

俄罗斯贝加尔裂谷带中呼兰霍博克火山岩岩石学及地球化学研究^{*}

郭璇 朱永峰^{**}

GUO Xuan and ZHU YongFeng^{**}

造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2006-9-15 收稿, 2008-4-8 改回.

Guo X and Zhu YF. 2008. Petrology and geochemistry of Hulanhoboke volcano in Baikal rift, Russia. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5):1021–1033

Abstract The volcanic cone of Hulanhoboke Volcano in Tongjing basin, Baikal rift region, consists of volcanic debris such as volcanic bombs, volcanic ashes and mafic lava. Olivine xenocrysts characterize with higher $Mg^{\#}$ relative to olivine phenocrysts in basalt. Some plagioclase phenocrysts have inverse zone and core-mantle-rim textures, and the mantle of plagioclase phenocrysts shows decompressing decomposition texture. One kind clinopyroxene rim shows decomposition texture. Based on chemical composition, this basalt belongs to shoshonite series; the light rare earth elements are strongly enriched and differentiate from the heavy rare earth elements obviously. Their geochemical characteristics of trace elements and isotopic compositions are similar to OIB. Petrologic and geochemical research indicates that the source of olivine basalt and the fraction of magma may relate to mantle plume. The magma eruption was rather fast, which led the formation of observed decomposition texture in plagioclase and clinopyroxene xenocrysts. The magma was rarely contaminated by continental crustal material. The studied magma captured a little shallow wall-rock which occurs as rhyolitic inclusion.

Key words Baikal rift; Olivine basalt; Decomposition texture; Russia

摘要 位于贝加尔裂谷带通京盆地中的呼兰霍博克火山火山锥由火山弹、火山灰等火山碎屑岩和基性熔岩(橄榄玄武岩)组成。橄榄玄武岩中橄榄石可分为具有较高 $Mg^{\#}$ 值的捕虏晶和 $Mg^{\#}$ 值相对较低的斑晶。部分斜长石斑晶具有核-幔-边结构,且幔部发生减压分解,一些单斜辉石晶体(俘虏晶)边部发生了减压分解。根据岩石的化学成分,该玄武岩属于橄榄粗玄岩系列,轻稀土强烈富集,重稀土相对亏损,轻重稀土之间分异较大,具有与 OIB 相似的微量元素和同位素地球化学特征。岩石学和元素地球化学研究表明,该橄榄玄武岩的源区和岩浆的形成可能与地幔柱活动有关;岩浆演化经历了压力骤减的过程,在岩浆快速上升过程中,深部形成的矿物(可能是地幔矿物的俘虏晶)减压分解。快速上升的岩浆几乎未受大陆地壳的混染,仅捕获了少量流纹质熔体。

关键词 贝加尔裂谷; 橄榄玄武岩; 减压分解; 俄罗斯

中图法分类号 P588.145

贝加尔裂谷的形成与演化以及相关的地质与环境科学问题长期以来备受关注(Zonenshain and Savostin, 1981; Polyansky, 2002; Suvorov *et al.*, 2002; Ionov, 2002; Poort and Klerkx, 2004; Hus *et al.*, 2006; Lebedev *et al.*, 2006; Yakovlev *et al.*, 2007)。大陆裂谷的地球动力学背景通常分

为主动裂谷和被动裂谷(Spohn and Skhwber, 1982)。部分学者认为贝加尔裂谷是岩石圈地幔之下异常热上地幔发生穹隆作用的结果(Gao *et al.*, 1994; Turutanov *et al.*, 2003), Zonenshain and Savostin(1981)认为贝加尔裂谷是印度板块与亚洲大陆碰撞后水平拉张的结果,也有人提出多种因素综

^{*} 国家自然科学基金项目(40730314)资助。

第一作者简介:郭璇, 1982 年生, 硕士研究生, 地球化学专业(现在 University of Michigan 攻读博士学位)

^{**} 通讯作者: 朱永峰, 教授, E-mail: yfzhu@pku.edu.cn

合作用的模型 (Petit *et al.*, 1996; Lesne *et al.*, 2000; Willson, 2001)。来自不同源区的岩浆具有特征的微量元素和同位素地球化学性质, 一些学者已经对贝加尔地区通京盆地内的玄武岩和粗面玄武岩以及其中的地幔捕虏体进行了研究 (Ashchepkov *et al.*, 2003; Esin *et al.*, 1995; Ashchepkov *et al.*, 2001; Naumov *et al.*, 2006)。然而, 在贝加尔裂谷区尚未找到大规模酸性岩浆。我们在通京盆地呼兰霍博克休眠火山的橄榄玄武岩中找到了流纹岩包体。本文通过对玄武岩和流纹岩包体岩石学和地球化学研究, 初步探讨了岩浆源区的地球化学性质, 研究了岩浆的形成机制及其演化过程。

1 地质背景

贝加尔裂谷带位于亚洲的中部, 从蒙古北部的库苏古尔湖向东北方向穿行到雅库特南部的奥廖克马河, 呈巨大的“S”形, 总长 1600 多公里 (Mats *et al.*, 2001)。贝加尔裂谷带及其周缘地区广泛分布有新生代玄武岩 (图 1a), 可识别出三个火山旋回: 晚白垩世—古新世、始新世—渐新世以及渐新世后。不同旋回不同地区的火山岩岩石化学特点各不相同, 形成了从强碱性到拉斑玄武岩连续系列, 以碱性橄榄玄武岩为主 (Esin *et al.*, 1995; Ashchepkov *et al.*, 2001; Mats *et al.*, 2001; Ashchepkov *et al.*, 2003; Naumov *et al.*, 2006) 通京盆地位于贝加尔裂谷西南端, 伊尔库茨克市西南, 呈东西向展布, 南缘受东西向断裂控制, 北缘主要受北西西向东萨彦断裂带控制。通京盆地在渐新世—早上新世出现了多次玄武岩喷发, 至少形成了 15 座火山, 它们平行于通京断裂分布 (杨巍然等, 1995, 图 1b), 其中的呼兰霍博克休眠火山最近一次于 1886 年喷发, 该火山锥由火山弹、火山灰等火山碎屑岩和基性熔岩组成。

2 分析测试方法

矿物的化学成分使用北京大学地球与空间科学学院的电子探针 JXA-8100 测试, 标样采用美国 SPI 公司的 53 种矿物, 加速电压 15kV, 束流 1×10^{-8} 安培, 束斑 $1 \mu\text{m}$ 。全岩主量元素由河北省地质矿产局廊坊实验室采用化学湿法分析, 分析精度小于 0.5%。在北京大学采用高分辨等离子质谱仪 (ICP-MS) 测量全岩样品的微量元素含量, 测定元素 RSD 小于 5%。同位素在中科院地质与地球物理所采用常规离子交换色谱法分离铷、锶, 同位素比值用 Finnigan MAT 262 测定, 所有误差以及标准偏差都是 2σ 。同位素的分析方法与样品处理过程见 Zhu *et al.* (2005, 2006)。

3 岩相学特征

呼兰霍博克休眠火山的火山弹呈椭球形, 大小不一。

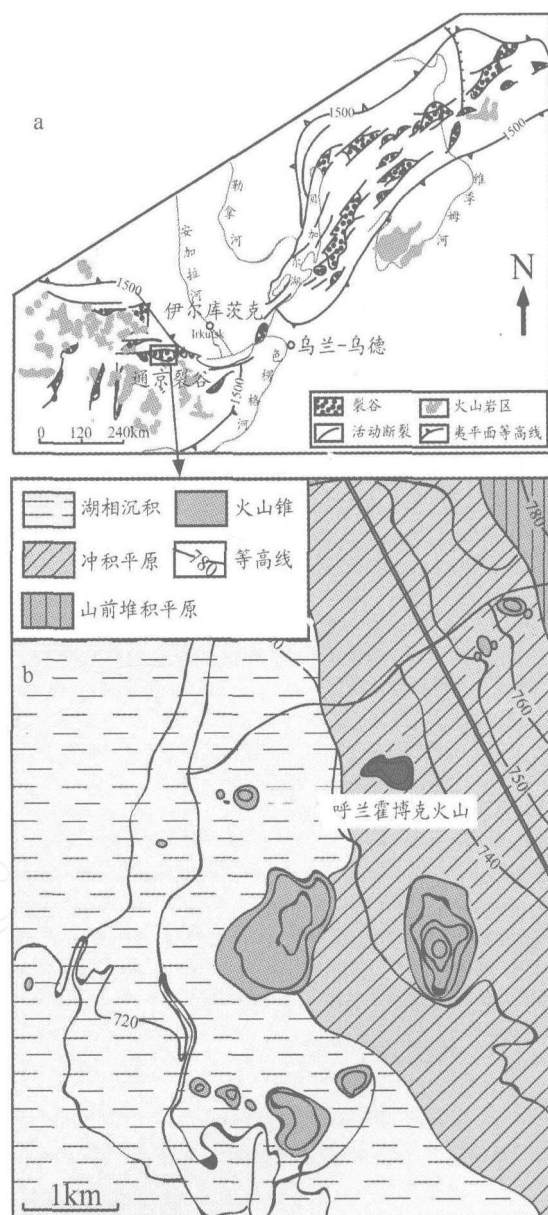


图 1 a) 贝加尔裂谷带裂谷中火山区分布简图; b) 通京盆地火山分布图 (根据杨巍然等改绘, 1995)

Fig. 1 a) Sketch map of rift and volcanic rock in Baikal rift region; b) the distribution of volcano in Tongjing basement (modified after Yang *et al.*, 1995)

外壳为红褐色多孔玻璃, 向内逐渐变为灰黑色多孔中空玄武岩。火山灰和火山渣呈红褐色、黄褐色。基性熔岩为橄榄玄武岩, 呈灰黑色, 气孔发育, 气孔含量随层理从上到下逐渐减少, 最多可达 50%, 最少约占 10%。橄榄玄武岩为斑状结构 (图 2a), 气孔构造, 斑晶为黄绿色橄榄石、灰黑色辉石、白色斜长石, 基质为隐晶质—玻璃质; 基质为间粒—间隐结构, 由橄榄石 (~5%)、辉石 (2%~3%)、板条状斜长石 (15%)、粒状柱状钛铁矿 (1%) 以及玻璃质 (30%) 组成。该玄武岩中橄榄石主要为贵橄榄石 ($Fo = 85 \sim 70$, 图 4a), 粒径为 0.25mm

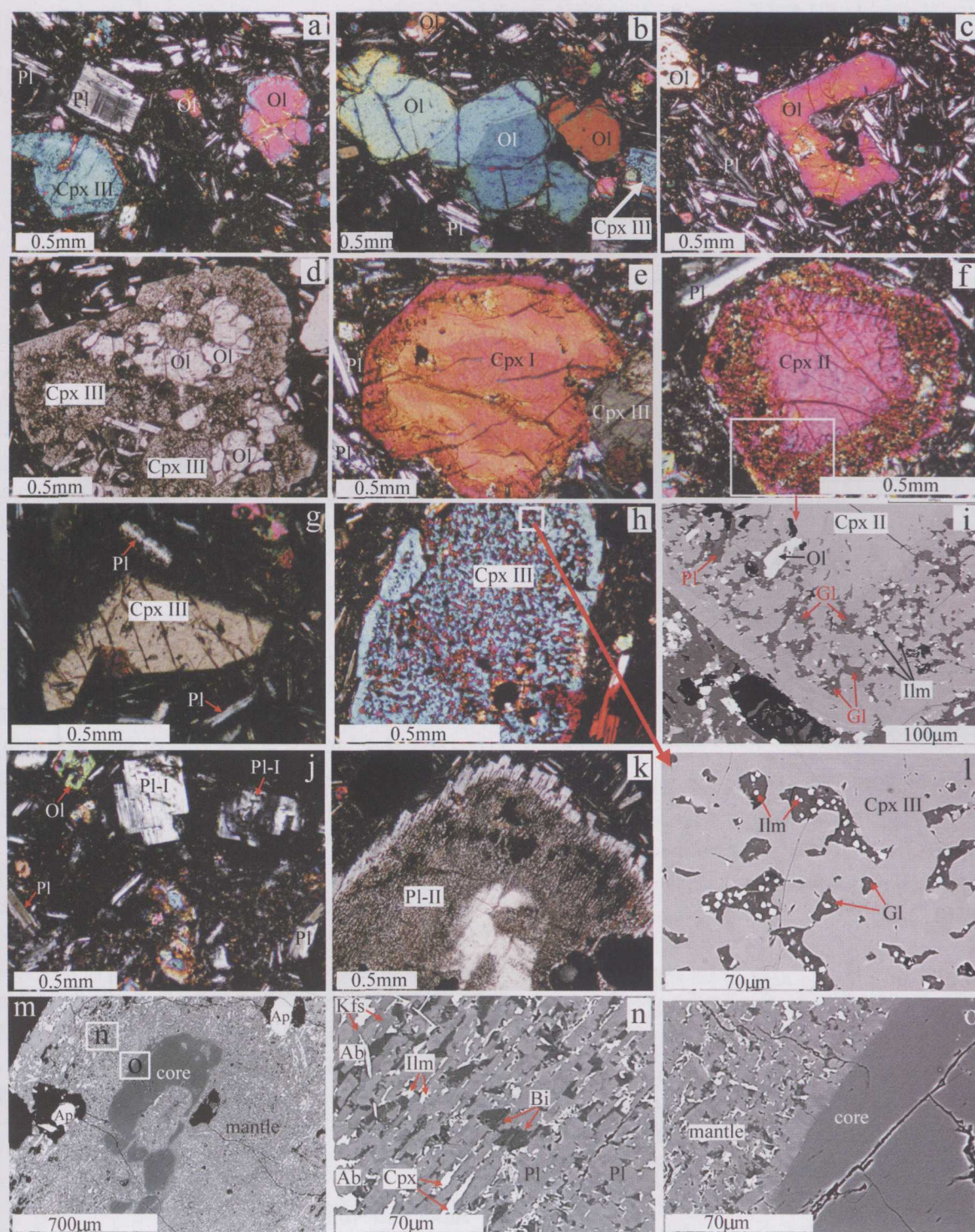


图2 呼兰霍博克玄武岩的岩相学照片和电子显微镜图像

a) 橄榄石斑晶 (正交偏光); b) 橄榄石扭折带 (正交偏光); c) 橄榄石骸晶 (正交偏光); d) 反应残留的橄榄石 (单偏光); e) 单斜辉石环带结构 (正交偏光); f) 单斜辉石边部减压分解结构 (正交偏光); g) 成分均匀的单斜辉石 (正交偏光); h) 单斜辉石整体发生减压分解 (正交偏光); i) f 的局部, 单斜辉石边部减压分解形成具有单斜辉石成分的玻璃 (Gl)、钛铁矿 (Ilm) 和斜长石 (BSE); j) 结构均匀的斜长石 Pl-I (正交偏光); k) 具核-幔-边结构的斜长石 Pl-II (正交偏光); l) h 的局部, 单斜辉石分解残留具单斜辉石成分的玻璃 (Gl) 和钛铁矿 (Ilm, BSE); m) k 的局部, 具核-幔-边结构的斜长石 Pl-II (BSE); n) m 的局部 (BSE); o) m 的局部, 斜长石中核-幔接触关系 (BSE)。Cpx I-第一类单斜辉石, Cpx II-第二类单斜辉石, Cpx III-第三类单斜辉石, Ol-橄榄石, Pl-斜长石, Ilm-钛铁矿, Pl-I-第一类斜长石, Pl-II-第二类斜长石, Ap-磷灰石, Gl-具单斜辉石成分的玻璃

Fig. 2 Microphotographs and BSE images of the Hulanhoboke basalt

a) olivine phenocrysts (cross polarized light); b) olivine with kink belt (cross polarized light); c) olivine skeleton crystal (cross polarized light); d) reaction remained olivine (single polarized light); e) clinopyroxene with zoned texture (cross polarized light); f) clinopyroxene with decompressing decomposition in the rim (cross polarized light); g) clinopyroxene of homogeneous component (cross polarized light); h) decompressing decomposition in the whole crystal (cross polarized light); i) the rim of Clinopyroxene decompressing decomposed into glass, ilmenite and plagioclase (BSE); j) Plagioclase with homogeneous texture (cross polarized light); k) Plagioclase with texture of core-mantle-rim (cross polarized light); l) the whole clinopyroxene decomposed with relics of ilmenite and glass (BSE). m) Plagioclase with texture of core-mantle-rim (BSE); n) the composition of mantle in plagioclase (BSE); o) the contact relationship between core and mantle in plagioclase (BSE). Cpx I-the first kind of clinopyroxene, Cpx II-the second kind of clinopyroxene, Cpx III-the third kind clinopyroxene, Ol-olivine, Pl-plagioclase, Ilm-ilmenite, Pl-I the first kind of plagioclase; Pl-II the second kind of plagioclase; Pl-III the third kind of plagioclase; Ap-apatite, Gl-glass

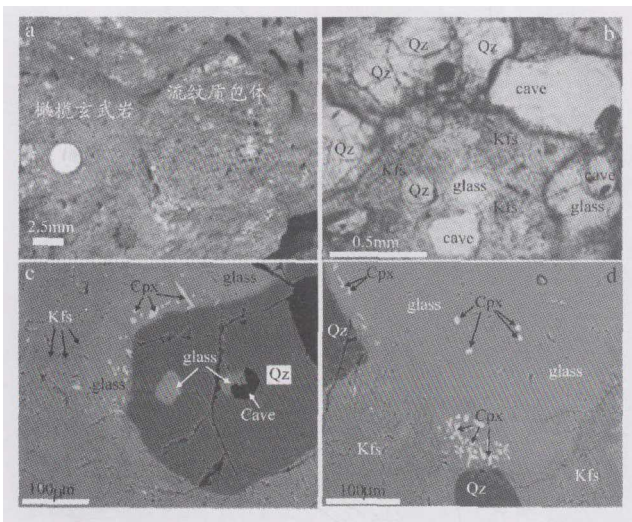


图3 流纹岩包体照片: a) 手标本照片; b) 显微镜下照片, 单偏光; c-d) 玻璃中的单斜辉石 (BSE)

Fig. 3 Rhyolite enclave in basalt: a) hand specimen; b) Microphotograph, single polarized light; c-d) clinopyroxene in glass (BSE)

~3mm (体积占 10% ~ 15%)。经镜下观察橄榄石可分为: ① 粒径较大的橄榄石 (1mm ~ 3mm) 呈浑圆状或仅部分晶体边界较平直, 裂理发育, 具扭折带 (图 2b), $Mg^{\#}$ 集中在 84 ~ 85, 晶体中常可见粒状、纺锤状和网状气液包裹体; ② 粒径较小的橄榄石 (0.25mm ~ 1mm) 较自形, 晶体完整 (图 2a) 或为骸晶 (图 2c), $Mg^{\#}$ 集中在 75 ~ 80; ③ 橄榄石周围已反应生成单斜辉石, 核部残留有橄榄石 (图 2d), 残留的橄榄石 $Mg^{\#}$ 为 73 ~ 80。基质橄榄石主要为透铁橄榄石 ($Fe = 66 \sim 70$), 粒径小于 0.1mm。总体上橄榄石中 $Mg^{\#}$ 与 NiO 含量成正相关关系 (表 1, 图 4b)。

辉石斑晶主要为普通辉石和透辉石, 粒径为 0.25mm ~ 1.0mm, 约占 10%。镜下观察到有三类辉石斑晶: ① 发育较明显的环带 (定义为 Cpx I, 图 2e); ② 内部保持新鲜干净, 边部具有减压分解结构 (定义为 Cpx II, 图 2f, 2i), 有的颗粒最外圈长出自形一半自形边界; ③ 成分均匀, 表面保持新鲜干净 (图 2g) 或整体发生减压分解 (定义为 Cpx III, 图 2h, 2l)。Cpx I 为自形一半自形, 环带发育, 具有两层或三层环带, 核

部边界呈凹凸状, 相对富铁; 从核部到边部铁含量减少, 钙镁含量增加 (表 2, 图 4c)。Cpx II 核部边界浑圆, 相对富铁, 与 Cpx I 核部成分相同; 边部发生减压分解, 从中心到边部成分向富镁富钙方向演化, 边部成分与 Cpx I 边部相同 (图 4c)。减压分解结构中充填有钛铁矿、斜长石和玻璃质 (图 2i)。Cpx III 成分均匀, 富钙富镁, 与 Cpx I 和 Cpx II 边部的成分相近 (图 4d)。基质中的辉石比较富钙, 主要为透辉石 (图 4d)。

斜长石斑晶可分为两类: ① 粒径较小 (定义为 Pl-I, 长轴约 0.5mm ~ 1.5mm), 表面干净新鲜 (图 2j), 属于拉长石 ($An = 57 \sim 63$), 占 2% ~ 3%; ② 粒径较大 (长轴约 2.5mm), 有的具有核-幔-边结构 (定义为 Pl-II, 图 2k, 2m): 核部新鲜, Na 含量高, 为更长石-中长石 ($An = 19 \sim 32$); 幔部长石成分变化大, 其中包裹有细粒辉石、钛铁矿等矿物; 边部干净新鲜, 为拉长石 ($An = 57 \sim 65$), 与基质斜长石成分相近 ($An = 57 \sim 62$) (表 3, 图 4e); 有的只发育两层环带, 核部为中长石, 边部为拉长石。

橄榄玄武岩中发现了流纹岩包体, 较大的流纹岩包体直径约 15cm, 呈浑圆状 (图 3a); 较小的流纹岩包体长轴为 1.5mm ~ 4mm, 呈椭球状。流纹岩包体与橄榄玄武岩接触的边界具有很多气孔, 可能是基性熔体和酸性熔体混合的结果。流纹岩包体内部有很多气孔, 为斑状结构, 斑晶为石英 (粒径约 0.5mm), 约占 20%, 基质为石英、长石微晶 (主要是歪长石和透长石, 图 3b-d、图 4e) 和玻璃 (呈团块状, 图 3b-d)。在玻璃质中结晶出细小的柱状普通辉石和透辉石晶体 (图 3c, d, 表 4)。

4 地球化学特征

依照 TAS 分类图 (图 5a), 该橄榄玄武岩为粗面玄武岩, 属碱性系列。从 K_2O-SiO_2 图中 (图 5b) 可以看到该橄榄玄武岩钾含量很高, 属于橄榄粗玄武岩系列。玄武岩中 TiO_2 含量约 2.4%, MgO 约 8%, K_2O (1.75% ~ 2.0%)、 Na_2O (3.8% ~ 4.1%) 和 P_2O_5 (约 7%) 含量较高, CaO 含量稍低 (8% ~ 8.5%)。与东非裂谷 (主动裂谷) 玄武岩相比, 我们所研究的贝加尔橄榄玄武岩碱含量 (K_2O, Na_2O) 稍高于东非裂谷 (图 5b, c) 而 CaO 含量稍低 (图 5d), FeO, MgO, TiO_2, P_2O_5

表1 橄榄石的电子探针分析结果

Table 1 The representative compositions of olivine (by EPMA, O = 4)

Wt %		橄榄石捕虏晶				橄榄石斑晶				橄榄石基质				残余橄榄石			
编号	TK4-2.1	T3-1.1	T3-4.1	TK3-5.4	TK4-2.2	TK1-4.1	TK3-3.4	TK1-2.1	T3-2.3	T3-4.2	TK3-4.3	TK2-1.2	TK2-3.3	TK2-2.1	TK2-2.6		
SiO ₂	39.42	39.56	39.39	39.55	38.90	38.52	39.19	38.07	37.07	36.59	37.29	38.47	37.48	38.02	38.42		
TiO ₂	0	0.06	0.06	0	0	0	0.01	0	0.01	0.11	0.07	0.02	0	0.02	0.06		
Al ₂ O ₃	0.07	0.03	0.05	0.03	0.04	0.04	0.07	0.02	0.06	0.07	0.04	0.04	0	0.05	0.01		
Cr ₂ O ₃	0.03	0.08	0	0.02	0.04	0.02	0.02	0	0.02	0	0.03	0.01	0.02	0	0		
FeO	14.50	14.71	15.01	15.16	19.49	18.94	18.82	24.25	28.02	30.05	29.77	20.64	25.02	20.39	19.33		
MnO	0.13	0.16	0.17	0.20	0.22	0.31	0.32	0.39	0.56	0.72	0.52	0.25	0.44	0.32	0.11		
NiO	0.30	0.18	0.20	0.22	0.12	0.08	0.10	0.08	0.03	0	0.03	0.13	0.05	0.08	0.11		
MgO	45.59	45.75	45.41	44.93	41.14	41.68	41.58	37.02	33.69	33.04	33.24	40.18	36.78	40.48	41.82		
CaO	0.23	0.20	0.19	0.20	0.20	0.22	0.22	0.34	0.42	0.34	0.39	0.20	0.42	0.21	0.23		
Na ₂ O	0.01	0	0.05	0.01	0.03	0	0.01	0	0.03	0.06	0.02	0	0	0.03	0.01		
K ₂ O	0	0	0.01	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01		
Total	100.28	100.74	100.53	100.32	100.16	99.81	100.33	100.17	99.91	100.97	101.38	99.95	100.22	99.61	100.11		
Si	0.988	0.993	0.990	0.993	0.997	0.990	0.997	0.999	0.994	0.992	0.994	0.992	0.986	0.998	0.984		
Al	0.002	0	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0	0	0.001	0	0	0	0		
Ti	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0	0.001	0	0	0	0		
Fe ²⁺	0.304	0.311	0.318	0.318	0.418	0.407	0.456	0.532	0.629	0.673	0.663	0.459	0.557	0.439	0.411		
Mn	0.003	0	0	0.004	0.005	0.007	0.006	0.009	0.023	0.023	0.012	0	0	0	0		
Mg	1.703	1.702	1.702	1.681	1.572	1.597	1.530	1.448	1.361	1.320	1.320	1.557	1.470	1.566	1.621		
Ca	0.006	0	0	0.005	0.005	0.006	0.007	0.010	0	0	0.011	0	0	0	0		
Na	0	0	0	0	0.001	0	0.001	0	0	0	0.001	0	0	0	0		
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Ni	0.006	0	0	0.004	0.002	0.002	0.003	0.002	0	0	0.001	0	0	0	0		
Total	3.012	3.006	3.010	3.006	3.001	3.010	3.002	3.001	3.007	3.008	3.004	3.008	3.013	3.003	3.016		
Fo, mol%	84.9	84.7	84.4	84.1	79.0	79.7	79.8	73.1	68.2	66.2	66.6	77.6	72.4	78.0	79.4		

表 2 单斜辉石电子探针成分 (O = 6)

Table 2 The representative compositions of clinopyroxene by EPMA (O = 6)

Wt. %	Cpx I												Cpx II											
	核				幔				边				核				幔				边			
	T4-1.1	T3-5.1	T1-3.1	T4-1.2	T3-5.2	T4-1.3	T3-5.3	T1-3.2	T1-2.2	T4-3.3	T1-4.3	T1-4.5	T3-5.3	T4-3.4	T1-4.4	T3-5.2	T3-5.4	T1-4.7	T3-4.4					
编号																								
SiO ₂	51.14	51.49	49.62	48.99	50.82	49.33	50.53	49.08	49.79	48.73	51.12	50.34	48.05	48.85	49.79	47.28	47.25	51.41	49.32					
TiO ₂	0.62	0.53	0.51	1.46	1.08	2.22	1.87	1.15	0.97	1.74	0.56	0.62	1.49	1.59	1.70	1.73	1.97	1.42	2.59					
Al ₂ O ₃	4.38	4.40	4.39	7.44	6.19	4.99	3.98	6.02	5.60	8.56	4.29	4.50	8.14	6.73	4.75	6.42	6.13	4.40	5.64					
Cr ₂ O ₃	0	0.03	0.04	0.23	0.72	0.11	0.13	0.89	0.92	0.07	0.05	0.09	0	0.07	0.60	0	0.04	0.04	0.24					
FeO	10.55	10.99	10.57	7.36	6.85	8.05	7.71	6.18	6.20	8.85	11.18	11.58	10.28	7.44	7.46	7.87	8.47	6.98	7.71					
MnO	0.41	0.52	0.56	0.22	0.09	0.15	0.14	0.19	0.12	0.21	0.31	0.39	0.24	0.13	0.16	0.15	0.10	0.10	0.20					
NiO	0.02	0.05	0	0.11	0.11	0	0.05	0.07	0	0	0	0.01	0	0.03	0.05	0.03	0	0.03	0					
MgO	13.36	13.12	13.25	14.20	15.29	13.20	13.39	15.04	15.92	12.31	12.94	13.00	12.85	13.05	13.93	13.62	13.84	13.83	12.77					
CaO	18.28	18.44	18.93	19.02	18.77	21.86	21.84	19.18	18.99	18.26	18.12	18.51	17.23	21.49	21.32	21.96	21.33	21.02	21.73					
Na ₂ O	1.16	0.81	0.97	0.98	0.71	0.49	0.45	0.82	0.76	1.23	0.97	0.96	1.41	0.48	0.46	0.47	0.53	0.44	0.45					
K ₂ O	0.01	0	0.01	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0.49	0.01					
Total	99.92	100.38	98.85	100.00	100.61	100.40	100.09	98.62	99.27	99.96	99.55	99.99	99.69	99.84	100.22	99.53	99.66	100.16	100.65					
Si	1.899	1.913	1.866	1.799	1.854	1.829	1.879	1.827	1.822	1.804	1.914	1.877	1.800	1.813	1.843	1.762	1.748	1.900	1.828					
AlIV	0.101	0.087	0.134	0.201	0.146	0.171	0.121	0.173	0.178	0.196	0.086	0.123	0.190	0.187	0.157	0.238	0.252	0.100	0.172					
AlVI	0.091	0.106	0.042	0.121	0.120	0.047	0.053	0.09	0.079	0.177	0.103	0.075	0.165	0.107	0.050	0.027	0.010	0.091	0.074					
Ti	0.017	0.015	0.028	0.040	0.040	0.062	0.052	0.028	0.027	0.048	0.016	0.017	0.028	0.044	0.047	0.056	0.056	0.039	0.072					
Fe ²⁺	0.328	0.340	0.340	0.220	0.209	0.250	0.240	0.180	0.183	0.274	0.350	0.361	0.315	0.231	0.231	0.250	0.249	0.216	0.239					
Cr	0	0	0	0	0.021	0.003	0.004	0.029	0.029	0.002	0.001	0.003	0	0.002	0.018	0	0	0.001	0.007					
Mg	0.74	0.72	0.72	0.78	0.83	0.73	0.74	0.83	0.86	0.67	0.72	0.72	0.73	0.72	0.77	0.78	0.77	0.762	0.706					
Ni	0	0	0	0.003	0.003	0	0.001	0	0	0	0	0	0	0.001	0.001	0	0	0.001	0					
Mn	0.01	0.01	0.03	0.01	0	0.01	0.01	0	0	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0.003	0.006					
Ca	0.72	0.73	0.76	0.75	0.73	0.86	0.87	0.75	0.74	0.72	0.72	0.73	0.68	0.85	0.84	0.88	0.83	0.832	0.863					
Na	0.08	0.05	0.07	0.07	0.05	0.03	0.03	0.07	0.07	0.08	0.07	0.06	0.07	0.03	0.03	0	0.07	0.032	0.032					
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.023	0					
Sum	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	3.977	4.000					
Mg [#]	69.3	68.0	69.1	77.5	79.9	74.5	75.6	81.3	82.1	71.3	67.4	66.7	69.0	75.8	76.9	75.5	74.4	77.9	74.7					
En, mol%	40.9	40.0	38.9	44.2	46.8	39.4	40.0	46.8	48.5	40.3	39.9	39.4	42.2	39.9	41.5	40.8	41.7	42.0	38.9					
Wo, mol%	40.2	40.4	40.9	42.6	41.3	46.9	46.9	42.6	41.4	43.0	40.2	40.3	39.6	47.2	45.7	46.1	44.9	45.9	47.6					
Fs, mol%	18.8	19.7	20.2	13.2	11.9	13.7	13.2	10.5	10.2	16.7	19.9	20.3	18.2	13.0	12.8	13.1	13.4	12.0	13.5					

续表 2

Continued Table 2

Wt. %		Cpx III										基质中的单斜辉石					玻璃中的单斜辉石				
编号	TK1-5.1	TK1-5.3	TK1-5.4	T3-2.2	T3-8.1	T1-1.1	T3-2.4	T1-6.2	T1-6.3	TK3-3.1	T3-11.1	T3-11.2	T3-11.3	T3-11.4	T3-11.3	T3-11.4					
SiO ₂	48.70	49.40	48.64	49.42	49.66	49.68	50.05	48.63	48.54	48.89	53.94	53.82	53.80	54.32	54.81						
TiO ₂	1.68	1.97	1.71	1.05	0.96	1.73	1.82	1.80	1.95	2.28	0.25	0.24	0.25	0.25	0.35						
Al ₂ O ₃	7.73	5.76	7.77	6.07	5.97	3.35	3.31	3.65	4.00	4.95	0.09	0.12	0.12	0.10	0.14						
Cr ₂ O ₃	0.04	0.15	0.09	0.81	0.87	0.13	0.28	0.10	0.30	0.43	0.09	0.09	0.02	0	0.03						
FeO	7.70	7.35	7.59	6.40	6.53	6.88	7.38	7.35	6.79	7.39	8.35	7.72	7.96	7.13	6.03						
MnO	0.08	0.11	0.11	0.06	0.09	0.12	0.08	0.15	0.21	0.15	0.48	0.33	0.41	0.40	0.30						
NiO	0	0.01	0.03	0.09	0	0.08	0	0.03	0.08	0.01	0.01	0	0	0.03	0.02						
MgO	13.57	13.49	13.50	15.70	15.89	14.64	14.58	14.21	13.88	13.44	18.47	17.52	17.67	17.09	17.65						
CaO	18.99	21.78	19.40	19.13	19.53	22.36	22.23	21.88	22.44	22.03	17.07	19.49	18.98	19.86	19.76						
Na ₂ O	0.97	0.39	0.89	0.92	0.86	0.36	0.47	0.47	0.36	0.43	0.67	0.69	0.77	0.84	0.87						
K ₂ O	0	0	0	0.01	0.02	0.01	0	0.02	0	0.01	0.04	0.08	0.07	0.04	0.10						
Total	99.46	100.42	99.72	99.66	100.37	99.33	100.2	98.28	98.54	100.01	99.45	100.10	100.06	100.06	100.06						
Si	1.803	1.826	1.797	1.802	1.791	1.872	1.872	1.858	1.858	1.818	2.006	1.967	1.967	1.990	1.996						
AlIV	0.197	0.174	0.203	0.198	0.209	0.128	0.128	0.142	0.142	0.182	0	0	0	0	0						
AlVI	0.140	0.076	0.135	0.062	0.044	0.005	0.005	0.036	0.036	0.035	0	0	0	0	0						
Ti	0.047	0.055	0.048	0.028	0.027	0.056	0.056	0.057	0.057	0.064	0	0	0	0	0						
Fe ²⁺	0.064	0.121	0.070	0.004	0.047	0.102	0.102	0.116	0.116	0.144	0.248	0.244	0.244	0.215	0.182						
Cr	0.239	0.227	0.235	0.184	0.210	0.219	0.219	0.222	0.222	0.230	0	0	0	0	0						
Mg	0.749	0.743	0.744	0.877	0.854	0.837	0.837	0.791	0.791	0.745	0.997	0.977	0.977	0.934	0.974						
Ni	0.749	0.743	0.744	0.877	0.854	0.837	0.837	0.791	0.791	0.745	0	0	0	0	0						
Mn	0.003	0.003	0.003	0	0	0	0	0	0	0.005	0	0	0	0	0						
Ca	0.753	0.862	0.768	0.749	0.767	0.883	0.883	0.894	0.894	0.878	0.677	0.741	0.741	0.790	0.778						
Na	0.070	0.028	0.064	0.071	0.069	0	0	0	0	0.031	0.072	0.071	0.071	0.071	0.070						
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
Sum	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000						
Mg [#]	75.9	76.6	76.0	81.4	81.3	79.1	77.9	77.5	78.5	76.4	79.8	80.2	79.8	81.0	83.9						
En, mol%	43.0	40.5	42.5	48.5	46.6	43.2	43.2	41.5	41.5	40.1	51.9	49.8	49.8	48.2	50.4						
Wo, mol%	43.2	47.0	43.9	41.4	41.9	45.5	45.5	46.9	46.9	47.3	35.2	37.8	37.8	40.7	40.2						
Fs, mol%	13.8	12.6	13.6	10.2	11.4	11.3	11.3	11.6	11.6	12.6	12.9	12.4	12.4	11.1	9.4						

表3 长石电子探针成分 (O = 8)
Table 3 The representative compositions of feldspar by EPMA (O = 8)

Wt. %	大 斑 晶										基 质 PI					流纹岩包体中的长石		
	核					幔					边							
编号	Tl-2-1	Tl-4-3	Tl-5-1	Tl-5-2	Tl-5-3	Tl-5-4	Tl-5-5	Tl-5-6	Tl-5-7	Tl-5-8	Tl-5-9	Tl-5-10	Tl-5-11	Tl-5-12	Tl-5-13	Tl-5-14	Tl-5-15	Tl-5-16
SiO ₂	52.94	52.60	52.41	61.76	63.60	55.10	66.22	59.07	50.67	54.94	53.49	52.10	51.49	64.88	65.28	64.51	64.51	64.51
TiO ₂	0.10	0.07	0.04	0	0.01	0.07	0.15	0.06	0.11	0.15	0.13	0.24	0.16	0.06	0.07	0.05	0.05	0.05
Al ₂ O ₃	28.98	29.07	29.56	24.15	21.97	27.14	20.26	28.36	29.71	28.50	29.05	29.63	29.66	19.46	19.63	19.54	19.54	19.54
Cr ₂ O ₃	0	0	0.06	0	0	0.05	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0.03	0.06	0.06	0.06
FeO	0.63	0.47	0.48	0.09	0.18	0.62	0.31	1.31	0.61	0.56	0.74	1.15	0.94	0.25	0.59	0.09	0.09	0.09
MnO	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.02	0.05	0	0.06	0.02	0	0.04	0.04	0.04
NiO	0	0	0	0	0.04	0	0.01	0	0	0.03	0.08	0.01	0.02	0.02	0.02	0	0	0
MgO	0.06	0.16	0.05	0	0.01	0.04	0	0.10	0.03	0.08	0.08	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
CaO	11.73	12.44	12.16	6.06	3.94	9.95	1.79	0.48	12.96	11.70	12.45	12.24	12.46	1.46	1.56	1.08	1.08	1.08
Na ₂ O	4.86	4.14	4.65	6.97	8.08	5.66	6.36	10.19	4.29	4.64	4.14	4.74	4.57	7.44	7.50	7.03	7.03	7.03
K ₂ O	0.34	0.27	0.24	0.40	1.96	0.39	5.92	1.64	0.16	0.37	0.28	0.17	0.16	5.53	5.27	6.55	6.55	6.55
Total	99.69	99.21	99.66	99.43	99.79	99.02	101.02	101.22	98.55	100.98	100.47	100.28	99.52	99.11	99.99	98.96	98.96	98.96
Si	2.412	2.437	2.381	2.761	2.834	2.513	2.933	2.610	2.349	2.464	2.420	2.369	2.351	2.967	2.900	2.927	2.927	2.927
Al	1.554	1.570	1.617	1.259	1.153	1.453	1.057	1.476	1.627	1.505	1.548	1.610	1.628	1.021	1.051	1.061	1.061	1.061
Fe ²⁺	0.038	0	0	0	0.007	0.038	0.012	0.049	0.039	0.021	0.028	0.038	0.039	0	0.037	0	0	0
Mg	0	0	0	0	0.001	0	0	0.007	0	0.005	0.006	0	0	0	0	0	0	0
Ca	0.585	0.591	0.589	0.286	0.188	0.490	0.085	0.023	0.642	0.562	0.604	0.586	0.593	0.049	0.096	0.048	0.048	0.048
Na	0.441	0.357	0.444	0.605	0.698	0.532	0.546	0.873	0.357	0.404	0.363	0.442	0.447	0.620	0.692	0.611	0.611	0.611
K	0	0	0	0	0.11	0	0.34	0.09	0	0.02	0.02	0	0	0.35	0.29	0.40	0.40	0.40
Cations	5.030	4.954	5.030	4.910	4.993	5.025	4.972	5.131	5.014	4.988	4.999	5.045	5.057	5.006	5.061	5.048	5.048	5.048
Ab, %	43.0	37.6	43.0	67.9	70.0	52.1	56.6	88.3	35.8	57.6	36.9	43.0	43.0	60.9	64.6	57.6	57.6	57.6
An, %	57.0	62.4	57.0	32.1	18.8	47.9	8.8	2.3	64.2	4.5	61.4	57.0	57.0	4.8	8.9	4.5	4.5	4.5
Or, %	0	0	0	0	11.2	0	34.6	9.4	0	37.9	1.7	0	0	34.3	26.5	37.9	37.9	37.9

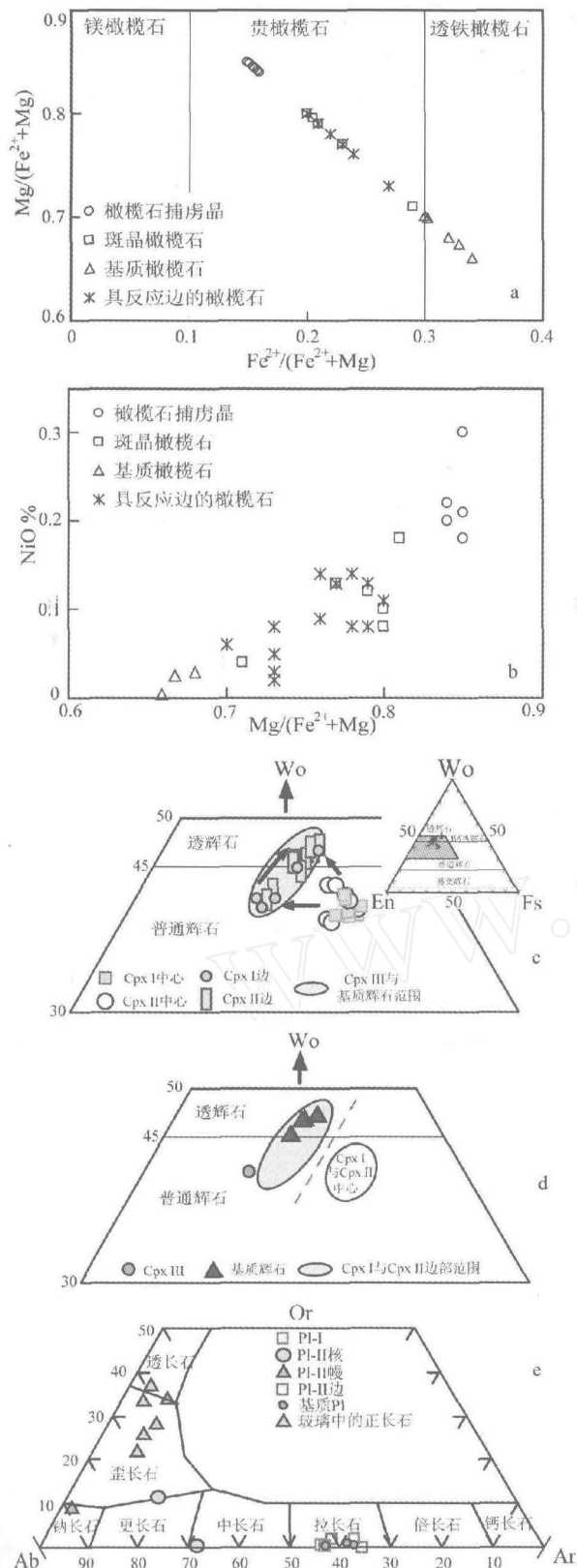


图4 a-b) 橄榄石成分图; c-d) 单斜辉石 Cpx I、Cpx II 和 Cpx III 的成分; e) 长石的成分图

Fig. 4 a-b) The component of olivine; c-d) The composition of Cpx I, Cpx II and Cpx III; e) The component of feldspar

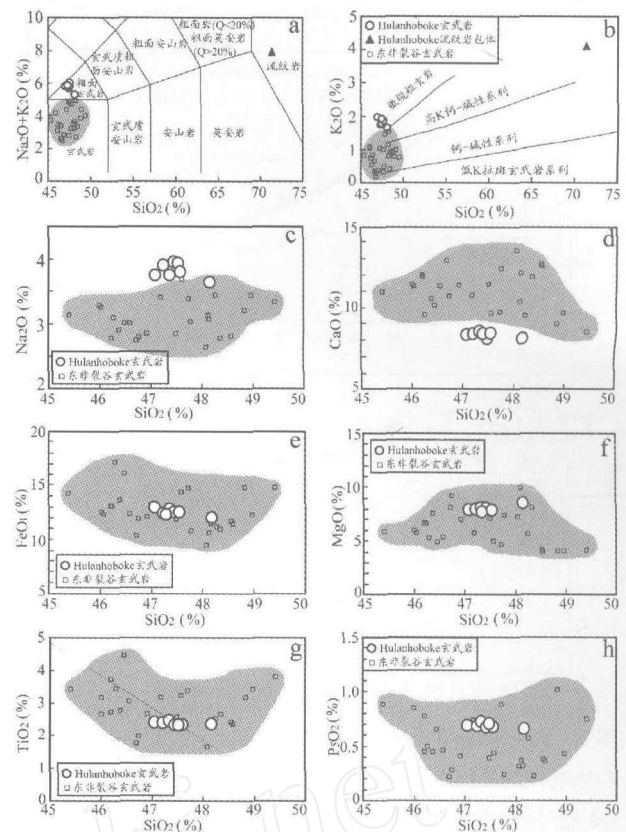


图5 火山岩的 TAS 图、K₂O-SiO₂ 图及主元素 Hark 图解 (东非裂谷玄武岩数据取自 Kabeto *et al.*, 2001; Willson, 2001; Barrat *et al.*, 2003)

Fig. 5 Classification of TAS diagram, K₂O vs. SiO₂ diagram and major element Hark diagrams (the basaltic data of east African rift are after Kabeto *et al.*, 2001; Willson, 2001; Barrat *et al.*, 2003)

含量与东非裂谷玄武岩相近(图 5e-h)。球粒陨石标准化稀土元素配分模式图显示(图 6a),该橄榄玄武岩轻稀土强烈富集,重稀土相对亏损,轻重稀土分异比较明显($(La/Yb)_N = 9.8 \sim 12.5$),轻稀土之间的分异($(La/Sm)_N$)与重稀土之间的分异($(Gd/Yb)_N$)相近(约为 2.5 ~ 2.7),不具有 Eu 异常($\delta Eu = 1.01 \sim 1.05$)。由重稀土的强烈亏损推知岩浆源区很可能残余有石榴石。原始地幔标准化蛛网图显示(图 6b),此橄榄玄武岩中大离子亲石元素、高场强元素等不相容元素富集程度较高,弱不相容元素相对亏损,表现出 Ba、Nb、K 富集峰。与 MORB 和 OIB 成分相比,该橄榄玄武岩与 OIB 成分相似,具有 OIB 型的特征。与 OIB 平均成分相比,元素 Ba 和 K 相对富集, Sr、P 与 OIB 的值相当,其余元素含量稍低。全岩的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始比值为 0.70435 ~ 0.70443, $\epsilon_{Nd} = +1.92 \sim +2.63$,表明该玄武岩来源于弱亏损地幔源区。

流纹岩包体属高钾钙碱性系列。CaO 含量大于 1%, K₂O 与 Na₂O 含量相近(约为 4%)。球粒陨石标准化稀土元

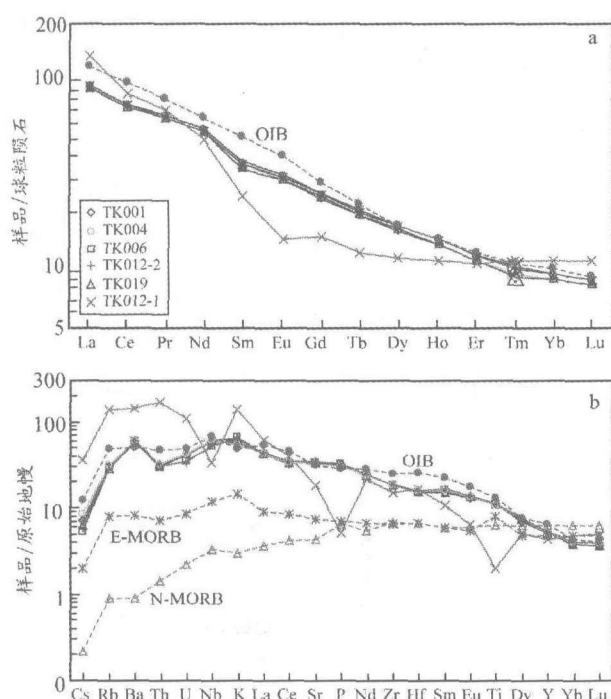


图6 稀土配分模式图(a)及蛛网图(b), 球粒陨石和原始地幔标准化值根据 Sun and Mcdonough (1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and spider diagram (b). Chondrite and primitive mantle values are after Sun and Mcdonough (1989)

素配分模式图显示(图6a), 该流纹岩轻稀土强烈富集, 重稀土相对亏损, 轻重稀土之间有明显的分异($(La/Yb)_N \approx 12$), 其中轻稀土之间的分异较强($(La/Sm)_N = 5.5$), 重稀土之间分异不明显($(Gd/Yb)_N = 1.3$); 具有轻微 Eu 负异常($\delta Eu = 0.76$)。原始地幔标准化蛛网图显示, 流纹岩包体中大离子亲石元素(Cs 除外)强烈富集, 高场强元素 Nb、P、Ti 严重亏损, 曲线呈右倾, 表现出与地壳相似的微量元素特征。全岩的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始比值为 0.71217, $\epsilon_{Nd} = -19.35$, 表明该流纹岩包体来源于大陆地壳。

5 讨论

壳源岩浆具有亏损 Nb、Ti、P 等高场强元素以及高 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 低 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的特点, 若岩浆在上升过程中受到地壳混染作用, 则应表现出 Nb、Ti、P 等元素相对亏损, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 偏高, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值偏低的现象。我们所研究的橄榄玄武岩中 Nb、Ti、P 等高场强元素未表现出亏损(类似 OIB 型玄武岩的地球化学特征, 参见朱永峰等, 2007)。在 Sr、Nd 同位素双变异图解上(图7), 该橄榄玄武岩样品具有低 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 和正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值($+1.92 \sim +2.63$)的特征, 与壳源岩浆区相距很远, 表明地壳混染的作用十分微弱。稀土配分模式图上可以看到该橄榄玄武岩轻稀土强烈富集, 轻重稀土之间的分异较大(≈ 10), 接近 OIB 的特征; 原始地幔标准化蛛网图上也显示, 该岩石的微量元素成分与 OIB 平均成分近似。OIB

表4 流纹岩包体中玻璃的电子探针分析结果

Table 4 The representative composition of glasses in rhyolitic enclave (by EPMA, wt. %)

编号	T2-91	T2-10.1	T3-121	T3-15.1	T3-11.6	T3-112	T3-11-4	T3-161	T3-162	T3-15-1	T3-17-1	T3-18-1	T3-18-2	T3-191	T3-19-5	T3-19-6	T3-19-7
SiO ₂	65.42	71.76	71.85	64.51	71.36	77.97	73.82	73.82	75.19	73.11	72.15	71.12	61.82	71.22	65.88	60.46	62.78
TiO ₂	0.12	0.27	0.31	0.05	0.70	0.26	0.48	0.29	0.44	0.07	0.53	0.66	0	0.77	0.08	0.24	0.20
Al ₂ O ₃	19.35	11.76	10.71	19.54	9.35	10.06	9.13	9.70	11.40	10.19	9.82	11.31	22.37	9.30	17.88	22.09	21.16
Cr ₂ O ₃	0.07	0.04	0	0.06	0	0	0.01	0	0	0.01	0	0.02	0	0	0.04	0	0.05
FeO	0.40	1.56	2.06	0.09	3.46	3.91	3.35	3.41	2.69	2.39	4.06	2.58	0.09	4.00	0.72	0.42	0.23
MnO	0.01	0.03	0.08	0.04	0.16	0.08	0.03	0.04	0	0.07	0.10	0.01	0.01	0	0	0.02	0
NiO	0	0	0.01	0	0.06	0	0	0	0	0	0.05	0	0.01	0	0	0	0.02
MgO	0.03	0.23	0.48	0.02	1.26	0.71	0.92	0.78	0.17	0.37	0.65	0.53	0.01	0.58	0.02	0.01	0.01
CaO	1.67	0.21	0.42	1.08	0.07	0.25	0.29	0.24	0.16	0.42	0.42	0.35	3.71	0.54	0.08	3.41	2.23
Na ₂ O	7.03	3.74	6.23	7.03	5.96	2.03	6.06	5.23	3.23	6.04	5.25	5.71	8.57	5.86	6.83	8.22	8.08
K ₂ O	5.31	6.25	5.61	6.55	5.84	3.94	5.40	5.81	6.03	5.33	5.76	5.99	2.27	5.86	8.03	3.46	4.55
Total	99.42	95.85	97.76	98.96	98.21	99.21	99.48	99.32	99.31	97.99	98.78	98.27	98.85	98.14	99.56	98.33	99.31

表5 呼兰霍博克火山岩岩石化学成分及 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 5 The element and Sr-Nd isotopic compositions of volcanic rocks in Hulanhoboke Volcano

样号	TK001	TK004	TK006	TK012-1	TK012-2	TK019
	橄榄玄武岩	橄榄玄武岩	橄榄玄武岩	流纹岩	橄榄玄武岩	橄榄玄武岩
SiO ₂	46.51	46.78	46.80	70.00	47.98	46.54
TiO ₂	2.35	2.33	2.34	0.43	2.35	2.32
Al ₂ O ₃	14.54	14.55	14.57	12.51	14.50	14.39
FeO	12.30	12.30	12.20	3.40	12.00	12.20
MgO	7.84	7.81	7.74	1.81	8.60	7.83
CaO	8.31	8.23	8.27	2.02	8.12	8.06
Na ₂ O	3.99	4.04	3.79	3.70	3.62	3.98
K ₂ O	1.72	1.73	1.89	3.98	1.61	1.82
MnO	0.17	0.16	0.16	0.04	0.18	0.16
P ₂ O ₅	0.70	0.68	0.68	0.11	0.66	0.70
LOI	0.44	0.05	0.34	1.83	0.40	0.18
Total	98.45	98.59	98.46	97.97	99.62	98.03
Cs	0.23	0.17	0.20	1.13	0.27	0.23
Rb	19.20	18.80	18.30	88.60	19.90	17.90
Ba	409.8	414.3	407.6	997.7	417.7	420.3
Th	2.57	2.56	2.54	14.13	2.77	2.63
U	0.87	0.74	0.88	2.25	0.90	0.71
Nb	42.70	37.00	43.30	24.00	43.30	38.50
Pb	1.739	2.370	1.958	9.405	2.690	2.208
Sr	713.8	716.3	704.6	391.4	693.2	720.1
Y	22.90	23.10	23.10	19.60	23.30	23.70
Zr	207.5	206.9	206.4	166.9	206.8	208.3
Hf	4.72	4.75	4.72	5.12	4.92	4.94
La	28.80	29.30	28.70	41.90	29.60	29.80
Ce	58.50	59.60	59.00	70.50	60.20	61.00
Pr	7.71	7.84	7.80	8.68	7.91	8.00
Nd	32.19	32.77	32.21	29.37	32.89	33.53
Sm	6.73	7.07	6.69	4.79	7.15	7.41
Eu	2.20	2.21	2.24	1.07	2.29	2.32
Gd	6.30	6.36	6.31	3.87	6.66	6.65
Tb	0.93	0.92	0.92	0.58	0.97	0.99
Dy	5.18	5.34	5.36	3.71	5.62	5.59
Ho	0.98	0.99	0.98	0.80	1.04	1.04
Er	2.40	2.37	2.39	2.31	2.51	2.51
Tm	0.31	0.31	0.30	0.36	0.35	0.33
Yb	1.89	1.88	1.88	2.34	2.02	1.98
Lu	0.27	0.27	0.27	0.36	0.29	0.28
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.0786	0.0774	0.0750	0.7063	0.0747	0.0734
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.704434	0.704374	0.704379	0.712173	0.704373	0.704352
Errors, 2σ	11	10	10	12	11	10
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.70443	0.70437	0.70438	0.71217	0.70437	0.70435
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.1314	0.1302	0.1313	0.1002	0.1308	0.1311
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512770	0.512756	0.512736	0.511646	0.512739	0.512773
Errors, 2σ	12	13	13	12	14	12
ε _{Nd} (t)	2.57	2.29	1.92	-19.35	1.98	2.63

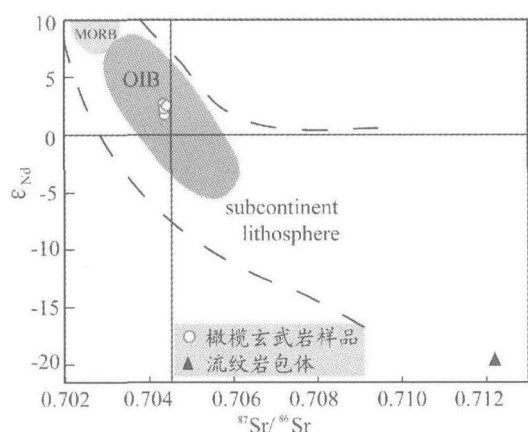


图7 Sr-Nd 同位素双变化图解 (MORB、OIB 和 subcontinent lithosphere 范围根据 Zindler and hart, 1986)
Fig.7 Plot of Sr-Nd isotope compositions (the fields of MORB, OIB and subcontinent lithosphere are after Zindler and Hart, 1986)

平均成分中具有 K 和 P 的负异常,而该橄榄玄武岩中无此现象,且具有元素 Ba 的正异常,这可能是由岩浆源区自身的地球化学特点所致。由以上稀土配分模式图、蛛网图以及同位素特点推测,该橄榄玄武岩岩浆源区与 OIB 源区相似,与地幔柱有关。地震层析成像资料显示,贝加尔裂谷带西部 410km ~ 660km 存在倾斜的低速带,解释为在该地区存在有小型地幔柱 (Zhao *et al.*, 2006)。

根据该橄榄玄武岩岩性特征,呼兰霍博克火山玄武岩属于碱性玄武岩类,斑晶矿物中既有岩浆结晶的产物,也有岩浆上升过程中捕获的捕虏晶。 $Mg^{\#}$ 为 84 ~ 85 的橄榄石与此橄榄玄武岩熔体是不平衡的。取橄榄石与玄武岩岩浆平衡复合分配系数 $K_{Fe,Mg}^{Oliv} = 0.3$ (Monjoie *et al.*, 2005),由全岩 $Mg^{\#}$ 为 53 ~ 56,经计算得到与此玄武岩熔体平衡的橄榄石 $Mg^{\#}$ 为 77 ~ 81,这与粒径较小的橄榄石斑晶 ($Mg^{\#} = 75 \sim 80$) 相近而小于粒径较大的橄榄石斑晶 ($Mg^{\#} = 80 \sim 85$)。因此 $Mg^{\#}$ 高粒径大的橄榄石可能是来源于深部的捕虏晶,而 $Mg^{\#}$ 稍低粒径较小的橄榄石斑晶与岩浆成分平衡的,是由分离结晶等作用演化而来。

通过仔细研究辉石可以获得有关岩浆以及岩浆岩(包括地幔岩)演化的重要信息 (Zhu & Ogasawara, 2004; 宋永峰和徐新, 2007)。通常碱性玄武岩中普通辉石的环带外带成分比内带相对富钠富铁,但此橄榄玄武岩中第一类 (Cpx I) 和第二类 (Cpx II) 单斜辉石斑晶则是核部铁含量较高,从核部到边部铁含量降低,钙镁含量增加。这可能与辉石结晶时的压力有关。单斜辉石中 $Mg_2Si_2O_6$ 与 $Fe_2Si_2O_6$ 构成二元互溶体系,在结晶过程中压力的增加将使固相线下降,从而使结晶出的固体偏向 $Fe_2Si_2O_6$ 端元,形成核部含铁相对高的反环带结构。粒径较大的斜长石斑晶也具有核部钠含量较高、边部钙含量高的反环带结构。压力的增加可能是构造应力作

用的结果,也可能是由地幔柱作用导致大量岩浆充填到岩浆房中造成的。根据上边所讨论的岩浆源区与地幔柱有关判断,压力增加的原因更可能是后者。压力聚积到一定程度将促使岩浆向上运移,由于压力巨大,岩浆上升速度很快,从而导致部分橄榄石和辉石形成骸晶。压力在岩浆上升时将降低,由于压力减小,普通辉石和斜长石斑晶在岩浆上升时发生减压分解。岩浆作用晚期在“减压分解”结构的外围继续结晶出与基质矿物成分基本一致的“净边”。

由于岩浆上升速度较快,基性岩浆带来的热量只能少量熔融浅部围岩并将其捕获发生同化混染。在呼兰霍博克火山堆中我们找到了橄榄玄武岩包裹流纹岩包体的样品。根据该流纹岩包体较高的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始比值和负的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 (-19.35) 可知包体源于地壳物质,但在贝加尔裂谷区尚未发现双峰式火山岩(缺失流纹岩),由此推知基性岩浆上升速度和裂谷拉张速度比较快,不具备形成大规模流纹质岩浆的条件。流纹岩包体中具有玻璃质团块是岩浆迅速喷发淬火的结果(这排除了流纹岩是岩石包体的可能性)。

6 结论

对贝加尔裂谷带通京盆地中的呼兰霍博克休眠火山橄榄玄武岩岩石学和地球化学研究表明,该橄榄玄武岩中既有从岩浆中结晶出的橄榄石,也有捕获的地幔橄榄石捕虏晶;岩浆作用经历了压力增加到骤减的过程,形成了辉石和斜长石反环带以及减压分解结构;岩浆上升速度快,捕获了少量流纹岩包体。地壳对橄榄玄武岩岩浆的混染作用微弱。该岩浆源区特点与 OIB 源区特点相似,岩浆源区与地幔柱活动有关。

致谢 本研究得到国家自然科学基金项目(编号 40730314)资助。罗照华、刘树文、陈斌、宋述光提供了许多好的建议,靳新娣、古丽冰和赵凤山协助完成了微量元素的分析,舒桂明协助完成了电子探针分析,储著银和李超峰协助完成了同位素分析。谭娟娟同学协助完成了部分图件的修编和绘制。匿名审稿人提出的修改意见对我们完善本文有很好帮助,特此一并致谢。

References

- Ashchepkov IV, Travin AV, Saprykin AI *et al.* 2003. Age of xenolith-bearing basalts and mantle evolution in the Baikal rift zone. *Geologiya i Geofizika*. 44(3): 1162 - 1190 (in Russia)
- Ashchepkov IV, Travin AV, Andre L and Khemel'nikova OS. 2001. Cenozoic flood basalt magmatism mantle xenoliths and melting regions in the lithospheric mantle of the Baikal rift and other regions of Central Asia. Irkutsk, Institute of Geochemistry, SB RAS. 161 - 176 (in Russia)
- Barrat JA, Joron JL, Taylor RN *et al.* 2003. Geochemistry of basalts from Manda Hararo, Ethiopia: LREE-depleted basalts in Central Afar.

- Lithos. 69: 1–13
- Esin SV, Ashchepkov IV, Ponomarchuk VA and Yamamoto M. 1995. Petrogenesis of alkaline basaltoids from the Vitim plateau: Baikal rift zone. Novosibirsk, UIGGM SB RAS, 58
- Gao S, Davis P, Liu K *et al.* 1994. Asymmetric upwarp of the asthenosphere beneath the Baikal rift zone, Siberia. *J. Geophys. Res.*, 99: 15319–15330
- Hus R, De Batist M, Klerkx J and Matton C. 2006. Fault linkage in continental rifts: Structure and evolution of a large relay ramp in Zavarotny; Lake Baikal (Russia). *Journal of Structural Geology*, 28: 1338–1351
- Ionov D. 2002. Mantle structure and rifting processes in the Baikal – Mongolia region: Geophysical data and evidence from xenoliths in volcanic rocks. *Tectonophysics*, 351: 41–60
- Kaberto K, Sawada Y, Iizumi S and Wakatsuki T. 2001. Mantle sources and magma – crust interactions in volcanic rocks from the northern Kenya rift: geochemical evidence. *Lithos.* 56: 111–139
- Lebedev S, Meier T, van der Hilst RD. 2006. Asthenospheric flow and origin of volcanism in the Baikal Rift area. *Earth and Planetary Science Letters*, 249: 415–424
- Lesne O, Calais E, Deverchere J, Chery J and Hassani R. 2000. Dynamics of intracontinental extension in the north Baikal rift from two-dimensional numerical deformation modeling. *J. Geophys. Res.* 105: 21727–21744
- Mats VD, Ufimtsev GF and Mandelbaum MM. 2001. The Baikal basin in the Cenozoic structure and geologic history. Novosibirsk, SB RAS Press, Branch. 1–249 (in Russian)
- Monjoie P, Bussy F, Lapierre H and Pfeifer HR. 2005. Modeling of in-situ crystallization processes in the Permian mafic layered intrusion of Mont Collon. *Lithos.* 89: 317–346
- Naumov VB, Portnyagin MV, Tolstykh ML and Yarmolyuk VV. 2006. Chemical composition and crystallization conditions of trachybasalts from the Dzhida Field, Southern Baikal volcanic area: Evidence from melt and fluid inclusions. *Geochemical International*, 44(3): 286–295. (in Russian)
- Spohn T and Schubert G. 1982. Convective thinning of the lithosphere: A mechanism for the initiation of continental rifting. *J. Geophys. Res.*, 87: 4669–4681
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 42: 313–345
- Turutanov Z, Mordvinova VV, Kozhevnikov VM *et al.* 2003. The Baikal rift zone: the effect of mantle plumes on older structure. *Tectonophysics*, 371: 153–173
- Petit C, Deverchere J, Houdry F *et al.* 1996. Present-day stress field changes along the Baikal rift and tectonic implications. *Tectonics*, 15: 1171–1197
- Polyansky OP. 2002. Dynamic causes for the opening of the Baikal Rift Zone: a numerical modelling approach. *Tectonophysics*, 351: 91–117
- Poort J and Klerkx J. 2004. Absence of a regional surface thermal high in the Baikal rift: New insights from detailed contouring of heat flow anomalies. *Tectonophysics*, 383: 217–241
- Suvorov VD, Mishenkina ZM, Petrick CV *et al.* 2002. Structure of the crust in the Baikal rift zone and adjacent areas from deep seismic sounding data. *Tectonophysics*, 351: 61–74
- Wilson M. 2001. *Igneous petrogenesis*. Ninth edition. Boston. Kluwer Academic Publishers, 1–465
- Yakovlev AV, Koulakov I Yu and Tychkov SA. 2007. Moho depths and three-dimensional velocity structure of the crust and upper mantle beneath the Baikal region, from local tomography. *Russian Geology and Geophysics*, 48(2): 204–220
- Yang W, Sun J, Ji K *et al.* 1995. Comparison for continental rifts: Analysis of the Fenwei and Baikal rift system. Beijing: China University of Geosciences Press, 1–127 (in Chinese)
- Zhao DP, Lei J, Inoue T, Yamada A and Gao SS. 2006. Deep structure and origin of the Baikal rift zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 243: 681–691
- Zindler A and Hart S. 1986. Chemical geodynamics. *Ann Rev. Earth Planet. Sci.*, 14: 493–571
- Zouenshain L and Savostin L. 1981. Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia. *Tectonophysics*, 76: 1–45
- Zhu YF and Ogasawara Y. 2004. Clinopyroxene phenocrysts (with green salite cores) in trachybasalts: Implications for two magma chambers under the Kokchetav UHP massif, North Kazakhstan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22: 517–527
- Zhu YF and Xu X. 2007. Exsolution texture of two-pyroxenes in peridotite from Baijiangtan ophiolitic mélange, western Junggar (NW China). *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1075–1086 (in Chinese with English Abstract)
- Zhu YF, Zhang LF and Gu LB *et al.* 2005. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 50: 2201–2212
- Zhu YF, Zeng YS and Gu LB. 2006. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite no. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altay mountains, northwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27: 61–77
- Zhu YF, Xu X and Wei SH *et al.* 2007. Geochemistry and tectonic significance of OIB-type pillow basalts in western Mts. of Keramay city (western Junggar), NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1739–1748 (in Chinese with English Abstract)

附中文参考文献

- 杨巍然, 孙继源, 纪克诚, 邢集善, Мац ВД, Лобацкая РМ, Уфимцев ГФ. 1995. 大社陆裂谷对比——汾渭裂谷系与贝加尔裂谷系例析. 北京: 中国地质大学出版社, 1–127
- 朱永峰, 徐新. 2007. 西准噶尔白碱滩二辉橄榄岩中两种辉石的出溶结构及其地质意义. *岩石学报*, 23(5): 1075–1086
- 朱永峰, 徐新, 魏少妮等. 2007. 西准噶尔克拉玛依 OIB 型枕状玄武岩地球化学及其地质意义研究. *岩石学报*, 23(7): 1739–1748