

一、模型研制的目的、必要性和需求分析目的：建立川滇地区壳幔粘滞结构模型，为川滇地区运动学模型和动力学模型的构建提供流变结构的参考。

必要性：流变结构对岩石圈的变形有很大的影响。在地球动力学数值模拟研究中，壳幔粘滞结构的数值量级将极大地影响定量模拟的结果，对等效粘滞系数合理的估计是取得可靠科学结果的基础（张晁军等，2008；石耀霖和曹建玲，2008）。

需求分析：震后形变因其包含有地球介质的流变信息，已成为研究地球介质粘性特征的重要手段。以往粘滞系数的研究通常是在某次大地震或特大地震发生之后，该区域的粘滞系数可以通过震后形变得以确定（沈正康等，2003；邵志刚等，2008；张晁军等，2008；Copley et al., 2012）。然而大地震发生后粘滞系数计算存在一定局限性，在更多的没有大地震震后形变观测而又重要的块体或断裂带，粘滞结构的确定仍然具有重要的意义。故可采用岩石实验室资料、壳幔温度状态以及震间期 GPS 观测资料求得的应变速率来估算粘滞结构，从而进一步分析川滇地区地下流变特征并应用于地球动力学模拟中。

二、模型预期指标和技术路线

预期指标：建立川滇地区壳幔粘滞结构模型，获得剖面流变结构。

技术路线：本任务采用岩石实验室资料、壳幔温度状态以及震间期 GPS 观测资料求得的应变速率来估算粘滞结构。主要参考石耀霖和曹建玲（2008）的方法，利用中国大陆岩石圈温度估计成果和 GPS 计算的应变速率结果，计算了川滇地区地壳和上地幔的等效粘滞系数。经典地估计岩石流变结构的一种方法是：利用一维稳态热传导方程计算的温度，再利用库仑摩擦强度和流变强度公式计算不同深度的岩石强度，得到强度随深度变化的包络线，由包络线可以确定岩石处于脆性域还是柔性域。对于处于柔性变形的岩石，在温度和应变速率确定时，可以计算其等效粘滞系数：

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{\tau_{\text{creep}}}{\dot{\epsilon}} = \frac{\epsilon^{-\frac{1-n}{n}}}{2A\dot{\epsilon}^{\frac{1}{n}}} \exp\left(\frac{E}{nRT}\right)$$

其中， τ_{creep} 是柔性域内一定温度和应变速率下的强度， $\dot{\epsilon}$ 是应变率， T 是绝对温度， R 是普适气体常数， A 、 n 、 E 是可以由岩石实验得到的特定岩石的流变常数。

三、模型数据来源和质量分析

(1) 温度场数据：Sun Y J, Dong S W, Fan T Y, et al. 3D rheological structure of the continental lithosphere beneath China and adjacent regions. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(5), 546-558.

(2) 速度场数据：Zheng, G., Wang, H., Wright, T. J., Lou, Y., Zhang, R., Zhang, W., ... Wei, N. (2017). Crustal deformation in the India-Eurasia collision zone from 25 years of GPS measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122. <https://doi.org/10.1002/2017JB014465>

(3) 地壳厚度：采用 crust1.0 的地壳厚度数据

(4) 岩石流变常数：石耀霖，曹建玲. 中国大陆岩石圈等效粘滞系数的计算和讨论. *地学前缘*, 2008, 15(3): 82~95.

Sun Y J, Dong S W, Fan T Y, et al. 3D rheological structure of the continental lithosphere beneath China and adjacent regions. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(5), 546-558.

四、模型研制关键技术方法

利用库仑摩擦强度和流变强度公式计算不同深度的岩石强度，得到强度随深度变化的包络线，由包络线可以确定岩石处于脆性域还是柔性域。对于处于柔性变形的岩石，在温度和应变速率确定时，可以计算其等效粘滞系数。

五、模型完成情况与成果

获得了川滇地区壳幔粘滞结构，并给出不同深度粘滞系数的分布（图 1），给出端点为（96.5，24.5）和（105，30.5）的剖面上粘滞系数随深度的变化（图 2），同时给出东经 105°、北纬 30°处的粘滞系数随深度的分布（图 3）。

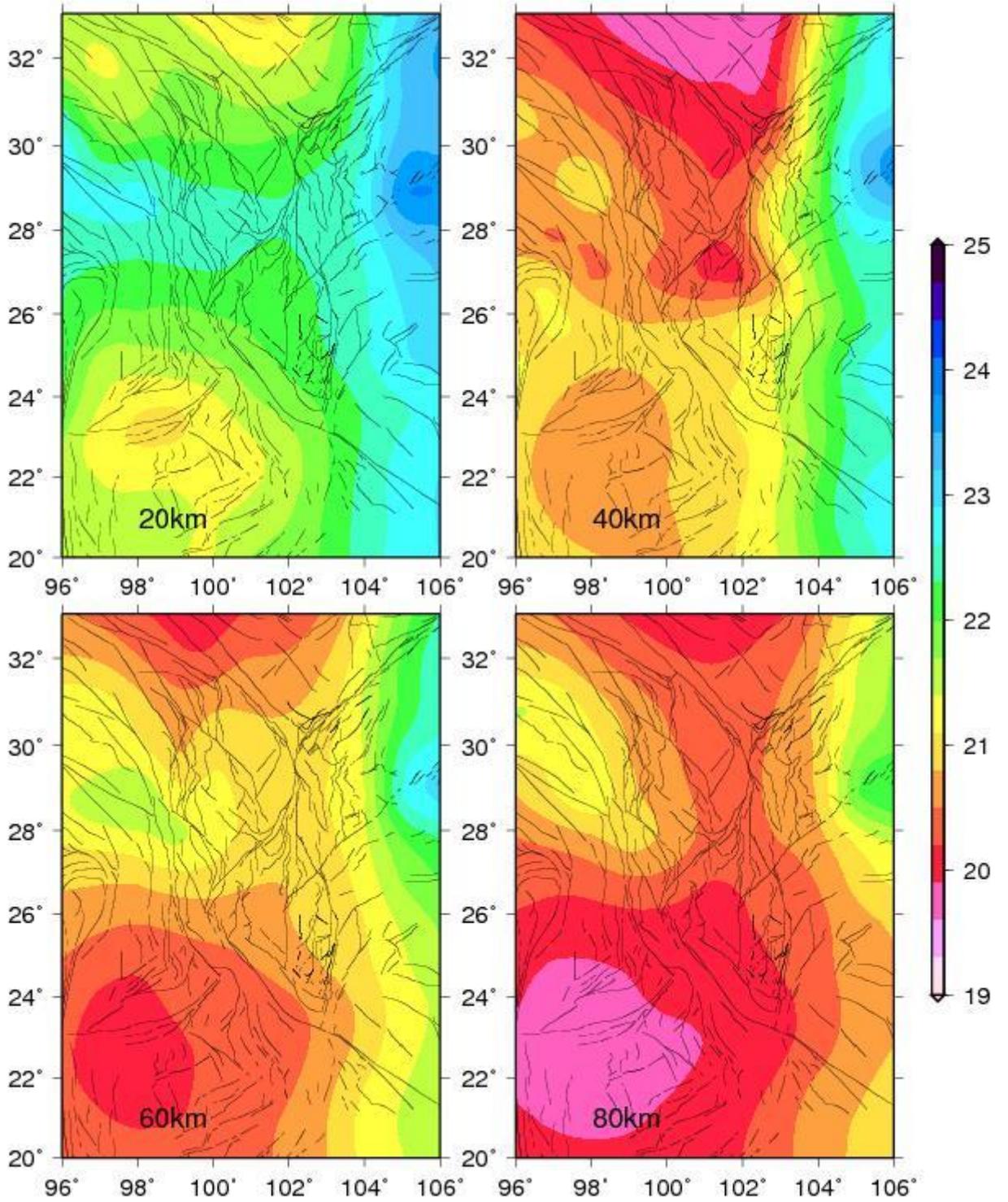


图 1 川滇地区不同深度粘滞系数分布 (20km, 40km, 60km, 80km)

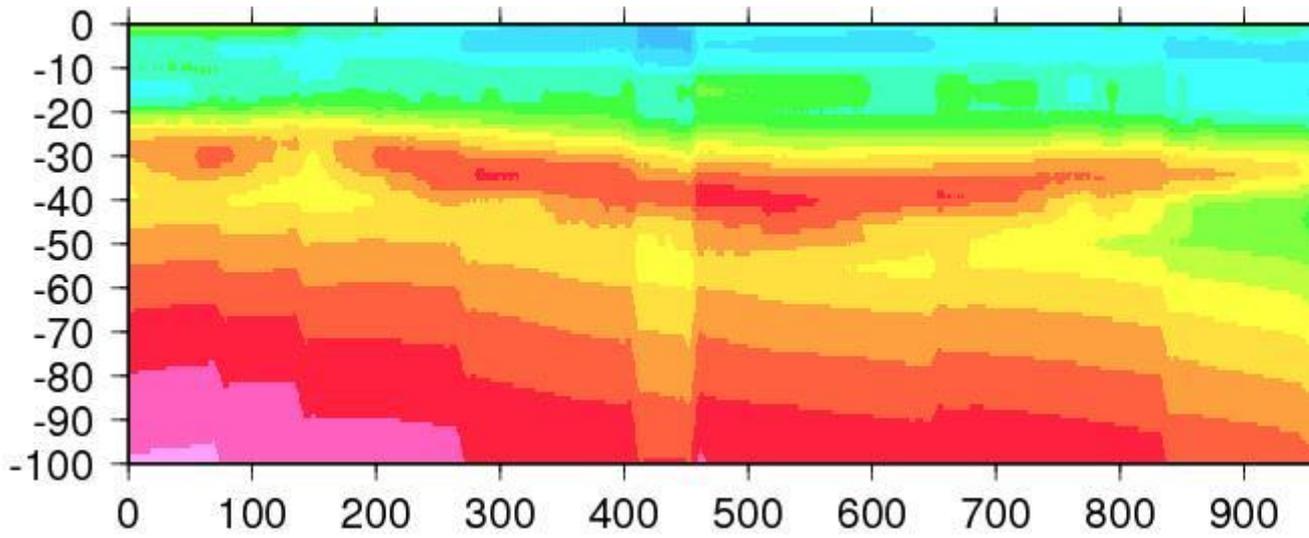


图 2 川滇地区剖面粘滞结构 (lon1: 96.5, lat1: 24.5, lon2: 105, lat2: 30.5)

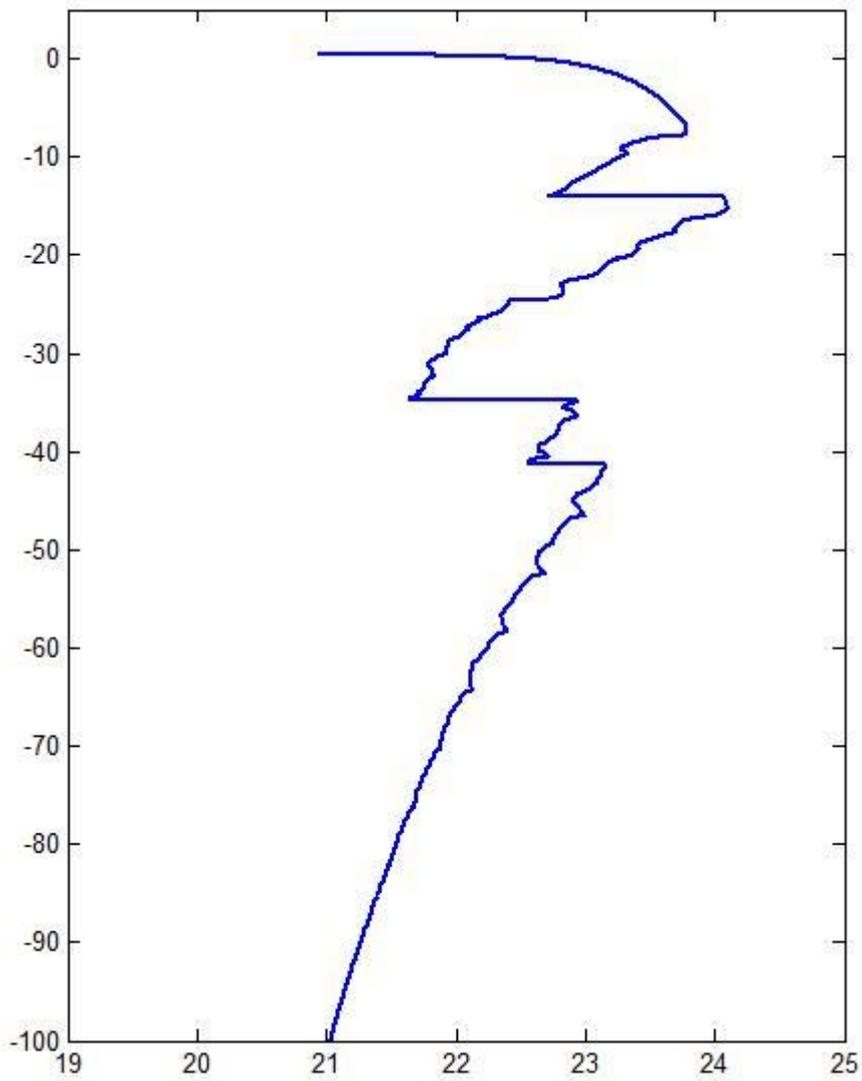


图 3 东经 105°、北纬 30°处的粘滞系数随深度的变化

六、模型验证（测试）与精度评价

流变模型精度与所用温度场、应变率、地壳厚度等多种数据有关，目前获得的川滇流变模型为参考现有数据的初级版本，结果精度和分辨率与输入数据密度和质量相关，观测密集的区域精度较高，缺乏观测的区域（例如模型西南）精度较差。

七、模型使用说明

流变模型使用说明，参考计算文件夹文档 *readme.txt*。

八、应用案例

流变模型所给出的川滇地区壳幔粘滞系数估值，应用于川滇地区运动学模型分析、川滇地区断层应力演化计算以及动力学模型构建中。

Please cite the following reference if this model is used in your research:

Xu Jing. (2019). The rheological model in China Seismic Experimental Site. *CSES Scientific Products.*, doi:10.12093/04md.02.2019.03.v1