

# 南秦岭早古生代碱性岩墙群的地球化学 及其地质意义\*

张成立<sup>①</sup> 高山<sup>①②</sup> 张国伟<sup>①</sup> 柳小明<sup>①</sup> 于在平<sup>①</sup>

(①西北大学大陆动力学教育部重点实验室, 西安 710069; ②中国地质大学地球科学院地球化学系, 武汉 430074)

**摘要** 南秦岭紫阳、岚皋一带早古生代碱性岩墙群具双峰火山岩组合特征, 它们的 REE 模式为轻、重稀土高度分馏的右倾谱型, 原始地幔标准化蛛网图表现为不相容元素富集, Ba, Nb 相对富集成峰, Pb, Sr 相对亏损成谷。Ta/Hf > 0.3, Th/Ta < 1.6, 指示它们来自于与地幔柱活动密切相关的富集地幔源区。这套碱性岩墙群的出现代表了秦岭造山带早古生代期间与深部地幔柱活动相关而引发的一次地壳伸展扩张事件, 由于地幔柱活动短暂, 这次裂谷扩张作用未能继续发展, 从而无新的洋盆打开。

**关键词** 碱性岩墙群 裂谷作用 地幔柱活动 早古生代 南秦岭

横亘于中国中部的秦岭造山带经过 10 余年的研究已取得了丰硕成果<sup>[1~3]</sup>。然而, 关于该造山带南秦岭构造带早古生代构造演化历史还存有争议。发育于南秦岭构造带内的一套碱性超基性-基性杂岩带的系统研究无疑将有助于这一问题的探索和解决, 它也成为揭示秦岭造山带古生代构造演化的重要研究内容。现今南秦岭构造带古生代时属于扬子板块北缘向北俯冲板块的被动大陆边缘, 发育了近乎连续的寒武纪-三叠纪地层, 在该构造带的陕西紫阳、岚皋、平利和湖北竹溪等地出露的早古生代地层中发育了碱性超基性-基性脉岩和火山岩的岩浆杂岩带。前人已对该杂岩中的火山岩及其幔源捕虏体的岩石学、矿物学及地球化学进行了研究<sup>[4~8]</sup>, 提出地幔捕虏体来自深部软流圈地幔, 寄主火山岩为早古生代晚期南秦岭被动陆缘裂陷带的产物。但与这套杂岩密切伴生的辉绿岩和粗面岩脉岩类的系统研究不多, 本文结合该杂岩带中火山岩的地球化学特征对这些脉岩类的岩石、地球化学详细研究, 以确定它们的性质与特征, 进而探讨古生代南秦岭被动陆缘环境下该岩浆杂岩带形成的深部动力学背景, 从而为秦岭造山带早古生代构造演化提供约束条件。

## 1 地质概况

南秦岭构造带的陕西紫阳、岚皋地区早古生代地层中出露大小脉岩近百余条, 它们与东部平利和湖北竹溪地区发育的脉岩及少量潜成基性火山岩一同构成南秦岭区一条特有的早古生代岩墙群(图 1)。研究区脉体宽数十米到百余米, 长达数百米到数公里不等, 除个别小角度切割地层外, 大多平行地层侵入于前泥盆纪地层中, 但在研究区西部的晚古生代地层内未发现此类岩脉产出。脉岩主要为辉绿岩、辉长辉绿岩和粗面岩。基性脉岩类主要侵入于紫阳县南部的红椿坝-瓦房店断裂以南的寒武系及奥陶系地层中, 粗面岩岩脉主要发育于该断裂北部奥

2002-01-08 收稿, 2002-03-20 收修改稿

\* 国家教育部骨干教师资助项目(批准号: 教技司[2000]143)和西部高校访问学者资助项目及国家自然科学基金重点资助项目(批准号: 49732080, 140032010-C)

陶系及早志留统中. 基性火山岩在岚皋县西北岚皋-铜洞沟一线及北部六口地区的寒武系及奥陶系地层中最为发育, 在岚皋县西北部有中志留世笔石页岩覆盖其上<sup>[9]</sup>.

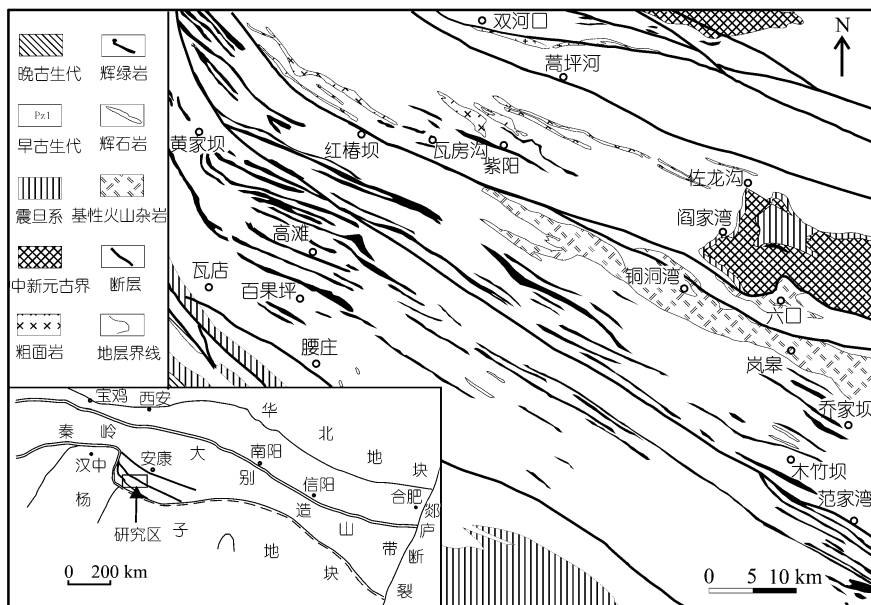


图 1 紫阳、岚皋地区地质图

据 1:20 万紫阳幅地质图简化<sup>1)</sup>

基性脉岩类具辉绿结构、辉长结构和似斑状结构, 矿物成分主要为斜长石(20%~60%)和单斜辉石(15%~45%)以及少量角闪石, 斑晶多为单斜辉石, 副矿物有钛铁矿(或钛磁铁矿)及榍石, 少数样品出现绿泥石、绿帘石等蚀变矿物, 个别见有碳酸盐化. 玄武岩具明显的斑状结构和角砾状构造, 斑晶主要为单斜辉石, 有少量棕色角闪石出现, 基质主要为辉石和斜长石, 并有较多钛铁矿, 蚀变的岩石多出现绿泥石和绿帘石, 偶见碳酸盐化. 粗面岩类具斑状结构, 斑晶以碱性长石为主, 基质具典型的粗面结构, 暗色矿物含少量黑云母(<5%), 见有少量磷灰石、榍石等副矿物.

## 2 样品采集及分析

在室内详细的显微镜观察基础上, 选择紫阳及岚皋地区新鲜代表性脉岩和基性火山岩 31 件. 其中, 基性火山岩中的各种角砾均已剔除. 主量元素在“西北大学大陆动力学教育部重点实验室”分析, FeO 和烧失量(LOI)采用湿法化学法分析, 其余主量元素用碱熔玻璃片法在日本理学 RIX2100X 荧光光谱仪上进行, 并经 BCR-2 和 GBW07105 标样监控, 各项主量元素分析误差均低于 5%. 微量元素在中国地质大学(武汉)“岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室”用 ICP-MS(POEMS III)测定, 分析方法见文献[10]. 样品经 AGV-1、BCR-2、G2 和 RGM-1 国际标样监控, Co, Ni, Zn, Ga, Rb, Y, Zr, Nb, Hf, Ta 和 REE(除 Hf 和 Lu)等元素分析相对误差低于 5%, 其他元素相对误差介于 5%~15%之间.

1) 陕西省地质矿产局区域地质调查队. 中华人民共和国 1:20 万紫阳幅(I-49-(31)地质图. 1990

### 3 地球化学特征

#### 3.1 主元素组成

所选择的代表性岩石元素分析列于表 1. 按照 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{-SiO}_2$ 图解, 本区各类岩石落入碱性岩系列, 并相对集中分布于基性(部分为苦橄玄武岩)和酸性岩两个端元(图 2), 构成一套双峰式岩类组合. 除少数样品外, 多数岩石的镁值( $\text{Mg\#} = 100 \times \text{MgO}/(\text{MgO} + 0.9 \times \text{TFe}_2\text{O}_3)$ )低, 指示它们为岩浆高度演化后的产物, 并显示了两组不同地球化学演化趋势(图 3). 其中一组(后称第一组)岩石成分变化范围大, 包括了超基性的辉石岩、基性脉岩、玄武岩以及粗面岩类. 它们的  $\text{SiO}_2 = 40.64\% \sim 66.99\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 1.53\% \sim 11.89\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.88 \sim 29.14$ ,  $\text{TiO}_2 = 1.61\% \sim 4.31\%$ ,  $\text{TFe}_2\text{O}_3 = 2.56\% \sim 16.06\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 6.67\% \sim 16.81\%$ ,  $\text{MgO} = 0.77\% \sim 13.48\%$ , 在鲍温变异图中呈现良好的线性演化趋势(图 3(a), (b), (c), (d)). 另一组(后称第二组)岩石主要为基性脉岩和玄武岩类,  $\text{SiO}_2 = 37.24\% \sim 51.06\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 0.86\% \sim 6.51\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 2.37 \sim 25.0$ ,  $\text{TiO}_2 = 2.38\% \sim 7.03\%$ ,  $\text{TFe}_2\text{O}_3 = 8.39\% \sim 20.34\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 9.47\% \sim 21.16\%$ ,  $\text{MgO} = 3.23\% \sim 6.34\%$ . 相比第一组岩石, 它们的成分变化范围小, 线性演化趋势不十分明显, 但  $\text{MgO}$  一定时, 该组岩石相对高  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  和  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  则无大的变化. 总之, 本区两组岩石以富钠、高钛的碱性岩为特征, 它们所具有的两种不同演化趋势在微量元素与  $\text{MgO}$  相关图中也有良好反映(图 3(e) ~ (j)), 并且当  $\text{MgO}$  一定时, 第二组岩石较第一组岩石高 V, Sc, Sr, 低 Zr, Ni, Cr 变化不大.

由于 Sc 强烈相容于石榴石、中等相容于辉石、在橄榄石和斜长石中强烈不相容, Ni, Cr 降低表明有橄榄石和单斜辉石的结晶分离作用发生<sup>[12]</sup>. 因此, 第一组岩石 Sc, Ni, Cr, V, Ti 与  $\text{MgO}$  正相关关系(图 3(h), (e), (f), (g), (a))说明, 岩浆演化过程中单斜辉石是分离结晶作用过程的主要晶出相, 同时有少量橄榄石和 Fe-Ti 氧化物的晶出, 但粗面岩异常高的 Zr 和很低的 Ti 可能是副矿物中(如榍石)Ti 被 Zr 取代所致. 第二组岩石  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  以及 V 随  $\text{MgO}$  降低大幅度降低指示除橄榄石外, 可能还有 Fe-Ti 氧化物(钛铁矿或钛磁铁矿)在岩浆演化过程中作为分离结晶矿物晶出.

#### 3.2 稀土元素及微量元素

研究区各岩类稀土总量变化大, 轻、重稀土分馏强, 并具铕正异常(或微弱负异常)的右倾谱型特征(图 4). 但第一组基性脉岩类以岩石稀土总量高( $\sum \text{REE} = (328.39 \sim 448.38) \times 10^{-6}$ )、轻稀土略富集( $\text{La}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N} = 2.52 \sim 2.93$ ), 具弱 Eu 正异常( $\delta \text{Eu} = 1.05 \sim 1.14$ )为特征; 玄武岩类的稀土总量略低( $\sum \text{REE} = (103.66 \sim 299.97) \times 10^{-6}$ ), 轻稀土富集( $\text{La}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N} = 2.38 \sim 3.97$ ), Eu 弱异常( $\delta \text{Eu} = 0.94 \sim 1.08$ ). 第二组基性脉岩类的稀土总量相对低而变化大( $\sum \text{REE} = (120.49 \sim 311.15) \times 10^{-6}$ ), 轻稀土弱富集( $\text{La}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N} = 1.91 \sim 2.36$ ), Eu 正异常明显( $\delta \text{Eu} = 0.97 \sim 1.50$ ); 玄武岩的稀

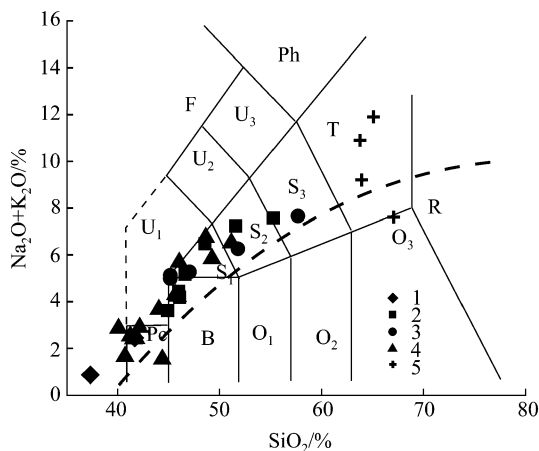


图 2 紫阳、岚皋杂岩  $\text{SiO}_2\text{-(K}_2\text{O+Na}_2\text{O)}$  图(据 Le Maitre 等, 1989<sup>[11]</sup>)

R 示流纹岩; T 示粗面岩( $Q < 20\%$ ); 粗面英安岩( $Q > 20\%$ ); O1 示玄武安山岩; O2 示安山岩; O3 示英安岩; Pc 示苦橄玄武岩; S1 示粗面玄武岩; S2 示玄武岩; S3 示粗面安山岩, 1. 辉石岩; 2. 辉绿岩; 3. 辉长辉绿岩; 4. 玄武岩; 5. 粗面岩

表 1 南秦岭紫阳、岚皋地区碱性杂岩的主量(%)和微量( $\times 10^{-6}$ )元素组成

| 组                               | 第一组   |       |        |        |        |       |       |       |       |        |        |        |       |       |       |        |       |       |       |
|---------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 岩性                              | 辉石岩   |       | 辉绿岩    |        | 辉长辉绿岩  |       |       |       | 玄武岩   |        |        |        |       |       |       | 粗面岩    |       |       |       |
| SiO <sub>2</sub>                | 41.6  | 55.2  | 48.5   | 51.5   | 57.6   | 51.7  | 44.0  | 45.9  | 45.6  | 44.3   | 49.2   | 41.5   | 40.6  | 41.7  | 45.8  | 65.0   | 63.9  | 63.7  | 67.0  |
| TiO <sub>2</sub>                | 4.3   | 1.8   | 3.2    | 2.8    | 1.6    | 2.5   | 3.8   | 4.1   | 4.0   | 3.8    | 3.7    | 4.3    | 4.3   | 4.3   | 3.5   | 0.94   | 1.1   | 1.1   | 0.96  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 9.9   | 14.6  | 14.4   | 15.2   | 15.6   | 14.9  | 11.3  | 11.6  | 10.9  | 6.7    | 11.3   | 9.0    | 9.6   | 9.9   | 9.2   | 15.9   | 16.0  | 16.8  | 15.9  |
| TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15.6  | 11.3  | 11.5   | 10.2   | 8.9    | 11.4  | 13.1  | 12.7  | 12.9  | 12.7   | 13.6   | 16.1   | 15.0  | 15.6  | 13.3  | 4.1    | 3.9   | 4.8   | 2.6   |
| FeO                             | 10.0  | 8.5   | 8.7    | 7.6    | 6.1    | 9.1   | 9.7   | 9.6   | 8.9   | 6.8    | 5.8    | 8.0    | 10.9  | 10.1  | 6.7   | 2.1    | 2.8   | 12.2  | 10.9  |
| MnO                             | 0.17  | 0.25  | 0.27   | 0.27   | 0.28   | 0.28  | 0.20  | 0.18  | 0.18  | 0.20   | 0.12   | 0.20   | 0.18  | 0.17  | 0.16  | 0.24   | 0.27  | 0.25  | 0.04  |
| MgO                             | 12.2  | 2.4   | 4.5    | 3.9    | 2.1    | 3.5   | 7.3   | 6.1   | 7.7   | 12.2   | 6.3    | 12.5   | 13.5  | 12.2  | 8.6   | 0.77   | 1.0   | 0.95  | 0.99  |
| CaO                             | 10.0  | 4.7   | 8.2    | 6.6    | 4.4    | 6.8   | 12.7  | 11.3  | 11.8  | 16.5   | 8.7    | 10.7   | 10.5  | 9.6   | 11.3  | 0.89   | 1.8   | 0.33  | 0.26  |
| Na <sub>2</sub> O               | 1.9   | 5.9   | 4.9    | 5.3    | 5.5    | 4.9   | 2.8   | 1.3   | 3.3   | 1.5    | 4.4    | 1.9    | 1.2   | 1.9   | 4.1   | 7.1    | 4.3   | 5.1   | 4.2   |
| K <sub>2</sub> O                | 0.53  | 1.7   | 1.6    | 2.0    | 2.2    | 1.4   | 0.8   | 4.4   | 0.96  | 0.02   | 1.5    | 0.54   | 0.48  | 0.53  | 0.14  | 4.8    | 4.9   | 5.8   | 3.4   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>   | 0.52  | 0.68  | 1.5    | 1.3    | 0.48   | 0.94  | 0.45  | 0.58  | 0.61  | 0.20   | 0.55   | 0.54   | 0.58  | 0.52  | 0.46  | 0.21   | 0.23  | 0.21  | 0.16  |
| 平均                              | 3.5   | 1.5   | 2.1    | 1.3    | 1.6    | 1.8   | 3.2   | 1.6   | 1.9   | 2.3    | 1.1    | 3.0    | 3.9   | 3.5   | 3.3   | 0.63   | 2.4   | 0.95  | 4.4   |
| 总计                              | 99.72 | 99.99 | 100.52 | 100.09 | 100.14 | 99.99 | 99.69 | 99.76 | 99.93 | 100.35 | 100.52 | 100.13 | 99.78 | 99.83 | 99.83 | 100.58 | 99.68 | 99.94 | 99.87 |
| Mg                              | 63    | 32    | 46     | 46     | 34     | 40    | 55    | 51    | 57    | 68     | 50     | 63     | 66    | 63    | 59    | 29     | 36    | 30    | 46    |
| Sc                              | 37    | 9.9   | 10     | 8.9    | 5.3    | 11    | 30    | 27    | 30    | 54     | 27     | 35     | 32    | 35    | 27    | 3.7    | 4.0   | 2.3   | 3.4   |
| V                               | 392   | 53    | 256    | 217    | 52     | 150   | 425   | 308   | 414   | 428    | 345    | 370    | 367   | 384   | 308   | 20     | 71    | 28    | 74    |
| Cr                              | 654   | 4.6   | 6.5    | 4.2    | 5.8    | 10    | 76    | 416   | 123   | 633    | 142    | 536    | 484   | 634   | 416   | 3.4    | 5.3   | 37    | 6.5   |
| Co                              | 88    | 28    | 23     | 27     | 26     | 34    | 73    | 60    | 74    | 78     | 67     | 84     | 84    | 84    | 60    | 26     | 32    | 23    | 52    |
| Ni                              | 266   | 1.7   | 2.4    | 1.7    | 1.2    | 2.8   | 71    | 176   | 57    | 125    | 87     | 230    | 218   | 253   | 176   | 1.5    | 2.7   | 1.5   | 2.5   |
| Cu                              | 175   | 11    | 20     | 18     | 10     | 18    | 147   | 63    | 206   | 69     | 107    | 67     | 131   | 129   | 63    | 6.3    | 8.4   | 6.8   | 14    |
| Zn                              | 136   | 136   | 120    | 206    | 132    | 143   | 124   | 90    | 128   | 113    | 84     | 132    | 126   | 130   | 90    | 153    | 136   | 194   | 69    |
| Ga                              | 25    | 26    | 26     | 26     | 25     | 29    | 18    | 16    | 18    | 17     | 15     | 21     | 21    | 24    | 16    | 37     | 37    | 41    | 40    |
| Rb                              | 13    | 36    | 32     | 41     | 48     | 31    | 22    | 3.6   | 32    | 1.7    | 18     | 11     | 18    | 13    | 3.6   | 75     | 107   | 111   | 49    |
| Sr                              | 323   | 271   | 736    | 1086   | 297    | 334   | 585   | 280   | 545   | 172    | 464    | 283    | 280   | 317   | 280   | 23     | 291   | 177   | 71    |
| Y                               | 25    | 45    | 46     | 45     | 41     | 44    | 20    | 26    | 23    | 15     | 27     | 25     | 25    | 24    | 26    | 43     | 49    | 53    | 36    |
| Zr                              | 275   | 354   | 339    | 400    | 415    | 360   | 180   | 245   | 233   | 137    | 287    | 270    | 278   | 267   | 245   | 554    | 960   | 1173  | 1090  |
| Nb                              | 67    | 61    | 86     | 96     | 76     | 71    | 51    | 50    | 74    | 42     | 74     | 64     | 68    | 65    | 50    | 154    | 211   | 242   | 247   |
| Cs                              | 0.73  | 4.5   | 1.6    | 1.7    | 8.2    | 1.7   | 0.56  | 1.2   | 2.0   | 0.08   | 0.17   | 0.41   | 1.3   | 0.73  | 1.2   | 0.46   | 3.9   | 3.1   | 1.8   |
| Ba                              | 242   | 856   | 1981   | 2041   | 906    | 443   | 3542  | 209   | 415   | 115    | 2752   | 201    | 228   | 251   | 209   | 176    | 1700  | 343   | 1784  |

续表 1

| 组                                             |      | 第一组  |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------------------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 岩性                                            | 辉石岩  | 辉绿岩  |      | 辉长辉绿岩 |      | 玄武岩  |      |      |      |      |      |      |      | 粗面岩  |      |      |      |      |      |
| La                                            | 51   | 59   | 83   | 88    | 61   | 59   | 34   | 39   | 48   | 19   | 52   | 44   | 67   | 47   | 39   | 107  | 148  | 89   | 58   |
| Ce                                            | 102  | 124  | 172  | 183   | 122  | 121  | 66   | 80   | 90   | 39   | 109  | 93   | 121  | 98   | 80   | 204  | 284  | 185  | 121  |
| Pr                                            | 13.2 | 16.6 | 23.3 | 23.8  | 15.8 | 16.3 | 8.4  | 10.6 | 11.5 | 5.3  | 13.5 | 12.4 | 14.9 | 12.6 | 10.6 | 25.4 | 32.9 | 22.9 | 14.0 |
| Nd                                            | 56   | 73   | 103  | 101   | 65   | 71   | 34   | 46   | 46   | 23   | 56   | 52   | 60   | 53   | 46   | 97   | 123  | 94   | 53   |
| Sm                                            | 10.3 | 14.8 | 19   | 19    | 13.0 | 14.7 | 6.4  | 9.4  | 8.5  | 4.9  | 10.3 | 10.2 | 10.6 | 10.1 | 9.4  | 16   | 20   | 19   | 9.4  |
| Eu                                            | 2.9  | 4.8  | 6.2  | 6.0   | 4.4  | 4.5  | 2.5  | 2.6  | 2.4  | 1.4  | 3.5  | 2.7  | 3.0  | 2.8  | 2.6  | 3.8  | 4.6  | 4.2  | 2.2  |
| Gd                                            | 7.5  | 11   | 14.7 | 14.4  | 10.0 | 10.8 | 8.0  | 6.8  | 6.5  | 3.5  | 9.5  | 7.1  | 7.9  | 7.3  | 6.8  | 11.5 | 14.7 | 12.9 | 7.0  |
| Tb                                            | 1.2  | 2.0  | 2.3  | 2.2   | 1.8  | 1.9  | 0.84 | 1.2  | 1.1  | 0.63 | 1.3  | 1.2  | 1.3  | 1.2  | 1.2  | 2.0  | 2.4  | 2.5  | 1.2  |
| Dy                                            | 6.5  | 11.1 | 11.6 | 11.1  | 9.6  | 10.1 | 4.7  | 6.4  | 5.6  | 3.5  | 6.6  | 6.5  | 6.8  | 6.5  | 6.4  | 10.4 | 12.2 | 12.6 | 6.90 |
| Ho                                            | 1.2  | 2.1  | 2.2  | 2.1   | 1.9  | 1.9  | 0.91 | 1.2  | 1.04 | 0.70 | 1.2  | 1.2  | 1.2  | 1.2  | 1.2  | 1.9  | 2.3  | 2.5  | 1.5  |
| Er                                            | 2.7  | 5.2  | 5.0  | 5.1   | 4.6  | 4.6  | 2.3  | 2.8  | 2.6  | 1.7  | 2.9  | 2.7  | 2.9  | 2.7  | 2.8  | 4.9  | 5.9  | 6.2  | 4.5  |
| Tm                                            | 0.33 | 0.69 | 0.61 | 0.61  | 0.63 | 0.59 | 0.31 | 0.34 | 0.34 | 0.23 | 0.37 | 0.34 | 0.35 | 0.33 | 0.34 | 0.64 | 0.81 | 0.84 | 0.71 |
| Yb                                            | 2.1  | 4.4  | 3.8  | 3.9   | 3.9  | 3.7  | 1.95 | 2.1  | 2.1  | 1.5  | 2.3  | 2.0  | 2.1  | 2.0  | 2.1  | 4.1  | 5.5  | 5.6  | 5.1  |
| Lu                                            | 0.26 | 0.60 | 0.48 | 0.51  | 0.53 | 0.49 | 0.27 | 0.27 | 0.28 | 0.20 | 0.30 | 0.25 | 0.27 | 0.26 | 0.27 | 0.57 | 0.76 | 0.77 | 0.78 |
| Hf                                            | 7.1  | 8.8  | 8.2  | 9.0   | 9.4  | 7.7  | 4.7  | 6.3  | 5.6  | 3.6  | 6.9  | 6.9  | 6.9  | 7.1  | 6.3  | 14   | 22   | 25   | 24   |
| Ta                                            | 6.1  | 5.3  | 8.4  | 8.4   | 6.4  | 5.7  | 4.5  | 4.6  | 6.2  | 3.4  | 6.2  | 5.8  | 5.9  | 5.9  | 4.6  | 13   | 19   | 23   | 21   |
| Pb                                            | 2.5  | 4.2  | 5.5  | 12    | 3.3  | 2.8  | 2.6  | 3.6  | 3.3  | 3.5  | 4.5  | 3.1  | 4.1  | 2.3  | 3.6  | 8.9  | 110  | 13   | 16   |
| Th                                            | 5.7  | 5.9  | 6.9  | 7.0   | 6.9  | 5.0  | 4.0  | 4.9  | 5.4  | 2.9  | 6.5  | 5.6  | 5.9  | 5.8  | 4.9  | 10   | 20   | 20   | 22   |
| U                                             | 1.3  | 1.4  | 1.5  | 1.8   | 1.6  | 1.2  | 0.93 | 1.3  | 1.6  | 0.98 | 1.5  | 1.1  | 1.1  | 1.4  | 1.3  | 2.0  | 4.4  | 5.3  | 6.2  |
| 组                                             |      | 第二组  |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 岩性                                            | 辉石岩  | 辉绿岩  |      | 辉长辉绿岩 |      | 玄武岩  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| SiO <sub>2</sub>                              | 37.2 | 46.0 |      | 44.8  |      | 46.5 |      | 45.9 |      | 47.0 |      | 45.1 |      | 45.1 |      | 42.1 |      | 40.0 |      |
| TiO <sub>2</sub>                              | 7.0  | 4.0  |      | 4.4   |      | 3.7  |      | 2.4  |      | 4.5  |      | 4.0  |      | 3.8  |      | 4.2  |      | 4.6  |      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                | 9.5  | 13.6 |      | 12.6  |      | 14.5 |      | 21.2 |      | 14.0 |      | 13.4 |      | 14.3 |      | 13.7 |      | 15.1 |      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>Tot</sup> | 20.3 | 14.8 |      | 15.5  |      | 14.6 |      | 8.4  |      | 15.2 |      | 14.3 |      | 13.0 |      | 17.1 |      | 19.0 |      |
| FeO                                           | 15.3 | 11.3 |      | 11.8  |      | 11.5 |      | 4.7  |      | 12.0 |      | 11.9 |      | 10.7 |      | 12.3 |      | 14.5 |      |
| MnO                                           | 0.29 | 0.29 |      | 0.23  |      | 0.20 |      | 0.11 |      | 0.24 |      | 0.25 |      | 0.24 |      | 0.18 |      | 0.18 |      |
| MgO                                           | 7.1  | 4.2  |      | 6.6   |      | 5.3  |      | 3.2  |      | 3.2  |      | 4.4  |      | 3.9  |      | 6.2  |      | 4.8  |      |
| CaO                                           | 13.8 | 9.8  |      | 9.4   |      | 7.2  |      | 10.9 |      | 7.4  |      | 9.7  |      | 10.0 |      | 11.3 |      | 10.7 |      |
| Na <sub>2</sub> O                             | 0.61 | 3.9  |      | 3.2   |      | 3.6  |      | 4.3  |      | 3.9  |      | 3.7  |      | 4.0  |      | 2.2  |      | 2.1  |      |
| K <sub>2</sub> O                              | 0.25 | 0.26 |      | 0.40  |      | 1.5  |      | 0.17 |      | 1.4  |      | 1.3  |      | 1.2  |      | 0.7  |      | 0.71 |      |

续表 1

|                               |        |        |       |       |        |        |       |       |       |      |       |       |
|-------------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 1.5    | 1.5    | 0.32  | 0.44  | 0.70   | 1.3    | 1.7   | 1.7   | 0.32  | 0.31 | 0.36  | 0.45  |
| 平均                            | 2.8    | 2.2    | 2.3   | 2.0   | 3.3    | 1.9    | 1.9   | 2.5   | 2.2   | 2.3  | 2.1   | 1.6   |
| 总计                            | 100.35 | 100.55 | 99.75 | 99.54 | 100.58 | 100.04 | 99.75 | 99.74 | 100.2 | 99.8 | 100.6 | 99.99 |
| Mg                            | 44     | 38     | 48    | 45    | 48     | 32     | 40    | 39    | 45    | 36   | 43    | 45    |
| Sc                            | 27     | 18     | 31    | 23    | 8.9    | 13     | 14    | 9.5   | 32    | 22   | 36    | 19    |
| V                             | 713    | 299    | 478   | 399   | 214    | 284    | 307   | 268   | 575   | 642  | 599   | 322   |
| Cr                            | 8.5    | 7.3    | 108   | 50    | 6.0    | 10     | 13    | 14    | 26    | 29   | 10    | 42    |
| Co                            | 91     | 44     | 67    | 58    | 37     | 57     | 42    | 40    | 85    | 87   | 97    | 67    |
| Ni                            | 5.1    | 2.3    | 70    | 37    | 13     | 1.7    | 8.0   | 4.3   | 79    | 67   | 56    | 39    |
| Cu                            | 43     | 22     | 79    | 52    | 17     | 35     | 26    | 25    | 134   | 115  | 65    | 102   |
| Zn                            | 200    | 126    | 136   | 137   | 73     | 186    | 148   | 134   | 135   | 146  | 151   | 129   |
| Ga                            | 25     | 28     | 20    | 23    | 22     | 27     | 23    | 23    | 23    | 24   | 23    | 16    |
| Rb                            | 9.7    | 6.2    | 9.2   | 41    | 5.3    | 34     | 25    | 21    | 28    | 24   | 5.7   | 37    |
| Sr                            | 773    | 179    | 255   | 1026  | 1041   | 730    | 392   | 279   | 880   | 864  | 406   | 732   |
| Y                             | 33     | 47     | 21    | 26    | 17     | 39     | 36    | 37    | 18    | 15   | 21    | 28    |
| Zr                            | 294    | 273    | 139   | 202   | 95     | 283    | 190   | 184   | 122   | 109  | 143   | 230   |
| Nb                            | 52     | 51     | 26    | 27    | 23     | 59     | 38    | 44    | 19    | 17   | 24    | 66    |
| Cs                            | 13.7   | 1.1    | 2.9   | 3.6   | 0.43   | 2.5    | 0.70  | 4.3   | 5.1   | 6.0  | 1.7   | 0.47  |
| Ba                            | 314    | 115    | 181   | 1806  | 2149   | 745    | 595   | 357   | 699   | 451  | 164   | 794   |
| La                            | 57     | 52     | 19    | 29    | 30     | 48     | 44    | 45    | 19    | 18   | 21    | 47    |
| Ce                            | 115    | 111    | 42    | 60    | 61     | 100    | 93    | 97    | 41    | 37   | 45    | 85    |
| Pr                            | 16.8   | 15.9   | 5.9   | 8.1   | 8.8    | 13.9   | 13.5  | 14.1  | 5.8   | 5.4  | 6.6   | 10.2  |
| Nd                            | 74     | 74     | 28    | 37    | 40     | 65     | 64    | 65    | 27    | 25   | 31    | 41    |
| Sm                            | 15     | 16     | 6.4   | 7.9   | 7.9    | 13.7   | 13.8  | 14.0  | 6.0   | 5.3  | 7.0   | 7.8   |
| Eu                            | 3.9    | 4.5    | 2.1   | 3.0   | 3.7    | 4.7    | 4.4   | 4.5   | 2.3   | 2.0  | 2.5   | 2.2   |
| Gd                            | 10.2   | 11.4   | 4.8   | 7.0   | 6.9    | 10.4   | 10.0  | 10.3  | 5.0   | 4.2  | 5.1   | 6.6   |
| Tb                            | 1.7    | 2.1    | 0.89  | 1.1   | 0.88   | 1.8    | 1.8   | 1.8   | 0.76  | 0.67 | 0.94  | 1.1   |
| Dy                            | 8.6    | 11.2   | 4.9   | 5.9   | 4.5    | 9.4    | 9.4   | 9.4   | 4.3   | 3.8  | 5.2   | 6.1   |
| Ho                            | 1.5    | 2.1    | 0.99  | 1.2   | 0.79   | 1.8    | 1.7   | 1.8   | 0.82  | 0.71 | 0.99  | 1.3   |
| Er                            | 3.5    | 5.0    | 2.3   | 2.8   | 1.8    | 4.2    | 4.0   | 4.1   | 1.9   | 1.7  | 2.3   | 3.2   |
| Tm                            | 0.41   | 0.62   | 0.30  | 0.37  | 0.21   | 0.51   | 0.48  | 0.50  | 0.25  | 0.22 | 0.30  | 0.45  |
| Yb                            | 2.5    | 3.9    | 1.9   | 2.3   | 1.3    | 3.2    | 2.9   | 3.0   | 1.5   | 1.3  | 1.8   | 3.0   |
| Lu                            | 0.32   | 0.51   | 0.25  | 0.30  | 0.16   | 0.43   | 0.38  | 0.38  | 0.20  | 0.17 | 0.25  | 0.41  |
| Hf                            | 8.3    | 6.7    | 3.8   | 4.8   | 2.3    | 6.7    | 4.9   | 4.8   | 3.1   | 2.9  | 3.8   | 5.4   |
| Ta                            | 5.0    | 4.5    | 2.0   | 2.5   | 1.9    | 5.1    | 3.6   | 3.9   | 1.5   | 1.3  | 2.1   | 5.6   |
| Pb                            | 4.5    | 0.60   | 6.2   | 0.43  | 4.5    | 2.9    | 1.5   | 0.47  | 0.96  | 2.0  | 0.37  | 4.0   |
| Th                            | 4.9    | 3.7    | 1.7   | 2.7   | 1.5    | 3.9    | 3.2   | 2.9   | 1.4   | 1.4  | 2.0   | 6.5   |
| U                             | 1.1    | 0.96   | 0.41  | 0.71  | 0.34   | 0.95   | 0.72  | 0.66  | 0.35  | 0.33 | 0.37  | 1.3   |

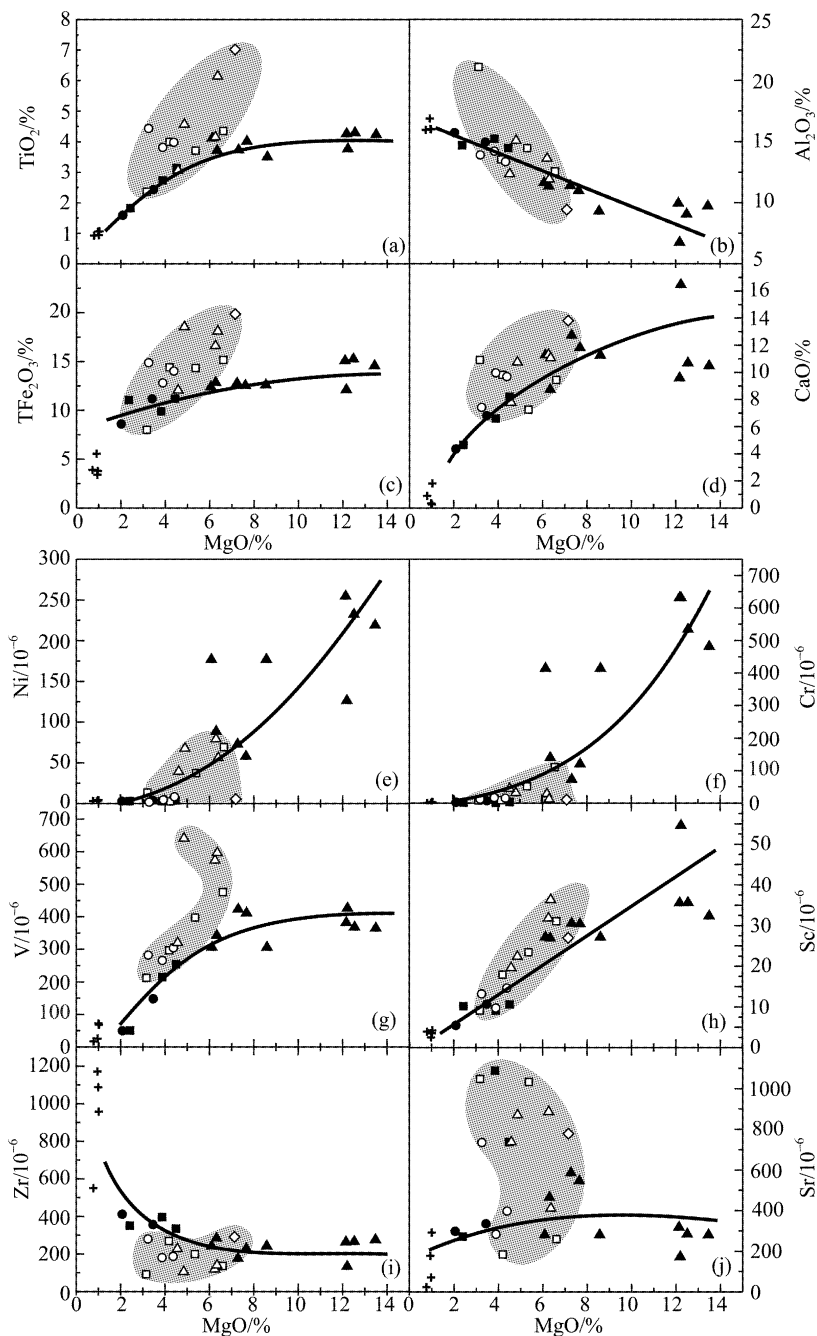


图 3 紫阳、岚皋碱性杂岩鲍温变异图

图中符号同图 2, 其中实心符号代表第一组岩石, 空心符号代表第二组岩石

土总量低( $\Sigma \text{REE} = (105.11 \sim 214.94) \times 10^{-6}$ )、轻稀土富集弱( $\text{La}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N} = 1.89 \sim 3.77$ )、Eu 异常较显著( $\delta \text{Eu} = 0.93 \sim 1.26$ )。两组岩石的  $\Sigma \text{REE}$  和  $\delta \text{Eu}$  与  $\text{MgO}$  均呈现负相关关系。其中, 第一组岩石随  $\text{MgO}$  降低其稀土总量升高的同时, 它们的 Eu 异常由微弱负异常转变为微弱正异常; 但

第二组岩石伴随着稀土总量升高, Eu 异常由微弱负异常迅速转变为明显正异常, 指示它们的岩浆演化过程存在较大差异. 与基性岩类相比, 粗面岩类的稀土总量高 ( $\Sigma \text{REE} = (285.75 \sim 657.34) \times 10^{-6}$ ),  $\text{La}_N/\text{Sm}_N (3.02 \sim 4.58)$  和  $\delta \text{Eu} (0.78 \sim 0.82)$  及它们的稀土模式与第一组岩石基本相似(图 4(e)), 说明它们与第一组岩石来自相同源区, 并有一致的岩浆演化过程.

所有岩石类型的微量元素原始地幔标准化蛛网图为 Nb 相对富集呈峰, Pb, Sr, P 亏损成谷的不相容元素相对富集隆起的图谱(图 5(a), (b), (c), (d), (e)), 与 OIB 型玄武岩特征相一致<sup>[14]</sup>. 尽管 OIB 以不相容元素富集为特征, 但不相容元素含量的明显变化常指示源区成分的差异<sup>[14]</sup>. 本区第一组岩石的不相容元素明显高于第二组岩石, 表明它们的源区存在一定差异, 但它们的谱型均与 EM I 或 HIMU 的 OIB 谱型相类似, 暗示它们均主要来自与 EM I 或 HIMU 的 OIB 相同的富集地幔源.

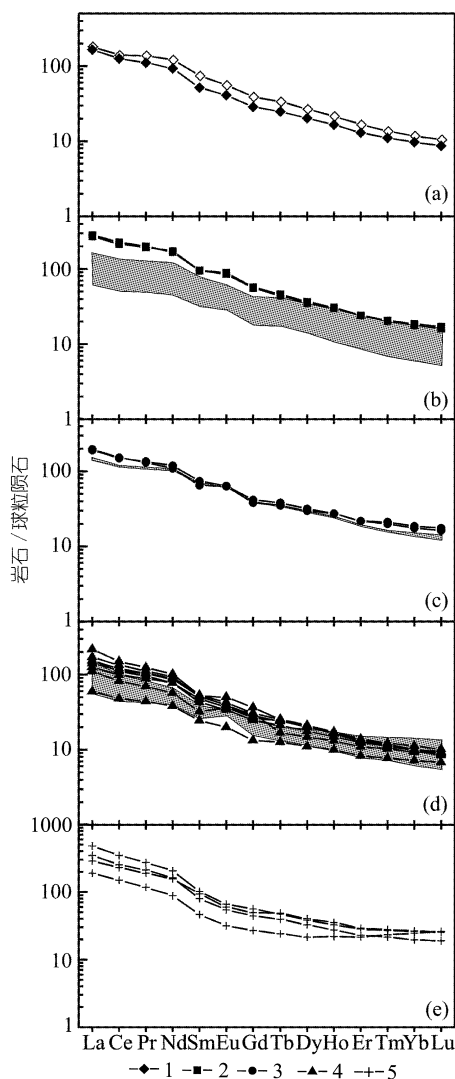


图 4 紫阳、岚皋碱性杂岩稀土模式图(标准化值据 Boynton, 1984<sup>[13]</sup>)

图中符号同图 2, 图中曲线为第一组岩石谱型, 阴影区为第二组岩石分布区

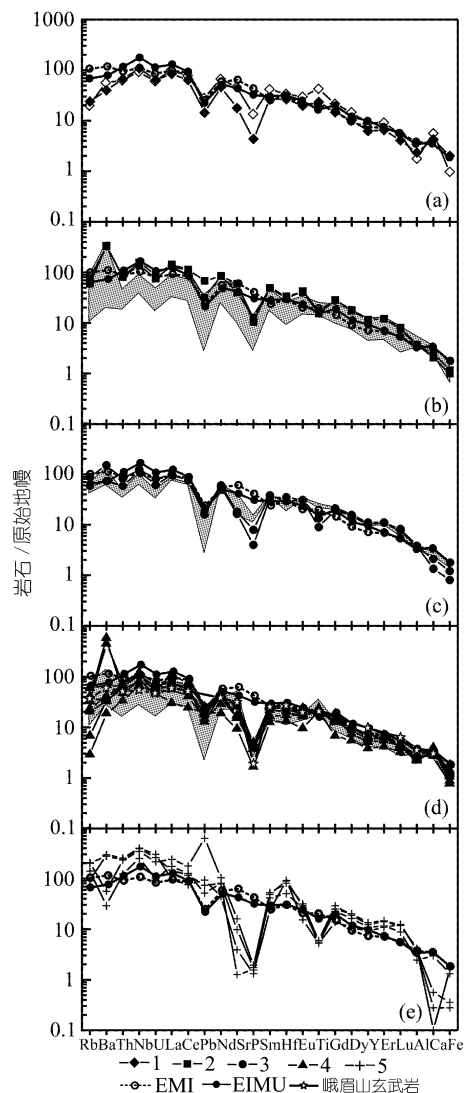


图 5 紫阳、岚皋碱性杂岩微量元素/原始地幔标准化图(标准化值据 Hofmann<sup>[15]</sup>)

图中符号同图 2, 图中曲线为第一组岩石谱型, 阴影区为第二组岩石分布区. EM I 和 HIMU 据 Hofmann<sup>[15]</sup>, 峨眉山玄武岩据 Yigang Xu 等<sup>[16]</sup>

## 4 讨论

南秦岭紫阳、岚皋地区的脉岩和火山杂岩主元素、稀土元素和微量元素特征共同揭示, 它们是由来自源区有差异、岩浆演化不尽相同的具双峰火山岩特征的两组碱性岩石构成. 两组岩石的 LREE 及 LIL 相对富集, 不相容元素(IEs)含量有所不同, 表明它们来自略有不同的富集地幔源区. 该区所有基性岩类均呈现明显 Nb 正异常和 Pb 负异常(图 5), 说明它们基本未受到大陆地壳混染作用的影响. 而粗面岩不同程度富集 Pb, 证明已受到地壳物质的混染. 低压条件下斜长石分离结晶作用可造成演化岩石 Sr 负异常出现, 本区除粗面岩外所有岩石均不存在明显 Eu 负异常, 说明并未发生以斜长石为主的分离结晶作用. 因此, 第一组岩石中代表原始玄武岩浆岩石( $Mg\# > 65$ )具低 Sr 含量, 反映了源区低 Sr 的特征. 但 Mg # 低的个别样品 Sr 含量变化很大(图 3(j)), 它们与烧失量(LOI)具明显负相关关系, 说明蚀变作用对岩石 Sr 的变化产生了明显的影响. 另外, 本区岩石(特别是粗面岩)P, Ti 明显亏损, 主要是由于岩浆演化晚期, 部分富集了 Ti, P 等元素的榍石和磷灰石等矿物发生了结晶分离作用.

大陆裂谷作用代表了地壳的伸展拉张, 受深部动力学过程所决定, 其陆壳可进一步分裂最终导致新洋盆的形成, 但也常由于深部原因使其终止而无新洋盆打开. 裂谷作用形成的典型岩石组合为拉斑玄武岩及碱性玄武岩系列组成的双峰火山岩, 以碱性玄武岩为主的岩石组合代表裂谷早期阶段的产物; 碱性玄武岩和拉斑玄武岩同等发育则指示大陆地壳已明显减薄进入裂谷作用中期; 当大陆破裂最终被拉开有新洋壳形成时, 又以拉斑玄武岩组合为主<sup>[9]</sup>. 南秦岭紫阳、岚皋地区以碱性基性岩为主构成本区特征的双峰火山岩, 基性岩类高 Ti, Zr 和 Nb( $TiO_2 = 1.61\% \sim 4.45\%$ , 平均为 3.34,  $Nb = (23.04 \sim 96.05) \times 10^{-6}$ , 平均为  $57.28 \times 10^{-6}$ ,  $Zr = (95.21 \sim 414.57) \times 10^{-6}$ , 平均为  $281.34 \times 10^{-6}$ , 与中国东部中生代大陆裂谷玄武岩<sup>[17]</sup>富  $TiO_2$ (平均 2.25%)、Nb(平均  $58 \times 10^{-6}$ )和 Zr(平均  $285 \times 10^{-6}$ )特征相一致, 表明南秦岭区这一碱性岩浆杂岩带代表了大陆裂谷发育早期阶段的产物.

另一方面, OIB、板内大陆溢流玄武岩(CFB)以及大陆地壳内的基性岩墙群的形成往往与深部地幔柱岩浆活动密切相关, 特别是当基性岩墙群或 CFB 大量出现并与其他岩石一同构成双峰火山岩模式时, 不但反映了地壳伸展裂解环境, 而且指示有地幔柱物质的上涌<sup>[18~23]</sup>. 通常, 与地幔柱活动有关的 CFB 和 OIB 源区多为富集地幔源, 它们的 IEs(特别是 Nb, Ta)和 LREE 富集,  $Ta/Hf > 0.3$ ,  $Th/Ta < 1.6$ <sup>[24]</sup>,  $Nb/Ta \approx 14 \sim 15$ <sup>[25]</sup>. 南秦岭紫阳、岚皋地区两组岩石的基性岩类均相对富集 IEs 和 LREE,  $Ta/Hf > 0.3$ (基性脉岩的  $Ta/Hf = 0.51 \sim 1.03$ ; 玄武岩的  $Ta/Hf = 0.45 \sim 1.11$ ;  $Th/Ta < 1.6$ (基性脉岩的  $Th/Ta = 0.74 \sim 1.11$ ; 玄武岩的  $Th/Ta = 0.86 \sim 1.16$ ), 反映了地幔柱源岩浆活动的成因特征. 但研究区基性岩类的 Nb/Ta 比值(均值分别为 11.43, 12.05)相对低于地幔柱成因的玄武岩(14 ~ 15), 主要是由于它们的源区富 Ti, 致使由该源区生成的岩浆演化出的岩石中大量出现钛铁矿(或钛磁铁矿)、榍石等富 Ti 矿物, 这些富 Ti 矿物的存在可大大降低 Nb/Ta 比值<sup>[17]</sup>. 同时, 富 Ti 地幔源区熔融后将形成亏损 Sr, P 并富集 Ti 的高 Ti 玄武岩<sup>[26,27]</sup>. 这一特征与我国西南三省晚二叠纪时由地幔柱头部熔融形成的峨眉山高 Ti 玄武岩<sup>[16,28]</sup>类似, 它们的原始地幔标准化图谱也相一致(图 5(d)), 同样证实南秦岭区存在与地幔柱相关的岩浆活动. 在 Ba/Nb-La/Nb 图解中基性火山岩和脉岩除个别样品由于高的 Ba/Nb 值而落在 OIB 区外, 大多与峨眉山高 Ti 玄武岩一样主要分布于 OIB 区(图略). 然而, 南秦岭基性火山岩和脉岩相对亏损

Pb, Th/Ta 比值低于峨眉山玄武岩( $\text{Th/Ta} = 0.41 \sim 2.68$ ), 指示尽管它们均来自与 OIB 相同的源区, 并与地幔柱上涌相关, 但南秦岭各类脉岩和火山岩主要来自地幔柱岩浆源区, 大陆岩石圈物质对它们形成的贡献不大. 而峨眉山玄武岩形成过程明显有大陆岩石圈物质参与<sup>[16,28,29]</sup>, 表明晚二叠纪期间扬子克拉通在古特提斯打开的总背景下发生伸展拉张时其下部地幔柱活动强烈, 不但造成地幔柱源岩浆的形成, 同时有大陆岩石圈地幔的熔融, 二者混合上升喷发形成了具大陆溢流玄武岩特征的峨眉山玄武岩<sup>[16,30]</sup>. 岩石圈厚度也直接影响地幔源区部分熔融发生的深度和程度, 进而影响岩浆成分<sup>[31]</sup>. 岩石圈厚度大, 地幔源区在高压下发生低程度部分熔融, 石榴石成为主要残留矿物相, 造成熔浆中亏损 Y 和 HREE, 强不相容元素富集, 并富 Ti 和  $\text{MgO}$ , 这种岩浆演化后即可形成碱性程度较高的富 Ti 玄武岩<sup>[29]</sup>. 研究区各类岩石高  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ , 轻、重稀土强烈分异, 富集不相容元素, 显示了此类岩浆演化的特点. 根据火山岩中地幔俘虏晶形成深度介于  $100 \sim 150 \text{ km}$  之间<sup>[6]</sup>推断, 这些岩石的岩浆至少来自于  $150 \text{ km}$  以下的地幔源区, 即它们是在深度大于  $150 \text{ km}$  的地幔区由地幔柱活动相关的深部岩浆作用上侵或喷出地表的产物. 因此, 从南秦岭岚皋地区中志留世笔石页岩覆盖于火山岩和碱性岩脉之上<sup>[9]</sup>, 紧邻其西部的晚古生代地层中未发现此类岩脉出露以及岩脉所获得  $431.9 \sim 413.10 \text{ Ma}$  的同位素年龄<sup>[5,6]</sup>, 证实了中志留世之前的早古生代该区深部存在与地幔柱活动相关的岩浆作用. 事实上, 从南秦岭早古生代被动大陆边缘发育奥陶-志留纪富硅和碳的陆缘裂谷深水盆地, 并有岩浆杂岩侵位于该裂谷沉积岩系中, 同样指示该区深部与地幔柱有关的活动引起的早古生代伸展扩张作用. 从而不但在当时隶属于扬子地块北缘的南秦岭区形成了这条颇具规模的碱性岩浆杂岩带, 同时有伸展盆地叠加于该被动陆缘之上<sup>[3]</sup>. 另外, 地幔柱活动得以长期存在的一个重要条件是地幔内部必须有足够的热量供给<sup>[16]</sup>. 根据该区仅发育碱性岩浆活动的产物而明显缺失大陆拉斑玄武岩分析, 该裂谷扩张作用仅为早期阶段, 虽然该区早古生代晚期岩浆的地幔源区深度较大但由碱性岩浆一般代表地幔源区低程度熔融的结果看, 显然深部持续作用和热量供给不足, 使得其地幔柱相关的扩张活动相对短暂, 未能沿陕西紫阳、岚皋、平利和湖北竹溪等地东西一线扩张打开形成新的洋盆.

## 5 结论

南秦岭区发育的一条上百公里长的早古生代晚期碱性脉岩和火山杂岩带代表了秦岭早古生代末期一次扩张分裂作用. 这一作用由与地幔柱相关的活动引起, 但由于该活动短暂, 从而未能继续扩张打开新的洋盆.

发育于陕、鄂两省交界地区的早古生代碱性脉岩和火山杂岩带向东在湖北随(州)枣(阳)及河南桐柏地区也大量出露<sup>[32]</sup>, 同时对比扬子西缘有类似的情况出现<sup>[33]</sup>, 充分反映南秦岭区、扬子地块北缘乃至西缘早古生代时期存在一次广泛的扩张裂谷作用, 代表了秦岭和扬子北缘及西缘地区重要地壳垂向增生事件, 对中国大陆壳的形成与演化具有重要大陆动力学意义.

**致谢** 微量元素分析工作由中国地质大学(武汉)国土资源部壳幔体系组成-物质交换及动力学开放研究实验室胡圣虹和刘勇胜博士承担, 特致谢忱.

## 参 考 文 献

- 1 张国伟, 孟庆任, 于在平, 等. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征, 中国科学, D 辑, 1996, 26: 193 ~ 200

- 2 张本仁, 张宏飞, 赵志丹, 等. 东秦岭及邻区壳、幔地球化学分区和演化及其大地构造意义. 中国科学, D 辑, 1996, 26: 201 ~ 208
- 3 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 2001
- 4 黄月华, 杨建业. 北大巴山笔架山-铜洞湾碱性镁铁质熔岩的岩石学研究. 中国地质科学院西安地质矿产研究所刊, 1990, 28: 15 ~ 24
- 5 黄月华. 岚皋碱性镁铁-超镁铁质潜火山杂岩中金云角闪辉石岩类地幔捕虏体矿物学特征. 岩石学报, 1993, (4): 367 ~ 378
- 6 夏祖春, 夏林圻, 张 诚. 北大巴山碱质基性-超基性潜火山杂岩的辉石矿物研究. 西北地质科学, 1992, 13(2): 22 ~ 30
- 7 黄月华, 任有祥, 夏林圻, 等. 北大巴山早古生代双模式火成岩套——以高滩辉绿岩和嵩坪粗面岩为例. 岩石学报, 1992, (3): 243 ~ 256
- 8 夏林圻, 夏祖春, 张 诚, 等. 北大巴山碱质基性-超基性潜火山杂岩岩石地球化学. 北京: 地质出版社, 1994
- 9 雒昆利, 端木和顺. 大巴山区早古生代基性火成岩的形成时代. 中国区域地质, 2001, 20(3): 262 ~ 266
- 10 Gao S, Ling W L, Qiu Y M, et al. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63:2071 ~ 2088
- 11 Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, et al. A classification of igneous rocks and glossary of terms. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1989. 1 ~ 50
- 12 Wilson M. Igneous petrogenesis. London: Unwin Hyman, 1989. 287 ~ 374
- 13 Boyton W V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson P, ed. Rare earth element geochemistry. New York: Elsevier, Scientific Publications B Y, 1984. 63 ~ 114
- 14 Hofmann A W. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism. *Nature*, 1997, 385: 219 ~ 229
- 15 Hofmann A W. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 90: 297 ~ 314
- 16 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. *Lithos*, 2001, 58: 145 ~ 168
- 17 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根-柱构造-大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社, 1996. 40 ~ 58
- 18 Hill R I. Mantle plumes and continental tectonics. *Lithos*, 1993, 30: 193 ~ 206
- 19 White R S, Kenzie D M. Mantle plumes and flood basalts. *J Geophys Res*, 1995, 100(B9): 17543 ~ 17585
- 20 Wedepohl K H, Baumann A. Central European Cenozoic plume volcanism with OIB characteristics and indications of a lower mantle source. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, 136: 225 ~ 239
- 21 Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. The breakup of Rodinia: did it start with a mantle plume beneath South China? *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 173:171 ~ 181
- 22 夏林圻, 夏祖春, 赵江天, 等. 北祁连山西段元古宙大陆溢流玄武岩性质的确定. 中国科学, D 辑, 2000, 30: 1 ~ 8
- 23 李江海, Kroner A, 黄雄南, 等. 恒山地区基性岩墙群的发现及“五台群”绿岩地层的解体. 中国科学, D 辑, 2001, 31: 902 ~ 910
- 24 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别. 岩石学报, 2001, 17(3): 413 ~ 421
- 25 Trevor H G. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system. *Chemical Geology*, 1995, 120: 347 ~ 359
- 26 Fram M S, Leshner C E. Generation and polybaric fractionation of East Greenland Early Tertiary flood basalts. *J Petro*, 1997, 38: 231 ~ 275
- 27 Hald, N, Tegner C. Composition and age of tertiary sills and dykes, Jameson Land Basin, East Greenland: relation to regional flood volcanism. *Lithos*, 2000, 54: 207 ~ 233
- 28 宋谢炎, 侯增谦, 曹志敏, 等. 峨眉山大火成岩省的岩石地球化学特征及时限. 地质学报, 2001, 75(4): 498 ~ 506
- 29 张鸿翔, 徐志方, 马英军, 等. 大陆溢流玄武岩的地球化学特征及起源. 地球科学, 2001, 26(3): 261 ~ 268
- 30 Chung S L, Jahn B M. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary. *Geology*, 1995, 23(10): 889 ~ 892
- 31 Mahotkin I L, Gibson S A, Thompson R N, et al. Late Devonian Diamondiferous Kimberlite and Alkaline Picrite (Proto-kimberlite?) Magmatism in the Arkhangelsk Region. NW Russia *Journal of Petrology*, 2000, 41(2): 201 ~ 227
- 32 邱家骥. 秦巴碱性岩. 北京: 地质出版社, 1993. 1 ~ 30
- 33 袁海华, 张树发, 张 平, 等. 攀西裂谷岩浆岩同位素地质年代学初步研究. 见: 张云湘主编, 中国攀西裂谷文集. 北京: 地质出版社, 1985. 241 ~ 257