# 内蒙古中部苏尼特左旗地区阿巴嘎组火山岩 地球化学特征及成因

张祥信<sup>1,2</sup>. 高永丰<sup>2</sup>. 雷世和<sup>2</sup> ZHANG Xiangxin<sup>1,2</sup>, GAO Yongfeng<sup>2</sup>, LEI Shihe<sup>2</sup>

1.河北地质大学区域地质与成矿作用重点实验室,河北石家庄050031;

2.河北地质大学资源学院,河北石家庄 050031

1. Key Laboratory of Regional Geology and Mineralization, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China;

2. College of Resource Science, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China

摘要:内蒙古中部苏尼特左旗地区阿巴嘎组火山岩主要由安山岩组成。岩石富碱、高钾和铝、低镁。富集大离子亲石元素 (LILEs)Rb、Ba、U、K和轻稀土元素(LREE),相对亏损高场强元素(HFSEs),具明显的Nb、Ta和Ti负异常和Pb正异常。稀土元素 总量较高,轻、重稀土元素分馏强烈且属轻稀土元素富集型,具弱负Eu异常。主量、微量元素地球化学特征表明,阿巴嘎组安 山岩为钾质火山岩,岩浆上升演化过程中经历了斜长石和铁镁矿物的分离结晶作用,无地壳物质的混染。阿巴嘎组钾质火山 岩的形成与新生代太平洋板片俯冲密切相关,其岩浆来源于滞留的俯冲太平洋板片释放流体交代的富集陆下岩石圈地幔,是 在板内伸展体制下含金云母石榴子石二辉橄榄岩低程度部分熔融的产物。这种板内伸展体制可能是新生代滞留于地幔过渡 带中的太平洋板片俯冲后撤引起的。

关键词: 阿巴嘎组; 钾质火山岩; 地球化学; 俯冲板片后撤; 内蒙古中部 中图分类号:P588.14:P595 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2019)04-0643-13

# Zhang X X, Gao Y F, Lei S H. Geochemistry and petrogenesis of the volcanic rocks from the Abaga Formation in Sonid Left Banner, central Inner Mongolia. Geological Bulletin of China, 2019, 38(4):643-655

Abstract: The volcanic rocks of the Abaga Formation in Sonid Left Banner area of central Inner Mongolia are mainly composed of andesites. These andesites have high alkali, potassium and aluminum, but low magnesium, and are obviously enriched in LILEs such as Rb, Ba, U, K and LREE, and depleted in HFSEs such as Nb, Ta, Ti with obvious negative anomalies. They have high  $\Sigma$  REE values, and show intense REE fractionation with LREE enrichment and weak negative Eu anomalies. Their geochemical characteristics suggest that they belong to potassic volcanic rocks, and were likely generated from a small degree of partial melting of phlogopite- bearing garnet lherzolite in an enriched sub- lithospheric mantle. The enriched sub- lithospheric mantle was metasomatized by fluids released from the stagnant Pacific slab in the mantle transition zone. Geochemical features also reveal that fractional crystallization with the removal of plagioclase and ferromagnesian minerals played an important role in the evolution, and the potassic magma was not affected by crustal contamination as it passed through the thick continental crust. These potassic rocks were formed in an intraplate extensional tectonic setting resulting from the rollback of the stagnant Pacific slab in the mantle transition zone.

Key words: Abaga Formation; potassic volcanic rocks; geochemistry; slab rollback; central Inner Mongolia

了规模宏大的陆相火山岩带",成为亚洲东部大陆 作用受到广泛关注,在火山作用的地质特征、深部

中国东部中新生代火山活动强烈而频繁,造就 边缘显著的地质特征<sup>12</sup>。以往中国东部新生代火山

收稿日期:2017-04-04:修订日期:2017-11-05

资助项目: 中国地质调查局项目《内蒙古1:5万准和热木音苏木(L49E021018)等六幅区域地质矿产调查》(编号:1212011220458)和 《华北陆块北缘金银多金属矿找矿方法》(编号:1212011220492)

作者简介: 张祥信(1975-), 男, 博士, 副教授, 构造地质学专业, 从事构造地质学教学与区域地质矿产调查工作。E-mail: zhxiangxin@126.com

地幔源区性质、岩浆起源等方面取得了大量研究成 果<sup>[3-18]</sup>。中国东部新生代火山作用以发育广泛的碱 性玄武岩和少量拉斑玄武岩为特征,其发生于大陆 板内环境已无异议,但是对岩浆作用的动力学机制 有较多争议,存在大陆根-柱构造<sup>[3-4]</sup>、大陆裂谷<sup>[5]</sup>、 岩石圈拆沉<sup>[6-7]</sup>、软流圈上涌<sup>[8-9]</sup>、地幔柱<sup>[10-11]</sup>等观点。

作为中国东部新生代火山岩带的重要组成部 分,内蒙古中东部发育的大面积新生代亥武岩,主 要分布于大兴安岭-太行山重力梯度带以西.呈北 北东向展布[19-20]。前人在这些新生代玄武岩的火山 地质、火山年代学、岩石地球化学等方面的研究取 得了丰硕成果[7-9,12-13,16-19]。近年来,随着研究的深 入,众多地质学者认为,内蒙古中东部的新生代玄 武岩以碱性玄武岩为主,来源于软流圈地幔,与太 平洋板块俯冲有密切的成因联系[9,16-18,20]。前人对内 蒙古中东部新生代火山作用的研究多集中于玄武 岩,对新生代安山岩研究较薄弱,限制了对新生代 火山作用动力学背景的认识。位于内蒙古中部的 苏尼特左旗地区分布有一套新生代安山岩,归属于 第四纪阿巴嘎组<sup>0</sup>。研究阿巴嘎组安山岩的地球化 学特征、岩石成因及形成的构造环境,对揭示内蒙 古中东部乃至中国东部新生代火山作用的动力学 背景具有重要意义。

# 1 区域地质背景

内蒙古中部位于兴蒙造山带西段,夹持于西伯 利亚板块和华北板块之间。该地区经历了长期而 复杂的多地块拼合和造山作用,古生代受控于古亚 洲洋构造域的演化,经历了古亚洲洋闭合及西伯利 亚板块和华北板块的碰撞拼合过程<sup>[21-23]</sup>;中生代受 控于古太平洋构造域和蒙古-鄂霍茨克构造域的演 化,进入造山后阶段并形成大规模的北东-北北东 向中生代构造岩浆岩带<sup>[24-25]</sup>。

晚古生代一中生代,伴随着古亚洲洋闭合、西 伯利亚板块和华北板块的碰撞拼贴及碰撞后的伸 展,内蒙古中部发育大量侵入岩和同期的火山 岩<sup>[26-30]</sup>。新生代,随着太平洋板块持续向西俯冲至 中国大陆东部之下,研究区整体处于伸展构造背 景,发育广泛的大陆板内火山作用<sup>[9,12-13,16-18]</sup>。新生代 板内火山岩以碱性玄武岩为主,含少量拉斑玄武 岩。内蒙古中部的新生代火山岩主要分布于大兴 安岭-太行山重力梯度带以西地区,成群分布,构成 多个火山岩区,如阿巴嘎火山岩区、贝力克火山岩 区、达里诺尔火山岩区等<sup>[19-20]</sup>。这些火山岩区向北 西延入蒙古国南部境内,与达里干加熔岩高原相 连,形成亚洲大陆东部规模最大的新生代板内火山 岩区之一<sup>[12,17,19-20,31]</sup>。

苏尼特左旗地区位于内蒙古中部,距离阿巴嘎 火山岩区以西约100km处。研究区主要出露新生 代地层和侵入岩,古生代地层少量分布(图1),为上 石炭统宝力高庙组陆相火山岩。新生界分布广泛, 为始新统伊尔丁曼哈组陆相沉积碎屑岩和更新统 阿巴嘎组火山岩。阿巴嘎组火山岩呈北东向带状 展布,出露面积约4.88km<sup>2</sup>,喷发不整合覆盖于伊尔 丁曼哈组砂砾岩、含砾砂岩和晚石炭世正长花岗岩 体之上。阿巴嘎组火山岩产状平缓,倾向北西或南 东,倾角15°~25°。研究区阿巴嘎组火山岩的岩石类 型简单,主要为气孔杏仁状安山岩和致密块状安山 岩,两者以互层产出,呈多个韵律出现,每个韵律的 底部一般为气孔杏仁状安山岩(图2)。本次工作厘 定的阿巴嘎组火山岩的K-Ar年龄为3.12Ma<sup>2</sup>,因样 品中含橄榄石捕虏晶,故年龄偏大。区域上,阿巴 嘎组主要由气孔杏仁状橄榄玄武岩、气孔状玄武 岩、橄榄玄武岩、安山岩等熔岩夹沉积岩组成,沉积 岩夹层中含 Eguus sp., Cerinneindef. 等植物化石<sup>[32]</sup>。 在阿巴嘎旗,新生代碱性玄武岩中普遍含有地幔橄 榄岩包体[17,33-34]。Ho等[12]获得阿巴嘎旗新生代碱性 玄武岩 K-Ar 年龄为 14.57~2.55Ma, 与蒙古国境内 的达里干加熔岩高原新生代火山作用的时间四基本 一致。

研究区侵入岩发育,为晚石炭世花岗岩体,呈 岩株产出。岩体的岩石类型包括正长花岗岩和花 岗闪长岩。正长花岗岩体侵入于花岗闪长岩体和 宝力高庙组火山岩中,其北侧被阿巴嘎组火山岩喷 发不整合覆盖。

# 2 岩石学特征

阿巴嘎组火山岩呈北东向展布,厚度几十米至一百多米不等,岩性为灰色气孔杏仁状安山岩、致密块状安山岩。岩石为斑状结构,气孔杏仁状构造、块状构造(图3)。气孔呈椭圆状、不规则状,大小为0.50~2.85mm。气孔内充填杏仁体(5%),零星分布,杏仁体成分为褐铁矿、隐晶状硅质等。斑晶由斜长石(5%)和少量暗色矿物橄榄石组成,零星分布,粒径为0.40~



#### 图1 研究区所在位置及地质简图

 Fig. 1 The tectonic location of the study area and geological sketch map
a一中国东北大地构造简图(据参考文献[13]修改);b一研究区地质简图;E<sub>2</sub>y一伊尔丁曼哈组; C<sub>2</sub>bl一室力高庙组;Qpa一阿巴嘎组;C<sub>2</sub>ζγ一正长花岗岩;C<sub>2</sub>γδ一花岗闪长岩;
1一安山岩;2一不整合界线;3一产状;4一采样位置;5一剖面线

0.65mm。斜长石呈半自形板状、板条状,杂乱或似格 架状排列,其间填充辉石及火山玻璃;表面干净,有的 隐约可见环带构造。橄榄石具皂石化、褐铁矿化,部 分呈橄榄石假象。基质由斜长石微晶(40%~45%)、暗 色矿物假象(15%)和火山玻璃(35%~40%)组成,粒径小 于 0.05mm,发育粘土化。火山玻璃呈红褐色、黑褐 色,针柱状、柱状,多具脱玻化。

# 3 地球化学特征

在野外采集阿巴嘎组火山岩较新鲜的岩石样

品,将样品粉碎至200目后进行岩石地球化学分析。火山岩样品主量、微量和稀土元素分析测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。 主量元素采用X-荧光光谱法(XRF)分析,分析仪器 为AB104-LX射线荧光光谱仪,分析精度和准确度 优于5%;微量和稀土元素采用电感耦合等离子质谱 法(ICP-MS)分析,分析仪器为ELEMENT等离子体 质谱分析仪,分析精度和准确度一般优于10%。

#### 3.1 主量元素

阿巴嘎组火山岩的主量元素分析结果见表1。



图 2 研究区阿巴嘎组火山岩地质剖面(剖面位置见图 1-b) Fig. 2 Geological section of the volcanic rocks from the Abaga Formation in the study area 1一砂砾岩;2—致密块状安山岩;3—气孔杏仁状安山岩;4—正长花岗岩;5—不整合接触;E<sub>2</sub>y—伊尔丁曼哈组; Qpa—阿巴嘎组;C<sub>2</sub>ζγ—正长花岗岩

由于样品经历了一定程度的蚀变,烧失量较大 (2.26%~4.57%),因此将分析数据的烧失量剔除后, 重新换算成100%。计算结果表明,火山岩具有较小 的主量元素变化范围,SiO<sub>2</sub>含量为54.14%~56.40%, 平均54.77%;K<sub>2</sub>O含量较高,变化于2.03%~2.95%之 间,平均2.43%。全碱(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)含量高,为5.97%~ 7.30%,平均6.52%。K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O值为0.51~0.68,平均 0.59。全铁TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量介于6.92%~9.83%之间,平均 8.99%。MgO含量低,为1.95%~2.62%,平均2.12%。 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量高,且变化范围小,介于15.63%~17.11%之 间,平均16.27%。Mg<sup>#</sup>值低,为32~41。A/CNK值为 0.70~0.76,小于1,属于准铝质岩石。研究区阿巴嘎 组火山岩的主量元素特征类似于中国东北五大连 池新生代钾质火山岩<sup>[11.15]</sup>,但与后者相比,本区阿巴 嘎组火山岩的K<sub>2</sub>O含量稍低。

由于样品遭受了后期蚀变,采用抗蚀变的高场 强元素和不活动元素进行岩石命名。在Nb/Y-Zr/ TiO<sub>2</sub>火山岩分类图解(图4)中,除样品D0332落在粗 面安山岩区外,其余样品均为安山岩,明显不同于 阿巴嘎旗新生代碱性玄武岩<sup>117]</sup>。在SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O图解 (图5-a)中,样品点落在钾玄岩系列和高钾钙碱性系 列区,显示从钾玄岩至高钾钙碱性系列的演化趋 势;但在Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O图解(图5-b)中,所有样品点均 落在钾玄岩区域。

因此,阿巴嘎组火山岩的主量元素特征与典型的 钾质火山岩<sup>[38]</sup>的特征基本一致,表明其为钾质火山岩。

3.2 微量元素

阿巴嘎组火山岩的微量元素表现出较一致的



图 3 研究区阿巴嘎组火山岩野外露头(a)及显微照片(b) Fig. 3 Outcrop photograph (a) and microphotograph (b) of the volcanic rocks from the Abaga Formation in the study area PI—斜长石;OI—橄榄石;红褐色者为火山玻璃,已脱玻化

	<i><i>n</i>, <i>n acc</i></i>	ciciliciti		2 compo	sitions of	the anacones	nom m	c Abaga	rorman	511 III the	study are
样品号	D0332	D4374	PM039	D7300	D2352	样品号	D0332	D4374	PM039	D7300	D2352
SiO <sub>2</sub>	52.24	52.63	53.72	51.76	52.80	Bi	0.051	0.072	0.056	0.053	0.053
$\mathrm{TiO}_2$	2.41	2.74	2.37	2.72	2.70	Th	4.71	5.00	3.67	4.42	4.15
$Al_2O_3$	15.60	15.78	16.30	15.39	15.10	U	2.06	1.77	1.22	1.46	1.58
$TFe_2O_3$	8.74	9.56	6.59	9.24	9.12	Zr	825	548	454	523	500
MnO	0.114	0.067	0.092	0.083	0.109	Hf	18.3	12.3	10.3	11.3	11.0
MgO	1.94	1.90	1.97	1.87	2.53	La	93.3	104.0	59.3	97.4	91.4
CaO	6.96	5.95	7.55	7.00	6.79	Ce	180	195	120	189	182
Na <sub>2</sub> O	4.14	4.23	3.76	3.67	3.88	Pr	22.8	26.9	15.4	24.5	23.2
$K_2O$	2.68	2.87	1.93	2.05	2.15	Nd	88.8	109.0	65.0	98.8	93.8
$P_2O_5$	1.38	1.49	0.971	1.42	1.44	Sm	15.1	17.3	11.8	15.9	15.3
烧失量	3.72	2.26	4.57	4.39	2.84	Eu	3.52	4.39	3.23	4.06	3.70
总量	99.92	99.48	99.82	99.59	99.46	Gd	11.7	12.6	9.59	11.2	11.1
$Mg^{\#}$	34	32	41	32	39	Tb	1.65	1.81	1.44	1.43	1.48
A/CNK	0.70	0.76	0.76	0.74	0.72	Dy	6.11	7.21	5.81	5.96	5.77
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	6.82	7.10	5.69	5.72	6.03	Но	1.010	1.230	0.976	1.010	0.974
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.65	0.68	0.51	0.56	0.55	Er	3.05	3.15	2.55	2.31	2.13
Sc	11.6	17.1	16.7	15.9	15.4	Tm	0.379	0.411	0.378	0.304	0.251
V	152	147	168	177	164	Yb	2.28	2.28	2.08	1.78	1.68
Cr	52.7	64.6	77.6	56.3	61.5	Lu	0.326	0.324	0.267	0.248	0.215
Со	34.5	19.6	25.4	20.2	22.2	$\Sigma$ REE	430.03	485.61	297.82	453.9	433
Ni	24.2	26.4	23	21.8	21.8	LREE/HREE	15.22	15.74	11.90	17.72	17.35
Ga	24.9	42.8	30.3	40.9	38.3	(La/Yb) <sub>N</sub>	27.59	30.75	19.22	36.89	36.68
Rb	37.4	50.5	42.7	43.0	42.1	(La/Sm) <sub>N</sub>	3.89	3.78	3.16	3.85	3.76
Sr	1160	1213	762	1276	1194	$(Gd/Yb)_{N}$	4.14	4.46	3.72	5.08	5.33
Y	29.5	35.6	29.7	27.5	25.6	δΕυ	0.78	0.87	0.90	0.89	0.83
Nb	25.70	3.66	20.00	1.89	2.08	Ba/Th	282.59	336.2	274.39	342.53	474.70
Мо	2.63	1.31	1.74	1.13	1.40	La/Sm	6.18	6.01	5.03	6.13	5.97
Cd	0.441	0.167	0.174	0.173	0.149	K/Rb	594.85	471.78	375.21	395.76	423.94
In	0.081	0.102	0.085	0.079	0.067	La/Yb	40.92	45.61	28.51	54.72	54.4
Cs	2.460	1.020	0.872	0.862	0.891	Dy/Yb	2.68	3.16	2.79	3.35	3.43
Ba	1331	1681	1007	1514	1970	Rb/Ba	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02
Та	1.280	0.019	0.585	0.040	0.011	Rb/Sr	0.03	0.04	0.06	0.03	0.04
Re	0.005	0.004	0.017	0.014	< 0.002	Tb/Yb	0.72	0.79	0.69	0.8	0.88
Tl	0.158	0.156	0.413	0.540	0.263	Zr/Hf	45.08	44.55	44.08	46.28	45.45

表1 研究区阿巴嘎组安山岩主量、微量和稀土元素含量

Table 1 Major, trace element and REE compositions of the andesites from the Abaga Formation in the study area

注:Mg<sup>#</sup>=100×Mg<sup>2+</sup>/(Mg<sup>2+</sup>+Fe<sup>3+</sup>);主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量为10<sup>-6</sup>

特征(表1;图 6-a),大离子亲石元素(LILEs)Rb、Ba、 U和K明显富集,普遍为原始地幔的50~200倍,最 高达280倍。其中,Rb含量为37.4×10<sup>-6</sup>~50.5×10<sup>-6</sup>, 平均43.1×10<sup>-6</sup>;Ba含量为1007×10<sup>-6</sup>~1970×10<sup>-6</sup>,平 均1501×10<sup>-6</sup>;U含量为1.22×10<sup>-6</sup>~2.06×10<sup>-6</sup>,平均 1.62×10<sup>-6</sup>。相容元素Cr、Co和Ni含量较低,分别为 52.7×10<sup>-6</sup>~77.6×10<sup>-6</sup>、19.6×10<sup>-6</sup>~34.5×10<sup>-6</sup>和21.8× 10<sup>-6</sup>~26.4×10<sup>-6</sup>。火山岩样品中Th和Sr相对亏损, 具明显的负异常;高场强元素(HFSEs)Nb、Ta和Ti 强烈亏损。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 6-a)上,所有样品的微量元素蛛网图相似,表现为总 体向右倾斜。本区阿巴嘎组火山岩存在明显的Nb、 Ta和Ti负异常,具有岛弧火山岩的地球化学特 征<sup>[40-41]</sup>。而阿巴嘎旗新生代碱性玄武岩具有明显的





Fig. 4 Nb/Y–Zr/TiO<sub>2</sub> diagram of the volcanic rocks from the Abaga Formation in the study area

Nb、Ta正异常(图 6-a),显示板内玄武岩的特征<sup>[17]</sup>。

#### 3.3 稀土元素

阿巴嘎组火山岩的稀土元素分析结果见表1。 火山岩的稀土元素总量( $\Sigma$ REE)较高,介于297.82× 10<sup>-6</sup>~485.61×10<sup>-6</sup>之间,平均420.07×10<sup>-6</sup>;LREE/ HREE值为11.90~17.72,平均15.59,轻、重稀土元素 分馏强烈;(La/Yb)<sup>N</sup>值为19.22~36.89,平均30.23,属 轻稀土元素富集型。(La/Sm)<sup>N</sup>值为3.16~3.89,平均 3.69;(Gd/Yb)<sup>N</sup>值为3.72~5.33,平均4.55,显示轻稀 土元素和重稀土元素内部均发生了一定程度的分 馏作用,且随着原子序数的增大,分馏程度明显降 低。δEu为0.78~0.90,平均0.85,具弱的负Eu异常, 与负 Sr 异常一致,表明岩浆演化过程中存在斜长石 的分离结晶作用,这与火山岩含有斜长石斑晶的岩 相学特征吻合。在稀土元素球粒陨石标准化图解 (图6-b)中,火山岩样品具有相似的稀土元素配分形 式,轻、重稀土元素分馏程度基本一致,轻稀土元素 富集、重稀土元素相对亏损且配分曲线较陡,为右 倾且互相平行的平滑曲线。

阿巴嘎组火山岩的球粒陨石标准化稀土元素配 分形式与中国东北新生代钾质火山岩<sup>[7,11,15]</sup>类似,但明 显不同于阿巴嘎旗新生代碱性玄武岩<sup>[17]</sup>。阿巴嘎旗 新生代碱性玄武岩轻稀土元素含量低且无负Eu异常 (图 6-b),而研究区阿巴嘎组火山岩以高的轻稀土元 素含量和微弱的负Eu异常与后者相区分。

4 讨 论

## 4.1 地壳混染和分离结晶作用

大陆板内幔源岩浆通过整个地壳上升到地表 过程中可能会受到地壳物质的混染。但是,地球化 学研究证明,中国东部新生代碱性玄武岩一般没有 受到明显的地壳物质混染<sup>[6-8,12,17,20,43-44]</sup>。阿巴嘎旗新 生代碱性玄武岩普遍含有地幔橄榄岩包体,表明岩 浆快速上升至地表,与地壳之间的相互作用有 限<sup>[14]</sup>。研究区阿巴嘎组钾质火山岩 Rb/Ba 值为 0.02~0.04,平均 0.03; Rb/Sr 值为 0.03~0.06,平均 0.04。这 2 个比值均小于大陆地壳(Rb/Ba=0.11, Rb/Sr=0.15<sup>[45]</sup>)和大陆上地壳(Rb/Ba=0.13, Rb/Sr= 0.26<sup>[45]</sup>)的平均值,说明岩浆喷出地表之前没有受到 明显的地壳物质混染,这与阿巴嘎旗乃至中国东部



图5 研究区阿巴嘎组火山岩SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O(a,底图据参考文献[36])和Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O(b,底图据参考文献[37])图解 Fig. 5 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O (a) and Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O (b) diagrams of the volcanic rocks from the Abaga Formation in the study area



图 6 研究区阿巴嘎组火山岩微量元素蛛网图(a)和稀土元素配分曲线(b) (阿巴嘎组碱性玄武岩据参考文献[17];原始地幔标准化值据参考文献[39];球粒陨石标准化值据参考文献[42]) Fig. 6 Trace element spidergrams (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) for the volcanic rocks from the Abaga Formation

新生代碱性玄武岩的特征一致。火山岩的La/Sm (5.03~6.18)、Tb/Yb(0.69~0.88)、Zr/Hf(44.08~46.28) 等分配系数相近的不相容元素的比值变化范围均 很小,排除岩浆上升过程中存在地壳物质混染的可能性。另外,火山岩不相容元素Ba和Sr含量高,分别为1007×10<sup>-6</sup>~1970×10<sup>-6</sup>和762×10<sup>-6</sup>~1276×10<sup>-6</sup>,明显大于大陆地壳中Ba和Sr的平均含量(Ba=456×10<sup>-6</sup>,Sr=320×10<sup>-6(45)</sup>),也支持地壳混染作用在岩浆演 化过程中影响微弱。因此,阿巴嘎组钾质火山岩的 化学成分主要反映了岩浆源区特征,岩浆上升过程 没有受到地壳物质的混染,排除火山岩呈岛弧地球 化学特征的地壳混染成因。

阿巴嘎组钾质火山岩的 SiO<sub>2</sub> 和全碱 (Na<sub>2</sub>O+ K<sub>2</sub>O)含量较高,而MgO含量和Mg<sup>#</sup>值(32~41)低,以 及Cr、Ni、Co等相容元素含量较低,表明该钾质火 山岩为富集岩石圈地幔部分熔融形成的母岩浆经 历了不同程度结晶分异演化的产物。从Harker图 解(图7)可以看出,火山岩SiO2含量与K2O、Na2O和 TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量呈负相关,与(La/Yb)<sub>N</sub>大致呈正相关,反 映成岩过程中存在斜长石和铁镁矿物的分离结 晶。这与岩石薄片中斜长石和橄榄石主要为斑晶 的岩相学特征一致。火山岩的 K<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Na<sub>2</sub>O 和全碱 (Na,O+K,O)含量随SiO,含量增高而降低,该趋势代 表岩浆存在斜长石的分离结晶,与稀土元素配分曲 线中负 Eu 异常一致; 而(La/Yb) 脑 SiO2含量增高而 增大,以及火山岩中低的MgO含量和Mg<sup>#</sup>值,说明 岩浆经历了铁镁矿物的分离结晶。图8显示,火山 岩样品随着La含量增大,La/Sm值保持稳定且有较 小的变化范围(5.03~6.18),基本呈近水平的直线分 布,同样说明岩浆在上升演化过程中经历了分离结 晶作用。

## 4.2 岩浆源区

主量和微量元素地球化学特征表明,研究区阿 巴嘎组安山岩为钾质火山岩。岩石富碱,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量 高且变化范围小,强烈富集大离子亲石元素(Rb、 Ba、U和K)和轻稀土元素,相对亏损高场强元素, Nb、Ta和Ti呈明显的负异常。上述元素地球化学 特征主要反映了岩浆源区的地球化学性质,表明阿 巴嘎组钾质火山岩可能来源于俯冲板片流体交代 的岩石圈地幔<sup>140</sup>。岩石圈地幔部分熔融产生的熔体 普遍具有岛弧型的地球化学特征,而与金云母或角 闪石有关的交代岩石圈地幔的部分熔融则产生钾 质或超钾质熔体<sup>117</sup>。

地幔交代作用是地球深部重要的地质过程。 俯冲过程中地幔源区的交代作用主要受板片熔融 和(或)板片脱水所约束[47-48]。俯冲板片的脱水先于 板片熔融发生,因而其释放的流体在岩石圈地幔的 富集过程中起关键作用[49-50]。含水流体中的相对不 活动元素(如高强场元素)一般被用于区分地幔交代 剂中熔体和流体的作用。与俯冲相关的流体富集 Ba、Rb、Sr、Pb 和 U, 亏损 Th、Nb、Ta、Ti、Hf 和 REE<sup>[51-52]</sup>。高Ba/Th和低La/Sm值是俯冲板片脱水 中含水流体的重要指标,而低Ba/Th和高La/Sm值 主要受板片沉积物熔融中含水熔体的影响<sup>53</sup>。阿巴 嘎组火山岩 Ba/Th 值(274.39~474.70)高, La/Sm 值 (5.03~6.18)低,表明岩浆来自俯冲板片流体交代的 地幔源区,而非受俯冲板片熔融所影响(图9-a)。因 此,研究区阿巴嘎组钾质火山岩的地球化学特征与 板片脱水而非板片熔体交代的地幔源区性质一 致。地震层析图像识别出中国东部地幔过渡带中





存在滞留的俯冲太平洋板片<sup>[54]</sup>,该滞留的太平洋板 片横向上已经到达大兴安岭-太行山重力梯度带以 西附近<sup>[55-56]</sup>。新近研究表明,阿巴嘎旗及其南部乌 兰哈达的新生代碱性玄武岩来源于亏损的软流圈 地幔,其岩浆源区可能与地幔过渡带中滞留的太平 洋板片释放的流体有关<sup>[16-17]</sup>。由此表明,大兴安岭-太行山重力梯度带以西的新生代岩浆作用与滞留 的太平洋板片俯冲有密切的成因联系,且太平洋板 片在新生代仍然含有流体。因此,滞留的俯冲太平





洋板片释放流体交代的富集陆下岩石圈地幔可能 是研究区阿巴嘎组钾质火山岩的岩浆源区。

钾质火成岩一般形成于岩石圈地幔或其中角 闪石/金云母脉的部分熔融,其钾含量受角闪石或 金云母脉、卷入的地幔成分、部分熔融程度等因素 所影响[53,58]。研究表明,地幔包体中的角闪石显示相 对高的K、Sr、Ba、HFSE和LREE含量,而Rb和Th 含量低。相反,金云母中K、Sr、Ba和Rb含量高,而 HFSE、REE和Th含量低<sup>[59-61]</sup>。角闪石和含角闪石 熔体的K/Rb值大于1100<sup>[61]</sup>,而金云母的K/Rb值一 般为40~400。研究区阿巴嘎组火山岩K/Rb 值低, 介干 375.21~594.85 之间, HFSE 和 Th 含量也低, 而 K、Rb、Sr和Ba含量高,表明地幔源区主要的含水矿 物是金云母。因此,该火山岩富钾的特征来自岩浆 源区存在的金云母而不是角闪石,这与中国东北诺 敏河和五大连池新生代钾质火山岩的特征一 致[7.15]。此外, MREE(中稀土元素)在角闪石矿物中 为相容元素<sup>62</sup>,阿巴嘎组火山岩无明显的MREE异 常(图 6-b)也说明地幔源区缺少角闪石。

阿巴嘎组火山岩的 La/Sm 和 La/Yb 值分别为 5.03~6.18 和 28.51~54.72,表明火山岩来源于石榴子 石橄榄岩部分熔融<sup>[53.63]</sup>。La-La/Sm 图解能够近似定 量模拟地幔源区的部分熔融条件<sup>[53.57]</sup>,在该图中,样 品点落在石榴子石二辉橄榄岩曲线上及附近,且在



图 9 研究区阿巴嘎组火山岩La/Sm-Ba/Th(a)<sup>[48]</sup>和La-La/Sm图解(b)<sup>[57]</sup> Fig. 9 La/Sm-Ba/Th (a) and La-La/Sm (b) diagrams of the volcanic rocks from the Abaga Formation in the study area

富集地幔范围(图9-b),表明该火山岩可能来源于 富集地幔源区石榴子石二辉橄榄岩小于5%的部分 熔融<sup>[53,57]</sup>。另外,Dy/Yb值是区分含角闪石和(或)含 金云母二辉橄榄岩是尖晶石还是石榴子石稳定区 部分熔融的重要地球化学指标<sup>[53,64]</sup>。石榴子石稳定区 部分熔融一般产生高Dy/Yb值(>2.5),而尖晶 石稳定区部分熔融产生的熔体具有低Dy/Yb值(< 1.5)。阿巴嘎组火山岩具有高Dy/Yb值,在2.68~ 3.43之间,表明地幔源区为含有石榴子石相的二辉 橄榄岩。阿巴嘎组火山岩稀土元素配分模式(图6b)显示轻稀土元素富集、重稀土元素亏损,呈向右陡 倾的配分曲线,说明岩浆源区存在石榴子石,该特 征与中国东北新生代钾质火山岩一致<sup>[7,15]</sup>。

综上,研究区阿巴嘎组钾质火山岩岩浆可能是 富集岩石圈地幔中含金云母石榴子石二辉橄榄岩 低程度部分熔融并经历分离结晶作用的产物,富集 组分来自地幔过渡带中滞留的俯冲太平洋板片释 放的流体。

## 4.3 岩石成因

中国东部新生代钾质火山岩集中分布于东北地区,其岩石成因存在较多争议,主要有以下3种构造岩浆模式:①岩石圈地幔拆沉<sup>[7]</sup>;②地幔过渡带的地幔柱上涌<sup>[11]</sup>;③富集岩石圈地幔的低程度部分熔融<sup>[15,65]</sup>。

部分学者基于大兴安岭北段诺敏河第四纪钾 质火山岩的岩石学和地球化学研究,提出了富钾岩 石圈地幔拆沉模式,以此来解释中国东北新生代钾 质火山岩的成因四。研究表明,中国东北新生代钾 质火山岩普遍具有类似EM I 的同位素特征<sup>四</sup>,其富 钾组分来源于岩浆源区的金云母等含钾矿物四。中 国东部拆沉的岩石圈地幔可能局部存在于东北之 下较浅的软流圈内,其同位素特征无类似EM I 的 组分[15,66]。因而,中国东北拆沉于软流圈中的岩石圈 地幔可能不是具有类似EM I 同位素标志的钾质火 山岩的岩浆源区15%。前已述及,研究区阿巴嘎组钾 质火山岩可能是富集岩石圈地幔含金云母石榴子 石二辉橄榄岩低程度部分熔融的产物,岩浆源区主 要的含水矿物是金云母。火山岩的稀土元素特征 表明其岩浆源区存在石榴子石残留。石榴子石的 存在约束了岩浆源区深度为80~120km<sup>115]</sup>。前人研 究表明,金云母在大于3GPa的高压下会发生分解, 在软流圈地幔中并不能保持稳定[67]。因此,含金云 母交代陆下岩石圈地幔而不是拆沉的岩石圈地幔 是研究区阿巴嘎组钾质火山岩的岩浆源区。

地幔过渡带的地幔柱模式<sup>[11]</sup>可以解释钾质火山 岩形成高温和不相容元素富集的地球化学特征。 中国东北新生代火山岩以碱性玄武岩为主,玄武岩 的地球化学特征与地幔柱成因的 OIB 玄武岩类 似。但是,这些玄武岩省的面积较小,其直径均小 于 100km,阿巴嘎-达里诺尔火山岩区的面积仅 10000km<sup>2[9]</sup>,而与地幔柱相关的典型大陆溢流玄武 岩省面积可达 1000000km<sup>2[6]</sup>。研究表明,中国东北 各个火山岩区,如五大连池、诺敏河等的活动历史 与喷发时期不一致,且火山喷发时间与火山岩的地 球化学特征之间无直接联系<sup>[7]</sup>。其中的多数火山主 要由单成因的火山渣锥组成<sup>[1,7]</sup>,与典型的地幔柱地 区如夏威夷、冰岛的火山完全不同。此外,深部地 幔的地震层析图像和氦同位素研究也不支持中国 东北及邻区深部存在地幔柱<sup>[54,69]</sup>。因此,地幔柱模式 不能解释研究区阿巴嘎组钾质火山岩的岩石成因。

前已述及,研究区阿巴嘎组火山岩钾含量高,富 集大离子亲石元素和轻稀土元素,相对亏损高场强元 素,具明显的Nb、Ta和Ti负异常,以及轻、重稀土元 素分异强烈,显示了弧岩浆的地球化学亲和性。这些 元素地球化学特征表明,阿巴嘎组钾质火山岩来源于 滞留的俯冲太平洋板片释放流体交代的富集陆下岩 石圈地幔,是含金云母石榴子石二辉橄榄岩部分熔融 并经历了分离结晶作用的产物,岩浆上升演化过程中 无地壳物质的混染。该模式可以解释阿巴嘎组钾质 火山岩具有岛弧型地球化学特征,又与其形成于新生 代大陆板内构造背景一致。

日益增多的证据表明,太平洋板块自中生代以 来的俯冲作用强烈影响了中国东部的地质过程,是 中国东部新生代板内火山作用的动力学成因。地 震层析成像研究显示,太平洋板块从日本海沟开始 向西俯冲,在东亚大陆边缘之下400~600km深处的 地幔过渡带逐渐变得平缓<sup>™</sup>,呈箕状的几何形 态四。太平洋箕状俯冲板片四横卧在中国东北之下 的地幔过渡带发生滞留<sup>54</sup>,该滞留的太平洋板片横 向上已经到达大兴安岭-太行山重力梯度带以西附 近[55-56]。相对冷的太平洋板片滞留在相对热的地幔 过渡带中必然会从其周围的地幔中吸收热量,周围 地幔的热传导触发了滞留的太平洋板片释放出流 体。同时,滞留于地幔过渡带中的太平洋板片在中 新世发生俯冲后撤19.721,板片俯冲后撤导致高温软流 圈物质上涌,因而触发了大陆岩石圈伸展作用。在 中国东部岩石圈伸展和减薄的背景下,软流圈物质 上涌诱发了富集陆下岩石圈地幔中的含金云母石 榴子石二辉橄榄岩发生低程度部分熔融并经历了 分离结晶作用,从而形成了阿巴嘎组钾质火山岩。

5 结 论

(1)阿巴嘎组火山岩主要由气孔杏仁状安山 岩、致密块状安山岩等熔岩组成,属于钾质火山岩 组合。岩石富碱、高钾和铝、低镁。富集大离子亲 石元素(LILEs) Rb、Ba、U、K和轻稀土元素(LREE), 相对亏损高场强元素(HFSEs),具明显的Nb、Ta和 Ti负异常。

(2)阿巴嘎组钾质火山岩来源于滞留的俯冲太 平洋板片释放流体交代的富集陆下岩石圈地幔,是 含金云母石榴子石二辉橄榄岩低程度部分熔融并 经历了分离结晶作用的产物。岩浆在上升演化过 程中无地壳物质的混染。

(3)阿巴嘎组钾质火山岩的形成与新生代太平 洋板片俯冲密切相关,形成于板内伸展构造体制, 这种板内伸展体制可能是新生代滞留于地幔过渡 带中的太平洋板片俯冲后撤引起的。

**致谢**:河北地质大学方勇勇教授和许圣传博士, 以及张振民、李伟龙、刘亚芳、王广、王洋、焦天佳、秦 旭亮、谷凤羽、李晓伟等硕士研究生参加了野外工作, 审稿专家提出了建设性的修改意见,在此一并表示衷 心感谢。

## 参考文献

- [1]赵勇伟,樊祺诚,白志达,等.大兴安岭诺敏河—奎勒河地区第四 纪火山活动研究[J].中国科学:地球科学,2013,43(9):1464-1473.
- [2]Zhang J H, Gao S, Ge W C, et al. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing' an Range, northeastern China: Implications for subduction– induced delamination[J]. Chemical Geology, 2010, 276: 144–165.
- [3]邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根-柱构造一大陆动力学的钥匙[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-110.
- [4]Deng J F, Mo X X, Zhao H L, et al. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: 'continental roots- plume tectonics' [J]. Earth–Science Reviews, 2004, 65: 223–275.
- [5]Liu J, Han J, Fyfe W S. Cenozoic episodic volcanism and continental rifting in northeast China and possible link to Japan Sea development as revealed from K- Ar geochronology[J]. Tectonophysics, 2001, 339: 385-401.
- [6]Xu Y G, Ma J L, Frey F A, et al. Role of lithosphere–asthenosphere interaction in the genesis of Quaternary alkali and tholeiitic basalts from Datong, western North China Craton[J]. Chemical Geology, 2005, 224: 247–271.
- [7]Zhao Y W, Fan Q C, Zou H B, et al. Geochemistry of Quaternary basaltic lavas from the Nuomin volcanic fi eld, Inner Mongolia: Implications for the origin of potassic volcanic rocks in Northeastern China[J]. Lithos, 2014, 196: 169–180.
- [8]Zou H B, Fan Q C, Yao Y P. U-Th systematics of dispersed young volcanoes in NE China: Asthenosphere upwelling caused by piling up and upward thickening of stagnant Paci fi c slab[J]. Chemical

Geology, 2008, 255: 134-142.

- [9]Zhang M L, Guo Z F. Origin of Late Cenozoic Abaga– Dalinuoer basalts, eastern China: Implications for a mixed pyroxenite– peridotite source related with deep subduction of the Pacific slab[J]. Gondwana Research, 2016, 37: 130–151.
- [10]Kuritani T, Ohtani E, Kimura J I. Intensive hydration of the mantle transition zone beneath China caused by ancient slab stagnation[J]. Nature Geoscience, 2011, 4: 713–716.
- [11]Kuritani T, Kimura J I, Ohtani E, et al. Transition zone origin of potassic basalts from Wudalianchi volcano, northeast China[J]. Lithos, 2013, 156/159: 1–12.
- [12]Ho K S, Liu Y, Chen J C, et al. Elemental and Sr–Nd–Pb isotopic compositions of late Cenozoic Abaga basalts, Inner Mongolia: Implications for petrogenesis and mantle process[J]. Geochemical Journal, 2008, 42: 339–357.
- [13]Ho K S, Ge W C, Chen J C, et al. Late Cenozoic magmatic transitions in the central Great Xing´an Range, Northeast China: Geochemical and isotopic constraints on petrogenesis[J]. Chemical Geology, 2013, 352: 1–18.
- [14]赵勇伟, 樊祺诚. 大兴安岭哈拉哈河-绰尔河第四纪火山岩地幔 源区与岩浆成因[J]. 岩石学报, 2012, 28(4): 1119-1129.
- [15]Chu Z Y, Harvey J, Liu C Z, et al. Source of highly potassic basalts in Northeast China: Evidence from Re–Os, Sr–Nd–Hf isotopes and PGE geochemistry[J]. Chemical Geology, 2013, 357: 52–66.
- [16]Fan Q C, Chen S S, Zhao Y W, et al. Petrogenesis and evolution of Quaternary basaltic rocks from the Wulanhada area, North China[J]. Lithos, 2014, 206: 289–302.
- [17]Chen S S, Fan Q C, Zou H B, et al. Geochemical and Sr-Nd isotopic constraints on the petrogenesis of late Cenozoic basalts from the Abaga area, Inner Mongolia, eastern China[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2015, 305: 30–44.
- [18]Guo P Y, Niu Y L, Sun P, et al. The origin of Cenozoic basalts from central Inner Mongolia, East China: The consequence of recent mantle metasomatism genetically associated with seismically observed paleo–Pacific slab in the mantle transition zone[J]. Lithos, 2016, 240/243: 104–118.
- [19]陈生生, 樊祺诚, 赵勇伟, 等. 内蒙古贝力克玄武岩地球化学特征及地质意义[]. 岩石学报, 2013, 29(8): 2695-2708.
- [20]樊祺诚,赵勇伟,陈生生,等.大兴安岭-太行山重力梯度带以西的第四纪火山活动[J].矿物岩石地球化学通报,2015,34(4): 674-681.
- [21]Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Tectonics, 2003, 22: 1069– 1088.
- [22]Miao L C, Fan W M, Liu D Y, et al. Geochronology and

geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late- stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling orogenic belt, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 32: 348–370.

- [23]徐备,赵盼,鲍庆中,等.兴蒙造山带前中生代构造单元划分初 探[J]. 岩石学报, 2014, 30(7): 1841-1857.
- [24]郭锋,范蔚茗,王岳军,等.大兴安岭南段晚中生代双峰式火山 作用[J]. 岩石学报, 2001, 17(1): 61-68.
- [25]林强, 葛文春, 曹林, 等. 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, 2003, 32(3): 208-222.
- [26]洪大卫,黄怀曾,肖宜君,等.内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及 其地球动力学意义[J].地质学报,1994,68(3):219-230.
- [27]李可,张志诚,冯志硕,等.内蒙古中部巴彦乌拉地区晚石炭 世一早二叠世火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义
  [1].岩石学报,2014,30(7):2041-2054.
- [28]贺淑赛,李秋根,王宗起,等.内蒙古中部宝力高庙组长英质火 山岩 U-Pb-Hf 同位素特征及其地质意义[J].北京大学学报(自 然科学版), 2015, 51(1): 49-64.
- [29]Tong Y, Jahn B M, Wang T, et al. Permian alkaline granites in the Erenhot–Hegenshan belt, northern Inner Mongolia, China: Model of generation, time of emplacement and regional tectonic significance[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 97: 320–336.
- [30]Zhang X H, Yuan L L, Xue F H, et al. Early Permian A– type granites from central Inner Mongolia, North China: Magmatic tracer of postcollisional tectonics and oceanic crustal recycling[J]. Gondwana Research, 2015, 28: 311–327.
- [31]Kononova V A, Kurat G, Embey–Isztin A, et al. Geochemistry of metasomatised spinel peridotite xenoliths from the Dariganga Plateau, Southeastern Mongolia[J]. Mineralogy and Petrology, 2002, 75: 1–21.
- [32]内蒙古地质矿产局.内蒙古自治区区域地质志[M].北京:地质 出版社, 1991: 1-725.
- [33]张臣,刘树文,韩宝福,等.内蒙古阿巴嘎旗新生代玄武岩包体的特征[J]. 岩石学报, 2006, 22(11): 2801-2807.
- [34]陈生生, 樊祺诚, 赵勇伟, 等. 内蒙古阿巴嘎地幔岩捕掳体与岩 石圈地幔性质探讨[J]. 岩石学报, 2012, 28(4): 1108-1118.
- [35]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.
- [36]Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides major and minor elements[J]. Lithos, 1989, 22: 247–263.
- [37]Miller C, Schuster R, Klotzli U, et al. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb- O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis[J]. Journal of Petrology, 1999, 40: 1399–1424.

[38]Morrison G W. Characteristics and tectonic setting of the

shoshonite rock association[J]. Lithos, 1980, 13: 97-108.

- [39]Sun S S, Mcdonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implication for mantle composition and processes[C]// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special. Publications, 1989, 42: 313–345.
- [40]Saunders A D, Tarney J, Weaver S D. Transverse geochemical variations across the Antarctic Peninsula: Implications for the genesis of calc– alkaline magmas[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1980, 46: 344–360.
- [41]梅可辰,李秋根,王宗起,等.内蒙古中部苏尼特左旗大石寨组 流纹岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 地质通报,2015,34(12):2181-2194.
- [42]Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[C]//Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam Elsevier, 1984: 63–114.
- [43]Tang Y J, Zhang H F, Ying J F. Asthenosphere– lithospheric mantle interaction in an extensional regime: implication from the geochemistry of Cenozoic basalts from Taihang Mountains, North China Craton[J]. Chemical Geology, 2006, 233: 309–327.
- [44]Xu Y G, Zhang H H, Qiu H N, et al. Oceanic crust components in continental basalts from Shuangliao, Northeast China: Derived from the mantle transition zone?[J] Chemical Geology, 2012, 328: 168–184.
- [45]Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [C]// Rudnick R L. The Crust, Treatise on geochemistry[M]. Amsterdam: Elsevier, 2003, 3: 1–64.
- [46]Zhang L C, Zhou X H, Ying J F, et al. Geochemistry and Sr–Nd– Pb–Hf isotopes of Early Cretaceous basalts from the Great Xinggan Range, NE China: Implications for their origin and mantle source characteristics[J]. Chemical Geology, 2008, 256: 12–23.
- [47]Turner S, Hawkesworth C. Constraints on flux rates and mantle dynamics beneath island arcs from Tonga- Kermadec lava geochemistry[J]. Nature, 1997, 389: 568–573.
- [48]Labanieh S, Chauvel C, Germa A, et al. Martinique: A clear case for sediment melting and slab dehydration as a function of distance to the trench[J]. Journal of Petrology, 2012, 53: 2441–2464.
- [49]Zhang H F, Nakamura E, Sun M, et al. Transformation of subcontinental lithospheric mantle through peridotite– melt reaction: Evidence from a highly fertile mantle xenolith from the north China Craton[J]. International Geology Review, 2007, 49: 658–679.
- [50]Sun W D, Teng F Z, Niu Y L, et al. The subduction factory: Geochemical perspectives[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, 143: 1–7.
- [51]Ayers J C, Dittmer S K, Layne G D. Partitioning of elements between peridotite and  $H_2O$  at 2.0–3.0GPa and 900–1100°C, and

application to models of subduction zone processes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 150: 381-398.

- [52]Kessel R, Schmidt M W, Ulmer P, et al. Trace element signature of subduction-zone fluids, melts and supercritical liquids at 120– 180km depth[J]. Nature, 2005, 437: 724–727.
- [53]Yang W B, Niu H C, Cheng L R, et al. Geochronology, geochemistry and geodynamic implications of the Late Mesozoic volcanic rocks in the southern Great Xing'an Mountains, NE China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 113: 454–470.
- [54]Huang J, Zhao D. High–resolution mantle tomography of China and surrounding regions[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(B9305): 1–21.
- [55]Zhao D, Zheng Y, Ohtani E. East Asia: Seismotectonics, magmatism and mantle dynamics[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40: 689–709.
- [56]Li J, Wang X, Wang X, et al. P and SH velocity structure in the upper mantle beneath Northeast China: Evidence for a stagnant slab in hydrous mantle transition zone[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2013, 367: 71–81.
- [57]Zhu Y F, Guo X, Song B, et al. Petrology, Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry and zircon chronology of the Late Palaeozoic volcanic rocks in the southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China[J]. Journal of the Geological Society, 2009, 166: 1085–1099.
- [58]Conticelli S, Marchionni S, Rosa D, et al. Shoshonite and subalkaline magmas from an ultrapotassic volcano: Sr-Nd-Pb isotope data on the Roccamonfina volcanic rocks, Roman Magmatic Province, Southern Italy[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2009, 157: 41–63.
- [59] JONOV D A, Hofmann A W. Nb-Ta-rich mantle amphiboles and micas- implications for subduction- related metasomatic traceelement fractionations[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1995, 131: 341-356.
- [60]Chazot G, Menzies M A, Harte B. Determination of partition coefficients between apatite, clinopyroxene, amphibole, and melt in natural spinellherzolites from Yemen: Implications for wet melting of the lithospheric mantle[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60: 423–437.
- [61]Chakrabarti R, Basu A R, Santo A P, et al. Isotopic and geochemical evidence for a heterogeneous mantle plume origin of the Virunga volcanics, Western rift, East African Rift system[J]. Chemical Geology, 2009, 259: 273–289.
- [62]Adam J, Green T. Trace element partitioning between mica- and amphibole-bearing garnet lherzolite and hydrous basanitic melt: 1. Experimental results and the investigation of controls on partitioning behaviour[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2006, 152: 1–17.

- [63]Yang W B, Niu H C, Shan Q, et al. Late Paleozoic calc–alkaline to shoshonitic magmatism and its geodynamic implications, Yuximolegai area, western Tianshan, Xinjiang[J]. Gondwana Research, 2012, 22: 325–340.
- [64]Jiang Y H, Jiang S Y, Dai B Z, et al. Middle to late Jurassic felsic and ma fi c magmatism in southern Hunan province, southeast China: Implications for a continental arc to rifting[J]. Lithos, 2009, 107: 185–204.
- [65]Zou H, Reid M R, Liu Y, et al. Constraints on the origin of historic potassic basalts from Northeast China by U–Th disequilibrium data[J]. Chemical Geology, 2003, 200: 189–201.
- [66]Chu Z Y, Wu F Y, Walker R J, et al. Temporal evolution of the lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton[J]. Journal of Petrology, 2009, 50: 1857–1898.
- [67]Class C, Goldstein S L. Plume- lithosphere interactions in the ocean basins: Constraints from the source mineralogy[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 150: 245–260.
- [68]Campbell I H, Griffiths R W. Implications of mantle plume

structure for the evolution of flood basalts[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1990, 99: 79–93.

- [69]Chen Y, Zhang Y X, Graham D, et al. Geochemistry of Cenozoic basalts and mantle xenoliths in Northeast China[J]. Lithos, 2007, 96: 108–126.
- [70]Zhao D. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: Insight into deep Earth dynamics[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2004, 146: 3–34.
- [71]许志琴,杨经绥,嵇少丞,等.中国大陆构造及动力学若干问题的认识[J].地质学报,2010,84(1):1-29.
- [72]Ren J Y, Tamaki K, Li S T, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas[J]. Tectonophysics, 2002, 344: 175–205.
- ① 内蒙古自治区地质调查院.内蒙古1:25万巴音乌拉幅 (L49C004004)区域地质调查报告.2007.
- ②石家庄经济学院地质调查研究院.内蒙古1:5万准和热木音苏木 (L49E021018)等六幅区域地质调查报告.2015.