

桂西德峨地区基性岩的岩石成因及地质意义

李兴鹏, 陈忠斌, 韦剑玮, 余树青, 刘武文, 陆干强

(广西第四地质队, 南宁 530033)

摘要: 桂西德峨地区广泛发育基性岩, 为查明区内基性岩的岩石学、岩石地球化学特征及形成时代, 探讨岩浆演化及其构造环境、岩浆活动与成矿关系。对德峨地区的基性岩进行了元素地球化学分析, 得出其具有较低的 SiO_2 (42.52% ~ 48.09%)、 $\text{Mg}^\#$ 值 (0.34 ~ 0.50)、Cr 和 Ni 含量 (分别为 21.77×10^{-6} ~ 202.2×10^{-6} 和 47.87×10^{-6} ~ 122×10^{-6}), 较高的 Fe_2O_3 (11.89% ~ 17.06%) 和 Al_2O_3 (14.39% ~ 17.04%) 含量, 暗示其为幔源岩浆演化的产物, 并且在上升的过程中遭受少量的地壳混染。结合其不相容元素比值 (如 La/Sm 和 Sm/Yb), 得出其岩浆起源于浅部地幔尖晶石橄榄岩相 5% ~ 10% 部分熔融。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年结果显示, 龙保山辉绿岩的谐和年龄为 259.9 ± 1.1 Ma, 小帽上辉绿岩的谐和年龄为 258.6 ± 2.3 Ma, 老山神玄武岩的谐和年龄为 261.0 ± 2.4 Ma。综合该地区的基性岩石的年代学、元素地球化学特征, 峨眉山大火成岩省的产出范围可能延伸到本区, 为重新界定峨眉山大火成岩省的分布范围提供新的直接资料。

关键词: 基性岩; 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学; 德峨地区; 峨眉山大火成岩省

中图分类号: P588.124

文献标志码: A

桂西德峨地区广泛发育基性岩, 一般沿断裂破碎带侵入, 局部沿层间裂隙。岩性单一, 主要是辉绿岩和玄武岩, 以浅层侵入相为主, 次为喷出相。前人曾对地层、构造、岩浆岩、矿产等方面开展了一些工作^[1-2], 但开展工作的时间都较早, 受当时工作手段和技术的限制, 测区基性岩的研究更多停留在野外观测和初步的岩相学和岩石地球化学研究, 均未作绝对年龄的测定, 部分学者在邻区百色、田阳、巴马、那坡地区对右江盆地基性岩作了地球化学和构造背景研究, 观点也不统一: 范蔚茗等^[3]认为百色、田阳地区发育的厚达几百米的基性岩, 与峨眉山高 Ti 玄武岩具有相似的元素-同位素地球化学特征, 有近一致的形成年龄, 其喷发时代大致限定在 254 ~ 256 Ma; 吴浩若等^[4]和王忠诚等^[5]认为是一套与深水沉积共生的早石炭世-早二叠世海相玄武岩, 形

成于大洋板内环境, 是特提斯东延的产物; 张旗等^[6]认为其形成与地幔柱作用关系密切; 近几年, 李政林等、陈雪峰等^[7-8]在那坡、凭祥地区发现陆内与岛弧基性岩一起出现, 反映其可能是峨眉山地幔柱与古特提斯相互作用的产物; 邓发亮等^[9]则认为隆林-西林地区辉绿岩可能是峨眉山大火成岩省外带岩浆作用的产物。本次在德峨地区分别对辉绿岩和玄武岩开展了精细年代学和地球化学特征研究, 可进一步确认该区的基性岩是峨眉山溢流玄武岩的重要组成部分, 扩展了峨眉山大火成岩省的产出范围, 为更好地理解峨眉山大火成岩省的时空分布提供了新的直接资料。

1 区域地质背景

峨眉山大火成岩省位于扬子克拉通的西部, 岩体主要分布于云南、贵州、四川, 少量分布于广

收稿日期: 2018-08-12

基金项目: 广西找矿突破战略行动地质矿产勘查项目(桂国土资函[2015]478号; 桂国土资函[2018]377号)

作者简介: 李兴鹏 (1983—), 硕士, 工程师, 研究方向: 基础地质和矿产调查, lixingpeng1007@qq.com。

引文格式: 李兴鹏, 陈忠斌, 韦剑玮, 等. 桂西德峨地区基性岩的岩石成因及地质意义 [J]. 桂林理工大学学报, 2019, 39 (2): 270-281.

西^[10-15]。扬子板块的基底主要是古元古代-中元古代会理群、同等时代的盐边群和昆阳群和新元古代的康定群杂岩体^[12]。峨眉山大火成岩省的岩性主要是拉斑质玄武岩、基性侵入岩墙及少量苦橄岩、流纹岩、粗面岩^[16]。

桂西德峨地区位于南盘江-右江成矿带西南部，地处古特提斯构造域和环太平洋构造域的复合部位，属南盘江-右江裂谷盆地的桂西北拗陷(图1a)。

1.1 地层

区内出露有寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系及第四系^[17]，其中以泥盆系、三叠系为主，其次为石炭系、二叠系，第四系零星分布。发育有盆地、斜坡、孤立台地相等多种沉积，沉积类型多样，岩性岩相复杂、变化快，生物种类繁多，形成多相并存、台盆(沟)交错的格局。

寒武系是本区出露的最老地层，主要出露于德峨镇及南部的老街村一带，属于德峨背斜和新街背斜的核部，岩性为灰色中-厚层状细晶白云岩，浅灰色、灰色中-厚层细砂质白云岩夹浅灰色薄-中层含钙质砂质白云岩，局部夹碎屑岩，厚度为540~914.7 m。

泥盆系主要出露于东北部德峨镇及南部新街

村一带，受古地理、古气候的影响，化石丰富，沉积类型丰富，既有滨岸相的碎屑岩沉积，也有滨海或局限、开阔台地相的泥灰岩、灰岩和白云岩沉积，也有盆地相的硅质岩、泥岩为主的沉积。

石炭系出露较为齐全，主要由一套浅海相的碳酸盐岩和碎屑岩沉积构成，与下伏泥盆系为整合接触。二叠系出露于德峨镇、猪场乡及小帽上一带，发育开阔台地相和斜坡-盆地相沉积，局部形成二叠纪礁灰岩。三叠系出露于猪场乡、张家寨一带，呈北西向展布，为盆地相的砂岩和泥岩组合。

1.2 构造

研究区褶皱、断裂发育，可划分为两个构造层，由寒武系组成的褶皱基底小面积出露，沉积盖层占绝大部分，出露上古生界泥盆系、石炭系、二叠系和中生界三叠系。盖层的构造变形特征主要是印支运动及燕山运动的产物。沉积盖层中断裂和褶皱较为发育，主体构造主要以近东西向为主，次为北西向及北东向，其中近东西向及北西向断裂线与褶皱轴线近平行，为同期形成的产物，且普遍为后期北东向断裂所切截。主要构造描述如下：

德峨背斜：分布于德峨镇一带，近东西向展布，

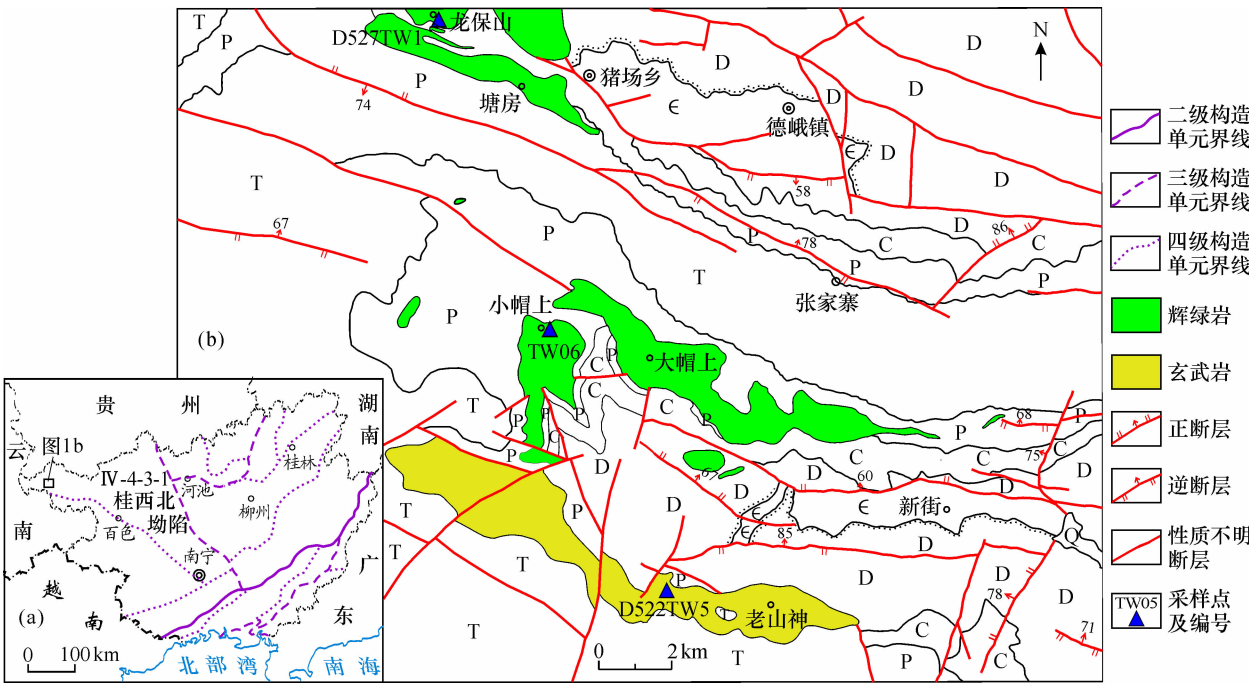


图1 研究区大地构造位置图(a)及德峨地区基性岩分布图(b)
(a. 据广西区域地质调查院最新修编的《广西地质志》修改；b. 据1:5万德峨幅区域地质图修改)
Fig. 1 Geological map of study area(a)and distribution of mafic rocks in De'e area(b)

区内出露完整。其核部地层为寒武系,翼部地层依次为泥盆系、石炭系、二叠系和三叠系,背斜西部末端为辉绿岩侵入。背斜核部平缓开阔,局部为水平岩层,因背斜核部西南处为断层切割,两翼地层呈不对称分布,两翼地层倾角为 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。

新街背斜:分布于新街村一带,近东西向展布,往东延伸出图,核部地层为寒武系,两翼地层依次为泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系,背斜西北部可见辉绿岩体分布。背斜核部平缓开阔,背斜被近东西向的新街断裂切割两翼,后期背斜东部被一组北北东向断层切割。两翼地层呈不对称分布,倾角为 $15^{\circ}\sim 58^{\circ}$,南翼相对北翼较缓。背斜长宽比近3:1,为短轴背斜。

八科断裂:位于德峨镇南东八科村一带,为一横贯本区的区域性大断裂,不仅控制着本区域岩浆岩活动分布,也控制本区域矿产分布及其两侧的沉积活动。在区域性拉张期,表现为同沉积活动性断层,控制着其南北两侧的沉积活动,寒武系与泥盆系断层接触;在区域性挤压期,表现为压扭性剪切断层,有辉绿岩侵入。

新街断裂:位于新街背斜核部,断层倾向整体为北东向,走向 $90^{\circ}\sim 110^{\circ}$,倾向 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$,倾角 $58^{\circ}\sim 80^{\circ}$,切割新街背斜核部,致使北翼缺失寒武系一中二叠统岩层,断层性质为正断层。

1.3 岩浆岩

岩浆岩有侵入岩和喷出岩两大类。其中侵入岩主要为辉绿岩,喷出岩主要为玄武岩。辉绿岩体共有10个,主要分布在猪场乡龙保山、小帽上和大帽上一带,其中龙保山、小帽上、大帽上岩体出露面积较大,呈岩株、岩床、岩墙、岩脉产出,主要沿断裂破碎带侵入,局部沿层间侵入二叠系和三叠系中。以浅成侵入相为主,次为溢出相,各岩体分带现象及其内部相变都不明显。喷出岩主要为玄武岩,仅在老山神、周帮村一带出露,岩性较简单,主要由致密玄武岩、含杏仁致密玄武岩等组成。

综上所述,研究区分布有印支期基性岩浆岩,地质构造复杂,具有较好的成矿地质条件,矿产资源较为丰富。因此,本次采样分析将进一步了解峨眉山地幔柱在广西影响,丰富峨眉山大火成岩省的“地球化学基因库”,从而更好地了解地幔柱的演化过程。

2 样品采集和岩石特征

本文在德峨地区采集了3个锆石测年样品(图1b),分别为老山神玄武岩(编号D522TW5: $N24^{\circ}31'23''$, $E105^{\circ}07'49''$)、龙保山辉绿岩(编号D527TW1: $N24^{\circ}39'38''$, $E105^{\circ}04'07''$)和小帽上辉绿岩(编号TW06: $N24^{\circ}35'13''$, $E105^{\circ}06'04''$)。同时采集了20件地球化学样品,其中5件为玄武岩,15件为辉绿岩。

德峨地区岩浆岩以基性岩为主,主要为辉绿岩和玄武岩。辉绿岩分布于龙保山、金平村、大帽上、小帽上、塘房、猪场、花痕一带,与围岩呈侵入接触关系,分别侵入下-中二叠统四大寨组(图2a)和上二叠统领好组(图2b)。岩石呈深灰色、灰绿色,辉绿结构,块状构造,岩石主要由斜长石、单斜辉石、隐晶质、绿帘石和不透明矿物组成,其中斜长石含量 $42\%\sim 45\%$,多呈半自形柱状,杂乱分布,粒径多在 $0.1\sim 0.5\text{ mm}$,表面浑浊发生钠黝帘石化,部分局部还见绿帘石化和绢云母化,单斜辉石含量 $38\%\sim 40\%$,多呈他形粒状,少数半自形柱状,粒径一般为 $0.1\sim 1.2\text{ mm}$,多包含或镶嵌柱状的斜长石形成嵌晶含长结构;隐晶质呈

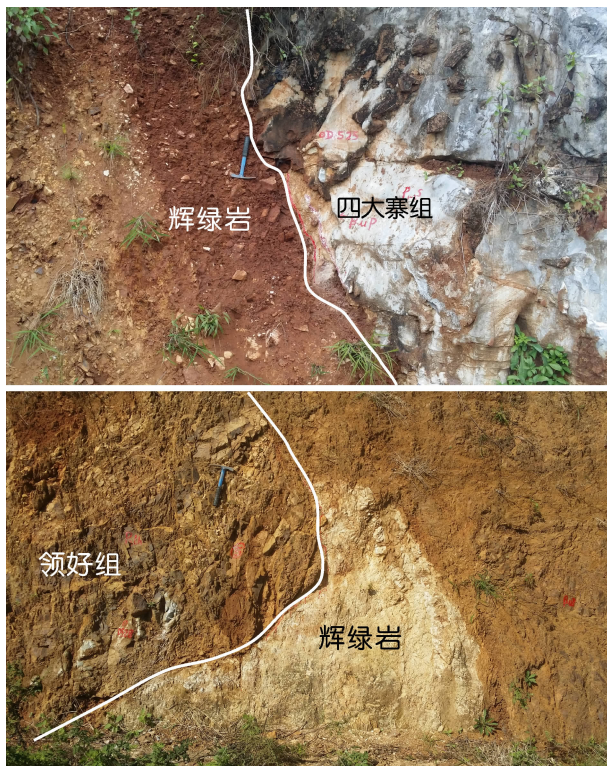


图2 辉绿岩与围岩的接触关系

Fig. 2 Contact relationship between dolerites and surrounding rock

集合体, 含量约 6% ~ 8%; 绿帘石多呈他形粒状, 大小 0.02 ~ 0.1 mm, 含量 1% ~ 2%; 不透明矿物呈半自形 - 他形粒状或板条状, 杂乱分布, 含量 3% ~ 4%, 主要是磁铁矿和钛铁矿。玄武岩分布于老山神、周帮一带, 与下伏地层下 - 中二叠统四大寨组为角度不整合接触, 与上覆地层下三叠统石炮组为整合接触(图 3)。该类岩石呈深灰色、斑状结构、间粒 - 间隐结构、块状构造, 斑晶主要由斜长石和少量辉石组成, 斜长石多呈半自形柱状, 粒径多在 0.1 ~ 0.5 mm, 辉石呈半自形粒状 - 短柱状, 粒径在 0.1 ~ 0.2 mm。表面浑浊发生钠黝帘石化和弱绢云母化, 聚片双晶隐约可见, 含量 60% ~ 65%; 基质由隐晶质组成, 含量 32% ~ 35%。



图 3 玄武岩与围岩的接触关系

Fig. 3 Contact relationship of basalts and surrounding rocks

3 测试方法

样品的 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 定年测试分析在中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA - ICP - MS)上完成。LA - ICP - MS 激光剥蚀系统为美国 Newwave 公司的 UP193FX 型 193 nm ArF 准分子系统, 激光器来自于德国 ATL 公司, ICP - MS 为 Agilent 7500 a, 激光器波长为 193 nm, 脉冲宽度 < 4 ns。本次所用斑束直径为 25 μm 。未知样品测试时采样方式为单点剥蚀、跳峰采集; 单点采集时间模式为: 15 ~ 20 s 气体空白, 40 s 样品剥蚀, 45 ~ 55 s 冲洗; 每 6 个未知样品点插入一组标样(锆石标样和成分标样)。本次样品分析过程中, Plesovice 标样作为未知样品的分析结果为 $337.2 \pm 1.1 \text{ Ma}$ ($n = 23$, 2σ), 对应的年龄推荐值为 $337.13 \pm 0.37 \text{ Ma}$ (2σ)^[18], 两者在误差范围内完全一致。成分标样采用 NIST SRM 612, 其中²⁹Si

作为内标元素。样品的同位素比值及元素含量计算采用 Glitter_ver 4.0 程序。上述测定的数据均采用 Andersen (2002)^[19]提出的进行 ComPbCorr#3.17 普通铅校正, 锆石 U - Pb 年龄谐和图的绘制和 MSWD 的计算则采用 Isoplot/Ex_ver3^[20]。

样品的主量元素和微量元素的测试均在中铁物探勘察有限公司实验室完成。其中主量元素分析在波长色散 X 荧光光谱仪上完成, 分析精度优于 0.1 ~ 1.0, FeO 含量用湿化学法测定, 分析精度优于 0.5% ~ 1%。微量元素的测定由 X series 2 型等离子体质谱仪完成。

4 测试结果

4.1 岩体的地球化学特征

德峨地区基性岩的主量和微量元素测试分析结果见表 1。总体来看, 玄武岩和辉绿岩显示类似的元素地球化学特征, 具有较低的 SiO_2 (42.52% ~ 48.09%) 和 MgO (3.94% ~ 6.61%) 含量, 高的 Fe_2O_3 (11.89% ~ 17.06%), Al_2O_3 (14.39% ~ 17.04%) 含量。玄武岩和辉绿岩样品的 $\text{Mg}^\#$ 值分别为 0.35 ~ 0.50 和 0.34 ~ 0.50。同时, 其具有较低的 Cr 和 Ni 含量(分别为 21.77×10^{-6} ~ 202.2×10^{-6} 和 47.87×10^{-6} ~ 122×10^{-6}), 暗示其岩浆具有演化特征。从微量元素原始地幔标准化图中(图 4)可以得到, 这类岩石显示轻微亏损 Nb、Ta 和 Sr 以及 Zr、Hf 的富集。从稀土元素球粒陨石蛛网图中(图 5)可以发现其轻微的重稀土元素富集。

4.2 锆石 U - Pb 年龄

本次工作对德峨地区已发现的 3 个岩体分别进行了同位素测年, 结果见表 2。

老山神玄武岩(D522TW5)共分析了 24 点。所有的分析点均具有较高的 U、Th 和 Pb 含量, 并且 Th/U 值接近或大于 0.1, 显示其属于岩浆成因^[21]。除了两个年龄值偏离谐和线外, 其余 22 个分析结果均较为谐和。在这 22 个分析点中, 15 个分析点显示较为古老的年龄(332 ~ 2 522 Ma)(图 6a), 可能代表着捕获锆石的年龄。4 个分析点的²³⁸U/²⁰⁶Pb 和²³⁷U/²⁰⁵Pb 年龄, 在误差内完全一致, 得出其谐和年龄为 $261.0 \pm 2.4 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 4.6$)(图 6b), 且与²³⁸U/²⁰⁶Pb 加权平均年龄 $259.8 \pm 5.1 \text{ Ma}$ 相当吻合, 因此上述年龄应该为老神山玄武岩的结晶年龄。另外还有 3 个颗粒显示偏年轻的年龄值(155、

表 1 玄武岩和辉绿岩代表性样品的主量($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果
Table 1 Major and trace element analyses for bulk rocks of De' e mafic rocks

样品编号	D522X2	D522X6	D522X10	D525X1	X01	D527X1	X04	X08	X11	06GS1
采样位置	老山神	老山神	老山神	老山神	老山神	龙保山	金平村	金平村	大帽上	小帽上
岩石类型	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩
SiO ₂	46.48	45.47	46.86	45.78	45.57	47.09	48.09	47.13	47.96	47.47
TiO ₂	3.54	2.32	3.15	3.71	3.39	3.50	2.97	2.36	2.88	3.10
Al ₂ O ₃	14.39	17.04	14.92	14.97	15.41	14.68	14.73	15.89	15.44	15.04
^T Fe ₂ O ₃	15.04	11.89	15.28	16.29	15.67	15.13	14.30	12.85	13.69	13.65
^T FeO	13.53	10.70	13.75	14.66	14.10	13.61	12.86	11.56	12.32	12.29
FeO	7.88	7.07	4.58	7.69	11.67	10.81	11.09	8.84	9.85	10.52
MnO	0.16	0.14	0.21	0.18	0.21	0.18	0.17	0.15	0.17	0.17
MgO	5.53	6.03	4.23	4.68	5.36	5.42	5.47	6.61	5.40	5.52
CaO	7.47	11.95	7.05	7.31	9.34	8.83	9.18	9.45	9.63	8.96
Na ₂ O	3.09	2.08	2.13	2.52	2.67	2.64	3.01	3.55	2.27	4.17
K ₂ O	1.34	0.68	1.78	1.72	1.22	1.54	0.99	0.48	1.19	0.24
P ₂ O ₅	0.37	0.23	0.38	0.38	0.41	0.37	0.31	0.23	0.32	0.37
LOI	3.28	2.82	4.30	3.15	1.87	1.66	1.90	2.18	2.02	2.40
Total	99.82	99.88	99.77	99.84	99.55	99.53	99.87	99.89	99.88	99.73
Mg [#]	0.42	0.50	0.35	0.36	0.40	0.42	0.43	0.50	0.44	0.44
La	34.84	24.40	44.00	41.69	39.07	34.98	30.95	27.57	31.68	27.70
Ce	77.43	51.97	88.37	77.53	84.31	73.29	65.77	55.43	67.79	58.63
Pr	10.35	6.832	11.6	12.53	11.04	10.15	8.572	7.659	8.873	7.714
Nd	45.64	29.22	48.95	55.36	47.14	44.62	36.74	32.84	37.52	33.67
Sm	10.08	6.506	9.879	12.69	9.643	9.687	7.950	7.263	8.315	7.255
Eu	3.493	2.324	3.462	4.424	3.869	3.350	2.717	2.339	2.672	2.380
Gd	9.356	6.112	8.893	11.97	8.687	9.140	7.614	6.706	7.619	6.735
Tb	1.676	1.124	1.523	2.157	1.464	1.610	1.384	1.237	1.393	1.160
Dy	10.19	7.009	8.966	13.35	8.670	9.904	8.836	7.987	8.977	6.929
Ho	2.082	1.497	1.857	2.724	1.817	2.105	1.904	1.697	1.911	1.400
Er	5.648	4.155	5.043	7.398	4.998	5.765	5.379	4.800	5.506	3.895
Tm	0.867	0.647	0.743	1.096	0.763	0.862	0.851	0.730	0.874	0.555
Yb	5.161	4.014	4.579	6.656	4.835	5.346	5.441	4.544	5.452	3.489
Lu	0.788	0.621	0.723	0.980	0.753	0.783	0.861	0.707	0.863	0.579
Y	55.19	39.05	48.74	68.51	46.29	54.32	49.85	45.93	51.00	42.62
Sc	34.85	30.72	27.35	31.53	28.42	31.97	32.47	34.52	33.52	27.60
V	420.3	306.6	360.9	405.6	414.8	371.5	320.5	333.2	331.3	293.3
Cr	144.6	158.8	37.27	147.7	21.77	141.2	138.3	193.4	133.1	92.43
Ni	91.08	99.52	48.46	99.78	47.87	83.30	76.56	116.5	76.02	55.58
Cu	127.6	135.0	107.0	130.2	94.71	106.5	103.9	147.4	106.7	84.50
Zn	141.8	91.37	135.4	162.9	148.7	136.5	120.2	112.6	120.9	108.0
Sr	268.5	520.2	849.3	467.7	646.9	561.5	453.0	568.5	448.0	235.8
Co	49.12	41.86	46.70	46.22	53.04	46.05	42.7	47.96	44.68	36.10
Rb	36.66	15.08	38.62	37.23	32.29	41.76	24.87	16.66	33.11	5.308
Zr	752.0	482.5	481.8	522.9	673.1	668.6	739.5	590.9	756.9	552.5
Nb	27.85	20.56	29.81	27.96	27.72	25.96	23.68	20.64	24.57	33.77
Ba	1 127	254.2	1 074	643.4	745.4	527.8	376.3	218.7	401.5	98.47
Hf	15.98	10.67	9.833	11.17	12.53	13.05	14.68	12.11	14.94	11.85
Ta	2.428	1.813	2.444	2.400	2.430	2.350	2.134	1.677	2.193	1.787
Pb	3.673	3.136	4.035	4.741	3.225	2.434	2.748	4.462	3.956	1.442
Th	3.908	3.336	3.897	4.103	4.025	3.939	4.41	3.475	4.478	3.606
U	1.142	0.940	0.866	0.998	1.050	1.022	1.209	1.006	1.274	0.919
Ga	29.73	21.00	27.78	23.05	23.71	20.45	17.53	15.37	18.62	19.14
ΣREE	218	146	239	251	227	212	185	162	189	162
La/Sm	6.75	6.08	9.61	6.26	8.08	6.54	5.69	6.07	5.81	7.94
Sm/Yb	1.95	1.62	2.16	1.91	1.99	1.81	1.46	1.60	1.53	2.08
(La/Sm) _N	4.84	4.36	6.89	4.49	5.80	4.69	4.08	4.35	4.17	5.69
(Sm/Yb) _N	2.23	2.42	2.88	2.12	2.62	2.33	2.51	2.45	2.46	2.58

续表 1

样品编号	06GS2	06GS3	D9072X1	D9072X3	D9071C2	HHGS1	HHGS2	D6575X1	D6573X2	D6574X2
采样位置	小帽上	小帽上	塘房	塘房	塘房	花痕	花痕	猪场	猪场	猪场
岩石类型	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩
SiO ₂	46.28	47.10	47.64	46.73	43.84	47.92	47.00	42.52	47.62	47.47
TiO ₂	3.17	3.05	2.46	3.27	3.82	2.85	2.56	3.58	2.79	2.81
Al ₂ O ₃	15.36	15.04	15.68	15.80	15.96	15.01	15.23	16.40	14.71	15.25
^T Fe ₂ O ₃	14.28	14.25	12.67	15.34	17.06	13.95	12.55	16.41	13.88	13.68
^T FeO	12.85	12.83	11.40	13.81	15.35	12.56	11.29	14.76	12.49	12.31
FeO	11.05	11.09	6.09	7.45	7.84	9.83	6.40	8.89	8.75	6.69
MnO	0.17	0.18	0.14	0.19	0.18	0.18	0.14	0.22	0.17	0.16
MgO	5.72	5.61	6.38	3.94	4.66	5.59	5.89	6.14	5.95	5.44
CaO	8.87	8.75	7.79	7.66	7.06	9.06	8.64	7.28	8.85	8.41
Na ₂ O	4.03	3.99	3.79	2.88	1.59	2.39	3.24	1.47	3.35	2.92
K ₂ O	0.22	0.26	0.25	1.40	0.97	1.33	0.58	1.20	0.99	0.94
P ₂ O ₅	0.38	0.37	0.23	0.35	0.33	0.38	0.30	0.40	0.27	0.28
LOI	2.67	2.57	3.55	3.15	5.28	2.31	4.48	5.25	2.26	3.24
Total	99.73	99.74	99.89	99.88	99.87	99.88	99.90	99.88	99.46	99.23
Mg [#]	0.44	0.44	0.50	0.34	0.35	0.44	0.48	0.43	0.46	0.44
La	30.30	28.17	28.5	38.68	36.03	32.94	24.96	46.64	27.76	29.69
Ce	63.77	59.76	56.04	69.04	61.17	66.90	48.89	74.87	59.40	60.01
Pr	8.283	7.747	7.982	10.84	10.66	8.77	6.796	13.30	7.996	8.486
Nd	35.79	33.63	34.43	46.2	45.96	37.22	29.26	57.10	34.29	36.82
Sm	7.594	7.145	7.553	10.24	10.30	7.881	6.642	11.46	7.657	8.097
Eu	2.487	2.157	2.504	3.280	3.517	2.571	2.256	4.164	2.586	2.750
Gd	7.123	6.721	6.988	9.474	9.431	6.291	5.511	10.07	7.075	7.570
Tb	1.255	1.159	1.298	1.752	1.762	1.096	1.028	1.711	1.274	1.373
Dy	7.356	6.920	8.02	10.94	11.02	6.490	6.289	9.904	8.048	8.530
Ho	1.537	1.439	1.683	2.348	2.342	1.336	1.301	2.027	1.68	1.811
Er	4.178	4.054	4.591	6.457	6.453	3.781	3.667	5.425	4.649	5.016
Tm	0.611	0.575	0.698	0.989	1.022	0.585	0.562	0.793	0.699	0.791
Yb	3.904	3.767	4.303	6.109	6.313	3.667	3.480	4.746	4.561	4.866
Lu	0.596	0.576	0.648	0.926	0.956	0.588	0.544	0.701	0.690	0.737
Y	46.03	43.15	44.22	61.58	56.51	32.61	32.94	53.68	43.24	47.19
Sc	29.81	28.34	35.53	35.99	40.38	34.43	38.66	33.73	31.63	32.56
V	322.6	301.8	353.9	352.5	410.4	393.2	410.5	425.2	336.2	338.0
Cr	101.9	81.89	202.2	123.9	169.2	115.9	161.3	91.73	129.1	151.5
Ni	59.41	54.60	115.8	88.79	105.4	77.30	122.0	83.50	92.96	99.86
Cu	80.46	69.11	150.3	113.2	134.8	110.5	166.1	121.5	127.5	142.7
Zn	110.3	102.1	98.59	134.1	176.4	136.7	123.5	134.2	108.2	109.7
Sr	215.3	195.2	350.4	439.3	220.2	501.7	485.2	331	384.8	413.1
Co	38.33	34.15	46.79	44.71	53.94	45.95	45.35	54.54	46.26	45.86
Rb	6.060	6.946	4.006	31.48	27.1	36.82	13.35	22.40	25.07	25.64
Zr	625.4	660.3	453.0	528.7	674.4	458.4	479.1	422.4	478.8	655.0
Nb	36.07	31.79	23.03	26.36	28.95	27.23	23.95	28.24	22.51	22.56
Ba	100.1	125.7	298.0	337.3	368.8	398.7	252.6	483.6	424.3	511.6
Hf	13.06	12.70	10.78	11.23	14.85	12.82	13.52	9.733	9.858	13.51
Ta	1.871	1.745	2.031	2.254	2.363	2.064	1.651	2.480	1.935	1.840
Pb	1.496	1.428	3.727	3.618	3.44	5.195	2.694	4.443	2.357	3.152
Th	3.968	3.970	3.129	4.590	4.388	4.460	3.693	3.532	3.412	3.709
U	1.008	1.066	0.861	1.208	1.150	0.961	1.039	0.943	0.878	1.052
Ga	20.05	19.18	17.33	18.87	21.44	18.55	15.70	20.57	18.30	19.84
ΣREE	175	164	165	217	207	180	141	243	168	177
La/Sm	7.76	7.48	6.62	6.33	5.71	8.98	7.17	9.83	6.09	6.10
Sm/Yb	1.95	1.90	1.76	1.68	1.63	2.15	1.91	2.41	1.68	1.66
(La/Sm) _N	5.57	5.36	4.75	4.54	4.09	6.44	5.14	7.05	4.37	4.38
(Sm/Yb) _N	2.58	2.55	2.44	2.44	2.26	2.70	2.43	2.63	2.34	2.37

备注：^TFe₂O₃ 和^TFeO 分别表示样品中全铁的含量，^TFeO = FeO + 0.899 8 × Fe₂O₃；Mg[#] = Mg/(Mg + ^TFe²⁺)，摩尔数。

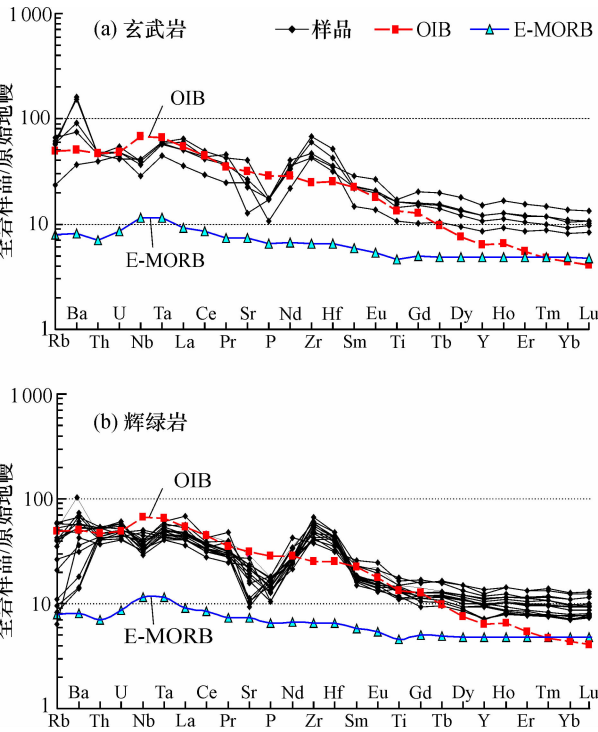


图 4 德峨地区基性岩微量元素蛛网图
Fig. 4 Primitive mantle-normalized trace element patterns of De'e mafic rocks

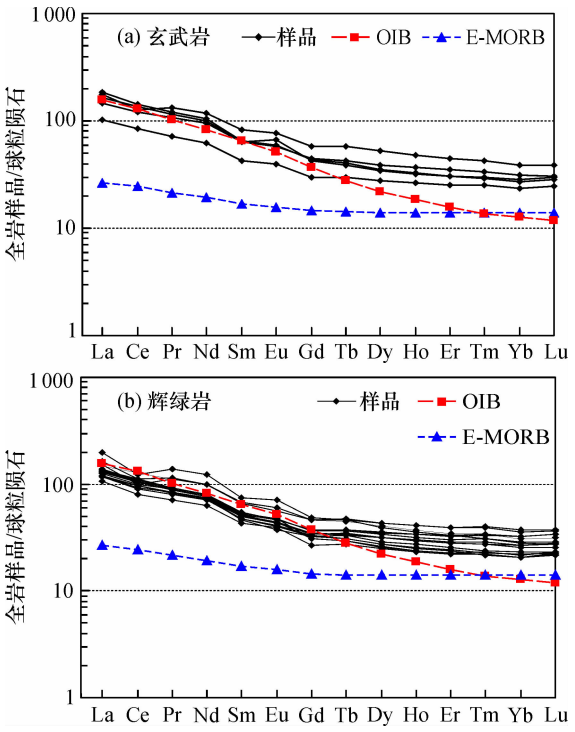


图 5 德峨地区基性岩稀土元素配分曲线
(OIB 平均值引自 Sun and McDonough, 1989)
Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of De'e mafic rocks

表 2 样品锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测试结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	普通铅($^{208}\text{法}$)校正后同位素比值						普通铅($^{208}\text{法}$)校正后表生年龄/Ma					
	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	
D522TW5, 玄武岩																
01	311	391	260	0.80	0.069 58	0.001 53	1.439 19	0.029 02	0.150 01	0.001 25	916	28	905	12	901	7
02	118	253	468	0.46	0.127 48	0.002 20	6.628 65	0.101 81	0.377 13	0.003 45	2 064	15	2 063	14	2 063	16
03	445	319	170	1.39	0.063 74	0.003 69	1.039 37	0.058 58	0.118 27	0.001 94	733	92	724	29	721	11
04	279	129	79.7	2.16	0.063 22	0.003 92	1.033 50	0.062 65	0.118 57	0.001 95	716	101	721	31	722	11
05	150	306	107	0.49	0.054 59	0.009 33	0.489 38	0.082 92	0.065 03	0.001 60	395	331	404	57	406	10
06	90.5	296	856	0.31	0.166 38	0.003 53	10.858 63	0.219 02	0.473 39	0.005 74	2 522	18	2 511	19	2 498	25
07	152	316	77.9	0.48	0.050 96	0.007 43	0.288 60	0.041 48	0.041 08	0.001 10	239	271	257	33	260	7
08	22.7	90.1	84.8	0.25	0.078 78	0.003 34	2.150 04	0.088 40	0.198 00	0.002 99	1 167	57	1 165	28	1 165	16
09	380	709	163	0.54	0.051 73	0.009 24	0.293 06	0.052 14	0.041 10	0.000 66	273	332	261	41	260	4
10	43.9	172	282	0.26	0.100 30	0.003 34	3.992 76	0.128 55	0.288 82	0.004 02	1 630	39	1 633	26	1 636	20
12	88.1	51.6	159	1.71	0.120 75	0.013 85	5.729 31	0.640 92	0.344 11	0.008 72	1 967	213	1 936	97	1 906	42
13	355	606	77.0	0.59	0.052 95	0.006 29	0.216 22	0.025 48	0.029 63	0.000 44	327	239	199	21	188	3
15	416	375	94.6	1.11	0.053 40	0.009 43	0.390 53	0.068 07	0.053 07	0.001 75	346	319	335	50	333	11
16	55.7	249	195	0.22	0.073 62	0.002 84	1.742 52	0.064 86	0.171 76	0.002 02	1 031	56	1 024	24	1 022	11
17	27.3	115	298	0.24	0.156 89	0.005 43	9.997 03	0.306 65	0.462 14	0.007 43	2 422	60	2 435	28	2 449	33
18	1 940	2 307	328	0.84	0.044 87	0.003 30	0.254 82	0.018 31	0.041 21	0.000 69	-26	124	230	15	260	4
19	348	443	119	0.78	0.046 05	0.003 48	0.217 29	0.016 24	0.034 23	0.000 38	168	200	14	217	2	
20	175	462	137	0.38	0.052 81	0.010 16	0.384 92	0.072 86	0.052 90	0.002 16	321	323	331	53	332	13
21	149	405	78.2	0.37	0.046 05	0.002 56	0.154 46	0.008 43	0.024 33	0.000 25		121	146	7	155	2
22	109	169	268	0.64	0.111 45	0.002 56	4.918 71	0.105 53	0.320 35	0.003 48	1 823	23	1 805	18	1 791	17
23	34.3	421	199	0.08	0.063 21	0.002 11	1.029 00	0.032 73	0.118 16	0.001 25	715	49	718	16	720	7
24	192	506	65.3	0.38	0.051 54	0.013 39	0.286 94	0.073 12	0.040 41	0.002 33	265	383	256	58	255	14
11	58.1	64.6	36.5	0.90	0.046 05	0.004 78	0.362 89	0.037 27	0.057 16	0.000 85		213	314	28	358	5
14	89.9	412	78.6	0.22	0.179 06	0.005 65	0.725 73	0.020 94	0.029 41	0.000 36	2 644	32	554	12	187	2

续表 2

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	普通铅(^{208}Pb 法)校正后同位素比值						普通铅(^{208}Pb 法)校正后表生年龄/Ma					
	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	
D527TW1, 辉绿岩																
01	3 285	1 002	329	3. 28	0. 051 46	0. 003 83	0. 291 79	0. 021 25	0. 041 14	0. 000 63	261	138	260	17	260	4
02	87. 0	135	62. 4	0. 65	0. 055 37	0. 029 06	0. 493 87	0. 258 43	0. 064 72	0. 003 24	427	887	408	176	404	20
03	5 032	1 534	422	3. 28	0. 051 60	0. 003 95	0. 292 71	0. 021 99	0. 041 15	0. 000 58	268	145	261	17	260	4
04	3 774	998	340	3. 78	0. 051 98	0. 004 19	0. 294 32	0. 023 30	0. 041 08	0. 000 66	285	151	262	18	260	4
06	1 731	772	237	2. 24	0. 051 55	0. 004 39	0. 291 89	0. 024 44	0. 041 07	0. 000 67	266	160	260	19	259	4
07	2 672	949	335	2. 82	0. 051 59	0. 004 39	0. 291 86	0. 024 50	0. 041 04	0. 000 53	267	167	260	19	259	3
08	3 125	1 095	415	2. 85	0. 051 11	0. 005 03	0. 289 76	0. 028 22	0. 041 12	0. 000 53	246	197	258	22	260	3
09	1 766	655	240	2. 70	0. 051 34	0. 005 76	0. 291 07	0. 032 30	0. 041 12	0. 000 68	256	220	259	25	260	4
10	3 441	1 232	402	2. 79	0. 052 23	0. 003 32	0. 296 56	0. 018 42	0. 041 18	0. 000 54	295	119	264	14	260	3
11	112	142	280	0. 79	0. 122 42	0. 006 12	6. 069 66	0. 303 72	0. 359 62	0. 008 67	1 992	55	1 986	44	1 980	41
12	2 552	1 264	381	2. 02	0. 051 08	0. 004 18	0. 290 74	0. 023 33	0. 041 28	0. 000 67	244	153	259	18	261	4
13	97. 5	384	861	0. 25	0. 154 76	0. 002 94	9. 437 43	0. 165 16	0. 442 32	0. 004 70	2 399	16	2 381	16	2 361	21
16	277	1 986	309	0. 14	0. 051 81	0. 002 69	0. 295 36	0. 014 85	0. 041 35	0. 000 53	277	92	263	12	261	3
19	139	208	166	0. 67	0. 058 96	0. 018 00	0. 753 46	0. 226 86	0. 092 70	0. 006 59	566	480	570	131	571	39
20	46. 5	273	225	0. 17	0. 073 51	0. 002 99	1. 736 81	0. 068 31	0. 171 40	0. 002 22	1 028	58	1 022	25	1 020	12
21	162	794	122	0. 20	0. 050 93	0. 005 42	0. 238 98	0. 024 97	0. 034 04	0. 000 73	238	196	218	20	216	5
23	70. 0	233	225	0. 30	0. 073 42	0. 004 41	1. 736 23	0. 102 20	0. 171 55	0. 003 28	1 026	88	1 022	38	1 021	18
24	1 874	8 203	1 119	0. 23	0. 050 04	0. 001 57	0. 193 27	0. 005 75	0. 028 02	0. 000 22	197	55	179	5	178	1
05	313	426	186	0. 73	0. 053 67	0. 036 92	0. 305 17	0. 208 30	0. 041 25	0. 004 05	357	1 019	270	162	261	25
14	140	313	125	0. 45	0. 084 81	0. 021 53	0. 479 53	0. 120 48	0. 041 01	0. 001 68	1 311	468	398	83	259	10
15	81. 1	250	109	0. 32	0. 064 31	0. 023 59	0. 348 66	0. 127 28	0. 039 32	0. 001 41	752	737	304	96	249	9
17	102	321	145	0. 32	0. 052 09	0. 021 25	0. 294 51	0. 119 08	0. 041 01	0. 002 57	289	614	262	93	259	16
18	183	622	129	0. 29	0. 091 85	0. 024 27	0. 173 83	0. 044 91	0. 013 73	0. 000 79	1 464	441	163	39	88	5
22	45. 1	135	109	0. 33	0. 047 37	0. 014 77	0. 563 44	0. 174 23	0. 086 26	0. 003 45	68	516	454	113	533	21
TW06, 辉绿岩																
01	55	173	328	0. 32	0. 128 76	0. 004 90	6. 739 63	0. 252 98	0. 379 54	0. 006 83	2 081	41	2 078	33	2 074	32
02	659	1 348	628	0. 49	0. 051 47	0. 009 59	0. 290 44	0. 053 54	0. 040 92	0. 001 20	262	324	259	42	259	7
03	755	2 792	467	0. 27	0. 051 86	0. 002 54	0. 291 76	0. 013 82	0. 040 80	0. 000 50	279	86	260	11	258	3
05	14	176	239	0. 08	0. 129 93	0. 005 13	6. 736 17	0. 263 39	0. 376 09	0. 007 41	2 097	41	2 077	35	2 058	35
06	553	1 018	167	0. 54	0. 050 33	0. 003 51	0. 232 84	0. 015 91	0. 033 56	0. 000 44	210	131	213	13	213	3
07	62	339	328	0. 18	0. 082 11	0. 002 33	2. 417 25	0. 064 83	0. 213 62	0. 002 30	1 248	36	1 248	19	1 248	12
08	233	803	133	0. 29	0. 051 43	0. 004 85	0. 237 87	0. 022 20	0. 033 56	0. 000 43	260	187	217	18	213	3
09	148	722	118	0. 21	0. 051 77	0. 006 38	0. 295 63	0. 035 88	0. 041 44	0. 000 98	275	230	263	28	262	6
10	3 118	5 148	843	0. 61	0. 050 30	0. 001 78	0. 235 50	0. 007 99	0. 033 98	0. 000 28	209	63	215	7	215	2
12	242	694	116	0. 35	0. 051 81	0. 007 32	0. 239 41	0. 033 57	0. 033 54	0. 000 58	277	283	218	28	213	4
13	1 092	3 290	455	0. 33	0. 051 05	0. 002 43	0. 237 92	0. 011 04	0. 033 83	0. 000 32	243	90	217	9	214	2
15	693	1 488	300	0. 47	0. 050 56	0. 002 68	0. 234 38	0. 012 07	0. 033 64	0. 000 41	221	97	214	10	213	3
16	66	107	98	0. 61	0. 068 99	0. 005 77	1. 423 23	0. 117 31	0. 149 69	0. 002 98	898	138	899	49	899	17
17	304	945	137	0. 32	0. 049 15	0. 005 91	0. 188 94	0. 022 32	0. 027 89	0. 000 64	155	219	176	19	177	4
18	40	384	381	0. 10	0. 071 48	0. 002 82	1. 587 08	0. 060 44	0. 161 09	0. 001 91	971	58	965	24	963	11
19	4 483	6 706	1 234	0. 67	0. 050 71	0. 001 97	0. 236 37	0. 008 83	0. 033 81	0. 000 29	228	71	215	7	214	2
20	73	251	208	0. 29	0. 069 10	0. 005 56	1. 449 17	0. 114 49	0. 152 11	0. 003 73	902	123	910	47	913	21
21	412	431	238	0. 96	0. 053 64	0. 010 76	0. 305 38	0. 060 65	0. 041 29	0. 001 27	356	356	271	47	261	8
22	750	2 323	269	0. 32	0. 051 08	0. 002 01	0. 238 20	0. 008 98	0. 033 81	0. 000 33	244	69	217	7	214	2
23	3 005	4 642	606	0. 65	0. 052 00	0. 001 73	0. 241 89	0. 007 62	0. 033 73	0. 000 30	285	56	220	6	214	2
24	1 053	2 346	451	0. 45	0. 050 53	0. 002 69	0. 234 58	0. 012 16	0. 033 65	0. 000 38	219	99	214	10	213	2
04	119	277	15	0. 43	0. 046 05	0. 019 89	0. 025 03	0. 010 63	0. 003 94	0. 000 31		717	25	11	25	2
11	82	136	68	0. 60	0. 146 92	0. 084 60	0. 904 58	0. 507 98	0. 044 68	0. 006 70	2 310	1 037	654	271	282	41
14	606	1 261	170	0. 48	0. 068 13	0. 017 29	0. 157 08	0. 039 05	0. 016 73	0. 000 90	873	447	148	34	107	6

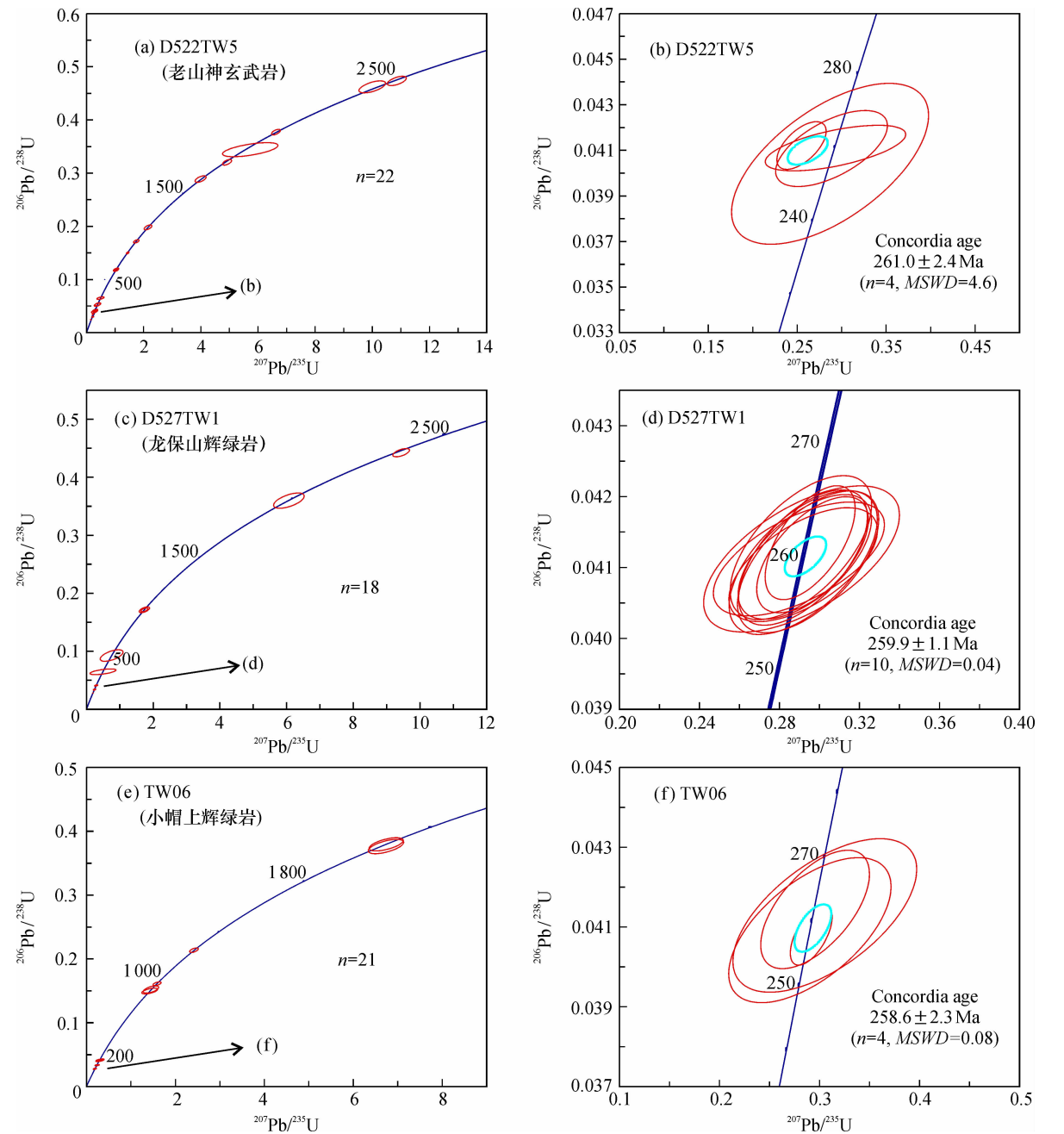


图6 德峨地区基性岩的锆石年龄谐和图

Fig. 6 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia plots for the sampled mafic rocks of De'e area

188 和 217 Ma)，可能是受到后期地质事件的影响发生 Pb 丢失所致。

龙保山辉绿岩 (D527TW1) 共分析了 24 点，所有的分析点均具有较高的 Th、U 和 Pb 含量，并且 Th/U 值均大于 0.1，同样显示其属于岩浆成因。除了 6 颗锆石年龄值不谐和或者误差过大以外，其余 18 个年龄较为谐和 (图 6c)。其中 10 颗锆石的 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 在误差范围内一致，其谐和年龄为 259.9 ± 1.1 Ma ($MSWD = 0.04$) (图 6d)，并且与

$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄值 260.0 ± 2.2 Ma 较好的吻合，因此上述年龄值代表了龙保山辉绿岩的侵位时代。另外 6 个分析点显示较为古老的年龄 (404 ~ 2 399 Ma) (图 6c)，可能为捕获锆石的年龄。2 个分析点显示偏年轻的年龄值 (178 和 216 Ma)，可能受到了后期热事件的影响。

小帽上辉绿岩 (TW06) 24 颗锆石分析测试显示，具有较高的 Th/U 值 (≥ 0.08)，指示其为岩浆锆石。除了 3 个分析点不谐和年龄以外，其余 21 个点均较

为谐和,其中有6个分析点显示古老的同位素年龄(899~2 097 Ma)(图 6e),同样表明可能是捕获锆石。由4个谐和的分析点可得出其谐和年龄为 258.6 ± 2.3 Ma ($MSWD = 0.08$)(图 6f),并且与 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄值 259.0 ± 4.7 Ma 基本一致,可能代表其结晶年龄。此外,有1个分析点显示偏年轻的 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值(177 Ma),还有10个分析点的 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值较为接近,并且其加权平均年龄值为 213.8 ± 1.4 Ma ($MSWD = 0.09$),可能代表后期地质事件影响或者是混合年龄。

5 讨论

5.1 源区特征

大部分测试样品的 LOI 小于 5%,表明这些基性岩受到后期蚀变改造作用较小。Rb、Ba 和 K 这些 LILE 可能受到后期的蚀变影响,在微量元素配分图中较紊乱分布。然而,这类岩石的高场强元素(如 Nb、Ta、Zr 和 Hf)及稀土元素呈现良好的一致性(图 4、5),因此这些抗蚀变元素可以作为岩浆源区及演化过程的判别因素。

另外,在幔源岩浆上升过程中,地壳物质混染是不可避免的。Zhang 等^[22]认为峨眉山大火成岩省玄武岩均有受到地壳混染的影响。本次锆石测年结果中获得了较多的古老锆石,也表明岩浆的上升过程中的确存在地壳物质的加入。在原始地幔标准化图解中,出现了 Nb-Ta 的负异常和 Zr-Hf 的正异常,表明岩浆上升过程中遭受了地壳混染,因为上地壳具有相对贫 Nb-Ta,富集 Zr-Hf 的特征。

Lassiter 等^[23]研究表明,某些不相容元素因具有相似的分配系数(如 La 和 Sm),其比值不受分离结晶作用的影响,故其可以用来指示源区特征。在 $\text{La}/\text{Sm} - \text{Sm}/\text{Yb}$ (图 7a)中,该地区基性岩主要是尖晶石橄榄岩相以及少量石榴子石橄榄岩相发生 5%~10% 的部分熔融岩浆产物。在 $(\text{La}/\text{Sm})_N - (\text{Sm}/\text{Yb})_N$ 图解(图 7b)中显示,本区玄武岩和辉绿岩样品分布于尖晶石相稳定域,比桂西地区分布的其他基性岩源区(位于石榴子石稳定域)更浅^[16, 24]。越来越多的证据表明大多数喷出岩和侵入岩的成分是不同深度地幔源区的部分熔融岩浆的混合^[25]。此外,与 OIB 特征相比,区内基性岩石具有相对富集的重稀土元素特征(图 5),可

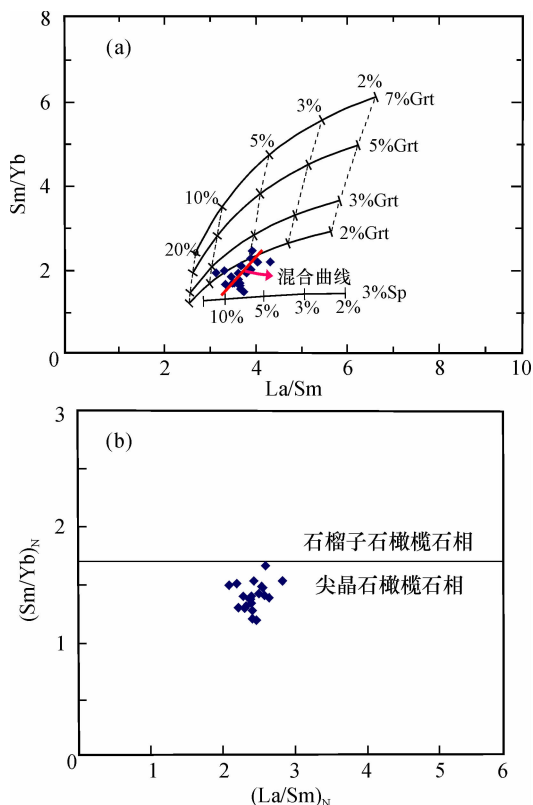


图7 德峨地区基性岩 $\text{La}/\text{Sm} - \text{Sm}/\text{Yb}$ 图(a)与 $(\text{La}/\text{Sm})_N - (\text{Sm}/\text{Yb})_N$ 图(b)

(a. 底图据文献[34~35])及 $(\text{La}/\text{Sm})_N - (\text{Sm}/\text{Yb})_N$;
b. 底图据文献[34])

Fig. 7 Diagrams of $\text{La}/\text{Sm} - \text{Sm}/\text{Yb}$ (a) and $(\text{La}/\text{Sm})_N - (\text{Sm}/\text{Yb})_N$ (b) for De'e mafic rocks

进一步暗示其原始岩浆起源于较浅的地幔源区。综上所述,这类桂西玄武岩和辉绿岩是来自较浅地幔低程度部分熔融的产物。

5.2 基性岩的时代及与峨眉山大火成岩省的关系

德峨地区基性岩的锆石 U-Pb 年龄分别为:龙保山辉绿岩的谐和年龄为 259.9 ± 1.1 Ma,小帽上辉绿岩的谐和年龄为 258.6 ± 2.3 Ma,老山神玄武岩的谐和年龄为 261.0 ± 2.4 Ma。基性岩的形成时代约为 260 Ma,为中二叠世—晚二叠世的岩浆产物,与广西其他地区的基性岩的年龄(259~263 Ma)一致^[12, 15, 27~28]。同时与峨眉山大火成岩省的形成时代(~ 260 Ma)^[10, 26, 29]较好的吻合,可能为峨眉山大火成岩省组成部分,指示峨眉山大火成岩省延伸到本区。

Chung 等^[36]提出峨眉山大火成岩省是由于地幔柱成因,并认为峨眉山大火成岩省是地幔柱和少量岩石圈地幔混合的产物。Song 等^[37]提出云南东川地区的碱玄武岩是交代岩石圈地幔部分熔融的

产物。岩石圈地幔是难熔的,但在新元古代,扬子克拉通西缘曾遭受特提斯洋壳的俯冲^[38],消减板块的流体或者熔体可能交代岩石圈地幔,形成富集地幔源区(例如辉石岩、二辉橄榄岩),并且使岩石圈地幔的固相线降低。Xu等^[29]认为地幔柱在上升过程中,不仅提供热源,使上地幔部分熔融,而且间接性的热也会使交代的岩石地幔部分熔融。从地理位置上看,地幔柱头位于云南丽江一带^[22],而桂西地区位于峨眉山大火成岩省的外带^[39],使得桂西地区的岩石圈地幔吸收传导热发生部分熔融。

综合年代学证据、岩石地球化学及地理位置特征,该基性岩可能是地幔柱活动,导致交代岩石圈地幔部分熔融上升侵位,因此该区基性岩是峨眉山大火成岩省的产物。本次研究成果也为重新界定峨眉山大火成岩省的分布范围提供新的信息。

6 结 论

(1) 德峨地区分布的玄武岩和辉绿岩中的锆石 U-Pb 年龄约为 258.6~261.0 Ma,与峨眉山大火成岩省的主喷发期年龄一致,可能是地幔柱衍生的产物。

(2) 德峨地区基性岩具有较低的 $Mg^\#$ 值、Cr 和 Ni 含量,暗示其是地幔原始岩浆演化的产物。依据不相容元素比值(如 La/Sm 和 Sm/Yb),得出其来自浅部地幔尖晶石橄榄岩相 5%~10% 部分熔融的产物。

参考文献:

- [1] 广西壮族自治区区域测量队第五分队. 1:20万西林幅区域地质测量报告[R]. 南宁:广西壮族自治区地质矿产勘查开发局, 1972.
- [2] 广西壮族自治区地质矿产局. 广西壮族自治区区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1985.
- [3] 范蔚茗, 王岳军, 彭头平, 等. 桂西晚古生代玄武岩 Ar-Ar 和 U-Pb 年代学及其对峨眉山玄武岩省喷发时代的约束[J]. 科学通报, 2004, 49(18): 1892-1900.
- [4] 吴浩若, 邝国敦, 王忠诚. 桂西晚古生代基性岩的再认识及其大地构造意义[J]. 地质科学, 1993, 28(3): 288~289.
- [5] 王忠诚, 吴浩若, 邝国敦. 桂西晚古生代海相玄武岩的特征及其构造环境[J]. 岩石学报, 1997, 13(2): 260~265.
- [6] 张旗, 钱青, 王焰, 等. 扬子地块西南缘晚古生代基性岩浆岩的性质与古特提斯洋的演化[J]. 岩石学报, 1999, 15(4): 576-583.
- [7] 李政林, 刘希军, 许继峰, 等. 右江盆地基性岩的地球化学演化特征及其区域构造意义[J]. 桂林理工大学学报, 2015, 35(4): 727-735.
- [8] 陈雪峰, 刘希军, 许继峰, 等. 桂西那坡基性岩地球化学: 峨眉山地幔柱与古特提斯俯冲相互作用的证据[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(3): 531-548.
- [9] 邓发亮, 姚野, 刘希军, 等. 桂西隆林-西林地区辉绿岩成因: 峨眉山地幔柱外带岩浆作用的启示[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(2): 231-244.
- [10] Ali J R, Thompson G M, Song X Y, et al. Emeishan basalts (SW China) and the 'end-Guadalupian' crisis: magnetobiostratigraphic constraints[J]. Journal of the Geological Society, 2002, 159(1): 21-29.
- [11] Deng Y F, Zhang Z J, Mooney W, et al. Mantle origin of the Emeishan large igneous province (South China) from the analysis of residual gravity anomalies[J]. Lithos, 2014, 204: 4-13.
- [12] Fan W M, Zhang C H, Wang Y J, et al. Geochronology and geochemistry of Permian basalts in western Guangxi Province, Southwest China: evidence for plume-lithosphere interaction[J]. Lithos, 2008, 102: 218-236.
- [13] He B, Xu Y G, Campbell I. Pre-eruptive uplift in the Emeishan? [J]. Nature Geoscience, 2009, 2: 530-531.
- [14] Xu Y G, He B, Chung S L, et al. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province[J]. Geology, 2004, 32(10): 917-920.
- [15] Zhou M F, Zhao J H, Qi L, et al. Zircon U-Pb geochronology and elemental and Sr-Nd isotope geochemistry of Permian mafic rocks in the Funing area, SW China[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2005, 151: 1-19.
- [16] Liu X J, Liang Q D, Li Z L, et al. Origin of Permian extremely high Ti/Y mafic lavas and dykes from Western Guangxi, SW China: implications for the Emeishan mantle plume magmatism[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 141: 97-111.
- [17] 殷保安, 陈建, 潘罗忠, 等. 广西壮族自治区地质矿产局. 广西壮族自治区岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
- [18] Sláma J, Košler J, Condon D J, et al. Plešovice zircon: a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. Chemical Geology, 2008, 249: 1-35.
- [19] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb[J]. Chemical geology, 2002, 192: 59-79.
- [20] Ludwig K. User's manual for Isoplot/Ex version 3.70: a geochronology toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronological Center, Special Publication, 2003, 4: 1-70.
- [21] Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18: 423-439.
- [22] Zhang Z C, Zhi X C, Chen L, et al. Re-Os isotopic compositions of picrites from the Emeishan flood basalt province, China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 276: 30-39.
- [23] Lassiter J C, DePaolo D J. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: chemical and isotope constraints[M] // Mahoney J J, Coffin M F. Large igneous provinces: continental, oceanic, and planetary flood volcanism. Geophysical Monograph 100, American Geophysical Union, 1997: 335-355.

- [24] 黄文龙, 刘希军, 时毓, 等. 桂西巴马地区极高 Ti/Y 值基性岩地球化学特征——来自峨眉山幔柱高 Ti 母岩浆? [J]. 地质通报, 2015, 34 (2-3): 474-486.
- [25] Kamenetsky V S, Chung S L, Kamenetsky M B, et al. Picrites from the Emeishan large igneous province, SW China: a compositional continuum in primitive magmas and their respective mantle sources [J]. *Journal of Petrology*, 2012, 53 (10): 2095-2113.
- [26] Zhou M F, Arndt N T, Malpas J, et al. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China [J]. *Lithos*, 2008, 103: 352-368.
- [27] Fan W M, Wang Y J, Peng T P, et al. Ar-Ar and U-Pb geochronology of Late Paleozoic basalts in western Guangxi and its constraints on the eruption age of Emeishan basalt magmatism [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49 (21): 2318-2327.
- [28] 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.
- [29] Xu Y G, Luo Z Y, Huang X L, et al. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72: 3084-3104.
- [30] 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: 525-546.
- [31] 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: 145-168.
- [32] Wang M X, Nebel O, Wang C Y. The flaw in the crustal 'zircon archive': mixed Hf isotope signatures record progressive contamination of late-stage liquid in mafic-ultramafic layered intrusions [J]. *Journal of Petrology*, 2016, 57 (1): 27-52.
- [33] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [M] // Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. London: Geological Society Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [34] Wang K, Plank T, Walker J D, et al. A mantle melting profile across the Basin and Range, SW USA [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B1): ECV 5-1-ECV 5-21.
- [35] Wei X, Xu Y G, Zhang C L, et al. Petrology and Sr-Nd isotopic disequilibrium of the Xiaohaizi intrusion, NW China: genesis of layered intrusions in the Tarim large igneous province [J]. *Journal of Petrology*, 2014, 55 (12): 2567-2598.
- [36] Chung S L, Jahn B M. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary [J]. *Geology*, 1995, 23 (10): 889-892.
- [37] Song X Y, Qi H W, Robinson P T, et al. Melting of the subcontinental lithospheric mantle by the Emeishan mantle plume: evidence from the basal alkaline basalts in Dongchuan, Yunnan, Southwestern China [J]. *Lithos*, 2008, 100: 93-111.
- [38] Song X Y, Zhou M F, Hou Z Q, et al. Geochemical constraints on the mantle source of the upper Permian Emeishan continental flood basalts, southwestern China [J]. *International Geology Review*, 2001, 43: 213-225.
- [39] He B, Xu Y G, Chung S L, et al. Sedimentary evidence for a rapid, kilometer-scale crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 213: 391-405.

Petrogenesis and geological significance of mafic rock in De'e area of the western Guangxi

LI Xing-peng, CHEN Zhong-bin, WEI Jian-wei, YU Shu-qing, LIU Wu-wen, LU Gan-qiang
(No. 4 Geological Team of Guangxi, Nanning 530033, China)

Abstract: The mafic rocks are extensively distributed in the De'e area of the western Guangxi. The geochemistry analyses and zircon U-Pb dating by LA-ICP-MS technology provide an effective approach to find out the relationship of the petrography, geochemistry and the age of these rocks, and further to understand the relation among the magmatic evolution, tectonic environment, magmatic activity and the metallogenic processes. The rocks contain low SiO₂ contents (42.52% - 48.09%), Mg[#] values (0.34 ~ 0.50), Cr and Ni contents (21.77 × 10⁻⁶ to 202.2 × 10⁻⁶ and 47.87 × 10⁻⁶ to 122 × 10⁻⁶) respectively, and high Fe₂O₃ (11.89% - 17.06%) and Al₂O₃ (14.39% - 17.04%) contents, implying the evolution and suffering crustal contamination. Combined with the ratios of incompatible elements (such as La/Sm and Sm/Yb), it is concluded that the magma originates from 5% - 10% partial melting of the shallow spinel peridotite mantle. The zircon grains from Longbaoshan dolerites, Xiaomaoshang dolerites and Laoshanshen basalts yield U-Pb concordant age of 259.9 ± 1.1 Ma, 258.6 ± 2.3 Ma and 261.0 ± 2.4 Ma respectively. Our researches suggest a larger distribution of ELIP than previous finding and provide a direct evidence for refining the extent of the ELIP.

Key words: mafic rocks; zircon U-Pb dating; De'e area; geochemistry; Emeishan large igneous province