

夏婷婷, 张景发, 田甜. 2019. 龙门山断裂带地壳结构的三维建模. 地震学报, 41(6): 743-756. doi: 10.11939/jass.20190087.
Xia T T, Zhang J F, Tian T. 2019. Three-dimensional modeling of the crust structure of Longmenshan fault zone. *Acta Seismologica Sinica*, 41(6): 743-756. doi: 10.11939/jass.20190087.

龙门山断裂带地壳结构的三维建模^{*}

夏婷婷 张景发 田甜[†]

(中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所)

摘要 为了实现龙门山区域地质信息的科学管理与共享, 推动该区域地球物理资料的统一管理, 本文在整理现有二维地球物理探测数据的基础上构造了龙门山断裂带区域的三维地壳结构模型, 并结合实测的布格重力异常数据对模型进行了分析. 结果表明, 地层模型正演的整体重力场与实测布格重力异常基本吻合, 初步证明该模型的正确性. 局部重力场显示: 在该模型的尺度下, 沉积层对整体重力场的变化贡献较小; 中上地壳有不同程度的隆起和拗陷, 与前人研究所揭示的低速异常体吻合; 地幔表现为规则的自西北至东南单调上升的重力异常梯度带, 与前人反演结果的趋势一致, 从而证明了模型的可靠性. 最后在重力资料约束下对模型进行了反演, 进一步修正了模型.

关键词 三维地质模型 龙门山断裂带 地震剖面 布格重力异常
doi: 10.11939/jass.20190087 中图分类号: P315.2 文献标识码: A

Three-dimensional modeling of the crust structure of Longmenshan fault zone

Xia Tingting Zhang Jingfa Tian Tian[†]

(Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China)

Abstract: 3D geological modeling can realize the intuitive and complete expression of the spatial relationship among geological bodies, therefore it is an effective way to achieve the scientific management and sharing of geological information. At the same time, a well-established 3D model supports slices in any direction, which can predict the shape of unknown areas and infer structural history. This paper constructed a 3D crustal structure model of the Longmenshan fault zone by collating existing 2D geophysical data, and analyzed the model with the measured Bouguer gravity anomaly data. The result show that the overall gravity field of the formation model is basically consistent with the measured Bouguer gravity anomalies, which preliminary proves the correctness of the model. The local gravity field shows that the sedimentary layer contributes less to the change of the overall gravity field with the scale of the model. The middle and upper crust develops uplifts and depressions to different degree, which coincides with the existence of low-velocity anomalies revealed by previous researches. The gravity anomaly

^{*} 基金项目 中国地震局地壳应力研究所基本科研业务专项(ZDJ2018-15, ZDJ2019-21)和吉林省科技发展规划(20180201034SF)共同资助.
收稿日期 2019-05-14 收到初稿, 2019-07-05 决定采用修改稿.
[†] 通信作者 e-mail: tiantianicd216@163.com



gradient zone regular monotonously rises from northwest to southeast, which is consistent with the trend from previous inversion results, thus basically proving the reliability of the model. Furthermore, we do model inversion under the constraint of gravity data, and the model was modified.

Key words: three-dimensional geological model; Longmenshan fault zone; seismic profile; Bouguer gravity anomaly

引言

龙门山断裂带位于青藏高原东缘、四川盆地西北缘, 长约 500 km, 宽约 30—50 km, 沿 NE-SW 向展布, 断层滑动以逆冲为主兼具右旋走滑分量. 如图 1 所示, 龙门山断裂带的主要断裂自西向东分布有后山断裂(汶川—茂县断裂)、中央断裂(映秀—北川断裂)、前山断裂(江油—灌县断裂)(唐荣昌等, 1991; 邓起东等, 1994; 贾东等, 2003). 在该断裂带上相继发生了 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震和 2013 年芦山 $M_s7.0$ 地震, 两次地震的地震成因和该断裂带的后续地震危险性研究备受关注. 构建三维地质模型能够实现浅层地质调查和深部构造资料的综合, 对岩石圈(地壳)结构进行直观描述, 是进行孕震环境和地震机制分析研究的前提.

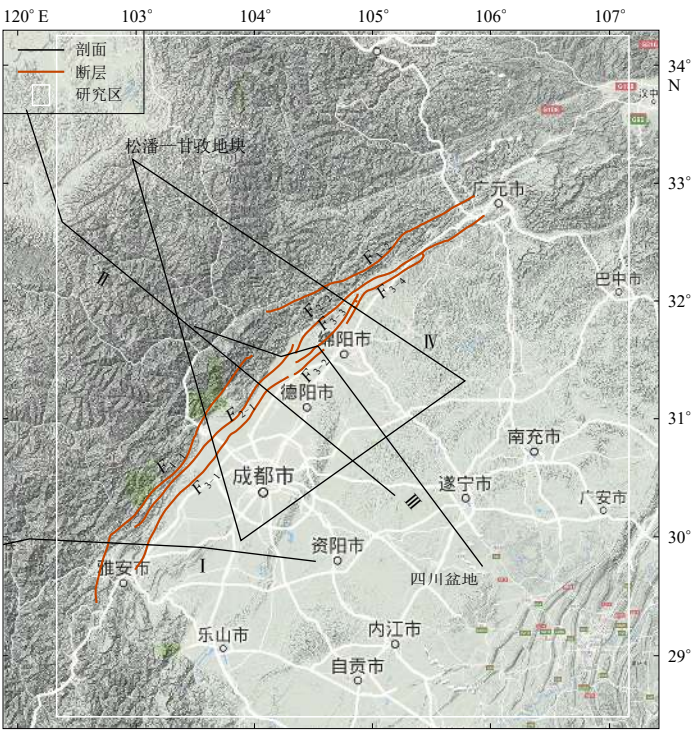


图 1 龙门山断裂带地质构造背景及剖面分布

I: 竹巴龙—资中剖面; II: 花石峡—简阳剖面; III: 黑水—三台剖面; IV: 唐克—蒲江—阆中三角剖面.

F_{1-1} : 汶川—茂汶断裂; F_{1-2} : 平武—青川断裂; F_2 : 映秀—北川断裂; F_3 : 灌县—安县断裂

Fig. 1 The geological structure of Longmenshan fault zone and profile position

I: Zhubalong-Zizhong profile; II: Huashixia-Jianyang profile; III: Heishui-Santai profile; IV: Tangke-Pujiang-Langzhong profile.

F_{1-1} : Wenchuan-Mao County fault; F_{1-2} : Pingwu-Qingchuan fault; F_2 : Yingxiu-Beichuan fault; F_3 : Guanxian-Anxian fault

近二三十年关于龙门山断裂带的研究已经累积了丰富的地球物理勘探资料,如深地震测深剖面(陈学波等, 1988; 韩渭宾, 蒋国芳, 2000; Wang *et al.*, 2007; 滕吉文等, 2008; 徐朝繁等, 2008; 朱介寿, 2008; Li *et al.*, 2009; Jia *et al.*, 2014; 王夫运等, 2015; 张新彦等, 2017)、基于接收函数反演或层析成像的速度结构模型构建(王椿镛等, 2002, 2003; 刘启元等, 2009; 郭彪等, 2009; 雷建设等, 2009; 吴建平等, 2009; Li *et al.*, 2009; 邓文泽等, 2014)、基于重磁数据的密度模型反演(邓起东, 1994; 滕吉文等, 2008; 张季生等, 2009; 唐新功等, 2012; 张恩会等, 2015; 杨光亮等, 2015)以及大地电磁探测(李立, 金国元, 1987; 孙洁等, 2003; 陈高等, 2006; 徐朝繁等, 2008; 王绪本等, 2008, 2009)。

龙门山区域的研究成果虽然丰富,但呈现单一分散的状态,针对这些已有成果进行客观整理的报道甚少。为此,本文拟将龙门山区域具有代表性的二维剖面作为数据源,通过专业的三维建模软件构建该区域深达 70 km 的三维地质模型,并通过实测的布格重力异常数据检验模型,继而通过重力资料约束反演对该模型进一步予以修正,为有效预测龙门山未知区域提供参考。

1 构造背景

龙门山断裂带处于华北地块、华南地块与羌塘地块的结合部位,西北侧是松潘—甘孜古残留洋盆,东南侧是稳定的扬子克拉通(Jia *et al.*, 2014)。龙门山断裂带及邻近区域的速度结构反演结果表明:该区域的速度结构从青藏高原东南部的山地到扬子地台具有强烈的不均匀性;四川盆地所处沉积层较厚,且其沉积环境自晚古生代以来变化不大(王椿镛等, 2002),地壳结构整体稳定,地壳及上地幔的平均速度均明显偏高(王椿镛等, 2015),其中上地壳呈现低速异常,表明该地区处于拗陷状态(胥颐, 2009);松潘—甘孜地块地壳因介质岩性变化而呈增厚状态(王椿镛等, 2015),其上地壳速度较高,中下地壳速度偏低,上地幔也表现为明显低速异常(胥颐, 2009; 王椿镛等, 2015)。

2 数据与方法

三维地质建模是一门通过空间信息管理、分析与地穴统计技术构造三维地质体,并进行地质解释的多学科教程技术(潘懋等, 2007)。地质单元具有多尺度的非均匀性和连续性,根据地质单元的连续性可以从测得的部分信息推算其相邻区域的趋势。但是,这种推算方法的主观性较强,建模过程会掺杂建模人员的主观判断,因此建模的结果具有多解性,即模型的随机性。

建模是基于一定的算法将二维资料推演成三维空间信息的过程。首先,在模型表面上确定剖面与断裂带的位置,在模型表面约束剖面的地表迹线、断层的走向及影响范围;然后,由剖面迹线建立对应的剖面,对剖面信息进行数字化,剖面信息包含断层在剖面位置向下延展轨迹数据、层位在该剖面的具体埋深及形态信息;最后,依据适合的算法,由二维剖面生成三维模型。实际建模过程中需要人为干预,协调各剖面信息以确保数据的一致性。对模型赋予物性参数并进行正演,与实测的重力数据进行对比,从而验证模型的可信度。

本文使用 GeoModeller 软件(4.0.5 版)进行三维地质建模,该软件支持输入不同类型的数
据,如二维剖面、地质图、钻孔数据等,支持对数据的可视化和编辑,定义不同地质单元的
接触关系后,使用势场插值的方式构建三维模型(Calcagno *et al.*, 2011)。本文取研究区范围为

(102°E—107°E, 29°N—34°N), 建模内容包括断层模型和地层模型. 用于比对的布格重力原数据是(98°E—108°E, 26°N—34°N)范围内的采样间隔为 5 km 的川滇地区格网数据.

2.1 断层参数

用于三维建模的断层参数包括地表迹线和断裂倾向、倾角. 断层地表迹线根据模型分辨率进行了适当的简化.

本文只考虑前山断裂带、中央断裂带和后山断裂带, 忽略其它断层的影响. 龙门山后山断裂包括北段的平武—青川断裂(F_{1-2})和南段的汶川—茂汶断裂(F_{1-1}). 平武—青川断裂走向 N60°—70°E (贾东等, 2003); 汶川—茂汶断裂中段走向为 N25°—45°E, 大约 10 km 深度以上产状的倾向为 NW, 倾角约为 55°, 在 5 km 深度处开始变缓, 倾角约为 35°, 在北端与平武—青川断裂斜交(唐荣昌等, 1991; 马保起等, 2005; 冯杨洋, 2016), 汶川—茂汶断裂南段的走向为 N45°E (徐锡伟等, 2008).

龙门山中央断裂, 即映秀—北川断裂, 分为北段和南段两部分. 北川—映秀断裂北段(F_{2-2})的走向为 N45°E, 倾向 NW, 整体倾角约为 50°—70°, 在平均 19 km 深度以上倾向 NW, 倾角约为 55°, 在 6 km 深度处开始变缓; 北川—映秀断裂南段(F_{2-1})的走向为 N35°—45°E, 倾向为 NW, 平均 17 km 深度以上倾向 NW, 倾角约为 55°, 在 9 km 深度处开始变缓(邓起东等, 1994; 赵小麟等, 1994; 冯杨洋, 2016).

龙门山前山断裂(F_3)又称灌县—安县断裂, 总体走向呈 N35°—45°E, 断面倾向 NW, 倾角为 50°—70°, 由南到北依次为 F_{3-1} , F_{3-2} , F_{3-3} , F_{3-4} : 南段的 F_{3-1} 和 F_{3-2} 走向为 N43°E, 倾向为 NW, 倾角 45°—65°不等, 在 10 km 深度以上倾向 NW, 倾角约为 50°, 在 4 km 处开始变缓, 倾角为 25°; 中段 F_{3-3} (灌县—江油断裂)主要发育在中生代地层中, 倾向 NW, 倾角较陡, 产状为北东陡南西缓; 北段 F_{3-4} 在平均 14 km 深度以上倾向 NW, 倾角约为 45°, 在 8 km 处开始变缓(邓起东等, 1994; 冯杨洋, 2016).

2.2 地层参数

地层参数包括地层界面形态和地层物性参数. 地层密度根据密度与速度的转化公式(冯锐, 1985)和实测剖面的地震波速度推算, 结合重力反演最终确定, 详见表 1. 地层界面形

表 1 地层密度

Table 1 Formation density	
地层	密度/(g·cm ⁻³)
沉积层	2.36
上地壳	2.67
中地壳	2.9
下地壳	3.14
地幔	3.35

态根据收集到的剖面获取, 经过筛选, 最终使用以下四个剖面作为建模数据源: 唐克—蒲江—阆中三角测线 DSS 剖面 IV (陈学波等, 1988; 邓阳凡等, 2011)、黑水—三台剖面 III (邓阳凡等, 2011)、花石峡—简阳剖面 II (王有学等, 2005)和竹巴龙—资中剖面 I (王椿镛, 2002, 2003; Jia *et al.*, 2014), 各剖面的地表迹线见图 1, 图 2 为经过修改和数字化的剖面.

2.3 重力数据

本文重力数据购买于全国地质资料馆. 中国地质调查局发展研究中心于 2000 年对原有的各行业间的数据进行整合, 按照统一的重力基本网(1985)、坐标系(北京 54)和国家高程标准(1985)、正常重力场公式、地改半径和中间层密度, 建立了规范的、安全的全国范围重力数据库. 该数据库收录原地矿部共计 255 个 1:20 万图幅的 1:20 万数据、84 个 1:20 万图幅的 1:50 万数据、27 个 1:100 万图幅的 1:100 万数据以及 1999 年以来“国土资源大调查”专项部署

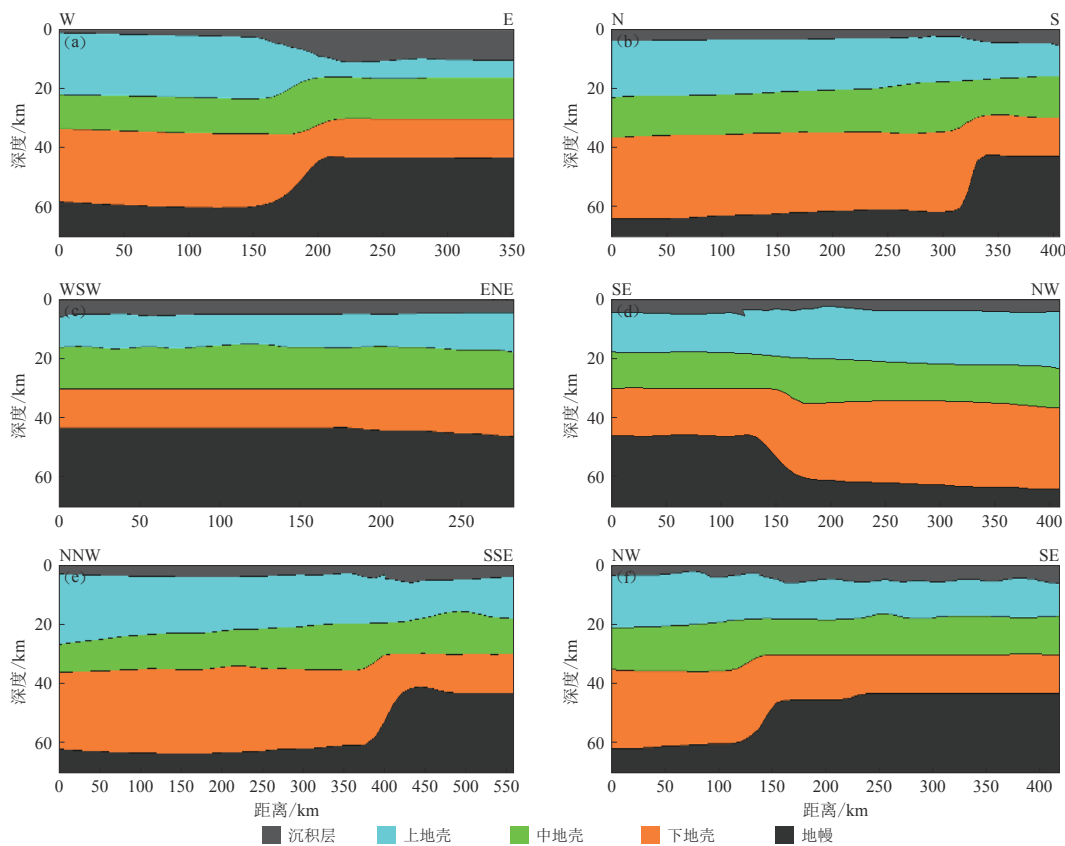


图 2 本文采用的五个数字化剖面

(a) 竹巴龙—资中剖面(改自 Wang *et al.*, 2007); (b) 唐克—蒲江剖面(改自韩渭宾, 蒋国芳, 2000);
(c) 蒲江—阆中剖面(改自韩渭宾, 蒋国芳, 2000); (d) 阆中—唐克剖面(改自韩渭宾, 蒋国芳, 2000);
(e) 花石峡—简阳剖面(改自王有学等, 2005); (f) 黑水—三台剖面(改自王成, 2012)

Fig. 2 Five digital profiles used in this paper

(a) Zhubalong-Zizhong profile (revised from Wang *et al.*, 2007); (b) Tangke-Pujian profile (revised from Han and Jiang, 2000); (c) Pujiang-Langzhong profile (revised from Han and Jiang, 2000); (d) Langzhong-Tangke profile (revised from Han and Jiang, 2000); (e) Huashixia-Jianyang profile (revised from Wang *et al.*, 2005); (f) Heishui-Santai profile (revised from Wang, 2012)

完成的青藏高原6个1:100万图幅和遍布全国的78个1:20万图幅的区域重力调查成果数据。

2.4 方法

本文利用Geomodeller进行建模。该软件支持多种地质数据的导入、可视化与编辑，在定义了描述不同地层单元之间关系的地层柱状图后，利用势场插值法计算三维模型。Geomodeller基于势场理论进行三维插值，使用协同克里金算法计算接触点(地质、断层)和方向数据，并将其视作三维标量场的等势面增量和导数(Lajaunie *et al.*, 1997)。根据不同接触关系定义地层层序，定义曲面为不同场的特殊等值面，根据地层层序的定义生成三维地质模型(Calcagno *et al.*, 2011)。

地球物理正演是指在地球物理资料解释理论中，由地质体的形状、产状、空间位置等赋

存状态和密度、磁性、电性、弹性、速度等物性参数计算该地质体引起的场异常过程. 正演模型是利用计算机模拟方法来获得已知地质体的地震响应特征, 从而指导地震资料的构造和岩性解释. 与反演相比, 正演的优势在于改变模型参数方便, 选用的计算方法灵活, 模型制作简单.

正演算法采用多线程空间卷积算法: 给定分辨率, 将连续的地质模型离散化为多个正则或半正则三维体元; 根据已知的观测值计算每个体元的权重, 并将其作为卷积算子; 对模型进行空间卷积, 统计不同体元的权重总和, 得到模型各点的重力异常; 评估每一次正演结果的残差, 迭代上述计算, 当残差值达到最小即停止迭代(Gibson *et al*, 2013).

3 讨论与分析

3.1 模型及重力异常残差

最终建成的地层模型和断层模型分别如图 3a 和图 3b 所示. 由图 3a 可见, 沉积层整体较薄, 受分辨率的影响并未表现出较大的变化; 地壳层以龙门山断裂带为界, 两侧有明显的厚度差异, 其中下地壳贡献的厚度变化值最大, 上地壳次之, 中地壳厚度变化最不明显; 本模型的地幔层主要反映上地幔, 在龙门山断裂带西北侧的松潘—甘孜地块埋深较大, 经过龙门山断裂带的抬升, 在东南侧的四川盆地上地幔约有 10—20 km 的抬升.

实测剖面(王成, 2012)显示, 位于四川盆地的龙泉驿、成都、彭州至都江堰段莫霍面埋

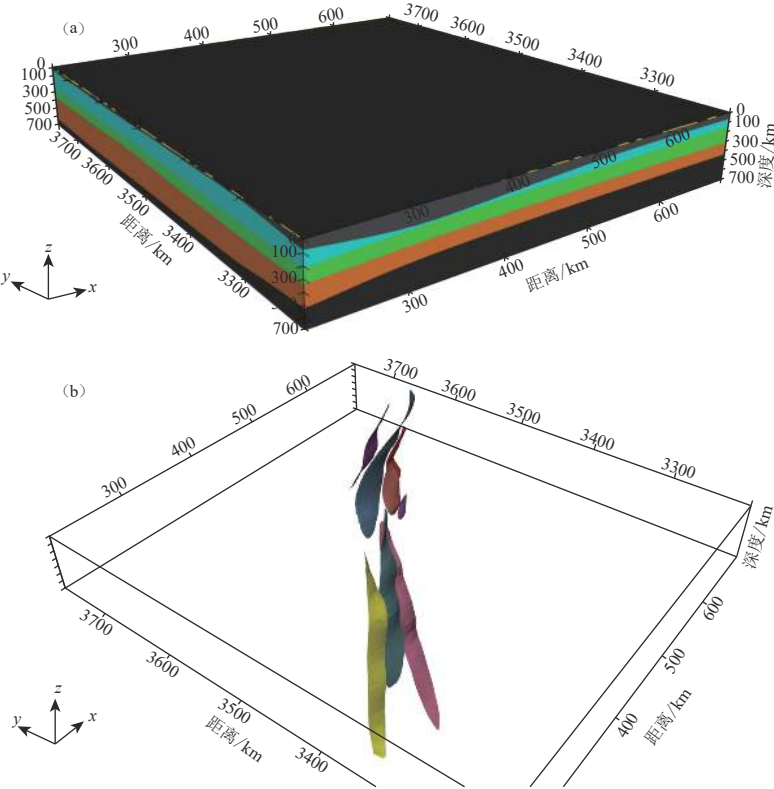


图 3 地层模型(a)和断层模型(b)

Fig. 3 Fault model (a) and formation model (b)

深处于 45—48 km 之间, 郫县、双流、资阳、简阳、成都至汉川段莫霍面埋深介于 42—44 km 之间; 位于龙门山断裂带的耿达(埋深 48 km)处莫霍面陡降至达维的 68 km, 经小金、丹巴缓慢上升至 64 km, 越过鲜水河断裂, 道孚附近的莫霍面变浅至 60 km, 在茂县(45 km)陡降至黑水的 58 km, 莫霍面出现了 13 km 的陡降带, 随后, 经壤口、红原、唐克、麦溪缓慢上升至 50 km. 模型整体趋势与实测数据吻合.

对模型进行正演以验证其可靠性, 参数见表 1. 布格重力异常原件的重力值范围为 $-76.17 \times 10^{-5} \sim -435.15 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (图 4a), 计算的重力值范围为 $-172.88 \times 10^{-5} \sim -424.23 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (图 4b). 根据总体形态, 计算场与观测场具有一致性, 能反映断裂沿东北—西南对角线分布, 但根据数值分析, 残差较大(图 4c). 如图所示, 观测值西侧边缘表现为带状的重力低值不规则圈闭, 计算值表现为存在于西北角的小面积重力低值圈闭, 根据竹巴龙—资中测线(Wang *et al.*, 2007)的解释剖面, 本文推断西南角的重力低值与埋深 17—20 km 处存在的延伸至龙门山断裂带的低速异常体有关; 南侧中部偏北的重力低值与花石峡—简阳剖面(王

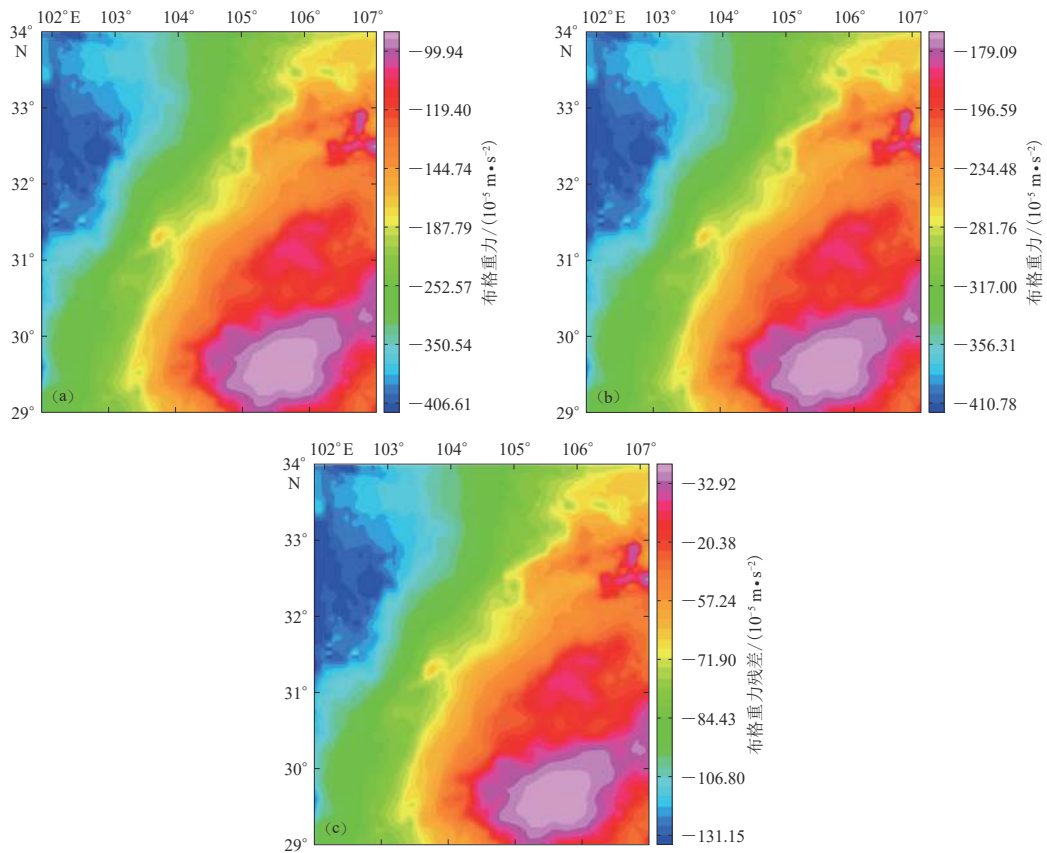


图 4 模型正演结果及残差

(a) 实际观测值; (b) 模型正演计算值; (c) 模型残差

Fig. 4 Model forward result and misfit

(a) Observed gravity; (b) Computed gravity from model forward; (c) Model misfit

有学等, 2005)上埋深 25—40 km 处的低速异常体、阿坝—双流测线(朱介寿, 2008)上埋深 20—30 km 处低速异常体有关. 至于龙门山断裂带, 观测值中显示出明显的重力梯度带, 与计算值形态基本吻合, 但断裂带西南端和东北端的重力梯度带表现为明显的向内侧收缩, 出现这种差异我们推测原因主要有两点, 其一是由于断裂带两端缺少实测剖面数据约束, 使得曲面插值算法在模型边缘产生了误差, 其二是模型正演在边缘处存在一定的误差.

根据实际建模中遇到的误差问题, 总结如下: ① 剖面数据由人工反演获取, 反演的算法与人工解释的过程均存在一定的误差; ② 在人工地震测深等试验下, 剖面位置均不是规则的线, 后期处理中经过一定程度的加工; ③ 模型建造中需要将不同剖面进行匹配, 为了保证整个模型的一致, 需要人为修改部分剖面上的信息.

从整体来看, 模型正演得到的重力异常展布与观测值基本一致, 即整体重力值呈现为自西北至东南单调上升的重力异常梯度带, 龙门山断裂带体现为高梯度变化带, 这表明速度剖面构造的正演模型能很好地反映重力场的变化趋势.

3.2 各地层正演结果

通过调整物性参数的设置, 排除其它各层的影响从而实现各地层的单独正演, 结果如图 5 所示.

1) 沉积层. 沉积层引起的布格重力异常整体表现为 $-45.53 \times 10^{-5} \sim -444.63 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 范围内的负异常, 西北高、东南低, 分区明显. 沿龙门山断裂带形成了一条重力梯度带, 该梯度带将整个区域划分为东西两侧, 松潘—甘孜盆地沉积层薄、四川盆地沉积层厚.

2) 中上地壳. 上地壳和中地壳皆显示为负异常值, 前者变化范围较大, 在 $-49.29 \times 10^{-5} \sim -352.03 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 之间, 后者变化范围较小, 在 $-89.14 \times 10^{-5} \sim -117.68 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$; 两者形态差异较大, 上地壳大致呈现为自西北至东南的梯度带, 龙门山断裂带表现为明显且粗糙的高梯度变化带, 而中地壳呈现为多个无规律的圈闭, 或重力高圈闭, 或重力低圈闭.

上地壳西北角表现为低重力异常, 与奔子栏—唐克埋深在 10—25 km 范围内速度为 5.7—5.9 km/s 的低速异常体有关(王椿镛等, 2003); 东侧中部的阿坝至理县(朱介寿, 2008)、花石峡附近(王有学等, 2005; 邓阳凡等, 2011)及黑水附近(蔡学林, 2007)的中地壳存在低速异常体, 与正演结果所显示的重力低值圈闭相对应.

3) 下地壳. 较中上地壳和沉积层, 下地壳引起的布格重力异常变化趋于光滑, 整体为正异常, 西北高、东南低, 范围为 $26.37 \times 10^{-5} \sim 52.73 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 变化较小, 龙门山断裂带表现为光滑的异常梯度带. 下地壳异常变化小, 说明厚度变化小, 整体厚度较大, 平均厚度达 30 km.

4) 莫霍面. 莫霍面的重力异常逐渐趋于简单, 局部重力异常现象消失, 反映了上地幔速度结构的简单化. 重力异常沿龙门山断裂带表现为一条重力梯度带, 梯度值介于 $75.08 \times 10^{-5} \sim 257.82 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$. 模型内布格重力异常数据呈现为规则的自西北至东南单调上升的重力异常梯度带. 地幔层的正演结果与利用重力数据反演获取的 4 阶小波逼近图(深度等同于地幔层)的趋势一致(姜文亮, 张景发, 2011).

龙门山断裂带西北侧的松潘—甘孜地块夹持于昆仑断裂带与龙门山断裂带之间, 莫霍面在整体上呈凹陷形态, 且地壳自西北向东南方向逐渐变薄, 表现为台阶状抬升, 莫霍面深度为 60—70 km, 东南侧四川盆地的莫霍面深度经龙门山的抬升, 其埋深陡增至 40—50 km (王有学等, 2005).

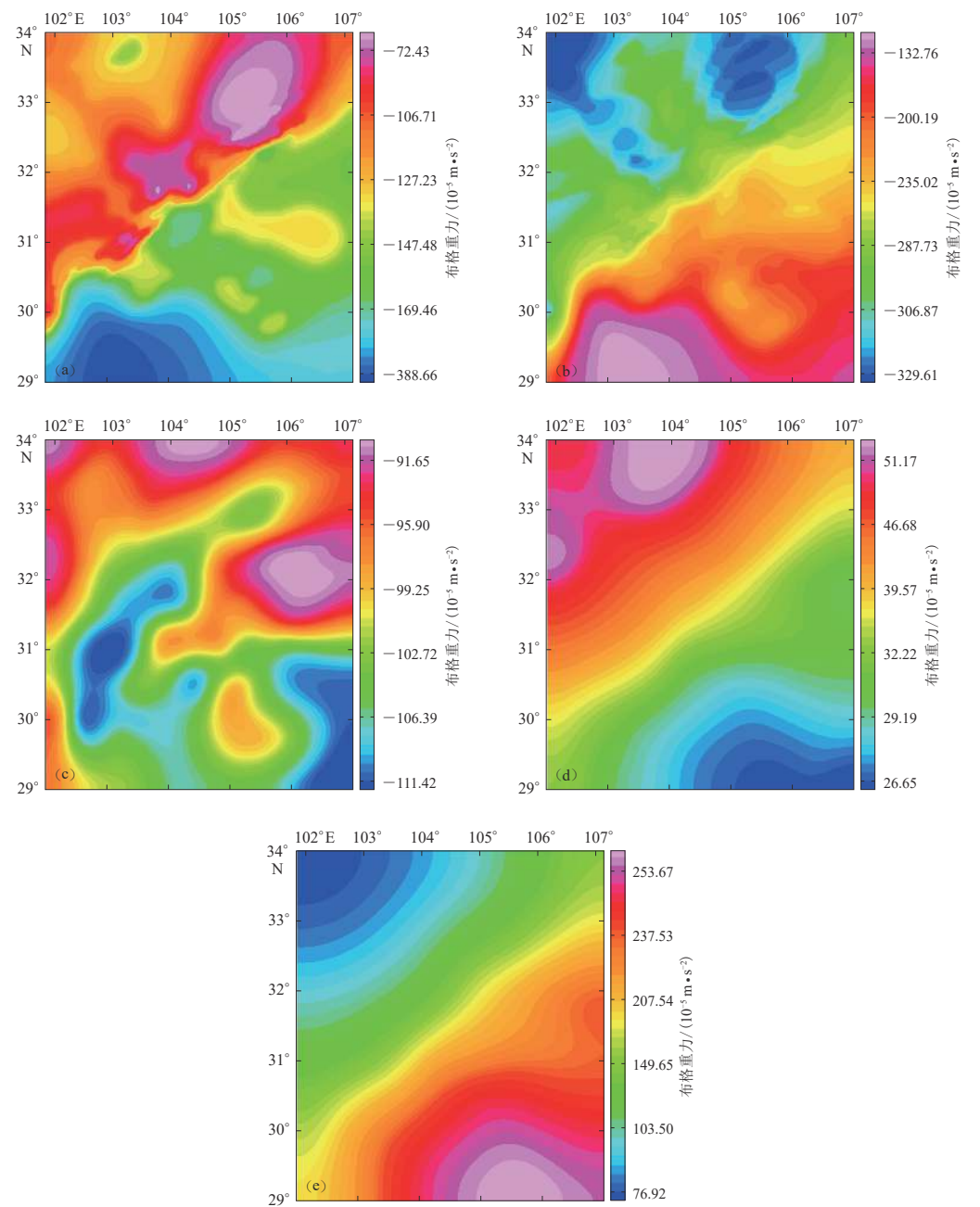


图 5 构建模型各地层的正演结果

(a) 沉积层; (b) 上地壳; (c) 中地壳; (d) 下地壳; (e) 地幔

Fig. 5 Forward results of each formations involved in the built model

(a) Sediment; (b) Upper crust; (c) Middle crust; (d) Lower crust; (e) Mantle

3.3 模型反演

为降低残差,在重力数据约束下对模型进行反演,根据残差计算(图 6a-c)可知反演结果良好,图 6d-f为反演后的模型展示,沿断层走向莫霍面的抬升情况很明显,与上述分析一致.

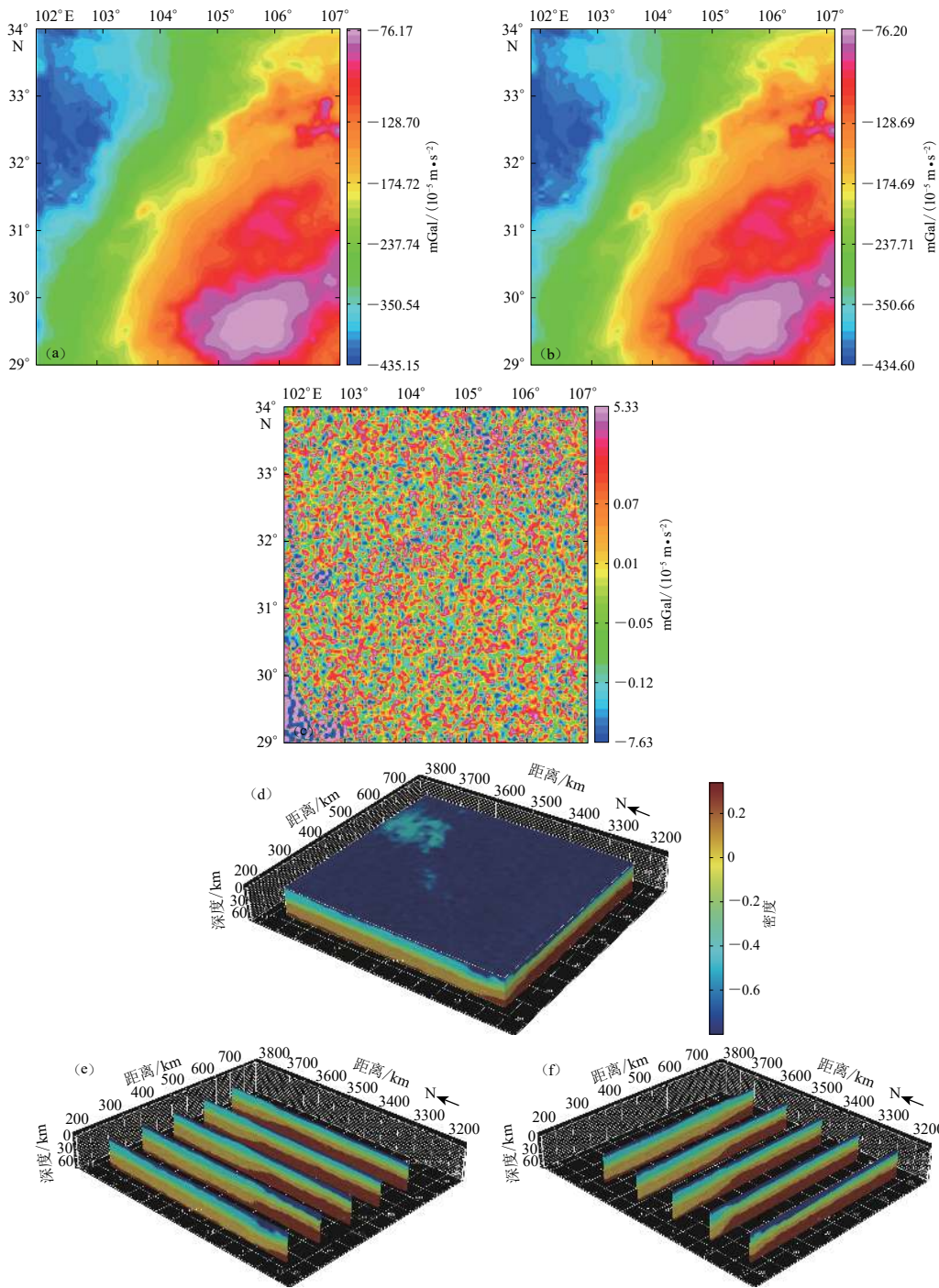


图 6 反演分析及模型展示

(a) 实际观测值; (b) 模型反演计算值; (c) 反演残差; (d) 反演模型; (e) 南北向切片展示; (f) 东西向切片展示

Fig. 6 Inversion and model presentation

(a) Observed gravity; (b) Computed gravity from model inversion; (c) Inversion misfit;
(d) Inversion model; (e) North-south slice; (f) West-east sections

4 讨论与结论

本文挑选整合了龙门山区域的经典文献研究资料, 从中挑选了部分二维剖面, 经过数字化、检校编辑、地层定义等步骤, 构建了龙门山区域的三维地质模型, 利用该区域实测重力数据验证, 结果证明了模型的可用性; 之后通过重力数据反演, 修正了模型的误差, 形成了龙门山区域基本可用的三维地质模型。

模型显示, 龙门山区域的莫霍面埋深约 40—66 km, 分区明显, 西低东高、北低南高; 下地壳厚度处于 9—31 km 的变化范围, 西北端厚, 向东南端逐渐变薄; 中地壳厚度变化无明显规律, 存在明显的隆起与凹陷, 整体厚度值在 7—19 km; 上地壳厚度约为 22 km, 自南至北呈增厚趋势, 其中部分区域存在隆起与凹陷; 沉积层埋深呈现东北浅、西南深的分布状态, 埋深范围为 1—9 km。其中中上地壳存在的隆起、凹陷与前人研究中所揭示的低速异常体吻合, 地幔的变化趋势与前人反演的自东北向西南单调上升重力梯度带吻合。

本文通过建模对龙门山区域的地球物理勘探成果进行了有选择的统一整理, 试图综合管理现有的成果并以三维的形式展示, 是对地球物理数据统一管理 with 共享方式的有益探索。模型的精度受原数据精度限制, 未能充分还原地壳结构的细节, 建模过程忽略了一些特殊地质体, 若需对特殊地质体进行建模需要高精度数据支撑; 建模过程中主要存在不同剖面数据间的 inconsistency, 受建模人员的主观影响较大, 这是三维地质建模下一步需要解决的问题。

参 考 文 献

- 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 程先琼. 2007. 中国大陆及邻区岩石圈地壳三维结构与动力学型式[J]. *中国地质*, **34**(4): 543–557.
- Cai X L, Zhu J S, Cao J M, Cheng X Q. 2007. 3D structure and dynamic types of the lithospheric crust in continental China and its adjacent regions[J]. *Geology in China*, **34**(4): 543–557 (in Chinese).
- 陈高, 吴健生, 于鹏. 2006. 松潘—阿坝地区深部电性特征[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, **31**(6): 857–860.
- Chen G, Wu J S, Yu P. 2006. Electrical property of deep structure in Songpan-Aba district[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, **31**(6): 857–860 (in Chinese).
- 陈学波, 吴跃强, 杜平山. 1988. 龙门山构造带两侧地壳速度结构特征[G]//中国大陆深部构造的研究与进展. 北京: 地震出版社: 97–113.
- Chen X B, Wu Y Q, Du P S. 1988. Characteristics of crustal velocity structure on both sides of Longmenshan tectonic belt[G]// *Research and Progress of Deep Structures in China Mainland*. Beijing: Seismological Press: 97–113 (in Chinese).
- 邓起东, 陈社发, 赵小麟. 1994. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. *地震地质*, **16**(4): 389–403.
- Deng Q D, Chen S F, Zhao X L. 1994. Tectonics, seismicity and dynamics of Longmenshan mountains and its adjacent regions[J]. *Seismology and Geology*, **16**(4): 389–403 (in Chinese).
- 邓文泽, 陈九辉, 郭飏, 刘启元, 李顺成, 李昱, 尹昕忠, 齐少华. 2014. 龙门山断裂带精细速度结构的双差层析成像研究[J]. *地球物理学报*, **57**(4): 1101–1110.
- Deng W Z, Chen J H, Guo B, Liu Q Y, Li S C, Li Y, Yin X Z, Qi S H. 2014. Fine velocity structure of the Longmenshan fault zone by double-difference tomography[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(4): 1101–1110 (in Chinese).
- 邓阳凡, 李守林, 范蔚茗, 刘佳. 2011. 深地震测深揭示的华南地区地壳结构及其动力学意义[J]. *地球物理学报*, **54**(10): 2560–2574.
- Deng Y F, Li S L, Fan W M, Liu J. 2011. Crustal structure beneath South China revealed by deep seismic soundings and its dynamics implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(10): 2560–2574 (in Chinese).
- 冯锐. 1985. 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*, **7**(2): 22–36.
- Feng R. 1985. Crustal thickness and densities in the upper mantle beneath China: The results of three dimensional gravity inversion[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **7**(2): 22–36 (in Chinese).

- 冯杨洋. 2016. 龙门山断裂带深部结构与地震特征分析[D]. 昆明: 昆明理工大学: 15–28.
- Feng Y Y. 2016. *Analysis of Deep Structure and Seismic Characteristics of Longmenshan Fault Zone*[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology: 15–28 (in Chinese).
- 郭飏, 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[J]. 地球物理学报, **52**(2): 346–355.
- Guo B, Liu Q Y, Chen J H, Liu L S, Li S C, Li Y, Wang J, Qi S H. 2009. Teleseismic P-wave tomography of the crust and upper mantle in Longmenshan area, west Sichuan[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(2): 346–355 (in Chinese).
- 韩渭宾, 蒋国芳. 2000. 四川地壳结构研究的现状、问题和建议[J]. 四川地震, (4): 1–8.
- Han W B, Jiang G F. 2000. Present situations, problems and suggestions of deep-crust study in Sichuan area[J]. *Earthquake Research in Sichuan*, (4): 1–8 (in Chinese).
- 贾东, 陈竹新, 贾承造, 魏国齐, 李本亮, 张恒, 魏东涛, 沈扬. 2003. 龙门山前陆褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育[J]. 高校地质学报, **9**(3): 402–410.
- Jia D, Chen Z X, Jia C Z, Wei G Q, Li B L, Zhang Q, Wei D T, Shen Y. 2003. Structural features of the Longmen Shan fold and thrust belt and development of the western Sichuan foreland basin, Central China[J]. *Geological Journal of China Universities*, **9**(3): 402–410 (in Chinese).
- 姜文亮, 张景发. 2011. 川滇地区重力场与深部结构特征[J]. 地球物理学进展, **26**(6): 1915–1924.
- Jiang W L, Zhang J F. 2011. Deep structures of Sichuan-Yunnan region derived from gravity data[J]. *Progress in Geophysics*, **26**(6): 1915–1924 (in Chinese).
- 雷建设, 赵大鹏, 苏金蓉, 张光伟, 李凤. 2009. 龙门山断裂带地壳精细结构与汶川地震发震机理[J]. 地球物理学报, **52**(2): 339–345.
- Lei J S, Zhao D P, Su J R, Zhang G W, Li F. 2009. Fine seismic structure under the Longmenshan fault zone and the mechanism of the large Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(2): 339–345 (in Chinese).
- 李立, 金国元. 1987. 攀西裂谷带及龙门山断裂带地壳上地幔的大地电磁测深研究[J]. 物探与化探, **11**(3): 161–169.
- Li L, Jin G Y. 1987. Telluric electromagnetic sounding study of crust and upper mantle in the Panxi “rift zone” and the Longmenshan faulted zone[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, **11**(3): 161–169 (in Chinese).
- 刘启元, 李昱, 陈九辉, 郭飏, 李顺成, 王峻, 张绪奇, 齐少华. 2009. 汶川M_s8.0地震: 地壳上地幔S波速度结构的初步研究[J]. 地球物理学报, **52**(2): 309–319.
- Liu Q Y, Li Y, Chen J H, Guo B, Li S C, Wang J, Zhang X Q, Qi S H. 2009. Wenchuan M_s8.0 earthquake: preliminary study of the S-wave velocity structure of the crust and upper mantle[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(2): 309–319 (in Chinese).
- 马保起, 苏刚, 侯治华, 舒赛兵. 2005. 利用岷江阶地的变形估算龙门山断裂带中段晚第四纪滑动速率[J]. 地震地质, **27**(2): 234–242.
- Ma B Q, Su G, Hou Z H, Shu S B. 2005. Late Quaternary slip rate in the central part of the Longmenshan fault zone from terrace deformation along the Minjiang river[J]. *Seismology and Geology*, **27**(2): 234–242 (in Chinese).
- 潘懋, 方裕, 屈红刚. 2007. 三维地质建模若干基本问题探讨[J]. 地理与地理信息科学, **23**(3): 1–5.
- Pan M, Fang Y, Qu H G. 2007. Discussion on several foundational issues in three-dimensional geological modeling[J]. *Geography and Geo-Information Science*, **23**(3): 1–5 (in Chinese).
- 孙洁, 晋光文, 白登海, 王立凤. 2003. 青藏高原东缘地壳、上地幔电性结构探测及其构造意义[J]. 中国科学: D辑, **33**(增刊1): 173–180.
- Sun J, Jin G W, Bai D H, Wang L F. 2003. Sounding of electrical structure of the crust and upper mantle along the eastern border of Qinghai-Tibet Plateau and its tectonic significance[J]. *Science in China: Series D*, **46**(S2): 243–253.
- 唐荣昌, 文德华, 黄祖智, 伍先国, 林伟凡, 陈国星, 吴刚. 1991. 松潘—龙门山地区主要活动断裂带第四纪活动特征[J]. 中国地震, **7**(3): 66–73.
- Tang R C, Wen D H, Huang Z Z, Wu X G, Lin W F, Chen G X, Wu G. 1991. The Quaternary activity characteristics of several major active faults in the Songpan-Longmenshan region[J]. *Earthquake Research in China*, **7**(3): 66–73 (in Chinese).
- 唐新功, 尤双双, 胡文宝, 严良俊. 2012. 龙门山断裂带地壳密度结构[J]. 地震地质, **34**(1): 28–38.
- Tang X G, You S S, Hu W B, Yan L J. 2012. The crustal density structure underneath Longmenshan fault zone[J]. *Seismology and Geology*, **34**(1): 28–38 (in Chinese).

- 滕吉文, 白登海, 杨辉, 闫雅芬, 张洪双, 张永谦, 阮小敏. 2008. 2008 汶川 $M_s8.0$ 地震发生的深层过程和动力学响应[J]. *地球物理学报*, **51**(5): 1385–1402.
- Teng J W, Bai D H, Yang H, Yan Y F, Zhang H S, Zhang Y Q, Ruan X M. 2008. Deep processes and dynamic responses associated with the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake of 2008[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **51**(5): 1385–1402 (in Chinese).
- 王成. 2012. 利用接收函数反演龙门山断裂带及邻区深部结构[D]. 成都: 成都理工大学: 24–26.
- Wang C. 2012. *Inversion of the Longmenshan Fault Zone and the Deep Structure of the Adjacent Area Using the Receiver Function*[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 24–26 (in Chinese).
- 王椿镛, Mooney W D, 王溪莉, 吴建平, 楼海, 王飞. 2002. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究[J]. *地震学报*, **24**(1): 1–16.
- Wang C Y, Mooney W D, Wang X L, Wu J P, Lou H, Wang F. 2002. Study on 3-D velocity structure of crust and upper mantle in Sichuan-Yunnan region, China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **24**(1): 1–16 (in Chinese).
- 王椿镛, 韩渭宾, 吴建平, 楼海, 白志明. 2003. 松潘—甘孜造山带地壳速度结构[J]. *地震学报*, **25**(3): 229–241.
- Wang C Y, Han W B, Wu J P, Lou H, Bai Z M. 2003. Crustal structure beneath the Songpan-Garze orogenic belt[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **25**(3): 229–241 (in Chinese).
- 王椿镛, 杨文采, 吴建平, 丁志峰. 2015. 南北构造带岩石圈结构与地震的研究[J]. *地球物理学报*, **58**(11): 3867–3901.
- Wang C Y, Yang W C, Wu J P, Ding Z F. 2015. Study on the lithospheric structure and earthquakes in North-South Tectonic Belt[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(11): 3867–3901 (in Chinese).
- 王夫运, 赵成彬, 鄧少英, 姬计法, 田晓峰, 魏学强, 李怡青, 李吉昌, 花鑫升. 2015. 深反射剖面揭示的芦山 7.0 级地震发震构造[J]. *地球物理学报*, **58**(9): 3183–3192.
- Wang F Y, Zhao C B, Feng S Y, Ji J F, Tian X F, Wei X Q, Li Y Q, Li J C, Hua X S. 2015. Seismogenic structure of the 2013 Lushan $M_s7.0$ earthquake revealed by a deep seismic reflection profile[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(9): 3183–3192 (in Chinese).
- 王绪本, 余年, 朱迎堂, 徐权辉, 黄文彬, 高树全. 2008. 龙门山逆冲构造带大地电磁测深初步成果[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, **35**(4): 398–403.
- Wang X B, Yu N, Zhu Y T, Xu Q H, Huang W B, Gao S Q. 2008. Preliminary result of magnetotelluric sounding in the Longmen thrust belt of West Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, **35**(4): 398–403 (in Chinese).
- 王绪本, 朱迎堂, 赵锡奎, 余年, 李坤, 高树全, 胡清龙. 2009. 青藏高原东缘龙门山逆冲构造深部电性结构特征[J]. *地球物理学报*, **52**(2): 564–571.
- Wang X B, Zhu Y T, Zhao X K, Yu N, Li K, Gao S Q, Hu Q L. 2009. Deep conductivity characteristics of the Longmen Shan, eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(2): 564–571 (in Chinese).
- 王有学, Mooney W D, 韩果花, 袁学诚, 姜枚. 2005. 台湾—阿尔泰地学断面阿尔金—龙门山剖面的地壳纵波速度结构[J]. *地球物理学报*, **48**(1): 98–106.
- Wang Y X, Mooney W D, Han G H, Yuan X C, Jiang M. 2005. The crustal P-wave velocity structure from Altyn Tagh to Longmen mountains along the Taiwan-Altay geoscience transect[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **48**(1): 98–106 (in Chinese).
- 吴建平, 黄媛, 张天中, 明跃红, 房立华. 2009. 汶川 $M_s8.0$ 级地震余震分布及周边区域 P 波三维速度结构研究[J]. *地球物理学报*, **52**(2): 320–328.
- Wu J P, Huang Y, Zhang T Z, Ming Y H, Fang L H. 2009. Aftershock distribution of the $M_s8.0$ Wenchuan earthquake and three dimensional P-wave velocity structure in and around source region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(2): 320–328 (in Chinese).
- 胥颐, 黄润秋, 李志伟, 徐亚, 刘劲松, 刘建华. 2009. 龙门山构造带及汶川震源区的 S 波速度结构[J]. *地球物理学报*, **52**(2): 329–338.
- Xu Y, Huang R Q, Li Z W, Xu Y, Liu J S, Liu J H. 2009. S-wave velocity structure of the Longmen Shan and Wenchuan earthquake area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(2): 329–338 (in Chinese).
- 徐朝繁, 潘纪顺, 王夫运, 田小峰, 冯建林. 2008. 龙门山及其邻近地区深部地球物理探测[J]. *大地测量与地球动力学*, **28**(6): 31–37.
- Xu Z F, Pan J S, Wang F Y, Tian X F, Feng J L. 2008. Deep geophysical exploration of Longmenshan and its adjacent area[J].

Journal of Geodesy and Geodynamics, **28**(6): 31–37 (in Chinese).

- 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 马保起, 陈杰, 周荣军, 何宏林, 田勤俭, 何玉林, 王志才, 孙昭民, 冯希杰, 于贵华, 陈立春, 陈桂华, 于慎鄂, 冉勇康, 李细光, 李陈侠, 安艳芬. 2008. 汶川 $M_s8.0$ 地震地表破裂带及其发震构造[J]. *地震地质*, **30**(3): 597–629.
- Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, Ma B Q, Chen J, Zhou R J, He H L, Tian Q J, He Y L, Wang Z C, Sun Z M, Feng X J, Yu G H, Chen L C, Chen G H, Yu S E, Ran Y K, Li X G, Li C X, An Y F. 2008. The $M_s8.0$ Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure[J]. *Seismology and Geology*, **30**(3): 597–629 (in Chinese).
- 杨光亮, 申重阳, 吴桂桔, 谈洪波, 石磊, 汪健, 张品, 王嘉沛. 2015. 金川—芦山—键为剖面重力异常和地壳密度结构特征[J]. *地球物理学报*, **58**(7): 2424–2435.
- Yang G L, Shen C Y, Wu G J, Tan H B, Shi L, Wang J, Zhang P, Wang J P. 2015. Bouguer gravity anomaly and crustal density structure in Jinchuan-Lushan-Jianwei profile[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(7): 2424–2435 (in Chinese).
- 张恩会, 石磊, 李永华, 王谦身, 韩长武. 2015. 基于抛物线密度模型的频率域三维界面反演及其在川滇地区的应用[J]. *地球物理学报*, **58**(2): 556–565.
- Zhang E H, Shi L, Li Y H, Wang Q S, Han C W. 2015. 3D interface inversion of gravity data in the frequency domain using a parabolic density-depth function and the application in Sichuan-Yunnan region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(2): 556–565 (in Chinese).
- 张季生, 高锐, 曾令森, 李秋生, 管烨, 贺日政, 王海燕, 卢占武. 2009. 龙门山及邻区重、磁异常特征及与地震关系的研究[J]. *地球物理学报*, **52**(2): 572–578.
- Zhang J S, Gao R, Zeng L S, Li Q S, Guan Y, He R Z, Wang H Y, Lu Z W. 2009. Relationship between characteristics of gravity and magnetic anomalies and the earthquakes in Longmenshan range and adjacent areas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(2): 572–578 (in Chinese).
- 张新彦, 高锐, 白志明, 徐涛, 李秋生. 2017. 阿坝—遂宁宽角地震剖面重建藏东缘龙门山地区地壳速度结构[J]. *地球物理学报*, **60**(6): 2200–2212.
- Zhang X Y, Gao R, Bai Z M, Xu T, Li Q S. 2017. Crustal structure beneath the Longmenshan area in eastern Tibet: New constraints from reprocessing wide-angle seismic data of the Aba-Longmenshan-Suining profile[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **60**(6): 2200–2212 (in Chinese).
- 赵小麟, 邓起东, 陈社发. 1994. 龙门山逆断裂带中段的构造地貌学研究[J]. *地震地质*, **16**(4): 422–428.
- Zhao X L, Deng Q D, Chen S F. 1994. Tectonic geomorphology of the central segment of the Longmenshan thrust belt, western Sichuan, southwestern China[J]. *Seismology and Geology*, **16**(4): 422–428 (in Chinese).
- 朱介寿. 2008. 汶川地震的岩石圈深部结构与动力学背景[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, **35**(4): 348–356.
- Zhu J S. 2008. The Wenchuan earthquake occurrence background in deep structure and dynamics of lithosphere[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, **35**(4): 348–356 (in Chinese).
- Calcagno P, Chilès J P, Courrioux G, Guillen A. 2011. Geological modelling from field data and geological knowledge: Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **171**(1/2/3/4): 147–157.
- Gibson H, Sumption J, Fitzgerald D, Seikel R. 2013. 3D modelling of geology and gravity data: summary workflows for minerals exploration[C]//*East Asia: Geology, Exploration Technologies and Mines*. Bali, Indonesia: Australian Institute of Geoscientists: 24–26.
- Jia S X, Liu B J, Xu Z F, Liu Z, Feng S Y, Zhang J S, Lin J Y, Tian X F, Liu Q X, Guo W B. 2014. The crustal structures of the central Longmenshan along and its margins as related to the seismotectonics of the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Science China Earth Science*, **57**(4): 777–790.
- Lajaunie C, Courrioux G, Manuel L. 1997. Foliation fields and 3D cartography in geology: Principles of a method based on potential interpolation[J]. *Math Geol*, **29**(4): 571–584.
- Li Q S, Gao R, Wang H Y, Zhang J S, Lu Z W, Li P W, Guan Y, He R Z. 2009. Deep background of Wenchuan earthquake and the upper crust structure beneath the Longmen Shan and adjacent areas[J]. *Acta Geologica Sinica*, **83**(4): 733–739.
- Wang C Y, Han W B, Wu J P, Lou H, Chan W W. 2007. Crustal structure beneath the eastern margin of the Tibetan Plateau and its tectonic implications[J]. *J Geophys Res*, **112**(B7): B07307.