

镜泊湖地区杏山火山群的火山岩特征 及其岩浆演化

郭可欣, 刘永顺, 聂保锋, 郭磊, 张辉, 黄志聪, 侯鹏, 李耀

首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京, 100048



www.
geojournals.cn/georev

内容提要:镜泊湖火山区是我国陆内新生代玄武岩研究的一个重要窗口。东南部的杏山火山群研究不足且前人的研究否定了其岩浆经历过同化混染作用。笔者等对杏山火山群的玄武岩开展了系统的岩石学、岩石地球化学和 Sr—Nd—Pb 同位素的研究,认为杏山火山群主要为碧玄岩和粗面玄武岩,原生岩浆在上升过程中发生了橄榄石和单斜辉石的分离结晶,并在地壳区域发生了同化混染作用,但同化混染—分离结晶作用较为微弱。将杏山火山群与同期的镜泊湖玄武岩对比发现,两个地区的玄武岩都来源于石榴子石橄榄岩的部分熔融,杏山火山群的部分熔融程度略低于同期的镜泊湖玄武岩。在岩浆源区方面,杏山火山群的岩浆源区为普通地幔与全硅酸盐地球端元的混合源。岩浆源区的不均一性和岩浆演化过程中所经历的同化混染作用是造成杏山火山群和镜泊湖火山群的岩性差异的主要影响因素。

关键词:杏山火山群;中新世—更新世玄武岩;岩石化学;同化混染;地幔源区

玄武岩岩浆作为地幔物质部分熔融的产物,可以有效地揭示地幔深部信息。与大洋玄武岩相比,大陆玄武岩岩浆在上升过程中受地壳的影响更大。岩浆在地壳的停留过程中,通常会经历岩浆演化(包括分离结晶、同化混染和岩浆混合作用等),其地球化学特征也更加复杂。因此,大陆玄武岩岩浆在上升过程中经历的演化过程、岩浆成分在上地幔和地壳中的变化,成为了岩石学领域长期研究的重要课题。

近几十年来,国内外学者在同化混染的形成机制、岩浆演化的影响等方面取得了很多新的突破(Said et al., 2010; Ardila et al., 2019; Fan Xingli et al., 2021)。其中,对于大陆玄武岩,大多数研究者认为 Sr—Nd—Pb 同位素对上地壳同化混染有显著的示踪作用(Mason et al., 1996; Geng Xianlei et al., 2022)。Zeng Gang 等(2016)利用铂族元素(PGE)的亲硫性判断了岩浆是否发生过同化混染,并在南京地区新生代玄武岩的研究中发现该区域内的瓜埠山、六合方山和江宁方山的玄武岩 PGE 成分都受到过同化混染的影响。Hopkins 等(2016)认为 Os 同位素不仅可以确定同化混染的来源,而且为解

释地幔的非均质性提供了有力证据。对于洋岛玄武岩(Ocean Island Basalt, OIB),通过全岩微量元素与传统的 Sr—Nd—Pb 同位素地球化学难以判断陆内的 OIB 碱性玄武岩是否经历过同化混染,但是 Re—Os 同位素可以为研究 OIB 的同化混染提供重要指标,可以示踪岩浆上升过程中在地幔与地壳里的具体位置,且无需考虑地幔交代作用的影响(Chesley et al., 2004; Jung et al., 2011)。Li Xiaowei 等(2015)结合 Re—Os 同位素与同化混染—分离结晶模型对秦岭地区白垩纪玄武岩的分析得出该区域内 OIB 岩浆在上升期间在下地壳中经历了同化混染,而且发现与洋中脊玄武岩(Mid-Ocean Ridge Basalt, MORB)、洋岛玄武岩和陆下岩石圈地幔捕虏体相比,大陆内类 OIB 玄武岩 $n(^{187}\text{Os})/n(^{188}\text{Os})$ 值域较宽,表明大陆岩石圈 Os 同位素丰度较大;通过分析华北克拉通北部地区新生代碱玄武岩的 Os 同位素, Li Zhuang 等(2021)发现该区域内的集宁玄武岩在岩浆上升过程中受到同化混染作用的影响较大,而赤峰玄武岩只受到了轻微的影响。

岩浆在上升过程中通常要在地壳中停留一段时间才能到达地表,在此期间很有可能受到地壳物质

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41372343, 40872062)的成果。

收稿日期:2023-04-11;改回日期:2023-08-11;网络首发:2023-08-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2023.08.085

作者简介:郭可欣,女,1999年生,硕士研究生,自然地理学专业;Email: 17636265185@163.com。通讯作者:刘永顺,男,1966年生,博士,副教授,主要从事火山学、岩石学、地质流体力学和地质系统复杂性科学研究;Email: cnu901@126.com。

的混染(Carlson et al., 1991;牛耀龄,2013)。前人发现由于岩石圈地幔成分具有不均一性,其同位素几乎囊括了地壳成分的范围,因此仅通过野外考察和地球化学来研究同化混染究竟来自地幔还是地壳是不可靠的(张树明等,2002;Clarke,2007)。我国对同化混染的研究也较多,对东北地区新生代火山的同化混染的研究主要集中在五大连池和长白山地区(邱家骧等,1988;王团华等,2006;郭文峰等,2014;马晗瑞,2016),对镜泊湖地区研究较少,杏山地区更是乏善可陈。并且,前人普遍认为镜泊湖地区玄武岩没有经历过同化混染作用。刘北玲等(1989)通过研究镜泊湖地区第四纪玄武岩的同位素与微量元素认为该地区的玄武岩岩浆来源于岩石圈地幔,且在上升过程中未受地壳混染的影响。之后,张招崇等(1999)根据镜泊湖地区第四纪玄武岩与夏威夷玄武岩的Sr—Nd—Pb同位素组成的相似性推断镜泊湖地区玄武岩的形成可能与地幔柱相关,并通过Pb同位素推断镜泊湖地区玄武岩浆未遭受同化混染。在此基础上他们又根据玄武岩样品中低 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 和高 $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$ 的特点进一步排除了岩浆经历同化混染的可能性(张招崇等,2000)。秦秀峰等(2008)、Yan Jun和Zhao Jianxin(2008)、Bai Xiang等(2021)、李明涛等(2022)在后续的研究中也进一步阐述了这一观点。目前,在镜泊湖火山岩岩浆源区性质上尚存在不同认识。Fan Xingli等(2021)认为镜泊湖地幔源区为富集型地幔,张招崇等(2000)认为该区域岩浆为似原始一亏损型地幔,秦秀峰等(2008)认为该区域岩浆源区有从富集岩石圈地幔向软流圈转化的趋势。

镜泊湖火山区是我国新生代陆内玄武岩研究的一个重要窗口。其喷发中心在全新世时期西移至镜泊湖火山群(巩杰生,1996;翟福君等,2010;邹宗霖,2020)。前人根据同位素测年和地球化学研究将镜泊湖地区的火山岩分为船底山期(中新世)、杏山期(晚更新世)、镜泊湖期(全新世)三个火山喷发旋回并在该区域展开了岩石学特征研究,初步确定:中新世玄武岩主要为碱玄岩、白榴碱玄岩,更新世到全新世以碱玄岩为主(李东津等,1982;沈远超等,1987;樊祺诚等,2005;Fan Xingli et al., 2021;Bai Xiang et al., 2021)。然而,值得注意的是,前人的研究区域主要集中于该区域内的西区(包括火山口森林、大干泡、迷魂阵火山群)和东区(蛤蟆塘火山群;郭磊等,2022),而且多数人认为两个地区岩浆的形成时间、岩性特征、岩浆源区有较大的差异(张招崇等,2000;樊祺诚等,2005)。那么位于该区域东南部的杏山火山群是否也具有类似的特征呢?笔者等以杏山火山群为研究对象,在野外地质考察的基础上,从矿物学、岩石学、地球化学、同位素地球化学的角度来定性、定量地研究该区域的地壳、地幔特征以及岩浆演化对玄武岩成分变化的影响,同时将杏山火山群与前人研究的镜泊湖火山岩的岩浆源区进行对比分析,以期完善镜泊湖火山群的成因认识。

1 区域地质概况

镜泊湖地区位于黑龙江省宁安市以及敦化—密山断裂带的西侧(图1)。该区域内岩浆活动在晚泥盆世、晚侏罗世、新近纪、第四纪均有发生,其中以新生代火山活动最为猛烈,形成了一条沿断裂带及其

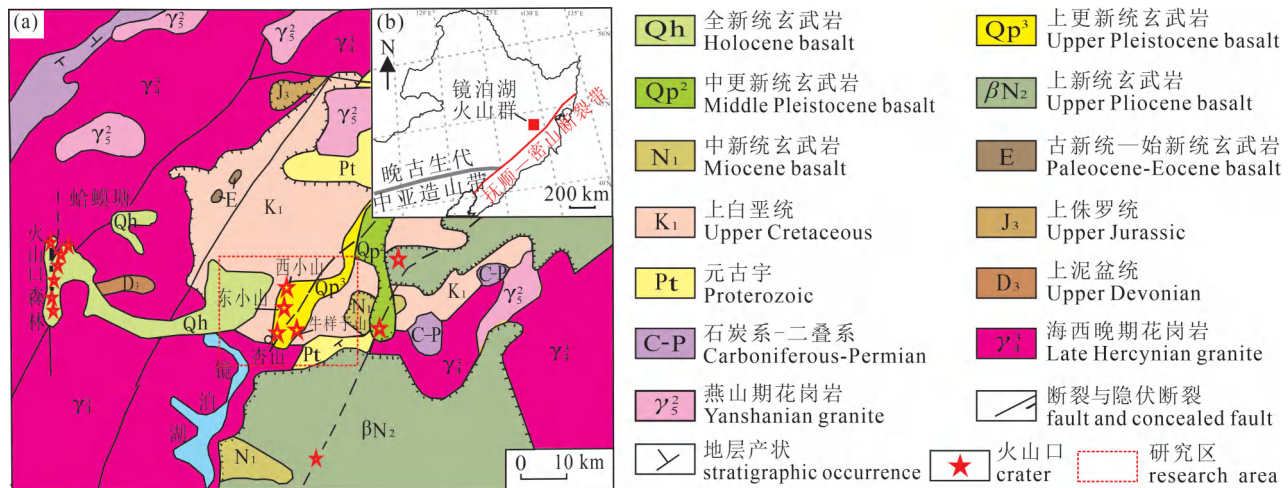


图1 黑龙江镜泊湖火山群地质图(a)和东北地区区域断裂简图(b)

Fig. 1 Geological map of the Jingpo Lake Volcano Group in Heilongjiang (a) and regional fractures sketch of Northeast China (b)



图 2 镜泊湖地区杏山火山群野外地质现象照片:(a)杏山火山锥剖面;(b)杏山火山的表面黏附火山渣的熔岩饼;(c)牛样子山橄榄岩包体;(d)牛样子山单斜辉石巨晶

Fig. 2 Photos of the field geological phenomena of the Xingshan Volcano Group in Jingpo Lake area: (a) Xingshan volcanic cone profile; (b) pancake bomb with scoria adhered to the surface from Xingshan Volcano; (c) peridotite xenolith from Niuyangzishan Volcano; (d) clinopyroxene megacrysts from Niuyangzishan Volcano

四周分布的 NNE 向的火山带,长约 400 km,宽约 40 km。镜泊湖地区广泛发育新生代碱玄岩(秦秀峰等,2008;Xiao Wenjiao and Santosh,2014)。除玄武岩外,区内还大量分布海西期—燕山期花岗岩,南部

表 1 镜泊湖地区杏山火山群野外岩石特征

Table 1 Rock characteristics of Xingshan Volcano Group in Jingpo Lake area

坐标	海拔	样品号	样品名称	所采集的样品的野外岩相特征
44°3'27"N 129°7'52.06"E	358 m	21JPH-39	牛样子山粗面玄武岩	采于溅落堆积层的火山渣,为表面发生塑性变形的红褐色粗面玄武岩,含少量花岗岩捕虏体,气孔构造,气孔的平均直径为 0.3 cm
		21JPH-40	牛样子山粗面玄武岩	采于剖面西侧的火山弹的壳,为红褐色含大量壳源包体、长石和石英捕虏晶、幔源橄榄岩包体(直径约 0.5 mm)的粗面玄武岩,气孔稠密均匀,平均直径为 0.3 cm
44°4'5.87"N 129°7'10.33"E	345 m	21JPH-50	西小山碧玄岩	红褐色溅落的塑性岩浆团块,表面粗糙呈锯齿状,内部含少量花岗岩捕虏体的碧玄岩
		21JPH-53	西小山碧玄岩	红褐色溅落的塑性岩浆团块,其中夹杂着黑色火山弹与红褐色的熔岩饼
44°3'53.38"N 129°7'22.87"E	323 m	21JPH-74	东小山碧玄岩	黑褐色的碧玄岩,含大量蜂窝状气孔,气孔直径约 3 mm
		21JPH-76	东小山碧玄岩	灰黑色致密块状的含斜长石、辉石斑晶的碧玄岩
44°3'45.21"N 129°6'43.05"E	334 m	21JPH-78	杏山碧玄岩	红褐色表面发生塑性变形的碧玄岩
		21JPH-79	杏山碧玄岩	火山弹的壳,为灰褐色致密块状碧玄岩,含少量直径较小的花岗岩捕虏体

与东北部还分布元古宇黑龙江群和麻山群变质岩,西部小北湖地区分布泥盆纪花岗岩,西北部和东南部分布石炭纪—二叠纪、侏罗纪、白垩纪的花岗岩(张招崇等,1999)。杏山火山群位于镜泊湖地区牡丹江深断裂与杏山断裂交界处,由4个火山渣锥及其熔岩组成,分别为牛样子山、西小山、东小山和杏山,属于前人划分的杏山玄武岩期(约为中新世到

晚更新世)(刘北玲等,1989;崔根等,2010;李树才,2013)(图1)。

4座火山均被风化堆积层不同程度地覆盖。除东小山外,其余火山剖面出露完好,均由红褐色扭曲变形的火山弹、熔岩饼及火山渣组成,溅落堆积物中有大量弱熔结的角砾集块岩、具有反应边的幔源包体和壳源花岗岩捕虏体以及单斜辉石、歪长石巨晶

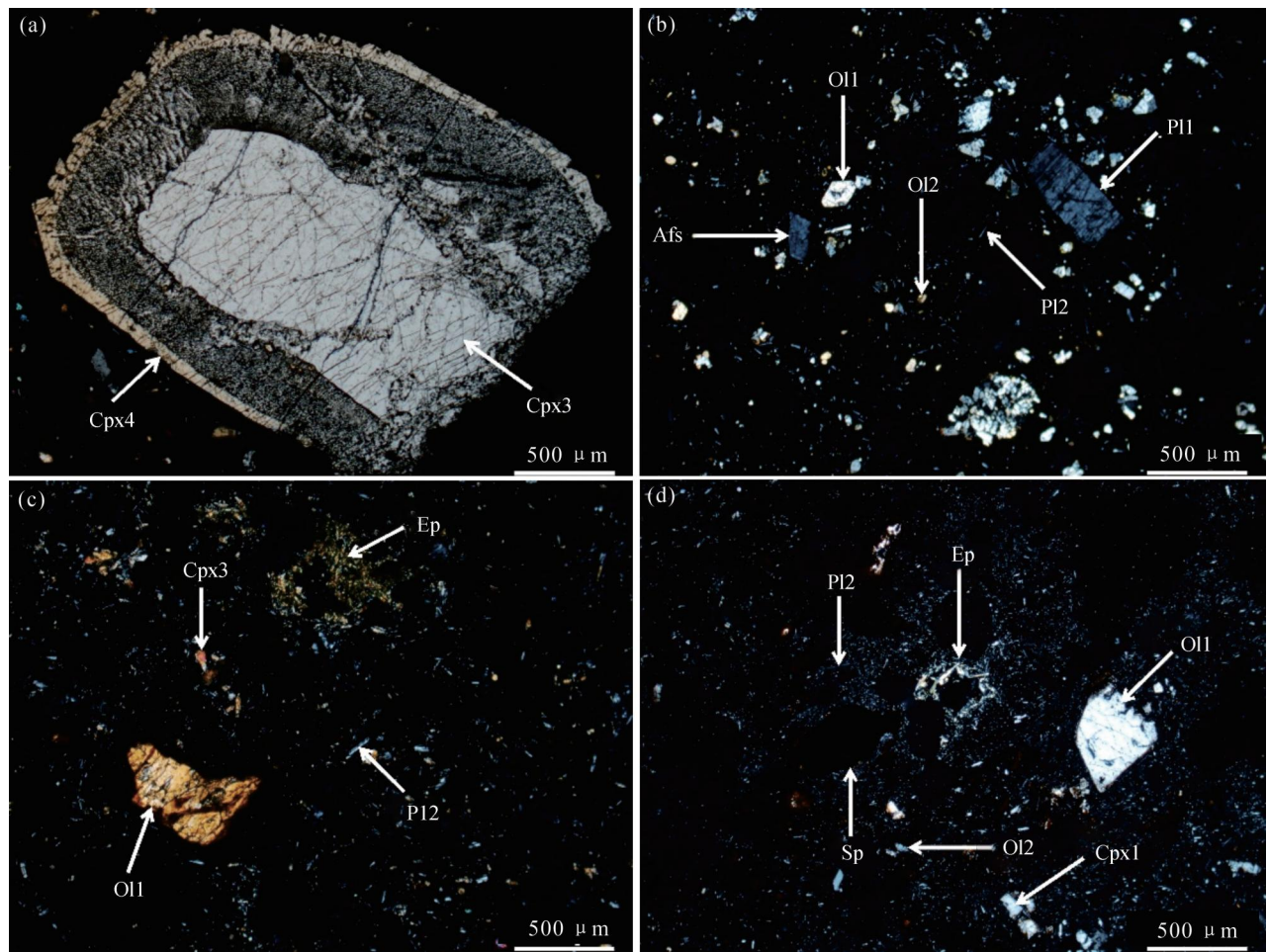


图3 镜泊湖地区杏山火山群的火山岩显微岩相照片:(a)牛样子山 21JPH-39 号含 Ol 和 Cpx 斑晶的玻基斑状钾质粗面玄武岩中的 Cpx 巨晶(正交偏光);(b)西小山 21JPH-53 号含 Cpx 巨晶和 Pl 与 Ol 斑晶的玻基斑状碧玄岩(正交偏光);(c)东小山 21JPH76 号含 Ol 斑晶与捕虏晶的玻基斑状碧玄岩(正交偏光);(d)杏山 21JPH-79 号含 Ol 斑晶和 Ol 与 Sp 捕虏晶的玻基斑状碧玄岩(正交偏光)

Fig. 3 Micropetrographic photos of volcanic rocks from the Xingshan Volcano Group in Jingpo Lake area: (a) Cpx megacryst No. 21JPH-39 potassic trachy-basalt with vitrophyric texture containing Ol and Cpx phenocrysts from Niuyangzishan Volcano (cross-polarized light, XPL); (b) No. 21JPH-53 basanite with vitrophyric texture containing Cpx megacrysts and Pl and Ol phenocrysts from Xixiaoshan Volcano (XPL); (c) No. 21JPH-76 basanite with vitrophyric texture containing Ol phenocrysts and xenocrysts from Dongxiaoshan Volcano (XPL); (d) No. 21JPH-79 basanite with vitrophyric texture containing Ol phenocrysts and Ol and Sp xenocrysts from Xingshan Volcano (XPL)

矿物缩写符号后的数字代表矿物的世代性,越晚世代的矿物,数字越大;Cpx—单斜辉石;
Ol—橄榄石;Pl—斜长石;Afs—碱性长石;Sp—尖晶石;Ep—绿帘石

The number after mineral abbreviation symbol represents the mineral generation, and the later the mineral generation, the larger the number; Cpx—clinopyroxene; Ol—olivine; Pl—plagioclase; Afs—alkali feldspar; Sp—spinel; Ep—Epidote

(图 2)。杏山火山群的岩石类型主要为碧玄岩,粗面玄武岩仅在牛样子山出现,具体的岩石特征见表 1。4 座火山均属于斯通博利型喷发,喷发物具有典型韵律堆积特点,但喷发和爆炸的强弱有所不同。

2 研究方法

笔者等选取牛样子山、西小山、东小山、杏山的 8 个代表性的岩石样品进行了全岩的主量元素、微量元素和稀土元素分析测试以及 Sr—Nd—Pb 同位素分析测试。岩石薄片的鉴定和照片采集工作是在首都师范大学地质流体实验室借助 Nikon Eclipse LV100pol 偏光显微镜和 NIS Elements D 软件完成。地球化学分析测试由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。主量元素分析仪器是 AB104L Axios-mAX 波长色散 X 射线荧光光谱仪、CS580A 碳硫分析仪,实验温度为 20℃,相对湿度为 40%。微量元素和稀土元素分析仪器是 ELEMENT XR 等离子体质谱仪,实验温度为 22.6℃,相对湿度为 20%。Sr—Nd—Pb 同位素分析仪器为 Phoenix 热表面电离质谱仪、ISOPROBE-T 热表面电离质谱仪,实验温

度为 20℃,相对湿度为 30%,误差为 2σ。

3 岩相学特征

本次研究对牛样子山粗面玄武岩(21JPH-39)、西小山碧玄岩(21JPH-53)、东小山碧玄岩(21JPH-76)和杏山碧玄岩(21JPH-79)进行了显微岩相学分析(图 3)。这些碧玄岩、粗面玄武岩以玻基斑状结构、气孔构造为主,斑晶为橄榄石、单斜辉石和斜长石,基质含斜长石和橄榄石微晶、火山玻璃。岩石中还含有小的橄榄岩包体、花岗岩捕虏体、单斜辉石和歪长石巨晶、尖晶石捕虏晶以及石英、碱性长石、斜长石捕虏晶。橄榄石斑晶多呈他形粒状,有明显的世代现象。单斜辉石斑晶为他形粒状或柱状。单斜辉石巨晶为板状,发育单斜辉石反应边和增生边。石英捕虏晶多呈他形粒状。斜长石捕虏晶半自形粒状,聚片双晶发育。碱性长石捕虏晶均为他形,单偏光下表面具有高岭土化。尖晶石呈粒状,正交偏光下全消光。此外,部分岩石受水热变质明显,局部有绿帘石分布。

4 地球化学特征

4.1 主量元素特征

从表 2 可以看出,杏山火山群 4 座火山的全岩的主量成分变化范围较小,总体具有低 SiO₂ (46.25% ~ 48.06%)、高碱 Na₂O+K₂O (6.22% ~ 6.75%) 和高 Al₂O₃ (15.28% ~ 15.6%) 的特征。在 TAS 图中(图 4),除牛样子山样品落入粗面玄武岩区域外,其余样品均落在碱玄岩、碧玄岩区域中。将这些样品进行 CIPW 计算(表 2),结果显示这些样品的 ol 标准矿物含量均大于 10%,属于碧玄岩。在 K₂O—Na₂O 和 K₂O—SiO₂ 相关图解上,杏山火山群的火山岩分别属于钠质岩系列和钾玄岩系列(图 5a、图 5b),镜泊湖地区玄武岩除个别样品落入钙碱系列和高钾钙碱系列区域外,其余特征与杏山火山群基本一致。在哈克图解中(图 6),SiO₂ 与 CaO、MgO、FeO_T、TiO₂

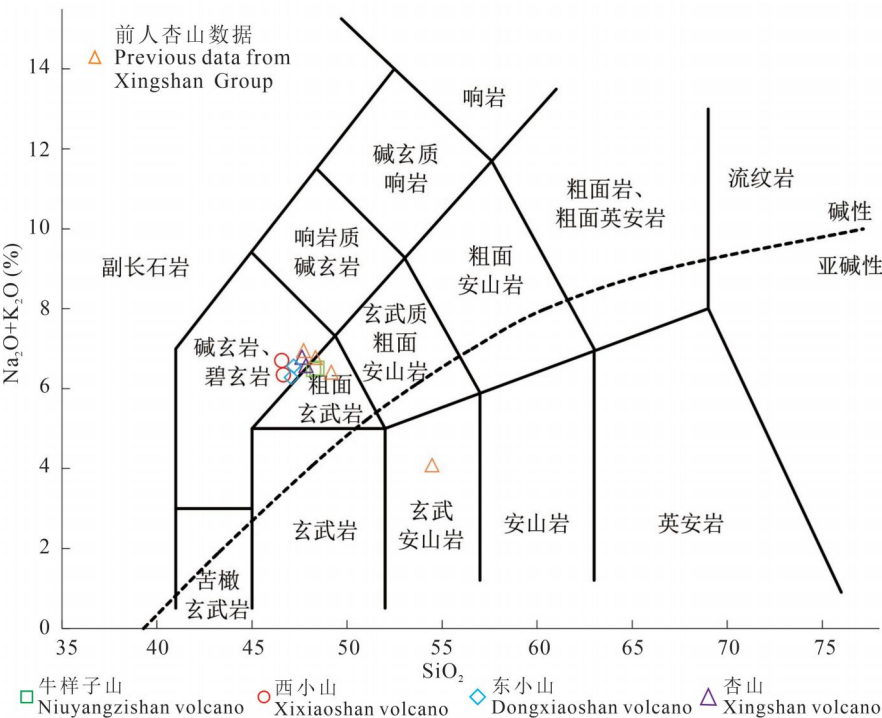


图 4 镜泊湖地区杏山火山群 TAS 分类图解

Fig. 4 TAS classification diagram of the Xingshan Volcano Group in Jingpo Lake area

底图据 Le Maitre 等(1984);前人杏山的数据来源于李明涛等(2022),下同

Base map after Le Maitre et al. (1984);data of the Xingshan Volcano Group are from

Li Mingtao et al. (2022), and the data sources of following figs. are the same

表 2 杏山火山群的火山岩主量元素(%)、稀土与微量元素($\times 10^{-6}$)含量及其参数和 CIPW(%) 计算结果

Table 2 Contents of major elements(%), rare earth and trace elements($\times 10^{-6}$) and their calculation results of parameters and CIPW(%) of volcanic rocks from Xingshan Volcano Group

样品编号	牛样子山		西小山		东小山		杏山	
	21JPH-39	21JPH-40	21JPH-50	21JPH-53	21JPH-74	21JPH-76	21JPH-78	21JPH-79
岩性	粗面玄武岩		碧玄岩					
SiO ₂	48.06	47.88	46.27	46.25	46.63	46.83	47.35	47.46
TiO ₂	1.69	1.69	1.91	1.91	1.74	1.77	1.83	1.83
Al ₂ O ₃	15.6	15.46	15.35	15.37	15.37	15.43	15.28	15.4
Fe ₂ O ₃	6.03	6.00	6.99	6.41	9.60	7.06	9.37	5.45
FeO	4.27	4.33	3.95	4.59	1.37	3.65	1.39	4.98
MnO	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.17	0.17	0.16
MgO	8.55	8.73	8.97	9.01	9.02	8.95	8.55	8.74
CaO	7.91	8.02	8.55	8.57	8.4	8.32	8.21	8.16
Na ₂ O	3.73	4.12	4.1	3.87	3.93	3.92	4.14	4
K ₂ O	2.74	2.31	2.56	2.42	2.29	2.59	2.61	2.53
P ₂ O ₅	0.54	0.57	0.55	0.57	0.55	0.55	0.54	0.52
烧失	0.15	0.16	0.1	0.25	0.66	0.27	0.33	0.11
总量	99.43	99.43	99.46	99.39	99.74	99.51	99.76	99.35
H ₂ O ⁺	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
H ₂ O ⁻	<0.10	<0.10	<0.10	0.2	0.48	<0.10	<0.10	<0.10
CO ₂	0.07	0.08	0.06	0.08	0.08	0.07	0.08	0.06
FeO _T	9.70	9.73	10.24	10.35	10.01	10.00	9.82	9.89
σ	8.27	8.47	13.56	12.17	10.66	11.07	10.47	9.56
AI	0.58	0.60	0.62	0.58	0.58	0.60	0.63	0.61
FL	44.99	44.50	43.79	42.33	42.54	43.90	45.12	44.45
AR	1.76	1.75	1.77	1.71	1.71	1.76	1.81	1.77
K ₂ O/Na ₂ O	0.73	0.56	0.62	0.63	0.58	0.66	0.63	0.63
Mg [#]	61.15	61.56	61.00	60.84	61.67	61.50	60.85	61.21
La	36.6	39.2	36.9	38.5	40.3	43.3	38.3	41.3
Ce	66.1	71.2	64.1	75.5	69.5	73.6	70.5	73.2
Pr	7.33	7.55	6.77	7.63	7.65	7.92	7.91	7.84
Nd	28.5	29.6	29.3	32.4	32.4	32.9	33.6	33.4
Sm	5.1	6.18	5.61	5.83	5.85	5.92	6.51	6.24
Eu	1.8	1.82	1.81	1.87	1.9	1.95	1.99	2.09
Gd	5.08	5.61	4.96	5.38	5.85	5.62	5.81	5.8
Tb	0.889	0.907	0.844	0.913	0.92	0.866	0.946	0.916
Dy	4.34	4.68	3.97	4.38	4.9	4.64	4.79	5.03
Ho	0.74	0.856	0.753	0.813	0.893	0.895	0.833	0.891
Er	2.14	2.4	2.04	2.22	2.48	2.43	2.24	2.53
Tm	0.313	0.342	0.267	0.285	0.336	0.347	0.326	0.339
Yb	1.81	2.01	1.73	1.81	2.17	2.03	1.72	2.12
Lu	0.264	0.297	0.225	0.255	0.286	0.29	0.231	0.306
ΣREE	161.01	172.65	159.28	177.79	175.44	182.71	175.71	182.00
LREE/HREE	9.34	9.10	9.77	10.07	8.84	9.67	9.40	9.15
(La/Yb) _N	14.50	13.99	15.30	15.26	13.32	15.30	15.97	13.97
(La/Sm) _N	4.63	4.09	4.25	4.26	4.45	4.72	3.80	4.27
δEu	1.07	0.93	1.03	1.00	0.98	1.02	0.97	1.04
δCe	0.93	0.95	0.92	1.02	0.91	0.90	0.94	0.93
Li	9.5	9.44	7.8	9.23	8.41	8.73	8.83	10.2
Be	2.07	2.06	1.8	1.82	1.8	1.81	2.09	2.72
Sc	20.3	22.5	19.5	20.6	23.8	25.2	21.4	22.7
V	168	178	183	197	171	189	172	192
Cr	180	188	176	195	211	215	177	210

样品编号	牛样子山		西小山		东小山		杏山	
	21JPH-39	21JPH-40	21JPH-50	21JPH-53	21JPH-74	21JPH-76	21JPH-78	21JPH-79
岩性	粗面玄武岩		碧玄岩					
Co	43.9	45.2	49.4	51.5	49	53	53.1	50
Ni	143	149	138	145	150	155	158	138
Cu	41.5	45.6	41.9	43.2	47.1	49	33.2	41.4
Zn	117	123	121	134	132	126	131	134
Ga	21.3	21.2	20.1	24.7	20.4	22.6	22.2	23.3
Rb	50.3	55.6	43.8	41.6	53.3	49.9	55.1	58.2
Sr	582	587	570	705	647	645	638	685
Y	19	19.6	18.4	19	21.2	21.5	19.8	22
Mo	4.18	4.66	3.93	5.03	4.22	4.55	3.24	4.44
Cd	0.08	0.12	0.08	0.10	0.10	0.14	0.11	0.14
In	0.01	0.09	0.07	0.09	0.16	0.07	0.08	0.09
Sb	0.10	0.15	0.06	0.08	0.10	0.10	0.09	0.11
Cs	1.22	1.03	0.84	0.60	0.88	0.91	1.12	1.27
Ba	634	652	639	675	623	716	651	735
W	0.89	1.02	0.73	0.90	0.76	0.95	0.82	1.00
Re	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Tl	0.02	0.02	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.04
Pb	3.24	6.99	2.54	3.81	3.04	5.14	5.14	5.37
Bi	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02
Th	5.47	6.24	5.01	5.73	5.49	5.72	5.57	5.97
U	1.34	1.38	1.12	1.36	1.29	2.1	1.45	1.69
Nb	46.2	52.9	51.7	53.2	51.8	47.5	51.8	53
Ta	2.76	3.15	2.91	3.26	2.96	3.19	3.27	3.25
Zr	200	216	208	236	215	214	219	234
Hf	4.79	5.24	4.81	5.41	5.11	5.63	4.99	5.63
K [*]	1.41	1.10	1.35	1.15	1.13	1.03	1.22	1.09
Nb [*]	0.82	0.97	0.93	0.93	0.98	0.81	0.87	0.91
Ba/Rb	12.60	11.73	14.59	16.23	11.69	14.35	11.81	12.63
Ni/Co	3.26	3.30	2.79	2.82	3.06	2.92	2.98	2.76
ap	1.29	1.36	1.31	1.36	1.31	1.31	1.29	1.24
il	3.23	3.23	3.65	3.66	3.34	3.39	3.50	3.50
mt	5.20	5.20	5.41	5.41	5.25	5.28	5.33	5.34
or	16.31	13.75	15.22	14.42	13.66	15.42	15.51	15.07
ab	19.73	20.92	13.10	14.75	16.92	15.48	17.07	18.09
an	17.86	16.99	16.02	17.57	17.70	16.99	15.49	16.72
ne	6.53	7.69	11.82	9.91	9.02	9.72	9.84	8.68
wo	7.58	8.09	9.64	9.02	8.67	8.78	9.17	8.64
en	5.30	5.68	6.75	6.29	6.06	6.14	6.45	6.09
fs	1.63	1.73	2.07	1.98	1.89	1.89	1.93	1.80
fo	11.31	11.37	11.02	11.46	11.64	11.43	10.49	11.10
fa	3.84	3.81	3.73	3.97	4.00	3.88	3.46	3.61
总计	99.82	99.83	99.75	99.79	99.47	99.73	99.53	99.88

注: σ 为里特曼指数。 AR 为莱特碱度率, $AR = (Al_2O_3 + CaO + ALK)/(Al_2O_3 + CaO - ALK)$; 当 $SiO_2 > 50\%$, 同时 $2.5 > K_2O/Na_2O > 1$ 时, 规定 $ALK = 2Na_2O$; 一般情况下 $ALK = K_2O + Na_2O$ 。 AI 为碱铝指数, $AI = (Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$ 。 FL 为长英指数, $FL = 100 \times (K_2O + Na_2O)/(K_2O + Na_2O + CaO)$ 。 $Mg^\#$ 为镁值, $Mg^\# = 100 \times n(Mg^{2+})/[n((Mg^{2+}) + n(TFe^{2+}))]$; $LREE$ 与 $HREE$ 采用二分法; $\delta Eu = 2Eu_N/(Sm_N + Gd_N)$; $\delta Ce = 2Ce_N/(La_N + Pr_N)$; $K^* = K_N/[0.5 \times (U_N + Nb_N)]$; $Nb^* = Nb_N/[0.5 \times (K_N + Ta_N)]$

呈良好的负相关关系,与 Na_2O 显著正相关,与 Al_2O_3 相关性不明显。通常情况下,碱性基性岩浆是在深部熔融程度较低、压力较大的地幔环境中部分熔融形成,而杏山火山群岩浆成分具有典型的这

类岩石特征,因此可以确定杏山火山群岩浆主要来源于上地幔。

4.2 稀土与微量元素特征

杏山火山群的 4 座火山具有相似的稀土和微量

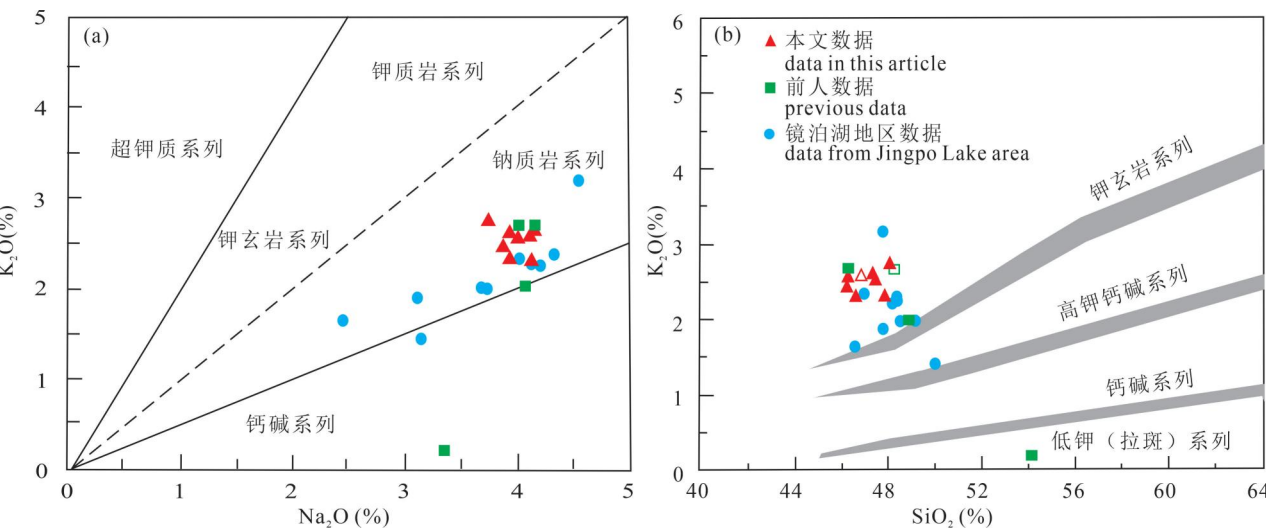


图 5 镜泊湖地区杏山火山群 K_2O 与 Na_2O 相关图解(a)和 K_2O 与 SiO_2 相关图解(b)

Fig. 5 Correlation diagram of K_2O and Na_2O (a) and correlation diagram of K_2O and SiO_2 (b)

for the Xingshan Volcano Group in Jingpo Lake area

底图据 Peccerillo and Taylor (1976), Rollinson (1993); 镜泊湖地区数据据 Yan Jun and Zhao Jianxin(2008), 下同

Base map after Peccerillo and Taylor (1976), Rollinson (1993); data of Jingpo Lake area are from Yan Jun and Zhao Jianxin (2008), and the data sources of following figs. are the same

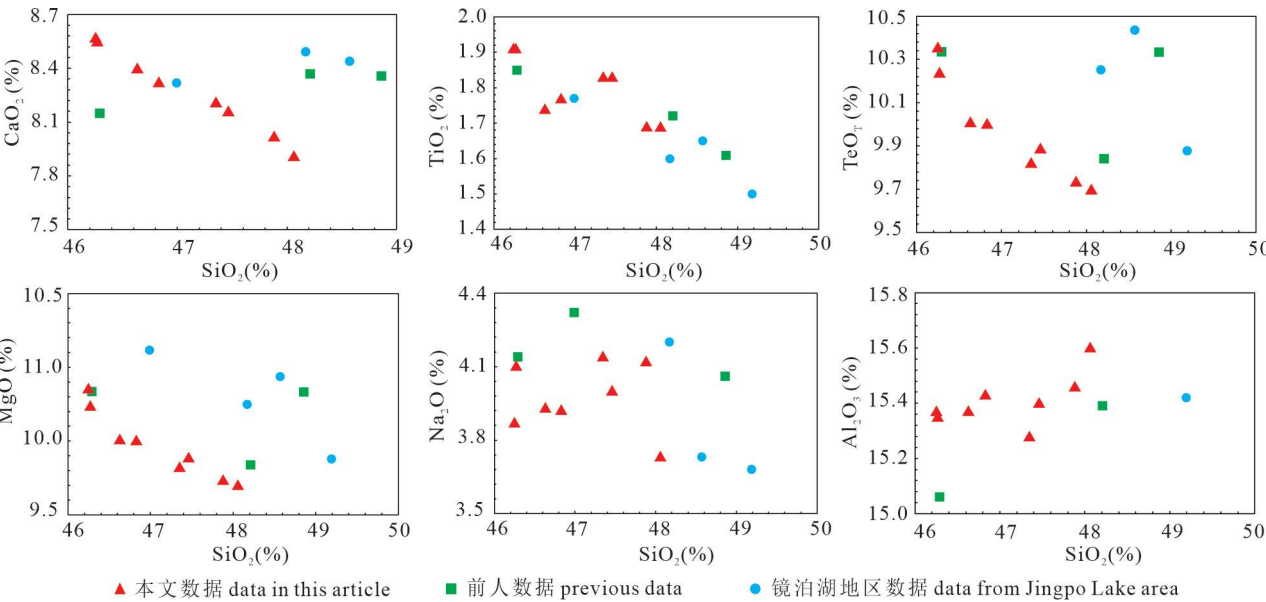


图 6 镜泊湖地区杏山火山群哈克图解

Fig. 6 Harker diagram of the Xingshan Volcano Group in Jingpo Lake area

元素配分型式,表明其地球化学特征与地质作用过程也较为相似。杏山火山群的稀土元素球粒陨石标准化配分型式与 OIB 型玄武岩有一定的相似性(图 7),曲线呈右倾型,富集轻稀土元素($(La/Sm)_N = 2.88 \sim 4.72$),亏损重稀土元素,重稀土元素在配分曲线上分布较为平坦,轻、重稀土元素分异程度较高

($(La/Yb)_N = 9.57 \sim 15.97$),且未发现 Eu 与 Ce 存在显著负异常($\delta Eu = 0.93 \sim 1.07, \delta Ce = 0.9 \sim 1.02$)。稀土元素总量 ΣREE 为 $146.01 \times 10^{-6} \sim 182.71 \times 10^{-6}$,轻重稀土之比为 $7.39 \sim 10.07$,暗示岩浆在演化过程中发生了富集(表 2)。不同的是,杏山玄武岩的轻稀土元素富集程度与重稀土元素分馏

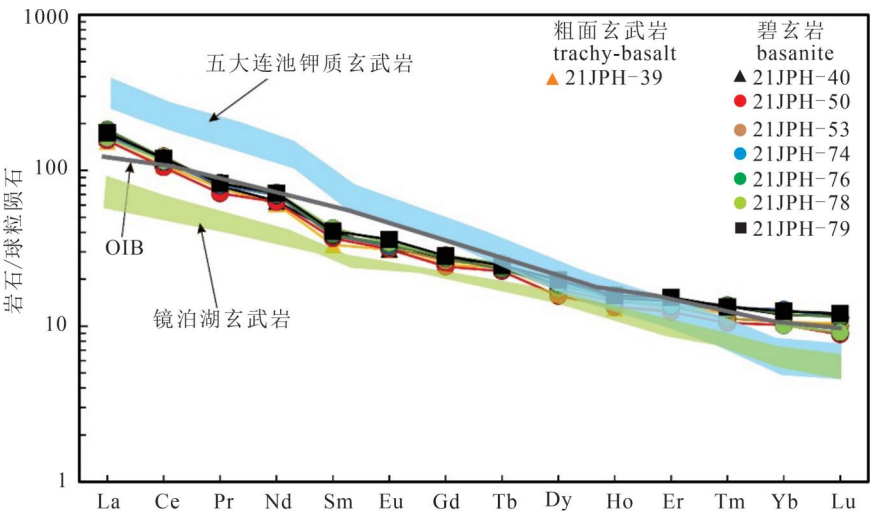


图 7 镜泊湖地区杏山火山群的稀土元素球粒陨石标准化配分图

Fig. 7 Chondrite-normalized REEs patterns of the

Xingshan Volcano Group in Jingpo Lake area

球粒陨石数据和 OIB 数据来源于 Sun 和 McDonough (1989);

五大连池钾质玄武岩数据来源于 Zhang Ming 等 (1995)

Chondrite data and OIB data are from Sun 和 McDonough (1989); data of

Wudalianchi potassic basalt are from Zhang Ming et al., 1995

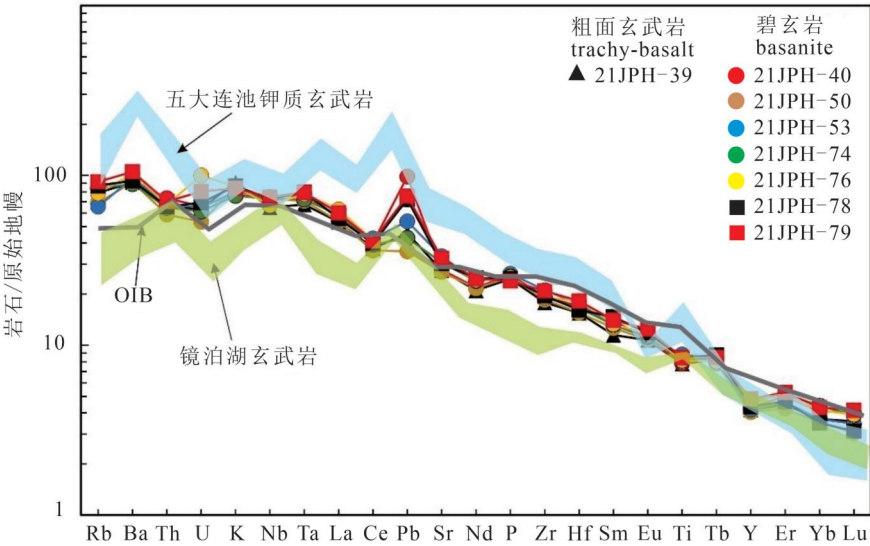


图 8 镜泊湖地区杏山火山群的微量元素原始地幔标准化配分图

Fig. 8 Trace element concentrations normalized to primitive mantle

of the Xingshan Volcano Group in Jingpo Lake area

原始地幔数据和 OIB 数据来源于 Sun 和 McDonough (1989),

五大连池钾质玄武岩数据来源于 Zhang Ming et al., 1995

Primitive mantle data and OIB data are from Sun and McDonough (1989), and

data of Wudalianchi potassic basalt are from Zhang Ming et al., 1995

于五大连池火山岩区,低于镜泊湖火山岩区 (Zhang Ming et al., 1995)。杏山火山群的微量元素原始地幔标准化配分型式 (图 8) 与镜泊湖火山岩区的分配型式较为相似,表现出大离子亲石元素 Ba、Ta、K 相对富集,高场强元素 (如 Zr、Ti、Nb) 相对亏损。Pb 呈显著正异常,暗示岩浆在演化的过程中有来自大陆地壳物质的参与 (表 2)。杏山火山群的微量元素配分型式虽与 OIB 型玄武岩有一定的相似性,但杏山火山群的 Ti 含量相对更低。五大连池钾质玄武岩除了具有更显著的 Ba、Ce、Ti 正异常外,其余的微量元素配分型式与杏山火山群的相似 (Yan Jun and Zhao Jianxin, 2008)。

4.3 Sr—Nd—Pb 同位素特征

杏山火山群的 Sr—Nd—Pb 同位素数据见表 3。杏山火山群的 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值为 0.70426 ~ 0.704493, $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$ 值为 0.512788 ~ 0.512907, $n(^{208}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 值为 37.975 ~ 38.108, $n(^{207}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 值为 15.502 ~ 15.528, $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 值为 17.912 ~ 18.085, $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ (为 ϵ_{Nd} 的现今值) 为 2.9 ~ 5.2。值得注意的是,含橄榄岩包体的样品较其他不含橄榄岩包体的样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 显著正异常 (样品 21JPH-50 的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值为 5.2), 且其微量元素特征与 OIB 最为相似 (图 8)。对这一现象,推测其成因是:无论是含包体的还是不含包体的岩浆都来自于软流圈,二者之所以会产生地球化学性质差异,主要是因为含包体的岩浆上升速度较快,在地壳

程度低于五大连池钾质玄武岩,高于镜泊湖地区玄武岩,说明杏山火山群相较于五大连池地区岩浆富集程度低,而高于镜泊湖火山岩区,部分熔融程度高

中停留时间短。相较而言,不含包体的岩浆上升速度较慢,在地壳停留过程中有充分的时间与地壳物质产生混染。

表 3 杏山火山群的全岩 Sr—Nd—Pb 同位素分析结果(微量元素含量单位为 $\times 10^{-6}$)
Table 3 Sr—Nd—Pb isotope data of whole rocks in Xingshan Volcano Group ($\times 10^{-6}$)

地点	牛样子山	西小山	东小山	杏山	地点	牛样子山	西小山	东小山	杏山
样品编号	21JPH-39	21JPH-50	21JPH-74	21JPH-78	样品编号	21JPH-39	21JPH-50	21JPH-74	21JPH-78
岩性	粗面玄武岩	碧玄岩			岩性	粗面玄武岩	碧玄岩		
Rb	50.3	43.8	53.3	55.1	Th	5.47	5.01	5.49	5.57
Sr	582	570	647	638	U	1.34	1.12	1.29	1.45
Rb/Sr	0.08643	0.07684	0.08238	0.08636	U/Pb	0.4136	0.4409	0.4243	0.2821
$n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$	0.704493	0.704260	0.704297	0.704461	Th/Pb	1.688	1.972	1.806	1.084
Sm	5.1	5.61	5.85	6.51	$n(^{208}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$	38.101	37.975	38.108	37.986
Nd	28.5	29.3	32.4	33.6	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$	15.528	15.502	15.522	15.507
Sm/Nd	0.1789	0.1915	0.1806	0.1938	$n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$	18.085	17.912	17.975	18.045
Sr/Nd	20.42	19.45	19.97	18.99	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	2.9	5.2	2.9	3.8
$n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$	0.512788	0.512907	0.512788	0.512831					
Pb	3.24	2.54	3.04	5.14					

总体来看,4 座火山的 Sr—Nd—Pb 同位素变化特征较为一致,暗示它们都来自于同一岩浆源区。

在 ϵ_{Nd} 与 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 的关系图解中(图 9),杏山火山群样品的 Sr—Nd 同位素呈现良好的负相关关系,并且都落在第二象限内洋岛玄武岩(OIB)区域中,属于亏损地幔,并与宽甸和龙岗地区的玄武岩呈现相似的同位素组成。

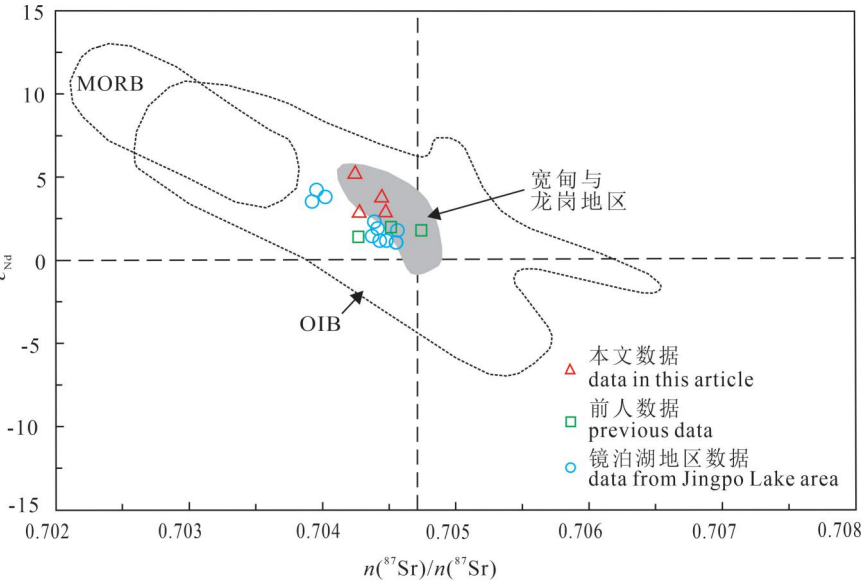


图 9 镜泊湖地区杏山火山群 ϵ_{Nd} 与 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 的关系图解

Fig. 9 Diagram of the relationship between ϵ_{Nd} and $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ of the Xingshan Volcano Group in Jingpo Lake area

洋中脊玄武岩(MORB)数据引自 Zou Haibo et al. (2000); 洋岛玄武岩(OIB)数据引自 Barry and Kent(1998); 宽甸玄武岩、龙岗玄武岩和五大连池钾质玄武岩数据分别引自 Basu et al. (1991)、闫峻等(2007)和 Zhang Ming et al. (1995)

Mid-ocean Ridge Basalt (MORB) data from Zou Haibo et al. (2000); Ocean Island Basalt (OIB) data from Barry and Kent (1998); Data of Kuandian basalt, Longgang basalt and Wudalianchi potassic basalt are quoted from Basu et al. (1991), Yan Jun et al. (2007) and Zhang Ming et al. (1995), respectively

在 ϵ_{Nd} 与 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 的关系图解中(图 9),杏山火山群样品的 Sr—Nd 同位素呈现良好的负相关关系,并且都落在第二象限内洋岛玄武岩(OIB)区域中,属于亏损地幔,并与宽甸和龙岗地区的玄武岩呈现相似的同位素组成。与镜泊湖地区相比,杏山火山群的 ϵ_{Nd} 平均值更高,暗示其受到地壳混染程度更高,岩浆更为演化。在 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 与 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 的关系图解和 $n(^{208}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 与 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 的关系图解中(图 10),杏山火山群所有样品均位于北半球参考线(NHRL)上方、地球年龄线(Geochron)的右侧,且落在印度洋洋中脊区域(I-MORB),Pb 同位素特征与宽甸和镜泊湖地区的相似。值得注意的是,与镜泊湖地区相比,杏山火山群 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 值更高。

5 讨论

5.1 岩浆演化

5.1.1 分离结晶

通常来说,玄武质岩浆演化

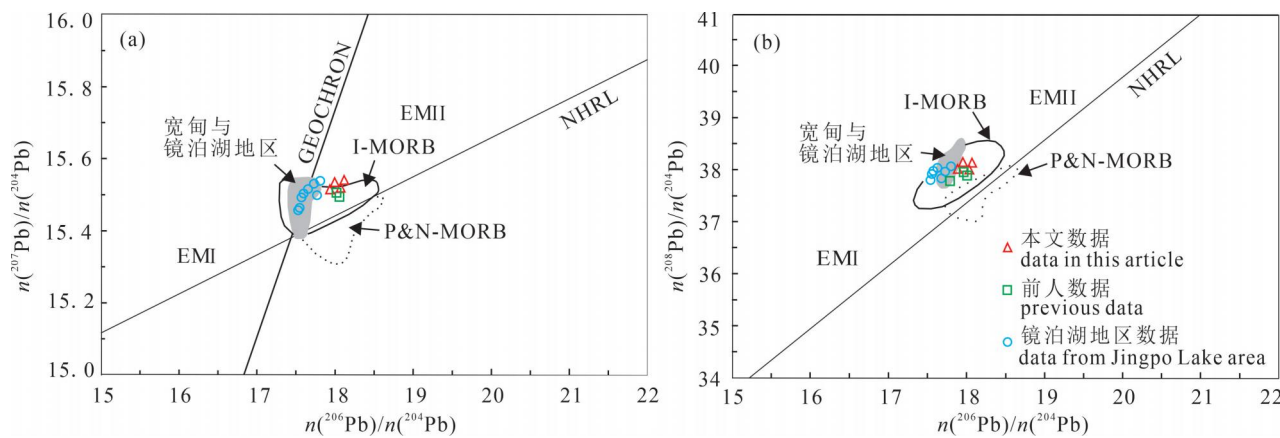


图 10 镜泊湖地区杏山火山群: (a) $n(^{207}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 与 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 关系图; (b) $n(^{208}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 与 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 关系图

Fig. 10 (a) Diagram of the relationship between $n(^{207}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ and $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$; (b) Diagram of the relationship between $n(^{208}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ and $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ of the Xingshan Volcano Group in Jingpo Lake area
印度洋 MORB(I-MORB)数据引自 Barry and Kent (1998);太平洋和北大西洋 MORB(P & N-MORB)数据引自 Zou Haibo et al. (2000);EMI和 EM II 数据引自 Zindler and Hart(1986)。地球年龄线(Geochron)与北半球参考线(NHRL)引自 Hart(1984)
Indian Ocean MORB (I-MORB) data from Barry and Kent (1998); Pacific and North Atlantic MORB (P & N-MORB) data from Zou Haibo et al. (2000); EMI and EM II data from Zindler and Hart (1986). The Earth Age Line (Geochron) and the Northern Hemisphere Reference Line (NHRL) are quoted from Hart (1984)

是岩浆从源区向上运移至岩浆房或浅部的冷却结晶的过程(牛耀龄,2013)。前人根据镜泊湖火山群玄武岩 SiO_2 与 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 无显著相关性排除了镜泊湖玄武岩浆经历分离结晶的可能性。而杏山火山群样品 $\text{Mg}^\# = 60.84 \sim 61.67$, $\text{Ni} = 138 \times 10^{-6} \sim 158 \times 10^{-6}$, $\text{Cr} = 176 \times 10^{-6} \sim 215 \times 10^{-6}$, 低于原始岩浆 $\text{Mg}^\# = 68 \sim 75$, $\text{Ni} = 400 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$, $\text{Cr} > 1000 \times 10^{-6}$ (Frey et al. , 1978; Wilkinson and Le Matire, 1987), 说明该岩浆经历了分离结晶过程。在哈克图解上(图 5), SiO_2 与 CaO 、 MgO 、 FeO_T 、 TiO_2 负相关, 与 Na_2O 显著正相关, 说明单斜辉石、橄榄石和镁铁矿物可能参与了岩浆分离结晶过程。由于 SiO_2 与 Al_2O_3 相关关系不明显, 且 Eu 的异常不明显 ($\delta\text{Eu} = 0.93 \sim 1.07$), 说明斜长石的分离结晶不显著。此外, 在杏山火山群的岩相中所观察到的晶形良好且 Fo 值较低的橄榄石斑晶、具有反应边的单斜辉石斑晶和大量斜长石基质也证实了这一点。

5.1.2 同化混染

幔源岩浆在上升的过程中受到地壳物质的影响,会发生同化混染作用。前人的主流观点认为杏山地区乃至镜泊湖地区没有发生明显的同化混染作用(Bai Xiang et al. , 2021;李明涛等,2022),主要原因如下:① 镜泊湖地区玄武岩样品具有低 SiO_2 、高 $\text{Mg}^\#$ 和 Sr—Nd 同位素亏损的特征,结合野外观察到

的熔岩流中广泛分布地幔包体的现象排除岩浆经历过同化混染作用。② 幔源岩浆发生地壳混染的样品会在 $\text{La}/\text{Sm}—\text{La}/\text{Nb}$ 图解上呈现正相关关系,而镜泊湖地区玄武岩样品在该图解上并未呈现出任何相关性(Bai Xiang et al. , 2021)。笔者等认为,杏山火山群样品的 Nb 弱负异常 ($\text{Nb}^* = 0.81 \sim 0.98$) 本身就暗示了同化混染的可能性,野外考察所观察到的大量已熔融或部分熔融的泥岩、花岗岩包体和石英、长石捕虏晶也证实了这一观点。

相容元素(如 Cr、Ni 等)和不相容元素(如 Rb、Ba、Nb、La 等)是鉴别岩浆演化过程的重要依据,若幔源岩浆在演化过程中受到同化混染或岩浆混合作用,在微量元素关系比值图解中会呈现线性演化趋势(Cocherie, 1986;赵振华,1997;王团华等,2006)。为此,笔者等采用了 $\text{Pr}/\text{Sm}—\text{Ce}/\text{Sm}$ 和 $\text{Nd}/\text{Yb}—\text{La}/\text{Yb}$ 关系图解来判断杏山火山群的岩浆是否发生了同化混染或岩浆混合。在图 11a 和 11b 中,杏山火山群样品均呈良好的正相关关系,说明岩浆在上升的过程中经历了同化混染或岩浆混合作用。除此之外,杏山火山群样品的 Nb/U 值为 $31.36 \sim 46.16$ (平均值为 35.99), Ce/Pb 值为 $10.19 \sim 25.24$ (平均值为 17.52),均低于 MORB 与 OIB 的平均值 ($\text{Nb}/\text{U} = 47 \pm 10$, $\text{Ce}/\text{Pb} = 25 \pm 5$) (Hofmann et al. , 1986)。岩浆中混入来自大陆地壳的物质会对微量元素造成极

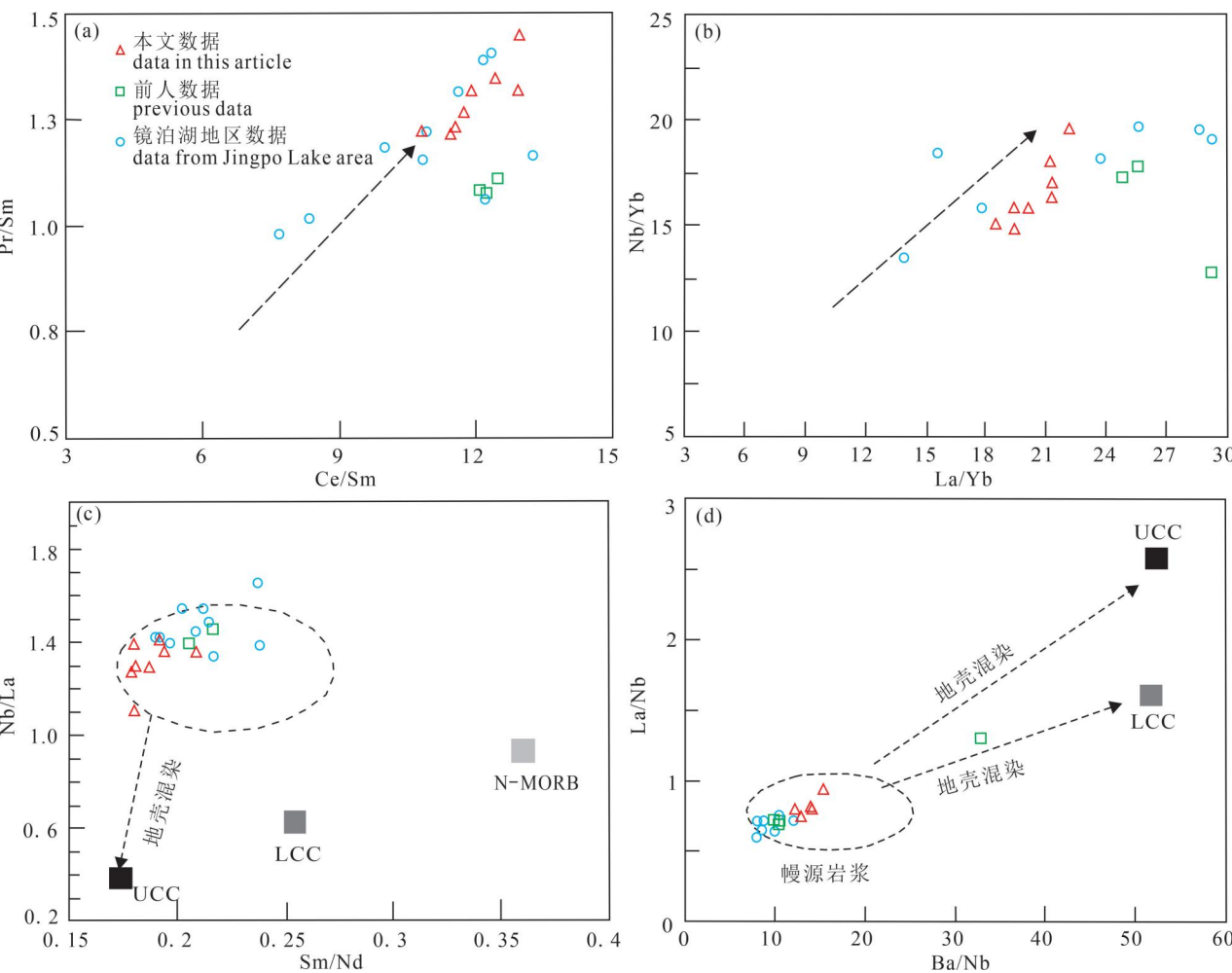


图 11 镜泊湖地区杏山火山群的全岩微量元素比值相关性图解:(a) Pr/Sm 与 Ce/Sm;(b) Nd/Yb 与 La/Yb;
(c) Nb/La 与 Sm/Nd;(d) La/Nb 与 Ba/Nb

Fig. 11 Correlation diagram of trace elements ratios of the volcanic rocks from the Xingshan Volcano Group in Jingpo Lake area:
(a) Pr/Sm and Ce/Sm; (b) Nd/Yb and La/Yb; (c) Nb/La and Sm/Nd; (d) La/Nb and Ba/Nb
大陆上地壳(UCC)、大陆下地壳(LCC)、N-MORB 的 Nb/La、Sm/Nd、La/Nb、Ba/Nb 均来源于 Sun 和 McDonough (1989)
Nb/La, Sm/Nd, La/Nb and Ba/Nb of Upper Crust of Continent (UCC), Lower Crust of Continent (LCC),
N-MORB (Normal Mid-Ocean Ridge Basalt) are all from Sun and McDonough (1989)

大影响,加之大陆地壳中 Nb/U 与 La/Nb 值较低 (Nb/U = 12.1, La/Nb = 14.1) (Taylor and McLennan,1995),这再一次印证了杏山火山群在上地壳经历了同化混染。

为进一步确认同化混染发生的位置,笔者等采用了 Ba/Th—(La/Sm)_N 关系图解(图 12),可以看到杏山火山群样品全部落到了上地壳附近。此外,杏山火山群 (La/Sm)_N 为 3.8 ~ 4.72 (平均值为 4.31), Ba/Th 为 113.48 ~ 127.55 (平均值为 118.45),普遍高于上地壳的值((La/Sm)_N = 4.26, Ba/Th = 60)。这再一次验证了同化混染作用于上地壳中。

那么,杏山火山群是否经历了岩浆混合作用呢?从 Nb/La—Sm/Nd 和 La/Nb—Ba/Nb 关系图解上(图 11c、11d)可以看出,杏山火山群与镜泊湖火山群的 Nb/La(或 La/Nb)值几乎都在同一直线上,相较而言,Sm/Nd 与 Ba/Nb 虽然值较小,但变化范围较大。与镜泊湖地区相比,杏山火山群样品沿地壳混染的趋势线分布,且主要集中在上地壳,这说明玄武岩浆在上升过程中发生了同化混染。根据野外所观察到的杏山火山群的火山岩含有大量部分熔融的砂岩、砾岩和花岗岩、片麻岩等壳源包体的情况间接地证实了岩浆在上升过程中经历了来自上地壳的同化混染而非岩浆混合作用。

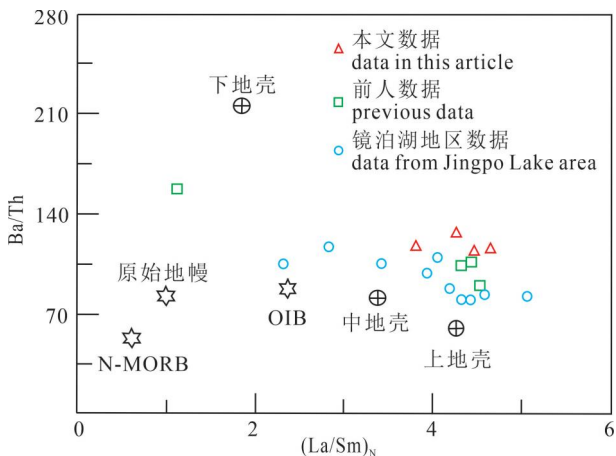


图 12 镜泊湖地区杏山火山群 Ba/Th—(La/Sm)_N 的关系图解

Fig. 12 Diagram of the relationship between Ba/Th and (La/Sm)_N for the Xingshan Volcano Group in Jingpo Lake area

OIB、N-MORB、原始地幔和地壳的数据来源于 Sun & McDonough (1989)

Data of OIB, N-MORB, primitive mantle and crust are from Sun & McDonough (1989)

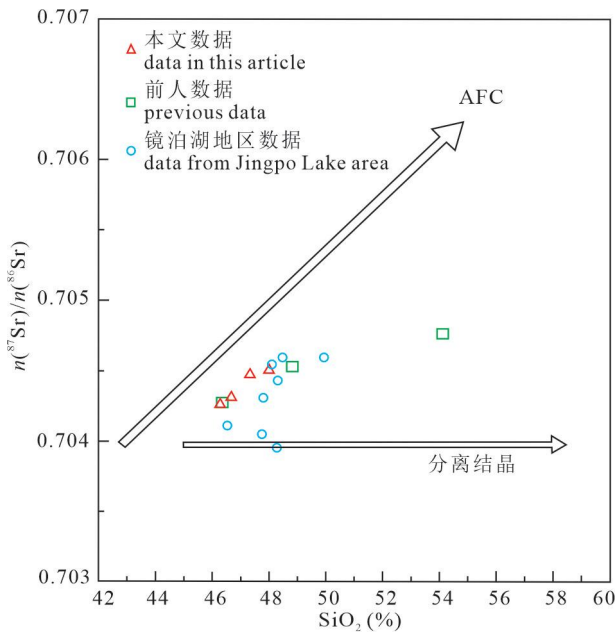


图 13 镜泊湖地区杏山火山群 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 与 SiO_2 的关系图解(改自 Ho Kunsuan et al., 2013)

Fig. 13 Diagram of the relationship between $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ and SiO_2 for the Xingshan Volcano Group in Jingpo Lake area (modified from Ho Kunsuan et al., 2013)

由此推断,杏山火山群主要经历了以下地质过程:原始岩浆在上地幔中发生橄榄石和单斜辉石的

分离结晶,形成碧玄岩和粗面玄武岩,随着岩浆不断上升,受周围的温度、压力与区域构造活动的影响,岩浆中较早晶出的斑晶呈现熔蚀麻点和反应边结构,岩浆上升至上地壳时发生了同化混染作用,同化混染—分离结晶作用(Assimilation Fractional Crystalization, AFC)相对较为微弱(图 13)。

5.2 地幔源区探讨

前人关于镜泊湖火山区的岩浆起源问题存在不同认识,对杏山火山群更是研究薄弱。张招崇等(1999)根据 Sr—Nd—Pb 同位素分析得出镜泊湖东部的岩浆源区为亏损地幔(Depleted-MORB Mantle, DMM)和富集地幔 I(Enriched Mantle Type I, EMI)的混合地幔,并认为其与软流圈地幔部分熔融有关。闫峻等(2007)分析得出镜泊湖地区 Sr—Nd 同位素明显亏损, Pb 同位素具有类似 Dupal 特征。Bai Xiang et al. (2021)认为镜泊湖地区中新世—更新世玄武岩岩浆来源于 EM II 和石榴子石橄榄岩的部分熔融,全新世岩浆来源于 EMI、EM II 的混合端元。尽管这样,但前人的研究主要集中在镜泊湖的火山口森林和蛤蟆塘火山区,对位于东南部的杏山火山群研究甚少。为弥补这一不足,笔者等基于 Sr—Nd—Pb 同位素数据来探究一下杏山火山群的岩浆源区,并将其与同期喷发的镜泊湖中新世—更新世玄武岩的源区进行一下对比与成因分析。

从 $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$ 和 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 的关系图解来看(图 14),杏山火山群样品均落到了第二象限(偏亏损地幔)的 BSE 与 PREMA 之间,而镜泊湖中新世—更新世玄武岩样品则落入第四象限(偏富集地幔)的 BSE 中,并有向 EM II 演化的趋势。与镜泊湖中新世—更新世玄武岩样品相比,杏山火山群样品离 PREMA 更近,说明其受原始地幔直接熔融影响更大。在 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 和 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 的关系图解上(图 15),杏山火山群样品都落在了 BSE 与 PREMA 之间,与前文得出的结论相一致。此外,在图 9 和图 10 中,杏山火山群与镜泊湖、龙岗火山群的岩浆源区较为相似,落在 I-MORB 区域内。不同的是,与镜泊湖地区相比,杏山火山群样品的 ϵ_{Nd} 和 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 值更高。总体而言,杏山火山群的岩浆源区为 PREMA 与 BSE 的混合源,镜泊湖中新世—更新世火山为 BSE 与 EM II 的混合源。那到底是什么原因造成了二者的差异呢?笔者等从以下三个方面来进行分析。

(1) 岩浆源区的不均一性。前人根据镜泊湖地区 Sr—Nd 同位素亏损的特征认为其岩浆源区为软

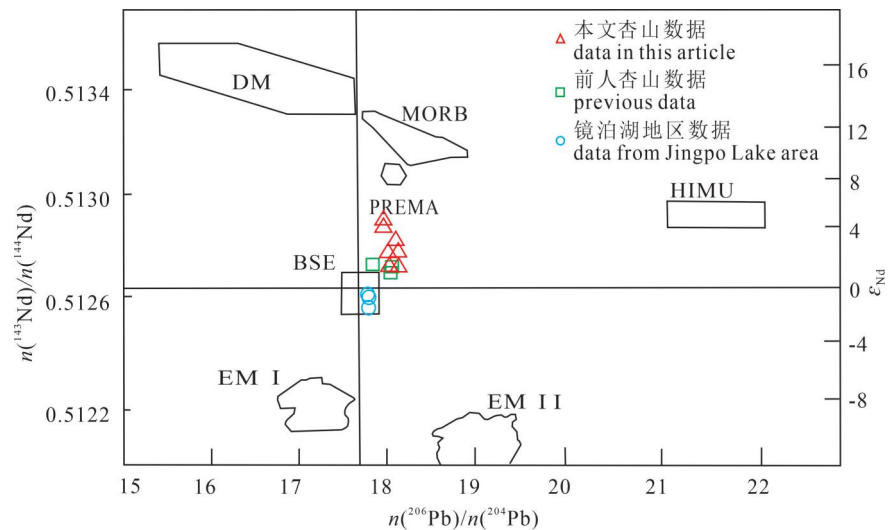


图 14 镜泊湖地区杏山火山群 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 与 $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$ 的关系图解
Fig. 14 Diagram of the relationship between $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ and $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$ for the Xingshan Volcano Group in Jingpo Lake area

DM—亏损地幔;BSE—全硅酸盐地球;EM I—I 型富集地幔;EM II—II 型富集地幔;HIMU—具有高 U/Pb 值的地幔;PREMA—流行地幔(即经常观察到的普通地幔);NHRL—北半球参考线;MORB—洋中脊玄武岩;OIB—洋岛玄武岩
DM—Depleted Mantle; BSE— Bulk Silicate Earth; EM I— Enriched Mantle Type I; EM II— Enriched Mantle Type II; HIMU— Mantle with a high $\mu(\text{U/Pb})$ ratio; PREMA— Prevalent Mantle; NHRL— Northern Hemisphere Reference Line; MORB— Mid-Ocean Ridge Basalt; OIB— Ocean Island Basalt

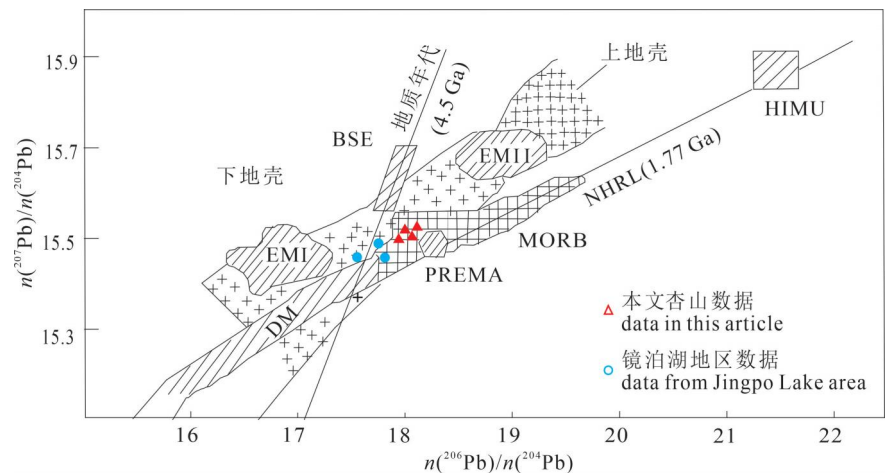


图 15 镜泊湖地区杏山火山群 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 与 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 的关系图解

Fig. 15 Diagram of the relationship between $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ and $n(^{207}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ for the Xingshan Volcano Group in Jingpo Lake area

流圈(Zou Haibo Haibo et al. , 2000)。杏山火山群与镜泊湖火山群具有空间相邻、时间相似、Sr—Nd 同位素同样亏损的特征,暗示杏山火山群岩浆源区同样来自软流圈,而二者不相容元素的异常反映了

地幔源区的不均一性。具体表现为:在微量元素标准化配分图上(图 8),杏山火山群具有 Ba、Ta 正异常和 Th、Nb 负异常,而镜泊湖中新世—更新世玄武岩的 Ba、Ta、Th、Nb 异常状况恰好与杏山火山群的相反。对此,前人已将 Ta、Nd 的异常归因于俯冲板块的富集作用、地壳物质的同化混染作用和副矿物的分离结晶作用(隋建立等,2007)。

(2)部分熔融。为了衡量与验证部分熔融作用对玄武岩的影响,笔者等对地幔源岩平衡部分熔融进行了模拟分析(Streck and Grunder, 2012; 郭文峰等, 2014)。由图可知(图 16),与镜泊湖中新世—更新世玄武岩样品相比,杏山火山群样品的变化范围较小,且其部分熔融程度略高于镜泊湖中新世—更新世玄武岩。此外,前人研究表明,镜泊湖地区经历过交代富集作用(张招崇等, 1999)。Th/Yb—Ba/Y 关系图解表明(图 17),杏山火山群也经历了一定的富集交代作用,但与镜泊湖地区相比,杏山火山群源区富集程度略高,暗示杏山火山群的熔融程度略低于镜泊湖中新世—更新世玄武岩,且其碱玄岩也来自于石榴子石橄榄岩的部分熔融。综上,杏山火山群的部分熔融程度略低于镜泊湖中新世—更新世玄武岩,但二者相差不大。因此部分熔融并非是最主要的影响因素。

(3)岩浆演化的差异。前已述及,杏山火山群在岩浆演化过程中受到强烈的同化混染、分离结晶作用以及微弱的 AFC 作用。而前人已根据镜泊湖地区广泛分布的地幔捕虏体排除了镜泊湖中新世—更新世玄武岩经历同化混染和分离结晶的可能性(Bai Xiang et al. , 2021)。因此,岩浆演化是造成

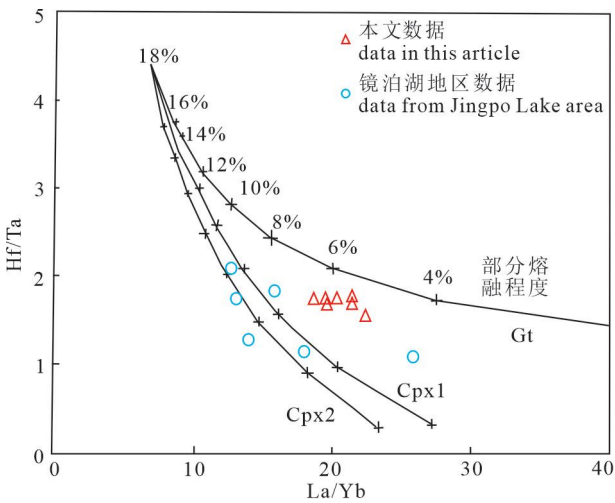


图 16 镜泊湖地区杏山火山群地幔源区部分熔融程度图(改自郭文峰等,2014)

Fig. 16 Partial melting diagram of mantle source for the Xingshan Volcano Group in Jingpo Lake area (modified from Guo Wenfeng et al. , 2014&)

采用批式熔融模式,合理假设部分熔融程度为 18% 来进行模拟。模拟曲线:假设 Hf/Ta 和 La/Yb 只受单斜辉石 (Cpx) 和石榴子石 (Gt) 的控制。 $D(La, \text{Melt}-Cpx) = 0.0536, 0.0515$; $D(La, \text{Melt}-Gt) = 0.016$; $D(Yb, \text{Melt}-Cpx) = 0.43, 0.633$, $D(Yb, \text{Melt}-Gt) = 3.88$; $D(Hf, \text{Melt}-Cpx) = 0.256, 0.195$, $D(Hf, \text{Melt}-Gt) = 1.22$ 。 $D(Ta, \text{Melt}-Cpx) = 0.0077, 0.0081$, $D(Ta, \text{Melt}-Gt) = 0.0538$ 。详细过程参见郭文峰等(2014)

The batch melting mode is adopted, and the partial melting degree is reasonably assumed to be 18% for simulation. Simulation curve: Assume that Hf/Ta and La/Yb are controlled only by clinopyroxene (Cpx) and garnet (Gt). $D(La, \text{Melt}-Cpx) = 0.0536, 0.0515$; $D(La, \text{Melt}-Gt) = 0.016$; $D(Yb, \text{Melt}-Cpx) = 0.43, 0.633$, $D(Yb, \text{Melt}-Gt) = 3.88$; $D(Hf, \text{Melt}-Cpx) = 0.256, 0.195$, $D(Hf, \text{Melt}-Gt) = 1.22$. $D(Ta, \text{Melt}-Cpx) = 0.0077, 0.0081$, $D(Ta, \text{Melt}-Gt) = 0.0538$. For detailed procedures, see Guo Wenfeng et al. (2014)

杏山火山区的火山岩与镜泊湖中新世—更新世火山源区的火山岩差异的重要影响因素之一。

6 结论

笔者等通过对杏山火山群的火山地质、岩相学、地球化学以及 Sr—Nd—Pb 同位素分析,得出以下结论:

(1)杏山火山群属于碧玄岩和粗面玄武岩。杏山火山群的玄武岩的微量元素、稀土元素配分型式与同期的镜泊湖火山岩较为相似,都具有类似 OIB 玄武岩的特征,且两个地区的玄武岩都来源于石榴子石橄榄岩的部分熔融。不同的是,杏山火山群的

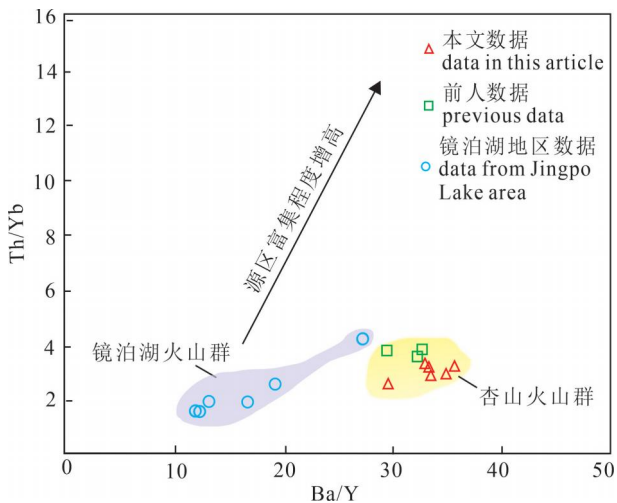


图 17 镜泊湖地区火山岩 Th/Yb 与 Ba/Y 的关系图解(改自张招崇等,2000)

Fig. 17 Diagram of the relationship between Th/Yb and Ba/Y for the volcanic rocks in Jingpo Lake area (modified from Zhang Zhaochong et al. , 2000&)

部分熔融程度略低于同期的镜泊湖玄武岩。

(2)杏山火山群 4 座火山是岩浆同源的,皆为原生岩浆发生橄榄石和单斜辉石分离结晶后形成的碧玄岩和粗面玄武岩岩浆。随着岩浆不断上升,受周围的温度、压力与区域构造活动的影响,岩浆中较早晶出的斑晶出现熔蚀麻点与反应边结构,岩浆上升至上地壳时发生了同化混染作用,而 AFC 作用较为微弱。

(3)杏山火山群的岩浆源区为 PREMA 与 BSE 端元的混合源。与之空间相邻、时间相似的镜泊湖中新世—更新世火山源区为 EM II 与 BSE 端元的混合源,岩浆源区的不均一性和岩浆演化过程中所经历的同化混染作用是造成两者岩性差异的主要影响因素。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

崔根, 杜英杰, 付艳丽. 2010. 镜泊湖地区新生代玄武岩划分及地球化学特征. 价值工程, 29(1): 170.

樊祺诚, 孙谦, 李霓, 王团华. 2005. 镜泊湖全新世火山岩——岩浆的多样性. 自然科学进展, (8): 943~950.

巩杰生. 1996. 东北地区新生代火山旅游资源. 全国第 11 届旅游地学年会暨东北地区旅游资源开发研讨会论文集, 300~309.

郭磊, 刘永顺, 聂保锋, 黄志聪, 侯鹏, 李耀, 郭可欣. 2022. 黑龙江镜泊湖地区蛤蟆塘火山空落堆积物形成机制研究. 地质论评, 68(5): 1980~1994.

郭文峰, 刘嘉麒, 郭正府. 2014. 长白山上新世以来玄武岩成分演变规律及其成因. 岩石学报, 30(12): 3595~3611.

李东津, 车仁顺. 1982. 密山——抚顺大陆裂谷的新生代沉积建造和火山岩特征. 吉林地质, (3): 28~38.

李明涛, 王婵, 杜海涛, 陶瑞, 任蕊. 2022. 黑龙江镜泊湖新生代火山岩成因机制研究. 矿物岩石, 42(4): 44~59.

李树才. 2013. 镜泊湖地区新生代火山岩岩石学、地球化学特征及构造环境探讨. 导师: 周宗桂. 武汉: 中国地质大学(武汉)硕士学位论文.

刘北玲, 陈毓蔚, 朱炳泉. 1989. 东北镜泊湖新生代玄武岩的成因及其地幔源化学特征——Sr、Nd、Pb 同位素与微量元素证据. 地球化学, 2(1): 9~19.

马晗瑞. 2016. 长白山天池火山成因研究. 导师: 程日辉, 杨清福. 长春: 吉林大学博士学位论文: 1~102.

牛耀龄. 2013. 全球构造与地球动力学: 岩石学与地球化学方法应用实例. 科学出版社, 1~307.

秦秀峰, 徐义刚, 张辉煌, 于宋月, 邱华宁. 2008. 大陆亚碱性火山岩的成因多样性: 以敦化——密山和东宁火山岩带为例. 岩石学报, 24(11): 2501~2514.

邱家骧, 廖群安, 杜向荣. 1988. 黑龙江省二克山、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): 97~108.

沈远超, 郑祥身, 王兴华. 1987. 牡丹江地区新生代火山岩初步研究. 岩石学报, (3): 35~45.

隋建立, 樊祺诚, 刘嘉麒, 郭正府. 2007. 长白山火山地幔不均一性——微量元素及同位素地球化学研究. 岩石学报, 23(6): 1512~1520.

孙春强. 2008. 长白山天池火山岩石学与岩浆演化特征研究. 导师: 魏海泉. 北京: 中国地震局地质研究所硕士学位论文: 1~82.

王团华, 樊祺诚, 孙谦, 谌宏伟, 李霓. 2006. 长白山区图们江流域新生代火山岩的岩石化学研究. 岩石学报, 22(6): 1481~1490.

闫峻, 赵建新, 刘海泉. 2007. 华北龙岗第四纪玄武岩: 岩石成因与源区性质. 岩石学报, 23(6): 1413~1422.

翟福君, 刘桂香. 2010. 第四纪镜泊火山活动与镜泊湖世界地质公园. 地质与资源, 19(1): 53~57.

张树明, 王方正. 2002. 玄武岩在研究岩石圈深部过程及构造背景中的应用. 地球科学进展, 17(5): 685~692.

张招崇, 李兆鼎, 李树才, 辛影, 李兆木, 王先政. 1999. 黑龙江镜泊湖地区第四纪玄武岩的 Sr、Nd、Pb 同位素组成及其地幔源区特征. 地质论评, 45(S1): 349~357.

张招崇, 李兆鼎, 李树才, 辛影, 李兆木, 王先政. 2000. 黑龙江镜泊湖地区全新世玄武岩的地球化学特征及其深部过程探讨. 岩石学报, 16(3): 327~336.

赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理. 北京: 科学出版社: 1~223.

邹宗霖. 2020. 镜泊湖火山区深部电性结构及其岩浆动力学意义. 导师: 翁爱华. 长春: 吉林大学硕士学位论文: 1~78.

Ardila A M M, Clausen B L, Memeti V, Paterson S C. 2019. Source contamination, crustal assimilation, and magmatic recycling during three flare-up events in the Cretaceous Peruvian Coastal Batholith: An example from the Ica—Pisco plutons. Journal of South American Earth Sciences, 95(11): 1~29.

Bai Xiang, Wei Wei, Yu Hongmei, Chen Zhengquan. 2021. Petrogenesis and dynamic implications of the Cenozoic alkali basalts from Jingpohu volcanic field, Northeast China. Geological Society London Special Publications, 510: 41~59.

Barry T L, Kent R W. 1998. Cenozoic magmatism in Mongolia and the origin of Central and East Asian basalts. In: Flower M F J, Chung S L, Lo C H and Lee T Y. eds. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. Geodynamics Series, vol. 27. Washington D C: American Geophysical Union: 347~364.

Basu A R, Wang J W, Huang W K, Xie G H, Tatsumoto M. 1991. Major element, REE, and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of Eastern China: Implications for their origin from suboceanic-type mantle reservoirs. Earth and Planetary Science Letters, 105(1~3): 149~169.

Carlson R W. 1991. Physical and chemical evidence on the cause and source characteristics of flood basalt volcanism. Australian Journal of Earth Sciences, 38(5): 525~444.

Chesley J, Righter K, Ruiz J. 2004. Large-scale mantle metasomatism: A Re-Os perspective. Earth and Planetary Science Letters, 219(1~2): 49~60.

Clarke D B. 2007. Assimilation of xenocrysts in granitic magmas: Principles, processes, proxies, and problems. Canadian Mineralogist, 45(1): 5~30.

Cocherie A. 1986. Systematic use of trace element distribution patterns in log—log diagrams for plutonic suites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 50(11): 2517~2522.

Cui Gen, Du Yingjie, Fu Yanli. 2010#. Basalt classification and earth chemical features around Lake Jingpo. Value Engineering, 29(1): 170.

Fan Q C, Hooper P R. 1991. The Cenozoic basaltic rocks of Eastern China: Petrology and chemical composition. Journal of Petrology, 32(4): 765~810.

Fan Qicheng, Sun Qian, Li Ni, Wang Tuanhua. 2005#. Holocene volcanic rocks at Jingpo Lake——diversity of magma. Progress in Natural Science, (8): 943~950.

Fan Xingli, Chen Qifu, Ai Yinshuang, Chen Ling, Jiang Mingming, Wu Qingju, Guo Zhen. 2021. Quaternary sodic and potassic intraplate volcanism in northeast China controlled by the underlying heterogeneous lithospheric structures. Geology, 49(10): 1260~1264.

Frey F A, Green D H, Roy S D. 1978. Integrated models of basalt petrogenesis: A study of quartz tholeiites to olivine melilitites from South Eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data. Journal of Petrology, 19: 463~513.

Geng Xianlei, Liang Zhengwei, Zhang Wen, Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Deng Lixu. 2022. Formation of green-core clinopyroxene in continental basalts through magmatic differentiation and crustal assimilation: Insights from in-situ trace element and Pb isotopic compositions. Lithos, 410~411: 106587. DOI: 10.1016/j.lithos. 2021.106587

Gong Jiesheng. 1996#. Cenozoic volcanic tourism resources in Northeast China. Proceedings of the 11th National Tourism Geoscience Annual Conference and Tourism Resources Development Seminar in Northeast Region, 300~309.

Guo Lei, Liu Yongshun, Nie Baofeng, Huang Zhicong, Hou Peng, Li Yao, Guo Kexin. 2022. Study on formation mechanism of fallout deposits in Hamatang Volcano, Jingpo Lake area, Heilongjiang. Geological Review, 68(5): 1980~1994.

Guo Wenfeng, Liu Jiaqi, Guo Zhengfu. 2014#. Temporal variations and petrogenetic implications in Changbai basaltic rocks since the Pliocene. Acta Petrologica Sinica, 30(12): 3595~3611.

Hart S R. 1984. A large isotope anomaly in the southern hemisphere mantle. Nature, 309(5971): 753~757.

- Ho Kunsuan, Ge Wenchun, Chen Juchin, You Chenfeng, Yang Huaijen, Zhang Yanlong. 2013. Late Cenozoic magmatic transitions in the central Great Xing'an Range, Northeast China: Geochemical and isotopic constraints on petrogenesis. *Chemical Geology*, 352: 1~18.
- Hofmann A W, Jochum K P, Seufert M, White W M. 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 79 (1~2): 33~45.
- Hopkins J L, Timm C, Millet M-A, Poirier A, Wilson C J N, Leonard G S. 2016. Os isotopic constraints on crustal contamination in Auckland Volcanic Field basalts, New Zealand. *Chemical Geology*, 439: 83~97.
- Jung S, Pfänder J A, Brauns M, Maas R. 2011. Crustal contamination and mantle source characteristics in continental intra-plate volcanic rocks: Pb, Hf and Os isotopes from central European volcanic province basalts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(10): 2664~2683.
- Le Maitre R W. 1984. A proposal by the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks for a chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica (TAS) diagram. *Australian Journal of Earth Sciences*, 31(2): 243~255.
- Li Dongjin, Che Renshun. 1982&. The Cenozoic depositional formation of the Mishan—Fushun Continental Rift Valley and its characteristics of volcanic rocks. *Jilin Geology*, (3): 28~38.
- Li Mingtao, Wang Chan, Du Haitao, Tao Rui, Ren Rui. 2022&. Study of the genetic mechanism of the Jingpo Lake Cenozoic volcanic rocks in Heilongjiang Province. *Mineralogy and Petrology*, 42(4): 44~59.
- Li Shuai. 2013&. The petrological and geochemical characteristics of Cenozoic volcanic rocks and their tectonic setting in Jingpohu area. Supervisor: Zhou Zonggui. Wuhan: Master's thesis of China University of Geosciences (Wuhan).
- Li Xiaowei, Li Jie, Bader T, Mo Xuanxue, Scheltens M, Chen Zhenyu, Xu Jifeng, Yu Xuehui, Huang Xiongfei. 2015. Evidence for crustal contamination in intra-continental OIB-like basalts from West Qinling, central China: A Re-Os perspective. *Journal of Asian Earth Sciences*, 98(2): 436~445.
- Li Zhuang, Chen Bin. 2021. Tracing crustal contamination of the Cenozoic basalts with OIB-affinity in northern marginal region of North China Craton: An Os perspective. *China Geology*, 4(4): 593~599.
- Liu Beiling, Chen Yuwei, Zhu Bingquan. 1989&. Genesis of Cenozoic basalts from Jingbo Lake in Northeast China and chemical characteristics of mantle sources: Evidence of Sr—Nd—Pb isotopes and trace elements. *Geochimica*, 2(1): 9~19.
- Ma Hanrui. 2016&. Study on the genesis of Tianchi Volcano in Changbai Mountain. Supervisor: Chen Rihui, Yang Qingfu. Changchun: Ph. D. thesis of Jilin University. 1~102.
- Mason P R D, Hilary D, Thirlwall M F, Seghedi I, Szakács A, Lowry D, Matthey D. 1996. Crustal assimilation as a major petrogenetic process in the East Carpathian Neogene and Quaternary continental margin arc, Romania. *Journal of Petrology*, (4): 927~959.
- Niu Yaoling. 2013&. Global Tectonics and Geodynamics—A Petrological and Geochemical Approach. Beijing: Science Press, 1~307.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63~81.
- Qin Xiufeng, Xu Yigang, Zhang Huihuang, Yu Songyue, Qiu Huaning. 2008&. Petrogenetic diversity of continental subalkaline volcanic rocks: An example from the Dunhua—Mishan—Dongning volcanic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2501~2514.
- Qiu Jiaxiang, Liao Qun'an, Du Xiangrong. 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.
- Rollinson H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. England: Longman Scientific & Technical: 1352.
- Said N, Kerrich R. 2010. Elemental and Nd-isotope systematics of the Upper Basalt Unit, 2. 7 Ga Kambalda Sequence: Quantitative modeling of progressive crustal contamination of plume asthenosphere. *Chemical Geology*, 273(3~4): 193~211.
- Shen Yuanchao, Zheng Xiangshen, Wang Xinghua. 1987&. Preliminary study on Cenozoic volcanic rocks in Mudanjang area. *Acta Petrologica Sinica*, (3): 35~45.
- Streck M J, Grunder A L. 2012. Temporal and crustal effects on differentiation of tholeiite to calcalkaline and ferro-trachytic suites, High Lava Plains, Oregon, USA. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 13(11): 1~23.
- Sui Jianli, Fan Qicheng, Liu Jiaqi, Guo Zhengfu. 2007&. Mantle heterogeneity beneath Changbaishan volcanic province: Evidence from geochemical study on trace elements and isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1512~1520.
- Sun Chunqiang. 2008&. Study on volcanic petrology and magmatic evolution characteristics of Tianchi in Changbai Mountain. Supervisor: Wei Haiquan. Beijing: Master's thesis of Institute of Geology, China Earthquake Administration: 1~82.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313~345.
- Taylor S R, McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241~265.
- Wang Tuanhua, Fan Qicheng, Sun Qian, Chen Hongwei, Li Ni. 2006&. Petrochemistry of Cenozoic volcanic rocks in the Tumen river field, Changbai mountain region. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1481~1490.
- Wilkinson J F G, Le Maitre R W. 1987. Upper mantle amphiboles and micas and TiO₂, K₂O, and P₂O₅ abundances and 100Mg/(Mg+Fe²⁺) ratios of common basalts and andesites: Implications for modal mantle metasomatism and undepleted mantle compositions. *Journal of Petrology*, 28(1): 37~73.
- Xiao Wenjiao, Santosh M. 2014. The western Central Asian Orogenic Belt: A window to accretionary orogenesis and continental growth. *Gondwana Research*, 4(25): 1429~1444.
- Yan Jun, Zhao Jianxing, Liu Haiquan. 2007&. Quaternary basalts from Longgang in the North China Craton: Petrology and characteristics of the mantle source. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 1413~1422.
- Yan Jun, Zhao Jianxing. 2008. Cenozoic alkali basalts from Jingpohu, NE China: The role of lithosphere—asthenosphere interaction. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33: 106~121.
- Zeng Gang, Huang Xiaowen, Zhou Meifu, Chen Lihui, Xu Xisheng. 2016. Using chalcophile elements to constrain crustal contamination and xenolith—magma interaction in Cenozoic basalts of eastern China. *Lithos*, 258~259: 63~172.

Zhai Fujun, Liu Guixiang. 2010&. The Jingpohu Geopark: Quaternary volcanic activities and tourism resources. *Geology and Resources*, 19(1): 53~57.

Zhang Ming, Suddary P, Thompson R N, Thirlwall M F, Menzies M A. 1995. Potassic volcanic-rocks in NE China: Geochemical constraints on mantle source and magma genesis. *Journal of Petrology*, 36(5): 1275~1303.

Zhang Shuming, Wang Fangzheng. 2002&. Basalt's action on the research of lithospheric deep process and structural setting. *Advance in Earth Sciences*, 17(5): 685~692.

Zhang Zhaochong, Li Zhaonai, Li Shucai, Xin Ying, Li Zhaomu, Wang Xianzheng. 1999&. Sr, Nd and Pb isotopic compositions of Quaternary basalts in the Jingpo Lake area and characteristics of the mantle source. *Geological Review*, 45(S1): 349~357.

Zhang Zhaochong, Li Zhaonai, Li Shucai, Xin Ying, Li Zhaomu, Wang Xianzheng. 2000&. Geochemistry of the Jingpohu Holocene basaltic rocks, Heilongjiang Province, and discussion on their deep processes. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 327~336.

Zhao Zhenhua. 1997&. Principles of Trace Element Geochemistry. Beijing: Science Press: 1~223.

Zindler A, Hart S. 1986. Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493~571.

Zou Haiibo, Zindler A, Xu Xisheng, Qi Qu. 2000. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: Mantle sources, regional variations and tectonic significance. *Chemical Geology*, 171(1~2): 33~47.

Zou Zonglin. 2020&. Deep electrical structure of Jingpo Lake volcanic area and its magmatic kinetic significance. Supervisor: Wong Aihua. Changchun: Master's thesis of Jilin University: 1~78.

The volcanic rock characteristics and magmatic evolution of the Xingshan Volcano Group in the Jingpo Lake area

GUO Kexin, LIU Yongshun, NIE Baofeng, GUO Lei, ZHANG Hui, HUANG Zhicong, HOU Peng, LI Yao
College of Resource, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing, 100048

Abstract: Volcanic field in Jingpo Lake area is an important window for the study of intra-continental Cenozoic basalts. Previous studies on the Xingshan Volcano Group located in the southeast of this area have rarely been conducted and the possibility of magma assimilation and mixing in this area has been denied. The basalts of the Xingshan Volcano Group have been systematically studied in terms of petrology, petrochemistry and Sr—Nd—Pb isotopes. It is believed that the basalts of the Xingshan Volcano Group are mainly basanites and trachy-basalts. The fractionation of olivine and clinopyroxene occurred during the ascent of the primary magma, and the assimilation and mixing occurred in the upper crust, with weak AFC effect. The comparison between the basalts of the Xingshan Volcano Group and the Jingbohu basalts during the same eruption shows that the basalts in both areas are derived from the partial melting of garnet peridotite, and the partial melting degree of the Xingshan Volcano Group is slightly lower than that of Jingbohu basalts. In terms of magmatic source region, the Xingshan Volcano Group is the mixing source of PREMA and BSE end-member. The heterogeneity of magma source area and the assimilation and mixing during magma evolution are the main influencing factors that cause the difference between the lithologic features of the Xingshan Volcano Group and Jingpohu Volcano Group.

Keywords: Xingshan Volcano Group; Miocene—Pleistocene basalt; petrochemistry; assimilation and mixing; mantle source region

Acknowledgements: This study was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41372343, 40872062)

First author: GUO Kexin, female, born in 1999, master graduate student, major in physical geography; Email: 17636265185@163.com

Corresponding author: LIU Yongshun, male, born in 1966, Ph. D., associate professor, is mainly engaged in volcanology, petrology, geological fluid mechanics and complexity science in geosystems; Email: cnu901@126.com

Manuscript received on: 2023-04-11; Accepted on: 2023-08-11; Published online on: 2023-08-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2023.08.085 **Edited by:** ZHANG Yuxu