

我国东北小古里河-科洛-五大连池-二克山火山带钾质矿物成因及地质意义*

李霓^{1,2} 张柳毅^{1,2} 赵勇伟^{1,2} 曹园园^{1,2} 盘晓东³

LI Ni^{1,2}, ZHANG LiuYi^{1,2}, ZHAO YongWei^{1,2}, CAO YuanYuan^{1,2} and PAN XiaoDong²

1. 中国地震局地质研究所, 活动构造与火山重点实验室, 北京 100029

2. 中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

3. 吉林省地震局, 长春 130022

1. Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China

2. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China

3. Jilin Earthquake Administration, Changchun 130022, China

2011-12-09 收稿, 2012-03-01 改回.

Li N, Zhang LY, Zhao YW, Cao YY and Pan XD. 2012. Genesis of potassic minerals in the Xiaogulihe-Keluo-Wudalianchi-Erkeshan volcanic rock belt, Northeast China and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4):1173–1180

Abstract Xiaogulihe-Keluo-Wudalianchi-Erkeshan potassic volcanic rock belt in Northeast China, one of the well preserved volcanic clusters in China, was characterized by the high contents of potassium, alkali and high K_2O/Na_2O ratios (>1.2) in the rocks and was attributed to high potassium peralkaline volcanic rocks. Based on the research relating compositions, crystallization conditions of potassic minerals (phlogopites, leucites) in hosted volcanic rocks and mantle peridotite xenoliths with magma component and its source, the authors suggested that lithospheric extension in the studied region was responsible for low-degree decompression melting of phlogopite-bearing peridotites in the mantle and the potassic magma experienced leucites crystallization in shallow crust. As magma evolved, the magma tended to be Na-rich and xenomorphic nepheline and sodalite occurred in matrix glass resulting from the crystallization of lots of potassic minerals. The volatile-rich minerals as phlogopite, leucite, aptite, nepheline and sodalite in volcanic rocks and mantle xenoliths also provided the evidence of high abundance of H_2O , F, Cl and P in the magma.

Key words Xiaogulihe-Keluo-Wudalianchi-Erkeshan volcanic rock belt; Potassic volcanic rock; Phlogopite; Leucite; Volatile

摘要 东北黑龙江小古里河-科洛-五大连池-二克山火山岩带是我国近代保存最好的火山群之一, 此带火山岩的岩石化学特点全都强碱富钾, $K_2O/Na_2O > 1.2$, 属于一套高钾过碱性火山岩。通过对东北钾质火山岩及金云母橄榄岩地幔捕虏体中钾质矿物金云母、白榴石的成分、结晶环境与岩浆成分及来源关系的研究, 认为在岩石圈伸展构造背景下, 地幔金云母橄榄岩的低度部分熔融形成钾质岩浆, 钾质岩浆上升到地壳浅部经历了白榴石的结晶作用。岩浆演化晚期, 因钾质矿物大量晶出导致岩浆相对富钠而出现他形霞石和方钠石等填隙矿物。火山岩及地幔捕虏体中富挥发分矿物金云母、白榴石、磷灰石、霞石和方钠石还提供了钾质岩浆富含 H_2O 、F、Cl、P 等挥发分的证据。

关键词 小古里河-科洛-五大连池-二克山火山岩带; 钾质火山岩; 金云母; 白榴石; 挥发分

中图法分类号 P588.14

* 本文受国家自然科学基金项目(40672043)、中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室开放课题(LED2010B07)、中国地震局地质研究所基本科研业务专项(IGCEA-1102)和中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室开放课题(GIGIso-10-01)联合资助。

第一作者简介: 李霓, 女, 1967年生, 研究员, 深源岩石学与地球化学专业, E-mail: lini8589@hotmail.com

表1 东北钾质火山岩全岩化学成分(wt%)

Table 1 Major element compositions (wt%) of potassic volcanic rocks in Northeast China

| 样品号 | 采样地点 | 岩性 | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO ^T | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | LOI | Total | σ |
|---------|---------|--------|------------------|------------------|--------------------------------|------------------|------|-------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|--------|----------|
| 09HLJ01 | 克东二克山山顶 | 响岩质碱玄岩 | 52.02 | 2.49 | 13.43 | 8.71 | 0.11 | 6.68 | 5.76 | 3.77 | 5.47 | 1.11 | 0.53 | 100.08 | 9.5 |
| 06WD30 | 五大连池老黑山 | 响岩质碱玄岩 | 50.06 | 2.26 | 12.84 | 9.49 | 0.13 | 8.00 | 7.16 | 3.63 | 4.78 | 1.10 | 0 | 99.47 | 10.0 |
| 10HLJ29 | 莲花山熔岩台地 | 响岩质碱玄岩 | 48.67 | 2.39 | 13.35 | 9.17 | 0.15 | 6.77 | 7.39 | 3.71 | 5.02 | 0.90 | 1.28 | 98.80 | 13.4 |
| 09HLJ13 | 科洛南山 | 响岩质碱玄岩 | 52.00 | 2.25 | 13.75 | 9.09 | 0.12 | 6.54 | 6.31 | 3.83 | 4.81 | 0.98 | 0.41 | 100.09 | 8.3 |
| 09HLJ15 | 科洛荡子山 | 碱玄岩 | 44.61 | 2.21 | 11.00 | 10.41 | 0.15 | 12.78 | 9.74 | 3.54 | 4.37 | 1.02 | 0.84 | 100.67 | 38.9 |
| 09HLJ17 | 科洛孤山 | 碱玄质响岩 | 52.48 | 2.71 | 14.56 | 8.60 | 0.11 | 3.94 | 4.84 | 3.59 | 6.86 | 1.28 | 1.23 | 100.20 | 11.5 |
| 09HLJ20 | 科洛黑山 | 响岩质碱玄岩 | 47.22 | 2.13 | 11.38 | 9.60 | 0.15 | 10.58 | 9.06 | 3.61 | 4.63 | 1.01 | 1.61 | 100.98 | 16.1 |
| 09HLJ22 | 科洛小椅山 | 碱玄质响岩 | 52.76 | 2.03 | 12.86 | 8.15 | 0.11 | 8.87 | 4.87 | 4.12 | 5.29 | 0.83 | 0.46 | 100.35 | 9.1 |
| 09HLJ26 | 科洛卡山 | 响岩质碱玄岩 | 49.84 | 2.28 | 13.37 | 8.93 | 0.13 | 7.44 | 6.53 | 3.67 | 4.88 | 1.13 | 1.85 | 100.05 | 10.7 |
| 09HLJ29 | 科洛大椅山 | 响岩质碱玄岩 | 50.35 | 2.64 | 13.18 | 9.14 | 0.12 | 5.58 | 6.95 | 4.01 | 5.73 | 1.33 | 0.69 | 99.72 | 12.9 |
| 09HLJ32 | 科洛尖山顶部 | 碱玄岩 | 45.55 | 2.27 | 11.76 | 9.97 | 0.15 | 11.40 | 9.36 | 3.31 | 2.75 | 0.97 | 1.12 | 98.61 | 14.4 |
| 10HLJ08 | 小古里河马鞍山 | 响岩质碱玄岩 | 48.86 | 2.95 | 11.17 | 8.12 | 0.11 | 8.57 | 6.46 | 1.78 | 7.87 | 1.87 | 1.73 | 99.48 | 15.9 |

注:样品分别在南京大学现代分析中心及中科院同位素年代学与地球化学重点实验室测试,分析方法为XRF;LOI:烧失量; $\sigma = (K_2O + Na_2O)^2 / (SiO_2 - 43)$

1 概述

在我国东北地区有一条小古里河-科洛-五大连池-二克山钾质火山岩带,由多座火山组成,岩性相近,呈大致南北向分布于松辽盆地和大小兴安岭隆起之间的狭长地带,全长超过300km,整个钾质火山岩分布面积超过1400km²,它们也是我国近代保存最好的火山群之一。这一区域断裂构造发育,东邻NNE向的孙吴地堑断裂,西为嫩江大断裂,南部又有次一级的EW向讷漠尔河断裂。这些断裂虽形成于中生代以前,但其活动具有多期性和继承性(胡世玲等,1983;王承祺等,1987),为研究区钾质火山岩带的形成和分布提供了大地构造背景条件。

这条钾质火山岩带北端是小古里河马鞍山火山,位于内蒙松岭火车站东约37km,海拔668m,山顶有南北两个火口。科洛火山群位于黑龙江省嫩江县东北部的科洛河两岸,清晰可辨的火山锥有9个。五大连池火山群由14座火山组成,分布在讷漠尔河北岸,其中老黑山和火烧山在距今约300年前有过最新喷发活动。二克山火山位于钾质火山岩带南端的克东县城北东约2km,由东山和西山组成。这些火山外观上的共同特点是海拔及火山锥相对高度不高,多数保存完好,分布相对集中,岩石化学特点全都强碱富钾,可称为我国东北钾质火山岩带。

以往国内外学者曾对我国东北地区的这些钾质火山岩进行过多方面的研究工作(王承祺等,1987;刘蒙华,1986,1988,1989,1990;邱家骧等,1988;邱家骧和廖群安,1990;曲成柱和崔建伟,1991;王俊文和解广轰,1992;樊祺诚等,1999;Zou *et al.*, 2003;张文兰等,2007;邵济安等,2008,2009),其中对这些钾质火山岩的岩矿研究集中在橄榄石、辉石等几种主要造岩矿物上。最近几年,我们对东北小古里

河-科洛-五大连池-二克山钾质火山群进行了详细的野外地质考查,全面采集了新生代以来喷发的火山岩和其中的地幔捕虏体样品,在对火山岩全岩及矿物进行了分析测试的基础上,对其中的钾质矿物进行了重点研究。

钾质矿物是钾质火山岩中钾质成分的重要载体,它们在钾质火山岩的演化中扮演了重要角色,对于阐明我国东部深部地球动力学过程以及高钾质火山岩的成因具有重要意义。因此本文着重介绍金云母二辉橄榄岩捕虏体中的金云母和火山岩中的白榴石两种钾质矿物的成分、结构特点和结晶条件,从钾质矿物的出现和变化探讨东北钾质岩浆的起源与演化。

2 钾质火山岩岩石化学

钾质火山岩的岩石化学特点是富钾和碱,且挥发性组分较高(表1)。SiO₂和K₂O是正相关关系,除个别火山岩因SiO₂不饱和而K₂O含量较低外,其它火山岩K₂O含量都在4.37%~7.87%之间,K₂O/Na₂O比值绝大部分在1.23~1.91之间,仅科洛尖山火山岩中因钾含量较少而导致K₂O/Na₂O比值相对偏低(0.83),小古里河马鞍山火山岩极度富钾(K₂O=7.87%),K₂O/Na₂O比值高达4.43。火山岩中FeO^T和TiO₂含量也普遍较高。根据火山岩化学分类,本区火山岩属于一套高钾碱性火山岩,分别为碱玄岩、响岩质碱玄岩和碱玄质响岩等(图1)。岩石的碱性程度总体较高,其中只有一个样品的里特曼指数 σ 略小于9,其余都大于或远大于9,基本上都属于过碱性火山岩的范畴;若按Foley(1992)、Foley and Peccerillo(1992)的K₂O>3%,MgO>3%且K₂O/Na₂O>2则为超钾质岩类,如小古里河马鞍山火山岩为响岩质碱玄岩。

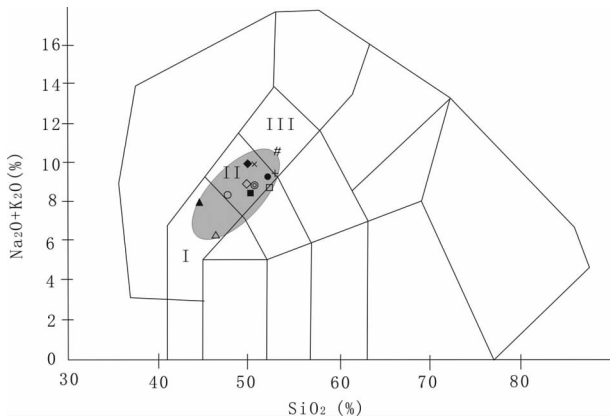


图1 本区钾质火山岩 TAS 分类图 (据 Middlemost, 1994)

I-碱玄岩;II-响岩质碱玄岩;III-碱玄质响岩;●-二克山;■-老黑山;◇-莲花山熔岩台地;□-南山;△-尖山;▲-荡子山;#-孤山;○-黑山;+ -小椅山;×-大椅山;◎-卡山;◆-马鞍山

Fig.1 TAS classification of studied potassic volcanic rocks (after Middlemost, 1994)

I-tephrite; II-phonotephrite; III-tephri-phonolite; IV-basaltic trachyandesite. ●-Erkeshan; ■-Laoheishan; ◇-Lianhuashan; □-Nanshan; △-Jianshan; ▲-Dangzishan; #-Gushan; ○-Heishan; + -Xiaoyishan; × -Dayishan; ◆-Ma'anshan

3 钾质火山岩及其地幔橄榄岩捕虏体岩相学

我们在大椅山和沐河南山火山岩中都发现了金云母二辉橄榄岩地幔捕虏体,呈浑圆和近似椭圆状,大小分别为 $3.5 \times 4\text{cm}$ 和 $1.5 \times 2.4\text{cm}$ 。尖晶石约 1%,金云母含量约 5% ~ 10%,斜方辉石约 10%,单斜辉石约 20%,橄榄石约 60%。捕虏体中矿物略有蚀变,镜下可见橄榄石颗粒边缘发生网格状蛇纹石化。大量金云母或呈鳞片状分散产出(图 2a),或呈片状集合体产出(图 2b)。在莲花山玄武质浮岩气孔中发现有 $8 \times 5\text{mm}$ 大小的片状金云母捕虏晶(图 2c)。

钾质火山岩为斑状结构,基质多为隐晶质,少量微晶质。斑晶有橄榄石(5% ~ 10%)、单斜辉石(2% ~ 5%)、白榴石(2% ~ 40%),微晶有单斜辉石、橄榄石、钛磁铁矿以及磷灰石等副矿物。橄榄石斑晶蚀变现象极其普遍,有熔蚀边呈港湾状,斑晶部分或整体发生伊丁石化。白榴石在火山岩中是常见矿物,呈圆粒状出现于斑晶和基质中,不同类型钾质火山岩中白榴石的大小、含量不等。磷灰石非常多见,呈短柱状或他形充填于斑晶和微晶矿物的间隙,或以子晶被包裹于白榴石斑晶矿物中。总体上,各火山岩的斑晶种类及含量均有不同且变化较大。

钾质火山岩及橄榄岩捕虏体中矿物的电子探针测试工作,大部分是在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针室完成的,少量在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家

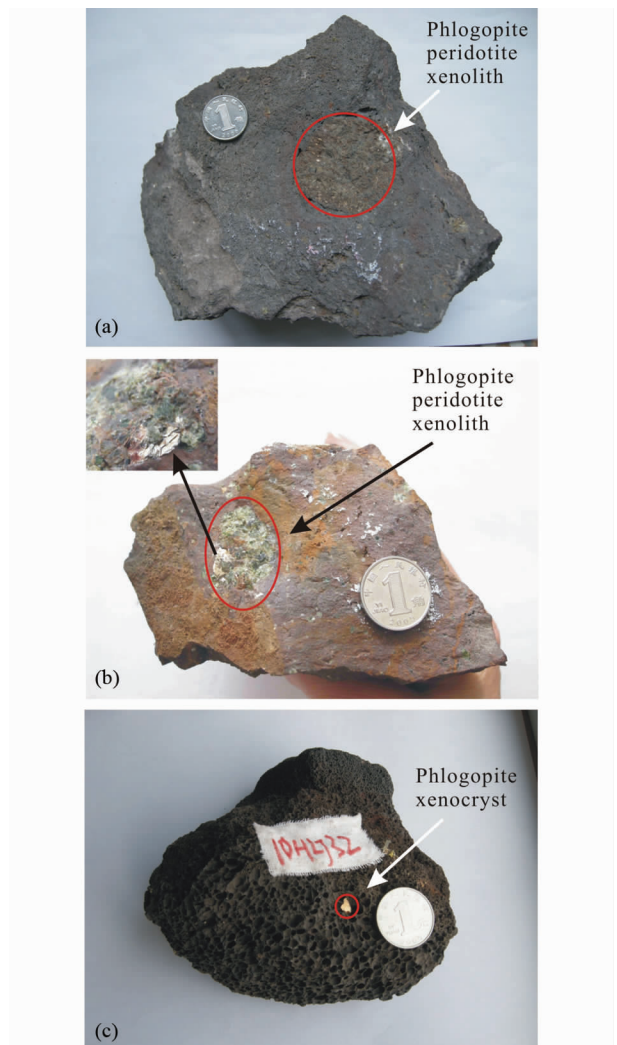


图2 金云母橄榄岩捕虏体和金云母捕虏晶

(a)-大椅山金云母橄榄岩捕虏体;(b)-沐河南山金云母橄榄岩捕虏体;(c)-莲花山火山岩中金云母捕虏晶

Fig.2 Phlogopite peridotite xenolith and phlogopite xenocryst (a)-phlogopite peridotite xenolith from Dayishan; (b)-phlogopite peridotite xenolith from Muhennanshan; (c)-phlogopite xenocrysts from Lianhuashan

重点实验室完成,仪器型号都为 JXA-8100M (JEOL),工作条件为加速电压 15kV,探针电流 20nA,束斑直径 $5\mu\text{m}$,对个别微晶改用束斑直径 $1\mu\text{m}$ 和 $2\mu\text{m}$,使用 ZAF 校正法。

4 钾质矿物

4.1 金云母

镜下单个金云母为长条状或片状,略有弯曲,呈黄褐色或红褐色,具微弱多色性,解理缝清晰(图 3)。

电子探针分析发现(表 2),大椅山二辉橄榄岩地幔捕虏体中金云母的化学成分比较均一,各种成分的变化幅度较小,

表2 金云母橄榄岩捕虏体的矿物化学成分(wt%)

Table 2 Mineral compositions of phlogopite peridotite xenolith (wt%)

| 地点 | 矿物 | SiO ₂ | TiO ₂ | Cr ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | FeO ^T | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | Total |
|-----|-----|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|-------|-------|-------------------|------------------|--------|
| 大椅山 | phl | 39.46 | 4.63 | 0 | 17.45 | 4.69 | 0 | 21.33 | 0.01 | 0.37 | 10.17 | 98.13 |
| | phl | 39.04 | 4.62 | 0 | 17.51 | 4.64 | 0.01 | 21.44 | 0 | 0.32 | 10.26 | 97.86 |
| | phl | 39.86 | 4.67 | 0 | 18.17 | 4.68 | 0.03 | 21.14 | 0 | 0.29 | 9.30 | 98.16 |
| | phl | 38.97 | 4.59 | 0.17 | 17.77 | 4.67 | 0.03 | 21.12 | 0.06 | 0.39 | 10.39 | 98.26 |
| | phl | 38.40 | 4.65 | 0.17 | 17.18 | 4.50 | 0.05 | 21.43 | 0 | 0.47 | 10.35 | 97.32 |
| | phl | 39.47 | 4.43 | 0.09 | 17.75 | 4.58 | 0 | 21.44 | 0.03 | 0.35 | 10.19 | 98.47 |
| | ol | 41.04 | 0 | 0 | 0.03 | 11.01 | 0.13 | 48.35 | 0.10 | 0.01 | 0 | 100.69 |
| | ol | 40.03 | 0 | 0 | 0.05 | 10.25 | 0.13 | 48.66 | 0.16 | 0.01 | 0 | 99.30 |
| | cpx | 51.36 | 1.05 | 0 | 7.08 | 3.05 | 0.07 | 13.93 | 22.78 | 0.62 | 0.01 | 99.97 |
| | cpx | 50.31 | 1.02 | 0 | 7.16 | 3.10 | 0.07 | 14.73 | 23.81 | 0.62 | 0 | 100.82 |
| 孤山 | opx | 56.24 | 0.11 | 0 | 4.69 | 7.77 | 0.25 | 30.69 | 0.32 | 0.03 | 0.01 | 100.11 |
| | opx | 54.77 | 0.09 | 0 | 4.24 | 7.97 | 0.18 | 31.44 | 0.38 | 0.03 | 0 | 99.10 |
| 孤山 | phl | 39.74 | 3.99 | 0.71 | 13.98 | 3.26 | 0 | 18.02 | 0.35 | 1.40 | 10.04 | 91.50 |

注:孤山数据引自刘蒙华,1986

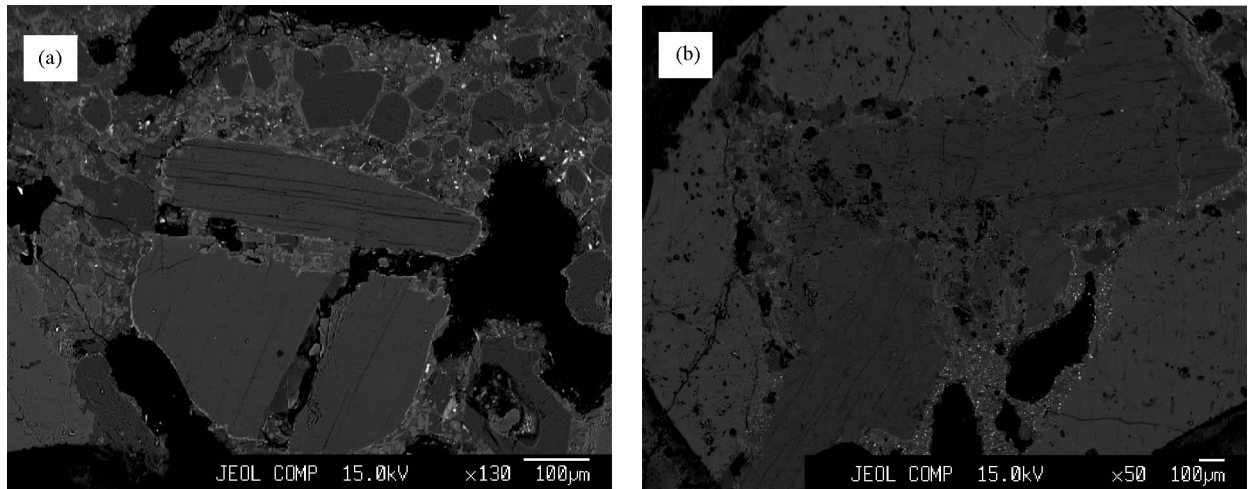


图3 大椅山地幔橄榄岩捕虏体中金云母的背散射照片

Fig. 3 Phlogopite backscattered images of phlogopite peridotite xenolith from Dayishan

其中 K₂O 平均含量为 10.11%, TiO₂ 平均含量高达 4.60%, MgO 平均含量 21.32%, 显示了地幔源区富 K、Mg 和 Ti 的特点。与早先报道的科洛孤山的金云母二辉橄榄岩捕虏体中的金云母成分相当(刘蒙华,1986),都属于地幔成因的金云母。橄榄石的 Fo 为 88.7~89.4,为含 Mg 较高的贵橄榄石,同样显示了幔源的特征。

4.2 白榴石

本区火山岩因 SiO₂ 含量偏低和钾含量高,普遍出现了白榴石斑晶,有些火山岩中白榴石斑晶含量较高的可达 30%(科洛尖山碱玄岩)~40%左右(小古里河马鞍山响岩质碱玄岩),密集成群分布(图 4)。白榴石斑晶自形程度较高,为白色或浅灰色四角三八面体,镜下白榴石横截面多为浑圆或八边形粒状,偶见聚片双晶,背散射照片还显示常有裂纹(图

4a-c)。根据白榴石中含子晶矿物与否,白榴石可分为含子晶和不含子晶两类,常见针状(辉石)、点状(钛铁氧化物)子晶矿物呈同心圆状分布(图 4d)。

白榴石电子探针测定结果表明,这些白榴石的成分比较均一, SiO₂ 含量在 53.23%~60.57% 之间变化, K₂O 含量除五大连池老黑山的白榴石为 15.01%~18.13% 略低外,其余都在 19.64%~20.99% 间变化(表 3),是非常典型的高钾矿物。子晶矿物多为次透辉石、透辉石和磁铁矿。火山岩中普遍出现白榴石,与岩浆中钾含量高有非常密切的关系,因为岩浆中 SiO₂ 越低, K₂O 及 K₂O/Na₂O 越高,越有利于形成白榴石。

4.3 霞石、方钠石

霞石通常产于富含 Na₂O 而缺少 SiO₂ 的碱性岩中,是一

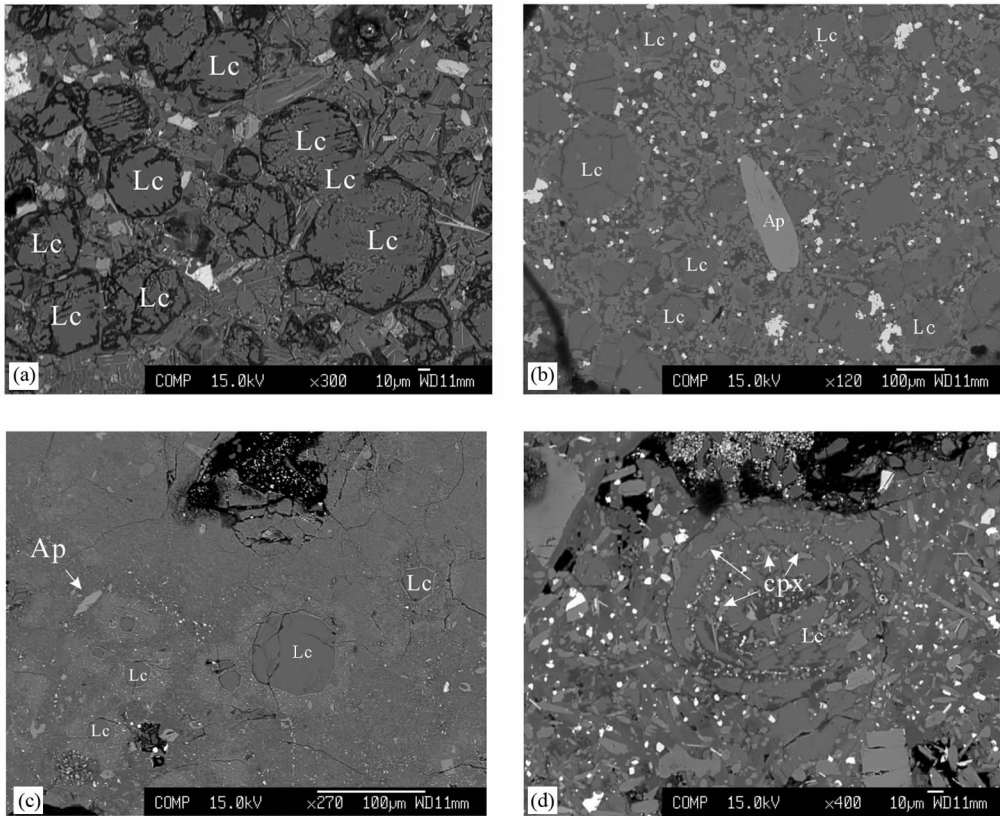


图4 东北钾质火山岩中白榴石(Lc)的背散射照片

(a)-小古里河马鞍山样品:横切面八边形、六边形粒状;(b)-尖山样品;(c)-孤山样品;(d)-卡山样品:层圈状结构,子晶辉石和钛铁氧化物呈同心圆状分布

Fig.4 Backscattered images of leucites in potassic volcanic rocks from Northeast China

(a)-sample from Xiaogulihe Ma'anshan: octolateral and hexagonal granular leucites; (b)-sample from Jianshan; (c)-sample from Gushan; (d)-sample from Kashan: concentric structure, pyroxenes and ferrotitanium oxides daughter crystals situated concentrically

表3 东北钾质火山岩中白榴石及其子晶成分(wt%)

Table 3 Compositions of leucite and its daughter crystals (wt%) in potassic volcanic rocks from Northeast China

| 样品号 | 采样地点 | SiO ₂ | TiO ₂ | Cr ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | FeO ^T | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | Total |
|----------|------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|-------|-------|-------------------|------------------|--------|
| 09HLJ01 | 二克山 | 57.21 | 0.20 | 0.01 | 21.56 | 0.82 | 0 | 0.03 | 0.06 | 0.1 | 19.92 | 99.97 |
| 09HLJ04 | 二克山 | 55.97 | 0.24 | 0.01 | 21.43 | 0.59 | 0.01 | 0.02 | 0.30 | 0.09 | 19.98 | 98.66 |
| 06WD07* | 老黑山 | 59.43 | 0.24 | 0 | 21.12 | 0.85 | 0 | 0 | 0.09 | 0.07 | 18.13 | 100.00 |
| 06WD07* | 老黑山 | 60.57 | 0.29 | 0 | 22.25 | 0.81 | 0.02 | 0.04 | 0.12 | 0.10 | 15.01 | 99.38 |
| 09HLJ32 | 尖山 | 54.91 | 0.25 | 0.02 | 22.22 | 0.55 | 0.01 | 0 | 0 | 0.57 | 20.18 | 98.72 |
| 09HLJ20 | 科洛黑山 | 54.40 | 0.29 | 0 | 22.29 | 0.70 | 0 | 0.04 | 0 | 0.20 | 20.99 | 98.97 |
| 09HLJ14 | 荡子山 | 54.26 | 0.22 | 0 | 22.12 | 0.56 | 0 | 0 | 0 | 0.34 | 20.57 | 98.13 |
| 09HLJ14 | 荡子山 | 54.14 | 0.27 | 0.04 | 21.99 | 0.75 | 0.02 | 0 | 0 | 0.51 | 20.59 | 98.42 |
| 09HLJ14 | 荡子山 | 54.49 | 0.17 | 0 | 21.49 | 0.67 | 0 | 0.05 | 0 | 0.15 | 20.81 | 97.84 |
| 09HLJ17 | 孤山 | 53.23 | 0.28 | 0.01 | 20.60 | 0.57 | 0 | 0.05 | 0 | 0.20 | 20.15 | 95.11 |
| 09HLJ17 | 孤山 | 56.82 | 0.35 | 0 | 21.48 | 0.94 | 0 | 0.06 | 0.04 | 0.25 | 19.64 | 99.73 |
| 09HLJ26 | 卡山 | 55.93 | 0.22 | 0 | 21.44 | 0.69 | 0.04 | 0.13 | 0.13 | 0.23 | 20.13 | 98.95 |
| 10HLJ05 | 科洛河边 | 54.25 | 0.21 | 0.24 | 20.56 | 0.43 | 0 | 0.04 | 0 | 0.13 | 20.24 | 96.08 |
| 10HLJ05 | 科洛河边 | 56.86 | 0.22 | 0.07 | 21.53 | 0.38 | 0 | 0.02 | 0 | 0.21 | 20.10 | 99.40 |
| 10HLJ05 | 科洛河边 | 54.82 | 0.19 | 0.06 | 20.96 | 0.37 | 0.01 | 0 | 0 | 0.14 | 20.57 | 97.15 |
| 10HLJ05 | 科洛河边 | 55.60 | 0.19 | 0.03 | 21.26 | 0.44 | 0 | 0.04 | 0 | 0.12 | 20.49 | 98.15 |
| 10HLJ11 | 小古里河 | 54.33 | 0.27 | 1.30 | 20.91 | 1.00 | 0 | 0.07 | 0.06 | 0.38 | 19.88 | 98.20 |
| 09HLJ14# | 荡子山 | 47.28 | 2.75 | 0.02 | 5.91 | 6.90 | 0.13 | 12.45 | 22.04 | 0.95 | 1.20 | 99.63 |

注: * 两个数据引自 Li *et al.*, 2009; #为白榴石中子晶次透辉石

表4 科洛火山岩中霞石成分(wt%)

Table 4 Electron probe analyses of nephelines in Keluo volcanic rocks (wt%)

| 样品号 | 采样地点 | SiO ₂ | TiO ₂ | Cr ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | FeO ^T | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | Total |
|---------|------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|------|------|-------------------|------------------|-------|
| 09HLJ32 | 尖山 | 52.87 | 0.94 | 0.06 | 24.34 | 2.41 | 0.04 | 0.58 | 0.42 | 14.14 | 1.84 | 97.67 |
| 09HLJ32 | 尖山 | 51.31 | 0.33 | 0 | 25.77 | 1.54 | 0 | 0.41 | 0.31 | 14.81 | 1.53 | 96.00 |
| 09HLJ20 | 大黑山 | 44.15 | 0.25 | 0 | 27.88 | 1.48 | 0 | 1.29 | 3.84 | 15.55 | 3.68 | 98.25 |
| 09HLJ14 | 荡子山 | 42.87 | 0.17 | 0.03 | 30.89 | 1.60 | 0.03 | 0.62 | 0.83 | 16.54 | 4.92 | 98.51 |
| 09HLJ15 | 荡子山 | 45.66 | 0.12 | 0 | 29.95 | 1.39 | 0 | 0.11 | 0.11 | 17.30 | 3.47 | 98.11 |
| 09HLJ15 | 荡子山 | 46.73 | 0.08 | 0 | 29.35 | 1.46 | 0.03 | 0.07 | 0.09 | 17.08 | 3.29 | 98.26 |

表5 科洛火山岩中方钠石成分(wt%)

Table 5 Electron probe analytical results of sodalites in Keluo volcanic rocks (wt%)

| 样品号 | 采样地点 | SiO ₂ | TiO ₂ | Cr ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | FeO ^T | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | Cl | Total |
|---------|------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|------|------|-------------------|------------------|------|-------|
| 09HLJ20 | 黑山 | 40.25 | 0.24 | 0.04 | 26.73 | 1.75 | 0.01 | 1.68 | 2.40 | 20.25 | 0.76 | 4.75 | 97.80 |
| 09HLJ14 | 荡子山 | 36.94 | 0.04 | 0 | 28.77 | 0.47 | 0.01 | 0 | 0.33 | 23.79 | 0.20 | 6.16 | 95.33 |

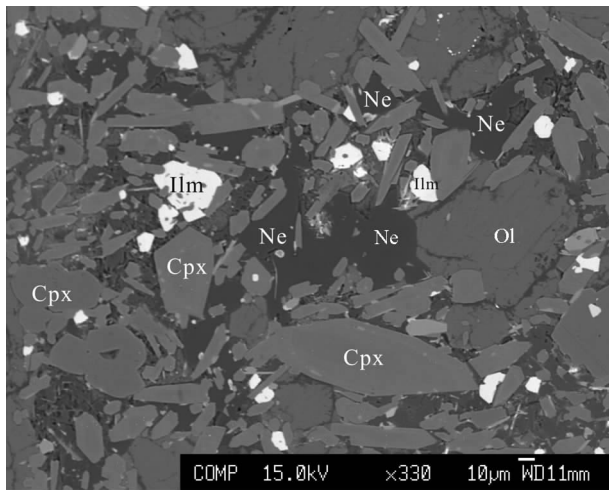


图5 东北钾质火山岩中充填状霞石(Ne)的背散射照片
Fig. 5 Backscattered images of interstitial nephelines in potassic volcanic rocks from Northeast China

种标准的SiO₂不饱和钠质似长石矿物,它的结晶条件不像白榴石那样明显受冷却速率、水气压力的制约,而主要取决于岩浆成分。

科洛荡子山、尖山和大黑山火山岩中SiO₂严重不饱和(44.61%~47.22%),均出现了霞石[Na(AlSi₃O₈)],根据其化学成分(Na₂O 14.14%~17.30%、K₂O 1.53%~4.92%和CaO 0.09%~3.84%,表4)可见,霞石中普遍含少量钾霞石[K(AlSi₃O₈)],甚至在大黑山火山岩的霞石中还含较多钙霞石,这反映了白榴石等钾质矿物晶出后晚期岩浆的成分变化。因霞石结晶最晚,多呈他形充填于基质中(图5)。荡子山火山岩中发现的白榴霓霞岩包体(邵济安等,2008)亦为岩浆演化晚期的产物。

科洛荡子山和大黑山的火山岩中还出现含钠较高并富挥发分Cl的似长石矿物方钠石(表5)。方钠石通常也是产于碱性岩中,并不常见,但它常与霞石共生,因此在荡子山和

大黑山的火山岩中就同时出现了方钠石与霞石,均为他形。实验岩石学表明,在一个SiO₂不饱和的NaAlSi₃O₈-SiO₂-NaCl-H₂O体系中,水压1kb时方钠石在400~800℃时保持稳定(Deer *et al.*, 1992),暗示方钠石也是晚期结晶矿物。从矿物成分到结晶形态均表明霞石和方钠石是在白榴石等钾质矿物晶出后导致晚期岩浆相对富钠而出现的。

5 讨论

钾质火山岩一般属于强碱性岩,其分布常受规模较大的断裂所控制。从大的构造环境看,研究区位于中国东部大陆裂谷带的大兴安岭-太行山火山裂谷带内(邓晋福等,1993);从小范围看,位于松辽裂谷系的东北边缘。大陆裂谷作用导致了岩石圈的拉伸,而岩石圈伸展不仅导致陆下岩石圈地幔深部含金云母石榴石橄榄岩发生低程度减压熔融(5%~7%,Zou *et al.*, 2003),为区内钾质火山岩提供了岩浆来源,也导致岩石圈变薄形成局部薄弱带,为地下深部流体上升和交代作用提供了通道和条件。

根据本文提供的东北小古里河马鞍山、科洛火山群、五大连池火山群及二克山钾质火山及其金云母地幔橄榄岩捕虏体,进一步提供了金云母橄榄岩是钾质岩浆母岩的证据。金云母橄榄岩低度部分熔融形成钾质岩浆,在岩浆上升过程中首先晶出白榴石。因为在NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-SiO₂体系中,白榴石是富钾熔体中最早结晶的矿物已为实验所证实(Deer *et al.*, 1992),其结晶及稳定区深度不超过9km(图6)。白榴石的成因既与岩浆成分有关,也与结晶条件密切相关。因其化学性质不稳定,在火山岩中并不多见,所以白榴石的出现可作为火山岩相对年轻的标志。随着岩浆中大量白榴石的结晶,晚期岩浆趋向富钠质岩浆演化,故在基质中出现霞石、方钠石等矿物。本区火山岩中金云母、黑云母、磷灰石、霞石、方钠石、榍石等富含H₂O、F、Cl、P等挥发分无一不与钾质岩浆有关,五大连池火山岩矿物中的包裹体挥发分同样富含

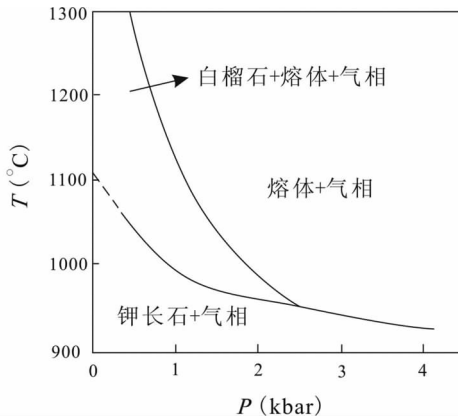


图6 $KAlSi_3O_8$ - H_2O 系统 P - T 平面投影图(据 Deer *et al.*, 1992)

Fig. 6 Projection on the P - T plane of the system $KAlSi_3O_8$ - H_2O (after Deer *et al.*, 1992)

H_2O 、F、Cl、P(夏林圻等, 1990; 王俊文和解广轰, 1992) 可为佐证。

6 结论

通过本文钾质火山岩及其金云母橄榄岩捕虏体中的金云母、白榴石、霞石、方钠石等矿物的研究, 我们得出以下结论:

(1) 钾质火山岩属于一套高钾过碱性火山岩, 包括碱玄岩、响岩质碱玄岩、碱玄质响岩。

(2) 金云母橄榄岩的低度部分熔融形成钾质岩浆, 钾质岩浆上升到地壳浅部结晶出白榴石, 随着白榴石的大量晶出导致晚期岩浆相对富钠质, 出现填隙状产出的霞石和方钠石。

(3) 钾质火山岩中富挥发分矿物金云母、白榴石、磷灰石、霞石和方钠石提供了钾质岩浆富含 H_2O 和 F、Cl、P 等挥发分的证据。

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所电子探针室毛骞和马玉光及南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室张文兰在电子探针测试中的热情支持和帮助; 非常感谢樊祺诚研究员和两位审稿人对本文提出的宝贵修改意见。

References

Deer WA, Howie RA and Zussman J. 1992. An Introduction to the Rock-forming Minerals. Pearson Education Limited, 1-696
Deng JF, Zhao HL, Ye DL, Lu FX and Mo XW. 1993. The shift of Cenozoic volcanoes and the spreading and drifting of continental rifts in the eastern China. *Experimental Petroleum Geology*, 15(1): 1-10 (in Chinese with English abstract)

Fan QC, Liu RX and Sui JL. 1999. Petrology and geochemistry of rift type Wudalianchi K-rich volcanic zone. *Geological Review*, 45 (Suppl.): 358-368 (in Chinese with English abstract)
Foley S. 1992. Petrological characterization of the source components of potassic magmas: Geochemical and experimental constraints, *Lithos*, 28: 187-204
Foley S and Peccerillo A. 1992. Potassic and ultrapotassic magmas and their origin, *Lithos*, 28: 181-185
Hu SL, Wang SS, Liu JQ, Sang HQ, Qiu J and Jiang WY. 1983. K-Ar ages and some characters of strontium, oxygen isotopes in Cenozoic Wudalianchi basalts, northeast China. *Petrology Research*, 2: 22-31 (in Chinese with English abstract)
Li N, Fan QC, Sun Q and Sun RB. 2009. Litho-geochemistry of volcanic rocks and hosted melt inclusions in Wudalianchi, Heilongjiang, China. *Journal of Earth Science*, 20(5): 771-783
Liu MH. 1986. Discovery of phlogopite-spinel ilherzolithic xenoliths in Keluo alkali basalt. *Geology-Geochemistry*, 7: 69-70 (in Chinese)
Liu MH. 1988. Preliminary study of inclusions in potassic volcanic rocks and their mantle inclusions from Keluo Heilongjiang Province. *Journal of East China College of Geology*, 11(1): 55-58 (in Chinese with English abstract)
Liu MH. 1989. Mineralogy of ultramafic inclusions and xenocrysts in K-rich volcanic rocks from Keluo, Heilongjiang Province. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 9(4): 59-66 (in Chinese with English abstract)
Liu MH. 1990. Petrology study on the inclusions of iolite and leucitite. *Journal of East China College of Geology*, 13(2): 41-50 (in Chinese with English abstract)
Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37: 215-224
Qiu JX, Liao QA and Du XR. 1988. Petrological characteristics and genetic analysis of the belt of potassium-rich volcanic rocks from Erkeshan, Wudalianchi and Keluo of Heilongjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 7(2): 97-108 (in Chinese with English abstract)
Qiu JX and Liao QA. 1990. Light-colored minerals of K-rich volcanic in Wudalianchi, Erkeshan and Keluo volcanic groups, Heilongjiang Province. *Earth Science*, 15(4): 357-366 (in Chinese with English abstract)
Qu CZ and Cui JW. 1991. The features of the Cenozoic K-rich basalt of the Keluo volcanic group and its formed tectonic setting and discussion on the cause of K-rich. *Heilongjiang Geology*, 2(2): 50-58 (in Chinese with English abstract)
Shao JA, Zhang WL and Zhang C. 2008. Mantle enrichment of Wudalianchi volcanic rock belt. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2485-2494 (in Chinese with English abstract)
Shao JA, Zhang WL, Zhou XH and Zhang C. 2009. Discovery of Xiaogulihe perpotassic basic and ultrabasic volcanic rock in the Northwest Heilongjiang Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2642-2650 (in Chinese with English abstract)
Wang CQ, Du XR and Liu JX. 1987. Keluo-Wudalianchi-Erkeshan volcanic clusters. *Journal of East China Geological Institute*, 10(2): 1-261 (in Chinese)
Wang JW and Xie GH. 1992. Geochemistry of Wudalianchi potassic volcanic rocks. In: Liu RX (ed.). *Chronology and Geochemistry of Cenozoic Volcanic Rocks in China*. Beijing: Seismology Press, 213-227 (in Chinese)
Xia LQ, Liu WF and Tang NA. 1990. Abundances of fluorine, chlorine, sulfur and phosphorus and their evolution in volcanic magmas from Wudalianchi. *Geochimica*, 3: 197-206 (in Chinese with English abstract)
Zhang WL, Shao JA, Xu XS and Wang RC. 2007. Discovery of P- and F-rich mantle melt/fluid and its metasomatism in mantle peridotite xenoliths in Keluo. *Chinese Science Bulletin*, 52(8): 931-938 (in Chinese)
Zou H, Mary R, Liu YS, Yao YP, Xu XS and Fan QC. 2003. Constraints on the origin of historic potassic basalts from northeast China by U-Th disequilibrium data, *Chemical Geology*, 200(1-2): 189-201

附中文参考文献

- 邓晋福, 赵海玲, 叶德隆, 路凤香, 莫宣学. 1993. 中国东部新生代火山的迁移与大陆裂谷的扩张和大陆漂移. 石油实验地质, 15(1): 1-10
- 樊祺诚, 刘若新, 隋建立. 1999. 五大连池裂谷型富钾火山岩带的岩石学与地球化学. 地质论评, 45(增刊): 358-368
- 胡世玲, 王松山, 刘嘉麒, 桑海清, 裘冀, 蒋文毓. 1983. 五大连池新生代玄武岩的 K-Ar 年龄和锶、氧同位素特征. 岩石学研究, 2: 22-31
- 刘蒙华. 1986. 在科洛碱性玄武岩中发现金云母尖晶石二辉橄榄岩包体. 地质地球化学, 7: 69-70
- 刘蒙华. 1988. 黑龙江科洛富钾火山岩及其地幔包体中包裹体的初步研究. 华东地质学院院报, 11(1): 55-58
- 刘蒙华. 1989. 黑龙江科洛富钾火山岩中超镁铁岩包体和捕虏晶的矿物学研究. 矿物岩石, 9(4): 59-66
- 刘蒙华. 1990. 石榴霓霞岩包体的岩石学及成因研究. 华东地质学院学报, 13(2): 41-50
- 邱家骧, 廖群安, 杜向荣. 1988. 黑龙江二克山、五大连池、科洛富钾火山岩带的岩石特征及成因分析. 岩石矿物学杂志, 7(2): 97
- 邱家骧, 廖群安. 1990. 黑龙江省五大连池、科洛二克山火山群富钾火山岩中的浅色矿物. 地球科学, 15(4): 357-366
- 曲成柱, 崔建伟. 1991. 新生代科洛火山群富钾玄武岩特征及形成的构造环境与富钾原因的初探. 黑龙江地质, 2(2): 50-58
- 邵济安, 张文兰, 张聪. 2008. 五大连池火山岩带的地幔富集作用. 岩石学报, 24(11): 2485-2494
- 邵济安, 张文兰, 周新华, 张聪. 2009. 黑龙江西北部小古里河过钾质基性、超基性火山岩的发现. 岩石学报, 25(10): 2642-2650
- 王承祺, 杜向荣, 刘继贤. 1987. 科洛-五大连池-二克山火山群. 华东地质学院学报, 10(2): 1-261
- 王俊文, 解广轰. 1992. 五大连池钾质熔岩的地球化学. 见: 刘若新编. 中国新生代火山岩年代学与地球化学, 北京: 地震出版社, 213-227
- 夏林圻, 刘文峰, 唐南安. 1990. 五大连池火山岩浆中氟、氯、硫、磷的丰度和演化. 地球化学, 3: 197-206
- 张文兰, 邵济安, 徐夕生, 王汝成. 2007. 科洛橄榄岩地幔捕虏体中富 P, F 地幔熔/流体的发现及其交代作用. 科学通报, 52(8): 931-938