

杨光亮,申重阳,吴桂桔等. 2015. 金川—芦山—犍为剖面重力异常和地壳密度结构特征. 地球物理学报, 58(7):2424-2435, doi:10.6038/cjg20150719.

Yang G L, Shen C Y, Wu G J, et al. 2015. Bouguer gravity anomaly and crustal density structure in Jinchuan-Lushan-Qianwei profile. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(7):2424-2435, doi:10.6038/cjg20150719.

金川—芦山—犍为剖面重力异常和地壳密度结构特征

杨光亮^{1,2,3}, 申重阳^{1,2*}, 吴桂桔^{1,2}, 谈洪波^{1,2},
石磊⁴, 汪健^{1,2}, 张品^{1,2}, 王嘉沛^{1,2}

1 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室), 武汉 430071

2 中国地震局地壳应力研究所武汉科技创新基地, 武汉 430071

3 中国科学院计算地球动力学重点实验室, 北京 100049

4 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘要 重力剖面金川—芦山—犍为穿越芦山震区,近垂直于龙门山断裂带南段,长约 300 km,测点距平均 2.5 km,采用高精度绝对重力控制下的相对重力联测与同址 GPS 三维坐标测量,获得了沿剖面的自由空气异常和布格重力异常,并对布格重力异常进行了剩余密度相关成像和密度分层结构正反演研究.结果表明,芦山地震所在的龙门山断裂带南段存在垂直断裂走向的宽广的巨型重力梯级带,重力变化达 $252 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 以上(龙泉山以西),反映出四川盆地与松潘—甘孜地块地壳厚度陡变(约 14.5 km)性质;四川盆地与松潘—甘孜地块过渡区(龙门山断裂带与新津—成都—德阳断裂之间)存在 $(30 \sim 50) \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的剩余异常“凹陷”,可能与上地壳低密度体、山前剥蚀与松散堆积和推覆体前缘较为破碎有关;剩余密度相关成像显示地壳密度呈现分段性特征,在芦山地震位置出现高低密度变化;地壳呈现三层结构,四川盆地上、中、下地壳底界面平缓,反映其稳定阻挡作用,而松潘—甘孜块体上、中、下地壳底界面明显往盆地逐步抬升,反映出青藏高原往东的强烈挤压作用;松潘—甘孜块体往东推覆变形主要集中在上地壳范围内,推覆深度随离龙门山断裂带愈近而越浅.本文通过对密度分布及结构特征的研究,分析了芦山地震及龙门山地区地壳构造背景和当前活动性的深部动力环境特征.

关键词 芦山地震;重力剖面;布格重力异常;地壳结构;龙门山断裂带

doi:10.6038/cjg20150719

中图分类号 P312, P313

收稿日期 2015-03-20, 2015-06-03 收修定稿

Bouguer gravity anomaly and crustal density structure in Jinchuan-Lushan-Qianwei profile

YANG Guang-Liang^{1,2,3}, SHEN Chong-Yang^{1,2*}, WU Gui-Ju^{1,2}, TAN Hong-Bo^{1,2},
SHI Lei⁴, WANG Jian^{1,2}, ZHANG Pin^{1,2}, WANG Jia-Pei^{1,2}

1 Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

2 Wuhan Base of Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

3 Key Laboratory of Computational Geodynamics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract On April 20, 2013, Lushan $M_s 7.0$ earthquake occurred near the range-front fault of the southwest segment of Longmenshan fault zone (Dachuan-Shuangshi fault). The focal depth of the earthquake was 13 km, and the epicenter was only 87 km away from the Wenchuan

基金项目 中国地震局行业重大专项(201308011),国家自然科学基金(41204014)和中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2013IES010103)资助;科研院所基本科研业务费(中国地震局地震研究所所长基金)(IS201416141)资助.

作者简介 杨光亮,男,1980年生,副研究员,主要从事重力与地球动力学研究. E-mail:vforyang@gmail.com

* **通讯作者** 申重阳,男,1963年生,研究员,主要从事重力与地球动力学研究. E-mail:scy907@163.com

earthquake. There was no trace of surface rupture. The background of the deep tectonic dynamics and the difference with the Wenchuan earthquake were concerned. According to the gravity profile data of Jinchuan-Lushan-Qianwei which was across the southern segment of Longmenshan fault zone, we try to analyze the characteristics of gravity anomaly distribution, deep crustal formation and density structure along the profile, and then investigate the tectonic dynamics environment of the Lushan $M_s 7.0$ earthquake. The profile was across the Lushan earthquake, nearly perpendicular to the south section of Longmenshan fault zone, about 300 km long, and the spacing between gravity stations was 2.5 km. We obtained gravity observation value and the 3D coordinate (Longitude, latitude, altitude) by relative gravity surveying under the control of high precision absolute gravity and GNSS (global navigation satellite system), respectively. And then we got free air gravity anomaly and Bouguer gravity anomaly along the profile. Through data processing using residual density image correlation algorithm and interactive inversion interpretation, we obtained results of residual density correlation imaging and density stratification structures.

Gravity observation results showed that Bouguer gravity anomaly of the profile from northwest to southeast gradually increased. The maximum change of gravity anomaly reaches to $252 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ in west of Longquanshan, and it was consistent with the giant gravitational gradient zone displayed in regional Bouguer gravity anomaly, which was parallel with Longmenshan fault zone. The gravity anomaly showed segmental feature. It was linear in the segment of Jinchuan-Dawei-Baoxing, "depression" in the segment of Baoxing-Lushan-Ya'an-Hongya, which lies in between Yingxiu-Beichuan fault and Xinjin-Chengdu-Deyang fault. The anomaly amplitude difference between the two sides of Yingxiu-Beichuan fault and Xinjin-Chengdu-Deyang fault was up to $50 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ and $30 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, respectively. It may be correlated with the characteristics of low density body, denudation, loose accumulation or broken nappe in upper crust. Bouguer anomaly in Hongya-Leshan-Qianwei tended to be stable. It may be related to the characteristics of its crustal stability.

The crust density structure was composed of four layers, and the density of the Sichuan basin was slightly larger than that of the Garzê-Songpan block. There was a low density covering layer in upper crust, whose depth was 0~7 km, with a density from 2.40 to 2.43 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, thinner in west and thicker in east. The bottom depth of upper crust was from 6 to 20 km and there was a thin detachment layer with low density 2.62 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ in west of Yingxiu-Beichuan fault in the bottom of upper crust. The depth of middle crust was from 24 to 36 km and its density was 2.83 to 2.85 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$. The undulation of Moho was 42.5~57 km. The Moho was depressed beneath the Longmenshan fault zone, and the depth difference between its two sides reached 14.5 km and density variation was from 2.92 to 2.93 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$. There was a local material loss region near the range-front fault (the Guanxian Anxian fault), which was irregular in shape, and Lushan earthquake occurred in the edge of the region, which was transfer position of material loss.

The profile crosses the Songpan-Garzê block, Longmenshan fault zone, and the South China block. Under the control of pushing effect of Indian plate, Qinghai-Tibet Plateau pushed eastward along the Bayan Har block. Material accumulated in the eastern part of the Songpan Garzê block because of barrier of Sichuan Basin. So the high gravity gradient zone was formed. The west of Longquan mountain (110 km) was directly under control of the high gravity gradient. Material moved eastward and blocked by the Sichuan Basin of South China block, it caused density changes, which mainly occurred in the Longmen mountain fault zone and its

adjacent area (50~52 km). In the eastern part of Songpan Garzê block, the material of upper crust moved along the lower density layer, and thus formed the movement of the thrust, and the closer the upper crustal detachment layer got to Longmenshan fault zone, the shallower it was. In the lower crust, it was easier to fold and shorten, which led to the slight deformation of Moho surface. As mentioned before, the area east of Longquan mountain fault was not in the gravity gradient zone, and the crust and upper mantle were stable, and the structures were almost not affected by the deformation caused by the eastward pushing.

Keywords Lushan Earthquake; Gravity profile; Bouguer gravity anomaly; Crust structure; Longmenshan fault

1 引言

龙门山断裂带(天全至广元)长约 500 km,宽约 30~50 km(李勇和曾允孚,1994;陈运泰等,2013),处于深部构造运动复杂的重力异常梯度带上,是地壳厚度由东向西急剧加厚的陡变过渡带(马宗晋和郑大林,1981;滕吉文等,2008),亦是地壳介质波速扰动的正负异常分界线(王椿镛等,2003),物质的组成与结构十分复杂,但具有分段特征(楼海等,2010).继该带中段 2008 年 5 月 4 日发生汶川 $M_s 8.0$ 强烈地震后,2013 年 4 月 20 日在其西南段再次发生芦山 7.0 级强烈地震(北纬 $30^{\circ}19'$,东经 $102^{\circ}57'$),震中距汶川地震仅 87 km.芦山地震破裂具逆冲性质,震源深度约 13 km(刘杰等,2013),位于龙门山断裂带南段的大川—双石断裂附近(陈立春等,2013).国内外对这次地震有关问题十分关注,开展了大量研究(詹艳等,2013;Ren et al.,2013;Chen et al.,2014).该次地震孕育发生的构造动力学背景有何特点?与汶川地震有何差异?目前仍具一定争议.

近年来,在龙门山断裂带及邻近的鲜水河断裂带实施了大量的地球物理探测研究,采用多种地球物理方法获得了该区地壳上地幔结构特征.人工地震深部探测研究获得了龙门山断裂带西南段的二维和三维速度结构(王椿镛等,2002,2003;王有学等,2005;高锐等,2006;嘉世旭和张先康,2008;嘉世旭等,2014;蔡学林等,2008;张季生等,2009),结果显示莫霍界面自松潘甘孜地块向龙门山断裂带及四川盆地逐渐抬升,变化范围为 40~60 km.宽频带地震台站观测及接收函数研究(张忠杰等,2009;Bai et al.,2010)显示松潘—甘孜地块地壳厚度 58 km,四川盆地地壳厚度约 40 km.楼海和王椿镛(2005)、楼海等(2008,2010)分析了川滇及邻区视密度分布,探

讨了龙门山断裂带的向下伸展可能模式及深部环境.多条大地电磁剖面穿过龙门山断裂带,电性结构差异显示(孙洁等,2003;金胜等,2010;詹艳等,2013),测区地下介质的电性在纵向上表现为多层结构,横向以鲜水河断裂和龙门山断裂相对应的两组电性梯度带为界,具有分块特征,龙门山断裂带西南段自地表到上地幔顶部存在龙门山高阻体.Zhang等(2014)利用跨汶川震区(映秀、北川)的二条重力剖面对龙门山断裂带中段的地壳密度结构进行了研究,但龙门山断裂带南段尚缺乏精细的密度结构信息.

重力剖面探测一直得到广泛应用,其通过高精度、小间距、跨断层观测地表重力异常来反演研究地下物质密度分布特征(包括块体之间差异性、深浅构造密度差异等),并推估地壳内部地质构造展布和介质变形状态.如 Halls 和 Mound(1998)及 Nitescu 和 Halls(2002)利用剖面高精度重力与 GPS 定位数据反演获取了加拿大卡普斯卡辛构造区断裂带发育与产状情况;孟令顺等(1990)研究了新疆叶城—西藏狮泉河重力剖面的地壳莫霍面结构;王谦身等(1997)利用青藏高原西部吉隆—鲁谷剖面高程与重力异常的关系进行对比分析,得到了各地壳块体构造单元非均衡状态.本文根据跨越龙门山断裂带南段的一条长 300 km 剖面所获得的观测数据,研究沿剖面的重力异常分布特征及其所反映的地壳分层密度结构特征,探讨芦山 7.0 地震孕育发生的构造动力学环境.

2 重力剖面数据

2.1 研究区地质构造背景

芦山地震位于由龙门山、鲜水河和安宁河三大主要断裂带构成的“Y”形交汇区或川滇地块、松潘地块以及华南地块过渡区(张培震,2008)内的龙门

山断裂带南段(图 1, 陈立春等, 2013)。龙门山断裂带以逆冲推覆运动为主兼有右旋走滑(陈社发等, 1994), 鲜水河断裂带、安宁河断裂带以左旋走滑运动为主, 三大断裂带的相互作用, 导致该区大震频发, 地壳构造运动剧烈且十分复杂。龙门山逆冲推覆断裂带是青藏高原东部的松潘—甘孜地块与华南地块西北的四川盆地之间的边界, 两侧构造块体的地质构造差异运动十分明显。松潘—甘孜地块广泛分布巨厚三叠纪复理石杂岩沉积; 龙门山逆冲推覆断裂带主要分布前寒武变质岩带, 自东北向西南依次分布有彭灌杂岩、宝兴杂岩及康定杂岩三个主要杂岩带; 四川前陆盆地基底由花岗岩、流纹英安岩组成, 盆地内部为呈近水平分布的沉积岩层, 是古生代和中、新生代前陆盆地叠合的复式盆地, 盆地地层层序齐全。

从大尺度区域布格异常(据地质矿产部 1988 年编制出版的 1:400 万《中国布格重力异常图》改绘)来看(图 1), 龙门山造山带及震中区处于布格重力异常北东向线性高梯度带上, 梯级变化达 260 mGal 左右。该梯级带在芦山附近开始往南弯曲, 并在泸定附近开始往南西和南南东分为两支。汶川 8.0 地震也发生在这一北东向重力异常梯级带上, 反映出两次地震孕育构造环境的共性和局部差异。已有研究表明(楼海和王椿镛, 2005; 楼海等, 2008)龙门山断裂带两侧深浅介质视密度分布明显差异(四川盆地密度较高, 松潘—甘孜块体密度较低), 暗示深部(下地壳和地幔)与浅部(上、中地壳)物质在运移过程中解耦。

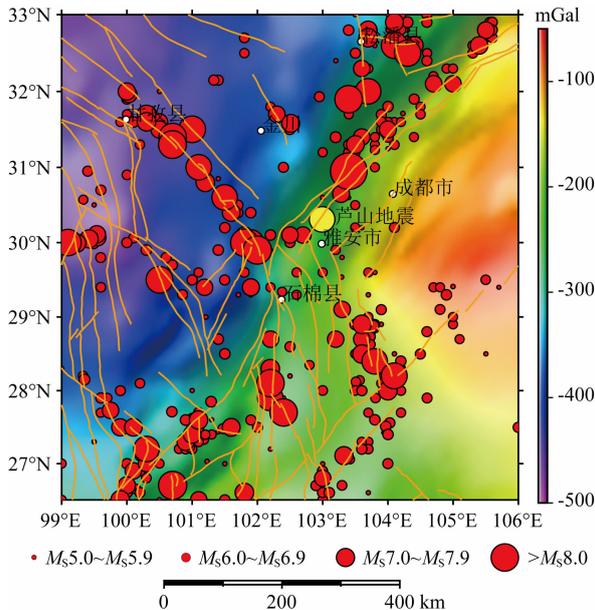


图 1 芦山震区布格异常与主要断层分布

Fig. 1 Regional Bouguer gravity anomaly and faults

2.2 数据采集

金川—芦山—犍为重力剖面测点分布如图 2 所示。该剖面自西北部的金川, 依次经过马尔康断裂末端、龙门山断裂带(汶川—茂汶断裂、映秀—北川断裂和大川—双石断裂、新津—成都—德阳断裂和龙泉山西缘断裂, 直至东南部的犍为, 总体上呈北西—南东向。该剖面地形高差起伏跨度较大, 范围为 300~5000 m, 芦山西北部毗邻青藏高原, 地形陡峭, 落差大, 构造复杂; 芦山东南部深入四川盆地, 地形平坦。测点平均点距约 2.5 km, 同址进行重力和 GPS 三维坐标观测, 相对重力联测时与附近的姑咱、郫县两个绝对重力点连测(图 2 中五角星), 共采集 127 个有效测点数据, 相对重力联测采用高精度 Scintrex CG-5 型自动重力仪, GPS 三维地理坐标观测采用 Trimble SPS882 全球导航卫星接收机。图 2 中北西向虚直线为剖面测点拟合线, 为便于后述分析, 实测点位的位置由其在虚直线上的投影点来代替, 这不会造成沿剖面走向的重力异常信号损失。

2.3 重力与 GPS 数据处理及重力异常

以 WGS84 高程坐标系统为基准, 对重力观测

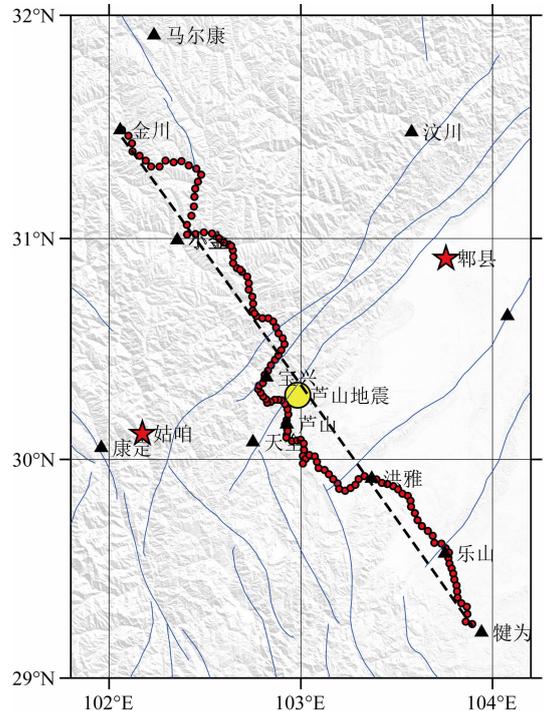


图 2 重力剖面测点分布及构造

红色圆点为重力测点, 黄色圆圈为芦山地震, 五角星为绝对重力点, 断裂信息据邓起东(2007)。

Fig. 2 Gravity stations and tectonic structures
Red dots are gravity stations, yellow circle is Lushan earthquake position, star are absolute gravity stations, tectonic structures after Deng (2007).

数据依次作漂移、潮汐等改正后,作平差处理,得到各测点重力观测值,其点值精度优于 $20 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. 再对重力观测值依次进行正常重力改正、大气改正、高度改正、地形改正、中间层改正得到重力自由空气异常、完全布格异常(图 3),自由空气异常可近似看作补偿深度为零的均衡异常(成福元等,1991),与地形高程相关性较高,因而地形改正量与自由空气异常呈反相相关,图 3 显示其相关性对应较好,只是部分区段($-40 \sim 0 \text{ km}$ 间)的自由空气异常和地形改正量相关性稍异. 在西北部地形较复杂地区,最大改正量达 $50 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;东南部地形平坦地区,地形改正量近于零. 由此可见,地形改正基本消除了地表地形的影响.

从图 3 可见,布格重力异常总体上呈渐进式线性上升,变化范围为 $(-403 \sim -151) \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,显示出芦山震区所在的龙门山断裂带南段存在巨型梯级带,该梯级带异常变化达 $252 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 以上,龙泉山以西(乐山)均处在梯级带范围. 该梯级带也呈现出分段特征,根据重力异常幅差变化可以分为三段. 第一段为金川—达维—宝兴段呈线性特征,一致性较好,该段主要断裂为马尔康断裂,该断裂仅末端与剖面相连,在布格异常图上几无明显特征;第二段为宝兴—芦山—雅安—洪雅段,即映秀—北川断裂与新津—成都—德阳断裂之间,布格异常在线性背景上明显“凹陷”,其中映秀—北川断裂两侧异常幅差达 $50 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,新津—成都—德阳断裂两侧异常幅差达 $30 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,可能与上地壳低密度层、山前剥蚀与松散沉积或推覆体前缘较为破碎等有关;第三段为洪雅—乐山—犍为,该段布格异常趋于平稳. 主要发育有龙泉山西缘断裂,在该断裂两侧布格重力异常稍有抬升,似与龙泉山褶皱发育有关.

对剖面布格重力异常去除线性趋势得到剩余重力异常(图 4),其更加突出局部重力变化信息. 从剩余重力异常中可见,夹金山至芦山之间存在明显的重力异常高,反映出推覆体物质长期累积状况;龙门山断裂带与新津—成都—德阳断裂之间存在局部异常低或“凹陷”,其可能与上地壳低密度体、山前剥蚀与松散堆积和推覆体前缘较为破碎有关;龙泉山西缘断裂附近,存在剩余布格异常局部高现象.

3 剖面密度分布模型及其分析

布格重力异常是地壳物质分布不均匀引起的,

对布格重力数据进行反演计算可获得地下密度分布模型. 不作任何先验信息约束的重力反演,如通过欧拉反褶积、维纳分解及剩余密度相关成像法(郭良辉等,2009)可探测地下空间物性分布图像,获取地壳密度分布的差异特征. 在此基础上,借助其他地质和地球物理信息依据一定的准则进行反演计算,可进一步获得可信的地壳结构分布模型. 本文先采用剩余密度的相关成像方法对剖面密度结构作初步探查,获取剩余密度分布信息;再结合该区域已有人工地震结果进行选择法重力反演,研究沿剖面的地壳密度分布特征.

3.1 剩余密度相关成像

剩余密度相关成像方法是将地下空间剖分成二维规则网格,计算每一网格结点单位剩余密度差所产生的异常与实测异常在一定窗口范围内的归一化互相关系数(或称场源发生的概率),根据网格结点上场源出现的概率勾画出界于 -1 和 $+1$ 之间的等效物性参数表示的场源分布. 剩余密度相关成像扣除了重力场的背景信息,可突出地下介质密度非均匀性. 相关系数的大小表示质量亏损和盈余的程度,零值表示既不亏损也不盈余,值越大表示盈余(正值)或亏损(负值)越大. 利用郭良辉等(2009)提供的重力多参量数据相关成像系统(GravCI3D)计算得到了基于异常分离的剖面相关成像结果(图 5).

图 5 所示的剩余密度相关成像结果清晰地展示了该剖面地下介质的分段特征和深浅构造差异. 松潘—甘孜块体、华南块体的川西前陆盆地和龙门山断裂带过渡区呈现相异的地壳物质分布特性. 松潘—甘孜块体物质偏于亏损(负值),愈往下亏损愈严重;密度扰动主要发生在上地壳(10 km 以内),在马尔康断裂处存在密度扰动,但影响范围有限;中、下地壳相关系数变化不大,整体连续性较完整. 龙门山断裂带大部分处于零值附近,中央断裂与后山断裂附近主要呈正值,在前山断裂(灌县—安县断裂)附近出现形状不规则、范围较大的局部物质亏损(负值)区,芦山地震震源区正处于该局部物质亏损区的边缘. 新津—成都—德阳断裂至龙泉山断裂以东,相关系数在各地壳深度逐步增大、完整性较好,乐山—犍为中下地壳显示大片盈余(正值)隆起区. 因此,从剩余密度相关成像可知,剖面地壳的密度扰动具有亏损、盈亏交替及盈余的横向分段(块)特征.

3.2 地壳密度分层结构

首先根据剖面地壳结构具有纵向分层、横向分块特征建立初始模型. 由上述剩余密度相关成像结

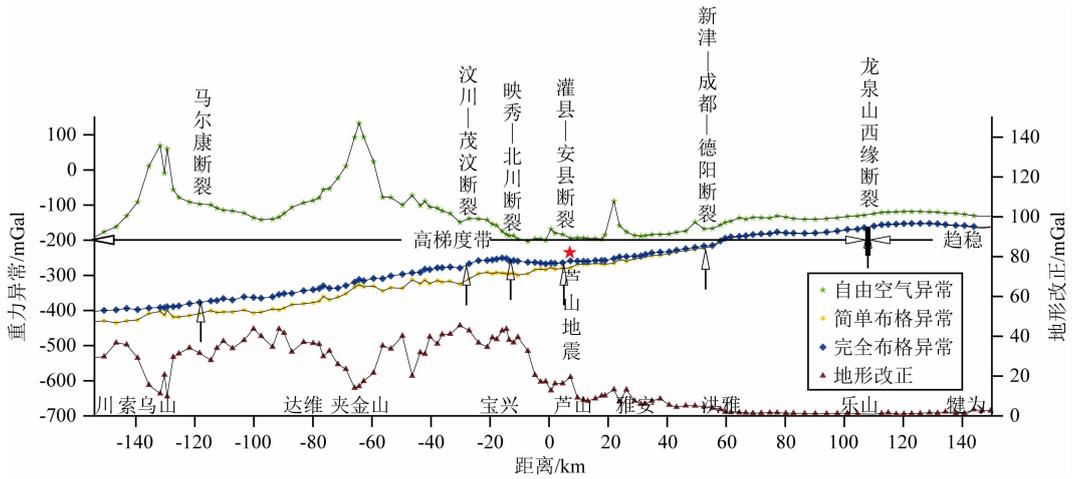


图 3 剖面重力异常、地形改正与断裂位置关系($mGal=10^{-5} m \cdot s^{-2}$)

Fig. 3 Gravity anomaly, terrain correction and fault along gravity profile($mGal=10^{-5} m \cdot s^{-2}$)

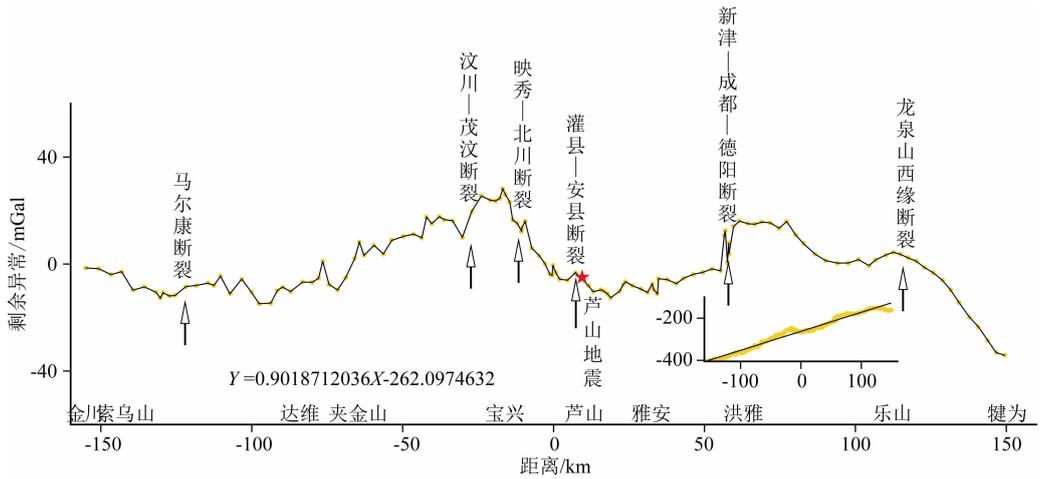


图 4 剖面剩余重力异常

Fig. 4 Residual gravity anomaly

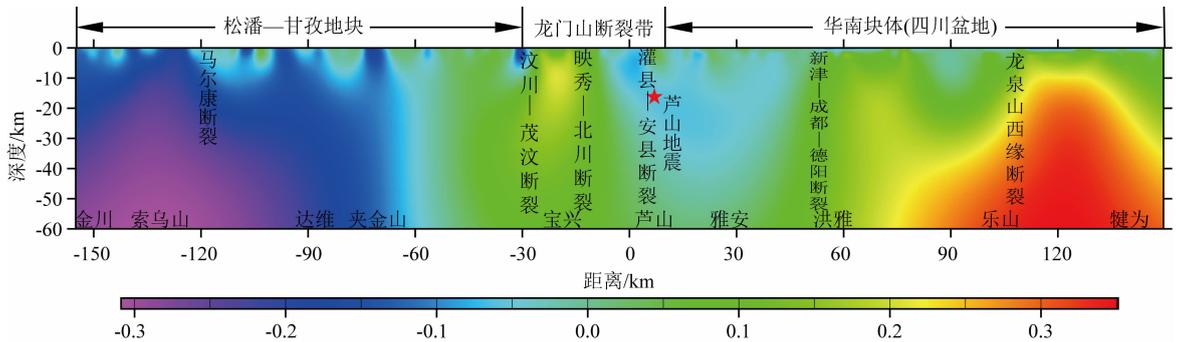


图 5 剖面布格重力异常相关成像

Fig. 5 2D correlation imaging for gravity anomaly of profile

果,可将剖面地壳密度结构在横向上分为松潘—甘孜地块、龙门山过渡带(龙门山断裂带至新津—成都—德阳断裂)、华南地块(四川盆地)三段;纵向分层可参考本区域及邻区已有的地震测深、层析成像结果.嘉世旭等(2014)通过人工地震宽角反射/折射

方法获得了龙门山中段褶皱造山带及两侧的二维非均匀地壳速度结构模型.王椿镛等(2003)在金沙江附近的竹巴龙,经理塘、雅江、康定和雅安,至岷江附近的资中开展了深地震测深研究,该剖面东段与本剖面基本重合.蔡学林等(2008)在王椿镛等

(2003)成果的基础上,对其进行了构造解析.以这些地震测深剖面速度结构成果主,结合区域其他地震层析成像结果(王椿镛等,2002),构建剖面区域地壳速度结构模型,并利用经验关系转换成密度(杨光亮等,2011),获得地壳各层密度初始模型(见表1).

表1 剖面地壳密度初始模型

Table 1 The initial model of the crust density

地层	区域		
	松潘—甘孜地块 (深度/密度)	龙门山过渡带 (深度/密度)	华南地块(四川盆地) (深度/密度)
覆盖层	0~2/2.4	0~5/2.4	0~10/2.4
上地壳	~22/2.67	~20/2.66	~21/2.67
中地壳	~35/2.82	~33/2.81	~30/2.82
下地壳	~60/2.90	~52/2.88	~44/2.90
上地幔	~/3.35		

注:深度单位为 km;密度单位为 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

利用上述成果信息,采用人机交互的选择法(Talwani,1959)进行模拟与反演.反演时亦参考了大地电磁、地质调查成果(孙洁,2003;王绪本,2008;金胜等,2010;詹艳等,2013),最终获得了图6所示的剖面密度分层结构模型(其中上图为布格重力异常实际观测值与拟合计算值).

由图6可知,剖面地壳密度分层模型总体分为四层.上、中地壳密度呈现分段性,四川盆地密度略大于松潘甘孜块体的,过渡区域所在的龙门山断裂带处密度略降低.C1为上地壳上部低密度覆盖层的底界面,深度变化范围为0~7 km,密度为 $2.40 \sim 2.43 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,在龙门山断裂带以西较薄,往东逐渐增厚,最厚处为龙门山断裂带与四川盆地的过渡地带,最深达7 km.C2为上地壳底界面,深度变化范围为6~20 km,龙门山断裂带以西上地壳底部存在一厚约2 km的低密度($2.62 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)薄层,其从金川附近20 km深往东南逐步抬升,推测为推覆构造体下部滑脱层.龙门山断裂带上地壳底面上隆至8 km左右,往东缓慢下降,到犍为约10 km.四川盆地上地壳下部密度为 $2.66 \sim 2.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.C3为中地壳底界面,深度范围为24~36 km,从西北往东南至新津—成都—德阳断裂,逐步上升,其以东则平缓变化,C3总体起伏相对C2、C4界面较平缓.中地壳密度为 $2.83 \sim 2.85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.C4为下地壳与上地幔的分界面即莫霍面,深度范围为42.5~57 km,莫霍面在龙门山断裂带附近下凹,往东远离龙门山断裂带则急剧抬升,龙门山断裂带两侧差异变化约14.5 km.下地壳密度为 $2.92 \sim 2.93 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,莫霍

面以下密度为 $3.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

总体而言,松潘—甘孜地块上地壳底界抬升剧烈、中地壳底界缓慢抬升、下地壳底界中间高两侧低——弧形隆起;过渡带的上地壳底界以山前断裂为中心局部隆起、中地壳底界逐步抬升、下地壳急剧抬升;四川盆地各地壳界面相对平缓.嘉世旭等(2014)龙门山中段地震测深结果显示,四川盆地地壳内部界面及介质速度横向均匀,地壳厚约41~43 km,松潘—甘孜块体地壳厚约53~57 km,与本文结果基本一致.由此可见,在青藏地块东向挤压作用下,龙门山推覆体的前端应力较为集中,同时中下地壳的向上隆升作用,使之成为构造变形和断裂易发部位.

4 结果和讨论

4.1 动力学背景分析

从大尺度构造动力环境来看,在印度板块向北持续推挤作用下,青藏高原不断隆升,造成高原物质向北、向东扩散,东流物质受鄂尔多斯块体和华南地块(四川盆地)刚性块体阻挡,导致了高原物质侧向流出现象、大型走滑剪切带和东缘挤压推覆构造带,其中龙门山断裂带为青藏高原东缘松潘—甘孜块体与华南地块的四川盆地分界上的推覆构造带(徐锡伟,2008;申重阳等,2009).这些构造单元在青藏高原物质东向运移作用下,形成了龙门山地区的重力高梯度带,该带直接控制了剖面上龙泉山西缘断裂(110 km处)以西的区域(图7);东向运动受到华南块体四川盆地的阻挡,引起的物质密度变化主要发生在龙门山过渡带(-50~52 km),该区域物质上部沿着上地壳滑脱层移动,滑动倾角随着靠近龙门山断裂带逐渐增大,其前端与华南块体接触部位形成陡倾角的龙门山断裂带,中部发生褶曲变形,下部因重力均衡调整向下深入地幔,引起莫霍面变形.龙泉山西缘断裂以东区域不在重力梯度带范围,显示为较稳定的地壳结构,几乎不受东向推挤引起的构造变形的影响.雅安—乐山剖面磁组构的测试结果表明(罗良等,2013)龙门山西南地区新生代并没有受到川西南褶皱带构造变形的影响,与本结果一致.

因此,松潘—甘孜块体地壳增厚是青藏高原物质东向运移、堆积隆升、地壳均衡调整及四川盆地阻挡等作用长期演化造成的,也是汶川和芦山地震重要的深部地球动力学背景;而松潘—甘孜地块与四川盆地莫霍面巨大差异的形成和发育、中下地壳底

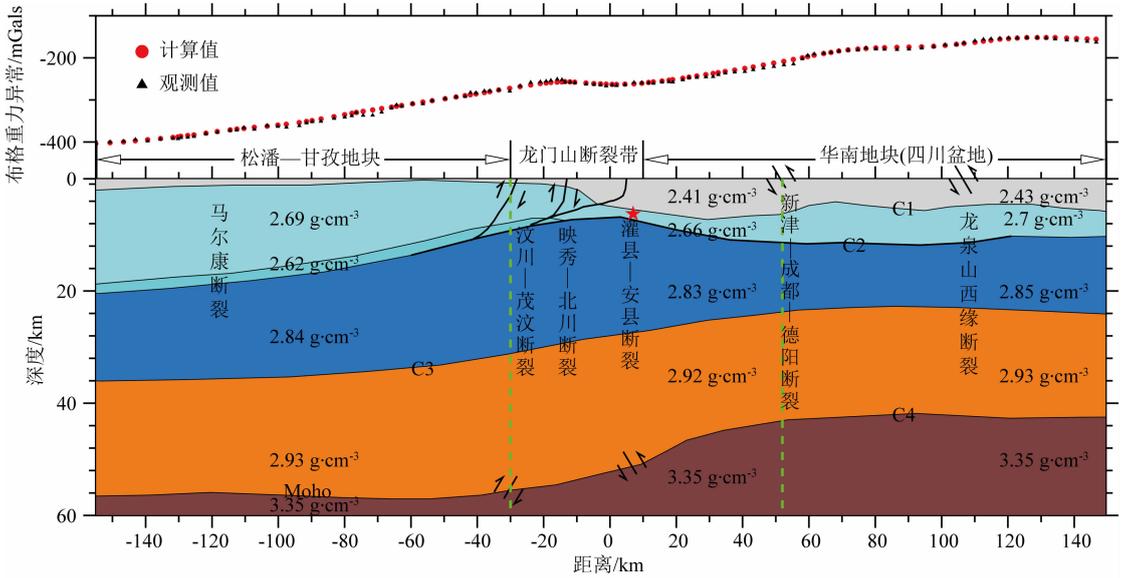


图 6 金川—芦山—犍为剖面密度分层结构

Fig. 6 Density structure of gravity profile along Jinchuan-Lushan-Jianwei

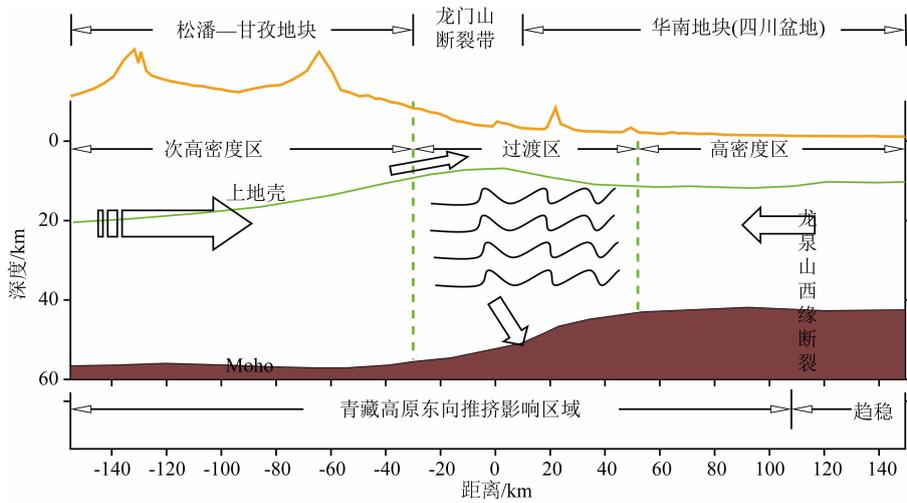


图 7 龙门山断裂带南段地壳运动模式

Fig. 7 Crustal movement pattern of South Longmenshan Fault

部阻挡后迅速抬升,是龙门山断裂带发展和芦山地震孕育形成的深部原因。

4.2 地壳密度分段特征与动力学背景关系

金川—芦山—犍为剖面布格重力异常的解译结果,基本反映了龙门山断裂带南段地壳内部构造的深浅差异特征.从布格重力异常、剩余密度相关成像和地壳分层结构图像可见,龙门山断裂带南段横向分块、纵向分层特征明显,为此,结合区域构造动力学背景,分别对松潘—甘孜地块、龙门山过渡带和四川盆地的地壳结构特征进行分析。

松潘—甘孜地块:松潘—甘孜地块位于巴颜喀拉地块的东部(张培震,2008)。剩余密度成像(图 5)和分层密度结构(图 6)显示该地块地壳密度相对四

川盆地较低、但地壳厚度明显要大,反映出地表隆升与地壳增厚可用艾利均衡模式来解释(楼海等,2010),与视密度分析结果(楼海等,2008)一致.其上地壳覆盖层剩余密度相关系数呈正负交替,说明松潘—甘孜块体向东推覆运动造成地表密度剧烈变化,暗示其长期构造演化形成的较强褶皱变形(陈社发等,1994)。上地壳底部的低密度层有利于上部推覆变形作用往盆地的推进,使松潘—甘孜块体往东推覆变形主要集中在上地壳范围内,推覆深度随离龙门山断裂带愈近而越浅,说明龙门山过渡带中、下地壳差异上隆时可能伴生往北倾斜的向上掀斜力的作用.龙门山造山带中段、北段人工地震结果显示在松潘地块上地壳底部 10 km 左右存在低密度薄层

(蔡学林等,2008;嘉世旭等,2014),表明松潘—甘孜地块上地壳底部的低密度层是广泛分布、龙门山推覆构造体非常巨大的.中地壳总体抬升,幅度较上地壳平缓,反映出四川盆地对青藏高原往东的强烈挤压的阻挡相对上地壳变弱,这可能因为中地壳较上地壳刚性变弱、塑性增强(韧性转换带)所致(Clark and Royden,2000).临近龙门山断裂带,莫霍面略有下降,可能与壳内重力均衡调整有关.该区重力均衡研究(楼海等,2010)显示为较大的正均衡异常,莫霍面下降表明该区已对重力均衡响应作了调整,但还未调整完全,推测莫霍面还有进一步向下调整的空间.

龙门山过渡带:龙门山断裂带与新津—成都—德阳断裂之间的区域,由具逆冲推覆性质的后山断裂(汶川—茂汶断裂)、中央断裂(映秀—北川断裂)、前山断裂(灌县—安县断裂)和山前隐伏断裂等多条断裂叠瓦状组成.地震测深、层析成像(王椿镛等,2003;朱介寿,2008;楼海等,2008;蔡学林等,2008;嘉世旭等,2014)均证实该区地壳特征主要为增厚、缩短、楔状变形结构.从密度分层结构可见(图5),龙门山断裂带以高角度破裂出现,其根部会合在一起.破裂集中在上地壳范围内(陈社发等,1994;张培震,2008;Bai et al,2010),表明推覆构造较浅.龙门山断裂带东部上覆低密度层由沉积速度较快所致.剩余密度相关成像结果显示,龙门山过渡带为微弱负值,表明该处密度相对整个剖面处于均值偏亏损状态.龙门山断裂带西南段的大地电磁剖面显示(詹艳等,2013)在龙门山断裂带下部存在深至莫霍面的高阻体,芦山地震发生在高低电阻率变换区域,与剩余密度相关成像的负密度异常区位置相近,也是相关系数高低值过渡位置,反映出松潘—甘孜地块与四川盆地过渡区复杂动力作用效应,剩余密度相关成像与该区域大地电磁反演图像具有相似性.

该区域莫霍面发生急剧变化,深度从57 km抬升至42.5 km,总体幅差达到14.5 km.人工地震剖面研究(张忠杰等,2009)认为莫霍面在龙门山下方存在约15 km迅速抬升,认为龙门山断裂带属于青藏高原东缘薄地幔向四川盆地下方厚地幔过渡带的转换部位,受到深达上地幔的华南块体的阻挡,除向东南方向转向外,还可能存在的垂直运动分量,使莫霍面发生快速抬升.

四川盆地:四川盆地属华南地块的一部分,密度分层结构显示各层物质基本为平行层状分布,其剩余密度相关系数基本为正,新津—成都—德阳断裂

及龙泉山断裂以东剩余密度相关系数在各地壳深度逐步增大、完整性较好,这种特性改变不了密度水平分层的基本特征,说明其对西部挤压的稳定阻挡作用.

4.3 芦山地震与汶川地震的关系

2008年汶川8.0级地震和此次芦山7.0级地震均发生在龙门山构造带上,前者发生在龙门山断裂带中段的中央断裂附近,后者发生在龙门山断裂带的南段的前山断裂附近,具备相类似的地质构造背景和地震活动背景.芦山地震和汶川地震均发生在北东向重力梯级带上,芦山地震位于梯级带往南开始拐弯部位,汶川地震位于北东走向的线性梯级带上.穿过汶川地震的重力剖面显示的密度结构(Zhang et al., 2014)横向上呈分段特征,密度略有差异;纵向上分多个密度层,密度结构与本剖面基本相似,但其莫霍面略深,反映出两次地震孕育构造环境的共性和局部差异.

5 结论

2013年4月20日在龙门山断裂带西南段的前山断裂(大川—双石)附近发生了芦山7.0级地震,国内外对该次地震孕育发生的深部构造动力学背景及其与汶川地震的差异等十分关注.本文利用横贯龙门山断裂带南段的金川—芦山—犍为重力剖面观测数据,对该区重力异常分布及其所反映的地壳深部分层密度结构特征和芦山7.0地震孕育发生的构造动力学环境等进行了研究,得到以下结论.

(1)重力观测结果显示,金川—芦山—犍为剖面布格重力异常由西北往东南逐步增大,龙泉山以西重力异常幅差达 $252 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,与区域布格重力异常展示的走向平行龙门山断裂带的巨型重力梯级带一致.剖面布格重力异常具有分段特征,金川—达维—宝兴段呈线性特征;宝兴—芦山—雅安—洪雅段,即映秀—北川断裂与新津—成都—德阳断裂之间,布格异常在线性背景上明显“凹陷”,其中映秀—北川断裂两侧异常幅差达 $50 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,新津—成都—德阳断裂两侧异常幅差达 $30 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,可能与上地壳低密度层、山前剥蚀与松散沉积或推覆体前缘较为破碎等有关;洪雅—乐山—犍为段布格异常趋于平稳,与四川盆地地壳稳定特性有关.

(2)剖面地壳密度结构分为四层,川西前陆盆地密度略大于松潘甘孜块体.上地壳上伏有一低密度覆盖层,密度为 $2.40 \sim 2.43 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,基底深度为

0~7 km,西薄东厚;上地壳下部密度为 $2.69 \sim 2.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,底界深度为 6~20 km,龙门山断裂带附近上地壳隆起,最浅处仅约 6 km,映秀—北川断裂以西上地壳底部存在一低密度($2.62 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)滑脱薄层;中地壳密度为 $2.83 \sim 2.85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,底界深度为 24~36 km,界面起伏相对其上下界面较平缓;下地壳密度为 $2.92 \sim 2.93 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,其底界莫霍面深度为 42.5~57 km,龙门山断裂带附近两侧差异变化约 14.5 km.宝兴—芦山—雅安—洪雅段是松潘块体和四川盆地的过渡区域,密度相关成像显示前山断裂(灌县—安县断裂)附近存在较大的局部物质亏损区,芦山地震震源处于此局部物质亏损区边缘部位。

(3)该剖面跨越了松潘—甘孜块体、龙门山断裂带和华南块体,在印度板块对青藏块体的推挤作用下,青藏高原物质沿巴颜喀拉块体逐步向东推挤、运移,受四川盆地的阻挡在其东部的松潘—甘孜块体不断积累,形成了龙门山地区的重力高梯度带,该带直接控制了剖面上龙泉山西缘断裂(110 km 处)以西地区.同时,四川盆地的阻挡作用引起物质密度变化主要发生在龙门山断裂带及邻区(剖面中—50~52 km 段).松潘—甘孜块体东部上地壳物质沿着下伏低密度滑脱层移动,从而形成推覆构造运动,推覆深度离龙门山断裂带愈近而越浅.中、下地壳易于发生褶曲变形、缩短,往下挠曲致使莫霍面稍有变形.龙泉山西缘断裂以东区域不属重力异常梯度带范围,上、中、下地壳底界面平缓,显示为较稳定的刚性结构。

致谢 剖面野外观测是由中国地震局“芦山 7.0 地震科学考察”任务支持下完成,感谢科考指挥部及四川地震局、雅安测绘工程院的大力支持和帮助;感谢郭良辉提供剩余密度相关成像软件.十分感谢匿名评审专家提出的修改建议和意见。

References

Bai D H, Swinburn M J, Meju M A, et al. 2010. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging. *Nature Geoscience*, 3(5): 358-362.

Cai X L, Cao J M, Zhu J S, et al. 2008. A preliminary study on the 3-D crust structure for the Longmen lithosphere and the genesis of the huge Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)* (in Chinese), 35(4): 357-365.

Chen F Y, Liu D Z, Zhang Y J. 1991. Research on the subterranean

structures in the Songzi depressed and broken zone area by gravimetric method. *Crustal Deformation and Earthquake* (in Chinese), 11(3): 22-30.

Chen L C, Ran Y K, Wang H, et al. 2013. The Lushan $M_s 7.0$ earthquake and activity of the southern segment of the Longmenshan fault zone. *Chinese Science Bulletin*, 58(28-29): 3475-3482.

Chen L C, Wang H, Ran Y K, et al. 2014. The 2013 Lushan $M_s 7.0$ earthquake: varied seismogenic structure from the 2008 Wenchuan earthquake. *Seism. Res. Lett.*, 85(1): 34-39.

Chen S F, Deng Q D, Zhao X L, et al. 1994. The evolution history and deformation mechanisms of the thrust and the tectonic belts in the middle of the Longmenshan mountains and its correlation structure. *Seismology and Geology* (in Chinese), 16(4): 404-412.

Chen Y T, Yang Z X, Zhang Y, et al. 2013. From 2008 Wenchuan earthquake to 2013 Lushan earthquake. *Science China: Earth Sciences* (in Chinese), 43(6): 1064-1072.

Clark M K, Royden L H. 2000. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. *The Journal of Geology*, 28(8): 703-706.

Deng Q D. 2007. The Map of China Activity Fault (1:4M) (in Chinese). Beijing: Earthquake Press.

Gao R, Ma Y S, Li Q S, et al. 2006. Structure of the lower crust beneath the Songpan block and West Qinling orogen and their relation as revealed by deep seismic reflection profiling. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 25(12): 1361-1367.

Guo L H, Meng X H, Shi L, et al. 2009. 3-D correlation imaging for gravity and gravity gradiometry data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(4): 1098-1106, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.027.

Halls H C, Mound J. 1998. The McEwan Lake fault: gravity evidence for a new structural element of the Kapuskasing zone. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 35(6): 696-701.

Jia S X, Zhang X K. 2008. Study on the crust phases of deep seismic sounding experiments and fine crust structures in the northeast margin of Tibetan plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 51(5): 1431-1443.

Jia S X, Liu B J, Xu Z F, et al. 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.

Jin S, Zhang L T, Wei W B, et al. 2010. Magnetotelluric method for deep detection of Chinese continent. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 84(6): 808-817.

Li Y, Zeng Y F. 1994. On the sedimentary response to thrusting of Longmenshan thrust belt in Chengdu basin. *Journal of Mineralogy and Petrology* (in Chinese), 14(1): 58-86.

Liu J, Yi G X, Zhang Z W, et al. 2013. Introduction to the Lushan, Sichuan $M_s 7.0$ earthquake on 20 April 2013. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(4): 1404-1407, doi: 10.6038/cjg20130434.

- Lou H, Wang C Y. 2005. Wavelet analysis and interpretation of gravity data in Sichuan-Yunnan region, China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 27(5): 515-523.
- Lou H, Wang C Y, Lü Z Y, et al. 2009. Deep tectonic setting of the 2008 Wenchuan $M_s8.0$ earthquake in southwestern China—Joint analysis of teleseismic P-wave receiver functions and Bouguer gravity anomalies. *Science China D: Earth Sciences*, 52(2): 166-179.
- Lou H, Wang C Y, Yao Z X, et al. 2010. Subsection feature of the deep structure and material properties of Longmenshan fault zone. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 17(5): 128-141.
- Luo L, Qi J F, Jia D, et al. 2013. Magnetic fabric investigation in Tianquan-Leshan section in front of Longmenshan fold-thrust belt and its indicative significance for the Cenozoic deformation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(2): 558-566, doi: 10.6038/cjg20130219.
- Ma Z J, Zheng D L. 1981. The Chinese-Mongolian continental mid-axis tectonic belt and its seismicity. *Journal of Seismology Research* (in Chinese), 4(4): 421-436.
- Meng L S, Jiang X R, Zhang F H, et al. 1990. The crust structure and gravity profile of Yecheng, Xinjiang-Shi Quanchen, Tibet. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 33(6): 670-677.
- Nitescu B, Halls H C. 2002. A gravity profile across southern Saganash Lake fault: implications for the origin of the Kapuskasing Structural Zone. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 39(4): 469-480.
- Ren Y F, Ji K, Wen R Z, et al. 2013. Field survey around strong motion stations and its explanation on the seismic intensity in the Lushan earthquake on April 20, 2013. *Earthquake Science*, 26(3-4): 241-250.
- Shen C Y, Li H, Sun S A, et al. 2009. Dynamic variations of gravity and the preparation process of the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(10): 2547-2557, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.013.
- Sun J, Jin G W, Bai D H, et al. 2003. The electric structure exploration and significance of crustal and upper mantle in eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Science China: D* (in Chinese), 33(S1): 173-180.
- Talwani M, Worzel J L, Landisman M. 1959. Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. *Journal of Geophysical Research*, 64(1): 49-61.
- Teng J W, Bai D H, Yang H, et al. 2008. Deep processes and dynamic responses associated with the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake of 2008. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 51(5): 1385-1402, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2008.05.012.
- Wang C Y, Mooney W D, Wang X L, et al. 2002. Study on 3-D velocity structure of crust and upper mantle in Sichuan-Yunnan region, China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 24(1): 1-16.
- Wang C Y, Wu J P, Lou H, et al. 2003. P-wave crustal velocity structure in western Sichuan and eastern Tibetan region. *Science in China D: Earth Sciences*, 46(S2): 254-265.
- Wang Q S, Wu C Z, Jiang W W. 1997. Gravity field and crustal structure of Gyirong-Lugu Region in western Xizang (Tibet) Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 42(8): 669-673.
- Wang X B, Yu N, Zhu Y T, et al. 2008. Preliminary result of magnetotelluric sounding in the Longmen thrust belt of West Sichuan, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)* (in Chinese), 35(4): 398-403.
- Wang Y X, Mooney W D, Han G H, et al. 2005. Crustal P-wave velocity structure from Altyn Tagh to Longmen mountains along the Taiwan-Altay geoscience transect. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 48(1): 98-106, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2005.01.015.
- Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. 2008. The $M_s8.0$ Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure. *Seismology and Geology* (in Chinese), 30(3): 597-629.
- Yang G L, Shen C Y, Sun S A, et al. 2011. Study on gravity anomaly of profile Riwoqe-Yushu-Maduo. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 31(5): 1-4.
- Zhan Y, Zhao G Z, Unsworth M, et al. 2013. Deep structure beneath the southwestern section of the Longmenshan fault zone and seimogenetic context of the 4.20 Lushan $M_s7.0$ earthquake. *China Science Bulletin* (in Chinese), 58(28-29): 3467-3474.
- Zhang J S, Gao R, Zeng L S, et al. 2009. Relationship between characteristics of gravity and magnetic anomalies and the earthquakes in Longmenshan range and adjacent areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(2): 572-578.
- Zhang P Z. 2008. Current tectonic deformation, strain distribution and deep dynamic process of eastern margin of Qinghai-Tibet Plateau in western Sichuan. *Science China: Earth Sciences* (in Chinese), 38(9): 1041-1056.
- Zhang Y Q, Teng J W, Wang Q S, et al. 2014. Density structure and isostatic state of the crust in the Longmenshan and adjacent areas. *Tectonophysics*, 619-620: 51-57.
- Zhang Z J, Chen Y, Tian X B. 2009. Crust-upper mantle structure on the eastern margin of Tibet Plateau and its geodynamic implications. *Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 44(4): 1136-1150.
- Zhu J S. 2008. The Wenchuan earthquake occurrence background in deep structure and dynamics of lithosphere. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)* (in Chinese), 35(4): 348-356.

附中中文参考文献

- 蔡学林, 曹家敏, 朱介寿等. 2008. 龙门山岩石圈地壳三维结构及汶川大地震成因浅析. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 35(4): 357-365.
- 成福元, 刘冬至, 张勇军. 1991. 用重力测量方法研究松滋拗折带的地下构造. *地壳形变与地震*, 11(3): 22-30.
- 陈立春, 冉勇康, 王虎等. 2013. 芦山地震与龙门山断裂带南段活

- 动性. 科学通报, 58(20): 1925-1932.
- 陈社发, 邓起东, 赵小麟等. 1994. 龙门山中段推覆构造带及相关构造的演化历史和变形机制(一). 地震地质, 16(4): 404-412.
- 陈运泰, 杨智娴, 张勇等. 2013. 从汶川地震到芦山地震. 中国科学: 地球科学, 43(6): 1064-1072.
- 高锐, 马永生, 李秋生等. 2006. 松潘地块与西秦岭造山带下地壳的性质和关系—深地震反射剖面的揭露. 地质通报, 25(12): 1361-1367.
- 邓起东. 2007. 中国活动构造图(1:400万). 北京: 地震出版社.
- 郭良辉, 孟小红, 石磊等. 2009. 重力和重力梯度数据三维相关成像. 地球物理学报, 52(4): 1098-1106, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.027.
- 嘉世旭, 张先康. 2008. 青藏高原东北缘深地震测深震相研究与地壳细结构. 地球物理学报, 51(5): 1431-1443.
- 嘉世旭, 刘保金, 徐朝繁等. 2014. 龙门山中段及两侧地壳结构与汶川地震构造. 中国科学: 地球科学, 44(3): 497-509.
- 金胜, 张乐天, 魏文博等. 2010. 中国大陆深探测的大地电磁测深研究. 地质学报, 84(6): 808-817.
- 李勇, 曾允孚. 1994. 试论龙门山逆冲推覆作用的沉积响应—以成都盆地为例. 矿物岩石, 14(1): 58-86.
- 刘杰, 易桂喜, 张致伟等. 2013. 2013年4月20日四川芦山M7.0级地震介绍. 地球物理学报, 56(4): 1404-1407, doi: 10.6038/cjg20130434.
- 楼海, 王椿镛. 2005. 川滇地区重力异常的小波分解与解释. 地震学报, 27(5): 515-523.
- 楼海, 王椿镛, 吕智勇等. 2008. 2008年汶川M_s8.0级地震的深部构造环境——远震P波接收函数和布格重力异常的联合解释. 中国科学D辑: 地球科学, 38(10): 1207-1220.
- 楼海, 王椿镛, 姚志祥等. 2010. 龙门山断裂带深部构造和物性分布的分段特征. 地学前缘, 17(5): 128-141.
- 罗良, 漆家福, 贾东等. 2013. 龙门山南段山前天全—乐山剖面磁组构研究及其对新生代构造变形的指示意义. 地球物理学报, 56(2): 558-566, doi: 10.6038/cjg20130219.
- 马宗晋, 郑大林. 1981. 中蒙大陆中轴构造带及其地震活动. 地震研究, 4(4): 421-436.
- 孟令顺, 姜喜荣, 张风华等. 1990. 新疆叶城—西藏狮泉河重力剖面与地壳结构. 地球物理学报, 33(6): 670-677.
- 申重阳, 李辉, 孙少安等. 2009. 重力场动态变化与汶川M_s8.0地震孕育过程. 地球物理学报, 52(10): 2547-2557, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.013.
- 孙洁, 晋光文, 白登海等. 2003. 青藏高原东缘地壳、上地幔电性结构探测及其构造意义. 中国科学(D辑), 33(增刊): 173-180.
- 滕吉文, 白登海, 杨辉等. 2008. 2008年汶川M_s8.0地震发生的深层过程和动力学响应. 地球物理学报, 51(5): 1385-1402, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2008.05.012.
- 王椿镛, Mooney W D, 王溪莉等. 2002. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究. 地震学报, 24(1): 1-16.
- 王椿镛, 吴建平, 楼海等. 2003. 川西藏东地区的地壳P波速度结构. 中国科学D辑, 33(增刊): 181-189.
- 王谦身, 武传真, 江为为. 1997. 青藏高原西部吉隆—鲁谷地区的重力场与地壳构造. 科学通报, 42(8): 858-862.
- 王绪本, 余年, 朱迎堂等. 2008. 龙门山逆冲构造带大地电磁测深初步成果. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(4): 398-403.
- 王有学, Mooney W D, 韩果花等. 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. 地球物理学报, 48(1): 98-106, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2005.01.015.
- 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青等. 2008. 汶川M_s8.0地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质, 30(3): 597-629.
- 杨光亮, 申重阳, 孙少安等. 2011. 类乌齐—玉树—玛多剖面重力异常研究. 大地测量与地球动力学, 31(5): 1-4.
- 詹艳, 赵国泽, Unsworth M等. 2013. 龙门山断裂带西南段4.20芦山7.0级地震区的深部结构和孕震环境. 科学通报, 58(20): 1917-1924.
- 张季生, 高锐, 曾令森等. 2009. 龙门山及邻区重、磁异常特征及与地震关系的研究. 地球物理学报, 52(2): 572-578.
- 张培震. 2008. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程. 中国科学D辑: 地球科学, 38(9): 1041-1056.
- 张忠杰, 陈赞, 田小波. 2009. 青藏高原东缘地壳上地幔结构及其动力学意义. 地质科学, 44(4): 1136-1150.
- 朱介寿. 2008. 汶川地震的岩石圈深部结构与动力学背景. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(4): 348-356.

(本文编辑 胡素芳)