

大兴安岭根河地区早白垩世火山岩深部源区与构造-岩浆演化: Sr-Nd-Pb-Hf 同位素地球化学制约^{*}

张连昌¹ 陈志广¹ 周新华² 英基丰² 王非² 张玉涛²

ZHANG LianChang¹, CHEN ZhiGuang¹, ZHOU XinHua², YING JiFeng², WANG Fei² and ZHANG YuTao²

1. 中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究重点实验室, 北京 100029

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

1. Key laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China

2. Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China

2007-02-08 收稿, 2007-10-12 改回.

Zhang LC, Chen ZG, Zhou XH, Ying JF, Wang F and Zhang YT. 2007. Characteristics of deep sources and tectonic-magmatic evolution of the early Cretaceous volcanics in Genhe area, Da-Hinggan Mountains: Constraints of Sr-Nd-Pb-Hf isotopic geochemistries. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11):2823–2835

Abstract Late Mesozoic volcanic rocks section in Genhe area, northeast of Inner-Mongolia, is the important part of Da-Hinggan Mountains Mesozoic volcanic rocks. They are mainly composed of trachy-basalt, basaltic trachy-andesite, trachy-andesite, trachyte and rhyolite. Through geochronological study, including ⁴⁰Ar-³⁹Ar and SHRIMP zircon U-Pb dating, our study group attained ages of Genhe volcanic section, which have the range from 115Ma to 140Ma. This result indicates that these volcanic rocks were formed in three gyrations of volcanic explosion in early Cretaceous. The major elements of the samples show that geochemical characteristics of rocks in the lower and upper volcanic section are similar. Both of them have higher Al₂O₃, K₂O and total alkaline contents, and relatively high in MgO and Mg[#]. The trace elements demonstrate total LREE enrichment with insignificant Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.83 \sim 1.00$) and intense fractionation between LREE and HREE. The primitive mantle-normalized spidergrams are characterized by LILE enrichment and HFSE depletion, especially for a significantly negative Nb-Ta anomaly. Isotopic geochemistries show that values of $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ range from 1.5 to 3.6, and (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i from 0.704571 to 0.705907. The geochemical characteristics of trachytes, in middle volcanic section, are similar with basic and intermediate-basic volcanics of lower and upper volcanic section. However, MgO content and Mg[#] is lower, and Ti shows intense depletion. Rhyolites of middle rocks section have higher SiO₂ and more lower MgO and Mg[#] values. Trace elements show the characteristics of significant Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.16 \sim 0.85$), intense depletion of Sr and Ba, and high (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i values. According to geochemistries of basic and intermediate-basic volcanics, it is inferred that these rocks formed in an intracontinental extension setting. On the other hand, some characteristics of arc volcanics can be recognised in these rocks, which probably relate with dynamics and geochemical processes of subduction among plates in ancient Asian ocean territory. The origination of volcanic magma is speculated from a metasomatized mantle wedge, which had been modified by paleozoic subducted ocean slab. Fractional crystallization is the most important evolutionary type during magma evolution. The early Cretaceous volcanics of Genhe area were formed in the transition stage from ancient Asia to paleo-pacific structural domain, which were caused by coupling effect of postorogenic extension Mongol-Okhotsk zone and subduction of west Pacific slab.

Key words Late Mesozoic volcanics, Characteristics of deep sources, Tectonic-magmatic evolution, Isotopic geochemistry, Da-Hinggan mountains

摘要 北大兴安岭根河地区发育大面积晚中生代火山岩,是大兴安岭中生代火山岩的重要组成部分。本文通过年代学(火山岩基质⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄和SHRIMP锆石U-Pb年龄)测定,发现该区火山岩年龄为140~100Ma,属早白垩世火山岩。通过根河西岸早白垩世火山岩剖面的岩石学和地球化学研究,认为根河早白垩世发生了三次大的火山喷发活动。火山岩剖面下部和上部主要为碱性的中基性-基性火山岩,剖面中部主要为一套碱性-亚碱性过渡性质的中酸性、酸性火山岩组合。该剖面

* 国家重点基金项目(40334043)和国家重点基础研究发展规划项目(2006CB403506)资助。

第一作者简介:张连昌,博士,研究员,矿床学与岩石地球化学专业, E-mail: lc Zhang@mail.igcas.ac.cn

下部和上部的基性、中基性火山岩具有相似的地球化学特征,显示高 Al_2O_3 、 K_2O 和全碱含量,较高的 MgO 和 $\text{Mg}^\#$ 值; LREE 富集、LREE 和 HREE 分馏较强、Eu 异常不明显,富集 LILE 而亏损 HFSE 元素,尤其强烈亏损 Nb 和 Ta 元素; $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) - \varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解表现出地幔源区特征。而剖面中部的中酸性火山岩与剖面上部和下部的基性火山岩具有相似的地球化学特征,不同的是 MgO 含量和 $\text{Mg}^\#$ 较低, Ti、Sr 和 Ba 元素亏损明显,负 Eu 异常明显,以及初始 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值较高。地球化学特征表明,基性和中基性火山岩均反映陆内伸展环境和陆缘弧火山岩的一些特征,这种特性可能与该区火山岩浆源于受古生代俯冲洋壳流体交代的地幔楔有关。火山岩浆演化以分离结晶作用为主要方式,上升过程基本未受地壳物质污染。结合最新资料,我们认为根河地区早白垩世火山岩形成于古亚洲洋向滨太平洋过渡阶段,是蒙古-鄂霍茨克海造山后伸展和西太平洋板块俯冲共同作用的产物。

关键词 晚中生代火山岩; 深部源区特征; 构造-岩浆演化; 同位素地球化学; 大兴安岭

中图法分类号 P588.14; P597.3

1 引言

影响大兴安岭中生代火山岩深入研究的主要制约因素是火山岩年代学问题,一是受过去火山岩定年方法(K-Ar、单颗粒锆石 U-Pb 和全岩 Rb-Sr 等时线)的局限性,造成火山岩时代测定不准;二是对晚侏罗世和早白垩世之间年龄界线划分不一致,国内多数学者以 135Ma 为界线,但目前国际上是以 145~140Ma 为界线,这就造成了同一套火山岩有早白垩世和晚侏罗世之争。但最重要的是采用先进的定年方法,给该火山岩以精确的年龄值。实践证明火山岩熔岩是快速冷却形成,火山岩基质 Ar-Ar 法是最理想的定年方法。我们课题组对大兴安岭北段中生代火山岩进行了大量而精确的年代学测定(即以火山岩基质 Ar-Ar 法为主,火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 法为辅),结果表明大兴安岭地区火山岩主体年龄小于 140Ma,即均为早白垩世,而晚侏罗世火山岩仅分布于大兴安岭的西部(Wang *et al.*, 2006)。

通过对大兴安岭北段根河地区火山岩的 Ar-Ar 年龄测定(Wang *et al.*, 2006),表明这套火山岩时代为 140~115Ma,即相当于早白垩世,按主喷发期可明显分为 3 个(140Ma、125Ma 和 115Ma)火山旋回。本文是在取得火山岩年龄的基础上,对这套火山岩熔岩的元素和同位素地球化学进行系统测定,以进一步获得对大兴安岭北段早白垩世火山岩深部源区和构造-岩浆演化等方面的认识。

2 大兴安岭北段根河中生代火山岩基本特征

根河火山岩区位于蒙古-鄂霍茨克海缝合-造山带的南侧、大兴安岭北段海拉尔盆地西北缘(图 1)。大兴安岭北段晚中生代火山活动强烈,广泛分布晚侏罗世-早白垩世陆相中基性和中酸性火山岩,自下而上依次为上侏罗统塔木兰沟组、和下白垩统吉祥峰组、上库力组和伊列克得组。主要岩石类型为玄武岩、玄武安山岩、安山岩、粗面安山岩、粗面岩、英安岩、流纹岩和凝灰岩(林强等, 1998, 2003; 葛文春等,

1999, 2001; 吕志成等, 2000, 2001; 尹志刚等, 2006)。

我们沿根河西岸火山岩剖面(图 2)进行了系统的地质观察。这套火山岩产状平缓,倾向北东,倾角 $10^\circ \sim 30^\circ$ 。剖面岩性主要以中基性火山熔岩为主,局部见酸性熔岩。从火山岩剖面看,火山喷发具多旋回性,结合火山岩 Ar-Ar 年代学研究(Wang *et al.*, 2006),初步将该火山岩剖面划分为下、中和上三部分(或 3 个火山旋回,图 2)。

初步研究表明该火山岩剖面主要由碱性系列的粗面玄武岩、玄武质粗安岩、粗安岩,和具碱性-亚碱性过渡系列的粗面岩、流纹岩组成。

粗面玄武岩的新鲜岩石呈黑、暗灰黑色,块状构造,斑状结构;斑晶约占 10%~20%,主要为斜长石、碱性长石(正长石)、橄榄石和透辉石,个别橄榄石具有单斜辉石反应边;基质为隐晶质结构,约占 80%~90%,主要由斜长石和暗色矿物组成。杏仁成分为硅质或绿泥石。

粗安岩的新鲜岩石呈灰黑、暗灰色,气孔、杏仁状构造,斑状结构,多斑、聚斑可见;斑晶约占 20%,主要为斜长石、碱性长石、单斜辉石和透辉石,偶见黑云母和角闪石,部分斜长石环带构造发育;基质为粗面和玻基交织结构,约占 70%~80%,主要由长石、辉石微晶、部分隐晶质和暗色玻璃质组成。副矿物为磷灰石、钛铁矿和磁铁矿等。杏仁成分为绿泥石和碳酸盐。

粗面岩的新鲜岩石呈灰黑和灰色,气孔杏仁状构造,斑状结构。斑晶约占 10%~20%,主要为斜长石、碱性长石和黑云母,见有少量的透辉石;基质为粗面结构和玻基交织结构,约占 80%~90%,主要为长石微晶、黑云母和辉石的蚀变残余;副矿物主要为磷灰石和磁铁矿等。

流纹岩的新鲜岩石呈灰白、棕黄色,流纹构造,斑状结构。斑晶主要为石英、斜长石和碱性长石;基质为霏细-交织者居多,主要为斜长石、碱性长石、石英的隐晶和长英质集合体;副矿物为磁铁矿和锆石等。

3 采样与分析方法

本次分析样品采自于额尔古纳和根河市之间的根河西岸,所有样品均为火山熔岩。选择 13 件不同层位和不同岩

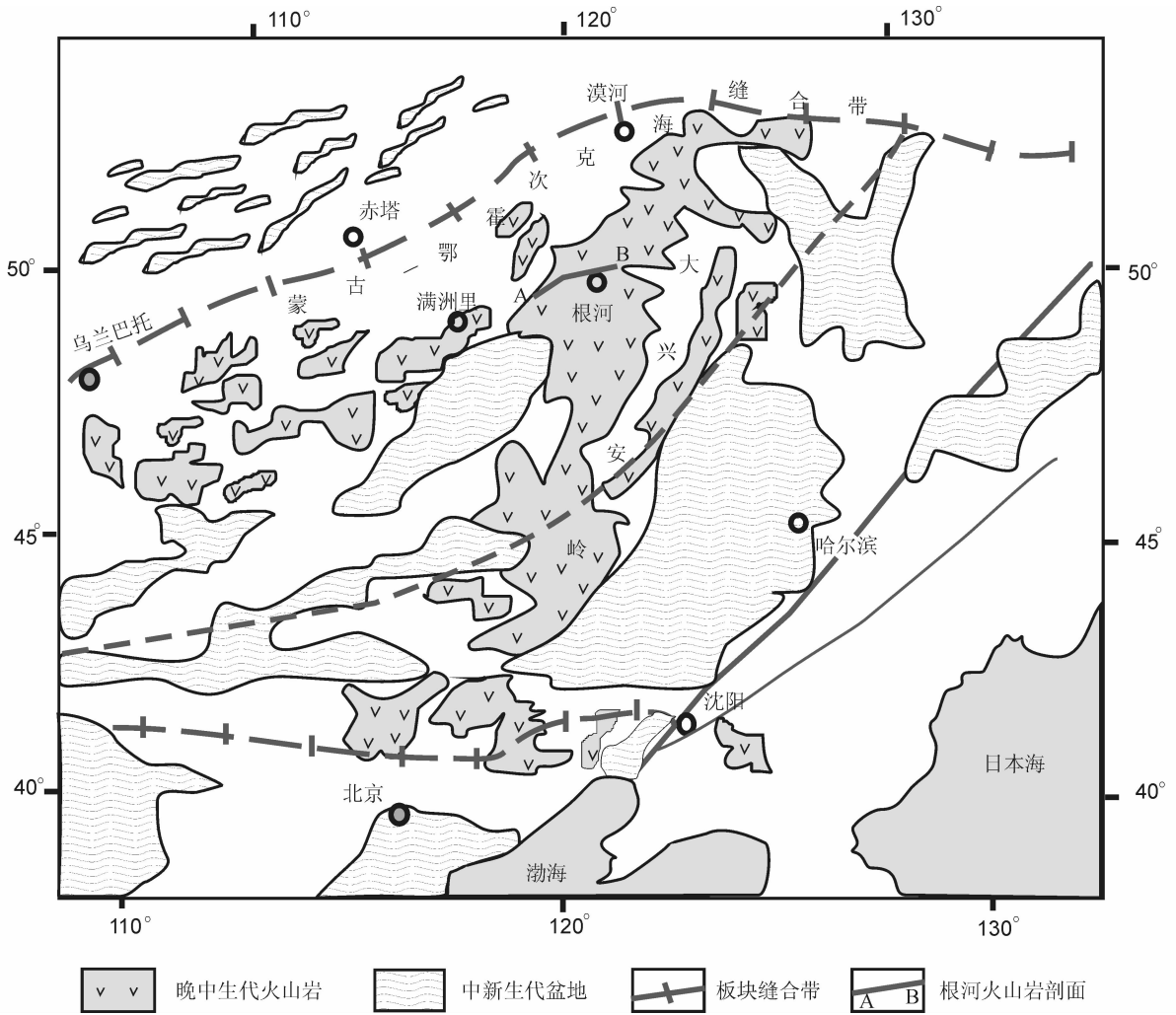


图1 大兴安岭火山岩区域地质及根河火山岩剖面位置简图

Fig.1 Regional geological map of the Da Xinggan mountains and location of Genhe volcanic section

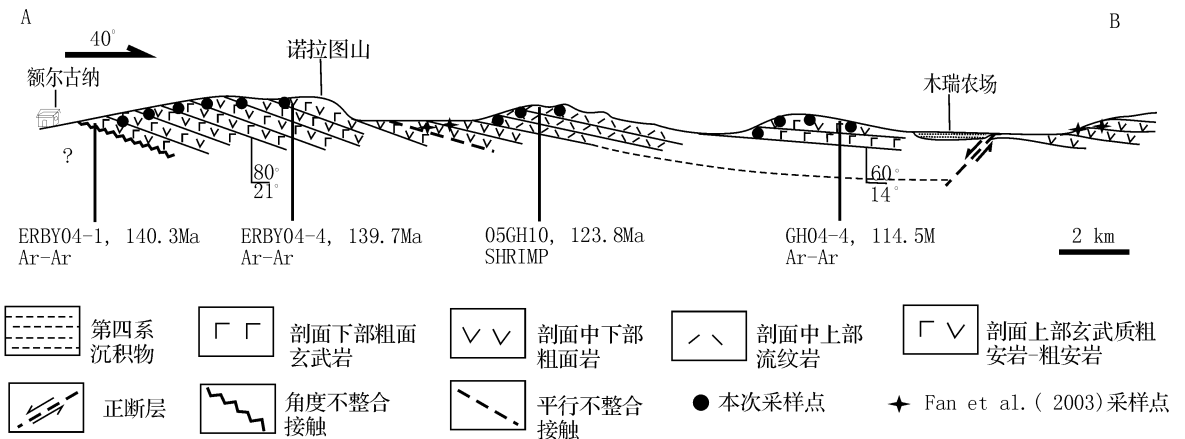


图2 根河地区早白垩世火山岩剖面

Fig.2 The sectional drawing of early Cretaceous volcanic rocks in Genhe area

性的样品分别进行主量、微量元素和 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素分析。所有样品测试工作由中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室完成。

主量元素使用 X-射线荧光光谱仪 (XRF-1500) 测试, 分析误差优于 5%。微量元素及稀土元素利用酸溶法制备样品, 使用 ICP-MS (Element II) 测试, 分析精度为: 当元素含量大于 10×10^{-6} 时, 精度优于 5%, 当含量小于 10×10^{-6} 时, 精度优于 10%。Rb、Sr、Sm、Nd 和 Pb 同位素组成在 MAT-262 和热电离质谱计 (TIMS) 上完成, 化学分析和同位素比值测试流程参考 Chen *et al.* (2000, 2002) 介绍的方法。Hf 同位素数据测试在新引进的 Neptune MC-ICP-MS 上进行, 并使用 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.7325$ 和 JMC-475 标准的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282160$ 进行质量分馏和外部校正, 其 Hf 同位素化学分离和同位素比值测试分别按李献华等 (2005) 和徐平等 (2004) 报道的流程进行。

4 分析结果

4.1 主量元素

大兴安岭根河西岸火山岩剖面主量元素分析结果及相关参数列于表 1。在火山岩 $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (TAS) 分类图 (图 3) 上, 可见剖面下部岩性为玄武质粗安岩、粗安岩; 中部为粗面岩、流纹岩、个别粗安岩; 上部为粗面玄武岩、玄武质粗安岩和粗安岩。从主量元素分析结果 (表 1) 看, 剖面下部玄武质粗安岩和粗安岩 SiO_2 含量介于 52.63% ~ 55.83% 之间, 具有高铝 (Al_2O_3 变化范围在 15.90% ~ 18.38% 之间)、高钾 (K_2O 组成为 2.14% ~ 3.79%) 的特点, CaO (3.27% ~ 6.37%), MgO (2.71% ~ 4.59%) 和 $\text{Mg}^\#$ (0.44 ~ 0.55) 相对

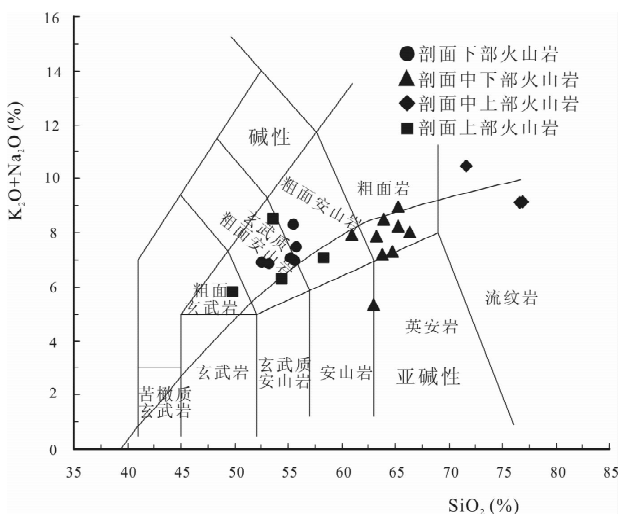


图 3 根河火山岩 $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 图解 (据 Rickwood, 1989), 碱性亚碱性系列界限据 Irvine and Baragar (1971)
Fig. 3 The $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ diagrams of Genhe volcanic rocks

较高, 而 Na_2O (3.43% ~ 6.13%)、 TiO_2 (1.13% ~ 1.33%) 相对较低, 全铁 (FeO^T) 含量介于 5.71% ~ 9.65% 之间。剖面中下部粗面岩 SiO_2 含量介于 60.96% ~ 66.80% 之间, 同样具有高铝 (Al_2O_3 为 16.23% ~ 17.45%)、高钾 (K_2O 为 0.90% ~ 4.89%) 的特点, 与下部火山岩相比, Na_2O 、全碱含量略有升高, CaO 含量略有降低, TiO_2 、 FeO^T 、 MgO 的含量和 $\text{Mg}^\#$ 降低比较明显。剖面中上部的流纹岩, 具有较高的 SiO_2 (71.68% ~ 76.93%) 和全碱 (9.07% ~ 10.44%) 的含量, 相对低的 Al_2O_3 (12.35% ~ 14.48%)、 FeO^T (0.51% ~ 1.51%)、 MgO (0.01% ~ 0.24%) 含量和 $\text{Mg}^\#$ (0.04 ~ 0.25)。剖面上部的粗面玄武岩、玄武质粗安岩和粗安岩, SiO_2 含量介于 49.76% ~ 58.37% 之间, 与剖面下部基性火山岩相比, 同具有高铝 (16.13% ~ 17.57%)、高钾 (2.23% ~ 3.46%) 的特点, 相似的 TiO_2 (1.16% ~ 1.68%)、 Na_2O (3.05% ~ 5.01%)、全碱 (5.77% ~ 8.47%) 和 FeO^T (6.61% ~ 8.87%) 含量, 不同的是 CaO (3.84% ~ 7.94%)、 MgO (1.46% ~ 5.27%) 的含量和 $\text{Mg}^\#$ (0.32 ~ 0.56) 更低。其中粗面玄武岩、玄武质粗安岩和粗安岩之间的 MgO 含量和 $\text{Mg}^\#$ 值变化较为明显, 反映岩浆演化过程中经历了一定的分离结晶作用。

在 Harker 图解 (图 4) 上, 剖面下部的玄武质粗安岩和粗安岩、中部的粗面岩和流纹岩和上部的粗面玄武岩、玄武质粗安岩及粗安岩的 SiO_2 与大多数常量元素具有较好的相关

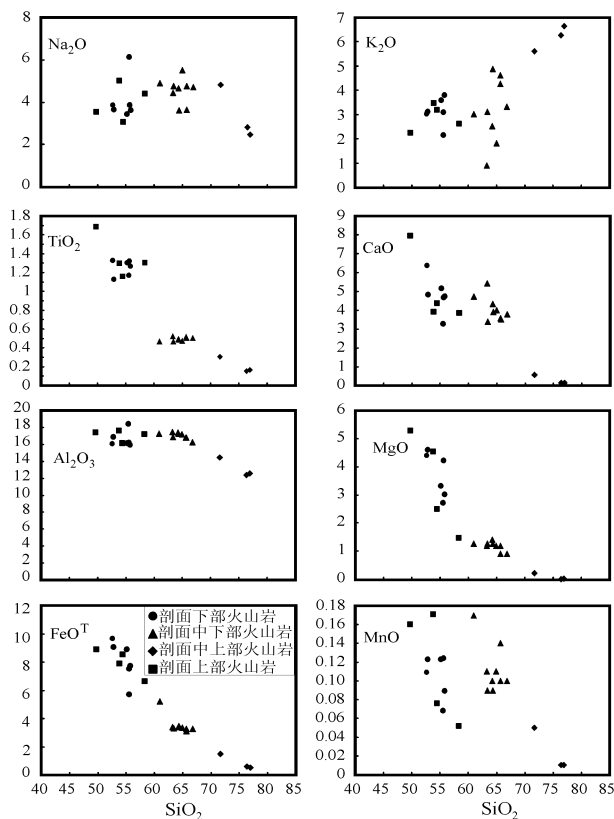


图 4 根河地区火山岩剖面样品 Harke 图解
Fig. 4 Harke diagram of Genhe volcanic rocks

性,总体上 SiO_2 与 K_2O 和 Na_2O 呈现较好的正相关,与 TiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO^T 、 CaO 、 MgO 和 MnO 呈现较好的负相关,反映岩浆分离结晶演化趋势。剖面下部和上部的中基性火山岩随着岩浆的演化, SiO_2 含量增加, $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ 比值(4~9)、 $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ 比值(1~3)变化较弱,甚至表现负相关趋势,这反映了在岩浆演化过程中地壳混染作用的影响较小。

根据 CIPW 计算结果,根河地区火山岩共 22 件样品中的标准矿物组成: 标准石英(Q) 0%~36.95%、钙长石(An) 0.69%~25.80%、钠长石(Ab) 21.01%~54.33%、正长石(Or) 5.48%~39.50%、紫苏辉石(Hy) 0~9.25%。基性岩含标准橄榄石(Ol) 6.06%~8.97%,酸性岩石样品含标准刚玉(C) 2.47%~2.97%。副矿物中钛铁矿(Il) 含量为 0.31%~3.29%、磁铁矿(Mt) 为 0.35%~6.17% 和磷灰石(Ap) 为 0.02%~1.52%,部分火山岩样品有极少数的赤铁矿(Hm)、锆石(Zr)、铬铁矿(Cm)。

4.2 微量元素

根河地区火山岩剖面微量和稀土元素组成测试结果及相关参数列于表 2。从稀土元素分析数据中可以看出剖面火山岩稀土元素总量(ΣREE) 为 123.56×10^{-6} ~ 285.74×10^{-6} ,基性、中基性和酸性火山岩均具有稀土元素总量偏高的特点。在球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线图(图 5)上,剖面下、上部的基性、中基性火山岩表现出相似的变化趋势(图 5 A、D),中部的基性、酸性火山岩表现出相似的变化趋势(图 5 B、C),同时剖面火山岩都具有轻稀土(LREE)富集的右倾特征, $(\text{Ce}/\text{Yb})_n$ 比值为 12.32~21.73,轻重稀土元素分馏较强, $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 为 7.92~39.52。剖面下部玄武质粗安岩、粗安岩 δEu 值为 0.83~1.00;中部粗面岩 δEu 值为 0.49~0.98;上部粗面玄武岩、玄武质粗安岩、粗安岩 δEu 值为 0.85~0.95,可见基性、中基性火山岩表现极弱 Eu 负异常,甚至无 Eu 异常,而中部流纹岩 δEu 为 0.16~0.85,表现出强烈的负 Eu 异常。

从火山岩剖面不相容元素蛛网图(图 5),可见剖面下部的中基性火山岩与上部基性、中基性火山岩具有相似的微量元素特征(图 5 a、d),富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素(LILE),亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素(HFSE),且 Nb、Ta 强烈亏损,所不同的是下部火山岩的 Sr、U 表现负异常,而上部火山岩的 Sr、U 则表现正异常。剖面中部中基性、酸性火山岩具有相似的微量元素特征(图 5 b、c),具有富集 Rb、K 等 LILE 而亏损 Nb、Ta、Ti 等 HFSE 特点,不同的是粗面岩的 Sr、Ba 表现出弱富集,Nb、Ta 表现强烈亏损,而流纹岩的 Sr、Ba 表现出强烈亏损,Nb、Ta 表现出的亏损相对较弱。基性和中基性火山岩的 La/Sm 随着岩浆演化,La 含量的增加而变化的范围为 $4.13 \sim 7.68 \times 10^{-6}$,变化幅度均较弱,暗示没有受到陆壳物质的影响,分离结晶作用是岩浆上升演化过程中的主要控制因素。而中部酸性火山岩 La/Sm 的变化的范围为 6.84~9.74,较基性和中基性火山岩 La/Sm 明显升高,可能

与不同的岩浆源区有关。剖面下、中、上部的基性和中基性火山岩的 Ba/Nb 比值变化幅度大(分别为 64.05~128.28、130.06~189.13 和 33.87~239.57,表 2),而 Ce/Nb 比值变化幅度小(分别为 7.50~10.70、9.35~9.93 和 5.09~9.48,表 2),反映其源区特征与流体交代作用趋势特征相近,同时 $(\text{Nb}/\text{La})_n$ 比值变化范围分别为 0.08~0.12、0.09~0.18 和 0.09~0.10,远小于 1,Th/Ta 比值(5.08~8.63、15.37~16.41 和 3.49~6.48)、Th/Nb 比值(0.33~0.78、1.47~1.55 和 0.28~0.45)高,这种特征也较好地反映了源区受俯冲流体交代作用的影响(Wilson, 1989; Pearce and Peate, 1995; Elliott *et al.*, 1997)。

4.3 Sr-Nd-Hf-Pb 同位素

火山岩样品 Sr-Nd-Hf-Pb 同位素组成测试结果列于表 3。本文采用 140Ma、125Ma 和 115Ma 分别来计算根河地区早白垩世剖面下部和中、上部火山岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 、 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值。剖面下部中基性火山岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 、 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化范围分别为 0.7047~0.7059 和 1.7~2.1;中部中酸性、酸性火山岩分别为 0.7050~0.7419 和 0.86~1.33;上部火山岩分别为 0.7046~0.7052 和 1.1~3.6。Sr、Nd 同位素组成特征表明剖面火山岩源区 Sr 同位素具有一定程度的富集,Nd 同位素具有轻度亏损的特点。在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解(图 6A)中、基性和中基性火山岩投在洋脊玄武岩(OIB)区域内,沿地幔阵列分布,反映了火山岩源区可能为岩石圈地幔。

与 Sr-Nd 同位素体系类似,在部分熔融过程中由于 Hf 较 Lu 更容易进入熔体,在地幔部分熔融过程中造成亏损地幔中高 Lu/Hf 比值,而产生的熔体由于具有低 Lu/Hf 比值,放射性成因 Hf 和 Nd 同位素组成也存在差异性(Griffin *et al.*, 2000)。本文研究表明火山岩剖面下部样品 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.28285~0.28288、 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 2.9~3.3;中部流纹岩样品 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.28286、 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 3.2;上部剖面样品 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.28285~0.28294、 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 2.9~5.8。可以看出,火山岩剖面的下部、中部和上部 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均变化不大,且比值相近,尤其是中部流纹岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 与下、上部基性、中基性火山岩相近。在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解(图 6B)样品均落在 OIB 区域内,并有向 MORB 演化的趋势,指示剖面火山岩的源区可能为岩石圈地幔,流纹岩与下部基性、中基性火山岩具有相似的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$,具有同源岩浆演化的特点。

剖面火山岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 范围为 18.3241~18.6464, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 范围为 15.4777~15.5744, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 范围为 38.0423~38.6119。下和上部中基性火山岩与中部流纹岩 Pb 同位素组成变化不明显。在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解上(图 7),样品几乎全部都投于 MORB 区域内,同样指示其源区为亏损地幔源区的特征。

表1 根河地区火山岩主量元素分析结果 (wt%)

Table 1 Major elements result (wt%) of Genhe volcanic rocks

样品 岩性	剖面下部玄武质粗安岩-粗安岩(140Ma**)							剖面中下部粗面岩(127Ma*)							剖面中上部流纹岩 (124Ma**)							剖面上部粗面玄武岩-粗安岩 (114Ma**)						
	ER04-1-1	ER04-2	ER04-3	ER04-4	ER04-7	ERSH-2	GH-5*	GH-8*	GH-10*	GH-12*	GH-14*	GH-15*	GH-16*	GH-28*	05GHH1	05GHH3	05GHH4	GH04-1	GH04-2	GH04-3	GH04-4							
SiO ₂	52.63	55.60	55.20	55.83	52.87	55.56	63.26	64.22	65.68	64.32	64.96	65.70	63.40	60.96	71.68	76.93	76.38	49.76	58.37	54.47	53.85							
TiO ₂	1.33	1.32	1.30	1.27	1.13	1.17	0.53	0.50	0.52	0.49	0.48	0.51	0.47	0.47	0.31	0.17	0.16	1.68	1.31	1.16	1.30							
Al ₂ O ₃	16.04	16.19	16.12	15.90	16.87	18.38	17.45	17.38	16.77	17.25	17.18	16.77	16.84	17.25	14.48	12.56	12.35	17.37	17.21	16.13	17.57							
Fe ₂ O ₃	6.47	4.77	5.90	5.00	6.36	4.65	2.05	2.05	2.65	2.45	2.10	2.28	2.43	4.10	1.17	0.25	0.38	5.05	5.79	6.97	4.30							
FeO	3.18	2.75	2.97	2.70	2.70	1.06	1.36	1.36	0.62	1.02	1.26	0.84	0.89	1.11	0.34	0.26	0.21	3.82	0.82	1.57	3.58							
MnO	0.11	0.12	0.12	0.09	0.12	0.07	0.11	0.10	0.10	0.09	0.11	0.14	0.09	0.17	0.05	0.01	0.01	0.16	0.05	0.08	0.17							
MgO	4.40	4.21	3.31	3.02	4.59	2.71	1.18	1.41	1.18	1.27	1.18	0.91	1.27	1.27	0.24	0.02	0.01	5.27	1.46	2.49	4.54							
CaO	6.37	4.68	5.16	4.74	4.83	3.27	5.41	4.33	3.58	3.92	3.99	3.52	3.38	4.73	0.57	0.15	0.15	7.94	3.84	4.37	3.90							
Na ₂ O	3.84	3.84	3.43	3.62	3.64	6.13	4.44	4.66	3.65	3.62	5.50	4.76	4.76	4.89	4.82	2.47	2.81	3.54	4.38	3.05	5.01							
K ₂ O	3.02	3.08	3.58	3.79	3.12	2.14	0.90	2.53	4.62	4.89	1.81	4.26	3.10	3.02	5.62	6.65	6.26	2.23	2.61	3.19	3.46							
P ₂ O ₅	0.63	0.64	0.62	0.58	0.47	0.41	0.20	0.19	0.19	0.20	0.19	0.18	0.19	0.26	0.04	0.01	0.01	0.56	0.54	0.38	0.38							
烧失	1.98	2.70	2.23	3.53	2.48	4.57	3.46	1.86	1.02	1.10	1.54	0.86	3.40	1.88	0.80	0.98	0.95	2.28	3.60	6.15	2.28							
总量	100.00	99.90	99.94	100.06	99.19	100.12	100.35	100.59	100.58	100.62	100.30	100.73	100.22	100.11	100.12	100.46	99.68	99.66	99.98	100.00	100.34							
Mg [#]	0.49	0.55	0.44	0.46	0.52	0.50	0.43	0.47	0.44	0.44	0.43	0.39	0.45	0.34	0.25	0.08	0.04	0.56	0.32	0.39	0.55							
CIPW 标准矿物																												
Q	0	0	0.39	1.06	2.06	6.06	6.5	7.01	9.99	11.44	13.46	14.04	14.9	16.37	16.57	17.71	18.25	21.02	21.13	36.2	36.95							
An	0.69	0.7	1.28	11.83	13.37	14.76	15.52	15.8	15.94	16.47	16.5	16.52	16.79	17.99	18.36	18.46	19.28	20.72	21.22	25.6	25.8							
Ab	21.01	24.08	27.59	29.74	30.77	30.8	31.03	31.75	31.91	33.2	33.44	38.51	38.73	39.95	40.35	41.07	41.61	42.16	43.2	47.14	54.33							
Or	5.48	10.84	13.25	13.54	15.15	16.03	18.18	18.23	18.73	18.92	19.1	19.71	20.15	21.68	23.22	25.22	27.43	29.06	33.44	37.47	39.5							
C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.59	0.71	0.85	1.05	1.31							
Di	0	0	0	0	0	0.38	0.57	0.93	0.94	0.98	1.12	1.36	1.39	1.86	3.29	3.52	3.58	3.77	4.97	8.47	9.25							
Hy	0.03	0.06	0.08	0.61	1.17	1.2	2.93	3.21	3.34	3.38	4.06	4.07	4.19	5.5	8.32	8.74	10.42	10.66	11.43	12.86	15.93							
Ol	0	0	0	0	0	0	6.06	0	0	8.97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
Il	0.31	0.32	0.59	0.91	0.92	0.92	0.94	0.96	0.97	0.97	0.99	1.04	2.22	2.35	2.49	2.51	2.53	2.58	2.58	2.58	3.29							
Mi	0.35	0.36	1.18	2.27	2.42	2.44	2.45	2.46	2.47	2.47	2.62	3.73	4.06	5.02	5.27	5.31	5.54	5.58	5.84	5.88	6.17							
Hm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.08	0	0.11	0	0	0	0	0	0	0	0							
Ap	0.02	0.02	0.09	0.42	0.42	0.44	0.45	0.45	0.45	0.47	0.48	0.61	0.89	1	1.14	1.3	1.33	1.39	1.46	1.49	1.52							
Zr	0	0	0	0	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07							
Cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03							
合计	100.05	100.02	100.06	100.04	100.03	100.03	100.04	100.04	100.04	100.02	100.01	100	100.02	100.01	100.03	100.01	100.01	100.01	100.01	100.01	100.03	100.01						

注: 测试工作在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室测试完成; Mg[#] = Mg/(Mg + 0.9Fe); 氧化物在去 H₂O 后重新换算为 100%, 用 Le Maitre RW (1976) 方法按火山岩调整氧化铁, 采用 Kurt Holoher CIPW 程序计算标准矿物组成, 标准矿物为重量百分含量。带* 号数据引自 Fan *et al.* (2003)。带** 号数据引自 Wang *et al.* (2006)。

表2 根河地区火山岩微量元素分析结果 ($\times 10^{-6}$)
Table 2 Composition of trace elements of Genhe volcanic rocks

样品 岩性	剖面下部玄武质粗安岩-粗安岩(140Ma [*])										剖面中下部粗安岩(127Ma [*])										剖面中上部流纹岩(124Ma [*])										剖面上部粗面玄武岩-粗安岩(114Ma [*])									
	ER04-1	ER04-2	ER04-3	ER04-4	ER04-7	ERSH-2	GH-5 [*]	GH-10 [*]	GH-16 [*]	GH-19 [*]	GH-28 [*]	05GH-11	05GH-13	05GH-14	GH04-1	GH04-2	GH04-3	GH04-4	ER04-1	ER04-2	ER04-3	ER04-4	ER04-7	ERSH-2	GH-5 [*]	GH-10 [*]	GH-16 [*]	GH-19 [*]	GH-28 [*]	05GH-11	05GH-13	05GH-14	GH04-1	GH04-2	GH04-3	GH04-4				
Rb	70.27	71.45	75.71	84.83	107.71	44.07	29.81	107.50	93.17	85.22	73.58	207.80	286.07	285.43	42.88	34.74	72.82	78.78	809.60	857.93	692.70	743.47	492.26	1061.04	1467.00	533.00	538.20	631.00	608.10	16.03	16.74	16.03	999.65	1223.59	234.52	1166.50				
Sr	914.62	970.62	997.40	1022.31	732.20	1162.22	809.00	1008.00	963.60	1119.00	1044.00	495.77	14.09	14.03	534.63	1323.62	452.20	1458.06	61.87	59.39	59.78	57.76	27.03	50.53	27.21	26.74	27.12	28.07	23.86	34.85	37.82	37.51	55.95	29.89	22.63					
Ce	125.16	120.32	122.67	118.80	58.07	96.95	58.16	58.83	58.58	60.60	51.84	73.32	49.88	59.06	80.41	111.61	62.64	50.14	15.01	14.64	14.82	14.32	7.53	11.63	7.19	7.05	6.68	6.75	6.51	6.87	7.86	10.21	13.33	7.28	6.64					
Pr	56.39	54.73	55.90	53.91	31.09	42.35	24.15	23.18	24.13	23.41	23.73	33.36	20.67	23.52	41.22	50.02	28.40	27.51	9.10	8.91	9.21	8.92	6.55	6.58	4.96	4.93	4.74	4.76	4.91	6.22	3.58	4.04	7.98	7.94	5.10	5.25				
Nd	2.29	2.29	2.24	2.20	1.77	1.91	1.39	1.44	1.33	1.31	1.46	0.92	0.18	0.20	2.22	2.01	1.45	1.52	2.29	2.29	2.24	2.20	1.77	1.91	1.39	1.44	1.33	1.31	1.46	0.92	0.18	0.20	2.22	2.01	1.45	1.52				
Sm	6.80	6.77	6.89	6.67	5.72	4.76	4.88	4.65	4.62	4.59	5.07	4.88	2.82	3.12	6.97	5.51	4.32	3.95	0.80	0.82	0.83	0.80	0.78	0.55	0.62	0.64	0.58	0.57	0.67	0.73	0.46	0.50	0.97	0.63	0.56	0.51				
Tb	3.87	3.89	4.05	3.89	4.36	2.58	3.47	3.45	3.37	3.19	3.70	4.07	2.53	2.82	5.44	2.99	3.10	2.56	0.71	0.68	0.73	0.70	0.87	0.44	0.68	0.69	0.69	0.62	0.75	0.84	0.58	1.11	0.53	0.53	0.48					
Hf	1.83	1.77	1.86	1.82	2.32	1.12	1.94	1.86	1.83	1.82	1.98	2.35	1.55	1.64	2.97	1.34	1.37	1.17	0.24	0.24	0.26	0.24	0.32	0.15	0.31	0.31	0.30	0.29	0.30	0.37	0.25	0.27	0.44	0.18	0.18	0.15				
Tm	1.45	1.41	1.51	1.45	2.06	0.86	2.12	2.08	2.11	2.00	2.03	2.51	1.70	1.85	2.73	1.05	1.05	0.93	0.21	0.21	0.22	0.22	0.30	0.12	0.34	0.33	0.33	0.30	0.41	0.26	0.28	0.42	0.15	0.16	0.14					
Yb	7.78	7.90	8.28	8.46	4.14	6.49	5.71	5.74	5.73	5.59	4.88	8.91	6.50	6.54	6.84	8.51	4.54	3.62	0.94	0.92	0.96	0.95	0.76	0.70	0.60	0.59	0.59	0.57	1.25	1.17	1.21	1.21	0.82	0.79	0.60					
Pb	14.69	12.60	16.93	16.42	12.28	20.82	9.22	9.45	9.68	9.14	8.09	26.85	25.16	21.98	10.45	15.64	13.60	9.50	4.76	4.76	4.76	5.26	6.03	6.04	9.22	9.45	9.68	9.14	8.09	26.85	25.16	21.98	10.45	15.64	13.60	9.50				
Th	1.04	1.07	1.19	1.21	1.59	0.90	3.30	3.23	3.25	3.07	2.86	2.31	5.01	5.22	4.39	5.34	3.89	2.09	15.45	14.93	15.11	14.86	15.90	11.87	3.47	3.31	3.00	3.66	9.41	4.71	1.99	2.13	21.39	12.73	13.17	14.55				
U	18.02	17.40	18.25	17.37	21.48	10.98	18.77	17.69	17.65	17.33	19.50	23.69	16.15	16.83	26.88	12.32	13.91	11.20	14.28	14.00	14.23	14.03	7.74	9.06	6.22	6.16	6.23	6.10	5.52	16.33	14.97	15.25	15.78	11.77	9.95	6.09				
Nb	347.98	338.71	349.34	341.42	149.26	254.76	199.30	196.50	190.90	190.50	155.40	304.96	177.74	174.98	280.72	332.00	207.86	143.17	285.74	276.06	280.94	271.71	148.77	220.53	137.42	136.18	136.41	138.28	127.11	182.19	126.14	143.54	200.59	253.21	146.02	123.56				
ΣREE	0.85	0.87	0.83	0.84	0.86	1.00	0.89	0.88	0.92	0.98	0.49	0.16	0.16	0.85	0.91	0.86	0.85	0.89	22.31	22.07	21.04	21.13	7.31	29.09	7.63	7.63	7.31	7.31	7.57	7.59	8.27	7.10	7.32	7.18	7.84	6.61				
(Ce/Yb) _N	4.28	4.19	4.08	4.07	2.60	4.83	2.96	4.44	3.68	2.71	4.30	6.13	5.89	3.45	3.41	3.60	3.71	3.06	(La/Sm) _N	28.75	28.40	26.72	26.78	8.87	39.52	9.28	9.28	9.28	9.28	9.28	9.28	9.28	9.28	9.28	9.28	9.28				
(La/Sm) _N	3.78	3.87	3.68	3.70	2.24	4.45	2.06	4.23	3.33	3.44	1.57	1.34	1.36	1.86	1.80	1.77	1.85	2.02	(La/Yb) _N	0.10	0.10	0.11	0.12	0.08	0.18	0.10	0.10	0.12	0.17	0.19	0.18	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10				
(La/Yb) _N	5.08	5.17	5.46	5.52	7.98	8.63	15.37	16.02	16.41	16.04	15.56	18.01	20.20	20.29	3.63	6.48	4.93	3.49	(Gd/Yb) _N	0.33	0.34	0.37	0.37	0.78	0.67	1.48	1.53	1.50	1.38	1.58	1.61	1.61	0.28	0.45	0.39	0.34				
(Gd/Yb) _N	0.33	0.34	0.37	0.37	0.78	0.67	1.48	1.53	1.55	1.50	1.47	1.38	1.58	1.61	0.28	0.45	0.39	0.34	(Nb/La) _N	5.08	5.17	5.46	5.52	7.98	8.63	15.37	16.02	16.41	16.04	15.56	18.01	20.20	20.29	3.63	6.48	4.93	3.49			
(Nb/La) _N	0.33	0.34	0.37	0.37	0.78	0.67	1.48	1.53	1.55	1.50	1.47	1.38	1.58	1.61	0.28	0.45	0.39	0.34	(Th/Ta)	0.33	0.34	0.37	0.37	0.78	0.67	1.48	1.53	1.50	1.38	1.58	1.61	1.61	0.28	0.45	0.39	0.34				
(Th/Ta)	0.33	0.34	0.37	0.37	0.78	0.67	1.48	1.53	1.55	1.50	1.47	1.38	1.58	1.61	0.28	0.45	0.39	0.34	(Th/Nb)	0.33	0.34	0.37	0.37	0.78	0.67	1.48	1.53	1.50	1.38	1.58	1.61	1.61	0.28	0.45	0.39	0.34				
(Th/Nb)	0.33	0.34	0.37	0.37	0.78	0.67	1.48	1.53	1.55	1.50	1.47	1.38	1.58	1.61	0.28	0.45	0.39	0.34	注: 测试工作在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室测试完成; (La/Yb) _N 为球粒陨石标准化比值(Sun and McDonough (1989))。带*号数据引自 Fan <i>et al.</i> (2003)。																					

表3 根河地区火山岩剖面 Sr、Nd、Pb 和 Hf 同位素分析结果

Table 3 Sr, Nd, Pb and Hf isotopic compositions of Genhe volcanic rocks

样品	ER04-1	ER04-2	ER04-3	ER04-4	ER04-7	ERSH-2	GH-10*	GH-16*	GH-19*	GH-28*	05GHI1	05GHI3	05GHI4	GH04-1	GH04-2	GH04-3	GH04-4
层位	剖面下部玄武质粗安岩-粗安岩										剖面中上部流纹岩				剖面上部粗面玄武岩-粗安岩		
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.238848	0.256839	0.324092	0.363495	0.673881	0.114184	0.584800	0.501900	0.265400	0.350800	3.961609	61.802773	75.836504	0.119196	0.080045	0.955982	0.201276
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.705390	0.705443	0.705521	0.705732	0.706047	0.706135	0.706065	0.705872	0.705657	0.714332	0.847320	0.863862	0.704775	0.705374	0.706879	0.705481	
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.107514	0.089626	0.086563	0.128549	0.095961	0.128700	0.118700	0.123000	0.107415	0.104544	0.104419	0.120268	0.099948	0.157877	0.119104		
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512656	0.512647	0.512647	0.512684	0.512634	0.512634	0.512645	0.512637	0.512621	0.512636	0.512634	0.512615	0.512762	0.512638	0.512663	0.512677	
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.704915	0.704932	0.704876	0.704706	0.705907	0.705010	0.704970	0.705180	0.704980	0.707576	0.741918	0.734526	0.704571	0.705238	0.705248	0.705138	
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	2.0	2.1	2.1	2.1	2.1	1.7	1.2	1.2	0.9	1.3	1.3	1.3	1.0	3.6	1.5	1.1	2.0
$t_{\text{DM}}(\text{Nd})$	711	620	606	837	670	670	909	826	912	740	723	748	748	636	688	1332	765
$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	0.003478	0.004237	0.003058	0.003478	0.003058	0.282853	0.003058	0.003058	0.003058	0.003058	0.003407	0.003407	0.003407	0.006215	0.003100	0.003812	
$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	0.282864	0.282884	0.282884	0.282864	0.282884	0.282853	0.282853	0.282853	0.282853	0.282853	0.282862	0.282862	0.282862	0.282936	0.282854	0.282872	
$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	3.3	4.0	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	3.2	3.2	3.2	5.8	2.9	3.6		
$t_{\text{DM}}(\text{Hf})$	660	641	670	670	670	670	670	670	670	662	662	662	587	669	652		
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	18.3707	18.3945	18.3510	18.3571	18.4918	18.3241	18.3241	18.3241	18.3241	18.6464	18.5912	18.6388	18.3415	18.3603	18.4353	18.3816	
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.4936	15.4990	15.4849	15.4899	15.4884	15.4845	15.4845	15.4845	15.4845	15.5744	15.4777	15.4819	15.4901	15.4871	15.5082	15.4858	
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	38.1011	38.1385	38.0536	38.0743	38.1937	38.0563	38.0563	38.0563	38.0563	38.6119	38.2416	38.2965	38.0941	38.0707	38.1556	38.0423	

注: 测试工作在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素实验室完成; 剖面下、中和上部($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分别由140Ma、125和115Ma推算; 所用参数 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(\text{CHUR})0} = 0.512638$, $^{144}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{(\text{CHUR})0} = 0.1967$, $\lambda_{\text{Rb}}^{87} = 1.42 \times 10^{-12} \text{a}^{-1}$, $\lambda_{\text{Sm}}^{147} = 6.57 \times 10^{-12} \text{a}^{-1}$ 。带*号数据引自 Fan *et al.* (2003)。

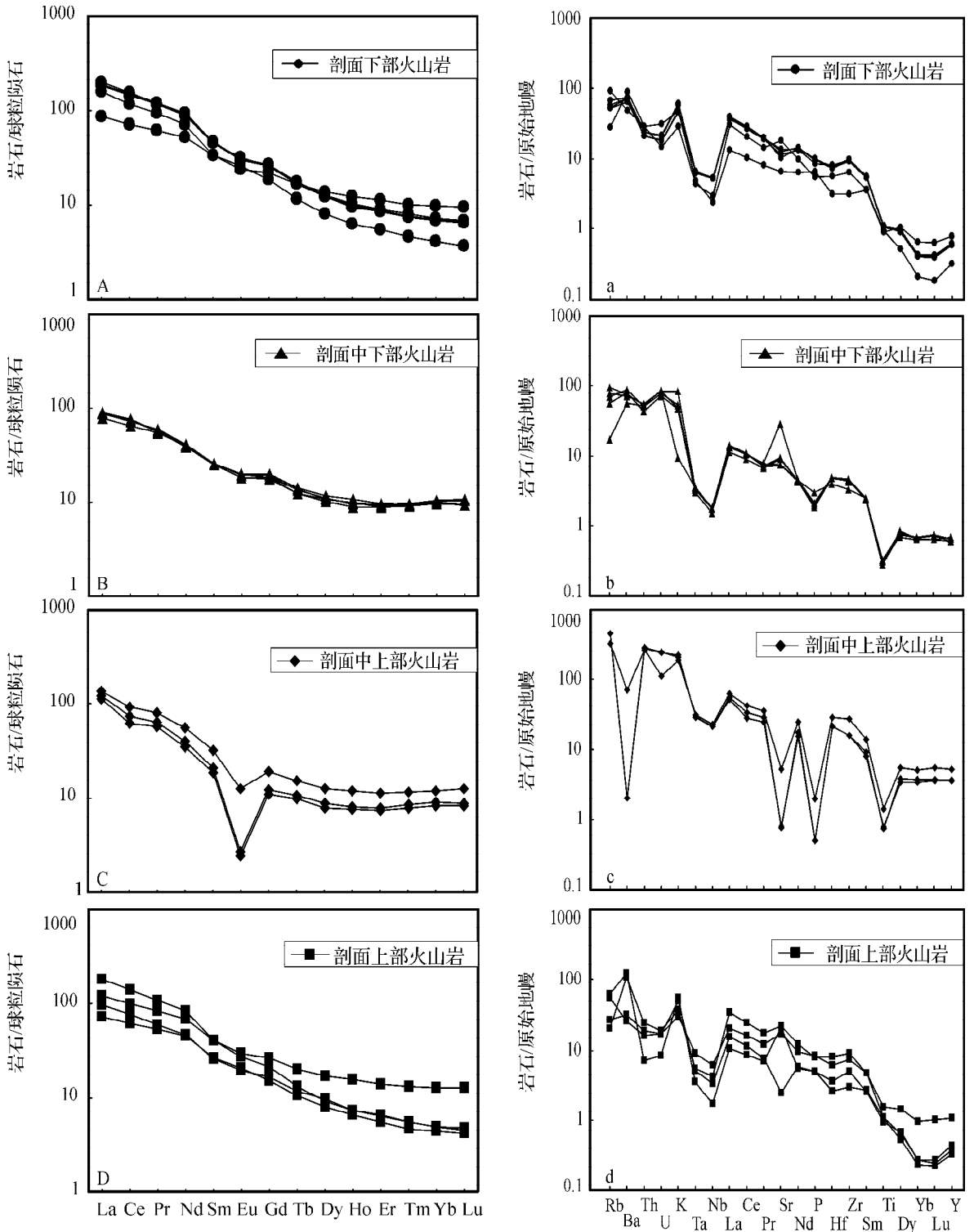


图5 根河地区火山岩剖面各层位火山岩样品稀土元素配分曲线(A、B、C、D)和微量元素蛛网图(a、b、c、d),其中球粒陨石标准化值来自 Boynton(1984);原始地幔标准化值来自 Sun and Mcdonough(1989)

Fig.5 (A、B、C、D) Chondrite-normalized rare earth elements diagram of Genhe volcanic rocks (Chondrite REE values from Boynton, 1984) and (a、b、c、d) Primitive mantle normalized trace elements spider-diagram of volcanic rocks from Genhe area (Primitive mantle values from Sun and Mcdonough, 1989)

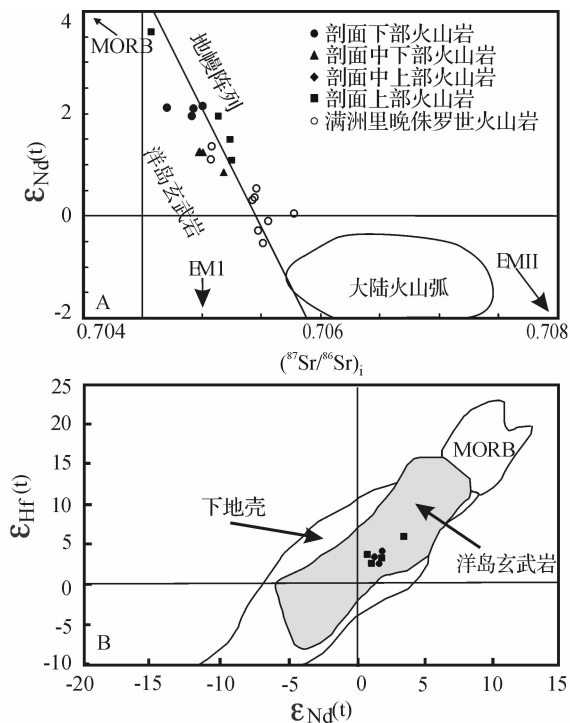


图6 根河地区火山岩剖面 $\epsilon_{Nd}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (A)、 $\epsilon_{Nd}(t)$ - $\epsilon_{Hf}(t)$ (B)图解。满洲里晚侏罗世火山岩数据来自陈志广等(2006)

Fig. 6 (A) $\epsilon_{Nd}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ and (B) $\epsilon_{Nd}(t)$ - $\epsilon_{Hf}(t)$ plot of Genhe volcanic rocks

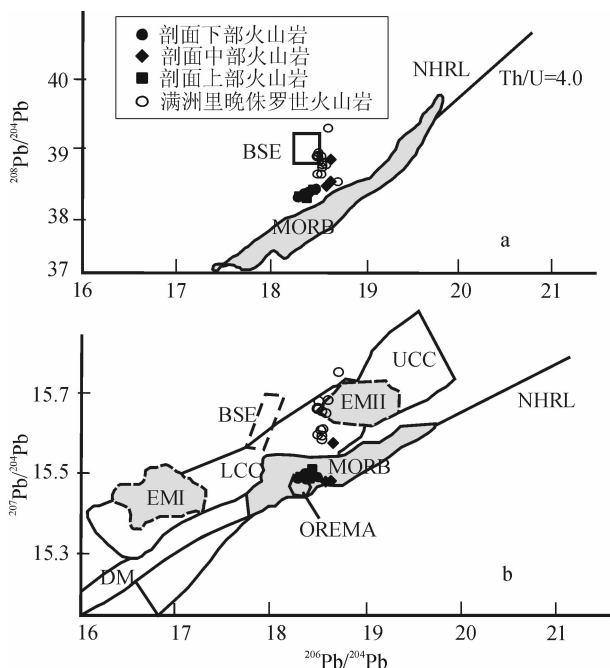


图7 根河地区火山岩剖面 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解(据 Zartman and Doe, 1981)

Fig. 7 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ plots of Genhe volcanic rocks

5 讨论

5.1 大兴安岭北段早白垩世火山岩源区特征

研究区基性和中基性火山岩具有相似的微量元素特征,富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素 (LILE), 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素 (HFSE), HFSE 相对于 LREE 强烈亏损 ($(\text{Nb}/\text{La})_N = 0.08 \sim 0.18$), 暗示剖面火山岩不可能是由洋岛玄武岩或 MORB 成分的岩浆经历陆壳混染的结果, 而可能是由于早期俯冲洋壳物质在深部发生脱水并交代了仰冲的地幔楔, 导致该地幔源区相对富集 LILE 而亏损 HFSE, 在这种地幔源区岩浆产生的火山岩同样继承了相对富集 LILE 而亏损 HFSE 的性质。

同时剖面下部基性、中基性岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值变化范围为 0.704706 ~ 0.705907, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 1.73 ~ 2.12, $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 2.9 ~ 3.3; 剖面中部中酸性岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 变化范围为 0.704970 ~ 0.705180, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 0.86 ~ 1.26, 酸性岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 变化范围为 0.707576 ~ 0.741918, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 0.97 ~ 1.33, $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 3.2; 上部基性、中基性岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 变化范围为 0.704571 ~ 0.705248, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 1.09 ~ 3.59, $\epsilon_{Hf}(t)$ 为 2.9 ~ 5.8。剖面火山岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 范围为 18.3241 ~ 18.6464, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 范围为 15.4777 ~ 15.5744, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 范围为 38.0423 ~ 38.6119, 可见剖面基性、中基性火山岩具有初始 Sr 弱富集、 ϵ_{Nd} 和 ϵ_{Hf} 较亏损的特征。其中剖面流纹岩与下部基性、中基性火山岩具有相似的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 、 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值, 指示其可能为同源岩浆演化火山岩系列。由于俯冲洋壳析出流体交代的地幔楔或亏损地幔可以使地幔源区出现相对弱亏损至弱富集的 Nd 同位素组成(陈义贤等, 1997; 邵济安等, 1999), 本文认为大兴安岭北部这套具有 Sr 弱富集、Nd 弱富集或亏损的玄武安山岩和粗安岩源于受古生代俯冲流体交代的岩石圈地幔。Pb 同位素组成特征指示了源区具有亏损地幔源区的特征。同时, 火山岩 Nd 和 Hf 同位素模式年龄分别为 606 ~ 912Ma 和 587 ~ 670Ma (表 3), 反映了岩石圈深部可能不存在老于新元古代的古老地壳基底。

大兴安岭北段西侧满洲里地区的晚侏罗世火山岩具有亚碱性-碱性过渡性质(陈志广等, 2006), 全碱 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) 含量为 5.52% ~ 8.79%、MgO 含量为 0.04% ~ 3.80%、Mg[#] 为 0.04 ~ 0.32、($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值为 0.705078 ~ 0.713891、 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -0.7 ~ 1.3。微量元素对比发现, 根河地区早白垩世火山岩与满洲里地区晚侏罗世火山岩具有相似特征, 不同的是其全碱、MgO、Mg[#] 以及 $\epsilon_{Nd}(t)$ 具有不同程度的增加, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值有所减小, 指示大兴安岭地区火山岩由西向东随其时代变新其源区有所加深, 这可能是受蒙古-鄂霍茨克海造山后伸展和古太平洋俯冲双重作用影响所致。

5.2 构造-岩浆演化分析

关于大兴安岭地区中生代火山岩形成的构造环境, 目前存在很多不同的观点。有的认为大兴安岭大面积分布的中生代火山岩与古太平洋板块向中国大陆俯冲作用有关, 属活动大陆边缘构造环境(赵国龙等, 1989; 马家骏和方大赫, 1991); 张宏等(1999)认为是一种在俯冲强挤压后的“减压”-“剪切”背景下的挤压环境; 也有一些学者认为是地幔柱成因(林强等, 1998; 葛文春等, 1999), 或是软流圈上涌与岩石圈伸展构造(邵济安等, 1999)。吴福元和曹林(1999)则认为中生代以来东部太平洋板块的俯冲及若干块体的拼贴, 对火山岩带形成构造环境有着至关重要的影响。近年来, 更多地学者把大兴安岭中生代火山岩的成因构造与蒙古-鄂霍茨克海闭合, 发生碰撞造山后伸展的环境相联系(Zorin, 1999; 郭锋等, 2001; Meng, 2003; Fan *et al.* 2003; 张昱等, 2005)。同时对于我国大兴安岭地区由古亚洲洋构造域向滨太平洋构造域的转变时代存在不同的观点, 一些学者认为这种构造域的转变是在晚侏罗世开始, 到早白垩世已经完全进入了滨太平洋构造域(赵越等, 1994; 葛文春等, 1999; 尹志刚等, 2006); 而另一些学者认为古亚洲洋构造域向滨西太平洋构造域转化不是在短时间完成的, 晚三叠世-早白垩世中期为古亚洲洋构造域向滨太平洋构造域转化阶段, 到早白垩世晚期开始我国东北地区才完全进入滨西太平洋构造域的演化阶段(张炯飞等, 2000; 李锦轶等, 2004)。

通过对分布于大兴安岭北段大面积的晚中生代火山岩地球化学比较研究, 本文认为从晚侏罗世到早白垩世, 火山岩在主量、微量元素以及同位素上存在一定的差异, 所反映的构造环境亦有所不同。大兴安岭北段西侧地区在晚侏罗世(150~160Ma)受蒙古-鄂霍茨克海造山后伸展和岩石圈减薄作用的影响形成了一套碱性-亚碱性过渡性质的火山岩(Fan *et al.*, 2003; 陈志广等, 2006), 而逐级向东为根河地区的这套早白垩世碱性和碱性-亚碱性过渡系列的火山岩, 其主量、微量元素以及同位素地球化学特征发生一定改变, 说明在早白垩世(140~115Ma)可能由于同时受蒙古-鄂霍茨克海造山后伸展和太平洋俯冲双重作用影响, 即大兴安岭地区在早白垩早期并没有完全进入滨太平洋构造域。

综合地质与地球化学研究, 本文认为大兴安岭地区晚中生代构造环境, 主要表现为岩石圈的伸展、减薄并伴有软流圈上隆作用。大约140Ma时, 被早期俯冲流体交代的岩石圈地幔由于其固相线较低而发生减压部分熔融作用出现基性岩浆(Ellam, 1992; Delay and DePaolo, 1992; McKenzie and Bickle, 1988; 周新华, 2006), 并喷发形成玄武质粗安岩和粗安岩; 大约在125Ma时, 基性岩浆在经历了深部岩浆房分异作用后, 形成了一套亚碱性-碱性过渡性质的粗面岩, 主、微量元素及Nd-Hf-Pb同位素特征显示流纹岩主要为同期岩浆分离结晶作用的产物; 大约在115Ma时, 基性岩浆形成了一套碱性的粗面玄武岩、玄武质粗安岩和粗安岩。

$\epsilon_{Nd}(t)$ - $1/Nd$ 图解显示(图8), 根河地区火山岩剖面样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 不随 $1/Nd$ 发生变化, 表现出岩浆演化主要为分离结晶方式。在 $\epsilon_{Nd}(t)$ - SiO_2 协变图解上(图9), 随着 SiO_2 含量的升高, $\epsilon_{Nd}(t)$ 没有明显变化, 也表明这套火山岩没有遭受明显的陆壳物质混染。

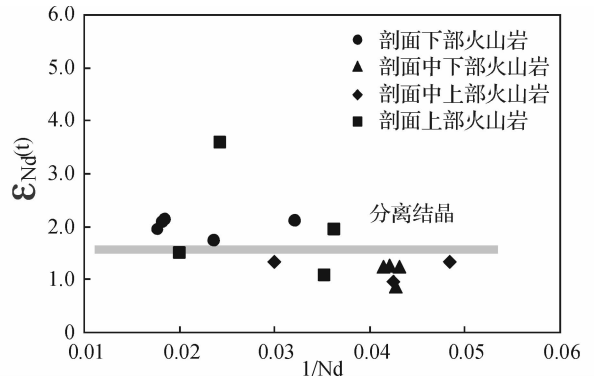


图8 根河地区火山岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ - $1/Nd$ 图解

Fig. 8 $\epsilon_{Nd}(t)$ - $1/Nd$ plots of Genhe volcanic rocks

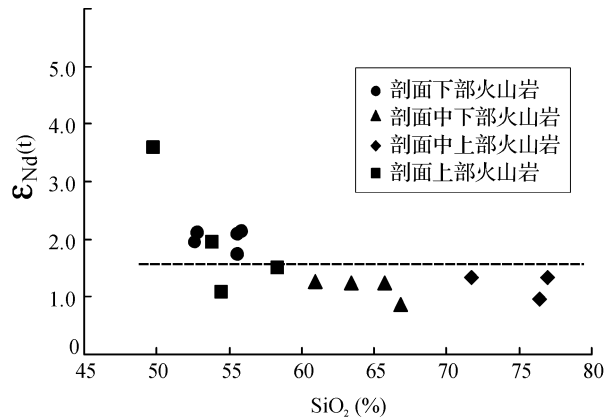


图9 根河地区火山岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ - SiO_2 协变图解

Fig. 9 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ - SiO_2 and $\epsilon_{Nd}(t)$ - SiO_2 plots of Genhe volcanic rocks

火山岩地球化学特征可以反映岩浆源区性质及早期构造事件对火山岩源区改造的信息, 本文认为本地区火山岩继承了早期古生代基底和洋壳俯冲的一些地球化学特征, 比如火山岩微量元素及同位素特征具有一些岛弧(陆缘弧)火山岩的特征。总体可以认为, 根河地区火山岩源区为受早期俯冲流体交代的岩石圈地幔; 在岩石圈伸展减薄背景下, 源区发生减压熔融形成了基性岩浆, 分别在大约140Ma、125Ma和115Ma形成了3次大的火山喷发活动。

6 结论

大兴安岭北段根河地区分别在 140Ma、125Ma 和 115Ma 发生 3 次大的火山喷发活动, 火山岩由碱性系列岩石和亚碱性系列岩石组成, 碱性系列岩石高度富集轻稀土元素和大离子亲石元素, 其丰度类似于板内碱性玄武岩, 但又具有明显亏损高场强元素的特征, 这一特征类似于火山弧钙碱性玄武岩。

通过对邻区晚中生代火山岩的对比发现, 在大兴安岭北段地区, 由西侧满洲里地区向东到根河地区, 火山岩年龄由晚侏罗世到早白垩世逐渐变小, 火山岩的地球化学特征表现出一定的相似性, 但全碱、MgO、Mg[#] 以及 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 具有不同程度的增加, 表现出火山岩浆源区具有逐渐加深的演化趋势, 同时反映了区域构造环境的逐渐演化和转变过程。根河地区火山岩样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 不随 1/Nd 发生变化, 表现出岩浆演化以分离结晶为主。 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ -SiO₂ 协变图解显示, 随 SiO₂ 含量升高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 没有明显变化, 表明这套火山岩没有遭受明显的陆壳物质混染。

本文认为根河地区早白垩世火山岩形成于古亚洲洋构造域向滨太平洋构造域转变阶段, 受蒙古-鄂霍茨克海造山后伸展和西太平洋板块俯冲双重作用影响。

大兴安岭造山带是在古亚洲洋构造域基础上经中生代叠加改造而形成。古亚洲洋经历了洋陆格局演变和多块体拼合-增生造山过程, 而多块体拼合后, 中生代期间的陆内伸展和环太平洋构造-岩浆作用的叠加, 使得本区岩浆活动表现为强烈而复杂的陆内垂向增生特征。

致谢 在野外地质考察期间, 承蒙内蒙古赤峰地质矿产勘查院万力和黑龙江齐齐哈尔地调院孙广瑞等高级工程师的帮助, 在此表示衷心感谢。

References

Boynton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements; meteorite studies. In: Henderson (ed). Rare earth element geochemistry. Elsevier, 63 - 114

Chen FK, Hegner E and Todt W. 2000. Zircon ages, Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany: Evidence for a Cambrian magmatic arc. *Int. J. Earth Sci.*, 88: 791 - 802

Chen FK, Siebel W, Satir M, Terzioglu N and Saka K. 2002. Geochronology of the Karadere basement (NW Turkey) and implications for the geological evolution of the Istanbul zone. *Int. J. Earth Sci.*, 91: 469 - 481

Chen YX, Chen WJ, Zhou XH, Li Q, Zhang GH and Wang F. 1997. The Mesozoic Volcanic Rocks in the Western Liaoning Province and Its Adjacent Areas: Geochronology Geochemistry and Tectonic Backgrounds. Beijing: Seismological Press, 1 - 279 (in Chinese)

Chen ZG, Zhang LC, Zhou XH, Wan B, Ying JF and Wang F. 2006. Geochronology and geochemical characteristics of Mesozoic volcanic rocks section in Manzhouli Xinyouqi, Inner-Mongolia. *Acta*

Petrologica Sinica, 22(12): 2971 - 2986 (in Chinese with English abstract)

Delay EE and DePaolo DJ. 1992. Isotopic evidence for lithospheric thinning during extension; Southeastern Great Basin. *Geology*, 20: 104 - 108

Ellam RM. 1992. Lithospheric thickness as a control on basalt geochemistry. *Geology*, 20: 153 - 156

Elliott T, Plank T, Zindler A, White W and Bourdon B. 1997. Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc. *J. Geophys. Res.*, 102(B7): 14991 - 15019

Fan WM, Guo F, Wang YJ and Lin G. 2003. Late Mesozoic calc alkaline volcanism of post orogenic extension in the northern Da Hinggan mountains, northeastern China. *J. Vol. Geotherm. Res.*, 121: 115 - 135

Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E and Jackson SE. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 133 - 147

Ge WC, Lin Q, Sun DY, Wu FY, Yuan ZK, Li WD, Chen MZ and Yin CX. 1999. Geochemical characteristics of Mesozoic basaltic volcanic rocks in the Daxing'anling Mountains; evidence for mantle-crust interaction. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 396 - 407 (in Chinese with English abstract)

Ge WC, Li XH, Lin Q, Sun DY, Wu FY and Yin CX. 2001. Geochemistry of Early Cretaceous alkaline rhyolites from Hulun lake, Daxing'anling and its tectonic implications. *Chinese J. Geology*, 36(2): 176 - 183 (in Chinese with English abstract)

Guo F, Fan WM, Wang YJ and Lin G. 2001. Petrogenesis of the late Mesozoic bimodal volcanic rocks in the southern Da Hinggan Mts. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 161 - 168 (in Chinese with English abstract)

Irvine TN and Baragar WRA. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Earth-Science Reviews*, 37: 215 - 224

Li JY, Mo SG, He ZJ, Sun GH and Chen W. 2004. The timing of crustal sinistral strike-slip movement in the northern Great khing'an ranges and its constraint on reconstruction of the crustal tectonic evolution of NE China and adjacent areas since the Mesozoic. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 11(3): 157 - 167 (in Chinese with English abstract)

Li XH, Qi CS and Liu Y. 2005. Rapid Separation of Hf from Rock Samples for Isotope analysis by MC-ICPMS: A Modified Single Column Extraction Chromatography Method. *Geochimica*, 34(2): 109 - 114 (in Chinese with English abstract)

Lin Q, Ge WC and Sun DY. 1998. Tectonic significance of Mesozoic volcanic rocks in northeastern China. *Sci. Geol. Sinica*, 33(2): 129 - 139 (in Chinese with English abstract)

Lin Q, Ge WC and Cao L. 2003. The geochemistry of the Mesozoic bimodal volcanic rocks in Da Hinggan Mountains. *Geochimica*, 32(3): 208 - 222 (in Chinese with English abstract)

Lü ZC, Hao LB, Duan GZ, Li DC and Lian ChY. 2000. Geochemical Research on Mesozoic Volcanic Rocks in the Manzhouli-E'erguna region. *Acta et Mineralogica Sinica*, 20(4): 406 - 414 (in Chinese with English abstract)

Lü ZC, Duan GZ, Hao LB, Li DC and Wei CD. 2001. Magmatism and Its Tectonic Significance in the Manzhouli-E'erguna region. *J. Mineral and Petrol.*, 20(1): 77 - 85 (in Chinese with English abstract)

Ma JJ and Fang DH. 1991. A preliminary study of the Mesozoic volcanic rocks in Heilongjiang Province, China. *Heilongjiang Geology*, 2(2): 1 - 16 (in Chinese)

McKenzie DP and Bickle MJ. 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere. *J. Petrol.*, 32: 625 - 679

Meng QR. 2003. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? *Tectonophysics*, 369: 155 - 174

Pearce JA and Peate DW. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 23: 251 - 285

Rickwood PC, 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22: 247-263

Shao JA, Zhang SX, Zhang LQ and Mou BL. 1999. Two kinds of vertical accretion of the continental crust: An example of the Da Hinggan Mts. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 600-606 (in Chinese with English abstract)

Sun SS. and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds). *Magmatism in Oceanic Basins*. Spec. Publ.-Geol. Soc. Lond., 42:313-345

Wang F, Zhou XH, Zhang LC, Ying JF, Zhang YT, Wu FY and Zhu RX. 2006. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an Range (NE China): Timing and implications for the dynamic setting of NE Asia. *Earth Planet. Sci. Let.*, 251: 179-198

Wilson M. 1989. *Igneous petrogenesis*. London: Unwin Hyman. 1-466

Wu FY and Cao L. 1999. Some fundamental geological problems in northeastern Asia. *Global Geology*, 18(2): 1-13 (in Chinese with English abstract)

Xu P, Wu FY and Xie LW. 2004. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1642-1648

Yin ZG, Zhao YJ, Yang XP, Zhao HD and Han ZZ. 2006. Characteristics of Mesozoic volcanic rocks and magma evolution in northern Daxing'anling. *Global Geology*, 2(25): 120-128 (in Chinese with English abstract)

Zartman RE and Doe BR. 1981. *Plumbotectonics-the model*. *Tectonophysics*, 75: 135-162

Zhang H, Ma JX, Quan H and Jin CZ. 1999. The dynamic environments of The Mesozoic volcanic rocks in North Da Hinggan Mountains. *Journal of Precious Metallic Geology*, 8(1): 56-64 (in Chinese)

Zhang JF, Quan H, Wu G and Zhu HC. 2000. Tectonic Setting of Mesozoic Volcanic Rocks in Northeast China. *Journal of Precious Metallic Geology*, 9(1): 33-38 (in Chinese)

Zhang Y, Zhao HL and Han YD. 2005. The emplacement mechanism and continental dynamics evolution of indosinian intrusive rocks in east Liaoning peninsula. *Geology and Resources*, 2(14): 87-96 (Chinese with English abstract)

Zhao GL, Yang GL, Fu JY and Yang YZ. 1989. *Mesozoic Volcanic Rocks in Middle-south Daxing'anling*. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1-260 (in Chinese)

Zhao Y, Yang ZY and Ma XH. 1994. Geotectonic transition from paleoasian system and paleotethyan system to paleopacific active continental margin in eastern Asia. *Scientia Geologica Sinica*, 29(2): 105-118 (in Chinese with English abstract)

Zhou XH. 2006. Major transformation and thinning of subcontinental lithosphere beneath eastern China in Cenozoic-Mesozoic: Review and prospective. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 13: 50-64 (in Chinese with English abstract)

Zorin YA. 1999. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia. *Tectonophysics*, 306: 33-56

附中文参考文献

陈义贤, 陈文奇, 周新华, 李齐, 张国辉, 王非. 1997. 辽西及邻区中生代火山岩-年代学、地球化学和构造背景. 北京: 地震局出版社, 1-279

陈志广, 张连昌, 周新华, 万博, 英基丰, 王非. 2006. 满洲里新右旗火山岩剖面年代学和地球化学特征. *岩石学报*, 22(12): 1

- 16

葛文春, 林强, 孙德有, 吴福元, 元钟宽, 李文远, 陈明植, 尹成孝. 1999. 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. *岩石学报*, 15(3): 396-407

葛文春, 李献华, 林强, 孙德有, 吴福元, 尹成孝. 2001. 呼伦湖早白垩世碱性流纹岩的地球化学特征及意义. *地质科学*, 36(2): 176-183

郭锋, 范蔚茗, 王岳军, 林舸. 2001. 大兴安岭南段晚中生代双峰式火山作用. *岩石学报*, 17(1): 161-168

李锦轶, 莫申国, 和政军, 孙桂华, 陈文. 2004. 大兴安岭北段地壳左行走滑运动的时代及其对中国东北邻区中生代以来地壳构造演化重建的制约. *地学前缘*, 11(3): 157-167

李献华, 祁昌实, 刘颖等. 2005. 岩石样品快速 Hf 分离与 MC-ICPMS 同位素分析: 一个改进的单柱提取色谱法. *地球化学*, 34(2): 109-114

林强, 葛文春, 孙德有, 吴福元, 元钟宽, 闵庚德, 陈明植, 李文远, 权致纯, 尹成孝. 1998. 中国东北地区中生代火山岩大地构造意义. *地质科学*, 33(2): 129-139

林强, 葛文春, 曹林. 2003. 大兴安岭中生代双峰式火山岩的地球化学特征. *地球化学*, 32(3): 208-222

吕志成, 郝立波, 段国正, 李殿超, 连长云. 2000. 满洲里-额尔古纳地区中生代火山岩地球化学研究. *矿物学报*, 20(4): 406-414

吕志成, 段国正, 郝立波, 李殿超, 魏存第. 2001. 海拉尔-额尔古纳地区岩浆作用及其大地构造意义. *矿物岩石*, 20(1): 77-85

马家骏, 方大赫. 1991. 黑龙江省中生代火山岩初步研究. *黑龙江地质*, 2(2): 1-16

邵济安, 藏绍先, 张履桥, 牟保磊. 1999. 陆壳增生的两种方式: 以大兴安岭为例. *岩石学报*, 19(4): 600-606

吴福元, 曹林. 1999. 东北地区的若干重要基础地质问题. *世界地质*, 18(2): 1-13

徐平, 吴福元, 谢烈文. 2004. U-Pb 同位素定年标准锆石 Hf 同位素. *科学通报*, 49(14): 1403-1410

尹志刚, 张跃龙, 杨晓平, 赵寒冬, 韩振哲. 2006. 大兴安岭北部中生代火山岩特征及岩浆演化. *世界地质*, 2(25): 120-128

张宏, 马俊孝, 权恒, 金成洙. 1999. 大兴安岭北段中生代火山岩形成的动力学环境. *贵金属地质*, 8(1): 56-64

张炯飞, 权恒, 武广, 祝洪臣. 2000. 东北地区中生代火山岩形成的构造环境. *贵金属地质*, 9(1): 33-38

张昱, 赵焕力, 韩彦东. 2005. 大兴安岭北段塔木兰沟组玄武岩地球化学及构造背景. *地质与资源*, 2(14): 87-96

赵国龙, 杨桂林, 傅嘉友, 杨玉琢. 1989. 大兴安岭中南部中生代火山岩. 北京: 北京科学技术出版社. 1-260

赵越, 杨振宇, 马醒华. 1994. 东亚大地构造发展的重要转折. *地质科学*, 29(2): 105-118

周新华. 2006. 中国东部中生代岩石圈转型与减薄研究的若干问题. *地学前缘*, 13: 50-64