

# 川滇地区地壳均衡状态及其与区域强震的关系

姜永涛<sup>1,2</sup> 张永志<sup>1</sup> 王 帅<sup>1</sup>

1 长安大学地质工程与测绘学院, 西安市雁塔路 126 号, 710054  
2 南阳师范学院环境科学与旅游学院, 南阳市卧龙路 1638 号, 473061

**摘 要:** 首先利用 CRUST1.0 模型分析川滇地区上地壳厚度和 Moho 起伏的主要结构特征,然后基于 Airy 地壳均衡理论计算区域均衡 Moho 深度,并利用其与实际 Moho 值的差异分析区域地壳均衡状态。将川滇地区上地壳厚度图和区域地震深度分布图对比可知,地震主要发生在上地壳脆性层内。区域地壳均衡状态显示,四川盆地地壳处于均衡状态,而龙门山断裂带为均衡差异最显著的地区,其北侧为正均衡状态(+6 km),南侧为负均衡状态(-6 km),西南侧为正均衡状态(+6 km),揭示龙门山断裂带附近为地壳深部物质重新分异、调整和能量强烈交换的地带。

**关键词:** Moho 起伏;川滇地区;地壳均衡;龙门山断裂带  
**中图分类号:** P315 **文献标识码:** A

川滇地区地质构造结构复杂,地形地貌反差显著,深浅构造活动强烈,地震发生频度高且强度大<sup>[1]</sup>。国内外学者利用重力异常和地震观测等资料对 Moho 界面的形态进行了大量研究。冯锐<sup>[2]</sup>利用全国 1°×1°布格重力异常数据,基于 Parker-Oldenburg 位场反演方法得到全国的地壳厚度和上地幔密度分布特征,结果显示川滇地区处于地壳厚度的陡变带上。Braitenberg<sup>[3]</sup>在地震剖面资料的约束下,运用频率域迭代算法研究青藏高原地区的 Moho 起伏。Shin<sup>[4]</sup>利用 GRACE 卫星重力场模型,基于 Parker-Oldenburg 迭代算法研究青藏高原地区的地壳厚度特征。王谦身<sup>[5]</sup>将 Airy 均衡地壳深度和由布格重力异常反演的区域地壳深度进行对比,研究龙门山断裂附近区域的地壳均衡状态。本文利用 CRUST1.0 提供的地壳结构,探讨了川滇地区的地壳结构和地壳均衡状态,并分析其与区域构造断裂、地震活动之间的关系。

## 1 区域构造和地震活动情况

### 1.1 川滇地区地震空间分布特征

图 1 给出了川滇地区  $M>4.5$  地震的空间分布<sup>[6]</sup>,图中蓝色小点为震中分布,时间跨度为 1980-01~2014-10。可以看出,地震沿活动断裂的带状分布特征非常突出,显示地震的发生与活动构造关系密切。此外,区域大震震源机制<sup>[7]</sup>显

示,甘孜-玉树断裂为走滑型断裂带,龙门山断裂带为逆冲型断层,且北段呈现少许走滑特征,说明大震震源机制与断层活动形式密切相关。

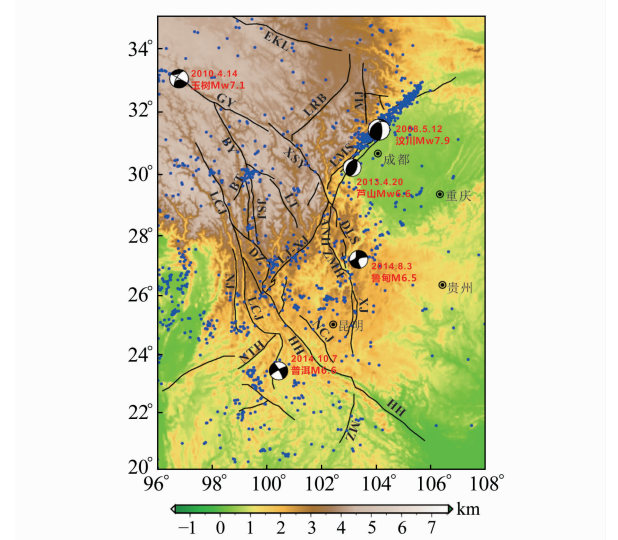


图 1 川滇地区地震空间分布  
Fig. 1 Spatial distribution of earthquakes in Sichuan-Yunnan region

图 1 中的区域断裂<sup>[8]</sup>包括:EKL 东昆仑断裂带;LRB 龙日坝断裂;MJ 岷江断裂;LMS 龙门山断裂带;GY 甘孜-玉树断裂带;XSH 鲜水河断裂带;DLS 大凉山断裂;ANH 安宁河断裂;ZMH 则木河断裂;XJ 小江断裂;MZ 湄沾断裂;BY 白玉断裂;LT 理塘断裂;LCJ 澜沧江断裂;NJ 怒江断

裂;BT 巴塘断裂;JSJ 金沙江断裂;DZ 德钦-中甸断裂;LJ-XJ 丽江-小金河断裂;HH 红河断裂;NCJ 南华-楚雄-建水断裂;NTH 南汀河断裂。

### 1.2 地震时间分布特征

川滇地区 1980~2014 年  $M>5.5$  地震资料得到的震级-时间分布与应变能释放图(图 2(a))显示,川滇地区大震在时间分布上是不均匀的。结合地震累积能量释放曲线,2008 年以后的地震发生频率和能量释放率都明显大于汶川地震前,说明 2008 年之后区域地震活动进入了一个强活动性阶段。通过震级-深度分布图(图 2(b))可知,区域大震主要集中在 5~15 km 深度的断裂带上,与朱艾斓等<sup>[9]</sup>研究结果一致,且在 25~33 km 深度处存在明显的缺震(震级  $M>5.5$ )层。

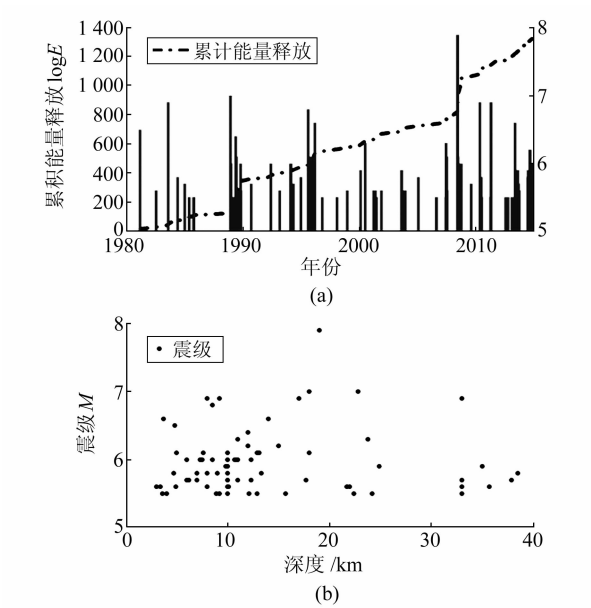


图 2 震级-时间分布与应变能释放图及震级-深度分布图  
Fig. 2 Magnitude-time and strain energy release map, magnitude-depth map

## 2 地壳结构

### 2.1 CRUST1.0

CRUST1.0<sup>[10]</sup>是覆盖全球、空间分辨率为  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  的地壳模型。模型中 Moho 深度取最新全球地震研究资料中地壳厚度数据的  $1^{\circ}$  窗口平均值,对南极洲等资料缺乏区域, Moho 深度由重力反演得到。

CRUST1.0 将地壳分为 8 层,从上至下依次是水层、冰层、上、中、下沉积层和上、中、下结晶地壳,给出了  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  的各层厚度、密度及波速  $V_p$ 、 $V_s$  数据。其中大陆地形、海深和冰盖数据来源于 ETOPO1;上、中、下沉积层的厚度和密度数据来源于全球沉积层模型;上、中、下地壳的厚度和密

度数据来自于地震资料。CRUST1.0 模型经过全球最新地震面波数据的验证和改正,是目前空间分辨率和精度最高的全球地壳模型。

### 2.2 区域主要地壳界面

由 CRUST1.0 模型<sup>[10]</sup>计算的川滇地区上地壳深度和地壳厚度如图 3、图 4 所示。

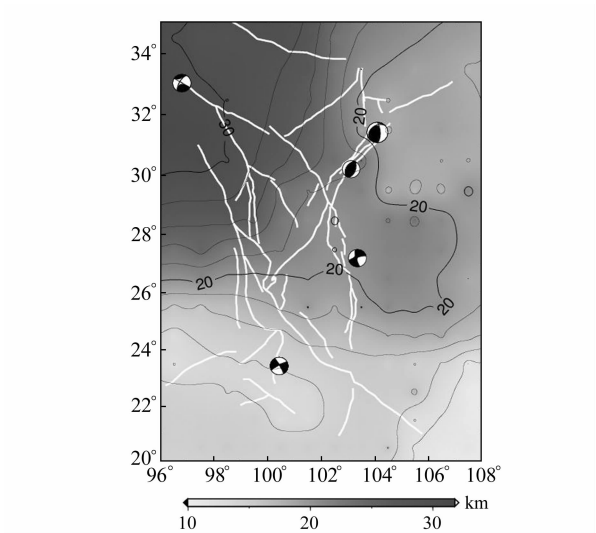


图 3 川滇地区上地壳厚度  
Fig. 3 Upper crust thickness

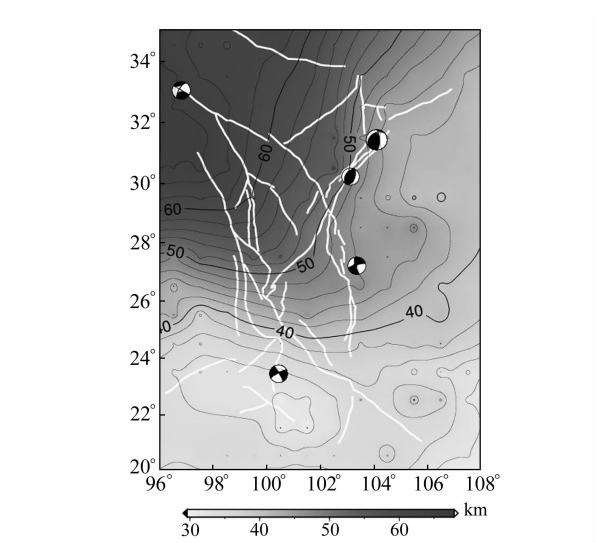


图 4 川滇地区地壳厚度  
Fig. 4 Crust thickness

从图 3 可以看出,川滇地区上地壳厚度呈现西北-东南向递减的趋势。龙门山次级块体、雅江次级块体和香格里拉次级块体为上地壳厚度变化的高梯度带;四川盆地上地壳厚度在 20 km 左右,起伏度较低。结合地震( $M>5.5$ )深度分布(图 2(b)),川滇地区大震主要发生在脆性上地壳中。

图 4 显示,川滇地区 Moho 起伏较大,从区域西北 60 km 发散状递减为区域东南 35 km。通过与地貌的对比可以发现,区域 Moho 起伏与地形有一定的镜像关系,但在龙门山次级块体,地表地

形陡变带、上地壳厚度梯度带和 Moho 起伏梯度带在分布特征上有一定的差异,这可能反映龙门山断裂带为一个深部物质重新分异、调整和能量强烈交换的地带<sup>[11]</sup>,该断裂带曾发生 2008-05-12 汶川 Mw7.9 大震和 2013-04-20 芦山 Ms7.0 地震。

3 川滇地区地壳均衡状态

Airy 大陆均衡理论把地壳视为“漂浮”在密度较大均质岩浆(名为硅镁层)上的密度较小的均质岩石柱体(名为硅铝层),处于平衡状态。根据阿基米德原理,山越高则陷入岩浆越深,形成山根;海越深则岩浆向上凸出也越高,形成反山根。这样,较轻的山根补偿山体的质量过剩,较重的反山根补偿海水的质量不足,且均衡补偿面可位于山根底部任意深度。

区域地壳均衡深度与实际地壳深度(由地震资料或重力资料获取)的差值反映现今区域地壳深部的构造活动状态<sup>[5,12]</sup>。根据地表高程  $H$  计算 Airy 地壳均衡厚度的公式为:

$$\text{moho}_{\text{airy}} = \frac{\rho_c}{\rho_m - \rho_c} \cdot H + t \tag{1}$$

式中,  $\rho_m = 3.27 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_c = 2.67 \text{ g/cm}^3$ , 分别为地幔和地壳的平均密度;  $t$  为川滇地区地壳平均深度, 本文  $t = 39 \text{ km}$ (据 CRUST1.0 模型)。

由于地貌形成除受构造运动作用外, 河流、风蚀等外部作用也对其有一定的影响, 因此本文在计算均衡 Moho 深度前, 对区域地形进行 20 km 窗口的中值滤波处理, 然后根据式(1)求算川滇地区均衡 Moho 深度(图 5)。可以看出, 区域均衡 Moho 深度与地貌镜像关系明显, 四川盆地均衡 Moho 深度为 40~42 km, 阿坝次级块体均衡 Moho 深度为 55~60 km, 26°N 以南各次级块体均衡 Moho 均小于 50 km。此外, 龙门山断裂带位于均衡 Moho 深度的陡变带上, 并与龙门山断裂带走向一致。

将区域地壳均衡深度  $\text{moho}_{\text{airy}}$  与实际地壳深度  $\text{moho}_{\text{crust1.0}}$  作差, 可以得到反映地壳深部构造活动的均衡状态(图 6)。当  $\text{moho}_{\text{airy}} > \text{moho}_{\text{crust1.0}}$  时, 为达到均衡状态, 真实 Moho 面应为深度增大趋势, 或者地表高程表现为下沉运动。图 6 显示, 川滇地区 26°N 以南区域呈现正均衡状态, 但区域水准测量显示现今地壳呈抬升状态<sup>[13]</sup>, 原因可能是由于青藏高原中下地壳流带来的地壳物质在此处源源不断地积累; 四川盆地  $\text{moho}_{\text{airy}} \approx \text{moho}_{\text{crust1.0}}$ , 说明地壳处于均衡状态; 图 6 中均衡差异最

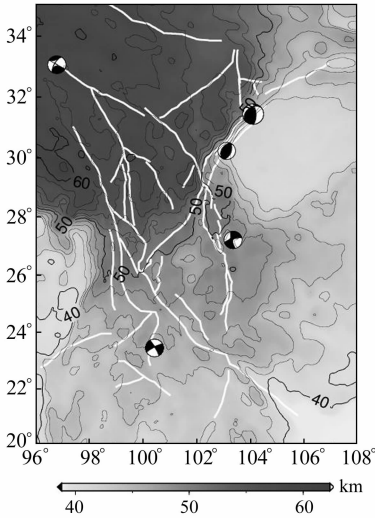


图 5 Airy 均衡 moho 深度  
Fig. 5 Moho discontinuity of Airy isostasy

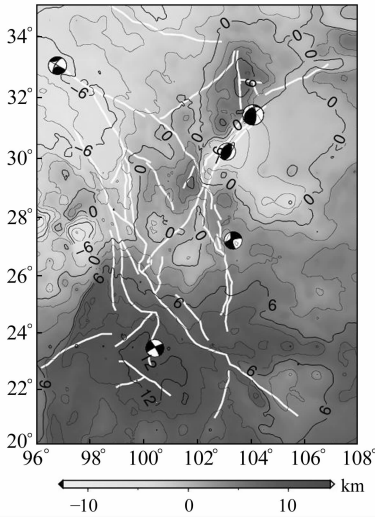


图 6 均衡与实际 moho 深度差异  
Fig. 6 Difference of Airy and real moho discontinuity

显著的地区位于龙门山断裂带附近, 龙门山断裂带本身就处于均衡状态变化的高梯度带上, 其北侧为正均衡状态(+6 km), 南侧为负均衡状态(-6 km), 西南侧为正均衡状态(+6 km), 这可能反映龙门山断裂带附近为地壳深部物质重新分异、调整和能量强烈交换的地带。

由大震与区域均衡状态的关系可以看出, 逆冲/正断型地震发生在均衡状态差异剧烈的梯度带上, 如汶川地震和芦山地震; 而走滑型地震发生在均衡状态差异不明显的地区, 如玉树地震、鲁甸地震和普洱地震。

4 结 语

1) 区域地震沿活动断裂的带状分布特征非常突出, 且大震震源机制与断层活动特征密切相关, 显示地震与活动构造的关系密切。

2)川滇地区处于地壳结构(上地壳厚度或 Moho 深度)的陡变带上。区域地壳均衡状态显示,26°N 以南区域呈现正均衡状态;四川盆地地壳处于均衡状态;区域均衡差异最显著的地区位于龙门山断裂带附近,可能反映龙门山断裂带附近为地壳深部物质重新分异、调整和能量强烈交换的地带。

3)由区域大震与均衡状态的关系可以看出,逆冲/正断型地震发生在均衡状态差异剧烈的梯度带上;而走滑型地震往往发生在均衡状态差异不明显的地区。

参考文献

[1] 王双绪,蒋锋云,郝明,等. 青藏高原东缘现今三维地壳运动特征研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(10):3 334-3 345 (Wang Shuangxu, Jiang Fengyun, Hao Ming, et al. Investigation of Features of Present 3D Crustal Movement in Eastern Edge of Tibet Plateau[J]. Chinese J Geophys, 2013, 56(10):3 334-3 345)

[2] 冯锐. 中国地壳厚度及上地幔密度分布:三维重力反演结果[J]. 地震学报, 1985, 7(2):143-157(Feng Rui. Crustal Thickness and Densities in the Upper Mantle Beneath China—the Results of Three Dimensional Gravity Inversion [J]. Acta Seismologica Sinica, 1985, 7(2): 143-157)

[3] Braitenberg C, Zadro M, Fang J, et al. The Gravity and Isostatic Moho Undulations in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Geodynamics, 2000, 30(5):489-505

[4] Shin Y H, Xu H, Braitenberg C, et al. Moho Undulations Beneath Tibet from GRACE-Integrated Gravity Data[J]. Geophysical Journal International, 2007, 170(3):971-985

[5] 王谦身,滕吉文,张永谦,等. 龙门山断裂系及邻区地壳重力均衡效应与汶川地震[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(6): 1 664-1 670 (Wang Qianshen, Teng Jiwen, Zhang Yongqian, et al. The Effect of Crustal Gravity Isostasy and Wenchuan Earthquake in Longmenshan Faults and Adjacent Area[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(6):1 664-1 670)

[6] <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>, 2015

[7] <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>, 2015

[8] 邓起东. 中国活动构造图[M]. 北京:地震出版社, 2007 (Deng Qidong. Map of Active Tectonics in China[M]. Beijing:Seismological Press, 2007)

[9] 朱艾斓,徐锡伟,周永胜,等. 川西地区小震重新定位及其活动构造意义[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3):629-636 (Zhu Ailan, Xu Xiwei, Zhou Yongsheng, et al. Relocation of Small Earthquakes in Western Sichuan, China and Its Implications for Active Tectonics[J]. Chin J Geophys, 2005, 48(3): 629-636)

[10] Laske G, Masters G, Ma Z, et al. Update on CRUST1.0—a 1-Degree Global Model of Earth’s Crust[J]. EGU General Assembly, 2013, 15: 2658

[11] 滕吉文,白登海,杨辉. 2008 汶川 Ms8. 0 地震发生的深层过程和动力学响应[J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1 385-1 402(Teng Jiwen, Bai Denghai, Yang Hui, et al. Deep Processes and Dynamic Responses Associated with the Wenchuan Ms8. 0 Earthquake of 2008[J]. Chinese J Geophys, 2008, 51(5):1 385-1 402)

[12] Heiskanen W A, Moritz H. Physical Geodesy[M]. Springer, 2005

[13] Hao M, Wang Q, Shen Z, et al. Present Day Crustal Vertical Movement Inferred from Precise Leveling Data in Eastern Margin of Tibetan Plateau[J]. Tectonophysics, 2014

The Crustal Isostatic State of Sichuan-Yunnan Region and Its Relationship with Regional Earthquakes

JIANG Yongtao<sup>1,2</sup> ZHANG Yongzhi<sup>1</sup> WANG Shuai<sup>1</sup>

1 School of Geology Engineering and Geomatics,Chang’an University,126 Yanta Road,Xi’an 710054, China

2 School of Environment Science and Tourism, Nanyang Normal University, 1638 Wolong Road, Nanyang 473061, China

**Abstract:** Using the model CRUST 1.0, we analyze the structure of upper crust thickness and the moho discontinuity in Sichuan-Yunnan region. Then we calculate the regional isostatic moho discontinuity based on the Airy isostatic theory. With the difference between the isostatic and the real moho discontinuity, we study the state of crustal equalization in the Sichuan-Yunnan region. Comparing the map of upper crust thickness with the depth distribution diagram of regional earthquakes, we found that regional earthquakes mainly occurred in the upper brittleness crust. The crustal isostatic apparently shows that the Sichuan basin is in an isostatic state. However, the Longmen mountain’s fault zone poses a state which is out of the isostatic, and represents the most remarkable disequilibrium area in Sichuan-Yunnan region, whose north side presents positive equilibrium (+6 km), south side presents negative equilibrium (−6 km) and southwest side presents positive equilibrium (+6 km). All of this possibly reflects that the deep crust material beneath Longmen Mountain’s fault zone is undergoing a dramatic differentiation, adjustment and intense exchange of energy.

**Key words:** Moho discontinuity;Sichuan-Yunnan region;crust isostasy;Longmen mountains fault zone