

成炼, 郗爱华, 胡有山, 等. 沙湾地区玄武岩对峨眉山地幔柱岩浆过程的响应. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 182-197. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220048.

Cheng Lian, Xi Aihua, Hu Youshan, et al. Response to the Magmatic Process of Mantle Plume with Basalt in the Shawan Area. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1): 182-197. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220048.

沙湾地区玄武岩对峨眉山地幔柱岩浆过程的响应

成炼¹, 郗爱华¹, 胡有山², 葛玉辉¹, 任杰¹, 郑江¹, 姜欢¹

1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500

2. 四川省地质矿产勘查开发局 403 地质队, 四川 峨眉山 614200

摘要: 四川省乐山市沙湾地区附近出露大面积的二叠纪玄武岩, 是峨眉山大火成岩省的重要组成部分。研究区岩石学及地球化学研究表明, 其岩性主要为致密块状辉石玄武岩、斜斑玄武岩和粗面玄武岩; 主量元素显示玄武岩具有高钛拉斑系列的成分特点, 稀土元素表现出玄武岩呈轻稀土元素富集的右倾模式, 轻、重稀土元素分馏程度较高; 微量元素相对富集 Th、U 等大离子亲石元素及高场强元素, 强烈亏损 Sr 和 P 等与流体相关的微量元素; 与云南宾川上仓附近晚期喷发的高钛玄武岩及洋岛玄武岩(OIB)特征相似, 暗示峨眉山周边的玄武岩形成于地幔柱诱发下的板内拉张环境, 原始岩浆源于交代富集地幔源区的石榴石二辉橄辉岩的低程度部分熔融, 具有与再循环洋壳有关的辉石岩相似的成分特点, 且在上升过程中发生斜长石的分离结晶作用及微弱的地壳混染。本次玄武岩对比工作揭示, 位于大火成岩省中带的沙湾地区玄武岩与内带的宾川上仓晚阶段喷发产物具有同源性和等时性的特点, 暗示该玄武岩浆属于大火成岩省活动晚期地幔柱边缘部分熔融的产物。

关键词: 峨眉山玄武岩; 地球化学; 大火成岩省; 地幔柱; 四川沙湾

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220048

中图分类号: P588.1

文献标志码: A

Response to the Magmatic Process of Mantle Plume with Basalt in the Shawan Area

Cheng Lian¹, Xi Aihua¹, Hu Youshan², Ge Yuhui¹, Ren Jie¹, Zheng Jiang¹, Jiang Huan¹

1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. Geological Team 403 of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, Emeishan 614200, Sichuan, China

Abstract: A large area of Permian basalt is exposed near Shawan District, Leshan City, which is an important part of Emeishan large igneous province. Petrological and geochemical analysis show that the basalts are mainly dense massive pyroxene basalts, oblique porphyry basalts and trachyte basalts. The

收稿日期: 2022-02-28

作者简介: 成炼(1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事火山岩岩石学方面的研究, E-mail: chengliangeo@163.com

通信作者: 郗爱华(1963-), 女, 教授, 博士, 主要从事固体矿产成因预测及火山岩储层方面的研究, E-mail: aihuaxi@163.com

基金项目: 中石油西南油气田分公司项目(XNS14JS2019-029)

Supported by the Petro China Southwest Oil & Gas Field Company (XNS14JS2019-029)

major elements indicate that basalts belong to high-titanium tholeiite series. The normalized rare earth element pattern of chondrites for basalts in the Shawan area exhibits right-dipping patterns with LREE enrichment and a high degree of fractionation of light and heavy rare earth elements. The normalized trace element distribution map of the primordial mantle shows that they are enriched in large ion lithophile elements (LILE) such as Th, U etc, but depleted in trace elements related to fluids (Sr and P) with negative Eu anomalies. It is similar to the ocean island basalts (OIB) and high-titanium basalts that erupted in the late period near Binchuan, Yunnan, suggesting that the basalts around Emeishan were formed in an intraplate rift environment induced by a mantle plume. The magma originated from the low-degree partial melting of the garnet peridotite and the separation and crystallization of plagioclase, and weak crustal contamination occurred during the ascent. The geochemical comparison between the basalts in the intermediate zone and the basalts in the inner zone of the large igneous province reveals that the basalts in Shawan area are the product of late magmatism in the large igneous province, and the main body is characterized by the edge of the mantle plume itself.

Key words: Emeishan basalt; geochemistry; large igneous province; mantle plume; Shawan, Sichuan

0 引言

峨眉山玄武岩主要分布于四川、贵州、云南等地,作为我国唯一被学术界认可的大火成岩省广受关注^[1-8]。前人根据构造单元、岩石组合特征等将峨眉山玄武岩分为西、中、东三大岩区,厚度自西向东、自南向北逐渐变薄。例如:位于西区的宾川上仓地区峨眉山玄武岩厚度最大可达 5 384 m,向东逐渐减薄至几百米^[9],在川东南华蓥山地区玄武岩厚度只有 50 m 左右^[10]。峨眉山地区位于大火成岩省的中部地带,造山作用的整体抬升使盆地边缘的火山岩出露齐全。虽然前人在此做了大量的基础性工作,包括火山岩的岩石类型、形成时代及成因并给出了多种不同的解释,但大多是基于某些典型露头的工作认识^[1,4,11-16]。特别是由于旅游保护措施的实施和植被覆盖严重,在峨眉山周边找到连续出露的火山岩剖面非常困难,成为系统研究大火成岩省及区域对比的障碍。

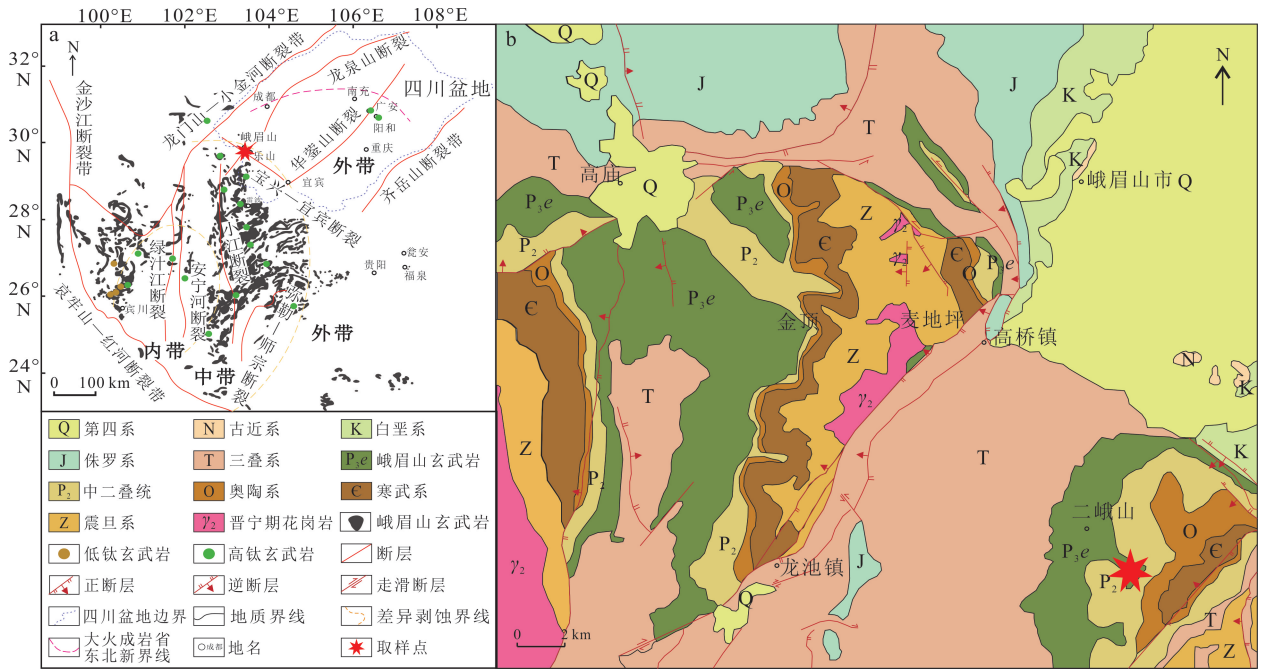
位于峨眉山西南方向约 25 km 的二峨山出露大面积的火山岩,“村村通”公路两侧揭露了产状完好的地质剖面,益于岩性观察、取样及产状判别。本次工作希望通过对玄武岩系统的野外及室内研究工作,并将其与云南宾川上仓等剖面相比较,揭示大火成岩省不同区带内岩浆的成分特点、喷发时序及岩浆源区等问题,以期对峨眉山大火成岩省横向对比提供基础数据与支撑。

1 区域地质背景

峨眉山大火成岩省面积超过 $5 \times 10^5 \text{ km}^2$,西部以哀牢山—红河断裂带、龙门山—小金河断裂为界,东部延伸至贵阳以东的福泉—瓮安一线,东北界和东南界分别受宝兴—宜宾断裂和弥勒—斯宗断裂所控制(图 1a)。研究区位于峨眉山大火成岩省的中带,大地构造位置上处于扬子板块西缘,龙泉山断裂与宝兴—宜宾断裂的交汇处,被认为是攀西裂谷的北东向延伸,受多期次构造运动的影响,区内发育一系列压扭性断层及褶皱构造。除泥盆系、石炭系、志留系局部缺失外,区域上地层自上元古界震旦系至第四系的松散物均有出露(图 1b)。上二叠统峨眉山玄武岩组(P_3e)与上覆的龙潭组(P_3l)之间以含角砾火山凝灰岩—沉火山凝灰岩为界呈平行不整合接触,与下伏的中二叠统茅口组(P_2m)含生屑泥晶灰岩呈喷发不整合接触。

2 岩相学特征

本次以四川省乐山市沙湾区范店乡二峨山出露较好的火山岩剖面为研究对象。剖面起点坐标为 $29^{\circ}22'20''\text{N}$, $103^{\circ}26'27''\text{E}$, 终点坐标为 $29^{\circ}22'52''\text{N}$, $103^{\circ}26'52''\text{E}$, 总长 430 m, 自下而上出露辉石玄武岩、斜斑玄武岩和粗面玄武岩(图 2)。剖面实测厘定出 2 个喷发旋回,每个旋回从早到晚呈现由辉石玄武岩—斜斑玄武岩—粗面玄武岩的组合特点。受后



a. 峨眉山大火成岩省分布范围图, 据文献[10, 17]修编; b. 研究区位置及地质简图, 据文献[18]修编。

图 1 研究区地质图

Fig.1 Geological map of the study area

期构造活动及热液作用影响,玄武岩发育不同程度的绿泥石化、硅化、碳酸盐化、绿帘石化、褐铁矿化等热液蚀变,蚀变矿物以粒间溶孔和杏仁体内充填 2 种方式赋存,蚀变强度与断裂构造间具明显的规律性,远离构造蚀变减弱甚至消失。

辉石玄武岩形成于喷发旋回的早期阶段,主体呈致密块状构造,部分区段发育杏仁状构造(图 3a、b),无斑(图 3c、d)或少斑结构,偶见斜长石斑晶(少于 2%)。岩石主要矿物组合为板条状微晶斜长石(55%~65%)、细粒状普通辉石(10%~15%)、隐晶质及玻璃质(10%~15%)和少量微量磁铁矿(约 3%),杏仁体局部可达 10%。

斜斑玄武岩一般覆盖于辉石玄武岩之上,岩石

发育少斑或聚斑结构(图 3e),主体呈致密块状构造,局部发育杏仁状构造。少斑岩石中斑晶体积分数约为 5%,主要为斜长石,少量为普通辉石。聚斑玄武岩主要以斜长石斑晶(10%~20%)为主,部分发育巨晶结构,粒径最大可达 8~10 mm。玄武岩基质主要呈间粒间隐结构,由板柱状微晶斜长石格架内充填微粒的辉石、磁铁矿及隐晶质矿物构成,玻璃质充填物较少(图 3f)。

粗面玄武岩发育于剖面中部和顶部。剖面中部的粗面玄武岩呈致密块状构造,剖面顶部则发育柱状节理,与上覆龙潭组呈不规则冲沟状不整合接触。岩石为无斑或少斑结构(约 5%),斑晶以斜长石为主,偶见卡式双晶发育的钾长石(图 3g、h)。基质主

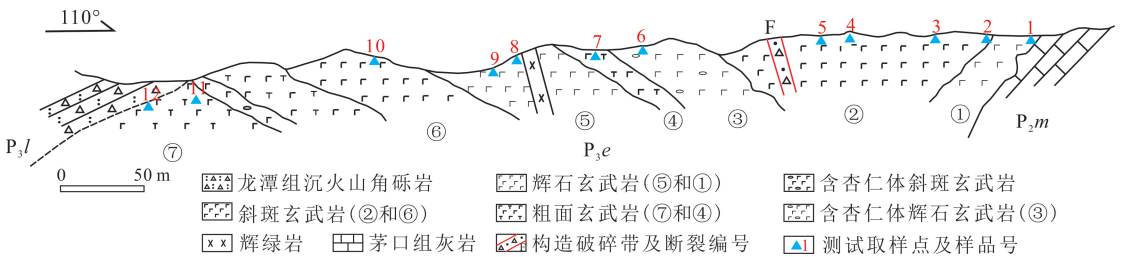
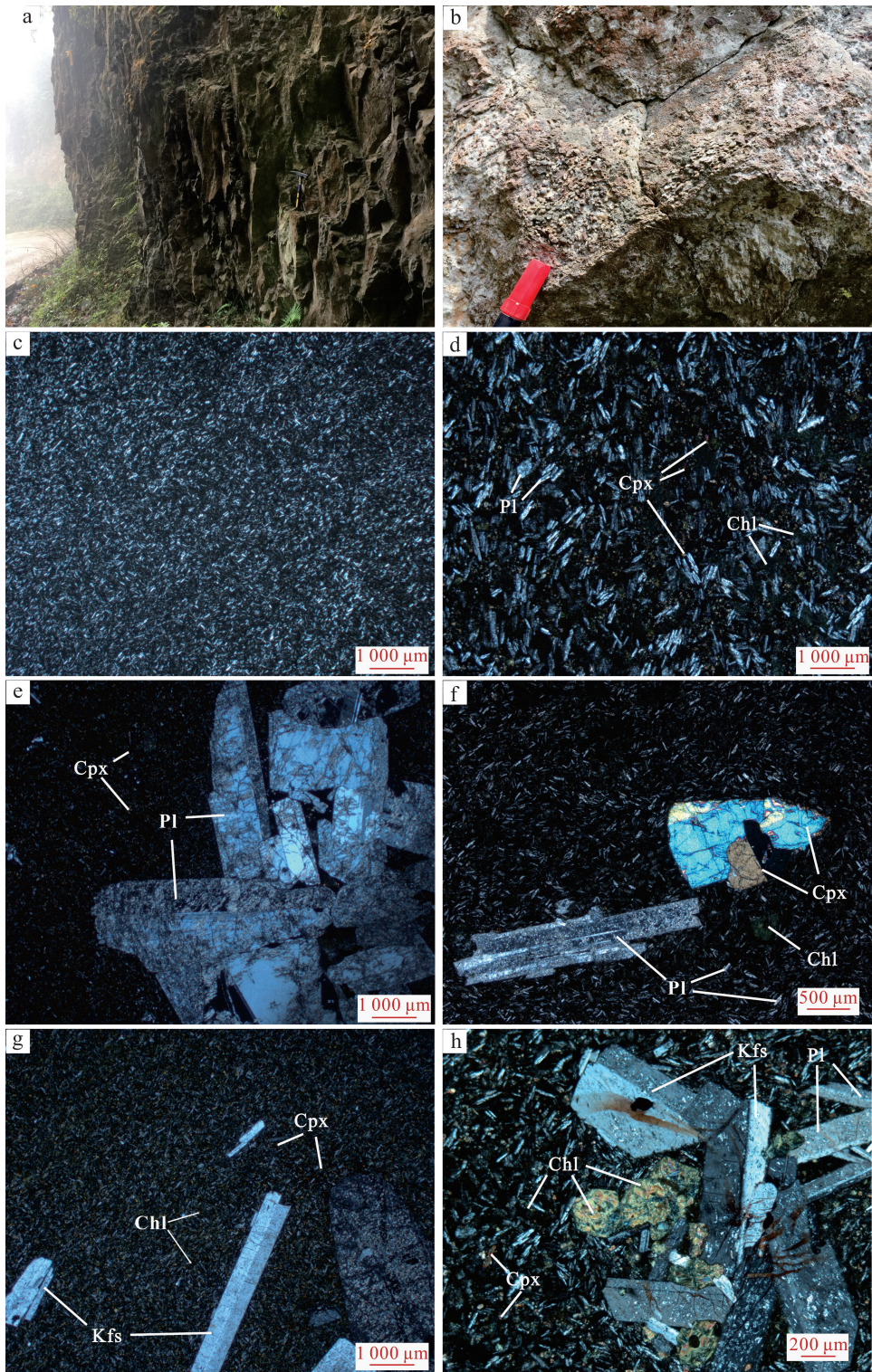


图 2 沙湾地区玄武岩剖面岩性示意图

Fig.2 Section of basalts strata in the Shawan area



a.玄武岩柱状节理;b.杏仁状玄武岩;c.辉石玄武岩,斑晶不发育,基质由斜长石和隐晶质构成间隐结构,正交偏光;d.辉石玄武岩,斑晶不发育,基质以间粒间隐结构为主,粒状辉石和隐晶质充填于斜长石格架间,部分辉石蚀变形形成绿泥石,正交偏光;e.斜斑玄武岩,粗粒的斜长石斑晶(最大可达 10 mm)聚集成聚斑结构,正交偏光;f.斜斑玄武岩,斜长石及接触双晶发育的粒状辉石为斑晶,基质为间隐间粒结构,正交偏光;g.粗面玄武岩,少斑结构,可见钾长石斑晶,正交偏光;h.粗面玄武岩,聚斑结构,可见斜长石、钾长石及辉石斑晶,部分辉石表面蚀变为绿泥石,正交偏光。Cpx. 单斜辉石;Pl. 斜长石;Kfs. 钾长石;Chl. 绿泥石。

图 3 沙湾地区玄武岩的岩石学特征

Fig.3 Features of basalts in the Shawan area

要由隐晶-微晶状长石及少量辉石和磁铁矿构成,长石粒间充填的蚀变绿泥石普遍具有类似皂石的金黄色色调,局部可见圆形或者不规则状杏仁体,主体填充绿泥石、方解石和石英。

3 测试分析方法及结果

在野外地质及薄片基础上选择新鲜无-弱蚀变的 12 件样品进行岩石地球化学分析,制样及主量、微量及稀土元素分析均由广州澳实矿物实验室完成。

主量元素采用荷兰 PANalytical 公司型号为 PW2 424 的 X 射线荧光光谱仪进行测试,采用熔片 X 射线荧光光谱仪熔融法(XRF)测试,分析精度和准确度均优于 95%。称取 3 份试样:1 份试样用高氯酸、硝酸、氢氟酸和盐酸进行消解,蒸干后用稀盐酸溶解定容,用等离子体发射光谱(ICP-AES)粗测 S-Ca-Fe-Mn-Cr 质量分数,确认流程是否适用;1 份试样于 105 °C 烘干,精确称取后加入四硼酸锂-偏硼酸锂-硝酸锂混合熔剂充分均混,于高精密熔样机 1 050 °C 熔融,冷却形成熔片后用 X 射线荧光光谱仪测定主量元素;1 份干燥后试样于马弗炉 1 000 °C 有氧灼烧,冷却测定烧失量(LOI)。所有样品主量元素分析结果见表 1。

稀土及微量元素采用美国 Agilent 公司型号为 7 900 的电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)和型号为 5 100 的电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)进行测试分析,分析精密度和准确度均大于 90%。取 2 份试样:1 份试样用高氯酸、硝酸、氢氟酸消解后蒸干,用稀盐酸溶解定容,用等离子体发射光谱(ICP-AES)与等离子体质谱(ICP-MS)进行分析;1 份试样加入到偏硼酸锂/四硼酸锂熔剂中混合均匀,在 1 025 °C 以上的熔炉中熔化,冷却后用硝酸、盐酸和氢氟酸定容,用等离子体质谱(ICP-MS)进行分析,结合样品情况及消解效果进行综合取值。所有样品稀土及微量元素分析结果见表 1。

3.1 主量元素特征

沙湾地区玄武岩样品的主量元素分析结果见表 1。数据显示:玄武岩 $w(\text{SiO}_2)$ 为 48.13%~51.29%,均值为 49.32%,属于基性火山熔岩。 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 13.06%~13.99%,较为集中。 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 1.81%~3.90%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 0.55%~3.35%, $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 为 3.23%~6.54%,均值为 4.30%,整体上表现为高碱的成分特点。 CaO 质量分数分

布范围较宽(5.96%~9.70%),均值为 8.28%,在烧失量 < 2% 的前提下,显示出整体高 Ca 的成分特点。 CaO 质量分数与辉石种类及斜长石的基性程度密切相关。玄武岩整体具有高 Ti、Fe 而低 Mg 的质量分数特征, $w(\text{TiO}_2)$ 介于 3.92%~4.15% 之间, Ti/Y 值可达 562.65~660.87,属于前人定义的高钛玄武岩^[19], $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 为 12.74%~14.64%, $w(\text{MgO})$ 为 3.60%~4.65%, $\text{Mg}^\#$ 介于 31.40~38.45 之间,说明玄武岩基性程度不高,与广义的拉斑系列玄武岩特点相似。投图于 TAS 图解(图 4a),所有样品均位于玄武岩区域,以亚碱性-碱性线为界,粗面玄武岩分布于碱性岩区间,而斜斑玄武岩和辉石玄武岩样品位于亚碱性范畴。亚碱性玄武岩在 $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{MgO}-w(\text{SiO}_2)$ 图解(图 4b)中均处于拉斑系列区域,与地幔柱成因玄武岩多为拉斑质的前人认识相符合。玄武岩的 Hark 图解(图 5)显示, SiO_2 总体上与 MgO 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 P_2O_5 质量分数呈负相关,与 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 、 TFe_2O_3 等相关性不明显,揭示相同组份岩浆结晶分异演化的特点。其中,粗面玄武岩、斜斑玄武岩及辉石玄武岩成分上有一定的差别,粗面玄武岩表现为高 Al、P、Ti 和 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 质量分数,Mg 质量分数居中且 SiO_2 质量分数偏低的成分特点,斜斑玄武岩和辉石玄武岩则成分变化范围较大,暗示了三者可能并非为统一源区岩浆结晶演化产物,或者是由于存在后期流体的叠加,使某些元素得到一定程度的富集和亏损。

3.2 微量元素特征

样品微量元素分析结果见表 1。数据显示,3 种不同岩性的稀土元素质量分数较高且差异不大($w(\sum\text{REE})$ 为 $245.43 \times 10^{-6} \sim 286.10 \times 10^{-6}$), $\text{LREE/HREE} = 6.70 \sim 8.91$, $(\text{La/Yb})_N = 9.27 \sim 12.76$,显示轻、重稀土元素分馏明显。 δEu 值介于 0.83~0.91 之间,呈较弱的 Eu 负异常。稀土元素球粒陨石标准化图解(图 6a)中所有样品均稀土配分相似,呈现轻稀土元素富集的右倾曲线模式,且可见 Eu 弱负异常,与热点洋岛玄武岩(OIB)形态类似。

玄武岩中相容元素质量分数总体较低,相容性较强的 $w(\text{Cr})$ 为 $15.00 \times 10^{-6} \sim 78.00 \times 10^{-6}$, $w(\text{Co})$ 为 $37.30 \times 10^{-6} \sim 41.90 \times 10^{-6}$, $w(\text{Ni})$ 为 $39.30 \times 10^{-6} \sim 79.80 \times 10^{-6}$,远低于原始地幔对应元素含量, $w(\text{V})$ 为 $354.00 \times 10^{-6} \sim 407.00 \times 10^{-6}$,高于原始地幔对应值。在微量元素原始地幔标准化的蛛网图(图 6b)中,沙湾地区的玄武岩具有与 OIB

表 1 峨眉山地区玄武岩主量元素和微量元素分析结果

Table 1 Major elements and trace element of basalts in the Emeishan area

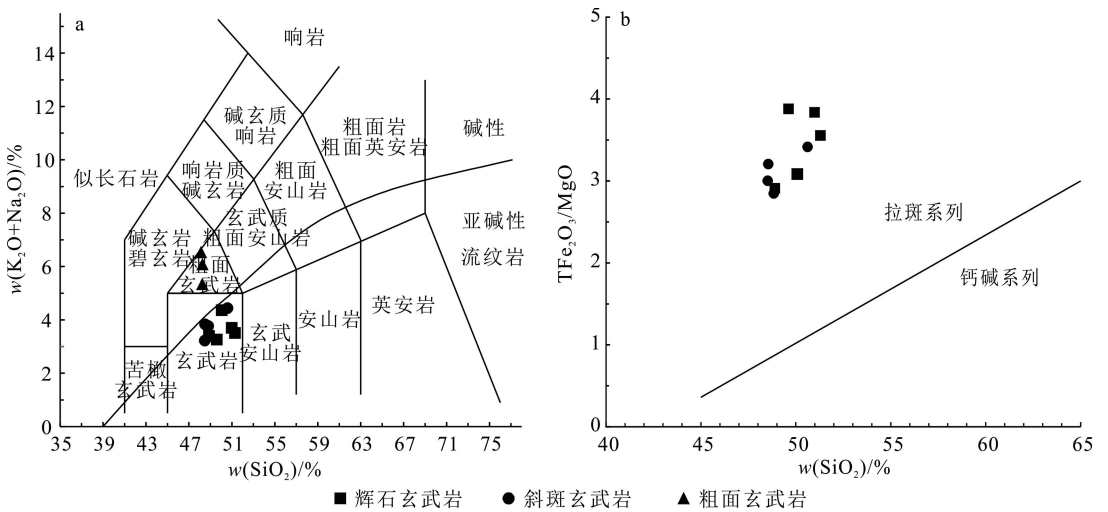
样品号	岩性	Al ₂ O ₃	CaO	TFe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
1	辉石玄武岩	13.76	8.27	12.74	1.99	4.12	0.17	2.38	0.43	50.06	3.92
2	辉石玄武岩	13.09	9.70	14.02	1.46	3.60	0.16	1.81	0.42	49.60	4.06
3	辉石玄武岩	13.19	9.29	13.06	1.71	3.66	0.16	1.81	0.40	51.29	3.92
4	辉石玄武岩	13.43	9.40	13.56	1.27	4.65	0.17	2.14	0.41	48.87	4.00
5	辉石玄武岩	13.13	8.05	14.64	0.75	3.80	0.23	2.96	0.38	50.98	3.95
6	粗面玄武岩	13.99	6.71	13.59	2.96	4.21	0.24	3.13	0.45	48.27	4.12
7	粗面玄武岩	13.80	7.81	13.35	3.15	4.12	0.17	2.19	0.46	48.24	4.05
8	粗面玄武岩	13.93	5.96	13.44	3.35	4.17	0.29	3.19	0.45	48.13	4.15
9	斜斑玄武岩	13.48	9.43	13.90	1.23	4.62	0.18	2.00	0.43	48.49	3.97
10	斜斑玄武岩	13.46	9.15	13.01	1.60	4.56	0.15	2.18	0.45	48.81	4.02
11	斜斑玄武岩	13.68	8.38	14.34	1.72	4.46	0.19	2.12	0.45	48.52	4.05
12	斜斑玄武岩	13.06	7.25	13.77	0.55	4.02	0.25	3.90	0.41	50.60	3.96
样品号	岩性	烧失量	Mg [#]	Rb	Ba	Th	U	Nb	Ta	K	Sr
1	辉石玄武岩	1.97	36.57	86.40	705.00	7.62	1.75	40.30	2.64	1.65	719.00
2	辉石玄武岩	1.89	31.40	60.90	545.00	7.17	1.64	41.90	2.80	1.18	675.00
3	辉石玄武岩	1.52	33.31	46.40	653.00	6.77	1.57	40.10	2.65	1.36	490.00
4	辉石玄武岩	2.14	37.94	40.50	490.00	6.69	1.58	39.80	2.72	1.04	534.00
5	辉石玄武岩	1.66	31.63	24.20	610.00	6.87	1.70	36.10	2.47	0.61	642.00
6	粗面玄武岩	2.06	35.58	97.80	757.00	7.10	1.64	41.20	2.87	2.54	471.00
7	粗面玄武岩	2.02	35.49	116.00	835.00	6.98	1.64	39.60	2.76	2.69	480.00
8	粗面玄武岩	2.02	35.61	101.00	903.00	7.16	1.75	40.90	2.77	2.87	346.00
9	斜斑玄武岩	1.91	37.20	38.90	495.00	6.76	1.55	39.20	2.63	1.02	553.00
10	斜斑玄武岩	1.98	38.45	52.00	421.00	7.05	1.64	39.80	2.79	1.36	533.00
11	斜斑玄武岩	2.32	35.67	63.20	546.00	7.02	1.62	40.40	2.72	1.42	564.00
12	斜斑玄武岩	1.66	34.23	24.80	259.00	6.90	1.69	36.90	2.50	0.47	566.00
样品号	岩性	P	Zr	Hf	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
1	辉石玄武岩	1 840.00	368.00	9.60	53.00	119.00	13.60	55.30	13.05	3.29	10.35
2	辉石玄武岩	1 910.00	390.00	10.00	49.40	111.50	14.05	57.50	13.25	3.69	10.90
3	辉石玄武岩	1 760.00	382.00	9.00	44.70	101.50	12.85	52.20	12.65	3.49	11.30
4	辉石玄武岩	1 890.00	374.00	9.90	47.10	103.80	13.25	53.80	12.85	3.34	10.75
5	辉石玄武岩	1 780.00	363.00	9.70	41.50	93.40	12.08	50.50	12.45	3.65	11.75
6	粗面玄武岩	2 030.00	382.00	10.00	45.80	102.80	12.70	54.50	13.15	3.47	10.85
7	粗面玄武岩	1 990.00	375.00	10.20	47.70	107.00	13.50	54.90	13.25	3.53	10.48
8	粗面玄武岩	1 980.00	385.00	9.50	43.50	99.50	13.00	53.30	12.15	3.32	11.35
9	斜斑玄武岩	1 860.00	380.00	9.90	47.80	105.00	12.60	54.90	13.45	3.37	10.70
10	斜斑玄武岩	1 920.00	379.00	10.50	49.70	107.50	13.70	56.80	13.95	3.60	11.35
11	斜斑玄武岩	1 940.00	378.00	10.10	48.10	107.50	13.10	55.90	13.20	3.39	11.25
12	斜斑玄武岩	1 780.00	364.00	9.40	41.80	93.90	11.50	50.50	13.25	3.63	11.90

续表 1

样品号	岩性	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	∑REE	LREE
1	辉石玄武岩	1.48	7.86	1.49	3.75	0.50	2.98	0.45	35.60	286.10	257.24
2	辉石玄武岩	1.58	7.78	1.48	3.72	0.49	2.95	0.44	34.50	278.73	249.39
3	辉石玄武岩	1.52	7.67	1.47	3.76	0.49	2.92	0.45	35.60	256.97	227.39
4	辉石玄武岩	1.52	8.14	1.50	3.86	0.51	2.93	0.45	35.50	263.80	234.14
5	辉石玄武岩	1.62	8.56	1.64	4.06	0.55	3.21	0.46	38.70	245.43	213.58
6	粗面玄武岩	1.50	8.00	1.55	3.74	0.50	2.87	0.42	36.30	261.85	232.42
7	粗面玄武岩	1.49	8.00	1.50	3.71	0.51	2.89	0.43	36.60	268.89	239.88
8	粗面玄武岩	1.58	8.43	1.58	3.85	0.51	2.98	0.44	36.30	255.49	224.77
9	斜斑玄武岩	1.45	7.69	1.45	3.71	0.50	2.88	0.42	36.00	265.92	237.12
10	斜斑玄武岩	1.57	8.20	1.50	3.74	0.50	2.91	0.44	37.40	275.46	245.25
11	斜斑玄武岩	1.52	7.64	1.53	3.77	0.50	2.90	0.44	36.50	270.74	241.19
12	斜斑玄武岩	1.65	8.56	1.66	4.10	0.55	3.16	0.45	40.70	246.61	214.58

样品号	岩性	HREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	δEu	δCe	Ti/Y	Co	Cr	Ni	V
1	辉石玄武岩	28.86	8.91	12.76	0.84	1.06	612.36	40.30	15.00	39.30	406.00
2	辉石玄武岩	29.34	8.50	12.01	0.91	1.02	660.87	40.50	78.00	71.60	407.00
3	辉石玄武岩	29.58	7.69	10.98	0.87	1.02	603.93	39.40	40.00	63.40	386.00
4	辉石玄武岩	29.66	7.89	11.53	0.85	1.00	633.80	40.90	15.00	42.30	400.00
5	辉石玄武岩	31.85	6.71	9.27	0.91	1.01	571.06	37.30	63.00	79.80	354.00
6	粗面玄武岩	29.43	7.90	11.45	0.86	1.03	644.63	40.90	75.00	67.10	388.00
7	粗面玄武岩	29.01	8.27	11.84	0.88	1.02	625.68	40.00	40.00	56.00	393.00
8	粗面玄武岩	30.72	7.32	10.47	0.85	1.01	652.89	40.40	42.00	59.40	387.00
9	斜斑玄武岩	28.80	8.23	11.91	0.83	1.03	630.56	38.60	40.00	58.40	375.00
10	斜斑玄武岩	30.21	8.12	12.25	0.85	0.99	614.97	41.90	39.00	57.40	371.00
11	斜斑玄武岩	29.55	8.16	11.90	0.83	1.03	610.96	40.30	40.00	59.00	369.00
12	斜斑玄武岩	32.03	6.70	9.49	0.87	1.03	562.65	41.90	39.00	58.70	360.00

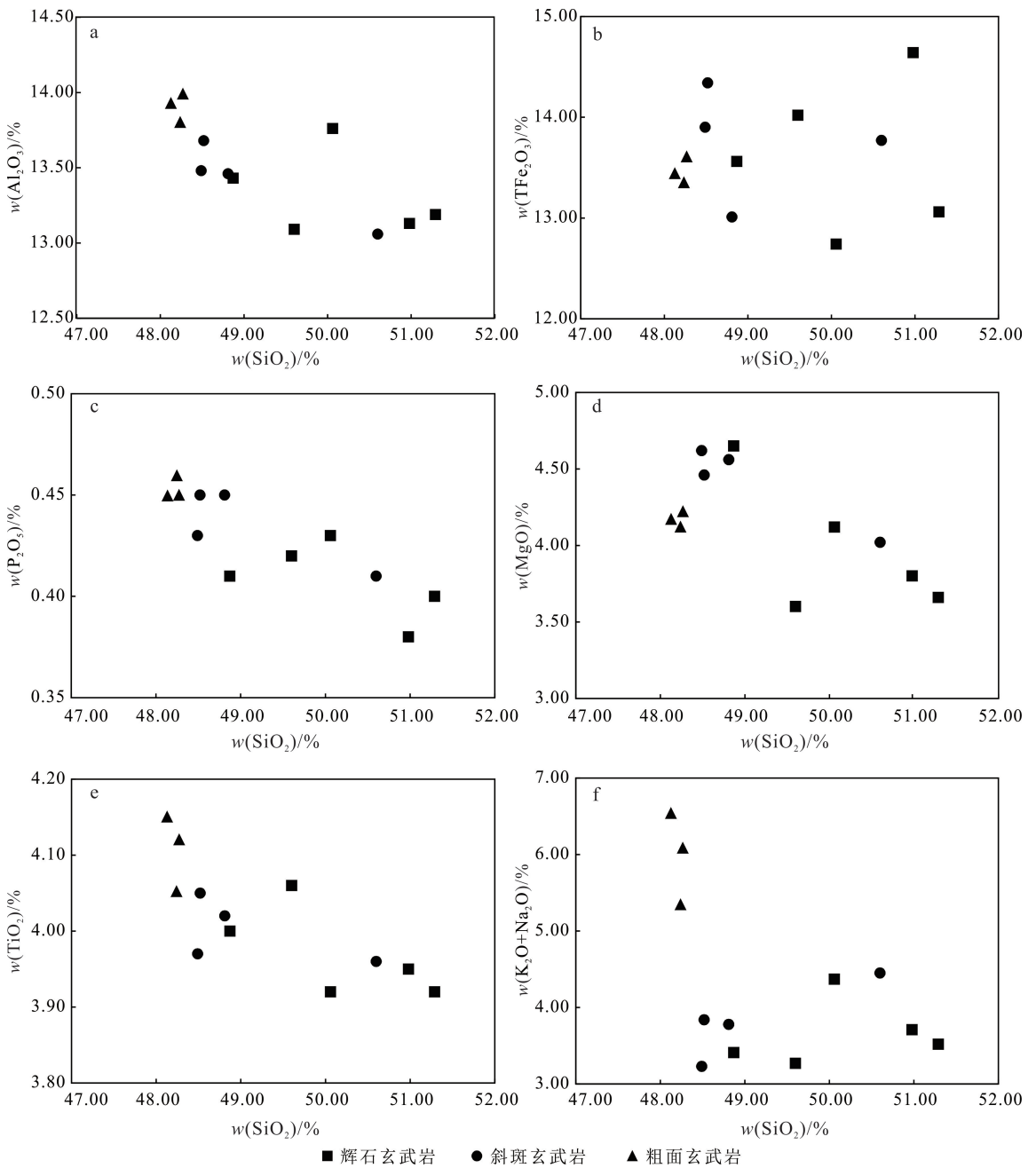
注:主量元素质量分数单位为%;微量元素质量分数单位为 10^{-6} 。 $Mg^{\#} = 100 * Mg / (Mg + Fe)$ (原子数)。



a 底图据文献[20]; b 底图据文献[21]。

图 4 沙湾地区玄武岩 TAS 图解(a)和 TFe₂O₃/MgO - w(SiO₂) 图解(b)

Fig.4 TAS (a) and TFe₂O₃/MgO - w(SiO₂) (b) diagram for basalts in the Shawan area



a. $w(\text{Al}_2\text{O}_3) - w(\text{SiO}_2)$; b. $w(\text{TFe}_2\text{O}_3) - w(\text{SiO}_2)$; c. $w(\text{P}_2\text{O}_5) - w(\text{SiO}_2)$; d. $w(\text{MgO}) - w(\text{SiO}_2)$; e. $w(\text{TiO}_2) - w(\text{SiO}_2)$; f. $w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) - w(\text{SiO}_2)$.

图 5 玄武岩主要元素 Hark 图解

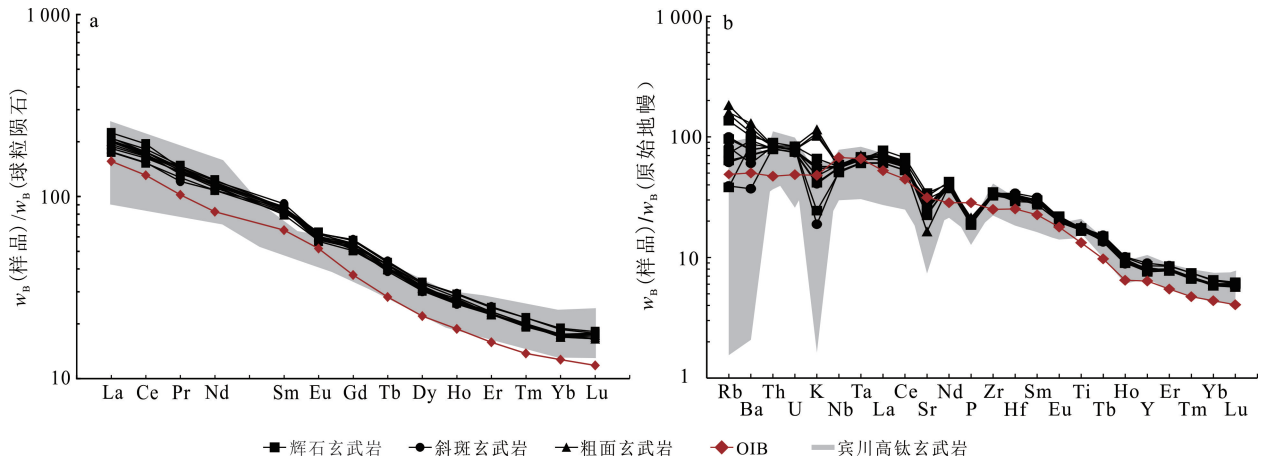
Fig.5 Hark diagram for basalts in the Emeishan area

基本一致的成分特点, Th、U 等大离子亲石元素 (LILE) 相对富集, Zr、Hf 等高场强元素 (HFSE) 相对亏损, 发育弱的 Nb、Ta 负异常和强烈的 Sr、P 负异常。不相容的大离子亲石元素 Rb、Ba、K 的变化范围较大, 部分粗面玄武岩具有明显的 Rb、K 等正异常, 与斜斑玄武岩和辉石玄武岩差异明显, 暗示岩浆源区差异或受到岩浆分异演化的影响。

4 讨论

4.1 岩浆演化及其构造背景

玄武岩浆的形成和演化涉及到来自地幔柱、软流圈、岩石圈地幔 (SLM) 和地壳等不同端元组分的贡献, 地壳物质的混染是影响岩浆演化的重要因素^[23]。典型的峨眉山高钛玄武岩部分特征值接近



宾川数据引自文献[11];球粒陨石、原始地幔标准值据文献[22]。

图 6 峨眉山地区玄武岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig.6 Chondrite normalized REE diagrams (a) and primitive mantle normalized spidergrams (b) of the basalts in the Emeishan area

原始地幔(Nb/U=36.12, Nb/La=0.66~1.50),微量元素蛛网图中一般具有 Ti 正异常特征,与经历地壳混染的玄武质岩浆存在明显差异(Ti 负异常, Th/Nb=0.02~0.25, Ta/La=0.06),且 Sr、Nd 同位素也不具备地壳混染后的明显迹象($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.704160 \sim 0.706900$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 1.59$),显示其没有经历明显的地壳混染[24-26]。

本次工作区的玄武岩均为高 Ti 玄武岩,微量元素特征值 Nb/U 为 21.24~25.55, Nb/La 为 0.76~0.94,与原始地幔值较为接近,明显高于大陆地壳值[22,27-29];Lu/Yb 为 0.142~0.154,明显低于大陆地壳值[22,26],表明该区域岩浆可能没有受到混染作用或混染程度较低。同时,分配系数相近的特征元素(Sm/Y, Ce/Y, Th/Nb, Ce/Nb)对混染作用敏感,可

用于表征混染作用的程度[30]。样品在 Ce/Y - Sm/Y 中呈明显正相关, Ce/Nb - Th/Nb 之间则相关性不明显(图 7),也揭示了研究区玄武岩受地壳混染作程度较低,与典型峨眉山高钛玄武岩特征一致[24,30]。

未经混染或者混染程度低的高钛玄武质岩浆的地球化学行为基本受控于岩浆演化过程。本剖面上的玄武岩 $\text{Mg}^\#$ 为 31.40~38.45,固结指数 I_s 为 17~22 之间 ($I_s = 100 \times w(\text{MgO}) / (w(\text{MgO}) + w(\text{FeO}) + w(\text{Fe}_2\text{O}_3) + w(\text{Na}_2\text{O}) + w(\text{K}_2\text{O}))$),远低于原始玄武岩浆的 I_s 值(≥ 40),显示出玄武岩浆经历了一定程度的分离结晶作用[31]。同时,斜长石的分离结晶作用可使残余岩浆贫 Sr 并形成 Eu 负异常,与玄武岩中发育大量斜长石聚斑结构相互印证。

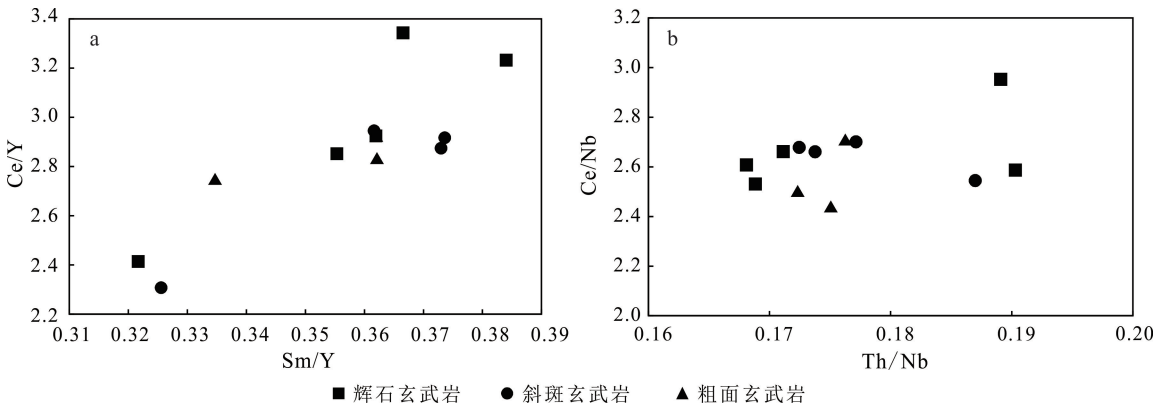


图 7 峨眉山地区玄武岩 Ce/Y - Sm/Y(a)和 Ce/Nb - Th/Nb(b)图解

Fig.7 Ce/Y - Sm/Y (a) and Ce/Nb - Th/Nb (b) diagram for basalts in the Emeishan area

目前,峨眉山大火成岩省为地幔柱成因的观点已逐渐被学术界认可^[1,32-34]。该类型成因的玄武岩除了大洋板内的热点形式外,在板块的离散边界、大陆内部裂谷以及板块缝合带附近均有产出^[35]。本次工作将宾川、雷波、马边及华蓥山等地的高钛玄武岩与工作区玄武岩相比较,利用高场强元素 Ta/Th、Th/Hf、Zr/Y 等特征值判断岩浆形成的构造环境。上述绝大部分玄武岩投落于板内玄武岩、陆内裂谷碱性及拉斑玄武岩区域(图 8),表明二叠纪末期地幔柱诱发下的玄武质岩浆主体形成于板内拉张环境,与前人^[10-11,36-37]报道的大火成岩省其他区域高钛玄武岩有相似的构造背景,证实其为峨眉山大火成岩省的组成部分。

4.2 岩浆源区性质

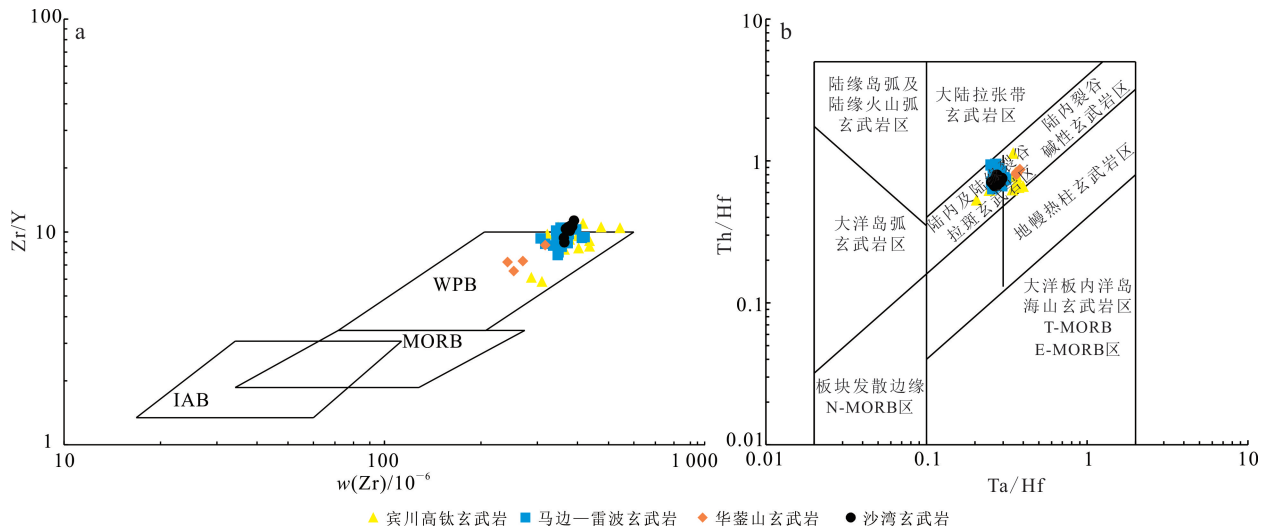
玄武质岩浆的成分,不仅受到演化过程中地壳成分的混染,更是由于其源区的复杂性导致形成的大陆玄武岩具有复杂、多变的地球化学性质^[38]。一般认为玄武质岩浆起源于地幔橄榄岩的熔融,但由于地幔组成的不均一性,板内玄武岩的源区通常也具有多样性的特点^[38]。相对于地幔柱成因的玄武岩来说,一些研究认为其源区母岩可能为再循环洋壳与橄榄石反应形成的辉石岩^[39]。本次工作将各种超镁铁质岩高压实验部分熔融体的结果进行比较,研究区玄武岩各种主量元素均较好地落在了辉石岩高压条件下部分熔融的区域(图 9),推测其源区母岩

可能为辉石岩,是古特提斯洋俯冲的成分体现。

由于 REE 在尖晶石中强烈不相容,在石榴石中重稀土(HREE)表现为强相容,中稀土(MREE)和轻稀土(LREE)则具有不相容或弱相容的特点。因此,Sm(或 Ce)相对中稀土元素 Yb 的比值 Sm/Yb(或 Ce/Yb)取决于地幔熔融过程中石榴子石是否为残留相^[39],利用这些特征值可以指示源区性质。沙湾地区玄武岩具有高 Ti 及富 Fe 质量分数的特点($w(\text{TFe}_2\text{O}_3)=12.74\% \sim 14.64\%$),且 Ce/Yb 值介于 29.1~39.9 之间,均值为 35.3,暗示源区可能为较深的石榴石稳定区($>80 \text{ km}$)^[25,41]。玄武岩的 Zr/Nb(9.13~10.06)、La/Nb(1.06~1.32)、Ba/Nb(7.02~22.08)等不相容元素比值与 EM-1 型 OIB 和 EM-2 型 OIB 最为接近(表 2),表明其可能来源于富集型地幔源区。在 La/Sm-Sm/Yb 图解(图 10)中,大火成岩省各地区样品均落于石榴石二辉橄榄岩熔融曲线附近,远离尖晶石二辉橄榄岩熔融区间,距平均大陆岩石圈地幔和地壳端元均较远,研究区玄武岩部分熔融程度略高于大火成岩省其余区域玄武岩但整体较低,表明其原始岩浆是由交代型富集地幔源区的石榴石二辉橄榄岩低程度部分熔融所形成,受地壳混染影响较小^[34,43-44]。

4.3 岩浆作用特点

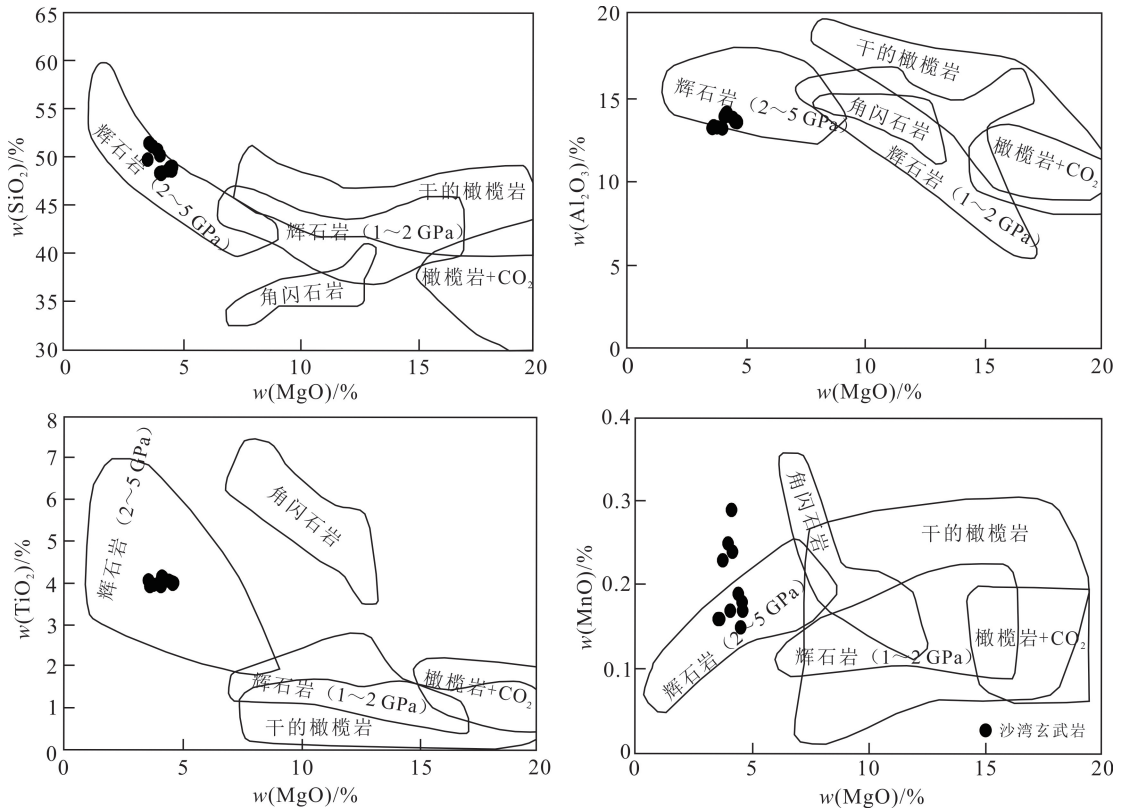
峨眉山玄武岩主喷发期为 259~258 Ma^[24],形成于短时间内的岩浆巨量喷发。云南宾川—丽江等是



a. 底图据文献[36]; b. 底图据文献[35]。宾川数据引自文献[11];雷波、马边数据引自文献[37];华蓥山数据引自文献[10]。IAB. 岛弧玄武岩; MORB. 洋中脊玄武岩; WPB. 板内玄武岩; N-MORB. 正常洋中脊玄武岩; T-MORB. 过渡型洋中脊玄武岩; E-MORB. 富集型洋中脊玄武岩。

图 8 玄武岩构造环境判别图

Fig.8 Discrimination diagrams of tectonic setting for basalts



底图据文献[40]。

图 9 峨眉山地区玄武岩与各种超镁铁质岩石在高压条件下的部分熔融实验对比图

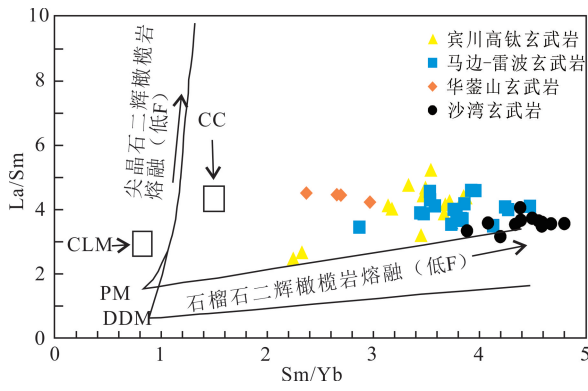
Fig.9 Comparison of partial melting experiments of basalts in the Emeishan area and various ultramafic rocks under high pressure

表 2 不同构造环境下玄武岩不相容元素比值特征

Table 2 Incompatible elements ratio characteristics of basalts in different tectonic settings

构造环境	Zr/Nb	La/Nb	Ba/Nb	Th/Nb	Rb/Nb	Ba/Th	Ba/La	Th/La
原始地幔	14.80	0.94	9.00	0.12	0.91	77.00	9.60	0.13
N - MORB	30.00	1.07	4.30	0.07	0.36	60.00	4.00	0.07
大陆地壳	16.20	2.20	54.00	0.44	4.70	124.00	25.00	0.20
GLOSS	14.54	3.20	86.80	0.77	6.40	112.00	26.90	0.24
HIMU OIB	3.20~5.00	0.66~0.77	4.90~5.90	0.08~0.10	0.35~0.38	63.0~77.0	6.80~8.70	0.11~0.13
EM - 1 OIB	5.00~13.10	0.78~1.32	9.10~23.40	0.09~0.13	0.69~1.41	80.0~204.0	11.20~19.10	0.09~0.15
EM - 2 OIB	4.40~7.80	0.79~1.19	6.40~11.30	0.11~0.17	0.58~0.87	57.0~105.0	7.30~13.50	0.11~0.18
沙湾地区玄武岩	9.13~10.06	1.06~1.32	7.02~22.08	0.17~0.19	0.67~2.93	37.54~126.12	6.20~20.76	0.14~0.17
沙湾地区玄武岩平均值	9.50	1.18	15.11	0.18	1.56	85.64	12.93	0.15

注:原始地幔、N - MORB、大陆地壳、OIB 端元元素比值引自文献[29];GLOSS(全球俯冲沉积物)比值引自文献[42]。N - MORB. 正常洋中脊玄武岩;GLOSS. 全球俯冲沉积物;HIMU OIB. 高 U 值洋玄武岩;EM - 1 OIB. 富集洋岛玄武岩I型;EM - 2 OIB. 富集洋岛玄武岩II型。



底图据文献[41]。数据参考同图 8。PM,原始地幔;DDM,亏损地幔;CLM,岩石圈地幔;CC,平均大陆地壳。

图 10 沙湾地区玄武岩 La/Sm - Sm/Yb 图解

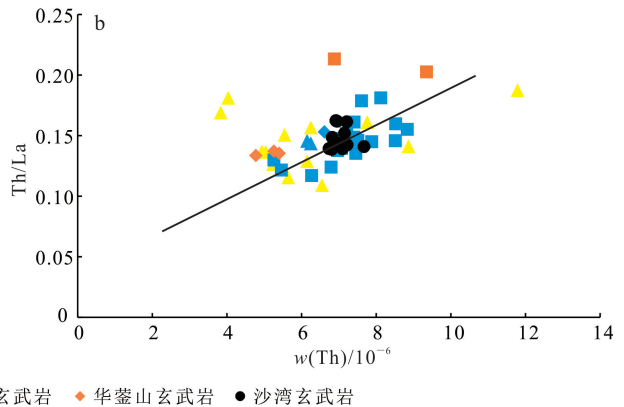
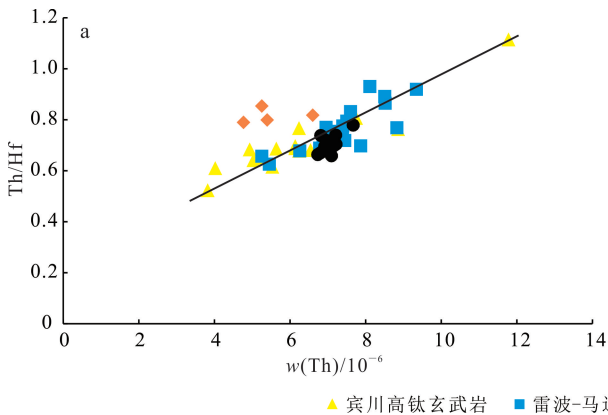
Fig.10 La/Sm - Sm/Yb diagram for basalts in the Emeishan area

玄武岩厚度最大(5 386 m)、岩石类型出露齐全的区域,与峨眉山地区对比研究可以揭示大火成岩省岩浆作用的特点和喷发幕次。

现有峨眉山大火成岩省空间分布模型显示,低钛玄武岩仅现于大火成岩省的内带,高钛玄武岩在内带、中带及外带均有分布(图 1a)^[10]。宾川上仓剖面位于大火成岩省内带,与地幔柱轴部接近,主要发育致密块状玄武岩、自碎角砾状玄武岩、杏仁状玄武岩、斜斑玄武岩及安山岩,按照岩浆爆发的时间顺序表现出从低钛向高钛过渡的变化趋势。其中,高钛玄武岩稀土配型与 OIB 一致,低钛玄武岩与 MORB 相似并存在向 OIB 演化的趋势,被认为早期低钛的玄武岩浆形成于地幔柱主期,是尖晶石稳定区的部分熔融产物,并卷入了较多的次大陆岩石圈地幔物质;晚期的高钛玄武岩具有较低的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值和较高的 ε_{Nd}(t)

值,源区为石榴石稳定区且壳源物质印记较少^[11]。沙湾地区地处大火成岩省中带边缘,仅发育高钛玄武岩^[15-16,45],岩石以致密块状辉石玄武岩、斜斑玄武岩和粗面玄武岩为主,其地球化学行为与 OIB 相似,具有岩浆来自富集型石榴石二辉橄榄岩源区的成分特点。Th/Hf - w(Th)及 Th/La - w(Th)等相关指标显示其与宾川上仓、马边、雷波及华蓥山等地高钛玄武岩位于同一趋势线上(图 11),表明二者具有相同的地幔源区^[46],虽源区部分熔融程度有所不同(图 10),但同属地幔柱晚期岩浆作用的产物。

综合岩石学、地球化学等方面资料对比研究^[11],位于大火成岩省中带边缘的峨眉山地区,二叠纪末期的玄武质岩浆喷发与内带宾川上仓剖面的晚阶段岩浆作用具有同源性及等时性特点,说明地幔柱可诱发不同源区的地幔发生部分熔融,大火成岩省不同类型的玄武岩可能源于不同的地幔源区^[1]。因此,低钛玄武岩浆可能是地幔柱柱头的熔融产物,于地下 140 km 处开始发生熔融并持续到尖晶石稳定区;部分熔融程度高(>30%)且能在岩石圈底部促使岩石圈地幔发生部分熔融形成巨量岩浆的混合源区,沿哀牢山-红河等基底断裂带喷发形成宾川、金平等地的巨厚低钛玄武岩。高钛玄武岩浆可能是地幔柱边缘或者地幔柱消亡阶段的产物,起始熔融深度较浅且仅延续到石榴石稳定区,低程度部分熔融形成体量有限的熔浆,不足以诱发岩石圈地幔产生部分熔融,岩浆主体表现为地幔柱边缘自身的岩石地球化学性质,在西、中、东部沿深大断裂上升至地表喷发,形成宾川、峨眉山、华蓥山等地的厚度较小高钛玄武岩^[1]。



数据参考同图 8。

图 11 沙湾地区玄武岩 Th/Hf - w(Th)图解(a)及 Th/La - w(Th)图解(b)

Fig.11 Th/Hf - w(Th) (a) and Th/La - w(Th) (b) diagram for basalts in the Emeishan area

5 结论

1) 沙湾地区位于大火成岩省中带边缘, 岩石主要类型为致密块状辉石玄武岩、斜斑玄武岩和粗面玄武岩, 整体具有高 $\omega(\text{Fe})$ 、高 $\omega(\text{Ti})$ 和相对低 $\omega(\text{Mg})$ 的地球化学特征, 属于高钛拉班系列的玄武岩。

2) 玄武岩稀土及微量元素曲线分布特征与洋岛玄武岩相似, $\omega(\sum\text{REE})$ 为 $245.43 \times 10^{-6} \sim 286.10 \times 10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 9.27 \sim 12.76$, 分馏程度较高, 具有微弱的 Eu 负异常; 大离子亲石元素 Rb、Ba、K 变化范围较大, 可见 Nb、Ta 的弱负异常和 Sr、P 的明显负异常。

3) 玄武岩形成于板内拉张环境, 属于峨眉山大火成岩省的组成部分, 原始岩浆来源于交代富集地幔的石榴石二辉橄辉岩的低程度部分熔融, 同与再循环洋壳有关的辉石岩特点相似, 岩浆上升过程中经历了以斜长石为主的结晶分异及微弱的地壳混染。

4) 沙湾地区玄武岩与宾川上仓剖面晚阶段喷发物具有相似的岩石学及地球化学特征, 同源性和等时性的特点暗示它们同是大火成岩省活动晚期地幔柱边缘自身熔融的产物。

参考文献 (References):

- [1] 徐义刚, 钟孙霖. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件[J]. 地球化学, 2001, 30(1): 1-9. Xu Yigang, Zhong Sunlin. The Emeishan Large Igneous Province: Evidence for Mantle Plume Activity and Melting Conditions[J]. *Geochimica*, 2001, 30(1): 1-9.
- [2] Courtillot V, Jaupart C, Manighetti I, et al. On Causal Links Between Flood Basalts and Continental Breakup[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 166(3): 177-195.
- [3] Chung Sunlin, Jahn Bor-Ming. Plume-Lithosphere Interaction in Generation of the Emeishan Flood Basalts at the Permian-Triassic Boundary[J]. *Geology*, 1995, 23(10): 889-892.
- [4] 张招崇, 王福生, 范蔚茗, 等. 峨眉山玄武岩研究中的一些问题的讨论[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(3): 239-246. Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, Fan Weiming, et al. A Discussion on Some Problems Concerning the Study of the Emeishan Basalts[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2001, 20(3): 239-246.

- [5] 袁永盛, 张宏辉, 娄元林, 等. 滇东北昭通地区发现峨眉山玄武岩沉积夹层: 峨眉山玄武岩幕式喷发新证据[J]. 地质通报, 2022, 41(10): 1772-1782. Yuan Yongsheng, Zhang Honghui, Lou Yuanlin, et al. The Discovery of Sedimentary Interactions in Emeishan Basalt in the Zhaotong Area, Northeastern Yunnan: The New Evidence of Episodic Eruption[J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(10): 1772-1782.
- [6] 王晓峰, 熊波, 戚戎辉, 等. 滇东北昭通地区峨眉山玄武岩钕-铈-铅同位素特征: 峨眉山地幔柱源区性质与 Rodinia 超大陆事件的耦合关系[J]. 地质通报, 2021, 40(7): 1084-1093. Wang Xiaofeng, Xiong Bo, Qi Ronghui, et al. Nd-Sr-Pb Isotopes of Emeishan Basalt in the Zhaotong Area of Northeastern Yunnan-Coupling Relationship Between Source of Emeishan Mantle Plume and Rodinia Supercontinent [J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(7): 1084-1093.
- [7] 朱靓, 郗爱华, 王挽琼, 等. 四川攀枝花二叠纪双峰式火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 世界地质, 2017, 36(2): 452-459. Zhu Liang, Xi Aihua, Wang Wanqiong, et al. Geochemical Characteristics and Their Geological Significance of Permian Bimodal Volcanic Rocks in Panzhihua, Sichuan [J]. *Global Geology*, 2017, 36(2): 452-459.
- [8] 任杰, 郗爱华, 郑江, 等. 川西南峨眉山玄武岩中蚀变绿泥石的成分特征及其地质意义[J/OL]. 吉林大学学报(地球科学版). 2023, 53. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20220181. Ren Jie, Xi Aihua, Zheng Jiang, et al. Composition Characteristics and Geological Significance of Altered Chlorite in Basalt of Emeishan in Southwestern Sichuan [J/OL]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20220181.
- [9] 张云湘, 罗耀南, 杨崇喜. 中华人民共和国地质矿产部地质专报五: 构造地质·地质力学: 第 5 号: 攀西裂谷 [M]. 北京: 地质出版社, 1988: 327. Zhang Yunxiang, Luo Yaonan, Yang Chongxi. Geological Special Report No. 5 of the Ministry of Geology and Mineral Resources of the People's Republic of China: Structural Geology · Geomechanics: No. 5: The Panxi Rift [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 327.
- [10] 梁宇馨, 李红, 张冬冬, 等. 四川盆地华蓥山峨眉玄

- 武岩地球化学特征及其成因分析[J]. 地质科学, 2021, 56(1): 288 - 302.
- Liang Yuxin, Li Hong, Zhang Dongdong, et al. Geochemical Characteristics and Genetic Analysis of Huayingshan Emeishan Basalt in Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2021, 56(1): 288 - 302.
- [11] Xiao L, Xu Y G, Mei H J, et al. Distinct Mantle Sources of Low-Ti and High-Ti Basalts from the Western Emeishan Large Igneous Province, SW China: Implications for Plume-Lithosphere Interaction[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 228(3): 525 - 546.
- [12] Lai S C, Qin J F, Li Y F, et al. Permian High Ti/Y Basalts from the Eastern Part of the Emeishan Large Igneous Province, Southwestern China: Petrogenesis and Tectonic Implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 47: 216 - 230.
- [13] 郝艳丽, 张招崇, 王福生, 等. 峨眉山大火成岩省“高钛玄武岩”和“低钛玄武岩”成因探讨[J]. 地质论评, 2004, 50(6): 587 - 592.
- Hao Yanli, Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, et al. Petrogenesis of High-Ti and Low-Ti Basalts from the Emeishan Large Igneous Province [J]. Geological Review, 2004, 50(6): 587 - 592.
- [14] 张乐. 峨眉山大火成岩省中高钛和低钛镁铁质岩浆成因: 熔体包裹体和微量元素模拟的研究[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2019.
- Zhang Le. The Origins of High-Ti and Low-Ti magmas in the Emeishan Large Igneous Provinces, Insights from Melt Inclusion Study and Trace Element Modeling [D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science), 2019.
- [15] 魏杰. 峨眉山玄武岩岩石学、岩石地球化学及其地球动力学意义[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- Wei Jie. The Petrology and Litho-Geochemistry and Geo-Dynamic Significance of Emeishan Basalt in Mts Emei of Sichuan Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [16] 熊舜华, 李建林. 峨眉山区晚二叠世大陆裂谷边缘玄武岩系的特征[J]. 成都地质学院学报, 1984, 11(3): 43 - 59, 123 - 124, 134 - 135.
- Xiong Shunhua, Li Jianlin. The Characteristic of the Late Permian Basalts in the Margin of Continental Rift in Emeishan Area [J]. Journal of Chengdu University School of Geology, 1984, 11(3): 43 - 59, 123 - 124, 134 - 135.
- [17] Li H B, Zhang Z C, Ernst R, et al. Giant Radiating Mafic Dyke Swarm of the Emeishan Large Igneous Province: Identifying the Mantle Plume Centre[J]. Terra Nova, 2015, 27(4): 247 - 257.
- [18] 四川省地质矿产局. 峨眉东半幅 H - 48 - 20 1/20 万地质图[R]. 成都: 四川省地质矿产局, 1971.
- Geology and Mineral Resources Bureau of Sichuan Province. H - 48 - 20 1/200000 Geological Map of East Half of Emei [R]. Chengdu: Geology and Mineral Resources Bureau of Sichuan Province, 1971.
- [19] Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, et al. Petrologic and Geochemical Constraints on the Petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan Flood Basalts in Southwestern China[J]. Lithos, 2001, 58(3): 145 - 168.
- [20] Lemaitre R. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms [M]. Cambridge: Cambridge University, 2002.
- [21] Irvine T N, Baragar W R A. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1971, 8(5): 523 - 548.
- [22] Sun S, McDonough W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes [J]. Geological Society, 1989, 42(1): 313 - 345.
- [23] Weaver B L. The Origin of Ocean Island Basalt End-Member Compositions: Trace Element and Isotopic Constraints[J]. Earth & Planetary Science Letters, 1991, 104(2): 381 - 397.
- [24] Plank T H, Langmuir C. The Chemical Composition of Subducting Sediment and Its Consequences for the Crust and Mantle[J]. Chemical Geology, 1998, 145(3): 325 - 394.
- [25] 段其发, 王建雄, 白云山, 等. 唐古拉山东段莫云地区二叠纪玄武岩地球化学特征及源区性质[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(2): 125 - 138.
- Duan Qifa, Wang Jianxiong, Bai Yunshan, et al. Geochemistry and Mantle Source Characteristics of the Permian Basalts in Moyun Area, Eastern Tanggula Range [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2010, 29(2): 125 - 138.
- [26] 田雨露, 李亚, 孟凡超, 等. 峨眉山大火成岩省岩石成因与空间差异性研究: 基于全区高 Ti 玄武岩地球化学数据分析与模拟[J]. 岩石矿物学杂志, 2021, 40(4): 687 - 703.

- Tian Yulu, Li Ya, Meng Fanchao, et al. A Study of the Petrogenesis and Spatial Difference of the Emeishan Large Igneous Province: Based on Geochemical Analysis and Simulation of the High Ti Basalts in the Whole Region[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2021, 40(4): 687 - 703.
- [27] 肖龙, 徐义刚, 梅厚钧, 等. 云南宾川地区峨眉山玄武岩地球化学特征: 岩石类型及随时间演化规律[J]. *地质科学*, 2003, 38(4): 478 - 494.
- Xiao Long, Xu Yigang, Mei Houjun, et al. Geochemistry of Emeishan Flood Basalts at Binchuan Area, SW China: Rock Type and Temporal Evolution [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2003, 38(4): 478 - 494.
- [28] Rudnick R L, Gao S. Composition of the Continental Crust[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 3(1): 1 - 64.
- [29] 李曙光. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba - Th - Nb - La 判别图[J]. *岩石学报*, 1993, 9(2): 146 - 157.
- Li Shuguang. Ba - Th - Nb - La Diagrams Used to Identify Tectonic Environments of Ophiolite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1993, 9(2): 146 - 157.
- [30] Hofmann A W. Mantle Geochemistry: The Message from Oceanic Volcanism [J]. *Nature: International Weekly Journal of Science*, 1997, 385: 219 - 229.
- [31] 姜寒冰, 姜常义, 钱壮志, 等. 云南峨眉山高钛和低钛玄武岩的岩石成因[J]. *岩石学报*, 2009, 25(5): 1117 - 1134.
- Jiang Hanbing, Jiang Changyi, Qian Zhuangzhi, et al. Petrogenesis of High - Ti and Low - Ti Basalts in Emeishan, Yunnan, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(5): 1117 - 1134.
- [32] 邱家骧. 岩浆岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 340.
- Qiu Jiexiang. *Magmatic Petrology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985: 340.
- [33] 肖龙, 徐义刚, 何斌. 峨眉地幔柱-岩石圈的相互作用: 来自低钛和高钛玄武岩的 Sr - Nd 和 O 同位素证据[J]. *高校地质学报*, 2003, 9(2): 207 - 217.
- Xiao Long, Xu Yigang, He Bin. Emei Mantle Plume-Subcontinental Lithosphere Interaction: Sr - Nd and O Isotopic Evidences from Low - Ti and High - Ti Basalts[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9(2): 207 - 217.
- [34] 李宏博. 峨眉山大火成岩省地幔柱动力学: 基性岩墙群、地球化学及沉积地层学证据[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- Li Hongbo. Mantle Plume Geodynamic Significances of the Emeishan Large Igneous Province: Evidence from Mafic Dykes, Geochemistry and Stratigraphic Records[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- [35] 宋谢炎, 侯增谦, 汪云亮, 等. 峨眉山玄武岩的地幔热柱成因[J]. *矿物岩石*, 2002, 22(4): 27 - 32.
- Song Xieyan, Hou Zengqian, Wang Yunliang, et al. The Mantle Plume Features of Emeishan Basalts[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2002, 22(4): 27 - 32.
- [36] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf - Ta/Hf 图解判别[J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 413 - 421.
- Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Xiu Shuzhi. Th/Hf - Ta/Hf Identification of Tectonic Setting of Basalts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(3): 413 - 421.
- [37] Norry M J. Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y, and Nb Variations in Volcanic Rocks [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1979, 69(1): 33 - 47.
- [38] 杨辉, 马继跃, 朱兵, 等. 四川马边、雷波地区峨眉山玄武岩地球化学特征及其成因[J]. *四川地质学报*, 2018, 38(1): 27 - 33, 38.
- Yang Hui, Ma Jiyue, Zhu Bing, et al. Geochemical Characteristics and Genesis of the Emeishan Basalt in the Mabian-Leibo Region, Sichuan [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2018, 38(1): 27 - 33, 38.
- [39] 廖宝丽, 张招崇, 寇彩化, 等. 贵州水城二叠纪钠质粗面玄武岩的地球化学特征及其源区[J]. *岩石学报*, 2012, 28(4): 1238 - 1250.
- Liao Baoli, Zhang Zhaochong, Kou Caihua, et al. Geochemistry of the Shuicheng Permian Sodium Trachybasalts in Guizhou Province and Constraints on the Mantle Sources [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(4): 1238 - 1250.
- [40] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- Zhao Zhenhua. *Trace Element Geochemical Principle* [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [41] 刘建强, 任钟元. 玄武岩源区母岩的多样性和识别特征: 以海南岛玄武岩为例[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(3): 471 - 488.
- Liu Jianqiang, Ren Zhongyuan. Diversity of Source Lithology and Its Identification for Basalts: A Case Study of the Hainan Basalts [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37(3): 471 - 488.

- [42] 张正伟,程占东,朱炳泉,等. 峨眉山玄武岩组铜矿化与层位关系研究[J]. 地球学报, 2004, 25(5): 503-508.
Zhang Zhengwei, Cheng Zhandong, Zhu Bingquan, et al. The Relationship Between the Horizon of the Emeishan Basalt Formation and Copper Mineralization[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2004, 25(5): 503-508.
- [43] Lassiter J C, Depaolo D J. Plume/Lithosphere Interaction in the Generation of Continental and Oceanic Flood Basalts: Chemical and Isotopic Constraints[R]. Washington: American Geophysical Union (agu), 2013.
- [44] 侯增谦,卢记仁,李红阳,等. 中国西南特提斯构造演化: 幔柱构造控制[J]. 地球学报, 1996, 17(4): 439-453.
Hou Zengqian, Lu Jiren, Li Hongyang, et al. Tectonic Evolution of the Tethys in Southwestern China: Is Controlled by Plume Tectonics[J]. Acta Geoscientica Sinica, 1996, 17(4): 439-453.
- [45] Xu J F, Suzuki K, Xu Y G, et al. Os, Pb, and Nd Isotope Geochemistry of the Permian Emeishan Continental Flood Basalts: Insights into the Source of a Large Igneous Province [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71(8): 2104-2119.
- [46] 汪云亮,李巨初,韩文喜,等. 幔源岩浆岩源区成分判别原理及峨眉山玄武岩地幔源区性质[J]. 地质学报, 1993, 67(1): 52-62.
Wang Yunliang, Li Juchu, Han Wenxi, et al. The Principles for Discrimination of the Source Composition of Mantle-Derived Igneous Rocks and the Nature of the Mantle Source Region of the Emeishan Basalt[J]. Acta Geologica Sinica, 1993, 67(1): 52-62.