

文章编号: 1006-6616 (2016) 03-0421-09

长江经济带地区岩石圈热流变 结构和深部动力学

孙玉军¹, 吴中海¹, 贾凤琴²

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 海南省地质环境监测总站, 海口 570216)

摘要: 通过 Crust 2.0 模型构建有限元三维数值模型, 以地表观测温度、深部反演温度和地表热流作为约束, 计算了长江经济带地区岩石圈温度结构; 在温度结构的基础上, 通过 GPS 观测数据得到的地表应变率和选取代表性岩石物性, 计算了长江经济带岩石圈流变强度和等效粘滞性系数。结果表明: 长江经济带地区岩石圈表现出明显的横向不均匀性, 其中四川盆地表现为低温、高强度和高粘滞性的特征, 相同深度, 四川盆地核心区比周围地块的温度低 100 ~ 300 °C, 强度和粘滞性分别比周缘高 1 ~ 2 个数量级; 在温度、强度和粘滞性的过渡地带构造活动性比较强烈。结合深部地球物理观测综合分析认为, 长江经济带东、西部分别受到太平洋板块深俯冲和印度-欧亚大陆板块碰撞的影响, 其深部影响范围分别达到四川盆地的东、西边界, 深部动力学过程可能导致了岩石圈的横向不均匀性。

关键词: 长江经济带; 岩石圈; 热流变结构

中图分类号: P542+.5

文献标识码: A

1 研究背景

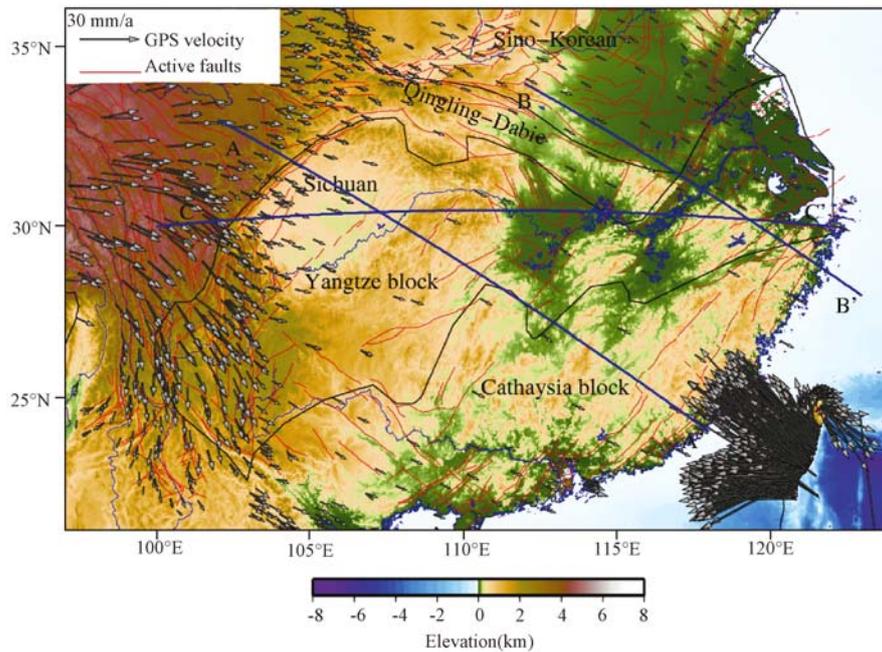
长江经济带地区主要是指长江干流及其支流流经的区域, 依托黄金水道建设长江经济带是我国未来经济社会发展的重大战略目标之一。从构造地质角度看, 长江经济带与华南大陆的大部分相重合, 包含了扬子地块的主体以及华夏地块和华北地块的部分地区, 有着复杂的地质构造演化历史^[1~2] (见图 1)。中新生代以来, 该区处于青藏高原形成及扩展、太平洋板块西向俯冲和印度-澳大利亚板块北向差异运动的共同作用下, 因此构造变形强烈, 动力学演化过程复杂^[1,3]。对长江经济带地区的岩石圈热流变结构和深部地球物理特征进行研究不仅有助于理解该区域的动力学演化机制, 同时可以对新构造和活动构造调查提供深部约束。

为获取该区域的岩石圈热流变结构, 本研究基于 Crust 2.0 模型构建了合理的三维数值模型, 以地表观测温度、深部反演温度和地表热流作为约束计算长江经济带岩石圈的深部温

收稿日期: 2016-03-06

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“长江经济带活动构造与区域地壳稳定性调查”(DD20160268)

作者简介: 孙玉军 (1983-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事地球动力学方面的研究。E-mail: sunyujunabc@163.com



箭头代表相对于稳定的欧亚大陆板块，该区域及缘的 GPS 观测速度值^[4-5]，红色实线代表活动断裂^[6]

图 1 长江经济带地区构造背景图 (据文献 [4~6] 修编)

Fig. 1 Tectonic setting map around the Yangtze River Economic Belt

度结构，并在此基础上，通过 GPS 观测数据得到的地表应变率，选取不同深度代表性岩石物性，计算了长江经济带地区岩石圈流变强度和等效粘滞性系数。基于这些结果结合深部地球物理研究结果对长江经济带地区的岩石圈特征及深部动力学过程进行了综合分析。

2 计算方法

2.1 温度场

根据 Crust 2.0 模型和地表地形数据，在球坐标系下建立了中国大陆岩石圈三维有限元模型。通过地震波波速获取的岩石圈上地幔温度为计算岩石圈热结构提供了强有力的深部约束^[7-8]。采用此方法，An and Shi^[9-10] 计算了中国大陆及邻区岩石圈上地幔温度。本文选取他们在 100 km 深度的温度结果作为计算岩石圈热结构的深部约束，同时将中国大陆地区 195 个地表气象台站提供的地表地温数据作为地表的温度约束。根据三维稳态热传导方程，考虑到热参数的各向不均匀性，计算了中国大陆及邻区岩石圈三维热结构。该计算结果与地表热流观测数据进行了对比，其中 89% 的数据误差控制在 20% 以内（热流实际观测的误差为 20%^[11]），本文中计算岩石圈蠕变强度中需要的温度采用此结果，详见文献 [12]。

2.2 岩石圈强度和等效粘滞性系数

岩石圈强度和等效粘滞性系数是岩石圈流变结构的 2 个基本参数。一般来说，岩石的失效形式有摩擦滑动、脆性破裂和蠕变，而这 3 种形式也被用来定义岩石圈的强度^[13]。

①摩擦滑动：假定 $2\sigma_2 = \sigma_1 - \sigma_3$ ，孔隙压力为 0，本文采用走滑断层的强度表达式来计算岩石圈的摩擦滑动强度^[14-16]。

$$2\tau_f = \sigma_1 - \sigma_3 = \begin{cases} 34.91z & z < 12.8\text{km} \\ 27.73z + 85.75 & 12.8\text{km} < z < 102.0\text{km} \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ_f 为摩擦滑动强度; z 为深度, km; σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为最大、中间和最小主应力, MPa。

②脆性破裂: 如果所考虑的岩石预先并不存在破裂面或者在破裂面之间完整岩石的尺寸比较大, 则岩石的整体强度需要用脆性破裂来约束^[13]。这种强度机制与岩石样品的尺度、所处的温度、压力和应变率密切相关。在温度为 800 °C 以下可以表示为如下形式^[15~18]:

$$2\tau_b = \sigma_1 - \sigma_3 = B_0 \left[1 + K \left(\frac{\sigma_c}{B_0} \right)^m \right] \left[1 + \alpha \left(\lg \frac{T}{T_0} \right)^\beta \right] \left[1 + \gamma \left(\lg \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \quad (2)$$

式中: τ_b 是脆性破裂强度; B_0 , K , m , α , β , γ 分别是岩石样本在大尺度 (1 m 尺度)、温度 T 、静岩压力 σ_c 情况下的岩石样本参数; 参考温度 T_0 和参考应变率 $\dot{\epsilon}_0$ 分别为 25 °C 和 10^{-5} s^{-1} 。

③蠕变: 当岩石圈温度和压力足够高时, 蠕变往往占主导地位。蠕变强度与温度、应变率和岩石属性密切相关。蠕变强度可以采用下式计算^[19~21]:

$$2\tau_d = \sigma_1 - \sigma_3 = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{A} \right)^{\frac{1}{n}} \exp\left(\frac{E}{nRT} \right) \quad (3)$$

式中: τ_d 是蠕变强度; $\dot{\epsilon}$ 是应变率; $\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$ 为差应力, MPa; $R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 为普适气体常数; T 为绝对温度, K; A , n , E 为岩石物性参数。

在一定温度和压力下, 以上 3 种强度机制中的一种将会占主导地位。本文在计算岩石圈强度的过程中, 3 种强度机制都进行了计算, 在一定温度和压力条件下, 选取其中最小的一个作为岩石圈的强度, 即:

$$\tau = \min(\tau_f, \tau_b, \tau_d) \quad (4)$$

得到岩石圈的强度后, 岩石圈的等效粘滞性系数可以表达为如下形式^[22]:

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{1}{2\dot{\epsilon}} (\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\tau}{\dot{\epsilon}} \quad (5)$$

在温度计算^[12]的基础上, 通过 GPS 观测数据得到的地表应变率^[23], 选取不同深度代表性岩石物性^[24], 计算得到了长江经济带岩石圈流变强度和等效粘滞性系数。

3 长江经济带地区岩石圈热流变结构

3.1 长江经济带地区岩石圈热结构特征

不同深度的温度结果 (见图 2) 显示, 长江经济带地区的四川盆地在相同深度的温度较低, 与之相邻的松潘—甘孜地块、印支地块、华夏地块和中朝地块在相同深度温度均较高。从具体温度数值来看, 在相同深度, 四川盆地核心区比周围地块的温度低 100 ~ 300 °C。温度场结果显示, 四川盆地岩石圈呈现冷而厚的特征, 这使其构造变形弱, 相对稳定; 而在四川盆地与其他地块的过渡地带, 构造变形均较强烈, 这与地表活动构造分布基本一致。从垂向剖面 (见图 3a) 看, 四川盆地的岩石圈下部 (大于 80 km) 温度整体较低, 而处于其两侧的青藏高原和华夏地块岩石圈下部温度较高。长江经济带下游的华夏地块和中朝地块的深部高温区可能与太平洋板块俯冲引起的岩石圈减薄因素有关, 而上游的印支地块可能与印度板块的俯冲有关, 松潘—甘孜地块的高温区可能与青藏高原物质东向运移有关。因此, 该结果显示扬子地块的东、西两部分温度分布特征差异较大。

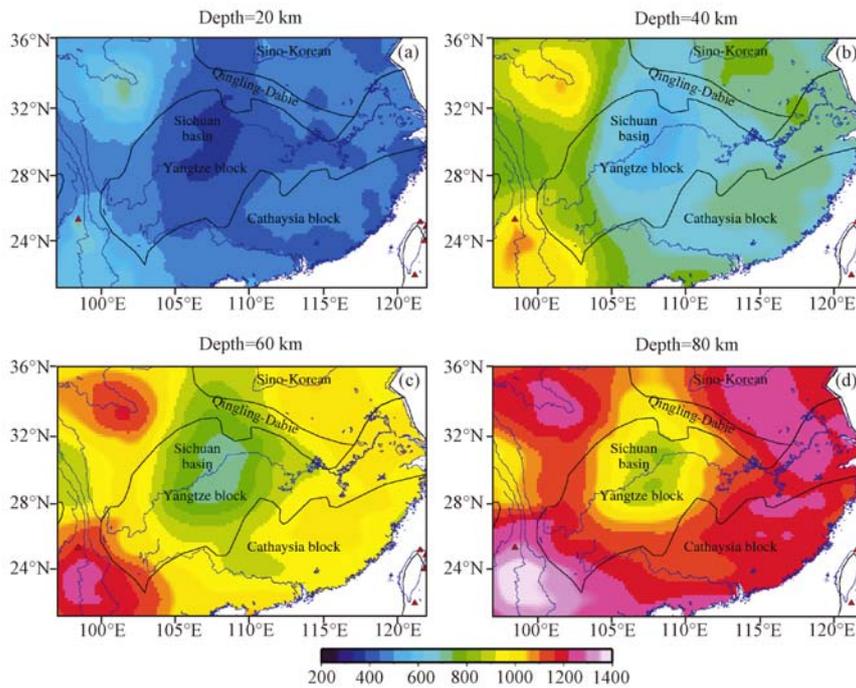


图2 长江经济带地区岩石圈不同深度温度场

Fig. 2 Temperature distribution at different depths of the lithosphere in the Yangtze River Economic Belt

3.2 长江经济带地区岩石圈流变结构特征

岩石圈的强度显示出明显的横向不均匀性(见图4)。在浅部(深度小于60 km),青藏高原周缘的岩石圈强度较低(小于10 MPa),扬子地块、华夏地块和中朝地块岩石圈强度都较高(大于10 MPa),而四川盆地及周缘地区的岩石圈强度最高,基本处于100 MPa左右。在深部(深度大于60 km),只有四川盆地及周缘地区岩石圈强度高于1 MPa,其他地区均低于该值。不同地块之间存在比较明显的强度过渡带,特别是在40 km深度处青藏高原和四川盆地之间的过渡带比较明显,强度差异大(见图4b),同时该过渡带与重力梯度带、地形阶梯带、地震波速变化带和构造活动性的过渡带也相对一致。垂向上看(见图3b),青藏高原的岩石圈强度整体较低,即相比周缘地块,其地壳和岩石圈地幔强度均较低,而且在60 km以下基本都低于1 MPa;在四川盆地及周缘100 km以上岩石圈强度基本都高于1 MPa,地壳和地幔岩石圈顶部强度最高,在10~100 MPa;其他区域地壳和地幔岩石圈顶部强度也较高,但岩石圈地幔深部(大于80 km),岩石圈强度明显降低至0.1 MPa左右。这与这些地区的温度分布特征比较相似。计算得到的强度剖面也显示了明显的分层性(见图3b),岩石圈强度呈现出脆-韧性相间分布的特征,下地壳均呈现出韧性特征,而且弱强度的下地壳广泛存在于研究区,下地壳的流变强度一般比上地壳和岩石圈地幔上部低1~2个数量级。

岩石圈等效粘滞性分布特征与岩石圈强度的分布特征比较一致。横向上看(见图5),在浅部(深度小于60 km),青藏高原的等效粘滞性系数(一般低于 10^{23} Pa·s)比扬子地块、华夏地块和中朝地块(一般高于 10^{23} Pa·s)要低;在深部(深度大于60 km),只有四川盆地及周缘岩石圈强度高于 10^{22} Pa·s,其他地区均低于该值。不同地块之间粘滞性系数也存在比较明显的过渡带。垂向上看(见图3c),上地壳、中地壳和岩石圈地幔上部的等效

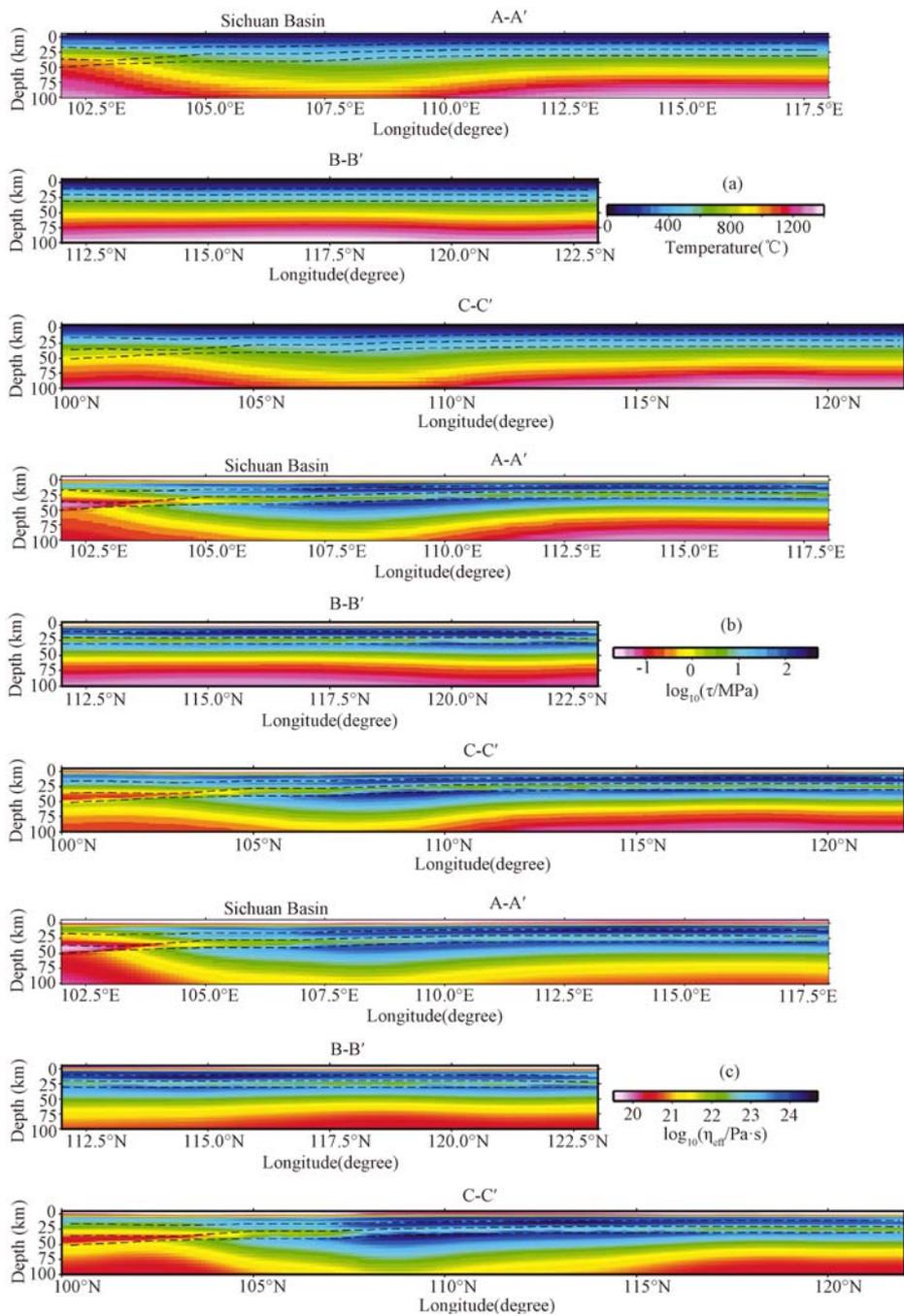


图3 长江经济带地区各个剖面岩石圈温度、强度和等效粘滞性系数分布 (剖面位置见图1)

Fig.3 Distributions of temperature, strength and viscosity of the lithosphere at different profiles in the Yangtze River Economic Belt

粘滞性系数较高, 下地壳的等效粘滞性系数较低, 厚而“弱”的下地壳在青藏高原的特征最为明显; 从量级上看 (见图3c), 下地壳的等效粘滞性系数一般比上地壳和岩石圈地幔的要低1~2个数量级。青藏高原的上地壳和中地壳等效粘滞性系数在 $10^{21} \sim 10^{22}$ 量级, 而扬子地块、华夏地块和中朝地块的上地壳和中地壳的等效粘滞性系数在 $10^{23} \sim 10^{24}$ 量级; 青藏高

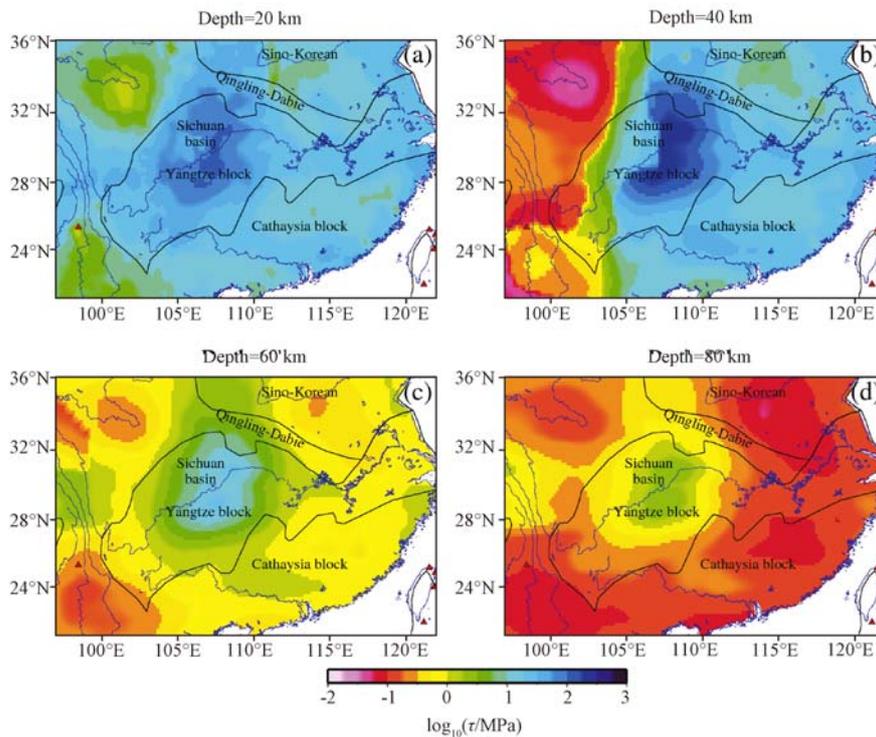


图4 长江经济带地区岩石圈不同深度的强度分布

Fig. 4 Lithospheric strength distribution at different depths in the Yangtze River Economic Belt

原的下地壳等效粘滞性系数只有 $10^{19} \sim 10^{21} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 而扬子地块、华夏地块和中朝地块的下地壳等效粘滞性系数在 $10^{21} \sim 10^{22}$ 量级。

3.3 长江经济带地区深部地球物理特征

从长江经济带地区的深部地震层析成像结果(见图6)来看, 所获取的热流变结构与其有较好的一致性。高精度 P 波层析成像结果^[25-26]显示, 扬子地块的东、西部有较大差异。在扬子地块西部, 主要以四川盆地的低速异常为主, 岩石圈厚而稳定, 受其西部印度板块俯冲的影响, 四川盆地下部的软流圈表现为低速异常, 但是在 400 km 深度之上整体为低速异常, 与本文所获取的温度场、岩石圈强度和等效粘滞性比较一致, 因此, 印度板块俯冲对扬子地块的影响可能只限于四川盆地及以西地区。在扬子地块中东部, 除了扬子地块东部 100 km 深度以上部分表现为高速异常外, 其他 400 km 深度以上区域均表现为明显的低速异常, 这可能是由于太平洋板块深俯冲引起的, 地幔深部层析成像结果显示深俯冲的太平洋板块在 410 ~ 660 km 深度范围内可能一直延伸至四川盆地以东区域, 使得其上覆地幔加热扰动而呈现低速异常, 该结果显示太平洋板块的深俯冲可能向西影响到四川盆地的东边界。从本文所获取的岩石圈热结构和流变特征来看, 与深部地震层析成像结果比较一致。

4 讨论和结论

本文通过构建三维数值模型, 结合地表温度观测、热流观测和深部岩石圈地幔温度约束, 获取了长江经济带地区岩石圈温度场结果; 在此基础上根据岩石圈分层结构和实验室获

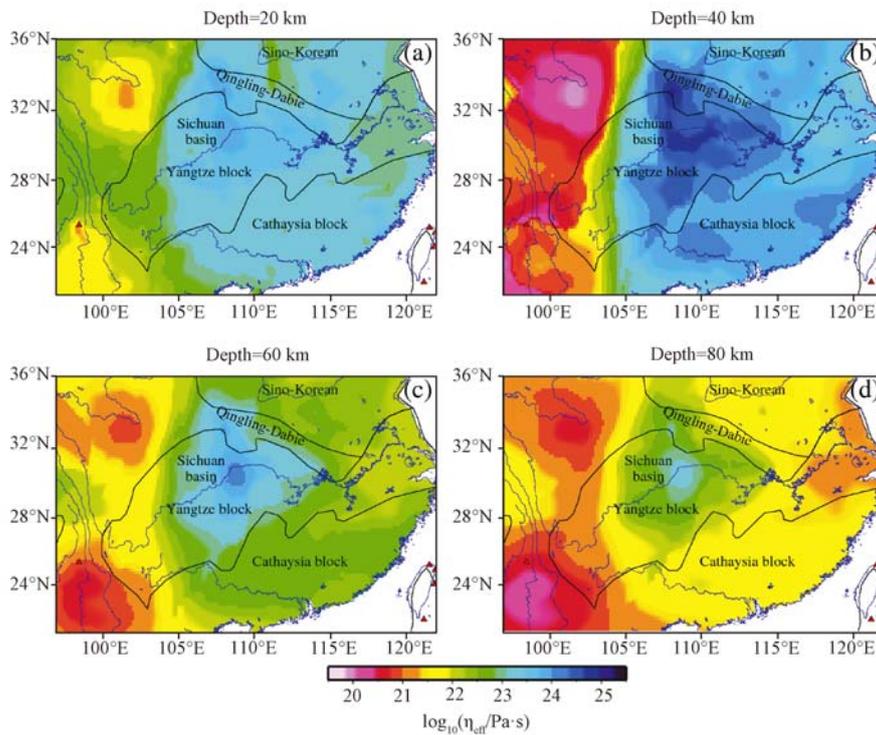


图 5 长江经济带地区岩石圈不同深度的等效粘滞性系数分布
 Fig. 5 Viscosity distribution at different lithospheric depths in the Yangtze River Economic Belt

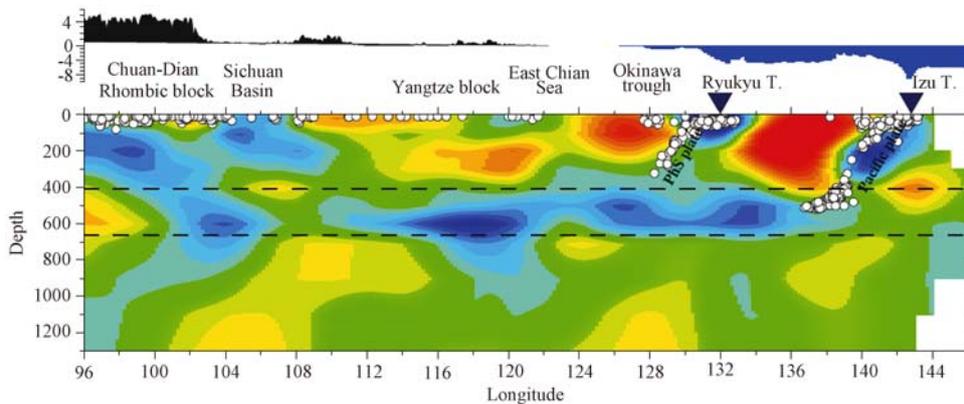


图 6 长江经济带地区及周缘深部地震层析成像结果^[25] (剖面沿着北纬 30°)
 Fig. 6 Deep seismic tomography results in the Yangtze River Economic Belt and adjacent area

取的典型代表性岩石的流变参数, 依据合理的流变强度机制约束, 计算分析了长江经济带地区岩石圈强度和等效粘滞性系数。所获取的岩石圈温度、强度和粘滞性系数虽然存在一定的不确定性^[12,24], 但与深部地震层析成像获取的结果具有较好的一致性。

相对于青藏高原, 扬子地块和华夏地块整体表现为低温、高强度和高粘滞性的特征。但扬子地块东部和西部在温度、岩石圈强度和等效粘滞性系数等特征上存在较大差别, 四川盆地及其周缘地壳和地幔岩石圈整体表现为低温、高强度和高粘滞性的特征, 构造稳定变形

弱；而扬子地块中、东部地区表现为高温、低强度和低粘滞性的特征。结合深部地震波层析成像结果初步认为，印度-欧亚板块的碰撞动力作用可能仅仅影响到四川盆地以西地区，而太平洋板块的深俯冲影响可能一直延伸至四川盆地的东边界，长江经济带地区东、西方向受到这两大动力作用影响，在温度、岩石圈强度和粘滞性方面表现出较大差异性。

参 考 文 献

- [1] 舒良树. 华南构造演化的基本特征 [J]. 地质通报, 2012, 31 (7): 1035 ~ 1053.
SHU Liang-shu. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31 (7): 1035 ~ 1053.
- [2] 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 中国华南大陆构造与问题 [J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43 (10): 1553 ~ 1582.
ZHANG Guo-wei, GUO An-lin, WANG Yue-jun, et al. Tectonics of South China continent and its implications [J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43 (10): 1553 ~ 1582.
- [3] 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 等. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录 [J]. 地学前缘, 2009, 16 (1): 234 ~ 247.
ZHANG Yue-qiao, XU Xian-bing, JIA Dong, et al. Deformation record of the change from Indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic system in South China during the Early Mesozoic [J]. Earth Sciences Frontiers, 2009, 16 (1): 234 ~ 247.
- [4] Gan W, Zhang P, Shen Z-K, et al. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: B08416.
- [5] Kreemer C, Blewitt G, Klein E C. A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2014, 15 (10): 3849 ~ 3889.
- [6] Deng Q, Zhang P, Ran Y, et al. Basic characteristics of active tectonics of China [J]. Science in China: Earth Sciences, 2003, 46 (4): 356 ~ 372.
- [7] Goes S, Govers R, Vacher P. Shallow mantle temperatures under Europe from P and S wave tomography [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105 (B5): 11153 ~ 11169.
- [8] Goes S, Lee S v d. Thermal structure of the North American uppermost mantle inferred from seismic tomography [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107 (B3): 2050.
- [9] An M, Shi Y. Lithospheric thickness of the Chinese continent [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2006, 159 (3/4): 257 ~ 266.
- [10] An M, Shi Y. Three-dimensional thermal structure of the Chinese continental crust and upper mantle [J]. Science in China: Series D, 2007, 50 (10): 1441 ~ 1451.
- [11] Hu S, He L, Wang J. Heat flow in the continental area of China: a new data set [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 179: 407 ~ 419.
- [12] Sun Y, Dong S, Zhang H, et al. 3D thermal structure of the continental lithosphere beneath China and adjacent regions [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 62: 697 ~ 704.
- [13] Kohlstedt D L, Evans B, Mackwell S J. Strength of the lithosphere: Constraints imposed by laboratory experiments [J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100 (B9): 17587 ~ 17602.
- [14] 臧绍先, 李昶, 魏荣强. 岩石圈流变机制的确定及影响岩石圈流变强度的因素 [J]. 地球物理学进展, 2002, 17 (1): 50 ~ 60.
ZANG Shao-xian, LI Chang, WEI Rong-qiang. The determination of the deformational mechanism of the lithosphere and the factors influenced the lithospheric rheological strength [J]. Progress in Geophysics, 2002, 17 (1): 50 ~ 60.
- [15] Zang S X, Wei R Q, Liu Y G. Three-dimensional rheological structure of the lithosphere in the Ordos block and its adjacent area [J]. Geophysical Journal International, 2005, 163 (1): 339 ~ 356.
- [16] Zang S X, Wei R Q, Ning J Y. Effect of brittle fracture on the rheological structure of the lithosphere and its application in the Ordos [J]. Tectonophysics, 2007, 429: 267 ~ 285.
- [17] 魏荣强, 臧绍先. 岩石破裂强度的温度和应变率效应及其对岩石圈流变结构的影响 [J]. 地球物理学报, 2006, 49 (6): 1730 ~ 1737.
WEI Rong-qiang, ZANG Shao-xian. Effects of temperature and strain rate on the fracture strength of rock and their influences on the rheological structure of the lithosphere [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49 (6): 1730

~1737.

- [18] Shimada M. Lithosphere strength inferred from fracture strength of rocks at high confining pressures and temperatures [J]. *Tectonophysics*, 1993, 217: 55 ~ 64.
- [19] Kirby S H. Rheology of the lithosphere [J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1983, 21 (6): 1458 ~ 1487.
- [20] Ranalli G, Murphy D C. Rheological stratification of the lithosphere [J]. *Tectonophysics*, 1987, 132: 281 ~ 295.
- [21] Weertman J. The creep strength of the Earth's mantle [J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1970, 8 (1): 145 ~ 168.
- [22] Kirby S H, Kronenberg A K. Rheology of the lithosphere: Selected topics [J]. *Review of Geophysics*, 1987, 25 (6): 1219 ~ 1244.
- [23] Zhu S, Shi Y. Estimation of GPS strain rate and its error analysis in the Chinese continent [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 40 (1): 351 ~ 362.
- [24] 孙玉军, 董树文, 范桃园, 等. 中国大陆及邻区岩石圈三维流变结构 [J]. *地球物理学报*, 2013, 56 (9): 2936 ~ 2946.
SUN Yu-jun, DONG Shu-wen, FAN Tao-yuan, et al. 3D rheological structure of the continental lithosphere beneath China and adjacent regions [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56 (5): 546 ~ 558.
- [25] Huang J, Zhao D. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111 (B9): B09305.
- [26] Wei W, Xu J, Zhao D, et al. East Asia mantle tomography: New insight into plate subduction and intraplate volcanism [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 60: 88 ~ 103.

LITHOSPHERIC THERMAL-RHEOLOGICAL STRUCTURE AND DEEP GEODYNAMICS IN THE YANGTZE RIVER ECONOMIC BELT

SUN Yu-jun¹, WU Zhong-hai¹, JIA Feng-qin²

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Hainan Province Geological Environmental Monitoring Station, Haikou 570216, China)*

Abstract: Constructing the finite three-dimensional numerical model through Crust 2.0, under constraints of the surface temperature, deep inversion temperature and surface heat flow, we have calculated the thermal structure of the continental lithosphere beneath Yangtze River Economic Belt and adjacent regions. On the basis of 3D thermal structure, deriving surface strain rates from GPS observation, and selecting representative rock physical properties, we have calculated the strength and effective viscosity of the continental lithosphere. The results show that there is obvious lateral heterogeneity in the Yangtze River Economic Belt. The Sichuan basin has low temperature, high strength and high viscosity. In the same depth, temperature beneath the Sichuan basin is lower than ambient region for 100 ~ 300 °C. Strength and viscosity is lower for 1 ~ 2 orders of magnitude. The transition zone of temperature, strength and viscosity has strong active tectonics. Combining with deep geophysical observation, the study proposed that the Pacific Plate subduction and India-Eurasia Plate collision played important roles in the deep dynamic process respectively in the eastern and western parts of the Yangtze River Economic Belt. The effective sphere reach the eastern and western boundaries of Sichuan basin, deep dynamic process may lead to the horizontal heterogeneity of the lithosphere.

Key words: the Yangtze River Economic Belt; lithosphere; thermal-rheological structure