

# 地壳再循环与大陆碱性玄武岩的成因： 以山东新生代碱性玄武岩为例

陈立辉, 曾罡, 胡森林, 俞恂, 陈霞玉

南京大学 地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210093

**摘要:** 大陆碱性玄武岩在地球化学特征上与洋岛玄武岩高度相似, 被看做是板内玄武岩在大陆上的典型代表。本文以山东新生代碱性玄武岩为例, 探讨大陆碱性玄武岩的成因。山东新生代碱性玄武岩按时空分布特征可以分为两类: 早期定向分布、相互平行的三个火山群(包括鲁西的潍坊火山群、沂水火山群和胶东的蓬莱火山群)和晚期杂乱分布的孤立小火山。早期火山群碱性较弱, 以碱性橄榄玄武岩和碧玄岩为主, 微量元素特征和同位素组成变化大; 晚期孤立小火山碱性强, 以碧玄岩和霞石岩为主, 微量元素特征和同位素组成较均一。因此, 从岩性组成和时空分布特征看, 山东的火山群相当于洋岛/海山的造盾期玄武岩, 而孤立小火山接近于洋岛/海山上的复苏期玄武岩。潍坊火山群和沂水火山群在Sr-Nd, Nd-Hf同位素相关图上都存在从亏损到富集的两端元混合排列趋势, 但两者的排列趋势有一点区别。其中同位素富集的端元相对于原始地幔具有偏低的Ce/Pb比和偏高的Ba/Th比, 指示其为大陆下地壳物质。同时, 这种富集端元的Th/La比值明显低于大陆下地壳的平均值, 其放射成因Hf相对于放射成因Nd过剩(即Nd-Hf同位素解耦), 说明这种富集端元不是岩浆上升过程中混染的下地壳物质, 而是经历过早期熔融的再循环大陆下地壳(榴辉岩或者石榴辉石岩)。鲁西两个平行火山群在同位素排列上的区别类似于夏威夷玄武岩中的KEA链和LOA链, 因此, 山东的平行火山群的深部动力学背景可能是地幔柱, 再循环大陆下地壳物质可能是这种地幔柱的重要组成物质。晚期的孤立小火山在地球化学特征上与火成碳酸岩非常相似, 如在原始地幔标准化图上都具有K, Pb, Zr, Hf, Ti的负异常等特征, 因此我们认为其地幔源区为碳酸盐化的橄榄岩。孤立小火山中等亏损的Sr, Nd, Hf同位素特征支持碳酸岩熔体来自年轻的(中生代?)再循环洋壳。

**关键词:** 大陆碱性玄武岩; 地壳再循环; 碳酸盐化地幔; 中国东部

中图分类号: P588.145

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2012)0016-12

## Crustal Recycling and Genesis of Continental Alkaline Basalts: Case Study of the Cenozoic Alkaline Basalts From Shandong Province, Eastern China

CHEN Lihui, ZENG Gang, HU Senlin, YU Xun, CHEN Xiayu

School of Earth Sciences and Engineering, State Key Laboratory for Mineral Deposit Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China

**Abstract:** Geochemically, continental alkaline basalts are similar to those oceanic island basalts, and are viewed as the representative of intraplate basalts in continents. Here we provide a case study of the Cenozoic basalts in Shandong Province, eastern China, to discuss the genesis of continental basalts. Spatially, the Cenozoic basalts can be divided into two kinds, the early three parallel volcanic belts and the late small and isolated volcanoes. The three belts including the Weifang belt and the Yishui belt in western Shandong, and the Penglai belt in eastern Shandong are less alkaline and are mainly composed of alkali olivine basalts and basanites, which show broad ranges of incompatible element ratios and isotopic values. The small and isolated

收稿日期: 2011-11-22; 修回日期: 2011-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172060, 40772035)资助

作者简介: 陈立辉, 男, 教授, 主要从事火成岩石学方面的研究; E-mail: chenlh@nju.edu.cn

volcanoes are more alkaline and are mainly composed of basanites and nephelinites, which are more homogenous in incompatible element ratios and isotopic values. Therefore, compared with oceanic island basalts, the parallel volcanic belts in Shandong can be regarded as shield-building stage basalts, while the small and isolated volcanoes correspond to the posterosional or rejuvenescent basalts. On the isotopic plots of Sr vs. Nd and Nd vs. Hf, both the Weifang belt and the Yishui belt show a two-endmember mixing array. However, there is minor difference of the enriched endmembers of these two arrays. The enriched endmembers are characterized by smaller Ce/Pb and elevated Ba/Th ratios, suggesting a signature of lower continental crust. However, such materials have much lower Th/La ratios and have excess radiogenic Hf contents relative to radiogenic Nd. Such geochemical signatures cannot be produced by assimilation of lower continental crust but by recycled lower continental crust (eclogite or garnet pyroxenite), which had undergone early melting in the mantle. The different arrays in isotopic plots of the two belts are alike those of the KEA chain and the LOA chain of Hawaii islands. Therefore, we propose that the parallel volcanic belts of Shandong be attributed to the plume activity and the recycled lower continental crust be important components of the plume. Geochemically, basanites and nephelinites of the late small and isolated volcanoes share many signatures with the carbonatite, e.g. the depletion of K, Pb, Zr, Hf, Ti in the primitive mantle-normalized grams. Therefore, we conclude that their mantle sources have been carbonated recently. The moderately depleted Sr, Nd, Hf isotopic compositions of these alkaline rocks indicate that the carbonated liquids might be derived from recycled young (Mesozoic?) oceanic crust.

**Key words:** continental alkaline basalts; crustal recycling; carbonated mantle; eastern China

**First author:** Chen lihui, Professor; E-mail: chenlh@nju.edu.cn

与热点有关的洋岛玄武岩是板内玄武岩的代表，其成因与洋壳再循环（recycling）密切相关（Hofmann, 1997; White, 2010）。大陆碱性玄武岩虽然在元素地球化学特征和同位素组成上都可以与洋岛玄武岩相类比（Hole et al., 1991），但是在大陆碱性玄武岩中识别再循环地壳物质信息却不容易，因为再循环地壳物质信息很难与地壳混染和岩石圈地幔混染区别开来（White, 2010）。因此，长期以来，作为板内玄武岩重要组成的大陆碱性玄武岩，其成因，尤其是与再循环地壳的关系一直是被忽视的，研究程度远没有洋岛玄武岩高。中国东部新生代碱性玄武岩分布广泛，是全球大陆碱性玄武岩的重要组成。近年来，我们借鉴洋岛玄武岩的研究思路，选择位于中国东部新生代火山岩带中部的山东省（及周边地区）的新生代碱性玄武岩为主要研究对象，在元素地球化学和同位素地球化学研究过程中，寻找识别再循环地壳和地壳混染的诊断性指标，并结合近年来实验岩石学的研究进展，以探讨大陆碱性玄武岩与地壳再循环的成因联系（Chen et al., 2009; Zeng et al., 2010, 2011）。本文是这些工作的一个总结。

## 1 板内玄武岩

板内玄武岩泛指产于板块内部、远离板块边

界的幔源火山岩。板内玄武岩主要为拉斑玄武岩和碱性玄武岩，碱性较强的基性-超基性岩石，如碧玄岩、霞石岩等也常见，而超基性、低碱的岩石如科马提岩、苦橄岩非常罕见。在大洋内，板内玄武岩构成洋岛、海山和海底高原。其中，以拉斑玄武岩为主的海底高原构成大火成岩省的主体，被认为是地幔柱头部或者是巨型地幔柱的产物。洋岛和海山经常呈链状分布并且存在明显的向洋年轻化趋势（离海沟越远越年青），被认为是热点活动（或地幔柱尾部）的标志。规模较大的洋岛或者海山以拉斑玄武岩为主，碱性玄武岩常以薄层夹层存在于厚层拉斑玄武岩中（比如夏威夷玄武岩），碱性较强的岩石（如碧玄岩）一般仅出现于洋岛或者海山的剥蚀后（或复苏）阶段（posterosional or rejuvenescent），与造盾阶段（shield-building stage）可以相差几个百万年。规模较小的洋岛或者海山以碱性玄武岩为主（比如南太平洋的路易斯维尔海山链）。在大陆上，板内玄武岩包括以拉斑玄武岩为主的大陆溢流玄武岩（如西伯利亚暗色岩和印度的德干玄武岩高原），它们是大陆上的大火成岩省；其次是以碱性玄武岩为主的大陆碱性玄武岩带（如中国东部新生代碱性玄武岩），它们分布分散，虽然单个岩体的面积都不大，但却在每一个大陆上都有分布（Farmer, 2003）。

## 2 地壳再循环与洋岛玄武岩的成因

由于洋岛玄武岩具有更广泛的代表性, 采样上又较海底高原、海山等其它海洋玄武岩容易, 因此洋岛玄武岩的研究程度非常高。在很长一段时间里, 板内玄武岩的研究主要是围绕洋岛玄武岩的成因来讨论的。相对产于板块边缘的大洋中脊玄武岩 (MORB), 洋岛玄武岩往往明显亏损重稀土元素和富集强不相容元素, 指示两者具有完全不同的地幔源区: 前者来源浅, 源区在元素地球化学特征和同位素组成特征上都相对亏损, 代表亏损的浅部地幔; 后者来源深, 源区在元素地球化学特征和同位素组成特征上都相对富集, 代表地幔深部存在的富集组分 (White, 2010)。

根据洋岛玄武岩普遍具有富集不相容元素和相对富集放射性成因同位素组成的地球化学特征, Hofmann and White (1982) 首先提出洋岛玄武岩的源区含有古老的再循环洋壳, 这些因为板块俯冲回到地幔的富集物质最终堆积在核-幔边界, 当地幔柱活动时又被带到地幔浅部 (即岩浆源区)。今天, 洋岛玄武岩地壳再循环成因的观点已经成为地幔柱学说的一个重要组成部分, 因而自然而然地卷入了地幔柱存在与否的学术纷争。但是, 洋岛玄武岩的元素地球化学特征和同位素组成特征变化范围非常大, 因此其源区组成是高度不均一的 (White, 1985)。Zindler and Hart (1986) 在总结大洋玄武岩 (包括洋岛、海山和洋中脊玄武岩) 的Sr, Nd, Pb同位素组成基础上, 提出了地幔中含有亏损地幔 (DMM) 和三种富集地幔 (EM1型、EM2型和HIMU型, 见于洋岛玄武岩) 等端元组分的地球化学模型。其中, EM1型地幔以低的放射成因Pb和Nd含量, 中等的放射成因Sr含量为特征, 这种同位素组成特征可以以古老的再循环的远洋沉积物来解释, 也可能是再循环的大陆下地壳 (Willbold and Stracke, 2010); EM2型地幔以高的放射成因Sr、中等的放射成因Nd和Pb含量为特征, 可以用古老的再循环的陆源沉积物来解释; HIMU型地幔以高的放射成因Pb、较低的放射成因Sr和中等的放射成因Nd为特征, 可以用古老的再循环洋壳来解释 (Workman et al., 2004)。后来, 洋岛玄武岩中识别出的这

些富集端元成为地幔柱中含有再循环地壳的关键证据。因此, 全球范围内大洋地幔的化学不均一性可以用一个简单的模型, 即再循环洋壳 (及其上覆沉积物) 不同程度和 (或) 不同形式的贡献来解释。近年来由于实验岩石学的进展和地球化学观测数据的不断积累和提高, 使我们对板内玄武岩地幔源区的认识上了一个新台阶, 并进一步支持和丰富了板内玄武岩的地壳再循环模型 (White, 2010)。

虽然地壳再循环模型被广泛的用来解释与热点有关的洋岛玄武岩的成因, 但是, 在大陆碱性玄武岩中识别再循环地壳物质却不容易, 因为热点活动在大陆上的表现 (如时空分布规律) 往往不明显, 而且大陆碱性玄武岩中的再循环地壳物质很难与地壳混染区别开来。因此, 找到一些可用的识别再循环地壳物质 (区别于地壳混染) 的地球化学指标, 是建立大陆玄武岩与地壳再循环之间成因联系的关键。另外, 还需进一步理清大陆碱性玄武岩的时空分布规律, 在与洋岛玄武岩时空分布规律充分对比的基础上, 建立适用于大陆碱性玄武岩的深部动力学背景。

## 3 中国东部新生代玄武岩

中国东部的新生代玄武岩以碱性玄武岩为主, 作为典型的陆内碱性玄武岩, 其成因受到长期持续的关注 (Zhou and Armstrong, 1982; Peng et al., 1986; Song et al., 1990; Zhi et al., 1990; Basu et al., 1991; Fan and Hooper, 1991; 刘若新, 1992; Liu et al., 1994; Zhang et al., 1995; Chung, 1999; Zou et al., 2000; Ho et al., 2003; Xu, 2001; Xu et al., 2004, 2005; Niu, 2005; Tang et al., 2006; Liu et al., 2008; Zhang et al., 2009; Chen et al., 2009; Zou and Fan, 2010; Zou et al., 2010; Zeng et al., 2010, 2011; Wang et al., 2011)。在中国东部新生代玄武岩中, 虽然个别地区存在钾质超钾质的岩石 (如黑龙江的五大连池), 但是绝大多数是钠质的。新生代早期 (古近纪) 的玄武岩主要分布于中-新生代的盆地中, 相关的研究仅局限于少量的露头 and 钻孔岩芯, 有关中国东部新生代玄武岩的研究主要是针对广泛出露的新生代晚期 (新近纪) 玄武岩展开

的。因此，与大多数相关文献一样，本文中讨论的中国东部新生代玄武岩是指：地理上位于太行山以东，时代上为中新世以来的，成分上为钠质的玄武岩。以上工作使我们对中国东部新生代玄武岩的地球化学特征有了一个整体的认识。概况起来，普遍具有以下两点：

(1) 元素地球化学特征上非常像洋岛玄武岩，比如富集绝大多数强不相容元素，在原始地幔标准化图上具有Nb, Ta的正异常（高的Nb/U比）和K, Pb的负异常（高的Ce/Pb比）等；

(2) 同位素组成变化范围大，并具有区域性。比如在Pb-Nd同位素相关图上，北方玄武岩（苏鲁造山带以北）的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 呈正相关（见Chen et al., 2009中的图2），说明玄武岩中含有具EM1型特征的富集组分（低的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值）；而南方玄武岩（苏鲁造山带以南）的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 呈负相关，说明其含有的富集组分与北方玄武岩区别明显（高 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与中等的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ）。

2008年以前，多数学者倾向于EM1型的富集组分来自岩石圈地幔（Peng et al., 1986; Song et al., 1990; Basu et al., 1991; Zhang et al., 1995; Chung, 1999; Zou et al., 2000），玄武岩富集的同位素组成特征可能是软流圈-岩石圈相互作用的结果（Xu et al., 2005; Tang et al., 2006），只有Han等（1999）因为观察到赤峰玄武岩低 $\epsilon_{\text{Nd}}$ 值的样品具有高的Ti/Y比，从而认为富集组分应该来自更深部。然而，考虑到古老大陆的地质背景，低的放射成因Pb同位素组成显然用大陆下地壳混染来解释更方便，因此很难排除地壳混染引起玄武岩同位素组成富集化趋势的可能性（Peng et al., 1986; Song et al., 1990）。近年来，随着实验岩石学的进展和地球化学示踪手段（如Hf, O同位素）的增加，越来越多的学者认为玄武岩中的这些富集组分是源区含有再循环地壳物质的结果（Liu et al., 2008; Chen et al., 2009; Zhang et al., 2009; Zeng et al., 2011; Wang et al., 2011）。

至于玄武岩中同位素亏损的组分，则几乎毫无例外的认为来自亏损的软流圈地幔，其富集的微量元素特征被认为是源区经历了近期交代作用。显然，这种认识过于粗枝大叶，因为源区的

岩性、交代流体的特征和来源都还没有被充分讨论；而这些对于中国东部新生代玄武岩的成因及其所反映的深部动力学背景都至关重要。

## 4 山东新生代碱性玄武岩的基本特征

山东省位于中国东部新生代火山带的中部，处于华北克拉通的东南缘。以郯庐断裂为界，一般称郯庐断裂以西地区为鲁西地区，郯庐断裂以东地区为胶东地区。自2007年以来，我们课题组对山东省的新生代玄武岩进行了系统的研究，发现山东的新生代玄武岩在时空分布、岩性和地球化学特征上都有一定的规律性。

### 4.1 空间分布特征

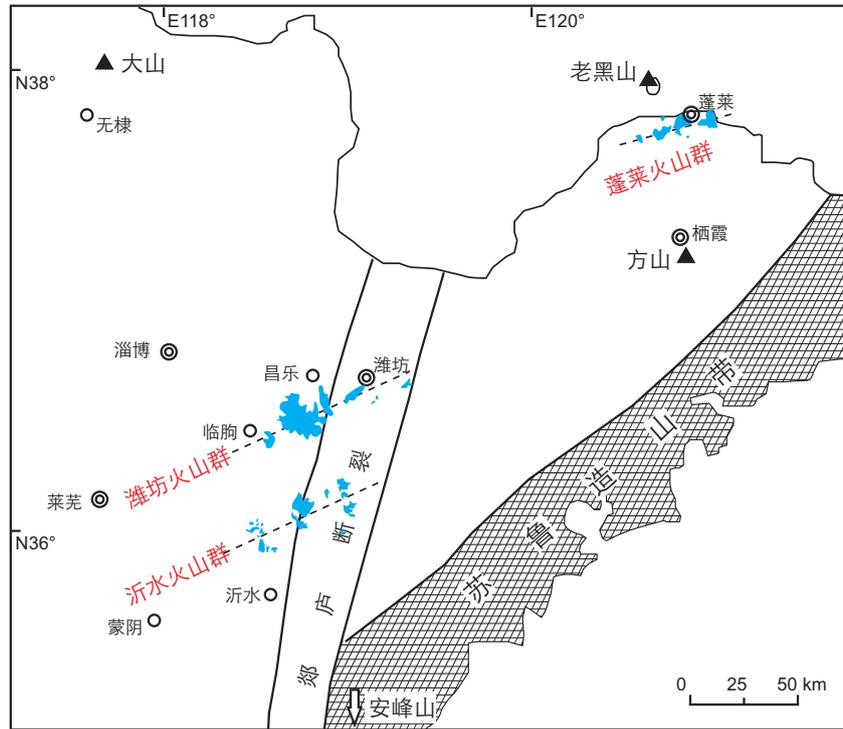
山东的新生代玄武岩按空间分布特征可以分为两种：定向分布的火山群和孤立的小火山。绝大多数玄武岩属于3条平行排列的火山群（图1）。其中两个火山群在鲁西，都以北东方向展布，并与郯庐断裂带以40~50度斜交。按与主要城市的远近，这里我们称北面的火山群为潍坊火山群，南面的火山群为沂水火山群。第三个火山群位于胶东的蓬莱地区，我们称之为蓬莱火山群。其展布方向与鲁西的两个火山群一致。只有少量玄武岩以孤立的小型火山零星分布，包括无棣的大山、栖霞的方山和蓬莱大黑山岛上的老黑山等。

### 4.2 时间特征

我们对已发表的山东新生代玄武岩K-Ar年龄进行了统计（罗丹等，2009）。山东新生代玄武岩启动时间为24 Ma，终于0.33 Ma。其中鲁西两个火山群（以下简称鲁西双火山群）的年龄都大于10 Ma，而胶东蓬莱火山群和其它孤立小火山的年龄都小于10 Ma。鲁西双火山群的岩浆活动可以分为三期，即早期的牛山期、中间的山旺期和晚期的尧山期。最近He等（2011）对昌乐的三期玄武岩进行了系统的Ar-Ar定年，结果分别为（ $21.0 \pm 2.5$ ）Ma（牛山期）、17~18 Ma（山旺期）和（ $17.3 \pm 1.5$ ）Ma（尧山期），因此鲁西双火山群是中新世早期的产物。

### 4.3 岩性特征

山东新生代玄武岩的岩性和岩体规模存在明显的相关性。岩体规模大的碱性程度弱，岩体规模小的碱性强。鲁西双火山群的岩体一般规模



蓝色阴影区为新生代玄武岩分布区，黑色三角代表孤立小火山，虚线代表火山排列方向  
Cenozoic basalts are distributed in the blue areas, dark triangles refer to the small and isolated volcanoes, dotted lines show of the volcanic belts

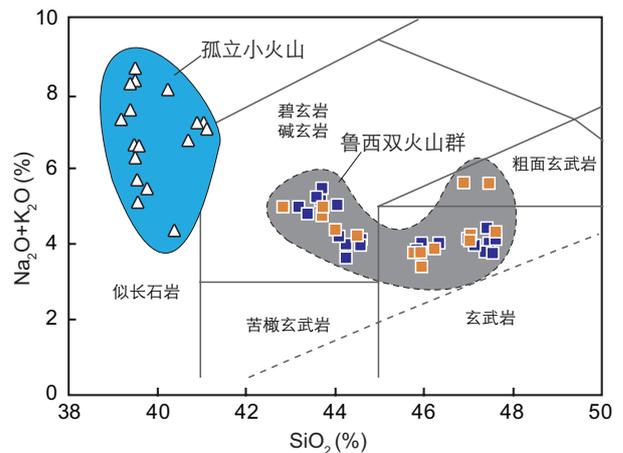
图1 山东地区新生代玄武岩的分布图

Fig. 1 Distribution of the Cenozoic basalts in Shandong Province, China

大，碱性相对弱，以碱性橄榄玄武岩为主，碧玄武岩次之；胶东蓬莱火山群的岩体规模一般较鲁西小，玄武岩的碱性程度稍强；孤立小火山的规模最小，碱性最强，以碧玄武岩和霞石岩为主。在硅-碱图上，鲁西双火山群与山东孤立小火山分成明显不同的两群样品（图2）。

#### 4.4 元素地球化学特征

在原始地幔标准化图上，山东新生代玄武岩与大多数洋岛玄武岩一样，富集绝大多数不相容元素，同时具有Nb, Ta的正异常，Nb, Ta相对于大离子亲石元素Rb, Ba, Th, U, K和LREE更富集（图3）。其中，孤立小火山相对鲁西双火山群更富集绝大多数强不相容元素，LREE和HREE的分馏更明显，并具有非常明显的K, Pb, Zr, Hf, Ti负异常。鲁西双火山群除整体富集程度低外，元素异常特征上表现为复杂化：Ti无异常或者微弱的正异常，Hf异常不明显，Sr的正异常非常明显，Pb和K的异常变化大（从负异常、无异常到正异常都有），Th和U相对于Ba明显亏损。总体来说，元素地球化学特征与岩性存在一定的对应性。



三角形代表孤立小火山，蓝色和黄色正方形分别代表潍坊火山群和沂水火山群。数据引自Zeng等（2010，2011），以下同。

Basalts from the small and isolated volcanoes, the Weifang volcanic belt and the Yishui volcanic belt are shown as blank triangles, blue squares, and yellow squares, respectively. Data for Cenozoic alkaline basalts of Shandong are from Zeng et al. (2010, 2011)

图2 山东新生代碱性玄武岩的硅-碱相关图

Fig. 2 Variations in  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  vs.  $\text{SiO}_2$  of alkaline basalts from Shandong.

#### 4.5 Sr-Nd-Hf同位素组成特征

总体来说，孤立小火山的同位素组成变化小，显示中等亏损的特征（本文中以无棣大山

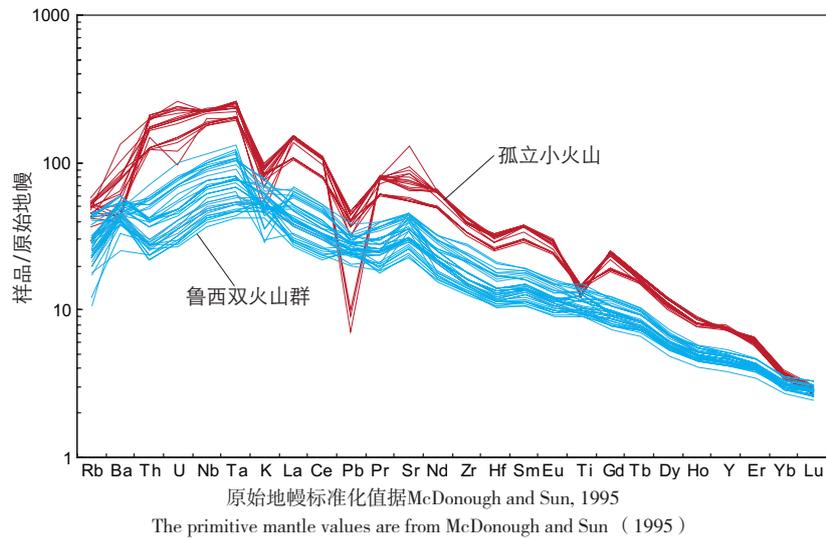


图3 山东新生代碱性玄武岩微量元素原始地幔标准化图

Fig. 3 Trace element spidergram for the Cenozoic alkaline basalts from Shandong

的平均值代表孤立小火山， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.70335$ ， $\varepsilon_{\text{Nd}}=5.8$ ， $\varepsilon_{\text{Hf}}=8.3$ 。鲁西双火山群的同位素组成变化范围大， $\varepsilon_{\text{Nd}}$ 变化在5.8~-1.4之间；在Sr-Nd同位素相关图上呈负相关，在Nd-Hf同位素相关图上呈正相关，其中亏损端元的同位素组成与孤立小火山相当（图4）。有趣的是，虽然鲁西两个火山群在Sr-Nd，Nd-Hf同位素相关图上的整体趋势一致，即表现出两端元混合的趋势，但是两者之间还是存在区别。两个火山群的排列在孤立小火山处相交（亏损端元），但在远离亏损端元方向，两个火山群的数据渐行渐远：在一定的Nd同位素比值情况下，潍坊火山群比沂水火山群总是具有偏高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和偏低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}$ 值。

## 5 陆壳再循环与鲁西双火山群的成因

### 5.1 下地壳物质信息的识别

在微量元素原始地幔标准化图上，鲁西双火山群的K，Pb从正异常到负异常都有，岩浆过程（不同程度的部分熔融和结晶分异引起的岩浆演化）无法导致K，Pb与其它地球化学性质相近的元素发生分馏（图3），因此，K，Pb异常的变化与同位素组成的变化一样（图4），示踪的应该是两种物质之间的混合。如果说同位素亏损的物质来自软流圈地幔，那么同位素富集的物质来自哪里呢？

鲁西双火山群的Pb含量偏高，其Ce/Pb比明显低于正常地幔值，暗示其中含有陆壳物质。在

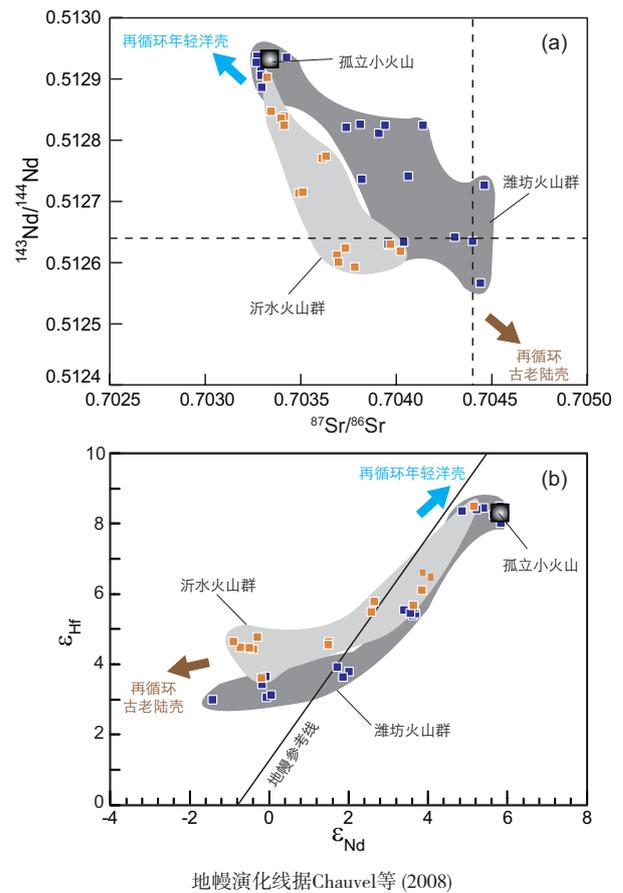


图4 山东新生代玄武岩的Sr-Nd和Nd-Hf同位素相关图  
Fig. 4 Variations in  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  vs.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  and  $\varepsilon_{\text{Hf}}$  vs.  $\varepsilon_{\text{Nd}}$  of the Cenozoic alkaline basalts from Shandong

Ce对Ce/Pb相关图上，它们刚好落在幔源岩浆和大陆下地壳的混合线上（图5a）。与Ce/Pb比一样，

Ba/Th比也是玄武岩的有效示踪剂,可以反映源区的组成。鲁西双火山群在 $\epsilon_{Nd}$ 对Ba/Th比相关图上呈负相关,其中富集端元具有偏高的Ba/Th比值(图5b)。在陆壳的上、中、下三层结构中,只有下地壳具有高于原始地幔的Ba/Th比值(Rudnick and Gao, 2003)。因此,鲁西双火山群中富集端元明显偏高的Ba/Th比值暗示玄武岩中含有大陆下地壳物质。

### 5.2 地壳再循环与地壳混染

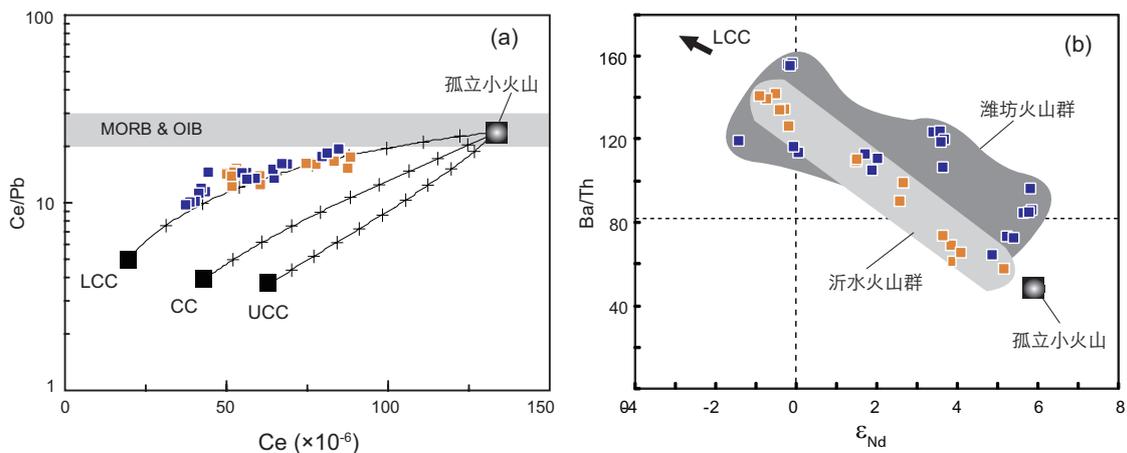
对于大陆玄武岩,富集组分来自地壳混染还是再循环地壳是一个没有解决的难题。无论是上升过程中被下地壳混染,还是源区含有再循环的大陆下地壳,都可以使玄武岩的地球化学特征(例如Ce/Pb和Th/Ba比)发生如图5中的变化趋势。因此,绝大多数地球化学指标无法区分这两种源区。我们对常用不相容元素比值(部分熔融过程中分配系数接近的不相容元素之间的比值)进行海选后发现,Th/La比值可以有效区别这两种源区。由于孤立小火山(代表亏损端元)的Th/La比值(平均为0.14),接近大陆下地壳的平均值(0.15),因此该地区的幔源岩浆被大陆下地壳物质混染后不会引起Th/La比值的明显降低。但是,鲁西双火山群的Th/La比值(0.09~0.13)明显低于孤立小火山,说明玄武岩中的富集物质不是来自地壳混染,而是来自地幔中的再循环地壳(图6)。

### 5.3 再循环地壳的特征、来源

如果再循环下地壳在榴辉岩相状态下经历高

程度熔融,残留的榴辉岩的Th/La比值将显著降低(图6)。在我国东部,大陆下地壳可以通过大陆深俯冲(Zhang et al., 2002)和拆沉作用(Gao et al., 2004)两种方式进入软流圈地幔,从而改变软流圈地幔的组成,并导致中生代大规模地幔岩浆事件的发生。大陆下地壳通过深俯冲作用或者拆沉作用回到软流圈地幔后,会相变为榴辉岩(或者是榴辉岩相的石榴辉石岩),这种榴辉岩如果长期存留在地幔中,由于熔点比周围的橄榄岩低,非常容易发生部分熔融,导致残留的再循环大陆下地壳具有低Th/La比的特征。这种源区来源的熔体具有非常低的Th/La比值,它们的混入将显著降低幔源岩浆的Th/La比值(图6)。因此,残留的榴辉岩质再循环大陆下地壳是鲁西平行火山群富集物质的源区。鲁西平行火山群的MgO在10%左右,具有原始岩浆的特征,但其CaO却都<10%,低于橄榄岩来源的岩浆(图7)。玄武岩偏低的CaO含量支持地幔中富集物质为榴辉岩(或石榴辉石岩)这一岩性推测。因为榴辉岩(或石榴辉石岩)熔融过程中,富钙矿物单斜辉石为其主要残留相,这导致榴辉岩来源的熔体相对橄榄岩来源的熔体具有偏低的CaO含量。

富集端元放射成因Hf相对于放射成因Nd含量偏高(即Nd-Hf同位素解耦)的特征也支持其源区曾经历榴辉岩相的早期熔融(图4b)。榴辉岩熔融过程中,Lu在残留相的石榴石中是相容元素,因此经历高程度熔融后,残留榴辉岩Lu/Hf比

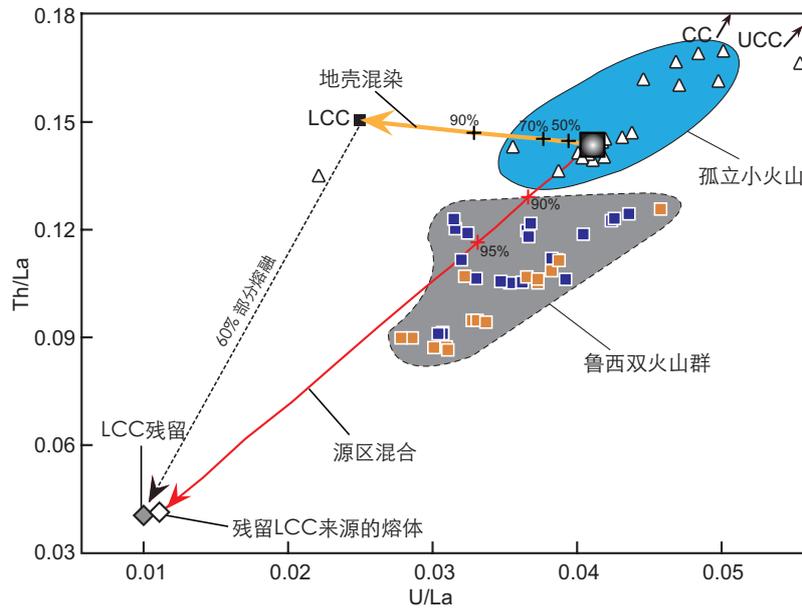


大陆下地壳、上地壳、地壳平均值据Rudnick and Gao (2003)

The average values for lower, upper and whole crust for the continent are after Rudnick and Gao (2003)

图5 山东新生代玄武岩的Ce-Pb (a) 和 $\epsilon_{Nd}$ -Ba/Th (b) 相关图

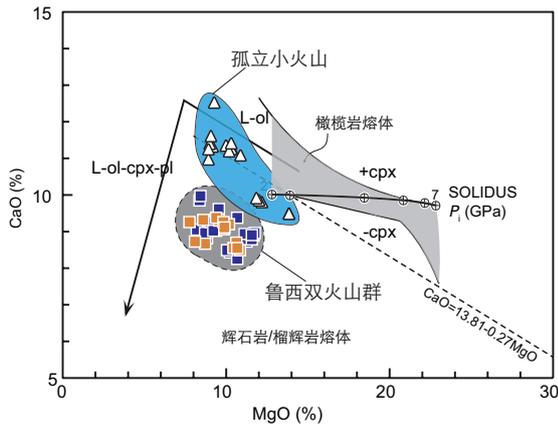
Fig. 5 Variations in Ce/Pb vs. Ce and Ba/Th  $\epsilon_{Nd}$  values of the Cenozoic alkaline basalts from Shandong



大陆下地壳、上地壳、地壳平均值据Rudnick and Gao (2003) 计算方法详见 Zeng 等 (2011)  
The average values for lower, upper and whole crust for the continent are after Rudnick and Gao (2003);  
Detailed calculations in this figure can be seen elsewhere (Zeng et al., 2011)

图6 山东新生代碱性玄武岩的U/La-Th/La相关图

Fig. 6 Plots of U/La vs. Th/La for the Cenozoic alkaline basalts from Shandong



橄榄岩、辉石岩/榴辉岩熔体区域据  
Herzberg and Asimow (2008)

The division for melts from peridotite and pyroxenite/eclogite is after  
Herzberg and Asimow (2008)

图7 山东新生代碱性玄武岩的MgO-CaO相关图

Fig. 7 Plot of MgO vs. CaO for the Cenozoic alkaline  
basalts from Shandong

的增加幅度将显著高于Sm/Nd比的增加幅度，这样放射成因Hf的积累速度将显著高于放射成因Nd的积累速度。在经历一段时间的演化后（比如100 Ma），残留的再循环地壳会出现明显的Nd-Hf同位素解耦（图4b）。临近的徐淮地区的中生代侵入岩中的石榴辉石岩捕虏体就具有异常高的Lu/Hf比（Xu et al., 2009）和Nd-Hf同位素解耦的现象（据高山未发表资料），支持该区软流圈地幔中

的再循环大陆下地壳经历过早期的高程度熔融。潍坊火山群和沂水火山群在同位素相关图上排列趋势上的差别可以解释为富集端元（再循环地壳）的组成差异，而这种差异是由于再循环地壳经历了不同程度的早期熔融。

总而言之，鲁西双火山群元素地球化学特征和同位素组成变化范围大不是地壳混染引起的，而是因为源区含有残留的再循环大陆下地壳（Zeng et al., 2011）。

## 6 洋壳再循环与山东孤立小火山的成因

### 6.1 山东孤立小火山的碳酸岩“印记”

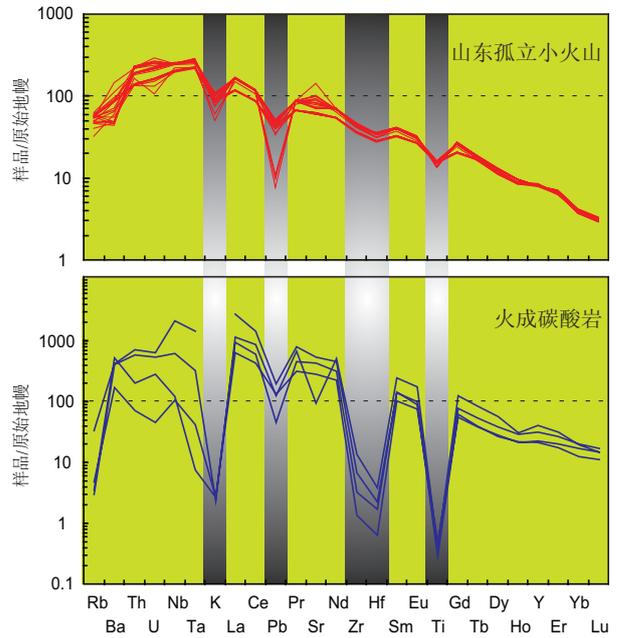
孤立小火山为一套碱性强的火山岩（碧玄岩、霞石岩），一般都含有大量的地幔捕虏体，同位素组成较为亏损（变化范围也小），但微量元素特征却非常富集（在早期文献中称之为同位素组成与微量元素特征解耦），因此普遍认为其源区为经历过近期交代的软流圈地幔。较高的CaO含量（MgO在10%时，CaO含量在11%左右）支持源区为橄榄岩，而不是榴辉岩或者辉石岩（图7）。

虽然极低程度的部分熔融可以导致强不相容元素的富集，但是正常的（干的）地幔岩显然无法熔融出微量元素如此富集的岩浆。我们注意

到，这些碱性较强岩石的关键地球化学特征，如K, Pb, Zr, Hf, Ti的负异常也是火成碳酸岩的标志性特征，只是前者的异常程度弱于后者（图8）。实验岩石学证明，碳酸盐化的橄榄岩在较低程度熔融的情况下可以生成这种硅不饱和的碱性岩浆（Hirose, 1997; Dasgupta et al., 2007）。因此，我们认为孤立小火山与火成碳酸岩的源区一样，都是碳酸盐化的软流圈地幔，只是后者是碳酸盐化地幔更低程度熔融的产物（Zeng et al., 2010）。

把孤立小火山样品和鲁西平行火山群中同位素较亏损的样品投在Sm/Yb-La/Yb相关图上，可以拟合出一条非常漂亮的熔融曲线（图9）。非常有意思的是，火成碳酸岩在这条熔融曲线的延长线上，这进一步支持了源区碳酸盐化的观点。因此一个完整的解释方案是：对于一个碳酸盐化的地幔，熔点附近的熔融产出火成碳酸岩，随着熔融程度的增加，相应生成霞石岩、碧玄岩和碱性玄武岩，岩石的碳酸岩地球化学“印记”（K, Pb, Zr, Hf, Ti的负异常）也逐渐削弱。

安峰山是一座位于苏鲁造山带上的新生代碧玄岩-霞石岩质火山，临近山东。由于其在同位素相关图上异常的排列特征使我们相信其源区也存在再循环的大陆下地壳（Chen L H et al., 2009）。

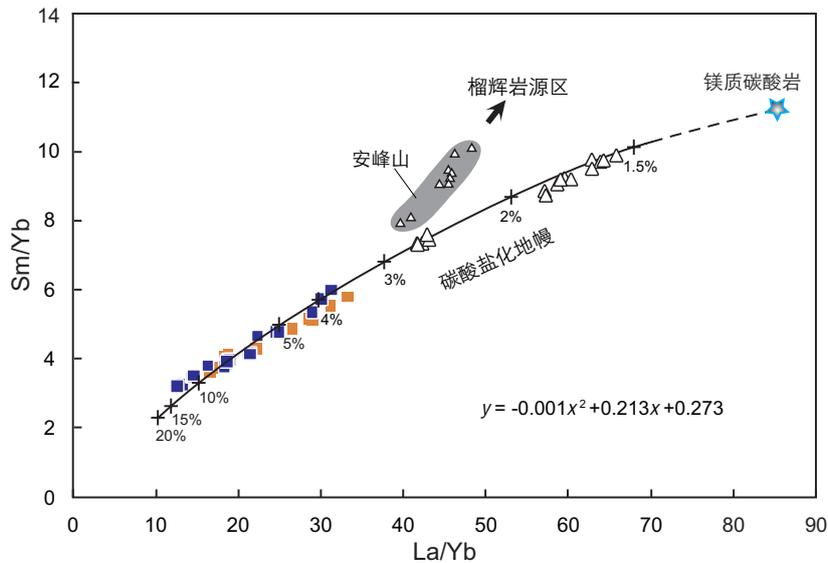


原始地幔标准化值据McDonough and Sun (1995); 火成碳酸岩平均值据Hoernle等(2002)和Bizimis等(2003)  
The primitive mantle values are from McDonough and Sun (1995);  
The average values for intraplate carbonatites are Hoernle et al. (2002) and Bizimis et al. (2003)

图8 山东新生代孤立小火山和火成碳酸岩在微量元素特征上的相似性

Fig. 8 Comparison of trace elemental signatures of the Cenozoic basalts from small and isolated volcanoes in Shandong and intraplate carbonatites

有趣的是，在Sm/Yb-La/Yb相关图上，安峰山玄武岩明显偏离由山东玄武岩组成的熔融曲线，在



镁质碳酸岩平均值据Hoernle等(2002); 部分熔融曲线计算方法详见Zeng等(2010)  
The average values for Magnesian-carbonatites are from Hoernle et al. (2002);  
The calculations for the partial melting curve can be seen elsewhere (Zeng et al., 2010)

图9 山东新生代碱性玄武岩在La/Yb-Sm/Yb相关图上的熔融曲线

Fig. 9 Melting curve for the Cenozoic alkaline basalts from Shandong in the plot of La/Yb vs. Sm/Yb

一定的La/Yb比值情况下具有偏高的Sm/Yb比值，这可以方便的解释为榴辉岩中的石榴石效应（图9）。因此，该熔融曲线除了可以用于判断熔融程度外，还可以用于判断源区是否含有再循环的地壳（榴辉岩）。

## 6.2 洋壳再循环与浅部地幔的碳酸盐化

那么，使软流圈地幔碳酸盐化的碳质流体（或者说使软流圈地幔经历近期交代的交代流体）的来源是什么？一般认为地幔中的碳主要是俯冲洋壳带下去的，因此探讨地幔中的碳质流体的来源问题也是“深部碳循环”研究的主题（Dasgupta and Hirschmann, 2010），目前对它的探讨还处于起步阶段，但这有可能成为理解地幔熔融以及地幔化学不均一性的关键一环。这里我们尝试以孤立小火山元素地球化学特征和同位素组成特征，探讨交代流体（碳酸岩熔体？）与洋壳再循环之间的成因联系。

以无棣大山为例，孤立小火山具有中等亏损的同位素组成特征（ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.70335$ ， $\epsilon_{\text{Nd}}=5.8$ ， $\epsilon_{\text{Hf}}=8.3$ ）。由于这些碱性岩石是碳酸盐化地幔极低程度熔融的产物（图9），不相容微量元素高度富集，明显高于鲁西双火山群（图3），而火成碳酸岩极端富集不相容微量元素（图8），因此，我们倾向于认为孤立小火山的Sr, Nd, Hf同位素组成可以反映其地幔源区交代流体（碳酸岩熔体？）的同位素组成。如果地幔中的碳酸盐都来自再循环的洋壳，那么孤立小火山的这种同位素组成特征最终继承自再循环的洋壳。这种中等亏损的同位素组成特征虽然与现今的绝大多数年轻洋壳（比如MORB）不同，但可以与稍老的洋壳，比如中生代（特别是白垩纪）的洋壳类似。

另一个支持该区地幔碳酸盐化与再循环洋壳有关的证据来自孤立小火山的微量元素特征。在原始地幔标准化图上，孤立小火山的Rb, Ba, Th, U相对Nb, Ta亏损，这与俯冲洋壳的地球化学行为吻合。在洋壳俯冲过程中，洋壳中含有的绝大多数水在榴辉岩化过程中丢失，并贡献于弧火山岩的地幔源区。在此脱水过程中，Rb, Ba, Th, U这些大离子亲石元素随着释放出来的水而流失，因此，残留的再循环洋壳相对亏损这些元素，并最终把这种地球化学特征“遗传”给山东

的孤立小火山。

归结起来，山东孤立小火山来源于地幔中的碳酸盐化橄榄岩低程度熔融。导致源区碳酸盐化的碳酸岩熔体可能来自再循环的洋壳。值得重视的是，Zhang等（2009）和Wang等（2011）发现苏皖地区新生代玄武岩的全岩和单斜辉石斑晶都常出现较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值，因此在中国东部新生代玄武岩的源区，再循环地壳物质可能分布比较广泛，当然这种低 $\delta^{18}\text{O}$ 物质是洋壳还是陆壳，以及其在源区的存在形式等都还可以进一步讨论。

## 7 玄武岩的空间分布规律与深部动力学

在解释山东新生代玄武岩的成因过程中，我们借鉴了洋岛玄武岩的成因模型，即地壳再循环模型。那么，我们是否能用洋岛玄武岩的深部动力学模型——地幔柱模型来解释山东新生代玄武岩的时空分布特征呢？

地幔柱学说认为链状分布的洋岛/海山（玄武质火山）是相对固定的热点（地幔柱）在漂移的大洋板块上留下的痕迹。链状火山分布的方向（从年青到年老）代表了板块移动的方向。山东的三个火山群虽然都具有定向分布的特征，但都非常短，只有40 km长，因此很难表现出由老到新排列的趋势。值得关注的是，洋岛玄武岩中最经典的夏威夷群岛在空间上由两个平行排列的火山链组成，分别是KEA链和LOA链。平行排列的两个火山链具有不同的Pb同位素排列，反映夏威夷地幔柱的小规模不均一性和富集物质（再循环地壳）在垂向上的连续性（Abouchami et al., 2005）。在山东，鲁西的两个火山群不仅相互平行，而且从同位素排列看也可以互相区别开来，反映源区也存在小规模的侧向不均一性（图4）。夏威夷玄武岩的这种侧向不均一性被认为是受地幔柱中不同富集组分的相对含量控制的（Ren et al., 2009），而上升地幔柱的侧向流动为这种化学上的侧向不均一性提高了可能（Farnetani and Hofmann, 2010）。因此，鲁西双火山群的地球化学特征和所反映的地幔侧向不均一性可以用地幔柱活动来解释，同位素富集的物质可以看作是地幔柱中的重要组成。

一方面为了解释区别于洋岛玄武岩的时空分

布规律,一方面为了与该区深部结构(如中国东部地幔过渡带存在的滞留太平洋板片, Huang and Zhao, 2006)相协调,我们在鲁西双火山群的深部动力学模型上借鉴了Sleep(2002, 2006)提出的地幔柱物质沿岩石圈底部侧向流动的模式,该模型可以解释远离地幔柱中心地区的大陆岩浆活动。在这个模型中,我们把地幔柱上升的位置放在太行山之下,并由西向东流动(Zeng et al., 2011)。该模型一方面考虑到太行山地区深部地幔存在垂向低速物质,而这种特征在山东地区之下的深部地幔并不明显(Zhao et al., 2009);另一方面也与我国陆下软流圈地幔整体自西向东流动的运动规律相吻合(Liu et al., 2004)。另外,华北地区岩石圈底界形貌西厚东薄的侧向变化(Chen L et al., 2009)使由西向东流动的地幔柱物质更容易找到合适的地方发生熔融。当然,该模型还需得到进一步的检验和改进。比如胶东蓬莱火山群与鲁西双火山群的成因联系如何?这种联系是否能用该模型解释?

如果说定向分布的火山群与地幔柱活动可能存在直接的关联,那么孤立小火山与地幔柱活动之间的关系要微妙得多。与洋岛玄武岩相比,鲁西双火山群在地球化学特征上和岩浆的相对规模上都相当于洋岛中造盾阶段的玄武岩。孤立小火山具有规模小,更富集不相容元素和相对亏损的同位素组成特征,明显晚于山东地区新生代岩浆活动的峰期(以出现火山群为标志)等特征,使它们更接近洋岛或者海山的复苏期玄武岩。遗憾的是后者与地幔柱活动之间的关系一直被忽视。因为孤立小火山并不分布在火山群中,所以我们倾向于认为孤立小火山与地幔柱活动没有直接联系,其所代表的同位素上亏损的端元可能是该地区软流圈地幔中普遍存在的物质组成。

### 参考文献(References):

罗丹, 陈立辉, 曾罡. 2009. 陆内强碱性火山岩的成因: 以山东无棣大山霞石岩为例[J]. 岩石学报, 25: 311-319.  
刘若新. 1992. 中国新生代火山岩年代学与地球化学[M]. 北京: 地震出版社.  
Abouchami W, Hofmann A W, Galer S J G, et al. 2005. Lead isotopes reveal bilateral asymmetry and vertical continuity in the Hawaiian mantle plume [J]. *Nature*, 434: 851-856.  
Basu A R, Wang J W, Huang W K, et al. 1991. Major element, Rb, and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of

eastern China: implications for their origin from suboceanic-type mantle reservoirs [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 105: 149-169.  
Bizimis M, Salters V J M and Dawson J B. 2003. The brevity of carbonatite sources in the mantle; evidence from Hf isotopes [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145: 281-300.  
Chauvel C, Lewin E, Carpentier M, et al. 2008. Role of recycled oceanic basalt and sediment in generating the Hf-Nd mantle array [J]. *Nature Geoscience*, 1: 64-67.  
Chen L H, Zeng G, Jiang S Y, et al. 2009. Sources of Anfengshan basalts: Subducted lower crust in the Sulu UHP belt, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 286: 426-435.  
Chen L, Cheng C and Wei Z. 2009. Seismic evidence for significant lateral variations in lithospheric thickness beneath the central and western North China Craton [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 286: 171-183.  
Chung S L. 1999. Trace Element and Isotope Characteristics of Cenozoic Basalts around the Tanlu Fault with Implications for the Eastern Plate Boundary between North and South China [J]. *The Journal of Geology*, 107: 301-312.  
Dasgupta R and Hirschmann M M. 2010. The deep carbon cycle and melting in Earth's interior [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 298: 1-13.  
Dasgupta R, Hirschmann M M and Smith N D. 2007. Partial melting experiments of peridotite+CO<sub>2</sub> at 3 GPa and genesis of alkalic ocean island basalts [J]. *Journal of Petrology*, 48: 2093-2124.  
Fan Q C and Hooper P R. 1991. The Cenozoic basaltic rocks of eastern China: petrology and chemical composition [J]. *Journal of Petrology*, 32: 765-810.  
Farmer G L. 2003. Continental basaltic rocks [G]// *Treatise on Geochemistry*, Elsevier Pergamon, Oxford: 85-121.  
Farnetani C G and Hofmann A W. 2010. Dynamics and internal structure of the Hawaiian plume [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 295: 231-240.  
Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton [J]. *Nature*, 432: 892-897.  
Han B, Wang S and Kagami H. 1999. Trace element and Nd-Sr isotope constraints on origin of the Chifeng flood basalts, North China [J]. *Chemical Geology*, 155: 187-199.  
He H, Deng C, Pan Y, et al. 2011. New <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating results from the Shanwang Basin, eastern China: Constraints on the age of the Shanwang Formation and associated biota [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 187: 66-75.  
Herzberg C and Asimow P D. 2008. Petrology of some oceanic island basalts: PRIMELT2.XLS software for primary magma calculation [J/OL]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9. doi: 10.1029/2008gc002057.  
Hirose K. 1997. Partial melt compositions of carbonated peridotite at 3 GPa and role of CO<sub>2</sub> in alkali-basalt magma generation [J]. *Geophysical Research Letters*, 24: 2837-2840.  
Ho K S, Chen J C, Lo C H, et al. 2003. <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar dating and geochemical characteristics of late Cenozoic basaltic rocks from the Zhejiang-Fujian region, SE China: eruption ages, magma evolution and petrogenesis [J]. *Chemical Geology*, 197: 287-318.  
Hofmann A W and White W M. 1982. Mantle plumes from ancient oceanic crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 57: 421-436.  
Hofmann A W. 1997. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism [J]. *Nature*, 385: 219-229.  
Hole M J, Rogers G, Saunders A D, et al. 1991. Relation between alkalic

- volcanism and slab-window formation [J]. *Geology*, 19: 657–660.
- Hoernle K, Tilton G, Le Bas M J, et al. 2002. Geochemistry of oceanic carbonatites compared with continental carbonatites: mantle recycling of oceanic crustal carbonate [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 142: 520–542.
- Huang J L and Zhao D P. 2006. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions [J/OL]. *Journal of Geophysical Research*, 111. doi: 10.1029/2005JB004066.
- Liu C Q, Masuda A and Xie G H. 1994. Major- and trace-element compositions of Cenozoic basalts in eastern China: petrogenesis and mantle source [J]. *Chemical Geology*, 114: 19–42.
- Liu M, Cui X J and Liu F T. 2004. Cenozoic rifting and volcanism in eastern China: a mantle dynamic link to the Indo-Asian collision? [J]. *Tectonophysics* 393: 29–42.
- Liu Y S, Gao S, Kelemen P B, et al. 2008. Recycled crust controls contrasting source compositions of Mesozoic and Cenozoic basalts in the North China Craton [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 2349–2376.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 120: 223–253.
- Niu Y. 2005. Generation and evolution of basaltic magmas: some basic concepts and a new view on the origin of Mesozoic–Cenozoic Basaltic Volcanism in Eastern China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 11: 9–46.
- Peng Z C, Zartman R E, Futa K, et al. 1986. Pb-, Sr- and Nd-isotopic systematics and chemical characteristics of Cenozoic basalts, eastern China [J]. *Chemical Geology*, 59: 3–33.
- Ren Z Y, Hanyu T, Miyazaki T, et al. 2009. Geochemical differences of the Hawaiian shield lavas: implications for melting process in the heterogeneous Hawaiian plume [J]. *Journal of Petrology*, 50: 1553–1573.
- Rudnick R L and Gao S. 2003. *Composition of the Continental Crust* [G// Treatise on Geochemistry, Elsevier Pergamon, Oxford: 1–64.
- Sleep N H. 2002. Local lithospheric relief associated with fracture zones and ponded plume material [J/OL]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3. doi:10.1029/2001GC000290.
- Sleep N H. 2006. Mantle plumes from top to bottom [J]. *Earth-Science Reviews*, 77: 231–271.
- Song Y, Frey F A and Zhi X. 1990. Isotopic characteristics of Hannuoba basalts, eastern China: Implications for their petrogenesis and the composition of subcontinental mantle [J]. *Chemical Geology*, 88: 35–52.
- Tang Y J, Zhang H F and Ying J F. 2006. Asthenosphere-lithospheric mantle interaction in an extensional regime: implication from the geochemistry of Cenozoic basalts from Taihang Mountains, North China Craton [J]. *Chemical Geology*, 233: 309–327.
- Wang Y, Zhao Z F, Zheng Y F, et al. 2011. Geochemical constraints on the nature of mantle source for Cenozoic continental basalts in east-central China [J]. *Lithos*, 125: 940–955.
- White W M. 1985. The sources of ocean basalts: radiogenic isotopic evidence [J]. *Geology*, 13: 115–118.
- White W M. 2010. Oceanic Island Basalts and Mantle Plumes: The Geochemical Perspective [J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 38: 133–60.
- Willbold M and Stracke A. 2010. Formation of enriched mantle components by recycling of upper and lower continental crust [J]. *Chemical Geology*, 276: 188–197.
- Workman R K, Hart S R, Jackson M, et al. 2004. Recycled metasomatized lithosphere as the origin of the Enriched Mantle II (EM2) end-member: Evidence from the Samoan Volcanic Chain [J/OL]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5. doi: 10.1029/2003GC000623.
- Xu W L, Gao S, Yang D B, et al. 2009. Geochemistry of eclogite xenoliths in Mesozoic adakitic rocks from Xuzhou–Suzhou area in central China and their tectonic implications [J]. *Lithos*, 107: 269–280.
- Xu Y G, Ma J L, Frey F A, et al. 2005. Role of lithosphere–asthenosphere interaction in the genesis of Quaternary alkali and tholeiitic basalts from Datong, western North China Craton [J]. *Chemical Geology*, 224: 247–271.
- Xu Y G, Chung S L, Ma J L, et al. 2004. Contrasting Cenozoic lithospheric evolution and architecture in western and eastern Sino-Korean Craton: Constraints from geochemistry of basalts and mantle xenoliths [J]. *Journal of Geology*, 112 (5): 593–605.
- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath eastern China: evidence, timing and mechanism [J]. *Physics and Chemistry of the Earth (A)*, 26: 747–757.
- Zeng G, Chen L H, Xu X S, et al. 2010. Carbonated mantle sources for Cenozoic intra-plate alkaline basalts in Shandong, North China [J]. *Chemical Geology*, 273: 35–45.
- Zeng G, Chen L H, Hofmann A W, et al. 2011. Crust recycling in the sources of two parallel volcanic chains in Shandong, North China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 302: 359–368.
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: evidence from major-, trace-element and Sr–Nd–Pb isotope studies of Fangcheng basalts [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144: 241–254.
- Zhang J J, Zheng Y F and Zhao Z F. 2009. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in east-central China [J]. *Lithos*, 110: 305–326.
- Zhang M, Suddaby P, Thompson R N, et al. 1995. Potassic Volcanic-Rocks in Ne China – Geochemical Constraints on Mantle Source and Magma Genesis [J]. *Journal of Petrology*, 36: 1275–1303.
- Zhao L, Allen R M, Zheng T Y, et al. 2009. Reactivation of an Archaean craton: constraints from P- and S-wave tomography in North China [J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 36. doi:10.1029/2009GL039781.
- Zhi X C, Song Y, Frey F A, et al. 1990. Geochemistry of Hannuoba basalts, eastern China: Constraints on the origin of continental alkalic and tholeiitic basalt [J]. *Chemical Geology*, 88: 1–33.
- Zhou X H and Armstrong R L. 1982. Cenozoic volcanic rocks of eastern China-secular and geographic trends in chemistry and strontium isotopic composition [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 58: 301–329.
- Zindler A and Hart S. 1986. *Chemical Geodynamics* [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493–571.
- Zou H B, Zindler A, Xu X S, et al. 2000. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: mantle sources, regional variations, and tectonic significance [J]. *Chemical Geology*, 171: 33–47.
- Zou H B and Fan Q C. 2010a. U–Th isotopes in Hainan basalts: Implications for sub-asthenospheric origin of EM2 mantle endmember and the dynamics of melting beneath Hainan Island [J]. *Lithos* 116: 145–152.
- Zou H B, Fan Q C and Zhang H F. 2010b. Rapid development of the great Millennium eruption of Changbaishan (Tianchi) Volcano, China/North Korea: Evidence from U–Th zircon dating [J]. *Lithos*, 119: 289–296.