

四川雷波峨眉山玄武岩岩石学及地球化学特征

刘建清¹⁾, 何 利¹⁾, 胡宇瀚²⁾, 何佳伟¹⁾, 何 平¹⁾

1) 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081;
2) 四川省地质矿产勘查开发局二〇七地质队, 四川乐山 614000

摘 要: 以剖面测量及野外系统观察、显微镜下及地球化学研究为基础, 认为雷波地区峨眉山玄武岩主要具有以下特点: ①岩石类型主要为致密块状玄武岩、斑状玄武岩、杏仁状玄武岩, 发育柱状节理, 为典型陆相喷发玄武岩; ②岩石化学分类为碱性玄武岩, 具高钛特征, 为板内拉张玄武岩; ③玄武岩经历了相似的岩浆演化和结晶分异, 形成深度大, 起源于富集地幔源, 是地幔柱作用的产物; ④玄武岩是攀西裂谷拉张作用的产物, 无爆发角砾岩相, 主要为喷溢-溢流相, 可能属攀西裂谷的边缘相带。

关键词: 雷波地区; 峨眉山玄武岩; 岩石学; 地球化学

中图分类号: P581; P595 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2019.100901

The Petrological and Geochemical Characteristics of Emei Shan Basalt in Leibo County, Sichuan Province

LIU Jian-qing¹⁾, HE Li¹⁾, HU Yu-han²⁾, HE Jia-wei¹⁾, HE Ping¹⁾

1) Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081;
2) 207 Geological Brigade of Sichuan Bureau of Exploration & Development of Geology & Mineral Resources, Leshan, Sichuan 614000

Abstract: Based on profile survey and microscopic and geochemical study, the authors investigated the Emei Shan basalt in Leibo County, Sichuan Province. Some conclusions have been reached: ①The rock types mainly include compact basalt, porphyritic basalt, and amygdaloidal basalt with columnar joints, formed probably by typical terrestrial eruption; ②The petrochemistry is classified as alkaline basalt with high titanium, resulting from stretching in plate; ③The basalt originated from enriched mantle source, which was produced by mantle plume and formed at large depth, and experienced similar activities of magmatic evolution and crystallization differentiation; ④The basalt has no eruptive breccia facies, and consists mainly of the spillway overflow facies. It is the product of extensional action in Panxi rift and may belong to its marginal facies.

Key words: Leibo area; Emei Shan basalt; petrology; geochemistry

峨眉山玄武岩在康滇古陆以西的云南丽江—宾川、香格里拉九龙、四川盐源等地, 以及在康滇古陆的攀枝花二滩、四川越西开展过系统的岩石学和地球化学研究(肖龙等, 2003a; 严再飞等, 2006; 朱士飞等, 2008; 孙晓旭, 2013; 王涛等, 2013; 张春生等, 2016)。但是, 在康滇古陆东缘, 尚未开展过系统的研究工作。四川雷波地区位于康滇古陆东缘, 往南逐渐靠近黔中古陆, 处于两个古陆向东和向北过渡区域。根据云南省区域地质志的划分, 该区在一级构造单元为扬子准地台, 二级构造单元为滇东

台褶皱带(云南省地质矿产局, 1982), 三级构造单元为滇东北台褶皱束(图 1)。2016 年以来, 该区开展了四幅 1:50000 标准图幅的区域地质调查, 工作中对图幅范围内涉及的地层单元进行了系统的控制, 所测峨眉山玄武岩为四川省雷波县回龙场乡新滩隧道剖面。剖面测制过程中, 系统采集了岩石学及地球化学样品, 以深入研究其岩石学及地球化学特征, 探讨峨眉山玄武岩的大地构造属性, 填补该地区相关研究的空白。本文旨在发表该地区峨眉山玄武岩的岩石学和地球化学特征, 为深化该地区峨眉山玄武

本文由中国地质调查局基础地质调查项目(编号: DD20160019-19; DD20190080)资助。

收稿日期: 2019-05-07; 改回日期: 2019-09-22; 网络首发日期: 2019-10-10。责任编辑: 张改侠。

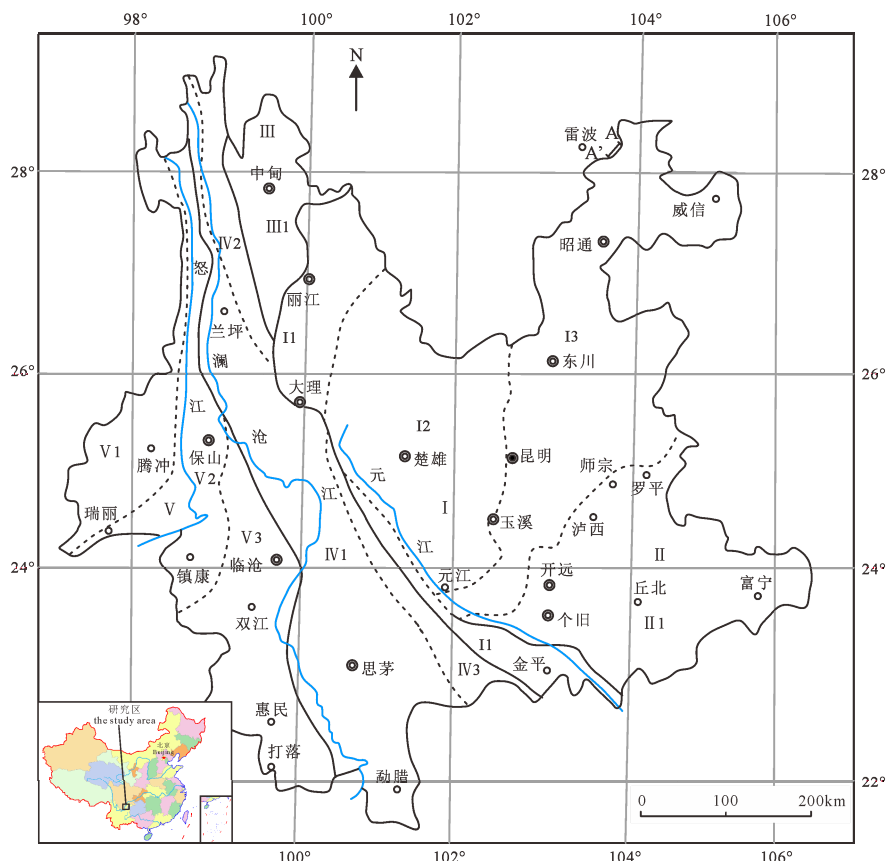
第一作者简介: 刘建清, 男, 1969 年生。硕士, 教授级高工。主要从事岩石学专业研究。E-mail: liujq1@tom.com。

岩的形成机制提供基础地质资料。

1 岩石学特征

四川省雷波县回龙场乡新滩隧道峨眉山玄武岩剖面, 起点坐标: 183819.77, 3128513.00(西安 80 坐标系); 终点坐标: 183807.98, 3127879.00(西安 80 坐标系)。该剖面玄武岩总厚 729.15 m, 主要为灰绿-铁灰色致密块状玄武岩、斑状玄武岩、杏仁状玄武岩、含玛瑙玄武岩, 顶部为灰绿-紫红色玄武岩(图 2)。中上部致密块状玄武岩中发育柱状节理(图 3a)。

斑状玄武岩斑晶为基性斜长石, 多呈板状自形晶, 局部为它形粒状, 宽约 0.2 cm, 长约 10 cm, 呈星散状或“雪花状”分布, 含量不等。杏仁状玄武岩, 杏仁体直径 0.1~0.6 cm, 含量不等, 主要为绿泥石、石英充填。总体上, 可划分出七个喷发旋回, 每一旋回以致密块状玄武岩、斑状玄武岩开始, 以杏仁状玄武岩、含玛瑙玄武岩结束。从其岩石类型、结构、构造特征看, 主要为喷溢-溢流相, 无爆发角砾岩相。玄武岩发育柱状节理、斑状结构、火山气孔(为杏仁及玛瑙充填), 具陆相喷发玄武岩的典型特征。



I—扬子准地台: I1—丽江台缘褶皱带; I2—川滇台背斜; I3—滇东台褶带; II—华南褶皱系: II1—滇东南褶皱带; II2—松潘—甘孜褶皱系: II21—中甸褶皱带; IV—唐古拉—昌都—兰坪—思茅褶皱带: IV1—兰坪—思茅拗陷; IV2—云岭褶皱带; IV3—墨江—绿春褶皱带; V—岗底斯—念青唐古拉褶皱系: V1—伯舒拉岭—高黎贡山褶皱带; V2—福贡—镇康褶皱带; V3—昌宁—孟连褶皱带。
I—Yangzi platform: I1—Lijiang fold belt at the margin of Yangzi platform; I2—Sichuan-Yunnan platform anticline; I3—fold belt of east Yunnan; II—South China fold system: II1—southeast Yunnan fold belt; II2—Songpan-Ganzi fold system: II21—Zhongdian fold belt; IV—Tanggula-Changdu-Lanping-Simao fold belt: IV1—Lanping-Simao depression, IV2—Yunling fold belt; IV3—Mojiang-Lüchun fold belt; V—Gangdisi-Nyainqentanglha fold system: V1—Baishula-Gaoligong mountain fold belt; V2—Fugong-Zhenkang fold belt; V3—Changning-Menglian fold belt.

图 1 研究区大地构造位置图(据云南省地质矿产局, 1982)

Fig. 1 Geotectonic location of the study area (after Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources, 1982)

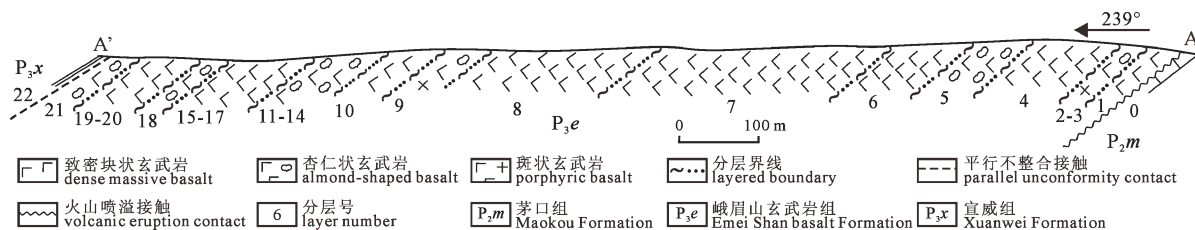


图 2 四川省雷波县回龙场乡新滩隧道峨眉山玄武岩剖面略图

Fig. 2 The sketch map of the Emei Shan basalt section in Xintan tunnel, Leibo County, Sichuan Province

1.1 致密块状玄武岩

铁灰-黄绿色, 块状构造。显微镜下斑晶<1%, 主要为斜长石, 偶见辉石。斜长石呈规则条板状, 蚀变轻, 聚片双晶纹清楚。辉石新鲜色, 常由绿泥石替代, 保留短柱状外形; 基质具间粒间隐结构, 主要由斜长石、辉石, 较多磁铁矿和部分隐晶火山物质组成。细条状斜长石微晶不规则杂乱分布, 间隙充填微晶辉石、磁铁矿和部分隐晶火山物质。磁铁矿微粒状, 部分隐晶火山物质脱玻分解生成绿泥石等(图 3b)。

1.2 杏仁状玄武岩

灰绿色, 呈块状特征。杏仁体多呈黑色小圆点, 直径 3~4 mm, 含量 8%~40%; 镜下局部偶见斑晶<1%, 全为斜长石, 规则条板状, 蚀变轻, 聚片双晶清楚。杏仁多数细小, 主要由绿泥石、石英充填, 由于先后多次充填, 形成玛瑙纹结构。基质具间粒间隐结构, 主要由斜长石、辉石、较多磁铁矿和部分隐晶火山物质组成, 细条状斜长石微晶多数不规则杂乱分布, 少部分大致定向分布, 间隙中充填辉石微晶、磁铁矿微粒和暗色隐晶火山物质。磁铁矿多较自形, 部分隐晶火山物质脱玻分解生成绿泥石和少量长英质微粒(图 3c)。

1.3 斑状玄武岩

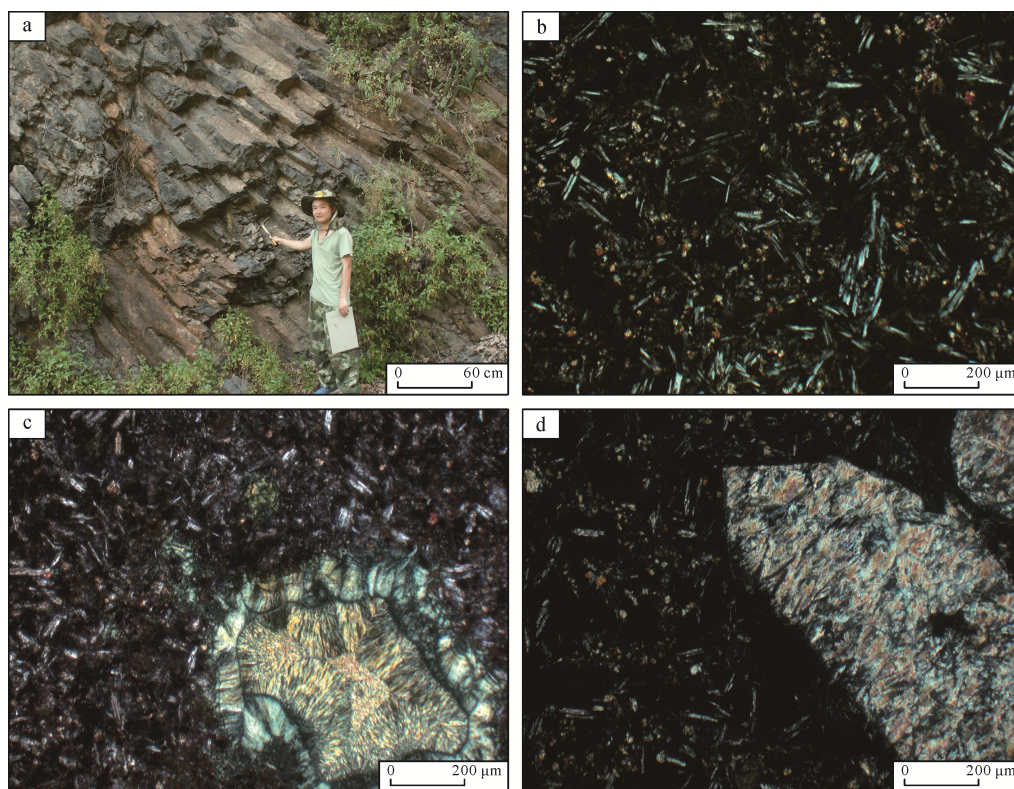
灰绿色, 呈斑状结构, 斑晶为斜长石, 呈板状

自形晶, 长约 1 cm, 宽约 0.2 cm, 个别斜长石斑晶相互交叉在一起, 整体呈星散状或“雪花状”特征, 含量约 5%; 镜下斑晶 1%~8%, 斜长石为主, 辉石<1%, 斜长石呈规则条板状、板柱状, 蚀变较强, 多由次闪石、绿帘石和硅质替代, 保留其特征的晶体外形, 细中粒, 少部分形成联斑。辉石呈规则短柱状, 个别见简单双晶, 细粒状。杏仁体偶见, 由绿泥石、硅质、碳酸盐组成。基质具间粒间隐结构, 主要由斜长石、辉石和隐晶火山物质组成。细条状斜长石呈微晶不规则杂乱分布, 间隙充填微晶辉石和暗色火山物质。部分火山物质脱玻分解生成绿泥石、石英微晶和少量碳酸盐矿物, 不均匀充填斜长石间隙空隙(图 3d)。

2 地球化学特征

2.1 主量元素特征

该区主量和微量元素测定采用 ICP-MS, 稀土元素含量测定采用等离子质谱仪(X-series), 测定误差小于 0.02%, 样品均由中国地质调查局成都地质调查中心测试。主量元素测试结果表明(表 1), 雷波地区峨眉山玄武岩样品的 SiO_2 含量范围为 47.94%~52.14%, 其平均含量为 49.88%; Al_2O_3 的含量范围为 11.78%~14.20%, 其平均含量为 13.17%; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量范围为 2.75%~6.66%, 平均值为



a—玄武岩中柱状节理; b—致密块状玄武岩; c—杏仁状玄武岩; d—斑状玄武岩。

a—columnar joints in basalt; b—dense massive basalt; c—almond-shaped basalt; d—porphyritic basalt.

图 3 雷波地区峨眉山玄武岩典型野外照片及显微镜下照片

Fig. 3 The typical field and microscopic photographs of Emei Shan basalt in Leibo area

4.27%, 表现为普遍高碱; Fe_2O_3 的含量范围为 2.55%~7.72%, 平均含量为 3.97%; FeO 的含量范围为 5.10%~11.26%, 平均含量为 9.24%; CaO 的含量范围为 5.54%~9.12%, 平均含量为 7.71%; TiO_2 的含量范围为 3.63%~4.34%, 其平均含量为 3.97%; P_2O_5 的含量范围为 0.38%~0.48%, 平均值为 0.42%; MgO 的含量范围为 2.95%~4.65%, 平均值为 4.16%。而调整后计算得到的 $\text{Mg}^\#$ 范围为 0.30~0.39。林伍德(1981)在研究了 94 个含有致密高压捕虏晶和捕虏体的碱性玄武质岩浆, 发现 $\text{Mg}^\#$ 的范围明显集中在 0.63~0.70(林伍德, 1981), 代表了原始岩浆的 $\text{Mg}^\#$ 。很明显, 雷波峨眉山玄武岩样品的 $\text{Mg}^\#$ 相对较低, 这表明在峨眉山玄武岩原始岩浆中的 MgO 的含量应大于 4.65%, 并在经历了一定的分异后才形成了母岩浆。

不同学者根据 TiO_2 的含量及 Ti/Y 值来划分高钛与低钛玄武岩, 认为 TiO_2 含量高于 2.5%, Ti/Y 值大于 500 为高钛玄武岩; 反之则为低钛玄武岩(Xu et al., 2001; 张招崇, 2009)。雷波地区峨眉山玄武岩中 TiO_2 的含量 (3.63%~4.34%) 均大于 2.5%, Ti/Y (499.91~577.60) 除样品 LB-1HX 的 Ti/Y 小于 500 外, 其余均大于 500, 所以所采样品属高钛玄武岩。

由玄武岩 TAS 图解(图 4)可以看出所采玄武岩样品主要集中在玄武岩区域, 少数分布在粗面玄武岩、玄武安山岩、玄武质粗面安山岩区域。样品主要集中在 Ir-Irvine 分界线两侧, 以亚碱性居多, 但因蚀变过程中 K、Na 元素较为活泼, TAS 进行的碱性划分可能会产生差别(李献华等, 1997)。

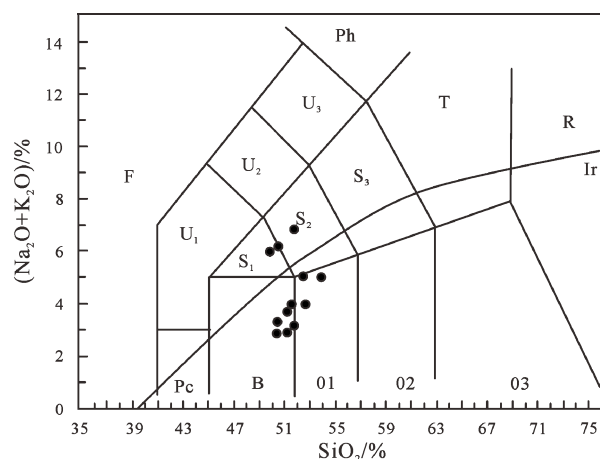
久野提出了用于确定玄武岩浆分异程度的固结指数(SI), $\text{SI}=100 \times \text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (邱家骧, 1985), 经计算雷波玄武岩样品的 SI 范围为 13~22。大多数岩石玄武岩浆的固结指数(SI)为 40 左右或更大, 但当发生结晶分异时, 固结指数(SI)会迅速减小, 且固结指数越低, 说明分离结晶程度越高, 分异越好(邱家骧, 1985)。这表明雷波玄武岩岩浆经历了一定的分离结晶作用。

2.2 微量元素特征

微量元素又称为痕量元素, 一般在岩石或矿物中的含量在 1%或 0.1%以下, 虽然其含量较小, 但对微量元素与主量元素之间的组合关系特征的研究已成为地球化学研究的重要组成部分。目前, 微量元素作为地球化学的“指示剂”已经备受重视(图 5)。

这里所要讨论的微量元素是指狭义上的微量元素, 即除同位素与稀土元素之外的相容元素和不

相容元素。有些元素在结晶过程中易进入结晶相, 例如 Ni、Co 易进入橄榄石, V 易进入磁铁矿, Cr 易进入尖晶石, Yb 易进入石榴石, Eu 易进入斜长石等, 这些元素被称为相容元素。而有些元素喜欢液相或气相, 则被称为不相容元素, 如 Nb、Rb、Zr、Ba、Re、Th、U、Hf 等(涂光炽, 1984; 李昌年, 1992)。应该注意的是这种划分是相对而言的, 在有些情况下不相容元素 also 具有很高的相容性。



Ir—Irvine 分界线, 上方为碱性, 下方为亚碱性;
Pc—苦橄玄武岩; B—玄武岩; 01—玄武安山岩; 02—安山岩;
03—英安岩; R—流纹岩; S₁—粗面玄武岩;
S₂—玄武质粗面安山岩; S₃—粗面安山岩;
T—粗面岩、粗面英安岩; F—副长石岩; U₁—碱玄岩、碧玄岩;
U₂—响岩质碱玄岩; U₃—碱玄质响岩; Ph—响岩。
Ir—Irvine line, the top is alkaline and the bottom is sub-alkaline;
Pc—picrite basalt; B—basalt; 01—basaltic andesite; 02—andesite;
03—dacite; R—rhyolite; S₁—coarse faced basalt; S₂—basaltic
coarse-faced andesite; S₃—coarse andesite; T—rhyolite, coarse faced
quartzite; F—deputy feldspar rock; U₁—tephrite, basanite;
U₂—phonolitic tephrite; U₃—alkali baltic phonolitic;
Ph—phonolitic.

图 4 雷波峨眉山玄武岩 TAS 图解
(底图据 LeBas et al., 1986)

Fig. 4 The TAS diagram of Emei Shan basalt in Leibo County (base map after LeBas et al., 1986)

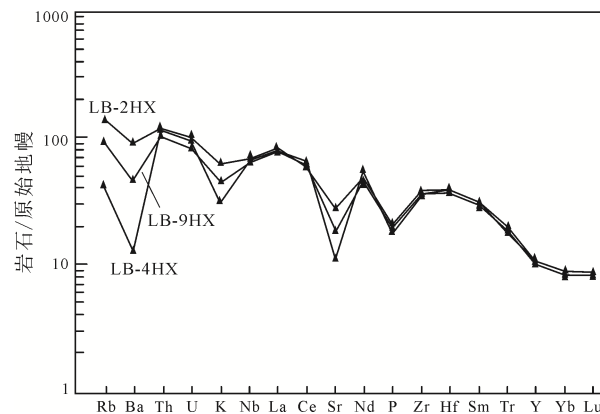


图 5 雷波峨眉山玄武岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(原始地幔值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 The primitive mantle-normalized spider web map of trace elements (primary mantle values after Sun and McDonough, 1989)

表 1 雷波峨眉山主量元素特征
Table 1 The major elements characteristics of Emei Shan basalt in Leibo area

样品编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	LOI	Na ₂ O+K ₂ O	Mg [#]
LB-1HX	50.85	13.31	3.51	9.10	7.18	3.94	1.88	3.00	3.63	0.41	0.17	1.82	4.88	0.36
LB-2HX	51.17	13.55	3.17	8.70	8.78	3.91	1.69	2.15	3.67	0.41	0.16	1.52	3.84	0.38
LB-3HX	49.71	13.29	3.96	9.48	8.61	4.27	1.62	1.98	3.65	0.39	0.17	1.68	3.60	0.37
LB-4HX	47.94	14.11	4.93	8.63	6.00	4.16	0.93	4.81	4.02	0.45	0.17	2.79	5.74	0.36
LB-5HX	50.18	12.72	3.66	9.70	8.96	4.26	1.18	1.87	4.04	0.40	0.18	1.57	3.05	0.37
LB-6HX	49.94	12.66	3.61	9.54	8.37	4.38	1.45	2.39	4.03	0.40	0.18	1.84	3.84	0.38
LB-7HX	50.62	13.92	7.72	5.10	6.43	2.95	1.46	5.20	3.75	0.39	0.11	1.65	6.66	0.30
LB-8HX	48.50	14.20	4.04	9.22	5.54	4.18	2.19	3.77	4.01	0.38	0.18	2.68	5.96	0.37
LB-9HX	48.82	12.90	3.60	10.25	9.12	4.60	0.96	1.79	4.34	0.42	0.18	1.50	2.75	0.38
LB-10HX	52.14	11.78	4.21	8.63	5.97	4.39	1.01	3.82	4.25	0.40	0.23	2.13	4.83	0.39
LB-11HX	49.14	12.90	2.71	11.23	8.71	4.65	1.20	2.02	4.17	0.48	0.18	1.21	3.22	0.38
LB-12HX	49.60	12.72	2.55	11.26	8.82	4.63	0.91	1.90	4.09	0.46	0.18	1.47	2.81	0.38
最大值	52.14	14.20	7.72	11.26	9.12	4.65	2.19	5.20	4.34	0.48	0.23	—	6.66	0.39
最小值	47.94	11.78	2.55	5.10	5.54	2.95	0.91	1.79	3.63	0.38	0.11	—	2.75	0.30
平均值	49.88	13.17	3.97	9.24	7.71	4.19	1.37	2.89	3.97	0.42	0.17	—	4.27	—

注: 表中元素含量单位为%, $Mg^{\#} = Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+})$, “—”表示未计算。

表 2 雷波峨眉山玄武岩微量元素含量
Table 2 The trace element content of Emei Shan basalt in Leibo area

样品编号	Cr	Ni	Co	V	Eu	Rb	Ba	Th	U	K	Nb	La	Ce	Sr	Nd	P	Zr	Hf	Sm	Ti	Y	Yb	Lu	Tb	Zn
LB-1HX	38.7	37.2	40.5	376	3.57	86.5	613.0	10.10	2.11	15 607	45.1	61.6	107.0	640	66.7	1 789	373	11.7	13.1	21 756	46.0	4.25	0.64	1.89	118.0
LB-2HX	48.2	43.1	37.7	371	3.46	58.7	501.0	9.48	2.01	14 030	42.6	58.8	103.0	552	63.7	1 789	360	11.1	12.7	21 996	44.0	4.08	0.61	1.81	112.0
LB-3HX	42.8	44.7	40.6	374	3.42	57.6	481.0	9.45	1.92	13 448	43.2	57.4	101.0	481	62.5	1 702	387	11.0	12.5	21 876	43.5	3.99	0.61	1.78	120.0
LB-4HX	42.6	53.8	46.0	398	2.72	26.4	86.3	9.94	1.94	7 720	46.6	52.9	110.0	230	70.3	1 964	403	11.9	14.1	24 094	45.3	4.14	0.63	1.95	135.0
LB-5HX	27.6	43.6	40.8	424	3.66	36.4	378.0	7.27	1.64	9 796	41.8	51.6	93.6	452	60.2	1 746	397	10.9	12.6	24 214	46.0	4.08	0.62	1.88	126.0
LB-6HX	29.3	44.1	41.9	427	3.66	54.4	499.0	7.10	1.63	12 037	41.7	49.5	93.8	484	60.6	1 746	414	11.1	12.6	24 154	46.4	4.15	0.63	1.89	120.0
LB-7HX	63.2	38.7	32.4	357	3.72	43.3	133.0	10.20	1.53	12 120	44.7	59.0	101.0	521	64.4	1 702	349	12.2	12.9	22 476	44.1	3.95	0.60	1.84	82.4
LB-8HX	39.1	45.4	43.8	425	3.72	63.2	229.0	7.10	1.57	18 180	41.7	76.3	124.0	173	70.3	1 658	329	10.5	13.0	24 034	42.1	3.73	0.56	1.86	137.0
LB-9HX	49.8	59.2	44.8	425	3.79	30.8	318.0	7.14	1.62	7 969	45.4	54.4	98.1	461	63.0	1 833	416	11.4	13.2	26 012	47.6	4.14	0.62	1.96	139.0
LB-10HX	44.0	55.3	40.9	420	3.08	28.3	115.0	6.49	1.40	8 385	44.1	38.1	97.8	164	53.8	1 746	336	10.9	12.1	25 472	44.1	3.82	0.57	1.84	131.0
LB-11HX	37.5	53.2	44.2	426	3.90	42.2	497.0	7.83	1.81	9 962	51.7	59.8	107.0	559	67.1	2 095	415	11.7	13.6	24 993	49.6	4.38	0.66	2.01	150.0
LB-12HX	38.2	51.3	43.5	411	3.74	28.8	387.0	7.82	1.75	7 554	49.2	57.4	103.0	501	64.9	2 007	427	11.2	13.1	24 513	47.5	4.25	0.63	1.91	124.0

注: 表中元素含量单位为 10^{-6} 。

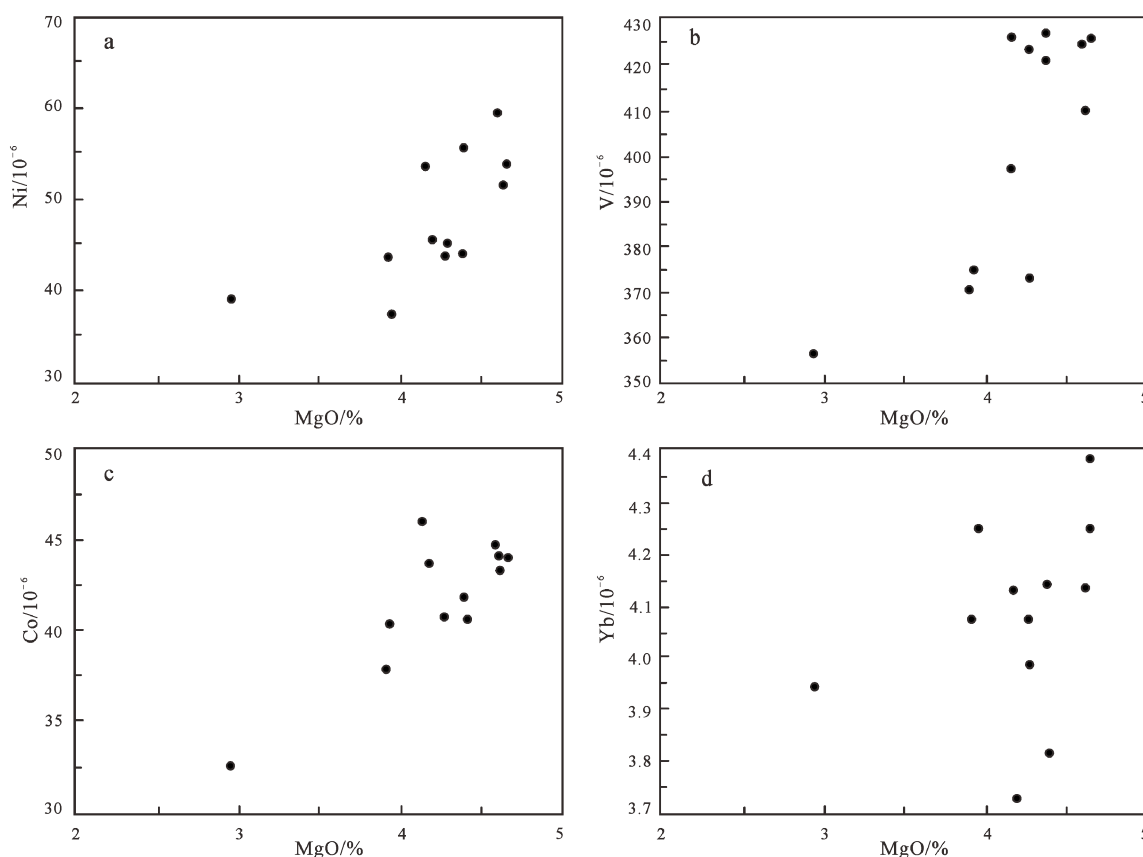


图 6 雷波峨眉山玄武岩 MgO 与相容元素关系图

Fig. 6 The relationship diagram of Emei Shan basalt between MgO and compatible element in Leibo area

2.2.1 相容元素

从表 2 中可看出, 雷波峨眉山玄武岩中的相容元素 Cr: $27.6 \times 10^{-6} \sim 63.2 \times 10^{-6}$, Ni: $37.2 \times 10^{-6} \sim 59.2 \times 10^{-6}$, Co: $32.4 \times 10^{-6} \sim 46.0 \times 10^{-6}$, V: $357 \times 10^{-6} \sim 427 \times 10^{-6}$, Eu: $2.72 \times 10^{-6} \sim 3.90 \times 10^{-6}$, 各相容元素变化范围较小。

从图 6 中可以直观地了解相容元素同 MgO 的线性变化关系, 其中相容元素 Ni、V、Co、Yb 与 MgO 呈正相关性, Yb 与 MgO 的相关性较弱。因 Ni、Co 易进入橄榄石, V 易进入磁铁矿, Yb 易进入石榴石, 正是因为这些矿物在不同阶段的熔融, 使得相容元素在玄武岩中发生了变化。这也表明雷波峨眉山玄武岩可能发生了橄榄石分离结晶作用, 也可能发生了磁铁矿与石榴石的分离结晶作用, 这也与前面固结指数(SI)较小相互印证。

2.2.2 不相容元素

在图 5 微量元素蛛网图中可以看出雷波地区玄武岩化学特征相似, 岩石中主要富集 Th、U、Nb、La、Nd、Zr、Hf 等高场强元素, Y 略有亏损, 这表明岩浆起源于富集地幔。

样品中 Sr、K 和 P 存在明显异常(图 5), 且 Sr 与 K 高含量与低含量之间相差较大(表 2)。K 的亏损预示着源区缺乏金云母和角闪石; P 的亏损指示了源区磷灰石的结晶分异; Sr 变现为亏损, 再结合

稀土元素中 Eu 的负异常(δEu 小于 0.95)说明发生了斜长石的分离结晶, 在样品采集地出现的大量斜长石斑晶, 也印证了这一观点(孙晓旭, 2013)。

通过 Zr/TiO₂-Nb/Y 图解(图 7), 所有的玄武岩样品均投点在碱性玄武岩内, 这与主量元素 TAS 图解有所出入, 但高场强元素 Zr、Nb 要比 K、Na 的稳定性强, 所以对玄武岩碱性的划分 Zr/TiO₂-Nb/Y 图解更为可靠。即雷波玄武岩样品以碱性玄武岩为主。

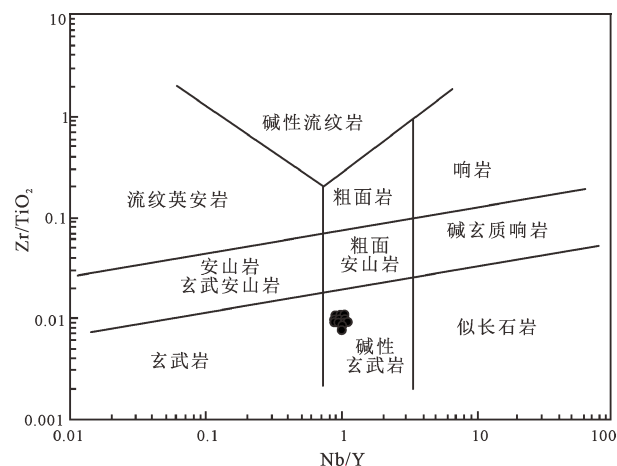


图 7 雷波峨眉山玄武岩 Zr/TiO₂-Nb/Y 图解
(底图据 Winchester and Floyd, 1977)

Fig. 7 The relationship of Emei Shan basalt between Zr/TiO₂ and Nb/Y in Leibo area
(base map after Winchester and Floyd, 1977)

表 3 雷波峨眉山玄武岩不相容元素比值特征

Table 3 The incompatible elements ratio characteristics of Emei Shan basalt in Leibo area

	原始地幔	N-MORB	大陆地壳	GLOSS	HIMU OIB	EM-1 OIB	EM-2 OIB	雷波玄武岩	雷波玄武岩平均值
Zr/Nb	14.80	30.00	16.20	14.54	3.20~5.00	5.00~13.10	4.40~7.80	7.62~9.93	8.58
La/Nb	0.94	1.07	2.20	3.20	0.66~0.77	0.78~1.32	0.79~1.19	0.86~1.83	1.26
Ba/Nb	9.00	4.30	54.00	86.80	4.90~5.90	9.10~23.40	6.40~11.30	1.85~13.59	7.91
Th/Nb	0.12	0.07	0.44	0.77	0.08~0.10	0.09~0.13	0.11~0.17	0.15~0.23	0.19
Rb/Nb	0.91	0.36	4.70	6.40	0.35~0.38	0.69~1.41	0.58~0.87	0.57~1.92	1.05
Ba/Th	77.0	60.0	124.0	112.0	63.0~77.0	80.0~204.0	57.0~105.0	8.7~70.3	43.0
Ba/La	9.60	4.00	25.00	26.90	6.80~8.70	11.20~19.10	7.30~13.50	1.63~10.08	6.26
Th/La	0.13	0.07	0.20	0.24	0.11~0.13	0.09~0.15	0.11~0.18	0.09~0.19	0.15

注: 原始地幔、N-MORB、大陆地壳、HIMU OIB、EM-1 OIB、EM-2 OIB 元素比值来自 Weaver(1991); GLOSS(全球俯冲沉积物)元素比值来自 Plank and Langmuir(1998)。

因大离子亲石元素和稀土元素具有相似的地球化学特性, 其比值反映的信息有限, 而高场强元素在地幔过程中能发生强烈的分馏, 更能反应板内洋岛玄武岩(OIB)的源区信息(严再飞等, 2006)。雷波玄武岩中, La/Nb、Ba/Nb、Th/Nb 等具备 OIB 特征(表 3), 这些特征表明雷波峨眉山玄武岩物源区与 OIB 源区相同。这种 OIB 特征反映了雷波地区峨眉山玄武岩与地幔柱活动有密切联系(侯增谦等, 1996; 宋谢炎等, 2002; 张正伟等, 2004)。

雷波玄武岩样品的 Nb/U 范围为 21.19~31.50, 与大陆地壳值 Nb/U=8 相差较大, La/Nb 范围为 0.86~1.83, 而典型的大陆地壳 La/Nb>12, Rb/Sr 主要集中在 0.06~0.17, 不同于地壳值(上地壳 0.32; 下地壳 0.023), 而 Zr/Hf 范围为 28.61~38.13, 与原始地幔值 Zr/Hf=36.25 相符(Rudnick and Fountain, 1995; 段其发等, 2010; 龚婷婷, 2013)。由此也可以说明雷波玄武岩与地幔柱活动有密切联系, 且受大陆地壳物质影响较弱。

根据 Ba/Yb-Ti/(Yb×10⁴)图解(图 8)可以看出雷波玄武岩样品主要集中在富集地幔源区域, 而离地壳混染较远。

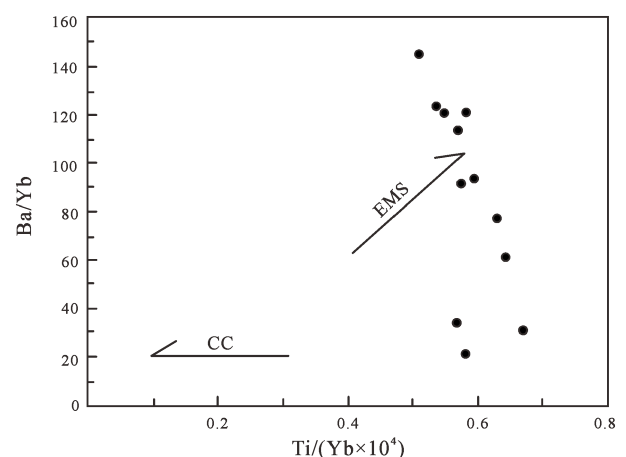
结合上述地球化学证据, 可以说明雷波玄武岩与地幔柱的活动有密切关系, 岩浆的适度演化主要为源区混染, 而地壳混染较弱。

2.3 稀土元素特征

稀土元素是指镧系元素与钇元素, 为典型的亲石元素。它们有相似的物理、化学性质, 在低级变质作用、热液蚀变及风化过程中活动性较差, 因此其含量、分馏及配分模式可以直接反应岩石的成因与源区特征(孙晓旭, 2013)。对雷波玄武岩稀土元素进行球粒陨石标准化处理并绘制配分图(图 9)。

稀土元素之间的化学性质也略有差异, 根据化学性质的差异将其分为重稀土元素与轻稀土元素,

其中重稀土元素在判定岩浆岩的源区性质与岩浆演化方面具有重要意义。在图 9 中, 轻稀土与重稀土



CC—地壳混染; EMS—富集地幔源。

CC—crustal contamination; EMS—enriched mantle source.

图 8 雷波峨眉山玄武岩 Ba/Yb-Ti/(Yb×10⁴)图解 (底图据 Deniel, 1998)

Fig. 8 The relationship of Emei Shan basalt between Ba/Yb and Ti/(Yb×10⁴) in Leibo area (base map after Deniel, 1998)

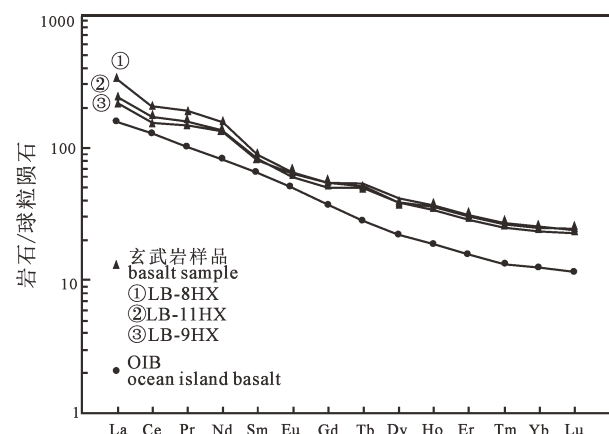


图 9 雷波峨眉山玄武岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(球粒陨石值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns of Emei Shan basalt (chondrite values after Sun and McDonough, 1989)

表 4 雷波峨眉山玄武岩稀土元素特征表
Table 4 The REE characteristics of Emei Shan basalt in Leibo area

样品编号	LB-1HX	LB-2HX	LB-3HX	LB-4HX	LB-5HX	LB-6HX	LB-7HX	LB-8HX	LB-9HX	LB-10HX	LB-11HX	LB-12HX
Ce	107.00	103.00	101.00	110.00	93.60	93.80	101.00	124.00	98.10	97.80	107.00	103.00
Pr	16.60	15.70	15.60	17.30	14.40	14.40	15.70	18.00	15.20	12.50	16.30	15.80
Nd	66.70	63.70	62.50	70.30	60.20	60.60	64.40	70.30	63.00	53.80	67.10	64.90
Sm	13.10	12.70	12.50	14.10	12.60	12.60	12.90	13.00	13.20	12.10	13.60	13.10
Eu	3.57	3.46	3.42	2.72	3.66	3.66	3.72	3.72	3.79	3.08	3.90	3.74
Gd	11.00	10.50	10.30	11.30	10.50	10.70	10.70	11.20	11.00	10.10	11.40	11.00
Tb	1.89	1.81	1.78	1.95	1.88	1.89	1.84	1.86	1.96	1.84	2.01	1.91
Dy	9.69	9.26	9.14	9.81	9.74	9.90	9.41	9.31	10.20	9.61	10.40	9.94
Ho	1.98	1.88	1.86	1.98	1.98	2.01	1.90	1.84	2.06	1.91	2.11	2.04
Er	4.98	4.76	4.68	4.96	4.92	4.99	4.70	4.56	5.06	4.69	5.24	5.04
Tm	0.68	0.64	0.63	0.66	0.66	0.66	0.62	0.60	0.66	0.61	0.70	0.67
Yb	4.25	4.08	3.99	4.14	4.08	4.15	3.95	3.73	4.14	3.82	4.38	4.25
Lu	0.64	0.61	0.61	0.63	0.62	0.63	0.60	0.56	0.62	0.57	0.66	0.63
Y	46.00	44.00	43.50	45.30	46.00	46.40	44.10	42.10	47.60	44.10	49.60	47.50
ΣREE	303.68	290.90	285.41	302.75	270.44	269.49	290.44	338.98	283.39	250.53	304.60	293.42
LREE	268.57	257.36	252.42	267.32	236.06	234.56	256.72	305.32	247.69	217.38	267.70	257.94
HREE	35.11	33.54	32.99	35.43	34.38	34.93	33.72	33.66	35.70	33.15	36.90	35.48
LREE/HREE	7.65	7.67	7.65	7.55	6.87	6.72	7.61	9.07	6.94	6.56	7.25	7.27
La _N /Yb _N	10.40	10.34	10.32	9.17	9.07	8.56	10.71	14.67	9.43	7.15	9.79	9.69
δEu	0.88	0.89	0.89	0.64	0.95	0.94	0.94	0.92	0.93	0.83	0.93	0.93
δCe	0.80	0.81	0.81	0.89	0.83	0.85	0.80	0.79	0.82	1.09	0.82	0.82
Ce/Yb	25.18	25.25	25.31	26.57	22.94	22.60	25.57	33.24	23.70	25.60	24.43	24.24

配分曲线斜率总体一致，暗示它们可能来源于同一源区，并经历了类似的岩浆演化(龚婷婷, 2013; Rollinson, 2014)。稀土元素配分图为右倾模式，表明该区玄武岩总体属于板内玄武岩(王涛等, 2013)。

由表 4 可知，轻稀土元素与重稀土元素比值范围为 6.56~9.07，相对富集轻稀土而亏损重稀土。δEu 在 0.64~0.95 之间，显示为负异常(δEu>1.05 为正异常，δEu<0.95 为负异常)，并在图 7 中部分样品中 Eu 偏离曲线并有明显下降，Eu 主要受长石矿物控制，斜长石影响最大，Eu 表现为负异常，可能是斜长石分离结晶造成的，这与微量元素蛛网图(图 5)中 Sr 出现亏损相互印证，可以说明发生了斜长石的分离结晶。Ce 与 Pb 能较好的传递岩浆过程的信息，雷波玄武岩 Ce/Yb 的范围为 22.60~33.24，比值较大，再结合图 6d 中 Yb 与 MgO 呈正相关性，可以说明该区有以石榴石为主的残留相，玄武岩的形成深度较大，可能为大于 80 km 的石榴石稳定区(肖龙等, 2003a; 孙晓旭, 2013)。

2.4 玄武岩的形成环境

在稀土元素配分图中(图 9)，各样品曲线基本相同且相对集中，这种特征与板内汇聚边缘玄武岩不同。配分图呈现出右倾模式，稀土元素从 La 到 Lu 含量逐递减小，这与板拉张环境特征相符(龚婷婷, 2013; 王涛等, 2013)。轻稀土元素相对富集，重稀土元素相对亏损，这种特征排除了雷波玄武岩是俯冲洋壳中 N-MORB 的可能，因为在俯冲洋壳中

N-MORB 的轻稀土元素相对重稀土元素出现明显亏损(朱士飞等, 2008)。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 5)也符合板内玄武岩所特有的大隆起型曲线特征(朱士飞等, 2008)。因高场强元素相对稳定，通过 2Nb-Zr/4-Y 图解(图 10)及 Zr/Y-Zr 图解(图 11)发现所有玄武岩样品均处于板内玄武岩区域内，进一步说明了雷波峨眉山玄武岩是在板内拉张的构造背景下形成的。

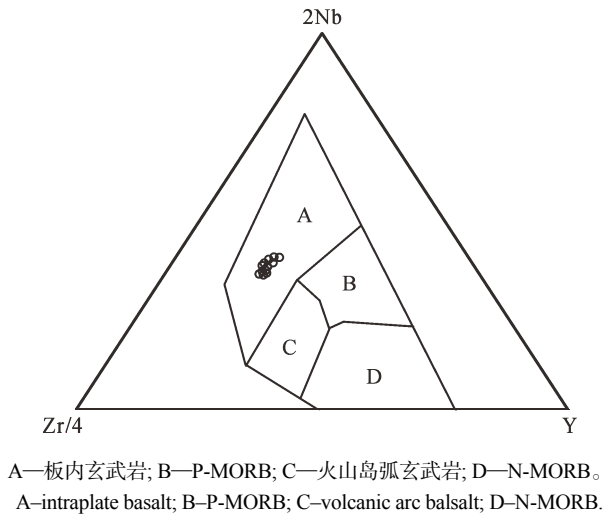


图 10 玄武岩 2Nb-Zr/4-Y 判别图
(底图据 Meschede, 1986)
Fig. 10 The 2Nb-Zr/4-Y discriminant diagram of Emei Shan basalt in Leibo area (base map after Meschede, 1986)

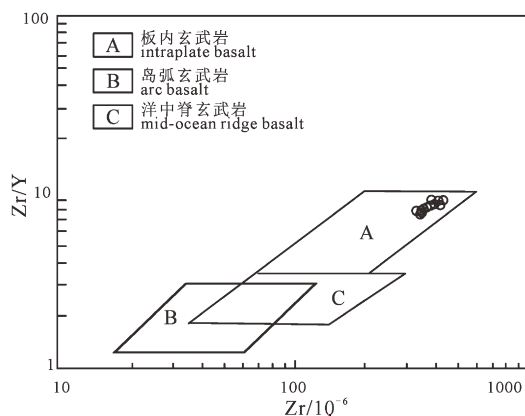


图 11 雷波玄武岩 Zr/Y-Zr 判别图

(底图据 Pearce, 1982)

Fig. 11 The Zr/Y-Zr discriminant diagram of Emei Shan basalt in Leibo area (base map after Pearce, 1982)

3 讨论与结论

中上扬子地区构造及盆地的演化与华南大地构造的演化有着密切的关系。已有的研究表明, 华南加里东造山带的形成结束了扬子与华夏陆块相互作用、相互影响的漫长历史, 形成了统一的华南海板块, 并进入板内活动构造阶段(刘宝珺等, 1993)。板内活动以大陆裂谷作用为主, 扬子陆块南缘发育的裂谷有右江—南盘江裂谷带和康滇裂谷带, 北缘主要有梁平—开江裂谷带和鄂西裂谷带, 其中南缘的裂谷活动开启时间较早, 主要为泥盆—石炭纪, 二叠纪继承性发展, 研究区主要受其影响; 北缘较晚, 主要为晚二叠世, 但它们都是古特提斯裂谷系的重要组成部分。

研究表明, 峨眉山玄武岩是地幔柱作用和古特提斯裂谷作用的重要产物和典型代表(张云湘等,

1988; 宋谢炎等, 2002; 李宏博, 2012)。由于地幔柱头的上涌会使地表在几百万年之内发生千米级的隆升, 如果地幔柱发生在一个浅海相的沉积盆地环境, 上覆地层会因抬升而遭受差异剥蚀和玄武岩的差异喷发(李宏博, 2012)以及裂谷盆地的形成。中上扬子地区, 海相茅口组碳酸盐岩残余厚度差异较大, 并与峨眉山玄武岩呈平行不整合和火山喷溢不整合接触, 反映了地幔柱隆升作用的深刻影响。这一中、晚二叠世之间的剥蚀事件, 涉及中国南方的大部分省市, 是一次强烈的区域性差异整体抬升运动, 早在 1931 年李四光命称之为东吴运动(何斌等, 2005)。伴随着东吴运动, 有强烈的拉张和火山喷发, 影响到中上扬子许多地区, 与古特提斯洋打开有着密切的关系, 罗志立(1989)称之为峨嵋地裂运动。这一运动在康滇地区形成了著名的攀西裂谷(张云湘等, 1988), 有着强烈的玄武岩喷发, 其喷发时间大致在 259 Ma(侯增谦等, 2006), 喷发时限约为 1 Ma(宋谢炎等, 2002)。在如此短的时间内形成如此巨量的玄武岩及同源基性-超基性侵入岩, 如果没有来源于深部的地幔热柱提供充足热源, 仅靠岩石圈减压熔融是不可能的。

雷波地区位于康滇古陆东缘, 其玄武岩的喷发与康滇裂谷带有着密切的关系。已有的研究表明, 峨眉山大火成岩省大致可分为内、中、外三个带(图 12)。西部的云南宾川玄武岩厚度达 5 000 m 以上; 中部厚度在 1 000 m 以上; 东部玄武岩厚度普遍小于 1 000 m, 在贵州盘县一带厚度只有 200~500 m, 随后向东呈舌状尖灭, 在贵州东部的都匀—瓮安一线仅有几十米厚(肖龙等, 2003b; He et al., 2006; 李宏博, 2012)。雷波地区玄武岩厚 729.15 m, 大致位于峨眉山

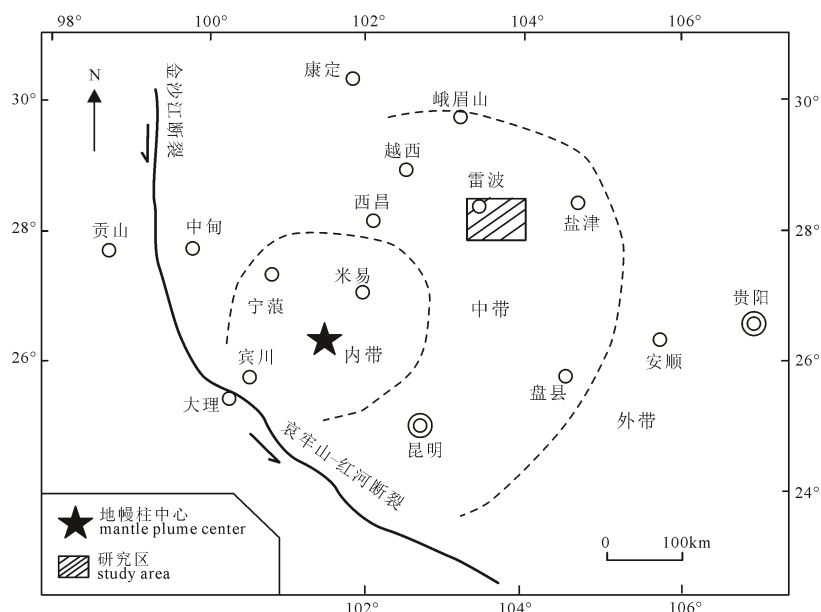


图 12 峨眉山大火成岩省分布图(据李宏博, 2012 修改)

Fig. 12 The distribution of Emei Shan igneous rock province (modified after LI, 2012)

大火成岩省中带。在区域上,沿康滇地区及周缘自西往东的金河—程海断裂、安宁河断裂、小江断裂等岩石圈深大断裂形成一系列的喷发中心,峨眉山玄武岩厚度以上述断裂带为中心向西由近及远逐渐减薄。根据云南省区域地质志(云南省地质矿产局,1982),小江断裂带峨眉山玄武岩厚度在2 000 m,而往东进入本文四川雷波地区,厚700 m左右,再往东进入云南盐津地区,本次工作所测剖面控制厚度为344.6 m,在小江断裂并有爆发相火山集块岩存在;根据李宏博等(2012)的研究,康滇古陆以西大致沿木里—丽江—大理一线为茅口组剥蚀的相对凹陷区,玄武岩厚度巨大,在宾川厚度可达5 000 m,显示出极大的岩浆产率,有苦橄岩和橄榄玄武岩出露,并见海相枕状玄武岩及直接指示地幔柱存在的巨型放射状岩墙群。苦橄岩和橄榄玄武岩具有高温、高镁特征,接近原始岩浆成分,因此,地幔柱的柱部位置被认为在米易—永仁一带。而在雷波地区仅有喷溢-溢流相喷发,发育柱状节理、含斜长石斑晶斑状玄武岩、火山气孔、杏仁状玄武岩、玛瑙等,为典型的陆相喷发,玄武岩经历结晶分异作用。本文玄武岩微量元素图解(图5)表明,雷波地区峨眉山玄武岩具高钛特征。高钛玄武岩主要来自大陆岩石圈地幔或者地幔柱熔体被大量岩石圈混染(Xu et al., 2007)。由此可见,由西向东,玄武岩的喷发呈现海相-陆相,由基本未分异的苦橄岩到雷波地区具分异和混染的玄武岩,由爆发相玄武岩到宁静的喷溢-溢流相玄武岩等一系列明显的变化。总结雷波地区峨眉山玄武岩,主要有以下认识:

(1)岩石类型主要为致密块状玄武岩、斑状玄武岩、杏仁状玄武岩,发育柱状节理,为典型陆相喷发玄武岩,无爆发角砾岩相,为喷溢-溢流相;

(2)可靠的微量元素图解表明,岩石化学分类为碱性玄武岩,具高钛特征;

(3)岩石地球化学特征表明,雷波地区峨眉山玄武岩经历了相似的岩浆演化,岩浆为板内拉张玄武岩,其形成深度较大,起源于富集地幔源,是地幔柱作用的产物,并经历了结晶分异作用;

(4)雷波地区峨眉山玄武岩是晚古生代裂谷盆地拉张构造背景下的产物,与地幔柱的作用有着密切的关系,应属攀西裂谷的范畴。其岩性、岩相特征反映出,无爆发角砾岩相,距强烈喷发中心尚有一定的距离,可能属攀西裂谷的边缘相带。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. DD20160019-19 and DD20190080).

参考文献:

- 段其发,王建雄,白云山,牛志军,何龙清,姚华舟,寇晓虎,张克信. 2010. 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, 29(2): 125-138.
- 龚婷婷. 2013. 香格里拉县九龙地区峨眉山玄武岩特征及成因[M]. 成都: 成都理工大学出版社.
- 何斌,徐义刚,王雅玫,肖龙. 2005. 东吴运动性质的厘定及其时空演变规律[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 30(1): 89-95.
- 侯增谦,陈文,卢记仁. 2006. 四川峨眉山大火成岩省259 Ma大陆溢流玄武岩喷发事件: 来自激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年证据[J]. 地质学报, (8): 1130.
- 侯增谦,卢记仁,李红阳,王登红,吕庆田. 1996. 中国西南特提斯构造演化-幔柱构造控制[J]. 地球学报, 17(4): 439-453.
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 李宏博. 2012. 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[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 李献华,胡瑞忠,饶冰. 1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学[J]. 地球化学, 26(2): 14-31.
- 林伍德 A E. 1981. 地幔的成分与岩石学[M]. 杨美娥,何永年,胥怀济,施良骥,译. 北京: 地震出版社.
- 刘宝珺,许效松,潘杏南,黄慧琼,徐强. 1993. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社.
- 罗志立. 1989. 峨眉山地裂运动的厘定及其意义[J]. 四川地质学报, 9(1): 1-17.
- 邱家骧. 1985. 岩浆岩石学[M]. 北京: 地质出版社.
- 宋谢炎,侯增谦,汪云亮,张成江,曹志敏,李佑国. 2002. 峨眉山玄武岩的地幔柱成因[J]. 矿物岩石, 22(4): 27-32.
- 孙晓旭. 2013. 四川盐源地区峨眉山玄武岩岩石学及地球化学特征研究[M]. 成都: 成都理工大学出版社.
- 涂光炽. 1984. 地球化学[M]. 上海: 上海科学技术出版社.
- 王涛,邓江红,肖渊甫,吕劲松,王明国. 2013. 香格里拉九龙二叠系峨眉山玄武岩的岩石成因研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 32(2): 269-278.
- 肖龙,徐义刚,何斌. 2003a. 峨眉山幔柱—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, 9(2): 207-217.
- 肖龙,徐义刚,梅厚钧,沙绍礼. 2003b. 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, 38(4): 478-494.
- 严再飞,黄志龙,许成,温春齐,张振亮. 2006. 峨眉山二滩玄武岩地球化学特征[J]. 矿物岩石, 26(3): 77-84.
- 云南省地质矿产局. 1982. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 张春生,李佑国,孙晓旭. 2016. 四川省越西地区峨眉山玄武岩岩石学特征[J]. 四川有色金属, (1): 50-53.

- 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜. 1988. 攀西裂谷[M]. 北京: 地质出版社: 141.
- 张招崇. 2009. 关于峨眉山大火成岩省一些重要问题的讨论[J]. 中国地质, 36(3): 634-646.
- 张正伟, 程占东, 朱炳泉, 张乾, 朱笑青, 胡耀国. 2004. 峨眉山玄武岩组铜矿化与层位关系研究[J]. 地球学报, 25(5): 503-508.
- 朱士飞, 秦勇, 钱壮志, 高艳青. 2008. 云南省丽江-宾川地区二叠纪玄武岩地球化学特征及其构造背景研究[J]. 矿物岩石, 28(1): 64-71.

References:

- DENIEL C. 1998. Geochemical and isotopic (Sr, Nd, Pb) evidence for plume-lithosphere interactions in the genesis of Grande Comore magmas (Indian Ocean)[J]. Chemical Geology, 144: 281-303.
- DUAN Qi-fa, WANG Jian-xiong, BAI Yun-shan, NIU Zhi-jun, HE Long-qing, YAO Hua-zhou, KOU Xiao-hu, ZHANG Ke-xin. 2010. Geochemistry and mantle source characteristics of Permian basalts in Moyun area, eastern Tanggula Range[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(2): 125-138(in Chinese with English abstract).
- GONG Ting-ting. 2013. Characteristics and genesis of Emeishan basalt in jiulong district, shangri-la county[M]. Chengdu: Chengdu University of Technology Press(in Chinese).
- HE B, XU Y G, WANG Y M, LUO Z Y. 2006. Sedimentation and lithofacies paleogeography of in southwestern China before and after the Emeishan flood volcanism: New insights into surface response to mantle plume activity[J]. Journal of Geology, 114(1): 117-132.
- HE Bin, XU Yi-gang, WANG Ya-mei, XIAO Long. 2005. Nature of the Dongwu Movement and its Temporal and Spatial Evolution[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 30(1): 89-95(in Chinese with English abstract).
- HOU Zeng-qian, CHEN Wen, LU Ji-ren. 2006. The eruption event of 259 Ma continental overflow basalt in Emei igneous province of Sichuan province: Dating evidence from laser $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ [J]. Acta Geologica Sinica, (8): 1130(in Chinese).
- HOU Zeng-qian, LU Ji-ren, LI Hong-yang, WANG Deng-hong, LÜ Qing-tian. 1996. Tectonic Evolution of Tethys in Southwestern China: Is Controlled by Plume Tectonics[J]. Acta Geoscientia Sinica, 17(4): 439-453(in Chinese with English abstract).
- LEBAS M J, LEMAITRE R W, STREKEISEN A, ZANETTIN B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkalic-silica diagram[J]. Journal of Petrology, 27: 745-750.
- LI Chang-nian. 1992. Trace element petrology of igneous rocks[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- LI Hong-bo. 2012. Dynamics of mantle plume in emei igneous province: Basic dike group, Geochemistry and Sedimentary stratigraphic evidence[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- LI Xian-hua, HU Rui-zhong, RAO Bing. 1997. Geochronology and Geochemistry of Cretaceous Mafic Dikes From Northern Guangdong, SE China[J]. Geochimica, 26(2): 14-31(in Chinese with English abstract).
- LINWOOD A E. Translated by YANG Mei-e, HE Yong-nian, XU Huai-ji, SHI Liang-qi. 1981. The composition and petrology of the mantle[M]. Beijing: Earthquake Press(in Chinese).
- LIU Bao-jun, XU Xiao-song, PAN Xing-nan, HUANG Hui-qiong, XU Qiang. 1993. Sedimentary crustal evolution and mineralization of the ancient continent in southern China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- LUO Zhi-li. 1989. The determination and significance of Emei Taphrogenesis[J]. Sichuan Geological Journal, 9(1): 1-17(in Chinese with English abstract).
- MESCHÉDE M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. Chemical Geology, 56: 207-218.
- PEARCE J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries//Thorpe R S. Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks[M]. Wiley, Chichester, 525-548.
- PLANK T, LANGMUIR C H. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle[J]. Chemical Geology, 145: 325-394.
- QIU Jia-xiang. 1985. Magmatic petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ROLLINSON H R. 2014. Using Geochemical Data: evaluation, presentation, interpretation[M]. Abingdon Routledge.
- RUDNICK R L, FOUNTAIN D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective[J]. Review of Geophysics, 33(3): 267-309.
- SONG Xie-yan, HOU Zheng-qian, WANG Yun-liang, ZHANG Cheng-jiang, CAO Zhi-min, LI You-guo. 2002. The Mantle Plume Features of Emeishan Basalts[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 22(4): 27-32(in Chinese with English abstract).
- SUN S S, MCDONOUGH W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society London Special Publications, 42: 313-345.
- SUN Xiao-xu. 2013. Petrological and geochemical characteristics of

- emeishan basalt in Yanyuan area, Sichuan Province[M]. Chengdu: Chengdu University of Technology Press(in Chinese).
- TU Guang-zhi. 1984. The geochemistry[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press(in Chinese).
- WINCHESTER J A, FLOYD P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20: 325-343.
- WANG Tao, DENG Jiang-hong, XIAO Yuan-fu, LÜ Jin-song, WANG Ming-guo. 2013. Petrogenesis of Permian Emeishan basalts in Jiulong, Shangri-la[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32(2): 269-278(in Chinese with English abstract).
- WEAVER B L. 1991. The origin of ocean basalt end-member compositions trace element and isotopic constrains[J]. *Earth Planetary Science Letter*, 104: 81-397
- XIAO Long, XU Yi-gang, HE Bin. 2003. 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*, 9(2): 207-217(in Chinese with English abstract).
- XIAO Long, XU Yi-gang, MEI Hou-jun, SHA Shao-li. 2003. Geochemistry Of Emeishan Flood Basalts At Binchuan Area, SW China: Rock Types And Temporal Evolution[J]. *Chinese Journal of Geology*, 38(4): 478-494(in Chinese with English abstract).
- XU J F, SUZUKI K, XU Y G, MEI H J, LI J. 2007. Os, Pb, and Nd isotope geochemistry of the Permian Emeishan continental flood basalt: insights into the source of a large igneous province[J]. *Geochemical et Cosmochimica Acta*, 71: 2104-2119
- XU Y G, CHUNG Sun-Lin, JAHN Bor-ming. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China[J]. *Lithos*, 58: 145-168.
- YAN Zai-fei, HUANG Zhi-long, XU Cheng, WEN Chun-qi, ZHANG Zhen-liang. 2006. Geochemical Fature of Emeishan Basalts From Ertan Area[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 26(3): 77-84(in Chinese with English abstract).
- Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources. 1982. Regional geology of yunnan province[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHANG Chun-sheng, LI You-guo, SUN Xiao-xu. 2016. Yuexi Area Emeishan Basalt Rock Characteristics of Sichuan Province[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, (1): 50-53(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yun-xiang, LUO Yao-nan, YANG Chong-xi. 1988. Panxi rift[M]. Beijing: Geological Publishing House: 141(in Chinese).
- ZHANG Zhao-chong. 2009. A discussion on some important problems concerning the Mmeishan large igneous province[J]. *Geology in China*, 36(3): 634-646(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zheng-wei, CHENG Zhan-dong, ZHU Bing-quan, ZHANG Qian, ZHU Xiao-qing, HU Yao-guo. 2004. The Relationship between the Horizon of the Emeishan Basalts Formation and Copper Mineralization[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(5): 503-508(in Chinese with English abstract).
- ZHU Shi-fei, QIN Yong, QIAN Zhuang-zhi, GAO Yan-qing. 2008. The Geochemical Characteristics And Tectonic Setting of The Permian Basalts In The Binchuan-Lijiang Area in Yunnan Province[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(1): 64-71(in Chinese with English abstract).