

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.982>



大陆俯冲带壳幔相互作用

郑永飞^{1,2}, 陈伊翔^{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

摘要: 由板块俯冲引发的深部物质循环过程是地球内部的一级运行机制, 主宰了地球从内到外的演化进程, 是地球科学研究的重要前沿。俯冲带化学地球动力学研究不仅需要确定俯冲带地壳物质再循环的机制和形式, 而且需要确定俯冲带动力来源和热体制及其随时间的变化。为了识别不同类型壳源熔/流体对地幔楔的交代作用、寻求板片-地幔界面反应的岩石学和地球化学证据、理解汇聚板块边缘地壳俯冲和拆沉对地幔不均一性的贡献, 我们必须将俯冲带变质作用、交代作用和岩浆作用作为一个地球科学系统来考虑。板块俯冲带变质过程中发生一系列物理化学变化, 这些变化不但是导致板块进一步俯冲的主要驱动力, 同时也控制着释放的熔/流体组成和俯冲到地球深部的物质组成, 对俯冲带化学地球动力学过程产生重要影响。地幔楔作为俯冲系统中连接俯冲盘和仰冲盘的关键构造单元, 在地球层圈之间物质循环和能量交换等方面起着重要作用。造山带地幔楔橄榄岩直接记录了俯冲带多种性质的熔/流体交代作用, 以及复杂的壳幔物质循环过程。俯冲带岩浆岩是大洋/大陆板块俯冲物质再循环的表现形式, 这些岩石样品记录了俯冲带从深部地幔到浅部地壳的过程, 也为认识地球深部物质循环提供了理想的天然样品。尽管国际上在俯冲带岩石学和地球化学领域针对地球深部过程的研究方面取得了多项重要进展, 但由于研究工作缺乏密切的协同配合, 包括俯冲带熔/流体的物理化学性质、俯冲带壳幔相互作用的机制和过程、俯冲带幔源岩浆活动的物质来源和启动机制以及深部地幔过程对地表环境的影响等许多关键科学问题尚未得到根本解决。将来的研究需要聚焦俯冲带物质循环这一核心科学问题, 进一步查明俯冲带变质作用、交代作用、岩浆作用等过程的各自特征和相互联系, 包括挥发性组分在地球深部的迁移过程及其资源和环境效应, 着力考察研究相对薄弱的古俯冲带, 阐明板块俯冲与地球深部物质循环之间的耦合机制。

关键词: 大陆俯冲带; 俯冲隧道; 壳幔相互作用; 俯冲带变质作用; 俯冲带交代作用; 俯冲带岩浆作用; 化学地球动力学。

中图分类号: P581; P597

文章编号: 1000-2383(2019)12-3961-23

收稿日期: 2019-10-08

Crust-Mantle Interaction in Continental Subduction Zones

Zheng Yongfei^{1,2}, Chen Yixiang^{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

Abstract: The recycling of crustal material into the mantle by subduction is the first-order mechanism of Earth's interior. In order to decipher the crustal-mantle interaction in subduction zones, it is important to distinguish different types of metasomatism by subducting crust-derived fluids such as aqueous solutions and hydrous melts to the mantle wedge. For this purpose, various lines of petrological and geochemical evidence have been used to determine the physicochemical properties of subduction zone fluids at the slab-mantle interface in subduction channels. In doing so, it is critical to determine how crustal rocks underwent metamorphic

基金项目: 国家“973”计划项目“大陆俯冲带壳幔相互作用”(No.2015CB856106).

作者简介: 郑永飞 (1959-), 男, 中国科学院院士, 主要从事同位素地球化学与化学地球动力学研究。ORCID: 0000-0003-0332-4871. E-mail: yfzheng@ustc.edu.cn

引用格式: 郑永飞, 陈伊翔, 2019. 大陆俯冲带壳幔相互作用. 地球科学, 44(12):3961-3983.

dehydration and partial melting at mantle depths. After incorporation of subduction zone fluids into the mantle wedge, different compositions of mantle metasomatites were generated in the mantle wedge to result in mantle heterogeneities. As soon as these metasomatites underwent partial melting, mafic igneous rocks were produced with both petrological and geochemical signatures of the subducted crust and the mantle wedge. In this regard, such processes as metamorphism, metasomatism and magmatism in subduction zones are the keys to the recycling of crustal material at convergent plate boundaries. The mantle wedge is the key lithotectonic unit linking the subducting slab and the obducting plate and thus plays an important role in the material transport and energy exchange in the subduction system. The orogenic mantle wedge peridotite directly records different types of crustal metasomatism in subduction zones. Subduction zone magmatism is the manifestation for recycling of subducted oceanic and continental rocks. These rocks witness the processes of magmatic melts from the mantle wedge to crustal levels above subduction zones, providing the natural samples to decode indirectly the crustal recycling at convergent plate boundaries. Although there are many advances in the study of subduction zones with respect to the crust-mantle interaction, such three processes as metamorphism, metasomatism and magmatism in subduction zones are still the most important targets in the deep Earth science. Many key problems cannot be resolved if no sufficient attention is paid to an integrated study of these three aspects. Such problems include the physiochemical properties of subduction zone fluids, the mechanism and process of crust-mantle interaction, the material source and triggering mechanism of mantle-derived magmatism above subduction zones, and the impact of deep mantle process on the shallow crustal environments. The future research needs to focus on the key question of material recycling in subduction zones, and take the metamorphism, metasomatism and magmatism in subduction zones as a whole in the framework of Earth system science. This concerns the transport process and the resource and environmental effects of volatile components, and clarify the coupling mechanism of plate subduction and material recycling in deep Earth by intensive studies of paleo-subduction zones.

Key words: continental subduction zone; subduction channel; crust-mantle interaction; subduction zone metamorphism; subduction zone metasomatism; subduction zone magmatism; chemical geodynamics.

0 引言

板块构造理论是二十世纪地球科学研究的圣杯.它以地球整个岩石圈的活动方式为依据,建立了全球尺度的构造运动模式,在地球科学领域中所起的作用可以与物理学领域的牛顿力学或生命科学领域的进化论相媲美(Zheng, 2018).板块运动是地球内部的一级运行机制,也是地球充满活力的重要象征.板块运动既是地球内动力地质作用的结果,又反过来影响地球从表层到内部的演化进程.在上世纪六十年代板块构造建立之时,人们强调的是三个要素(Kearey *et al.*, 2009; Frisch *et al.*, 2010; Livermore, 2018):板块整体具有刚性行为、发散板块边缘海底扩张产生新的洋壳、汇聚板块边缘岩石圈俯冲使洋壳消失.半个世纪的研究发现,刚性板块边缘在高温下表现出韧性特点、发散板块边缘夭折的大陆裂断并不产生新的洋壳、汇聚板块边缘岩石圈俯冲产生不同性质的活动带(Moores *et al.*, 2013; Hawkesworth and Brown, 2018).板块边界以活动带为标志,其中变形、地震、变质和岩浆作用呈带状分布.如果活动带具有全球网络性质才属于现代板块构造(Bercovici and Ricard, 2014; Stern,

2018),而只具有局部网络性质的则属于远古板块构造(Cawood *et al.*, 2018; Smrekar *et al.*, 2018).越来越多的研究发现,板块边界活动带既是地壳重力驱动的岩石圈俯冲带也是地幔浮力驱动的岩石圈裂断(rift)带(Zheng and Chen, 2017).

在板块构造的识别上,一般将其鉴定性标志确定为岩石圈边界发生了地壳俯冲作用.不过, Stern (2018)强调形成蓝片岩—榴辉岩相变质岩的冷俯冲带才能作为现代板块构造的标志,而 Lenardic (2018)则认为板块边界既有俯冲作用也有裂断作用(rifting).在板块构造之前是盖子构造,缺乏板块边缘(Lenardic, 2018; Smrekar *et al.*, 2018).从太古代起在地球上已经出现丰富的板块边缘和全球性的俯冲,但是其热性质和区域程度在地球历史上的不同时期存在显著差别(Cawood *et al.*, 2018; Brown and Johnson, 2018),结果板块边缘性质随动力体制和热状态的变化而变化.一般来说,俯冲板块边缘在低热梯度下表现出刚性行为,表壳岩石能够俯冲到大陆岩石圈地幔深度;在中等热梯度下即可表现出韧性行为,结果表壳岩石只能俯冲到大陆下地壳深度.由此可以区分出两种范式的板块构造(Zheng and Zhao, 2019),其中现代范式的板块构造

以冷俯冲为特征,典型产物是阿尔卑斯式蓝片岩—榴辉岩相变质系列;远古范式的板块构造以暖俯冲为特征,典型产物是巴罗式角闪岩—麻粒岩相变质系列.在太古代广泛出现的是暖俯冲,在古元古代开始出现区域性冷俯冲,到新元古代起才出现全球性的冷俯冲(Holder *et al.*, 2019; Zheng and Zhao, 2019).另一方面,软流圈上涌将热能从地幔传输到地壳,不仅引起巴肯式高温低压变质作用,而且使下部地壳发生部分熔融产生长英质熔体(Zheng and Chen, 2017).这些高温低压过程是在先前俯冲带的基础上发展起来的,由此所产生的主动大陆裂断带构成板块边缘的活动带,其性质决定于下伏软流圈地幔的温度(Zheng and Zhao, 2019).太古代地幔温度较高,地壳深熔产生的长英质熔体对板块边缘的焊接比较牢固,因此远古板块构造作用所形成的活动带具有高的强度和大的宽度.

与地幔相比,板块表层的地壳物质含有较高丰度的硅、铝、挥发性组分和大离子亲石元素,而且成分变化很大;再者,同样是地球浅表的陆壳和洋壳,它们在化学组成上也存在明显差异(Rudnick and Gao, 2014; White and Klein, 2014).板块俯冲是将地壳浅表物质输送到地球内部的最主要机制(Hofmann, 1997; Zheng, 2019).随着俯冲过程中温度和压力条件的变化,俯冲板片经历变质脱水和部分熔融,发生一系列矿物相变反应(Hermann and Rubatto, 2014; 郑永飞等, 2016).更为重要的是,当板片或其衍生物质(如变质脱水释放的富水溶液或者板片熔融形成的含水熔体)在不同深度与地幔橄榄岩接触时,物理条件和化学成分的巨大差异会导致二者之间发生复杂的化学反应,形成具有特殊成分和性质的新矿物相或组合,并改造地幔的化学成分,导致地幔的化学和岩石学不均一性(Ringwood, 1974; Allègre, 1982; Zindler and Hart, 1986; Hofmann, 1997; Kelemen *et al.*, 2014).

进入地球内部的地壳物质又可以通过多种机制不同程度地重新返回地表.在俯冲带浅部,俯冲板片发生变质脱水乃至部分熔融(Zheng and Chen, 2016).一方面,经受高压—超高压变质的地壳岩石会沿着俯冲隧道折返(Bebout, 2007; Guillot *et al.*, 2009; Zheng, 2012; 郑永飞等, 2013).另一方面,释放出的流体向上运移交代地幔楔,所形成的地幔交代岩比正常橄榄岩易于熔融,结果引起大洋弧和大陆弧岩浆作用(Tatsumi and Eggins, 1995; Stern,

2002; Tatsumi and Kogiso, 2003; Schmidt and Poli, 2014),这些弧岩浆作用产物喷出地表完成整个物质循环.相反,俯冲到地幔深部、超过折返极限的板片岩石则不再以超高压变质岩的形式折返,而是发生进一步的矿物相变,将地壳组分迁移进入地幔过渡带乃至下地幔.肇始于板块俯冲的多种岩浆作用又对地表环境演化和宜居性产生了深刻的影响.

因此,由板块俯冲引发的地壳物质再循环是地球内部的一级运行机制,主宰了地球从内到外的演化进程,是地球科学研究的重要前沿(Stern, 2002; Bebout, 2007; Zheng and Chen, 2016).俯冲带出露的各种变质岩、造山带橄榄岩和火成岩虽然出露在板块缝合带两侧的不同位置,但是它们分别记录了俯冲带变质作用、交代作用和岩浆作用等复杂过程,是地球深部物质循环的最终产物,提供了认识俯冲带壳幔相互作用的直接窗口.矿物岩石学、地球化学、现代原位微区分析技术以及模拟计算相结合是研究俯冲带壳幔相互作用的有效手段.

1 俯冲带变质作用

板块俯冲带变质过程将发生一系列物理、化学变化,这些变化不但是导致板块进一步俯冲的主要驱动力,同时这些变化控制着俯冲到地球深部物质的组成,对俯冲带化学地球动力学过程产生重要影响.随着实验技术的发展,岩相学观察、矿物微区原位分析技术和相平衡模拟计算的完美结合,现在已经可以有效反演板片俯冲变质作用的整个过程.

传统板块构造理论认为,只有洋壳俯冲带才是壳幔相互作用最为活跃的地方(Allègre, 1982; Zindler and Hart, 1986; Tatsumi and Eggins, 1995; Hofmann, 1997).在大洋板块俯冲过程中,洋壳玄武岩和海底沉积物在经历变质脱水和部分熔融后进入地幔(Bebout, 2007; Agard *et al.*, 2009; Spandler and Pirard, 2013; 郑永飞等, 2016).鉴于大陆地壳物质在组成上与地幔物质存在巨大差异,大陆地壳的深俯冲和折返必然会对上覆大陆岩石圈和大陆板块汇聚边界的结构、组成、变形和演化进程造成显著影响(Chopin, 2003; Zheng, 2012).这一过程在传统的板块构造理论中并未涉及,因而至今未能得到合理的解释.洋壳和陆壳在物质组成上的差异,必然造成陆壳物质和洋壳物质与岩石圈地幔相互作用性质上的差异(Zheng and Chen, 2016).前人在对大洋深俯冲研究的基础上提出了俯冲隧道这一概

念(Cloos and Shreve, 1988a, 1988b),为解释大洋俯冲带浅部到深部的构造地质提供了参考模型(Beaumont *et al.*, 1999; Gerya *et al.*, 2002; Guillot *et al.*, 2009).将这一概念应用到大陆俯冲带,可以很好解释大陆碰撞过程中发生构造变形、高压/超高压变质以及俯冲地壳的拆理解耦和差异折返等(Beaumont *et al.*, 2009; Guillot *et al.*, 2009; 郑永飞等, 2013).

俯冲带流体活动和元素迁移是俯冲工厂研究的热点和前沿(Eiler, 2003; Tatsumi, 2005).由于大洋板块富含流体,大洋板块俯冲普遍导致大规模的地幔交代和岛弧岩浆活动(Stern, 2002; Zheng and Chen, 2016).此外,经历过脱水和化学变化的残留板片物质继续下沉并对地幔的地球化学组成造成影响,最终会形成板内玄武质岩浆活动的源区物质来源(Hofmann, 1997; Xu and Zheng, 2017; 郑永飞等, 2018).因此,国际上俯冲带深部壳幔相互作用研究主要集中在大洋板块俯冲带.但是,俯冲镁铁质洋壳的密度高于周围的地幔岩石,经历深俯冲的洋壳极少能折返到地表(Agard *et al.*, 2009; Erdman and Lee, 2014).因此,研究与洋壳俯冲和洋壳物质再循环有关的流体活动和元素分异主要借助有限折返的大洋地壳(高压蓝片岩和榴辉岩)和浅层地幔(橄榄岩包体和蛇绿岩)岩石,以及间接利用弧岩浆岩和高温高压实验来研究.到目前为止,深俯冲大洋板块内部流体活动和元素分异的具体过程和机制还缺乏足够的直接岩石学和地球化学证据的支持和揭示,对大洋板片组分进入地幔楔的方式、反应过程和机制还缺乏认识.地幔楔中弧岩浆产生的深度通常在80~200 km,对应于进入柯石英稳定域乃至金刚石稳定域的超高压变质作用(图1).对来自于80~200 km弧下(subarc)深度的超高压变质岩和相应的地幔楔岩石进行直接观察,才能全面了解俯冲带深部流体活动和壳幔相互作用.

越来越多的矿物学证据,如变泥质岩和榴辉岩中斯石英副相和斯石英假象出溶尖晶石等特征表明,大陆地壳岩石可以超深俯冲到~300 km地幔深度的斯石英稳定域而后折返回地壳(Liu *et al.*, 2007, 2018).南阿尔金石榴辉石岩中石榴石出溶单斜辉石和北秦岭松树沟长英质片麻岩中石榴石出溶石英棒状体也指示岩石的峰期变质压力为>9~10 GPa的斯石英稳定域.对南阿尔金长英质与基性高压—超高温麻粒岩的变质相平衡研究,也获得了

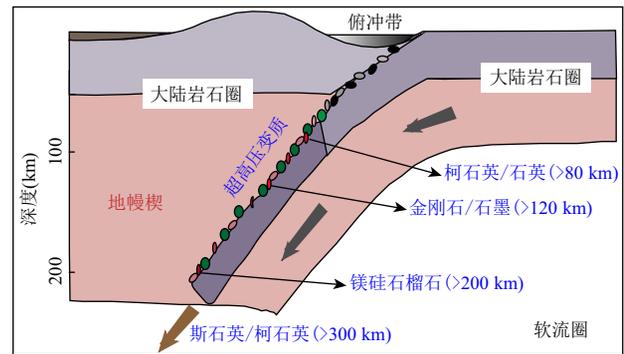


图1 大陆俯冲深度与变质指示矿物对应关系示意图

Fig.1 Metamorphic index minerals indicate depths of crustal subduction at convergent plate boundaries

修改自郑永飞等(2015)

峰期变质压力为斯石英稳定域(>7 GPa)的结果,揭示大陆地壳经历超深俯冲后快速折返至加厚地壳底部并经历高压—超高温麻粒岩相变质作用(Dong *et al.*, 2018).这些结果指示,陆壳俯冲到斯石英稳定域的地幔深度(~300 km)然后再折返回地表的地质现象可能更为普遍,其岩石类型也具有多样性(Liu *et al.*, 2018).

最近在东昆仑榴辉岩和泥质片麻岩锆石中首次发现了柯石英建立了东昆仑造山带约500 km长的早古生代超高压变质带(Bi *et al.*, 2018).在北秦岭斜长角闪岩锆石中首次发现柯石英(宫相宽等, 2016),为北秦岭超高压变质作用进一步提供了确凿的矿物学证据,扩大了北秦岭高压—超高压岩石的空间分布范围.对西南天山蛇纹岩的岩石学研究,首次发现了钛粒硅镁石和钛斜硅镁石这两种含水矿物,实验岩石学和相平衡计算指示西南天山蛇纹岩经历了超高压变质作用,峰期温压条件为510~540 °C、3.0~3.7 GPa,峰期矿物组合为钛粒硅镁石+橄榄石+叶蛇纹石+绿泥石±氢氧镁石(Shen *et al.*, 2015).这表明在低的热梯度条件下,叶蛇纹石可以越过脱水分解线,携带大量水俯冲到深部地幔,而硅镁石的稳定域表明硅镁石族矿物对地幔水循环的作用也不容忽视(Shen *et al.*, 2015).这些最新结果指示,超高压变质大陆和大洋地体的分布比之前认为的更为广泛.

将大洋俯冲隧道模型拓展到大陆俯冲带(Guillot *et al.*, 2009; 郑永飞等, 2013),对于解释俯冲带地壳岩石折返具有重要价值(图2).俯冲隧道是指汇聚板块边缘下伏俯冲板片与上覆板块之间的自由

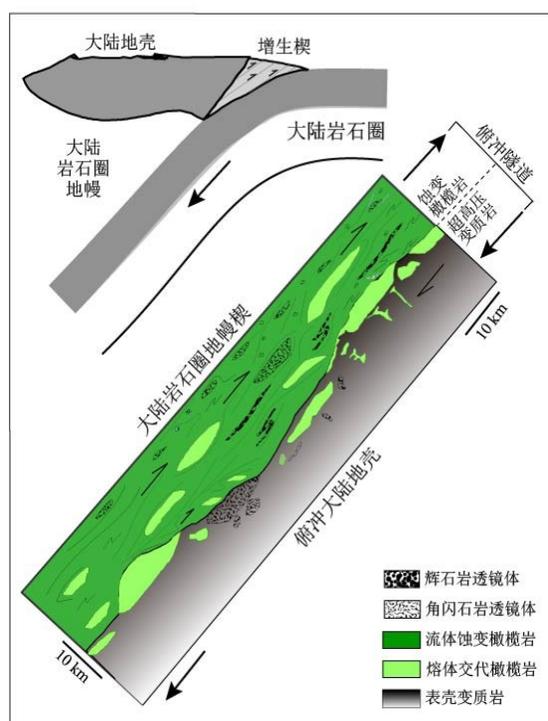


图 2 大陆俯冲隧道中壳幔相互作用示意图

Fig.2 Schematic diagram showing the crust-mantle interaction in continental subduction channel

修改自郑永飞等(2013).大陆地壳俯冲到地幔过程中释放流体交代上覆地幔楔橄辉岩,形成富集不相容元素的地幔交代岩

空间及其中发生运动的物质,强调的是板块界面相互作用.在大洋俯冲带,俯冲大洋岩石圈板片的上地壳物质由于受地幔楔隧道壁的机械刮削作用而拆离成不同大小的地壳碎块进入大洋俯冲隧道,同时经历不同程度的变形和变质(Beaumont *et al.*, 1999; Gerya *et al.*, 2002; Guillot *et al.*, 2009).将这个概念拓展到大陆碰撞带,就是不仅俯冲大陆岩石圈上层在不同深度发生拆离进入大陆俯冲隧道,而且不同大小的地幔岩石碎块从地幔楔底部被刮削下来进入大陆俯冲隧道(郑永飞等,2013).这些不同来源的物质在大陆俯冲隧道内发生混合,经历不同程度的变质、变形乃至局部深熔作用,形成不同型式的高压—超高压构造混杂岩(图2).无论是大洋还是大陆俯冲隧道,俯冲隧道之上地幔楔受到俯冲板片热传导影响而冷却,结果在板片—地幔楔界面的温度总是最低(Zheng, 2019).在大陆俯冲隧道,由于上覆大陆岩石圈一般较厚,结果其温度也显著偏低,这有利于大陆俯冲带超高压变质岩的形成和保存.由于板块界面的平整程度存在差异,俯冲隧道表现出不同的地形,大洋俯冲隧道的局部高度一般

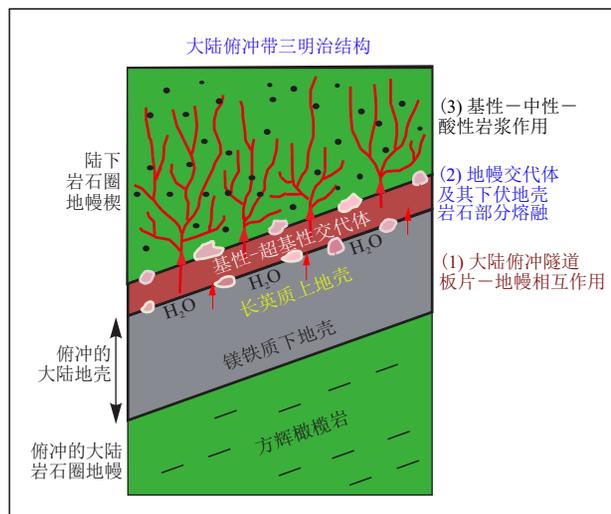


图 3 大陆俯冲带板片—地幔楔界面两侧岩石组合的“三明治”结构示意图

Fig.3 The sandwich structure of lithological associations at the slab-mantle interface in continental subduction zones

修改自郑永飞等(2015)

从 <1 km 变化到 >2 km,大陆俯冲隧道的高度一般从 <2 km 变化到 >7 km.随着两个刚性板块之间的汇聚,俯冲隧道内的物质形成韧性剪切带,从而表现为“动态三明治结构”(图3).根据俯冲隧道中角力流的方向,这些壳源和幔源碎块可以发生不同方向的运动(郑永飞等,2013).上部低温/高压岩片折返而下部高温/超高压岩片继续俯冲可能是俯冲隧道内发生的普遍现象.这些地壳/地幔碎块可以在俯冲隧道内发生旋转,导致一个超高压岩片中不同部位记录的 P - T - t 轨迹出现差别.这些差异性的俯冲/折返过程可以被同一个碰撞造山带的高压/超高压岩石记录下来.某些超高压变质岩片可以在下地壳深度长时间存留,导致其在大陆碰撞的晚期阶段出现明显的退变质甚至热力学再平衡现象.

汇聚大陆边缘常常表现出俯冲物质构造行为的大范围变化.这可以由大陆俯冲过程中发生在不同深度的三种地壳拆离作用来解释(郑永飞等,2013):(1)浅部沉积物盖层与结晶基底之间的拆离;(2)上地壳与下地壳之间的拆离;(3)大陆地壳与下伏岩石圈地幔之间的拆离.在大陆俯冲隧道内,陆壳可在不同深度拆离形成大小不一的碎块和岩片,某些拆离下来的岩片可以在俯冲隧道中旋转,这可以解释在意大利阿尔卑斯 Sesian 地区所观察到的同一岩石构造单元内出现两阶段榴辉岩相

变质的现象(Rubatto *et al.*, 2011).

在大陆俯冲过程中形成的“动态三明治结构”,在超高压岩片折返后转化成碰撞造山带岩石圈的“静态三明治结构”,一般为交代岩石圈地幔在上层、俯冲上地壳折返超高压岩片在中间、俯冲下地壳折返超高压岩片在下层(图3).综合岩石学、数值模拟、地球化学和地球物理学研究结果,大陆俯冲一般分为三个阶段(郑永飞等,2013):(1)地壳物质在不同深度与俯冲大陆岩石圈发生拆离,并在俯冲隧道中遭受不同程度的变形变质作用;(2)在地幔深度,不仅被俯冲刮削下来的不同壳源物质之间发生混合,而且这些壳源物质与地幔楔底部刮削下来的橄榄岩碎块之间也发生混合,形成超高压变质混杂岩(图4);(3)这些混杂岩受到俯冲隧道内部角力流作用而折返至地壳深度,部分可能与没有深俯冲的低级变质岩发生混合,形成出露于地表的、反映不同变质温压条件且岩石学属性不一的构造混杂岩.大陆俯冲隧道中不同程度的物理混合和化学反应,在造山带混杂岩的形成和折返过程中发挥了关键作用(Zheng, 2012).大陆碰撞造山带中的一切超高压变质岩也由此可被看成是主要由大陆基底、沉积物盖层和少量来自地幔楔物质所组成的三组分混合体系(Zheng and Chen, 2016).鉴于这三种组分在大陆俯冲隧道中的机械混合,这些超高压变质岩即为构造混杂岩.因此,大陆碰撞造山带中出现的各种微观和宏观岩石构造单元,都可以归因于俯冲隧道过程这种构造机制.

大陆板块通常紧接着古大洋板块俯冲的结束才开始俯冲,当俯冲进入下地壳和大陆岩石圈地幔深度时发生高压—超高压变质作用.在古大洋板块俯冲转换到大陆板块俯冲这个构造过程中,大陆边缘岩石圈发生拆离变形、变质脱水和部分熔融,部分岩石沿俯冲隧道发生折返,结果形成不同等级的俯冲带变质岩(郑永飞等,2013).根据前人的动力学数值模拟结果,可将大陆板块的会聚过程概括为以下六种模式(李忠海,2014):(1)纯剪切增厚,(2)挤压褶皱,(3)单向高角度俯冲,(4)单向低角度俯冲,(5)双向俯冲,(6)俯冲板块的断离.在俯冲隧道中高压—超高压岩石的折返机制可以概括为八种模式(李忠海,2014):(1)逆冲断裂折返,(2)褶皱挠曲折返,(3)物质回旋折返,(4)构造增压折返,(5)俯冲板块“中上地壳”整体拆离和折返,(6)不同深度处周期性的韧性挤出,(7)俯冲板块断离引发的板

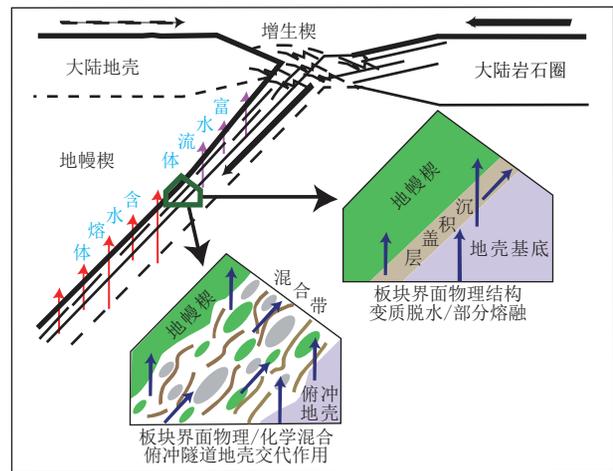


图4 大陆俯冲隧道内板片—地幔楔界面过程示意图

Fig.4 Schematic diagram for the slab-mantle interface in continental subduction channel

修改自郑永飞等(2013).大陆碰撞过程中在俯冲隧道板片界面发生两种过程:(1)物理混合,形成由变质岩组成的构造混杂岩;(2)化学反应,俯冲地壳释放的熔/流体交代上覆岩石圈地幔楔橄榄岩

块后撤折返,(8)俯冲隧道中地壳物质穿过“破裂的”上覆岩石圈而折返.在大陆俯冲隧道中,中上地壳的弱化和拆离是物质从俯冲到折返转换的先决条件.

一般来说,大陆俯冲和折返的动力学机制可以等效为流体动力学中的“倾斜隧道流模式”.在这个模式中,物质的俯冲或折返取决于俯冲隧道中“向下的同轴旋转流”和“向上的非轴对称流”这两种流动机制的竞争结果.但是,物质弱化的主导机制及其在大陆俯冲隧道中的控制作用尚没有得到很好的解决;地壳岩石中的水对于俯冲隧道和上覆岩石圈地幔的变形和破坏的作用尚有待于进一步评价.最近研究发现,俯冲带内上覆地幔楔的弱化强烈依赖于俯冲带温度结构及其引起的流体活动(Huangfu *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2017a).厚的上覆岩石圈和年轻的俯冲大洋岩石圈引起大洋板片发生低角度俯冲,导致俯冲带温度结构较冷.该条件下,俯冲带中流体活动较弱,对上覆岩石圈的弱化程度有限,导致俯冲带内物质仅能沿俯冲隧道折返.相反,薄的上覆大陆岩石圈和老的俯冲大洋岩石圈容易引起高角度俯冲,导致俯冲带温度结构较热,显著的流体活动对上覆地幔楔产生严重弱化,易于产生穿越地幔楔上升的通道,导致俯冲带内物质以底辟形式折返.

超高压地体从地幔深度折返至地壳深度的机理一直是大陆深俯冲研究的热点和前沿.俯冲隧道

模型也已经被用来解释大陆碰撞造山带高压/超高压变质岩的折返 (Beaumont *et al.*, 2009). 根据大陆俯冲隧道模型 (郑永飞等, 2013), 首先是俯冲地壳在不同深度发生拆离, 沿俯冲隧道依次差异性折返; 然后是大陆岩石圈与大洋岩石圈在过渡带发生断裂, 俯冲大陆板片整体折返. 折返的大陆地壳岩片经历了不同深度 P - T 条件的俯冲带变质变形作用, 即使同一岩片的不同部位在 P - T 轨迹上也存在差异. 这与大陆造山带的地壳结构格架一致. 在这种差异性折返过程中, 深部超高压岩石可能发生高压麻粒岩相叠加, 由此加热脱水作用所释放的流体有可能呈弥散式向上迁移, 成为引起浅部超高压岩石发生角闪岩相退变质的富水流体 (Zheng and Chen, 2017). 尽管目前对高压—超高压地体的折返机制仍有争议, 但是大小和形状不一的超高压岩片的确能够从冷的大陆俯冲隧道中折返上来. 俯冲隧道中的内力和外力共同作用于这种折返 (郑永飞等, 2013). 内力作用指浮力驱动的向上运动, 包括大陆俯冲的隧道流、地壳物质从深俯冲大陆岩石圈拆离后的楔形挤出、俯冲地壳物质在流体或熔体作用下的底辟式上升. 外力作用指拆离物质的向上流动, 包括与地壳剥蚀同期的大规模壳内逆冲、大陆碰撞过程中与地壳剥蚀同期的纯剪切加厚、汇聚陆块边缘处陆壳脱耦和拆离以及岩石圈运动学变化. 由于冷俯冲隧道中内外力的共同作用, 俯冲隧道内的地壳物质可以在不同深度经历不同程度和形式的变质变形乃至局部深熔作用. 这也是大陆碰撞过程中地壳拆离引起差异性折返的主要机制. 另一方面, 俯冲大陆岩石圈回卷也可以引起超高压岩石折返 (Brun and Faccenna, 2008). 这可以通过板片回卷引起俯冲隧道空间增大来解释, 这产生了构造拉张环境, 结果超高压岩片在浮力驱动下得以折返.

俯冲带中构造超压效应一直讨论不断. 超高压岩石中粒间柯石英的存在为进一步深入认识这个问题提供了新的视角. 粒间柯石英极其罕见, 早期在苏鲁仰口榴辉岩中首次发现粒间柯石英 (Liou and Zhang, 1996), 最近在大别山变沉积岩中发现了第二例粒间柯石英 (Liu *et al.*, 2017b). 与常见的产于石榴子石和绿辉石等高强度矿物中的包体不同, 大别山甘家岭地区变沉积岩中的粒间柯石英和柯石英包体多产出在相对低强度的白云石中, 指示其基质和寄主矿物都曾经历过超高压作用. Liu *et al.* (2017b) 的红外光谱研究表明, 粒间柯石英周边

的白云石基本不含水, 石榴子石仅含微量水, 说明流体活动性非常低. 这个结果指示构造超压或压力釜效应不可能是超高压矿物柯石英形成或保存的主要机制, 柯石英得以保存最关键的因素应该是局部低水活度.

陆壳由于具有相对古老、干和冷的特征, 一般认为其在俯冲过程中释放流体极为有限. 与大洋俯冲带相比, 大陆俯冲带之上的岩石圈以缺乏同俯冲大陆弧岩浆作用为特征 (Rumble *et al.*, 2003). 先前将这个特征归因于深俯冲大陆地壳相对缺水, 因此大陆俯冲带相对缺乏流体活动 (Liou *et al.*, 1997; Rumble *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 2003; McCarthy *et al.*, 2018). 但是对俯冲带地壳脱水行为的研究发现 (郑永飞等, 2016), 大陆和大洋地壳在 >30 km 的弧前深度都是以含水矿物作为水的主要储库, 两者俯冲隧道的温度在同等俯冲条件下 (主要是板块汇聚速率和俯冲角度) 相似, 弧下深度超高压变质温度在大陆和大洋俯冲隧道也相似. 因此, 大陆和大洋俯冲隧道中地壳岩石在弧下深度发生了类似程度的脱水作用. 地质上, 大陆岩石圈地幔楔橄榄岩在俯冲隧道界面受到俯冲陆壳及其碎块产生的流体交代, 的确形成了富化、富集的造山带岩石圈地幔交代岩 (Malaspina *et al.*, 2006a, 2006b, 2009; Zheng, 2012; 陈意等, 2015). 根据这个观察, 结合俯冲带热结构和地壳脱水行为研究, 郑永飞等 (2016) 提出大陆俯冲带之上缺乏同俯冲弧岩浆作用不是由于俯冲大陆地壳缺水, 而是由于上覆大陆岩石圈太厚导致地幔楔温度太低, 结果其中的交代岩在大陆俯冲阶段难以发生部分熔融引发大陆弧岩浆作用. 在碰撞后阶段, 这些交代岩发生部分熔融, 在碰撞造山带形成了各种镁铁质—超镁铁质火成岩 (Zhao *et al.*, 2013).

不过, 在大陆俯冲和折返过程中局部会有显著的流体活动. 对大别山花凉亭发育的复合多期脉体的研究发现, 三期脉体由均一的超高压流体在降温降压过程中依次结晶形成 (Guo *et al.*, 2015, 2016). 其中绿辉石—绿帘石脉体结晶最早, 绿帘石—石英脉次之, 蓝晶石—绿帘石—石英脉结晶最晚. 同时发现, 均一流体在结晶过程中导致元素重新分配, 其中难溶组分 (如 Mg、HFSE 和 HREE) 在早期结晶的脉体中富集; 易溶组分 (如 LILE 和 LREE) 在晚期结晶的脉体中富集. 大别山硬玉石英岩中锆石阴极发光图像、包裹体和地球化学特征指示其经历了流

体交代作用(Gao *et al.*, 2015). 其中交代重结晶锆石被明显改造为模糊的振荡环带或面状分带, 含有大量超高压变质矿物包裹体如柯石英、金红石和硬玉等, 并且具有比原岩年龄小但不一致的表观年龄. 这些特征指示了在超高压条件下, 原岩锆石被板块内部流体交代, 大量的超高压变质矿物如柯石英、金红石和硬玉沿着锆石裂隙进入核部, 受交代流体改造重结晶锆石的 U-Pb 同位素体系也发生不同程度的改造(Gao *et al.*, 2015). 对硬玉石英岩的进一步 Mg 同位素分析表明, 绝大部分样品具有显著高于地幔的 Mg 同位素组成, 其 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值为 $-0.16\text{‰} \sim 0.61\text{‰}$ (Gao *et al.*, 2019). 此外, 全岩 Mg 同位素与微量元素具有相关性, 指示了硬玉石英岩是原岩古元古代花岗岩在三叠纪经历高 $\delta^{26}\text{Mg}$ 流体交代作用形成. 这种交代流体主要来自于弧下深度俯冲变沉积岩的变质脱水作用. 考虑到硬玉石英岩在大别山的面积分布达 50 km^2 , 硬玉石英岩的 Mg 同位素结果指示在大陆俯冲带内 UHP 峰期附近变质流体活动规模是相当巨大的(Gao *et al.*, 2019).

大陆俯冲带高压/超高压岩石在峰期变质或早期折返时, 这些岩石有可能发生部分熔融(Zheng *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2017a), 同样会交代上覆地幔楔, 引起显著的壳幔相互作用, 大多体现在造山带橄榄岩和同折返或碰撞后的岩浆岩中(Zheng, 2012; Zhao *et al.*, 2013, 2017). 因此, 研究这些岩石的地球化学特征, 能够间接揭示陆壳衍生熔体的组成特征. 对苏鲁造山带经历超高压变质作用的混合岩样品进行详细分析, 发现俯冲板片不同部位/岩性岩石在大陆碰撞过程中具有差异性的熔/流体活动行为(Li *et al.*, 2016a). 在深熔岩石中的锆石、石榴石和独居石及淡色体的锆石核部, 都发现了显微花岗岩包裹体存在, 指示这些锆石域是通过转熔反应生长的. 深熔岩锆石和淡色体锆石核部具有一致的 U-Pb 年龄(230~227 Ma)、平坦的重稀土配分模式、弱或无 Eu 负异常, 说明这期深熔作用发生在俯冲过程中角闪岩相向榴辉岩相转变过程中. 深熔岩锆石和淡色体锆石核部都具有高 $\delta^{18}\text{O}$ 值以及转熔石榴石的存在, 指示其来自于变沉积岩的部分熔融. 浅熔岩中的转熔锆石和淡色体锆石边部具有一致的 U-Pb 年龄(218~214 Ma)、弱的振荡环带和陡峭的重稀土配分模式、显著 Eu 负异常, 以及变化的 Th、U、Nb 和 Ta 含量, 指示锆石生长于演化的含水熔体, 与淡色体中存在伟晶岩一致. 浅熔岩中的锆

石具有低 $\delta^{18}\text{O}$ 值和新元古代 U-Pb 年龄的残留岩浆核, 指示其原岩为低 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变花岗岩. 淡色体锆石边部氧同位素组成较高, 来自变沉积岩的部分熔融. 这些结果说明, 主要位于深俯冲陆壳板片顶部的变沉积岩在俯冲到地幔深部时被上覆地幔楔加热, 发生第一次部分熔融, 而折返过程中上地壳岩片在俯冲通道内发生第二次部分熔融(Li *et al.*, 2016a). 陆壳俯冲带总是具有低的热梯度, 俯冲板片顶部岩石在俯冲过程中随着深度增加而温度升高, 在变质脱水温度超过湿的固相线时就会发生部分熔融; 而深俯冲岩片内部在折返过程由于构造拉张条件下的地幔热传导也会发生部分熔融. 转熔锆石中柯石英的发现, 指示初始熔融发生在超高压变质域(Chen *et al.*, 2013b; Li *et al.*, 2016a). 高级变质岩中浅色体全岩成分总体具有较低的 REE 含量, 相对富集 LILE 和 LREE, 亏损 HFSE 和 HREE(Zhang *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2019). 同折返花岗岩则具有较高的 REE 和微量元素含量, 相对富集 LILE 和 LREE, 亏损 HFSE 和 HREE(Zhao *et al.*, 2017). 这种熔体组成差异的主要控制因素包括部分熔融反应、部分熔融过程中副矿物的差异溶解以及熔体演化过程中副矿物分离结晶作用(Chen *et al.*, 2017a).

俯冲带深部还有可能出现超临界流体(Hermann *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2008; Xia *et al.*, 2010; Mibe *et al.*, 2011; Zheng *et al.*, 2011; Kawamoto *et al.*, 2012; Huang and Xiao, 2015; Shen *et al.*, 2018). 这种流体对通常认为的不活动元素(如重稀土和高场强元素)具有很强的溶解和迁移能力. 如何识别这些超临界流体的存在及其在变质岩和岩浆岩中的反映是一个重大的前沿科学问题, 目前对这方面的研究还相当缺乏(Zheng, 2019). 由于经历深俯冲的陆壳岩石大量整体折返到地表, 并携带有地幔楔的橄榄岩, 这些超高压变质陆壳岩石和造山带橄榄岩为我们提供了能直接研究俯冲带深部流体以及壳幔相互作用的理想天然实验室.

实际上, 超高压变质岩从地幔深度向上折返过程中会发生显著的脱水作用, 特别是到达下地壳深度时这种退变质流体活动显著(Zheng, 2009; Zheng *et al.*, 2009; Zheng and Hermann, 2014). 如果流体以弥散式流动则引起角闪岩相退变质, 如果发生局部聚集则形成石英脉(Chen *et al.*, 2012). 当温度升高时, 超高压岩石还可能发生深熔作用(Zheng *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2017a). 在大陆俯冲过程中, 拆离

的地壳碎块和岩片在俯冲隧道内受到构造剪切,促使其变质脱水和部分熔融,产生富水流体和含水熔体(Gao *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2013a; Liu *et al.*, 2013),这样在板片—地幔界面既有物理混合也有化学反应.所有流体沿板片—地幔界面流动并上升进入上覆大陆岩石圈地幔楔,与地幔楔橄榄岩反应形成镁铁质到超镁铁质交代岩(Zheng, 2012).这些交代岩可以在造山带岩石圈地幔中储存数百万年甚至更长时间,在受到加热后发生部分熔融,形成同折返碱性岩浆作用(Zhao *et al.*, 2012, 2017)或者碰撞后镁铁质岩浆作用(Dai *et al.*, 2011, 2012; Zhao *et al.*, 2013).

2 俯冲带交代作用

地幔楔作为俯冲系统中连接俯冲盘和仰冲盘的关键构造单元,在地球层圈之间物质循环和能量交换等方面起着重要作用.造山带橄榄岩则能够直接记录俯冲带多种性质的熔/流体交代作用(硅酸盐熔体、碳酸盐熔体和含硅酸盐组分的C-H-O流体/超临界流体),以及复杂的壳幔物质循环过程等.采用高空间分辨率、高精度的测试方法对俯冲带橄榄岩进行俯冲带壳幔相互作用的系统研究,不仅可以从微观尺度上约束复杂的化学交代过程和变质变形历史,还可以与宏观构造的时、空演化相联系.

前人对大洋弧玄武岩和大陆弧安山岩的研究已经明确,俯冲洋壳脱水交代上覆地幔楔中的橄榄岩,地幔楔发生部分熔融引起弧岩浆作用(Stern, 2002; Eiler, 2003).部分弧火山岩还记录了沉积物部分熔融产生的熔体信息(Elliott, 2003).与洋壳俯冲带相比,陆壳俯冲带同样发生了显著的脱水和熔融过程.实际上,俯冲进入地幔深度的地壳岩石都会发生不同程度的部分熔融,所产生的熔体会交代不同层位和不同性质的地幔.因此,这些熔/流体活动与板片内外的岩石反应,会记录在不同类型的俯冲带变质岩和岩浆岩中(图5).汇聚大陆边缘的造山带橄榄岩可能保存这些过程的直接记录(Li *et al.*, 2016b, 2018; Chen *et al.*, 2017b, 2017c),而碰撞后岩浆作用产生的岩浆岩则间接记载了这些过程(Zhao *et al.*, 2013).深俯冲陆壳熔/流体释放如何影响上覆地幔?俯冲带壳幔相互作用的发生时间、机制和过程如何?深俯冲陆壳物质如何发生再循环?对这些方面的深入研究将有助于揭示深俯冲地壳的化学变化、陆壳再循环的过程与机制以及大陆玄武岩的

成因.

世界上典型的超高压变质带中很多变质岩都含有俯冲带深部壳幔相互作用的记录,主要体现在超高压变质岩的岩石和脉体组成、造山带石榴橄榄岩和辉石岩以及和造山带出露的镁铁质岩浆岩中(Malaspina *et al.*, 2009; Zheng, 2012; 陈意等, 2015; Li *et al.*, 2016b; Chen *et al.*, 2017b).石榴橄榄岩一般呈大小不等的透镜状岩块分布于长英质片麻岩中,与榴辉岩共生的较少;主要岩石类型包括石榴二辉橄榄岩、石榴方辉橄榄岩和含石榴石纯橄岩.地幔楔来源的石榴橄榄岩(M型)是大陆深俯冲/折返过程中从上覆岩石圈地幔楔底部刮削下来的,与超高压变质的地壳长英质和镁铁质岩石一起形成了构造混杂岩.这类石榴橄榄岩对研究大陆俯冲带壳幔相互作用具有重要意义.造山带M型橄榄岩记录了大陆碰撞造山过程中俯冲陆壳衍生的流体和熔体对上覆岩石圈地幔的交代作用.由于这些橄榄岩最初位于大陆俯冲带上部的大陆岩石圈地幔楔底部,它们在受到俯冲/折返大陆地壳构造剥蚀的同时,在俯冲隧道内部与地壳衍生的熔/流体之间发生化学反应(图5).在这类造山带橄榄岩中发现角闪石和金云母等含水矿物,为这些岩石受到过地壳交代作用提供了矿物学证据.对造山带石榴橄榄岩中锆石及其它熔流体交代形成的金云母、角闪石和Ti-斜锆镁石等矿物的研究能提供壳幔相互作用的丰富信息.

造山带橄榄岩在岩石学、微量元素和放射性成因同位素上都表现出较大的变化范围.这些特征不仅与长英质熔体交代有关,还可能与镁铁质熔体的提取有关.熔体交代作用通常发生在俯冲带之上的俯冲隧道内部,参与反应的地幔楔可以是软流圈地幔(洋壳—洋壳俯冲带)、新生的大陆岩石圈地幔(洋壳—陆壳俯冲带)或者是古老的大陆岩石圈地幔(大陆—大陆俯冲带).随着长英质熔体的成分变化,交代后的地幔可以不同程度地富集辉石或角闪石、不相容性元素以及放射成因同位素(Zheng, 2019).相应的,橄榄石在熔体—橄榄岩反应过程中会不断消耗.这些超镁铁质岩石以不同大小分布在大洋岩石圈地幔和大陆岩石圈地幔中,由于热力学上不受地幔对流的影响,它们可以长时间在岩石圈地幔中保存其独特的地球化学特征.被交代的地幔橄榄岩部分熔融产生的镁铁质熔体相对富集不相容元素.镁铁质熔体的提取会使残留的超镁铁质地

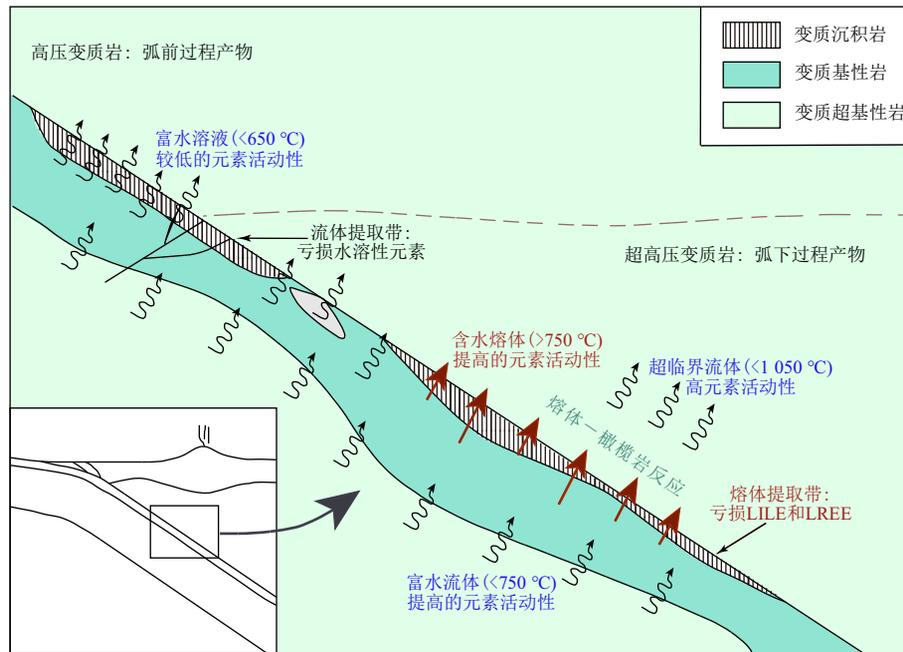


图5 俯冲带不同深度流体组成特征及对地幔楔交代的影响

Fig.5 The composition of subduction zone fluids and their metasomatism to the mantle wedge in subduction zones
修改自 Zheng(2019)

幔亏损不相容元素,形成具有正常 MORB 型的微量元素分布.因此,通过对造山带 M 型橄榄岩的细致研究能揭示大陆俯冲隧道内丰富的壳幔相互作用信息.

俯冲板片脱水或部分熔融形成的熔/流体交代橄榄岩会在矿物或地球化学组成上留下印记.由于这些熔/流体富集 H_2O 、LILE、LREE 和其他不相容元素,交代的橄榄岩会含有含水矿物(如金云母和角闪石)、新生锆石或其他交代矿物,也会引起矿物的 LILE 和 LREE 含量升高(Zheng, 2012, 2019).交代熔/流体还会携带一些矿物,物理运移到橄榄岩中,形成与橄榄岩基质化学不平衡的矿物特征(Liati and Gebauer, 2009; Zheng, 2019).熔/流体交代橄榄岩会形成辉石岩,引起 Sm/Nd 比值的强烈分异和微观尺度巨大的同位素不均一(Borghini *et al.*, 2013).这对于理解地幔同位素不均一性具有重要意义.

俯冲大陆地壳如何交代上覆地幔楔?大陆地壳发生深俯冲的基本原因是大洋地壳俯冲的重力牵引,俯冲古洋壳对上覆地幔楔是否发生过交代作用?对苏鲁和柴北缘造山带石榴橄榄岩开展的系统研究,发现在大陆碰撞过程中地幔楔橄榄岩在大陆俯冲隧道中经历了来自深俯冲陆壳不同部位的多种流体的多期交代作用,并识别出大陆俯冲带地

幔楔受到了古洋壳来源流体的交代作用(Su *et al.*, 2016, 2017; Li *et al.*, 2016b, 2018; Chen *et al.*, 2017b).苏鲁造山带荣成橄榄岩为纯橄岩,其矿物组合为橄榄石+斜方辉石+尖晶石+铬铁矿+角闪石+蛇纹石+绿泥石+白云石,其较高的难熔组分含量和矿物组成特征指示这些纯橄岩为经历熔体提取的残留大陆岩石圈地幔.它们富集的 LREE 和 LILE、较高的初始 Sr 同位素组成以及异常的氧同位素组成,指示这些纯橄岩经历了地壳来源流体的交代作用.矿物和岩石学特征表明,纯橄岩从地幔楔进入俯冲隧道过程中,在弧前深度受到第一期俯冲大陆地壳衍生的流体交代作用,形成交代橄榄岩;这些交代岩在俯冲隧道内进一步俯冲至弧下深度,并在 4.0~4.4 GPa 和 773~838 °C 经历超高压变质作用,白云石分解形成菱镁矿和文石.第二期交代作用发生在初始折返阶段,从碳酸盐熔体中生长白云石质碳酸盐,而第三期交代作用发生在晚期折返阶段,形成交代锆石和角闪石.这些多阶段地壳交代作用指示,地幔楔底部的橄榄岩在大陆俯冲过程中被刮削进入俯冲隧道,并且在不同深度经历不同组分地壳来源流体的交代作用(Li *et al.*, 2016b, 2018).对大别-苏鲁造山带两个具有代表性的橄榄岩及其交代脉体(大别毛屋和苏鲁蒋庄)进行了系统研究,发现深俯冲陆壳俯冲到 >170~200 km 时

可对地幔楔底部进行强烈的非均衡改造(Chen *et al.*, 2017c; Su *et al.*, 2019). 深俯冲陆壳释放富 Si-Al 质熔体, 以层析效应或不同熔/岩比的机制可不同程度地改造地幔楔底部, 形成富石榴石脉和富辉石脉, 从而不同程度地改变地幔化学组成. 交代过程中新生硫化物的沉淀会引发强烈的 Os 同位素分馏效应. 毛屋石榴单斜辉石岩具有极低的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值, 指示了俯冲带深部先前大洋板片中沉积碳酸盐来源的流体交代了地幔楔(Shen *et al.*, 2018). 熔/流体—地幔楔相互作用不仅改变地幔楔岩性和化学组成, 还能够改变交代介质成分, 交代体由于其易熔特征可为俯冲带各类深部地幔岩浆提供源区物质.

柴北缘造山带绿梁山地区石榴二辉橄榄岩和纯橄岩大多数样品表现出共存矿物氧同位素不平衡(图 6), 指示这些超镁铁岩在高温条件下经历了与低 $\delta^{18}\text{O}$ 和高 $\delta^{18}\text{O}$ 流体的相互作用(Chen *et al.*, 2017b). 在橄橄榄岩和辉石岩中识别出了两类锆石区域: 一类具有低 REE 含量、平坦的 HREE 配分和无 Eu 负异常, 含有橄橄榄石+斜方辉石+单斜辉石+石墨包裹体, U-Pb 年龄为 417~426 Ma, 指示它们从富水流体和含水熔体中生长; 另一类具有低 Th/U 比值 (<0.1)、高 REE 含量、陡峭 REE 配分和明显 Eu 负异常, 含有多相包裹体方解石+钾长石和石英+钾长石+斜长石, U-Pb 年龄为 404~405 Ma, 表明它们在折返晚期阶段从含水硅酸盐和碳酸盐熔体中生长. 结合区域超高压变质岩的深熔作用, 揭示了造山带橄橄榄岩和辉石岩在深俯冲陆壳折返和碰撞后阶段经历了深俯冲陆壳来源熔/流体的多期交代作用. 已有研究表明柴北缘造山带深俯冲大陆地壳具有正常或高 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 不能提供低 $\delta^{18}\text{O}$ 交代流体来源, 因此这些低 $\delta^{18}\text{O}$ 流体更可能来源于经历过海水高温热液蚀变的俯冲洋壳(Chen *et al.*, 2017b). 这些造山带橄橄榄岩/辉石岩记录了大陆俯冲隧道中洋壳和陆壳来源流体与上覆地幔楔差异的壳幔相互作用.

俯冲带壳幔相互作用会使地幔源区产生岩石学和地球化学不均一性, 进而影响地幔和地壳的动力学和化学演化. 由于水对地幔橄橄榄岩的熔融温度、压力、熔融程度和熔体组成具有显著影响, 有必要对壳幔相互作用过程对地幔楔水含量的效应进行深入研究. 笔者对苏鲁造山带胡家林石榴单斜辉石岩进行了全岩地球化学、矿物水含量、主微量元素和氧同位素的联合分析, 发现熔体—橄橄榄岩反应

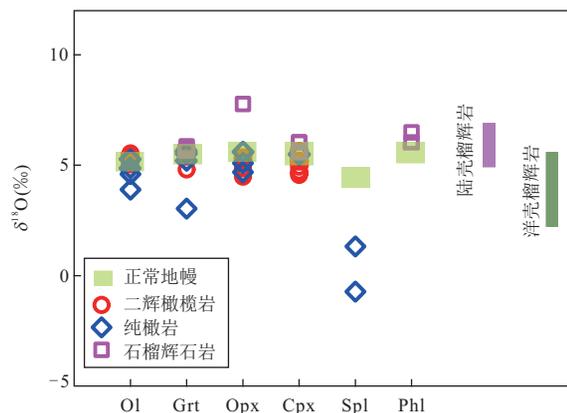


图 6 柴北缘绿梁山造山带橄橄榄岩造岩矿物氧同位素组成
Fig. 6 The oxygen isotope composition of rock-forming rocks in orogenic peridotite from Lüliangshan in North Qaidam

数据来自 Chen *et al.* (2017b)

形成的石榴辉石岩具有高水含量和变化的 $\text{H}_2\text{O}/\text{Ce}$ 比值, 能为镁铁质岩浆岩提供高水含量的地幔源区(Li *et al.*, 2018). 胡家林石榴单斜辉石岩具有富集 LREE、Pb 正异常和弱 Nb、Ta 负异常的特征, 部分单斜辉石和石榴石具有亏损的氧同位素组成. 这表明石榴单斜辉石岩原岩受到了俯冲地壳来源熔/流体交代作用. 结合同地区出露的纯橄岩和石榴橄辉岩中三叠纪锆石的出现, 指示石榴单斜辉石岩由地幔楔橄橄榄岩与三叠纪深俯冲大陆地壳部分熔融衍生的含水长英质熔体发生交代反应而形成. 根据单斜辉石和石榴石水含量获得全岩水含量和 $\text{H}_2\text{O}/\text{Ce}$ 比值分别为 $(424\sim 660) \times 10^{-6}$ 和 63~145. 辉石岩的水含量高于洋中脊玄武岩的地幔源区, 相似或高于洋岛玄武岩的地幔源区, 接近岛弧玄武岩岩浆源区的下限; 辉石岩的 $\text{H}_2\text{O}/\text{Ce}$ 比值高于夏威夷石榴辉石岩和大洋辉石岩. 这些特征表明, 交代富辉石地幔岩石与高水含量和变化 $\text{H}_2\text{O}/\text{Ce}$ 比值的地幔源区有关, 一些板内玄武岩的源区可能为橄橄榄岩和辉石岩的混合物(Li *et al.*, 2018).

造山带橄橄榄岩中锆石记录了俯冲带深部壳幔相互作用的信息(图 7). 原始地幔橄橄榄岩由于全岩低的 Zr 含量和 Si 活度, 理论上无法结晶出锆石. 但是许多造山带橄橄榄岩、橄橄榄岩包体和蛇绿岩中都发现锆石的存在. 传统上认为, 橄橄榄岩中这些锆石是在其侵位到地壳过程中地壳混染所致. 然而, 橄橄榄岩薄片中的锆石颗粒和锆石中橄橄榄石包裹体的发现说明橄橄榄岩中锆石来自寄主橄橄榄岩本身而非地壳

混染.对于橄榄岩中锆石成因存在很大争议,主要机制有地幔流体交代、俯冲地壳流体交代、橄榄岩侵位时花岗质岩浆注入和俯冲地壳残片.对苏鲁造山带橄榄岩中锆石进行分析,明确了橄榄岩中锆石的成因机制为地壳来源熔体交代形成(Li *et al.*, 2016b, 2018),从而为橄榄岩中锆石年龄和地球化学信息的正确解释奠定了基础.苏鲁造山带荣成橄榄岩中含有残留锆石和新生长锆石,其中新生长锆石具有低 Th/U 比值、低 HREE 含量、陡峭的中重稀土配分、负 Eu 异常、极低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-11.3\text{‰}\sim 0.9\text{‰}$ 和三叠纪 U-Pb 年龄,指示它们是深俯冲大陆地壳折返过程中流体交代橄榄岩形成(图 7).橄榄岩中交代流体的渗滤得到了含水矿物如蛇纹石、角闪石和绿泥石的证实.残留锆石表现出岩浆锆石的特征,其元素和同位素组成与大别—苏鲁造山带超高压变质岩中原岩锆石相似.这说明橄榄岩中残留岩浆锆石是由深俯冲大陆地壳脱水产生的交交流

体物理搬运进入橄榄岩的.对柴北缘造山带橄榄岩中锆石的地球化学特征研究也得出了类似结论,其较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值也指示了地壳来源流体的交代作用(图 6).因此,地壳来源流体在大陆俯冲隧道的板片—地幔界面中同时把 Zr 和 Si 等化学组分以及细小的锆石颗粒从深俯冲陆壳岩石携带到橄榄岩中,在这种壳幔相互作用过程中同时存在溶解元素的化学迁移和细小矿物颗粒的物理搬运(Zheng and Hermann, 2014).

前人较多关注深俯冲板片释放熔/流体交代地幔楔(正向交代)形成弧岩浆源区的过程和机制,然而对地幔楔岩石能否脱水交代深俯冲地壳(反向交代)并不清楚.对欧洲西阿尔卑斯造山带 Dora-Maira 地体白片岩的地球化学研究,首次发现地幔楔交代岩能够脱水反向交代俯冲地壳岩石(Chen *et al.*, 2016, 2017d).锆石和全岩地球化学分析表明,白片岩和围岩变花岗岩具有类似的源区,为 S 型花岗岩

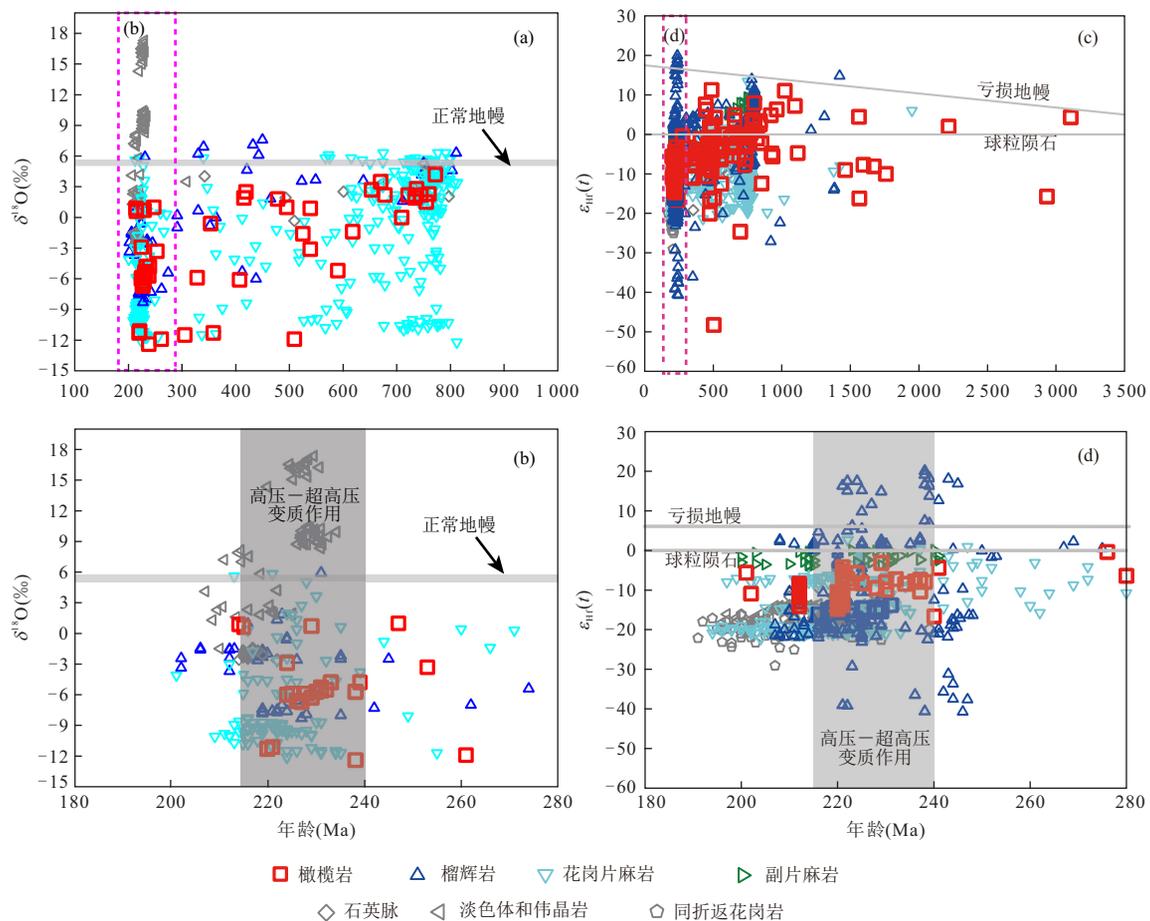


图 7 大别—苏鲁造山带 M 型橄榄岩及相关岩石中锆石 O 和 Hf 同位素与年龄相关图解

Fig. 7 The relationships between O-Hf isotope compositions and U-Pb ages for zircon from M-type peridotites and related rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt

引自陈仁旭等(2019)

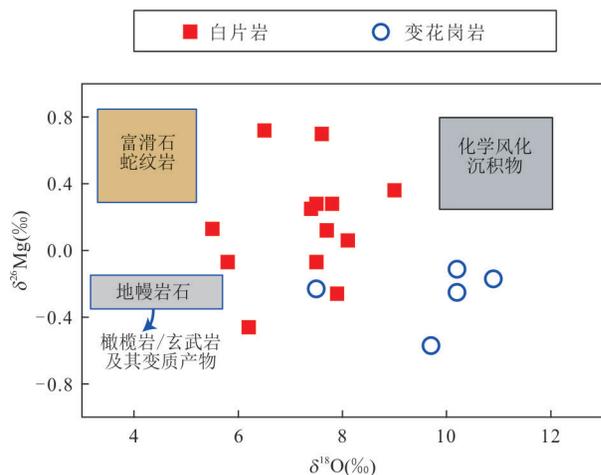


图 8 大陆俯冲带超高压白片岩镁和氧同位素组成图解

Fig.8 The Mg and O isotope compositions of UHP whiteschist from the continental subduction zone in west-ern Alps

修改自 Chen *et al.* (2016). 白片岩经受了富镁流体的交代作用, 流体来源于蛇纹石化橄榄岩在弧下深度的脱水, 属于幔源流体. 因此, 在俯冲带深部存在幔源流体对地壳岩石的反交代作用

(Chen *et al.*, 2017d). 这些结果澄清了关于 Dora-Maira 地体白片岩原岩属性的长期争议. 通过对白片岩的 Mg-O 同位素分析 (图 8), 发现白片岩具有高温岩石中最重的 Mg 同位素组成, 指示了富滑石蛇纹岩变质脱水的流体交代作用; 由于交代流体具有较低 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 而洋底低温水化形成的蛇纹岩通常具有高 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 这种富滑石蛇纹岩应该来自高温地幔楔蛇纹岩. 考虑到 Dora-Maira 地体为超高压变质大陆地体, 这种流体交代很可能发生在板片-地幔楔界面的大陆俯冲隧道中. 因此, 这些结果在查明大陆俯冲隧道中富 Mg 流体来源的基础上, 首次提供了地幔楔蛇纹岩来源流体对深俯冲陆壳岩石反交代作用的典型实例. 这种反交代极大改变了陆壳的地球化学组成, 使白片岩具有了富 Mg、贫 Na、Fe 和 Ca 以及 LILE 的特征 (Chen *et al.*, 2016, 2017d).

3 俯冲带岩浆作用

俯冲带岩浆岩是大洋/大陆板块俯冲物质再循环的表现形式. 这些岩石样品记录了俯冲带从深部地幔到地表的过程, 也为认识地球深部物质循环提供了理想的天然样品. 自从板块构造理论建立以来, 国际上对现代大洋俯冲带壳幔相互作用的研究相对较多, 对大洋弧和大陆弧火成岩成因中的地壳

物质再循环获得了相对成熟的认识. 与此相比, 国际上对古大洋俯冲带和大陆俯冲带壳幔相互作用的研究相对薄弱. 由于在这类俯冲带出露有不同成分的火成岩, 不仅包括古洋壳俯冲过程中产生的大洋弧玄武岩和大陆弧安山岩, 而且包括汇聚板块边缘的俯冲后洋岛型和岛弧型镁铁质火成岩. 这些岩浆岩为我们研究地质历史时期地球深部物质再循环提供了良好的研究对象.

前人已经对现代洋壳俯冲带壳幔相互作用以及再循环洋壳对洋壳玄武岩地幔源区的影响有了大量研究 (Zindler and Hart, 1986; Hofmann, 1997; Bebout, 2007, 2014; Spandler and Pirard, 2013). 研究发现, 大洋俯冲带具有“冷”和“暖”之分, 由此造成在俯冲板片地震和弧火山岩分布上出现显著差别 (Peacock and Wang, 1999). 在“冷”的大洋俯冲带, 俯冲地壳岩石在弧前 (forearc) 深度 (<60~80 km) 不会发生显著脱水, 只是发生蓝片岩相到低温榴辉岩相变质作用, 而在弧下深度 (80~200 km) 才发生大规模脱水引起弧火山作用. 相反, 在“暖”的大洋俯冲带, 俯冲地壳岩石在弧前深度就发生大规模脱水, 结果在弧下深度脱水较少, 没有产生大规模弧火山作用. 无论如何, 深俯冲洋壳释放的流体交代上覆地幔楔橄榄岩, 而后其中的富化部分发生部分熔融形成大洋弧玄武岩或大陆弧安山岩 (Zheng, 2019); 残留的板片将继续下沉进入深部地幔, 结果对地幔地球化学成分产生显著影响 (Allègre and Turcotte, 1986; Hofmann, 1997; Anderson, 2006). 因此, 俯冲进入弧下深度的大洋地壳或者衍生出流体与地幔楔橄榄岩反应后形成大洋弧玄武岩或者大陆弧安山岩, 或者进一步俯冲在弧后 (postarc) 深度发生部分熔融, 所产生的熔体与地幔楔橄榄岩反应形成板内玄武岩的地幔源区 (Ringwood, 1990; Zheng, 2012, 2019), 由此与在俯冲带开始的岩石圈深度地壳变质脱水过程一起形成完整的再循环过程.

大陆俯冲带具有低的热梯度 (Ernst and Liou, 1995, 2008). 大陆地壳俯冲/折返过程中也存在显著的熔/流体活动 (Zheng *et al.*, 2003, 2011; Zhang *et al.*, 2008; Hermann *et al.*, 2013; Zheng and Hermann, 2014; Chen *et al.*, 2017a). 这意味着, 在这类“冷”的大陆俯冲带, 俯冲地壳岩石可能在 <60~80 km 的地壳深度没有发生显著的变质脱水, 只是发生蓝片岩相到低温榴辉岩相变质作用, 而在 80~200 km 的

地幔深度才发生显著的变质脱水乃至部分熔融,但是由于上覆的大陆岩石圈地幔较冷也未能引发同俯冲弧岩浆作用(郑永飞等,2016).不过,这些熔/流体不仅在地壳深度的俯冲大陆地壳内部流动引起角闪岩相退变质和形成各种成分的脉体,而且在地幔深度交代上覆地幔楔橄榄岩.因此,大陆深俯冲不但能够产生超高压变质作用,而且会在大陆俯冲隧道内产生显著的壳幔相互作用(Zheng,2012).目前,大陆俯冲隧道过程流体活动和壳幔相互作用,正在成为国际地球科学界越来越关注的研究领域.

大陆碰撞造山带同折返或碰撞后岩浆作用与俯冲带深部壳幔相互作用密切相关.近期研究发现,在同折返阶段,深俯冲大陆地壳可以发生大规模部分熔融,形成花岗质岩体(Zhao *et al.*,2017).这些花岗质岩浆岩具有岛弧型微量元素和富集的同位素组成特征,可以作为深部壳幔相互作用的长英质熔体来源.一些同折返基性岩石可能是俯冲板片衍生熔体交代地幔楔而后部分熔融的产物(Zhao *et al.*,2012).这些岩石中还保存有俯冲岩片的特征矿物(如继承锆石核)以及元素和同位素记录.造山带中碰撞后产出的基性岩有的具有 LILE 和 LREE 富集、HFSE 和 HREE 亏损等类似岛弧玄武岩的微量元素配分特征;而有的则具有 LREE 富集、Pb 负异常和 HFSE 正异常等类似洋岛玄武岩的微量元素配分特征(Zhao *et al.*,2013).这暗示地幔源区性质不同,可能分别是俯冲陆壳、俯冲洋壳及上覆沉积物部分熔融产生熔体交代的产物(Dai *et al.*,2015a; Xu and Zheng,2017).

3.1 深俯冲陆壳物质再循环及其衍生的镁铁质火成岩记录

大陆碰撞造山带同碰撞和碰撞后镁铁质岩浆岩间接记录了俯冲带深部壳幔相互作用信息.由于大陆俯冲带热梯度较低,因此尚未发现同俯冲镁铁质弧岩浆作用.不过,Fang *et al.*(2019)在华北克拉通东南缘发现有 244~247 Ma 侵位的基性岩,侵位年龄与大别—苏鲁造山带的华南陆块俯冲到华北陆块之下的时限(Zheng *et al.*,2003,2009)一致.这些基性岩具有洋岛型微量元素分布特征、较低的初始 Sr 同位素比值(0.705 7~0.709 1)和较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-3.8~-1.2),指示它们的源区是俯冲古特提斯洋壳衍生熔体交代的地幔楔.三叠纪同岩浆锆石具有变化的 Hf-O 同位素组成,表明地壳组分中既有蚀变洋壳也有陆源沉积物.这些岩石的高 Fe/Mn 和

Zn/Fe 比值表明,地幔源区以超镁铁质辉石岩为主.辉石岩熔融过程中熔体活动性不相容元素相对于熔体不活动性不相容元素发生了显著分异,为形成洋岛型微量元素分布特征奠定了基础.这种镁铁质岩浆作用可能是俯冲古特提斯大洋板片进入地幔深度后大陆板片在早三叠世接续俯冲,由于大陆地壳浮力较大,结果在岩石圈深度发生阻塞,古特提斯大洋板片发生回卷引起构造拉张,在原来的地幔楔之下发生软流圈加热造成的.因此,同俯冲镁铁质岩浆作用记录了华北陆块和华南陆块碰撞过程中从大洋俯冲到大陆碰撞的构造转换.

对大别造山带碰撞后镁铁质—超镁铁质侵入岩(包括辉长岩、辉长闪长岩、辉石岩和角闪石岩)进行的详细岩石学和地球化学研究(Dai *et al.*,2015b,2016a),不仅识别出了俯冲华南陆壳物质及其携带的大气稀有气体再循环的信息,还区分出了地幔源区形成过程中的源区混合和岩浆演化过程中的岩浆混合.大别造山带碰撞后椒子岩辉长岩和辉长闪长岩形成于早白垩世(126~130 Ma),残留锆石核具有新元古代 U-Pb 年龄(765 ± 8 Ma),与大别造山带超高压变火成岩的原岩年龄一致.这些镁铁质岩浆岩具有岛弧型微量元素分布特征和富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成,表明它们来源于富化、富集的造山带岩石圈地幔.该地幔源区是在三叠纪大陆碰撞过程中,俯冲华南陆壳物质部分熔融产生的长英质熔体交代上覆华北岩石圈地幔楔橄榄岩形成的.这些镁铁质岩浆岩中单斜辉石和斜长石具有复杂的结构和成分环带.单斜辉石核部与边部的 Cr、Ni、Ba 和 Rb 含量的差异指示,核部结晶于含金云母地幔橄榄岩部分熔融产生的镁铁质熔体,而边部结晶于辉石岩部分熔融产生的镁铁质熔体.斜长石原位 Sr 同位素组成具有较大变化,暗示大陆碰撞过程中不同陆壳物质来源的长英质熔体与上覆地幔楔橄榄岩的源区混合形成了不均一的富化、富集地幔交代岩,在碰撞后阶段这些不均一的地幔交代岩发生部分熔融形成的镁铁质熔体之间的岩浆混合,最终形成了地球化学不均一的碰撞后镁铁质岩浆岩.这些岩石中辉石具有低 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值(0.002~1.8 Ra)和类似于大气的 Ar-Ne 同位素组成(图 9),并且辉石 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值与全岩地球化学显示一定的相关性,指示俯冲陆壳来源的长英质熔体、俯冲陆壳携带的大气稀有气体与地幔楔橄榄岩在源区混合形成了富化、富集的造山带岩石圈地

幔,并作为碰撞后镁铁质—超镁铁质岩浆岩的源区。因此,大陆造山带碰撞后镁铁质岩浆岩不仅记录了俯冲陆壳物质再循环的信息,也记录了其携带的大气稀有气体再循环的信息。

大陆碰撞造山带碰撞后安山岩也间接记录了俯冲带壳幔相互作用。Dai *et al.* (2016b) 对大别造山带北淮阳碰撞后安山质火山岩进行了同位素年代学和地球化学研究,发现了俯冲华南陆壳物质再循环及其壳幔相互作用的鉴定性证据。这些安山岩主体为粗面安山岩,含少量玄武粗面安山岩、安山岩、英安岩和粗面岩,锆石 U-Pb 年龄为 124~130 Ma。它们含有丰富的残留锆石核,其 U-Pb 年龄为新元古代和三叠纪,分别与大别—苏鲁造山带超高压变火成岩的原岩年龄和变质年龄一致。它们具有岛弧型微量元素分布特征以及富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成,即高 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 比值、低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值。同岩浆锆石具有低 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和变化的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,部分同岩浆锆石和残留锆石具有低于正常地幔的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。新元古代 U-Pb 年龄和 ^{18}O 亏损是区分俯冲华南陆块与上覆华北陆块的典型标志 (Zheng, 2012; Zhao *et al.*, 2017)。这些地球化学特征表明,大别造山带碰撞后安山质火山岩来源于交代富集的造山带岩石圈地幔。在三叠纪华南陆块与华北陆块碰撞过程中,深俯冲华南陆壳在弧下深度发生部分熔融,所产生的长英质熔体在大陆俯冲隧道内交代上覆华北岩石圈地幔楔橄榄岩,通过熔体—橄榄岩反应形成了富化、富集的镁铁质地幔交代岩。这种地幔交代岩在早白垩世发生部分熔融,形成了安山质火山岩。因此,大陆俯冲隧道内板片—地幔相互作用是形成碰撞造山带幔源岩浆岩地幔源区的关键过程,而加入地幔楔中长英质熔体的比例决定了这些幔源岩浆岩的岩石化学和地球化学成分。

3.2 俯冲古洋壳物质再循环及其衍生的镁铁质火成岩记录

在造山带镁铁质火成岩中识别出再循环古洋壳物质的信息比较困难。对秦岭—桐柏—红安—大别—苏鲁造山带早古生代到新生代镁铁质火成岩进行的锆石学和全岩地球化学研究,为示踪大陆俯冲带先前俯冲古洋壳物质再循环提供了地球化学证据 (Dai *et al.*, 2016a, 2017a, 2017b, 2018; Xu and Zheng, 2017; Xu *et al.*, 2017; Zheng *et al.*, 2019)。

桐柏造山带早古生代镁铁质火成岩形成于晚奥陶世—早志留世 (436~449 Ma), 具有岛弧型微

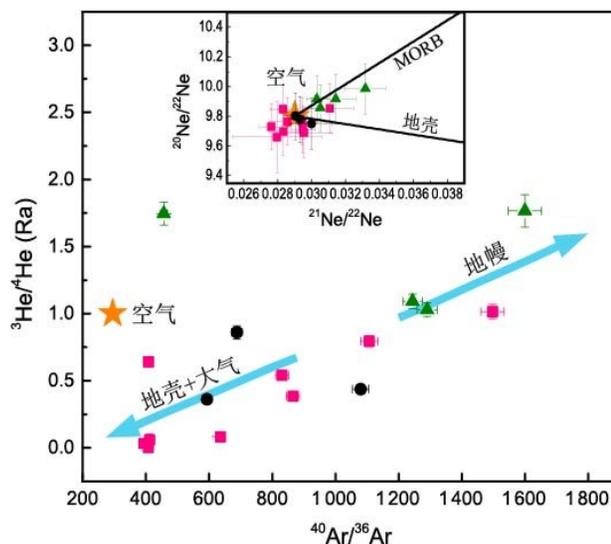


图9 碰撞造山带镁铁质岩浆岩矿物稀有气体同位素组成图解
Fig.9 The noble gas isotope compositions of mafic minerals from mafic igneous rocks in the Dabie orogen

修改自 Dai *et al.* (2016a). 俯冲地壳可以将水及其溶解的大气组分稀有气体同位素信息带入地幔,并最终以镁铁质岩浆岩的形式重新返回到地表,实现地表物质再循环

量元素分布特征、相对亏损的 Sr-Nd 同位素组成 (Zheng *et al.*, 2019). 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 8.9~14.8, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 4.4‰~5.9‰, 部分锆石域高于或低于正常地幔锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值。这些地球化学特征表明,它们来自 LILE 和 LREE 富集但放射成因同位素亏损的富化地幔源区。该地幔源区属于造山带岩石圈地幔,是先前俯冲的原特提斯洋壳来源的流体与上覆地幔楔发生交代反应形成的。模拟计算结果显示,1%~10% 俯冲二郎坪洋壳来源的富水溶液和 0.05%~0.1% 沉积物来源的含水熔体分别与地幔橄榄岩反应形成的地幔交代岩,在部分熔融后就能够产生桐柏镁铁质火成岩的微量元素和 Sr-Nd 同位素组成。该交代作用可能发生在二郎坪岛弧与北秦岭微陆块碰撞之前的原特提斯洋壳俯冲过程中,形成了富集辉石的超镁铁质交代岩。

桐柏—红安造山带碰撞后白垩纪镁铁质火成岩记录了先前俯冲古洋壳物质在弧后 (postarc) 深度再循环的地球化学证据 (Dai *et al.*, 2017a)。这些白垩纪火成岩具有洋岛型微量元素分布特征、低的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (-1.8~4.5) 和正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (4.7~10.3)。因此,它们源区是先前俯冲古特提斯洋壳衍生熔体与地幔橄榄岩反应形成的超镁铁质交代岩,并且俯冲古洋壳在部分熔融过程中金红石发生分解,产生了 Nb 和 Ta 等高场强元素不

亏损的特点.熔体—橄榄岩反应形成了富辉石岩的地幔源区,其部分熔融便形成了桐柏—红安造山带碰撞后镁铁质岩浆岩.模拟计算结果表明,3%~10%俯冲古特提斯蚀变玄武质洋壳和0.1%~0.25%沉积物来源的熔体与亏损地幔橄榄岩反应形成的地幔源区,其发生部分熔融就能够解释桐柏—红安白垩纪镁铁质火成岩的微量元素和Sr-Nd同位素组成.

Xu and Zheng(2017)对中国东部新生代玄武岩的地球化学成分进行了系统总结,发现这些玄武岩的地幔源区含有三种组分:(1)亏损地幔,(2)俯冲大洋板片中的镁铁质洋壳和沉积物,(3)俯冲板片从大陆岩石圈中刮削下来的下地壳.华北和华南新生代玄武岩地幔源区均含有亏损地幔、俯冲大洋板片中的镁铁质洋壳和沉积物组分.Xu *et al.*(2017)对这些玄武岩的Pb同位素组成与其它地球化学变量之间的关系进行了进一步研究,发现华北新生代玄武岩中存在低 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值,并且在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值之间出现负相关关系,这可能是其源区中所含的低 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、高 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 的大陆下地壳组分所致.相反,华南新生代玄武岩中缺乏低 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值,并且在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值之间呈现正相关关系,表明其源区中不含此种大陆下地壳组分.另外,中国东部新生代玄武岩Pb同位素类似于印度洋MORB,表明加入到其源区中的俯冲古太平洋地壳具有类似于印度洋MORB的

组成.通过对新生代玄武岩的岩石成因进行定量模拟,验证了华北和华南新生代玄武岩地幔源区中地壳组分存在差异.模拟计算结果表明,不超过5%的地壳熔体与亏损地幔的混合即可以反演出中国东部新生代玄武岩的微量元素和Sr-Nd-Pb同位素组成(Xu and Zheng, 2017; Xu *et al.*, 2017).

大陆碰撞造山带玄武岩的地幔源区比较复杂,交代介质包括硅酸盐熔体和碳酸盐熔体.Dai *et al.*(2017b, 2018)对西秦岭中新生代玄武岩进行岩石学和地球化学研究,揭示了它们的地幔源区受到了先前俯冲古特提斯洋壳物质来源的硅酸盐/碳酸盐熔体的交代作用.西秦岭麻当地区(中生代)和礼县地区(新生代)玄武岩在主微量元素和同位素组成上存在明显差别,指示它们来源于不同性质的地幔源区.新生代玄武岩具有明显低 SiO_2 和 Al_2O_3 含量,高CaO和MgO含量,以及高CaO/ Al_2O_3 比值,富集LREE、LILE、Nb和Ta,亏损K、Pb、Zr、Hf和Ti,具有高 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 和低Ti/Eu比值.这些特征表明其地幔源区经历过明显的碳酸盐熔体交代作用.新生代玄武岩具有低 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值(-0.54‰ ~ -0.32‰),以及碳酸盐矿物(方解石)的出现,表明它们来源于碳酸盐化的地幔源区.中生代玄武岩则具有明显高的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量,低CaO和MgO含量,以及低CaO/ Al_2O_3 比值,具有类似于洋岛玄武岩的微量元素特征,不亏损HFSE以及Pb的负异常.它们的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值为 -0.35‰ ~ -0.21‰ ,类似于正常地幔的

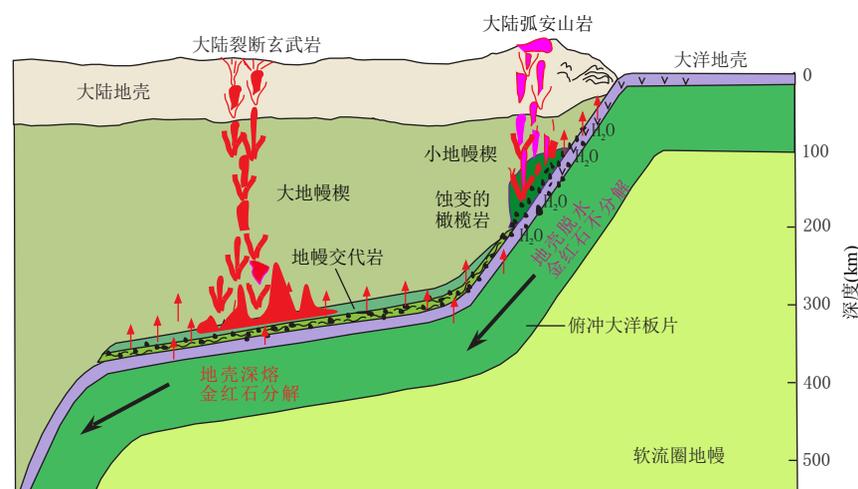


图 10 板片俯冲、熔/流体交代与岩浆岩地球化学组成间的联系示意图

Fig.10 Schematic diagram showing the petrogenetic linkage between slab subduction, fluid metasomatism and mafic magmatism above oceanic subduction zones

修改自 Zheng(2019).大洋板块俯冲到大陆岩石圈之下的过程中交代地幔楔,地幔楔变得越来越大,在弧后区域形成大地幔楔.俯冲洋壳在不同深度释放微量元素存在巨大差异的熔/流体交代地幔楔,从而形成岛弧型和洋岛型微量元素组成特征的镁铁质岩浆岩的地幔源区

Mg 同位素组成,表明中生代玄武岩可能来自于受硅酸盐熔体交代形成的地幔源区.因此,西秦岭中新世代玄武岩的地幔源区分别受到了硅酸盐熔体和碳酸盐熔体的交代作用.考虑到这些玄武岩亏损的 Sr-Nd-Hf 同位素特征以及所处的构造环境,它们的地幔源区可能是俯冲古特提斯洋壳来源的硅酸盐/碳酸盐熔体交代上覆亏损地幔橄榄岩形成的.

通过系统总结红安—大别—苏鲁造山带和胶东半岛中生代和新生代镁铁质火成岩的地球化学成分,特别是将主要和微量元素组成与稳定和放射成因同位素组成结合起来综合制约这些玄武岩的地幔源区原生性质和地壳深度次生过程,可以区分和排除前人在岩石成因研究过程中遇到的如何认识源区和过程的问题,结果揭示出大陆俯冲带存在两种类型的壳幔相互作用(图 10),对应于两类地球化学性质截然不同的镁铁质火成岩 (Zhao *et al.*, 2015; Dai *et al.*, 2016a; Dai *et al.*, 2018). 第一类岩石显示岛弧型微量元素分布特征(富集 LILE、LREE 和 Pb, 亏损 HFSE)和相对富集的放射成因 Sr-Nd 同位素组成,而第二类具有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.它们都具有变化且不同于正常地幔的锆石 O 同位素组成,含有残留的地壳锆石.这些地球化学特征表明,这两类镁铁质火成岩来源于不同地球化学性质的地幔源区,其中第二类岩石的地幔源区是先前俯冲古洋壳来源的熔体与上覆新生岩石圈地幔反应形成的,而第一类岩石的地幔源区是随后俯冲的华南陆壳来源的长英质熔体与上覆华北古老岩石圈地幔反应形成的.因此,碰撞后镁铁质岩浆岩为大陆碰撞造山带不同类型的板片—地幔相互作用提供了可靠的岩石学和地球化学记录.

4 结语

“地球内部是如何运作的?”是一个长期探索的基础科学问题.在二十世纪,化学地球动力学致力于研究板块俯冲对地幔成分的影响,力图区分不同类型地壳和不同成因沉积物脱水熔融对岛弧和洋岛玄武岩源区成分的贡献.进入 21 世纪以来,人们将注意力转到俯冲带结构、过程和产物上来,发现俯冲带热状态有冷与热之分,动力来源有重力与浮力之分,应力体制有挤压与拉张之分,时空演化有进行时与过去时之分,板片再循环机制有断离与拆

沉之分,地壳再循环形式有流体与固体之分.因此,俯冲带化学地球动力学研究不仅需要确定俯冲带地壳物质再循环的机制和形式,而且需要确定俯冲带动力来源和热状态及其随时间的变化.为了识别不同类型壳源熔/流体对地幔楔的交代作用、寻求板片—地幔界面反应的岩石学和地球化学证据、理解汇聚板块边缘地壳俯冲和拆沉对地幔不均一性的贡献,我们必须将俯冲带变质作用、交代作用和岩浆作用作为一个地球科学系统来考虑.

尽管国际上在俯冲带变质作用、俯冲带交代作用、俯冲带岩浆作用三大领域都各自在针对地球深部过程的研究方面取得了多项重要进展,但由于研究工作缺乏密切的协同配合,包括俯冲带熔/流体的物理化学性质、俯冲带壳幔相互作用的机制和过程、俯冲带幔源岩浆活动的物质来源和启动机制以及深部地幔过程对地表环境的影响等许多关键科学问题尚未得到根本解决.将来的研究需要聚焦俯冲带物质循环这一核心科学问题,查明俯冲带变质作用、交代作用和岩浆作用,包括挥发性组分在地球深部的迁移过程及其资源和环境效应,着力考察研究相对薄弱的古俯冲带,阐明板块俯冲与地球深部物质循环之间的耦合机制.

References

- Agard, P., Yamato, P., Jolivet, L., et al., 2009. Exhumation of Oceanic Blueschists and Eclogites in Subduction Zones: Timing and Mechanisms. *Earth-Science Reviews*, 92(1–2): 53–79. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2008.11.002>
- 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)
- Allègre, C.J., Turcotte, D.L., 1986. Implications of a Two-Component Marble-Cake Mantle. *Nature*, 323:123–127. <https://doi.org/10.1038/323123a0>
- Anderson, D.L., 2006. Speculations on the Nature and Cause of Mantle Heterogeneity. *Tectonophysics*, 416(1–4): 7–22. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.07.011>
- Beaumont, C., Ellis, S., Pfiffner, A., 1999. Dynamics of Sediment Subduction - Accretion at Convergent Margins: Short-Term Modes, Long-Term Deformation, and Tectonic Implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B8):17573–17601.
- Beaumont, C., Jamieson, R.A., Butler, J.P., et al., 2009. Crustal Structure: A Key Constraint on the Mechanism of

- Ultra - High - Pressure Rock Exhumation. *Earth and Planetary Science Letters*, 287(1-2):116-129. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.08.001>
- Bebout, G. E., 2007. Metamorphic Chemical Geodynamics of Subduction Zones. *Earth and Planetary Science Letters*, 260(3-4): 373-393. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.05.050>
- Bebout, G. E., 2014. Chemical and Isotopic Cycling in Subduction Zones. *Treatise on Geochemistry*, 4:703-747.
- Bercovici, D., Ricard, Y., 2014. Plate Tectonics, Damage and Inheritance. *Nature*, 508: 513-516. <https://doi.org/10.1038/nature13072>
- Bi, H. Z., Song, S. G., Dong, J. L., et al., 2018. First Discovery of Coesite in Eclogite from East Kunlun, Northwest China. *Science Bulletin*, 63(23):1536-1538. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2018.11.011>
- Borghini, G., Rampone, E., Zanetti, A., et al., 2013. Meter-Scale Nd Isotopic Heterogeneity in Pyroxenite-Bearing Ligurian Peridotites Encompasses Global-Scale Upper Mantle Variability. *Geology*, 41(10):1055-1058. <https://doi.org/10.1130/g34438.1>
- Brown, M., Johnson, T., 2018. Secular Change in Metamorphism and the Onset of Global Plate Tectonics. *American Mineralogist*, 103:181-196.
- Brun, J. P., Faccenna, C., 2008. Exhumation of High-Pressure Rocks Driven by Slab Rollback. *Earth and Planetary Science Letters*, 272(1-2):1-7. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.02.038>
- Cawood, P. A., Hawkesworth, C. J., et al., 2018. Geological Archive of the Onset of Plate Tectonics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2132). <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0405>
- Chen, R. X., Yin, Z. Z., Xia, C. P., 2019. Crustal Metasomatism of Mantle Wedge during Collisional Orogeny: Insights from Orogenic Peridotites in the Dabie-Sulu Orogenic Belt. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 38(3):459-484(in Chinese with English abstract).
- Chen, R. X., Zheng, Y. F., Hu, Z. C., 2012. Episodic Fluid Action during Exhumation of Deeply Subducted Continental Crust: Geochemical Constraints from Zoisite-Quartz Vein and Host Metabasite in the Dabie Orogen. *Lithos*, 155: 146-166. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.023>
- Chen, R. X., Li, H. Y., Zheng, Y. F., et al., 2017b. Crust-Mantle Interaction in a Continental Subduction Channel: Evidence from Orogenic Peridotites in North Qaidam, Northern Tibet. *Journal of Petrology*, 58(2): 191-226. <https://doi.org/10.1093/petrology/egx011>
- Chen, Y., Su, B., Chu, Z. Y., 2017c. Modification of an Ancient Subcontinental Lithospheric Mantle by Continental Subduction: Insight from the Maowu Garnet Peridotites in the Dabie UHP Belt, Eastern China. *Lithos*, 278-281: 54-71. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.01.025>
- Chen, Y., Su, B., Guo, S., 2015. The Dabie-Sulu Orogenic Peridotites: Progress and Key Issues. *Science China: Earth Sciences*, 58(10):1679-1699(in Chinese).
- Chen, Y. X., Schertl, H. P., Zheng, Y. F., et al., 2016. Mg-O Isotopes Trace the Origin of Mg-Rich Fluids in the Deeply Subducted Continental Crust of Western Alps. *Earth and Planetary Science Letters*, 456: 157-167. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.09.010>
- Chen, Y. X., Zheng, Y. F., Hu, Z., 2013a. Petrological and Zircon Evidence for Anatexis of UHP Quartzite during Continental Collision in the Sulu Orogen. *Journal of Metamorphic Geology*, 31(4): 389-413. <https://doi.org/10.1111/jmg.12026>
- Chen, Y. X., Zheng, Y. F., Hu, Z. C., 2013b. Synexhumation Anatexis of Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks: Petrological Evidence from Granitic Gneiss in the Sulu Orogen. *Lithos*, 156-159:69-96. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.10.008>
- Chen, Y. X., Zhou, K., Gao, X. Y., 2017a. Partial Melting of Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks during Continental Collision: Evidence, Time, Mechanism, and Effect. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145:177-191. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.03.020>
- Chen, Y. X., Zhou, K., Zheng, Y. F., et al., 2017d. Zircon Geochemical Constraints on the Protolith Nature and Metasomatic Process of the Mg-Rich Whiteschist from the Western Alps. *Chemical Geology*, 467:177-195. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.08.013>
- Chopin, C., 2003. Ultrahigh-Pressure Metamorphism: Tracing Continental Crust into the Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 212(1-2): 1-14. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(03\)00261-9](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(03)00261-9)
- Cloos, M., Shreve, R. L., 1988a. Subduction-Channel Model of Prism Accretion, Melange Formation, Sediment Subduction, and Subduction Erosion at Convergent Plate Margins: 1. Background and Description. *Pure and Applied Geophysics*, 128(3-4):455-500.
- Cloos, M., Shreve, R. L., 1988b. Subduction-Channel Model of Prism Accretion, Melange Formation, Sediment Subduction, and Subduction Erosion at Convergent Plate Margins: 2. Implications and Discussion. *Pure and Applied Geophysics*, 128(3-4):501-545.

- Dai, F. Q., Zhao, Z. F., Dai, L. Q., et al., 2016b. Slab-Mantle Interaction in the Petrogenesis of Andesitic Magmas: Geochemical Evidence from Postcollisional Intermediate Volcanic Rocks in the Dabie Orogen, China. *Journal of Petrology*, 57(6): 1109–1134. <https://doi.org/10.1093/petrology/egw034>
- 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., 2015a. Tectonic Development from Oceanic Subduction to Continental Collision: Geochemical Evidence from Postcollisional Mafic Rocks in the Hong'an-Dabie Orogens. *Gondwana Research*, 27(3): 1236–1254. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.12.005>
- Dai, L. Q., Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., et al., 2015b. Source and Magma Mixing Processes in Continental Subduction Factory: Geochemical Evidence from Postcollisional Mafic Igneous Rocks in the Dabie Orogen. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(3): 659–680. <https://doi.org/10.1002/2014gc005620>
- Dai, L. Q., Zheng, Y. F., He, H. Y., et al., 2016a. Postcollisional Mafic Igneous Rocks Record Recycling of Noble Gases by Deep Subduction of the Continental Crust. *Lithos*, 252–253: 135–144. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.02.025>
- Dai, L. Q., Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., et al., 2017b. 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., 2017a. 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.
- Dai, L. Q., Zheng, F., Zhao, Z. F., et al., 2018. Geochemical Insights into the Lithology of Mantle Sources for Cenozoic Alkali Basalts in West Qinling, China. *Lithos*, 302–303: 86–98. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.12.013>
- Dong, J., Wei, C. J., Clarke, G. L., et al., 2018. Metamorphic Evolution during Deep Subduction and Exhumation of Continental Crust: Insights from Felsic Granulites in South Altyn Tagh, West China. *Journal of Petrology*, 59(10): 1965–1990. <https://doi.org/10.1093/petrology/egy086>
- Eiler, J., 2003. Inside the Subduction Factory. *Geophysical Monograph*, 138:1–311.
- Elliott, T., 2003. Tracers of the Slab. *Geophysical Monograph*, 138:23–45.
- Erdman, M., Lee, C. T. A., 2014. Implications and Limitations of Buoyancy-Driven Exhumation of High-Pressure and Ultrahigh-Pressure Terranes. *Earth-Science Reviews*, 139:33–46.
- Ernst, W. G., Liou, J. G., 1995. Contrasting Plate-Tectonic Styles of the Qinling-Dabie-Sulu and Franciscan Metamorphic Belt. *Geology*, 23:353–356.
- Ernst, W. G., Liou, J. G., 2008. High- and Ultrahigh-Pressure Metamorphism: Past Results and Future Prospects. *American Mineralogist*, 93:1771–1786.
- Fang, W., Dai, L. Q., Zheng, Y. F., et al., 2019. 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. *GSA Bulletin*. <https://doi.org/10.1130/b35278.1>
- Frisch, W., Meschede, M., Blakey, R. C., 2010. Plate Tectonics: Continental Drift and Mountain Building. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 149–158.
- Gao, X. Y., Zheng, Y. F., Chen, Y. X., 2012. Dehydration Melting of Ultrahigh-Pressure Eclogite in the Dabie Orogen: Evidence from Multiphase Solid Inclusions in Garnet. *Journal of Metamorphic Geology*, 30(2): 193–212. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2011.00962.x>
- Gao, X. Y., Zheng, Y. F., Chen, Y. X., et al., 2015. Zircon Geochemistry Records the Action of Metamorphic Fluid on the Formation of Ultrahigh-Pressure Jadeite Quartzite in the Dabie Orogen. *Chemical Geology*, 419: 158–175. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.10.043>
- Gao, X. Y., Wang, L., Chen, Y. X., et al., 2019. Geochemical Evidence from Coesite-Bearing Jadeite Quartzites for Large-Scale Flow of Metamorphic Fluids in a Continental Subduction Channel. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 265: 354–370. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.09.006>
- Gerya, T. V., Stöckhert, B., Perchuk, A. L., 2002. Exhumation of High-Pressure Metamorphic Rocks in a Subduction Channel: A Numerical Simulation. *Tectonics*, 21(6): 6–1–6–19. <https://doi.org/10.1029/2002tc001406>

- Gong, X.K., Chen, D.L., Ren, Y.F., et al., 2016. Identification of Coesite-Bearing Amphibolite in the North Qinling and Its Geological Significance. *Chinese Science Bulletin*, 61 (12):1365–1378(in Chinese with English abstract).
- Guo, S., Chen, Y., Ye, K., et al., 2015. Formation of Multiple High-Pressure Veins in Ultrahigh-Pressure Eclogite (Hualiangting, Dabie Terrane, China): Fluid Source, Element Transfer, and Closed-System Metamorphic Veining. *Chemical Geology*, 417: 238–260. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.10.006>
- Guo, S., Yang, Y.H., Chen, Y., et al., 2016. Grain-Scale Sr Isotope Heterogeneity in Amphibolite (Retrograded UHP Eclogite, Dabie Terrane): Implications for the Origin and Flow Behavior of Retrograde Fluids during Slab Exhumation. *Lithos*, 266–267: 383–405. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.10.014>
- Guillot, S., Hattori, K., Agard, P., et al., 2009. Exhumation Processes in Oceanic and Continental Subduction Contexts: A Review. *Subduction Zone Geodynamics*. Springer, Berlin Heidelberg, 175–205.
- Hawkesworth, C.J., Brown, M., 2018. Earth Dynamics and the Development of Plate Tectonics. *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 376(2132): 20180228.
- Hermann, J., Rubatto, D., 2014. Subduction of Continental Crust to Mantle Depth: Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks. *Treatise on Geochemistry*, 4: 309–340. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-095975-7.00309-0>
- Hermann, J., Spandler, C., Hack, A., et al., 2006. Aqueous Fluids and Hydrous Melts in High-Pressure and Ultrahigh-Pressure Rocks: Implications for Element Transfer in Subduction Zones. *Lithos*, 92(3–4):399–417. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.03.055>
- Hermann, J., Zheng, Y.F., Rubatto, D., 2013. Deep Fluids in Subducted Continental Crust. *Elements*, 9(4): 281–287. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.4.281>
- Holder, R.M., Viete, D.R., Brown, M., et al., 2019. Metamorphism and the Evolution of Plate Tectonics. *Nature*, 572: 378–381.
- Hofmann, A.W., 1997. Mantle Geochemistry: The Message from Oceanic Volcanism. *Nature*, 385:219–229. <https://doi.org/10.1038/385219a0>
- Huang, J., Xiao, Y.L., 2015. Element Mobility in Mafic and Felsic Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks from the Dabie UHP Orogen, China: Insights into Supercritical Liquids in Continental Subduction Zones. *International Geology Review*, 57(9–10): 1103–1129. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.893213>
- Huangfu, P.P., Wang, Y.J., Fan, W.M., et al., 2017. Dynamics of Unstable Continental Subduction: Insights from Numerical Modeling. *Science China: Earth Sciences*, 60(2): 218–234.
- Kawamoto, T., Kanzaki, M., Mibe, K., et al., 2012. Separation of Supercritical Slab-Fluids to Form Aqueous Fluid and Melt Components in Subduction Zone Magmatism. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(46): 18695–18700. <https://doi.org/10.1073/pnas.1207687109>
- Kearey, P., Klepeis, K.A., Vine, F.J., 2009. *Global Tectonics*. John Wiley & Sons, Oxford, 482.
- Kelemen, P.B., Hanghøj, K., Greene, A.R., 2014. One View of the Geochemistry of Subduction-Related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust. *Treatise on Geochemistry*, 4:749–806.
- Lenardic, A., 2018. The Diversity of Tectonic Modes and Thoughts about Transitions between Them. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2132). <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0416>
- Li, W.C., Chen, R.X., Zheng, Y.F., et al., 2016a. Two Episodes of Partial Melting in Ultrahigh-Pressure Migmatites from Deeply Subducted Continental Crust in the Sulu Orogen, China. *Geological Society of America Bulletin*, 128(9–10):1521–1542.
- Li, H.Y., Chen, R.X., Zheng, Y.F., et al., 2016b. The Crust-Mantle Interaction in Continental Subduction Channels: Zircon Evidence from Orogenic Peridotite in the Sulu Orogen. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(2):687–712.
- Li, H.Y., Chen, R.X., Zheng, Y.F., et al., 2018. Crustal Metasomatism at the Slab-Mantle Interface in a Continental Subduction Channel: Geochemical Evidence from Orogenic Peridotite in the Sulu Orogen. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(3):2174–2198.
- Li, Z.H., 2014. A Review on the Numerical Geodynamic Modeling of Continental Subduction, Collision and Exhumation. *Science China: Earth Sciences*, 57(1): 47–69 (in Chinese).
- Liatì, A., Gebauer, D., 2009. Crustal Origin of Zircon in a Garnet Peridotite: A Study of U-Pb SHRIMP Dating, Mineral Inclusions and REE Geochemistry (Erzgebirge, Bohemian Massif). *European Journal of Mineralogy*, 21(4): 737–750. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2009/0021-1939>
- Liou, J.G., Zhang, R.Y., 1996. Occurrences of Intergranular

- Coesite in Ultrahigh - P Rocks from the Sulu Region, Eastern China; Implications for Lack of Fluid during Exhumation. *American Mineralogist*, 81(9-10): 1217-1221. <https://doi.org/10.2138/am-1996-9-1020>
- Liou, J.G., Zhang, R.Y., Ernst, W.G., 1997. Lack of Fluid during Ultrahigh - P Metamorphism in the Dabie - Sulu Region, Eastern China. *Proc. 30th Intern. Geol. Congr.*, 17 (II): 141-155.
- Liu, L., Zhang, J.F., Green, H.W. II., et al., 2007. Evidence of Former Stishovite in Metamorphosed Sediments, Implying Subduction to >350 km. *Earth and Planetary Science Letters*, 263(3-4): 180-191. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.08.010>
- Liu, L., Zhang, J.F., Cao, Y.T., et al., 2018. Evidence of Former Stishovite in UHP Eclogite from the South Altyn Tagh, Western China. *Earth and Planetary Science Letters*, 484: 353-362. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.12.023>
- Liu, M.Q., Li, Z.H., Yang, S.H., 2017a. Diapir versus Along-Channel Ascent of Crustal Material during Plate Convergence: Constrained by the Thermal Structure of Subduction Zones. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145: 16-36. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.02.036>
- Liu, P.L., Massonne, H.J., Zhang, J.F., et al., 2017b. Intergranular Coesite and Coesite Inclusions in Dolomite from the Dabie Shan: Constraints on the Preservation of Coesite in UHP Rocks. *Terra Nova*, 29(3): 154-161. <https://doi.org/10.1111/ter.12258>
- Liu, Q., Hermann, J., Zhang, J.F., 2013. Polyphase Inclusions in the Shuanghe UHP Eclogites Formed by Subsolidus Transformation and Incipient Melting during Exhumation of Deeply Subducted Crust. *Lithos*, 177: 91-109. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.06.010>
- Livermore, R., 2018. *The Tectonic Plates are Moving*. Oxford University Press, Oxford.
- Malaspina, N., Hermann, J., Scambelluri, M., 2009. Fluid/Mineral Interaction in UHP Garnet Peridotite. *Lithos*, 107 (1-2): 38-52. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.07.006>
- Malaspina, N., Hermann, J., Scambelluri, M., et al., 2006a. Multistage Metasomatism in Ultrahigh - Pressure Mafic Rocks from the North Dabie Complex (China). *Lithos*, 90 (1-2): 19-42. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.01.002>
- Malaspina, N., Hermann, J., Scambelluri, M., et al., 2006b. Polyphase Inclusions in Garnet - Orthopyroxenite (Dabie Shan, China) as Monitors for Metasomatism and Fluid-Related Trace Element Transfer in Subduction Zone Peridotite. *Earth and Planetary Science Letters*, 249(3-4): 173-187. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.07.017>
- McCarthy, A., Chelle-Michou, C., Müntener, O., et al., 2018. Subduction Initiation without Magmatism: The Case of the Missing Alpine Magmatic Arc. *Geology*, 46(12): 1059-1062. <https://doi.org/10.1130/g45366.1>
- Mibe, K., Kawamoto, T., Matsukage, K.N., et al., 2011. Slab Melting versus Slab Dehydration in Subduction - Zone Magmatism. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(20): 8177-8182. <https://doi.org/10.1073/pnas.1010968108>
- Moore, E. M., Yıkılmaz, M. B., Kellogg, L. H., 2013. Tectonics: 50 Years after the Revolution. *Geological Society of America*, 500: 321-369. [https://doi.org/10.1130/2013.2500\(10](https://doi.org/10.1130/2013.2500(10)
- Peacock, S.M., Wang, K.L., 1999. Seismic Consequences of Warm versus Cool Subduction Metamorphism: Examples from Southwest and Northeast Japan. *Science*, 286 (5441): 937-939. <https://doi.org/10.1126/science.286.5441.937>
- Ringwood, A.E., 1974. The Petrological Evolution of Island Arc Systems. *Journal of the Geological Society*, 130(3): 183-204. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.130.3.0183>
- 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. [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541\(90\)90081-H](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541(90)90081-H)
- Rubatto, D., Regis, D., Hermann, J., et al., 2011. Yo-Yo Subduction Recorded by Accessory Minerals in the Italian Western Alps. *Nature Geoscience*, 4(5): 338-342. <https://doi.org/10.1038/ngeo1124>
- 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>
- Rumble, D., Liou, J.G., Jahn, B.M., 2003. Continental Crust Subduction and Ultrahigh Pressure Metamorphism. *Treatise on Geochemistry*, 3: 293-319. <http://dx.doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03112-0>
- Schmidt, M.W., Poli, S., 2014. Devolatilization during Subduction. *Treatise on Geochemistry*, 4: 669-701.
- Shen, J., Li, S.G., Wang, S.J., et al., 2018. Subducted Mg-Rich Carbonates into the Deep Mantle Wedge. *Earth and Planetary Science Letters*, 503: 118-130. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.09.011>
- Shen, T.T., Hermann, J., Zhang, L.F., et al., 2015. UHP Metamorphism Documented in Ti-Chondrodite- and Ti-Clinohumite - Bearing Serpentinized Ultramafic Rocks from Chinese Southwestern Tianshan. *Journal of Petrology*

- ogy, 56(7):1425–1458. <https://doi.org/10.1093/petrology/egv042>
- Smrekar, S. E., Davaille, A., Sotin, C., 2018. Venus Interior Structure and Dynamics. *Space Science Reviews*, 214(5). <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0518-1>
- Spandler, C., Pirard, C., 2013. Element Recycling from Subducting Slabs to Arc Crust: A Review. *Lithos*, 170–171: 208–223. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.02.016>
- Stern, R.J., 2002. Subduction Zones. *Reviews of Geophysics*, 40(4):1–38. <https://doi.org/10.1029/2001rg000108>
- Stern, R.J., 2018. The Evolution of Plate Tectonics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2132). <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0406>
- Su, B., Chen, Y., Guo, S., et al., 2016. Carbonatitic Metasomatism in Orogenic Dunites from Lijiatun in the Sulu UHP Terrane, Eastern China. *Lithos*, 262: 266–284. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.07.007>
- Su, B., Chen, Y., Guo, S., et al., 2017. Dolomite Dissociation Indicates Ultra-Deep (>150 km) Subduction of a Garnet-Bearing Dunite Block (the Sulu UHP Terrane). *American Mineralogist*, 102(11): 2295–2306. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5982>
- Su, B., Chen, Y., Guo, S., et al., 2019. Garnetite and Pyroxenite in the Mantle Wedge Formed by Slab-Mantle Interactions at Different Melt/Rock Ratios. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(7): 6504–6522. <https://doi.org/10.1029/2019jb017347>
- Tatsumi, Y., 2005. The Subduction Factory: How It Operates in the Evolving Earth. *GSA Today*, 15(7):4–10.
- Tatsumi, Y., Eggins, S., 1995. Subduction Zone Magmatism. Blackwell Science, Boston.
- Tatsumi, Y., Kogiso, T., 2003. The Subduction Factory: Its Role in the Evolution of the Earth's Crust and Mantle. *Geological Society, London, Special Publications*, 219(1): 55–80. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2003.219.01.03>
- White, W.M., Klein, E.M., 2014. Composition of the Oceanic Crust. *Treatise on Geochemistry*, 4:457–496.
- Xia, Q. X., Zheng, Y. F., Hu, Z. C., 2010. Trace Elements in Zircon and Coexisting Minerals from Low-T/UHP Metagranite in the Dabie Orogen: Implications for Action of Supercritical Fluid during Continental Subduction-Zone Metamorphism. *Lithos*, 114(3–4): 385–412. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.09.013>
- 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.jseae.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>
- Zhang, L., Chen, R. X., Zheng, Y. F., et al., 2015. Partial Melting of Deeply Subducted Continental Crust during Exhumation: Insights from Felsic Veins and Host UHP Metamorphic Rocks in North Qaidam, Northern Tibet. *Journal of Metamorphic Geology*, 33(7): 671–694. <https://doi.org/10.1111/jmg.12146>
- Zhang, Z. M., Shen, K., Sun, W. D., et al., 2008. Fluids in Deeply Subducted Continental Crust: Petrology, Mineral Chemistry and Fluid Inclusion of UHP Metamorphic Veins from the Sulu Orogen, Eastern China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(13): 3200–3228. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.04.014>
- 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>
- Zhao, Z. F., Dai, L. Q., Zheng, Y. F., 2015. Two Types of the Crust-Mantle Interaction in Continental Subduction Zones. *Science China: Earth Sciences*, 58(8): 1269–1283. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5136-0>
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., Chen, Y. X., et al., 2017. Partial Melting of Subducted Continental Crust: Geochemical Evidence from Synexhumation Granite in the Sulu Orogen. *GSA Bulletin*, 129(11–12): 1692–1707. <https://doi.org/10.1130/b31675.1>
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., Zhang, J., et al., 2012. Syn-Exhumation Magmatism during Continental Collision: Evidence from Alkaline Intrusives of Triassic Age in the Sulu Orogen. *Chemical Geology*, 328: 70–88. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.11.002>
- 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., 2009. Fluid Regime in Continental Subduction Zones: Petrological Insights from Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks. *Journal of the Geological Society*, 166(4): 763–782. <https://doi.org/10.1144/0016-76492008-016r>
- 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., 2018. Fifty Years of Plate Tectonics. *National Science Review*, 5(2): 119. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwy024>
- Zheng, Y. F., 2019. Subduction Zone Geochemistry. *Geoscience Frontiers*, 10(4): 1223–1254.
- Zheng, Y. F., Chen, R. X., 2017. Regional Metamorphism at Extreme Conditions: Implications for Orogeny at Convergent Plate Margins. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145: 46–73.
- Zheng, Y. F., Chen, R. X., Xu, Z., et al., 2016. The Transport of Water in Subduction Zones. *Science China: Earth Sciences*, 59(4): 651–682 (in Chinese).
- 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(2): 327–358. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.09.014>
- 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 (in Chinese).
- 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)
- Zheng, Y. F., Hermann, J., 2014. Geochemistry of Continental Subduction-Zone Fluids. *Earth Planets and Space*, 66: 93. <https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-93>
- Zheng, Y. F., Xia, Q. X., Chen, R. X., et al., 2011. Partial Melting, Fluid Supercriticality and Element Mobility in Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks during Continental Collision. *Earth-Science Reviews*, 107(3–4): 342–374. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.04.004>
- 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*, 61(4): 353–385 (in Chinese).
- Zheng, Y. F., Zhao, G. C., 2019. Two Styles of Plate Tectonics in Earth's History. *Science Bulletin*. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2018.12.029>
- Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., Chen, Y. X., 2013. Continental Subduction Channel Processes: Plate Interface Interaction during Continental Collision. *Chinese Science Bulletin*, 58(35): 4371–4377 (in Chinese).
- Zhou, K., Chen, Y. X., Zheng, Y. F., et al., 2019. Migmatites Record Multiple Episodes of Crustal Anatexis and Geochemical Differentiation in the Sulu Ultrahigh-Pressure Metamorphic Zone, Eastern China. *Journal of Metamorphic Geology*, 37(8): 1099–1127. <https://doi.org/10.1111/jmg.12503>
- Zindler, A., Hart, S., 1986. Chemical Geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14(1): 493–571. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.14.050186.002425>

附中文参考文献

- 陈仁旭, 尹壮壮, 夏春鹏, 2019. 大别—苏鲁造山带橄榄岩记录的碰撞造山过程中地幔楔的地壳交代作用. *矿物岩石地球化学通报*, 38(3): 459–484.
- 陈意, 苏斌, 郭顺, 2015. 大别—苏鲁造山带橄榄岩: 进展和问题. *中国科学: 地球科学*, 45(9): 1245–1269.
- 宫相宽, 陈丹玲, 任云飞, 等, 2016. 北秦岭含柯石英斜长角闪岩的发现及其地质意义. *科学通报*, 61(12): 1365–1378.
- 李忠海, 2014. 大陆俯冲—碰撞—折返的动力学数值模拟研究综述. *中国科学: 地球科学*, 44(5): 817–841.
- 郑永飞, 陈仁旭, 徐峥, 等, 2016. 俯冲带中的水迁移. *中国科学: 地球科学*, 46(3): 253–286.
- 郑永飞, 陈伊翔, 戴立群, 等, 2015. 发展板块构造理论: 从洋壳俯冲带到碰撞造山带. *中国科学: 地球科学*, 45(6): 711–735.
- 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.
- 郑永飞, 赵子福, 陈伊翔, 2013. 大陆俯冲隧道过程: 大陆碰撞过程中的板块界面相互作用. *科学通报*, 58(23): 2233–2239.