综 述

碰撞后镁铁质岩浆作用: 大陆造山带岩石圈地幔演化的物质记录

许文良^{1*}, 赵子福^{2,3}, 戴立群^{2,3}

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061;

2. 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, 合肥 230026;

3. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

* 通讯作者, E-mail: xuwl@jlu.edu.cn

收稿日期: 2019-11-07; 收修改稿日期: 2020-03-18; 接受日期: 2020-04-08; 网络版发表日期: 2020-05-14

国家重点研发计划重点专项项目(编号: 2016YFC0600103)和国家自然科学基金项目(批准号: 91858211、41822302)资助

摘要 为了更好地了解汇聚板块边缘碰撞后镁铁质岩浆作用在揭示地球演化历史中的作用, 文章系统总结了碰撞后岩浆作用的研究历史、碰撞类型及其对造山带地幔属性的影响、碰撞后岩浆作用的概念与内涵, 以及碰撞后镁铁质岩浆作用与造山带地幔演化和成矿作用的关系。碰撞后镁铁质岩浆岩不仅是研究和揭示造山带地幔属性与演化的直接物质记录, 而且是区域成矿作用的重要载体。然而, 对碰撞造山过程中改造上覆岩石圈地幔的地壳物质种类、贡献量及其改造过程与机制、碰撞后镁铁质岩浆成矿作用的主要控制因素与机制等都是未来本领域研究的主要内容和方向。碰撞后镁铁质岩浆作用研究对丰富板块构造理论具有重要理论意义。

关键词 造山带, 碰撞类型, 碰撞后镁铁质岩浆作用, 造山带地幔演化, 成矿作用

1 引言

汇聚板块边缘碰撞后地球动力学背景或碰撞后岩浆作用作为地球演化历史中的一个特殊的构造阶段, 并没有完全纳入到经典的板块构造体系中, 即使在地幔柱理论中也很少提及(Liègeois, 1998)。然而, 在这一特殊地球演化过程中却往往形成强烈的岩浆作用, 同时伴随着成矿作用的发生。碰撞后岩浆作用的定义与内涵如何? 目前的认识还存在争论。碰撞后火成岩对我们了解地球深部作用过程(尤其是造山带地幔演化历史)有哪些指示意义? 它们在发展板块构造理论研究

中何有意义? 这些问题仍是目前碰撞后岩浆作用研究的主题。

2 碰撞后岩浆作用的研究历史

根据对汇聚板块边缘碰撞后岩浆作用研究内容的不同, 同时结合全球构造研究的进展以及分析测试技术的进步, 初步对碰撞后岩浆作用的研究历史划分成以下几个阶段。

(i) 20世纪80年代中期以前: 可以称为实验岩石学与岩石成因研究阶段。该阶段对碰撞后岩浆作用的

中文引用格式: 许文良, 赵子福, 戴立群. 2020. 碰撞后镁铁质岩浆作用: 大陆造山带岩石圈地幔演化的物质记录. 中国科学: 地球科学, 50(12): 1906–1918, doi: 10.1360/SSTe-2019-0267

英文引用格式: Xu W, Zhao Z, Dai L. 2020. Post-collisional mafic magmatism: Record of lithospheric mantle evolution in continental orogenic belt. Science China Earth Sciences, 63(12): 2029–2041, <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9611-9>

研究主要集中在碱性岩和A型花岗岩的岩石成因方面, 通过高温高压实验岩石学的研究来阐明碱性岩浆的形成条件、岩浆源区不均一性对碱性岩浆产生的影响(Wendlandt和Eggler, 1980a, 1980b; Yoder, 1986; Clemens等, 1986).

(ii) 20世纪80年代中期至20世纪90年代末: 可以称为岩石地球化学与岩石成因研究阶段. 该阶段主要是全岩地球化学, 尤其是Sr-Nd-Pb多元同位素体系在钾质-超钾质火成岩成因研究中的应用(Nelson等, 1986), 使人们在讨论钾质-超钾质岩浆作用的年代、地球化学特征、分类和成因的同时, 也将地幔源区的性质以及与造山带演化过程的关系作为重要的研究内容之一(Hawkesworth等, 1985; Bonin等, 1987; Liègeois和Black, 1987; Foley等, 1987; Thompson等, 1990).

(iii) 20世纪90年代末至21世纪初: 可以称为多元同位素体系应用与碰撞后火成岩成因及源区性质研究阶段. 自从20世纪80年代后期多元同位素体系(主要是全岩Sr-Nd-Pb体系)在碰撞后火成岩成因研究中的应用, 使人们在讨论碰撞后火成岩成因时更注重对岩浆源区性质的讨论, 比如地幔和地壳物质对碰撞后岩浆的贡献与作用(Bonin, 1996; Lustrino等, 2000).

(iv) 21世纪初至现在: 矿物原位微区成分和同位素及非传统同位素分析测试技术的应用与地幔源区性质、动力学及壳幔相互作用过程研究阶段. 随着分析测试技术的进步, 矿物原位微区分析和Os-Hf-O同位素体系和非传统同位素体系在碰撞后火成岩成因研究中的应用, 使人们不仅仅讨论岩石成因与构造背景, 更多的是关注岩浆源区的地幔动力学(Liu和Fei, 2006; Prelević等, 2012; Wang等, 2014; Kubínová等, 2017)、岩浆源区发生的壳幔相互作用过程与机制(Dai等, 2011, 2012, 2015a, 2016a; Dai F Q等, 2016; Zhao等, 2011, 2013; 赵子福等, 2015; Huang等, 2015)、地幔源区岩石学性质(Sobolev等, 2005; Herzberg, 2011; Dai等, 2014, 2017a, 2018; Dai等, 2019)以及不同性质壳源物质的贡献对岩浆属性的制约(Gao等, 2008; Liu等, 2008; Ammannati等, 2016; Dai等, 2015b, 2016b, 2017b; Dai等, 2019; 赵子福等, 2015).

从上述研究历史不难看出, 自从20世纪80年代以来, 碰撞后岩浆作用的研究经历了从实验岩石学与岩石成因、岩石化学和地球化学到岩浆源区性质和演化再到成为岩石构造探针来示踪岩石圈深部作用过程的

研究历史. 这也体现了碰撞后岩浆作用未来的研究方向.

3 碰撞类型及其对碰撞后地幔属性的影响

碰撞后岩浆作用是相对碰撞而言的, 也是发生在汇聚板块边缘. 在地球演化过程中或在板块构造理论框架下, 要想知道碰撞后地球动力学背景, 首先应该了解碰撞类型以及不同碰撞类型对地幔物质组成的贡献或影响.

根据俯冲板片性质的不同, 在板块汇聚过程中产生了不同的碰撞类型. 这主要包括下面两类.

3.1 与洋-洋和洋-陆俯冲过程相对应的“弧-陆”碰撞

在洋-洋俯冲过程中, 往往形成岛弧, 现在的Izu-Bonin-Mariana(IBM)弧就是一个典型实例, 它是太平洋板块俯冲于菲律宾板块之下的产物(Stern等, 2004; Reagan等, 2010). 随着菲律宾板块在欧亚大陆下俯冲作用的发生与继续, 未来必将发生IBM弧与欧亚大陆的碰撞. 已有的地质研究表明, 发生洋-陆俯冲和弧-陆碰撞的造山带有很多, 中亚造山带和冈底斯造山带西缘就是典型实例. 前者是古生代期间古亚洲洋演化的结果, 多数是岛弧地体与微陆块之间的碰撞拼合(Xiao等, 2003, 2015; Song等, 2015), 如多宝山岛弧与兴安地块于早石炭世晚期的碰撞拼合(Li等, 2014). 后者是中生代开始的新特提斯岛弧形成和向拉萨地体的多阶段俯冲汇聚, 致使Kohistan岛弧地体碰撞拼合在亚洲大陆南缘(Aitchison等, 2000; Jagoutz, 2014; Xu等, 2019).

在弧-陆碰撞过程中表现的主要地质过程包括地壳的横向增生和与碰撞相关的岩浆作用和变质作用(图1). 如弧-陆碰撞过程的发生, 已经使中亚造山带成为全球最大的增生型造山带(Windley等, 2007; Xiao等, 2003, 2015), 同时产生了同碰撞岩浆作用(如兴安地块东缘的早石炭世晚期含石榴子石二长花岗岩的形成; Li等, 2014)和高压变质作用(如嫩江地区早石炭世蓝片岩的形成; 黑龙江省地质矿产局, 1993). 在弧-陆碰撞过程中, 由于是年轻的洋壳物质和新增生陆壳物质与古老陆壳物质的汇聚过程, 其深部作用过程往往表现为年轻与古老陆壳的再造和富集型岩石圈地幔的形成

图1 弧-陆碰撞增生型造山带

修改自Zheng(2012)

(Zhu等, 2011; Wu和Zheng, 2013).

3.2 与“陆-弧-陆”和“陆-陆”俯冲过程相对应的“陆-陆”碰撞

在洋-陆俯冲过程中, 随着大洋板片的消失、弧-陆碰撞的发生和洋盆的相继消失, 在大洋板片的拖曳下进而可以发生陆-弧-陆和/或陆-陆的俯冲与碰撞, 从而形成了陆-弧-陆碰撞造山带(图2)和陆-陆碰撞造山带(图3)(Yin和Harrison, 2000; Zheng等, 2013; Song等, 2014; 宋述光等, 2015; Xu等, 2019).

在陆-弧-陆碰撞造山带(图2), 主要地质过程包括弧-陆碰撞过程中引起的地壳侧向增生和在后续陆壳俯冲碰撞过程中发生的高压-超高压变质作用. 典型实例如青藏高原南部中生代早期开始的新特提斯大洋板片北向俯冲形成的弧-陆碰撞带(冈底斯带)和相继出现的印度与亚洲大陆的陆-弧-陆碰撞造山带(Yin和Harrison, 2000; Xu等, 2019). 在陆-弧-陆碰撞过程中, 其深部作用过程主要表现为年轻与古老陆壳物质的再造和富集型岩石圈地幔的形成(Zhao等, 2013; Chung等, 2005), 青藏高原南部中生代壳源火成岩锆石Hf同位素成分的空间变异很好地反映了新生陆壳和古老陆壳物质再造过程的发生(Zhu等, 2011), 而幔源岩浆高度富集不相容元素的地球化学属性则揭示了早期地壳俯冲事件对富集型地幔形成的贡献(Chung等, 2005; Zhao等, 2009; Zheng, 2012).

在陆-陆碰撞造山带(图3), 表现的主要地质过程包括陆-陆俯冲碰撞过程中发生的高压-超高压变质作用以及古老地壳物质的再造和再循环. 典型实例是秦岭-桐柏-红安-大别-苏鲁造山带(Xu等, 1992; 郑永飞,

2008; Liou等, 2009; Zheng等, 2003, 2019a; Wu和Zheng, 2013). 在陆-陆俯冲碰撞过程中, 其深部作用主要表现为古老地壳物质的再造和富集型岩石圈地幔的形成. 在华南与华北陆块俯冲碰撞过程中不仅形成了大别-苏鲁超高压变质带, 同时这些超高压变质岩在其碰撞和折返过程中还发生了部分熔融(Zheng等, 2011), 超高压变质岩中长英质脉体和同折返花岗岩的形成就是最好的例证(Chen等, 2017; Zhao等, 2012, 2017a), 这很好地反映了俯冲陆壳物质再造过程的存在. 胶东-辽南晚三叠世和鲁西地区早白垩世幔源镁铁质岩浆岩的岛弧型微量元素和富集的Sr-Nd同位素组成均很好地揭示了俯冲陆壳物质对上覆岩石圈地幔的改造以及富集型地幔的形成(Yang等, 2005, 2007; Gao等, 2008; Yang D B等, 2012; Yang Q L等, 2012a, 2012b; Zhang等, 2012; Zhao等, 2012; Xu等, 2013a; Dai等, 2019). 此外, 碰撞造山带内部和仰冲陆块边缘出露的部分幔源镁铁质岩浆岩也记录了先前俯冲古洋壳物质对上覆地幔楔的改造(Li等, 2016, 2018). 辽东半岛南端早-中三叠世和秦岭-桐柏-红安造山带早白垩世-新生代镁铁质岩浆岩具有洋岛型微量元素和亏损-弱富集的Sr-Nd-Hf同位素组成, 揭示了牵引华南陆壳俯冲的古特提斯洋壳物质对上覆地幔楔的改造(Dai等, 2015b, 2017b, 2018; 赵子福等, 2015; Fang等, 2020).

4 碰撞后镁铁质岩浆作用的内涵、主要特征与时间界定

4.1 “碰撞后岩浆作用”的定义与内涵

所谓“碰撞后地球动力学背景”和“碰撞后岩浆作

图 2 陆-弧-陆碰撞型造山带

修改自Zheng(2012)

图 3 陆-陆碰撞型造山带

修改自Zheng(2012)

用”是相对碰撞而言的。因此，确定碰撞造山作用的时限是其前提。确定碰撞造山作用时限的基本原则是：运用碰撞造山作用发生前-后产生的地质记录来限定碰撞造山作用的时间范围。如可以通过运用大洋岩石圈消减过程中的沉积作用、岩浆作用和变质作用来限定碰撞造山时间的下限，运用同碰撞造山时期的岩浆作用和变质作用以及磨拉石沉积作用作为碰撞造山时间的上限(Liègeois, 1998; Zheng和Wu, 2018)。就碰撞后岩浆作用的时间而言，碰撞后比碰撞要年轻。进一步，碰撞后岩浆作用发生的大地构造背景不同于碰撞造山作用，但是碰撞后岩浆岩在结构和成分上出现隶属碰撞造山带特点的继承性(Zheng等, 2013, 2019a)。

一般认为“碰撞”是两个或多个陆块之间的碰撞，以主要的逆冲断层和高压-超高压变质作用的发生为标志。而“碰撞后”，往往是指汇聚板块边缘演化为陆内环境之后的时期——即主要洋盆已经关闭，但仍然存在沿巨型缝合带发生的再活化，在本质上与板内构造

环境没有区别。碰撞后背景是一个复合构造阶段，它可以包含多个地质事件，如沿剪切带发生的大水平运动、造山带去根和垮塌、小洋盆的产生，一般来说与大陆裂断有关(Zheng和Chen, 2017)。这些事件共同的特征是连续的或周期性伸展机制的存在，在这种背景中产生的各种类型岩浆作用统称为“碰撞后岩浆作用”(Liègeois, 1998; Bonin, 2004; Zheng和Chen, 2017; Zheng等, 2019b)。

4.2 “碰撞后岩浆作用”术语的使用及其内涵

在文献中有“晚碰撞岩浆作用”和“碰撞后岩浆作用”两种表述方式。前者指的是在碰撞造山作用的晚期阶段产生的岩浆作用，如胶东地区和辽南地区发育的晚三叠世同折返碱性岩浆作用(Yang等, 2005, 2007; Zhao等, 2012, 2017a)。后者是指碰撞造山之后发生的岩浆作用，在时间上与该期碰撞事件无关，在地球动力学体制上也独立于碰撞造山，但是其岩浆源区受到该

期碰撞事件影响, 如大别-苏鲁造山带及其相邻地区发生的早白垩世岩浆作用(Yang等, 2004; Yang D B等, 2012; 赵子福和郑永飞, 2009; Zhao等, 2017b). 就青藏高原南部新生代早期钾质-超钾质岩浆岩来说, 其侵位年龄跨度为48~8Ma(Chung等, 2005; Zhao等, 2009), 与印度-亚洲大陆碰撞造山时限(55 ± 10)Ma(Zhu等, 2011; Hu等, 2016; Zheng和Wu, 2018)相比, 绝大多数属于碰撞后岩浆作用产物. 虽然最早期(年龄在48~44Ma)可划为晚碰撞岩浆作用产物, 但是总体上这些钾质-超钾质岩浆岩都是拉张构造作用的产物, 因此记录了大陆碰撞晚期开始的造山带岩石圈拉张作用. 为了避免术语使用的混乱, 我们赞同Liègeois(1998)的建议, 将碰撞后与晚碰撞岩浆作用区分开来.

最近, Zheng等(2019b)将汇聚板块边缘造山带的形成和演化分成三个阶段(图4): 与大洋板块俯冲相关的增生造山阶段, 与大陆块体拼合碰撞有关的碰撞造山阶段, 以及发育在已经汇聚的板块边缘、表现出沿先前挤压造山带岩石圈发生大规模再活化的裂断造山阶段, 即碰撞后阶段. Liègeois(1998)曾将造山后和非造山划为板内阶段的范畴, 的确在两个大陆碰撞之后, 汇聚板块边缘已经处于陆内环境. 因此, 在使用碰撞后岩浆作用一词时, 碰撞后与造山后还是有差异的, 前者表明是大陆碰撞之后发生的、但与碰撞造山作用具有继承性的岩浆作用, 而后者可以是增生造山之后或者碰撞造山之后的岩浆作用. 就碰撞后岩浆作用而言, 它们常常是古缝合带在裂断造山作用的产物(Zheng和Chen, 2017; Zheng和Zhao, 2017), 因此只能是挤压造山作用之后的岩浆作用.

4.3 “碰撞后岩浆作用”的主要特征及其与“板内岩浆作用”的界定

碰撞后岩浆作用通常具有以下特征(Liègeois, 1998; Bonin, 2004; 赵子福和郑永飞, 2009; 宋述光等, 2015): (1) 碰撞后岩浆作用主要是钾质的, 尤其是高钾钙碱性以及次要的粗玄质岩石, 强过铝质和碱性-过碱性花岗质岩石也许体积大、但数量少. 基性-超基性岩相对花岗岩出露较少, 可以包括辉石岩、辉长岩、玄武岩和基性岩墙; (2) 碰撞后岩浆作用通常与沿着主要剪切带的大型水平运动有关; (3) 碰撞后岩浆作用的源区形成于俯冲和碰撞过程, 不管它位于地壳还是岩石圈/软流圈地幔. 此外, 这个源区可以含有大量的

图4 造山过程和非造山的时间界定
修改自Zheng等(2019b)

年轻组分, 这个年轻组分既可以是地幔也可以是新形成的陆壳(Liègeois, 1998; Bonin, 2004), 岩浆源区的性质主要与碰撞类型有关. 确定岩浆源区组分是困难的, 因为年轻的镁铁质下地壳与岩石圈地幔在地球化学和同位素组成上是类似的. 目前, 普遍认为碰撞后火成岩的地球化学反映的是岩浆源区的物质组成, 基本上没有多少人赞同碰撞后火成岩的地球化学能够揭示构造背景这一想法(Liègeois, 1998).

在碰撞造山带之外的大陆地区发育有板内岩浆作用, 例如中国东部新生代大陆玄武岩. 前人在定义碰撞后岩浆岩和板内岩浆岩时, 也为两者提出了鉴别标志. 例如, 根据Liègeois(1998)的概括: (1) 碰撞后阶段发生的各种岩浆作用——碰撞后岩浆作用通常以二氧化硅过饱和的钙碱性岩浆作用结束, 而板内阶段多以二氧化硅不饱和的碱性岩浆作用为主; (2) 碰撞后岩浆作用多数与沿主要剪切带发生的大型水平运动有关, 而板内阶段大型水平运动已经结束, 这预示着宁静板内期的到来; (3) 进入到板内阶段, 整个地区作为一个整体, 构成了单一的板块, 这一转变过程也标志着造山作用的结束. 根据现代岩浆岩岩石学研究进展, 可以将他的概括重新解读如下: (1) 碰撞后岩浆作用以高程度部分熔融为特征, 是引起二氧化硅过饱和的钙碱性岩浆作用; 而板内岩浆作用以低程度部分熔融为特征, 是引起二氧化硅不饱和的碱性岩浆作用; (2) 碰撞后岩浆作用多数出现在尚未稳定的碰撞造山带, 而板内岩

浆作用发生在已经稳定的大陆内部; (3) 进入稳定化阶段的大陆块体, 整个地区在岩石大地构造上形成一个整体(但未必构成单一的板块), 但是这一构造转变过程并不标志着裂断造山作用的结束。

从两个大陆聚合开始, 汇聚板块边缘已经成为板内环境。过去采用碰撞后阶段到板内阶段来标志一个造山旋回的结束, 实际上说的是Wilson旋回的结束。一个造山旋回就是三大造山作用(增生、碰撞或者裂断)之一的持续时间, 一般来说增生造山最长, 碰撞造山最短, 裂断造山介于其间(Zheng和Chen, 2017)。碰撞后既可以是弧陆碰撞之后, 也可以是陆陆碰撞之后。就Wilson旋回来说, 一旦汇聚板块边缘出现碰撞后岩浆作用, 则指示这里发生过夭折的大陆裂断, 这是大陆裂解的前奏。如果那里演化成为大陆裂解、海底扩张, 那就是成功的大陆裂断, 开始新一轮Wilson旋回(Zheng等, 2019a)。因此, 大陆碰撞就标志着一个Wilson旋回的结束(Dewey和Burke, 1974), 而碰撞后岩浆作用是在古缝合带发生的大陆裂断作用的构造响应(Zheng和Chen, 2017)。

4.4 典型造山带“碰撞后岩浆作用”发生的时间范围

碰撞后岩浆作用的时间界定是研究碰撞后岩浆作用成因以及成矿作用关系的基础。从已有研究成果可以看出, 目前主要有两种观点。一是认为碰撞后岩浆作用主要发生在碰撞后, 与拉张构造相关, 属于碰撞造山带演化晚期阶段的产物, 其成因与裂断造山作用有关(Zheng和Chen, 2017); 当进入到碱性岩浆作用时, 便进入到了板内阶段宁静期(Liègeois, 1998)。二是认为碰撞后岩浆作用在源区成分上受到碰撞造山过程的影响, 而岩浆作用发生在碰撞造山旋回之后的某个时间(赵子福和郑永飞, 2009; Zheng等, 2019a, 2019b)。那么, 同碰撞与碰撞后岩浆作用在发生时间上的差距有多大? 这可从典型碰撞造山带的形成和演化以及岩浆作用研究中得到回答。

中国中东部大别-苏鲁造山带是典型的中生代陆-陆俯冲碰撞造山带(郑永飞, 2008)。对该造山带中超高压变质岩锆石U-Pb年代学的研究揭示, 该造山带发生超高压变质的年龄为240~225Ma(Zheng等, 2009; Liu和Liou, 2011), 代表了陆-陆俯冲碰撞的峰期时间。与该俯冲碰撞作用密切相关的岩浆作用包括辽东南端

早-中三叠世辉绿岩(244~247Ma; Fang等, 2020), 胶东晚三叠世甲子山碱性岩201~220Ma(Yang等, 2005; Zhao等, 2012; Xu等, 2016)和米白山花岗岩(Zhao等, 2017a)。从岩浆侵位时间上看, 前者属于同俯冲岩浆作用, 而后者属于同折返岩浆作用, 两者合起来才是同碰撞岩浆作用。由此可以判定, 该造山带从碰撞挤压到折返拉张的持续时间为20~35Myr, 这就是这个大陆碰撞造山作用的持续时间。此外, 在大别-苏鲁造山带及其邻区还广泛发育早白垩世岩浆作用, 岩浆侵位年龄为145~118Ma, 主要集中在130~120Ma(Zhao等, 2017b)。已有的岩石地球化学研究表明, 这些镁铁质和花岗质岩浆岩分别是受俯冲陆壳物质改造的造山带岩石圈地幔和俯冲陆壳部分熔融的产物(Zhao等, 2013, 2017b)。在西部的秦岭-桐柏-红安造山带出现的少量白垩纪镁铁质岩浆岩具有洋岛型微量元素和亏损的放射性成因同位素组成, 记录了先前俯冲的古特提斯洋壳物质再循环及其壳幔相互作用(Dai等, 2015b, 2017a, 2017b, 2018)。因此, 如果将所有这些白垩纪岩浆岩作为碰撞后岩浆作用产物来看待, 那么该造山带中碰撞后岩浆作用发生的时间与主碰撞期的时间间隔达到80~110Myr。

青藏高原南部喜马拉雅造山带是典型新生代大陆俯冲/碰撞造山带, 它是印度大陆与亚欧大陆碰撞的结果, 但是在中生代发生过弧-陆碰撞(Zheng和Wu, 2018; Zheng等, 2019b)。先前对该造山带陆-陆碰撞的时间存在一定争论, 甚至将整个新生代都作为碰撞造山的年龄。随着同位素定年技术的发展, 目前已经认识到碰撞造山发生在(55±10)Ma这个时间段(Zhu等, 2011; Hu等, 2016; Zheng和Wu, 2018), 而青藏高原南部作为碰撞后岩浆作用的代表, 钾质-超钾质岩浆作用发生的时间主要介于46~8Ma(Chung等, 2005; Zhao等, 2009)。这表明, 青藏高原南部碰撞后岩浆作用发生的时间为印度-亚洲大陆碰撞造山之后的10~50Myr。安纳托利亚造山带是阿尔卑斯-喜马拉雅造山带西段的重要组成部分, 是新特提斯洋各分支先后闭合、弧-陆和陆-陆碰撞的产物。在安纳托利亚西北部, 萨迦利大陆和安纳托利特岛地块的碰撞发生在古新世-早始新世, 碰撞后岩浆作用开始于~54Ma, 一直持续到第四纪(Dilek和Altunkaynak, 2007, 2009; Güraslan和Altunkaynak, 2019)。因此, 安纳托利亚造山带中碰撞后岩浆作用从主碰撞期结束一直持续了近50Myr。

中亚造山带是典型的弧-陆碰撞增生型造山带, 其东段通常称为兴蒙造山带, 是古亚洲洋演化的结果. 基于同碰撞花岗岩的形成时间和晚二叠世磨拉石建造的形成时间, 目前认为兴蒙造山带的最终造山时间(古亚洲洋的最终闭合时间)是在晚二叠世-中三叠世(250~245Ma; Li, 2006; Xu等, 2013b; Song等, 2015; Wang等, 2018), 而该造山带中碰撞后岩浆作用发生的时间可以华北克拉通北缘东西向分布的碱性岩以及晚三叠世花岗岩(205~230Ma)和造山带中镁铁质-超镁铁质侵入岩的形成时间(210~225Ma)为代表(Wu等, 2004; Xu等, 2013b). 由此可以看出, 兴蒙造山带中碰撞后岩浆作用发生的时间为主碰撞期后的20~45Myr.

欧洲华力西造山带从西部的伊比利亚向东延伸到波西米亚, 包括比利牛斯-伊比利亚半岛中北部、法国中央造山带、孚日-黑森林地区、科西嘉岛-撒丁岛和波西尼亚地块等区域, 多陆块碰撞事件发生于晚志留世-早二叠世期间, 主要集中于早石炭世. 其中, 法国中央造山带的峰期变质年龄约为420~400Ma(Berger等, 2010), 碰撞后岩浆岩的形成时间主要集中在345~300Ma(Paquette等, 2003; Faure等, 2010). 在波西米亚厄尔士山脉-意大利阿尔卑斯地区, 超高压地体的变质年龄为360~353Ma(Schmädicke等, 1995), 碰撞后岩浆作用主要发生在310~260Ma(Dallagiovanna等, 2009; Maino等, 2012). 在欧洲华力西造山带中的法国中央造山带和波西米亚地区, 尽管西段和东段在变质作用和岩浆作用时限上存在系统差别, 但是出露的碰撞后岩浆作用时间为主碰撞期后的40~100Myr.

西冈瓦那造山带也称泛非造山带, 该造山带的造山过程发生在620~580Ma, 而碰撞后岩浆作用发生的时间主要集中在580~525Ma, 该造山带中碰撞后岩浆作用发生的持续时间为主碰撞期后的50Myr左右(Araujo等, 2014).

综上所述, 通过对典型造山带碰撞时间与碰撞后岩浆作用时间的检查可以看出, 大陆碰撞造山带发育的碰撞后岩浆作用的时间一般为20~50Myr, 有的甚至小于20Myr, 有的甚至长达100Myr. 碰撞造山作用与碰撞后岩浆作用在时间间隔上最为明显的是大别-苏鲁造山带, 那里三叠纪大陆碰撞与早白垩世岩浆作用之间的界限清晰(Zhao等, 2013, 2017b). 但是就欧亚大陆南缘新特提斯洋关闭之后的大陆碰撞来说, 碰撞造山作用与碰撞后岩浆作用之间的时间间隔较短, 有时难

以明确划分. 此外, 同碰撞岩浆岩主要侵位于俯冲带之上的大陆边缘, 而晚碰撞和碰撞后岩浆岩可以在板块缝合带两侧的大陆边缘侵位.

5 碰撞后镁铁质岩浆作用: 造山带地幔属性与演化的物质记录

根据构造单元的属性——活动与稳定, 岩石圈可以划分成克拉通和造山带两大构造单元. 造山带作为地球演化过程中构造作用发生的主要场所, 它不仅记录了地壳的增生与再造过程, 同时也记载了深部地幔的形成与演化历史. 如何了解造山带的属性与演化? 碰撞后长英质岩浆作用记录了造山带地壳的增生与再造过程, 而碰撞后镁铁质岩浆作用则很好地反映了造山过程中地幔属性的演化历史(Dilek和Altunkaynak, 2007, 2009; Zhao等, 2013; Song等, 2014; Chung等, 2005; Zheng等, 2020). 那么, 有哪些因素能够影响造山带地幔的属性与演化?

首先, 俯冲板片及其不规则的几何形态(撕裂、剥离、回卷)和板片俯冲速率、极性和倾斜角度以及俯冲前地幔楔的成分等都可以影响造山带的地幔属性(Syracuse等, 2010; 李忠海等, 2015; Zheng和Chen, 2016). 其次是造山过程对地幔属性的影响. 造山带中的碰撞构造引起了岩石圈的加厚和叠覆, 这就造成了造山带地幔地球化学上的不均一, 碰撞后相继出现的岩石圈抬升、垮塌、拆沉、断裂是碰撞后岩浆作用发生的主要地球动力学机制(Zheng和Zhao, 2017; Zheng等, 2019b, 2020). 再者, 造山带形成机制也是引起其地幔属性出现差异的主要原因. 因此, 可以用碰撞后岩浆作用来了解造山带岩石圈动力学的演化, 具体分析如下.

对于弧-陆碰撞型造山带, 活动大陆边缘之下的地幔楔不仅受到先前俯冲的大洋地壳衍生物质的交代, 而且受到俯冲大陆地壳衍生物质的交代, 结果造山带岩石圈地幔相对富集流体活动性元素(Zheng, 2019), 例如青藏高原南部中生代冈底斯造山带(Zhu等, 2011; Zheng等, 2019b). 就这个活动大陆边缘地幔楔的地球化学富集来说, 至少经历了三个阶段: (1) 亚洲大陆南缘在中生代时期受到新特提斯大洋板片的俯冲交代作用, 产生了冈底斯大陆弧; (2) 在新生代早期印度大陆俯冲阶段, 俯冲陆壳来源的流体又对大陆弧之下的地

幔楔进行了交代并在弧后位置产生同碰撞岩浆作用; (3) 在碰撞后阶段, 这个先前的活动大陆边缘发生再活化, 产生碰撞后岩浆作用(Zheng等, 2019b). 受到活化再造的大陆弧下地幔发生部分熔融, 所形成的镁铁质岩浆岩依然表现出弧型微量元素分布特征(富集LILE、LREE和Pb, 亏损HFSE)和放射性成因同位素亏损-弱富集的特征.

对于陆-陆碰撞型造山带, 虽然活动大陆边缘之下的地幔楔不仅受到过先前俯冲大洋地壳衍生物质的交代, 而且受到过俯冲大陆地壳衍生物质的交代, 这样造山带岩石圈地幔也相对富集流体活动性元素和成矿元素, 但是由于活动大陆边缘岩石圈太厚, 结果既没有产生大陆弧岩浆作用, 也没有发生显著的同碰撞岩浆作用, 例如大别-苏鲁造山带北侧的华北克拉通南缘(郑永飞, 2008; Zheng等, 2019a). 就同折返和碰撞后岩浆作用源区记录来看, 主要表现为俯冲古老陆壳物质对上覆岩石圈地幔的改造, 这在华北克拉通东南部早白垩世镁铁质岩浆岩及其幔源捕虏体中都有体现, 很好地揭示了俯冲陆壳物质对上覆岩石圈地幔的改造过程与机制(Gao等, 2008; Zhang等, 2002; Xu等, 2013a), 受改造的地幔部分熔融所形成的镁铁质岩石表现为弧型微量元素分布特征和相对富集的放射成因Sr-Nd同位素组成(Yang D B等, 2012; Zhao等, 2013). 大陆地壳的俯冲通常被认为受到了俯冲古洋壳的重力牵引, 因此俯冲古洋壳对陆-陆碰撞造山带上盘的岩石圈地幔也应该具有一定影响, 如华北东南缘辽东半岛早-中三叠世洋岛型幔源岩浆岩以及桐柏-红安地区白垩纪辉绿岩均记录了牵引华南陆壳俯冲的古特提斯洋对造山带岩石圈地幔的改造(Dai等, 2015b, 2017b; Fang等, 2020), 受改造的地幔部分熔融所形成的镁铁质岩石表现为洋岛型微量元素分布特征(富集LILE和LREE, HFSE不亏损)和相对亏损的放射成因Sr-Nd同位素组成. 由于陆-陆碰撞型造山带岩石圈后期经历了俯冲陆壳的叠加改造, 导致碰撞后镁铁质岩浆岩所记录的俯冲古洋壳信息相对较少.

综上所述, 我们不难看出, 造山带地幔成分是复杂的, 同时随着从洋壳俯冲到大陆碰撞造山过程的发展, 地幔成分是在变化的. 如何来揭示造山带地幔成分及其演化? 碰撞后幔源火成岩地球化学仍然是探索碰撞造山带地幔动力学的唯一记录, 因为它们包含了与同碰撞和碰撞后地球动力学相对应的地幔成分随时间的

变异. Prelević等(2012)利用超钾质-镁铁质火成岩的成分揭示了造山带岩石圈地幔动力学的演化. Liu等(2015)利用青藏高原南部碰撞后超钾质岩石的Os-Sr-Mg同位素组成, 很好地揭示了岩石圈地幔中的碳酸盐交代过程. Ammannati等(2016)利用二氧化硅不饱和超钾质火成岩中橄榄石的微量元素变化很好地揭示了岩石圈地幔中发生的碳酸盐交代过程. Dai等(2017a)利用造山带碱性玄武岩的岩石地球化学数据识别和区分了硅酸盐熔体和碳酸盐熔体交代对地幔源区的差异贡献, 并分别识别出其地幔源区的岩石学性质可能是角闪岩和碳酸盐化橄榄岩. Qi等(2018)对拉萨地体南部碰撞前和碰撞后幔源岩浆岩进行了对比研究, 发现前者具有亏损到弱富集的Sr-Nd同位素组成, 表明是俯冲新特提斯洋壳来源物质交代的地幔部分熔融形成的; 而后者具有明显富集的Sr-Nd同位素组成, 指示是俯冲印度陆壳来源物质交代的地幔部分熔融形成的. 目前, 虽然通过对碰撞后镁铁质火成岩岩石地球化学的系统研究揭示了造山带地幔被俯冲/碰撞地壳物质改造这一事实, 但是, 对改造造山带岩石圈地幔的地壳物质种类、贡献量及其改造过程与机制的研究还相对薄弱, 这已成为未来碰撞后镁铁质岩浆作用研究的主要内容, 该项研究对完善板块构造理论具有重要意义.

6 碰撞后镁铁质岩浆作用与成矿作用

汇聚板块边缘造山带中的碰撞构造引起了岩石圈的加厚和叠覆, 因其重力上的不稳定以及热边界层的对流减薄作用, 相继出现造山带的伸展坍塌, 这也正是碰撞后岩浆作用产生的动力学背景. 在这一阶段, 不仅可以产生由地壳物质再造形成的花岗质岩浆作用, 而且也可以产生与岩石圈地幔或软流圈地幔部分熔融相关的镁铁质-超镁铁质岩浆作用(Liègeois, 1998; Bonin, 2004; 赵子福和郑永飞, 2009; Zheng等, 2020). 前者多与斑岩型矿床的形成有关, 后者多与造山型铜镍硫化物或铂族元素矿产有关(Wu等, 2004; Xu等, 2013b; Fiorentini等, 2018). 此外, 早期洋壳俯冲作用与晚期大陆碰撞后阶段的热液金属成矿作用可能有成因联系(Hou等, 2015; 张洪瑞和侯增谦, 2018; Zheng等, 2019b). 早期洋壳俯冲和交代作用可以使成矿元素在地幔中得到初步富集, 最后通过大陆碰撞后断裂造山作用重新激活金属预富集区域导致碰撞造山带的成矿

作用(Zheng等, 2019b). Hou等(2015)的研究也表明, 早期洋壳俯冲作用与晚期碰撞后阶段的斑岩型铜成矿作用可能有成因联系: 弧岩浆在相对封闭环境下保持高氧逸度, 导致金属Cu、Au逐渐富集于演化岩浆中, 形成俯冲型斑岩铜矿. 相反, 弧岩浆在开放环境与地壳相互作用, 岩浆氧逸度降低, 将导致岩浆硫化物在新生下地壳堆积. 在碰撞后期过程中, 富含金属硫化物的新生下地壳发生部分熔融, 金属Cu向岩浆系统释放, 形成碰撞型斑岩铜矿(张洪瑞和侯增谦, 2018).

兴蒙造山带南缘的红旗岭晚三叠世铜镍硫化物矿床就是碰撞造山带成矿的典型实例, 成矿作用与晚三叠世的镁铁质-超镁铁质岩浆作用有关, 镁铁质-超镁铁质岩浆作用形成于古亚洲洋最终闭合后的伸展环境——即碰撞后阶段, 镁铁质岩浆的深部分异、浅部多期次侵位造就了铜镍硫化物成矿作用的发生(Wu等, 2004; Xu等, 2013b). 此外, 碰撞后幔源镁铁质和碱性岩浆作用的发生以及在地壳底部的底侵、堆积和分异过程也是将地幔金属和硫带入到深部陆壳的主要途径(Fiorentini等, 2018), 并为期后壳源岩浆作用和斑岩型矿床的形成奠定了良好的物质基础, 某些造山型金矿的形成就是与碰撞后花岗质岩浆作用有关(Zhang等, 2017).

综上所述, 碰撞后岩浆作用与区域成矿作用关系密切. 虽然人们已经证实在碰撞造山带通过碰撞后岩浆作用可以将成矿金属和硫从地幔搬运到地壳, 然而, 岩浆侵位的方式以及金属和挥发组分从局部富集的岩石圈地幔搬运到大陆地壳底部的机制、速率和动力学了解却很少(Griffin等, 2009; Fiorentini等, 2018). 此外, 如何通过碰撞造山带岩浆岩的研究建立明确的成矿理论, 并应用于不同的碰撞造山带及其他构造环境? 碰撞造山带成矿作用的关键控制要素是什么? 这已成为未来碰撞后镁铁质岩浆作用与成矿关系研究的重点内容之一, 对指导区域找矿具有重要现实意义.

7 结论

碰撞后镁铁质岩浆作用是板块俯冲-碰撞造山作用演化的一个重要环节, 它是碰撞造山后造山带伸展坍塌阶段的产物, 记录了汇聚板块边缘碰撞造山前、碰撞过程和碰撞后岩石圈地幔随时间的演化过程. 它是揭示碰撞造山带岩石圈地幔演化的直接物质记录,

同时也是形成各种矿产资源的主要载体. 然而, 对改造上覆岩石圈地幔的地壳物质种类、贡献量及其改造过程与机制, 以及碰撞后镁铁质岩浆成矿作用的主要控制因素与机制等都是本领域未来研究的主要内容和方向.

致谢 感谢郑永飞主编邀请撰写本文, 同时感谢主编和三位审稿人为本文提出的建设性修改意见和建议, 这对提高本文质量至关重要.

参考文献

- 黑龙江省地质矿产局. 1993. 黑龙江省区域地质志. 北京: 地质出版社
- 李忠海, 刘明启, Gerya T. 2015. 俯冲隧道中物质运移和流体-熔体活动的动力学数值模拟. 中国科学: 地球科学, 45: 881–899
- 宋述光, 王梦珏, 王潮, 牛耀龄. 2015. 大陆造山带碰撞-俯冲-折返-垮塌过程的岩浆作用及大陆地壳净生长. 中国科学: 地球科学, 45: 916–940
- 张洪瑞, 侯增谦. 2018. 大陆碰撞带成矿作用: 年轻碰撞造山带对比研究. 中国科学: 地球科学, 48: 1629–1654
- 赵子福, 戴立群, 郑永飞. 2015. 大陆俯冲带两类壳幔相互作用. 中国科学: 地球科学, 45: 900–915
- 赵子福, 郑永飞. 2009. 俯冲大陆岩石圈重熔: 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩成因. 中国科学: 地球科学, 39: 888–909
- 郑永飞. 2008. 超高压变质与大陆碰撞研究进展: 以大别-苏鲁造山带为例. 科学通报, 53: 2129–2152
- Aitchison J C, Badengzhu J C, Davis A M, Liu J, Luo H, Malpas J G, McDermid I R C, Wu H, Ziabrev S V, Zhou M. 2000. Remnants of a Cretaceous intra-oceanic subduction system within the Yarlung-Zangbo suture (southern Tibet). *Earth Planet Sci Lett*, 183: 231–244
- Ammannati E, Jacob D E, Avanzinelli R, Foley S F, Conticelli S. 2016. Low Ni olivine in silica-undersaturated ultrapotassic igneous rocks as evidence for carbonate metasomatism in the mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 444: 64–74
- Araujo C E G, Rubatto D, Hermann J, Cordani U G, Caby R, Basei M A S. 2014. Ediacaran 2500-km-long synchronous deep continental subduction in the West Gondwana Orogen. *Nat Commun*, 5: 5198
- Berger J, Féménias O, Ohnenstetter D, Bruguier O, Plissart G, Mercier J C C, Demaiffe D. 2010. New occurrence of UHP eclogites in Limousin (French Massif Central): Age, tectonic setting and fluid-rock interactions. *Lithos*, 118: 365–382
- Bonin B. 1996. A-type granite ring-complexes: Mantle origin through crustal filters and the anorthosite-rapakivi magmatism connection. In: Demaiffe D, ed. *Petrology and Geochemistry of Magmatic Suite*

- of Rocks in the Continental and Oceanic Crusts. Bruxelles: ULB-MRAC. 201–218
- Bonin B. 2004. Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, sources? A review. *Lithos*, 78: 1–24
- Bonin B, Platevoet B, Vialette Y. 1987. The geodynamic significance of alkaline magmatism in the Western Mediterranean compared with West Africa. *Geol J*, 22: 361–387
- Chen Y X, Zhou K, Gao X Y. 2017. Partial melting of ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision: Evidence, time, mechanism, and effect. *J Asian Earth Sci*, 145: 177–191
- Chung S L, Chu M F, Zhang Y, Xie Y, Lo C H, Lee T Y, Lan C Y, Li X, Zhang Q, Wang Y. 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. *Earth-Sci Rev*, 68: 173–196
- Clemens J D, Holloway J R, White A J R. 1986. Origin of an A-type granite: Experimental constraints. *Am Miner*, 71: 317–324
- Dai F Q, Zhao Z F, Dai L Q, Zheng Y F. 2016. Slab-mantle interaction in the petrogenesis of andesitic magmas: Geochemical evidence from postcollisional intermediate volcanic rocks in the Dabie orogen, China. *J Petrol*, 57: 1109–1134
- Dai F Q, Zhao Z F, Zheng Y F, Sun G C. 2019. The geochemical nature of mantle sources for two types of Cretaceous basaltic rocks from Luxi and Jiaodong in east-central China. *Lithos*, 344–345: 409–424
- Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F, Li Q L, Yang Y H, Dai M N. 2011. Zircon Hf-O isotope evidence for crust-mantle interaction during continental deep subduction. *Earth Planet Sci Lett*, 308: 229–244
- Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F, Zhang J. 2012. The nature of orogenic lithospheric mantle: Geochemical constraints from postcollisional mafic-ultramafic rocks in the Dabie orogen. *Chem Geol*, 334: 99–121
- Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F. 2014. Geochemical insights into the role of metasomatic hornblende in generating alkali basalts. *Geochem Geophys Geosyst*, 15: 3762–3779
- Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F, Zhang J. 2015a. Source and magma mixing processes in continental subduction factory: Geochemical evidence from postcollisional mafic igneous rocks in the Dabie orogen. *Geochem Geophys Geosyst*, 16: 659–680
- Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F. 2015b. Tectonic development from oceanic subduction to continental collision: Geochemical evidence from postcollisional mafic rocks in the Hong'an-Dabie orogens. *Gondwana Res*, 27: 1236–1254
- Dai L Q, Zheng Y F, He H Y, Zhao Z F. 2016a. Postcollisional mafic igneous rocks record recycling of noble gases by deep subduction of the continental crust. *Lithos*, 252–253: 135–144
- Dai L Q, Zheng Y F, Zhao Z F. 2016b. Termination time of peak decratonization in North China: Geochemical evidence from mafic igneous rocks. *Lithos*, 240–243: 327–336
- Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F, An Y J, Zheng F. 2017a. Geochemical distinction between carbonate and silicate metasomatism in generating the mantle sources of alkali basalts. *J Petrol*, 58: 863–884
- Dai L Q, Zheng F, Zhao Z F, Zheng Y F. 2017b. Recycling of Paleotethyan oceanic crust: Geochemical record from postcollisional mafic igneous rocks in the Tongbai-Hong'an orogens. *Geol Soc Am Bull*, 129: 179–192
- Dai L Q, Zheng F, Zhao Z F, Zheng Y F. 2018. Geochemical insights into the lithology of mantle sources for Cenozoic alkali basalts in West Qinling, China. *Lithos*, 320–303: 86–98
- Dallagiovanna G, Gaggero L, Maino M, Seno S, Tiepolo M. 2009. U-Pb zircon ages for post-Variscan volcanism in the Ligurian Alps (Northern Italy). *J Geol Soc*, 166: 101–114
- Dewey J F, Burke K. 1974. Hot spots and continental break-up: Implications for collisional orogeny. *Geology*, 2: 57–60
- Dilek Y, Altunkaynak Ş. 2007. Cenozoic crustal evolution and mantle dynamics of post-collisional magmatism in Western Anatolia. *Int Geol Rev*, 49: 431–453
- Dilek Y, Altunkaynak Ş. 2009. Geochemical and temporal evolution of Cenozoic magmatism in western Turkey: Mantle response to collision, slab break-off, and lithospheric tearing in an orogenic belt. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 311: 213–233
- Fang W, Dai L Q, Zheng Y F, Zhao Z F, Ma L T. 2020. Tectonic transition from oceanic subduction to continental collision: New geochemical evidence from Early-Middle Triassic mafic igneous rocks in southern Liaodong Peninsula, east-central China. *Geol Soc Am Bull*, doi: 10.1130/B35278.1
- Faure M, Cocherie A, Mézème E B, Charles N, Rossi P. 2010. Middle Carboniferous crustal melting in the Variscan Belt: New insights from U-Th-Pb total monazite and U-Pb zircon ages of the Montagne Noire Axial Zone (southern French Massif Central). *Gondwana Res*, 18: 653–673
- Fiorentini M L, LaFlamme C, Denyszyn S, Mole D, Maas R, Locmelis M, Caruso S, Bui T H. 2018. Post-collisional alkaline magmatism as gateway for metal and sulfur enrichment of the continental lower crust. *Geochim Cosmochim Acta*, 223: 175–197
- Foley S F, Venturelli G, Green D H, Toscani L. 1987. The ultrapotassic rocks: Characteristics, classification, and constraints for petrogenetic models. *Earth-Sci Rev*, 24: 81–134
- Gao S, Rudnick R L, Xu W L, Yuan H L, Liu Y S, Walker R J, Puchtel I S, Liu X, Huang H, Wang X R, Yang J. 2008. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 270: 41–53
- Griffin W L, O'Reilly S Y, Afonso J C, Begg G C. 2009. The Composition and Evolution of Lithospheric Mantle: A re-evaluation

- and its tectonic implications. *J Petrol*, 50: 1185–1204
- Güraslan I N, Altunkaynak Ş. 2019. Role of mantle and lower continental crust in the genesis of Eocene post-collisional granitoids: Insights from the Topuk pluton (NW Turkey). *J Asian Earth Sci*, 179: 365–384
- Hawkesworth C J, Fraser K J, Rogers N W. 1985. Kimberlites and lamproites: Extreme products of mantle enrichment processes. *Trans Geol Soc South Africa*, 88: 439–447
- Herzberg C. 2011. Identification of source lithology in the Hawaiian and Canary islands: Implications for origins. *J Petrol*, 52: 113–146
- Hou Z, Duan L, Lu Y, Zheng Y, Zhu D, Yang Z, Yang Z, Wang B, Pei Y, Zhao Z, McCuaig T C. 2015. Lithospheric architecture of the Lhasa Terrane and its control on ore deposits in the Himalayan-Tibetan Orogen. *Econ Geol*, 110: 1541–1575
- Hu X M, Garzanti E, Wang J G, Huang W T, An W, Webb A. 2016. The timing of India-Asia collision onset—Facts, theories, controversies. *Earth-Sci Rev*, 160: 264–299
- Huang F, Chen J L, Xu J F, Wang B D, Li J. 2015. Os-Nd-Sr isotopes in Miocene ultrapotassic rocks of southern Tibet: Partial melting of a pyroxenite-bearing lithospheric mantle? *Geochim Cosmochim Acta*, 163: 279–298
- Jagoutz O. 2014. Arc crustal differentiation mechanisms. *Earth Planet Sci Lett*, 396: 267–277
- Kubínová Š, Faryad S W, Verner K, Schmitz M, Holub F. 2017. Ultrapotassic dykes in the Moldanubian Zone and their significance for understanding of the post-collisional mantle dynamics during Variscan orogeny in the Bohemian Massif. *Lithos*, 272–273: 205–221
- Li H Y, Chen R X, Zheng Y F, Hu Z C. 2016. The crust-mantle interaction in continental subduction channels: Zircon evidence from orogenic peridotite in the Sulu orogen. *J Geophys Res-Solid Earth*, 121: 687–712
- Li H Y, Chen R X, Zheng Y F, Hu Z, Xu L. 2018. Crustal metasomatism at the slab-mantle interface in a continental subduction channel: Geochemical evidence from orogenic peridotite in the Sulu orogen. *J Geophys Res-Solid Earth*, 123: 2174–2198
- Li J Y. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate. *J Asian Earth Sci*, 26: 207–224
- Li Y, Xu W L, Wang F, Tang J, Pei F P, Wang Z J. 2014. Geochronology and geochemistry of late Paleozoic volcanic rocks on the western margin of the Songnen-Zhangguangcai Range Massif, NE China: Implications for the amalgamation history of the Xing'an and Songnen-Zhangguangcai Range massifs. *Lithos*, 205: 394–410
- Liègeois J P. 1998. Preface-some words on the post-collisional magmatism. *Lithos*, 45: 15–17
- Liègeois J P, Black R. 1987. Alkaline magmatism subsequent to collision in the Pan-African belt of the Adrar des Iforas (Mali). *Geol Soc Lond Spec Publ*, 30: 381–401
- Liu D, Zhao Z, Zhu D C, Niu Y, Widom E, Teng F Z, DePaolo D J, Ke S, Xu J F, Wang Q, Mo X. 2015. Identifying mantle carbonatite metasomatism through Os-Sr-Mg isotopes in Tibetan ultrapotassic rocks. *Earth Planet Sci Lett*, 430: 458–469
- Liu F L, Liou J G. 2011. Zircon as the best mineral for P-T-time history of UHP metamorphism: A review on mineral inclusions and U-Pb SHRIMP ages of zircons from the Dabie-Sulu UHP rocks. *J Asian Earth Sci*, 40: 1–39
- Liu W, Fei P X. 2006. Methane-rich fluid inclusions from ophiolitic dunite and post-collisional mafic-ultramafic intrusion: The mantle dynamics underneath the Palaeo-Asian Ocean through to the post-collisional period. *Earth Planet Sci Lett*, 242: 286–301
- Liu Y S, Gao S, Kelemen P B, Xu W L. 2008. Recycled crust controls contrasting source compositions of Mesozoic and Cenozoic basalts in the North China Craton. *Geochim Cosmochim Acta*, 72: 2349–2376
- Liou J G, Ernst W G, Zhang R Y, Tsujimori T, Jahn B M. 2009. Ultrahigh-pressure minerals and metamorphic terranes—The view from China. *J Asian Earth Sci*, 35: 199–231
- Lustrino M, Melluso L, Morra V. 2000. The role of lower continental crust and lithospheric mantle in the genesis of Plio-Pleistocene volcanic rocks from Sardinia (Italy). *Earth Planet Sci Lett*, 180: 259–270
- Maino M, Dallagiovanna G, Gaggero L, Seno S, Tiepolo M. 2012. U-Pb zircon geochronological and petrographic constraints on late to post-collisional Variscan magmatism and metamorphism in the Ligurian Alps, Italy. *Geol J*, 47: 632–652
- Nelson D R, McCulloch M T, Sun S S. 1986. The origins of ultrapotassic rocks as inferred from Sr, Nd and Pb isotopes. *Geochim Cosmochim Acta*, 50: 231–245
- Paquette J L, Ménot R P, Pin C, Orsini J B. 2003. Episodic and short-lived granitic pulses in a post-collisional setting: Evidence from precise U-Pb zircon dating through a crustal cross-section in Corsica. *Chem Geol*, 198: 1–20
- Prelević D, Akal C, Foley S F, Romer R L, Stracke A, Van Den Bogaard P. 2012. Ultrapotassic mafic rocks as geochemical proxies for post-collisional dynamics of orogenic lithospheric mantle: The case of southwestern Anatolia, Turkey. *J Petrol*, 53: 1019–1055
- Qi Y, Gou G N, Wang Q, Wyman D A, Jiang Z Q, Li Q L, Zhang L. 2018. Cenozoic mantle composition evolution of southern Tibet indicated by Paleocene (~64 Ma) pseudoleucite phonolitic rocks in central Lhasa terrane. *Lithos*, 302–303: 178–188
- Reagan M K, Ishizuka O, Stern R J, Kelley K A, Ohara Y, Blichert-Toft J, Bloomer S H, Cash J, Fryer P, Hanan B B, Hickey-Vargas R, Ishii

- T, Kimura J I, Peate D W, Rowe M C, Woods M. 2010. Fore-arc basalts and subduction initiation in the Izu-Bonin-Mariana system. *Geochem Geophys Geosyst*, 11: Q03X12
- Schmädicke E, Mezger K, Cosca M A, Okrusch M. 1995. Variscan Sm-Nd and Ar-Ar ages of eclogite facies rocks from the Erzgebirge, Bohemian Massif. *J Metamorph Geol*, 13: 537–552
- Stern R J, Fouch M J, Klempner S L. 2004. An overview of the Izu-Bonin-Mariana subduction factory. In: Eiler J, ed. *Inside the Subduction Factory*. American Geophysical Union. 175–222
- Sobolev A V, Hofmann A W, Sobolev S V, Nikogosian I K. 2005. An olivine-free mantle source of Hawaiian shield basalts. *Nature*, 434: 590–597
- Song S, Niu Y, Su L, Zhang C, Zhang L. 2014. Continental orogenesis from ocean subduction, continent collision/subduction, to orogen collapse, and orogen recycling: The example of the North Qaidam UHPM belt, NW China. *Earth-Sci Rev*, 129: 59–84
- Song S, Wang M M, Xu X, Wang C, Niu Y, Allen M B, Su L. 2015. Ophiolites in the Xing'an-Inner Mongolia accretionary belt of the CAO: Implications for two cycles of seafloor spreading and accretionary orogenic events. *Tectonics*, 34: 2221–2248
- Syracuse E M, van Keken P E, Abers G A. 2010. The global range of subduction zone thermal models. *Phys Earth Planet Inter*, 183: 73–90
- Thompson R N, Leat P T, Dickin A P, Morrison M A, Hendry G L, Gibson S A. 1990. Strongly potassic mafic magmas from lithospheric mantle sources during continental extension and heating: Evidence from Miocene minettes of northwest Colorado, U.S.A. *Earth Planet Sci Lett*, 98: 139–153
- Wang M J, Song S G, Niu Y L, Su L. 2014. Post-collisional magmatism: Consequences of UHPM terrane exhumation and orogen collapse, N. Qaidam UHPM belt, NW China. *Lithos*, 210: 181–198
- Wang Y N, Xu W L, Wang F, Li X B. 2018. New insights on the early Mesozoic evolution of multiple tectonic regimes in the northeastern North China Craton from the detrital zircon provenance of sedimentary strata. *Solid Earth*, 9: 1375–1397
- Wendlandt R F, Eggler D H. 1980a. The origins of potassic magmas; 1, Melting relations in the systems $\text{KAlSiO}_4\text{-Mg}_2\text{SiO}_4\text{-SiO}_2$ and $\text{KAlSiO}_4\text{-MgO-SiO}_2\text{-CO}_2$ to 30 kilobars. *Am J Sci*, 280: 385–420
- Wendlandt R F, Eggler D H. 1980b. The origins of potassic magmas; 2, Stability of phlogopite in natural spinel lherzolite and in the system $\text{KAlSiO}_4\text{-MgO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O-CO}_2$ at high pressures and high temperatures. *Am J Sci*, 280: 421–458
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W, Kröner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian orogenic belt. *J Geol Soc*, 164: 31–47
- Wu F Y, Wilde S A, Zhang G L, Sun D Y. 2004. Geochronology and petrogenesis of the post-orogenic Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic complexes in Jilin Province, NE China. *J Asian Earth Sci*, 23: 781–797
- 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 Res*, 23: 1402–1428
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, Zhai M G. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22: 1069
- Xiao W J, Windley B F, Sun S, Li J L, Huang B C, Han C M, Yuan C, Sun M, Chen H L. 2015. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in Central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 43: 477–507
- Xu S T, Okay A I, Ji S Y, Sengor A M C, Su W, Liu Y C, Jiang L L. 1992. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 256: 80–82
- Xu W L, Zhou Q J, Pei F P, Yang D B, Gao S, Li Q L, Yang Y H. 2013a. Destruction of the North China Craton: Delamination or thermal/Chemical erosion? Mineral chemistry and oxygen isotope insights from websterite xenoliths. *Gondwana Res*, 23: 119–129
- Xu W L, Pei F P, Wang F, Meng E, Ji W Q, Yang D B, Wang W. 2013b. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes. *J Asian Earth Sci*, 74: 167–193
- Xu H, Zhang J, Wang Y, Liu W. 2016. Late Triassic alkaline complex in the Sulu UHP terrane: Implications for post-collisional magmatism and subsequent fractional crystallization. *Gondwana Res*, 35: 390–410
- Xu Z Q, Zhao Z B, Ma X X, Chen X J, Ma Y. 2019. From Andean orogen to Gangdese orogen: From ocean-continent subduction to continent-continent collision. *Acta Geol Sin-Engl*, 93: 1–11
- Yang J H, Chung S L, Zhai M G, Zhou X H. 2004. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China: Evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle. *Lithos*, 73: 145–160
- Yang J H, Chung S L, Wilde S A, Wu F, Chu M F, Lo C H, Fan H R. 2005. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chem Geol*, 214: 99–125
- Yang J H, Sun J F, Chen F, Wilde S A, Wu F Y. 2007. Sources and petrogenesis of Late Triassic dolerite dikes in the Liaodong Peninsula: Implications for post-collisional lithosphere thinning of the Eastern North China Craton. *J Petrol*, 48: 1973–1997
- Yang D B, Xu W L, Pei F P, Yang C H, Wang Q H. 2012. Spatial extent of the influence of the deeply subducted South China Block on the southeastern North China Block: Constraints from Sr-Nd-Pb isotopes

- in Mesozoic mafic igneous rocks. *Lithos*, 136-139: 246–260
- Yang Q L, Zhao Z F, Zheng Y F. 2012a. Modification of subcontinental lithospheric mantle above continental subduction zone: Constraints from geochemistry of Mesozoic gabbroic rocks in southeastern North China. *Lithos*, 146-147: 164–182
- Yang Q L, Zhao Z F, Zheng Y F. 2012b. Slab-mantle interaction in continental subduction channel: Geochemical evidence from Mesozoic gabbroic intrusives in southeastern North China. *Lithos*, 155: 442–460
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 28: 211–280
- Yoder H S. 1986. Potassium-rich rocks: Phase analysis and heteromorphic relations. *J Petrol*, 27: 1215–1228
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Fan W M, Zhai M G, Yin J F. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: Evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contrib Mineral Petrol*, 144: 241–254
- Zhang J, Zhao Z F, Zheng Y F, Liu X, Xie L. 2012. Zircon Hf-O isotope and whole-rock geochemical constraints on origin of postcollisional mafic to felsic dykes in the Sulu orogen. *Lithos*, 136-139: 225–245
- Zhang J Y, Ma C Q, Li J W, Pan Y M. 2017. A possible genetic relationship between orogenic gold mineralization and post-collisional magmatism in the eastern Kunlun Orogen, western China. *Ore Geol Rev*, 81: 342–357
- Zhao Z, Mo X, Dilek Y, Niu Y, DePaolo D J, Robinson P, Zhu D, Sun C, Dong G, Zhou S. 2009. Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic compositions of the post-collisional ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Petrogenesis and implications for India intra-continental subduction beneath southern Tibet. *Lithos*, 113: 190–212
- Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, Wu F Y. 2011. Origin of postcollisional magmatic rocks in the Dabie orogen: Implications for crust-mantle interaction and crustal architecture. *Lithos*, 126: 99–114
- Zhao Z F, Zheng Y F, Zhang J, Dai L Q, Li Q, Liu X. 2012. Syn-exhumation magmatism during continental collision: Evidence from alkaline intrusives of Triassic age in the Sulu orogen. *Chem Geol*, 328: 70–88
- Zhao Z F, Dai L Q, Zheng Y F. 2013. Postcollisional mafic igneous rocks record crust-mantle interaction during continental deep subduction. *Sci Rep*, 3: 3413
- Zhao Z F, Zheng Y F, Chen Y X, Sun G C. 2017a. Partial melting of subducted continental crust: Geochemical evidence from synexhumation granite in the Sulu Orogen. *Geol Soc Am Bull*, 129: 1692–1707
- Zhao Z F, Liu Z B, Chen Q. 2017b. Melting of subducted continental crust: Geochemical evidence from Mesozoic granitoids in the Dabie-Sulu orogenic belt, east-central China. *J Asian Earth Sci*, 145: 260–277
- Zheng Y F. 2019. Subduction zone geochemistry. *Geosci Front*, 10: 1223–1254
- Zheng Y F, Chen R X, Zhao Z F. 2009. Chemical geodynamics of continental subduction-zone metamorphism: Insights from studies of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) core samples. *Tectonophysics*, 475: 327–358
- Zheng Y F, Fu B, Gong B, Li L. 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. *Earth Sci Rev*, 62: 105–161
- Zheng Y F, Xia Q X, Chen R X, Gao X Y. 2011. Partial melting, fluid supercriticality and element mobility in ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision. *Earth-Sci Rev*, 107: 342–374
- Zheng Y F. 2012. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. *Chem Geol*, 328: 5–48
- Zheng Y F, Xiao W J, Zhao G. 2013. Introduction to tectonics of China. *Gondwana Res*, 23: 1189–1206
- Zheng Y F, Chen Y X. 2016. Continental versus oceanic subduction zones. *Natl Sci Rev*, 3: 495–519
- Zheng Y F, Chen R X. 2017. Regional metamorphism at extreme conditions: Implications for orogeny at convergent plate margins. *J Asian Earth Sci*, 145: 46–73
- Zheng Y F, Zhao Z F. 2017. Introduction to the structures and processes of subduction zones. *J Asian Earth Sci*, 145: 1–15
- Zheng Y F, Wu F Y. 2018. The timing of continental collision between India and Asia. *Sci Bull*, 63: 1649–1654
- Zheng Y F, Zhao Z F, Chen R X. 2019a. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: Compositional inheritance and metamorphic modification. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 474: 89–132
- Zheng Y F, Mao J W, Chen Y J, Sun W D, Ni P, Yang X Y. 2019b. Hydrothermal ore deposits in collisional orogens. *Sci Bull*, 64: 205–212
- Zheng Y F, Xu Z, Chen L, Dai L Q, Zhao Z F. 2020. Chemical geodynamics of mafic magmatism above subduction zones. *J Asian Earth Sci*, 104185; doi: 10.1016/j.jseas.2019.104185
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y, Mo X X, Chung S L, Hou Z Q, Wang L Q, Wu F Y. 2011. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth. *Earth Planet Sci Lett*, 301: 241–255

(责任编委: 郑永飞)