

# 越南西北部莱州地区新生代煌斑岩地球化学特征及其成因\*

杨一增<sup>1</sup> 龙群<sup>1</sup> 胡焕婷<sup>1</sup> HIEU Pham Trung<sup>2</sup> NGUYEN Thi Bich Thuy<sup>3</sup> 陈福坤<sup>1\*\*</sup>  
 YANG YiZeng<sup>1</sup>, LONG Qun<sup>1</sup>, HU HuanTing<sup>1</sup>, HIEU Pham Trung<sup>2</sup> NGUYEN Thi Bich Thuy<sup>3</sup> and CHEN FuKun<sup>1\*\*</sup>

1. 中国科学技术大学地球与空间科学学院 壳幔物质与环境重点实验室, 合肥 230026

2. Department of Geology, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

3. Research Institute of Geology and Mineral Resources, Hanoi, Vietnam

1. Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2. Department of Geology, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

3. Research Institute of Geology and Mineral Resources, Hanoi, Vietnam

2012-07-30 收稿, 2012-10-02 改回.

**Yang YZ, Long Q, Hu HT, Hieu PT, Nguyen TBT and Chen FK. 2013. Geochemical characteristics and origin of lamprophyre in the Laichau area, northwestern Vietnam. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3):899–911**

**Abstract** Cenozoic lamprophyre dykes exposed in the Laichau area of northwestern Vietnam hold geological significances for understanding geochemical features and evolution of deep lithosphere in the eastern part of the Tethyan orogenic belt. This study reports geochemical and Sr-Nd-Pb radiogenic isotopic composition of lamprophyre dykes from the Laichau area and discuss their petrogenesis and geological implications. Lamprophyre samples reported here are of calc-alkaline and potassic to ultra-potassic characteristics in major element contents. When compared with relating rocks in the neighbouring areas, lamprophyre dykes from the Laichau area are similar in geochemical composition with alkalic rocks in the Ailaoshan fault zone, but considerable different from volcanic rocks exposed in Hainan and southern Vietnam. The Laichau lamprophyre dykes show enriched isotopic feature of high  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios, low  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  ratios and high radiogenic Pb isotopic composition. Evidence of trace element contents from these lamprophyre samples indicates that the magma source of the lamprophyre dykes likely suffered metasomatic processes or input of sedimentary components before partial melting of the mantle. Low  $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$  ratios of lamprophyre samples imply that enrichment of the mantle source producing the Laichau lamprophyre dykes took place recently, probably related to amalgamation of the Indochina block to the Yangtze block during the Late Paleozoic to Early Mesozoic.

**Key words** NW Vietnam; Cenozoic; Lamprophyre; Geochemistry; Sr-Nd-Pb isotopes

**摘要** 越南西北部莱州地区出露的新生代煌斑岩岩脉对理解特提斯造山带东段的深部岩石圈特征和演化具有重要的地质意义。本文报道莱州地区煌斑岩的元素地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素组成特征, 探讨其岩石成因。该地区煌斑岩属于钙碱性, 钾质-超钾质煌斑岩特征。地球化学特征对比表明, 莱州地区煌斑岩与哀牢山断裂带碱性岩具有相似的地球化学特征, 但与海南和越南南部火山岩存在明显差异。分析结果表明, 煌斑岩具有高的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值、低  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比值和高放射性成因 Pb 同位素组成特征。岩石的微量元素组成特征指示, 形成煌斑岩的地幔源区可能经历过流体交代作用或沉积物组分的加入。低  $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$  比值暗示地幔源区富集事件是近期发生的, 可能与晚古生代-早中生代印支地块向扬子地块俯冲事件有关。

**关键词** 越南西北部; 新生代; 煌斑岩; 地球化学; Sr-Nd-Pb 同位素

中图法分类号 P588.15

\* 本文受国家自然科学基金项目(41090372、40973042)资助。

第一作者简介: 杨一增, 男, 1986 生, 博士生, 地球化学专业, E-mail: yyzeng@mail.ustc.edu.cn

\*\* 通讯作者: 陈福坤, 男, 教授, 地球化学专业, E-mail: fkchen@ustc.edu.cn

莱州地区 (Laichau) 位于越南西北部哀牢山-红河断裂带以南、马江断裂带以北秀丽盆地和沱江裂谷之间, 该地区的岩石圈演化历史类似于滇西地区, 经历了原特提斯阶段、古特提斯阶段和新特提斯阶段复杂的地质历史。在新生代时期, 随着新特提斯洋的闭合, 该地区的大地构造环境转为陆内演化阶段, 发育大面积的碱性岩体和晚期的煌斑岩脉。对于新生代的岩石圈地幔演化的研究是地学研究的热点问题之一, 对滇西地区岩石圈地幔性质的研究已有多篇文献报道 (朱炳泉和毛存孝, 1983; 朱炳泉等, 1992; Zhang and Xie, 1997; 钟大赟, 1998; 李献华等, 2002; Chen *et al.*, 2002), 但是, 对于越南西北部地区幔源岩石的研究程度并不高。

了解深部地幔的特征和演化, 通常利用幔源岩石 (如: 金伯利岩、辉长岩、基性脉岩) 的研究获得的。煌斑岩是一类暗色、浅成的火成岩 (Wimmenauer, 1973; Rock, 1977; Rock *et al.*, 1991), 广泛分布在不同的构造环境中 (Rock *et al.*, 1991; Shand *et al.*, 1994; Duggan and Jaques, 1996; Madhavan *et al.*, 1998; Shappard and Taylor, 1992)。一般认为, 其来自于岩石圈地幔, 因而, 是研究岩石圈地幔性质较好的研究对象, 又由于其可能与金矿之间的密切关系, 近年来也受到了广泛的关注 (Rock *et al.*, 1991; Huang *et al.*, 2002)。本文分析来自越南西北部莱州地区秀丽盆地和沱江裂谷带之间的 13 个煌斑岩样品, 利用主量、微量元素和 Sr-Nd-Pb 同位素组成特征, 探讨该地区煌斑岩的岩石成因及其对越南西北部地区新生代岩石圈地幔性质和演化过程提供制约。

## 1 地质背景和煌斑岩

在地质上, 越南西北部地区位于华南地块南缘, 印支地块以北, 地质历史复杂, 通常被认为是“西北部褶皱带” (Dovjikov, 1965)、“北部褶皱带” (Tri, 1977) 或“中越地台” (Luong and Nguyen, 1982)。区内发育多条 NW-SE 向断裂带, 从东北到西南方向, 主要有齐江断裂带、红河断裂带、沱江 (黑水河) 断裂带和马江断裂带组成 (图 1)。奠边府-莱州断裂带是一条近南北向断裂。部分学者认为马江缝合带原先应该与哀牢山缝合带相连, 在新生代时期右行平移作用可能将两边地体错移了大约 45 ~ 50km (如: 刘俊来等, 2011)。

最近的年代学研究表明, 印支地块可能在晚太古代-早新生代已经位于扬子地块附近 (Hieu *et al.*, 2009), 一直到早古生代时期哀牢山构造带的大地构造属性与扬子华南地区依然具有密切的亲缘关系 (Leloup *et al.*, 1993; 刘俊来等, 2011)。随后在晚古生代-早中生代时期古特提斯洋的打开, 一直发育稳定的海相沉积地层。在三叠纪发生印支地块与扬子地块的碰撞和拼接作用以后, 该地区转化为陆内演化阶段。在喜马拉雅造山时期, 印度板块与欧亚大陆发生碰撞和挤压, 隆升形成青藏高原, 对中国西南部及周边地区大陆岩石圈产生重要改变 (钟大赟, 1998; Wang *et al.*, 2001)。

沱江裂谷带 (Song Da) 和秀丽盆地 (Tu Le) 位于两条超深走滑断裂带, 哀牢山-红河断裂带和马江断裂带 (图 1)

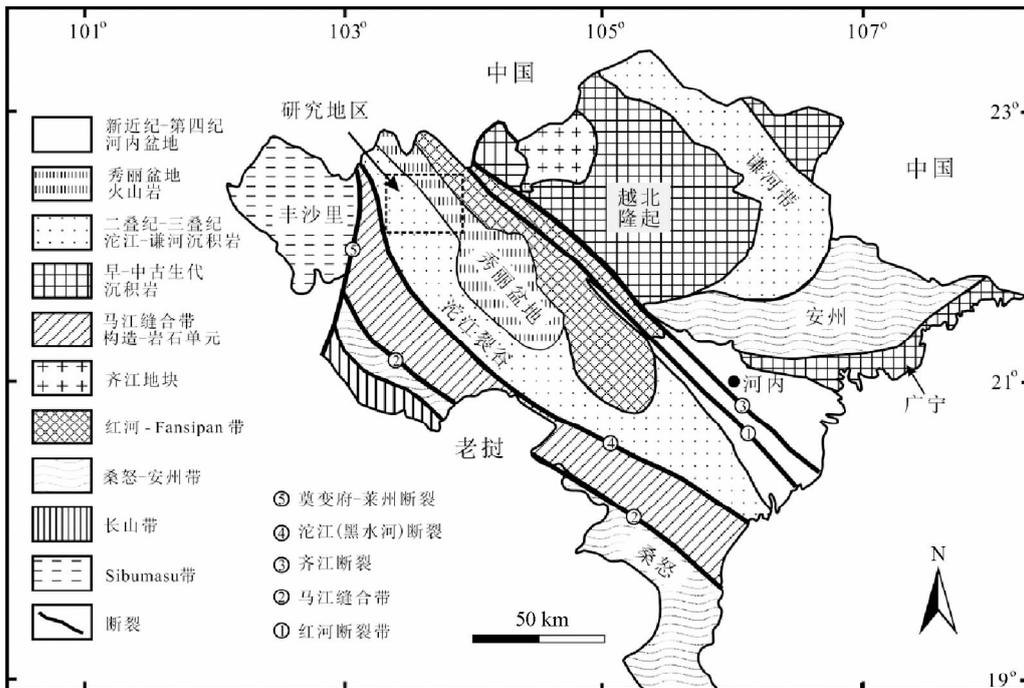


图 1 越南北部地质略图 (根据 Tri, 1977 修改)

Fig. 1 Sketch geological map of northern Vietnam (after Tri, 1977)

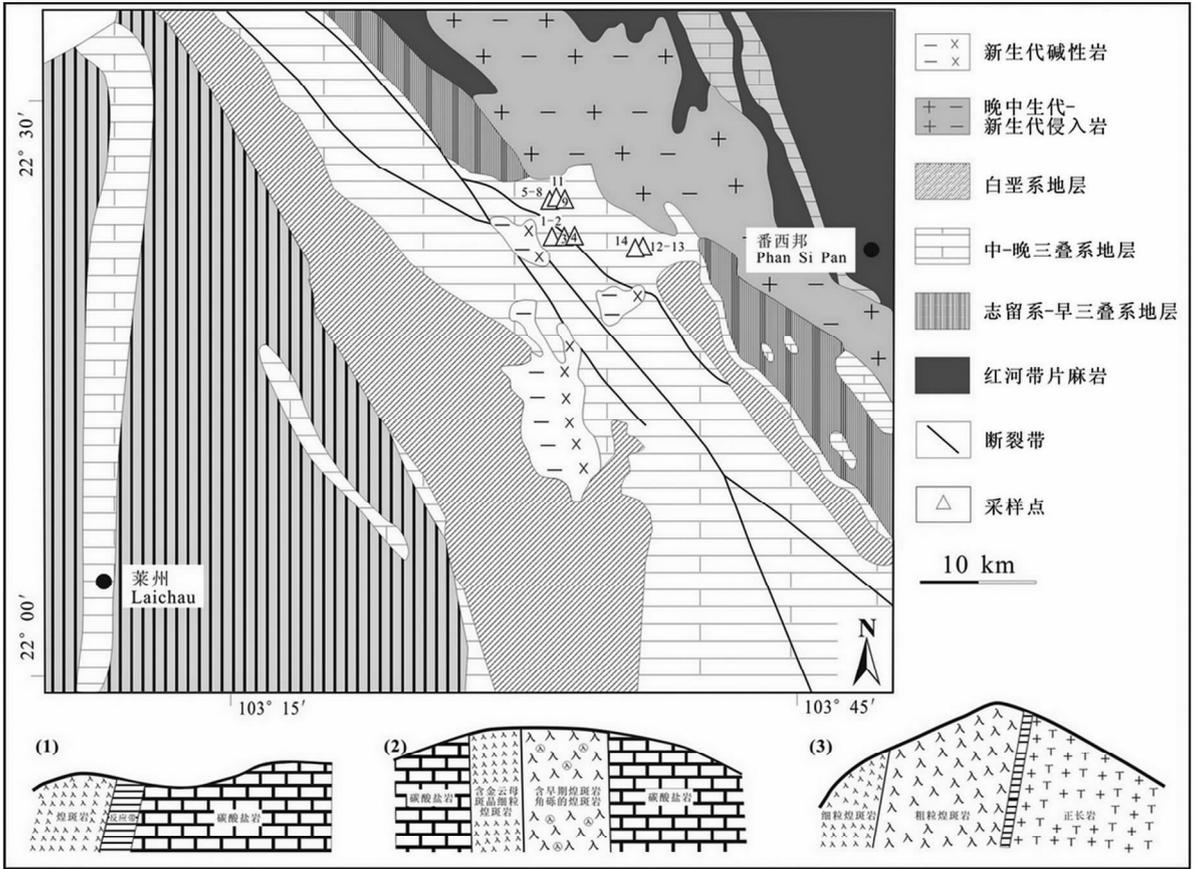


图2 越南西北部莱州地区地质简图、采样位置及煌斑岩与围岩的侵位关系示意图

Fig.2 Sketch geological map of the Laichau area, NW Vietnam, showing the sample localities and contact relationship between lamprophyres and country rocks

之间,区内发育众多次级走滑断层,多呈 NW-SE 向展布。沱江裂谷带的岩石学组成、成因、时代以及变形特征复杂,包括高级变质的早古生代陆源碳酸盐岩沉积、晚古生代-早中生代双峰式火山岩夹厚层陆源碳酸盐岩和晚中生代陆相红层沉积。莱州地区位于秀丽盆地和沱江裂谷带之间,红河裂谷带西南部(图2),发育自早古生代到早中生代的海相碳酸盐岩沉积和晚中生代的陆相火山岩沉积,并有侵入于前寒武纪基底的双峰式火山岩、广泛发育新生代碱性岩和煌斑岩脉。

莱州地区煌斑岩在野外呈脉状产出,宽约有几米到几十米,侵入到中、晚三叠系碳酸盐岩地层或新生代碱性岩中(图2),说明煌斑岩侵入时代较碱性岩稍晚。根据最近的碱性岩年代学报道,其锆石 U-Pb 年龄为 ~35Ma (Zelazniewicz *et al.*, 2012) 和  $32.7 \pm 0.4$  Ma (Tran *et al.*, 2010), 因此,可以判断煌斑岩的侵入/喷出时代应在 35Ma 之后。红河断裂带与印度板块拼贴事件相关的左行平移时间约为 17Ma (Tapponnier *et al.*, 1986), 随后的断裂带在 ~5Ma (Leloup *et al.*, 1993) 重新活动转化成右行平移断层。因此,推断煌斑岩的形成时间应在 30 ~ 5Ma 之间。

煌斑岩呈灰褐色、块状构造,在显微镜下主要矿物为金

云母、辉石(主要是透辉石和普通辉石)、橄榄石,副矿物主要是磁铁矿(图3a, b)。大部分岩石有相似的矿物成分,具有煌斑结构,斑晶主要为金云母(10% ~ 15%)、辉石(5% ~ 10%)和橄榄石(5% ~ 10%),基质中主要为钾长石(30% ~ 40%)、辉石(15%)和橄榄石(5%)。斑晶矿物表现出略微定向,基质矿物围绕斑晶表现出一定的流动构造。煌斑岩是一种分布很广泛的岩石,多呈岩脉、岩墙、岩床产出,岩体一般规模不大,岩石往往遭受风化或蚀变作用,主要有蛇绿岩化、碳酸盐化、硅化等。越南西北部莱州地区煌斑岩在野外成脉状产出,围岩主要是碳酸盐岩和正长岩,发育明显的反应带(图2)。在样品 L1212 和 L1213 中,可以观察到明显的碳酸盐化影响(图3c, d),在显微镜下可见方解石矿物,样品边界较为浑浊,其他样品蚀变较弱。

## 2 分析方法

岩石粉末的主量元素含量测试工作在中国科学院地质与地球物理研究所元素分析实验室完成。氧化物采用 X 射线荧光光谱仪 XRF-1500 测定,烧失量采用重量法测定,分析精度优于 1%。微量元素含量测试工作在中国科学技术大学

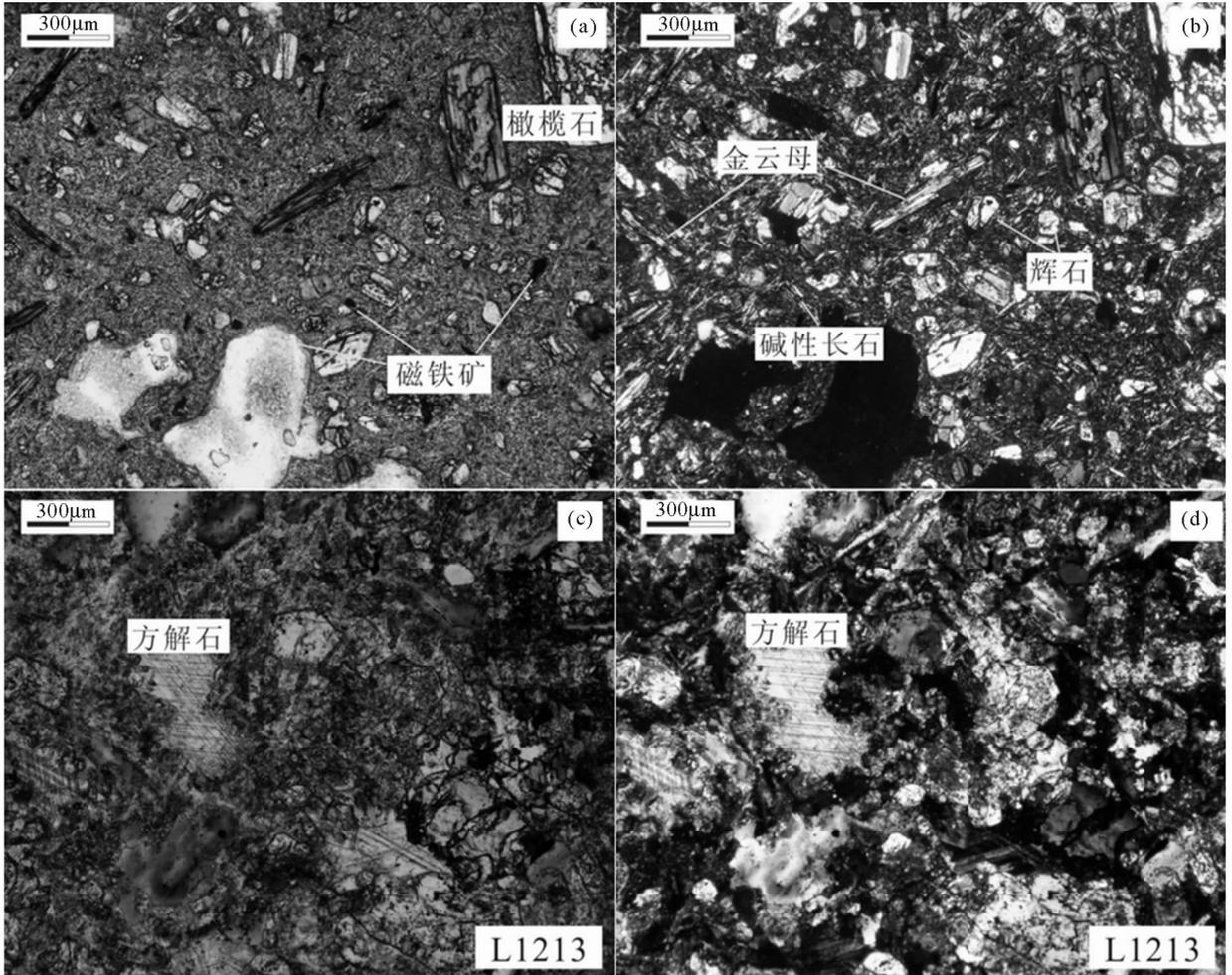


图3 莱州地区煌斑岩显微结构照片

图a、b为大部分样品特征,其中a为单偏光,b为正交偏光;图c、d为代表性碳酸盐蚀变样品(L1213),其中c为单偏光,d为正交偏光

Fig.3 Micro-structures of lamprophyres from the Laichau area

ICP-MS 实验室完成。准确地称取烘干后的 50mg 岩石粉末于聚四氟乙烯熔样弹中,加入 1.5mL  $\text{HNO}_3$ 、1.5mL HF 和 0.01mL  $\text{HClO}_4$ ,置于电热板上 140℃ 蒸至湿盐状;再加入  $\text{HNO}_3$  和 HF 各 1.5mL,加钢套密封,于 190℃ 置于烘箱中加热 48h,以保证样品完全溶解。冷却后,在电热板上 140℃ 蒸干,加入 3mL  $\text{HNO}_3$  蒸至湿盐状,再加入 3mL 50%  $\text{HNO}_3$ ,加钢套密封后于 150℃ 置于烘箱中加热 12h。冷却后转移至干净 PET 瓶中加入 Rh 内标溶液,并用去离子水稀释至 80g,使得溶液中的 Rh 浓度大致为 10ng/mL,使用 ICP-MS 分析。

Sr-Nd-Pb 同位素分析在中国科学技术大学放射性成因同位素地球化学实验室完成。准确地称取粉末样品 100mg 左右于 15mL 的 Teflon 闷罐中,滴入纯化  $\text{HClO}_4$  酸 8~10 滴摇匀后,加入 2~3mL 纯化 HF 酸,密闭加热一周左右以充分溶解样品。在样品溶解后,采用阴离子交换树脂 (AG 1×8) 分离纯化 Pb 元素,采用阳离子交换树脂 (AG 50W×12) 将 Rb、Sr 和稀土元素分离。在含有 HDEHP 萃取剂和 2-乙基己

基-正磷酸的聚四氟乙烯粉末分离纯化 Nd 和 Sm。详细的同位素分析流程可以参见 Chen *et al.* (2002, 2007)。同位素比值测试在 MAT-262 质谱计上完成。Sr 和 Nd 同位素比值分别被校正到  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$  和  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 。标准溶液 NBS987 的重复测量结果为  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710249 \pm 0.000012$  ( $2\sigma$ ,  $n=38$ ),标准溶液 La Jolla 的重复测量结果为  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511869 \pm 0.000006$  ( $2\sigma$ ,  $n=25$ )。Sr 和 Nd 同位素比值测量精度优于 0.003%, Pb 同位素比值测量精度好于 0.01%。

### 3 分析结果

#### 3.1 元素地球化学组成

本文分析测试了 13 个煌斑岩全岩样品的主量元素和微量元素含量,分析数据列于表 1 中。从表中数据可以看出,煌斑岩的烧失量变化较大 (0.32% ~ 9.95%, 平均值 2.68%), 表明煌斑岩富集挥发分且存在差异性。煌斑岩的

表1 煌斑岩样品的主量元素(wt%)和微量元素( $\times 10^{-6}$ )含量Table 1 Major (wt%) and trace ( $\times 10^{-6}$ ) element contents of lamprophyre samples

| 样品号   | L1201 | L1202 | L1203 | L1204 | L1205 | L1206 | L1207 | L1208 | L1209 | L1211 | L1212 | L1213 | L1214 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>                            | 51.39 | 49.24 | 51.98 | 51.37 | 55.02 | 55.50 | 55.34 | 54.49 | 53.04 | 51.81 | 46.42 | 48.24 | 49.86 |
| TiO <sub>2</sub>                            | 0.68  | 0.59  | 0.68  | 0.61  | 0.61  | 0.78  | 0.77  | 0.78  | 0.72  | 0.66  | 0.68  | 0.67  | 0.68  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>              | 11.55 | 10.34 | 11.83 | 10.75 | 9.71  | 12.63 | 11.52 | 12.22 | 12.09 | 10.86 | 9.07  | 9.49  | 11.15 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup> | 8.77  | 9.22  | 8.55  | 8.87  | 5.11  | 7.32  | 7.12  | 7.49  | 6.82  | 7.53  | 6.86  | 6.60  | 8.21  |
| MnO   | 0.14  | 0.14  | 0.14  | 0.15  | 0.14  | 0.18  | 0.14  | 0.11  | 0.16  | 0.10  | 0.12  | 0.11  | 0.13  |
| MgO   | 11.22 | 12.55 | 10.95 | 12.78 | 5.35  | 5.87  | 7.26  | 6.64  | 11.00 | 10.38 | 9.77  | 9.36  | 12.66 |
| CaO   | 7.22  | 9.18  | 6.47  | 6.70  | 7.01  | 6.64  | 7.11  | 5.98  | 4.83  | 6.94  | 13.33 | 12.58 | 6.88  |
| Na <sub>2</sub> O                           | 2.24  | 1.10  | 2.53  | 1.82  | 1.00  | 2.77  | 2.21  | 1.93  | 2.35  | 1.92  | 0.43  | 0.50  | 1.45  |
| K <sub>2</sub> O                            | 4.93  | 5.36  | 5.40  | 5.18  | 5.73  | 5.56  | 5.70  | 6.06  | 4.82  | 4.58  | 5.45  | 5.91  | 6.09  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>               | 0.53  | 0.61  | 0.62  | 0.68  | 0.57  | 0.65  | 0.87  | 0.74  | 0.73  | 0.64  | 0.51  | 0.52  | 0.72  |
| LOI   | 0.82  | 1.02  | 0.32  | 0.52  | 9.95  | 1.82  | 1.78  | 3.00  | 3.26  | 4.36  | 3.46  | 2.92  | 1.60  |
| Total                                       | 99.49 | 99.34 | 99.47 | 99.43 | 100.2 | 99.72 | 99.82 | 99.44 | 99.82 | 99.78 | 96.10 | 96.90 | 99.43 |
| Li  | 11.9  | 20    | 17.4  | 19    | 23    | 15.8  | 14.6  | 13    | 26    | 21.3  | 41.5  | 27.9  | 74.8  |
| Be  | 5.06  | 5.15  | 4.8   | 4.96  | 5.66  | 3.32  | 5.38  | 5.85  | 4.81  | 4.69  | 6.47  | 6.32  | 5.98  |
| Sc  | 21.8  | 21.7  | 19.9  | 24.1  | 20.7  | 16.9  | 17.5  | 20.3  | 15.7  | 17.9  | 15.1  | 14.7  | 18.8  |
| V   | 148   | 136   | 134   | 141   | 142   | 118   | 118   | 141   | 112   | 128   | 108   | 112   | 133   |
| Cr  | 722   | 1050  | 855   | 1182  | 418   | 255   | 227   | 171   | 851   | 578   | 668   | 745   | 1141  |
| Co  | 44.9  | 45    | 43.8  | 49    | 31.5  | 21    | 31.3  | 27.9  | 47.6  | 35.7  | 36.5  | 59.5  | 57.9  |
| Ni  | 194   | 269   | 249   | 313   | 78.8  | 64.2  | 55.9  | 46.7  | 412   | 214   | 194   | 192   | 333   |
| Cu  | 52.1  | 50.9  | 43.4  | 36.9  | 96.1  | 22.4  | 37.8  | 30.1  | 40    | 46.4  | 31    | 61.9  | 55.1  |
| Zn  | 67.5  | 70    | 70.6  | 75.5  | 48.4  | 76.6  | 75.3  | 73    | 67.2  | 63    | 65.1  | 96.4  | 75    |
| Ga  | 14.7  | 13.3  | 15.1  | 14.2  | 14.1  | 16.1  | 17.5  | 18.3  | 15    | 15    | 11.9  | 11.2  | 14    |
| Rb  | 206   | 192   | 273   | 282   | 347   | 220   | 229   | 384   | 116   | 196   | 347   | 280   | 285   |
| Sr  | 1798  | 1151  | 1174  | 986   | 672   | 1210  | 1299  | 836   | 1486  | 1523  | 1392  | 6373  | 1731  |
| Zr  | 165   | 153   | 161   | 165   | 166   | 220   | 220   | 222   | 193   | 161   | 130   | 119   | 198   |
| Nb  | 15.8  | 12.8  | 14.8  | 14.2  | 12.2  | 16.3  | 16.3  | 17    | 12.8  | 11.6  | 9.56  | 11.1  | 13.1  |
| Cs  | 7.79  | 7.06  | 12    | 7     | 7.63  | 3.72  | 3.68  | 117   | 2.3   | 11.8  | 6.75  | 4.94  | 39.1  |
| Ba  | 1569  | 1610  | 1725  | 1451  | 1612  | 1502  | 1945  | 1119  | 1710  | 2537  | 3870  | 3230  | 1866  |
| Hf  | 3.96  | 3.76  | 3.94  | 4     | 4.06  | 5.23  | 5.17  | 5.21  | 4.59  | 3.85  | 3.17  | 2.95  | 4.75  |
| Ta  | 0.95  | 0.79  | 0.91  | 0.86  | 0.8   | 1.04  | 1     | 1.01  | 0.71  | 0.68  | 0.59  | 0.57  | 0.73  |
| Pb  | 29.1  | 37.1  | 33.1  | 32.4  | 43.3  | 36.7  | 33.8  | 34    | 27.1  | 33.9  | 36.4  | 118   | 40.4  |
| Th  | 10.4  | 11.7  | 12.7  | 10.7  | 9.94  | 14.7  | 16.3  | 14.5  | 13.8  | 15.8  | 10.4  | 10.4  | 17.9  |
| U   | 3.38  | 3.99  | 3.99  | 3.49  | 3.39  | 2.87  | 3.87  | 3.57  | 3.05  | 4.29  | 2.88  | 4.71  | 5.14  |
| La  | 35.1  | 34.6  | 41.6  | 39.8  | 36    | 43.3  | 58.8  | 50.3  | 56.9  | 56.6  | 46.4  | 97.9  | 63    |
| Ce  | 69.7  | 67.3  | 80.1  | 73.9  | 65.3  | 87    | 117   | 102   | 114   | 105   | 77.6  | 126   | 117   |
| Pr  | 7.96  | 7.55  | 8.91  | 8.25  | 7.68  | 9.87  | 13.1  | 11.6  | 12.7  | 11.6  | 8.42  | 11.4  | 13.1  |
| Nd  | 32.6  | 30.6  | 35.8  | 32.6  | 31.9  | 40.8  | 52.6  | 46.9  | 50.4  | 45.6  | 33    | 39.9  | 51.5  |
| Sm  | 6.39  | 6.28  | 7.2   | 6.7   | 6.54  | 8.21  | 9.48  | 8.97  | 8.72  | 8.23  | 5.94  | 6.51  | 9.24  |
| Eu  | 1.52  | 1.55  | 1.83  | 1.64  | 1.64  | 2.01  | 2.38  | 2.18  | 2.15  | 2.07  | 1.65  | 1.78  | 2.34  |
| Gd  | 5.19  | 5.21  | 5.97  | 5.64  | 5.48  | 6.64  | 7.39  | 7.21  | 6.46  | 6.33  | 4.65  | 5.32  | 7.01  |
| Tb  | 0.73  | 0.73  | 0.84  | 0.82  | 0.78  | 0.91  | 0.96  | 0.97  | 0.79  | 0.81  | 0.61  | 0.66  | 0.89  |
| Dy  | 4.03  | 3.96  | 4.61  | 4.65  | 4.25  | 4.92  | 4.92  | 5.09  | 3.97  | 4.14  | 3.17  | 3.48  | 4.45  |
| Ho  | 0.75  | 0.73  | 0.84  | 0.87  | 0.78  | 0.89  | 0.85  | 0.91  | 0.67  | 0.72  | 0.56  | 0.63  | 0.75  |
| Er  | 2.16  | 2.07  | 2.44  | 2.54  | 2.21  | 2.49  | 2.34  | 2.51  | 1.79  | 1.97  | 1.59  | 1.8   | 2.03  |
| Tm  | 0.32  | 0.31  | 0.35  | 0.37  | 0.31  | 0.35  | 0.32  | 0.35  | 0.24  | 0.27  | 0.22  | 0.26  | 0.27  |
| Yb  | 2.04  | 2     | 2.31  | 2.39  | 2.04  | 2.23  | 2.01  | 2.27  | 1.54  | 1.68  | 1.43  | 1.66  | 1.7   |
| Lu  | 0.31  | 0.3   | 0.35  | 0.36  | 0.31  | 0.33  | 0.3   | 0.33  | 0.23  | 0.25  | 0.21  | 0.24  | 0.25  |
| Y   | 22.2  | 21.8  | 25.1  | 26.1  | 24.8  | 28.4  | 26.2  | 27.1  | 20    | 24    | 16.8  | 20.2  | 22.9  |
| ΣREE  | 191.0 | 185.0 | 218.2 | 206.6 | 190.0 | 238.4 | 298.6 | 268.7 | 280.6 | 269.3 | 202.2 | 317.7 | 296.4 |
| LREE/HREE                                   | 4.06  | 3.98  | 4.10  | 3.72  | 3.64  | 4.05  | 5.59  | 4.75  | 6.86  | 5.70  | 5.92  | 8.28  | 6.36  |
| δEu   | 0.81  | 0.83  | 0.86  | 0.82  | 0.84  | 0.84  | 0.87  | 0.83  | 0.88  | 0.88  | 0.97  | 0.93  | 0.89  |
| (La/Yb) <sub>N</sub>                        | 11.51 | 11.57 | 12.04 | 11.14 | 11.8  | 12.98 | 19.56 | 14.82 | 24.71 | 22.53 | 21.7  | 39.44 | 24.78 |
| (La/Sm) <sub>N</sub>                        | 3.39  | 3.4   | 3.57  | 3.67  | 3.4   | 3.25  | 3.83  | 3.46  | 4.03  | 4.24  | 4.82  | 9.28  | 4.21  |
| (Gd/Lu) <sub>N</sub>                        | 2.06  | 2.13  | 2.1   | 1.92  | 2.17  | 2.47  | 3.03  | 2.68  | 3.45  | 3.11  | 2.72  | 2.72  | 3.44  |
| Ce/Pb                                       | 2.40  | 1.81  | 2.42  | 2.28  | 1.51  | 2.37  | 3.46  | 3.00  | 4.21  | 3.10  | 2.13  | 1.07  | 2.90  |
| La/Nb                                       | 2.22  | 2.70  | 2.81  | 2.80  | 2.95  | 2.66  | 3.61  | 2.96  | 4.45  | 4.88  | 4.85  | 8.82  | 4.81  |
| Ba/Nb                                       | 99    | 126   | 117   | 102   | 132   | 92    | 119   | 66    | 134   | 219   | 405   | 291   | 142   |
| Nb/Y  | 0.71  | 0.59  | 0.59  | 0.54  | 0.49  | 0.57  | 0.62  | 0.63  | 0.64  | 0.48  | 0.57  | 0.55  | 0.57  |
| Zr/Hf                                       | 41.67 | 40.69 | 40.86 | 41.25 | 40.89 | 42.07 | 42.55 | 42.61 | 42.05 | 41.82 | 41.01 | 40.34 | 41.68 |
| Th/U  | 3.08  | 2.93  | 3.18  | 3.07  | 2.93  | 5.12  | 4.21  | 4.06  | 4.52  | 3.68  | 3.61  | 2.21  | 3.48  |
| Nb/U  | 4.67  | 3.21  | 3.71  | 4.07  | 3.60  | 5.68  | 4.21  | 4.76  | 4.20  | 2.70  | 3.32  | 2.36  | 2.55  |
| Nb/Th                                       | 1.52  | 1.09  | 1.17  | 1.33  | 1.23  | 1.11  | 1.00  | 1.17  | 0.93  | 0.73  | 0.92  | 1.07  | 0.73  |
| Ta/Th                                       | 0.091 | 0.068 | 0.072 | 0.080 | 0.080 | 0.071 | 0.061 | 0.070 | 0.051 | 0.043 | 0.057 | 0.055 | 0.041 |
| Rb/Sr                                       | 0.115 | 0.167 | 0.233 | 0.286 | 0.516 | 0.182 | 0.176 | 0.459 | 0.078 | 0.129 | 0.025 | 0.044 | 0.165 |
| Ba/Rb                                       | 7.62  | 8.38  | 6.32  | 5.14  | 4.65  | 6.83  | 8.49  | 2.91  | 14.7  | 12.9  | 11.2  | 11.5  | 6.55  |
| Mg <sup>#</sup>                             | 72    | 73    | 72    | 74    | 68    | 62    | 67    | 64    | 76    | 73    | 74    | 74    | 76    |

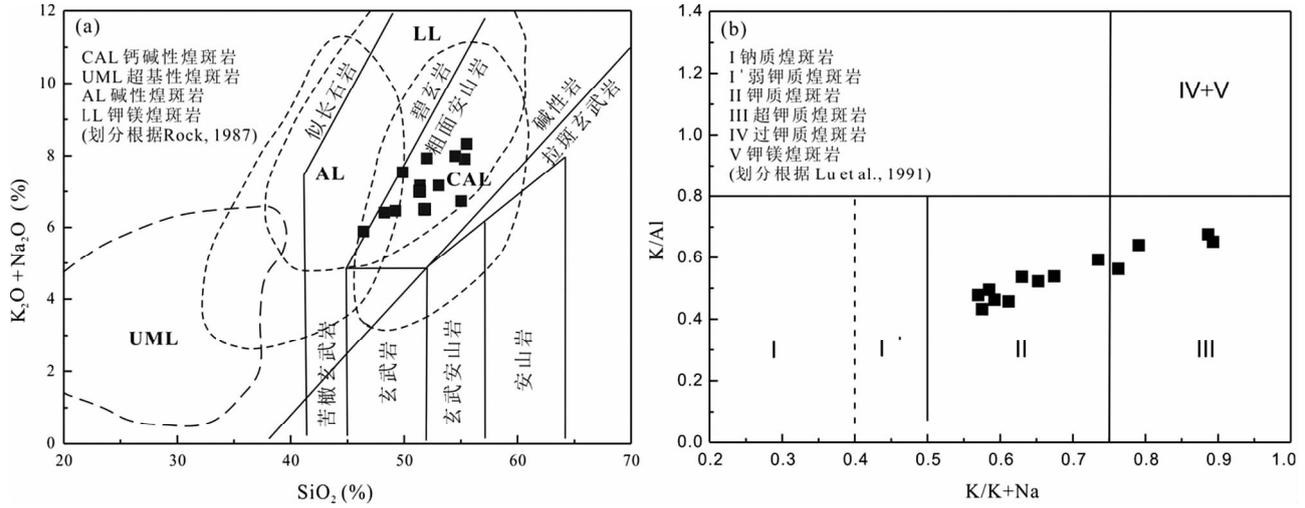


图4 莱州地区煌斑岩样品的 TAS 岩石分类图解(a)和  $K/Al$ - $K/(K+Na)$  图解(b)

Fig. 4 TAS classification diagram (a) and  $K/Al$ - $K/(K+Na)$  diagram (b) of lamprophyre samples from the Laichau area

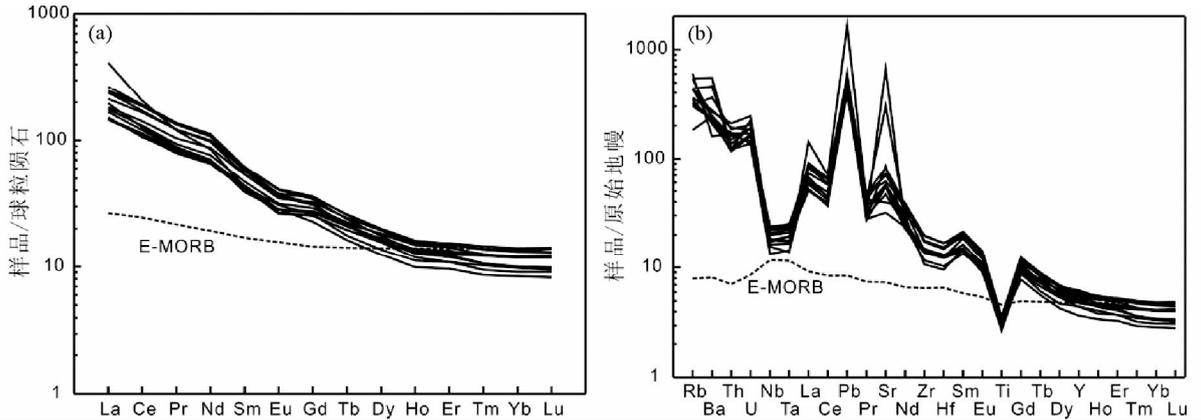


图5 莱州地区煌斑岩样品稀土元素球粒标准化配分图和微量元素地幔标准化蛛网图

球粒陨石标准化值和地幔标准化值分别引自 Taylor and McLennan (1985) 和 Sun and McDonough (1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns and primitive-mantle normalized trace element patterns of lamprophyre samples from the Laichau area

$SiO_2$  含量变化在 46.42% ~ 55.50% 之间, 平均值为 51.8%;  $K_2O + Na_2O$  平均值达 7.16%,  $K_2O$  含量为 4.58% ~ 6.09%, 平均值为 5.44%, 表明煌斑岩具有高碱、高钾的特征;  $MgO$  含量为 5.35% ~ 12.78%, 平均为 9.68%; 计算得到  $Mg^\#$  值为 62 ~ 76 (平均 71);  $Al_2O_3$  含量为 9.07% ~ 12.63%, 平均值为 11.02%。除了两个可能受到碳酸盐岩混染的样品外, 其他样品的  $K/Na$  比值在 2.2 ~ 5.7, 属于钾质-超钾质系列。在  $SiO_2$ - $(Na_2O + K_2O)$  图解和  $K/(K+Na)$ - $K/Al$  分类图上 (Rock *et al.*, 1991; 路凤香等, 1991), 莱州地区新生代煌斑岩落入钙碱性系列和钾质-超钾质煌斑岩的区域中 (图 4)。根据路凤香等 (1991) 总结的钾质和钠质煌斑岩矿物特征表也可得知, 钾质-超钾质煌斑岩的特征矿物组合为金云母-黑云母、透长石、透辉石-普通辉石及少量橄榄石、玻璃质等, 与显微镜下观察结果基本相符 (图 3a, b), 由此可以判断本文

报道的煌斑岩属于钾质-超钾质和钙碱性。

分析结果显示, 煌斑岩稀土元素含量总量较高,  $185 \times 10^{-6}$  ~  $318 \times 10^{-6}$ , 平均值  $243 \times 10^{-6}$ , 明显地高于洋中脊玄武岩的平均稀土元素总量 (Sun and McDonough, 1989), 其中 LREE 总含量为  $148 \times 10^{-6}$  ~  $283 \times 10^{-6}$ , HREE 总含量为  $29 \times 10^{-6}$  ~  $47 \times 10^{-6}$ , 这说明本区煌斑岩轻稀土含量具有较宽的变化范围, 而重稀土含量则相对稳定。轻重稀土存在明显分异, LREE/HREE 比值为 3.64 ~ 8.28, 平均值为 5.15,  $(La/Yb)_N$  值为 11.14 ~ 39.44, 平均值为 18.35, 明显富集轻稀土元素, 在稀土配分图上呈轻稀土富集型的分配模式 (图 5a);  $(La/Sm)_N$  值为 3.25 ~ 9.28, 平均值为 4.20;  $(Gd/Lu)_N$  值为 1.92 ~ 3.45, 平均值为 2.62, 反映轻稀土相对于重稀土有较大的分馏。煌斑岩  $\delta Eu$  值为 0.81 ~ 0.97, 平均值为 0.87, 反映岩浆演化过程中发生过斜长石分离结晶作用;  $\delta Ce$

表 2 煌斑岩样品 Sr-Pb 同位素组成

Table 2 Sr-Pb isotopic composition of lamprophyre samples

| 样品号   | $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (20Ma) | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ |
|-------|---------------------------------|---------------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| L1201 | 0.331                           | 0.706094                        | 0.7060                                 | 18.612                            | 15.595                            | 38.655                            | 0.99                                  |
| L1202 | 0.483                           | 0.706594                        | 0.7065                                 | 18.656                            | 15.598                            | 38.706                            | 0.99                                  |
| L1203 | 0.673                           | 0.707266                        | 0.7071                                 | 18.710                            | 15.623                            | 38.810                            | 0.99                                  |
| L1204 | 0.827                           | 0.706772                        | 0.7065                                 | 18.688                            | 15.649                            | 38.889                            | 1.00                                  |
| L1205 | 1.494                           | 0.707785                        | 0.7074                                 | 18.711                            | 15.642                            | 38.797                            | 0.99                                  |
| L1206 | 0.526                           | 0.707060                        | 0.7069                                 | 18.658                            | 15.622                            | 38.797                            | 1.00                                  |
| L1208 | 0.510                           | 0.707350                        | 0.7072                                 | 18.652                            | 15.620                            | 38.722                            | 0.99                                  |
| L1209 | 0.226                           | 0.706877                        | 0.7068                                 | 18.533                            | 15.598                            | 38.655                            | 0.99                                  |
| L1211 | 0.372                           | 0.706549                        | 0.7064                                 | 18.494                            | 15.590                            | 38.587                            | 0.99                                  |
| L1212 | 0.072                           | 0.707460                        | 0.7074                                 | 18.708                            | 15.649                            | 39.191                            | 1.03                                  |
| L1213 | 0.127                           | 0.707386                        | 0.7073                                 | 18.700                            | 15.641                            | 39.165                            | 1.03                                  |
| L1214 | 0.476                           | 0.706809                        | 0.7067                                 | 18.697                            | 15.655                            | 38.934                            | 1.01                                  |

注: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  测量精度( $2\sigma$ )好于  $1.2 \times 10^{-5}$ ; Pb 同位素比值测量精度( $2\sigma$ )好于 0.04%;  $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$  比值根据 Allègre *et al.* (1986) 计算得到; 样品  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  比值根据微量元素含量(表 1)和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  测量值计算得到

表 3 煌斑岩样品 Sm-Nd 同位素组成和模式年龄

Table 3 Sm-Nd isotopic composition and model ages of lamprophyre samples

| 样品号   | $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ | $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ | $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (20Ma) | $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ | $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (20Ma) | $t_{\text{DMI}}$ (Ga) | $t_{\text{DM2}}$ (Ga) |
|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|---------------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| L1201 | 0.1185                            | 0.512529                          | 0.512513                                 | -2.13                     | -1.92                            | 0.99                  | 1.01                  |
| L1202 | 0.1241                            | 0.512536                          | 0.512520                                 | -1.99                     | -1.80                            | 1.04                  | 1.00                  |
| L1203 | 0.1216                            | 0.512510                          | 0.512494                                 | -2.50                     | -2.03                            | 1.06                  | 1.04                  |
| L1204 | 0.1242                            | 0.512474                          | 0.512458                                 | -3.20                     | -3.01                            | 1.15                  | 1.10                  |
| L1205 | 0.1239                            | 0.512474                          | 0.512458                                 | -3.20                     | -3.01                            | 1.15                  | 1.10                  |
| L1206 | 0.1216                            | 0.512401                          | 0.512385                                 | -4.62                     | -4.43                            | 1.24                  | 1.22                  |
| L1208 | 0.1156                            | 0.512437                          | 0.512422                                 | -3.92                     | -3.71                            | 1.11                  | 1.16                  |
| L1209 | 0.1046                            | 0.512449                          | 0.512435                                 | -3.69                     | -3.45                            | 0.98                  | 1.14                  |
| L1211 | 0.1091                            | 0.512424                          | 0.512410                                 | -4.17                     | -3.95                            | 1.06                  | 1.18                  |
| L1212 | 0.1088                            | 0.512390                          | 0.512376                                 | -4.84                     | -4.61                            | 1.10                  | 1.23                  |
| L1213 | 0.0986                            | 0.512469                          | 0.512456                                 | -3.30                     | -3.04                            | 0.90                  | 1.10                  |
| L1214 | 0.1085                            | 0.512499                          | 0.512485                                 | -2.71                     | -2.48                            | 0.94                  | 1.06                  |

注: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  测量精度( $2\sigma$ )好于  $1.2 \times 10^{-5}$ 。样品  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  比值根据微量元素含量(表 1)和  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  测量值计算得到

值为 0.92 ~ 1.04, 平均值为 1.00, 说明后期的蚀变作用对稀土的影响较弱。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 5b)上,所有的样品显示 Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 等高场强元素亏损和 Rb、Ba、Sr、Pb 等大离子亲石元素和 LREE 富集, Th、U 具有正异常,但是 Th 相对于 Ba、U 具有弱的亏损。煌斑岩的稀土元素和稀土总量与 MgO 之间线性关系不明显,但是过渡族元素 Cr、Ni、Co 与 MgO 之间表现出一定的线性关系(图 6),暗示岩浆演化过程中存在少量的基性矿物(橄榄石、辉石、云母)的分离结晶作用。

样品 L1212 和 L1213 的 Sr 和 Pb 含量远高于其他样品,样品具有显著高的 CaO 含量和相对低的  $\text{Na}_2\text{O}$  含量,这可能

与样品发生了少量的碳酸盐岩蚀变作用有关,这与显微镜下观察到碳酸盐蚀变作用相一致。这两个样品主量元素的质量总和偏差较大,可能是在测试烧失量的过程中存在挥发分残留而造成烧失量的偏低。从表 1 的数据结果可以观察到,莱州地区煌斑岩的过渡族元素含量具有较宽的变化范围,其中 Sc 含量  $14.7 \times 10^{-6}$  ~  $24.1 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $18.9 \times 10^{-6}$ ; Co 含量  $21 \times 10^{-6}$  ~  $59.5 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $40.9 \times 10^{-6}$ ; Cr 含量  $171 \times 10^{-6}$  ~  $1182 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $682 \times 10^{-6}$ ; Ni 含量  $46.7 \times 10^{-6}$  ~  $412 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $201 \times 10^{-6}$ , 与 Rock *et al.* (1991) 统计的钙碱性煌斑岩微量元素含量一致。与估算的原始地幔组成(Taylor and McLennan, 1985)相比,煌斑岩的 Sc、Co、Cr 和 Ni 等过渡族元素含量具有明显的亏损特征。

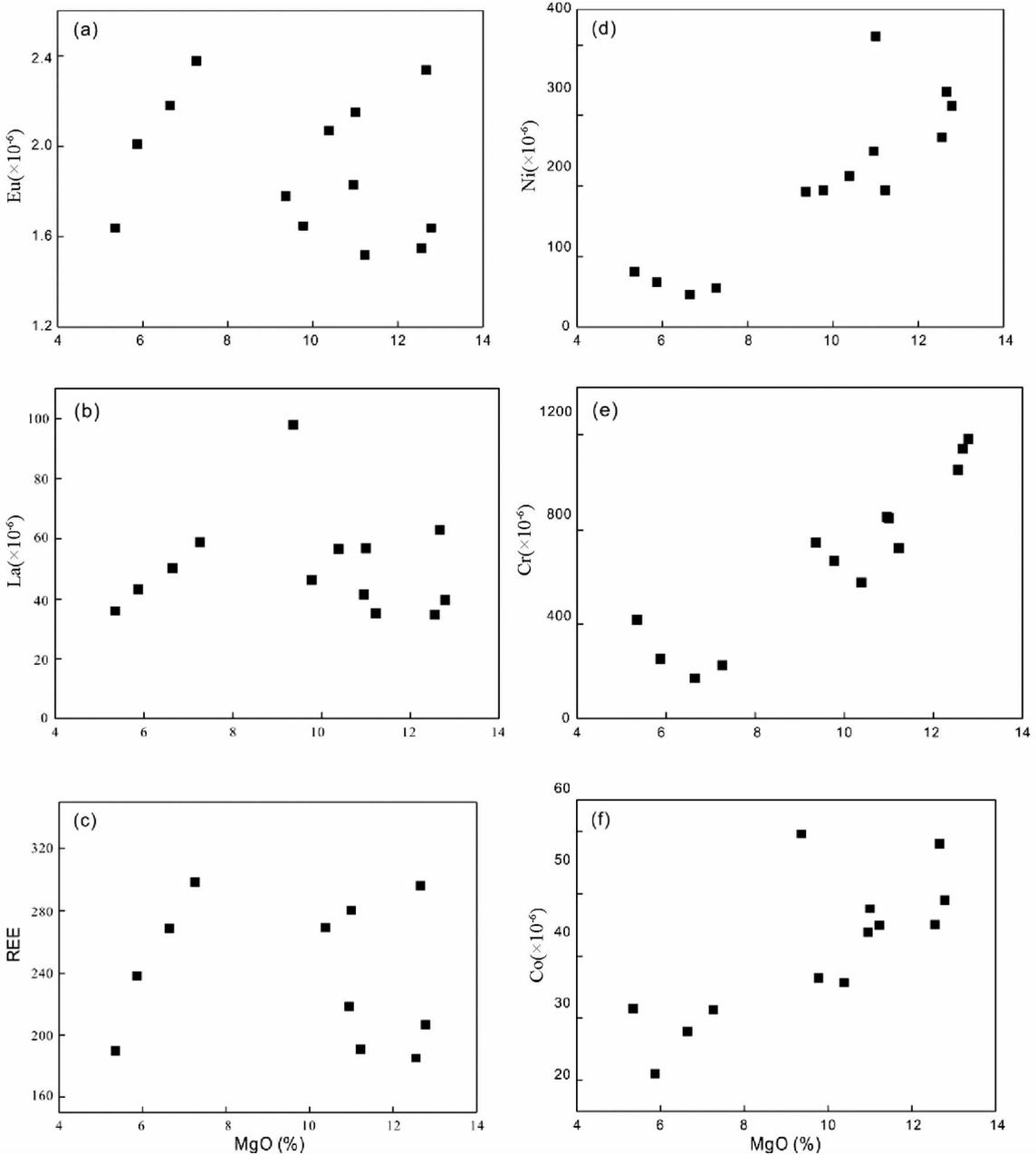


图6 莱州地区煌斑岩样品微量元素与MgO相关图解

Fig. 6 Trace element contents versus MgO diagrams of lamprophyre samples from the Laichau area

### 3.2 Sr-Nd-Pb 同位素组成

本文测试了13组越南北部煌斑岩样品的Sr-Nd-Pb同位素组成,数据见表2和表3中。初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 同位素比值采用 $t = 20\text{Ma}$ 进行计算,即估计的煌斑岩形成时代。煌斑岩Sr-Nd同位素特征投于图7,Pb同位素组成投于图8。煌斑岩的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化范围为0.7061~0.7078,初始 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值为0.51239~0.51254, $\epsilon_{\text{Nd}}$ 值为-4.83~-1.99。从Sr-Nd同位素数据可以看出,两个碳酸盐化样品(L1212和L1213)的同位素组成并没有受到明显

的影响。煌斑岩样品Pb同位素变化范围小,富集放射性成因Pb同位素,其 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 范围为18.49~18.71, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 范围为15.59~15.66, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 范围为38.59~39.19。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 投影中(图8a),数据点位于地球等时线右侧和北半球参考线(NHRL)上方,造山带和上地壳演化线之间,靠近EM-II型富集地幔端元。在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 投影中(图8b)也有类似的信息,所有数据点均位于NHRL以上,下地壳和造山带之间,并且靠近造山带呈现一定的线性关系分布,靠近EM-II型富集地幔端元。与印度洋MORB同位素组成相比,莱州地区的煌斑岩

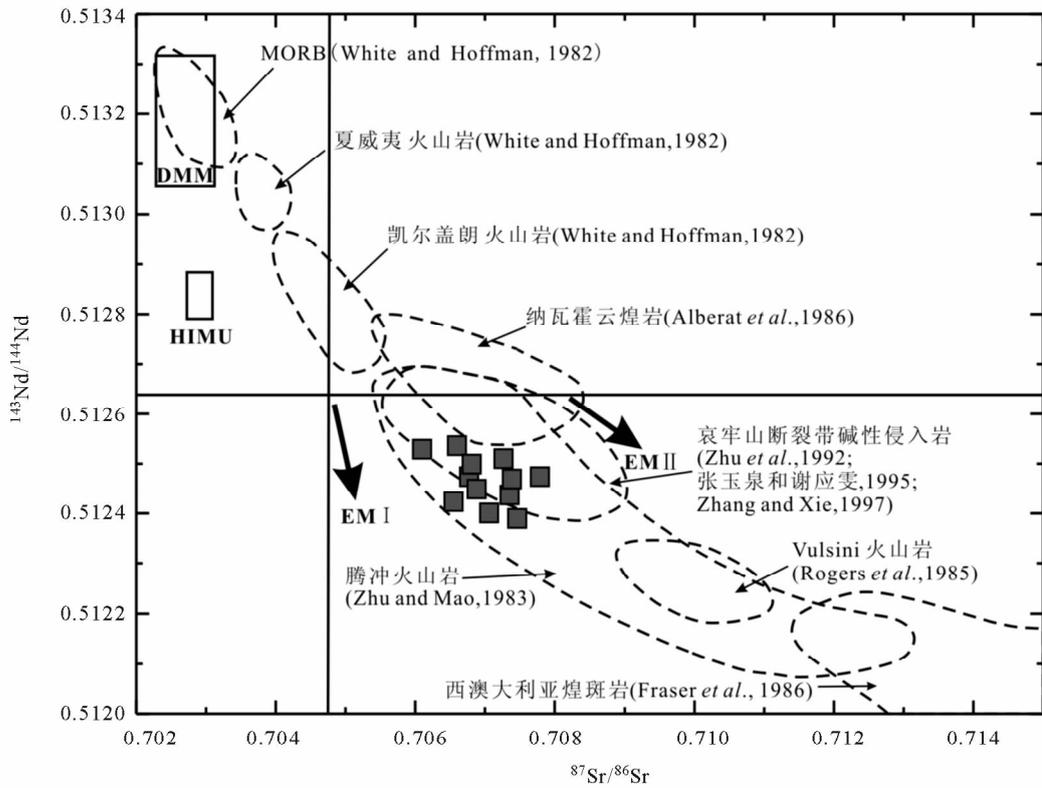


图7 莱州地区煌斑岩样品  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  图解

Fig.7  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  versus  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  diagram of lamprophyre samples from the Laichau area

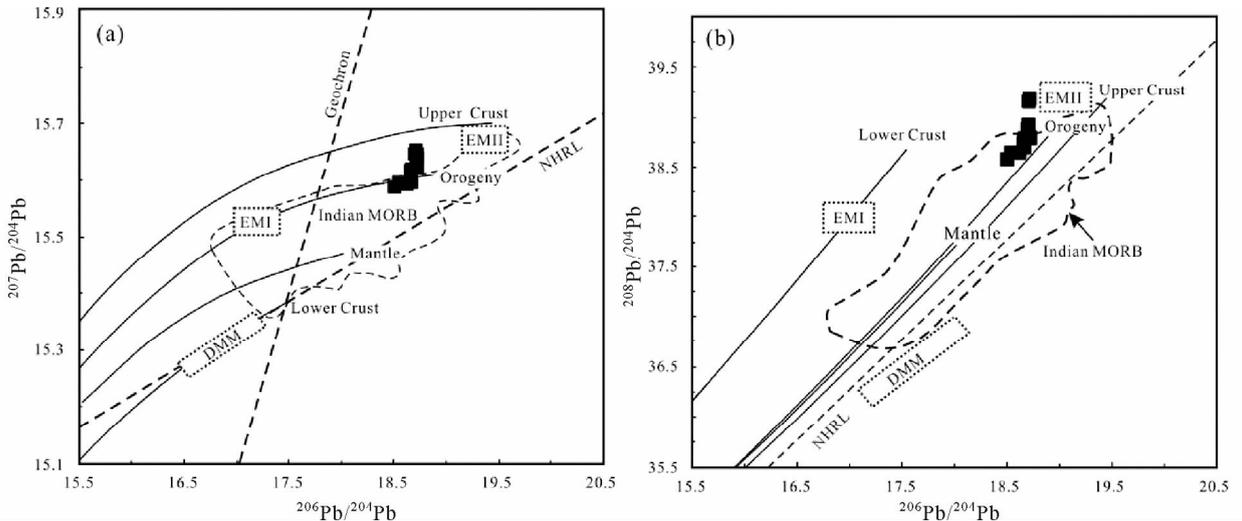


图8 莱州地区煌斑岩样品  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图解 (a) 和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图解 (b), 印度洋 MORB 数据 Hofman (2003)

Fig.8  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (a) and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (b) diagrams of lamprophyre samples from the Laichau area

样品的 Pb 同位素均位于该范围偏上,有部分数据点位于 MORB 上方,指示存在一个更富集 Pb 同位素的端元。

在同位素封闭体系条件下,岩石的  $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$  比值仅与形成时间和源区的 Th/U 比值有关,因此,在百万年时间尺

度下,  $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$  比值可以用来指示源区 Th/U 比值的变化 (Allègre *et al.*, 1986)。通过 Allègre *et al.* (1986) 计算  $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$  值为 0.99 ~ 1.03,反映源区存在较低的 Th/U 比值,这与配分图上具有弱的 Th 低谷相一致。

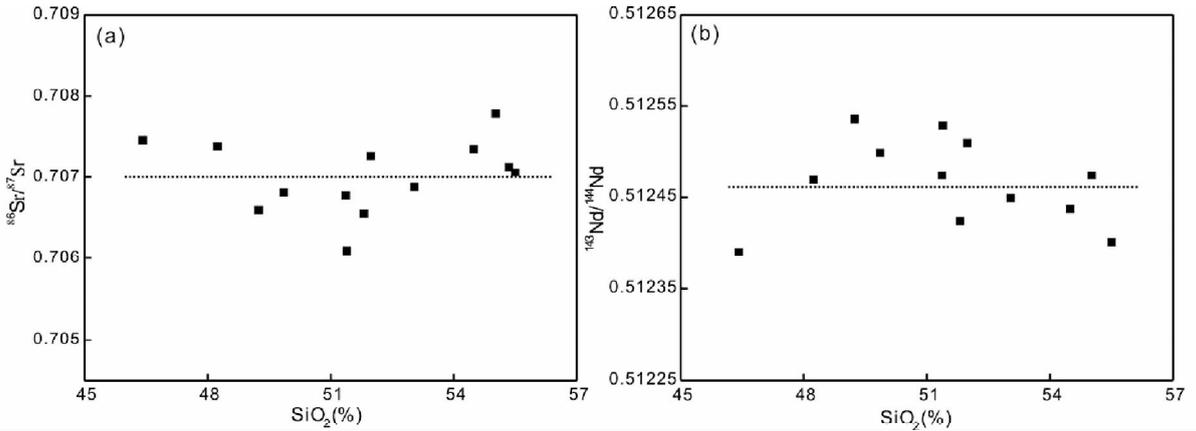


图9 莱州地区煌斑岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $\text{SiO}_2$  (a) 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $\text{SiO}_2$  (b) 图解

Fig. 9  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $\text{SiO}_2$  (a) and  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $\text{SiO}_2$  (b) diagram of lamprophyre samples from the Laichou area

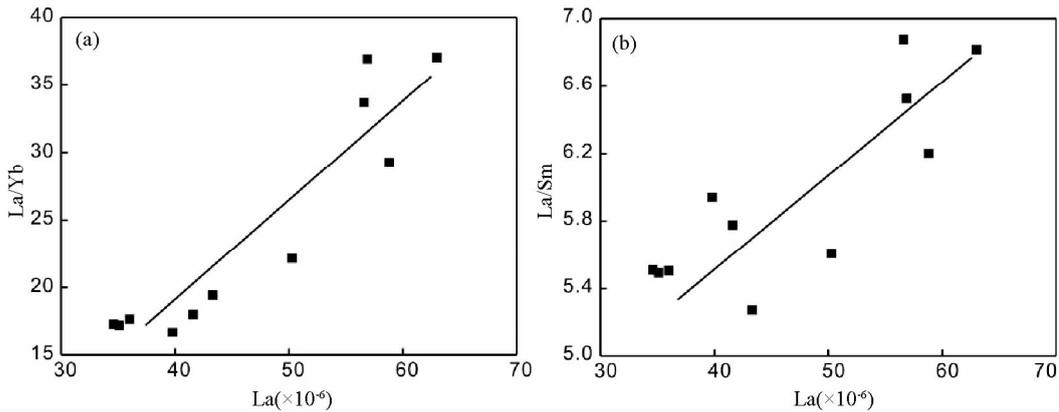


图10 莱州地区煌斑岩样品 La/Sm-La (a) 和 La/Yb-La (b) 图解

Fig. 10 La/Sm-La (a) and La/Yb-La (b) diagrams of lamprophyre samples from the Laichou area

## 4 讨论

### 4.1 煌斑岩岩浆源区

煌斑岩是一种来自岩石圈地幔的岩石,常呈脉状产出,如果用来反映地幔的信息,在岩浆侵位过程中,地壳物质的影响往往是不可忽视的。为了区分煌斑岩的同化混染过程,可以通过  $\text{SiO}_2$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和  $\text{SiO}_2$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  图(图9a, b)进行判别。从图9中可以看出,岩石样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值(0.70609 ~ 0.707785) 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比值(0.512529 ~ 0.512536) 存在一定的变化范围,但是同位素 Sr 和 Nd 同位素组成与  $\text{SiO}_2$  含量之间没有明显的线性变化关系。这一现象可能说明,岩浆源区可能存在一定的同化混染作用或源区物质不均一,而在岩浆上升过程中陆壳物质的加入不显著,对煌斑岩岩浆的同位素组成影响并不大。

微量元素也反映了相似的地球化学信息,煌斑岩的 Ce 和 Eu 含量均无明显异常,REE 含量与 MgO 含量之间没有明

显的相关性(图6),分离结晶在煌斑岩岩浆演化过程中作用并不明显。高的  $\text{Mg}^\#$  值(平均值为71),  $\delta\text{Eu}$  不随  $\text{Mg}^\#$  值而规律性变化,以及去除两个受到碳酸盐化蚀变的样品外,样品的 La/Yb、La/Sm 与 La(图10)之间呈现正相关性,也表明岩浆作用是以部分熔融为主。这与基性脉岩一般形成在拉伸背景下,具有较低的粘度,迁移较快,一般不会发生很大的混染相一致。因此,我们可以用煌斑岩的元素组成,尤其同位素组成指示莱州地区岩石圈地幔源区的性质。

越南西北部莱州地区煌斑岩具有高  $\text{K}_2\text{O}$ 、贫  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、低  $\text{TiO}_2$  特征,明显不同于东非裂谷碱性岩( $\text{TiO}_2 = 2\% \sim 4\%$ )、越南南部新生代玄武岩(高  $\text{TiO}_2$ 、低  $\text{K}_2\text{O}$ 、富  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 和新生代腾冲火山岩(低  $\text{K}_2\text{O}$ 、富  $\text{SiO}_2$ ) ,而相似于滇西洱海东第三纪超 K 质火成岩系和西藏雅鲁藏布江缝合线 Ca-碱性岩(朱炳泉和毛存孝, 1983),可能与活动大陆边缘环境到陆内环境转换过程有关(朱炳泉等, 1992; Hoang and Flower, 1998)。煌斑岩的高场强元素 Nb/Ta 比值为 15.2 ~ 19.5, 平均为 16.8; Zr/Hf 比值 40.3 ~ 42.6, 平均值为 41.5, 分别与原始地幔相近 ( $\text{Nb}/\text{Ta} = 17.5$ ,  $\text{Zr}/\text{Hf} = 36.3$ ; Sun and

McDonough, 1989), 远高于大陆地壳值 ( $Nb/Ta = 12 \sim 13$ ,  $Zr/Hf = 11$ ; Sun and McDonough, 1989), 表明煌斑岩岩浆源区较为均一, 在岩浆上升过程中受地壳混染作用并不明显。莱州地区煌斑岩样品 Pb 同位素 ( $\Delta 7/4Pb = 8.5 \sim 13.7$ ,  $\Delta 8/4Pb = 52.4 \sim 94.6$ ,  $\Delta Sr = 60.9 \sim 77.9$ ) 与 Dupal 异常铅的边界条件 ( $\Delta 7/4Pb > 3$ ,  $\Delta 8/4Pb > 10$  和  $\Delta Sr > 40$ ) 完全吻合 (Hart, 1984)。对比周边地区, 莱州地区煌斑岩 Pb 同位素特征比腾冲火山岩  $^{206}Pb/^{204}Pb$  值略高,  $^{207}Pb/^{204}Pb$  和  $^{208}Pb/^{204}Pb$  接近 (朱炳泉等, 1992; Chen *et al.*, 2002), 虽然 Pb 同位素特征与海南新生代火山岩类似, 但是海南岛新生代火山岩具有亏损 Nd-Sr 特征以及不同的 Nb/U 和 Ce/Pb 等微量元素比值, 这说明研究地区的 Dupal 异常与海南 Pb 异常具有不同的成因机制。

关于 Dupal 异常 Pb 成因, 目前存在多种观点: (1) 通过蚀变洋壳或大洋沉积物再循环进入地幔方式形成 (Dupré and Allègre, 1983); (2) 由地幔中存在的 DMM、EM-I、EM-II 和 HIMU 组分之间不同组合、不同比例的混合形成 (Zindler and Hart, 1986); (3) 由交代作用形成的 EM I 和 HIMU 组分可能存在于核/幔边界部位, 由于该部位的不稳定性产生的热点喷发而形成 Dupal 异常 (Hart, 1984, 1988); (4) 由古老且相对不亏损的陆下岩石圈形成 (McKenzie and O' Nions, 1983)。由于 Dupal 异常现象在南半球普遍存在, 许多学者认为扬子西南缘的 Dupal 异常可能是由于这些陆块是由来自南半球的冈瓦纳大陆分离出来的小陆块的关系, 但是, 也有学者认为 Dupal 异常可能并不是南半球所特有的现象, 因为板块迁移过程中一般不会造成软流圈地幔的同步移动 (鄢全树等, 2008)。越南西北部地区在晚太古代时期就已经位于扬子地块附近 (Hieu *et al.*, 2009), 最新的构造属性上也该地区划归到扬子地块边缘属性 (Leloup *et al.*, 1993; Sone and Metcalfe, 2008), 可能该地区的 Pb 富集事件与南半球 Dupal 异常中不同端元源区混合机制有所不同。

#### 4.2 地幔交代作用

地质学家普遍接受煌斑岩岩浆来自于岩石圈地幔, 并且认为煌斑岩可以用来和世界其他地区进行对比 (Rock *et al.*, 1991)。对比全球钾质-超钾质煌斑岩, 夏威夷火山岩 ( $< 1Ma$ ), 凯尔盖朗火山岩 (30Ma) (White and Hofmann, 1982), 纳瓦霍云煌岩 (30Ma) (Alibert *et al.*, 1986), 腾冲火山岩 (朱炳泉和毛存孝, 1983) 和哀牢山碱性岩 (管涛等, 2006) 均形成在新生代, 而西澳大利亚煌斑岩可能来自古老的陆下岩石圈地幔 (Fraser *et al.*, 1985)。莱州地区煌斑岩在  $^{87}Sr/^{86}Sr-^{143}Nd/^{144}Nd$  图上 (图 7), 落入腾冲火山岩区域内和哀牢山碱性岩附近, 显著比夏威夷火山岩、凯尔盖朗火山岩和纳瓦霍云煌岩更加富集, 比西澳大利亚煌斑岩更加亏损, 这说明该类煌斑岩的成因可能与哀牢山碱性岩相关。Pb 同位素在  $^{207}Pb/^{204}Pb-^{206}Pb/^{204}Pb$  和  $^{208}Pb/^{204}Pb-^{206}Pb/^{204}Pb$  关系图中均位于印度洋 MORB 范围或以上, 明显不同于亏损地

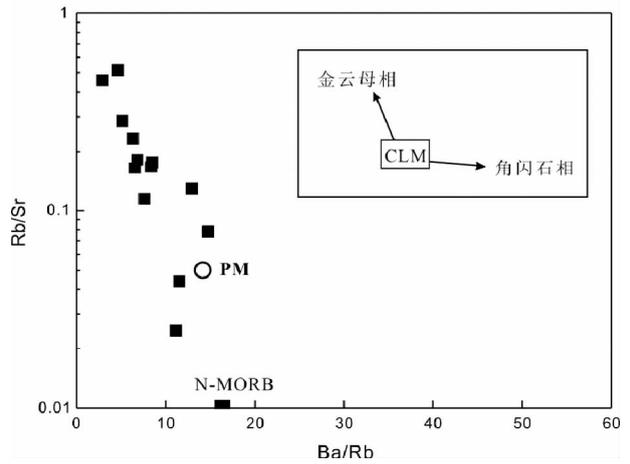


图 11 莱州地区煌斑岩样品 Rb/Sr-Ba/Rb 图解  
原始地幔和 N-MORB 原始值据 Sun and McDonough (1989); PM-原始地幔; CLM-正常岩石圈地幔  
Fig. 11 Rb/Sr-Ba/Rb diagram of lamprophyre samples from the Laichau area

幔、富集 EM-I 和下地壳物质, 而靠近 EM-II 型富集地幔。 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 、 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{206}Pb/^{204}Pb$  的变化均趋向于 EM-II 型富集地幔端元, 说明本区煌斑岩源区具有 EM-II 型富集地幔的特征。

莱州地区煌斑岩具有典型的岛弧型微量元素特征, 明显高的 Rb、Th、U 等 LILE 含量, Nb、Ta、Ti 等 HFSE 负异常 (图 5b), 明显低于 MORB 或 OIB 的  $Ce/Pb = 1.07 \sim 4.21$  (平均为 2.51), 低  $Nb/La = 0.11 \sim 0.45$  (平均值为 0.29), 高  $Th/Ta = 10.9 \sim 24.5$  (平均值为 16.3)、 $Th/La = 0.11 \sim 0.34$  (平均值为 0.34), 这些地球化学特征可能与俯冲流体交代相关 (Miller *et al.*, 1999)。Furman and Graham (1999) 认为与金云母平衡的矿物具有比角闪石相更高的 Rb/Sr ( $> 0.10$ ) 和 低 Ba/Rb ( $< 20$ ), 除了两个煌斑岩样品 (L12012 和 L12013) 受蚀变作用影响, 造成 Sr 异常富集而比值偏低之外, 莱州地区煌斑岩样品的 Rb/Sr 比值为  $0.08 \sim 0.52$ , 平均值为 0.23。Ba/Rb 没有受到堆晶的影响, 为  $2.9 \sim 14.7$ , 平均值为 8.3 (图 11), 与 Furman and Graham (1999) 提出的结果一致, 说明煌斑岩可能来自于金云母相上地幔源区, 岩石圈源区可能经历过地幔交代作用。莱州地区煌斑岩明显富集 Nb、Ta 含量, 具有低的 Nb/U 比值 ( $2.36 \sim 5.68$ , 平均为 3.77) 和 Ce/Pb 比值 ( $1.07 \sim 4.21$ , 平均为 2.51), 类似于上陆壳平均值 ( $Nb/U = 9$ ,  $Ce/Pb = 3$ ; Taylor and McLennan, 1985), 而不同于原始地幔值 ( $Nb/U = 30$ ,  $Ce/Pb = 9$ ; Hofmann, 1988), 说明莱州地区地幔源区可能有类似上地壳成分的沉积物组分的加入。计算得到, 煌斑岩的亏损地幔 Nd 模式年龄较老,  $t_{DM1}$  值为  $0.90 \sim 1.24Ga$ , 平均  $1.06Ga$ , 可以解释为在先前存俯冲-交代过程中加入岩石圈地幔的沉积物的平均地壳存留时间 (李献华等, 2002)。

煌斑岩样品的 Th/U 比值较低 (2.21 ~ 5.12, 平均为 3.55)。实验岩石学研究表明,在俯冲带富集 Th 的过程与沉积物密切相关 (Johnson and Plank, 1999)。在洋壳蚀变过程中 U 含量会系统的升高,因此,洋壳脱水和沉积物的流体将会具有较低的 Th/U 比值,被交代过的岩石圈地幔将会具有较低的  $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$  比值 (Staudigel *et al.*, 1995)。煌斑岩的  $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$  比值为 0.99 ~ 1.00,说明源区存在较低 Th/U 比值,却有高的 Pb 含量,说明同位素富集事件发生在近期 (Chen *et al.*, 2002; Allègre *et al.*, 1986)。

## 5 结论

越南西北部莱州地区新生代煌斑岩为一类钙碱性,钾质-超钾质煌斑岩。在岩浆形成过程中,受到地壳同化混染程度较小,岩浆形成过程中以部分熔融作用为主。煌斑岩的同位素和微量元素组成特征表明,岩浆源区具有 EM II 型富集地幔特征,地幔富集事件可能与近期的俯冲事件,沉积物组分加入到地幔源区有关。

**致谢** 感谢李禾、侯振辉、贺剑峰和肖平在分析测试上提供的帮助;感谢两位评审人对本文提出建设性修改意见。

## References

Alibert C, Michard A and Albarède F. 1986. Isotope and trace element geochemistry of Colorado Plateau volcanics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(12): 2735–2750

Allègre CJ, Dupré B and Lewin E. 1986. Thorium/uranium ratio of the Earth. *Chemical Geology*, 56(3–4): 219–227

Chen F, Satir M, Ji JQ *et al.* 2002. Nd-Sr-Pb isotopes of Tengchong Cenozoic volcanic rocks from western Yunnan, China: Evidence for an enriched-mantle source. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(1): 39–45

Chen FK, Li XH, Wang XL *et al.* 2007. Zircon age and Nd-Hf isotopic composition of the Yunnan Tethyan belt, southwestern China. *International Journal of Earth Sciences*, 96(6): 1179–1194

Dovjikov AE. 1965. *Geology of Northern Vietnam*. Hanoi: Technical and Scientific Publisher (in Vietnamese)

Duggan MB and Jaques AL. 1996. Mineralogy and geochemistry of Proterozoic shoshonitic lamprophyres from the Tennant Creek Inlier, Northern Territory. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43(3): 269–278

Dupré B and Allègre CJ. 1983. Pb-Sr isotope variation in Indian Ocean basalts and mixing phenomena. *Nature*, 303(5913): 142–146

Fraser KJ, Hawkesworth CJ, Erlank AJ *et al.* 1986. Sr, Nd and Pb isotope and minor element geochemistry of lamproites and kimberlites. *Earth and Planetary Science Letters*, 76(1–2): 57–70

Furman T and Graham D. 1999. Erosion of lithospheric mantle beneath the East African Rift system: Geochemical evidence from the Kivu volcanic province. In: Hilst RD and McDonough WF (eds.). *Developments in Geotectonics*. Elsevier, 24: 237–262

Hart SR. 1984. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle. *Nature*, 309(5971): 753–757

Hart SR. 1988. Heterogeneous mantle domains: Signatures, genesis and mixing chronologies. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3):

273–296

Hieu PT, Chen FK, Zhu XY *et al.* 2009. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition of the Posen granite in northwestern Vietnam. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3141–3152 (in Chinese with English abstract)

Hoang N and Flower M. 1998. Petrogenesis of Cenozoic basalts from Vietnam; Implication for origins of a ‘diffuse igneous province’. *Journal of Petrology*, 39(3): 369–395

Hofmann AW. 1988. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297–314

Hofmann AW. 2003. Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: Isotopes and trace elements. *Treatise on Geochemistry*, 2: 61–101

Huang ZL, Liu CQ, Yang HL *et al.* 2002. The geochemistry of lamprophyres in the Laowangzhai gold deposits, Yunnan Province, China; Implications for its characteristics of source region. *Geochemical Journal*, 36(2): 91–112

Johnson MC and Plank T. 1999. Dehydration and melting experiments constrain the fate of subducted sediments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 1: doi: 10.1029/GC000014

Leloup PH, Harrison TM, Ryerson FJ *et al.* 1993. Structural, petrological and thermal evolution of a tertiary ductile strike-slip shear zone, Diancang Shan, Yunnan. *Journal of Geophysics Research*, 98(B4): 6715–6743

Li XH, Zhou HW, Wei GJ *et al.* 2002. Geochemistry and Sr-Nd isotopes of Cenozoic ultrapotassic lamprophyres in western Yunnan: Constraints on the composition of sub-continental lithospheric mantle. *Geochemistry*, 31(1): 26–34 (in Chinese with English abstract)

Liu JL, Tang Y, Song ZJ *et al.* 2011. The Ailaoshan belt in western Yunnan: Tectonic framework and tectonic evolution. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(5): 1285–1303 (in Chinese with English abstract)

Lu FX, Shu XX and Zhao CH. 1991. A suggestion on classification of lamprophyres. *Geological Science and Technology Information*, 10(Suppl.): 55–62 (in Chinese with English abstract)

Luong TD and Nguyen BX. 1982. *Geological Map of Vietnam in Scale 1:500000*. Hanoi: Department of Geology (in Vietnamese)

Madhavan V, David K, Mallikharjuna RJ *et al.* 1998. Comparative study of lamprophyres from the Cuddapah Intrusive Province (CIP) of Andhra Pradesh, India. *Journal of Geological Society of India*, 52(6): 621–642

McKenzie D and O’Nions RK. 1983. Mantle reservoirs and ocean island basalts. *Nature*, 301(5897): 229–231

Miller C, Schuster R, Klotzli U *et al.* 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis. *Journal of Petrology*, 40(9): 1399–1424

Rock NMS. 1977. The nature and origin of lamprophyres: Some definitions, distinctions, and derivations. *Earth-Sciences Review*, 13(2): 123–169

Rock NMS, Bowes DR and Wright AE. 1991. *Lamprophyres*. Glasgow: Blackie, 285

Rogers NW, Hawkesworth CJ, Parker RJ *et al.* 1985. The geochemistry of potassic lavas from Vulcini, central Italy and implications for mantle enrichment processes beneath the Roman region. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 90(2–3): 244–257

Shand P, Gaskarth JW, Thirlwell MF *et al.* 1994. Late caledonian lamprophyre dyke swarms of south-eastern Scotland. *Mineralogy and Petrology*, 51(2–4): 277–298

Shppard S and Taylor WR. 1992. Barium- and LREE-rich, olivine-mica-lamprophyres with affinities to lamproites, Mt. Bunday, Northern Territory, Australia. *Lithos*, 28(3–6): 303–325

Sone M and Metcalfe I. 2008. Parallel Tethyan sutures in mainland Southeast Asia; New insights for Palaeo-Tethys closure and implications for the Indosinian orogeny. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(2–3): 166–179

- Staudigel H, Davies GR, Hart SR *et al.* 1995. Large scale isotopic Sr, Nd and O isotopic anatomy of altered oceanic crust: DSDP/ODP sites 417/418. *Earth and Planetary Science Letters*, 130(1-4): 169-185
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345
- Tapponnier P, Peltzer G and Armijo R. 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia. In: Coward MP and Ries AC (eds.). *Collision Tectonics*. Geological Society, London, Special Publications, 19(1): 113-157
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell
- Tran MD, Liu JL, Nguyen QL *et al.* 2010. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition of the Pu Sam Cap high-potassic alkaline rocks in northwestern Vietnam and regional tectonic implication. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1902-1914 (in Chinese with English abstract)
- Tri TV. 1977. *Geology of Vietnam: Northern Part*. Hanoi: Technical and Scientific Publisher (in Vietnamese)
- Wang JH, Yin A, Harrison TM *et al.* 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 188(1-2): 123-133
- White WM and Hofmann AW. 1982. Sr and Nd isotope geochemistry of oceanic basalts and mantle evolution. *Nature*, 296(5860): 821-825
- Wimmenauer W. 1973. Lamprophyre, semilamprophyre and anchi-basaltsche ganggesteine. *Fortschritte der Mineralogie*, 51: 3-67
- Yan QS, Shi XF, Wang KS *et al.* 2008. Major and trace elements and Sr-Nd-Pb isotopic composition of Cenozoic alkali basalt in Hainan. *Science in China (Series D)*, 38(1): 56-71 (in Chinese)
- Zelazniewicz A, Hoa TT and Larionov AN. 2012. The significance of geological and zircon age data derived from the wall rocks of the Ailao Shan-Red River Shear Zone, NW Vietnam. *Journal of Geodynamics*, doi: 10.1016/j.jog.2012.04.002
- Zhang YQ and Xie YW. 1995. Petrochemistry of the Cenozoic magmatic rocks in the eastern Erhai, Yunnan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 11(4): 423-433 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ and Xie YW. 1997. Geochronology of Ailaoshan-Jinshajiang alkali-rich intrusive rocks and their Sr and Nd isotopic characteristics. *Science China (Series D)*, 40(5): 524-529
- Zhong DL. 1998. *Paleo-Tethyan Orogenic Belt in the Western Yunnan and Sichuan*. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Zhu BQ and Mao CJ. 1983. Nd-Sr isotope and trace element study on Tengchong volcanic rocks from the Indo-Eurasian collisional margin. *Geochemistry*, (1): 1-14 (in Chinese with English abstract)
- Zhu BQ, Zhang YQ and Xie YW. 1992. Nd, Sr and Pb isotopic characteristics of cenozoic ultra-potassic volcanic rocks from eastern Erhai, Yunnan and their implications for subcontinent-mantle evolution in southwestern China. *Geochemistry*, (3): 201-212 (in Chinese with English abstract)
- Zindler A and Hart SR. 1986. Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493-571

### 附中文参考文献

- Hieu PT, 陈福坤, 祝禧艳等. 2009. 越南西北部 Posen 花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成特征. *岩石学报*, 25(12): 3141-3152
- 李献华, 周汉文, 韦刚健等. 2002. 滇西新生代超钾质煌斑岩的元素和 Sr-Nd 同位素特征及其对岩石圈地幔组成的制约. *地球化学*, 31(1): 26-34
- 刘俊来, 唐渊, 宋志杰等. 2011. 滇西哀牢山构造带: 结构与演化. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(5): 1285-1303
- 路凤香, 舒小辛, 赵崇贺. 1991. 有关煌斑岩分类的建议. *地质科技情报*, 10(增刊): 55-62
- Tran MD, 刘俊来, Nguyen QL 等. 2010. 越南西北部 Pu Sam Cap 高钾碱性岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素组成及其区域构造意义. *岩石学报*, 26(6): 1902-1914
- 鄢全树, 石学法, 王昆山等. 2008. 南海新生代碱性玄武岩主量、微量元素及 Sr-Nd-Pb 同位素研究. *中国科学(D 辑)*, 38(1): 56-71
- 张玉泉, 谢应雯. 1995. 云南洱海东部新生代岩浆岩岩石化学. *岩石学报*, 11(4): 423-433
- 钟大赉. 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社
- 朱炳泉, 毛存孝. 1983. 印度与欧亚板块东部碰撞边界腾冲火山岩的 Nd-Sr 同位素和微量元素研究. *地球化学*, (1): 1-14
- 朱炳泉, 张玉泉, 谢应雯. 1992. 滇西洱海东第三纪超 K 质火成岩系的 Nd-Sr-Pb 同位素特征与西南大陆地幔演化. *地球化学*, (3): 201-212