^[8,37]。侵入岩主要为燕山期,以花岗岩类为主。构造–岩浆作用的鼎盛时期,早白垩世花岗岩类主要侵入火山盆地边部的基底隆起区或与火山岩、次火山岩构成火山–深成杂岩体,以黑云母钾长花岗岩为主,常形成复式岩基或大岩株。花岗闪长岩–二长岩类分布局限,可与钾长花岗岩构成杂岩体^[38]。

2 岩相学特征

研究区位于内蒙古林西县和克什克腾旗之间,火山–侵入杂岩长约60km,最宽处约15km,出露面积较大,主体为花岗岩类,边部过渡为火山熔岩,受NE向右行剪切应力作用,沿断裂上升形成NE向岩浆岩带(图2),岩体侵入于古生代地层。

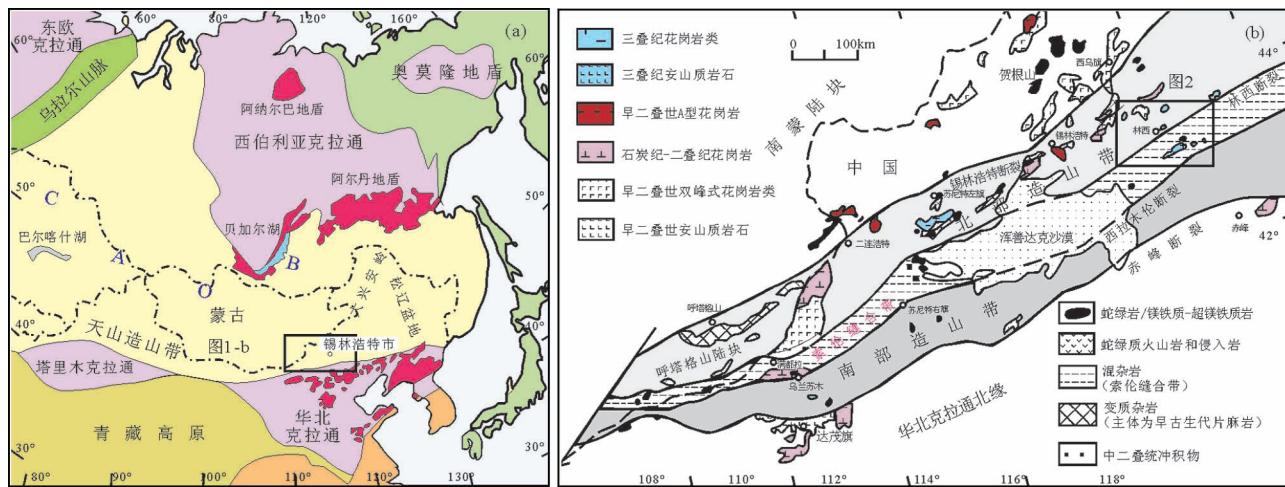


图1 大兴安岭南段及其邻区构造简图(据参考文献[14-15,27]修改)

Fig. 1 Sketch tectonic map of the southern Da Hinggan

Mountains and adjacent areas

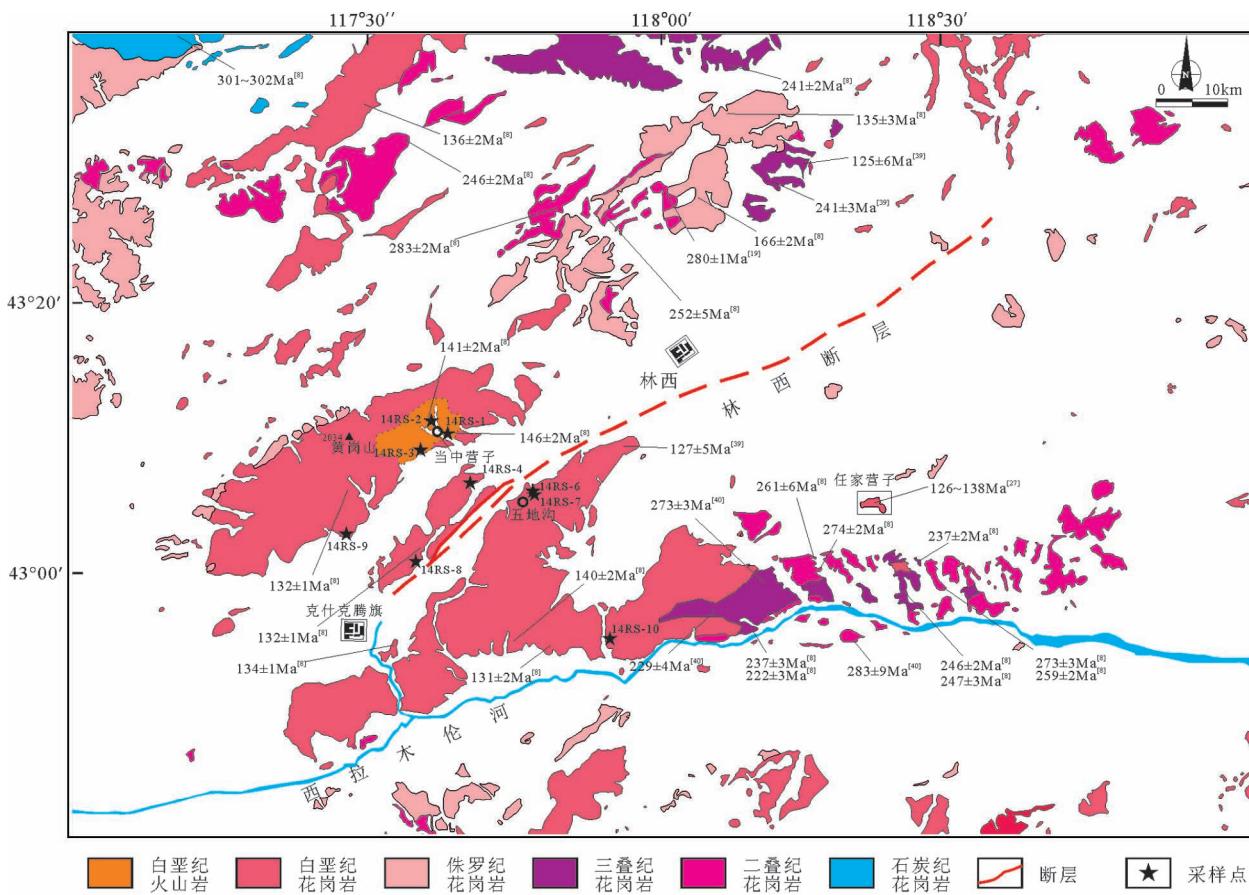


图2 大兴安岭南段林西地区花岗岩类及采样位置

(据参考文献[27]①②修改,花岗岩类)

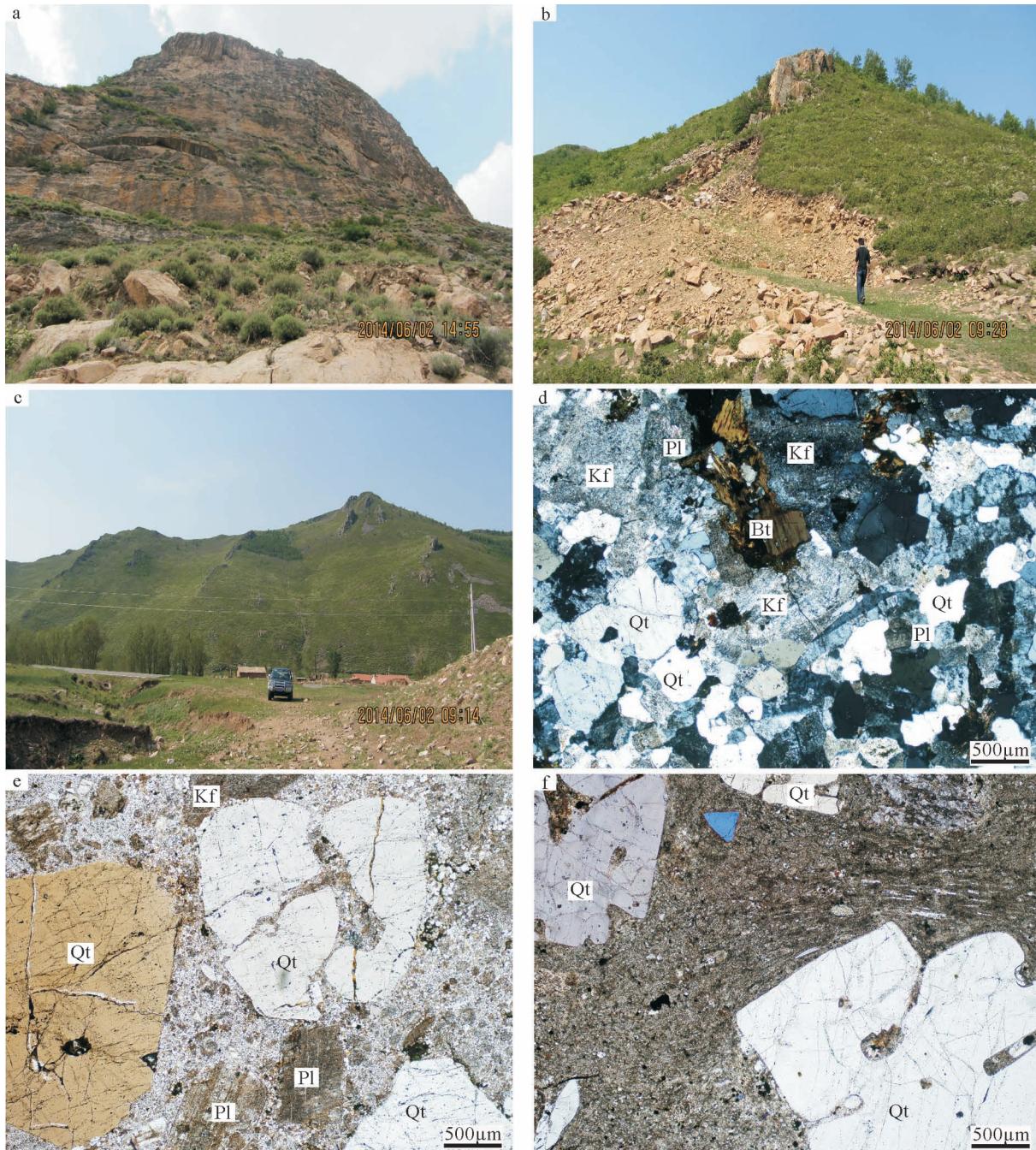
锆石U-Pb年龄数据据参考文献[8,19,27,39-40])

Fig. 2 Distribution of granitoids in the Linxi area
of southern Da Hinggan Mountains

黄岗梁火山-侵入杂岩的主要岩石类型为钾长花岗岩(图版 I-a),局部过渡为碎斑熔岩(图版 I-b,c),但两者的具体界线和范围有待进一步查明。钾长花岗岩样品较新鲜,未风化,新鲜面为肉红色,中粗粒花岗结构,块状构造,主要由石英(约35%)、钾长石(约50%)、斜长石(约15%)组成。钾长石具

有轻微的高岭土化,斜长石发生绢云母化。石英主要呈他形粒状,部分呈斑晶出现,发育少量的裂纹,粒度一般为0.5~1.0mm。钾长石粒度大小为0.5~1.0mm,矿物表面因绢云母化和高岭土化而略显浑浊,具较为明显的卡式双晶,部分斜长石也发生绢云母化。暗色矿物主要为黑云母(约2%),黑云母中

图版 I Plate I



a.钾长花岗岩(14RS-7);b.碎斑熔岩(14RS-2);c. 碎斑熔岩(14RS-1);d.钾长花岗岩(14RS-7);
e.碎斑熔岩(14RS-2);f.碎斑熔岩(14RS-1)。Qt-石英;Bt-黑云母;Kf-钾长石;Pl-斜长石

光率体主轴 Ng 为淡绿色, Np 为浅褐色(图版 I-d)。副矿物主要为锆石、磁铁矿、钛铁矿、磷灰石、榍石等。碎斑熔岩颜色较钾长花岗岩浅, 为浅肉红色, 具有熔岩和火山碎屑岩过渡的结构特征。以斑状结构为主, 块状构造, 斑晶主要为碎屑状、碎裂状石英、钾长石、斜长石, 黑云母斑晶较少, 碎斑矿物体积分数一般为 30%~50%。其中石英斑晶出现碎斑熔岩典型的碎而不散、散而不离、离而不远、整体可拼合的特点^[41](图版 I-e), 钾长石斑晶中可见具格子双晶的微斜长石, 斜长石斑晶中见聚片双晶, 钾长石、斜长石斑晶因发生强烈的高岭土化, 表面较脏。基质是长英质熔岩, 以显微粒状结构、靡细质结构为特征, 14RS-1 样品中局部可见流动构造(图版 I-f)。

3 测试方法

锆石 U-Pb 定年测试样品(14RS-2)采自克什克腾旗热水塘镇当中营子西北方向约 1.5km 处, 采样坐标为 N43° 31' 7.4"、E117° 37' 24.3"。样品(14RS-7)采自于克什克腾旗热水塘镇五地沟附近, 采样坐标为 N43°26'12.7"、E117°47'23.5"(图 2)。

锆石单矿物分离在河北廊坊诚信地质服务有限公司完成, 首先将测试岩石样品粉碎, 经常规重选和电磁选后, 在双目镜下挑选锆石。将完整的典型锆石颗粒置于 DEVCON 环氧树脂中, 待固结后抛磨, 使锆石内部充分暴露, 然后进行锆石显微(反射光和透射光)照相和阴极发光(CL)照相, 锆石的透射光、反射光和阴极发光照相均在北京离子探针中心完成。

锆石 U-Pb 定年测定在国立台湾大学地球科学系利用 LA-ICP-MS 按标准测定程序进行。分析仪器为 New Wave UP 213 型激光剥蚀系统和 Agilent 7500s ICP-MS, 激光束斑直径约为 30 μm, 频率为 4Hz。每个点的分析数据包括 60s 的空白信号及 70s 的样品信号, U-Pb 同位素测年采用 GJ-1 标准锆石作外标进行同位素分馏校正, 标准锆石 91500 和 PLS 锆石标样作为参考标样, 浓度计算采用 NIST NRM 610 作外标, ²⁹Si 作内标进行校正。数据处理和年龄计算成图采用 Glitter4.0^[42]和 Isoplot3.0^[43]软件完成。详细的分析方法和流程处理见 Chiu 等^[44]。

样品主量、微量元素和稀土元素分析测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。主量元

素分析使用 Philips PW2404 型 X 荧光光谱仪(XRF)完成, 分析偏差优于 1%; 稀土和微量元素采用 Finnigan MAT Element I 型高分辨率等离子体质谱仪(HR-ICP-MS)完成, 分析偏差多优于 3%, 测试方法和依据参照 DZ/T0223-2001 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法通则, 实验过程中温度为 20°C, 相对湿度为 30%。

4 测试结果

4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

用于测试的碎斑熔岩样品(14RS-2)和钾长花岗岩样品(14RS-7)中的锆石结晶较好, 晶形主要呈长柱状、短柱状或不规则状, 绝大多数锆石颗粒为浅黄色或无色透明, 颗粒多在 100~250 μm 之间, 长宽比为 2:1~4:1。阴极发光图像(图 3)显示, 大多数锆石均发育较清晰的岩浆振荡环带, 无核-幔结构, 无后期变质壳。碎斑熔岩的锆石 U 和 Th 含量分别为 72×10^{-6} ~ 479×10^{-6} 和 27×10^{-6} ~ 361×10^{-6} , Th/U 值变化于 0.29~0.75 之间, 平均为 0.42, 钾长花岗岩的锆石 U 和 Th 含量分别为 194×10^{-6} ~ 827×10^{-6} 和 76×10^{-6} ~ 299×10^{-6} , Th/U 值变化于 0.34~0.79 之间, 平均为 0.45, 两者的 Th/U 值均大于 0.4, 为典型岩浆成因的锆石^[45]。分别对样品 14RS-2 中的 25 颗锆石和样品 14RS-7 中的 24 颗锆石进行测试, 这些测点均落在谐和线上或其附近(图 4), 分析结果见表 1。碎斑熔岩样品 14RS-2 中 25 个点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 144~132Ma, 年龄加权平均值为 137.7 ± 1.2 Ma(MSWD=1.06), 钾长花岗岩样品 14RS-7 中 24 个点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 142~136Ma, 年龄加权平均值为 137.7 ± 1.2 Ma(MSWD=0.39), 表明这 2 个样品均形成于早白垩世早期, 是燕山中期酸性岩浆结晶的产物。

4.2 地球化学特征

黄岗梁地区钾长花岗岩和碎斑熔岩具有相似的主量元素特征(表 2)。该火山-侵入杂岩整体具有高硅($\text{SiO}_2=69.1\% \sim 78.3\%$)、高碱($\text{K}_2\text{O}=3.9\% \sim 5.3\%$, $\text{Na}_2\text{O}=2.7\% \sim 4.0\%$)、高 TiFeO/MgO 值(5.68~30.91), 低 Al_2O_3 (11.02%~14.12%), 极低的 MnO (0.01%~0.05%), P_2O_5 (0.01%~0.10%), TiO_2 (0.12%~0.42%), 贫钙($\text{CaO}=0.2\% \sim 1.3\%$)、镁($\text{MgO}=0.06\% \sim 0.67\%$)的特征, 其中 14RS-9 样品中 SiO_2 含量较低可能是其受到轻微的蚀变所致。全碱含量($\text{Na}_2\text{O}+$

表 1 黄岗梁地区岩浆岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 分析数据

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb age of the magmatite in the Huanggangliang area

点号	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值						同位素年齡/Ma					
	U	Th		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
14RS-2 碎斑熔岩															
14RS-2-01	138	53	0.39	0.05280	0.00115	0.16	0.007	0.02252	0.00056	320	50	154	6	144	4
14RS-2-02	94	35	0.37	0.05193	0.00172	0.15	0.008	0.02079	0.00054	282	77	141	7	133	3
14RS-2-03	217	83	0.38	0.04879	0.00184	0.14	0.008	0.02075	0.00049	138	86	133	7	132	3
14RS-2-04	130	57	0.44	0.04884	0.00123	0.14	0.007	0.02137	0.00054	140	60	136	6	136	3
14RS-2-05	156	76	0.49	0.05489	0.00117	0.16	0.006	0.02088	0.00052	408	49	149	6	133	3
14RS-2-06	72	27	0.37	0.04869	0.00214	0.14	0.010	0.02142	0.00058	133	101	136	9	137	4
14RS-2-07	145	48	0.33	0.04884	0.00119	0.15	0.007	0.02189	0.00055	140	58	140	6	140	3
14RS-2-08	91	44	0.48	0.04892	0.00183	0.15	0.009	0.02162	0.00057	144	86	138	8	138	4
14RS-2-09	282	98	0.35	0.04788	0.00078	0.14	0.005	0.02105	0.00051	93	39	132	4	134	3
14RS-2-10	147	83	0.56	0.04715	0.00218	0.14	0.009	0.02126	0.00051	57	99	131	8	136	3
14RS-2-11	284	115	0.40	0.04850	0.00079	0.15	0.005	0.02174	0.00053	124	39	138	4	139	3
14RS-2-12	106	36	0.34	0.05012	0.00150	0.15	0.008	0.02161	0.00056	201	71	141	7	138	4
14RS-2-13	445	153	0.34	0.04867	0.00071	0.15	0.005	0.02258	0.00054	132	35	143	4	144	3
14RS-2-14	142	57	0.40	0.05041	0.00125	0.15	0.007	0.02136	0.00054	214	58	141	6	136	3
14RS-2-15	95	41	0.44	0.04952	0.00168	0.15	0.009	0.02257	0.00059	173	80	146	8	144	4
14RS-2-16	252	107	0.43	0.04859	0.00087	0.14	0.005	0.02134	0.00052	128	43	136	5	136	3
14RS-2-17	358	169	0.47	0.04999	0.00074	0.15	0.005	0.02208	0.00053	195	35	144	4	141	3
14RS-2-18	349	120	0.34	0.04793	0.00074	0.14	0.005	0.02173	0.00053	96	37	136	4	139	3
14RS-2-19	168	74	0.44	0.04885	0.00115	0.15	0.006	0.02155	0.00055	141	56	138	6	137	3
14RS-2-20	182	93	0.51	0.04647	0.00105	0.14	0.006	0.02124	0.00053	22	48	130	5	135	3
14RS-2-21	446	174	0.39	0.04861	0.00068	0.15	0.004	0.02165	0.00052	129	33	138	4	138	3
14RS-2-22	346	155	0.45	0.04937	0.00075	0.15	0.005	0.02204	0.00054	165	36	142	4	141	3
14RS-2-23	383	133	0.35	0.04836	0.00072	0.14	0.005	0.02174	0.00053	117	36	137	4	139	3
14RS-2-24	479	361	0.75	0.04862	0.00076	0.15	0.005	0.02185	0.00053	130	37	139	4	139	3
14RS-2-25	276	79	0.29	0.04858	0.00084	0.14	0.005	0.02163	0.00053	128	41	137	5	138	3
14RS-7 钾长花岗岩															
14RS-7-01	593	292	0.49	0.04940	0.00064	0.15	0.004	0.02137	0.00051	167	31	138	4	136	3
14RS-7-02	425	200	0.47	0.04916	0.00070	0.15	0.005	0.02146	0.00052	155	34	138	4	137	3
14RS-7-03	567	224	0.40	0.05180	0.00068	0.16	0.005	0.02211	0.00053	277	31	149	4	141	3
14RS-7-04	512	255	0.50	0.05412	0.00076	0.16	0.005	0.02124	0.00052	376	32	149	4	135	3
14RS-7-05	348	135	0.39	0.04907	0.00076	0.15	0.005	0.02161	0.00053	151	37	139	4	138	3
14RS-7-06	558	222	0.40	0.04921	0.00064	0.15	0.004	0.02222	0.00054	158	31	143	4	142	3
14RS-7-07	368	186	0.51	0.04906	0.00074	0.14	0.005	0.02141	0.00052	151	36	137	4	137	3
14RS-7-08	461	156	0.34	0.04986	0.00072	0.15	0.005	0.02140	0.00052	188	34	139	4	136	3
14RS-7-09	478	211	0.44	0.04914	0.00069	0.15	0.005	0.02161	0.00052	155	33	139	4	138	3
14RS-7-10	785	275	0.35	0.04847	0.00061	0.15	0.004	0.02183	0.00052	122	30	138	4	139	3
14RS-7-11	497	193	0.39	0.04892	0.00069	0.15	0.005	0.02167	0.00052	144	34	139	4	138	3
14RS-7-12	498	206	0.41	0.04977	0.00071	0.15	0.005	0.02152	0.00052	184	34	140	4	137	3
14RS-7-13	258	87	0.34	0.04873	0.00090	0.15	0.006	0.02201	0.00055	135	44	140	5	140	3
14RS-7-14	559	242	0.43	0.04971	0.00065	0.15	0.004	0.02171	0.00052	181	31	141	4	138	3
14RS-7-15	661	272	0.41	0.04926	0.00062	0.15	0.004	0.02181	0.00052	160	30	140	4	139	3
14RS-7-16	503	395	0.79	0.04932	0.00066	0.15	0.004	0.02173	0.00052	163	32	140	4	139	3
14RS-7-17	755	296	0.39	0.04907	0.00061	0.15	0.004	0.02151	0.00051	151	30	138	4	137	3
14RS-7-18	262	158	0.60	0.04748	0.00085	0.14	0.005	0.02141	0.00053	73	43	133	5	137	3
14RS-7-19	463	167	0.36	0.05114	0.00074	0.15	0.005	0.02144	0.00052	247	34	143	4	137	3
14RS-7-20	285	121	0.42	0.04873	0.00081	0.14	0.005	0.02153	0.00053	135	40	137	4	137	3
14RS-7-21	481	241	0.50	0.04934	0.00069	0.15	0.005	0.02152	0.00052	164	33	139	4	137	3
14RS-7-22	384	264	0.69	0.05005	0.00076	0.15	0.005	0.02104	0.00051	197	36	138	4	134	3
14RS-7-23	194	76	0.39	0.04878	0.00106	0.15	0.006	0.02217	0.00056	137	52	141	5	141	4
14RS-7-24	827	299	0.36	0.05058	0.00064	0.15	0.004	0.02136	0.00051	222	30	141	4	136	3

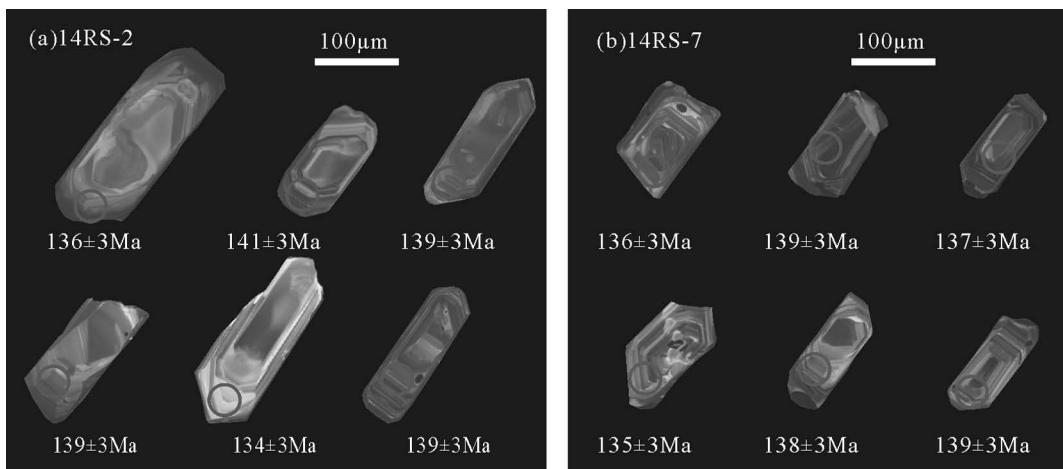


图3 黄岗梁地区岩浆岩锆石CL图

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of selected zircon

grains from igneous rocks in the Huanggangliang area

a—碎斑熔岩(14RS-2);b—钾长花岗岩(14RS-7)

K_2O)为7.35%~8.66%, K_2O/Na_2O 值高, 均大于1, 平均为1.5, 属于高钾系列岩石; 在 $SiO_2-(Na_2O+K_2O-CaO)$ 图解中均落入钙碱性和碱钙性区域(图5-a), 显示出钙碱性和碱性过渡的特点。岩石显著贫镁, 相对富铁, 在 $SiO_2-TFeO/(TFeO+MgO)$ 图解中全部落入铁质花岗岩区域(图5-b), 铝饱和指数ASI为1.06~1.33, 均小于1.5, 在 SiO_2-ASI 图解中均落入弱过铝质花岗岩区域(图5-c)。分异指数(DI)为

85.43~95.99, 平均为92.00, 固结指数(SI)为0.58~5.43, 平均为2.24, 反映岩浆具有较高演化程度和结晶分异程度。黄岗梁岩体东侧同期的任家营子岩体显著贫铁, 相对富镁, 主要为钙碱性系列, 在 $SiO_2-TFeO/(TFeO+MgO)$ 图解中全部落在了镁质花岗岩区域^[27], 表明该区早白垩世岩浆具有宽泛岩浆性质。总体上, 该区早白垩世岩浆岩与侏罗纪岩浆岩具有相似的主量元素地球化学性质(图5)。

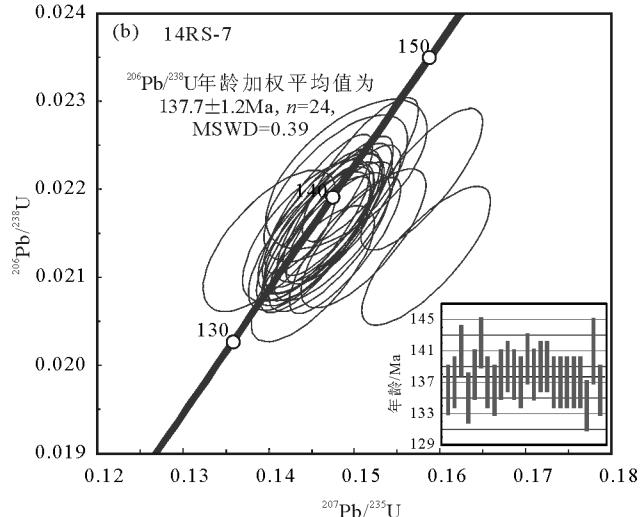
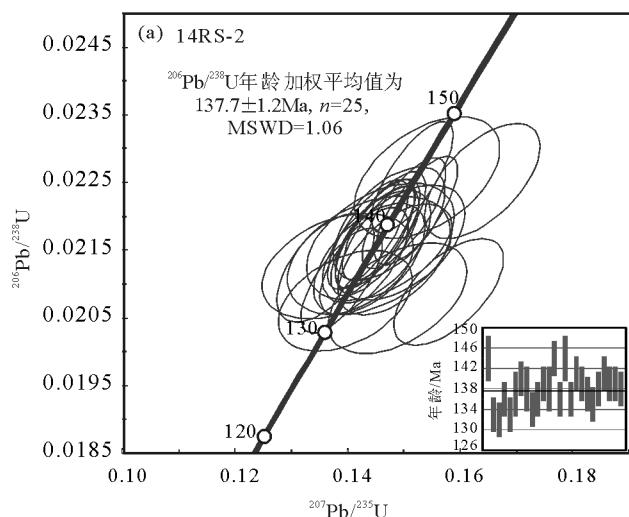


图4 黄岗梁地区岩浆岩LA-ICP-MS锆石U-Pb谐和图

Fig. 4 Concordia diagrams of zircons by LA-ICP-MS U-Pb dating

for igneous rocks in the Huanggangliang area

a—碎斑熔岩(14RS-2);b—钾长花岗岩(14RS-7)

表2 黄岗梁地区花岗岩主量、微量元素组成

Table 2 Chemical compositions of the magmatic in Huanggangliang area

岩性 样品	碎斑熔岩 14RS-1	碎斑熔岩 14RS-2	碎斑熔岩 14RS-3	钾长花岗岩 14RS-4	钾长花岗岩 14RS-6	钾长花岗岩 14RS-7	钾长花岗岩 14RS-8	钾长花岗岩 14RS-9	钾长花岗岩 14RS-10
SiO ₂	78.09	74.50	76.79	73.75	77.27	75.02	78.25	69.11	74.57
TiO ₂	0.13	0.17	0.13	0.26	0.12	0.19	0.14	0.42	0.17
Al ₂ O ₃	11.49	13.06	12.82	12.76	12.13	12.91	11.02	14.12	13.26
Fe ₂ O ₃	1.49	1.90	1.20	2.17	0.58	1.57	1.30	3.81	1.35
FeO	0.39	1.07	0.53	1.86	0.50	1.38	0.96	0.94	0.76
MnO	0.01	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.04	0.05
MgO	0.06	0.15	0.16	0.67	0.18	0.25	0.23	0.32	0.27
CaO	0.16	0.51	0.17	1.23	0.39	0.72	0.35	1.28	0.90
Na ₂ O	2.73	3.58	2.79	3.18	3.38	3.66	3.58	2.94	4.01
K ₂ O	5.00	5.08	4.56	4.52	5.17	4.80	3.90	5.26	4.55
P ₂ O ₅	0.01	0.04	0.02	0.07	0.03	0.05	0.04	0.10	0.05
LOI	0.80	0.96	1.27	1.35	0.68	0.79	1.12	2.57	0.79
Total	100.36	101.05	100.47	101.85	100.44	101.36	100.93	100.91	100.74
La	79.7	51.9	57.1	29.7	66.2	57.5	20.6	55.7	30.9
Ce	122.0	105.0	92.7	55.2	122.0	110.0	42.4	112.0	60.9
Pr	19.1	13.7	15.1	6.4	13.2	12.4	5.8	14.2	7.2
Nd	72.90	51.30	56.00	21.80	42.60	41.70	22.20	54.30	24.30
Sm	14.30	10.80	12.00	4.10	6.70	7.34	5.28	10.40	4.31
Eu	0.32	0.53	0.35	0.42	0.26	0.44	0.23	1.59	0.44
Gd	12.80	9.56	10.30	3.50	5.53	6.48	4.91	9.41	3.62
Tb	2.21	1.82	2.07	0.63	0.87	1.12	0.97	1.58	0.67
Dy	11.20	9.84	11.80	3.40	4.77	5.85	5.42	8.61	3.72
Ho	2.14	1.90	2.31	0.73	1.02	1.27	1.11	1.73	0.75
Er	6.17	5.81	7.45	2.31	3.30	4.10	3.45	4.90	2.36
Tm	0.94	0.92	1.27	0.42	0.60	0.72	0.54	0.82	0.42
Yb	5.92	5.58	7.82	2.85	4.02	5.04	3.56	4.95	2.95
Lu	0.82	0.79	1.09	0.41	0.54	0.71	0.51	0.66	0.38
Y	61.0	55.1	72.4	23.3	32.4	41.0	35.4	48.0	23.7
Sc	1.0	2.5	1.6	3.3	1.1	2.6	2.8	7.6	2.2
V	3	6	4	27	7	10	11	20	10
Cr	1	1	1	12	2	1	2	2	1
Co	0.1	1.0	0.6	2.5	1.2	1.4	1.1	3.0	1.3
Ni	1	1	1	3	2	1	1	2	1
Ga	25	23	24	17	18	21	18	22	17
Rb	247	234	255	228	263	276	209	192	191
Sr	24	56	84	161	68	98	67	167	151
Zr	273	204	170	115	153	205	126	405	136
Nb	26.1	22.3	27.4	12.6	16.4	18.6	15.6	20.2	17.9
Cs	15.9	10.3	8.3	10.6	5.2	8.9	4.1	11.0	6.3
Ba	89	247	278	350	126	254	167	1173	448
Hf	10.3	8.2	7.9	4.5	6.3	7.6	5.3	11.4	4.5
Ta	1.97	2.24	3.27	2.21	2.74	2.63	1.79	1.53	1.29
Pb	85	28	23	21	53	22	14	32	22
Th	25	28	37	32	56	57	26	16	23
U	3.6	4.0	4.4	3.7	8.2	3.5	4.3	3.5	3.0
K ₂ O+Na ₂ O	7.73	8.66	7.35	7.7	8.55	8.46	7.48	8.2	8.56
K ₂ O/Na ₂ O	1.83	1.42	1.63	1.42	1.53	1.31	1.09	1.79	1.13
10000Ga/Al	4.03	3.36	3.60	2.58	2.74	3.09	3.00	2.96	2.47
ΣREE	350.51	269.46	277.36	131.81	271.61	254.66	116.98	280.85	142.87
LREE/HREE	7.31	6.44	5.29	8.26	12.15	9.07	4.71	7.60	8.61
(La/Yb) _N	9.66	6.67	5.24	7.48	11.81	8.18	4.15	8.07	7.51
δEu	0.07	0.16	0.09	0.33	0.13	0.19	0.14	0.48	0.33
δCe	0.74	0.94	0.76	0.94	0.95	0.96	0.94	0.95	0.97
SI	0.58	1.24	1.77	5.43	1.8	2.16	2.3	2.45	2.45
DI	95.39	92.66	93.48	86.71	95.99	91.77	94.49	85.43	92.08

注: 主量元素含量单位为%; 微量和稀土元素含量为10⁻⁶

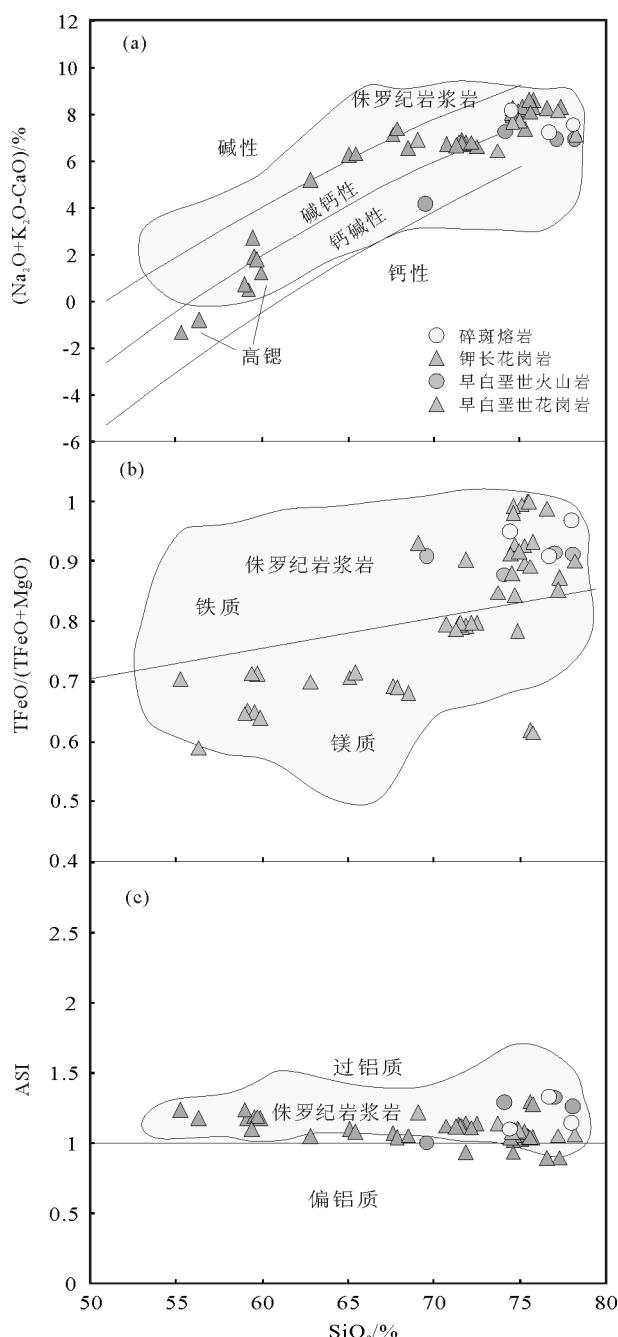


图5 黄岗梁地区岩浆岩主量元素图解

Fig. 5 Selected major element diagrams for igneous rocks in the Huanggangliang area
 a— $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})$ 图解(底图据参考文献[46]);
 b— $\text{SiO}_2-\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ 图解(底图据参考文献[47]);
 c— SiO_2-ASI 图解(底图据参考文献[47])。

$\text{TFeO}=\text{FeO}+0.9\text{Fe}_2\text{O}_3$; ASI=摩尔 $\text{Al}/(\text{Ca}-1.67\text{P}+\text{Na}+\text{K})$;

背景数据据参考文献[19,22,27,37,48-52]

黄岗梁地区岩石稀土元素总量较高, $\Sigma \text{REE}=116.98 \times 10^{-6} \sim 350.51 \times 10^{-6}$, 平均为 232.90×10^{-6} , 富集

轻稀土元素, $(\text{La/Yb})_N=4.15 \sim 11.81$, $\text{LREE/HREE}=4.71 \sim 12.15$, 说明岩浆后期强烈分异。在稀土元素球粒陨石标准化配分图(图6-a)中, 碎斑熔岩的稀土元素总量较钾长花岗岩略高, 且均显示强烈的负Eu异常($\delta \text{Eu}=0.07 \sim 0.48$), 配分曲线呈现右倾型。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图6-b)上, 碎斑熔岩和钾长花岗岩均明显富集K、Rb、Th、U等大离子亲石元素及Nd、Zr、Hf等高场强元素, 亏损Ba、Sr、P、Ti、Nb等强不相容元素, 但是碎斑熔岩的亏损程度较钾长花岗岩略高。

5 讨论

5.1 成因类型及岩浆源区和成因

黄岗梁地区火山-侵入杂岩主要矿物为钾长石和石英, 次要矿物为角闪石和黑云母。岩石矿物成分中没有出现富铝的硅酸盐矿物, 在 $\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$ 图(图7)上, Si_2O 与 P_2O_5 整体呈负相关趋势, 因此不具有S型花岗岩的特征, 显示出I型花岗岩的演化趋势。这些样品具有高硅、高碱、富铁、低铝、贫钙、贫镁的特征, 微量元素富集K、Rb、Th、U等大离子亲石元素及Nd、Zr、Hf等高场强元素, 亏损Ba、Sr、P、Ti、Nb等强不相容元素, 强烈负Eu异常, 与A型花岗岩或高分异I型花岗岩较为相似。在A型花岗岩的分类图解(图8)中, 样品点位于I、S、A型花岗岩及高分异花岗岩附近, 显示出过渡的特征。然而, 样品中并没有典型的碱性暗色矿物, 且Ba强烈亏损, 似乎更显示高分异I型花岗岩的特征。以上特征表明, 黄岗梁地区火山-侵入杂岩大都为高分异高钾钙碱性I型花岗岩。同时, 黄岗梁岩体东侧同期的任家营子岩体显著贫铁、相对富镁, 主要为钙碱性系列镁质花岗岩^[27], 这与黄岗梁地区发育锡铁矿床及任家营子岩体中多见辉石和角闪石的事实一致。这些同期的任家营子样品Sr强烈富集($631 \times 10^{-6} \sim 887 \times 10^{-6}$, 平均为 778×10^{-6}), 低Y($17.6 \times 10^{-6} \sim 32.0 \times 10^{-6}$, 平均为 22.9×10^{-6}), 高Sr/Yb值($26.7 \sim 49.3$, 平均为35.3), 显示了高Sr花岗岩和埃达克质花岗岩的特征^[27], 说明黄岗梁地区同期岩浆性质差异较大, 可能来源于不同的岩浆深度。

碎斑熔岩和钾长花岗岩相对富集LREE、LILE而亏损Ta、Nb、Ti等高场强元素, 具有显著的负Eu异常; 其Nb/La值较低($0.25 \sim 0.76$), 表明源区有部分陆壳物质参与。岩体的Nb/Ta值为 $5.7 \sim 13.9$, 平均为

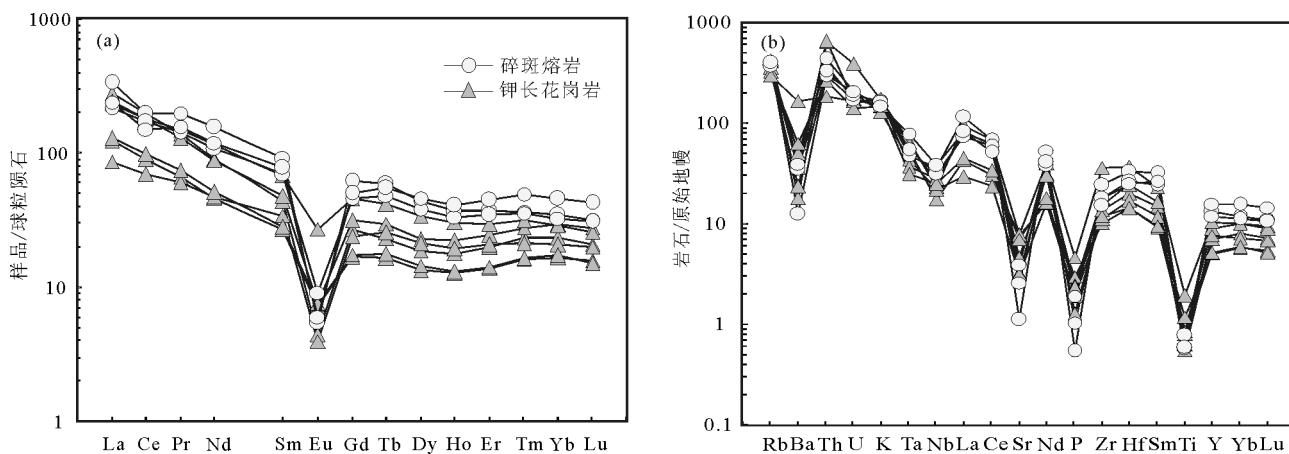


图6 球粒陨石标准化稀土元素配分模式(a)和微量元素地幔标准化蛛网图(b)(底图据参考文献[53])

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) for porphyroclastic lavas and granites in the Huanggangliang area

9.6,明显低于幔源岩石(17.5 ± 2)^[55-56],而接近陆壳岩石(11左右)^[55,57];Zr/Hf值为21.49~35.53,平均为26.61,远低于幔源岩石(36.27 ± 2.0)^[55-56],接近壳源岩石(33左右)^[55,57]。以上特征表明,这些岩石可能主要为陆壳物质部分熔融形成。黄岗梁地区火山-侵入杂岩中没有见到基性岩包体,也没有出现其他岩浆混合的迹象,表明壳幔混合并不强烈。黄岗梁地区钾长花岗岩和花岗斑岩的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)值为0.70211~0.70729, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -0.8 \sim +0.9$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = +1.9 \sim +18.3$,并具有年轻的Nd同位素模式年龄(993~855Ma)和二阶段锆石Hf同位素模式年龄(888~561Ma)^[20],表

明岩浆来源于年轻的地壳源区,并可能有少量古老陆壳的参与。西拉木伦河北岸地区的柯单山、九井子、杏树洼等地区发育古生代蛇绿混杂岩^[58-59],暗示这种陆壳物质是幔源物源分异演化时间不长的年轻地壳。这些年轻的地壳物质可能由古亚洲洋俯冲的洋壳、岛弧建造或增生楔组成,主要衍生自亏损地幔^[10,60-62]。因此,研究区晚中生代长英质岩浆的源区可能主要是先存新生地壳物质的重融、循环再分配。

结合区域地质背景,笔者认为黄岗梁火山-侵入杂岩形成于底侵的基性岩浆所导致的新生地壳重融作用形成的长英质岩浆,从而形成不同侵位深度的花岗岩,上升至浅部的岩浆由于压力减弱,挥发分和水分散失,岩浆粘度变大,侵出地表后温度降低等因素造成斑晶破碎,形成碎斑熔岩,上升过程中可能存在少量古老陆壳物质的加入。强烈亏损Eu、Sr、Ba等元素,显示岩浆可能经历了斜长石和黑云母的分离结晶作用;P和Ti的亏损说明,岩浆可能经历了磷灰石、磁铁矿、钛铁矿、榍石、角闪石、黑云母等矿物的分离结晶作用。

5.2 构造背景

大兴安岭南段前中生代基底岩系主要由元古宇片麻岩和上古生界二叠系浅变质碎屑岩-中酸性火山岩组成。中生代以来,在继承、改造和利用前中生代构造的基础上,形成了由NE向、NW向和EW向断裂构成的格子状断裂系统,产生了一系列NE走向、EW相间排列的断陷-火山喷发岩带

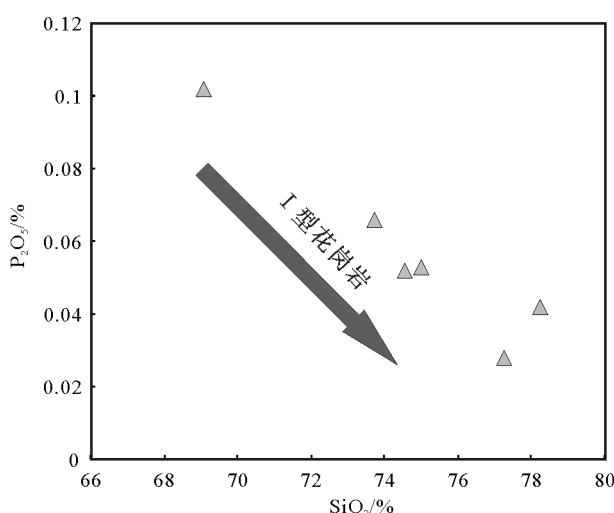


图7 黄岗梁地区花岗岩 $\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$ 相关图

Fig. 7 $\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$ discrimination diagram of granites in the Huanggangliang area

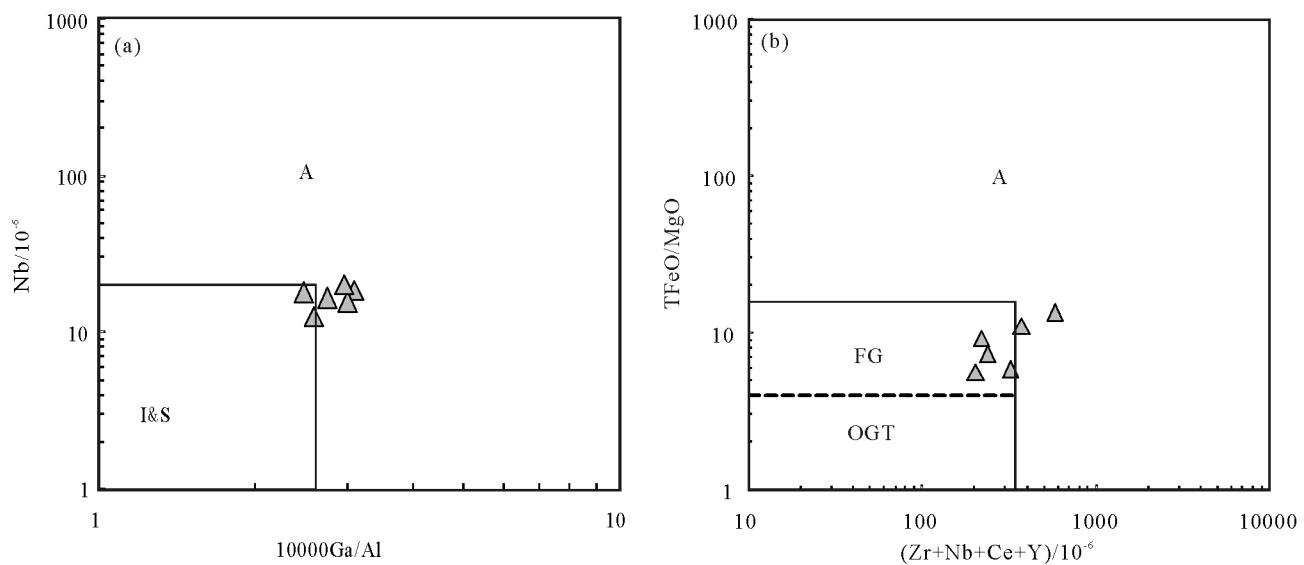


图8 黄岗梁地区花岗岩成因类型判别 10000Ga/Al-Nb(a)和
(Zr+Nb+Ce+Y)-TFeO/MgO 判别图解(b)(底图据参考文献[54])

Fig. 8 Discrimination diagrams for A-type granites in the Huanggangliang area
FG—分异的I,S型花岗岩类分布区;OGT—未分异的I,S,M型花岗岩类
分布区;I,S,A分别代表I型,S型,A型花岗岩

和断隆-岩浆侵入岩带^[38],这种构造-岩浆格局是中亚造山带的造山过程和接踵而至的燕山运动造成^[38,63-66]。关于大兴安岭中生代岩浆岩的成因和其构造背景争论较大,武广等^[67]总结了3种代表性观点:与东侧太平洋板块俯冲有关^[68-73]、与北部蒙古-鄂霍茨克海向南的俯冲有关^[74]、与兴蒙造山带的造山后或板内演化有关^[63,75-78]。

赵越等^[79]在综合分析构造地质、古地磁、古生物、地质年代等研究成果后,提出古亚洲洋构造系和古特提斯构造系向环太平洋主动陆缘的转变出现在中侏罗世。任纪舜等^[65]认为,中国东部构造动力彻底改变发生在155~140Ma,来自西伯利亚和西太平洋古陆2个方向的强大挤压作用,造成中国东部陆缘活化带西带(包括大兴安岭南段)在晚三叠世发生活化,构造线转化为NE走向。毛景文等^[80]在总结前人研究成果的基础上,对中国北方主要矿床成矿年龄进行统计分析,认为铜铅锌银成矿期为180~160Ma,锡多金属成矿期为140Ma,稀有金属成矿期为120Ma,140Ma是构造体制大转换时期。区域岩浆的分布和发育情况(图9)也表明,从140Ma开始,岩浆活动变得剧烈起来。由此可见,140Ma左右的构造背景应与全面伸展作用有关。黄

岗梁地区火山-侵入杂岩的分异指数DI(DI=Qz+Or+Ab+Ne+Kp)为82.38~96.18,平均为91.53,表明其具有张性的高演化岩浆岩的特征^[60,81]。近年来,林西地区相继发现了晚中生代中基性岩墙群、幔源镁铁质堆晶岩、超基性的角闪岩和橄榄玄武岩,以及区域上的晚中生代伸展盆地和变质核杂岩,它们的存在证明晚中生代侵入岩形成于伸展构造

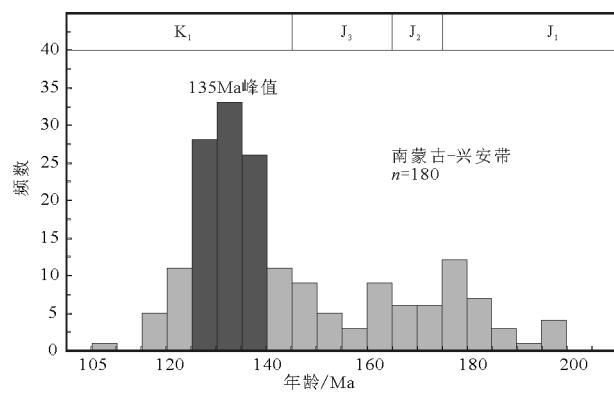


图9 南蒙古-兴安带晚中生代花岗岩锆石年龄直方图
(数据据参考文献[1,27]和本文)

Fig. 9 Late Mesozoic (Jurassic-Early Cretaceous)
zircon ages for granitoids in South Mongolia-
Da Hinggan Mountains

环境^[11,33~34,82~83]。贺根山部分镁铁质-超镁铁质岩体的SHRIMP测年显示这些岩体的形成时代为139~125Ma,代表了该区早白垩世的一次幔源岩浆底侵事件^[84],黄岗梁火山-侵入杂岩具有年轻壳源的特点。因此,这些岩浆可能是晚中生代伸展构造背景的幔源岩浆底侵的响应。在构造环境判别图(图10)上,花岗岩样品更多地显示出后造山伸展环境的特点。

张连昌等^[86]通过研究西拉木伦钼铜多金属成矿带认为,西伯利亚板块和华北-蒙古板块的碰撞作用持续到蒙古-鄂霍茨克洋闭合(中侏罗世),约180Ma古太平洋开始向亚洲板块俯冲,于晚侏罗世—早白垩世达到顶峰,中生代陆内造山和岩浆成矿作用受蒙古-鄂霍茨克构造体制和古太平洋构造体制的共同制约,经历构造体制的转折后,145~120Ma研究区发生陆内伸展和岩石圈大规模减薄,形成大规模成矿事件。李益龙等^[82]通过研究西拉木伦河断裂带内变形闪长岩认为,晚侏罗世古太平洋板块西向俯冲达到了顶峰,俯冲方向也随之改变,转变为向欧亚大陆的西北向俯冲,在构造机制转换过程中可能还受到蒙古-鄂霍茨克洋的影响。Wang等^[1]统计分析大量花岗岩类数据后认为,大兴安岭南段地区的伸展可能起源于蒙古-鄂霍茨克洋俯冲/碰撞后的后造山伸展垮塌,早白垩世开始,蒙古-鄂霍茨克造山带伸展垮塌,并叠加了与古太平洋俯冲相关的

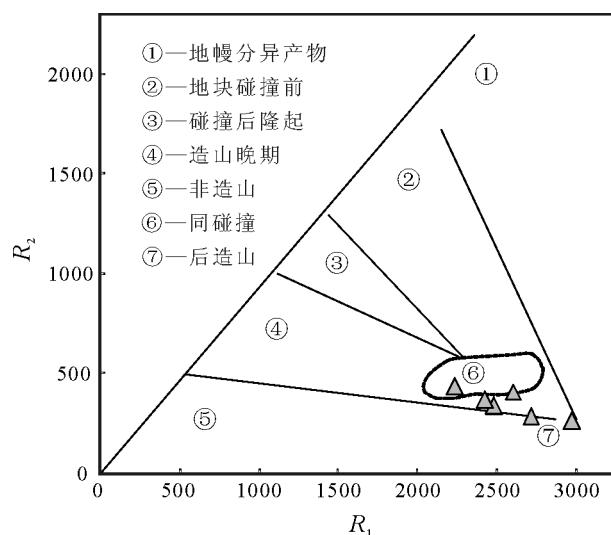


图10 黄岗梁地区火山-侵入杂岩构造环境判别 R_1-R_2 图解
(底图据参考文献[85])

Fig.10 R_1 versus R_2 discrimination diagram of tectonic setting of volcanic-granites in the Huanggangliang area

弧后伸展,整个东北亚地区进入伸展体制,形成巨量的白垩纪花岗岩。

因此,通过以上区域构造背景分析,结合本文所获得的2个早白垩世年龄(约138Ma)及该火山-侵入杂岩体的地理位置,笔者认为,大兴安岭南段黄岗梁地区的伸展作用主体与蒙古-鄂霍茨克造山带的伸展垮塌作用有关。

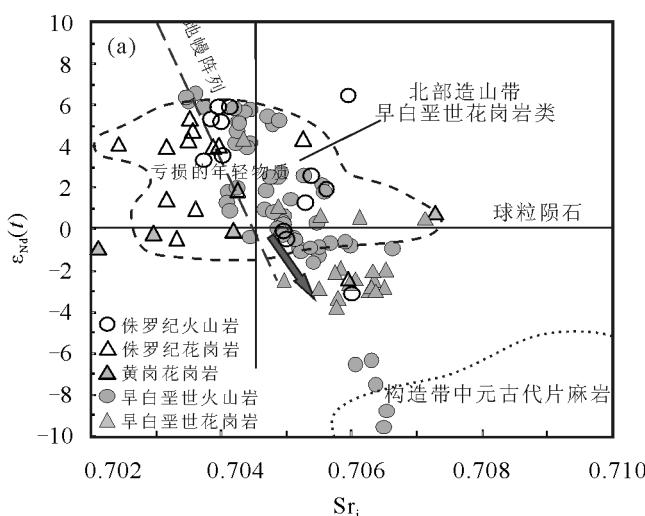


图11 黄岗梁地区岩浆岩全岩 $\text{Sr}_i-\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解及锆石 $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解

(数据据参考文献[20,27,37,39,49~51,62,87~90])

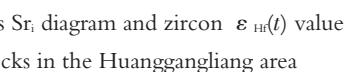


Fig.11 Whole-rock $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ value versus Sr_i diagram and zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value

versus t diagram for the igneous rocks in the Huanggangliang area

5.3 晚中生代岩浆演化与构造意义

晚中生代(侏罗纪—白垩纪)是大兴安岭南段及其邻区最重要的构造—岩浆作用时期,普遍出现的大量花岗岩类和火山岩是其重要的岩浆响应,高峰期在135Ma左右(图9),与中国东部及整个东北亚的岩浆发育高峰期相吻合^[1]。侏罗纪花岗岩类具有中等—高的SiO₂含量(55%~77%)和高的Na₂O含量(大于4%),亏损大离子亲石元素,无或弱的Eu异常,高Sr,低Y和Yb,高Sr/Y和Sr/Yb值,低Mg[#]值(平均小于37)。岩石类型大多为I型、I-A型、A型,形成的构造环境主要为岛弧、后碰撞和板内环境。白垩纪花岗岩类呈现出低CaO、Al₂O₃,高Si₂O、K₂O含量的特征,稀土元素含量高,具强烈的负Eu异常和显著的Ba、Sr、Ti亏损,低的Sr/Y值^[1],显示了更高的演化程度。整体上,侏罗纪—白垩纪岩浆岩呈现由高钾钙碱性向高钾碱钙性—碱性演变,由镁质向铁质演变,由I型花岗岩向高分异I型、A型花岗岩演变的特征。由于地壳减薄过程的渐进性和区域不均一性,晚中生代高Sr岩浆岩在侏罗纪—早白垩世都有分布,例如大兴安岭南段东麓O型埃达克岩(约150Ma)^[5]和研究区东侧的任家营子岩体(138~134Ma),高Sr花岗岩需要较大的压力,加厚地壳的熔融可能是其形成的主要原因^[18]。区域上,侏罗纪—白垩纪的岩浆演化过程,反映侏罗纪—白垩纪造山带逐渐坍塌和陆壳逐渐减薄过程诱导了幔源物质的底侵,造成了早白垩世区域的构造不均一性,形成了具有宽广地球化学性质的岩浆岩。早白垩世岩浆岩较侏罗纪岩浆岩具有略负的全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,显示早白垩世岩浆可能有更多的古老陆壳的贡献(图11)。如在林西地区,3个早白垩世的野来改、龙头山和小城子岩体较晚侏罗世的马鞍山岩体具有偏低的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$,暗示随着时间的推移,更多的古老陆壳物质参与花岗质岩浆的形成^[1,61]。并且,自北(北部造山带)向南(西拉木伦缝合带),全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值也有略微降低的趋势,这似乎与缝合带附近有更多华北古老陆壳物质的贡献有关。

6 结 论

(1)LA-ICP-MS锆石U-Pb定年结果表明,内蒙古西拉木伦河缝合带北侧的黄岗梁火山—侵入杂岩的碎斑熔岩和钾长花岗岩锆石U-Pb年龄均为

137.7 ± 1.2 Ma,为大兴安岭南段发育最广泛的一期岩浆作用。

(2)黄岗梁火山—侵入杂岩整体上属于准铝质—弱过铝质的高钾钙碱—碱性系列,具有高分异I型花岗岩的特征,主要来自于新生陆壳的部分熔融,可能有少量古老陆壳的参与。

(3)结合区域地质背景,黄岗梁岩体的形成可能与蒙古—鄂霍茨克构造体系下的造山后区域性伸展作用有关。

(4)区域上,白垩纪岩浆岩较侏罗纪岩浆岩具有更高的岩浆演化程度,反映了侏罗纪—白垩纪造山带逐渐坍塌和陆壳逐渐减薄过程中诱导了幔源物质的底侵,造成早白垩世区域的构造不均一性,形成了具有多种性质的岩浆岩。

致谢:成文过程中得到中国地质科学院地质研究所薛怀民、童英研究员及张磊副研究员的悉心指导,中国地质大学(北京)金子梁博士及司东泽、谷建辉硕士给予支持与帮助,匿名审稿专家对文本提出了宝贵的修改意见,在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Wang T, Guo L, Zhang L, et al. Timing and evolution of Jurassic-Cretaceous granitoid magmatism in the Mongol-Okhotsk belt and adjacent areas, NE Asia: Implications for transition from contractional crustal thickening to extensional thinning and geodynamic settings [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 97: 365–392.
- [2] Li S, Wang T, Wilde S A, et al. Evolution, source and tectonic significance of Early Mesozoic granitoid magmatism in the Central Asian Orogenic Belt (central segment) [J]. Earth-Science Reviews, 2013, 126(11): 206–234.
- [3] 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.
- [4] Xiao W J, Windley B F, Yuan C. Paleozoic multiple subduction-accretion processes of the southern Altaiids [J]. American Journal of Science, 2009, 309(3): 221–270.
- [5] Jahn B, Wu F, Chen B. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic [J]. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 2000, 91(262): 181–193.
- [6] Xu W, Pei F, Wang F, et al. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes [J]. Jour-

- nal of Asian Earth Sciences, 2013, 74(18): 167–193.
- [7] Li S, Wilde S A, Wang T. Early Permian post-collisional high-K granitoids from Liuyuan area in southern Beishan orogen, NW China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Lithos*, 2013, 179(10): 99–119.
- [8] Wu F, Sun D, Ge W, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(1): 1–30.
- [9] Li S, Wilde S A, He Z, et al. Triassic sedimentation and postaccretionary crustal evolution along the Solonker suture zone in Inner Mongolia, China[J]. *Tectonics*, 2014, 33(6): 960–981.
- [10] 张连昌, 英基丰, 陈志广, 等. 大兴安岭南段三叠纪基性火山岩时代与构造环境[J]. 岩石学报, 2008, 24(4): 911–920.
- [11] Meng Q, Hu J, Jin J, et al. Tectonics of the late Mesozoic wide extensional basin system in the China–Mongolia border region[J]. *Basin Research*, 2003, 15(3): 397–415.
- [12] Ren J, Tamaki K, Li S, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas[J]. *Tectonophysics*, 2002, 344(3): 175–205.
- [13] 邵济安, 耿保磊, 张履桥. 华北东部中生代构造格局转换过程中的深部作用与浅部响应[J]. 地质论评, 2000, 46(1): 32–40.
- [14] 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*, 2014.
- [15] Jian P, Liu D, 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(1/2): 169–190.
- [16] Li J Y. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 26(3/4): 207–224.
- [17] 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.
- [18] 王涛, 张磊, 郭磊, 等. 亚洲中生代花岗岩图初步编制及若干研究进展[J]. 地球学报, 2014, 35(6): 655–662.
- [19] 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.
- [20] 周振华. 内蒙古黄岗锡铁矿床地质与地球化学[D]. 中国地质科学院博士学位论文, 2011: 1–195.
- [21] 曾庆栋, 刘建明. 西拉沐伦钼矿带半拉山斑岩钼矿床花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(4): 828–834.
- [22] 周振华, 吕林素, 杨永军, 等. 内蒙古黄岗锡铁矿区早白垩世 A型花岗岩成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学制约[J]. 岩石学报, 2010, 26(12): 3521–3537.
- [23] 曾庆栋, 刘建明, 张作伦, 等. 华北克拉通北缘西拉沐伦钼多金属成矿带钼矿化类型、特征及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2009, 25(5): 1225–1238.
- [24] 陈志广, 张连昌, 吴华英. 内蒙古西拉木伦成矿带砾石沟相矿区 A型花岗岩地球化学和构造背景[J]. 岩石学报, 2008, 24(4): 879–889.
- [25] 葛文春, 吴福元, 周长勇, 等. 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, 2007, 52(20): 2407–2417.
- [26] 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.
- [27] Li S, Wilde S 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(8): 226–242.
- [28] 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.
- [29] Chen B, Jahn B M, Tian W. Evolution of the Solonker suture zone: Constraints from zircon U–Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd–Sr isotope compositions of subduction– and collision–related magmas and forearc sediments[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(3): 245–257.
- [30] 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.
- [31] Wang T, Zheng Y, Zhang J, et al. Pattern and kinematic polarity of late Mesozoic extension in continental NE Asia: Perspectives from metamorphic core complexes[J]. *Tectonics*, 2011, 30(6): 148–151.
- [32] Zorin Y A. Geodynamics of the western part of the Mongolia Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia [J]. *Tectonophysics*, 1999, 306(1): 33–56.
- [33] Lin W, Monié P, Faure M, et al. Cooling paths of the NE China crust during the Mesozoic extensional tectonics: Example from the south-Liaodong peninsula metamorphic core complex[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 42(5): 1048–1065.
- [34] Davis G A, Meng J, Cao W, et al. Triassic and Jurassic Tectonics in the Eastern Yanshan Belt, North China: Insights from the Controversial Dengzhangzi Formation and Its Neighboring Units[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(3): 69–86.
- [35] Jahn B M, Litvinovsky B A, Zavilovich A N, et al. Peralkaline granitoid magmatism in the Mongolian–Transbaikalian Belt: Evolution, petrogenesis and tectonic significance[J]. *Lithos*, 2009, 113(3/4): 521–539.
- [36] Zhou J B, Wilde S A, Zhang X Z, et al. The onset of Pacific margin accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang high-

- pressure metamorphic belt[J]. Tectonophysics, 2009, 478(3/4): 230–246.
- [37]Liu W, Siebel W, Li X, et al. Petrogenesis of the Linxi granitoids, northern Inner Mongolia of China: constraints on basaltic underplating[J]. Chemical Geology, 2005, 219(1/4): 5–35.
- [38]王京彬, 王玉往, 王丽娟. 大兴安岭南段中生代伸展成矿系统[J]. 矿床地质, 2002, 21(S1): 241–244.
- [39]Liu W, Pan X, Liu D, et al. Three-step continental-crust growth from subduction accretion and underplating, through intermediary differentiation, to granitoid production[J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98(6): 1413–1439.
- [40]Li J Y, Gao L M, Sun G H, et al. Shuangjingzi middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(3): 565–582.
- [41]张学斌, 周长红, 贾晓青, 等. 内蒙古毛登地区碎斑熔岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. 地质通报, 2014, 33(7): 974–983.
- [42]Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. The Application Of Laser Ablation- Inductively Coupled Plasma- Mass Spectrometry To In Situ U - Pb Zircon Geochronology[J]. Chemical Geology, 2004, 211(1/2): 47–69.
- [43]Ludwig K R. SOPEN 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley, 2003.
- [44]Chiu H, Chung S, Wu F, et al. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints from eastern Transhimalayan batholiths on the precollisional magmatic and tectonic evolution in southern Tibet[J]. Tectonophysics, 2009, 477(1): 3–19.
- [45]Belousova E A, Griffin W L, Pearson N J. Trace element composition and cathodoluminescence properties of southern African kimberlite zircons[J]. Mineralogical Magazine, 1998, 62(3): 355–366.
- [46]Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A Geochemical Classification for Granitic Rocks[J]. Journal of Petrology, 2001, 42(11): 2033–2048.
- [47]Frost B R, F C. A geochemical classification for feldspathic igneous rocks[J]. Journal of Petrology, 2008, 49(11): 1955–1969.
- [48]王喜龙, 刘家军, 翟德高, 等. 内蒙古边家大院矿区石英斑岩 U-Pb 年代学、岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 35(5): 654–665.
- [49]张晓静, 张连昌, 靳新娣, 等. 内蒙古半砬山钼矿含矿斑岩 U-Pb 年龄和地球化学及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(5): 1411–1422.
- [50]覃锋, 刘建明, 曾庆栋, 等. 内蒙古小东沟斑岩型钼矿床的成矿时代及成矿物质来源[J]. 现代地质, 2008, 22(2): 173–180.
- [51]张永北, 孙世华, 毛骞. 大兴安岭南段东麓中生代 O 型埃达克质火山岩及其成因、古构造环境和找矿意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(9): 2289–2304.
- [52]张永北, 孙世华, 本间弘次, 等. 大兴安岭南段林西地区中生代酸性岩类岩浆的混染作用[J]. 岩石学报, 2003, 19(3): 369–384.
- [53]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society of London Special Publications, 1989, 42: 313–345.
- [54]Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95(4): 407–419.
- [55]Green T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system[J]. Chemical Geology, 1995, 120(94): 347–359.
- [56]Hofmann A W. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1988, 90(3): 297–314.
- [57]Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[J]. The Journal of Geology, 1984, 94(4): 57–72.
- [58]梁日暄. 内蒙古中段蛇绿岩特征及地质意义[J]. 中国区域地质, 1994, 1: 37–45.
- [59]王荃, 刘雪亚, 李锦铁. 中国内蒙古中部的古板块构造[J]. 中国地质科学院院报, 1991, 1: 1–15.
- [60]邵济安, 牟保磊, 朱慧忠, 等. 大兴安岭中南段中生代成矿物质的深部来源与背景[J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 649–656.
- [61]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.
- [62]蔡剑辉, 阎国翰, 肖成东, 等. 太行山-大兴安岭构造岩浆带中生代侵入岩 Nd, Sr, Pb 同位素特征及物质来源探讨[J]. 岩石学报, 2004, 20(5): 1225–1242.
- [63]邵济安, 张履桥, 牟保磊. 大兴安岭中生代伸展造山过程中的岩浆作用[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 339–346.
- [64]邵济安, 张履桥, 牟保磊. 大兴安岭中南段中生代的构造热演化[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(3): 193–200.
- [65]任纪舜, 牛宝贵, 和政军, 等. 中国东部的构造格局和动力演化[J]. 地学研究, 1997, 29/30: 43–55.
- [66]邵济安, 臧绍先, 牟保磊, 等. 造山带的伸展构造与软流圈隆起——以兴蒙造山带为例[J]. 科学通报, 1994, 39(6): 533–537.
- [67]武广, 陈衍景, 孙丰月, 等. 大兴安岭北端晚侏罗世花岗岩类地球化学及其地质和找矿意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(4): 899–910.
- [68]吴福元, 孙德有, 张广良, 等. 论燕山运动的深部地球动力学本质[J]. 高校地质学报, 2000, 6(3): 379–388.
- [69]朱勤文, 路凤香, 谢意红, 等. 大陆边缘扩张型活动带火山岩组合——松辽盆地周边中生代火山岩研究[J]. 岩石学报, 1997, 13(4): 551–552.
- [70]邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 大陆根柱构造——大陆动力学的钥匙[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 110.
- [71]马家骏, 方大赫. 黑龙江省中生代火山岩初步研究[J]. 黑龙江地质, 1991, 2(2): 1–16.
- [72]赵国龙, 杨桂林, 王忠, 等. 大兴安岭中南部中生代火山岩[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1989: 260.
- [73]蒋国源, 权恒. 大兴安岭根河、海拉尔盆地中生代火山岩[C]//中国地质科学院沈阳地质矿产研究所文集(17), 1988: 23–93.

- [74] Wang P, Liu W, Wang S, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K/Ar dating on the volcanic rocks in the Songliao basin, NE China: constraints on stratigraphy and basin dynamics[J]. International Journal of Earth Sciences, 2002, 91(2): 331–340.
- [75] 林强, 葛文春, 吴福元, 等. 大兴安岭中生代花岗岩类的地球化学[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 403–412.
- [76] Fan W M, Guo F, Wang Y J, et al. Late Mesozoic calc–alkaline volcanism of post–orogenic extension in the northern Da Hinggan Mountains, Northeastern China[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2003, 121(1): 115–135.
- [77] 邵济安, 刘福田, 陈辉, 等. 大兴安岭–燕山晚中生代岩浆活动与俯冲作用关系[J]. 地质学报, 2001, 75(1): 56–63.
- [78] 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): 22–30.
- [79] 赵越, 杨振宇, 马醒华. 东亚大地构造发展的重要转折[J]. 地质科学, 1994, 29(2): 105–119.
- [80] 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地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2005, 21(1): 169–188.
- [81] Petro W L, Vogel T A, Wilband J T. Major–element chemistry of plutonic rock suites from compressional and extensional plate boundaries[J]. Chemical Geology, 1979, 26(79): 217–235.
- [82] 李益龙, 周汉文, 肖文交, 等. 古亚洲构造域和西太平洋构造域在索伦缝合带东段的叠加: 来自内蒙古林西县西拉木伦断裂带内变形闪长岩的岩石学、地球化学和年代学证据[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2012, 37(3): 433–450.
- [83] 李益龙, 周汉文, 钟增球, 等. 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 年龄及地球化学证据[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2010, 35(6): 921–932.
- [84] Jian P, Kröner A, Windley B F, et al. Carboniferous and Cretaceous mafic–ultramafic massifs in Inner Mongolia (China): A SHRIMP zircon and geochemical study of the previously presumed integral “Hegenshan ophiolite” [J]. Lithos, 2012, 142/143: 48–66.
- [85] Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. Chemical Geology, 1985, 48(85): 43–55.
- [86] 张连昌, 吴华英, 相鹏, 等. 中生代复杂构造体系的成矿过程与成矿作用——以华北大陆北缘西拉木伦钼铜多金属成矿带为例[J]. 岩石学报, 2010, 26(5): 1351–1362.
- [87] Guo F, Fan W, Gao X, et al. Sr–Nd–Pb isotope mapping of Mesozoic igneous rocks in NE China: Constraints on tectonic framework and Phanerozoic crustal growth[J]. Lithos, 2010, 120(3): 563–578.
- [88] Guo F, Fan W, Li C, et al. Early Cretaceous Highly Positive End Felsic Volcanic Rocks From The Hinggan Mountains, Ne China: Origin And Implications For Phanerozoic Crustal Growth[J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98(6): 1395–1411.
- [89] Zhang L C, Zhou X H, Ying J F, et al. Geochemistry and Sr–Nd–Pb–Hf isotopes of Early Cretaceous basalts from the Great Xinggan Range, NE China: Implications for their origin and mantle source characteristics[J]. Chemical Geology, 2008, 256(1/2): 12–23.
- [90] 高晓峰, 郭锋, 范蔚茗, 等. 南兴安岭晚中生代中酸性火山岩的岩石成因[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 737–748.
- ① 内蒙古自治区地质调查院. 1:20万林西县(K-50-05)、克什克腾旗(K-50-10)、五分地(K-50-11)幅区域地质图. 2000.
- ② 内蒙古自治区地质调查院. 1:20万刘家营子(K-50-04)幅区域地质图. 2001.