

文章编号: 1000-4734(2011)01-0036-07

## 峨眉山二滩高钛玄武岩 Zr/Hf 分异的指示意义

严再飞<sup>1</sup> 程礼军<sup>2</sup> 王宏图<sup>3</sup> 陈觅<sup>1,4</sup> 周家喜<sup>1,4</sup>(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;  
2. 重庆地质矿产研究院, 重庆 400042; 3. 重庆大学 资源与环境学院, 重庆 400030;  
4. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 对峨眉山二滩高钛玄武岩高场强元素的研究表明, Zr/Hf 比值出现了明显分异, 可分为高 Zr/Hf 组和低 Zr/Hf 组两组玄武岩。Zr/Hf 比值的分异与岩浆结晶分异作用无关, 而是由部分熔融和地幔源区的不同所致, 暗示高 Zr/Hf 组和低 Zr/Hf 组玄武岩分别具有不同的部分熔融条件和不同的地幔物质组分。

关键词: 高钛玄武岩; 高场强元素; 部分熔融; 不均一性

中图分类号: P588.11; P595 文献标识码: A

作者简介: 严再飞, 男, 32岁, 博士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 研究方向岩石地球化学。E-mail: zaifeiyan78@hotmail.com

高场强元素(High field strength elements, 简称 HFSE) 如 Nb, Ta, Zr 和 Hf, 已成为研究地幔、地壳地球化学过程的强有力工具。研究表明, HFSE 的选择性亏损和富集与幔源熔体的演化、源区特征是密切相关的<sup>[1-3]</sup>。如岛弧玄武岩(IAB) 相对洋中脊玄武岩(MORB) 亏损 HFSE<sup>[4-5]</sup>, 这种亏损被认为是 HFSE 滞留在残留的钛酸盐相(如金红石) 中所造成的<sup>[6-8]</sup>。据此, 在地幔中则会存在一个由俯冲洋壳形成的富集 HFSE 的储库<sup>[8-10]</sup>, 这些俯冲洋壳随着地幔柱上涌, 形成了富含 HFSE 的洋岛玄武岩(OIB)<sup>[11-13]</sup>。

不同的 HFSE 在地球各储库所表现出的习性往往有所差异, 如所有硅酸盐储库似乎均显示了低于球粒陨石的 Nb/Ta 比值, 这种现象就是通常所指的“Nb 悖论”<sup>[8, 14-17]</sup>。这是有悖于常理的, 因为 Nb 和 Ta 具有相同的离子势和几乎一致的离子半径, 因此二者地球化学行为(如岩浆过程和壳-幔体系演化过程中) 应该是非常相似的。然而, 随着分析技术的提高, 硅酸盐地球和球粒陨石储库间 Nb/Ta 比值的差异之谜逐渐被揭开<sup>[18-20]</sup>。Rudnick 等<sup>[8]</sup> 对榴辉岩捕虏体中的金红石进行了分析, 其 Nb/Ta 比值高于球粒陨石值(17.5)<sup>[21]</sup>。

大量的岩石学实验数据表明, 金红石与熔体和流体间的平衡导致了 Nb 和 Ta 的分异<sup>[6, 23-24]</sup>; 而部分熔融和岩浆分异则导致了 Zr/Hf 比值的变化。近年来, 随着分析方法的改善和分析技术的提高, Münker 等<sup>[16]</sup> 对球粒陨石 Nb/Ta 比值进行了校正, 所得比值(19.9) 有显著提高。根据 Weyer 等<sup>[20]</sup> 的分析技术, 不同学者对来自不同储库的样品进行了分析, 所得 Nb/Ta 比值均低于球粒陨石值; 如 MORB 的 Nb/Ta 比值为  $14.2 \pm 0.8$ <sup>[16, 25]</sup>, OIB 为  $15.8 \pm 1.6$ <sup>[26]</sup>。这暗示了地幔的 Nb/Ta 比值明显低于球粒陨石值。与 Nb/Ta 比值相比, 大多数全硅酸盐地球储库, 包括地幔和地壳, 其 Zr/Hf 比值似乎均处于球粒陨石值(34.2)<sup>[20]</sup> 周围, 变化不大。因此, 俯冲作用似乎不可能对 Zr 和 Hf 产生明显的分异作用。然而, 新的研究表明, 亏损地幔橄榄岩的 Zr/Hf 比值可以低至  $10$ <sup>[3]</sup>, 而 OIB 的 Zr/Hf 比值则可以高于球粒陨石值<sup>[26]</sup>。因此, Zr/Hf 比值的变化可以监控地幔的部分熔融和岩浆分异过程。

中国西南地区的峨眉山大火成岩省, 虽然前人做了大量的研究工作<sup>[27-38]</sup>, 但这些研究对玄武岩高场强元素的关注不多。本次研究将利用已获得的高质量高场强元素数据来探讨二滩高钛(High-Ti) 玄武岩高场强元素的地球化学行为, 并揭示导致高场强元素分异的可能机制。

收稿日期: 2010-07-11

基金项目: 贵州省科学技术基金(黔科合J字[2008]2223)

# 1 分析方法及结果

分析方法见严再飞等<sup>[39-40]</sup>, 高场强元素的分析结果见表 1。从表 1 中可以看出, 绝大多数样品 Nb/Ta 比值均位于 13.59 ~ 16.16 之间, 仅有两个样品表现出相对较低的 Nb/Ta 比值, ERT-39 为

11.64, ERT-7 为 12.30, 这说明二滩高钛玄武岩中 Nb/Ta 比值变化范围不大。Zr/Hf 比值的变化范围则非常大, 均位于 6.90 ~ 38.07 之间(表 1), 说明二滩高钛玄武岩发生了明显的 Zr/Hf 分异作用。此外, 不同 Zr/Hf 比值的岩石样品中 Pb 同位素比值也是不同的(表 2)。

表 1 二滩高钛玄武岩高场强元素组成  
Table 1. Composition of HFSE in the Ertan high-Ti basalt

|             | 样品     | Nb    | Ta   | Zr  | Hf    | Nb/Ta | Zr/Hf | Zr/Nb |
|-------------|--------|-------|------|-----|-------|-------|-------|-------|
| 低 Zr/Hf 比值组 | ERT-1  | 68.70 | 4.39 | 71  | 10.20 | 15.65 | 6.96  | 1.03  |
|             | ERT-3  | 54.40 | 3.56 | 62  | 9.12  | 15.28 | 6.79  | 1.14  |
|             | ERT-4  | 68.00 | 4.34 | 76  | 10.80 | 15.67 | 7.04  | 1.12  |
|             | ERT-5  | 60.60 | 3.98 | 69  | 10.00 | 15.23 | 6.90  | 1.14  |
|             | ERT-10 | 42.40 | 2.82 | 61  | 8.99  | 15.04 | 6.78  | 1.44  |
|             | ERT-16 | 21.00 | 1.40 | 126 | 7.16  | 15.00 | 17.59 | 6.00  |
|             | ERT-17 | 31.20 | 2.09 | 101 | 6.94  | 14.93 | 14.55 | 3.24  |
|             | ERT-18 | 32.30 | 2.10 | 144 | 6.43  | 15.38 | 22.39 | 4.46  |
|             | ERT-20 | 37.40 | 2.35 | 52  | 7.52  | 15.91 | 6.91  | 1.39  |
|             | ERT-21 | 36.10 | 2.26 | 181 | 7.73  | 15.97 | 23.41 | 5.01  |
|             | ERT-22 | 23.00 | 1.47 | 137 | 7.19  | 15.65 | 19.05 | 5.96  |
|             | ERT-23 | 43.50 | 2.70 | 154 | 9.12  | 16.11 | 16.88 | 3.54  |
|             | ERT-24 | 36.30 | 2.27 | 135 | 7.75  | 15.99 | 17.42 | 3.72  |
|             | ERT-25 | 40.30 | 2.52 | 59  | 8.38  | 15.99 | 7.04  | 1.46  |
|             | ERT-27 | 36.30 | 2.29 | 53  | 7.50  | 15.85 | 7.07  | 1.46  |
|             | ERT-28 | 39.80 | 2.51 | 57  | 8.02  | 15.86 | 7.11  | 1.43  |
|             | ERT-29 | 38.90 | 2.43 | 95  | 8.02  | 16.01 | 11.84 | 2.44  |
|             | ERT-30 | 41.10 | 2.55 | 60  | 8.33  | 16.12 | 7.20  | 1.46  |
|             | ERT-31 | 38.70 | 2.43 | 140 | 7.89  | 15.92 | 17.74 | 3.62  |
|             | ERT-37 | 70.80 | 4.38 | 101 | 13.60 | 16.16 | 7.43  | 1.43  |
| 高 Zr/Hf 比值组 | ERT-6  | 28.70 | 1.94 | 197 | 5.56  | 14.79 | 35.43 | 6.86  |
|             | ERT-7  | 13.90 | 1.13 | 130 | 3.65  | 12.30 | 35.62 | 9.35  |
|             | ERT-8  | 14.30 | 0.97 | 134 | 3.52  | 14.74 | 38.07 | 9.37  |
|             | ERT-9  | 18.70 | 1.31 | 254 | 7.22  | 14.27 | 35.18 | 13.58 |
|             | ERT-11 | 41.70 | 2.8  | 333 | 8.87  | 14.89 | 37.54 | 7.98  |
|             | ERT-13 | 12.50 | 0.92 | 136 | 3.79  | 13.59 | 35.88 | 10.88 |
|             | ERT-15 | 15.20 | 1.01 | 185 | 4.89  | 15.05 | 37.83 | 12.17 |
|             | ERT-19 | 25.10 | 1.72 | 216 | 6.91  | 14.59 | 31.26 | 8.60  |
|             | ERT-26 | 23.00 | 1.5  | 239 | 6.33  | 15.33 | 37.76 | 10.39 |
|             | ERT-35 | 16.00 | 1.15 | 96  | 2.69  | 13.91 | 35.69 | 6.00  |
|             | ERT-39 | 27.60 | 2.37 | 214 | 6.87  | 11.64 | 31.15 | 7.75  |

注: 表中高场强元素数据引自严再飞等<sup>[39-40]</sup>。

表 2 二滩高钛玄武岩 Pb 同位素组成

Table 2. Composition of Pb isotope in the Ertan high-Ti basalt

| 低 Zr/Hf 比值组 |                                      |                                      |                                      |   | 高 Zr/Hf 比值组 |                                      |                                      |                                      |   |
|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|
| 样品          | <sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb | <sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb | <sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb | <sup>208</sup> Pb* / <sup>206</sup> Pb* | 样品          | <sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb | <sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb | <sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb | <sup>208</sup> Pb* / <sup>206</sup> Pb* |
| ERT-3       | 18.3104                              | 15.5472                              | 38.9457                              | 1.05                                    | ERT-7       | 18.5327                              | 15.5704                              | 38.7897                              | 1.009                                   |
| ERT-18      | 18.4104                              | 15.5457                              | 38.8423                              | 1.029                                   | ERT-9       | 18.3001                              | 15.5358                              | 38.4095                              | 0.993                                   |
| ERT-22      | 18.3584                              | 15.558                               | 38.8189                              | 1.032                                   |             |                                      |                                      |                                      |   |
| ERT-28      | 18.3815                              | 15.5516                              | 38.8239                              | 1.030                                   |             |                                      |                                      |                                      |   |

注: 低 Zr/Hf 比值组 Pb 同位素数据引自严再飞等<sup>[40]</sup>, 高 Zr/Hf 比值组据严再飞等<sup>[41]</sup>。

## 2 讨论

在岩浆演化过程中致使 Nb/Ta、Zr/Hf 比值发生分异的因素是多样和复杂的。由于 Nb-Ta、Zr-Hf 的受控矿物相不同,因此结晶分异和部分熔融对 Nb/Ta、Zr/Hf 比值的分异具有重要影响。除结晶分异和部分熔融作用外,地幔源物质组成的不同也是导致 Nb/Ta、Zr/Hf 比值发生变化的重要因素。在本次研究的二滩高钛玄武岩中 Zr/Hf 比值出现明显变化,而 Nb/Ta 比值则变化不大。本文将从结晶分异、部分熔融和源区组分几方面对二滩高钛(High-Ti)玄武岩的高场强元素地球化学行为进行探讨,揭示其高场强元素的分异机制。

### 2.1 结晶分异对 Nb/Ta、Zr/Hf 分异的影响

在镁铁质体系中,从矿物-熔体间的分配来看,Nb、Ta 比 Zr、Hf 更具不相容性,这种不相容性的差异可以达到数量级以上。因此,在结晶分异过程中,Nb、Ta 能与 Zr、Hf 分离。例如,在镁铁质熔体中,单斜辉石的结晶分异可导致 Zr/Hf 比值的变化<sup>[42-43]</sup>。

本次研究发现二滩高钛玄武岩中 Nb/Ta 比值无明显变化,而 Zr/Hf 比值则出现了非常明显的分异(图1)。据此,我们将二滩高钛玄武岩分为高 Zr/Hf 组和低 Zr/Hf 组 2 组玄武岩(表1-2),并探讨结晶分异作用对这两组不同 Zr/Hf 比值岩石样品的影响。

在二滩高钛玄武岩中,Nb/Ta、Zr/Hf 与  $Mg^\#$  均不具有相关性(图1),说明岩浆的结晶分异作用并没有改变 Nb/Ta、Zr/Hf 比值。Sc 与 Zr/Hf 之

间也缺乏正相关关系(图2),表明二滩高钛玄武岩 Zr/Hf 比值的变化也不是单斜辉石的结晶分异所导致。除单斜辉石外,金红石、钛铁矿和角闪石也能使 Zr/Hf 和 Nb/Ta 比值发生分异<sup>[7,44-48]</sup>。HFSE 在金红石和钛铁矿中是相容的,分配系数  $D_{Nb/Ta}$ 、 $D_{Zr/Hf}$  均小于 1<sup>[49]</sup>。但这种含钛矿物相主要对 Nb/Ta 有显著影响,而对 Zr/Hf 影响不明显<sup>[26]</sup>。然而,本次研究显示二滩高钛玄武岩 Nb/Ta 比值并无明显变化,表明该玄武岩没有经历含钛矿物相的结晶分异作用或分异作用不明显。角闪石的结晶分异对 Nb/Ta、Zr/Hf 比值的影响取决于角闪石的成分。玄武岩中的低镁角闪石有  $D_{Nb/Ta} > 1$ 、 $D_{Zr/Hf} < 1$ <sup>[44]</sup>,这种角闪石的分异将使残留熔体中 Nb/Ta 降低,Zr/Hf 比值增高;而高镁角闪石分异对 Nb/Ta、Zr/Hf 比值的影响与单斜辉石分异对其造成的影响相似<sup>[26]</sup>。但 Nb/Ta、Zr/Hf 比值与 MgO 含量的变化并无相关性,因此角闪石的结晶分异不能充分解释二滩玄武岩 Nb/Ta、Zr/Hf 比值的变化规律。这进一步说明岩浆的结晶分异并不是导致二滩玄武岩 Nb/Ta、Zr/Hf 比值分异的主要因素,可能暗示了其地幔源是不均一的,或部分熔融过程中 Zr/Hf 发生了明显分异,而 Nb/Ta 几乎不受影响。

### 2.2 部分熔融对 Nb/Ta、Zr/Hf 分异的影响

众所周知,洋中脊玄武岩(MORB)和洋岛玄武岩(OIB)有不同的化学组成,而这些差异反应了其各自的地幔源组成和部分熔融程度。许多基于主量元素和微量元素的研究认为,MORB 形成所需的平均熔融程度约为 10%<sup>[50-53]</sup>。通过微量

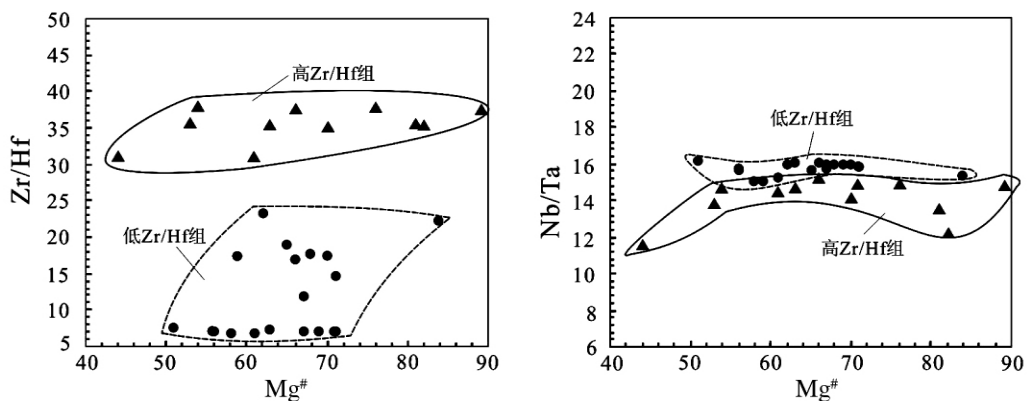


图1 二滩高钛玄武岩 Zr/Hf、Nb/Ta 与  $Mg^\#$  相关图解

Fig. 1. Plots of Zr/Hf, and Nb/Ta vs.  $Mg^\#$  of the Ertan high-Ti basalt.

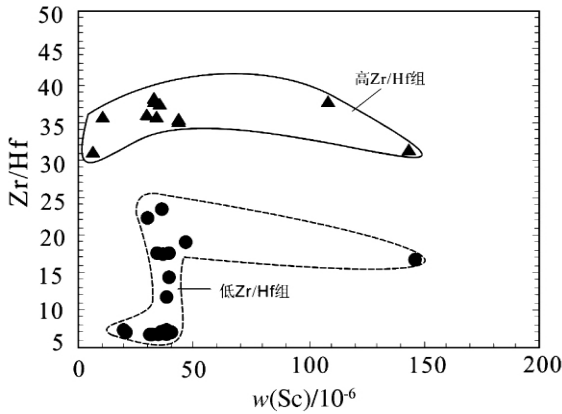


图 2 二滩玄武岩 Zr/Hf 与 Sc 相关图解

Fig. 2. Plots of Zr/Hf vs. Sc of the Ertan high-Ti basalt.

元素数据反演所得的结果则表明,形成碱性洋岛玄武岩的熔融程度平均为 3% ~ 4% [54-56]。因此,部分熔融程度在成岩过程中扮演着重要的角色。

在 Nb/Ta-Nb 图解中(图 3A),二滩高钛玄武岩高 Zr/Hf 组和低 Zr/Hf 组均具有 OIB 特征,Nb/Ta 比值差异并不明显,多数低 Zr/Hf 组样品的 Nb/Ta 比值稍高于高 Zr/Hf 组样品。此外,两组样品在 Nb/Ta-Nb 图解中均显示了一定的正相关关系,但相关性不明显。在 Zr/Hf-Zr 图解中(图 3B),高 Zr/Hf 组样品落入 OIB 范围,具有 OIB 特征;而低 Zr/Hf 组的 Zr/Hf 比值明显低于 OIB 和 MORB 范围值,但低 Zr/Hf 组样品表现出非常明显的正相关关系,高 Zr/Hf 组样品的相关性则不明显。两组样品均表现出了正相关性,说明二滩玄武岩高场强元素的地球化学行为受到了部分熔融的影响,且熔融过程中 Nb 比 Ta 更不相容,Zr 比 Hf 更不相容<sup>[41]</sup>。这表明高 Zr/Hf 组为更高层次的部分熔融所形成。然而,高 Zr/Hf 组样品的 Nb/Ta 比值低于低 Zr/Hf 组,这可能暗示了两组样品的控制矿物相是不同的,或地幔源的物质组分有所区别。在 Zr/Nb-Zr/Hf 图解中(图 4),两组样品亦表现出不同的地球化学行为。低 Zr/Hf 比值组样品显示强烈的正相关性,而高 Zr/Hf 比值组样品则不具有相关性。这可能与部分熔融过程中的压力变化有关,因为 Bromiley 和 Redfern<sup>[57]</sup>的研究表明在高压熔融中 Zr/Nb 比值对部分熔融深度具有重要的指示意义。由于低 Zr/Nb 比值可被视为深部地幔熔融的证据<sup>[57]</sup>,因此低 Zr/Hf 比值组玄武岩应为高压部分熔融的产物,而高 Zr/Hf 比值玄武岩则有相对较浅的部分熔融深度。这与图 3B 所表达的结果一致。

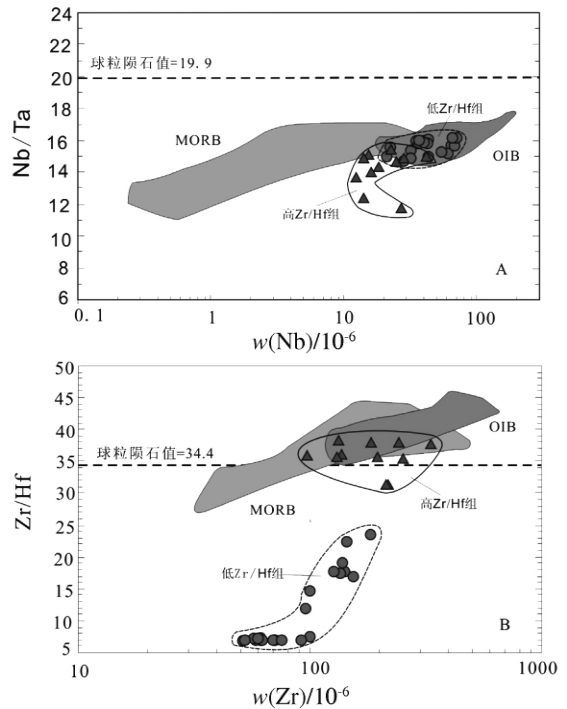


图 3 二滩高钛玄武岩 Nb/Ta 与 Nb Zr/Hf 与 Zr 相关图解(底图据文献[56]修改)

Fig. 3. Plots of Nb/Ta vs. Nb (A), and Zr/Hf vs. Zr (B) of the Ertan high-Ti basalt.

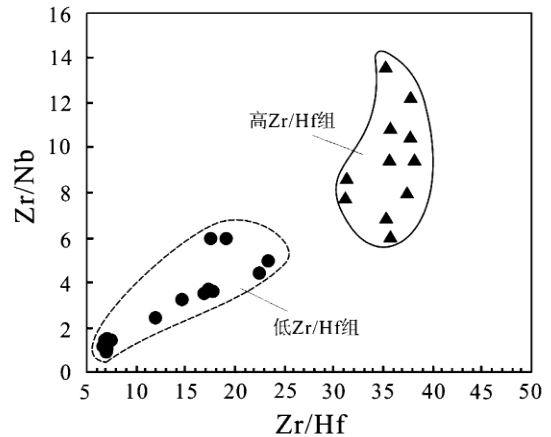


图 4 二滩高钛玄武岩 Zr/Nb 与 Zr/Hf 相关图解

Fig. 4. Plots of Zr/Nb vs. Zr/Hf of the Ertan high-Ti basalt.

### 2.3 幔源不均一性与 Nb/Ta Zr/Hf 分异

二滩高钛玄武岩中高 Zr/Hf 组和低 Zr/Hf 组岩石样品除了具有不同的熔融程度外,其放射性同位素比值也有较为明显的差异。低 Zr/Hf 组样品有较高的 <sup>208</sup>Pb\* / <sup>206</sup>Pb\* 比值(1.029 ~ 1.052),高 Zr/Hf 组样品则有较低的 <sup>208</sup>Pb\* / <sup>206</sup>Pb\* 比值(0.993 ~ 1.009)(图 5A)。此外,Nb/Ta 比值则

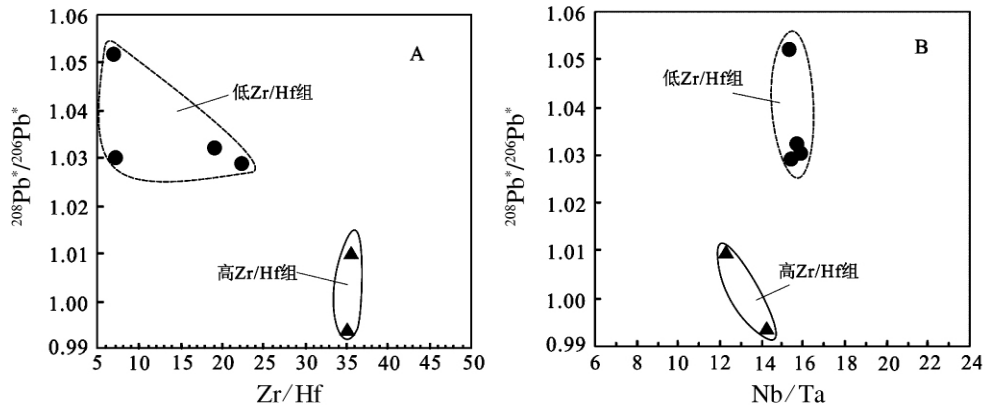


图5 二滩高钛玄武岩 $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ -Zr/Hf与 $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ -Nb/Ta相关图解

Fig. 5. Plots of  $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$  vs. Zr/Hf (A), and  $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$  vs. Nb/Ta (B) of the Ertan high-Ti basalt.

无明显差异(图5B),这与大多数洋岛玄武岩(OIB)相似<sup>[26]</sup>。这表明二滩高Zr/Hf组和低Zr/Hf组高钛玄武岩具有不同的地幔源组分,暗示二滩高钛玄武岩的地幔源具不均一性特征。由于在地幔深部Zr、Hf受控于石榴石相,而Nb、Ta受控于榴辉质岩石<sup>[26]</sup>,且Zr、Hf在石榴石与熔体间的分配系数 $D_{\text{Zr}} > D_{\text{Hf}}$ <sup>[58]</sup>,因此,高Zr/Hf组高钛玄武岩地幔源可能含有石榴石辉石岩,而低Zr/Hf组高钛玄武岩的地幔源则可能含有少量的榴辉质岩石。

### 3 结论

(1) 二滩高钛玄武岩出现了明显的Zr/Hf比

值分异,这种分异与岩浆演化过程中的结晶分异无关。高Zr/Hf组和低Zr/Hf组高钛玄武岩分别具有不同的熔融深度和压力,Zr/Hf比值的分异与部分熔融密切相关。

(2) 二滩高钛玄武岩高Zr/Hf组和低Zr/Hf组的存在暗示了二者具有不同的幔源物质组分,高Zr/Hf组地幔源可能含有石榴石辉石岩,而低Zr/Hf组地幔源则可能包含了一定量的榴辉质岩石。

### 参考文献:

- [1] McCulloch M T, Gamble J A. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 102: 358-374.
- [2] Pearce J A, Baker P E, Harvey P K, Luff I W. Geochemical evidence for subduction fluxes, mantle melting and fractional crystallization beneath the South Sandwich island arc [J]. *Journal of Petrology*, 1993, 36: 1073-1109.
- [3] Weyer S, Münker C, Mezger K. Nb/Ta, Zr/Hf and REE in the depleted mantle: Implications for the differentiation history of the crust-mantle system [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 205: 309-324.
- [4] Perfit M R, Gust D A, Bence A E, Arculus R J, Taylor S R. Chemical characteristics of island-arc basalts: Implications for mantle sources [J]. *Chemical Geology*, 1980, 30: 227-256.
- [5] Pearce J A, Peate D W. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1995, 23: 251-286.
- [6] Brenan J M, Shaw H F, Phinney D L, Ryerson F J. Rutile-aqueous fluid partitioning of Nb, Ta, Hf, Zr, U and Th: Implications for high field strength elements depletions in island-arc basalts [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 128: 327-339.
- [7] Foley S F, Barth M G, Jenner G A. Rutile/melt partition coefficients for trace elements and an assessment of the influence of rutile on the trace element characteristics of subduction zone Magmas [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64: 933-938.
- [8] Rudnick R L, Barth M G, Horn I, McDonough W F. Rutile-bearing refractory eclogites: Missing link between continents and depleted mantle [J]. *Science*, 2000, 287: 278-281.
- [9] McDonough W F. Partial melting of subducted oceanic crust and isolation of its residual eclogite lithology [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series-A*, 1991, 335: 407-418.
- [10] Kamber B S, Collerson K D. Role of 'hidden' deeply subducted slabs in mantle depletion [J]. *Chemical Geology*, 2000, 166: 241-254.

- [11] Weaver B L. The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 381-397.
- [12] Prytulak J, Elliott T. TiO<sub>2</sub> enrichment in ocean island basalts [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 263: 388-403.
- [13] Jackson M G, Hart S R, Saal A E, Shimizu N, Kurz M D, Blusztajn J, Skovgaard A C. Globally elevated titanium, tantalum, and niobium (TITAN) in ocean island basalts with high <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2008, 9: Q04o27, doi: 10.1029/2007GC001876.
- [14] Barth M G, McDonough W F, Rudnick R L. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust [J]. *Chemical Geology*, 2000, 165: 197-213.
- [15] Kamber B S, Collerson K D. Role of "hidden" deeply subducted slabs in mantle depletion [J]. *Chemical Geology*, 2000, 166: 241-254.
- [16] Münker C, Pfänder J A, Weyer S, Büchl A, Kleine T, Mezger K. Evolution of planetary cores and the Earth-Moon system from Nb/Ta systematics [J]. *Science*, 2003, 301: 84-87.
- [17] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite [J]. *Nature*, 2003, 425: 605-609.
- [18] Niu Y, Batiza R. Trace element evidence from seamounts for recycled oceanic crust in the Eastern Pacific mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148: 471-483.
- [19] Münker C. Nb/Ta fractionation in a Cambrian arc/back arc system, New Zealand: Source constraints and application of refined ICPMS techniques [J]. *Chemical Geology*, 1998, 144: 23-45.
- [20] Weyer S, Münker C, Rehkämper M, Mezger K. Determination of ultra-low Nb, Ta, Zr and Hf concentrations and the chondritic Zr/Hf and Nb/Ta ratios by isotope dilution analyses with multiple collector ICP-MS [J]. *Chemical Geology*, 2002, 187: 295-313.
- [21] Jochum K P, Stolz A J, McOrist G. Niobium and Tantalum in carbonaceous chondrites: Constraints on the solar system and primitive mantle niobium/tantalum, zirconium/niobium and niobium/uranium ratios [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2000, 35: 229-235.
- [22] Green T H, Adam J. Experimentally-determined trace element characteristics of aqueous fluid from partially dehydrated oceanic crust at 3.0 GPa, 650 ~ 700°C [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2003, 15: 815-830.
- [23] Schmidt M W, Dardon A, Chazot G, Vannucci R. The dependence of Nb and Ta rutile-melt partitioning on melt composition and Nb/Ta fractionation during subduction processes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 226: 415-432.
- [24] Xiong X L, Adam J, Green T H. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: implications for TTG genesis [J]. *Chemical Geology*, 2005, 218: 339-359.
- [25] Büchl A, Münker C, Mezger K. High precision Nb/Ta and Zr/Hf ratios in global MORB [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, A108 (Suppl.): 66.
- [26] Pfänder J A, Münker C, Stracke A, Mezger K. Nb/Ta and Zr/Hf in ocean island basalts—Implications for crust-mantle differentiation and the fate of Niobium [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 254: 158-172.
- [27] 汪云亮, 李巨初, 周蓉生. 岩浆岩微量元素地球化学原理及其应用——兼论峨眉山玄武岩的成因 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993: 42-219.
- [28] 汪云亮, 李巨初. 峨眉山玄武岩地幔源成分及其变化的微量元素标志 [J]. 成都理工学院学报, 1994, 21(4): 45-51.
- [29] 黄开年, 杨瑞英, 王小春, 黄忠祥, 刘秉光. 峨眉山玄武岩微量元素地球化学的初步研究 [J]. 岩石学报, 1988, (4): 49-60.
- [30] 李巨初, 汪云亮. 试论峨眉山玄武岩喷发构造环境 [J]. 成都地质学院学报, 1989, 16(3): 81-87.
- [31] Chung S L, Jahn B M. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary [J]. *Geology*, 1995, 23: 889-892.
- [32] 徐义刚, 钟孙霖. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件 [J]. 地球化学, 2001, 30(1): 1-9.
- [33] Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, Wu G Y. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China [J]. *Lithos*, 2001, 58: 145-168.
- [34] Song X Y, Zhou M F, Hou Z Q. Geochemical constraints on the mantle source of the upper Permian Emeishan continental flood basalt, Southwestern China [J]. *International Geology Review*, 2001, 43: 213-225.
- [35] Zhang Z C, Wang F S. Geochemistry of two types of basalts in the Emeishan basaltic province: Evidence for mantle plume-lithosphere interaction [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(2): 229-238.
- [36] 肖龙, 徐义刚, 梅厚钧, 何斌. 云南金平晚二叠纪玄武岩特征及其与峨眉山玄武岩关系——地球化学证据 [J]. 岩石学报, 2003, 19(1): 38-48.
- [37] Xiao L, Xu Y G, Mei H J, Zheng Y F, He B, Pirajno F. Franco Pirajno. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: Implications for plume-lithosphere interaction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 228: 525-546.
- [38] 何斌, 徐义刚, 王雅致, 罗震宇, 王康明. 用沉积记录来估计峨眉山玄武岩喷发前的地壳抬升幅度 [J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(3): 316-320.
- [39] 严再飞, 黄智龙, 许成, 温春齐, 张振亮. 峨眉山二滩玄武岩地球化学特征 [J]. 矿物岩石, 2006, 26(3): 77-84.
- [40] 严再飞, 黄智龙, 程礼军, 许成, 陈觅. 峨眉山高钛玄武岩物源的不均一性研究 [J]. 矿物岩石, 2007, 12: 60-65.
- [41] 严再飞, 黄智龙, 陈觅, 等. 峨眉山高钛玄武岩的两种不同地幔源特征 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 待刊.
- [42] David K, Schiano P, Allègre C J. Assessment of the Zr/Hf fractionation in oceanic basalts and continental materials during petrogenetic

- processes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 178: 285-301.
- [43] Beier C, Haase K M, Hansteen T H. Magma evolution of the Sete Cidades volcano, Sao Miguel, Azores [J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47: 1375-1411.
- [44] Tiepolo M, Vannucci R, Oberti R, Foley S, Bottazzi P, Zanetti A. Nb and Ta incorporation and fractionation in titanian pargasite and kaersutite: Crystal-chemical constraints and implications for natural systems [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 176: 185-201.
- [45] Tiepolo M, Bottazzi P, Foley S F, Oberti R, Vannucci R, Zanetti A. Fractionation of Nb and Ta from Zr and Hf at mantle depths: The role of titanian pargasite and kaersutite [J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42: 221-232.
- [46] Klemme S, Blundy J D, Wood B J. Experimental constraints on major and trace element partitioning during partial melting of eclogite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66: 3109-3123.
- [47] Schmidt K H, Bottazzi P, Vannucci R, Mengel K. Trace element partitioning between phlogopite, clinopyroxene and leucite lamproite melt [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 168: 287-299.
- [48] Foley S, Tiepolo M, Vannucci R. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones [J]. *Nature*, 2002, 417: 837-840.
- [49] Möunker C, Warner G, Yagodinski G, Churikova T. Behaviour of high field strength elements in subduction zones: Constraints from Kamchatka-Aleutian arc lavas [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224: 275-293.
- [50] Klein E M, Langmuir C H. Global correlation of ocean ridge basalt chemistry with axial depth and crustal thickness [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92: 8089-8115.
- [51] 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: 297-314.
- [52] Schiano P, Allègre C J, Dupré B, Lewin E, Joron J-L. Variability of trace elements in basaltic suites [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 119: 37-51.
- [53] Minster J F, Allègre C J. Systematic use of trace elements in igneous processes, Part III: Inverse problem of batch partial melting in volcanic suites [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1978, 68: 37-52.
- [54] Hofmann A W, Feigenson M D. Case studies of the origins of basalt. I. Theory and reassessment of Grenada basalts [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1983, 84: 382-389.
- [55] Ormerod D S, Rogers N W, Hawkesworth C J. Melting in the lithospheric mantle, inverse modelling of alkali-olivine basalts from the Big Pine volcanic field, California [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1991, 108: 305-317.
- [56] Schmidt A, Weyer S, John T, Brey G P. HFSE systematics of rutile-bearing eclogites: New insights into subduction zone processes and implications for the earth's HFSE budget [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73: 455-468.
- [57] Bromiley G D, Redfern S A T. The role of TiO<sub>2</sub> phases during melting of subduction-Modified crust: Implications for deep mantle melting [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 267: 301-308.
- [58] Pertermann M, Hirschmann M M, Hametner K, Günther D, Schmidt M W. Experimental determination of trace element partitioning between garnet and silica-rich liquid during anhydrous partial melting of MORB-like eclogite [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2004, 5: Q05A01, doi: 10.1029/2003GC000638.

## Implications of Zr/Hf Fractionation in the Ertan High-Ti Basalt

YAN Zai-fei<sup>1</sup>, CHENG Li-jun<sup>2</sup>, WANG Hong-tu<sup>3</sup>, CHENG Mi<sup>1,4</sup>, ZHOU Jia-xi<sup>1,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Ore Deposits Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Institute of Geology and Mine of Chongqing, Chongqing 400042, China; 3. College of Resources and Environment, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 4. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10039, China)

**Abstract:** Variations of high-field strength element (HFSE) of the Ertan high-Ti basalts in the Emeishan suggest that Zr/Hf ratios were fractionated. According to the fractionation, the Ertan high-Ti basalts can be divided into high Zr/Hf group and low Zr/Hf group based on Zr/Hf ratios. The fractionation of Zr/Hf is not related with crystallization of basaltic magmas but partial melting and distinct compositions of mantle. This implies that high Zr/Hf basalt and low Zr/Hf basalt possessed distinct compositions of mantle and underwent different surroundings of partial melting, respectively.

**Key words:** high-Ti basalt; high-field strength element; partial melting; heterogeneity