

# 大陆俯冲隧道过程: 大陆碰撞过程中的 板块界面相互作用

郑永飞\*, 赵子福, 陈伊翔

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

\* 联系人, E-mail: yfzheng@ustc.edu.cn

2013-07-09 收稿, 2013-07-18 接受, 2013-08-07 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2009CB825004)和国家自然科学基金(41221062)资助

**摘要** 研究俯冲带过程是发展板块构造理论的关键. 板块界面相互作用是实现地球表层与内部之间物质和能量交换的基本机制. 将俯冲隧道模型拓展到大陆碰撞造山带, 能够透视大陆俯冲带构造过程及其产物. 由长英质到镁铁质岩石组成的大陆地壳于不同深度从大陆岩石圈上部拆离并迁移进入大陆俯冲隧道, 由橄榄岩组成的大陆岩石圈地幔楔底部也受到俯冲板片刮削进入俯冲隧道. 大小不同的地壳和地幔碎块在俯冲隧道中受到角力流作用向上或向下运动, 导致它们经历不同程度的变质作用, 并伴有不同程度的变形乃至局部深熔. 在俯冲隧道中壳源岩石与幔源岩石之间发生机械混合, 结果形成了超高压变质混杂岩. 它们在折返到地壳层位时与低级变质岩拼合到一起, 形成构造混杂岩, 结果在同一造山带出露有不同变质程度的岩石. 俯冲陆壳基底花岗岩和上覆沉积物衍生的熔/流体与上覆大陆岩石圈地幔楔橄榄岩之间发生化学反应, 实现了大陆俯冲隧道中的壳幔相互作用. 超高压变质岩原岩性质支配了碰撞造山带的类型、超高压变质地体的大小和折返速率.

## 关键词

大陆碰撞  
俯冲隧道  
超高压变质  
差异折返  
构造混杂

在大陆碰撞造山带, 出露的超高压变质地体含有阿尔卑斯型俯冲的岩石构造记录<sup>[1]</sup>. 这些记录反映了大陆俯冲带变质的温压条件和物质传输, 证明大陆地壳岩石曾经俯冲到>100 km 的上地幔深度. 这些超高压地体主要由长英质片麻岩组成, 含有少量镁铁质榴辉岩和超镁铁质橄榄岩. 而这种超高压榴辉岩相岩石共生组合在太平洋型俯冲带是缺乏的<sup>[2]</sup>. 在大陆碰撞造山带不仅出露有经受超高压变质的地壳和地幔岩石, 而且出露有只受到低压变质的表壳岩石, 它们构成了另一种类型的构造混杂岩<sup>[3]</sup>. 需要回答的关键问题是: (1) 大陆地壳是如何俯冲到地幔深度经受超高压变质的? (2) 超高压变质岩是怎样折返到地壳深度的? (3) 为什么变质温压条件不同的岩石能够作为构造混杂岩出现在同一个造山带?

认识俯冲带板块界面的性质, 是理解板块边缘相互作用的关键. 汇聚板块之间的物理和化学传输可以出现在各种空间和时间尺度上, 这对于俯冲带过程非常关键. 就像板块构造理论一样, 为研究板块界面相互作用所提出的俯冲隧道这个概念, 起初也是建立在大洋俯冲带构造的基础上<sup>[4-6]</sup>, 然后被拓展到大陆俯冲带<sup>[7]</sup>. 虽然这个概念已经广泛用来解释大洋俯冲带变质岩的产出<sup>[8-10]</sup>, 但是对大陆碰撞造山带的应用才刚刚开始. 尽管引起大陆地壳俯冲和折返的构造机制存在差别, 板块界面物质在俯冲和折返过程中必然发生拆离并进入俯冲隧道. 虽然大陆俯冲带超高压地体有大有小、折返速率有快有慢、深熔程度有高有低, 但是它们的形成和演化基本上都可以根据大陆俯冲隧道过程予以解释. 本文针对大陆

**引用格式:** 郑永飞, 赵子福, 陈伊翔. 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, 2013, 58: 2233-2239

**英文版见:** Zheng Y F, Zhao Z F, Chen Y X. Continental subduction channel processes: Plate interface interaction during continental collision. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-013-6066-x

碰撞造山带岩石, 试图阐明大陆俯冲隧道过程中壳幔物质混合和迁移的构造机制.

### 1 大陆俯冲隧道过程

俯冲隧道是指汇聚板块边缘下伏俯冲板片与上覆板片之间的自由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. 将这个概念拓展到大陆碰撞带<sup>[7]</sup>, 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, 而且有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(图 1). 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. 由于大陆俯冲隧道之上地幔楔比大洋俯冲隧道之上地幔楔冷, 因此大陆俯冲隧道的温度显著低于大洋俯冲隧道, 这也是大陆俯冲带超高压变质岩在地幔深度形成后得以保存而没有完全熔融的基本原因.

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高度, 但是与板块尺度相比要狭窄得多. 大洋俯冲隧道的高度一般从<1 km 变化到>10 km, 大陆俯冲隧道的高度一般从>5 km 变化到>30 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”. 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, 其中一些碎块会向下埋藏得更深, 而另一些则向上发生折返. 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和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. 例如在大别-苏鲁造山带, 低  $\delta^{18}\text{O}$  上地壳岩石俯冲到地幔深度发生超高压变质<sup>[11]</sup>, 而加积在大陆边缘的变形的增生楔则并没有俯冲到地幔深度<sup>[12]</sup>. 这些差异可以由大陆俯冲过程中发生在不同深度的 3 种地壳拆离作用来解释: (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 Rubatto 等人<sup>[13]</sup>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.

由于大陆俯冲隧道的温度显著低于大洋俯冲隧道, 地幔深度超高压变质温度在大陆俯冲隧道显著较低, 而大洋俯冲隧道之上弧下地幔底部温度显著较高. 因此, 大陆俯冲隧道中地壳岩石在弧下地幔深度发生的脱水作用远弱于大洋俯冲隧道. 这解释了大陆俯冲带之上的岩石圈为什么没有出现同俯冲大陆弧型岩浆作用. 尽管如此, 大陆岩石圈地幔楔橄

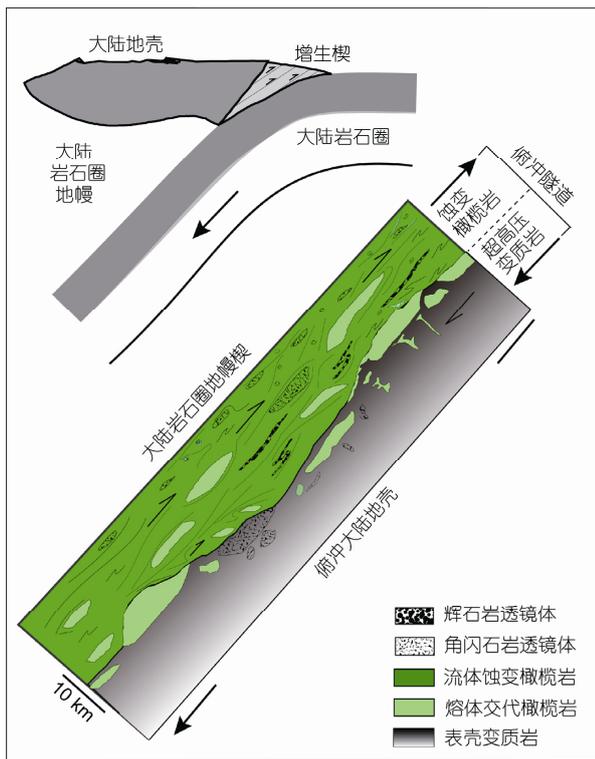


图 1 大陆俯冲隧道中壳幔相互作用示意图

修改自 Zheng<sup>[7]</sup>. 当大陆地壳(结晶基底和沉积盖层)俯冲 to 地幔深度时, 变质脱水和部分熔融所释放的富水流体和含水熔体交代上覆的大陆岩石圈地幔楔橄榄岩, 形成富集不相容元素的地幔交代体. 但是, 由于俯冲大陆地壳释放的流体量远低于大洋地壳俯冲带, 因此大陆俯冲带之上缺乏同俯冲弧型岩浆作用

岩在俯冲隧道界面仍会被俯冲陆壳及其碎块产生的富水流体和含水熔体所交代, 形成富化、富集的造山带岩石圈地幔交代体<sup>[7]</sup>. 另一方面, 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<sup>[14]</sup>, 特别是到达下地壳深度时这种退变质流体活动显著. 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. 当温度升高时, 超高压岩石还可能发生深熔作用<sup>[15]</sup>.

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<sup>[16-19]</sup>, 这样在板片-地幔界面既有物理混合也有化学反应(图 2). 所有熔/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体<sup>[7]</sup>. 这些交代体可以在造山带岩石圈地幔中储存几个乃至几十个百万年, 在受到加热后发生部分熔融, 形成同折返碱性岩浆作用<sup>[20]</sup>或者碰撞后镁铁质岩浆作用<sup>[21-26]</sup>. 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. 地球物理观察<sup>[27,28]</sup>和地球化学分析<sup>[21,29]</sup>都已经在大别造山带识别出这种典型的大陆碰撞带“三明治结构”.

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 3 个阶段: (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, 不但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; (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<sup>[7]</sup>. 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 3 组分混合体系. 鉴于这 3 种组分在大陆

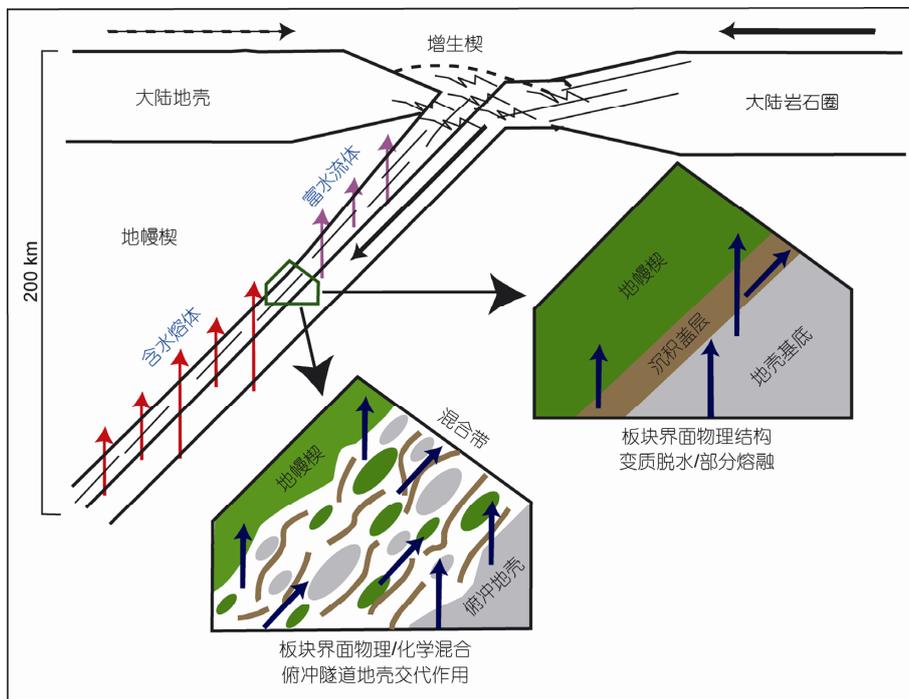


图 2 板块界面大陆俯冲隧道过程示意图

修改自 Zheng 等人<sup>[3]</sup>. 大陆碰撞过程中, 在板片-地幔界面之间的俯冲隧道中存在两类过程: (a) 物理混合, 形成由变质岩组成的构造混杂岩; (b) 化学反应, 俯冲地壳衍生的富水流体/含水熔体交代上覆大陆岩石圈地幔楔橄榄岩

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.

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<sup>[30,31]</sup>. 传统模型是板片断离引起折返<sup>[32,33]</sup>, 假设大洋板片与大陆板片在过渡带发生断离, 大陆岩石圈整体后退折返. 大陆俯冲隧道模型也已经被用来解释高压和超高压变质岩的折返<sup>[34-36]</sup>. 根据大陆俯冲隧道模型<sup>[7]</sup>, 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(图3(a)); 然后是大陆岩石圈与大洋岩石圈在过渡带发生断离, 俯冲大陆板片整体折返(图3(b)). 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. 结果大陆碰撞造山带一般表现出下列构型: 低温/超高压岩片首先折返, 位于碰撞造山带上层; 中温/超高压岩片随后折返, 位于碰撞造山带中层; 高温/超高压岩片最后折返, 位于碰撞造山带下层. 在这种差异性折返过程中, 深部超高压岩石可能发生麻粒岩相叠加, 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.

尽管目前高压-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<sup>[37]</sup>. 内力作用的表现形式为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. 外力作用的表现形式为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, 俯冲大陆岩石圈后撤也可以引起超高压岩石折返<sup>[38,39]</sup>. 这可以通过板片后撤引起俯冲隧道空间增大来解释, 结果超高压岩片在浮力驱动下得以折返.

## 2 原岩性质与大陆碰撞

将俯冲隧道模式应用于大陆碰撞造山带, 可使我们把焦点聚集到俯冲地壳和上覆地幔楔的岩石构造属性上. 俯冲陆壳主要由基底花岗岩、麻粒岩和辉长岩以及沉积盖层组成, 也包含极少量橄榄岩侵入体. 上覆大陆岩石圈地幔楔具有黏滞度高、温度低和水活度低等特点, 与大洋俯冲隧道上覆地幔楔所具有的低黏滞度、高温度和高水活度等性质相反. 不过, 根据壳幔分异的时间, 原则上可以区分出2种类型的地壳<sup>[7]</sup>: (1) 新生地壳, 一般是指最近才从洋中脊、岛弧、弧后以及裂谷构造带由于地幔直接部分熔融所形成的地壳, 岩石  $\epsilon_{Nd}(t) > 0$ ; (2) 古老地壳, 对于显生宙变质岩来说一般是指前寒武纪时期形成的地壳, 岩石  $\epsilon_{Nd}(t) < 0$ .

大陆俯冲带一般是由弧后盆地或陆间盆地转化而来, 由于大洋板片俯冲的牵引才使大陆板片得以俯冲到地幔深度. 这样大陆俯冲带常常具有复合性质, 因此超高压变质岩的原岩类型变化很大<sup>[7]</sup>. 例如在阿尔卑斯-喜马拉雅和天山-乌拉尔这类俯冲带, 作为新生地壳的特提斯型玄武岩被俯冲到地幔深度经

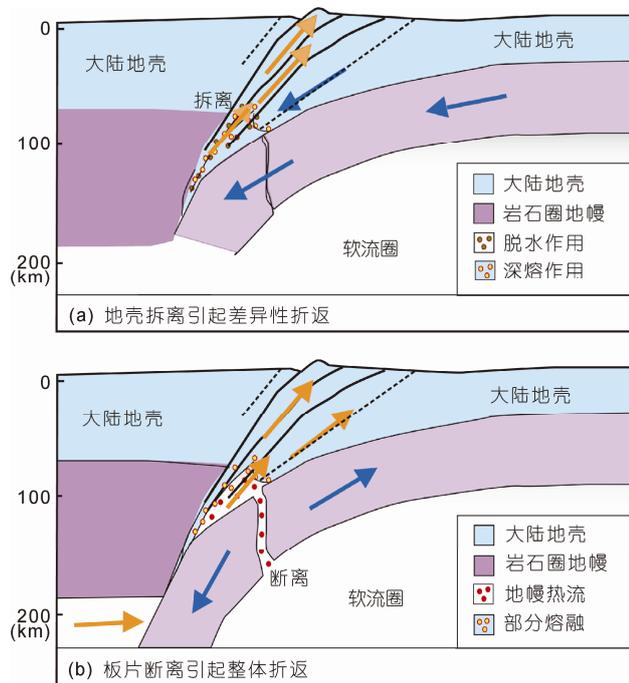


图3 大陆碰撞过程中俯冲地壳岩石差异性折返示意图

(a) 俯冲大陆地壳在不同深度发生拆离后沿俯冲隧道发生差异性折返; (b) 俯冲大陆岩石圈与牵引大洋岩石圈发生断离后整体折返

受超高压变质作用. 而在另一类俯冲带例如大别-苏鲁和挪威西部片麻岩省中, 则是古老大陆基底被俯冲到地幔深度经受超高压变质作用. 无论何种情况, 俯冲带的结构总是一样的, 即地幔楔总是夹持在俯冲大陆地壳与上覆大陆地壳之间. 在大洋岩石圈俯冲至大陆岩石圈之下的安第斯型俯冲带中, 大陆边缘一般是由大洋弧地体增生形成的, 因此俯冲板上覆的地幔楔具有新生成因. 另一方面, 在大陆岩石圈俯冲至大陆岩石圈之下的阿尔卑斯型俯冲带中, 俯冲板上覆的地幔楔既可以具有古老成因(克拉通地幔), 也可以具有新生成因(弧下地幔), 具体取决于两个俯冲陆块的原岩性质.

虽然地球上造山带的类型多种多样, 但是根据构造演化和原岩性质一般分为增生型和碰撞型 2 类. 就碰撞型而言, 大陆地壳俯冲到弧型地体之下发展成弧-陆碰撞造山带(例如喜马拉雅山和巴布亚新几内亚), 而大陆岩石圈俯冲到大陆岩石圈之下则发展成陆-陆碰撞造山带(例如大别-苏鲁、挪威西部片麻岩省)<sup>[7]</sup>. 许多增生型造山带发展的高级阶段就变成了陆-弧-陆碰撞造山带, 因此将它们称为加积型弧-陆碰撞造山带<sup>[37]</sup>. 在大陆碰撞过程中, 成因不同的地壳岩石俯冲至地幔深度并遭受超高压变质. 变质前原岩性质差异与碰撞造山带类型和超高压地体大小之间存在一定的关系<sup>[7]</sup>. 在弧-陆碰撞造山带中, 镁铁质超高压榴辉岩的原岩主要为新生成因玄武岩, 而长英质超高压片麻岩的原岩大多为加积楔沉积物(可以源自古老或者新生地壳岩石的风化). 另一方面, 在陆-陆碰撞造山带中, 榴辉岩的原岩主要为古老地壳镁铁质岩石, 而片麻岩的原岩大多为古老地壳基底花岗岩, 少部为大陆沉积物. 在这 2 种类型碰撞造山带的超高压地体中, 体积很小的超高压榴辉岩均被体积很大的片麻岩所包裹<sup>[2,7]</sup>.

尽管超高压变质作用的年龄可以从早古生代到晚新生代, 但是根据同位素年代学数据的积累, Zheng 等人<sup>[40]</sup>和 Kylander-Clark 等人<sup>[41]</sup>先后注意到超高压变质持续时间与超高压榴辉岩相变质岩出露面积(地体大小)之间存在相关关系(图4), 总体上可以分为 2 组. 一组持续时间较短(仅为几个百万年), 对应于小的超高压地体(例如西阿尔卑斯山 Dora Maira 地区、喜马拉雅山 Kaghan Valley 和巴布亚新几内亚 Woodlark 地区); 另一组持续时间较长(可达 10~20 百万年), 对应于大的超高压地体(例如大别-苏鲁、挪威

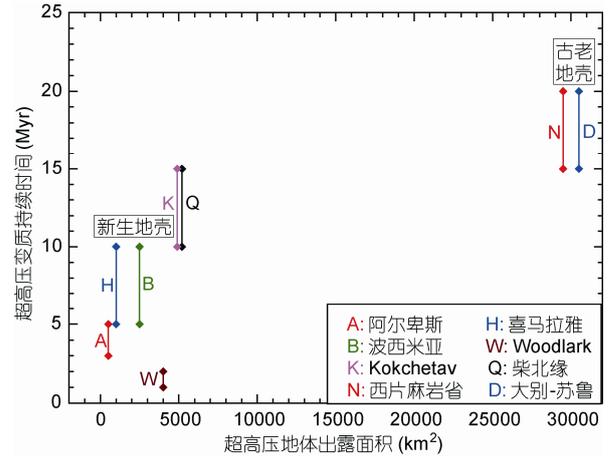


图 4 大陆碰撞带超高压变质地体大小与变质持续时间之间的关系

数据引自 Zheng<sup>[7]</sup>. 出露面积小的超高压地体含有新生地壳碎片, 在地幔深度居留时间短; 出露面积大的超高压地体不含新生地壳碎片, 在地幔深度居留时间长

西部片麻岩省). 通过检查这两组超高压地体的原岩性质, 发现它们与变质持续时间和超高压地体大小有相关关系<sup>[7]</sup>: 较小超高压地体的原岩多为新生地壳, 一般经历了持续时间较短的变质作用, 折返的速率也较高; 较大超高压地体的原岩多为古老地壳, 一般经历了持续时间较长的变质作用, 折返的速率也较低. 这种相关关系可由大陆碰撞时发生的俯冲隧道过程予以解释: 小的地体在俯冲隧道内易于运动, 而大的地体在俯冲隧道内难以运动. 因此, 原岩性质支配了碰撞造山带的类型、超高压变质地体的大小和超高压变质的持续时间<sup>[7]</sup>.

在大陆碰撞时, 陆壳或是俯冲至弧下岩石圈地幔之下(例如阿尔卑斯-喜马拉雅山、天山-乌拉尔山), 或是俯冲至克拉通岩石圈地幔之下(例如大别-苏鲁、挪威西部片麻岩省). 前者对应于加积型弧-陆碰撞体系, 两个碰撞的大陆之间夹持有弧地体, 结果形成了宽阔的造山带; 后者对应于陆-陆碰撞体系, 两个碰撞大陆之间不夹持有弧地体, 结果形成了狭窄的造山带<sup>[7]</sup>. 在板块构造的框架下, 可以发育有一系列从大洋俯冲到大陆碰撞的过程<sup>[37]</sup>: (1) 特提斯型岩石圈俯冲至特提斯型岩石圈之下, 引起大洋弧岩浆作用; (2) 俯冲板片后撤引起弧后盆地扩张和弧后岩浆作用; (3) 弧后盆地关闭, 伴随有安第斯型弧-陆碰撞; (4) 特提斯型岩石圈俯冲至新增生的弧地体之下, 引起大陆弧岩浆作用; (5) 古老大陆岩石圈俯冲至新增

生的弧地体之下,引起喜马拉雅型弧-陆碰撞(例如 Dora Maira, Kaghan Valley 和 Woodlark). 在喜马拉雅型弧-陆碰撞造山带中俯冲地壳岩石遭受超高压变质,而在安第斯型弧-陆碰撞造山带中则未见有超高压变质; (6) 古老大陆岩石圈俯冲至古老大陆岩石圈之下,引起陆-陆碰撞和超高压变质(例如大别-苏鲁、挪威西部片麻岩省).

### 3 结语

研究板块界面相互作用是将板块构造理论从洋壳俯冲发展到大陆碰撞的一个重要环节. 俯冲隧道是地球表层与内部之间相互作用的纽带, 汇聚板块之间的物理耦合和化学反应控制了俯冲带内部的力学传递和物质传输. 厘定板块界面的空间大小和几何形态, 确定板块界面的物质属性、结构构造和物理化学性质, 找出板块界面质量传输随时间和空间变化的规律, 是深化地球动力学研究的重要途径. 确定富水流体、含水熔体和超临界流体在俯冲带的形成及其演化对不同类型元素的溶解、迁移和富集作用, 是认识板块界面地球化学过程的关键.

将俯冲隧道模型拓展到大陆俯冲带, 不仅为研究大陆碰撞造山带岩石提供了板块构造格架, 而且为探索大陆俯冲带壳幔相互作用提供了化学地球动力学思路. 在大陆俯冲隧道中, 壳幔相互作用可以通

过地壳来源的熔/流体与上覆岩石圈地幔橄榄岩之间的化学反应来实现. 与大陆岩石圈地幔橄榄岩和大陆地壳基底相比, 俯冲隧道中的物质具有相对较大的韧性. 俯冲隧道内部长英质变质岩具有较低的密度和黏滞度, 与镁铁质变质岩相比容易向上运移. 俯冲隧道中地壳块体既可以在俯冲过程中伴随着进变质作用向下运移, 也可以在折返过程中伴随着退变质作用向上运移, 甚至发生旋转. 大陆俯冲带变质岩表现出叠加型多期变质矿物生长/重结晶、幕式流体活动.

大陆俯冲隧道过程使俯冲地壳和上覆地幔楔岩石发生不同程度的变质变形乃至深熔作用, 其特征产物在地表以折返的超高压变质地体的形式出现, 留下了很多值得注意并且可直接获得的记录. 高压变质岩随向下运动的板片继续俯冲形成超高压变质岩, 而大陆俯冲隧道中的角力流驱动着高压-超高压变质地壳碎片的差异性折返. 由新生地壳岩石组成的小超高压地体在地幔深度存留的时间较短并快速折返, 而由古老地壳岩石组成的大超高压地体在地幔深度存留的时间较长, 折返的速率也较低. 然而不同情况下不同岩石单元的折返机理也不同, 这取决于其在大陆俯冲隧道的时空位置及内外力的竞争作用. 因此, 在大陆俯冲隧道中存在壳源和幔源岩石之间的多种物理混合和化学反应过程.

### 参考文献

- 1 Chopin C. Ultrahigh-pressure metamorphism: Tracing continental crust into the mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 212: 1–14
- 2 Liou J G, Ernst W G, Song S G, et al. Tectonics and HP-UHP metamorphism of northern Tibet—Preface. *J Asian Earth Sci*, 2009, 35: 191–198
- 3 Zheng Y F, Zhang L F, McClelland W C, et al. Processes in continental collision zones: Preface. *Lithos*, 2012, 136–139: 1–9
- 4 Shreve R L, Cloos M. Dynamics of sediment subduction, mélange formation, and prism accretion. *J Geophys Res*, 1986, 91: 10229–10245
- 5 Cloos M, Shreve R L. Subduction-channel model of prism accretion, mélange formation, sediment subduction, and subduction erosion at convergent plate margins: 1, Background and description. *Pure Appl Geophys*, 1988, 128: 455–500
- 6 Cloos M, Shreve R L. Subduction-channel model of prism accretion, mélange formation, sediment subduction, and subduction erosion at convergent plate margins: 2, Implications and discussion. *Pure Appl Geophys*, 1988, 128: 501–505
- 7 Zheng Y F. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. *Chem Geol*, 2012, 328: 5–48
- 8 Beaumont C, Ellis S, Pfiffner A. Dynamics of sediment subduction-accretion at convergent margins: Short-term modes, long-term deformation, and tectonic implications. *J Geophys Res*, 1999, 104: 17573–17601
- 9 Gerya T V, Stöckhert B, Perchuk A L. Exhumation of high-pressure metamorphic rocks in a subduction channel: A numerical simulation. *Tectonics*, 2002, 21: 1056, doi: 10.1029/2002TC001406
- 10 Guillot S, Hattori K, Agard P, et al. Exhumation processes in oceanic and continental subduction contexts: A review. In: Lallemand S, Funicello F, eds. *Subduction Zone Geodynamics*. Berlin: Springer-Verlag, 2009. 175–205
- 11 Zheng Y F, Fu B, Gong B, et al. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. *Earth Sci Rev*, 2003, 62: 105–161
- 12 Zheng Y F, Zhou J B, Wu Y B, et al. Low-grade metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: A passive-margin accretionary wedge deformed during continent subduction. *Int Geol Rev*, 2005, 47: 851–871

- 13 Rubatto D, Regis D, Hermann J, et al. Yo-yo subduction recorded by accessory minerals in the Italian Western Alps. *Nat Geosci*, 2011, 4: 338–342
- 14 Zheng Y F. Fluid regime in continental subduction zones: Petrological insights from ultrahigh-pressure metamorphic rocks. *J Geol Soc London*, 2009, 166: 763–782
- 15 Zheng Y F, Xia Q X, Chen R X, et al. Partial melting, fluid supercriticality and element mobility in ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision. *Earth Sci Rev*, 2011, 107: 342–374
- 16 Zhao Z F, Zheng Y F, Chen R X, et al. Element mobility in mafic and felsic ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision. *Geochim Cosmochim Acta*, 2007, 71: 5244–5266
- 17 Xia Q X, Zheng Y F, Zhou L G. Dehydration and melting during continental collision: Constraints from element and isotope geochemistry of low-T/UHP granitic gneiss in the Dabie orogen. *Chem Geol*, 2008, 247: 36–65
- 18 Gao X Y, Zheng Y F, Chen Y X. Dehydration melting of ultrahigh-pressure eclogite in the Dabie orogen: Evidence from multiphase solid inclusions in garnet. *J Metamorph Geol*, 2012, 30: 193–212
- 19 Chen Y X, Zheng Y F, Hu Z. Synexhumation anatexis of ultrahigh-pressure metamorphic rocks: Petrological evidence from granitic gneiss in the Sulu orogen. *Lithos*, 2013, 156–159: 69–96
- 20 Zhao Z F, Zheng Y F, Zhang J, et al. Syn-exhumation magmatism during continental collision: Evidence from alkaline intrusives of Triassic age in the Sulu orogen. *Chem Geol*, 2012, 328: 70–88
- 21 Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, et al. Origin of postcollisional magmatic rocks in the Dabie orogen: Implications for crust-mantle interaction and crustal architecture. *Lithos*, 2011, 126: 99–114
- 22 Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F, et al. Zircon Hf-O isotope evidence for crust-mantle interaction during continental deep subduction. *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 308: 224–244
- 23 Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F, et al. The nature of orogenic lithospheric mantle: Geochemical constraints from postcollisional mafic-ultramafic rocks in the Dabie orogen. *Chem Geol*, 2012, 334: 99–121
- 24 Yang Q L, Zhao Z F, Zheng Y F. Modification of subcontinental lithospheric mantle above continental subduction zone: Constraints from geochemistry of Mesozoic gabbroic rocks in southeastern North China. *Lithos*, 2012, 146–147: 164–182
- 25 Yang Q L, Zhao Z F, Zheng Y F. Slab-mantle interaction in continental subduction channel: Geochemical evidence from Mesozoic gabbroic intrusives in southeastern North China. *Lithos*, 2012, 155: 442–460
- 26 Zhang J, Zhao Z F, Zheng Y F, et al. Zircon Hf-O isotope and whole-rock geochemical constraints on origin of postcollisional mafic to felsic dykes in the Sulu orogen. *Lithos*, 2012, 136–139: 225–245
- 27 Dong S W, Li Q S, Gao R, et al. Moho-mapping in the Dabie ultrahigh-pressure collisional orogen, Central China. *Am J Sci*, 2008, 308: 517–528
- 28 Luo Y H, Xu Y X, Yang Y J. Crustal structure beneath the Dabie orogenic belt from ambient noise tomography. *Earth Planet Sci Lett*, 2012, 313–314: 12–22
- 29 Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, et al. Zircon U-Pb ages, Hf and O isotopes constrain the crustal architecture of the ultrahigh-pressure Dabie orogen in China. *Chem Geol*, 2008, 253: 222–242
- 30 Sizova E, Gerya T V, Brown M. Exhumation mechanisms of melt-bearing ultrahigh pressure crustal rocks during collision of spontaneously moving plates. *J Metamorph Geol*, 2012, 30: 927–955
- 31 Warren C. Exhumation of (ultra-)high-pressure terranes: Concepts and mechanisms. *Solid Earth*, 2013, 4: 75–92
- 32 Davies J H, von Blanckenburg F. Slab break off: A model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional origins. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 129: 85–102
- 33 von Blanckenburg F, Davies J H. Slab breakoff: A model for syncollisional magmatism and tectonics in the Alps. *Tectonics*, 1995, 14: 120–131
- 34 Lardeaux J M, Ledru P, Daniel I, et al. The Variscan French Massif Central—A new addition to the ultrahigh pressure metamorphic ‘club’: Exhumation processes and geodynamic consequences. *Tectonophysics*, 2001, 332: 143–167
- 35 Beaumont C, Jamieson R A, Butler J P, et al. Crustal structure: A key constraint on the mechanism of ultrahigh-pressure rock exhumation. *Earth Planet Sci Lett*, 2009, 287: 116–129
- 36 Li Z H, Gerya T V. Polyphase formation and exhumation of high-to ultrahigh-pressure rocks in continental subduction zone: Numerical modeling and application to the Sulu ultrahigh-pressure terrane in eastern China. *J Geophys Res*, 2009, 114: 406
- 37 Zheng Y F, Xiao W J, Zhao G C. Introduction to tectonics of China. *Gondwana Res*, 2013, 23: 1189–1206
- 38 Brun J P, Faccenna C. Exhumation of high-pressure rocks driven by slab rollback. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 272: 1–7
- 39 Husson L, Brun J P, Yamoto P, et al. Episodic slab rollback fosters exhumation of HP-UHP rocks. *Geophys J Int*, 2009, 179: 1292–1300
- 40 Zheng Y F, Chen R X, Zhao Z F. Chemical geodynamics of continental subduction-zone metamorphism: Insights from studies of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) core samples. *Tectonophysics*, 2009, 475: 327–358
- 41 Kylander-Clark A R C, Hacker B R, Mattinson C G. Size and exhumation rate of ultrahigh-pressure terranes linked to orogenic stage. *Earth Planet Sci Lett*, 2012, 321–322: 115–120