

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.240>



# 大陆碰撞造山带镁铁质岩浆岩记录俯冲古洋壳物质再循环

戴立群,赵子福

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

**摘要:**在大陆碰撞造山带中寻找消失的古洋壳再循环及其壳幔相互作用的证据,对理解从洋壳俯冲到陆壳俯冲化地地球动力学过程的转变,以及板块构造理论的发展具有重要意义。通过对桐柏—红安造山带晚古生代和晚中生代镁铁质岩浆岩的岩石地球化学特征进行总结,可以识别出俯冲古洋壳再循环的岩石学和地球化学记录。晚古生代岛弧型镁铁质岩石具有弧型微量元素特征和相对亏损的放射成因同位素组成,记录了俯冲古洋壳在弧下深度(80~160 km)的流体交代作用;而晚中生代洋岛型镁铁质岩石OIB型微量元素特征和亏损—弱富集的放射成因同位素组成,记录了俯冲古洋壳在弧后深度(>200 km)的熔体交代作用。这一定性的解释也进一步得到了定量计算的证实,其结果表明镁铁质岩浆岩中的不相容元素的含量以及放射性成因同位素的富集程度,主要受控于地幔源区中所加入的地壳组分的性质和比例。因此,碰撞造山带中的岛弧型和洋岛型镁铁质岩浆岩,分别记录了弧下和弧后深度的俯冲古洋壳物质再循环。

**关键词:**碰撞造山带;镁铁质岩浆岩;古洋壳再循环;壳幔相互作用;岩石学。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2019)12-4128-07

收稿日期:2019-08-30

## Mafic Igneous Rocks in Continental Collision Orogen Record Recycling of Subducted Paleo-Oceanic Crust

Dai Liquan, Zhao Zifu

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

**Abstract:** It is of great significance to search for the evidence of paleo-oceanic crust recycling in collisional orogens to understand the geodynamic transition from oceanic subduction to continental subduction, and also the development of plate tectonics. This is illustrated by the petrology and geochemistry of Late Paleozoic and Late Mesozoic mafic magmatic rocks in the Tongbai-Hong'an orogens. The fluid metasomatism of subducted oceanic crust at sub-arc depth (80–160 km) was recorded by the Late Paleozoic mafic rocks, which are characterized by the arc-like trace element features and depleted radiogenic isotopes, while the melt metasomatism of subducted oceanic crust at post-arc depth (>200 km) was recorded by Late Mesozoic mafic rocks, which are characterized by the OIB-like trace element features and depleted-weakly enriched radiogenic isotopes. These qualitative interpretations are further confirmed by quantitative calculations, which indicates that the content of incompatible elements and the enrichment degree of radiogenic isotopes in mafic igneous rocks are mainly controlled by the nature and proportion of crustal components in the mantle sources. Therefore, the recycling of the subducted paleo-oceanic crust at sub-arc and post-arc depths,

**基金项目:**国家“973”计划项目(No.2015CB856102);国家自然科学基金项目(Nos.41573001,41822302)。

**作者简介:**戴立群(1986—),男,特任教授,主要从事岩石地球化学。ORCID:0000-0002-2294-2758. E-mail:lqdai@ustc.edu.cn

**引用格式:**戴立群,赵子福,2019.大陆碰撞造山带镁铁质岩浆岩记录俯冲古洋壳物质再循环.地球科学,44(12):4128—4134.

are confirmed by arc-like and OIB-like mafic igneous rocks in the collisional orogenic belt, respectively.

**Key words:** collisional orogenic belt; mafic igneous rocks; recycling of paleo-oceanic crust; crust-mantle interaction; petrology.

## 0 引言

低密度的大陆地壳俯冲通常被认为是受到了先前高密度俯冲洋壳的重力牵引(Zheng and Chen, 2016). 在大陆碰撞过程中, 从洋壳俯冲逐渐发展到陆壳俯冲, 洋壳和陆壳都有可能循环进入地幔(Zheng *et al.*, 2015). 在大陆碰撞造山带中寻找先前俯冲的古洋壳物质再循环的岩石学和地球化学证据, 对理解大陆碰撞过程中从洋壳俯冲到陆壳俯冲化学地球动力学过程的转变, 以及板块构造理论的发展具有重要意义.

在大洋俯冲过程中, 俯冲板片脱水或发生部分熔融时产生的熔流体性质主要取决于矿物的稳定性(Poli and Schmidt, 2002). 前人实验岩石学的研究结果表明: 在 900~1 600 °C 和 3~5 GPa 时, 金红石在含水熔体中的溶解度会随着温度和压力的增加而增加(Spandler *et al.*, 2007; Skora and Blundy, 2010). 因此随着俯冲深度的增加, 金红石会发生不稳定分解, 板片熔融所形成的熔体会逐渐富集高场强元素(Ringwood, 1990; Portnyagin *et al.*, 2005). 研究表明, 俯冲玄武质洋壳及其上覆沉积物在弧下深度(80~160 km)发生脱水形成的流体往往富集流体活动性元素(Ringwood, 1990; Zheng, 2012), 如大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE), 亏损流体不活动性元素, 如高场强元素(HFSE). 这些流体交代上覆地幔橄榄岩形成水化的橄榄岩, 它们发生部分熔融最终形成大洋弧和大陆弧岩浆岩(Tatsumi and Eggins, 1995; Schmidt and Poli, 2003; Zheng, 2019). 随着洋壳的进一步俯冲, 其在弧后深度(>200 km)部分熔融产生的长英质熔体具有富集LILE 和 LREE、不亏损 HFSE 的微量元素特征; 在放射成因同位素特征上, 由玄武质洋壳部分熔融形成的熔体具有相对亏损的同位素特征, 而由上覆变沉积物部分熔融所产生的长英质熔体具有相对富集的同位素特征. 这些熔体会与上覆地幔橄榄岩发生反应, 形成贫橄榄石的橄榄岩、碳酸盐化橄榄岩, 甚至不含橄榄石的辉石岩和角闪石岩(Yaxley and Green, 1998; Sobolev *et al.*, 2005; Pilet *et al.*, 2008; Dai *et al.*, 2017a). 这些熔体—橄榄岩反应所形成地幔交代体, 部分熔融可以形成一些洋岛玄武岩

(Hirschmann *et al.*, 2003; Pilet *et al.*, 2008; Herzberg, 2011) 以及大陆玄武岩(Zhang *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2012). 因此, 理解大洋俯冲过程中壳幔相互作用的性质是研究镁铁质岩浆作用的关键. 俯冲隧道中所卷入的地壳和地幔物质的性质和比例直接影响到镁铁质岩浆岩地幔源区的性质, 从而进一步影响所产生的镁铁质岩浆岩的性质(Zheng *et al.*, 2015).

本文系统总结了桐柏—红安造山带出露的晚古生代和晚中生代镁铁质火成岩的岩石地球化学特征, 认为对元素和同位素地球化学数据的综合限定, 可以很好地制约造山带镁铁质火成岩地幔源区的岩石学和地球化学性质. 此外, 我们还对造山带镁铁质岩浆的源区形成和部分熔融进行了定量地球化学模拟, 限定了俯冲古洋壳在弧下和弧后深度的再循环过程.

## 1 桐柏—红安造山带镁铁质岩浆岩及其岩石地球化学特征

秦岭—桐柏—红安—大别—苏鲁造山带, 是华南板块向华北板块在三叠纪时期俯冲碰撞所形成的, 它记录了两个陆块之间从古生代到中生代早期的整个拼合过程(Zheng *et al.*, 2003; Wu and Zheng, 2013). 位于造山带东部的大别—苏鲁造山带目前仅发现了三叠纪大陆地壳俯冲的证据, 而位于西部的秦岭—桐柏—红安造山带记录了古生代大洋地壳俯冲和弧陆碰撞, 以及中生代大陆地壳俯冲和陆陆碰撞等一系列地质过程(Wu and Zheng, 2013). 该造山带不仅出露了大量的高压—超高压变质地体, 而且在造山过程中发育强烈的岩浆活动(Dai *et al.*, 2011; Zhao *et al.*, 2013). 造山带中出露的岩浆岩, 特别是秦岭—桐柏—红安造山带中的镁铁质火成岩, 为我们理解碰撞造山带先前俯冲的古洋壳物质再循环及其壳幔相互作用的过程和机制提供了良好的研究对象.

桐柏造山带晚古生代镁铁质岩浆岩主要以岩墙或岩脉的形式出露在二郎坪群内, 锆石 U-Pb 年龄的结果为  $436 \pm 4$  Ma 至  $449 \pm 4$  Ma(Wang *et al.*, 2013; Zheng *et al.*, 2019). 这些镁铁质岩总体具有变

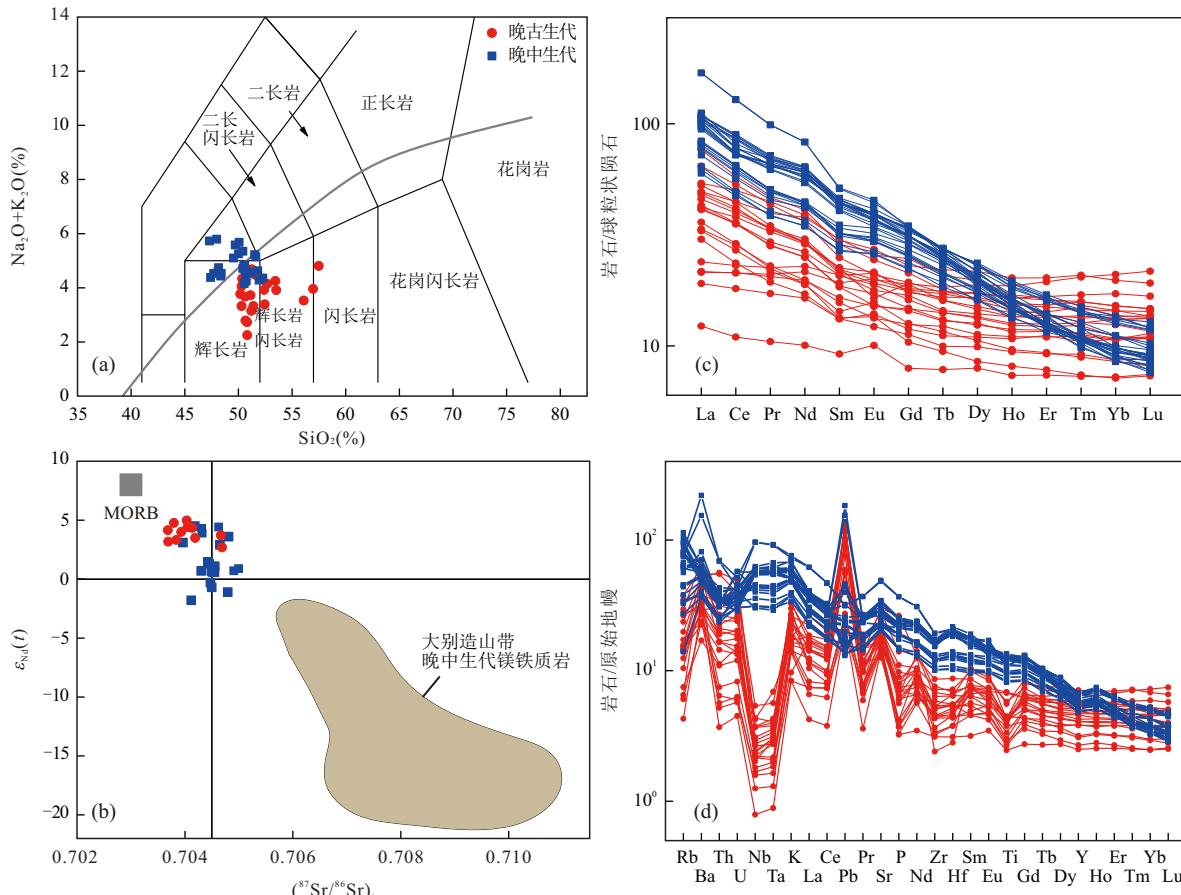


图 1 桐柏—红安造山带晚古生代和晚中生代镁铁质岩浆岩岩石地球化学和同位素组成

Fig.1 Plots of lithochemical and isotopic compositions for the Late Paleozoic and Late Mesozoic mafic rocks in the Tongbai-Hong'an orogens

数据源自 Dai et al.(2017a); Zheng et al.(2019); a. 全岩 Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>(TAS)图;b. Sr-Nd 同位素组成;c. 稀土元素球粒陨石标准化分布图;d. 微量元素原始地幔标准化蛛网图

化的 SiO<sub>2</sub> (50.2%~57.5%) , Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (14.2%~18.4%) , Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (8.1%~14.5%) 和 MgO (3.3%~8.4%, Mg<sup>#</sup>=40~65) 含量 . 在硅碱图(TAS)上, 它们主要落在辉长岩和辉长闪长岩的范围内(图 1a). 桐柏镁铁质岩表现为弧型的微量元素分布特征:富集 LREE 和 LILE(Pb、K、Ba、Pb 等), 亏损 HREE 和 HFSE(Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti); 相对亏损的全岩 Sr-Nd 同位素组成, 其(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 比值为 0.703 7 到 0.704 7, ε<sub>Nd</sub>(t) 值为 +2.7 到 +5.0(图 1b, 1c 和 1d). 此外, 桐柏镁铁质火成岩还具有变化的并且正的锆石 ε<sub>Hf</sub>(t) 值 (+8.9~+14.8) 和 δ<sup>18</sup>O 值 (4.4‰±0.3‰~5.9‰±0.3‰).

桐柏—红安造山带晚中生代镁铁质岩浆岩, 主要包括桐柏造山带的安陆玄岩以及红安造山带的新洲玄武岩和麻城辉绿岩等(Chen et al., 2010; Dai et al., 2017b). 前人的研究表明, 这些玄武岩的形成

时代在晚白垩世 (~81 Ma), 麻城镁铁质岩墙形成于早白垩世 (112~115 Ma). 桐柏—红安造山带晚中生代镁铁质岩浆岩具有相对低的 SiO<sub>2</sub> (44.4%~50.3%) 和高的 K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O (4.2%~5.9%) 含量, 其 Mg<sup>#</sup> 为 52~59. 在 TAS 图解上, 它们主要位于辉长岩的范围内(图 1a). 这些镁铁质岩具有 OIB 型微量元素分布特征:富集 LILE 和 LREE, HFSE 不亏损; 低的初始 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值 (0.704 0~0.705 0), 高的 ε<sub>Nd</sub>(t) 值 (-1.8~4.5) 和 ε<sub>Nd</sub>(t) 值 (4.7~10.3) (图 1b~1d). 它们也具有变化的锆石 ε<sub>Nd</sub>(t) 值 (-19.7~0.4) 和 δ<sup>18</sup>O 值 2.4‰~6.8‰.

总体来看, 桐柏—红安造山带晚古生代和晚中生代镁铁质岩浆岩的地球化学组成具有明显差异. 桐柏—红安晚古生代镁铁质火成岩具有出弧型微量元素分布特征(富集 LILE、LREE 和 Pb, 亏损 HFSE) 和相对亏损的放射成因同位素组成; 晚中生

代镁铁质岩浆岩具有 OIB 型微量元素分布特征(富集 LILE 和 LREE, HFSE 不亏损)、更高的 LREE/HREE 比值和亏损—弱富集的放射成因同位素组成。这些地球化学特征表明, 它们来源于地球化学性质不同的地幔源区。而且, 它们都明显不同于大别造山带碰撞后镁铁质岩: 富集 LILE 和 LREE、亏损 HFSE, 具有富集的放射性成因同位素组成(初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值为 0.705 9~0.710 0,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为 -20.6~-2.3, 表明它们的地幔源区没有受到俯冲陆壳物质的改造(Dai *et al.*, 2011, 2012; Zhao *et al.*, 2013)。

## 2 岛弧型镁铁质岩浆岩记录弧下深度俯冲古洋壳再循环

在主量元素特征上, 桐柏造山带晚古生代镁铁质火成岩具有低的  $\text{SiO}_2$  和高的  $\text{MgO}$  含量, 表明它们是地幔源区部分熔融所形成的。此外, 晚古生代镁铁质岩浆岩还显示出弧型微量元素分布特征: 富集 LILE、LREE 和 Pb, 亏损 HFSE, 这明显不同于正常软流圈地幔部分熔融所产生的洋中脊玄武岩(通常具有亏损 LILE 和 LREE 特征)。因此, 正常的软流圈地幔橄榄岩不可能是桐柏晚古生代镁铁质火成岩的地幔源区。结合这些镁铁质岩浆岩的出露位置和构造环境, 以及弧型的微量元素特征和相对亏损的放射成因同位素组成, 这些特征与典型的大洋/大陆弧岩浆岩一致, 因此它们的源区很有可能是受俯冲洋壳来源流体交代的地幔。

在洋壳俯冲过程中, 俯冲玄武质洋壳及其上覆沉积物在弧下深度(80~160 km)脱水形成的流体相对富集 LILE 和 LREE、亏损 HFSE; 俯冲沉积物部分熔融产生的含水熔体具有高的  $\text{Ba}/\text{Th}$  比值和低  $\text{Th}/\text{Nb}$  比值以及更富集放射性同位素组成。综合桐柏晚古生代镁铁质岩弧型微量元素特征, 比 MORB 略富集的 Sr-Nd 同位素, 变化的  $\text{Ba}/\text{Th}$ 、 $\text{Th}/\text{Nb}$  比值和锆石氧同位素, 指示俯冲板片来源的流体中既包含玄武质洋壳来源的富水溶液, 还包含洋壳沉积物来源的含水熔体(Zheng *et al.*, 2019)。这些镁铁质岩具有年轻的锆石 Hf 模式年龄(450~700 Ma), 表明流体交代的地幔为新生的岩石圈地幔。综合考虑桐柏晚古生代镁铁质岩浆岩所处的构造环境, 古生代时期俯冲的二郎坪洋壳在弧下深度析出的富水流体交代上覆亏损的地幔橄榄岩可以形成流体活动性元素富集、放射性成因同位素亏损的地幔源区。该

地幔发生部分熔融, 可以形成弧型的微量元素特征和亏损的放射成因同位素组成的桐柏古生代镁铁质岩。在定性理解这些镁铁质岩火成岩成因的基础上, 我们还对流体交代和部分熔融过程中的元素分异进行了模拟计算。计算结果显示(图 2a 和 2c), 需要 1%~10% 俯冲大洋地壳来源的富水溶液和 0.05%~0.10% 俯冲沉积物来源的含水熔体与上覆亏损地幔橄榄岩发生反应, 形成富集的地幔交代体, 其部分熔融能够解释晚古生代镁铁质火成岩的微量元素和放射性成因同位素组成。因此, 我们认为桐柏造山带出露的晚古生代岛弧型镁铁质火成岩记录了弧下深度俯冲古洋壳物质再循环。

## 3 洋岛型镁铁质岩浆岩记录弧后深度俯冲古洋壳再循环

明显不同于与桐柏晚古生代镁铁质岩浆岩, 桐柏—红安造山带晚中生代镁铁质岩浆岩具有类似于 OIB 的微量元素分布特征: 富集 LILE 和 LREE, 不亏损 HFSE; 更高的 LREE/HREE 比值; 亏损—弱富集的放射性成因同位素(图 1)。这些地球化学特征明显不同于正常的岛弧岩浆岩(弧形的微量元素特征和亏损的放射性成因同位素), 因此俯冲洋壳来源的流体交代上覆地幔橄榄岩不可能形成这些晚中生代岩浆岩的地幔源区。而且, 俯冲陆壳交代上覆地幔橄榄岩也不可能形成桐柏—红安晚中生代洋岛型镁铁质岩浆岩的地幔源区, 这是因为俯冲陆壳来源的熔体不仅具有富集的放射性成因同位素特征, 还具有弧型微量元素特征(Zhao *et al.*, 2013)。例如, 大别造山带碰撞后镁铁质岩富集 LILE 和 LREE、亏损 HFSE, 以及富集的放射性成因同位素特征, 表明其地幔源区中具有俯冲陆壳物质的加入(Dai *et al.*, 2011, 2012; Zhao *et al.*, 2013)。考虑到桐柏—红安造山带晚中生代洋岛型镁铁质岩浆岩属于碰撞后岩浆岩, 并位于造山带内部, 因此俯冲古洋壳来源的长英质熔体交代上覆亏损的地幔橄榄岩所形成的富集岩石圈地幔很有可能作为它们的地幔源区(Zheng, 2012; Dai *et al.*, 2017a)。

当洋壳俯冲到弧后深度(>200 km)时, 俯冲板片中的玄武质洋壳和沉积物会发生明显的部分熔融并形成地球化学性质不同的长英质熔体(Zheng, 2012)。在微量元素组成上, 这些长英质熔体通常表现为富集 LILE 和 LREE、HFSE 不亏损(主要因为玄武质洋壳在部分熔融过程中金红石发生分解, 熔

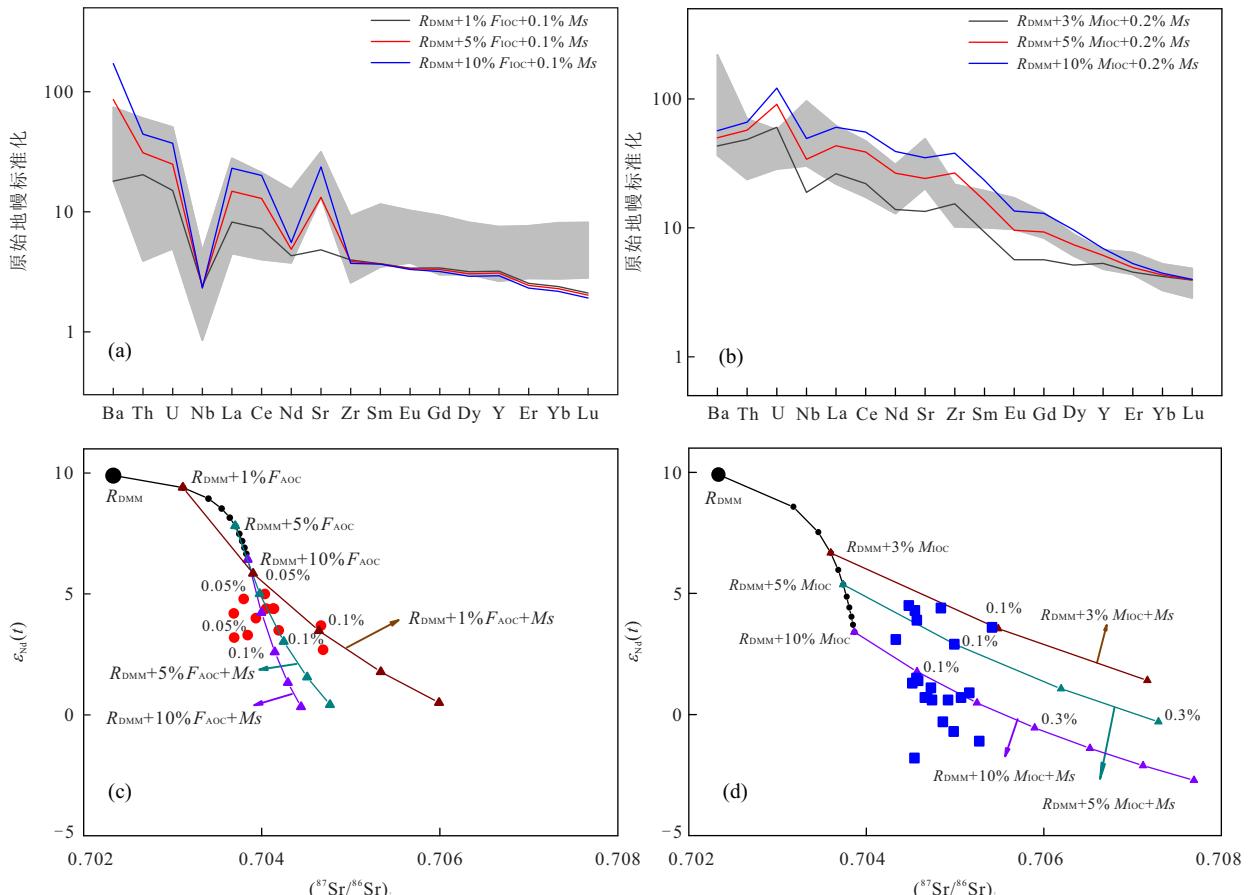


图2 桐柏—红安造山带晚古生代(a和c)和晚中生代(b和d)镁铁质岩浆岩微量元素和放射性成因Sr-Nd同位素模拟计算结果  
Fig.2 Modal calculation results of the trace elements and radiogenic Sr-Nd isotopes for Late Paleozoic(a and c) and Late Mesozoic (b and d) mafic igneous rocks in the Tongbai-Hong'an orogens

计算方法参照 Xu and Zheng(2017);数据源自 Dai *et al.*(2017b)和 Zheng *et al.*(2019). $R_{\text{DMM}}$ .亏损地幔; $F_{\text{IOC}}$ .洋壳产生的流体; $M_{\text{IOC}}$ .洋壳产生的熔体; $Ms$ .沉积物产生的熔体

体富集Nb、Ta和Ti);在放射成因同位素组成上,玄武质洋壳部分熔融形成的熔体具有相对亏损的特征,而沉积物部分熔融所产生的熔体具有相对富集的特征。这些俯冲洋壳来源的长英质熔体会与上覆地幔楔橄榄岩反应,形成贫橄榄石的橄榄岩,甚至辉石岩和角闪石岩,其部分熔融会形成同位素相对亏损的洋岛型镁铁质岩浆岩(Zheng, 2012)。桐柏—红安造山带晚中生代镁铁质岩浆OIB型的微量元素特征以及亏损—弱富集的放射性成因同位素组成,锆石变化的氧同位素特征以及年轻的全岩Hf模式年龄表明:俯冲古特提斯洋壳在弧后深度部分熔融产生的长英质熔体交代上覆亏损的地幔橄榄岩可以形成富集的地幔源区。这些受交代的地幔发生部分熔融,可以形成晚中生代镁铁质火成岩的元素和同位素地球化学特征。模拟计算结果进一步显示(图2b和2d),3%~10%俯冲古特提斯洋和0.1%~

0.25%沉积物来源的熔体与上覆亏损地幔橄榄岩反应所形成的地幔源区,部分熔融可以形成目前所观察到的桐柏—红安晚中生代镁铁质火成岩的微量元素和放射性成因同位素组成。因此,我们认为桐柏—红安晚中生代洋岛型镁铁质火成岩记录了弧后深度俯冲古洋壳再循环。

总体看来,模拟计算的结果表明镁铁质岩浆岩中的不相容元素的含量以及放射性成因同位素的富集程度,主要受控于地幔源区中所加入的俯冲地壳组分的性质和比例(图2)。相比晚古生代岛弧型镁铁质岩浆岩,晚中生代洋岛型岩浆岩具更富集LREE,这主要是因为洋壳来源的含水熔体相对富水溶液更富集水不相容性元素,如LREE。此外,晚中生代洋岛型岩浆岩还具有更富集的放射性成因同位素,这主要受控于有更多的洋壳沉积物来源熔体的贡献。

## 4 结语

通过对桐柏—红安造山带晚古生代和晚中生代镁铁质岩浆岩的系统研究,可以在大陆碰撞造山带中识别出了俯冲古洋壳再循环岩石地球化学记录。造山带中的岛弧型镁铁质岩石具有弧型微量元素分布特征(富集 LILE、LREE 和 Pb, 亏损 HFSE)和亏损的放射成因 Sr-Nd 同位素,其地幔源区是由俯冲古洋壳在弧下深度(80~160 km)析出的富水流体与上覆亏损地幔橄榄岩反应所形成。然而,造山带中的洋岛型镁铁质火成岩具有 OIB 型微量元素分布特征:富集 LILE 和 LREE, HFSE 不亏损,以及亏损—弱富集的放射成因同位素组成,其地幔源区是由俯冲古洋壳在弧后深度(>200 km)发生部分熔融所形成的长英质熔体与上覆亏损地幔所反应形成。这一定性的解释也进一步得到了定量计算的证实。因此,碰撞造山带中的岛弧型和洋岛型镁铁质岩浆岩,分别记录了弧下和弧后深度的俯冲古洋壳物质再循环。但是,对造山带镁铁质岩浆岩地幔源区的熔融机制、温压条件和初始岩浆成分等问题还不是很清楚,有待在以后的工作中继续深化。

致谢:感谢郑永飞院士在成文过程中的指导和帮助;衷心感谢两位匿名审稿专家提出的宝贵建议!

## References

- Chen, L., Ma, C.Q., Zhang, J.Y., et al., 2010. Mafic Dykes Derived from Early Cretaceous Depleted Mantle beneath the Dabie Orogenic Belt: Implications for Changling Lithosphere Mantle beneath Eastern China. *Geological Journal*, 46(4):333—343. <https://doi.org/10.1002/gj.1273>
- Dai, L.Q., Zhao, Z.F., Zheng, Y.F., et al., 2011. Zircon Hf-O Isotope Evidence for Crust-Mantle Interaction during Continental Deep Subduction. *Earth and Planetary Science Letters*, 308(1–2): 229—244. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.06.001>
- Dai, L.Q., Zhao, Z.F., Zheng, Y.F., et al., 2012. The Nature of Orogenic Lithospheric Mantle: Geochemical Constraints from Postcollisional Mafic-Ultramafic Rocks in the Dabie Orogen. *Chemical Geology*, 334:99—121. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.10.009>
- Dai, L.Q., Zhao, Z.F., Zheng, Y.F., et al., 2017a. Geochemical Distinction between Carbonate and Silicate Metasomatism in Generating the Mantle Sources of Alkali Basalts. *Journal of Petrology*, 58(5): 863—884. <https://doi.org/10.1093/petrology/egx038>
- Dai, L. Q., Zheng, F., Zhao, Z. F., et al., 2017b. Recycling of Paleotethyan Oceanic Crust: Geochemical Record from Postcollisional Mafic Igneous Rocks in the Tongbai-Hong'an Orogens. *Geological Society of America Bulletin*, 129(1–2):179—192.
- Herzberg, C., 2011. Identification of Source Lithology in the Hawaiian and Canary Islands: Implications for Origins. *Journal of Petrology*, 52(1):113—146. <https://doi.org/10.1093/petrology/egq075>
- Hirschmann, M.M., Kogiso, T., Baker, M.B., et al., 2003. Alkaline Magmas Generated by Partial Melting of Garnet Pyroxenite. *Geology*, 31(6):481.
- Pilet, S., Baker, M. B., Stolper, E. M., 2008. Metasomatized Lithosphere and the Origin of Alkaline Lavas. *Science*, 320(5878): 916—919. <https://doi.org/10.1126/science.1156563>
- Poli, S., Schmidt, M.W., 2002. Petrology of Subducted Slabs. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 30: 207—235. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.30.091201.140550>
- Portnyagin, M., Hoernle, K., Avdeiko, G., et al., 2005. Transition from Arc to Oceanic Magmatism at the Kamchatka-Aleutian Junction. *Geology*, 33(1): 25. <https://doi.org/10.1130/g20853.1>
- Ringwood, A.E., 1990. Slab-Mantle Interactions: 3. Petrogenesis of Intraplate Magmas and Structure of the Upper Mantle. *Chemical Geology*, 82(3–4): 187—207. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(90\)90081-H](https://doi.org/10.1016/0009-2541(90)90081-H)
- Schmidt, M. W., Poli, S., 2003. Generation of Mobile Components during Subduction of Oceanic Crust. *Treatise on Geochemistry*, 3:567—591.
- Skora, S., Blundy, J., 2010. High-Pressure Hydrous Phase Relations of Radiolarian Clay and Implications for the Involvement of Subducted Sediment in Arc Magmatism. *Journal of Petrology*, 51(11): 2211—2243. <https://doi.org/10.1093/petrology/egq054>
- Sobolev, A. V., Hofmann, A. W., Sobolev, S. V., et al., 2005. An Olivine-Free Mantle Source of Hawaiian Shield Basalts. *Nature*, 434:590—597. <https://doi.org/10.1038/nature03411>
- Spandler, C., Yaxley, G., Green, D.H., et al., 2007. Phase Relations and Melting of Anhydrous K-Bearing Eclogite from 1 200 to 1 600 °C and 3 to 5 GPa. *Journal of Petrology*, 49(4): 771—795. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm039>
- Tatsumi, Y., Eggins, S., 1995. Subduction Zone Magmatism. Blackwell Science, Oxford, 211.

- Wang, H., Wu, Y.B., Qin, Z.W., et al., 2013. Age and Geochemistry of Silurian Gabbroic Rocks in the Tongbai Orogen, Central China: Implications for the Geodynamic Evolution of the North Qinling Arc-Back-Arc System. *Lithos*, 179: 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.07.021>
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., 2013. Tectonic Evolution of a Composite Collision Orogen: An Overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu Orogenic Belt in Central China. *Gondwana Research*, 23(4): 1402–1428. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.09.007>
- Xu, Z., Zhao, Z.F., Zheng, Y.F., 2012. 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>
- Yaxley, G.M., Green, D.H., 1998. Reactions between Eclogite and Peridotite: Mantle Refertilisation by Subduction of Oceanic Crust. *Schweizerische Mineralogische et Petrologische Mitteilung*, 78(2): 243–255.
- Zhang, J.J., Zheng, Y.F., 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. *Lithos*, 110(1–4): 305–326. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.01.006>
- Zhao, Z.F., Dai, L.Q., Zheng, Y.F., 2013. Postcollisional Mafic Igneous Rocks Record Crust-Mantle Interaction during Continental Deep Subduction. *Scientific Reports*, 3 (3413). <https://doi.org/10.1038/srep03413>
- Zheng, F., Dai, L.Q., Zhao, Z.F., et al., 2019. Recycling of Paleo-Oceanic Crust: Geochemical Evidence from Early Paleozoic Mafic Igneous Rocks in the Tongbai Orogen, Central China. *Lithos*, 328–329: 312–327. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.01.010>
- Zheng, Y.F., 2012. Metamorphic Chemical Geodynamics in Continental Subduction Zones. *Chemical Geology*, 328: 5–48. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.02.005>
- 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., Chen, Y.X., Dai, L.Q., et al., 2015. Developing Plate Tectonics Theory from Oceanic Subduction Zones to Collisional Orogens. *Science China: Earth Sciences*, 58 (7): 1045–1069. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5097-3>
- Zheng, Y.F., Fu, B., Gong, B., et al., 2003. Stable Isotope Geochemistry of Ultrahigh Pressure Metamorphic Rocks from the Dabie-Sulu Orogen in China: Implications for Geodynamics and Fluid Regime. *Earth-Science Reviews*, 62(1–2): 105–161. [https://doi.org/10.1016/s0012-8252\(02\)00133-2](https://doi.org/10.1016/s0012-8252(02)00133-2)