

# 龙门山中段及邻区地壳密度结构及其地球动力学启示\*

王芃<sup>1,2</sup> 张忠杰<sup>3</sup> 张晰<sup>3\*\*</sup> 韩颜颜<sup>2,3</sup> 王敏玲<sup>2,3</sup> 侯爵<sup>2,3</sup> 徐涛<sup>3</sup>

WANG Peng<sup>1,2</sup>, ZHANG ZhongJie<sup>3</sup>, ZHANG Xi<sup>3\*\*</sup>, HAN YanYan<sup>2,3</sup>, WANG MinLing<sup>2,3</sup>, HOU Jue<sup>2,3</sup> and XU Tao<sup>3</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2013-11-20 收稿, 2014-02-12 改回.

Wang P, Zhang ZJ, Zhang X, Han YY, Wang ML, Hou J and Xu T. 2014. Crustal density structure of the central Longmenshan and adjacent area and its geodynamic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4):1179–1187

**Abstract** Longmenshan is an important part of the topographic and tectonic boundaries in China. The varied lithospheric structure on two sides of Longmenshan could take part in the formation of Longmenshan orogenic belt and have a lasting effect on the evolution of Longmenshan. In order to understand the differences between the structure of crust and mantle on two sides of Longmenshan, we constructed the density structure under a profile crossing central Longmenshan. Based on gravity anomaly data from EGM2008 model and crustal P-wave velocity structure from the latest Aba-Suining deep seismic sounding profile, we obtained detailed crustal density structure of central Longmenshan and adjacent area. The density structure showed weak lower crust in Songpan-Ganzi, strong lower crust in Sichuan Basin and upwelling of material from lower crust beneath Longmenshan. Based on the crustal density structure obtained in this study, we suggest that the uplift of the Longmenshan has been mainly controlled by the continent-continent collision between the Indian plate and the Eurasian plate, which has forced the crustal material of the Tibetan Plateau move eastward. While restricted by the rigid Sichuan basin, the crustal material of the Songpan-Ganzi in eastern part of the Tibetan Plateau move upward, and this could be the reason for the uplift and formation of the Longmenshan.

**Key words** Longmenshan; Sichuan basin; EGM 2008; Density structure

**摘要** 龙门山是我国东西构造、地貌分界线的重要组成部分。其两侧的岩石圈结构差异,是形成龙门山造山带的主要原因之一,并对龙门山的构造演化起着持续影响。为了解龙门山两侧壳幔结构差异,本文从重力角度探讨跨龙门山地区的地壳密度结构。我们使用EGM2008模型的重力异常数据,以最新的阿坝-遂宁人工源地震剖面速度模型为基础,得到了龙门山造山带中段及其邻区的精细地壳密度结构。密度结构显示松潘-甘孜地区和四川盆地分别具有软弱和坚硬的地下壳。根据本文所得到的地壳密度结构模型,我们认为龙门山的隆升主要受印度洋板块与欧亚大陆板块的陆-陆碰撞作用影响,强烈的挤压作用使青藏高原物质向东运移,东移物质在青藏高原东缘龙门山地区受到坚硬的四川盆地的阻挡转而向上运移,造成了龙门山的隆升。

**关键词** 龙门山;四川盆地;EGM2008;密度结构

**中图法分类号** P541; P631

\* 本文受国家“深部探测技术与实验研究”专项课题(SinoProbe-03-02)、国家973计划项目(2011CB808904)和国家自然科学基金项目(40930418, 41274090, 41174075, 41021063, 41174043)联合资助。

第一作者简介:王芃,男,1985年生,博士生,地球物理专业,E-mail: stonite@126.com

\*\* 通讯作者:张晰,女,1979年生,副研究员,主要从事重力学与岩石组成结构研究,E-mail: zhangxi@mail.iggcas.ac.cn

## 1 引言

印度与欧亚板块的碰撞持续了约 45Ma, 导致青藏高原的地壳缩短了至少 1500km (Molnar and Tapponnier, 1975)。尽管学者对高原地壳缩短增厚的方式存在“地壳增厚”(Allègre, 1984)、“剥蚀”(Meng *et al.*, 2006)和“岩石圈拆离”(Molnar, 1988)等争议, 但一般都认为南北向的持续会聚导致了高原地壳物质的侧向扩展。在青藏高原东缘, 向外生长的高原遭受到坚硬的四川克拉通盆地阻挡, 导致了高原地壳向东南和东北的逃逸, 并产生了沿北东-南西走向的龙门山(Chen *et al.*, 2013a; Zhang, 2013)。龙门山是青藏高原东部与四川盆地间强烈相互作用的主要地区与标志之一(Zhang *et al.*, 2010b)。作为我国东、西部构造和地貌分界线的重要组成部分, 在大地构造上, 龙门山代表了特提斯与太平洋构造域的分界; 在地貌上, 龙门山是青藏高原与四川盆地的分界(Wang and Meng, 2008)。布格重力异常显示龙门山是划分中国东西部重力异常场的重力梯度带的组成部分(殷秀华等, 1980)。地震深部探测结果则显示龙门山下方莫霍面存在 10~15km 的错断(Zhang *et al.*, 2009, 2010b; Jia *et al.*, 2014)。

对龙门山造山带的研究一直是国内外学者关注的重点, 特别是 2008 年汶川大地震以来, 学者在龙门山地区开展了大量的地球物理深部探测研究, 包括: P 波速度结构(郭颺等, 2009; 吴建平, 2009)、S 波速度结构(刘启元等, 2009; Wang *et al.*, 2010)、横波分裂(Chen *et al.*, 2013b)、电性结构(王绪本等, 2013; 赵国泽等, 2009)和密度结构等(Wang *et al.*, 2007; Lou *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2010a; 唐新功等, 2012; Zhang *et al.*, 2013)。在此基础上, 学者对该区的构造活动特征, 特别是 2008 汶川地震发生的动力学过程进行了探讨(滕吉文等, 2008; Wang and Meng, 2008; Burchfiel *et al.*, 2008; Hubbard and Shaw, 2009; Chen *et al.*, 2013a)。但对龙门山的形成机制与演化过程目前仍然存在很大的争议, 主要的模式包括: “地壳缩短”(Tapponnier *et al.*, 2001; Hubbard and Shaw, 2009)、“岩石圈拆沉”(Chen *et al.*, 2014)、“地壳固有厚度差异”(Chen *et al.*, 2013a)、“剥蚀-均衡回弹”(Fu *et al.*, 2011)和“下地壳流”(Royden *et al.*, 1997; Clark and Royden, 2000)等。龙门山两侧地壳-上地幔在结构和物性上的显著差异可能是导致龙门山形成的深部原因。最近, 嘉世旭等发表了一条横穿龙门山中部的宽角地震剖面, 该剖面提供了龙门山下方地壳的精细速度结构信息(Jia *et al.*, 2014)。为了更好地理解龙门山下方的物性特征, 我们以该宽角地震剖面的速度结构为基础, 利用 EGM2008 模型的重力异常数据构建了剖面下方的地壳密度结构。在此基础上, 我们结合研究区已有的地球物理深部探测成果, 探讨了密度结构对龙门山地区地球动力学的启示。

## 2 数据与方法

中国地震局地球物理勘探中心于 2010 年 5 至 6 月完成了由四川盆地中部向西北方向、近垂直穿越龙门山中段 5.12 汶川特大地震极震区和川西北高原的深地震宽角反/折射测深野外工作(图 1)。该测线为北西-南东走向, 北起阿坝县, 南至遂宁, 长约 500km, 自北至南跨越松潘-甘孜块体、松潘-甘孜褶皱带、龙门山造山带与四川盆地。松潘-甘孜块体地表主要为三叠系; 松潘-甘孜褶皱带出露志留系到三叠系; 龙门山地区有太古界、元古界和变质杂岩出露; 四川盆地靠近龙门山地区有少量第四系出露, 其他地区为侏罗系、白垩系覆盖(Jia *et al.*, 2014)。

通过地震波走时拟合(Cerveny, 2001; 徐涛等, 2004; Xu *et al.*, 2006, 2010, 2014; 李飞等, 2013)获得剖面的 P 波速度结构(图 2), 结果显示四川盆地地壳内部界面及介质速度横向均匀、速度随深度稳定增加, 地壳厚约 41~43km, 结晶地壳平均速度约 6.45km/s, 上地幔顶部速度 8.1~8.2km/s, 为典型克拉通性质的地壳上地幔速度结构特征。川西北高原松潘-甘孜块体内界面及介质速度横向较为均匀, 地壳厚约 53~57km, 结晶地壳平均速度约 6.23km/s, 上地幔顶部速度约 7.90km/s。相对于四川盆地, 川西北高原

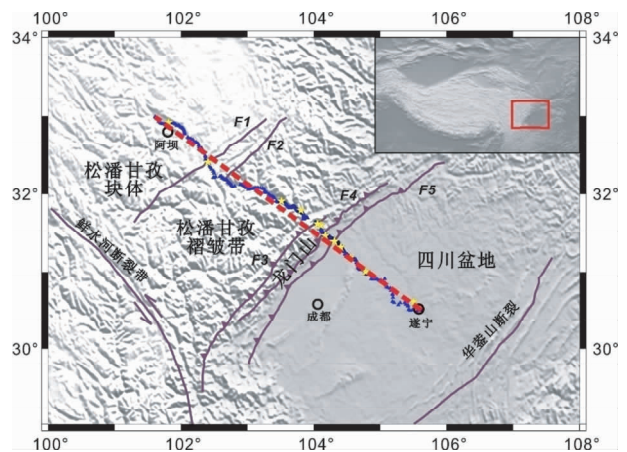


图 1 跨龙门山地区重力剖面(红色虚线)与阿坝-遂宁深地震测深剖面位置

黄色五角星代表人工源炮点, 蓝色三角形代表接收器. F1-龙日坝断裂; F2-东门沟断裂; F3-茂汶断裂; F4-北川-映秀断裂; F5-江油-都江堰断裂

Fig. 1 Position of gravity profile (red dashed line) and Aba-Suining deep seismic sounding profile crossing Longmenshan

The yellow stars represent the shot points; the blue triangles represent the receivers. F1-Longriba Fault; F2-Dongmengou Fault; F3-Maowen Fault; F4-Beichuan-Yingxiu Fault; F5-Jiangyou-Dujiangyan Fault

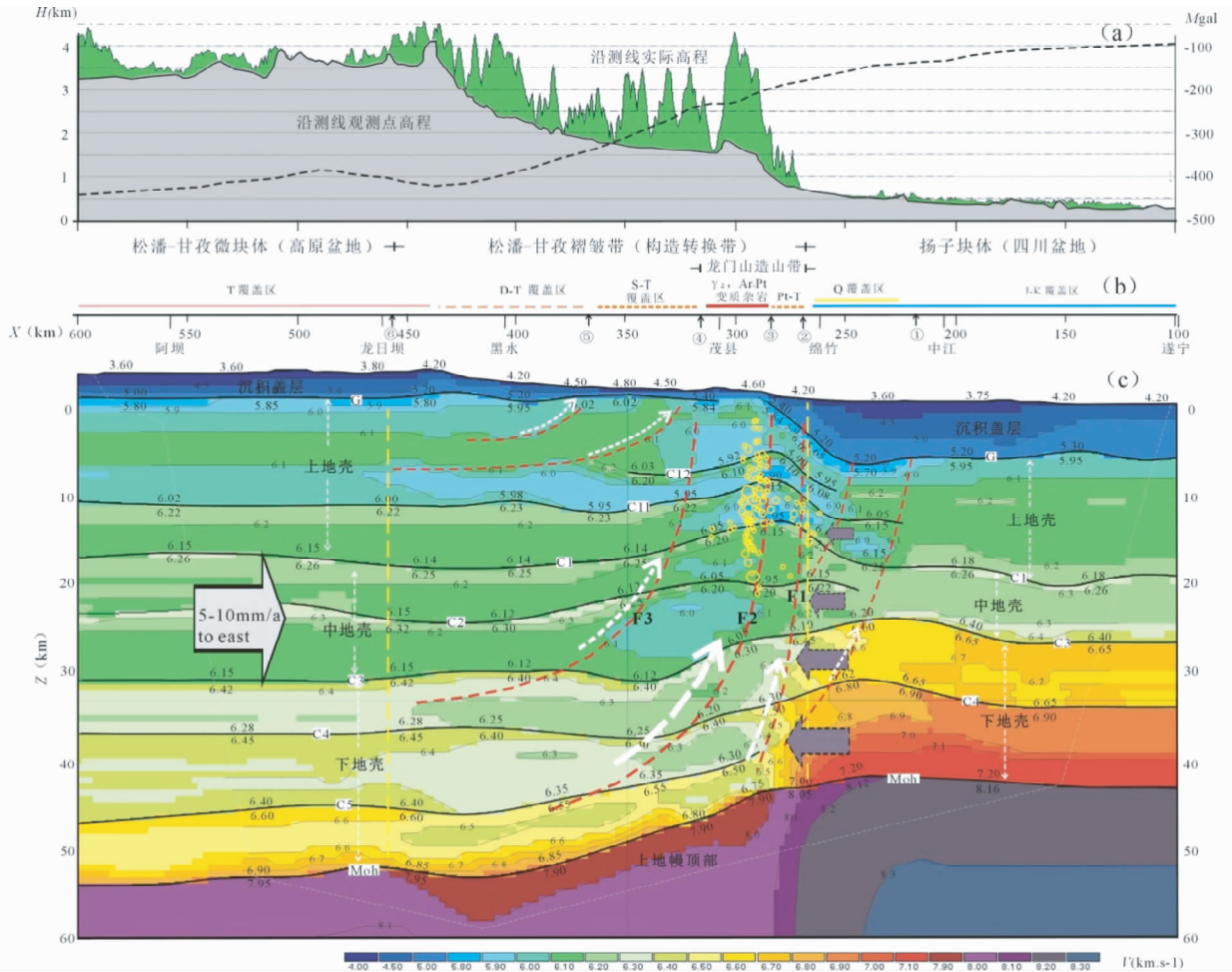


图2 龙门山中段阿坝-遂宁人工源地震剖面的速度结构(据 Jia *et al.* , 2014)

Fig.2 Velocity structure of Aba-Suining deep seismic sounding profile crossing central Longmenshan (after Jia *et al.* , 2014)

上、中、下地壳界面增多、介质速度分别降低了1%~2%,2%~4%和6%~10%,揭示了高原地壳由上向下岩性性质改变,特别是高原下部地壳(深约30~55km)介质速度大幅降低及岩性的塑性流变性质(Jia *et al.* , 2014)。

EGM2008重力模型是美国国家地理空间情报局2008年4月发布的全球超高阶地球重力场模型。模型的建立采用了GRACE卫星跟踪数据、卫星测高数据和地面区域平均重力数据等多种来源重力数据以及高分辨率的全球地形数据。该模型比之前广泛应用的EGM96等地球重力模型精度显著提高,可以满足小比例尺重力勘测的要求(杨金玉等, 2012)。模型的自由空气异常与川西地区实测异常相比差值较小且基本为一常数(付广裕等, 2013)。在此基础上,美国国家地理空间情报局使用1'分辨率的高程数据对其进行了地形改正(Hermann *et al.* , 2012),得到了2.5'分辨率的布格异常数据,并发布在国际重力局(BGI)网站上。本文采用这一数据作为布格异常来源。

图3为深地震测线对应的布格重力异常及地形起伏。从图中可以看出,以龙门山造山带为界,其西北的松潘-甘孜

地区和东南的四川盆地在布格异常与高程两方面都有显著的差别。测线高程西北高而东南低,松潘-甘孜块体地区平均高程最高,在3600m以上,自西北向东南由3400m上升至3900m,在接近松潘-甘孜褶皱带的地区出现明显上升;松潘-甘孜褶皱带的平均高程在2800m左右,地形崎岖,高程从西北向东南呈下降趋势,但在接近龙门山处突然上升;龙门山造山带具有极大的地形梯度,在50km的距离内高程从3700m陡降至600m;四川盆地的平均高程约500m,地形平缓,最大高差不足300m。

测线的布格异常在-470到-120mGal之间,布格异常曲线与高程曲线大体呈镜像关系,松潘-甘孜块体的布格异常最低,在-460到-390mGal之间,从西北向东南逐渐上升;松潘-甘孜褶皱带的布格异常从-390到-170mGal有较大的变化;龙门山造山带的布格异常较高,在-190到-170mGal之间,自西北向东南呈高-低-高的分布规律;四川盆地的布格异常最高,自西北端的-160mGal至东南端的-120mGal逐渐增加。

我们基于剖面的速度模型来构建剖面下方的地壳密度

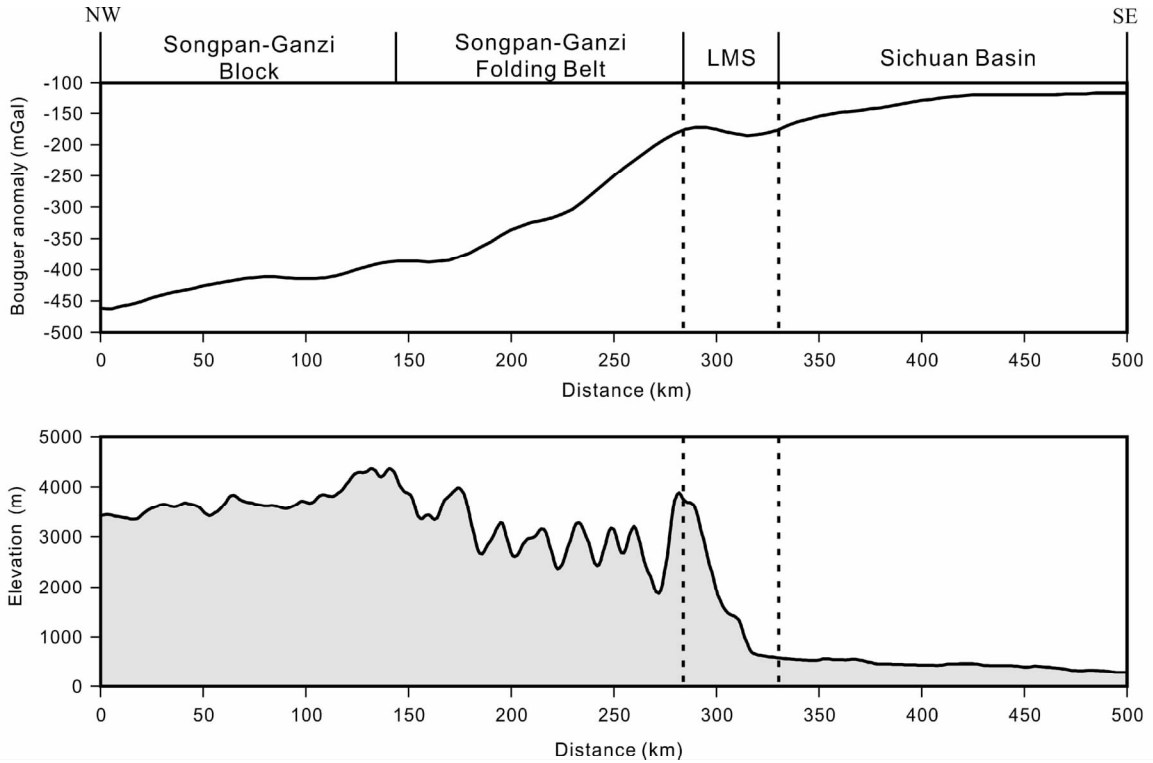


图3 测线的布格异常曲线(上图)与高程曲线(下图)

Fig. 3 Bouguer anomaly (upper plot) and elevation (lower plot) of the profile

结构的初始模型。对于地壳部分,Christensen 和 Mooney 给出了不同深度下大陆地壳岩石速度和密度线性关系式: $\rho = a + b \cdot V_p$  (式1),其中  $a$  的单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $b$  的单位为  $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{km} \cdot \text{m}^3$ ,  $V_p$  的单位为  $\text{km}/\text{s}$ ,  $\rho$  的单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,在不同深度下,  $a$ 、 $b$  的数值分别如下(Christensen and Mooney, 1995):

$$\begin{cases} \rho = 540.6 + 360.1 \cdot V_p; \text{depth} = 10\text{km} \\ \rho = 444.1 + 375.4 \cdot V_p; \text{depth} = 20\text{km} \\ \rho = 381.2 + 388.0 \cdot V_p; \text{depth} = 30\text{km} \\ \rho = 333.4 + 398.8 \cdot V_p; \text{depth} = 40\text{km} \\ \rho = 257.1 + 431.4 \cdot V_p; \text{depth} = 50\text{km} \end{cases} \quad (1)$$

对于地幔部分,我们使用使用 Nafe-Drake 曲线(Brocher, 2005)。

使用上述关系式剖剖面将地壳 P 波速度转为密度,得到初始密度模型后,我们采用基于 Matlab 平台的二维复杂地质模型多边形网格建模及重力异常正演计算方法(王芃等, 2014),来构建和调整密度模型,使其产生的理论布格异常曲线逼近观测的布格异常曲线,并得到最终的密度结构(图4)。模型计算的布格异常与实际布格异常间的平均误差为 3.3mGal。

### 3 密度模型

由密度结构(图4)可见,剖面的上地壳密度在 2.34 ~

2.79 $\text{g}/\text{cm}^3$  之间,在 0 ~ 6km 深度范围内,四川盆地的平均密度为 2.34 $\text{g}/\text{cm}^3$ ,松潘-甘孜地区(松潘-甘孜块体和松潘-甘孜褶皱带)的平均密度较高,达到 2.46 $\text{g}/\text{cm}^3$ ,龙门山造山带的平均密度最高,为 2.67 $\text{g}/\text{cm}^3$ 。在 6km 以下的上地壳中,松潘-甘孜地区平均密度为 2.59 $\text{g}/\text{cm}^3$ ,四川盆地的平均密度 2.61 $\text{g}/\text{cm}^3$ 。在中地壳中,松潘-甘孜地区在 20km 深度处存在低密度层,平均密度 2.55 $\text{g}/\text{cm}^3$ ,如果不考虑此低密度层,松潘-甘孜地区中地壳的平均密度为 2.71 $\text{g}/\text{cm}^3$ ,小于四川盆地的平均密度(2.75 $\text{g}/\text{cm}^3$ ),而龙门山造山带仍然具有最高的平均密度(2.79 $\text{g}/\text{cm}^3$ )。在下地壳中,四川盆地的平均密度(2.89 $\text{g}/\text{cm}^3$ )仍然大于松潘-甘孜地区的平均密度(2.82 $\text{g}/\text{cm}^3$ ),且差距进一步增加。龙门山造山带不再具有最高的平均密度,而与松潘-甘孜地区的平均密度接近。在剖面的上地幔部分,四川盆地的平均密度为 3.3 $\text{g}/\text{cm}^3$ ,其他地区的为 3.25 $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

远震 P 波层析成像结果表明,在 100km 深度内,四川盆地与龙门山地区的 P 波速度大于松潘-甘孜地区(郭飏等, 2009),而地壳尺度的 P 波与 S 波层析成像结果表明,在 20km 深度内,龙门山地区速度最高,松潘-甘孜地区速度略大于四川盆地;而在此深度以下,四川盆地速度增加较快,逐渐超过松潘-甘孜地区,且高速特征随深度向西北扩展,松潘-甘孜地区则具有低速的下地壳(吴建平, 2009; 刘启元等, 2009)。本文的密度结构与前人的层析成像结果有良好的一致性,即在上地壳与中地壳内,四川盆地与松潘-甘孜地区密



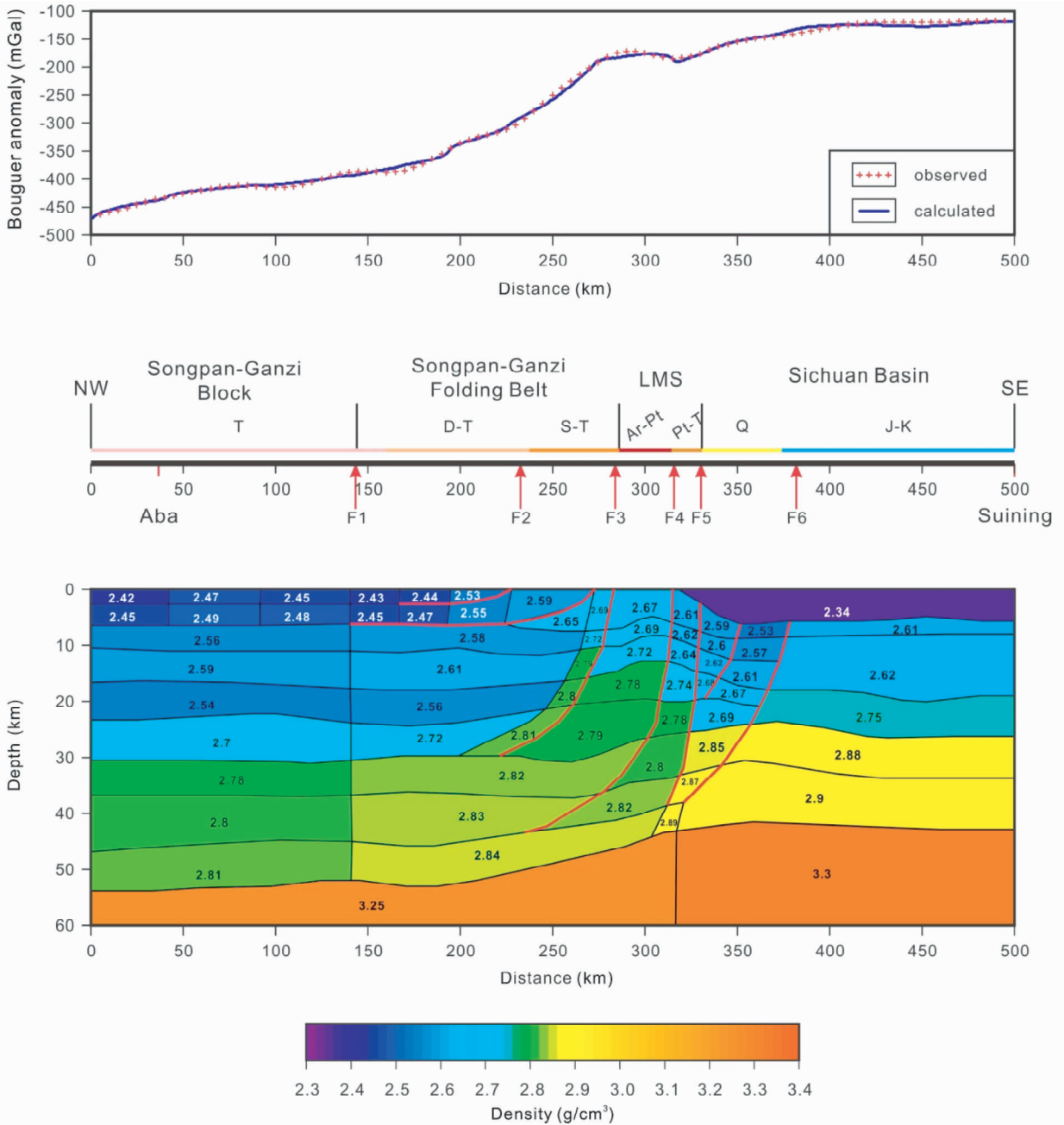


图4 阿坝-遂宁剖面的密度结构

上图:根据密度结构计算的布格异常曲线与EGM2008数据曲线的对比;中图:测线地表岩石出露与构造分区情况,据Jia *et al.* (2014), F1-F5见图1, F6-巴中-龙泉山断裂;下图:剖面的密度结构,各色块中的数字代表相应密度,单位为 $g/cm^3$

Fig. 4 Density structure of Aba-Suining profile

Upper plot: comparison of calculated Bouguer anomaly and Bouguer anomaly from EGM2008; Middle plot: strata along the profile and tectonic frame of the profile (Jia *et al.*, 2014), F1-F5 are referred in Fig. 1, F6-Bazhong-Longquanshan Fault; Lower plot: density structure of the profile, values in each colored block represent its density ( $g/cm^3$ )

度相差不大,二者由龙门山地区的高密度体分离。自中地壳向下,四川盆地密度随深度快速增加,逐渐超过松潘-甘孜地区,在下地壳中二者的差异尤为明显,且四川盆地高密度体的边界随深度增加逐渐向西北移动;而龙门山高密度体与两侧地壳的密度差距逐渐减小,最终消失于下地壳(图4)。

从阿坝-遂宁剖面的密度结构(图4)可以看出,剖面中界面的起伏变形在龙门山造山带附近最强,远离龙门山造山带,起伏逐渐减弱,可能说明了变形程度的不同。自西向东,各块体的密度结构特征如下:

### 3.1 松潘-甘孜块体

该区位于青藏高原东北部,由于远离变形强烈的龙门山造山带,该区各密度界面相对平缓,上地壳厚 17km,各密度层厚度稳定;中地壳厚 14km,其中的密度界面略有突起,但幅度较小,在 20km 深度处存在低密度层;下地壳厚 23km,变形相对较强,密度界面的深度从剖面西北端到龙日坝断裂有 2.5km 的变化;莫霍面在剖面西北较深,向东南逐渐变浅,抬升约 2km。

### 3.2 松潘-甘孜褶皱带

该区以茂汶断裂与龙门山造山带相邻,其变形程度也随与龙门山造山带距离的减小而增强。该区的布格异常变化很大(图 3),说明该区的地壳结构存在巨大的横向差异,可以以剖面 200km 处为界分为两段。第一段(140~200km)变形较弱,密度层界面稳定,各层面的厚度与密度与松潘-甘孜块体相似。第二段(200~280km)变形较强,各密度层界面变化较大。上地壳厚 17km,向东南减薄至 14km,东南部密度明显增加,可能代表了沿茂汶断裂上升的深部物质。中地壳厚 14km,其底界向东南上升 2.5km,在 20km 深度处存在低密度层,西北部密度较低,而东南部密度明显升高,可能分别代表了中地壳物质与上升的下地壳物质。下地壳的厚度变化较大,从西北端的 23km 减薄至东南端的 18km,但是密度变化较小。

### 3.3 龙门山造山带

该区由茂汶断裂、北川-映秀断裂和江油-都江堰断裂三条主干断裂与其所夹持的推覆体组成,变形最为强烈。在该区西北部,深部物质沿北川-映秀断裂上升,浅层物质遭受剥蚀,自晚中新世以来剥蚀量可达 8~10km (Kirby *et al.*, 2002)。如此大规模的剥蚀导致地表出露结晶基底、变质杂岩和侵入岩,因此该区东北部浅层密度大,布格异常高,而该区东南部的深部物质上升幅度较小,还有浅层物质的残留,因此密度较低。深部物质的上升也导致了该区上地壳底界上凸,使其厚度降至 12km(图 4)。中地壳的密度分布与上地壳相似,西北部密度高,接近松潘-甘孜褶皱带下地壳的密度,东南部密度较低。在下地壳中,密度分布发生了改变,西北部密度较低,而东南端较高,可能反映了龙门山造山带与四川盆地在深部的分界。上地幔的密度分布与下地壳相似,莫霍面的深度从西北端的 46km 升高到东南端的 42km(图 4)。

### 3.4 四川盆地

以巴中-龙泉山断裂为界,该区可分为变形较强的西北段与变形较弱的东南段。西北段紧邻龙门山造山带,各密度界面均有抬升;东南段随着与龙门山造山带距离的增加,密度界面趋于平缓。该区具有约 5km 厚的沉积盖层,因此其浅

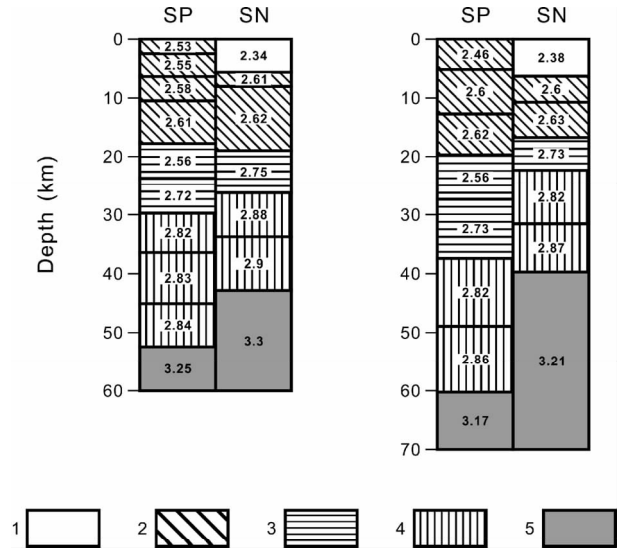


图 5 龙门山两侧密度柱状对比

左图:本文的密度结构;右图:Zhang *et al.* (2013) 提出的密度结构. 1-沉积层;2-上地壳;3-中地壳;4-下地壳;5-上地幔;SP-松潘;SN-遂宁. 各块中的数字代表相应密度,单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$

Fig. 5 Columnar comparison of densities on two sides of Longmenshan

Left plot: density structure in this paper; Right plot: density structure proposed by Zhang *et al.* (2013). 1-sedimentary layer; 2-upper crust; 3-middle crust; 4-lower crust; 5-upper mantle; SP-Songpan; SN-Suining. values in each block represent its density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

层密度最低。沉积盖层之下的上地壳厚约 14km。中地壳较薄,在西北部厚 12km,向东南减薄至 8km。下地壳厚约 16km,其界面在西北部略有隆起,向东南趋于平缓。莫霍面平均深度约 42km。该区具有巨厚的沉积盖层,地壳与上地幔中的界面平缓,整体密度较高,说明作为扬子克拉通的一部分,四川盆地长期处于稳定状态。

Zhang *et al.* (2013) 给出了该地区松潘-武胜剖面的密度结构,其剖面位置与本文接近,但偏向东南。我们选择了松潘(约 200km 桩号)与遂宁两地的地层密度柱进行了对比,发现两条剖面的密度结构有一定的相似性。如图 5 所示,在中上地壳中,两条剖面的密度较为接近,在下地壳和上地幔中,两条剖面密度差异有所增大,可能是由于使用的速度密度关系式不同,但同一深度的密度横向差异都很明显。两条剖面最主要的区别在于莫霍面的深度的变化,本文中龙门山两侧莫霍面深度相差约 10km,而 Zhang *et al.* 的密度结构中相差近 20km,这是建立初始模型时所用的速度结构不同导致的。

## 4 地壳密度结构的地球动力学启示

GPS 观测表明龙门山地区地表的运动速率很低,约为 1

~3mm/a (Chen *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2004)。龙门山地区具有很高的地形梯度,在 30km 的距离内高差可达到 4000m 以上。龙门山地区的风化作用十分强烈,而能保持如此大的地形梯度,说明其具有持续的内动力作用 (Wang and Meng, 2008)。物理模拟实验表明,在地壳较厚或较热的地区,中、下地壳可能存在软弱的韧性区域,将强硬的脆性上地壳与强流变性的韧性上地幔分离 (Kirby, 1983)。包含软弱层的地壳会强烈改变地表变形方式。深部地壳中的软弱层无法垂直传递应力,导致地壳变形与地幔活动解耦。当下地壳足够软弱时,可能会在压力差或密度差的驱动下以通道流的方式发生变形 (Clark *et al.*, 2005)。数值模拟的结果说明,下地壳流可以形成龙门山地区的陡峭地形 (Clark and Royden, 2000; Wang and He, 2012)。龙门山地区的层析成像、天然地震、人工地震和大地电磁观测的结果均表明,龙门山西北的青藏高原存在低速低阻的下地壳 (郭飏等, 2009; 吴建平, 2009; 刘启元等, 2009; Wang *et al.*, 2007, 2010; Zhao *et al.*, 2012; 王绪本等, 2013),可能代表了青藏高原东部下地壳中含有流体或发生了部分熔融 (Keller, 1989) 而较为软弱。

根据本文研究得到的地壳密度结构,我们对该区的地球动力学过程讨论如下:

#### 4.1 松潘-甘孜地区与四川盆地地下地壳差异

从密度结构(图 4)及横向对比(图 5)可以看出,与四川盆地的下地壳相比,松潘-甘孜地区下地壳的密度明显较低(平均密度差  $0.07\text{g/cm}^3$ ),而厚度较大,说明松潘-甘孜地区下地壳较为软弱,易于发生运移,而四川盆地的下地壳较为坚硬,可对向东运移的松潘-甘孜地区地壳物质产生阻挡 (Lou *et al.*, 2008)。这与前人对龙门山地区的地震和大地电磁观测的结果一致 (Wang *et al.*, 2007, 2010; Zhao *et al.*, 2012; 王绪本等, 2013)。

#### 4.2 龙门山地区中上地壳的密度异常

在中上地壳密度的横向对比中,龙门山造山带与松潘-甘孜褶皱带的东南部的密度最高,其上地壳密度与其他地区中地壳密度相似,其中地壳密度与松潘-甘孜地区的下地壳密度相似,而龙门山造山带上地壳中密度界面上凸,这些现象可能表明坚硬的四川盆地阻挡了向东南运动的松潘-甘孜下地壳物质,迫使其向上运动 (Meng *et al.*, 2006; 滕吉文等, 2008)。三条切穿至下地壳的龙门山主干断裂可能是物质向上运移的通道(图 2)。下地壳物质的上升导致了龙门山地区发生强烈的剥蚀 (Kirby *et al.*, 2002),也造成了龙门山地区与松潘-甘孜地区中上地壳较大的密度差,这一密度差在布格异常上有很好的反映。

根据本文所得到的地壳密度结构模型,我们认为龙门山的隆升主要受印度洋板块与欧亚大陆板块的陆-陆碰撞作用影响,强烈的挤压作用导致相对软弱的青藏高原物质向东运

移,东移物质在青藏高原东缘龙门山地区受到坚硬的四川盆地阻挡而向上运移,造成了龙门山的隆升。在龙门山西北的松潘-甘孜地区(即青藏高原东北缘地区)存在低密度的下地壳,其在龙门山地区向上延伸,这可能是由于松潘-甘孜地区下地壳比较软弱,而高密度的四川盆地较为坚硬,阻挡了松潘-甘孜地区下地壳向东南的运动,迫使其向上运动的结果。

## 5 结论

我们利用 EGM2008 模型的重力异常数据,以最新的深地震测深速度模型为基础,构建了龙门山中段及邻区精细的地壳密度结构。结果表明,松潘-甘孜地区与四川盆地中上地壳密度比较接近,被龙门山下方高密度的中上地壳物质分隔;松潘-甘孜地区下地壳的密度明显小于四川盆地,表明位于青藏高原东北缘地域的松潘-甘孜地区下地壳相对软弱,而四川盆地的下地壳较为坚硬,可以对向东南运动的松潘-甘孜地壳物质产生阻挡,从而促使地壳物质在此处被迫向上运移,并因此造成了龙门山的隆升。

**致谢** 感谢中国地震局地球物理勘探中心嘉世旭研究员提供的深地震测深剖面的速度模型;感谢中国科学院地质与地球物理研究所王谦身研究员的指导和帮助,在论文写作过程中与中国科学院地质与地球物理研究所陈林副研究员和吴晶副研究员、中国地质科学院矿产资源研究所张永谦助理研究员进行了有益的讨论,一并表示感谢。

## References

- Allégre C.J., Courtillot V., Tapponnier P. *et al.* 1984. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt. *Nature*, 307(5946): 17–22
- Brocher T.M. 2005. Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the Earth's crust. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(6): 2081–2092
- Cerveny V. 2001. *Seismic Ray Theory*. Cambridge: Cambridge University Press
- Chen L., Gerya T.V., Zhang Z.J., Aitken A., Li Z.H. and Liang X.F. 2013a. Formation mechanism of steep convergent intracontinental margins: Insights from numerical modeling. *Geophysical Research Letters*, 40(10): 2000–2005
- Chen L., Fredrik B., Zhang Z.J., Wang P., Wu J. and Xu T. 2014. Seismically constrained thermo-rheological structure of the eastern Tibetan margin: Implication for lithospheric delamination. *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2013.11.005
- Chen Y., Zhang Z.J., Sun C.Q. and Badal J. 2013b. Crustal anisotropy from Moho converted Ps wave splitting analysis and geodynamic implications beneath the eastern margin of Tibet and surrounding regions. *Gondwana Research*, 24(3–4): 946–957
- Chen Z., Burchfiel B.C., Liu Y., King R.W., Royden L.H., Tang W., Wang E., Zhao J. and Zhang X. 2000. Global positioning system measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation. *J. Geophys. Res.*, 105(B7): 16215–16227
- Christensen N.I. and Mooney W.D. 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *Journal of*

- Geophysical Research: Solid Earth, 100(B6): 9761–9788
- Clark MK and Royden LH. 2000. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. *Geology*, 28(8): 703–706
- Clark MK, Bush JWM and Royden LH. 2005. Dynamic topography produced by lower crustal flow against rheological strength heterogeneities bordering the Tibetan Plateau. *Geophys. J. Int.*, 162(2): 575–590
- Fu BH, Shi PL, Guo HD, Okuyama S, Ninomiya Y and Wright S. 2011. Surface deformation related to the 2008 Wenchuan earthquake, and mountain building of the Longmen Shan, eastern Tibetan Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(4): 805–824
- Fu GY, Zhu YQ, Gao SH, Liang WF, Jin HL, Yang GL, Zhou X, Guo SX, Xu YM and Du WJ. 2013. Discrepancies between free air gravity anomalies from EGM2008 and the ones from dense gravity/GPS observations at west Sichuan Basin. *Chinese J. Geophys.*, 56(11): 3761–3769 (in Chinese with English abstract)
- Guo B, Li QY, Chen JH, Liu LS, Li SC, Li Y, Wang J and Qi SH. 2009. Teleseismic P-wave tomography of the crust and upper mantle in Longmenshan area, West Sichuan. *Chinese J. Geophys.*, 52(2): 346–355 (in Chinese with English abstract)
- Hermann D, Helmut H, József á and Szabolcs R. 2012. The Geodesist's Handbook 2012. *Journal of Geodesy*, 86(10): 787–974
- Hubbard J and Shaw JH. 2009. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan Plateau, and the 2008 Wenchuan (M = 7.9) earthquake. *Nature*, 458(7235): 194–197
- Jia SX, Liu BJ, Xu ZF, Liu Z, Feng SY, Zhang JS, Lin JY, Tian XF, Liu QX and Guo WB. 2014. The crustal structures of the central Longmenshan along and its margins as related to the seismotectonics of the 2008 Wenchuan Earthquake. *Science China (Earth Sciences)*, 57(4): 777–790
- Keller GV. 1989. Electrical structure of the crust and upper mantle beneath the United States; part 2, Survey of data and interpretation. *Geological Society of America Memoirs*, 172: 425–446
- Kirby E, Reiners PW, Krol MA, Whipple KX, Hodges KV, Farley KA, Tang WQ and Chen ZL. 2002. Late Cenozoic evolution of the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and (U-Th)/He thermochronology. *Tectonics*, 21(1), doi: 10.1029/2000TC001246
- Kirby SH. 1983. Rheology of the lithosphere. *Rev. Geophys.*, 21(6): 1458–1487
- Li F, Xu T, Wu ZB, Zhang ZJ and Teng JW. 2013. Segmentally iterative ray tracing in 3-D heterogeneous geological models. *Chinese J. Geophys.*, 56(10): 3514–3522 (in Chinese with English abstract)
- Liu QY, Li Y, Chen JH, Guo B, Li SC, Wang J, Zhang XQ and Qi SH. 2009. Wenchuan MS8.0 earthquake: Preliminary study of the S-wave velocity structure of the crust and upper mantle. *Chinese J. Geophys.*, 52(2): 309–319 (in Chinese with English abstract)
- Lou H, Wang CU, Lü ZY, Yao ZX, Dai SG and You HC. 2008. Deep tectonic setting of the 2008 Wenchuan Ms8.0 earthquake in southwestern China. *Science in China (Series D)*, 52(2): 166–179
- Meng QR, Hu JM, Wang EC and Qu HJ. 2006. Late Cenozoic denudation by large-magnitude landslides in the eastern edge of Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(1–2): 252–267
- Molnar P and Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*, 189(4201): 419–426
- Molnar P. 1988. Continental tectonics in the aftermath of plate tectonics. *Nature*, 335(6168): 131–137
- Royden LH, Burchfiel BC, King RW, Wang E, Chen ZL, Shen F and Liu YP. 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 276(5313): 788–790
- Royden LH, Burchfiel BC and Van der Hilst RD. 2008. The geological evolution of the Tibetan Plateau. *Science*, 321(5892): 1054–1058
- Tang XG, You SS, Hu WB and Yan LJ. 2012. The crustal density structure underneath Longmenshan fault zone. *Seismology and Geology*, 34(1): 28–38 (in Chinese with English abstract)
- Tapponnier P, Xu ZQ, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G and Yang JS. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibetan Plateau. *Science*, 294(5547): 1671–1677
- Teng JW, Bai DH, Yang H, Yan YF, Zhang HS, Zhang YQ and Ruan XM. 2008. Deep processes and dynamic responses associated with the Wenchuan Ms8.0 earthquake of 2008. *Chinese J. Geophys.*, 51(5): 1385–1402 (in Chinese with English abstract)
- Wang CY, Han WB, Wu JP, Lou H and Chan WW. 2007. Crustal structure beneath the eastern margin of the Tibetan Plateau and its tectonic implications. *J. Geophys. Res.*, 112(B7): B07307, doi: 10.1029/2005JB003873
- Wang CY, Lou H, Silver PG, Zhu LP and Chang LJ. 2010. Crustal structure variation along 30°N in the eastern Tibetan Plateau and its tectonic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 289(3–4): 367–376
- Wang EQ and Meng QR. 2008. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Longmenshan fault belt. *Science in China (Series D)*, 52(5): 579–592
- Wang P, Zhang ZJ, Zhang X, Wang ML, Liang XF and Teng JW. 2014. Polygonal grid modeling of 2-D complex geological model and calculation of gravity anomaly on Matlab Platform. *Journal of Guilin University of Technology*, accepted (in Chinese with English abstract)
- Wang XB, Luo W, Zhang G, Cai XL, Qin QU and Luo HZ. 2013. Electrical resistivity structure of Longmenshan crust-mantle under sector boundary. *Chinese J. Geophys.*, 56(8): 2718–2727 (in Chinese with English abstract)
- Wang XF and He JK. 2012. Channel flow of the lower crust and its relation to large-scale tectonic geomorphology of the eastern Tibetan Plateau. *Science in China (Series D)*, 55(8): 1338–1390
- Wu JP, Huang Y, Zhang TZ, Ming YH and Fang LH. 2009. Aftershock distribution of the Ms8.0 Wenchuan earthquake and three dimensional P-wave velocity structure in and around source region. *Chinese J. Geophys.*, 52(2): 320–328 (in Chinese with English abstract)
- Xu T, Xu GM, Gao EG, Zhu LB and Jiang XY. 2004. Block modeling and shooting ray tracing in complex 3-D media. *Chinese J. Geophys.*, 47(6): 1118–1126 (in Chinese with English abstract)
- Xu T, Xu GM, Gao EG, Li YC, Jiang XY and Luo KY. 2006. Block modeling and segmentally iterative ray tracing in complex 3D media. *Geophysics*, 71(3): T41–T51
- Xu T, Zhang ZJ, Gao EG, Xu GM and Sun L. 2010. Segmentally iterative ray tracing in complex 2D and 3D heterogeneous block models. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100(2): 841–850
- Xu T, Li F, Wu ZB, Wu CL, Gao EG, Zhou B, Zhang ZJ and Xu GM. 2014. A successive three-point perturbation method for fast ray tracing in complex 2D and 3D geological models, *Tectonophysics*, doi:10.16/j.tecto.2014.02.012
- Yang JY, Zhang XH, Zhang FF, Han B and Tian ZX. 2012. On the accuracy of EGM2008 earth gravitational model in Chinese Mainland. *Progress in Geophys.*, 27(4): 1298–1306 (in Chinese with English abstract)
- Yin XH, Shi ZH, Liu ZP and Zhang YM. 1980. The basic features of regional gravity field in Chinese Continent. *Seismology and Geology*, 2(4): 69–75 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JS, Gao R, Zeng LS, Li QS, Guan Y, He RZ, Wang HY and Lu ZW. 2010a. Relationship between characteristics of gravity and magnetic anomalies and the earthquakes in the Longmenshan range and adjacent areas. *Tectonophysics*, 491(1–4): 218–229
- Zhang PZ, Shen ZK, Wang M, Gan WJ, Bürgmann R, Molnar P, Wang Q, Niu ZJ, Sun JZ, Wu JC, Sun HR and You XZ. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology*, 32(9): 809–812
- Zhang PZ. 2013. A review on active tectonics and deep crustal processes of the western Sichuan region, eastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 584: 7–22
- Zhang YQ, Teng JW, Wang QS and Hu GZ. 2013. Density structure and



- isostatic state of the crust in the Longmenshan and adjacent areas. *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2013.08.018
- Zhang ZJ, Wang YH, Chen Y, Houseman GA, Tian XB, Wang EC and Teng JW. 2009. Crustal structure across Longmenshan fault belt from passive source seismic profiling. *Geophysical Research Letters*, 36(17): L17310, doi: 10.1029/2009GL039580
- Zhang ZJ, Yuan XH, Chen Y, Tian XB, Kind R, Li XQ and Teng JW. 2010b. Seismic signature of the collision between the east Tibetan escape flow and the Sichuan Basin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 292(3-4): 254-264
- Zhao GZ, Chen XB, Xiao QB, Wang LF, Tang J, Zhan Y, Wang JJ, Zhang JH, Utada H and Uyeshima M. 2009. Generation mechanism of Wenchuan strong earthquake of MS8.0 inferred from EM measurements in three levers. *Chinese J. Geophys.*, 52(2): 553-563 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GZ, Unsworth MJ, Zhan Y, Wang LF, Chen XB, Jones AG, Tang J, Xiao QB, Wang JJ, Cai JT, Li T, Wang YZ and Zhang JH. 2012. Crustal structure and rheology of the Longmenshan and Wenchuan Mw 7.9 earthquake epicentral area from magnetotelluric data. *Geology*, 40(12): 1139-1142
- 王芃, 张忠杰, 张晰, 王敏玲, 梁晓峰, 滕吉文. 2014. 基于 Matlab 平台实现二维复杂地质模型多边形网格建模及重力异常正演计算. *桂林理工大学学报*, 已接受
- 王绪本, 罗威, 张刚, 蔡学林, 覃庆炎, 罗皓中. 2013. 扇形边界条件下的龙门山壳幔电性结构特征. *地球物理学报*, 56(8): 2718-2727
- 吴建平, 黄媛, 张天中, 明跃红, 房立华. 2009. 汶川 Ms8.0 级地震余震分布及周边区域 P 波三维速度结构研究. *地球物理学报*, 52(2): 320-328
- 徐涛, 徐果明, 高尔根, 朱良保, 蒋先艺. 2004. 三维复杂介质的块状建模和试射射线追踪. *地球物理学报*, 47(6): 1118-1126
- 杨金玉, 张训华, 张菲菲, 韩波, 田振兴. 2012. EGM2008 地球重力模型数据在中国大陆地区的精度分析. *地球物理学进展*, 27(4): 1298-1306
- 殷秀华, 史志宏, 刘占坡, 张玉梅. 1980. 中国大陆区域重力场的基本特征. *地震地质*, 2(4): 69-75
- 赵国泽, 陈小斌, 肖骑彬, 王立凤, 汤吉, 詹艳, 王继军, 张继红, Utada H, Uyeshima M. 2009. 汶川 Ms8.0 级地震成因三“层次”分析: 基于深部电性结构. *地球物理学报*, 52(2): 553-563
- 付广裕, 祝意青, 高尚华, 梁伟锋, 金红林, 杨光亮, 周新, 郭树松, 徐云马, 杜伟吉. 2013. 川西地区实测自由空气重力异常与 EGM2008 模型结果的差异. *地球物理学报*, 56(11): 3761-3769
- 郭颺, 刘启元, 陈九辉, 刘立申, 李顺成, 李昱, 王峻, 齐少华. 2009. 川西龙门山及邻区地壳上地幔远震 P 波层析成像. *地球物理学报*, 52(2): 346-355
- 李飞, 徐涛, 武振波, 张忠杰, 滕吉文. 2013. 三维非均匀地质模型中的逐段迭代射线追踪. *地球物理学报*, 56(10): 3514-3522
- 刘启元, 李昱, 陈九辉, 郭颺, 李顺成, 王峻, 张绪奇, 齐少华.