

东太平洋海隆 13°N 附近洋中脊玄武岩微量元素特征

赵慧静^{1,2,3}, 曾志刚^{1,2}, 殷学博^{1,2}, 陈 帅^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 对 33 件采自东太平洋海隆(EPR)13°N 附近的玄武岩和火山玻璃样品进行了微量元素分析, 以探讨该区域玄武岩的演化过程和物质来源。测试分析结果显示所有样品的微量元素含量比值 $m(\text{Tb})/m(\text{Lu})$ (1.74~2.03), $m(\text{Sm})/m(\text{Nd})$ (0.29~0.35) 和 $m(\text{Nd})/m(\text{Y})$ (0.32~0.48) 存在不能忽略的变化, 表明它们可能受到了非均一质地幔来源的影响。 $m(\text{La})/m(\text{Nb})$, $m(\text{La})/m(\text{Sm})$ 和 $m(\text{La})$ 的线性相关性判别结果, 以及稀土元素分布型式图表现的元素分布特征等均表明东太平洋海隆 13°N 附近的洋中脊玄武岩可能来自不同的端元组分, 也证明研究区域内的玄武岩除 N-MORB(常规型 MORB)外, 还有 E-MORB(富集型 MORB)。此外, 玄武岩 $m(\text{Ce})/m(\text{Pb})$ 和 $m(\text{Ce})$, $m(\text{Nb})/m(\text{U})$ 和 $m(\text{Nb})$, 以及 $m(\text{Nb})/m(\text{La})$ 和 $m(\text{La})$ 线性相关性, 均显示了这些微量元素比值和微量元素含量的正相关趋势, 这可能与双组份地幔熔融有关。 $m(\text{Nb})/m(\text{Th})$ 和 $m(\text{Th})$ 线性相关性显示出负相关, 显示该区域玄武岩的地幔来源组成可能受到了富集组分的影响。分析显示, 样品的 Nb^* 值均大于 1, 而大部分样品的 Ta^* 值大于 1, 这表示大部分玄武岩的来源很可能是从俯冲区域循环的物质。

关键词: 东太平洋海隆(EPR); 洋中脊玄武岩; 微量元素

中图分类号: P736.4³ 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)04-0061-10
doi: 10.11759/hyhx20121114002

洋中脊玄武岩(MORB)在地球表面广泛分布, 它是在洋脊扩张背景下, 上升地幔解压熔融的最终产物, 记录了上层地幔的地球化学特征。因此, 洋中脊玄武岩是了解地幔组分和研究全球构造板块的有力工具。

MORB 具有多种地球化学类型, 包括“N-MORB”(常规型 MORB)和“E-MORB”(富集型 MORB)^[1], 后者又被称为“地幔柱-洋中脊玄武岩”或者“P-MORB”。现在的 MORB 数据汇编清楚地显示这两者之间有一个完整的连续性^[2]。E-MORB(或“P-MORB”)多与热点或地幔柱相关^[3], 大部分 E-MORB 被认为是地幔柱物质经由岩脉或地幔通道进入软流圈的产物^[4], 但也有一些例外, 如某些海山地区的 E-MORB, 不能简单地归因于地幔柱物质的输入^[5]。E-MORB 中富集组分的来源大致可以分为两类: 一是循环洋壳, 其中可能含有部分陆壳物质的输入^[6]; 二是上层地幔由于低程度熔融体的交代作用, 生成了一个随后经历了大范围熔融的富集来源^[5, 7-8]。

微量元素是了解硅酸盐地球演化及其主要来源储库的关键指标, 玄武岩中微量元素 Nb, Ta, K 和 Pb

的全岩分配系数(相对于其他微量元素)可用作玄武岩物质来源的示踪器^[5]。本文分析了 33 件东太平洋海隆 13°N 附近地区的玄武岩和火山玻璃样品, 通过对这些岩石样品的微量元素数据及其比值的分析, 对该区域玄武岩的演化过程进行研究。

1 地质背景

研究区东太平洋海隆(EPR)13°N(图 1)位于 EPR15°N 和 11°49'N 之间, 扩展速率大约 10~11 cm/a(图 2), 属于快速扩张洋脊, 海隆两侧扩展速率呈不对称(西侧 6.5 cm/a, 东侧 4.5 cm/a)^[9-10]。

根据构造特征和基底地形, Choukroune 等^[10-11]将 EPR13°N 附近的海隆分为四个部分: (1)位于中部地堑的活动火山带; (2)构成中央地堑并向隆起轴两侧延展大约 2 km 的活动构造区; (3)距离轴线外 2 km

收稿日期: 2012-11-14; 修回日期: 2014-02-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(40830849, 40976027, 40906029); 国家重点基础研究发展计划(013CB429700); 山东省自然科学基金杰出青年基金项目(JQ200913); 国家大洋重大专项课题(DY125-12-R-02, DY125-11-R-05)
作者简介: 赵慧静(1983-), 女, 浙江宁波人, 在读博士生, 主要从事岩石地球化学研究, E-mail: silent911sohu@163.com

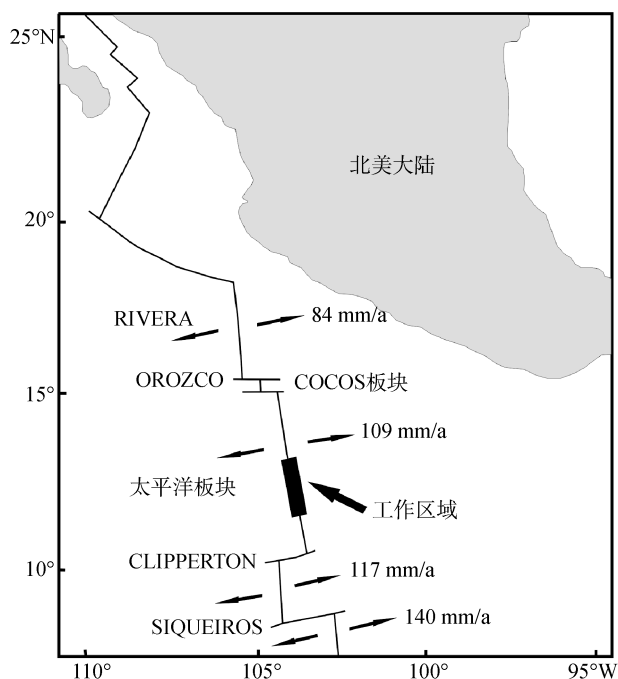


图1 东太平洋海隆 13°N 附近研究地区地质构造图
Fig.1 The tectonic map of working area near the East Pacific Rise(EPR) 13°N

远, 由不连续地垒和地堑构成的非活动构造区; (4)位于海隆轴线两侧 20 km 之内的轴外火山(海山)。

之前的研究已经显示, 东太平洋海隆 13°N 附近区域作为快速扩展洋脊, 洋壳下方 1~2 km 处存在着透镜状的岩浆房, 其沿洋中脊轴部方向连续分布, 呈薄且窄的席状熔融体, 覆盖于厚度约为 1~1.5 km 的碎晶带之上^[12-13]。McClain 等^[13-14]对该地区附近地壳进行的地震反射数据的分析显示, 该区域洋底下的浅部地壳中可能存在一个与岩浆房有关的低速带。该研究区域的

地质构造见图 1(修改自 Macdonald 等的图 1a^[15])。

2 样品和方法

本文研究的玄武岩和火山玻璃样品是在 2003 年 11 月大洋一号的 DY105-12 航次的第四航段的海底热液硫化物调查中, 在东太平洋海隆 12°41'~12°49'N, 103°52'~103°57'W 之间, 水深 528~2 709 m 的热液区域(图 2), 用拖网作业获取的。采集到的玄武岩部分带有玻璃壳层, 另外还有些火山玻璃(见图 3), 具体采样信息见表 1。

微量元素分析在中国科学院海洋研究所用 ICP-MS(ELAN DRC II)完成。首先在体式显微镜下通过手工, 挑选岩石表层新鲜玻璃(标记 g)及岩石基质部分(标记 m), 然后把所有样品在蒸馏水中通过超声波振荡 1 h(每 15 min 换水一次), 在烘箱中控制温 60°C 将样品烘干, 接着在玛瑙研钵中磨至 200 μm。

称取 40 mg 至 Teflon 烧杯中, 加 1.5 mL HF 和 0.5 mL HNO₃, 然后放置于电热板并控温至 150 °C, 加热 24 h 后调节温度至 120°C 并加入 0.2 mL HClO₄, 在 120°C 下直至不冒白烟, 再在剩余物中加 1 mL HNO₃ 和 1 mL 纯水(去离子), 把样品密封在 Teflon 烧杯中, 置于 120°C 下回溶 12 h, 最后利用纯水配置的 2% HNO₃ 稀释样品 1 000 倍, 进行上机测试。测试过程中采用 GBW07315, GBW07316BCR-2(国际标样)作为标准样品。实验的具体过程已由张国良等^[16]进行了详细描述。

本文通过对东太平洋海隆 13°N 地区玄武岩的微量元素含量数据及相关元素含量比值的分析, 对该区域玄武岩的演化过程进行探讨。

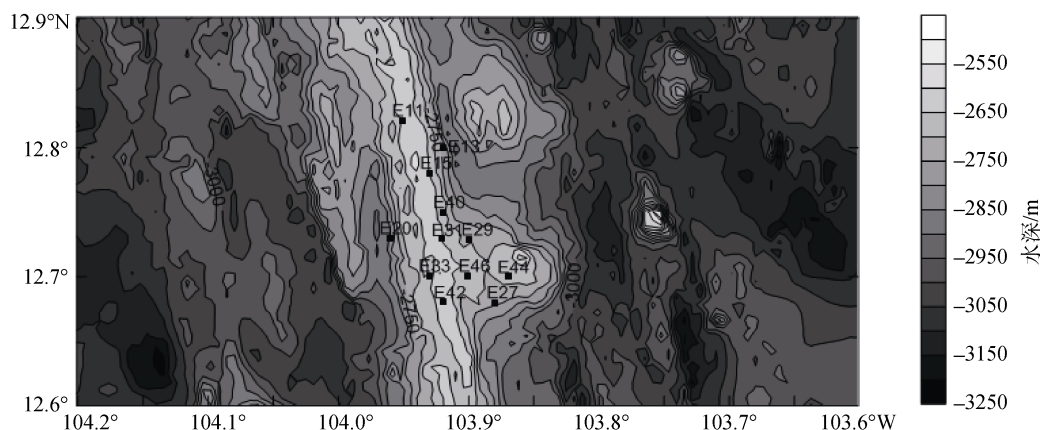


图 2 东太平洋海隆 13°N 附近地区采样位置和水深图
Fig.2 The sampling locations and bathymetric chart near EPR 13°N

表 1 东太平洋海隆 13°N 附近区域采样位置信息

Tab. 1 Information of sampling location near EPR 13°N

| 站位编号 | 拖网起点 | 拖网终点 | 水深(m) | 样品描述 |
|------|-------------------------|-------------------------|-----------|--------------------|
| E11 | 12°49'41"N, 103°57'38"W | 12°50'43"N, 103°57'07"W | 2626~2676 | 火山玻璃、未蚀变玄武岩 |
| E13 | 12°48'38"N, 103°55'59"W | 12°50'34"N, 103°56'43"W | 2528~2548 | 火山玻璃、蚀变玄武岩、未蚀变玄武岩 |
| E15 | 12°47'00"N, 103°56'24"W | 12°48'44"N, 103°57'10"W | 2563~2624 | 未蚀变玄武岩 |
| E20 | 12°44'47"N, 103°56'08"W | 12°48'03"N, 103°58'18"W | 2633~2732 | 火山玻璃、未蚀变玄武岩 |
| E27 | 12°41'57"N, 103°53'15"W | 12°43'02"N, 103°55'57"W | 2646~2707 | 火山玻璃、未蚀变玄武岩 |
| E29 | 12°42'26"N, 103°54'49"W | 12°44'12"N, 103°54'46"W | 2617~2704 | 蚀变玄武岩 |
| E31 | 12°44'39"N, 103°55'31"W | 12°42'36"N, 103°55'28"W | 2616~2636 | 火山玻璃、蚀变玄武岩、未蚀变的玄武岩 |
| E33 | 12°42'32"N, 103°56'07"W | 12°42'17"N, 103°55'14"W | 2615~2659 | 蚀变玄武岩 |
| E40 | 12°45'10"N, 103°55'10"W | 12°44'39"N, 103°56'31"W | 2680~2709 | 蚀变玄武岩、火山玻璃 |
| E42 | 12°41'24"N, 103°55'41"W | 12°44'27"N, 103°56'26"W | 2651~2678 | 蚀变玄武岩、火山玻璃 |
| E44 | 12°42'39"N, 103°52'38"W | 12°43'09"N, 103°54'47"W | 2626~2653 | 火山玻璃、未蚀变玄武岩 |
| E46 | 12°42'41"N, 103°54'28"W | 12°43'11"N, 103°54'46"W | 2640~2644 | 蚀变玄武岩 |

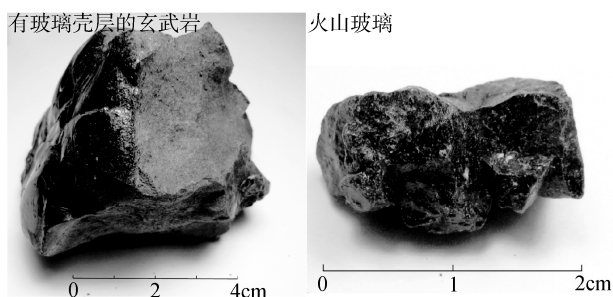


图 3 东太平洋海隆 13°N 附近样品照片
Fig. 3 Picture of samples near EPR 13°N

3 结果和讨论

东太平洋海隆 13°N 附近 33 件玄武岩样品的微量元素数据见表 2, 微量元素含量比值见表 3, 其中样品的玄武岩基质部分标注为 m, 火山玻璃部分标

注为 g。从图 4 可以看出, 洋中脊玄武岩的 $m(U)/m(Ta)$ 高于火山玻璃的 $m(U)/m(Ta)$, 但 $m(Ce)/m(Pb)$ 和 $m(Nb)/m(U)$ 则低于火山玻璃的。此次研究, 选择 Sun 和 McDonough 的 E-MORB 和 N-MORB 数据作为参照对比, 东太平洋海隆 13°N 附近地区玄武岩样品的稀土元素球粒陨石标准化分布型式图显示(图 5), 其中, N-MORB, E-MORB 数据来自 Sun 和 McDonough^[17]。图 5 显示, 大部分样品的稀土元素分布型式图具有相似的配分模式, 而样品 E40-m 显示出轻微的轻稀土元素富集(例如 La, Ce 和 Pr)。

3.1 东太平洋海隆 13°N 附近洋中脊玄武岩的地球化学类型

玄武岩中的某些微量元素对壳层污染很敏感^[18-19], 因此可以用来指示地幔是否为均一质。此次研究中, 几个重要的微量元素含量比值分别为 $1.74 < m(Tb)/$

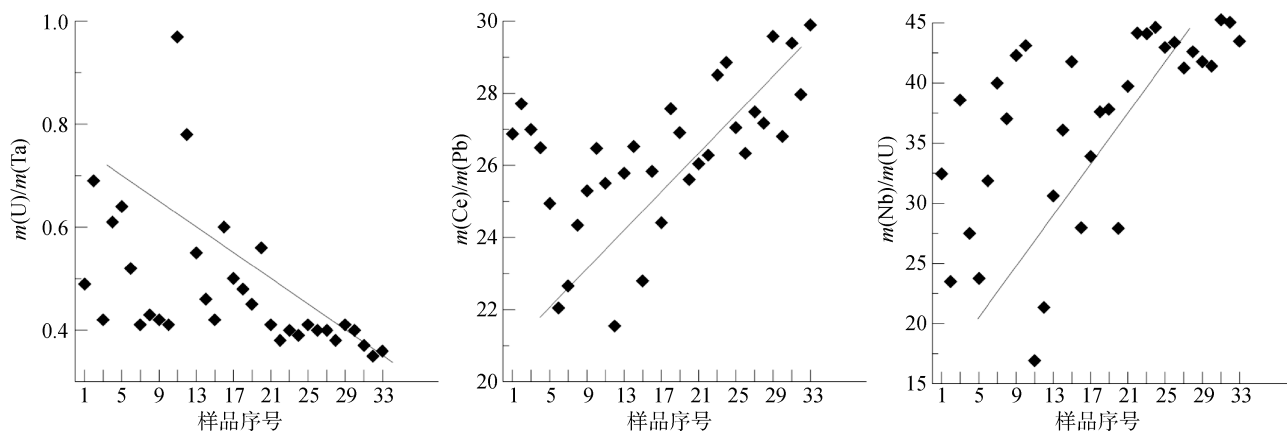


图 4 东太平洋海隆 13°N 附近玄武岩和火山玻璃样品的微量元素含量比值
Fig. 4 Trace element ratios of basalt and glass samples near EPR 13°N

表 2 东太平洋海隆 13°N 附近洋中脊玄武岩的微量元素含量($\times 10^{-6}$)
Tab. 2 Trace element contents of mid-ocean ridge basalts near EPR 13°N

| 样品序号 | 样品编号 | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | Y | Nb | Ta | Pb | Th | U |
|------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | E11-m | 4.26 | 12.9 | 2.09 | 11.0 | 3.78 | 1.43 | 4.09 | 0.97 | 5.60 | 1.28 | 3.35 | 0.55 | 3.33 | 0.50 | 31.5 | 3.48 | 0.22 | 0.48 | 0.22 | 0.11 |
| 2 | E13-m | 4.20 | 12.4 | 2.03 | 10.9 | 3.55 | 1.32 | 3.80 | 0.85 | 5.07 | 1.16 | 3.11 | 0.50 | 3.03 | 0.46 | 29.4 | 3.33 | 0.21 | 0.45 | 0.21 | 0.14 |
| 3 | E15-m1 | 2.99 | 9.14 | 1.54 | 8.26 | 2.80 | 1.07 | 2.93 | 0.69 | 4.01 | 0.92 | 2.48 | 0.40 | 2.41 | 0.36 | 23.3 | 2.11 | 0.13 | 0.34 | 0.14 | 0.05 |
| 4 | E15-m2 | 4.66 | 14.0 | 2.23 | 11.9 | 3.98 | 1.52 | 4.30 | 0.95 | 5.66 | 1.28 | 3.37 | 0.57 | 3.40 | 0.50 | 33.0 | 3.78 | 0.23 | 0.53 | 0.23 | 0.14 |
| 5 | E20-m1 | 3.12 | 9.55 | 1.56 | 8.59 | 2.94 | 1.14 | 3.09 | 0.70 | 4.23 | 0.96 | 2.59 | 0.42 | 2.53 | 0.37 | 24.5 | 2.09 | 0.14 | 0.38 | 0.13 | 0.09 |
| 6 | E20-m2 | 2.90 | 9.07 | 1.54 | 8.18 | 2.73 | 1.05 | 3.02 | 0.69 | 4.00 | 0.96 | 2.51 | 0.40 | 2.49 | 0.37 | 23.6 | 2.03 | 0.12 | 0.41 | 0.13 | 0.06 |
| 7 | E27-m1 | 5.07 | 14.5 | 2.30 | 12.1 | 4.01 | 1.45 | 4.20 | 0.95 | 5.60 | 1.28 | 3.35 | 0.55 | 3.32 | 0.51 | 32.5 | 4.12 | 0.25 | 0.64 | 0.25 | 0.10 |
| 8 | E27-m2 | 3.76 | 11.3 | 1.85 | 9.50 | 3.23 | 1.23 | 3.45 | 0.80 | 4.57 | 1.04 | 2.77 | 0.44 | 2.78 | 0.41 | 26.6 | 4.72 | 0.17 | 0.47 | 0.17 | 0.07 |
| 9 | E29-m1 | 5.74 | 15.8 | 2.44 | 12.6 | 3.92 | 1.41 | 4.11 | 0.90 | 5.26 | 1.20 | 3.27 | 0.52 | 3.11 | 0.47 | 30.7 | 5.63 | 0.32 | 0.62 | 0.34 | 0.13 |
| 10 | E29-m2 | 5.72 | 15.7 | 2.45 | 12.4 | 3.87 | 1.35 | 4.09 | 0.90 | 5.27 | 1.19 | 3.29 | 0.51 | 3.16 | 0.48 | 30.7 | 5.69 | 0.32 | 0.59 | 0.35 | 0.13 |
| 11 | E31-m1 | 2.99 | 9.30 | 1.62 | 8.83 | 3.06 | 1.12 | 3.26 | 0.72 | 4.49 | 1.05 | 2.82 | 0.45 | 2.72 | 0.41 | 26.6 | 2.05 | 0.12 | 0.36 | 0.12 | 0.12 |
| 12 | E31-m2 | 2.83 | 9.09 | 1.57 | 8.36 | 2.90 | 1.08 | 3.18 | 0.72 | 4.26 | 1.02 | 2.77 | 0.43 | 2.65 | 0.41 | 25.3 | 1.93 | 0.12 | 0.42 | 0.13 | 0.09 |
| 13 | E33-m1 | 4.97 | 14.4 | 2.32 | 12.2 | 3.93 | 1.38 | 4.23 | 0.95 | 5.67 | 1.29 | 3.53 | 0.56 | 3.42 | 0.50 | 33.2 | 4.27 | 0.26 | 0.56 | 0.26 | 0.14 |
| 14 | E33-m2 | 4.16 | 12.5 | 2.07 | 10.9 | 3.76 | 1.37 | 4.05 | 0.91 | 5.55 | 1.27 | 3.43 | 0.54 | 3.38 | 0.51 | 32.5 | 3.30 | 0.20 | 0.47 | 0.21 | 0.09 |
| 15 | E40-m | 8.97 | 25.5 | 3.96 | 18.9 | 5.55 | 1.89 | 5.73 | 1.21 | 6.89 | 1.61 | 4.37 | 0.65 | 4.08 | 0.63 | 39.6 | 8.30 | 0.47 | 1.12 | 0.57 | 0.20 |
| 16 | E42-m1 | 5.06 | 14.6 | 2.39 | 12.2 | 3.96 | 1.37 | 4.13 | 0.91 | 5.44 | 1.29 | 3.56 | 0.55 | 3.37 | 0.52 | 32.3 | 4.21 | 0.25 | 0.56 | 0.26 | 0.15 |
| 17 | E42-m2 | 5.03 | 14.7 | 2.34 | 12.0 | 3.95 | 1.40 | 4.28 | 0.94 | 5.55 | 1.28 | 3.46 | 0.53 | 3.36 | 0.50 | 32.8 | 4.18 | 0.25 | 0.60 | 0.26 | 0.12 |
| 18 | E44-m1 | 5.32 | 15.0 | 2.40 | 11.7 | 3.67 | 1.30 | 3.96 | 0.82 | 4.90 | 1.18 | 3.16 | 0.49 | 2.96 | 0.46 | 28.6 | 5.46 | 0.31 | 0.54 | 0.33 | 0.15 |
| 19 | E44-m2 | 5.26 | 14.3 | 2.27 | 11.5 | 3.59 | 1.26 | 3.70 | 0.81 | 4.80 | 1.11 | 3.04 | 0.48 | 2.83 | 0.43 | 28.0 | 5.23 | 0.30 | 0.53 | 0.32 | 0.14 |
| 20 | E46-m | 2.89 | 8.98 | 1.55 | 8.60 | 2.92 | 1.05 | 3.19 | 0.73 | 4.43 | 1.02 | 2.78 | 0.44 | 2.62 | 0.40 | 25.9 | 1.99 | 0.13 | 0.35 | 0.12 | 0.07 |
| 21 | E15-g1 | 3.09 | 9.36 | 1.55 | 8.30 | 2.84 | 1.05 | 2.98 | 0.70 | 4.11 | 0.93 | 2.51 | 0.40 | 2.42 | 0.36 | 23.6 | 2.12 | 0.13 | 0.36 | 0.13 | 0.05 |
| 22 | E15-g2 | 3.57 | 10.7 | 1.76 | 9.31 | 3.17 | 1.17 | 3.47 | 0.79 | 4.53 | 1.05 | 2.80 | 0.44 | 2.69 | 0.41 | 26.4 | 2.67 | 0.16 | 0.41 | 0.16 | 0.06 |
| 23 | E27-g1 | 5.65 | 15.6 | 2.44 | 12.1 | 3.80 | 1.40 | 4.09 | 0.92 | 5.13 | 1.20 | 3.21 | 0.50 | 3.13 | 0.47 | 29.6 | 5.58 | 0.32 | 0.55 | 0.35 | 0.13 |
| 24 | E27-g2 | 5.73 | 15.9 | 2.49 | 12.4 | 3.89 | 1.39 | 4.10 | 0.90 | 5.18 | 1.23 | 3.26 | 0.50 | 3.16 | 0.48 | 30.4 | 5.70 | 0.33 | 0.55 | 0.35 | 0.13 |
| 25 | E29-g1 | 5.68 | 15.7 | 2.46 | 12.2 | 3.84 | 1.37 | 4.03 | 0.87 | 5.12 | 1.22 | 3.24 | 0.51 | 3.10 | 0.47 | 30.4 | 5.66 | 0.32 | 0.58 | 0.34 | 0.13 |
| 26 | E29-g2 | 5.79 | 16.0 | 2.45 | 12.6 | 4.02 | 1.45 | 4.21 | 0.92 | 5.34 | 1.23 | 3.14 | 0.52 | 3.17 | 0.47 | 31.2 | 5.81 | 0.33 | 0.61 | 0.35 | 0.13 |
| 27 | E33-g1 | 4.66 | 13.5 | 2.24 | 11.4 | 3.93 | 1.39 | 4.25 | 0.95 | 5.51 | 1.31 | 3.51 | 0.55 | 3.44 | 0.53 | 32.9 | 3.69 | 0.22 | 0.49 | 0.24 | 0.09 |
| 28 | E33-g2 | 4.90 | 14.0 | 2.23 | 12.0 | 3.97 | 1.41 | 4.30 | 0.95 | 5.71 | 1.31 | 3.48 | 0.57 | 3.50 | 0.52 | 33.6 | 3.94 | 0.24 | 0.51 | 0.24 | 0.09 |
| 29 | E42-g | 6.34 | 18.4 | 2.86 | 14.4 | 4.45 | 1.58 | 4.79 | 1.06 | 5.95 | 1.38 | 3.62 | 0.58 | 3.57 | 0.55 | 34.1 | 5.64 | 0.33 | 0.62 | 0.36 | 0.13 |
| 30 | E44-g1 | 5.64 | 15.3 | 2.37 | 12.2 | 3.83 | 1.36 | 4.04 | 0.85 | 5.13 | 1.17 | 3.15 | 0.51 | 3.06 | 0.46 | 29.7 | 5.51 | 0.33 | 0.57 | 0.33 | 0.13 |
| 31 | E44-g2 | 5.91 | 16.3 | 2.49 | 12.4 | 4.04 | 1.48 | 4.26 | 0.96 | 5.46 | 1.24 | 3.23 | 0.52 | 3.23 | 0.48 | 31.1 | 5.75 | 0.35 | 0.55 | 0.35 | 0.13 |
| 32 | E46-g1 | 3.23 | 9.75 | 1.68 | 9.06 | 3.08 | 1.14 | 3.33 | 0.74 | 4.51 | 1.05 | 2.81 | 0.45 | 2.74 | 0.42 | 26.5 | 2.36 | 0.15 | 0.35 | 0.14 | 0.05 |
| 33 | E46-g2 | 2.97 | 9.28 | 1.62 | 8.70 | 3.05 | 1.15 | 3.38 | 0.74 | 4.50 | 1.05 | 2.79 | 0.45 | 2.71 | 0.41 | 26.7 | 2.02 | 0.13 | 0.31 | 0.12 | 0.05 |
| | E29-m2' | 5.37 | 14.7 | 2.34 | 11.7 | 3.64 | 1.33 | 3.86 | 0.84 | 4.90 | 1.15 | 3.11 | 0.48 | 2.92 | 0.45 | 28.9 | 5.43 | 0.31 | 0.55 | 0.33 | 0.12 |
| | E46-m' | 2.68 | 8.65 | 1.47 | 7.95 | 2.82 | 1.04 | 3.10 | 0.74 | 4.21 | 0.97 | 2.60 | 0.41 | 2.57 | 0.38 | 24.5 | 1.85 | 0.12 | 0.34 | 0.11 | 0.07 |
| | E44-g1' | 5.77 | 15.5 | 2.41 | 12.5 | 3.89 | 1.38 | 4.13 | 0.85 | 5.28 | 1.19 | 3.18 | 0.52 | 3.12 | 0.46 | 30.3 | 5.71 | 0.33 | 0.54 | 0.35 | 0.13 |

注: E29-m2'、E46-m'、E44-g1'等为平行样

表 3 东太平洋海隆 13°N 附近洋中脊玄武岩的微量元素含量比值
Tab.3 Trace elements ratios of mid-ocean ridge basalts near EPR 13°N

| 样品序号 | 样品编号 | $m(\text{Tb})/m(\text{Lu})$ | $m(\text{Sm})/m(\text{Nd})$ | $m(\text{Nd})/m(\text{Y})$ | $m(\text{La})/m(\text{Nb})$ | $m(\text{Ce})/m(\text{Pb})$ | $m(\text{Nb})/m(\text{U})$ | $m(\text{Nb})/m(\text{La})$ | $m(\text{Nb})/m(\text{Ta})$ | $m(\text{Nb})/m(\text{Th})$ | $m(\text{Ta})/m(\text{U})$ | Na* | Ta* |
|------|---------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|------|------|
| 1 | E11-m | 1.94 | 0.34 | 0.35 | 1.22 | 26.87 | 32.43 | 0.82 | 16.02 | 15.79 | 2.02 | 1.88 | 1.04 |
| 2 | E13-m | 1.87 | 0.33 | 0.37 | 1.26 | 27.70 | 23.50 | 0.79 | 16.13 | 16.02 | 1.46 | 1.91 | 0.75 |
| 3 | E15-m1 | 1.94 | 0.34 | 0.35 | 1.42 | 27.00 | 38.61 | 0.70 | 16.25 | 15.62 | 2.38 | 1.86 | 1.22 |
| 4 | E15-m2 | 1.90 | 0.33 | 0.36 | 1.23 | 26.50 | 27.48 | 0.81 | 16.79 | 16.32 | 1.64 | 1.95 | 0.84 |
| 5 | E20-m1 | 1.88 | 0.34 | 0.35 | 1.50 | 24.95 | 23.73 | 0.67 | 15.19 | 16.35 | 1.56 | 1.95 | 0.80 |
| 6 | E20-m2 | 1.88 | 0.33 | 0.35 | 1.43 | 22.05 | 31.88 | 0.70 | 16.67 | 15.91 | 1.91 | 1.90 | 0.98 |
| 7 | E27-m1 | 1.87 | 0.33 | 0.37 | 1.23 | 22.65 | 39.99 | 0.81 | 16.54 | 16.56 | 2.42 | 1.97 | 1.24 |
| 8 | E27-m2 | 1.98 | 0.34 | 0.36 | 1.38 | 24.34 | 37.01 | 0.72 | 16.04 | 15.77 | 2.31 | 1.88 | 1.18 |
| 9 | E29-m1 | 1.91 | 0.31 | 0.41 | 1.02 | 25.30 | 42.29 | 0.98 | 17.60 | 16.49 | 2.40 | 1.97 | 1.23 |
| 10 | E29-m2 | 1.89 | 0.31 | 0.40 | 1.00 | 26.48 | 43.13 | 1.00 | 17.51 | 16.16 | 2.46 | 1.93 | 1.26 |
| 11 | E31-m1 | 1.74 | 0.35 | 0.33 | 1.46 | 25.50 | 16.95 | 0.68 | 16.38 | 16.54 | 1.03 | 1.97 | 0.53 |
| 12 | E31-m2 | 1.78 | 0.35 | 0.33 | 1.46 | 21.54 | 21.37 | 0.68 | 16.59 | 15.38 | 1.29 | 1.83 | 0.66 |
| 13 | E33-m1 | 1.89 | 0.32 | 0.37 | 1.16 | 25.78 | 30.62 | 0.86 | 16.72 | 16.61 | 1.83 | 1.98 | 0.94 |
| 14 | E33-m2 | 1.79 | 0.34 | 0.34 | 1.26 | 26.53 | 36.10 | 0.79 | 16.57 | 15.49 | 2.18 | 1.85 | 1.12 |
| 15 | E40-m | 1.92 | 0.29 | 0.48 | 1.08 | 22.79 | 41.78 | 0.93 | 17.66 | 14.58 | 2.37 | 1.74 | 1.21 |
| 16 | E42-m1 | 1.75 | 0.32 | 0.38 | 1.20 | 25.84 | 27.96 | 0.83 | 16.90 | 16.12 | 1.65 | 1.92 | 0.85 |
| 17 | E42-m2 | 1.88 | 0.33 | 0.37 | 1.20 | 24.40 | 33.88 | 0.83 | 16.93 | 16.03 | 2.00 | 1.91 | 1.03 |
| 18 | E44-m1 | 1.79 | 0.31 | 0.41 | 0.97 | 27.57 | 37.58 | 1.03 | 17.91 | 16.44 | 2.10 | 1.96 | 1.07 |
| 19 | E44-m2 | 1.87 | 0.31 | 0.41 | 1.00 | 26.90 | 37.81 | 1.00 | 17.17 | 16.52 | 2.20 | 1.97 | 1.13 |
| 20 | E46-m | 1.81 | 0.34 | 0.33 | 1.45 | 25.61 | 27.94 | 0.69 | 15.77 | 16.60 | 1.77 | 1.98 | 0.91 |
| 21 | E15-g1 | 1.94 | 0.34 | 0.35 | 1.46 | 26.04 | 39.74 | 0.69 | 16.17 | 16.26 | 2.46 | 1.94 | 1.26 |
| 22 | E15-g2 | 1.93 | 0.34 | 0.35 | 1.36 | 26.29 | 44.14 | 0.73 | 16.74 | 16.59 | 2.64 | 1.98 | 1.35 |
| 23 | E27-g1 | 1.98 | 0.32 | 0.41 | 1.01 | 28.51 | 44.11 | 0.99 | 17.49 | 16.05 | 2.52 | 1.91 | 1.29 |
| 24 | E27-g2 | 1.89 | 0.31 | 0.41 | 1.01 | 28.85 | 44.63 | 0.99 | 17.21 | 16.09 | 2.59 | 1.92 | 1.33 |
| 25 | E29-g1 | 1.83 | 0.32 | 0.40 | 1.00 | 27.04 | 42.99 | 1.00 | 17.49 | 16.48 | 2.46 | 1.96 | 1.26 |
| 26 | E29-g2 | 1.97 | 0.32 | 0.40 | 1.00 | 26.33 | 43.39 | 1.00 | 17.45 | 16.41 | 2.49 | 1.96 | 1.27 |
| 27 | E33-g1 | 1.80 | 0.34 | 0.35 | 1.26 | 27.48 | 41.23 | 0.79 | 16.54 | 15.18 | 2.49 | 1.81 | 1.28 |
| 28 | E33-g2 | 1.82 | 0.33 | 0.36 | 1.24 | 27.17 | 42.58 | 0.80 | 16.36 | 16.29 | 2.60 | 1.94 | 1.33 |
| 29 | E42-g | 1.93 | 0.31 | 0.42 | 1.12 | 29.58 | 41.78 | 0.89 | 17.26 | 15.51 | 2.42 | 1.85 | 1.24 |
| 30 | E44-g1 | 1.86 | 0.31 | 0.41 | 1.02 | 26.81 | 41.40 | 0.98 | 16.61 | 16.49 | 2.49 | 1.97 | 1.28 |
| 31 | E44-g2 | 2.03 | 0.33 | 0.4 | 1.03 | 29.39 | 45.28 | 0.97 | 16.66 | 16.44 | 2.72 | 1.96 | 1.39 |
| 32 | E46-g1 | 1.78 | 0.34 | 0.34 | 1.37 | 27.97 | 45.04 | 0.73 | 15.77 | 16.42 | 2.86 | 1.96 | 1.46 |
| 33 | E46-g2 | 1.82 | 0.35 | 0.33 | 1.47 | 29.89 | 43.49 | 0.68 | 15.85 | 17.06 | 2.74 | 2.03 | 1.41 |
| | E29-m2' | 1.88 | 0.31 | 0.41 | 0.99 | 26.57 | 43.48 | 1.01 | 17.50 | 16.33 | 2.48 | 1.95 | 1.27 |
| | E46-m' | 1.94 | 0.35 | 0.32 | 1.44 | 25.28 | 28.00 | 0.69 | 15.93 | 16.31 | 1.76 | 1.94 | 0.90 |
| | E44-g1' | 1.84 | 0.31 | 0.41 | 1.01 | 29.01 | 44.62 | 0.99 | 17.30 | 16.31 | 2.58 | 1.94 | 1.32 |

注: E29-m2', E46-m', E44-g1'等为平行样

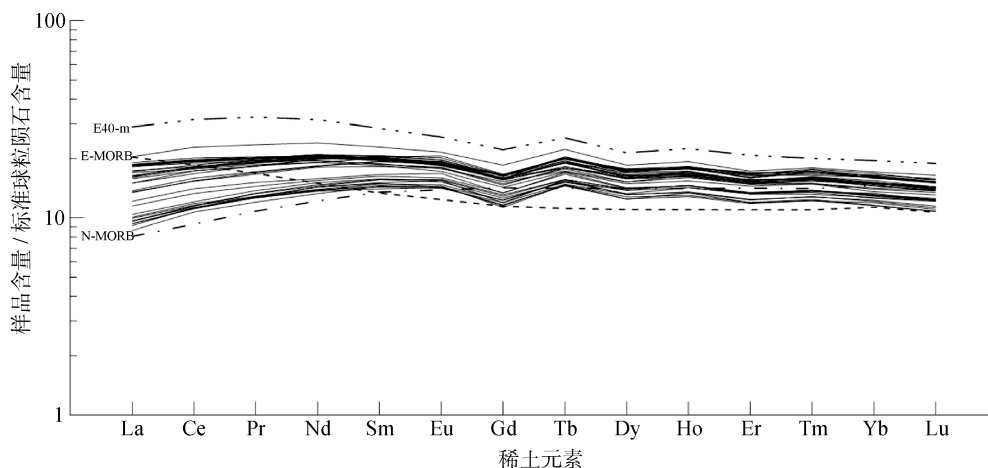


图5 东太平洋海隆 13°N 附近玄武岩样品球粒陨石标准化后的 REE 分布型式图
Fig.5 REE distribution patterns of chondrite-normalized basalt samples near EPR 13°N

$m(\text{Lu}) < 2.03$, $0.29 < m(\text{Sm})/m(\text{Nd}) < 0.35$ 和 $0.32 < m(\text{Nd})/m(\text{Y}) < 0.48$ (表3), 它们的变化范围虽然有限却不能忽略, 显示这些样品可能受到了非均一质地幔来源的影响。

Sun 等^[17]根据 $m(\text{La})/m(\text{Nb})$, 把大洋玄武岩分为 $m(\text{La})/m(\text{Nb}) > 1.0$ 的 N-MORB ($m(\text{La})/m(\text{Ta}) > 17$) 和 $m(\text{La})/m(\text{Nb})$ 低的 E-MORB ($m(\text{La})/m(\text{Nb}) < 1.0$) 及 $m(\text{La})/m(\text{Nb})$ 更低的 HIMU 型洋岛玄武岩(OIB) ($0.6 < m(\text{La})/m(\text{Nb}) < 0.7$)。前人的研究显示, 经过俯冲区域的洋壳会产生较低的 $m(\text{La})/m(\text{Nb}) (< 1.0)$, 在一些 OIB, 特别是 HIMU 型大洋玄武岩中, 观察到和 0.95 的球粒陨石比值相比, 较低的 $m(\text{La})/m(\text{Nb})$, 显示循环洋壳在俯冲过程中经历了脱水/部分熔融的幔源特征^[20]。从表 3 中可以看出, 东太平洋海隆 13°N 大部分站位的 MORB 样品的 $m(\text{La})/m(\text{Nb})$ 大于 1.0, 而来自 E29 和 E44 站位的玄武岩样品的 $m(\text{La})/m(\text{Nb})$ 约等于 1.0 或稍小于 1.0, 表明研究区域的大部分玄武岩样品为 N-MORB 型, 但也有少量 E-MORB 型存在, 这在稀土元素标准化分布型式图也得到验证(图 5)。

3.2 东太平洋海隆 13°N 附近洋中脊玄武岩的演化

在 $m(\text{La})/m(\text{Sm})$ 与 $m(\text{La})$ 的线性相关性图解上(图 6), 玄武岩的 $m(\text{La})/m(\text{Sm})$ 与 $m(\text{La})$ 呈现很好的线性相关, 表明研究区域的玄武岩经历了熔融作用。MORB 和 OIB 的 $m(\text{Nb})/m(\text{U})$ 和 $m(\text{Ce})/m(\text{Pb})$ 分别稳定在 47 ± 10 和 25 ± 5 , 均高于初始地幔 ($m(\text{Nb})/m(\text{U}) \approx 30$ 和 $m(\text{Ce})/m(\text{Pb})$) 和平均陆壳的 ($m(\text{Nb})/m(\text{U}) \approx 10$ 和 $m(\text{Ce})/m(\text{Pb}) \approx 4$)^[21], 这是因为岩浆在上升过程中发

生了分馏, 最后生成了亏损不相容元素的相对均一地幔^[21-23]。此次研究中, 玄武岩样品的 $m(\text{Nb})/m(\text{U})$ 范围为 16.95~45.28(表 3), 稍低于 MORB 和 OIB 的 $m(\text{Nb})/m(\text{U}) = 47 \pm 10$, 甚至部分低于初始地幔的 $m(\text{Nb})/m(\text{U})$, 这可以解释为这些玄武岩样品中涉及了有壳层物质特征的地幔来源^[24]。之前图 4 中显示, 洋中脊玄武岩的 $m(\text{Ce})/m(\text{Pb})$ 和 $m(\text{Nb})/m(\text{U})$ 均低于火山玻璃, 显示出火山玻璃中比玄武岩含有更多的富集组分^[24], 说明包裹于玄武岩外层的火山玻璃受到了外源物质的影响。

图 7 中, 我们把此次研究样品所测得的 $m(\text{Ce})/$

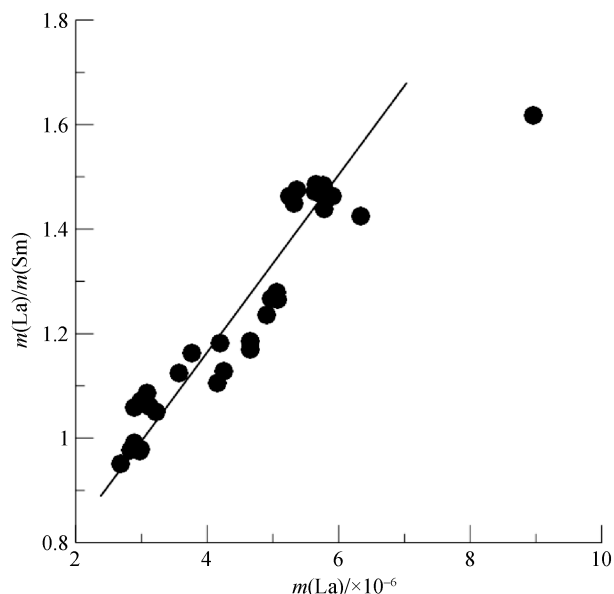


图6 东太平洋海隆 13°N 附近样品 $m(\text{La})/m(\text{Sm})$ 与 $m(\text{La})$ 的线性相关性图解

Fig.6 Linear correlation plot of $m(\text{La})/m(\text{Sm})$ versus $m(\text{La})$ of samples near EPR 13°N

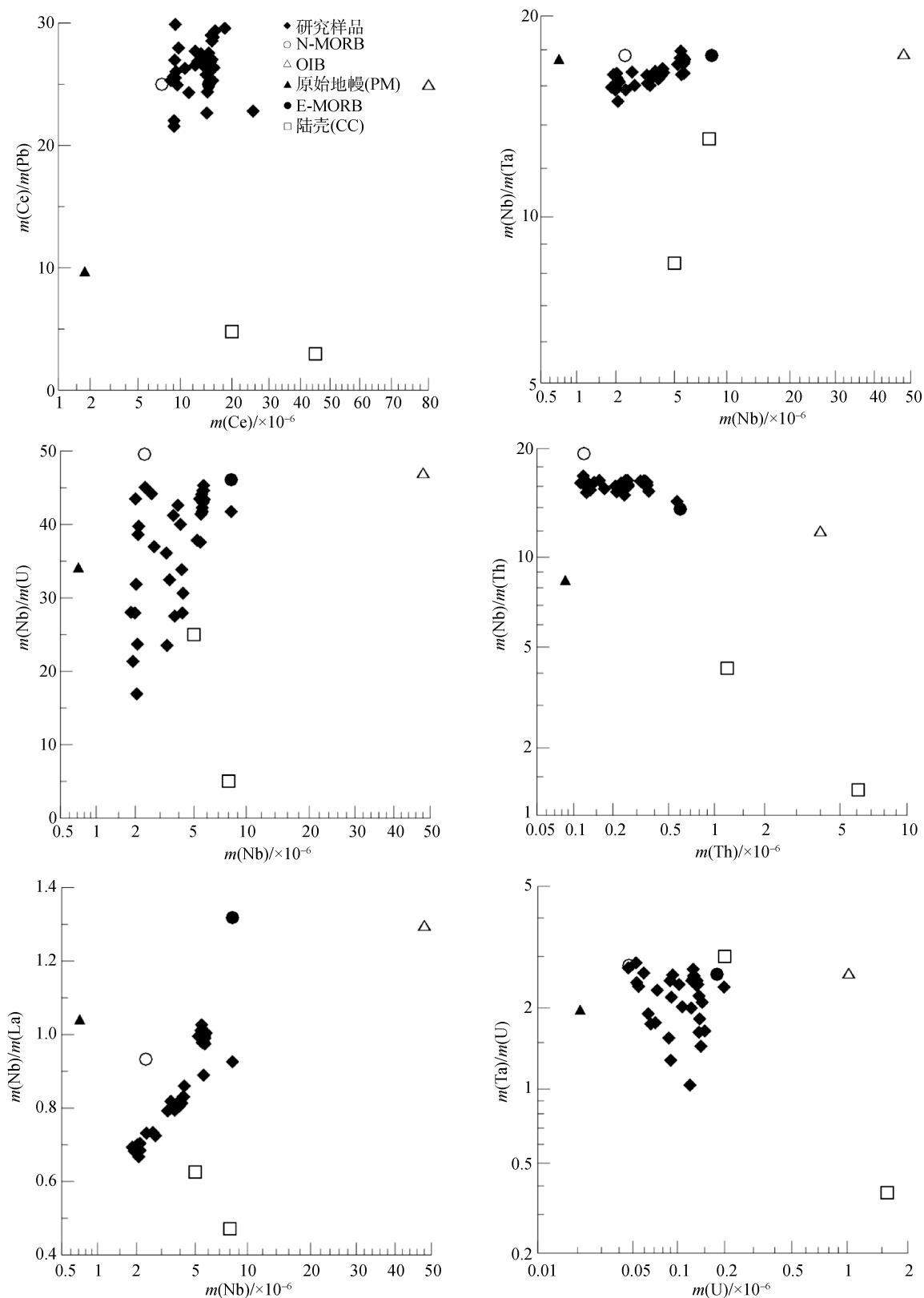


图7 东太平洋海隆 13°N 附近玄武岩微量元素含量比值与微量元素含量的线性相关性图解
 Fig.7 Linear correlation plot of trace element ratios and trace element data of samples near EPR 13°N

$m(\text{Pb})$ 与 $m(\text{Ce})$, $m(\text{Nb})/m(\text{U})$ 与 $m(\text{Nb})$, 以及 $m(\text{Nb})/m(\text{La})$ 与 $m(\text{La})$ 进行线性相关性作图, 同时采用 OIB^[17], 和 CC(陆壳)^[24]微量元素数据作为参考, 我们的研究样品相关数据均显示了正相关趋势, 这可能与双组分地幔熔融有关^[25]。图 7 中, 来自 EPR 样品的 $m(\text{Nb})/m(\text{Ta})$ 变化范围为 14.58~17.06, 这与早先的研究认为大洋玄武岩中 $m(\text{Nb})/m(\text{Ta})$ 基本恒定在 16~18 稍有差异^[17, 22, 26]。事实上, MORB 中的 $m(\text{Nb})/m(\text{Ta})$ 并不稳定, 在熔融过程中, Nb 比 Ta 更不相容, 这导致 $m(\text{Nb})/m(\text{Ta})$ 会随着熔岩中亏损组分的增加而降低^[27-28]。因此, 样品中稍低的 $m(\text{Nb})/m(\text{Ta})$, 显示研究区域的玄武岩幔源在熔融过程中发生了分离结晶, 导致 Nb 和 Ta 这些更多的不相容元素进入了熔体, 特别是 E40 站位的样品, $m(\text{Nb})/m(\text{Ta})$ 低至 14.58。

Niu 和 Batiza^[29]认为 $m(\text{Nb})/m(\text{Th})$ 和 $m(\text{Ta})/m(\text{U})$ 可用于揭示地幔起源, 因为它们均是循环大洋岩石圈的组成部分, 且在俯冲区域的脱水过程中由于 Th 和 U 易溶于水而流失进入了地幔楔(Nb 和 Ta 不易溶于水), 使得残余的俯冲岩石圈相对亏损 Th 和 U, 因而大洋玄武岩源中残余岩石圈的加入, 会导致这些玄武岩中 Nb 和 Ta 富集, 从而使 $m(\text{Nb})/m(\text{Th})$ 和 $m(\text{Ta})/m(\text{U})$ 升高^[25]。图 7 中, $m(\text{Nb})/m(\text{Th})$ 与 $m(\text{Th})$ 的线性相关性显示出负相关, 说明 Nb 含量的增加小于 Th 含量, 而 $m(\text{Nb})/m(\text{Th})$ 高于原始地幔(PM)和 OIB 的比值, 但相比于 N-MORB 的比值, 更接近 E-MORB 比值, 显示玄武岩的地幔来源组成可能受到了富集组分的影响。图 7 中, $m(\text{Ta})/m(\text{U})$ 变化范围在 1.03~2.86, 其中火山玻璃的 $m(\text{Ta})/m(\text{U})$ (2.42~2.86)明显高于玄武岩的 $m(\text{Ta})/m(\text{U})$ (1.03~2.48) (表 3), 说明相比玄武岩, 玻璃受到了更多外源物质的影响, 这也与之前的 Nb/U 变化得出的推论一致。

同时, Nb^* 和 Ta^* 这两个值也被用来揭示玄武岩的地幔来源, 其中 $\text{Nb}^*=[\text{Nb}/\text{Th}]_{\text{sample}}/[\text{Nb}/\text{Th}]_{\text{PM}}$, $\text{Ta}^*=[\text{Ta}/\text{U}]_{\text{sample}}/[\text{Ta}/\text{U}]_{\text{PM}}$ ^[25]。根据 $D_{\text{Nb}} < D_{\text{Th}} < D_{\text{Ta}}$ D_{U} ^[29](D 表示分配系数), 大洋玄武岩中高的 Nb^* 值和 Ta^* 值被用来解释这些玄武岩的来源, 是之前经历了俯冲区域脱水作用而优先转移 Th 和 U(相比 Nb 和 Ta)进入地幔楔的循环大洋岩石圈, 导致残余岩石圈富集 Nb 和 Ta。从表 2 中看出, 样品的 Nb^* 值均大于 1, 而大部分样品的 Ta^* 值大于 1, 这显示大部分玄武岩的来源很可能是之前从俯冲区域循环的物质。富集和亏损的端元一定代表了循环大洋岩石圈的不同部分, 富集组分的最终来源是壳层岩石圈, 而亏损

岩石圈地幔很可能起源于极端亏损的端元组分。

4 结论

东太平洋海隆 13°N 附近玄武岩的微量元素数据分析显示, $1.74 < m(\text{Tb})/m(\text{Lu}) < 2.03$, $0.29 < m(\text{Sm})/m(\text{Nd}) < 0.35$ 和 $0.32 < m(\text{Nd})/m(\text{Y}) < 0.48$, 它们的变化范围虽然有限却不能忽略, 表明这些样品可能受到了非均一质地幔来源的影响。 $m(\text{La})/m(\text{Nb})$ 被用来指示洋中脊玄武岩是否富集不相容元素, 此项研究中, EPR13°N 附近区域大部分站位 MORB 的 $m(\text{La})/m(\text{Nb})$ 大于 1.0, 而部分站位(例如 E29 和 E44)玄武岩样品的 $m(\text{La})/m(\text{Nb})$ 约等于 1.0 或稍小于 1.0, 这显示研究区域中, 大部分玄武岩为 N-MORB, 但也有部分 E-MORB 存在。玄武岩的稀土元素标准化分布型式图也显示出该区域 E-MORB 特征玄武岩的存在。

玄武岩的 $m(\text{La})/m(\text{Sm})$ 与 $m(\text{La})$ 展现出很好的线性相关, 表明研究区域的玄武岩经历了熔融作用。此次研究中, 玄武岩样品的 $m(\text{Nb})/m(\text{U})$ 范围为 16.95~45.28, 稍低于 MORB 和 OIB 的 $m(\text{Nb})/m(\text{U})=47 \pm 1$, 可以推断这些玄武岩样品中涉及了有壳层物质特征的地幔来源。洋中脊玄武岩的 $m(\text{Ce})/m(\text{Pb})$ 和 $m(\text{Nb})/m(\text{U})$ 均低于火山玻璃的, 说明包裹于玄武岩外层的火山玻璃受到了外源物质的影响。玄武岩的 $m(\text{Ce})/m(\text{Pb})$ 与 $m(\text{Ce})$, $m(\text{Nb})/m(\text{U})$ 与 $m(\text{Nb})$, $m(\text{Nb})/m(\text{La})$ 与 $m(\text{La})$ 的线性相关性均显示了正相关趋势, 这可能与岩石的双组分地幔熔融有关。玄武岩的 $m(\text{Nb})/m(\text{Th})$ 与 $m(\text{Th})$ 的线性相关性显示出负相关, 显示该区域玄武岩的地幔来源组成可能受到了富集组分的影响。 $m(\text{Ta})/m(\text{U})$ 变化范围在 1.03~2.86, 其中火山玻璃的 $m(\text{Ta})/m(\text{U})$ (2.42~2.86)明显高于玄武岩的 $m(\text{Ta})/m(\text{U})$ (1.03~2.48), 说明与玄武岩相比, 玻璃受到了更多外源物质的影响, 这也与之前的 $m(\text{Nb})/m(\text{U})$ 变化得出的推论一致。分析显示, 样品的 Nb^* 值均大于 1, 而大部分样品的 Ta^* 值大于 1, 这表示大部分玄武岩的来源很可能是从俯冲区域循环的物质。

研究区域玄武岩微量元素数据的分析显示, 该区域玄武岩在地幔上升过程中经历了分离结晶, 且岩石的地幔来源组分中受到了非均一质地幔来源和富集组分的影响。该富集组分可能来源于俯冲区域循环的物质。

参考文献:

[1] Sun S S, Nesbitt R W, Sharaskin A Y. Geochemical

- characteristics of mid-ocean ridge basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1979, 44(1): 119-138.
- [2] Hofmann A W. Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: isotopes and trace elements [C]. Carlson R W. *Treatise on Geochemistry*(2). Oxford: Elsevier Science Ltd, 2003: 61-101.
- [3] Schilling J G. Iceland mantle plume-geochemical study of Reykjanes Ridge[J]. *Nature*, 1973, 242: 565-571.
- [4] Schilling J G, Thompson G, Kingsley R, et al. Hotspot-migrating ridge interaction in the South Atlantic[J]. *Nature*, 1985, 313: 187-191.
- [5] Hémond C, Hofmann A W, Vlastélic I, et al. Origin of MORB enrichment and relative trace element compatibilities along the Mid-Atlantic Ridge between 10° and 24°N[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2006, 7(12): Q12010.
- [6] Hofmann A W, White W M. Mantle plumes from ancient oceanic crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1982, 57(2): 421-436.
- [7] Donnelly K E, Goldstein S L, Langmuir C H, et al. Origin of enriched ocean ridge basalts and implications for mantle dynamics[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 226(3-4): 347-366.
- [8] Workman R K, Hart S R, Jackson M, et al. Recycled metasomatized lithosphere as the origin of the Enriched Mantle II (EM2) end-member: Evidence from the Samoan Volcanic Chain[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2004, 5(4): Q04008.
- [9] Klitgord K D, Mammertckx J. Northern East Pacific Rise: magnetic anomaly and bathymetric framework[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87(B8): 6725-6750.
- [10] Choukroune P, Francheteau J, Hekinian R. Tectonics of the East Pacific Rise near 12°50'N: a submersible study[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 68(1): 115-127.
- [11] Zhang Guoliang, Zeng Zhigang. Genesis of ²³⁰Th excess in basalts from mid-ocean ridges and ocean islands: Constraints from the global U-series isotope database and major and rare earth element geochemistry[J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(10): 1486-1494.
- [12] Sinton J M, Detrick R S. Mid-ocean ridge magma chambers[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B1): 197-216.
- [13] 张国良. 东太平洋海隆 13° N 附近玄武岩特征及其对岩浆作用的指示意义[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2010
- [14] McClain J S, Orcutt J A, Burnett M. The East Pacific Rise in cross section: a seismic model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90(B10): 8627-8639.
- [15] Macdonald K C, Fox P J, Miller S, et al. The East Pacific Rise and its flanks 8–18° N: history of segmentation, propagation and spreading direction based on SeaMARC II and Sea Beam studies[J]. *Marine Geophysical Research*, 1992, 14(4): 299-344.
- [16] Zhang Guoliang, Zeng Zhigang, Yin Xuebo, et al. Deep fractionation of clinopyroxene in the East Pacific Rise 13°N: evidence from high MgO MORB and melt inclusions[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(2): 266-277.
- [17] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[C]. Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*(42). London: Geological Society of London Description Special Publications, 1989: 313-345.
- [18] Zhang Guoliang, Zeng Zhigang, Yin Xuebo, et al. Periodical mixing of MORB magmas near East Pacific Rise 13°N: evidence from modeling and zoned plagioclase phenocrysts[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(12): 1786-1801.
- [19] Caroff M, Fleutelot C. The north-south propagating spreading center of the North Fiji Basin. Modeling of the geochemical evolution in periodically replenished and tapped magma chambers[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2003, 79(3-4): 203-224.
- [20] Weaver B L, Wood D A, Tarney J, et al. Role of subducted sediment in the genesis of ocean-island basalts: Geochemical evidence from South Atlantic Ocean islands[J]. *Geology*, 1986, 14(4): 275-278.
- [21] Hofmann A W, Jochum K P, Seufert M, et al. Nb and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 79(1-2): 33-45.
- [22] Hofmann A W. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*,

- 1988, 90(3): 297-314.
- [23] Hofmann A W. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism[J]. *Nature*, 1997, 385(6613): 219-229.
- [24] Roberta L Rudnick, David M Fountain. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective [J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(3): 267-309.
- [25] Niu Yaolin, Collerson K D, Batiza R. Origin of enriched-type mid-ocean ridge basalt at ridges far from mantle plumes: the East Pacific Rise at 11°20'N[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(B4): 7067-7087.
- [26] Bougault H, Joron J L, Treuil M. Alteration, fractional crystallization, partial melting, mantle properties from trace elements in basalts recovered in the North Atlantic[C]//Manik T, Christopher G H, Dennis E H. *Deep Drilling Results in the Atlantic Ocean: Ocean Crust*. Washington, DC: American Geophysical Union, 1979: 352-368.
- [27] Niu Yaolin, Batiza R. Extreme mantle source heterogeneities beneath the northern East Pacific Rise Ñ trace element evidence from near-ridge seamounts[C]. Li Zhaonai, Qi Jianzhong, Zhang Zhaochong. *Proceedings of the 30th International Geological Congress(15)*. Beijing: CRC Press, 1997, 15: 109-120.
- [28] Plank T, White W M. Nb and Ta in arc and mid-ocean ridge basalts[J]. *EOS Transaction*, 1995, 76: F655.
- [29] Niu Yaolin, Batiza R. Trace element evidence from seamounts for recycled oceanic crust in the Eastern Pacific mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148(3-4): 471-483.

Characteristic of trace element in mid-ocean ridge basalts near the East Pacific Rise 13°N

ZHAO Hui-jing^{1, 2, 3}, ZENG Zhi-gang^{1, 2}, YIN Xue-bo^{1, 2}, CHEN Shuai^{1, 2}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Received: Nov., 14, 2012

Key words: the East Pacific Rise; mid-ocean ridge basalt; trace element

Abstract: In this study 33 samples including basalts and glass near the East Pacific Rise (EPR) 13°N were analyzed to investigate the evolutionary process and material sources of basalts in this area. The trace elements ratios including $m(\text{Tb})/m(\text{Lu})$ (1.74~2.03), $m(\text{Sm})/m(\text{Nd})$ (0.29~0.35) and $m(\text{Nd})/m(\text{Y})$ (0.32~0.48) in these samples show that the variations are limited but could not be ignored. It implies these basalts maybe influenced by heterogeneous mantle source. The trace elements ratios $m(\text{La})/m(\text{Nb})$, the linear correlation plot of trace elements ratios $m(\text{La})/m(\text{Sm})$ versus $m(\text{La})$ and REE distribution patterns of chondrite-normalized basalt samples all show that MORB near EPR 13°N may have different end-members, demonstrating that the basalts near EPR 13°N include N-MORB and E-MORB. Meanwhile, the linear correlation plot of trace elements ratios $m(\text{Ce})/m(\text{Pb})$ versus $m(\text{Ce})$, $m(\text{Nb})/m(\text{U})$ versus $m(\text{Nb})$ and $m(\text{Nb})/m(\text{La})$ versus $m(\text{La})$ all display positive trends. It means they have relationship with two end-members mantle melting. Linear correlation plot of trace elements ratios $m(\text{Nb})/m(\text{Th})$ versus $m(\text{Th})$ displays negative trend, which implies there are enriched components involving in mantle source of basalts near EPR 13°N. The values of Nb^* of all samples and Ta^* of some samples are higher than 1, which demonstrate that mantle source of most MORBs are materials from subduction area.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)