

大兴安岭嫩江地区中生代双峰式火山岩锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其地质意义

刘 阁^{1,2}, 吕新彪², 陈 超², 杨永胜², 王庆军¹, 孙耀锋¹

(1. 新疆地质调查院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 本文对嫩江地区中生代双峰式火山岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和岩石地球化学研究。测年结果显示嫩江地区中生代双峰式火山岩形成于 127.5 Ma 的早白垩世晚期。岩石地球化学研究表明, 早白垩世晚期火山岩具有双峰式组合特点, 基性端员富碱, 富含轻稀土元素和大离子亲石元素, 亏损重稀土元素和高场强元素 (Nb、Ta、Ti、Y), 形成于富集的岩石圈地幔的部分熔融和分离结晶作用, 形成的过程可能含有少量的陆壳混染。酸性端员显示 A 型流纹岩的特征, 为幔源岩浆底侵, 使中下地壳岩石发生部分熔融的成因。双峰式火山岩组合的存在暗示其形成于陆内拉张的构造环境。结合区域上中生代火山岩的空间展布特征, 嫩江地区早白垩世晚期双峰式火山岩的形成应与太平洋板块向欧亚大陆的俯冲作用有关。

关键词: 锆石 U-Pb 年代学; 地球化学; 中生代; 双峰式火山岩; 构造背景

中图分类号: P597+.3; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)03-0458-13

Zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic bimodal volcanic rocks from Nenjiang area in Da Hinggan Mountains and their tectonic implications

LIU Ge^{1,2}, LÜ Xin-biao², CHEN Chao², YANG Yong-sheng², WANG Qing-jun¹ and SUN Yao-feng¹

(1. Geological Research Academy of Xinjiang, Urumqi 830000, China; 2. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and geochemical data of the Mesozoic bimodal volcanic rocks from Nenjiang in the Da Hinggan Mountains were studied in this paper. U-Pb ages of zircons show that the Mesozoic bimodal volcanic rocks were formed at the late stage of the Early Cretaceous (about 127.5 Ma). The Baiyingaolao Formation acidic volcanic rocks are composed of rhyolites and rhyolitic crystal clastic tuffs. The Meletu Formation basaltic volcanic rocks are composed of trachybasalt, basaltic andesite and basaltic trachyte. Geochemical studies suggest that the late Early Cretaceous volcanic rocks display a bimodal volcanic rock association. The Meletu volcanic rocks belong to alkaline series, have low silicon and are rich in alkalis. The chondrite-normalized REE patterns indicate that the volcanic rocks are enriched in light rare earth elements (LREE) with significant fractionation between HREE and LREE and weak Eu anomalies. The trace element geochemistry is characterized by enrichment of large ionic lithophile elements (K, Rb, Ba) and depletion of high field strength elements (Nb, Ta). These characteristics indicate that the volcanic rocks originated from the remelting and fractionation of metasomatized enriched subcontinental lithospheric mantle, probably mixed with a small amount of crustal

收稿日期: 2013-11-06; 修订日期: 2014-04-08

基金项目: 内蒙古自治区区域矿产地质调查资助项目(NMKD2010-3)

作者简介: 刘 阁(1988-), 男, 硕士, 从事区域地质调查工作, E-mail: liugecug@qq.com; 通讯作者: 吕新彪(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事矿床学、矿产勘查研究, E-mail: luxb@cug.edu.cn.

materials. The alkaline basalt series was formed under the condition of an intraplate setting, most likely continental rift. The Baiyingaolao volcanic rocks are rich in silicon and alkalis, poor in calcium and magnesium and have characteristic FeO^T/MgO ratio. The chondrite-normalized REE patterns indicate that the volcanic rocks are enriched in light rare earth elements (LREE) with significant fractionation between HREE and LREE and strong negative Eu anomalies. The trace element geochemistry is characterized by enrichment of large ionic lithophile elements (K, Rb) and LREE, and depletion of high field strength elements (Nb, Ta, P, Ti). The trace element geochemistry characteristics of rhyolites show an affinity with the A-type granite, suggesting that the volcanic rocks should have been formed in an extensional setting. These characteristics imply that the low-Sr rhyolitic magma originated from enriched mantle plume that intruded into the lower crust, and made it partially melted. The bimodal volcanic rocks were probably formed in an extensional setting. Combined with spatial and temporal distribution of the Mesozoic volcanic rocks in Northeast China, it is suggested that the formation of the late Early Cretaceous bimodal volcanic rocks might be attributed to subduction of the Paleo-Pacific plate beneath the Eurasian continent.

Key words: zircon U-Pb chronology; geochemistry; Mesozoic; bimodal volcanic rocks; tectonic setting

嫩江地区位于大兴安岭中北部,在大地构造位置上属于兴蒙造山带东段,晚古生代至早中生代经历了古亚洲洋、蒙古-鄂霍茨克洋的闭合及区内多块体拼贴的过程(Kuzmin *et al.*, 1996; Zhao and Coe, 1996)。而在中、新生代,该区又叠加了环太平洋构造体系和蒙古-鄂霍茨克缝合带的影响(林强, 1999)。该地区中生代火山岩出露广泛,岩石类型复杂,是大兴安岭巨型火山岩带的重要组成部分。

近年来虽然对区域上中生代火山岩年代学的研究取得了明显进展(葛文春等, 2000, 2001, 2005; 吕志成等, 2000; 郭锋等, 2001; Jahn *et al.*, 2001; Fan *et al.*, 2003; Wu *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2008; 苟军等, 2010; 孙德有等, 2011; 赵忠华等, 2011; 孟恩等, 2011; 徐美君等, 2011),但是,对不同时期火山岩形成构造背景的认识仍存在较大争论:如与地幔柱岩浆活动有关的盆岭型构造模式(Fan *et al.*, 2003; 孙德有等, 2011, 赵忠华等, 2011);还是与东部太平洋板块的俯冲作用有关(Wang *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2008; 孟恩等, 2011; 徐美君等, 2011)。

大兴安岭部分地区存在着双峰式火山岩(林强等, 2003; 孟恩等, 2011; 徐美君等, 2011),而双峰式火山岩具有重要的构造指示意义。鉴于此,本文以大兴安岭中北部嫩江地区中生代双峰式火山岩为研究对象,从野外地质及岩石学、年代学及地球化学三个方面进行研究,结合区域上同时代火成岩组合特征,讨论该期火成岩的成因及其形成的构造背景,

这对系统完整的认识东北地区中生代的构造属性具有重要意义。

1 地质背景及岩石学特征

研究区位于黑龙江省嫩江县西部地区,大地构造位置位于贺根山-嫩江-黑河缝合带北侧(图 1a)。该地区出露的古生代地层为早石炭世莫尔根河,主要由玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩及凝灰岩组成(刘阁等, 2012)。中生代地层为陆相火山岩系和陆相碎屑沉积岩,陆相碎屑沉积岩主要为晚白垩世嫩江组;火山岩地层依据内蒙古自治区地质矿产局(1991)及李文国等(1996)的地层清理意见自下而上依次为晚侏罗世玛尼吐组(相当于上库力组二段)、早白垩世白音高老组(相当于上库力组三段)和梅勒图组(相当于伊列克得组)。火山岩分布概况见图 1b。

本文所研究的白音高老组火山岩主要由流纹岩、流纹质凝灰岩组成,厚度 1 179.2 m,与梅勒图组玄武安山岩等岩性相伴产出;梅勒图组火山岩主要由玄武安山岩、粗面玄武岩、玄武粗安岩组成,厚度 2 075.0 m,与上覆嫩江组呈角度不整合接触,岩石组合呈现出双峰式火山岩套的特点。

流纹岩:岩石呈灰白色,斑状结构,流纹构造,斑晶主要由石英(15%~20%)、碱性长石和斜长石组成。石英斑晶呈半自形-他形粒状,大小 0.5~4 mm 不等,碱性长石斑晶呈半自形板状,粒度 0.5~1.5 mm 不等,斜长石斑晶呈半自形板状。基质由隐

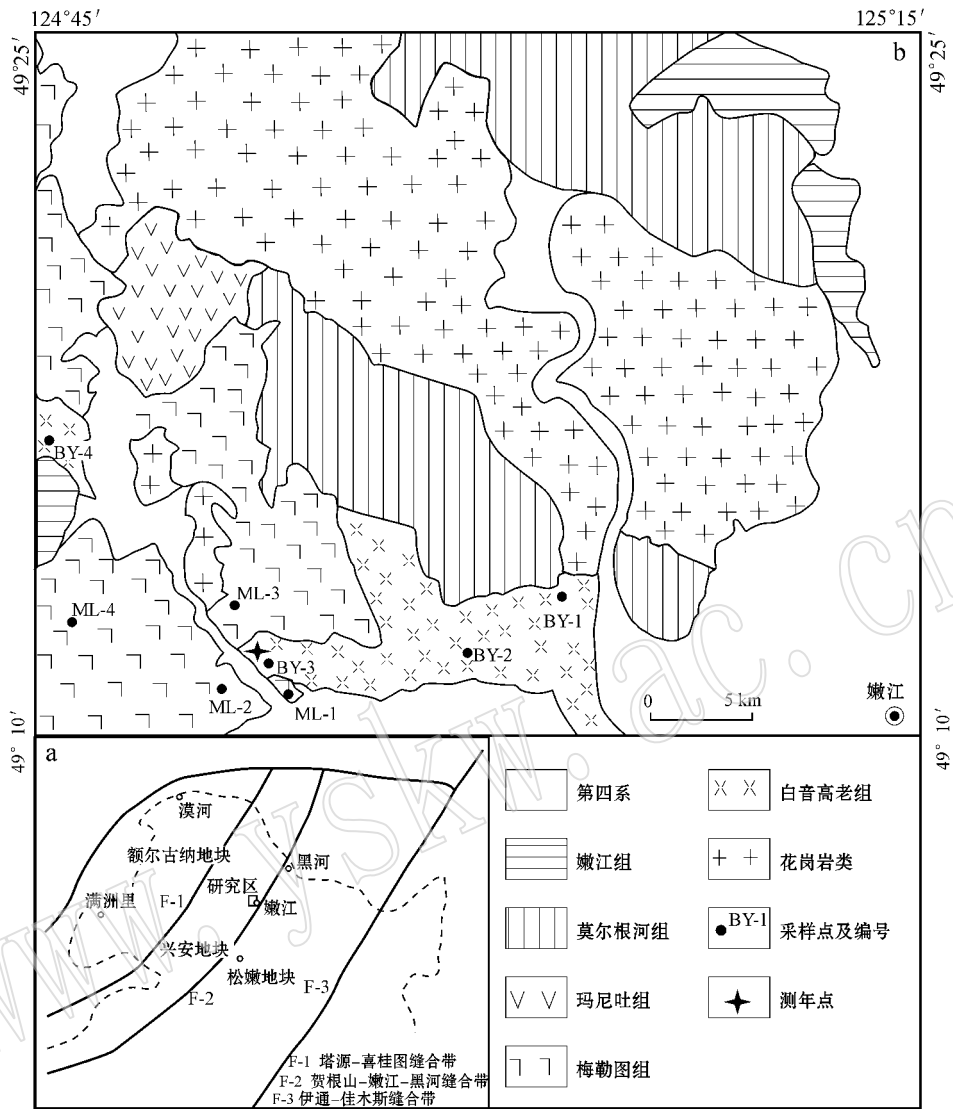


图 1 区域地质构造简图(a, 据张兴洲等, 2006 修改)和嫩江地区地质简图(b)

Fig. 1 Tectonic setting map (a, modified after Zhang Xingzhou *et al.*, 2006) and simplified geological map of Nenjiang area (b)

晶质-微晶质的长石、石英组成, 可见明显的流纹构造。

流纹质晶屑凝灰岩: 火山碎屑以晶屑为主, 含量在 50%~60% 之间, 晶屑成分主要为石英、碱性长石和斜长石, 呈次棱角状, 晶屑被熔蚀现象较为普遍; 岩屑以灰白色流纹质碎屑为主 (<10%), 呈浑圆状。

玄武安山岩: 暗灰色、灰黑色, 斑状结构, 气孔-杏仁构造。斑晶主要为斜长石、辉石。斜长石斑晶较自形, 粒径 0.5~5 mm 不等, 含量大约为 15%~20%。辉石斑晶呈浅绿色, 短柱状晶形, 大小 0.5~2 mm 不

等, 含量大约为 5%~10%。基质由斜长石、辉石和火山玻璃组成, 呈交织结构、安山结构。

粗面玄武岩: 深灰色, 斑状结构, 斑晶主要为斜长石和辉石, 还含有少量的碱性长石斑晶。斜长石斑晶较自形, 呈板状或片状, 具正低突起, 可见聚片双晶, 粒度为 0.5~3 mm, 含量大约为 15%~20%。辉石斑晶呈浅绿色、短柱状晶形, 含量 <5%, 碱性长石斑晶含量较少。基质由斜长石、辉石和火山玻璃组成, 呈交织结构。

2 样品制备及分析方法

选择双峰式火山岩套的酸性端员白音高老组流纹岩样品做锆石 U-Pb 定年分析, 样品破碎锆石挑选由河北省区域地质矿产调查研究所完成。阴极发光显微照相在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成, 同位素组成用国际标准锆石 91500 作为外标进行校正, 激光束直径 32 μm , 分析方法参见 Zong 等(2010)。

选择 4 个基性和 4 个酸性火山岩岩石样品送至澳实分析检测集团澳实矿物实验室(广州)测试分析。主量元素由荷兰 PANalytical 生产的 Ax-ios 仪器利用荧光光谱仪(XRF)测试分析, 痕量元素分析采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析方法, 检测仪器为美国 Perkin Elmer 公司生产的 Elan 9000。主量元素分析精度和准确度优于 5%, 痕量元素的分析精度和准确度优于 10%。

3 分析结果

3.1 年代学结果

白音高老组流纹岩锆石为无色透明至浅黄色, 颗粒呈短柱状或长柱状。粒径通常为 50~90 μm ,

长宽比 1.5:1~3:1。CL 图像显示该火山岩锆石震荡环带清晰, 具典型的岩浆锆石特征(图 2)。流纹岩所测锆石的 Th 和 U 含量分别为 $317 \times 10^{-6} \sim 2\,218 \times 10^{-6}$ 和 $891 \times 10^{-6} \sim 2\,322 \times 10^{-6}$, Th/U 比值介于 0.36~1.16, 明显大于变质锆石 Th/U 比值(< 0.1)(Griffin *et al.*, 2004), 表明其岩浆成因(Hoskin and Schaltegger, 2003)(表 1)。

白音高老组流纹岩锆石测点 15 个, 所有数据点都位于谐和线上及附近, 其中一个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄 145.7 ± 6.5 Ma, 与区域上塔木兰沟组火山岩形成时代一致(赵忠华等, 2011), 可能为捕获的岩浆锆石, 其余 14 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄 124~131.4 Ma, 加权平均年龄 127.5 ± 0.8 Ma, MSWD = 0.99(图 3), 代表了岩石的形成时代, 即早白垩世晚期。

3.2 岩石地球化学特征

由表 2 可以看出, 嫩江地区早石炭世晚期火山岩样品 SiO_2 含量变化于 49.95%~55.93% 和 76.39%~78.06% 之间, 其成分在中性岩的范围出现了明显的间断(即 Daly 间断), 为典型的双峰式火山岩组合。

3.2.1 主量元素特征

梅勒图组基性火山岩的 SiO_2 介于 49.95%~55.93%, Al_2O_3 较高介于 16.91%~19.43%, 较富碱

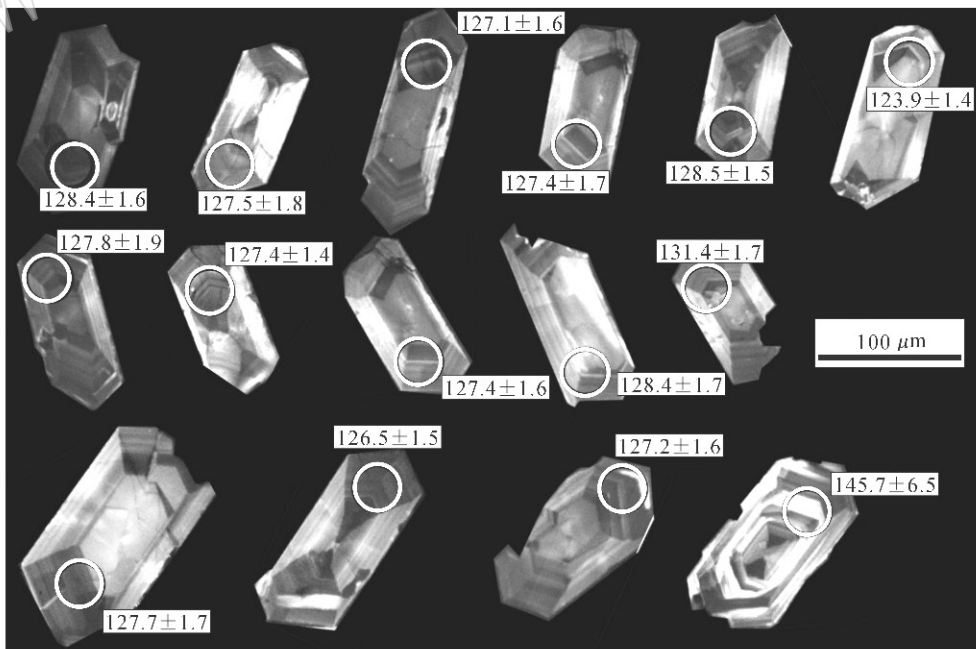


图 2 研究区白音高老组火山岩锆石阴极发光图像

Fig. 2 CL images of zircons from Baiyingaolao volcanic rocks in the study area

表 1 嫩江地区白音高老组火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年数据

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results for Baiyingaolao volcanic rocks from Nenjiang area

测试点	$w_B/10^{-6}$		Th/U	比值						年龄/Ma	
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
N3-01	605	1157	0.52	0.169 8	0.008 0	0.022 9	0.001 0	159.3	7.0	145.7	6.5
N3-02	1 058	1 809	0.58	0.134 1	0.005 6	0.020 1	0.000 2	127.8	5.0	128.4	1.6
N3-03	1 136	1 952	0.58	0.134 7	0.005 5	0.020 0	0.000 3	128.3	4.9	127.5	1.8
N3-04	602	1 665	0.36	0.140 7	0.006 6	0.019 9	0.000 2	133.7	5.8	127.1	1.6
N3-05	533	1 245	0.43	0.138 8	0.005 9	0.020 0	0.000 3	132.0	5.3	127.4	1.7
N3-06	598	1 424	0.42	0.146 6	0.006 2	0.020 1	0.000 2	138.9	5.5	128.5	1.5
N3-07	1 244	2 025	0.61	0.142 6	0.005 3	0.019 4	0.000 2	135.3	4.7	124.0	1.4
N3-08	317	891	0.36	0.144 2	0.008 0	0.020 0	0.000 3	136.8	7.1	127.8	1.9
N3-09	956	1 688	0.57	0.157 5	0.006 4	0.020 0	0.000 2	148.5	5.6	127.4	1.4
N3-10	1 503	2 322	0.65	0.136 7	0.005 1	0.020 0	0.000 2	130.1	4.5	127.4	1.6
N3-11	752	1 558	0.48	0.149 1	0.006 5	0.020 1	0.000 3	141.1	5.7	128.4	1.7
N3-12	929	1 776	0.52	0.154 0	0.006 1	0.020 6	0.000 3	145.4	5.4	131.4	1.7
N3-13	502	1 393	0.36	0.140 0	0.006 2	0.020 0	0.000 3	133.1	5.5	127.8	1.7
N3-14	2 218	1 915	1.16	0.146 2	0.005 2	0.019 8	0.000 2	138.6	4.6	126.5	1.5
N3-15	376	986	0.38	0.134 1	0.006 6	0.019 9	0.000 3	127.8	5.9	127.2	1.6

($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) = 5.28% ~ 6.44%, 镁含量较低 (MgO = 3.94% ~ 4.38%, 平均为 4.09%), 镁值较小 $\text{Mg}^\# = 45 \sim 57$, 平均为 50。在 TAS 图解上大多位于碱性系列及其过渡区(图 4a), 相当于林强等(2003)提出的大兴安岭地区碱性系列粗面玄武岩-玄武粗安岩类。

白音高老组火山岩 SiO_2 含量较高, 介于 76.39% ~ 78.06% 之间, Al_2O_3 变化于 11.57% ~ 12.65%, 富碱 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 6.49\% \sim 8.61\%$, 并为钾质 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.35 \sim 4.1$ 。相反, 贫镁 $\text{MgO} = 0.16\% \sim 0.39\%$ 、贫钙 $\text{CaO} = 0.14\% \sim 0.41\%$, 高 TFeO/MgO 比值 2.19 ~ 8.77, 火山岩显示出高硅富碱、贫铝钙镁的特点, 与世界 A 型花岗岩和碱性流纹岩平均成分接近(Whalen *et al.*, 1987)。在 TAS 图解中, 白音高老组火山岩位于流纹岩区域, 相当于林强等(2003)提出的大兴安岭低 Sr 流纹岩类(图 4a); 在 AR - SiO_2 图解中白音高老组火山岩位于碱性岩区(图 4b)。

3.2.2 稀土元素

白音高老组火山岩稀土总量 ΣREE 介于 $77.13 \times 10^{-6} \sim 262.75 \times 10^{-6}$ 之间, 稀土元素配分模式呈轻稀土富集右倾型, 轻重稀土分馏明显(图 5a), 轻重稀土元素的分馏系数 $(\text{La}/\text{Yb})_N = 7.12 \sim 21.56$ (平均为 13.04), $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 介于 3.09 ~ 10.31 之间, 轻稀土分馏明显 ($\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 介于 1.24 ~ 1.78 之间, 重稀土分馏不明显。岩石钕负异常较强, $\delta\text{Eu} = 0.05 \sim 0.47$, 说明源区有斜长石残留或岩浆演化过程中

经历了斜长石的分离结晶作用。白音高老组火山岩稀土元素配分曲线图与具有显著钕负异常的大陆裂谷碱性流纹岩、A 型花岗岩(Macdonald *et al.*, 1987; Wilson, 1989) 大兴安岭低 Sr 流纹岩(林强等, 2003) 具有较好的一致性。

梅勒图组基性火山岩稀土元素总量 ΣREE 偏低, 介于 $128.22 \times 10^{-6} \sim 192.23 \times 10^{-6}$ 之间; 具有轻稀土元素富集的右倾特征, 轻稀土元素富集且轻、重稀土元素之间存在着较强的分馏作用(图 5b), 分馏系数 $(\text{La}/\text{Yb})_N = 6.83 \sim 17.75$, 轻稀土元素内部之间发生了一定的分馏作用 ($\text{La}/\text{Sm})_N = 2.66 \sim 4.87$, 而重稀土元素分馏较弱 ($\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.75 \sim 2.28$, 负 Eu 异常不明显 (δEu 值为 0.84 ~ 0.98)。总体特征与大兴安岭地区碱性玄武岩特征类似(林强等, 2003)。

3.2.3 微量元素

白音高老组流纹岩微量元素原始地幔标准化蛛网图的曲线分布形式相似, 表现为大离子亲石元素(LILE)K、Rb 和 LREE 相对富集, Ba、Sr 出现强烈的负异常。上述火山岩微量元素组成类似于非洲肯尼亚裂谷碱性流纹岩, 与大兴安岭低 Sr 流纹岩的特征也完全一致(Wilson, 1989; 葛文春等, 2001; 林强等, 2003)(图 6a)。火山岩 Sr 的亏损说明斜长石作为熔融残留相或结晶分离相的存在, P、Ti 的亏损与磷灰石、钛铁矿的分离结晶有密切关系。岩石的 Rb/Sr 比值较高, 介于 1.74 ~ 8.27 之间(平均值为 4.07), 接近于 A 型花岗岩(平均值为 3.52)(Whalen

表 2 嫩江地区中生代火山岩主量元素 ($w_B/\%$) 与微量元素、稀土元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果Table 2 Major elements ($w_B/\%$) and rare earth elements ($w_B/10^{-6}$) of Mesozoic volcanic rocks in Nenjiang area

样品号	白音高老组				梅勒图组			
	BY-1	BY-2	BY-3	BY-4	ML-1	ML-2	ML-3	ML-4
SiO ₂	78.06	76.67	76.39	76.77	49.95	53.8	55.93	52.76
TiO ₂	0.04	0.05	0.11	0.08	1.41	1.1	0.77	1.21
Al ₂ O ₃	12.01	11.84	12.65	11.57	19.43	16.95	16.91	17.65
TFe ₂ O ₃	0.64	0.95	1.56	1.35	9.42	8.09	6.67	8.74
MnO	0.01	0.01	0.11	0.12	0.12	0.15	0.13	0.14
MgO	0.18	0.39	0.16	0.25	3.94	4.05	4.38	3.99
CaO	0.14	0.41	0.23	0.28	4.99	7.32	4.52	6.25
Na ₂ O	1.44	2.11	3.67	3.24	5.29	3.58	5.22	4.62
K ₂ O	5.9	4.38	4.94	4.8	1.15	1.7	0.97	1.21
P ₂ O ₅	0.01	0.02	0.01	0.02	0.527	0.44	0.288	0.489
LOI	1.04	2.7	0.25	1.29	3.41	2.94	4.16	2.61
Total	99.48	99.61	100.05	99.93	99.75	100	99.87	99.82
Na ₂ O + K ₂ O	7.34	6.49	8.61	8.04	6.44	5.28	6.19	5.83
K ₂ O/Na ₂ O	4.1	2.08	1.35	1.48	0.22	0.47	0.19	0.26
TFeO/MgO	3.2	2.19	8.77	4.86				
AR	4.05	3.25	5.03	5.22				
Mg [#]					45	50	57	47
La	15	26.9	52.2	45.73	23.8	53.7	33	26.8
Ce	32.6	49.2	16.5	72.84	49.3	70.1	64	55.95
Pr	4.02	6	12.5	1.98	6.21	8.77	7.59	7.38
Nd	14	19.7	43.2	19.58	24.7	34.4	28.1	31.68
Sm	3.05	3.56	9.04	2.79	5.63	6.93	5.39	5.94
Eu	0.21	0.49	0.13	0.44	1.56	1.77	1.52	1.76
Gd	2.5	2.65	7.59	2.95	5.09	5.67	4.38	4.83
Tb	0.37	0.41	1.16	0.44	0.74	0.74	0.61	0.76
Dy	2.14	2.18	7.67	2.23	4.58	4.35	3.41	3.93
Ho	0.44	0.42	1.55	0.44	0.91	0.85	0.68	0.77
Er	1.15	1.16	4.79	1.21	2.63	2.29	1.71	2.13
Tm	0.19	0.17	0.7	0.21	0.35	0.31	0.25	0.31
Yb	1.27	1.2	4.94	1.43	2.35	2.04	1.55	1.87
Lu	0.19	0.17	0.78	0.24	0.37	0.31	0.24	0.29
ΣREE	77.13	114.21	262.75	156.51	128.22	192.23	152.43	144.4
(La/Yb) _N	7.96	15.11	7.12	21.56	6.83	17.75	14.35	9.66
(La/Sm) _N	3.09	4.75	3.63	10.31	2.66	4.87	3.85	2.84
(Gd/Yb) _N	1.59	1.78	1.24	1.66	1.75	2.24	2.28	2.08
δEu	0.23	0.47	0.05	0.47	0.87	0.84	0.93	0.98
Sc	2	1	4	8	14	15	13	13
V	7	5	2	13	178	206	116	138
Cr	4	3	10	9	120	120	70	80
Co	<1	<1	<1	<1	28	23	18	22
Ni	1	1	1	1	65	33	29	30
Ga	19.2	17.1	20	18.7	20.8	21.5	21.1	21.3
Rb	190	107.5	147	177.8	32.5	34	40.9	61.23
Ba	234	175	44.3	89.3	335	836	228	943
Th	7.9	9.09	13.95	15.08	2.21	4.65	8.55	3.76
U	1.53	1.47	3.36	2.85	0.86	0.99	2.67	1.21
Nb	12.5	10.8	30.6	16.3	12.8	8.1	9.8	7.3
Ta	1.1	0.9	2.3	1.4	0.8	0.5	0.7	0.41
Sr	60.4	61.5	46.8	21.5	842	1105	652	1134
Zr	67	69	269	103	201	192	189	164
Hf	3.3	3	8.2	4.31	4.8	4.9	4.9	4.3
Y	11.4	11.4	42.5	14.4	26.1	22.8	17	23.6

注: TFe₂O₃ 表示总铁量 (La/Yb)_N 为球粒陨石标准化比值, Mg[#] = Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺)

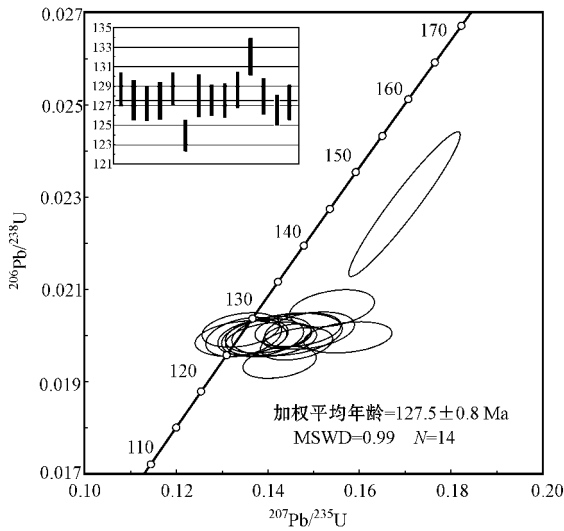
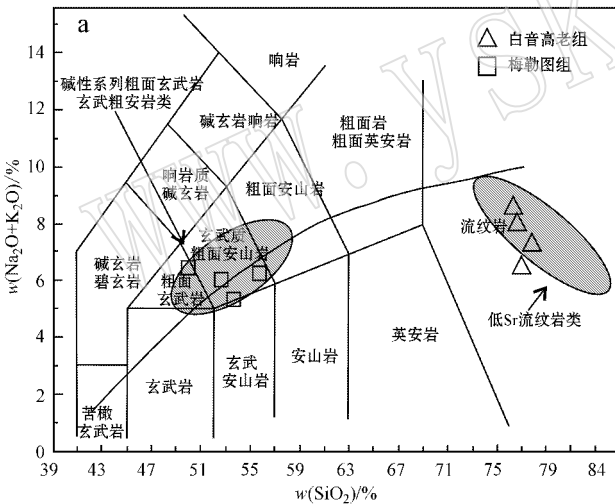


图 3 研究区白音高老组火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 U-Pb concordia diagrams of LA-ICP-MS zircon data for Baiyingaolao volcanic rocks in the study area



et al. , 1987), 在 Whalen 等(1987) 的 Nb - 10 000 Ga/Al, Y - 10 000 Ga/Al, Zr - 10 000 Ga/Al 和 Ce - 10 000 Ga/Al (图 7) 岩石类型判别图解上, 白音高老组火山岩样品位于 A 型花岗岩区。

梅勒图组基性火山岩微量元素原始地幔标准化蛛网图的曲线分布形式相似(图 6b), 都具有相对富集大离子亲石元素 (LILE) 和相对亏损重稀土元素 (HREE) 如 Yb 和 Lu 的特征, 并且都具有明显亏损高场强元素 Nb 和 Ta 的特点, 与洋脊玄武岩 (MORB)、洋岛玄武岩 (OIB)、大陆溢流玄武岩 (CFB) 明显不同 (Sun and McDonough, 1989), 与大兴安岭地区碱性玄武岩特征类似 (林强等 2003)。

4 讨论

4.1 岩浆来源及岩石成因

双峰式火山岩中的玄武岩源于地幔橄榄岩的部分熔融已被学者所公认, 但流纹岩却有两种截然不

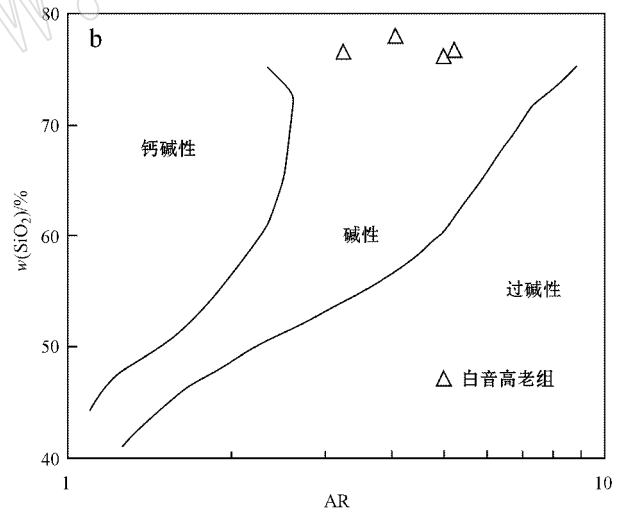


图 4 研究区中生代火山岩 TAS 图解 (a, 据 Le et al. , 1989) SiO₂ - AR 图解 (b, 据 Wright , 1969)

Fig. 4 TAS diagram (a, after Le et al. , 1989) and SiO₂ - AR diagram (b, after Wright , 1969) for Mesozoic volcanic rocks in the study area

同的成因机制, 有幔源玄武质岩浆分异也有地壳物质的部分熔融 (Condie, 1986; Wilson, 1989)。由玄武质岩浆分异作用形成的流纹岩通常地壳混染物极少或没有, 两者在微量元素和同位素地球化学特征上都极为相似 (Geist et al. , 1995; Garland et al. , 1995); 由地壳物质部分熔融形成的流纹岩, 玄武质岩浆仅为流纹岩提供了热源, 与伴生的玄武质岩石的微量元素及同位素组成相差较大 (Davies and Mac-

donald, 1987; 王焰等, 2000)。

4.1.1 玄武质岩石成因

玄武岩岩浆从形成到喷出地表一般会经历分离结晶作用和同化混染作用, 或二者的共同作用 (AFC 过程)。梅勒图组火山岩样品具有较高的 SiO₂ 含量, MgO 含量都不大于 4.38%, 镁值 (Mg[#]) 较低 45 ~ 57, 相容元素如 Co 和 Ni 的含量分别为 18 × 10⁻⁶ ~ 28 × 10⁻⁶ 和 30 × 10⁻⁶ ~ 65 × 10⁻⁶, 都比较低, 因

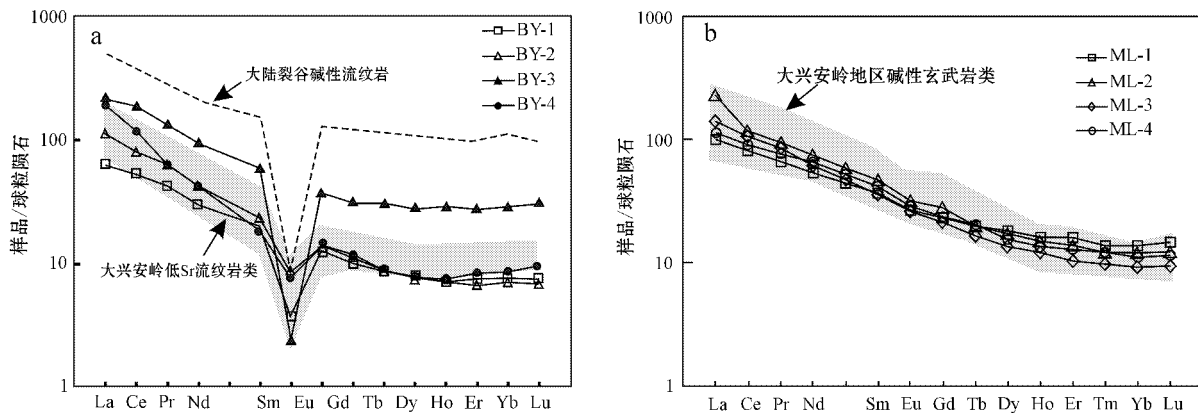


图 5 研究区中生代火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分图解(球粒陨石标准化值据 Boynton, 1984)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns for Mesozoic volcanic rocks in the study area (normalizing data after Boynton, 1984)

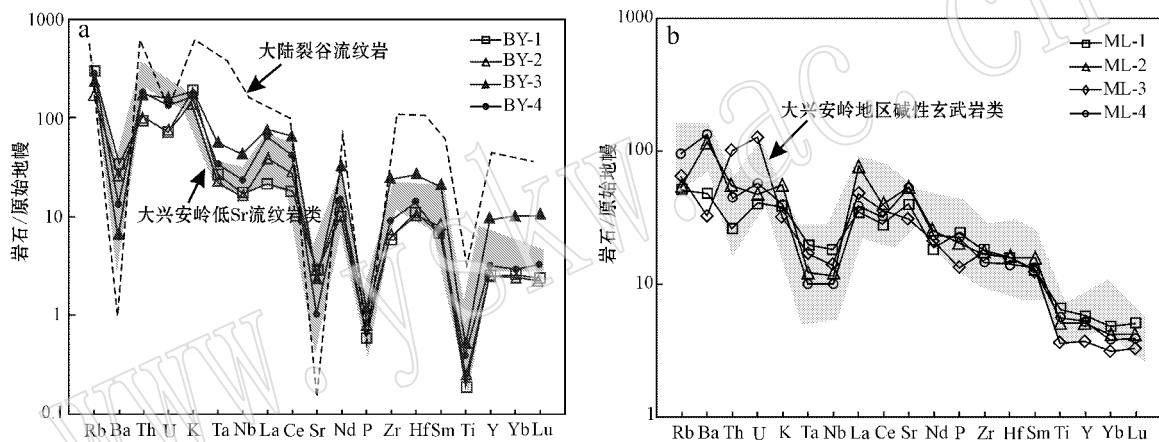


图 6 研究区中生代火山岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams for Mesozoic volcanic rocks in the study area (normalizing data after Sun and McDonough, 1989)

此这些岩石可能是经结晶分离作用演化的岩浆喷发形成的。

梅勒图组火山岩样品均具有富集大离子亲石元素(LILE)如 Rb 和 Ba、轻稀土元素(LREE),亏损高场强元素如 Nb、Ta 等特点。Nb、Ta 的亏损说明火山岩可能遭受到了陆壳的混染作用或者是反映了其源区的地球化学性质。从变化不大的微量元素比值 La/Sr(4.23~7.75)来看,地壳混染作用在岩浆演化过程中影响不大(可能会有微弱的混染作用),因此其元素地球化学特征主要反映了其源区的地球化学性质。Arndt 等(1992)通过对玄武岩的研究认为,岩石的 Nb 负异常很可能与岩石圈地幔的交代作用有关。由于来自富集的大陆岩石圈地幔的岩浆通常亏损高场强元素(Molzahn et al., 1996),因此梅勒图组火山

岩样品的源区可能是富集的岩石圈地幔。

研究表明,软流圈地幔来源的岩浆具有相对较低(LREE/HFSE)比值,如美国盆岭省软流圈地幔来源玄武岩的 La/Nb<1.5,而内华达州起源于富集岩石圈地幔熔岩的 La/Nb>1.5(Fitton et al., 1998)。科罗拉多州西北软流圈地幔来源的火山岩其 La/Ta<22,未受到岩石圈地幔或地壳的混染,而 La/Ta>30 的火山岩浆受到岩石圈地幔或地壳的影响(Leat et al., 1988)。梅勒图组火山岩的 La/Nb=1.86~6.63(>1.5),La/Ta=29.75~107.4(平均 62.4)>30,同样暗示岩浆可能起源于富集的岩石圈地幔。

根据讨论可知梅勒图组火山岩形成于富集的岩石圈地幔的部分熔融和分离结晶作用,形成的过程可能含有少量的陆壳混染。

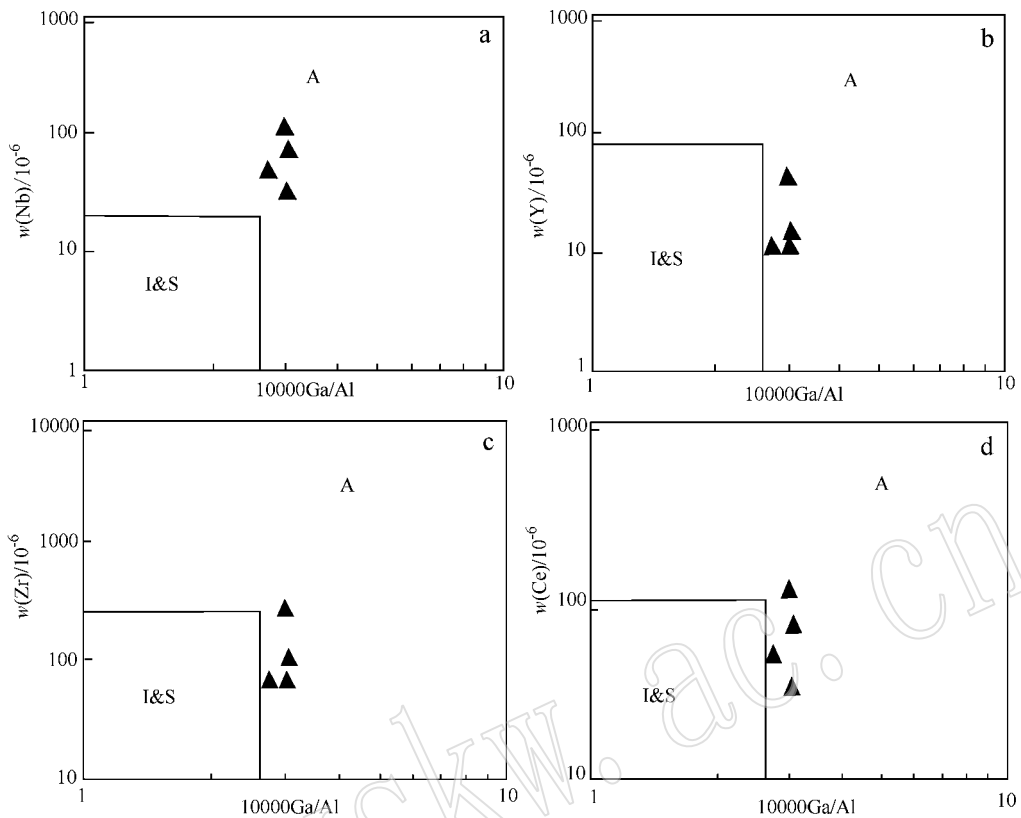


图 7 研究区白音高老组火山岩 Nb, Y, Zr 和 Ce-10 000 Ca/Al 关系图(据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 7 Nb, Y, Zr and Ce-10 000 Ca/Al diagrams for Baiyingaolao volcanic rocks in the study area (after Whalen *et al.*, 1987)

4.1.2 流纹质岩石成因

梅勒图组基性火山岩与白音高老组酸性火山岩相比,前者的 TiO_2 、 MgO 、 P_2O_5 和 TFe_2O_3 含量较高,后者具有极低的 TiO_2 、 MgO 、 P_2O_5 和 TFe_2O_3 含量;它们的微量元素原始地幔标准化配分形式有一定的差异,如白音高老组酸性火山岩明显富集 Th、U、K,强烈亏损 Sr、P、Ti,梅勒图组基性火山岩富集 U、Th,而 Sr、P 和 Ti 不具负异常。此外,它们的不相容微量元素比值差异明显,如基性火山岩的 Zr/Hf 、 Nb/Ta 、 Zr/Nb 分别为 38.1~41.8、14~17.8、15.7~23.7,酸性火山岩的相应值分别为 20.3~23.8 (去除一个异常值 32.5)、11.6~13.3、5.4~8.8。综上所述,研究区的双峰式火山岩的两个端员并非同源,流纹岩可能不是玄武质母岩浆结晶分异的产物,而更可能是幔源岩浆与壳源熔体混合作用的结果。

白音高老组流纹岩高的 SiO_2 和极低的 MgO 含量表明其不可能是幔源岩石直接熔融的产物。岩石具有强烈的 Eu 负异常,表明发生了斜长石的强烈的分离结晶作用或者源区有残留。事实上,对于如此高

硅的酸性岩浆来说,很难发生强烈的分离结晶作用。因此流纹岩更可能是壳源岩石部分熔融的产物。

微量元素组成上研究区白音高老组火山岩以富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土(LREE)元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素为特征,显示火山岩具有壳源岩浆的典型特征。白音高老组流纹岩的 $\text{Rb}/\text{Sr} = 1.74 \sim 8.27 (> 0.5)$, $\text{Ti}/\text{Y} = 15.52 \sim 33.33 (< 100)$, $\text{Ti}/\text{Zr} = 2.45 \sim 4.66 (< 20)$ 均位于壳源岩浆范围内(Pearce, 1983; Tischendorf and Paelchen, 1985)。 $\text{Nb}/\text{Ta} = 11.36 \sim 13.30$, 平均值为 12.07,与地壳平均值(11~12)基本一致(Green, 1994),也表明白音高老组流纹岩是由陆壳岩石部分熔融形成的。此外,白音高老组流纹岩具有 A 型流纹岩的特征,在贫水条件下 A 型流纹岩岩浆可由玄武质或长英质地壳部分熔融产生(Pation, 1997)。

研究区白音高老组流纹岩具有低 Sr 流纹岩的特点,与伴生的玄武岩微量元素特征差距较大且与碱性系列玄武岩之间的伴生关系表明,白音高老组流纹岩为起源于富集型地幔源的碱性系列母岩浆底

侵,使中下地壳岩石发生部分熔融所形成。

4.2 嫩江地区双峰式火山岩形成环境及地质意义

研究区白音高老组与梅勒图组火山岩具有双峰式火山岩的特征,形成于早白垩世晚期。梅勒图组玄武岩样品具有较高的 Zr 质量分数($164 \times 10^{-6} \sim 201 \times 10^{-6}$)和 Zr/Y 值(6.95~11.12),在 Zr/Y-Zr 图解上落入板内玄武岩区及其附近,表明其应为大陆板内玄武岩,并非属于陆缘弧玄武岩(图 8a)。该组玄武岩 Ta/Hf=0.10~0.17(>0.1)和 Th/Ta=2.76~12.21(>1.6),同样属于大陆板内构造环境(Zhang and Wang, 1996),与葛文春等(2000)对大兴安岭北部伊列克得组玄武岩特征一样指示一个大陆裂谷构造环境。白音高老组流纹质岩石具有强烈的负 Eu 异常,大离子亲石元素(LILE)K、Rb 和 LREE 相对富集,Ba、Sr 出现强烈的负异常,高场强元素

(HFSE)Nb、Ta、P、Ti 强烈亏损,微量元素组成类似于非洲肯尼亚裂谷碱性流纹岩(Wilson, 1989);此外白音高老组流纹岩样品均落入 Nb-Y-3Ga 及 Nb-Y-Ce 图解的 A1 区及附近,属于 A 型火山岩,且为 A1 型(图 8b),同样指示一个板内裂谷的环境(Eby, 1992)。综合上述特征可以判定研究区早白垩世晚期火山岩事件发生在与裂谷相似的拉张性构造环境,与中国东部早白垩世双峰式火山岩等所揭示的伸展环境具有较好的一致性。

嫩江地区中生代双峰式火山岩形成于早白垩世晚期,与前人研究的中生代双峰式火山岩具有较好的一致性(葛文春等, 2001; 孟恩等, 2011; 徐美君等, 2011),均形成于非造山的板内构造体制下。许文良等(2008)对东北地区中生代早白垩世晚期火山岩组合的研究表明,在东部陆缘(宝清-延边-临江)

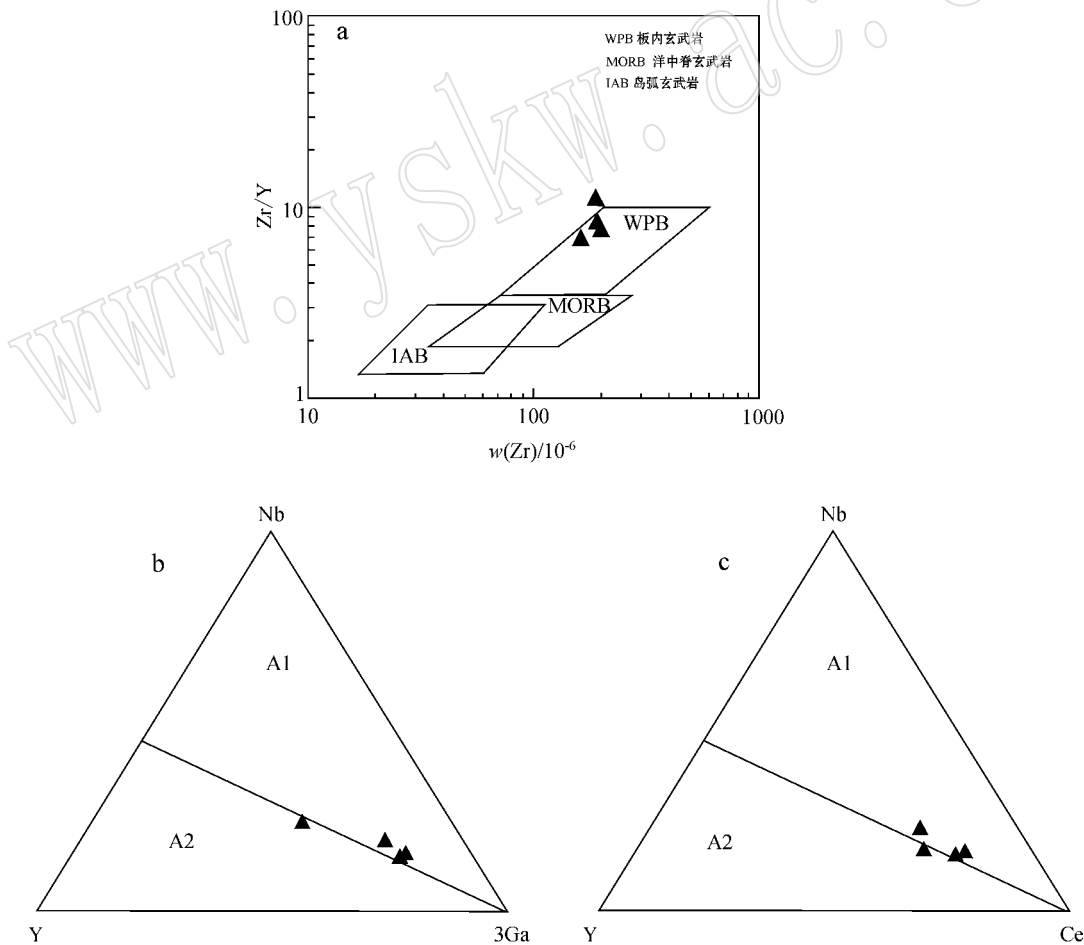


图 8 研究区梅勒图组火山岩 Zr/Y-Zr 图解(a, 据 Pearce, 1982),白音高老组火山岩 Nb-Y-3Ga (b) 和 Nb-Y-Ce 图解 (c, 据 Eby, 1992)

Fig. 8 Zr/Y-Zr diagram (a, after Pearce, 1982) for Meiletu volcanic rocks and Nb-Y-3Ga (b), Nb-Y-Ce (c) diagrams (after Eby, 1992) for Baiyingaolao volcanic rocks in the study area

早白垩世晚期火山岩显示为钙碱性火山岩组合,而靠近陆内一侧的松辽盆地和大兴安岭地区则显示双峰式火山岩组合的特征(徐美君等,2011;孟恩等,2011)。然而蒙古-鄂霍茨克洋在早白垩世早期已经进入演化的末期阶段,不太可能再形成大规模的火山活动。由此说明,嫩江地区早白垩世晚期火山岩与环太平洋构造体制有关,即古太平洋板块的俯冲作用,形成于类似弧后盆地性质的陆内伸展环境。

5 结论

(1)嫩江地区双峰式火山岩形成于 127.5 ± 0.8 Ma,即早白垩世晚期。

(2)嫩江地区双峰式火山岩中的基性组分形成于富集的岩石圈地幔的部分熔融和分离结晶作用,形成的过程可能含有少量的陆壳混染;流纹岩与玄武岩为不同源岩浆,其形成可能为中下地壳岩石的部分熔融。

(3)嫩江地区早白垩世晚期双峰式火山岩组合的形成应与古太平洋板块俯冲作用下的陆内伸展环境有关。

References

Arndt N T and Christensen U. 1992. The role of lithospheric mantle in continental flood volcanism: thermal and geochemical constraints [J]. *Geophys Research*, 97: 10 967~10 981.

Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry* [C]. Elsevier, 63~114.

Condie K C. 1986. Geochemistry and tectonic setting of Early Proterozoic supercrustal rocks in the Southwestern United states [J]. *Geology*, 94: 845~864.

Davies G R and Macdonald R. 1987. Crustal influences in the petrogenesis of the Naicasha basalt-comendite complex: combined trace element and Sr-Nd-Pb isotope constraint [J]. *Petrol*, 28(6): 1 009~1 031.

Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implication [J]. *Geology*, 20: 641~644.

Fan W M, Guo F, Wang Y J, et al. 2003. Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of post-orogenic extension in the northern Da Hinggan Mountains, northeastern China [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121: 115~135.

Fitton J G, James D, Kempton P D, et al. 1998. The role of lithosphere

mantle in the generation of late Cenozoic basic magmas in the western United States [J]. *Journal Petrology*, 331~349.

Garland F E, Hawkesworth C J and Mantovani M S M. 1995. Description and petrogenesis of Parana rhyolites, Southern Brazil [J]. *Journal of Petrology*, 36: 1 193~1 227.

Ge Wenchun, Li Xianhua, Lin Qiang, et al. 2001. Geochemistry of early Cretaceous alkaline rhyolites from Hulun Lake, Da Xing 'an Ling and its tectonic implication [J]. *Chinese Journal of Geology*, 36(2): 176~183 (in Chinese with English abstract).

Ge Wenchun, Lin Qiang, Li Xianhua, et al. 2000. Geochemical characteristics of basalts of the Early Cretaceous Yiliokede Formation, North Da Hinggan Ling [J]. *Journal of Mineral Petrology*, 20(3): 14~18 (in Chinese with English abstract).

Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhou Changyong, et al. 2005. Zircon U-Pb ages and its significance of the Mesozoic granites in the Wulanhaote Region, central Great Xing 'an Rang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 749~762 (in Chinese with English abstract).

Geist D, Howard K A and Larson P. 1995. The generation of oceanic rhyolites by crystal fractionation: the basalt-rhyolite association at Volcán Alcedo, Galápagos Archipelago [J]. *Journal of Petrology*, 36: 965~982.

Gou Jun, Sun Deyou, Zhao Zhonghua, et al. 2010. Zircon LA-ICPMS U-Pb dating and petrogenesis of rhyolites in Baiyingaolao Formation from the southern Manzhouli, Inner-Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 333~344 (in Chinese with English abstract).

Grenn T H. 1994. Experimental studies of trace-element partitioning applicable to igneous petrogenesis-Sedona 16 years later [J]. *Chemical Geology*, 117: 1~36.

Griffin W L, Belousova E A and Shee S. 2004. Crustal evolution in the northern Yilarn Craton: U-Pb and Hf isotope evidence from detrital zircon [J]. *Precambrian Research*, 131: 231~282.

Guo Feng, Fan Weiming, Wang Yuejun, et al. 2001. Petrogenesis of the Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in the southern Da Hinggan Mts, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 161~168 (in Chinese with English abstract).

Hoskin P W O and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 27~62.

Inner Mongolia Bureau of Geology and Mineral Resources. 1991. Regional Geology of Inner Mongolia [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Jahn B M, Wu F Y, Capdevila R, et al. 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing 'an Mountain in NE China [J]. *Lithos*, 59: 171~198.

- Kuzmin M L , Abramovich G Y , Dril S L , *et al.* 1996. The Mongolian-Okhotsk suture as the evidence of Late Paleozoic-Mesozoic collisional processes in Central Asia [C]. Abstract of 30th IGC , 1 : 261.
- Le Maitre R W , Bateman P , Dudek A , *et al.* 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms [A]. Recommendation of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rock [C]. Oxford : Blackwell.
- Leat P T , Thompson R N , Morrison M A , *et al.* 1988. Compositionally-diverse Miocene-Recent rift-related magmatism in northwest Colorado : partial melting and mixing of mafic mafmas from 3 different asthenospheric and lithospheric mantle sources [J]. *Journal of Petrology* , 351~377.
- Li Guoqiang , Li Qingfu , Jiang Wandu , *et al.* 1996. Lithostratigraphy of Inner Mongolia [M]. Wuhan : China University of Geoscience Press (in Chinese).
- Lin Qiang , Ge Wenchun , Cao Lin , *et al.* 2003. Geochemistry of Mesozoic volcanic rocks in Da Hinggan Ling : The bimodal volcanic rocks [J]. *Geochemical* , 32 (3) : 208~222 (in Chinese with English abstract).
- Lin Qiang . 1999. Some thoughts on Mesozoic volcanic rocks in Northeast Asia [J]. *World Geology* , 18 (2) : 14~22 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ge , Lü Xinbiao , Zhang Lei , *et al.* 2012. Geochemical characteristics of Early Carboniferous volcanic rocks in Hongyan area of northwestern Xiao Hinggan Mountains and their geological significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 31 (5) : 641~651 (in Chinese with English abstract).
- Lü Zhicheng , Hao Libo , Duan Guozheng , *et al.* 2000. Magmatism and its tectonic significance in the Manzhouli-Erguna region [J]. *Journal of Mineral Petrology* , 21 (1) : 77~85 (in Chinese with English abstract).
- Macdonald R , Davies G R , Bliss C M , *et al.* 1987. Geochemistry of high-silica peralkaline rhyolites , Naivasha , Kenya Rift Valley [J]. *Journal of Petrology* , 29 (6) : 979~1 008.
- Meng En , Xu Wenliang , Yang Debin , *et al.* 2011. Zircon U-Pb chronology , geochemistry of Mesozoic volcanic rocks from the Lingquan basin in Manzhouli area , and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 27 (4) : 1 209~1 226 (in Chinese with English abstract).
- Molzahn M , Reisberg L and Worner G. 1996. Os , Sr , Nd , Pb , O isotope and trace element data from the Ferrar flood basalts , Antarctica : evidence for an enriched subcontinental lithospheric source [J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 144 : 529~546.
- Patino D A E. 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids [J]. *Geology* , 25 : 743~746.
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [A]. Thorpe R S. *Andesites* [C]. New York : John Wiley and Sons , 525~548.
- Pearce J A. 1983. The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins [A]. Hawkesworth C J and Norry M J. *Continental Basalts and Mantle Xenoliths* [C]. Nantwich Shiva : Academic Press , 230~249.
- Sun Deyou , Gou Jun , Ren Yunsheng , *et al.* 2011. Zircon U-Pb dating and study on geochemistry of volcanic rocks in Manitu Formation from southern Manchuria , Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 27 (10) : 3 083~3 094 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematicsof oceanic basalt : implication for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basin* [C]. *Geol. Soc. London Spec. Pub.* , 42 : 313~345.
- Tischendorf G and Paelchen W. 1985. Zur Klassifikation von Granitoiden/Classification of granitoids [J]. *Zeitschrift fuer Geologische Wissenschaften* , 13 (5) : 615~627.
- Wang F , Zhou X H , Zhang L C , *et al.* 2006. 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* , 251 : 179~198.
- Wang Yan , Qian Qing , Liu Liang , *et al.* 2000. Major geochemical characteristics of bimodal volcanic rocks in different geochemical environments [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 16 (2) : 169~173 (in Chinese with English abstract).
- Whalen J B , Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites : Geochemical characteristics , discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 95 : 407~419.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrology : A Global Tectonic Approach* [M]. London : Unwin Hyman , 1~466.
- Wright J B. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis [J]. *Geological Magazine* , 106 : 370~384.
- Wu F Y , Lin J Q , Wilde S A , *et al.* 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in Eastern China [J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 233 : 103~119.
- Xu Meijun , Xu Wenliang , Meng En , *et al.* 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic volcanic rocks from the Shanghulin-Xiangyang basin in Ergun area , northeastern Inner Mongolia [J]. *Geological Bulletin of China* , 30 (9) : 1 321~1 338 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wenliang , Ge Wenchun , Pei Fuping , *et al.* 2008. Geochronological framework of the Mesozoic volcanism in NE China and its tectonic

- implications[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(3): 286~287 (in Chinese).
- Zhang C J and Wang Y L. 1996. The characteristics of Th, Ta and Hf in an igneous rock series and the identification of tectonic setting of its source region[A]. Zhou Y Z. *Contributions to Mineralogy, Petrology and Geochemistry*[C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 57~62.
- Zhang J H, Ge W C, Wu F Y, *et al.* 2008. Large-scale Early Cretaceous volcanic events in the northern Great Xing 'an Range, Northeastern China[J]. *Lithos*, 102: 138~57.
- Zhang Xingzhou, Yang Baojun, Wu Fuyuan, *et al.* 2006. The lithosphere structure in the Hingmong-Jihe(Hinggan-Mongolia-Jilin-Heilongjiang) region, northeastern China[J]. *Geology in China*, 33(4): 816~823 (in Chinese with English abstract).
- Zhao X X and Coe R S. 1996. Paleomagnetic constraints on the paleogeography of China: Implications for Gondwanaland[C]. *Abstract of 30th IGC*, 1(1): 231.
- Zhao Zhonghua, Sun Deyou, Gou Jun, *et al.* 2011. Chronology and geochemistry of volcanic rocks in Tamulangou Formation from Southern Manchuria, Inner-Mongolia[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 41(6): 1 865~1 880 (in Chinese with English abstract).
- Zong K Q, Liu Y S, Cao S, *et al.* 2010. In situ U-Pb dating and trace element analysis of zircons in thin sections of eclogite: refining constants on the ultra high-pressure metamorphism of the Sulu terrane China[J]. *Chemical Geology*, 269: 237~251.
- 葛文春, 李献华, 林 强, 等. 2001. 呼伦湖早白垩世碱性流纹岩的地球化学特征及其意义[J]. *地质科学*, 36(2): 176~183.
- 葛文春, 林 强, 李献华, 等. 2000. 大兴安岭北部伊列克得组玄武岩的地球化学特征[J]. *矿物岩石*, 20(3): 14~18.
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 等. 2005. 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*, 21(3): 749~762.
- 苟 军, 孙德有, 赵忠华, 等. 2010. 满洲里南部白音高老组流纹岩锆石 U-Pb 定年及岩石成因[J]. *岩石学报*, 26(1): 333~344.
- 郭 锋, 范蔚茗, 王岳军. 2001. 大兴安岭南段晚中生代双峰式火山作用[J]. *岩石学报*, 17(1): 161~168.
- 李文国, 李庆富, 姜万德, 等. 1996. 内蒙古自治区岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 林 强, 葛文春, 曹 林, 等. 2003. 大兴安岭中生代双峰式火山岩的地球化学特征[J]. *地球化学*, 33(3): 208~222.
- 林 强. 1999. 东北亚中生代火山岩研究若干问题的思考[J]. *世界地质*, 18(2): 14~22.
- 刘 阁, 吕新彪, 张 磊, 等. 2012. 小兴安岭西北部红彦地区早石炭世火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 31(5): 641~651.
- 吕志成, 郝立波, 段国正, 等. 2000. 内蒙古满洲里-额尔古纳地区中生代火山岩地球化学研究[J]. *矿物学报*, 20(4): 406~414.
- 孟 恩, 许文良, 杨德彬, 等. 2011. 满洲里地区灵泉盆地中生代火山岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. *岩石学报*, 27(4): 1 209~1 226.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 孙德有, 苟 军, 任云生, 等. 2011. 满洲里南部玛尼吐组火山岩锆石 U-Pb 年龄与地球化学研究[J]. *岩石学报*, 27(10): 3 083~3 094.
- 王 焰, 钱 青, 刘 良, 等. 2000. 不同构造环境中双峰式火山岩的主要特征[J]. *岩石学报*, 16(2): 169~173.
- 徐美君, 许文良, 孟 恩, 等. 2011. 内蒙古东北部额尔古纳地区上护林-向阳盆地中生代火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. *地质通报*, 30(9): 1 321~1 338.
- 许文良, 葛文春, 裴福萍, 等. 2008. 东北地区中生代火山作用的年代学格架及其构造意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 27(3): 286~287.
- 张兴洲, 杨宝俊, 吴福元, 等. 2006. 中国兴蒙-吉黑地区岩石圈结构基本特征[J]. *中国地质*, 33(4): 816~823.
- 赵忠华, 孙德有, 苟 军, 等. 2011. 满洲里南部塔木兰沟组火山岩年代学与地球化学[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(6): 1 865~1 880.

附中文参考文献