

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.253>



大陆俯冲带热结构的数值模拟

冷 伟, 孙郁东

中国科学技术大学地球和空间科学学院, 地震与地球内部物理实验室, 安徽合肥 230026

摘 要: 俯冲带热结构是控制俯冲板块演化的最主要因素之一. 前人通过建立解析模型和数值模型对大洋俯冲带热结构进行了一系列研究, 发现俯冲板块年龄和俯冲速度是影响俯冲带热结构的关键因素. 为了认识大陆俯冲带热结构, 特别是理解数值模型结果与岩石学结果之间的差异, 我们建立了二维大陆俯冲带运动学和动力学数值模型研究其热结构演化. 模型结果显示, 如果大陆俯冲板块的俯冲速度与角度和大洋板块一致的话, 较低的大陆俯冲带初始温度导致其板块温度比大洋俯冲带低. 但是, 当大陆俯冲板块的初始温度较高, 俯冲速度超慢并且考虑大陆地壳中的放射性元素生热时, 模型得到的大陆俯冲带热结构能够解释通过高压和超高压变质岩得到的较热俯冲带温度. 另一方面, 如果俯冲板块与上覆板块存在动力学解耦作用, 也能够得到较热的俯冲带温压数据.

关键词: 俯冲带; 热结构; 大陆俯冲带; 数值模型; 地球动力学.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2019)12-3993-05

收稿日期: 2019-08-27

Numerical Modeling of Thermal Structure for the Continental Subduction Zones

Leng Wei, Sun Yudong

Laboratory of Seismology and Physics of the Earth's Interior, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: The thermal structure of subduction zone is one of the most important factors controlling the evolution of subduction plate. Previous studies on the thermal structure of oceanic subduction zones have been carried out by establishing analytical and numerical models. It is found that the age and velocity of the subduction plate are the key factors affecting the thermal structure of the subduction zones. In order to further understand the thermal structure of the continental subduction zone, especially to understand the difference between the numerical model results and petrological results, we established two-dimensional numerical kinematic and geodynamic models of the continental subduction zone to study its thermal structure evolution. The model results show that if the subduction velocity and dip angle of the continental plate are the same as those of the oceanic plate, lower initial temperature causes the continental subduction zone to be colder than the oceanic subduction zone. However, when the initial temperature of the continental plate is high, the subduction velocity is super slow and the heat generation of radioactive elements in the continental crust is taken into account, the thermal structure of the continental subduction zone obtained by the model can explain the hot subduction temperature obtained from high-pressure and ultra-high-pressure metamorphic rocks. On the other hand, if there is dynamic decoupling between the subduction plate and the overlying plate, the hot subduction temperature can also be obtained.

Key words: subduction zone; thermal structure; continental subduction zone; numerical modeling; geodynamics.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(No.2015CB856106).

作者简介: 冷伟(1980-), 男, 博士, 教授, 从事地球动力学相关研究, 主要研究方向包括俯冲板块和地幔热柱动力学, 岩石圈形变和地幔对流等. ORCID: 0000-0002-7979-4100. E-mail: wleng@ustc.edu.cn

引用格式: 冷伟, 孙郁东, 2019. 大陆俯冲带热结构的数值模拟. 地球科学, 44(12):3993-3997.

1 俯冲带热结构的主要控制因素

理解大陆俯冲带的一个重要前提是得到其热结构. 板块在俯冲过程中与周围地幔不断发生热交换, 其热结构是控制俯冲过程的最重要参数之一 (Zheng and Chen, 2016; Leng and Huang, 2018). 一方面, 俯冲板块的温度决定着其相对于周围地幔的密度异常, 是驱动板块运动的主要动力; 另一方面, 俯冲板块的温度对其自身的强度、板块矿物成分的相变、脱水以及岩石的部分熔融等具有重要影响, 导致了俯冲带大地震和岛弧火山活动等关键地质现象的形成 (Stern, 2002; Peacock, 2003; Zheng, 2019). 因此, 对俯冲带热结构的研究是板块构造研究的一个重要方面.

板块俯冲过程中的温度变化可以使用一个无量纲化的能量守恒方程进行描述:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T = \kappa \nabla^2 T + H, \quad (1)$$

(1)式中 T 、 t 、 κ 和 H 分别为无量纲化的温度、时间、热扩散系数和内部生热率. \mathbf{v} 为无量纲化板块运动速度矢量. 公式(1)中的 $\frac{\partial T}{\partial t}$ 项描述板块温度相对于初始温度的变化, $\mathbf{v} \cdot \nabla T$ 、 $\kappa \nabla^2 T$ 以及 H 三项分别描述对流效应, 传导效应以及生热效应对俯冲板块温度结构的影响. 前人通过大量的解析模型 (McKenzie, 1969; Molnar and England, 1990; England and Wilkins, 2004) 和数值模型 (Peacock and Wang, 1999; van Keken *et al.*, 2002; Syracuse *et al.*, 2010) 研究发现, 俯冲板块的热结构主要受以下几个因素控制, 包括俯冲板块年龄, 板块之间的汇聚速度和俯冲角度, 地幔楔的性质, 上覆板块厚度以及俯冲导致的剪切生热等 (图 1).

其中俯冲板块的年龄决定了俯冲板块的初始温度结构; 板块之间的汇聚速度和俯冲角度通过对流效应改变俯冲板块的温度; 地幔楔的性质主要体现在其粘性结构, 通过热传导效应改变俯冲板块的温度; 上覆板块的厚度影响地幔楔开始加热俯冲板块的深度; 而俯冲导致的剪切生热则通过生热效应影响板块界面的温度. 综合前人结果, 决定俯冲带热结构最主要的因素是板块汇聚的速度和俯冲板块的年龄 (Leng and Mao, 2015 及其中的参考文献); 板块汇聚越慢、俯冲板块年龄越小, 其表面温度越高; 反之, 速度越快、年龄越大, 则表面温度越低; 矿物相变以及岩石的水化和脱水作用都能对俯

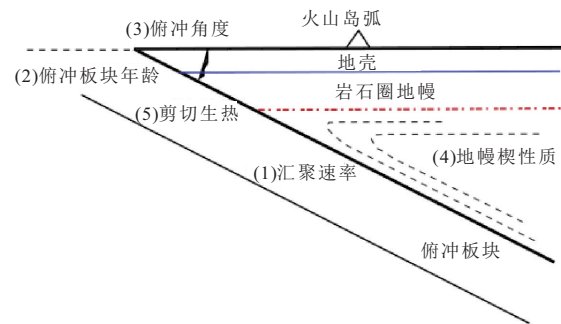


图 1 俯冲带热结构的主要控制因素

Fig.1 Key controlling parameters for thermal structure of subduction zones

包括汇聚速率、俯冲板块年龄、俯冲角度、地幔楔性质和剪切生热等; 据 Zheng (2019)

冲带的热结构产生影响 (Rüpke *et al.*, 2004; van Keken *et al.*, 2011), 但这些影响小于其速度和年龄的影响, 并且一般集中于局部区域 (Leng and Mao, 2015; Zheng and Chen, 2016); 剪切生热主要作用于脆性/韧性转换带之上, 对应的深度在 10~15 km, 其对俯冲带热结构的影响还存在一定的争议 (Kohn *et al.*, 2018; van Keken *et al.*, 2019).

2 大陆俯冲带数值模型

前人已经建立了较好的数值模型用来研究大洋俯冲带热结构, 并且应用到了地球表面的主要大洋俯冲带区域 (Syracuse *et al.*, 2010). 这些数值模型的控制参数主要根据现今大洋俯冲带的特征进行设置, 包括不同的上覆板块性质、俯冲板块的年龄、俯冲速度和俯冲角度、剪切生热等. 根据俯冲板块的动力来源, 可以分为运动学模型 (kinematic modeling) 和动力学模型 (dynamic modeling) 两种主要类型. 其中运动学模型不考虑俯冲板块本身的重力, 俯冲板块的运动由事先给定的速度边界条件进行驱动 (van Keken *et al.*, 2008). 因此运动学模型可以精细的设定俯冲板块的主要运动学特征 (如俯冲速度和角度等), 进而研究各种运动学特征对俯冲板块热结构的影响. 与之相对, 动力学模型中俯冲板块由其本身的重力所驱动, 因此其相对更为真实地反映了板块俯冲的动力学演化, 包括俯冲板块与上覆板块的解耦等复杂过程 (Billen and Hirth, 2007). 但是, 动力学模型无法像运动学模型那样对俯冲板块的俯冲速度和俯冲角度等参数进行严格设定. 两种模型互为补充, 都在俯冲带热结构的研究中有广

泛的应用。

相对于大洋俯冲带热结构的研究,前人对大陆俯冲板块热结构的研究还不多。大陆俯冲涉及碰撞造山作用(Zheng and Chen, 2016),似乎构造演化过程一般更为复杂,用来研究大陆俯冲带热结构的数值模型需要额外考虑几点特殊的设置。首先,大洋俯冲带的初始温度结构可以根据年龄使用半空间冷却模型进行很好的约束(Turcotte and Schubert, 2002)。但是对于大陆俯冲带来说,虽然下沉和上覆板块的年龄都老于大洋板块,但是其初始温度结构与年龄之间的关系还没有准确的公式可以很好的描述。因此,我们需要使用地表测量得到的热流作为主要约束参数,通过给定地壳中的放射性元素生热率,求解一维热传导方程得到大陆俯冲带的初始温度结构(Syracuse *et al.*, 2010)。其次,与大洋地壳相比,大陆地壳中的放射性元素富集程度要高得多,在俯冲过程中能够对大陆俯冲板块进行持续加热,因此需要考虑其对大陆俯冲带热结构的影响。再次,大陆俯冲板块在俯冲过程中由于其密度较小,会对俯冲过程起到明显的阻碍作用。同时,由于俯冲地壳中的变质高压相和超高压相的力学强度大于大洋俯冲带中的蛇纹岩(Zheng, 2012),大陆俯冲板块表面受到的阻力要大于大洋俯冲板块。因此,大陆俯冲带的俯冲速度可能为慢速甚至是超慢速(Zheng, 2012; Burov *et al.*, 2014),这个需要在模型中予以考虑。最后,大陆俯冲过程一般跟随前序的大洋俯冲进行,在从大洋俯冲到大陆俯冲转换的过程中,可能存在着板块的断离和解耦作用,需要建立相应的动力学模型进行研究。

3 大陆俯冲带热结构

大陆俯冲带的主要分布区域为从阿尔卑斯到中亚造山带,一直延伸到中国的齐鲁—大别碰撞造山带(Zheng, 2012)。与大洋俯冲带相比,在研究大陆俯冲带时,俯冲后折返到地面的高压和超高压变质岩的温压数据为我们提供了对其热结构的重要约束(Zheng and Chen, 2016)。然而,通过对比以往的数值模型结果和高压/超高压变质岩的温压数据, Penniston-Dorland *et al.* (2015) 研究发现,变质岩数据给出的大陆俯冲带温度普遍高于数值模型得到的温度,一般接近于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的热梯度线。在对大陆俯冲带热结构的研究中,需要重点探讨这一系统偏差的可能原因。

我们使用有限元地幔对流 Citcom 程序(Moresi and Solomatov, 1995)建立了二维大陆俯冲带热结构的运动学模型。我们的运动学模型与图 1 展示的一致,整个俯冲板块的速度为固定值(分为 $5\text{ cm}/\text{a}$ 、 $1\text{ cm}/\text{a}$ 和 $0.5\text{ cm}/\text{a}$ 三种情况)。俯冲板块的初始温度结构由给定的地表热流(分为 $30\text{ mW}/\text{m}^2$ 、 $65\text{ mW}/\text{m}^2$ 和 $90\text{ mW}/\text{m}^2$ 三种情况)计算得到。上覆板块为固定边界条件,温度结构由 $65\text{ mW}/\text{m}^2$ 的热流值计算得到。右侧为自由流入流出的边界条件。上覆板块与俯冲板块的解耦深度对该深度附近的板块表面温度具有重要影响。从前人模型出发,我们选择的解耦深度为 80 km ,这会导致俯冲板块在 80 km 深度直接受到软流圈的快速加热作用(Syracuse *et al.*, 2010)。模型的粘性系数由温度控制,由于俯冲板块的温度结构仅受控于垂直方向的速度,在模型中我们固定了板块的俯冲角度为 30° 。

首先考虑较老的克拉通区域,设其地表热流为 $30\text{ mW}/\text{m}^2$,俯冲速度为 $5\text{ cm}/\text{a}$ 。模型结果显示,对于年龄较老厚度较大的大陆俯冲板块,其较低的初始温度结构使得俯冲板块的表面温度比绝大多数大洋俯冲板块的表面温度都要低,一般低于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的地温梯度(图 2, 黑色线条);当考虑非克拉通区域的大陆板块俯冲时,将地表热流从 $30\text{ mW}/\text{m}^2$ 增加到 $65\text{ mW}/\text{m}^2$ 。初始温度的提高使得大陆俯冲板块的表面温度也有了一定程度的提高,在浅部接近于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的地温梯度(图 2, 绿色线条)。由于大陆俯冲带受到的阻力较大,俯冲速度较慢。我们接下来将大陆板块的俯冲速度从 $5\text{ cm}/\text{a}$ 降低到 $1\text{ cm}/\text{a}$ 。对于这种慢速俯冲,板块表面温度由于地幔楔的持续加热作用,使得其地温梯度介于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 与 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (图 2, 蓝色线条)。最终,我们将俯冲速度降低为 $0.5\text{ cm}/\text{a}$,同时考虑大陆地壳中的放射性元素生热效应。在这种超慢速俯冲并伴随放射性生热的条件下,板块表面的温度分布接近 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的地温梯度线(图 2, 红色线条)。需要注意的是大陆地壳中的放射性元素生热对俯冲板块表面温度影响较小,俯冲板块表面温度的升高主要是由于俯冲速度降低造成的。

我们还进一步建立了大陆俯冲带的动力学模型。动力学模型由运动学模型修改得到。与运动学模型的主要区别为俯冲板块自身的速度和俯冲角度不再由初始条件给定,而是由左侧流入的边界条件和俯冲板块自身的负浮力约束演化得到。同时,

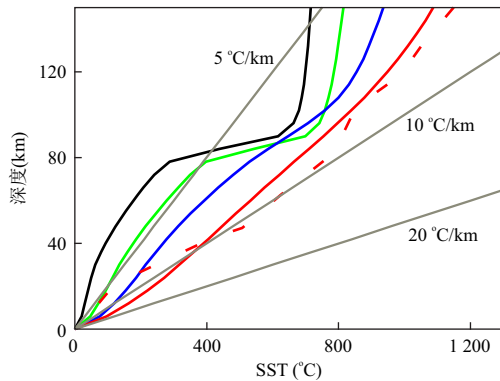


图2 不同模型参数下的大陆俯冲板块的表面温度(SST)随深度的分布

Fig.2 Slab surface temperature (SST) for the continental subduction zones with different model parameters

黑色线条代表俯冲速度为 5 cm/a, 地表热流为 30 mW/m² 的大陆俯冲板块得到的热结构; 绿色线条代表将地表热流从 30 mW/m² 增加到 65 mW/m² 得到的热结构; 蓝色线条代表不仅增加地表热流, 同时将俯冲速度从 5 cm/a 降低到 1 cm/a 得到的热结构; 红色线条代表进一步的降低俯冲速度到 0.5 cm/a, 同时考虑大陆地壳的放射性元素生热效应得到的热结构. 以上模型中俯冲角度均为 30°. 红色虚线代表使用动力学模型得到的热结构. 其中的三条灰色线条分别代表 5 °C/km、10 °C/km 和 20 °C/km 的地温梯度线

由于大陆板块的俯冲一般由大洋板块拖动导致, 我们在大陆板块俯冲之前增加了 200 km 长度的大洋俯冲板块. 模型结果显示, 当大陆俯冲板块与上覆板块耦合时, 其表面温度较低. 但是当大陆俯冲板块与上覆板块发生解耦导致地幔楔物质上涌时 (Zheng and Chen, 2016; Zheng, 2019), 可以快速加热俯冲板块表面, 使其表面地温梯度达到 10 °C/km (图 2, 红色虚线). 我们的结果为解释使用高压和超高压变质岩数据得到的大陆俯冲板块的 P - T 轨迹图提供了可能.

我们的模型中没有考虑剪切生热对大陆俯冲带温度结构的影响. Kohn *et al.* (2018) 认为, 剪切生热可以对俯冲板块温度起到很大的加热作用. van Keken *et al.* (2019) 则认为这种加热作用即使存在, 也只作用于脆性/韧性转换带之上. 对于大陆俯冲带, 剪切生热的作用程度和范围值得建立新的模型进行深入探讨. 我们的模型中也没有考虑部分熔融和矿物脱水的作用. 这两种作用对板块的表面温度都有一定的影响 (Rüpke *et al.*, 2004; van Keken *et al.*, 2011), 但是考虑这两种因素需要在模型中加入更多的复杂参数和过程, 是下一步的研究方向之

一. 由于多种作用的共同影响, 对于不同的大陆俯冲带, 造成温度结构变化的原因也可能不尽相同, 因此未来需要更为细致的模型和更多的地表观测资料以得到对大陆俯冲带热结构更好的约束.

致谢: 郑永飞院士的意见和建议对本文的完成起到了重要作用, 在此表示感谢!

References

- Billen, M. I., Hirth, G., 2007. Rheologic Controls on Slab Dynamics. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(8): Q08012. <https://doi.org/10.1029/2007gc001597>
- Burov, E., Francois, T., Agard, P., et al., 2014. Rheological and Geodynamic Controls on the Mechanisms of Subduction and HP/UHP Exhumation of Crustal Rocks during Continental Collision: Insights from Numerical Models. *Tectonophysics*, 631:212–250. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.04.033>
- England, P., Wilkins, C., 2004. A Simple Analytical Approximation to the Temperature Structure in Subduction Zones. *Geophysical Journal International*, 159(3):1138–1154.
- Kohn, M. J., Castro, A. E., Kerswell, B. C., et al., 2018. Shear Heating Reconciles Thermal Models with the Metamorphic Rock Record of Subduction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(46):11706–11711.
- Leng, W., Huang, L. Z., 2018. Progress in Numerical Modeling of Subducting Plate Dynamics. *Science China: Earth Sciences*, 61(12):1761–1774.
- Leng, W., Mao, W., 2015. Geodynamic Modeling of Thermal Structure of Subduction Zones. *Science China: Earth Sciences*, 58(7):1070–1083.
- McKenzie, D. P., 1969. Speculations on the Consequences and Causes of Plate Motions. *Geophysical Journal International*, 18(1): 1–32. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1969.tb00259.x>
- Molnar, P., England, P., 1990. Temperatures, Heat Flux, and Frictional Stress near Major Thrust Faults. *Journal of Geophysical Research*, 95(B4):4833–4856.
- Moresi, L. N., Solomatov, V. S., 1995. Numerical Investigation of 2D Convection with Extremely Large Viscosity Variations. *Physics of Fluids*, 7(9):2154–2162.
- Peacock, S. M., 2003. Thermal Structure and Metamorphic Evolution of Subducting Slabs. Inside the Subduction Factory. AGU, Washington D. C., 7–22.
- Peacock, S. M., Wang, K., 1999. Seismic Consequences of Warm versus Cool Subduction Metamorphism: Examples from Southwest and Northeast Japan. *Science*, 286

- (5441):937–939.
- Penniston-Dorland, S. C., Kohn, M. J., Manning, C. E., 2015. The Global Range of Subduction Zone Thermal Structures from Exhumed Blueschists and Eclogites: Rocks are Hotter than Models. *Earth and Planetary Science Letters*, 428: 243–254. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.07.031>
- Rüpke, L. H., Morgan, J. P., Hort, M., et al., 2004. Serpentine and the Subduction Zone Water Cycle. *Earth and Planetary Science Letters*, 223:17–34.
- Stern, R. J., 2002. Subduction Zones. *Reviews of Geophysics*, 40(4):2001RG000108.
- Syracuse, E. M., van Keken, P. E., Abers, G. A., 2010. The Global Range of Subduction Zone Thermal Models. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 183(1–2): 73–90.
- Turcotte, D. L., Schubert, G., 2002. *Geodynamics*. Cambridge University Press, New York, 456.
- van Keken, P. E., Currie, C., King, S. D., et al., 2008. A Community Benchmark for Subduction Zone Modeling. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1–4):187–197. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.04.015>
- van Keken, P. E., Hacker, B. R., Syracuse, E. M., et al., 2011. Subduction Factory: 4. Depth-Dependent Flux of H₂O from Subducting Slabs Worldwide. *Journal of Geophysical Research*, 116(B1):B01401. <https://doi.org/10.1029/2010jb007922>
- van Keken, P. E., Kiefer, B., Peacock, S. M., 2002. High-Resolution Models of Subduction Zones: Implications for Mineral Dehydration Reactions and the Transport of Water into the Deep Mantle. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3(10): 2001GC000256. <https://doi.org/10.1029/2001gc000256>
- van Keken, P. E., Wada, I., Sime, N., et al., 2019. Thermal Structure of the Forearc in Subduction Zones: A Comparison of Methodologies. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(7): 3268–3288. <https://doi.org/10.1029/2019gc008334>
- Zheng, Y. F., 2012. Metamorphic Chemical Geodynamics in Continental Subduction Zones. *Chemical Geology*, 328: 5–48. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.02.005>
- Zheng, Y. F., 2019. Subduction Zone Geochemistry. *Geoscience Frontiers*, 10(4):1223–1254
- 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>