

DOI: 10.13745/j.esf.yx.2017-3-52

黑龙江黑河地区早白垩世火山岩岩石地球化学特征及其构造环境意义

邵 帅^{1,3}, 邓晋福¹, 刘 翠^{1,*}, 赵院冬^{1,2}, 段培新¹, 许逢明², 狄永军¹

1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110000

3. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083

SHAO Shuai^{1,3}, DENG Jinfu¹, LIU Cui^{1,*}, ZHAO Yuandong^{1,2}, DUAN Peixin¹, XU Fengming², DI Yongjun¹

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China

2. Shenyang Geological Survey, China Geological Survey, Shenyang 110000, China

3. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China

SHAO Shuai, DENG Jinfu, LIU Cui, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting of Early Cretaceous volcanic rocks in the Heihe area, Heilongjiang Province, China. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(3): 215-229

Abstract: The Mesozoic volcanic rocks are extensively developed in the Heihe area of Heilongjiang Province, but their geological dating, rock assemblage, petrogenesis and tectonic setting remain unclear. This paper focuses on the petrology and geochemistry of volcanic rocks in this area. Our study showed that the volcanic rocks formed in the Early Cretaceous. They comprise mainly of andesite, dacite and rhyolite, but also contain trachyte, latite, basaltic andesite, trachydacite, shoshonite and benmoreite. The rock assemblage therefore is of arc-volcanic rock assemblage. These rocks mostly belong to the sub-alkaline series with $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ratio > 1.2 in general. The rock assemblage is metaluminous-peraluminous in the A/CNK-A/NK diagram. Other rock series of lesser quantity were also shown in the oxide phase diagrams: both calc-alkaline (including low Fe calc-alkaline (LF-CA)) and tholeiitic (TH) series in SiO_2 -TFeO/MgO diagram, high-K calc-alkaline and medium-K calc-alkaline series in SiO_2 - K_2O diagram, calc-alkaline/alkali-calcic and alkaline (CA+AC+A) series in SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$) diagram, and experimental basaltic and magnesium andesitic melting ranges in SiO_2 -MgO diagram. The rocks were enriched in LILE (K, La, Zr, Hf, Tb and Tm) and depleted in HFSE (Nb, Ta, Ti, Y and Yb). They were relatively enriched in LREEs and slightly depleted in HREEs with weak negative Eu anomaly. Most of the rocks had high Sr and low Y contents, some displayed adakite characteristics. Overall, the geochemical characteristics were consistent with arc volcanic rocks and in accordance with the rock assemblage. Taking into account tectonic setting discrimination result, we propose that the volcanic rocks were formed in subducted oceanic zones, and the magma source areas were likely subducted oceanic crust, upper mantle wedge, and lower crust of Xing'an Arc.

Key words: Heihe area in Heilongjiang Province; Early Cretaceous; volcanic rocks assemblage; arc-volcanic rocks; subduction setting

摘 要: 黑龙江省黑河地区广泛发育侏罗—白垩纪火山岩, 但是该火山岩的岩石组合、成因和所表征的大地构造环境目前有很大的争议。本文对该套火山岩开展详细的岩石学、岩石地球化学等研究。该火山岩形成于早

收稿日期: 2016-11-10; 修回日期: 2017-03-01

基金项目: 中国地质调查局项目(DD-16-049, 12120114055701, 12120115069701, 12120114020901, 中地调研合同[2016]第 132 号); 国家自然科学基金项目(41502063)

作者简介: 邵 帅(1983—), 女, 博士, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: vipss@163.com

* 通讯作者简介: 刘 翠(1973—), 女, 博士, 副教授, 主要从事岩浆岩岩石学研究。E-mail: liucui@cugb.edu.cn

白垩世, 主要以安山岩-英安岩-流纹岩为主, 包含英安岩、安山岩、粗面岩、流纹岩、安粗岩、玄武安山岩、粗面英安岩、钾玄岩、歪长粗安岩, 因此属于弧火山岩的组合。该区火山岩主要为亚碱性系列, 岩石 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值一般 >1.2 。A/CNK 在 1 附近, 为准铝质-过铝质岩石。 $\text{SiO}_2\text{-TFeO}/\text{MgO}$ 图上既有钙碱性系列(包括低铁钙碱性系列), 又有拉斑系列。 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图上主要为中钾钙碱-高钾钙碱系列。 $\text{SiO}_2\text{-(Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})$ 图上主要为钙碱系列、碱钙系列和碱性系列, 在 $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ 图中主要落入实验玄武岩的局部熔融范围和镁安山岩系列范围。微量元素蛛网图显示富集大离子亲石元素, K、La、Zr、Hf、Tb、Tm 为峰, 亏损 Nb、Ta、Ti、Y、Yb 等高场强元素。稀土元素球粒陨石标准化配分模式为缓右倾型的模式, 轻稀土相对富集, 重稀土内部分馏不明显, 具有微弱负 Eu 异常。大部分岩石具有高 Sr 低 Y 的特征, 其中一些岩石具有 adakite 岩的特征。上述特征均指示弧火山岩的特征。结合构造环境判别认为该火山岩形成于与洋俯冲有关的环境, 推测岩浆可能的源区为俯冲的洋壳、上覆的地幔楔、兴安弧的下地壳。

关键词: 黑龙江黑河地区; 早白垩世; 火山岩组合; 弧火山岩; 俯冲环境

中图分类号: P584; P588.14; P542 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2018)03-0215-15

兴蒙造山带广泛发育燕山期的岩浆活动, 尤其是晚侏罗世-早白垩世的陆相火山活动^[1-3]。但是, 由于陆相火山地层的划分一般借鉴海相火山地层的划分方法, 导致火山地层的时代归属存在很大争议。以塔木兰沟组为例, 内蒙古地质矿产局^[4]给出的塔木兰沟组形成年龄为 161 Ma, 黑龙江地质矿产局^[1]将其归属为中-晚侏罗世, 时限为 155~168 Ma。然而, 近年来许多作者相继发表了 125 Ma 左右的塔木兰沟组火山岩形成年龄^[5-8]。本文对托牛河、三道湾子等地的原塔木兰沟组火山岩、光华组火山岩等开展了 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 测年, 结果表明其形成年龄约为 111~117 Ma(详细结果另文发表)。出现以上争议的主要原因在于对火山岩组合的基本特征存在模糊的认识。据此, 本文聚焦于黑龙江黑河三道湾子及其邻区发育的早白垩世火山岩, 试图澄清这套火山岩的基本特征, 进而探讨其构造意义。

研究区在中生代时期经历了古亚洲洋构造域向滨太平洋构造域的转化^[9-11], 以及北部蒙古-鄂霍次克洋的长期影响^[1, 11-13]。复杂的构造转换过程、流体过程广泛而强烈的发育, 使黑河地区火山岩与金矿的关系非常密切, 是三道湾子、北大沟、上马场等金矿的主要赋存层位^[7, 14-15]。但是, 对于黑河地区的火山岩组合、岩浆成因与演化以及形成于上述哪个构造域作用阶段, 目前还有很大争议^[2-3, 5-6, 10-11, 16-17]。因此, 阐明该区火山岩的基本特征具有重要的意义。

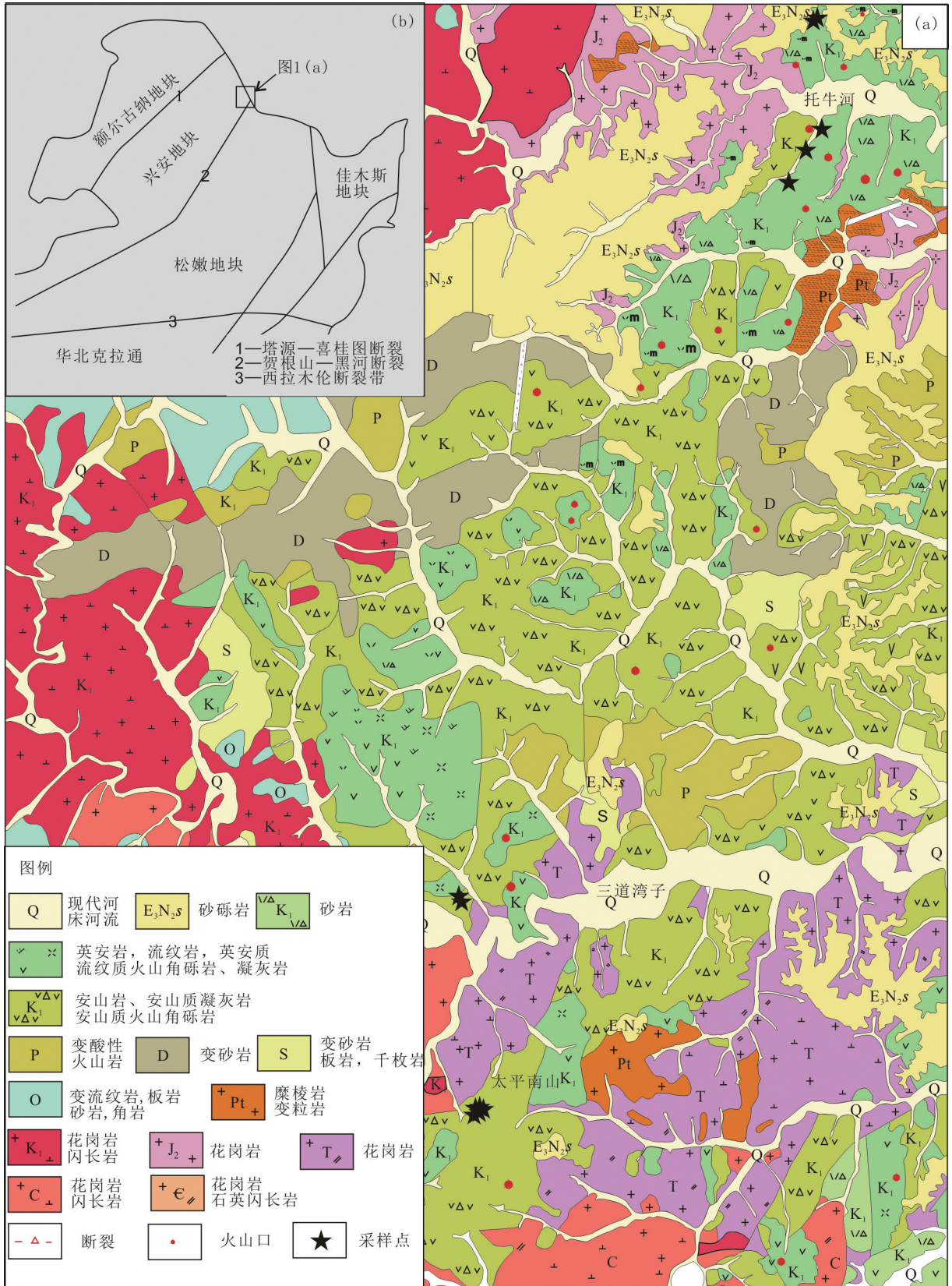
1 区域地质背景及采样位置

兴蒙造山带的东段可以塔源-喜桂图断裂和

贺根山-黑河断裂为界划分为额尔古纳、兴安和松嫩等三个地块^[9]。黑河地区位于兴安地块的东北端(图 1b), 即大、小兴安岭的接壤部位, 其东侧为贺根山-黑河断裂(蛇绿混杂岩带)。中生代早期, 古亚洲洋的作用在该区结束, 最晚被认为于晚三叠世在西拉木伦一线闭合^[18]。晚侏罗世-白垩纪时期, 其北侧为蒙古-鄂霍次克洋作用域, 东侧隔着小兴安岭、佳木斯块体与伊泽纳崎洋(古太平洋)相望。

区内主要出露古生界、中生界和新生界地层, 前寒武纪地层不发育(图 1a)。元古宙兴华渡口群和落马湖群系列变质岩零星出露, 早古生代铜山组、多宝山组为一套陆缘弧碎屑和火山-沉积岩系分布在多宝山镇一带。晚古生代泥鳅河组、根里河组等为海陆交互、陆相火山-沉积岩系, 主要分布在卧都河附近。中生界地层分布较广, 上黑龙江地区早-中侏罗世陆源沉积岩系被晚侏罗世-早白垩世火山岩覆盖, 后者被认为是一套陆相火山-沉积岩系, 主要分布在研究区东部的托牛河-三道湾子一带。新生界为第三系孙吴组(E_3N_2s)砂岩及第四系(Q)沉积, 主要分布在山间盆地及研究区东部。该区侵入岩发育, 早古生代花岗闪长岩类主要分布在多宝山附近, 石炭纪-二叠纪糜棱岩化花岗岩类主要沿嫩江-新开岭-黑河断裂带分布, 中生代花岗岩分布最广, 呈岩基状(图 1a)出露在研究区的北部和西部。区内断裂构造及褶皱构造发育, 区域性深大断裂控制了岩浆活动及成矿作用。

本文对托牛河、三道湾子、上马场、大平南山等地出露的火山岩进行了野外地质观察和采样, 采样位置见图 1。



a—区域地质简图及采样位置^[14]; b—大地构造分区简图^[11]。

图 1 研究区地质图

Fig.1 A geological map of the research area

2 火山岩岩相学特征及分类命名

2.1 岩相学特征

上述地区的火山岩呈层状产出。一般较新鲜, 矿化区或矿体附近蚀变较强烈。火山岩一般为斑状结构, 无斑隐晶质结构较少见。野外可见斑晶具有明显定向分布。岩石一般为块状构造, 局部可见气孔状构造。熔岩和火山碎屑岩均有出露。显微镜下观察, 岩石类型主要为安山岩、英安岩、流纹岩、粗面岩、粗安岩以及相应的火山碎屑岩。

安山岩: 岩石为斑状结构, 斑晶主要为斜长石, 见少量辉石。斜长石斑晶呈自形板柱状, 发育聚片双晶。基质呈玻晶交织结构, 由长条状斜长石微晶和玻璃质及少许微粒状不透明矿物构成。基质斜长石微晶定向排列明显, 且与斑晶排列方向基本一致(图 2a)。

英安岩: 斑状结构, 斑晶主要见斜长石和钾长石。斜长石自形板柱状, 聚片双晶, 发育环带结构(图 2b), 可能为中长石, 粒度 $\leq 1.0 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$; 钾长石, 卡氏双晶或不发育双晶; 基质为玻晶交织结构。

粗安岩: 主要为少斑斑状结构, 斑晶见少许斜长石, 偶见辉石斑晶, 斜长石自形板柱状, 聚片双晶; 辉石无色, 短柱状, 干涉色二级蓝绿色, 消光角大约 45° ; 基质为玻晶交织结构, 由板条状斜长石、少许角闪石(辉石)和玻璃质交织构成。基质与斑晶排列方向基本一致, 定向构造较明显。

粗面岩: 主要为斑状结构。斑晶主要为斜长石、少量钾长石、石英。斜长石见雏晶聚片双晶, 为更-

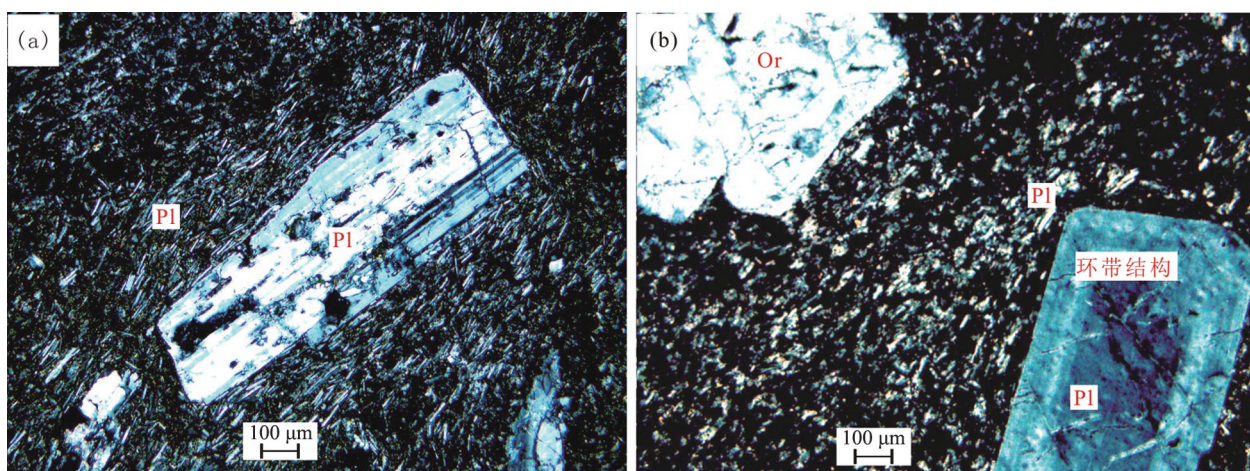
中长石; 钾长石无色, 自形板柱状, 卡式双晶或无双晶; 石英无色, 透明洁净。基质为隐晶质结构, 由斜长石、石英微晶和玻璃质构成。斑晶及基质中斜长石微晶具有一致的定向排列趋势。

火山角砾岩: 主要为岩屑凝灰-火山角砾状构造, 岩石主要由隐晶质安山岩岩屑和少量石英、长石等晶屑和隐晶质熔岩物质等组成。

2.2 火山岩分类命名

按照国际地科联分类方案^[19], 火山岩岩石由于基质多为隐晶质-玻璃质, 因此分类命名采用化学分类。本文测试了 24 套火山岩样品的数据(表 1), 加上收集的前人数据, 合计 84 套。全岩地球化学测试在国家地质实验测试中心完成。主量元素化学成分测试在 X 射线荧光光谱仪(PW4400)上测试完成(FeO 除外)。本文同时采用了 XRF 法及湿化学分析方法, 分别测出 TFeO 及 FeO 的数值, 并据此计算出 Fe_2O_3 的含量。微量元素测试在等离子质谱仪(PE300D)上测试。锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质科学院矿床资源所利用 LA ICP-MS 分析完成。相关试验流程、仪器操作条件和数据处理方法见参考文献[20-21]。

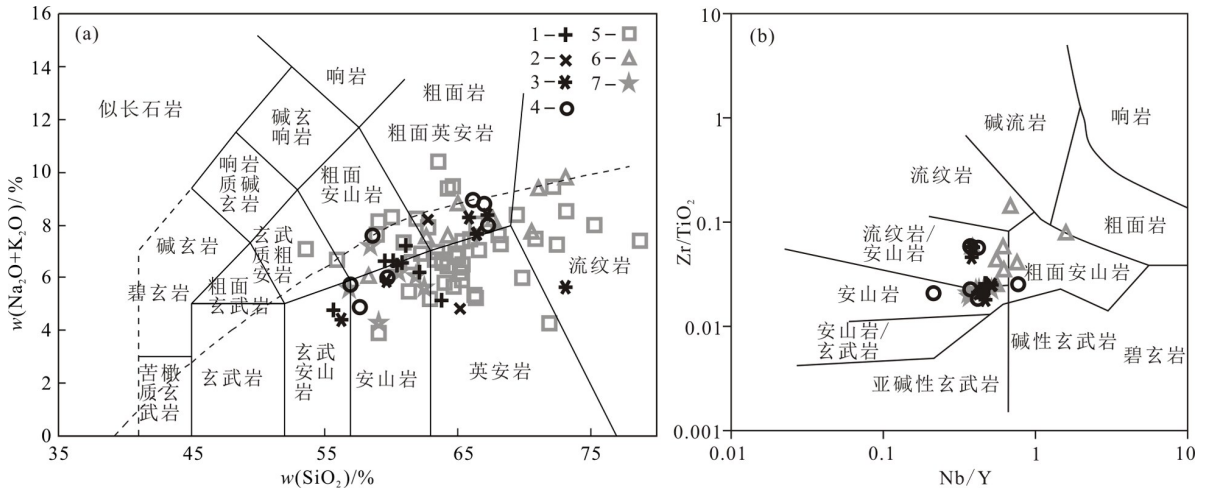
将火山岩主量元素数据去掉烧失量, 重新 100% 换成干体系后, 数据投入 TAS 图(图 3a), 显示大部分数据投入安山岩、英安岩、粗面安山岩、粗面岩/粗面英安岩及流纹岩区, 少部分投入玄武安山岩、玄武质粗面岩区。样品主要为亚碱性系列, 少量属于碱性系列。为确保岩石命名准确, 主要采用 Zr/TiO₂-Nb/Y 图(图 3b)再次进行分类命名, 结果显示该区火山岩主要是亚碱性系列的安山岩-英安岩, 少



a—安山岩; b—英安岩。Pl—斜长石; Or—正长石。

图 2 安山岩、英安岩岩相学照片

Fig.2 Microphotographs of the andesite and the dacite



(a) 一火山岩的 TAS 分类图^[22], 图中虚线为碱性和亚碱性系列的分界线^[23]; (b) $Zr/TiO_2-Nb/Y$ 图^[24]。1—大平南山数据; 2—三道湾子数据; 3—上马场数据; 4—托牛河岩芯数据; 5—引用数据文献^[25]; 6、7—引用数据文献^[14, 26]。

图 3 黑河地区火山岩分类图

Fig.3 Classification of the Heihe volcanic rocks

量流纹岩、粗面安山岩。这一结果与 TAS 分类基本一致。

按照国际地科联分类方案^[19], 笔者对 TAS 图解中落入玄武质粗面安山岩区、粗面安山岩区和粗面岩区的岩石进行了进一步的分类命名。在玄武质粗面安山岩区, 样品均为钾质, 即钾玄岩 (shoshonite); 在粗面安山岩区, 歪长粗安岩 (benmoreite) 和安粗岩均存在, 其中安粗岩稍多。对于落入粗面岩区的样品, 粗面岩、粗面英安岩均存在。因此, 详细的岩石分类命名详见表 1。

由上, 该区火山岩的岩石组合为: 玄武安山岩、安山岩、英安岩、流纹岩、钾玄岩、歪长粗安岩、安粗岩、粗面岩、粗面英安岩, 是以安山岩-英安岩-流纹岩为主的火山岩。

3 岩石地球化学特征

3.1 主量元素地球化学特征

去掉烧失量, 换成干体系后, 火山岩样品主量组分含量如下: $w(SiO_2)$ 介于 51.14%~70.83%; $w(Na_2O)$ 介于 2.04%~5.58%; $w(K_2O)$ 介于 0.58%~6.09%; $w(Al_2O_3)$ 介于 11.05%~22.84%; $w(TiO_2)$ 介于 0.06%~1.62%; $w(TFeO)$ 介于 1.18%~8.20%; $w(MnO)$ 介于 0.01%~0.81%; $w(MgO)$ 介于 0.01%~8.16%; $w(CaO)$ 介于 0.26%~8.49%; $w(P_2O_5)$ 介于 0.01%~1.23% (表 1)。

在 Harker 图解中 (图 4), 该区火山岩样品的投点总体较为分散。随着 SiO_2 含量升高, TiO_2 、 MgO 、

$TFeO$ 、 P_2O_5 、 CaO 、 Al_2O_3 含量具有较明显的降低趋势; Na_2O 、 K_2O 变化趋势不明显。从本文数据的投点来看, 似乎本区火山岩至少存在两种分布趋势。在 TiO_2-SiO_2 图解中, 多数投点构成一个良好的线性趋势 (斜率较陡), 少数样品构成了斜率较缓的趋势。在 $MnO-SiO_2$ 图解中, 多数投点显示 MnO 与 SiO_2 呈负相关, 少数投点呈正相关。 MgO 总体与 SiO_2 负相关, 但至少有两个投点分布在更高 MgO 水平上, 两个趋势线的斜率相同。 $TFeO$ 的分布也显示两个趋势, 但斜率有所不同。 CaO 随 SiO_2 的变化, 清晰展示出两个趋势线。以上表明: 控制火山岩成分变化的主要因素可能是岩浆混合作用; 区内火山岩至少可以划分出两个系列。

A/CNK 图解 (图 5a) 显示, 样品主要集中于 $A/CNK=1$ 附近, 该区火山岩为准铝质-过铝质。在 $SiO_2-(K_2O+Na_2O-CaO)$ 图 (图 5c) 中, Peacock 碱钙指数跨度较大, 从钙碱性到碱性均有, 极少量钙碱性。 SiO_2-K_2O 图解 (图 5b) 显示, 该区火山岩总体以高钾钙碱-中钾钙碱性系列为主, 少量为低钾钙碱性和钾玄岩系列。 SiO_2-MgO 图解 (图 5d) 显示样品主要落入实验玄武岩局部熔浆范围和镁安山岩系列 (MA) 范围内。将 TAS 图解中亚碱性系列岩石投入到 $TFeO-TFeO/MgO$ 图 (图 5f) 和 SiO_2-TFeO/MgO 图 (图 5e) 中, 可以看出该区钙碱性火山岩更多一些, 其中部分样品落入低铁钙碱 (LFCA) 的区域。图 5 再次展示了火山岩的宽广的地球化学特征以及多演化系列特征, 这种特征可能反映了不同的岩浆源区和演化。

表 1 黑河地区火山岩主量元素和微量元素数据表
Table 1 Major and trace elemental contents in volcanic rocks from Heihe region

岩性	样品号	$w_B/\%$												
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	Total
安粗岩	DPNS-1	57.80	0.90	16.55	3.69	2.86	0.11	2.55	4.93	3.35	3.03	0.29	2.81	98.87
安粗岩	DPNS-2	58.67	0.90	16.86	4.39	2.35	0.12	2.56	2.92	3.74	3.19	0.28	3.28	99.26
安粗岩	DPNS-3	58.05	0.92	17.10	4.58	2.14	0.13	2.37	5.43	3.58	2.89	0.30	1.82	99.31
安山岩	DPNS-4	59.25	0.87	15.69	3.21	3.22	0.13	2.74	4.03	4.80	1.12	0.27	4.23	99.56
英安岩	DPNS-5	60.51	0.88	15.54	4.80	1.92	0.10	1.70	4.23	3.00	1.88	0.26	4.79	99.61
安山岩	DPNS-6	58.94	0.86	17.70	2.75	3.18	0.12	2.31	5.04	3.07	3.24	0.28	1.99	99.48
玄武安山岩	DPNS-7	51.14	1.08	20.98	5.40	1.89	0.12	2.90	3.65	2.08	2.31	0.30	7.30	99.15
安山岩	DPNS-8	59.07	0.85	17.43	3.20	2.64	0.12	2.13	4.99	3.44	2.94	0.28	2.38	99.47
英安岩	SDWZ-1	61.27	0.65	16.21	1.81	3.65	0.11	3.40	2.14	2.04	2.50	0.19	4.85	98.82
粗面岩	SDWZ-3	60.82	0.69	17.18	1.62	3.57	0.10	1.88	2.78	5.08	2.87	0.27	2.75	99.61
流纹岩	SMC-1	70.83	0.64	11.31	1.63	3.04	0.07	1.83	1.79	3.11	2.35	0.23	2.51	99.34
安山岩	ZK0-1-2	55.38	0.80	17.12	1.94	4.69	0.12	2.86	4.19	3.07	2.39	0.23	6.04	98.83
玄武安山岩	ZK0-1-3	51.98	1.00	18.36	2.88	4.01	0.11	2.62	6.99	3.15	0.92	0.33	6.64	98.99
英安岩	ZK0-1-4	64.3	0.52	16.76	1.50	1.63	0.15	1.16	3.03	5.07	2.35	0.23	2.78	99.48
英安岩	ZK0-1-5	63.8	0.52	16.79	1.50	1.63	0.15	1.11	2.93	4.71	2.63	0.23	2.86	98.86
粗面英安岩	ZK0-1-6	65.96	0.51	16.69	2.40	0.59	0.18	0.55	2.73	4.84	3.37	0.23	2.01	100.06
粗面岩	ZK0-1-7	64.93	0.60	16.60	2.19	1.60	0.35	1.08	2.76	5.02	3.14	0.28	1.37	99.92
粗面英安岩	ZK0-2-1	64.7	0.53	16.92	2.50	0.48	0.07	0.87	2.15	4.30	3.37	0.23	2.96	99.08
粗面岩	ZK0-2-2	66.47	0.52	16.57	1.53	1.74	0.17	0.96	2.27	5.58	3.14	0.22	1.11	100.28
粗面岩	ZK0-2-3	64.91	0.51	16.73	2.28	1.13	0.16	0.99	2.37	5.45	3.32	0.23	0.97	99.05
安山岩	ZK0-2-4	54.3	0.95	20.54	4.18	2.96	0.15	2.90	3.44	3.05	1.55	0.14	5.38	99.54
玄武安山岩	ZK0-2-5	55.29	0.90	17.39	4.69	2.86	0.15	3.52	6.41	3.86	1.71	0.28	2.01	99.07
歪长粗安岩	ZK0-2-6	55.98	0.87	17.86	4.05	2.39	0.09	2.40	4.34	4.67	2.58	0.26	4.40	99.89
安山岩	ZK0-2-7	56.32	0.87	18.01	5.13	2.32	0.07	1.88	3.74	3.90	1.76	0.27	5.23	99.50

岩性	样品号	$w_B/10^{-6}$														
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE
安粗岩	DPNS-1	30.7	70.6	8.65	30.30	6.61	1.50	5.25	0.78	4.47	0.81	2.49	0.37	2.25	0.37	165.15
安粗岩	DPNS-2	27.80	63.6	7.89	27.90	6.08	1.39	5.02	0.73	4.18	0.77	2.30	0.34	2.07	0.35	150.42
安粗岩	DPNS-3	31.6	73.00	8.81	29.70	6.60	1.52	5.43	0.82	4.68	0.83	2.55	0.39	2.29	0.38	168.60
安山岩	DPNS-4	28.80	68.30	8.24	28.70	6.10	1.41	4.93	0.74	4.29	0.77	2.36	0.36	2.16	0.36	157.52
英安岩	DPNS-5	25.40	57.10	7.11	25.10	5.47	1.44	4.72	0.69	4.11	0.77	2.33	0.36	2.29	0.38	137.27
安山岩	DPNS-6	34.60	78.60	9.53	33.20	7.04	1.70	5.72	0.84	4.74	0.87	2.64	0.39	2.36	0.40	182.63
玄武安山岩	DPNS-7	36.40	78.90	9.82	33.00	7.39	1.73	6.30	0.93	5.34	0.97	2.91	0.44	2.60	0.43	187.16
安山岩	DPNS-8	33.90	75.50	9.23	32.40	6.83	1.67	5.58	0.80	4.73	0.85	2.53	0.38	2.33	0.38	177.11
英安岩	SDWZ-1	17.40	36.10	5.09	20.20	3.98	1.18	3.15	0.44	2.43	0.44	1.30	0.19	1.12	0.19	93.21
粗面岩	SDWZ-3	23.20	46.90	6.60	25.30	4.67	1.18	3.54	0.50	2.71	0.47	1.43	0.21	1.21	0.21	118.13
流纹岩	SMC-1	17.50	37.40	5.15	20.50	4.15	0.99	3.47	0.52	3.22	0.58	1.73	0.26	1.62	0.27	97.36
安山岩	ZK0-1-2	23.90	56.80	7.13	25.30	5.39	1.40	4.25	0.59	3.38	0.59	1.76	0.25	1.52	0.24	132.50
玄武安山岩	ZK0-1-3	26.30	61.20	7.95	28.50	6.03	1.59	4.74	0.67	3.70	0.62	1.80	0.25	1.49	0.24	145.08
英安岩	ZK0-1-4	38.60	89.00	11.20	39.00	8.24	1.96	6.38	0.98	5.83	1.08	3.40	0.53	3.36	0.58	210.14
英安岩	ZK0-1-5	38.80	91.10	11.30	39.90	8.39	1.97	6.52	1.03	5.96	1.12	3.59	0.56	3.40	0.60	214.24
粗面英安岩	ZK0-1-6	35.00	77.90	10.30	37.00	7.71	1.84	6.26	0.95	5.58	1.04	3.27	0.53	3.24	0.57	191.19
粗面岩	ZK0-1-7	36.30	85.50	10.70	38.40	8.21	2.06	6.64	1.01	5.99	1.10	3.44	0.54	3.32	0.56	203.77
粗面英安岩	ZK0-2-1	34.00	79.30	10.20	35.30	7.49	1.85	5.98	0.91	5.30	0.98	3.09	0.48	3.01	0.52	188.41
粗面岩	ZK0-2-2	38.90	92.70	11.40	38.00	8.25	2.01	6.61	1.02	6.14	1.13	3.49	0.56	3.40	0.58	214.19
粗面岩	ZK0-2-3	36.80	87.00	10.80	37.10	8.10	1.95	6.54	0.99	5.79	1.09	3.37	0.54	3.33	0.58	203.98
安山岩	ZK0-2-4	20.30	73.50	5.50	17.00	4.49	1.28	3.62	0.58	3.24	0.52	1.52	0.22	1.31	0.21	133.29
玄武安山岩	ZK0-2-5	28.60	57.30	8.95	33.60	7.01	1.63	5.89	0.79	4.25	0.73	2.15	0.3	1.80	0.29	153.29
歪长粗安岩	ZK0-2-6	25.00	56.90	7.02	24.40	5.35	1.41	4.34	0.61	3.34	0.58	1.72	0.24	1.45	0.24	132.6
安山岩	ZK0-2-7	26.10	67.60	10.60	45.20	11.60	2.74	9.40	1.34	7.73	1.32	3.81	0.57	3.41	0.56	191.98

(续表 1)

岩性	样品号	$\omega_B/10^{-6}$													
		Y	Be	Sc	V	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Nb	Mo	Cd
安粗岩	DPNS-1	18.70	1.70	14.90	167.00	17.70	4.35	16.40	152.00	19.60	93.50	581.00	9.18	0.38	0.48
安粗岩	DPNS-2	17.30	1.51	16.60	175.00	18.50	3.92	16.00	88.40	19.10	87.40	541.00	7.72	0.21	0.13
安粗岩	DPNS-3	19.40	1.81	15.40	164.00	18.40	4.45	22.70	101.00	20.70	80.30	595.00	9.50	0.75	0.13
安山岩	DPNS-4	18.10	1.82	15.00	166.00	17.90	3.80	15.00	86.90	14.80	32.10	517.00	8.77	0.06	0.15
英安岩	DPNS-5	18.20	1.90	13.40	144.00	14.40	4.67	21.70	79.80	17.40	88.50	441.00	7.63	0.26	0.14
安山岩	DPNS-6	19.50	1.59	12.10	125.00	12.90	1.96	6.30	87.60	20.10	85.70	804.00	9.23	0.53	0.13
玄武安山岩	DPNS-7	22.60	2.39	19.10	192.00	20.80	8.90	21.00	93.80	20.90	94.30	544.00	10.10	0.10	0.15
安山岩	DPNS-8	19.60	1.69	12.40	136.00	12.60	2.08	5.53	89.50	19.80	85.70	745.00	9.15	0.33	0.11
英安岩	SDWZ-1	9.93	1.87	12.70	124.00	16.60	31.40	59.3	76.60	20.10	91.60	190.00	4.23	0.76	0.05
粗面岩	SDWZ-3	11.10	2.06	9.26	110.00	13.00	6.75	13.50	102.00	20.20	67.60	842.00	5.73	0.43	0.15
流纹岩	SMC-1	13.20	1.54	10.20	92.10	12.70	4.77	3.57	63.50	12.00	93.40	325.00	6.81	0.13	<0.05
安山岩	ZK0-1-2	13.60	1.35	16.00	143.00	23.00	26.9	27.90	98.80	21.10	96.80	256.00	6.19	0.13	0.06
玄武安山岩	ZK0-1-3	14.30	1.81	13.70	212.00	20.80	15.20	19.90	103.00	22.20	23.30	816.00	6.71	0.30	0.11
英安岩	ZK0-1-4	26.60	2.19	6.27	14.30	2.12	1.21	1.48	104.00	21.00	40.80	1 295.00	10.10	0.67	0.17
英安岩	ZK0-1-5	26.60	2.02	6.47	12.90	1.70	0.88	1.03	106.00	20.20	49.50	1 632.00	10.20	0.45	0.13
粗面英安岩	ZK0-1-6	25.20	2.48	5.75	14.10	1.58	0.77	1.12	98.30	19.90	66.00	528.00	9.82	0.55	0.09
粗面岩	ZK0-1-7	25.70	2.26	7.34	19.70	2.64	0.80	1.45	110.00	20.60	65.30	517.00	9.79	0.74	0.13
粗面英安岩	ZK0-2-1	24.10	2.31	6.41	16.70	1.76	1.07	1.92	102.00	20.70	82.60	436.00	10.10	0.70	0.09
粗面岩	ZK0-2-2	27.10	2.21	6.35	14.50	2.21	1.39	2.30	97.80	21.40	68.20	524.00	10.10	0.37	0.05
粗面岩	ZK0-2-3	26.80	2.25	6.10	11.60	1.95	0.96	1.53	103.00	20.80	80.90	526.00	10.00	0.38	0.15
安山岩	ZK0-2-4	10.70	1.79	17.30	160.00	20.60	32.50	38.9	123.00	25.70	35.60	801.00	8.23	0.33	0.07
玄武安山岩	ZK0-2-5	18.00	1.78	18.40	192.00	27.30	37.90	93.9	119.00	21.70	34.40	834.00	6.71	0.67	0.26
歪长粗安岩	ZK0-2-6	13.40	1.54	14.50	175.00	18.00	8.14	18.8	85.60	19.40	46.00	1 016.00	5.60	0.29	0.08
安山岩	ZK0-2-7	27.60	1.75	14.50	188.00	16.30	14.30	44.00	254.00	19.60	47.60	486.00	5.90	0.29	1.20

岩性	样品号	$\omega_B/10^{-6}$											
		In	Cs	Ba	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U	Zr	Hf
安粗岩	DPNS-1	0.06	2.04	760.00	0.73	3.06	0.38	15.20	0.16	11.00	2.58	212.00	5.81
安粗岩	DPNS-2	0.06	1.41	774.00	0.61	0.83	0.40	12.60	0.05	10.20	2.09	192.00	5.15
安粗岩	DPNS-3	0.06	2.07	726.00	0.75	2.69	0.37	15.30	0.36	11.40	2.70	222.00	5.96
安山岩	DPNS-4	0.06	13.00	527.00	0.69	1.17	0.22	16.00	0.21	10.50	2.56	208.00	5.46
英安岩	DPNS-5	0.10	11.00	526.00	0.62	1.30	0.35	16.20	0.76	8.70	1.60	187.00	4.92
安山岩	DPNS-6	0.06	1.51	1 094.00	0.72	4.49	0.42	16.90	0.11	12.10	2.92	220.00	5.98
玄武安山岩	DPNS-7	0.07	47.40	931.00	0.76	0.68	0.41	16.90	0.11	10.40	2.32	225.00	5.97
安山岩	DPNS-8	0.06	1.84	984.00	0.70	1.61	0.40	16.20	0.11	11.90	2.81	219.00	5.85
英安岩	SDWZ-1	<0.05	5.16	616.00	0.35	5.92	0.49	12.50	0.22	4.38	1.15	132.00	3.45
粗面岩	SDWZ-3	<0.05	7.38	814.00	0.45	5.92	0.61	16.10	0.09	6.26	1.51	170.00	4.50
流纹岩	SMC-1	<0.05	2.86	498.00	0.47	13.10	0.65	8.32	<0.05	4.70	1.20	160.00	4.000
安山岩	ZK0-1-2	0.07	7.19	411.00	0.57	2.76	0.56	14.20	0.16	5.48	1.47	170.00	4.42
玄武安山岩	ZK0-1-3	0.06	8.15	528.00	0.47	3.50	0.12	12.50	0.08	4.64	1.25	180.00	4.71
英安岩	ZK0-1-4	0.07	28.40	1 081.00	0.70	4.99	0.50	19.20	0.20	8.00	2.70	298.00	7.48
英安岩	ZK0-1-5	0.07	18.90	1 837.00	0.71	3.51	0.55	18.90	0.13	8.29	2.62	302.00	7.63
粗面英安岩	ZK0-1-6	0.06	5.53	1 225.00	0.65	3.47	0.35	19.90	0.12	7.68	2.24	293.00	7.34
粗面岩	ZK0-1-7	0.07	3.75	1 216.00	0.65	6.01	0.33	17.60	0.11	7.63	2.21	276.00	7.05
粗面英安岩	ZK0-2-1	0.07	6.31	1 049.00	0.65	3.48	0.36	19.50	0.11	8.01	2.19	301.00	7.37
粗面岩	ZK0-2-2	0.07	2.83	1 134.00	0.69	5.01	0.36	18.00	0.22	8.3	2.44	305.00	7.63
粗面岩	ZK0-2-3	0.06	1.76	1 199.00	0.68	4.98	0.45	18.50	0.13	8.04	2.30	299.00	7.47
安山岩	ZK0-2-4	0.07	4.98	755.00	0.61	0.77	0.36	17.50	0.13	8.21	1.99	241.00	6.31
玄武安山岩	ZK0-2-5	0.06	1.39	858.00	0.45	2.29	0.17	14.80	0.08	5.56	1.41	204.00	5.20
歪长粗安岩	ZK0-2-6	0.06	11.30	1 390.00	0.40	0.75	0.27	14.80	<0.05	6.79	1.59	160.00	4.16
安山岩	ZK0-2-7	0.06	15.30	567.00	0.42	0.81	0.29	19.30	0.76	5.23	1.33	181.00	4.67

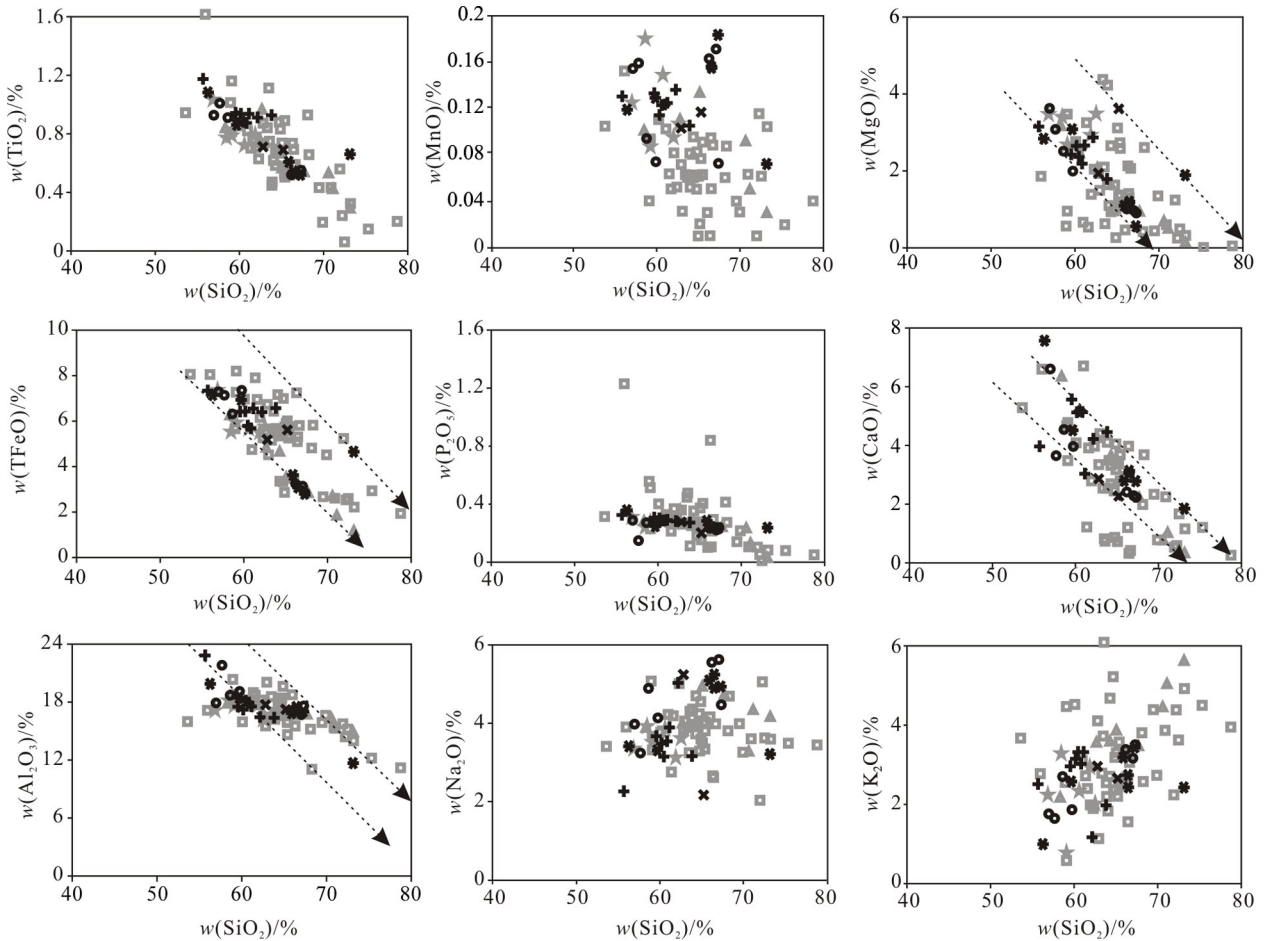


图4 黑河地区早白垩世火山岩的哈克图解

Fig.4 Harker diagrams of the volcanic rocks in Heihe region

3.2 微量及稀土元素特征

研究区火山岩微量元素和稀土元素的分布型式总体近似。在微量元素蛛网图中(图 6a)表现出大离子亲石元素 K、Ba 元素相对富集的特征, La、Zr、Hf、Tb、Tm 为峰, Nb、Ta、P、Ti、Y、Yb 为谷。部分样品具有高 Sr ($>400 \times 10^{-6}$) 低 Y ($<18 \times 10^{-6}$) 的特征, Sr/Y 比值介于 20~80.06, 具有埃达克岩的特征。

稀土元素球粒陨石标准化配分型式(图 6b)显示, 该区火山岩的 REE 配分曲线均呈平缓右倾型, 轻稀土相对富集, 重稀土相对亏损; 且轻稀土分异程度高于重稀土元素, 重稀土内部分馏不明显 [$(\text{Ho}/\text{Lu})_N$ 介于 0.72~1.42]。测试样品的 ΣREE 含量为 $(69.464 \sim 286.234) \times 10^{-6}$ 。 δEu 为 0.50~1.07, 平均值为 0.84, 具有很微弱的负 Eu 异常。弱(或无)负 Eu 异常, 说明源区液相线的平衡矿物仅有少量斜长石或没有斜长石, 或者经历过少量(或没有)斜长石的分离结晶作用。这与 Harker 图解(图 4)

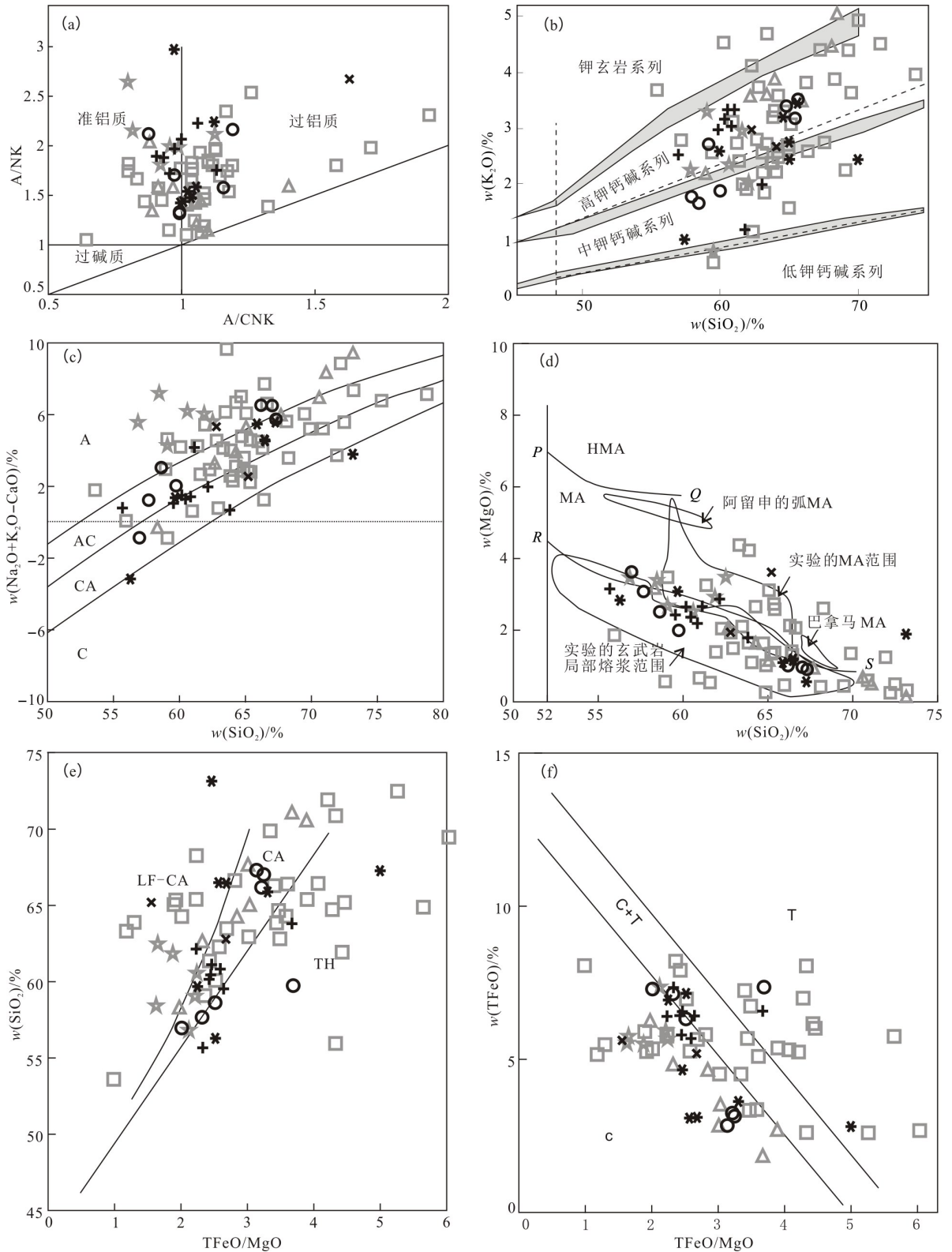
显示的 Na_2O 与 SiO_2 不具有明显的线性关系相吻合, 指示斜长石不是主要的分离结晶矿物, 暗色矿物应为主要分离结晶矿物。

4 讨论

4.1 黑河地区火山岩的岩石组合及成因

前文已述, 关于该区的火山岩组合目前还有争议。王碧香指出大兴安岭北部火山岩主要以英安质和流纹质火山岩为主, 局部为玄武质、粗安质、粗面质、碱性玄武质或碱性流纹质火山岩等, 其次为偏碱性(甚至出现少量碱性岩)粗安岩和粗面岩(响岩)组合^[3]; 张玉涛等指出塔河地区的火山岩组合为玄武岩、玄武安山岩、玄武质粗面安山岩和粗面安山岩, 并且以碱性岩石为主^[6]; 而林强等认为大兴安岭北部早白垩世为双峰式火山岩^[2]。

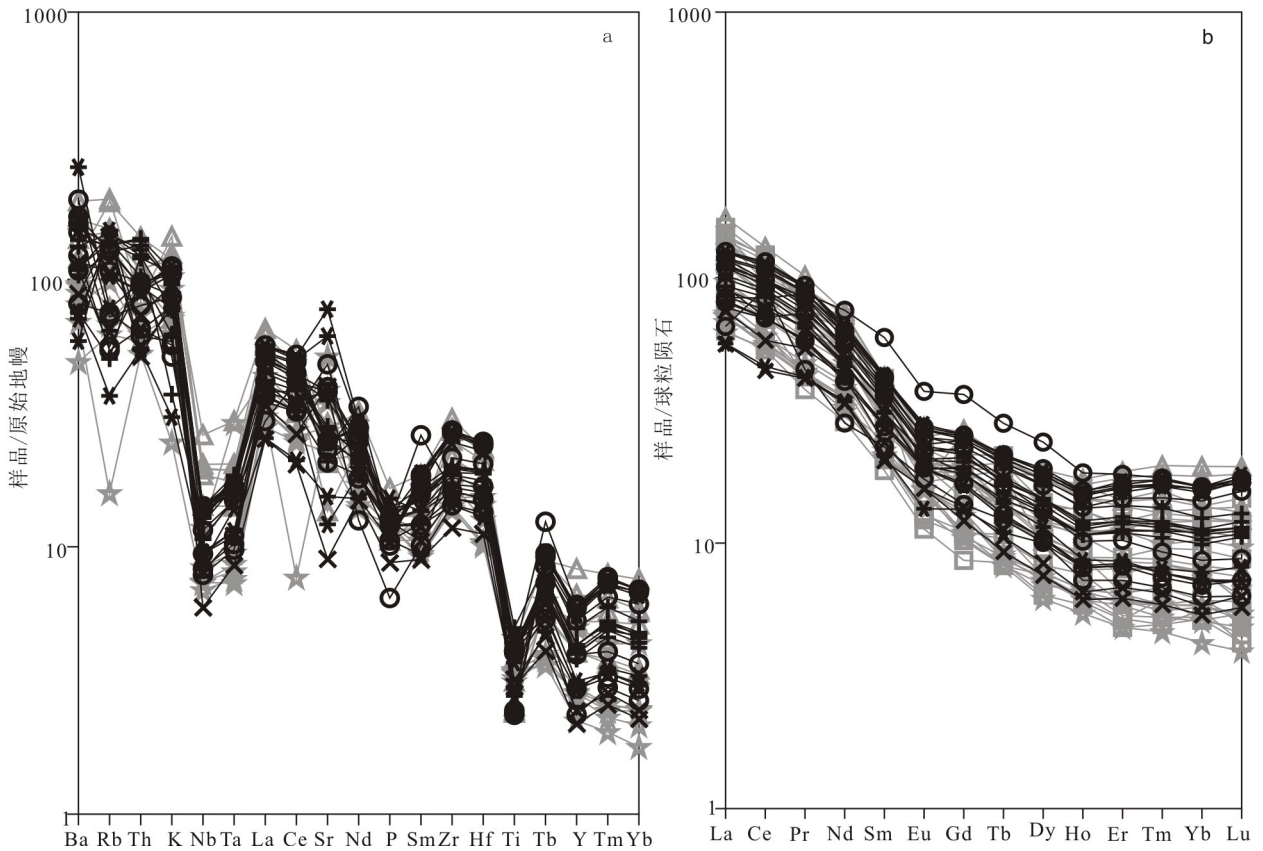
本文基于年代学的测试结果, 根据图 3a、图 3b 可知, 黑河地区早白垩世晚期的火山岩组合以安山



a—火山岩 A/CNK-A/NK 图解^[27]; b—研究区火山岩 SiO₂-K₂O 图^[19]; c—研究区火山岩 SiO₂-(Na₂O + K₂O - CaO) 图解^[28]; d—SiO₂-MgO 图^[29]; e—研究区火山岩 SiO₂-TFeO/MgO 图^[30]; f—研究区火山岩 TFeO-TFeO/MgO 图^[30]。图例参照图 3a。图 5(c) 中: A—碱质; AC—碱钙质; CA—钙碱质; C—钙质。图 5(d) 中: HMA—高镁安山岩系列; MA—镁安山岩系列; 实线 PQ、RS 分别为高镁安山岩系列与镁安山岩系列、镁安山岩系列与非镁安山岩系列的边界。图 5(e) 中: LF-CA 为低铁钙碱性系列; CA 为钙碱性系列 TH 为拉斑系列。图 5(f) 中: T 为拉斑系列; C+T 为钙碱系列。

图 5 黑河地区火山岩岩石地球化学特征

Fig.5 Diagrams of geochemical characteristics of the volcanic rocks in Heihe region



图例参照图 3a。

图 6 痕量元素原始地幔标准化蛛网图(a)及稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(b)
(标准值据文献[31-32])

Fig.6 Primitive mantle normalized trace element spider diagrams(a) and chondrite-normalized REE patterns(b)

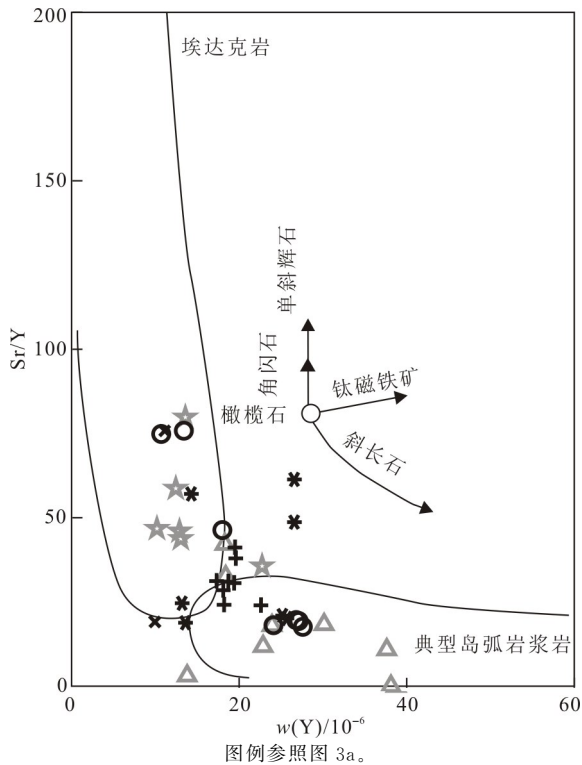
岩(粗安岩)-英安岩(粗面英安岩/粗面岩)-流纹岩为主,不是双峰式火山岩组合,是弧火山岩组合。

根据前文岩石地球化学特征分析可知,上述火山岩其 SiO₂ 含量介于 53.60%至 78.74%之间,主要属于中酸性岩类,少量玄武安山岩。基于 Irvine 等^[23]的结果可知,该区火山岩既有碱性系列,又有亚碱性系列;其中在亚碱性系列里,基于 SiO₂-TFeO/MgO 图(图 5e),既有 CA(LF-CA)系列,又有 TH 系列,考虑到现今世界上火山岩组合的分布,只有与洋俯冲有关的弧环境才能碱性系列(图 3a)+钙碱性系列(CA,图 5f)+拉斑系列(TH,图 5e)岩石共存。在 SiO₂-MgO 图(图 5d)中可见该区火山岩中部分岩石镁高,落入实验 MA 和巴拿马 MA 区,属于 Mg 安山岩系列,自然界中中铁钙碱系列(LF-CA)和镁安山岩系列的岩石是俯冲环境的标记性岩石(特征)之一^[30]。由上,结合 Peacock 指数,铁镁的特征等均指示其具有弧火山岩的特征,与洋俯冲作用有关。

上述火山岩的微量元素、稀土元素特征级分布

模式亦印证了这一点。上文提到,研究区火山岩大部分具有高 Sr 低 Y 的特征(Sr/Y 比值除少量样品外,其余均处于 20~80.06)。将数据投入到 Sr/Y-Y 图(图 7),可知该区火山岩含有埃达克岩,并且对照样品可知,三道湾子、上马场、太平南山等金矿区内的火山岩往往属于埃达克岩及其附近,指示该区金矿应与埃达克岩具有密切联系。其余的火山岩样品落入了典型岛弧岩浆岩范畴,与上文结论一致。

尽管,上述特征指示该区火山岩具有弧的特征,与俯冲作用有关,但是 Si、Al、K、Na、Ca、Fe、Mg 等较广的分布区间和变化可能指示岩浆源区并不唯一。 $w(Al_2O_3)$ 介于 11.05%~22.84%,准铝质-过铝质(图 5a)。SiO₂-(Na₂O+K₂O-CaO)图(图 5c)上主要为钙碱性(CA)+碱钙性(AC)+碱性(A),甚至含有少量 C 性,分布范围很广, SiO₂-K₂O 图上尽管以中钾钙碱系列-高钾钙碱系列为主,但仍然含有少量低钾钙碱系列和钾玄岩系列,这一分布也很广,结合其他地球化学特征,可能指示岩浆来源于不同的源区。



图例参照图 3a。

图 7 Sr/Y-Y 图解^[33]Fig.7 Diagram of Sr/Y-Y^[33]

邓晋福等^[34]指出俯冲的洋壳为玄武质岩石,如果发生局部熔融的话,则形成长英质(felsic)岩浆;楔形地幔区为橄榄岩,则可发生镁铁质(mafic)岩浆;最上面的陆壳(玄武质或安山岩),或洋壳(玄武质),则可形成长英质岩浆和/或高硅的长英质岩浆。基于 Wyllie 的图解(转引自文献^[35]),可知俯冲带上如果是热的洋壳和热的地幔楔,产生岩浆的源区就会有多处,产生的岩石组合也有多种,岩浆作用也最为强烈。热洋壳可能会诱发洋壳的角闪石脱水熔融,形成安山岩-英安岩-流纹岩系列的岩浆(与之对应的侵入岩为英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩组合即 TTG 岩浆),它们上升穿过地幔楔时会与橄榄岩发生反应使之 MgO 等元素升高,最终定位于浅部地壳或喷出地表。与此同时,在达地壳底部时还可诱发地壳的局部熔融形成 TTG 类岩浆(相当于 Na 质安山岩-英安岩)(当洋内弧环境时),或花岗岩岩浆(相当于流纹岩,狭义的硅高和钾高的真正花岗岩)(当大陆边缘弧或有陆壳基底的岛弧环境时)。热的地幔楔橄榄岩局部熔融产生的岩浆依赖于压力的大小,在 <15 kbar 时可产生高镁安山质岩浆与拉斑玄武质岩浆,在 >15 kbar 条件下则无高镁安山岩岩浆的发生。除此以外,在地幔楔深部可能有金云母(Phl)脱水诱发钾质和超钾质岩浆的发

生。黑河地区宽广的火山岩组合分布特征与上文的实验结果相符合。

本文的火山岩组合以安山岩-英安岩-流纹岩为主,与热洋壳部分熔融产生的岩石组合类似,本区火山岩的 Na₂O/K₂O 比值大部分在 1.2 以上,其中相当一部分比值大于 1.5,极少量的在 1 以下。Rapp 等^[36]认为 MORB-like 的低 K₂O 玄武岩($w(\text{Na}_2\text{O})$ 介于 2.2%~4.3%, $w(\text{K}_2\text{O}) < 0.1\% \sim 0.8\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 3 \sim 28$),其产生的熔体(melt)为 Na 质的岩石:第一种是固相线附近,局部熔融程度 < 10% 者,其 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} \leq 1.2$ (0.9~1.2);第二种为局部熔融程度 10%~30% 者,其 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1.5$ ^[35]。邓晋福等基于其他人的实验结果,将 MORB-like 的源岩改为洋壳-like 的源岩(N-MORB, E-MORB, OIB)^[34]。本区火山岩的 Na₂O/K₂O 比值大部分在 1.2 以上,指示该区部分火山岩来源于洋壳-like 源岩的部分熔融。

研究区发现了部分镁安山岩,说明岩浆源区有俯冲洋壳的贡献,并与上覆地幔楔发生过反应。部分埃达克岩的存在亦指示这一点。Defant 和 Drummond 提出埃达克岩(adakite)概念^[37],后来逐渐明确 MgO 高和 TFeO/MgO 比值低的埃达克岩可能是俯冲洋壳板片局部熔融产生的岩浆与上覆地幔楔橄榄岩发生反应的结果,高温高压实验进一步地证实了这种认识^[30,38]。本区有一定数量的埃达克岩,并且具有高 MgO(MA,图 5d)和低的 TFeO/MgO 比值(LF-CA,图 5e),因此,俯冲的洋壳和上覆的地幔楔均为可能的岩浆源区。

除上述岩类之外,该区火山岩还含有正常的非 Na 质的、非 MA 系列的火山岩类(图 5d),该部分火山岩大多仍具有高 Sr/Y 比值,推测其形成于加厚的兴安弧的下地壳的部分熔融。

另外,本区火山岩还有部分属于碱性系列,其成因仍有待进一步研究。

综上,黑河地区早白垩世晚期的火山岩可能来源于上述 3 个可能的岩浆源区:(1)洋壳的部分熔融,岩石以 Na 质为主,镁安山岩(MA)系列岩石,高 Sr/Y 比值的埃达克岩类;(2)地幔楔的局部熔融, MgO 高的安山岩-英安岩-流纹岩类,以及埃达克岩类;(3)兴安弧下地壳的部分熔融,是正常的安山岩-英安岩-流纹岩类。

该区火山岩以较低的初始 Sr、正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和年轻的 Nd 模式年龄为特征^[8-9,17,39],这与上文描述的岩浆源区特征是一致的。

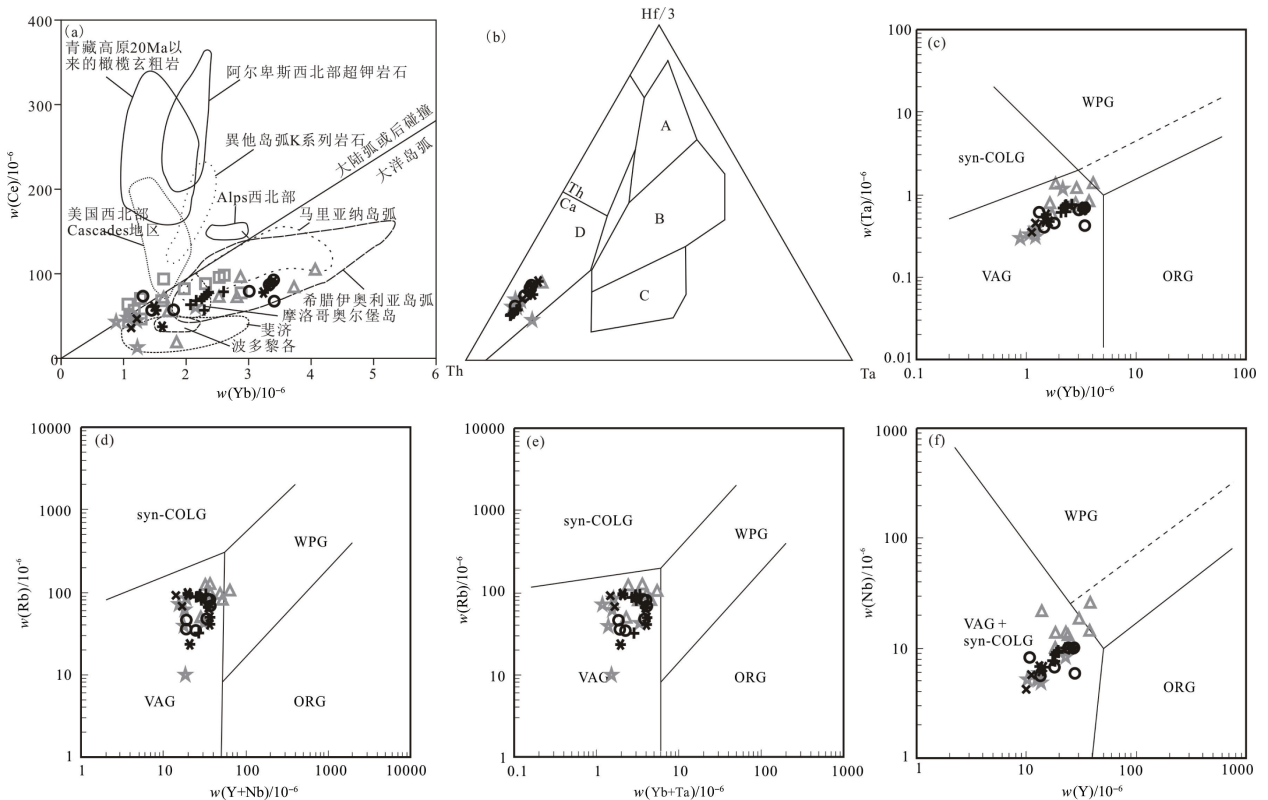
4.2 火山岩所形成的地构造环境讨论

关于该区火山岩形成的地构造环境和动力学机制,前人的观点并不统一。王碧香^[3]认为早白垩世火山岩是先挤压后拉张的构造环境下的产物,属于板内活化带火山岩。Fan等^[40]认为该火山岩形成于造山后的弥散性伸展环境。许文良等^[11]指出松辽盆地和大兴安岭地区早白垩世晚期(106~133 Ma)与早期加厚陆壳的拆沉和/或类似弧后的伸展环境有关。赵书跃等^[41]认为早白垩世上库力组酸性火山岩与印度-澳大利亚板块朝北偏东方向推挤运移、中国东部岩石圈拉张引起的下地壳拆沉作用有关。张炯飞等^[42]认为大兴安岭地区晚三叠世一早白垩世火山岩的形成是受到鄂霍次克板块和滨西太平洋板块俯冲作用所产生的两个冷地幔下沉带的中间部位产生的地幔隆起带的控制。吕军^[14]认为大兴安岭北部中生代火山岩的形成与蒙古-鄂霍次克造山带造山过程密切相关,晚期与太平洋板块俯冲有关。但Wang等^[5]基于古生代的盆地结构分析和大兴安岭地区及邻区的火山岩测年认为早白垩世的构造岩

浆活动与蒙古-鄂霍次克洋的闭合无关系。Zhang等^[17]认为早白垩世的火山岩与太平洋板块的俯冲引发的岩石圈伸展、减薄有关。邵济安等^[43]认为大兴安岭地区自晚中生代以来的岩浆活动是由于软流圈的上涌引起。

花岗岩的研究也存在类似的争议。隋振民等^[44-45]、褚少雄等^[46]、苟军等^[47]基于花岗岩等研究认为与古太平洋板块俯冲有关;林强等^[48]、邵济安等^[49]认为与陆内造山机制有关。近年来,越来越多的学者认为与蒙古-鄂霍次克洋的俯冲闭合、碰撞造山有关^[50]。前文提到,在早白垩世时期古亚洲洋早已经闭合,中生代早期是古亚洲洋与滨太平洋构造体制转换时期已经得到普遍的认可^[9,11,51]。因此,这套火山岩的产出应当与古亚洲洋无关。

上文已指出,该区火山岩的组合以及火山岩的特征均指示是与俯冲有关的弧环境。在Ce-Yb关系图(图8a)上大部分落在大洋岛弧区域。由此可以看出,本文少量钾玄岩形成的地构造环境仍为弧的环境,也证实了钾玄岩并非陆内环境的绝对标识,判断地构造环境必须通过同时期的火成岩组合。



a—Ce-Yb关系图^[52]; b—Th-Hf-Ta构造环境判别图解^[53-54]; c—研究区火山岩的Ta-Yb图^[55]; d—Rb-(Y+Nb)图^[55]; e—Rb-(Yb+Ta)图^[55]; f—Nb-Y图^[55]。图b中:A—亏损性洋中脊玄武岩;B—富集型洋中脊玄武岩和板内玄武岩;C—板内玄武岩;D—火山弧玄武岩。图例参照图3a。VAG—火山弧花岗岩;WPG—板内花岗岩;syn-COLG—同碰撞花岗岩;ORG—洋中脊花岗岩。

图8 火山岩构造环境判别图解

Fig.8 Discrimination diagrams of tectonic settings

因未采集到玄武岩样品, 作者将玄武安山岩、安山岩数据投入 Th-Hf-Ta 构造环境判别图解(图 8b), 可见其亦落入火山弧玄武岩范围。Pearce 系列图解中, 在 Nb-Y 关系图(图 8f)中, 数据处于火山弧(VAG)+同碰撞(syn-COLG)环境。在 Ta-Yb、Rb-(Y+Nb)、Rb-(Yb+Ta)关系图(图 8c、图 8d、图 8e)中, 数据均位于火山弧(VAG)区, 进一步证实该套火山岩形成于弧的大地构造环境, 与俯冲作用有关。

邓晋福等^[35]指出, 兴蒙造山带东端古生代以来一直是弧的火成岩组合。多宝山早古生代 TTG 的发育^[56], 早侏罗世黑河白石砬子 TTG 的发育, 一直到本文早白垩世弧火山岩的发育, 说明该区长期以来一直是弧的大地构造环境。

这套弧岩石究竟与蒙古—鄂霍次克洋的俯冲有关, 还是与伊泽纳崎洋俯冲有关, 目前越来越多的研究人员倾向于强调北部的蒙古—鄂霍次克洋的俯冲作用^[11-12, 50, 57]。黑河地区北近蒙古—鄂霍次克构造域, 东邻古太平洋俯冲带。从区域构造演化上, 蒙古—鄂霍次克洋自西向东呈“剪刀式”闭合, 东部区的闭合可能持续到晚侏罗—早白垩世^[58-59]。据 Zonenshain 等研究, 蒙古—鄂霍次克洋盆在晚三叠世时宽 2 000 km, 晚三叠世—早侏罗世洋盆渐作剪切式收缩, 至中—晚侏罗世(180~150 Ma)西段闭合, 东部地区尚存约 300 km 宽的大洋, 至早白垩世(140~120 Ma)大洋最终闭合^[60]。

早白垩世火山活动主要集中在北纬 50°左右的大兴安岭西北段、北段及其邻区^[42], 上述火山岩的时间、空间展布可能不是东面的伊泽纳崎洋能独自控制的。因此, 蒙古—鄂霍次克洋的俯冲对上述地区火山岩的产生必然起到了至关重要的作用。张玉涛等^[6]提到, 在西伯利亚板块之下有蒙古—鄂霍次克洋闭合时的大洋残片, 其时代为侏罗纪, 指示蒙古—鄂霍次克洋闭合时可能是双向俯冲。东面的古太平洋在早白垩世也是作用的高峰时期。由上, 本文认为东北地区早白垩世火山岩的形成应当与上述两者的俯冲有关, 对于黑河地区的早白垩世火山岩来说, 蒙古—鄂霍次克洋的俯冲可能是其直接的物质和动力学来源。黑河地区早白垩世晚期弧火山岩的发育, 指示蒙古—鄂霍次克洋的闭合可能晚于早白垩世晚期(约 117 Ma 之后)。

5 结论

(1) 研究区火山岩主要形成于早白垩世晚期。

岩石组合为玄武安山岩、安山岩、英安岩、流纹岩、钾玄岩、歪长粗安岩、安粗岩、粗面岩、粗面英安岩, 且含有镁安山岩系列和埃达克岩等特征岩类, 为以安山岩—英安岩—流纹岩为主的弧火山岩组合。

(2) 火山岩地球化学特征显示其具有宽广的 Si、Al、K、Na、Ca、Fe、Mg 等分布范围。火山岩既有碱性系列, 又有亚碱性系列。A/CNK 为准铝质—过铝质; SiO₂-TFeO/MgO 图上有钙碱系列(CA)(包括低铁钙碱系列(LF-CA))及拉斑系列(TH); SiO₂-K₂O 图上主要为中钾钙碱—高钾钙碱系列, 有少量低钾—钙碱系列和钾玄岩系列; SiO₂-(Na₂O+K₂O-CaO)图上主要为钙碱系列+碱钙系列+碱性系列(CA+AC+A), 有少量钙性系列(C); SiO₂-MgO 图中主要落入实验玄武岩的局部熔融范围和镁安山岩系列范围。痕量元素蛛网图和稀土元素配分曲线模式类似, 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素; 缓右倾的稀土元素配分曲线, 轻稀土相对富集, 重稀土相对亏损, 具有微弱的负 Eu 异常。

(3) 基于火山岩组合、火山岩地球化学特征, 结合构造环境判别等, 认为该区早白垩世火山岩形成于与洋俯冲有关的大地构造环境, 推测与蒙古—鄂霍次克洋俯冲密切相关, 推测岩浆可能的源区为俯冲的洋壳、上覆的地幔楔、兴安弧的下地壳。

参考文献

- [1] 黑龙江省地质矿产局. 黑龙江省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-734.
- [2] 林强, 葛文春, 孙德有, 等. 大兴安岭中生代两类流纹岩与玄武岩的成因联系[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(4): 322-328.
- [3] 王碧香. 中国火山岩地质图(1:1800万)及其说明书[M]//李兆鼎. 火山岩火山作用及有关矿产. 北京: 地质出版社, 1993: 17-22.
- [4] 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 54-60.
- [5] WANG F, ZHOU X H, ZHANG L C, et al. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an Range (NE China): timing and implications for the dynamic setting of NE Asia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 251: 179-198.
- [6] 张玉涛, 张连昌, 英基丰, 等. 大兴安岭北段塔河地区早白垩世火山岩地球化学及源区特征[J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2811-2822.
- [7] 翟德高, 刘家军, 韩思宇, 等. 黑龙江三道湾子碓金矿床黄铁矿型特征及矿床变化保存过程分析[J]. 地质学报, 2013,

- 87(1): 81-90.
- [8] 张吉衡. 大兴安岭中生代火山岩年代学及地质化学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009: 1-63.
- [9] WU F Y, SUN D Y, GE W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(1): 1-30.
- [10] 葛文春, 林强, 孙德有, 等. 大兴安岭中生代玄武岩的地球化学特征: 壳幔相互作用的证据[J]. *岩石学报*, 1999, 15(3): 396-407.
- [11] 许文良, 王枫, 裴福萍, 等. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J]. *岩石学报*, 2013, 29(2): 339-353.
- [12] 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.
- [13] 刘翠, 邓晋福, 许立权, 等. 大兴安岭一小兴安岭地区中生代岩浆-构造-钼成矿地质事件序列的初步框架[J]. *地学前缘*, 2011, 18(3): 166-178.
- [14] 吕军. 黑龙江省黑河市三道湾子金矿床地质特征、成矿条件及矿床模型[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011: 1-113.
- [15] LIU J L, BAI X D, ZHAO S J, et al. Geology of the Sandaowanzi telluride gold deposit of the northern Great Xing'an Range, NE China: geochronology and tectonic controls[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41: 107-118.
- [16] 葛文春, 林强, 孙德有, 等. 大兴安岭中生代两类流纹岩成因的地球化学研究[J]. *地球科学*, 2000, 25(2): 172-178.
- [17] ZHANG J H, GE W C, WU F Y, et al. Large-scale Early Cretaceous volcanic events in the northern Great Xing'an Range, Northeastern China[J]. *Lithos*, 2008, 102: 138-157.
- [18] 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J]. *岩石学报*, 2007, 23(3): 565-582.
- [19] LE MAITRE R W. 火成岩分类及术语辞典[Z]. 王碧香, 沈昆, 毕立君, 译. 北京: 地质出版社, 1991: 1-253.
- [20] HU Z C, GAO S, LIU Y S. Signal enhancement in laser ablation ICP-MS by addition of nitrogen in the central channel gasp[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2008, 23: 1093-1101.
- [21] LIU Y, GAO S. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51: 537-571.
- [22] LE BAS M J, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. *Journal of Petrology*, 1986, 27(3): 745-750.
- [23] IRVINE T N, BARAGAR W. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Science*, 1971, 8(5): 63-68.
- [24] WINCHESTER J A, FLOYD P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 1977, 20: 325-343.
- [25] 黑龙江省地质调查总院齐齐哈尔分院. 1:5万区域地质调查报告(新峰幅、达音卢幅、山神府幅、大平林场幅)[R]. 哈尔滨: 黑龙江省地质调查总院齐齐哈尔分院, 2000: 109-152.
- [26] 李勇超. 黑龙江白石砬子地区火山岩年代学及地球化学特征[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012: 1-45.
- [27] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *GSA Bulletin*, 1989, 101: 635-643.
- [28] FROST B R, BARNES C G, COLLINS W J, et al. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42(11): 2 033-2 048.
- [29] 邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 等. 高镁安山岩/闪长岩类(HMA)和镁安山岩/闪长岩类(MA): 与洋俯冲作用相关的两类典型的火成岩类[J]. *中国地质*, 2010, 37(4): 1112-1118.
- [30] ARCULUS R. Use and abuse of the terms calcalkaline and calcalkalic[J]. *Journal of Petrology*, 2003, 44(5): 929-935.
- [31] DILEK Y, FURNES H. Ophiolite genesis and global tectonics: geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere[J]. *GSA Bulletin*, 2011, 123(3/4): 387-411.
- [32] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and Isotopic Systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[M]// SAUNDERS A D, NORRY M J. Magmatism in the ocean basins. London: Geological Society, Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- [33] PATERNO R. Castillo. Adakite petrogenesis[J]. *Lithos*, 2012, 134/135: 304-316.
- [34] 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 等. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换[J]. *地质论评*, 2015, 61(3): 473-484.
- [35] 邓晋福, 刘翠, 狄永军, 等. 地壳对接消减带和叠接消减带与陆-陆碰撞造山和俯冲增生造山: 来自侵入岩构造组合的记录[J]. *地学前缘*, 2016, 23(6): 34-41.
- [36] RAPP R P, 肖龙, IZU N S M. 中国东部富钾埃达克岩成因的实验约束[J]. *岩石学报*, 2002, 18(3): 293-302.
- [37] DEFANT M J, DRUMMOND M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 1990, 347: 662-665.
- [38] 邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 等. 火成岩组合与构造环境: 讨论[J]. *高校地质学报*, 2007, 11: 392-402.
- [39] JAHN B M, WU F Y, CHEN B. Massive granitoid generation in central Asia: Nd isotopic evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic[J]. *Episodes*, 2000, 23: 82-92.
- [40] FAN W M, GUO F, WANG Y J, et al. Late Mesozoic calcalkaline volcanism of post orogenic extension in the northern Da Hinggan mountains, northeastern China[J]. *Journal of Volcan-*

- ology and Geothermal Research, 2003, 121: 115-135.
- [41] 赵书跃, 韩彦东, 朱春燕. 大兴安岭火山喷发带北段中性-中酸性火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 地质力学学报, 2004, 10(3): 276-286.
- [42] 张炯飞, 李之彤, 金成沫. 中国东北部地区埃达克岩及其成矿意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 361-368.
- [43] 邵济安, 张履桥, 牟保磊, 等. 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.
- [44] 隋振民, 葛文春, 吴福元, 等. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗岩岩石的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 461-480.
- [45] 隋振民, 葛文春, 徐学纯, 等. 大兴安岭十二站晚古生代后造山花岗岩的特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2679-2686.
- [46] 褚少雄, 刘建明, 徐九华, 等. 黑龙江三矿沟铁铜矿床花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 定年、岩石成因及构造意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(20): 433-450.
- [47] 苟军, 孙德有, 李蓉, 等. 孙吴嘉荫地区早中生代花岗岩的年代学、地球化学与成因[J]. 吉林大学学报, 2013, 43(1): 119-133.
- [48] 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.
- [49] 邵济安, 张履桥, 肖庆辉, 等. 中生代大兴安岭的隆起: 一种可能的陆内造山机制[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 789-794.
- [50] 余宏全, 李进文, 向安平, 等. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 571-594.
- [51] 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): 655-672.
- [52] 薛怀民, 董树文, 马芳, 等. 安徽庐枞火山岩盆地橄榄玄粗岩系的地球化学特征及其对下扬子地区晚中生代岩石圈减薄机制的约束[J]. 地质学报, 2010, 84(5): 664-681.
- [53] WOOD D A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1980, 50: 11-30.
- [54] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459-46.
- [55] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25: 956-983.
- [56] 杜琦, 马晓阳, 韩成满. 多宝山斑岩铜矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-594.
- [57] 张炯飞, 权恒, 武广, 等. 东北地区中生代火山岩形成的构造环境[J]. 贵金属地质, 2000, 9(1): 33-36.
- [58] 陈毓川, 王登红, 朱裕生, 等. 中国成矿体系与区域成矿评价[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 1-1005.
- [59] SOROKIN A A, KOVACH V P, ROTOV A B. Isotope geochemical (Sr, Nd): peculiarities and resources of Mesozoic magmatic associations of the umlekano-ogodzhinskii belt (Amur Area)[J]. Doklady Earth Sciences, 2010, 435(2): 1650-1655.
- [60] ZONENSHAIN L P, KUZMIN M I, NATAPOV L M. Geology of the USSR: a plate tectonic synthesis[J]. Geodynamic Monograph, 1990, 21: 242.