

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.232>



板块俯冲带水流体活动及其效应的定量化数值模拟

李忠海, 杨舒婷, 刘明启, 皇甫鹏鹏

中国科学院大学地球与行星科学学院, 计算地球动力学重点实验室, 北京 100049

摘要:为探讨水流体活动对板块俯冲隧道过程及大陆碰撞造山的制约作用,采用热力学和动力学耦合的数值模拟方法,建立了系统的数值模型。结果显示俯冲隧道内的混杂岩存在两种不同的折返路径:(1)平行于俯冲隧道斜向上折返,形成靠近缝合带的高压—超高压变质岩;(2)近垂直穿过上覆地幔楔侵入地壳深度。这两种差异性的模式主要受控于俯冲带热结构。俯冲带的温度结构控制俯冲隧道内水流体和熔体活动,从而影响上覆地幔楔的弱化程度,最终导致俯冲带内物质的不同运移过程和折返路径。同时,大陆俯冲碰撞带的岩石圈变形和拆沉作用均与俯冲带的流体—熔体活动所导致的岩石圈弱化息息相关。数值模拟结果极大促进了对于板块俯冲带流体—熔体活动及其动力学过程的理解。

关键词:俯冲带;流体活动;折返;拆沉;数值模拟;地球动力学。

中图分类号: P31

文章编号: 1000-2383(2019)12-3984-09

收稿日期: 2019-08-09

Aqueous Fluid Activity and Its Effects in the Subduction Zones: A Systematic Numerical Modeling Study

Li Zhonghai, Yang Shuting, Liu Mingqi, Huangfu Pengpeng

Key Laboratory of Computational Geodynamics, College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In order to study the effects of aqueous fluid activity on the subduction channel processes and continental collision dynamics, systematic numerical models were constructed with integrated thermodynamic and thermomechanical methods. The model results indicate that the subducted crustal materials may either exhumed along the subduction channel to the surface near the suture zone, or extrude sub-vertically upward through the mantle wedge to the crust of the overriding plate. The contrasting modes are strongly dependent on the thermal structure of subduction zones. The temperature field controls the aqueous fluid and melt activities, which further regulates the weakening of overriding mantle wedge and finally dominates the material transportation in the subduction channel. Meanwhile, the lithospheric deformation during continental subduction and collision is also strongly dependent on the fluid-melt activity and the induced lithospheric weakening. The numerical models contribute significantly to the better understanding of subduction-zone fluid-melt activity and the geodynamic processes.

Key words: subduction zone; fluid activity; exhumation; delamination; numerical modeling; geodynamics.

基金项目: 科技部“973”项目(No.2015CB856106)。

作者简介: 李忠海(1982—),男,教授,博士生导师,主攻地球动力学数值模拟方向,以理论计算和软件程序开发为基础,以大尺度数值模拟为主要手段,以板块俯冲—碰撞带及其相关动力学过程为研究对象。ORCID:0000-0003-1968-5129. E-mail:li.zhonghai@ucas.ac.cn

引用格式: 李忠海,杨舒婷,刘明启,等,2019.板块俯冲带水流体活动及其效应的定量化数值模拟.地球科学,44(12):3984—3992.

0 引言

水流体活动是板块俯冲带最重要的制约因素之一。它可以导致俯冲带中物质密度和流变强度的降低,也可以导致部分熔融和岩浆作用的发生,并与俯冲带的中深源地震和上覆板块的火山作用息息相关。然而,前人的数值模拟研究大多基于纯动力学模型,一般不包含水流体的活动和影响,从而导致上覆岩石圈的弱化和破坏机制相对较弱(Burg and Gerya, 2005; Li *et al.*, 2010; Butler *et al.*, 2013)。因此,地幔楔的物质一般没有卷入俯冲带过程,并且上覆岩石圈的水化、部分熔融及岩浆作用也同样缺失(综述可见李忠海, 2014)。相反,在传统地质模型中,流体和熔体的活动是板块俯冲带研究的核心和焦点(综述可见 Zheng, 2012),这意味着传统数值模型与地质模型之间仍存在较大差异。为了弥补该方面的差异,需要构建新的含水流体和熔体活动的数值模型,将动力学与热力学进行耦合,进而针对俯冲带过程进行精细的量化模拟研究。

1 俯冲带含水流体活动数值模型

建立俯冲带含水流体和熔体活动的数值模型,需要对一系列相互联系的地质过程进行(近似的)量化处理,它们包括:俯冲岩石的含水量是多少?何时脱水,脱多少水?脱水后,水怎样运移?水不饱和矿物如何吸水,吸多少水?吸水后的部分熔融如何?为了解决这一系列问题,首先需要构建岩石含水能力相图(Hacker *et al.*, 2003),这里主要采用PerpleX(Connolly, 2005)进行计算,如浅部数据库(0~7 GPa; Gerya and Meilick, 2011)和深部数据库(0~30 GPa; Li *et al.*, 2019)。然后将该热力学数据库引入到动力学模型中,就可以首先解决其中三个地质过程的量化问题:俯冲岩石的含水量多少?何时脱水,脱多少水?水不饱和矿物如何吸水,吸多少水?进而通过简化水的运移和部分熔融算法实现完整的水流体活动过程(详细方法流程参考李忠海等, 2015; Li *et al.*, 2019)。基于该方法,可以建立完整的大洋俯冲至大陆碰撞的含水流体活动模型(如图 1 所示)。

图 1a 和图 1b 显示,在远端推力作用下,大洋板块沿初始薄弱带俯冲进入地幔,俯冲板片表面发生脱水,导致上覆地幔楔水化蚀变和部分熔融。同时,俯冲大洋板块拖曳大洋沉积物进入俯冲隧道,混合

地壳及地幔物质,发生变质及部分熔融作用,形成混杂岩。大洋板块持续俯冲,上覆地幔楔水化及部分熔融作用增强,产生地表岩浆岩(包括来自大洋上地壳和沉积物熔融所产生的中酸性岩浆岩和来自地幔部分熔融所产生的基性岩浆岩)(图 1c)。岩浆作用导致上覆地幔楔的流变强度变低,形成近垂直的弱化通道;俯冲海沟后撤引发上覆板块的伸展。两者共同作用导致低密度混杂岩受浮力作用沿弱化通道上升至地壳深度,热的软流圈物质上涌,上覆岩石圈发生严重的破坏(图 1c)。

随着大陆板块进入俯冲隧道,海沟前进,俯冲带宽度逐渐变大,上覆岩石圈由伸展环境向挤压环境转变,最终导致地表一系列逆冲断裂系(图 1d 和图 1f)。俯冲大陆板块在俯冲带中发生中上地壳物质拆离,发生部分熔融(图 1d)。低密度的壳幔熔融物质受浮力作用沿俯冲隧道斜向上折返,在地壳深度形成靠近缝合带的高压—超高压变质岩(图 1e 和图 1f)。

为了更好的显示俯冲隧道中水的作用,我们也对参考模型(图 1)进行了无水化实验,即取消了脱水/水化和部分熔融作用。数值模型的结果显示(李忠海等, 2015),俯冲隧道作用主要发生在俯冲板块一侧,并伴随着高压—超高压变质岩石折返。其中,造山带只在俯冲一侧生长。值得注意的是,在欠缺流体—熔体弱化作用的情况下,上覆岩石圈未能产生较大变形,未见含水模型中产生的地壳缩短增厚以及逆冲断裂系,与之对应的岩浆作用同样缺失。前人的数值模拟结果大多与此实验类似(综述见李忠海, 2014),将上覆板块视为强阻挡块体,而重点探讨俯冲下盘的演化过程。

2 会聚板块温度结构对水流体活动和物质运移的制约

会聚板块温度结构可以直接控制俯冲带中水流体和熔体活动,改变上覆地幔楔的流变性质,影响俯冲带动力学过程,引起俯冲带内物质的不同运移过程和(超)高压岩石折返路径,对俯冲带的物理性质、流体迁移、矿物相变及部分熔融作用至关重要(Iwamori, 2004; Wang, 2010; Behn *et al.*, 2011; Leng and Mao, 2015; Liu *et al.*, 2017; 刘明启和李忠海, 2018)。俯冲带的温度结构主要受控于俯冲大洋板块年龄、上覆大陆板块厚度以及板块会聚速率。为了更好理解俯冲带温度结构对俯冲带中流体活动和物质运移的影响,针对这些控制因素,Liu *et*

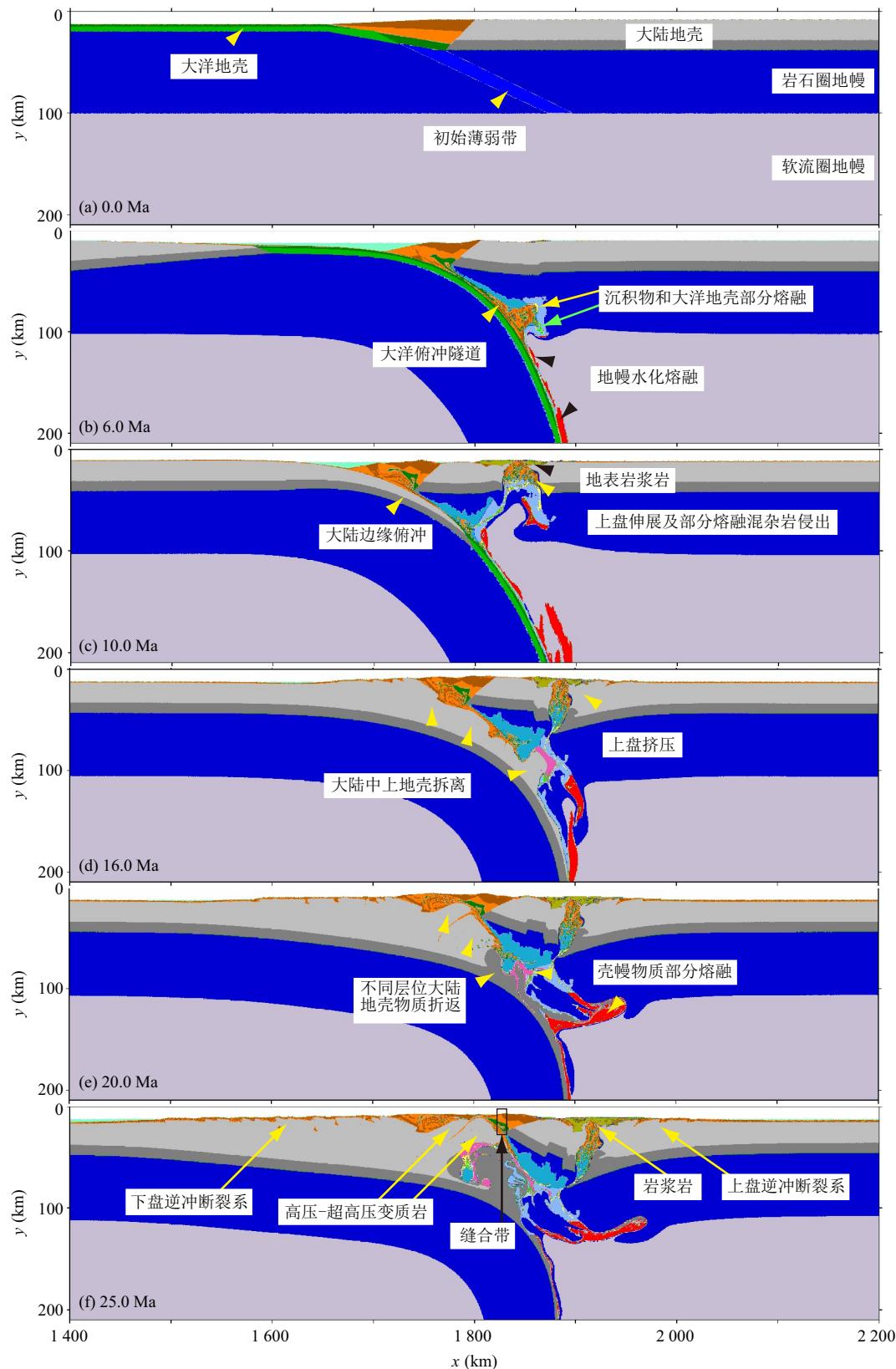


图 1 倾冲带含水流体活动的物质场演化数值模型

Fig.1 Composition evolution of the numerical model with fluid-melt activity in the subduction zones
颜色代表岩石类型. 模型的演化时间如图左下角所示(修改自李忠海等, 2015)

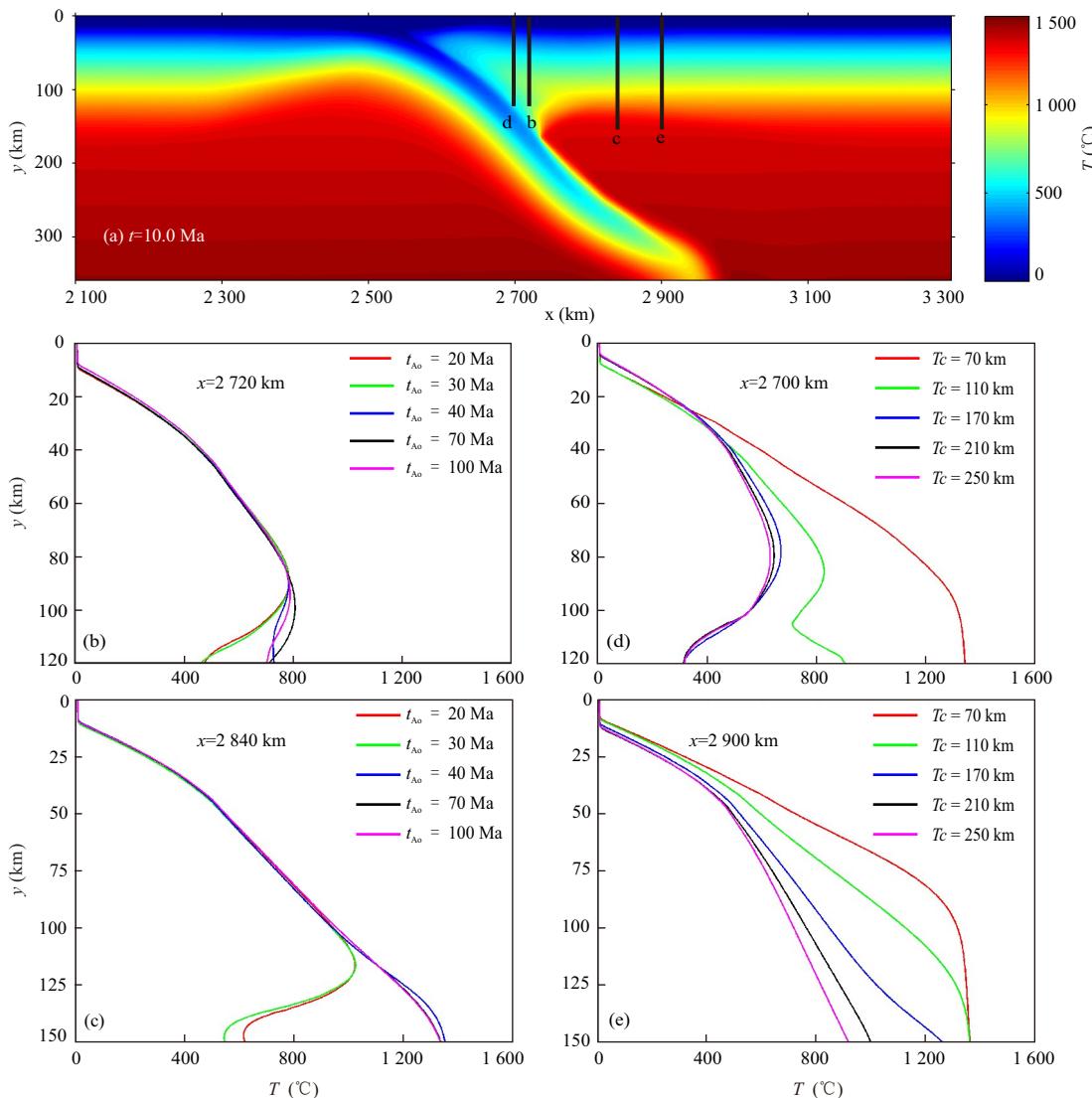


图2 会聚板块年龄或厚度对俯冲带温度结构的制约

Fig.2 The constraints of age or thickness of convergent plates on the temperature structure of subduction zones

a. 参考模型演化至 10 Ma 时, 温度场分布(俯冲大洋岩石圈年龄为 $t_{\text{Ao}}=60$ Ma, 上覆大陆岩石圈厚度为 $T_c=140$ km, 俯冲速率为 $Vx=5 \text{ cm/a}$); 黑色垂线 b~e 代表温度剖面位置.b、c. 保持 $T_c=140$ km 和 $Vx=5 \text{ cm/a}$ 不变, 不同年龄大洋岩石圈模型俯冲至 10 Ma 时, 黑线 b、c($x=2720 \text{ km}, 2840 \text{ km}$)位置对应的温度结构.d、e 保持 $t_{\text{Ao}}=60$ Ma 和 $Vx=5 \text{ cm/a}$ 不变, 不同上覆大陆岩石圈厚度模型演化至 10 Ma 时, 黑线 d、e($x=2700 \text{ km}, 2900 \text{ km}$)位置对应的温度结构. 图修改自 Liu et al.(2017)

al.(2017)进行了系统的数值模拟研究.

数值模型结果显示, 对大洋板块而言, 年轻大洋板块将以较小的角度向下俯冲, 导致上覆大陆岩石圈和俯冲大洋岩石圈间的耦合作用较强, 俯冲带呈现较冷的温度(图 2b, 2c 中红线和绿线). 相反, 较老大洋岩石圈导致较大的俯冲角度, 引起软流圈上涌, 俯冲带呈现较热的温度结构(图 2b 和 2c 中蓝线、黑线和粉红色线). 对上覆大陆板块而言, 当其厚度较薄时, 大洋板块的俯冲角度较大, 上涌软流圈引起较热的俯冲带温度结构(图 2d 和 2e 中红线和绿线); 随着厚度增加, 大洋板块的俯冲角度逐渐变

小, 上覆大陆岩石圈和俯冲大洋岩石圈的耦合作用逐渐变强, 俯冲带的温度结构逐渐变冷(图 2d 和 2e 中蓝线、黑线和粉红线). 因此, 如图 3 所示, 当俯冲大洋板块较年轻或上覆大陆板块较厚(红色箭头右侧区域)时, 导致较小的大洋板片俯冲角度, 俯冲大洋岩石圈和上覆大陆岩石圈的耦合作用较强, 俯冲带的温度结构较冷, 俯冲带内流体—熔体活动较弱, 对上覆地幔楔的弱化程度较小, 导致俯冲带内混杂岩只能沿俯冲隧道折返至地壳深度; 相反, 当俯冲大洋板块较老或上覆大陆板块较薄(蓝色箭头左侧区域)时, 导致较大的大洋板片俯冲角度, 上涌

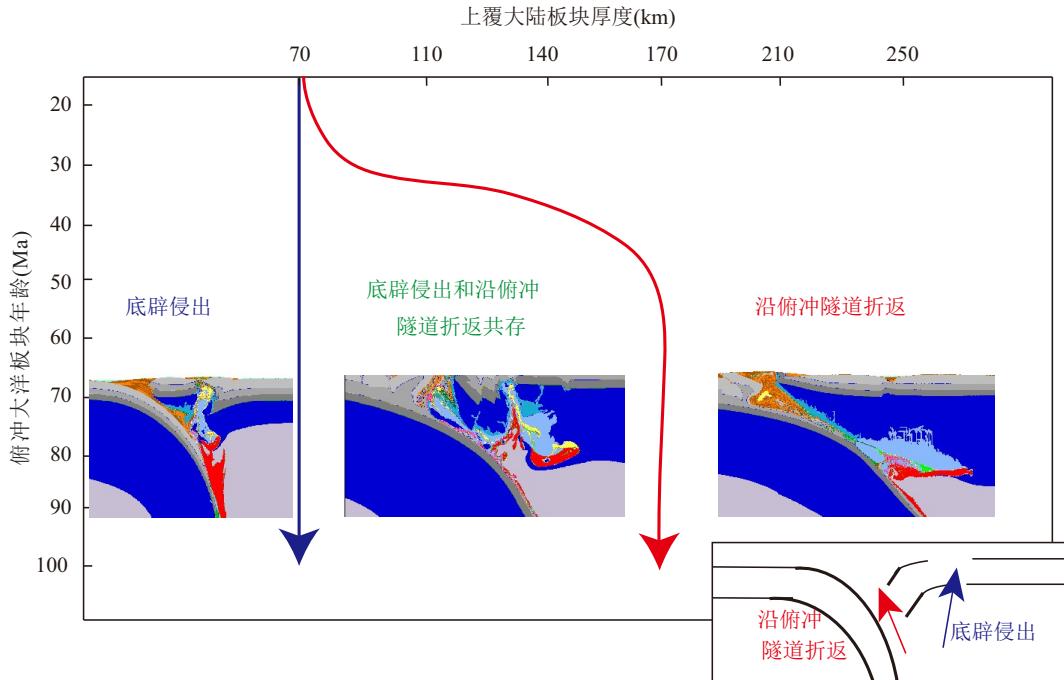


图3 俯冲带物质折返模式相

Fig.3 Regime diagram of material exhumation in the subduction zones

修改自 Liu et al.(2017)

软流圈引起较热的俯冲带温度结构,俯冲带内流体—熔体活动较强,上覆地幔楔被严重弱化,其流变强度变低,形成穿越地幔楔上升的通道,俯冲带内低密度混杂岩几乎全部以底辟侵出形式,近垂直穿过弱化通道折返到地壳深度.蓝色箭头和红色箭头中间区域为过渡区域,底辟侵出和沿俯冲隧道折返共存.在这个区域,受俯冲大洋岩石圈和上覆大陆岩石圈的共同影响,大洋板片的俯冲角度介于左右两侧区域之间,俯冲带的温度结构也介于左右两侧区域之间,受俯冲带内流体-熔体活动影响,上覆地幔楔虽受一定程度弱化,但不足以使全部混杂岩以底辟侵出形式折返到地壳深度,因而部分混杂岩沿俯冲隧道形式折返到地壳深度.值得指出的是,板块平俯冲的冷结构阻碍了部分熔融作用的发生,因此部分熔融仅在俯冲板块的前缘(即平俯冲向陡俯冲转换的部位)发育,而高角度俯冲的部分熔融则是在弧下 1 000 km 左右的深度发育.

在无水模型中,俯冲带物质的折返都是沿着俯冲隧道进行的,因为流变强度较大的上覆岩石圈作为折返通道的顶面而存在(李忠海等,2015).而在含水模型中,俯冲大洋板片和沉积物的脱水/水化作用受俯冲带温度结构的影响,强烈制约俯冲带内的流体—熔体活动及上覆地幔楔的弱化程度.较冷的

俯冲带温度结构导致俯冲带内的流体和熔体活动较弱,上覆地幔楔被弱化的程度较低,俯冲带内的物质只能沿俯冲隧道折返至地壳深度(图 3 中红色箭头).世界上大多数高压—超高压岩体都是以这种折返模式形成的(Zheng, 2012).然而,对于较热的俯冲带温度结构,俯冲带内显著的流体和熔体活动对上覆地幔楔产生严重弱化,导致俯冲隧道内物质以底辟形式折返(图 3 中蓝色箭头),例如巴布亚新几内亚高压—超高压岩体(Liu et al., 2017).

3 含水岩石圈弱化对大陆碰撞模式的制约

大陆板块俯冲—碰撞过程中的岩石圈变形及可能拆沉作用与岩石圈的流变强度息息相关,而后者又受到前期俯冲过程中的水流体和熔体活动的强烈制约.基于会聚大陆板块不同的流变性质、密度特征及会聚速率,系统的数值模拟(Li et al., 2016)揭示弱化的岩石圈地幔是其强烈变形和拆沉作用发生的先决条件(图 4);进而揭示三种不同的大陆岩石圈拆沉模式:俯冲板块拆沉、上覆板块拆沉以及两个会聚板块同时拆沉.俯冲板块的拆沉受控于较低的会聚速率、较高的岩石圈密度以及流变

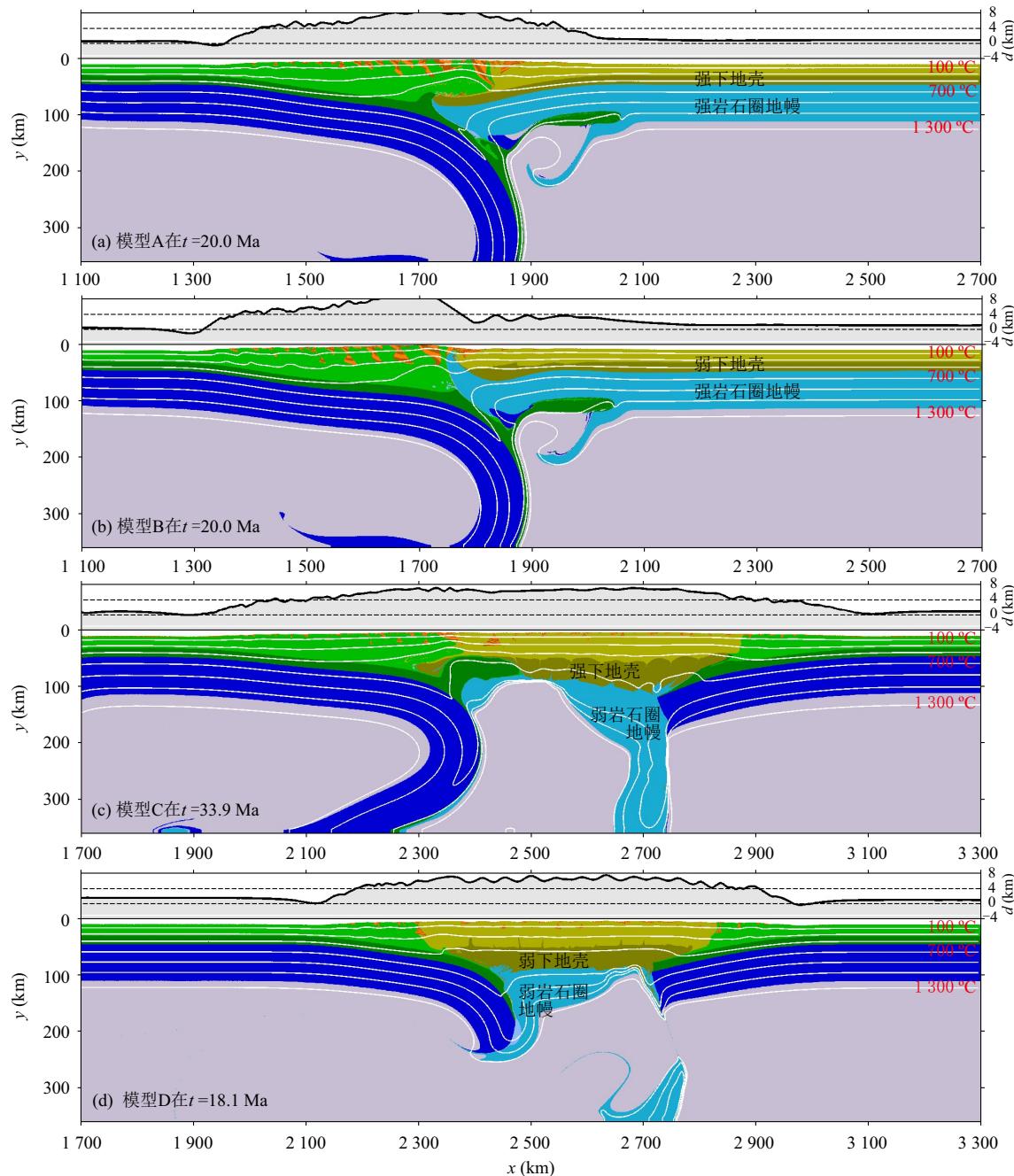


图4 岩石圈弱化程度对大陆俯冲碰撞模式的制约

Fig.4 Constraints of lithospheric weakening on the continental subduction and collision

修改自 Li *et al.* (2016);模型A和B的上覆岩石圈地幔采用干橄榄岩的流变强度,而模型C和D的上覆岩石圈地幔采用湿橄榄岩的流变强度(Ranalli, 1995)

强度较大的上覆岩石圈,而上覆板块的拆沉需要一个流变强度较弱的上覆岩石圈,归因于前期板块俯冲过程中流体—熔体活动的弱化作用,青藏高原中北部是对应这种拆沉模式的一个典型地区。同时,数值模型还揭示岩石圈拆沉的地表响应,尤其是地形响应特征。碰撞造山带大尺度的岩石圈拆沉可以产生宽而平的高原(图4c, 4d),而如果没有岩石圈

拆沉,则仅产生宽度较小的狭长造山带(图4a, 4b)。

系统的数值模型结果与新特提斯构造带的差异性大陆俯冲模式进行了对比研究,主要围绕该构造域内的三个典型碰撞造山带(安纳托利亚、扎格罗斯和喜马拉雅;见图5)而开展(皇甫鹏鹏等, 2017; Huangfu *et al.*, 2018, 2019)。根据模型结果中的大陆俯冲型式以及上覆大陆的变形行为,可以将

大陆俯冲分为岩石圈尺度俯冲和地壳尺度下插两种类型。前者定义为俯冲侧大陆岩石圈上覆大陆岩石圈地幔之下俯冲(见图 5 东安纳托利亚高原和伊朗高原壳幔结构图),而后者指的是俯冲大陆岩石圈直接下插并近水平垫置于上覆大陆地壳之下,进而形成所谓的“双地壳”结构(见图 5 青藏高原壳幔结构图)。喜马拉雅造山带是大陆地壳尺度下插模式的典型代表,而另两个造山带均属于大陆岩石圈尺度俯冲模式,但后者具体的俯冲样式仍存在显著差异性。对于岩石圈尺度俯冲模式,其上覆大陆岩石圈的弱化程度较低,因而在板块会聚过程中的变形很小。相反,大陆地壳尺度下插模式的前提条件是上覆岩石圈经历过强烈的弱化(例如受到前期俯冲过程的剧烈流体—熔体活动的作用),因而在板块会聚过程中,该弱化的岩石圈发生强烈缩短、增厚

及拆沉作用,最终导致俯冲板块下插于上覆板块地壳之下。该工作揭示出新特提斯构造域不同造山带大陆碰撞模式差异性的主控因素,为深入理解大陆俯冲—碰撞的壳幔结构及地质演化提供理论支撑。

4 结论

系统的数值模型揭示,水流体活动对于板块俯冲隧道过程及大陆碰撞造山作用具有重要影响,本文的主要结论如下。

(1) 俯冲带内物质既包含从俯冲板块拆离的表壳岩,也包含了从上覆板块底部刮擦、蚀变的地幔岩,从而形成一个构造混杂岩体。俯冲带中的混杂岩既可以近平行于俯冲带的方式向上折返,形成靠近缝合带的高压—超高压变质岩;又可能以近垂直的方式向上穿过地幔楔侵入上覆地壳中。而这两种

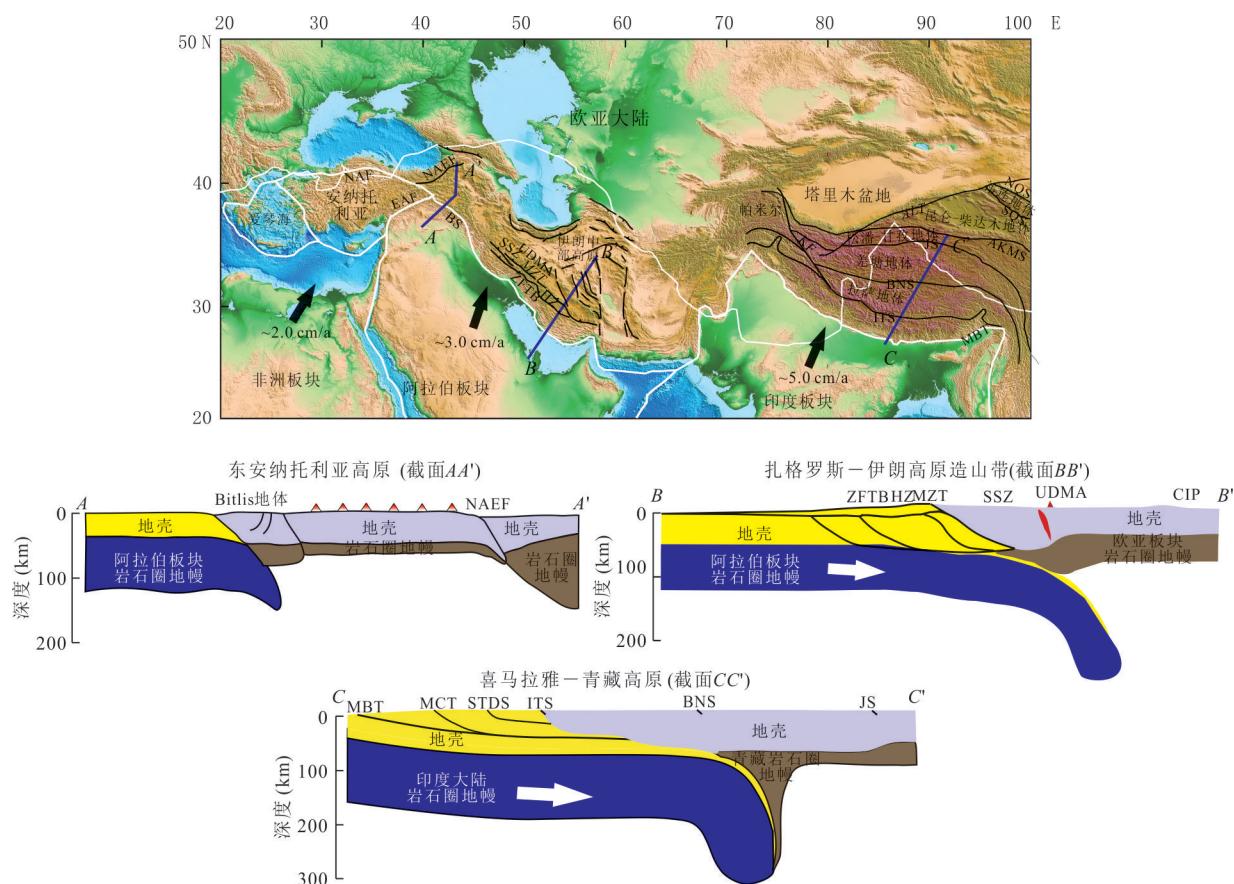


图 5 阿尔卑斯—喜马拉雅构造域内三个典型造山带区域地质简图及壳幔结构示意

Fig.5 Major tectonic units and simplified crustal-lithospheric structure of three collisional orogenies within the Alpine-Himalayan belt

区域主要构造线及构造单元(从西至东):EAF.东安纳托利亚断裂;NAF.北安纳托利亚断裂;NEAF.北东安纳托里亚断裂;BS.Bitlis缝合带;ZFTB.扎格罗斯褶皱带;HZ.高扎格罗斯;SSZ.Sanandaj-Sirjan区域;UDMA.Urumieh-Dokhtar岩浆弧;CIP.中部伊朗高原;MBT.主边界断裂;MCT.主中央断裂;STDS.藏南拆离系;ITS.雅江缝合带;BNS.班怒缝合带;JS.金沙江缝合带;KF.喀喇昆仑断裂;修改自 Huangfu et al.(2019)

差异性的模式与俯冲带水流体活动的弱化作用直接相关。

(2)俯冲带的热结构控制着俯冲带中的流体—熔体活动,进而制约上覆地幔楔的弱化程度,最终强烈影响俯冲带中的物质运移过程和路径。板块会聚条件相同时,年轻的俯冲大洋板块和/或厚的上覆大陆板块使得俯冲角度较低并产生较冷的俯冲带。俯冲带中的流体—熔体活动较弱,进而对上覆大陆板块的弱化程度较小。相反,薄的上覆大陆板块和/或相对古老俯冲大洋板块将引起高角度俯冲并产生较热的俯冲带,导致上覆地幔楔在强烈的水化以及交代作用下发生强烈弱化。

(3)大陆俯冲带的岩石圈变形和拆沉作用与俯冲带的流体—熔体活动所导致的岩石圈弱化息息相关。数值模拟结果揭示,特提斯造山带的安纳托利亚高原、扎格罗斯—伊朗高原和喜马拉雅—青藏高原的上覆岩石圈都受到俯冲带流体活动不同程度的影响,最终导致差异性的俯冲带结构。造山后岩石圈的去根和拆沉作用也受前期的岩石圈弱化的控制。

致谢:感谢郑永飞院士及三位评审人对本文提出的宝贵意见和建议。

References

- Behn, M.D., Kelemen, P.B., Hirth, G., et al., 2011. Diaps as the Source of the Sediment Signature in Arc Lavas. *Nature Geoscience*, 4(9):641–646. <https://doi.org/10.1038/ngeo1214>
- Butler, J.P., Beaumont, C., Jamieson, R.A., 2013. The Alps 1: A Working Geodynamic Model for Burial and Exhumation of (Ultra) High-Pressure Rocks in Alpine-Type Orogenes. *Earth and Planetary Science Letters*, (377–378): 114–131. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.06.039>
- Burg, J.P., Gerya, T.V., 2005. The Role of Viscous Heating in Barrovian Metamorphism of Collisional Orogenes: Thermomechanical Models and Application to the Lepontine Dome in the Central Alps. *Journal of Metamorphic Geology*, 23(2): 75–95. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2005.00563.x>
- Connolly, J. A. D., 2005. Computation of Phase Equilibria by Linear Programming: A Tool for Geodynamic Modeling and Its Application to Subduction Zone Decarbonation. *Earth and Planetary Science Letters*, 236(1–2): 524–541. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.04.033>
- Gerya, T. V., Meilick, F. I., 2011. Geodynamic Regimes of Subduction under an Active Margin: Effects of Rheological Weakening by Fluids and Melts. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(1): 7–31. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2010.00904.x>
- Hacker, B. R., Abers, G. A., Peacock, S. M., 2003. Subduction Factory 1. Theoretical Mineralogy, Densities, Seismic Wave Speeds, and H₂O Contents. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B1): 2029. <https://doi.org/10.1029/2001jb001127>
- Huangfu, P. P., Li, Z. H., Fan, W. M., et al., 2019. Continental Lithospheric-Scale Subduction versus Crustal-Scale Underthrusting in the Collision Zone: Numerical Modeling. *Tectonophysics*, 757: 68–87. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.03.007>
- Huangfu, P. P., Li, Z. H., Gerya, T., et al., 2018. Multi-Terrane Structure Controls the Contrasting Lithospheric Evolution beneath the Western and Central-Eastern Tibetan Plateau. *Nature Communications*, 9:3780.
- 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*, 47(2): 135–153 (in Chinese).
- Iwamori, H., 2004. Phase Relations of Peridotites under H₂O-Saturated Conditions and Ability of Subducting Plates for Transportation of H₂O. *Earth and Planetary Science Letters*, 227(1–2): 57–71. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.08.013>
- Leng, W., Mao, W., 2015. Geodynamic Modeling of Thermal Structure of Subduction Zones. *Science China: Earth Sciences*, 58(7): 1070–1083. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5107-5>
- Li, Z. H., 2014. A Review on the Numerical Geodynamic Modeling of Continental Subduction, Collision and Exhumation. *Science China: Earth Sciences*, 44(5): 817–841 (in Chinese).
- Li, Z. H., Gerya, T., Connolly, J. A. D., 2019. Variability of Subducting Slab Morphologies in the Mantle Transition Zone: Insight from Petrological-Thermomechanical Modeling. *Earth-Science Reviews*, 196: 102874. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.05.018>
- Li, Z. H., Gerya, T. V., Burg, J. P., 2010. Influence of Tectonic Overpressure on P-T paths of HP-UHP Rocks in Continental Collision Zones: Thermomechanical Modelling. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(3): 227–247. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2009.00864.x>
- Li, Z. H., Liu, M. Q., Gerya, T., 2015. Material Transportation and Fluid-Melt Activity in the Subduction Channel: Numerical Modeling. *Science China: Earth Sciences*, 45(7):

- 881—899(in Chinese).
- Li, Z.H., Liu, M.Q., Gerya, T., 2016. Lithosphere Delamination in Continental Collisional Orogens: A Systematic Numerical Study. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(7): 5186—5211. <https://doi.org/10.1002/2016jb013106>
- Liu, M.Q., Li, Z.H., 2018. Dynamics of Thinning and Destruction of the Continental Cratonic Lithosphere: Numerical Modeling. *Science China:Earth Sciences*, 48(7):844—877 (in Chinese).
- Liu, M.Q., Li, Z.H., Yang, S.H., 2017. 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>
- Ranalli, G., 1995. Deformation and Flow Processes in Geophysics and Geodynamics. Chapman & Hall, Ranalli London, 413.
- Wang, Q., 2010. A Review of Water Contents and Ductile Deformation Mechanisms of Olivine: Implications for the Lithosphere - Asthenosphere Boundary of Continents. *Lithos*, 120(1—2): 30—41. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.05.010>
- Zheng, Y. F., 2012. Metamorphic Chemical Geodynamics in Continental Subduction Zones. *Chemical Geology*, 328: 5—48.<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.02.005>
- 附中文参考文献**
- 皇甫鹏鹏,王岳军,范蔚茗,等,2017.大陆不稳定俯冲的动力学研究.中国科学:地球科学,47(2):135—153.
- 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—843.
- 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(7):881—899.
- 刘明启,李忠海,2018.克拉通岩石圈减薄与破坏机制的动力学数值模拟.中国科学:地球科学,48(7):844—877.