

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.273>



中国东部新生代玄武岩记录古太平洋俯冲带壳幔相互作用

徐 峥^{1,2,3}, 郑永飞^{1,2}

1. 中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026
2. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 安徽合肥 230026
3. 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广东广州 510640

摘要: 大陆玄武岩通常具有与洋岛玄武岩相似的地球化学成分, 其中含有显著的壳源组分. 对于洋岛玄武岩来说, 虽然其中的壳源组分归咎于深俯冲大洋板片的再循环, 但是对板片俯冲过程中的壳幔相互作用缺乏研究. 对于大陆玄武岩来说, 由于其形成与特定大洋板片在大陆边缘之下的俯冲有关, 可以用来确定古大洋板片俯冲的地壳物质再循环. 本文总结了我们对中国东部新生代玄武岩所进行的一系列地球化学研究, 结果记录了古太平洋板片俯冲析出流体对地幔楔的化学交代作用. 这些大陆玄武岩普遍具有与洋岛玄武岩类似的地球化学成分, 在微量元素组成上表现为富集 LILE 和 LREE、亏损 HREE, 但是不亏损 HFSE 的分布特点, 在放射成因同位素组成上表现为亏损至弱富集的 Sr-Nd 同位素组成. 在排除地壳混染效应之后, 这些玄武岩的地球化学特征可以由其地幔源区中壳源组分的性质来解释. 俯冲大洋地壳部分熔融产生的熔体提供了地幔源区中的壳源组分, 其中包括洋壳镁铁质火成岩、海底沉积物和大陆下地壳三种组分. 华北和华南新生代大陆玄武岩在 Pb 同位素组成上存在显著差异, 反映它们地幔源区中的壳源组分有所区别. 中国东部新生代玄武岩的地幔源区是古太平洋板片于中生代俯冲至亚欧大陆东部之下时, 在 >200 km 的俯冲带深度发生壳幔相互作用的产物. 在新生代期间, 随着俯冲太平洋板片的回卷引起的中国东部大陆岩石圈拉张和软流圈地幔上涌, 那些交代成因的地幔源区发生部分熔融, 形成了现今所见的新生代玄武岩.

关键词: 大陆玄武岩; 大洋板片; 俯冲带; 壳幔相互作用; 岩石学.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2019)12-4135-09

收稿日期: 2019-10-01

Crust-Mantle Interaction in the Paleo-Pacific Subduction Zone: Geochemical Evidence from Cenozoic Continental Basalts in Eastern China

Xu Zheng^{1,2,3}, Zheng Yongfei^{1,2}

1. CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China
2. Center of Excellence for Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China
3. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract: Continental basalts, erupted in either rift or flood mode, usually show oceanic island basalt (OIB)-like geochemical compositions, with the presence of crustal components in the mantle sources of OIB. However, it is uncertain for OIB when and how the crustal components were incorporated into the mantle sources. In comparison, the formation of continental basalts is associated with specific settings for subduction of oceanic slabs and its interaction with the mantle. In this regard, a geochemical

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos.41673028,41590620);中国科学院先导专项(No.XDB18020303);科技部“973”计划项目(No.2015CB856100).

作者简介: 徐峥(1985-),男,副研究员,从事俯冲带岩浆岩研究工作. ORCID:0000-0002-9735-8409. E-mail:xuzheng@gig.ac.cn

引用格式: 徐峥,郑永飞,2019. 中国东部新生代玄武岩记录古太平洋俯冲带壳幔相互作用. 地球科学, 44(12):4135-4143.

study of continental basalts can provide insights into the crust-mantle interaction in oceanic subduction channels. This is illustrated for the geochemistry of Cenozoic continental basalts in eastern China. These basalts are characterized by OIB-like trace element compositions and depleted to weakly enriched Sr-Nd isotope compositions. After precluding the effect of crustal contamination, the geochemical features of these basalts can be interpreted by recycling of crustal components into their mantle sources. The subducting oceanic crust is the major source of crustal components. In addition to both igneous oceanic crust and seafloor sediment, the lower continental crust of the overriding continental margin was offscraped into the mantle sources. There are a series of differences in Pb isotope compositions between the Cenozoic basalts in North and South China, suggesting a difference in the nature of crustal components between these two areas. The mantle sources of Cenozoic continental basalts were produced by the crust-mantle interaction in the oceanic subduction zone during the Mesozoic subduction of paleo-Pacific slab beneath the Euroasian continent. Hydrous melts were produced by partial melting of the subducting oceanic crust at postarc depths. They were then reacted with the overlying mantle wedge to generate metasomatic domains, whose partial melting in the Cenozoic give rise to the continental basalts.

Key words: continental basalts; oceanic slab; subduction zone; crust-mantle interaction; petrology.

0 引言

大陆玄武岩往往具有与洋岛玄武岩(OIB)类似的地球化学成分(Allègre, 1982; Farmer, 2007),在微量元素分布型式上表现为富集轻稀土元素(LREE)和大离子亲石元素(LILE)、亏损重稀土元素(HREE)、富集或者不亏损高场强元素(HFSE),在放射成因同位素组成上表现为亏损至弱富集 Sr-Nd 同位素。对这些洋岛型玄武岩所具有的地球化学特征,一般都可以归因于玄武岩地幔源区中壳源物质的加入(郑永飞等, 2018)。就这些壳源物质的来源以及加入到地幔源区中的形式和过程来说,不仅是洋岛型玄武岩成因研究中的基本问题,而且是板块构造理论体系中物质再循环过程的重要问题(Zheng, 2019)。

中国东部新生代玄武岩是典型的大陆玄武岩,具有与洋岛玄武岩类似的地球化学特征(Xu and Zheng, 2017)。前人已经对这些玄武岩进行了大量研究,提出了不同的成因模式,主要分为:(1)软流圈地幔部分熔融(Zhou and Armstrong, 1982; Zhi *et al.*, 1990)或软流圈地幔-岩石圈地幔相互作用(Xu *et al.*, 2005; Tang *et al.*, 2006);(2)地幔柱(Wang *et al.*, 2012, 2015);(3)下地壳物质加入到软流圈地幔中(Liu *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2009);(4)俯冲洋壳组分加入到亏损地幔中(Zhang *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2012a, 2012b; Xu, 2014; Huang *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2015, 2016a, 2016b, 2016c)。本文总结了我国东部新生代玄武岩的地球化学特征,力图将全岩主量和微量元素、放射成因 Sr-Nd-Pb 同位素和稳定同位素组成以及矿

物元素组成结合在一起研究玄武岩源区的地球化学性质,在此基础上讨论壳源物质再循环的过程和机理,结果对大陆玄武岩的成因提供了重要制约。

1 中国东部新生代玄武岩的地球化学性质

中国东部新生代玄武岩 SiO₂ 含量为 36%~53%。华北玄武岩大部分为碱性玄武岩,在硅碱图中分布于碧玄岩和粗面玄武岩范围内(图 1)。而华南玄武岩则大部分分布在玄武岩和粗面玄武岩范围内,一部分样品分布于碧玄岩和似长岩范围中(图 1)。虽然华北和华南玄武岩在硅碱图上的分布不尽相同,它们在其他主量元素上却无实质差异。这些玄武岩一般富 Na₂O(K₂O/Na₂O<1)。

中国东部新生代玄武岩均显示出 LREE 相对 HREE 的不同程度富集(Xu and Zheng, 2017),其(La/Yb)_N=3.1~64.2。大部分岩石的 Eu 异常不明显(Eu/Eu* = 0.84~1.52, 大部分值为 0.9~1.2)。这些玄武岩一般显示出诸如 K、Pb 之类的 LILE 亏损以及诸如 Nb、Ta 之类的 HFSE 不亏损等,与常见的洋岛玄武岩具有类似的微量元素特征。

中国东部新生代玄武岩放射成因 Sr-Nd-Pb 同位素变化范围较大(Xu and Zheng, 2017; Xu *et al.*, 2017),且表现出 Sr-Nd 同位素良好的负相关关系(图 2a)。这些岩石大部分 Sr-Nd 同位素表现出相对亏损的特征,小部分 Sr-Nd 同位素表现出相对富集的特征。相较于华南玄武岩,华北玄武岩显示出更大的 Sr-Nd 同位素变化范围。并且中国东部 Sr-Nd 同位素富集的新生代玄武岩几乎都分布在华北。

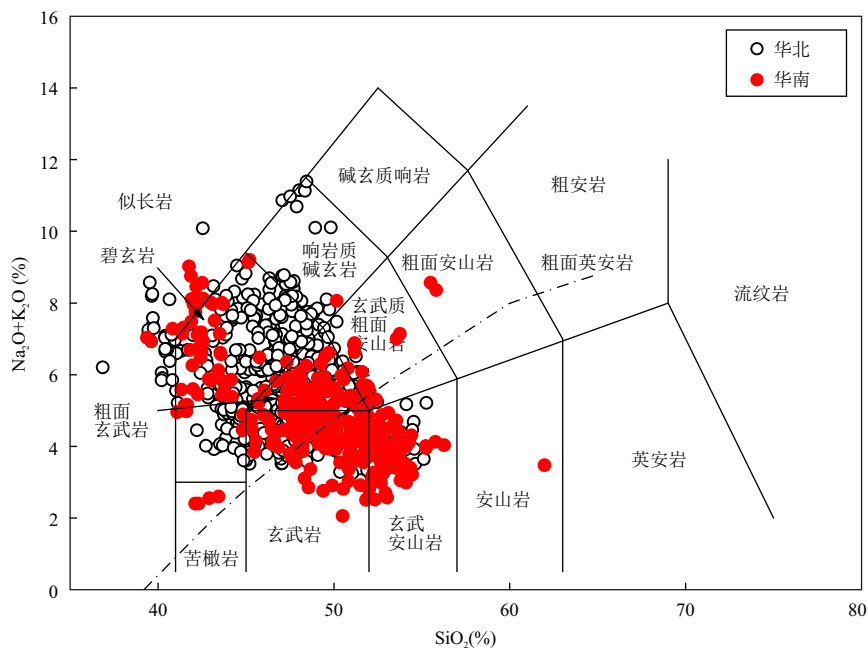


图 1 中国东部新生代玄武岩硅碱图

Fig.1 TAS diagram of Cenozoic basalts in eastern China

引自 Xu and Zheng(2017)

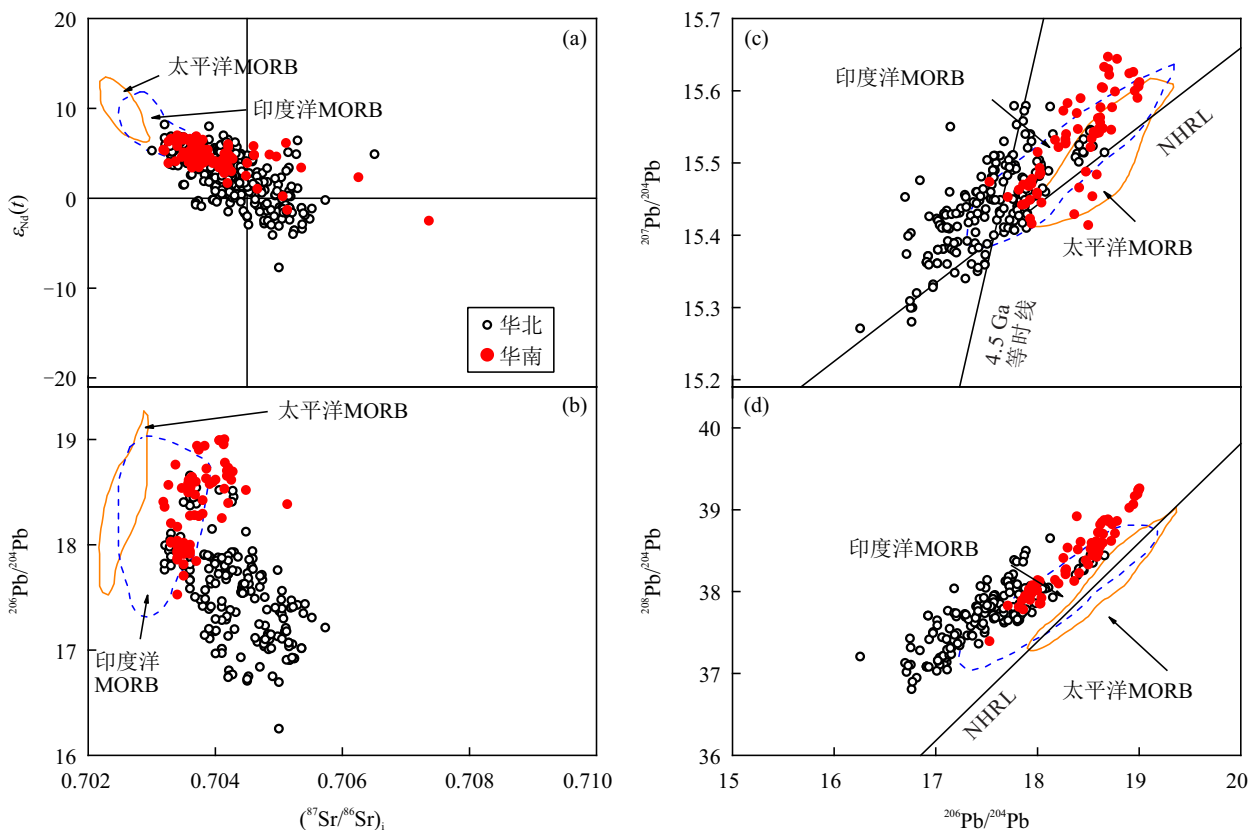


图 2 中国东部新生代玄武岩 Sr-Nd-Pb 同位素组成

Fig.2 Sr-Nd-Pb isotope compositions of Cenozoic basalts in eastern China

引自 Xu and Zheng(2017)

中国东部新生代玄武岩的 Pb 同位素变化范围也很大(Xu *et al.*, 2017).除了少数样品落在北半球参考线(NHRL)之下外,其余样品均位于 NHRL 上部,表现出 DUPAL 正异常.这些玄武岩的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 均与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 具有良好的正相关关系(图 2c, 2d).华北玄武岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 明显低于华南玄武岩,且华北玄武岩样品点与 NHRL 的距离(在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解上以参数 $\Delta 8/4$ 衡量)也高于华南玄武岩,而且 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 低的样品 $\Delta 8/4$ 值高.值得注意的是,华北玄武岩表现出 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的负相关关系,与华南玄武岩相反(图 2b).这表明华北和华南玄武岩的地幔源区组成是有区别的.

2 中国东部新生代玄武岩的源区组分

中国东部新生代玄武岩亏损至弱富集的 Sr-Nd 同位素组成说明,其地幔源区是亏损的.但其有别于正常的洋中脊玄武岩(MORB)的微量元素特征则暗示,这种地幔并不等同于作为 MORB 源区的亏损地幔,而是亏损地幔与再循环地壳组分的混合产物.

中国东部新生代玄武岩普遍具有的与 OIB 类似的微量元素特征暗示,其地幔源区中可能含有与 OIB 类似的再循环地壳组分.由于 OIB 中 LILE 亏损和 HFSE 不亏损是继承自脱水的俯冲洋壳,并且现在已知陆壳的微量元素特征有别于 OIB,因此中国东部新生代玄武岩类似于 OIB 的微量元素特征也应继承自脱水的俯冲洋壳.另一方面,俯冲洋壳岩浆岩也具有相对于亏损地幔富集的 Sr-Nd 同位素组成,因此新生代玄武岩中 Sr-Nd 同位素的负相关关系可以由亏损地幔与俯冲洋壳组分混合形成.

某些中国新生代玄武岩显示出低 Nb/La 和高 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (图 3).洋壳上层的海底沉积物可以含有古老的陆源物质,它们在 Sr-Nd 同位素组成上表现为相对富集的特点(Plank, 2014).另外,这些沉积物可以具有高 U/Pb 比值和低 Nb/La 比值(Plank, 2014),前者可导致沉积物具有高的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值.因此,如果在亏损地幔中加入俯冲陆源沉积物衍生的熔体,就可以导致交代后的地幔以及熔融产物玄武岩具有低 Nb/La 比值而高 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值的特点.因此,海底沉积物的属性对大陆玄武岩地幔源区的成分影响很大.

大陆下地壳具有相对亏损地幔较低的 U/Pb 比

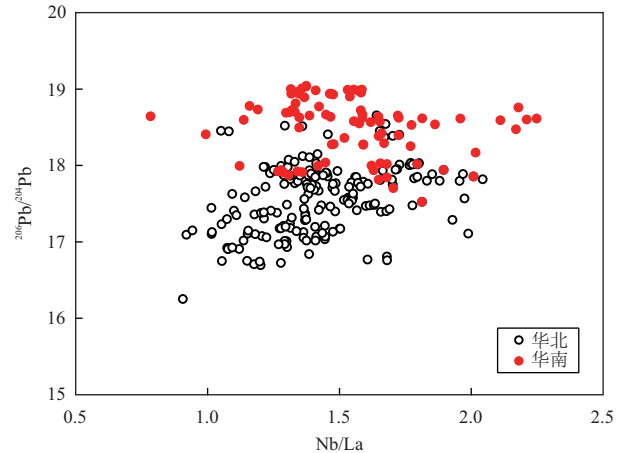


图 3 中国东部新生代玄武岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. Nb/La 图
Fig.3 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. Nb/La diagram for Cenozoic basalts in eastern China

引自 Xu *et al.*(2017)

值和较高的 Rb/Sr 比值(Rudnick and Gao, 2014),继而古老的大陆下地壳会具有较低的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值和较高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值.对于华北玄武岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 之间的负相关关系,可由大陆下地壳衍生物质加入至地幔源区所致.另一方面,大陆下地壳的 Th/U 比值较高,这可导致其具有较高的 $\Delta 8/4$ 比值 [$\Delta 8/4 = 100 \times (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - 1.209 \times ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - 15.627)$;按 Hart(1984)定义],因此大陆下地壳组分的加入可以解释华北玄武岩所显示出的 $\Delta 8/4$ 随 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 降低而增大的特征.华北玄武岩显示出明显的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 Nb/La 之间的正相关关系(图 3),这也进一步支持其地幔源区中含有大陆下地壳组分,因为这种组分具有较低的 Nb/La.另一方面,华南玄武岩显示出 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 之间的正相关关系以及 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 Nb/La 之间无明显相关关系,则说明其地幔源区中不含大陆下地壳组分.

中国东部新生代玄武岩普遍具有相较亏损地幔低的 $\delta^{26}\text{Mg}$ (Li *et al.*, 2017),一般将其解释为地幔源区中存在低 $\delta^{26}\text{Mg}$ 的壳源组分.由于高镁碳酸盐(例如白云石、菱镁矿等)都具有低于亏损地幔的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值(Huang *et al.*, 2015 和其中引用的文献),因此它们部分熔融会产生低 $\delta^{26}\text{Mg}$ 的富 Mg 熔体,这种熔体交代亏损地幔橄榄岩则会形成低 $\delta^{26}\text{Mg}$ 地幔交代岩.中国东部新生代玄武岩存在 $\delta^{26}\text{Mg}$ 与 Ca/Al 和 Zr/Hf 的相关性,则进一步支持了其地幔源区曾经被碳酸盐熔体交代过的结论.汉诺坝玄武岩中低

$\delta^{26}\text{Mg}$ (-1.51% 至 -0.10%) 辉石岩包体的发现 (Hu *et al.*, 2016), 证明其地幔源区中确实存在碳酸盐熔体交代现象, 间接支持了低 $\delta^{26}\text{Mg}$ 是来自于碳酸盐化地幔的结论. 另一方面, 碳酸盐的高 $\delta^{66}\text{Zn}$ 也可以用来解释中国东部新生代玄武岩的高 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值 (Liu *et al.*, 2016).

3 中国东部新生代玄武岩源区岩石学特征

中国东部大陆新生代玄武岩相对于正常 MORB 往往显示出较高的 Fe/Mn 比值和较低的 Fe/Zn 比值 (Xu and Zheng, 2017), 与夏威夷洋岛玄武岩相近. 另外, 这些大陆玄武岩也显示出较高的 FC3MS ($\text{FeO}/\text{CaO} - 3 \times \text{MgO}/\text{SiO}_2$) 值, 高于前人定义的 0.65 这一橄榄岩和非橄榄岩熔融产生熔体的边界值 (Yang and Zhou, 2013; Yang *et al.*, 2016). 因此, 中国东部新生代玄武岩的地幔源区可能是富辉石的地幔岩. 另一方面, 玄武岩中橄榄石斑晶与根据实验得出的从橄榄岩部分熔融熔体中结晶出的橄榄石成分并不相同, 而是介于上述橄榄石和从辉石岩部分熔融熔体中结晶出的橄榄石之间 (Xu and Zheng, 2017), 这也说明玄武岩地幔源区不是正常橄榄岩, 但也不是无橄榄石辉石岩, 而是介于两者之间的富辉石橄榄岩.

4 大洋俯冲带壳幔相互作用与大陆玄武岩成因

中国东部新生代玄武岩的地幔源区中存在有多种地壳组分, 而这些地壳组分再循环进入上地幔的途径无疑是俯冲带壳幔相互作用 (Xu and Zheng, 2017). 俯冲洋壳在弧下 (subarc) 深度经历脱水, 此时金红石等富集 HFSE 的矿物保持稳定而诸如 LILE 之类的水溶性元素会大量进入流体进而被运移至弧下地幔. 因此, 俯冲洋壳析出流体表现为富集 LILE 亏损但是亏损 HFSE. 当这种经过变质脱水的洋壳继续俯冲到弧后 (postarc) 深度时就会发生部分熔融, 此时金红石等富集 HFSE 的矿物不再稳定, 所产生的长英质熔体就会不仅相对富集 LILE 和 LREE 而且富集或者不亏损 HFSE. 被这种熔体交代的地幔岩石 (地幔交代岩) 就会继承这种微量元素特征, 在部分熔融过程中不相容元素得到进一步富集. 这是中国东部新生代玄武岩具有洋岛型微量

元素特征的根本原因. 另一方面, 俯冲洋壳中的陆源沉积物和俯冲板片层刮削大陆下地壳碎片也可以被携带至弧后深度, 在那里并发生部分熔融产生长英质熔体交代地幔. 由于亏损地幔受到不同来源地壳衍生物质的交代, 结果就造成了中国东部新生代玄武岩表现出变化的地球化学特征, 这个地壳交代作用也可能是华北和华南新生代玄武岩放射成因 Sr-Nd-Pb 同位素组成差异的根本原因.

中国东部新生代玄武岩中 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 最低样品的 Pb 同位素类似于印度洋 MORB 而不是太平洋 MORB (图 2b). 由于玄武岩的 Sr-Nd-Pb 同位素主要受控于地幔源区中的壳源组分, 因此这些玄武岩源区中的洋壳岩浆岩组分应当也具有类似于印度洋 MORB 的 Sr-Nd-Pb 同位素组成. 俯冲古太平洋板片提供了中国东部洋岛型大陆玄武岩地幔源区的壳源组分, 因此俯冲古太平洋地壳中具有类似于印度洋地壳的放射成因 Sr-Nd-Pb 同位素特征.

毫无疑问, 现代俯冲在欧亚大陆东部下面的太平洋洋壳火成岩具有与太平洋 MORB 一致的 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素组成. 然而, 这并不代表古太平洋 (Paleo-Pacific 或者 Izanagi) 板片洋壳也具有相同的同位素组成. 除了上述中国东部新生代玄武岩外, 华北中生代 (最老可至 121 Ma) 洋岛型玄武岩中 Sr-Nd 同位素最亏损样品的 Pb 同位素仍然为印度洋型, 暗示此时加入到地幔源区中的古太平洋板片成分与印度洋相似. 这表明, 在早白垩世俯冲的古太平洋板片 Sr-Nd-Pb 同位素组成可以表现出印度洋型地壳的特点. 这些具有印度洋型地壳的古太平洋板片可能形成于侏罗纪.

地震层析成像研究表明, 在欧亚大陆东部之下 410~660 km 深处的地幔过渡带中存在高速异常, 这被解释为俯冲至地幔过渡带中的滞留太平洋板片 (Huang and Zhao, 2006; Li and van der Hilst, 2010). 而位于岩石圈地幔与滞留俯冲太平洋板片之间的软流圈地幔通常被称作大地幔楔. 有人假设华北克拉通破坏与大地幔楔中发生软流圈地幔上涌有关, 有人假设板片在地幔过渡带脱水引起中国大陆东北地区新生代火山活动. 由于中国东部新生代玄武岩地幔源区中的壳源组分来自俯冲大洋板片, 也有学者将其成因归咎于滞留在地幔过渡带的俯冲太平洋板片与大地幔楔之间的相互作用. 中国东部新生代玄武岩都具有洋岛型地球化学特征, 与白垩纪洋岛型镁铁质岩浆岩之间并无本质差别 (郑永

飞等, 2018). 然而, 有研究将大地幔楔模型推广到那些白垩纪洋岛型镁铁质岩浆岩. 这个推广假设, 至少在早白垩世 (~110 Ma) 太平洋板块也已俯冲至地幔过渡带并在此滞留, 然后与大地幔楔发生相互作用形成洋岛型镁铁质岩浆岩. 然而, Goes *et al.* (2017) 的研究指示, 俯冲大洋板片在地幔过渡带的停滞时间不超过 60 Ma. Liu *et al.* (2017) 的研究也显示, 现今滞留在地幔过渡带的太平洋板片最多是在 30 Ma 左右开始俯冲的. 不过, 古太平洋板片与太平洋板块之间曾经有洋中脊存在 (Kimura *et al.*, 2019), 这个洋中脊在新生代早期迁移到亚洲大陆东缘, 在那里发生蛇绿岩的构造侵位, 对应于洋中脊—海沟转换 (Zheng and Chen, 2016). 但是, 对于 60 Ma 之前古太平洋板片的俯冲方式, 目前尚未有直接的地质学和地球物理学观察资料予以说明.

如果中生代时期古太平洋板片俯冲是造成华北克拉通减薄和破坏的根本原因 (郑永飞等, 2018), 那么古太平洋板片在侏罗纪刚开始向亚欧大陆下俯冲时可能角度较小, 也就是所谓的平俯冲 (郑永飞和吴福元, 2009), 与东太平洋 Nazca 板块向美洲大陆下俯冲 (Scire *et al.*, 2016) 的情形相似. 当板片俯冲到弧后深度时发生回卷, 俯冲角度变大, 板片表面受到软流圈地幔加热发生部分熔融, 所产生的长英质熔体交代上覆大地幔楔形成洋岛型玄武岩的地幔源区 (郑永飞等, 2018). 古太平洋板片与太平洋板块之间的洋中脊在新生代早期与亚洲大陆东缘发生碰撞 (Kimura *et al.*, 2019), 然后太平洋板块开始俯冲到亚洲大陆东缘之下, 从新生代中期开始俯冲板片逐步下沉进入地幔过渡带. 这一过程与东太平洋 Farallon 板块俯冲至北美板块之下的过程 (Schmid *et al.*, 2002) 相似. 中国东部新生代玄武岩的形成可能是对俯冲太平洋板片回卷所引起的弧后拉张的响应, 而不是现今停滞在地幔过渡带的太平洋板片与大地幔楔之间发生相互作用的产物 (郑永飞等, 2018).

中国东部新生代玄武岩普遍存在镁同位素比值低于亏损地幔值的现象 (Li *et al.*, 2017), 暗示地幔源区中很可能存在俯冲板片来源的碳酸盐熔体. 由于亏损地幔橄榄岩中的 MgO 含量很高, 因此要使其镁同位素发生显著变化, 就需要碳酸盐熔体也具有很高的 MgO 含量, 也即需要诸如白云石甚至菱镁矿之类富镁的碳酸盐矿物作为碳酸盐熔体的源区. 根据碳酸盐相变线, 板片可能不需要俯冲至过渡

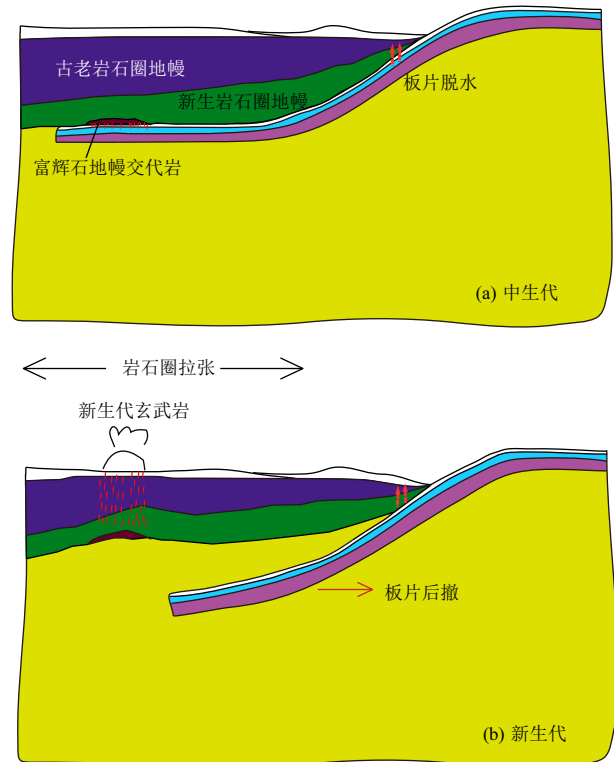


图 4 中国东部新生代玄武岩成因模式图

Fig. 4 Schematic diagrams for origin of Cenozoic basalts in eastern China

带, 其中以方解石为主的富钙碳酸盐就会相变成富镁碳酸盐. 如果俯冲板片当中的富镁碳酸盐以菱镁矿为主, 根据菱镁矿与白云石的相变线 (Sato and Katsura, 2001; Morlidge *et al.*, 2006) 估计的碳酸盐化橄榄岩地幔源区深度为 300~360 km. 如果俯冲板片当中的富镁碳酸盐以菱镁矿为主, 则上述深度为 <300 km. 另外, 在中国东部新生代玄武岩中目前尚未发现诸如高硅石榴石、瓦茨利石和林伍德石等能够指示深度的地幔包体矿物, 因此单凭玄武岩地幔源区中需要俯冲板片富镁碳酸盐产生的碳酸盐熔体的推论尚无法直接证明在玄武岩地幔源区形成时板片已经俯冲至地幔过渡带深度, 也就无法论证玄武岩地幔源区的形成与大地幔楔中的壳幔相互作用有关.

总的来说, 中国东部新生代玄武岩的形成与古太平洋俯冲带中的壳幔相互作用密切相关. 它的地幔源区是古太平洋板片在中生代俯冲过程中, 板片在 >200 km 的弧后深度发生熔融, 所产生的长英质熔体交代上覆地幔楔橄榄岩的反应产物 (图 4a). 而俯冲板片的进一步回卷可导致弧后扩张和软流圈上涌, 引起这些地幔交代岩部分熔融产生新生代玄

玄武岩(图 4b)。虽然现今在中国东部之下的地幔过渡带中存在滞留的俯冲太平洋板片,并形成大地幔楔的构造,但不等于说古太平洋板片在早白垩世就俯冲进入地幔过渡带。目前尚无足够的证据能证明,现今大地幔楔中的壳幔相互作用与中国东部新生代玄武岩的形成有密切的时空关系。

5 结论

中国东部新生代玄武岩具有类似于洋岛玄武岩的微量元素和放射成因 Sr-Nd 同位素组成。这些玄武岩的地幔源区应当是镁铁质火成岩洋壳、海底沉积物以及大陆下地壳等产生的熔体交代亏损地幔所形成的。尽管这些地壳组分主要源自俯冲的古太平洋地壳,但是交代介质是熔体而不是固体。玄武岩与印度洋 MORB 类似的 Pb 同位素组成暗示,源区中的俯冲古太平洋地壳也具有印度洋型地壳同位素特征。虽然现今的地球物理学资料指示太平洋板片已经俯冲并滞留于地幔过渡带,但其与上覆大地幔楔中的软流圈地幔之间的壳幔相互作用是否是洋岛型大陆玄武岩的成因尚无确凿的地质地球化学证据。

References

- Allègre, C.J., 1982. Chemical Geodynamics. *Tectonophysics*, 81 (3-4): 109-132. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(82\)90125-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(82)90125-1)
- Chen, L.H., Zeng, G., Jiang, S.Y., et al., 2009. Sources of Anfengshan Basalts: Subducted Lower Crust in the Sulu UHP Belt, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 286(3-4): 426-435. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.07.006>
- Farmer, G.L., 2007. Continental Basaltic Rocks. *Treatise on Geochemistry*, 3: 1-39. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03019-x>
- Goes, S., Agrusta, R., van Hunen, J., et al., 2017. Subduction-Transition Zone Interaction: A Review. *Geosphere*, 13(3): 644-664. <https://doi.org/10.1130/ges01476.1>
- Hart, S.R., 1984. A Large-Scale Isotope Anomaly in the Southern Hemisphere Mantle. *Nature*, 309: 753-757. <https://doi.org/10.1038/309753a0>
- Hu, Y., Teng, F.Z., Zhang, H.F., et al., 2016. Metasomatism-Induced Mantle Magnesium Isotopic Heterogeneity: Evidence from Pyroxenites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 185: 88-111. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.11.001>
- Huang, J., Li, S.G., Xiao, Y.L., et al., 2015. Origin of Low $\delta^{26}\text{Mg}$ Cenozoic Basalts from South China Block and Their Geodynamic Implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 164: 298-317. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.04.054>
- Huang, J.L., Zhao, D.P., 2006. High-Resolution Mantle Tomography of China and Surrounding Regions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B9): B09305. <https://doi.org/10.1029/2005jb004066>
- Kimura, G., Kitamura, Y., Yamaguchi, A., et al., 2019. Origin of the Early Cenozoic Belt Boundary Thrust and Izanagi-Pacific Ridge Subduction in the Western Pacific Margin. *Island Arc*, 28(5). <https://doi.org/10.1111/iar.12320>
- Li, C., van der Hilst, R.D., 2010. Structure of the Upper Mantle and Transition Zone beneath Southeast Asia from Traveltime Tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B7): B07308. <https://doi.org/10.1029/2009jb006882>
- Li, Y.Q., Ma, C.Q., Robinson, P.T., et al., 2015. Recycling of Oceanic Crust from a Stagnant Slab in the Mantle Transition Zone: Evidence from Cenozoic Continental Basalts in Zhejiang Province, SE China. *Lithos*, 230: 146-165. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.05.021>
- Li, Y.Q., Ma, C.Q., Robinson, P.T., 2016a. Petrology and Geochemistry of Cenozoic Intra-Plate Basalts in East-Central China: Constraints on Recycling of an Oceanic Slab in the Source Region. *Lithos*, 262: 27-43. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.06.012>
- Li, H.Y., Xu, Y.G., Ryan, J.G., et al., 2016b. Olivine and Melt Inclusion Chemical Constraints on the Source of Intracratonic Basalts from the Eastern North China Craton: Discrimination of Contributions from the Subducted Pacific Slab. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 178: 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.12.032>
- Li, H.Y., Zhou, Z., Ryan, J.G., et al., 2016c. Boron Isotopes Reveal Multiple Metasomatic Events in the Mantle beneath the Eastern North China Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 194: 77-90. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.08.027>
- Li, S.G., Yang, W., Ke, S., et al., 2017. Deep Carbon Cycles Constrained by a Large-Scale Mantle Mg Isotope Anomaly in Eastern China. *National Science Review*, 4(11): 111-120. <https://doi.org/10.1093/nsr/nww070>
- Liu, S.A., Wang, Z.Z., Li, S.G., et al., 2016. Zinc Isotope Evidence for a Large-Scale Carbonated Mantle beneath Eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 444: 169-178. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.03.051>
- Liu, X., Zhao, D.P., Li, S.Z., et al., 2017. Age of the Subduct-

- ing Pacific Slab beneath East Asia and Its Geodynamic Implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 464: 166–174. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.02.024>
- 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. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(9): 2349–2376. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.02.018>
- Morlidge, M., Pawley, A., Droop, G., 2006. Double Carbonate Breakdown Reactions at High Pressures: An Experimental Study in the System CaO-MgO-FeO-MnO-CO₂. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(3): 365–373. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0112-5>
- Plank, T., 2014. The Chemical Composition of Subducting Sediments. *Treatise on Geochemistry*, 4: 607–629. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-095975-7.00319-3>
- Rudnick, R.L., Gao, S., 2014. Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, 4: 1–51. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-095975-7.00301-6>
- Sato, K., Katsura, T., 2001. Experimental Investigation on Dolomite Dissociation into Aragonite+Magnesite up to 8.5 GPa. *Earth and Planetary Science Letters*, 184(2): 529–534. [https://doi.org/10.1016/S0012-821x\(00\)00346-0](https://doi.org/10.1016/S0012-821x(00)00346-0)
- Schmid, C., Goes, S., van der Lee, S., et al., 2002. Fate of the Cenozoic Farallon Slab from a Comparison of Kinematic Thermal Modeling with Tomographic Images. *Earth and Planetary Science Letters*, 204(1–2): 17–32. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(02\)00985-8](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(02)00985-8)
- Scire, A., Zandt, G., Beck, S., et al., 2016. Imaging the Transition from Flat to Normal Subduction: Variations in the Structure of the Nazca Slab and Upper Mantle under Southern Peru and Northwestern Bolivia. *Geophysical Journal International*, 204(1): 457–479. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv452>
- Tang, Y. J., Zhang, H. F., 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. *Chemical Geology*, 233(3–4): 309–327. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.03.013>
- Wang, X. C., Li, Z. X., Li, X. H., et al., 2012. Temperature, Pressure, and Composition of the Mantle Source Region of Late Cenozoic Basalts in Hainan Island, SE Asia: A Consequence of a Young Thermal Mantle Plume Close to Subduction Zones? *Journal of Petrology*, 53(1): 177–233. <https://doi.org/10.1093/petrology/egr061>
- Wang, X. C., Wilde, S. A., Li, Q. L., et al., 2015. Continental Flood Basalts Derived from the Hydrous Mantle Transition Zone. *Nature Communications*, 6: 7700. <https://doi.org/10.1038/ncomms8700>
- 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. *Lithos*, 125(3–4): 940–955. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.05.007>
- Xu, Y. G., 2014. Recycled Oceanic Crust in the Source of 90–40 Ma Basalts in North and Northeast China: Evidence, Provenance and Significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 143: 49–67. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.04.045>
- 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. *Chemical Geology*, 224(4): 247–271. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.08.004>
- Xu, Y. G., Zhang, H. H., Qiu, H. N., et al., 2012a. Oceanic Crust Components in Continental Basalts from Shuangliao, Northeast China: Derived from the Mantle Transition Zone? *Chemical Geology*, 328: 168–184. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.01.027>
- Xu, Z., Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., 2012b. Slab-Mantle Interaction for Thinning of Cratonic Lithospheric Mantle in North China: Geochemical Evidence from Cenozoic Continental Basalts in Central Shandong. *Lithos*, 146–147: 202–217. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.05.019>
- Xu, Z., Zheng, Y. F., 2017. Continental Basalts Record the Crust-Mantle Interaction in Oceanic Subduction Channel: A Geochemical Case Study from Eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145: 233–259. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.03.010>
- Xu, Z., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., 2017. The Origin of Cenozoic Continental Basalts in East-Central China: Constrained by Linking Pb Isotopes to other Geochemical Variables. *Lithos*, 268–271: 302–319. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.11.006>
- Yang, Z. F., Li, J., Liang, W. F., et al., 2016. On the Chemical Markers of Pyroxenite Contributions in Continental Basalts in Eastern China: Implications for Source Lithology and the Origin of Basalts. *Earth-Science Reviews*, 157: 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.04.001>
- Yang, Z. F., Zhou, J. H., 2013. Can We Identify Source Lithology of Basalt? *Scientific Reports*, 3: 1856. <https://doi.org/10.1038/srep01856>
- Zhang, J. J., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., 2009. Geochemical Evidence for Interaction between Oceanic Crust and Litho-

- spheric Mantle in the Origin of Cenozoic Continental Basalts in East-Central China. *Lithos*, 110(1-4):305-326. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.01.006>
- Zheng, Y.F., 2019. Subduction Zone Geochemistry. *Geoscience Frontiers*, 10(4): 1223-1254. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.02.003>
- Zheng, Y.F., Chen, Y.X., 2016. Continental versus Oceanic Subduction Zones. *National Science Review*, 3(4): 495-519. <https://doi.org/10.1093/nsr/nww049>
- Zheng, Y.F., Wu, F.Y., 2009. Growth and Reworking of Cratonic Lithosphere. *Chinese Science Bulletin*, 54(14) : 1945-1949(in Chinese).
- Zheng, Y.F., Xu, Z., Zhao, Z.F., et al., 2018. Mesozoic Mafic Magmatism in North China: Implications for Thinning and Destruction of Cratonic Lithosphere. *Science China: Earth Sciences*, 48(4):379-414(in Chinese).
- Zhi, X.C., Song, Y., Frey, F.A., et al., 1990. Geochemistry of Hannuoba Basalts, Eastern China: Constraints on the Origin of Continental Alkaline and Tholeiitic Basalt. *Chemical Geology*, 88(1-2): 1-33. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(90\)90101-c](https://doi.org/10.1016/0009-2541(90)90101-c)
- Zhou, X., Armstrong, R., 1982. Cenozoic Volcanic Rocks of Eastern China: Secular and Geographic Trends in Chemistry and Strontium Isotopic Composition. *Earth and Planetary Science Letters*, 58(3): 301-329. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(82\)90083-8](https://doi.org/10.1016/0012-821x(82)90083-8)

附中文参考文献

- 郑永飞, 吴福元, 2009. 克拉通岩石圈的生长和再造. *科学通报*, 54(14):1945-1949.
- 郑永飞, 徐峥, 赵子福, 等, 2018. 华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉通减薄和破坏. *中国科学:地球科学*, 48(4): 379-414.