

李媛, 牛安福, 刘希康, 赵静, 曹景鹏. 2015. 汶川 $M_s8.0$ 地震震前近震源区地壳形变机制探究. 地震学报, 37(6): 959–972. doi:10.11939/jass.2015.06.007.
Li Y, Niu A F, Liu X K, Zhao J, Cao J P. 2015. Crustal deformation mechanism exploration in the near-source area before Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. Acta Seismologica Sinica, 37(6): 959–972. doi:10.11939/jass.2015.06.007.

汶川 $M_s8.0$ 地震震前近震源区 地壳形变机制探究^{*}

李媛^{1,2,3)} 牛安福^{2),*} 刘希康¹⁾ 赵静²⁾ 曹景鹏^{2,3)}

1) 中国天津 300180 中国地震局第一监测中心

2) 中国北京 100045 中国地震台网中心

3) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

摘要 多种形变资料表明, 汶川地震震前越靠近震源区, 其形变特征越不明显, 且在近震源区震前呈现短期平静状态. 为研究这种小变形现象的深部动力学因素及形变机制, 本文基于成都地区 1996—2007 年 13 期重复重力观测数据, 经平差处理后进行密度的三维反演, 得到了汶川地震近震源区震前 10 年的地壳深部密度变化水平向和垂直向的时空分布特征. 结果表明: 密度变化在空间上呈有序分布, 主要集中在龙门山断裂带及其附近区域, 且深部变化幅度显著大于浅部, 表明近震源区断裂带深部活动较为显著; 从时间上来看, 密度变化速率并不均衡, 在震前 3—8 年介质密度变化剧烈, 而在震前短期变化却不明显. 根据震前形变特征和不同深度密度变化的动态演化过程, 本文认为龙门山断裂带的地壳分层运动, 导致了浅层地壳的小形变和深部显著的密度变化. 此外, 根据该断裂带及其附近地区的密度变化特征, 本文选取和改进了适合汶川地震的孕震模型, 即改进的组合-硬化模型, 将动力学过程与孕育机制结合起来, 以期对汶川地震震前近震源区的形变机制作出合理解释.

关键词 地壳形变机制 汶川 $M_s8.0$ 地震 近震源区 密度动态变化 三维反演
doi:10.11939/jass.2015.06.007 中图分类号: P315.7 文献标志码: A

Crustal deformation mechanism exploration in the near-source area before Wenchuan $M_s8.0$ earthquake

Li Yuan^{1,2,3)} Niu Anfu^{2),*} Liu Xikang¹⁾ Zhao Jing²⁾ Cao Jingpeng^{2,3)}

1) First Crust Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration,
Tianjin 300180, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

3) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

^{*} 基金项目 地震科技星火计划项目(XH15049Y)、国家自然科学基金项目(41330314)、国家科技支撑计划项目(2012BAK19B02-02)和中国地震局第一监测中心主任基金项目(FMC2015005)共同资助.

收稿日期 2015-01-02 收到初稿, 2015-08-21 决定采用修改稿.

^{*} 通讯作者 e-mail: niuanfu01@sina.com

Abstract: Various deformation data showed that the deformation characteristics of near-source area were not obvious and a short-time quiet state existed before the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. In order to study the deep dynamic factors and deformation mechanism of the phenomenon mentioned above, based on the 13-issue repeated gravity data of Chengdu area from 1996 to 2007, which have been dealt with by adjustment processing, we obtained the spatio-temporal evolution characteristics of crustal density variation in near-source area along horizontal and vertical directions ten years before the Wenchuan earthquake by 3-D inversion of crustal density. The density variation distribution is ordered in space and mainly concentrates on the Longmenshan fault zone and its vicinity. Additionally, the range of density variation in deep is more obvious than shallow, which may mean the fault activity in deep is more significant. From the view of temporal distribution, the density variation rate is uneven, that is, it is severe 3–8 years before Wenchuan earthquake and unobvious in short term before the event. Based on the deformation characteristics and the dynamic evolution process of density variation in different depth before the Wenchuan earthquake, we deduced that the layered crust movement of Longmenshan fault zone results in small deformation in shallow and obvious density variation in deep from the dynamics perspective. In addition, we selected and improved the combination-hardening model as the appropriate seismogenic model for the Wenchuan earthquake according to the density variation characteristics of Longmenshan fault zone and its adjacent areas. Finally, we combined the dynamic process with generating mechanism of earthquakes so as to reveal the deformation mechanism in near-source area before Wenchuan earthquake.

Key words: crustal deformation mechanism; Wenchuan $M_s8.0$ earthquake; near-source area; dynamic change of density; 3-D inversion

引言

2008年5月12日汶川 $M_s8.0$ 地震是我国近年来发生的灾难最为严重的地震之一,其强烈程度和破坏程度均为世界罕见.大地震的孕育与发生,是地壳运动剧烈的一种表现形式.但根据震前GPS计算结果显示,横跨整个龙门山断裂带的滑动速率小于2 mm/a,单条断裂的活动速率小于1 mm/a,其活动性并不明显(张培震等,2008;吴建平等,2009),且汶川地震前在震中及附近地区丰富的连续形变观测、GPS观测和跨断层等资料分析(沈正康等,2003;江在森等,2009;张立成等,2009;牛安福等,2012)所显示的现象与经验性理解相悖:越靠近震中位置的异常变化反而越不明显,且在震前短期无明显的形变异常现象,相对来说,震前中长期形变比震前短期形变要明显.同时,根据1976年唐山 $M_s7.8$ 、1989年洛马普列塔 $M_s7.1$ 和2004年帕克菲尔德 $M_w6.0$ 等地震震前形变前兆研究(Linde *et al.*, 1992; 薄万举,华彩虹,2001; Bilham, 2005)表明,这一现象具有一定普遍性.

震前在近震源区形变不明显但如此大的地震却发生了,像这种形变小但处于活动状态的现象令人匪夷所思.但是,鉴于地震的孕育与发生是深部物质与能量的交换和其深层动力过程的产物,而地表过程仅是深层过程在某种程度上的间接表征或影响(滕吉文等,2008),未必能真实地反映出深层过程,因此产生这种震前小形变特征也就不难理解.由于

介质密度变化是地壳形变最直观的反应, 因此我们希望探究近震源区深部地壳介质的密度是否发生显著改变, 并依此来研究龙门山断裂带及其邻区地壳密度动态变化过程, 这对于揭示和认识汶川地震的孕震过程和动力学过程具有重要意义, 乃至对大地震的预测研究工作也具有积极意义。

地震从孕育到发生是一个应力逐渐积累到突然释放的过程。在地震孕育过程中, 随着地壳构造活动的增强, 震源区应力的不断增加, 地壳内部物质发生迁移, 使得地壳内部密度和地表重力值发生变化(祝意青等, 2009), 因此震前重力场的变化在一定程度上可以反映并用来研究地震孕育期地壳形变、介质密度变化和质量迁移等。目前, 应用重力场资料对地下物质密度变化进行反演的研究已逐渐趋于成熟, 由原来采用二维反演(申重阳等, 2000, 2001, 2003)已逐渐发展到三维反演(Montesinos *et al.*, 2005; 柯小平等, 2009; 玄松柏等, 2008, 2013)。早在 20 世纪 60 年代, 龙门山断裂带附近已经开始了流动重力观测, 汶川地震发生前已进行了多期重复重力观测(李媛等, 2015)。

本文利用 1996—2007 年 13 期地表重力观测数据反演地下三维密度, 探究汶川地震近震源区震前地下物质密度的演化特征和地下构造活动。根据不同深度的密度变化特征选取合适的动力学模型和孕震机制, 进而尝试对震前的形变特征及其机制作出合理解释。

1 震前地壳密度变化反演

1.1 重力数据处理

本文选取龙门山地区重力网 1996—2007 年 13 期流动重力数据反演地壳深部物质密度。该重力网台站分布如图 1 所示。该区域主要包括龙门山断裂带中南段。对重力数据处理主要包括: ① 消除其它因素对重力的影响, 求出不规则各测点 1997—2007 年相对 1996 年累积动态变化的重力场; ② 对离散点进行网格化处理, 得到 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 网格数据; ③ 通过滤波处理, 消除测量误差和浅表质量变化所产生的短波干扰(徐云马等, 2008; 祝意青等, 2008), 得到用于反演计算的重力场数据。

影响重力变化的因素主要是高程变化、地下水及降水、测点地下介质密度变化以及地下质量迁移等(吴雪芳等, 1992)。利用测量的重力数据反演地下深部密度之前, 需扣除除介质密度变化外的其它影响因素所造成的重力变化, 即高程因素和水文因素。

相对而言, 地面升降所引起的重力效应是可以定量估算的。李媛等(2015)对四川地区 1999—2007 年的 GPS 垂直分量数据插值拟合得到了各个测点的垂向运动速率, 由此计算

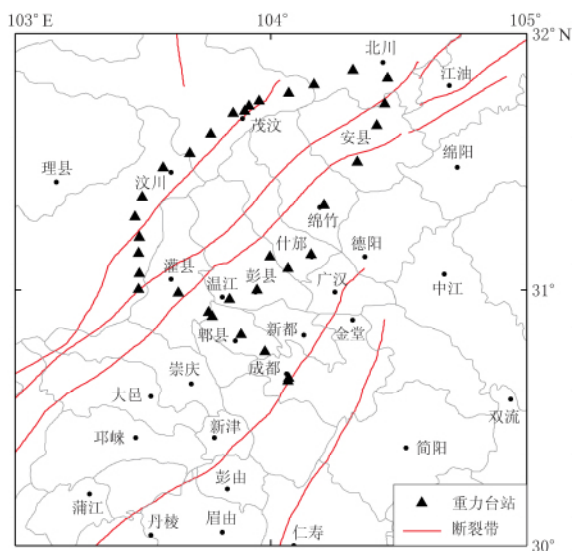


图 1 龙门山地区重力台站及断裂带分布(引自李媛等, 2015)

Fig. 1 Distribution of gravity stations and fault zones in Longmenshan area (after Li *et al.*, 2015)

出数年的高程变化. 为定量消除各点因高程变化和相应的层间质量所引起的重力效应, 需作空间校正和层间校正, 即

$$\delta g = -0.3086\Delta h + 2\pi g\rho\Delta h = -0.3086vn + 0.1119vn = -0.1967vn, \quad (1)$$

式中: Δh 为高程变化量; v 为垂直向运动速度; ρ 为地壳密度, 通常取 $\rho = 2.67 \text{ g/cm}^3$; n 为年数.

然而, 因气象数据等的缺乏, 降水和地下水变化所造成的重力效应却不宜定量估算, 所以我们只能进行一些简单分析. 为减小季节性差异, 观测时间多选在每年的 4—7 月. 经多个井水位的观察和分析表明, 水文的年变化并不大. 以安县和小金井为例(图 2a, b), 其年变趋势非常小, 尽管整体变化趋势是上升的, 但 10 年间的最大上升量也未达到 25 cm. 德阳市是四川地区少有的井水位变化比较大的地区, 因缺少前期数据, 故本文对其进行分段分析: 2002—2008 年的井水位升幅显示(图 2c), 其每年测量月份的井水位升幅(黑点所标示位置)最大也不超过 50 cm; 1996—2002 年的测量月份集中在 4 月和 5 月, 由于该时段抽水及降水量少(高东东等, 2012)等原因, 导致该时段的水位升幅非常小, 所以即使在水位变化较大的德阳地区, 测量期间的地下水变化也较小. 因此, 可以认为该地区地下水位的年变化不到 0.5 m. 何志堂等(2010)研究认为, 埋深 25 m 的测点地下水变化与其重力变化之间具有较为密切的关系, 且基本上呈线性关系. 在一定变化范围内, 地下水变化 1 m 对重力的影响估值为 $(1.4—1.5) \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$. 由此可以估算, 龙门山地区由地下水位和降水所引起的重力变化小于 $0.8 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$, 与观测到的变化量相比相差甚远.

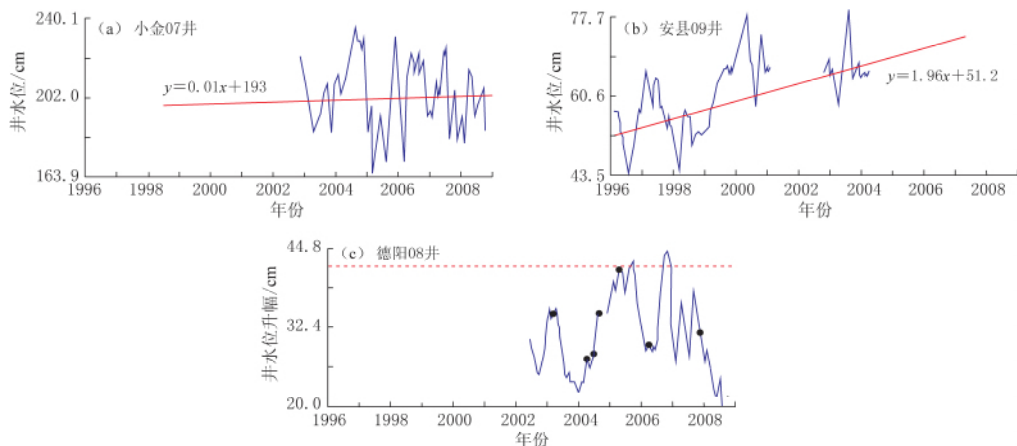


图 2 龙门山断裂带附近小金 07 井(a)、安县 09 井(b)井水位及德阳 08 井井水位升幅变化(c)

Fig. 2 The well water level in the well Xiaojin07 (a), Anxian09 (b) and the water level rise of the well Deyang08 (c) near Longmenshan fault zone

综上, 对除密度以外的其它重力影响因素的消除, 目前只能定量消除各点因高程变化和层间质量所引起的重力效应. 考虑到水文影响因素较小, 故在数据处理中暂忽略水文变化所产生的重力效应.

1.2 密度变化的重力反演

重力反演是将观察到的重力场数据映射到物理初始模型, 求解得到场源模型参数(场源密度)的过程. 其基本原理是将地下空间划分为大小固定, 空间位置已知的多层、多块网格状地块单元, 建立重力观测场与地下场源物性参数的线性函数, 通过阻尼最小二乘法求

得光滑解(李媛等, 2015).

为避免由于噪声干扰产生多余构造信息而导致模型过于复杂, 采用奥卡姆最小构造反演法(刘天佑, 2007); 为克服重力场反演的深度衰减效应, 将目标函数进行深度加权(Li, Oldenburg, 1996, 1998); 为缩小参数空间范围, 减少其多解性以及改善迭代过程中的收敛性, 对目标函数施加密度约束条件(刘天佑, 2007), 如 $m_a < m < m_b$, 其中, m_a 和 m_b 分别为密度约束的下界和上界.

针对每期重力变化, 利用上述反演方法不断调整参数, 试算地壳深部 5—65 km 深度的密度变化, 得出 2002 年相对于 1996 年的三维密度变化图像, 如图 3 所示. 为更好地反映密度变化趋势与深度的关系, 本文分析了所选区域内多个地点密度变化随深度变化的关系, 结果显示各地点密度变化趋势基本一致. 以点(31°N, 104°E)为例(图 4), 可以看出, 在一定深度范围内, 随

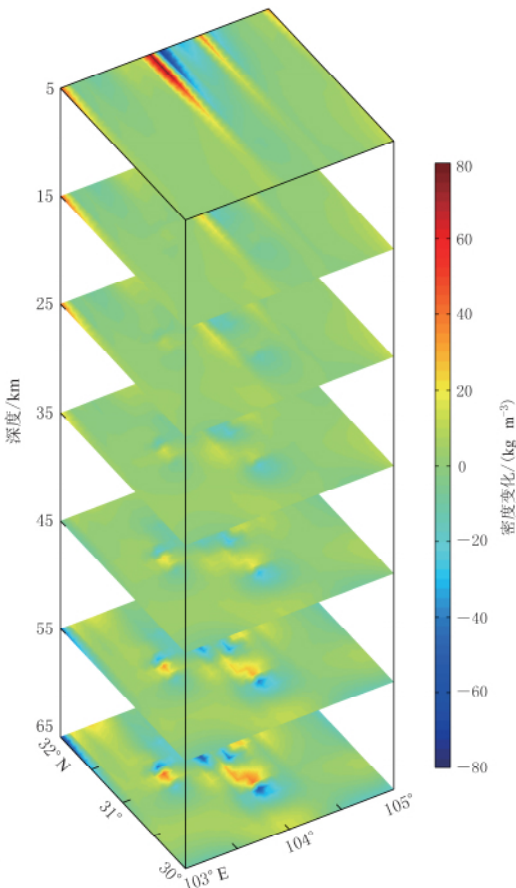


图 3 2002 年相对于 1996 年地壳物质密度变化切片

Fig. 3 Slices of density changes of crustal material in the year 2001 relative to that in 1996

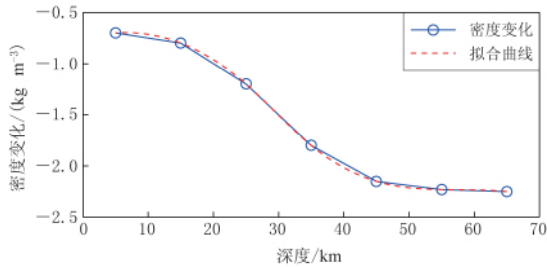


图 4 (31°N, 104°E)处密度变化随深度变化曲线

Fig. 4 The curve of density variation with depth at the point (31°N, 104°E)

着深度增加, 密度变化量增大, 在莫霍面附近(40—50 km)变化量最大. 该结果与莫霍面处物质扰动相对应, 之后密度变化幅度不再随深度变化.

1.3 密度变化结果与分析

考虑到如下两方面: ① 中国地震局汶川地震科学考察队利用川西流动宽频带地震台阵记录到的近场地震波确定 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震震源深度为(18.66±0.49) km; ② 下地壳物质迁移过程所引起的密度变化是观测到重力场变化的主要原因, 其等效压缩质源深度为 20—40 km(陈石等, 2011), 因此本文选择 15—25 km 深度的密度变化对揭示震源体变化过程更有参考意义, 由此计算出 15 km, 20 km 和 25 km 深度处的密度变化范围约为 -60—60 kg/m³.

图 5 给出了 1997—2007 年各年份相对于 1996 年地下深度分别为 25 km(左)、20 km(中)和 15 km(右)的密度累积变化切片。根据图像的变化特征,为便于分析,将时间序列大致分为 1997—1999, 1999—2002, 2002—2005 和 2005—2007 等 4 个时段。根据密度变化幅值、时间序列以及空间分布等方面,可初步得出以下分析结果:

1) 从时间序列分布来看,不同时间段内地壳介质密度的变化速率不均衡。显然,在震前中长期的密度变化较为显著,而在震前短期(1—2 年)地壳介质密度变化反而比较平静。整体来看,在汶川地震前 10 年孕育期,介质密度动态变化具有明显的阶段性特征:平稳小幅增加阶段(1997—1999 年)—剧烈波动增加阶段(1999—2002 年)—缓慢波动阶段(2002—2005 年)—平稳小幅减小阶段(2005—2007 年)。各阶段密度变化较具体动态为:① 1997—1999 年的密度变化非常小且比较平稳,以 25 km 深度变化较大的北川中部为例,3 年间密度增加幅值不到 10 kg/m^3 ,该时段应力水平还不是很高;② 1999—2002 年的密度变化比较剧烈且波动大,剧烈波动增加的阶段体现为区域密度呈正密度加速增大(1999—2000 年)—负密度加速增大(2000—2001 年)—正密度小幅增大(2001—2002 年)的波动性过程,密度变化剧烈的区域多分布在龙门山断裂带及其西侧的川西高原;③ 2002—2005 年的密度变化尽管比较缓慢,但在龙门山断裂带上的变化却很明显,由原来的正负密度变化区沿断层相间分布转为正密度变化区沿断层而负密度变化区居断层两侧分布态势,即呈现出沿断层分布的密度梯度带,且密度变化剧烈区域更加趋近于断裂带,由 2002—2005 年的密度变化可以看出,汶川—成都一带既是密度变化剧烈带,也是正负密度变化区域的分界线;④ 2005—2007 年的震前平稳变化阶段,该阶段构造活动较弱,但密度的小幅减小表明地壳岩石开始微破裂膨胀。

对映秀和北川两个极震区分析可以得出,映秀地区密度变化的时序分布为:1996—1999 年密度呈平稳变化,1999—2001 年密度迅速转为正值变化,2001—2005 年密度变化呈波动性增加,2005—2007 年密度变化很小;北川地区的密度变化整体呈现出平稳变化(1996—2000 年)—加速增大(2001—2004 年)—平稳变化(2004—2005 年)的过程。由此表明汶川地区密度变化趋势清晰地反映了汶川地震前期震源区的深部物理演化过程。

2) 从空间分布来看,整个地区的密度变化分布不均匀。显著的密度变化多分布于龙门山断裂带及其附近地区,这可以由祝意青等(2009)和张季生等(2009)的研究结果来解释,即龙门山断裂带附近,布格重力异常图和地壳等厚度图上均表现为梯度陡变带。此外,密度场变化在空间整体分布上由比较散乱的正负分布状态逐渐趋于有序和相对集中。密度聚集区主要集中在北川、茂县、汶川—映秀和绵竹地区,分布于龙门山断裂带及其附近地区,反映了大震前区域构造活动增强和局部应力集中现象。与大震前的其它形变特征一样,汶川地震前的密度场也具有场熵值减小(吴翼麟等,1993)的现象,表明龙门山断裂带及其附近区域是物质迁移和构造变形差异运动强烈的地带。

3) 从纵向分布来看,密度变化趋势在深度上基本是一致的,并且在一定深度范围内,密度变化幅值随深度增加而增大,表明地壳深部活动比浅部强。重点是,汶川地震震前短期的地壳密度变化呈现平静期,断层活动较小,而且在浅部的构造活动比较弱,这就不难解释“汶川地震震前短期观测到的形变异常不明显”这一现象。因此,汶川地震的孕育与发生应该从深部去研究。

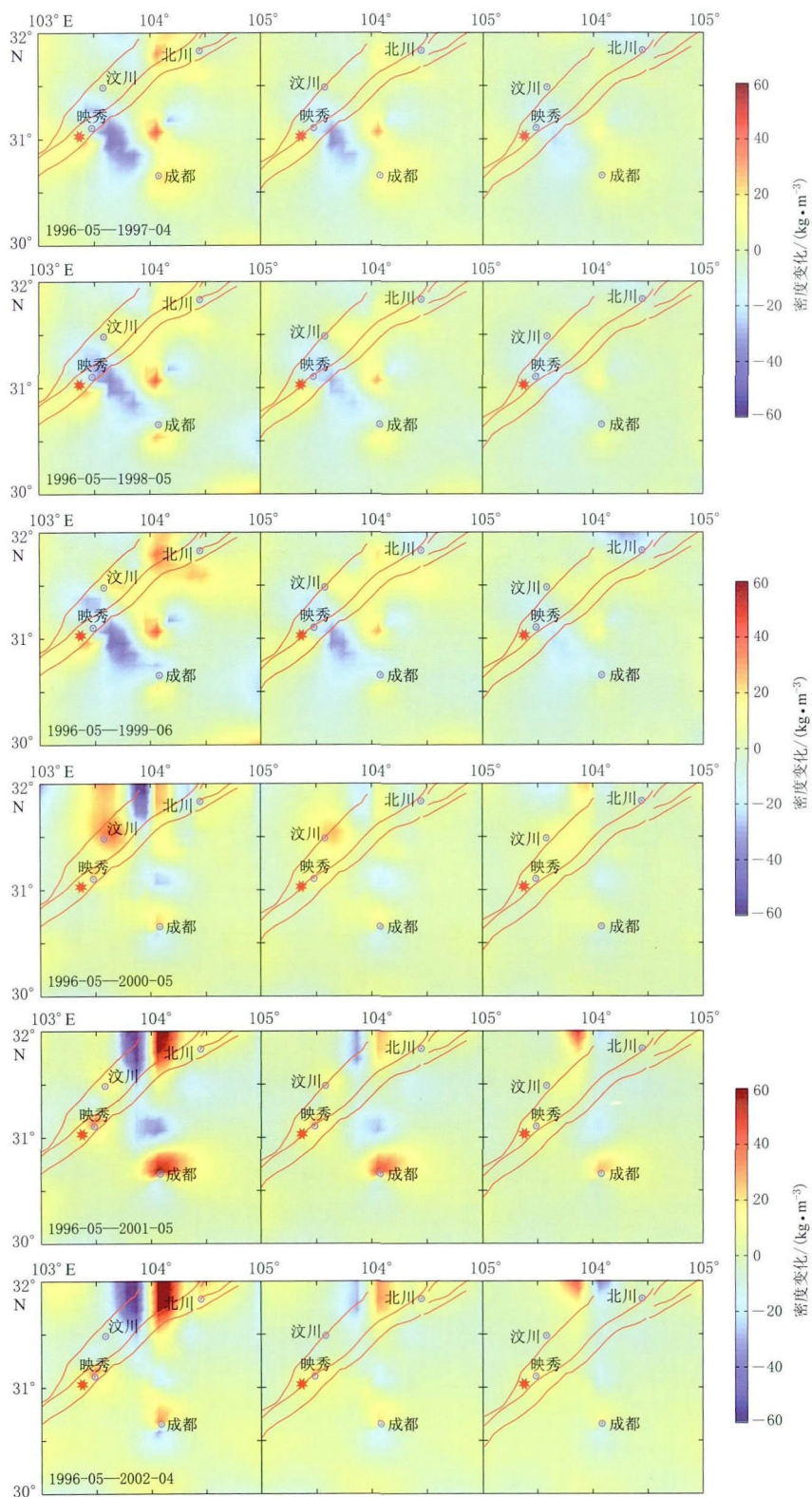


图 5 1997—2007 年相对于 1996 年的地下深度 25 km (左)、20 km (中) 和 15 km (右) 的密度变化图象(星号表示汶川地震震中)(I)

Fig. 5 The density variation of the layers at the depth 25 km (left), 20 km (middle) and 15 km (right) in the period of 1997—2007 relative to the year 1996 (asterisk represents the epicenter of Wenchuan earthquake)

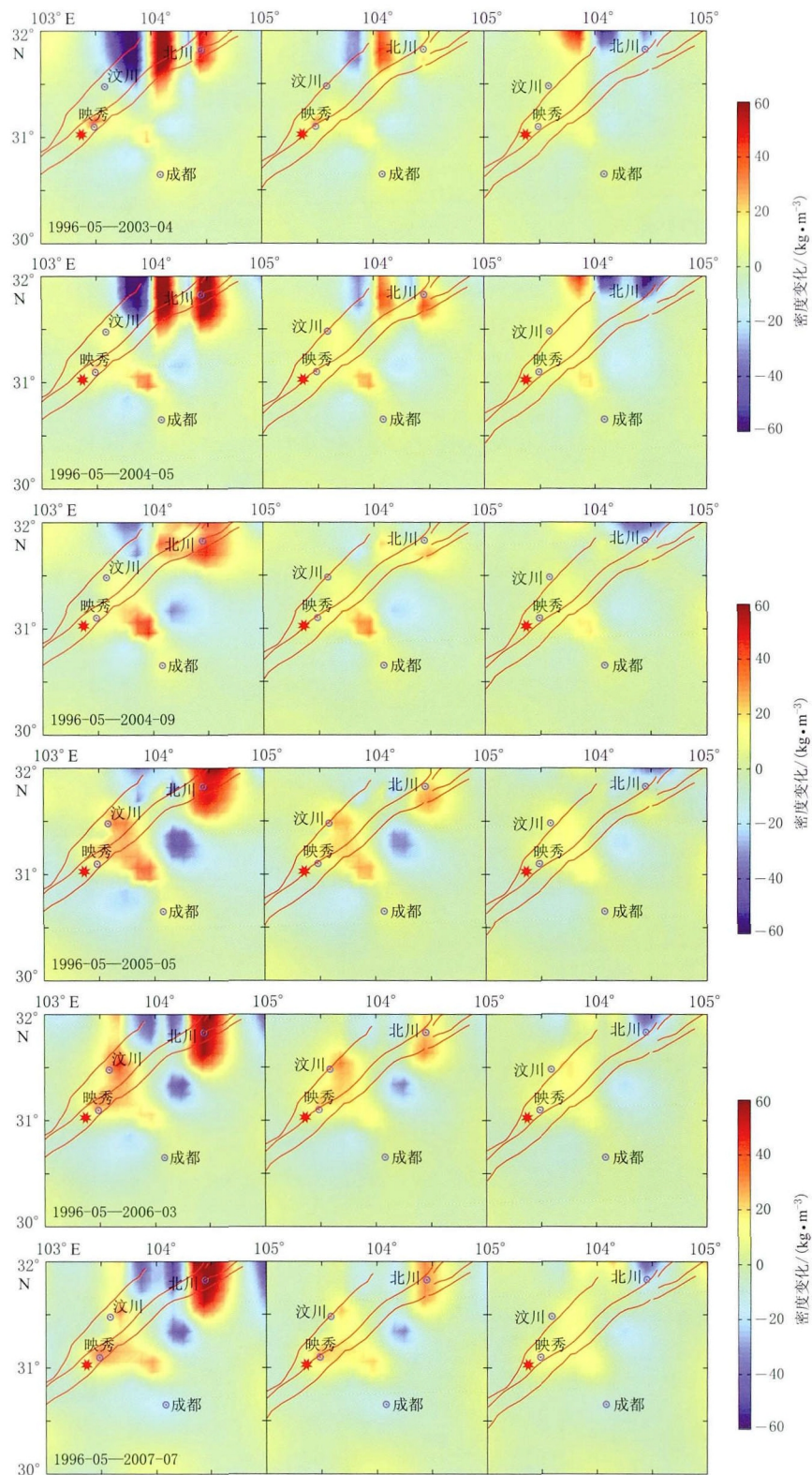


图5 1997—2007年相对于1996年的地下深度25 km (左)、20 km (中)和15 km (右)的密度变化图象(星号表示汶川地震震中)(Ⅱ)

Fig. 5 The density variation of the layers at the depth 25 km (left), 20 km (middle) and 15 km (right) in the period of 1997—2007 relative to the year 1996 (asterisk represents the epicenter of Wenchuan earthquake)

2 震前形变机制探讨

地壳密度场的时空动态变化能够较直观地反映深部物质运移和地壳构造活动信息,与地震的形成和发展有着内在联系. 研究地壳密度场的时空演化特征可为进一步探讨现今地壳构造与强震孕育、发生的相互关系提供一定依据. 从上述反演结果及分析中我们认识到,关于震前形变研究不能仅限于地壳浅部现象,而更应该关注其深部的形变活动机制. 地壳物质密度变化与形变的关系为形变机制和孕震动力学研究提供了一种特殊的研究途径,即根据震前地壳物质密度动态演化过程来选取最适合汶川地震孕育的动力学过程和孕震模型,进而对该地震震前的形变机制作出一定解释. 对汶川地震震前形变机制较全面的认识应该从多个角度出发,本文从大时间尺度的孕震动力学与小时间尺度的孕震机制两方面结合进行研究.

2.1 汶川地震孕震动力学过程对震前形变机制的解释

应力和物质在震源体附近逐渐积累,达到一定程度后,深部震源体岩石开始破裂并沿断裂带由深入浅破裂. 根据滕吉文等(2008)的汶川强烈地震的形成模型,并结合地壳物质密度的时空分布特征(图 5),得到了汶川地震孕震过程中的物质运移情况,如图 6 所示. 根据汶川地震近震源区地壳介质密度的垂向变化及空间分布特征显示:在地壳浅层(0—15 km),物质迁移活动较弱,地壳深部的构造活动明显强于浅部;龙门山断裂带附近物质迁移较强;川西高原密度变化较大. 以上特点均在图 6 所示的物质运移模型中得到印证. 据此认为,能够合理解释汶川地震震前的浅层小形变特征和深部密度变化较显著特征的动力学过程,可能是由于上地壳和下地壳不处于统一的匹配力源体系上(陈祖安等, 2009). 上、下地壳运动不一致导致各深度地壳分层运动显著.

根据图 6 对汶川地震的孕震动力学

过程可解释为:在印度板块向四川地块挤压的大环境下,深部物质向东南向流动,上地壳地块与低速层(地下 10—15 km 处)发生拆离,上地壳物质缓慢向四川地块运移,因在地下 0—10 km 深度龙门山地块为高速体(高密度、高波速的冷物质),不易变形,在遇到坚硬四川地块的阻挡以及上部物质的重力作用下,与四川地块形成僵持对峙格局,故地表浅层物质并未能产生大规模横向运动. 而深部中下地壳和上地幔盖层物质在大环境的“逼迫”下,以低速层和上地幔软流层为物质运移通道和上下边界(滕吉文等, 2008),向四川地块前进. 当龙门山地块(30—65 km 为低速层)遇到坚硬的四川地块阻挡后转为向上逆冲,产生推覆剪切作用,造成龙门山断裂带上部震源附近物质逐渐积累,应力也不断积累,到一定程度后,震源附近岩石开始微破裂、膨胀,直到最后完全破裂. 1996—2005 年密度变化呈

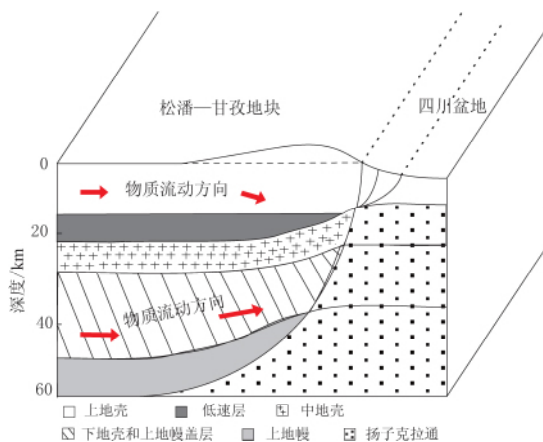


图 6 汶川地震形成和深部物质运移模型(改编自滕吉文等, 2008)

Fig. 6 The model for the generation of Wenchuan earthquake and migration of deep material (revised by Teng *et al.*, 2008)

波动性增加的特征表明该时段物质是不断积累的,并且龙门山断裂带及其附近地区因上部物质的重力作用,深部地壳介质密度变化较浅部大.2005—2007年密度的小幅度下降表明岩石已经产生微破裂,发生膨胀导致密度下降.由此可以看出,该模型所揭示的上、下地壳的运动过程与本文反演所得到的结果相符合.

由上述分析可以得出,汶川大地震震前短期的平静现象和近震源区浅部的小形变现象是特定的深部构造活动和多元的深层过程所造成的.尽管可以用上述模型大体解释汶川地震孕震动力学过程,但对其局部密度变化的解释还不尽完善,需要进一步修正和探索.另外,关于汶川地震临震前岩石破裂的发生机制仍需进行探讨,以完善本文对反演结果时间序列特征的解释.

2.2 汶川地震孕震模式对震前形变机制的解释

有关岩石力学实验表明(朱志澄,1999),在力的作用下,岩石经历弹性形变—塑性形变—塑性硬化—破裂等变形阶段.硬化阶段特征为,随着应变速率增加,介质强度先迅速增强,达到一定程度后,介质强度不再增加,直至破裂.强震前大范围构造活动加剧及震中区介质硬化过程的共同作用,形成了场兆、源兆及长、中、短、临阶段各不相同的前兆特征.根据近年来几次 $M \geq 6.0$ 地震的形变前兆分析认为,震前中长期形变较显著而短期震中区形变不明显的现象正是上述作用的结果.因此,车兆宏和范燕(1999)在组合孕震模式(郭增建,秦保燕,1991)的基础上提出了组合-硬化孕震模式.根据汶川地震震前的形变场、重力场(祝意青等,2008;申重阳等,2009)及密度场的动态变化特点,认为汶川地震震前10年的孕育过程与组合-硬化模型在一定程度上比较吻合.根据地壳物质密度变化的动态演化特点,本文对组合-硬化模式在时间进程和阶段划分上作了适当调整,认为汶川地震的孕震过程可分为以下5个阶段:

1) 孕震初期阶段.在受力情况下,地下介质在较大范围内(该范围直径可以大到震源体直径的几倍至十几倍)出现地壳及断层运动加剧的动力学过程,产生背景性异常,这一阶段大致出现在震前5—8年甚至更长一段时间(车兆宏,范燕,1999),此阶段也为形变和重力等加速变化时段.同时,该时段的地壳介质密度变化也处于剧烈波动阶段.

2) 震前中长期阶段.在应力场作用下,应力集中在近震源区.随之,介质出现硬化现象,近震源区地下介质运动相对平静.与此相反,其周边地区运动继续加剧,造成外围地区形变前兆增多.该阶段大致为震前2—5年.2002—2005年的反演结果表明,该时段的密度变化幅度逐渐减小,空间分布逐渐趋于集中,且该地区水准、GPS以及重力资料(中国地震局监测预报司,2009)均显示该时段特点为远场形变比近场形变变化显著得多,且近场形变较为平静,尤其是越靠近断裂带变化越不明显.上述结果与该阶段地下介质运移状态相吻合.

3) 震前短期平静期阶段.在应力场继续作用下,震源体进一步硬化,但硬化速率有所减缓,此时应变积累至较高水平,内部刚度增大.高应变积累区可能引起介质弹性模量的增加,有利于更高水平的应变积累.当积累到一定程度时,应力增量所引起的形变变化量可能很小.此时的地块越来越难以发生变化,各种“动态变化”几乎都处于僵持静止状态,至此震前平静期产生,出现进入短期平静阶段的迹象.这一阶段大致在震前1—2年.该时段无论是重力还是形变,甚至密度变化都处于平静状态.

4) 应力持续集中阶段.介质硬化进入后期阶段,随着震源区应力的增大,介质强度不

再随应变的继续增加而显著增加。当应力超出介质破裂强度时,在硬化体周围将出现微破裂现象(车兆宏,范燕,1999),此时穿过硬化体的断层出现预位移。本文前面所述“地壳介质密度变化在震前短期处于小幅减小阶段”以及“空间分布上更加集中于龙门山断裂带”正揭示了微破裂膨胀的产生。

5) 微破裂继续发展阶段。断层预位移不断扩张,最终引发震源区介质的破裂,发生强烈地震。这一阶段出现在震前几个月,即为发震的短期阶段。

根据本文总结的汶川地震震前形变、重力和地下密度的变化特征可以看出,汶川地震基本符合上述的组合-硬化孕震模式,同时震前各阶段密度变化特征与各孕震阶段特征的吻合也验证了该模式的合理性。

3 讨论与结论

汶川地震震前形变场所呈现的场兆、源兆及长、中、短、临各阶段不同的前兆演化特征,对强震的预测等方面具有重要的研究意义,尤其在震前形变机制研究方面。

地震的孕育与发生并不仅仅是地壳浅层作用所能决定的,因此要探究汶川地震震前形变机制需要对深部过程进行揭示,而介质密度变化则是介质形变最直观的反应,因此本文对密度进行三维反演,得出了不同深度密度变化的时空分布特征。结果显示:在空间分布上,该区域介质密度变化呈现有序和相对集中态势,主要集中在龙门山断裂带及其附近地区,正是深部物质向断裂带附近积累的体现;在时间序列上,密度变化速率并不均衡,在震前 3—8 年,介质密度变化波动剧烈,而在震前短期变化却很不明显,物质密度的变化趋势清晰地反映了汶川地震前期震源区的深部物理演化过程;在深度分布上,深部变化幅度明显大于浅部,表明近震源区断裂带深部物质活动强于浅部。

根据震前形变特征及震前密度场的时空变化特征等,本文选取比较符合汶川地震孕育过程的地壳分层运动动力学过程,并选取改进的组合-硬化孕震模型,最后将两者结合,对汶川地震近震源区震前 10 年的形变现象,即“越靠近震中位置异常变化反而越不明显,且在震前短期无明显形变异常”作出解释,具体为:

1) 龙门山地块上地壳与地壳低速层之间的“解耦”,以及该地块浅层 0—10 km 深度范围内为高速体,造就了汶川地震震前浅部形变不显著。龙门山地块高速体不易发生变形,上地壳与低速层发生拆离,上地壳物质缓慢向四川地块运移,在遇到坚硬四川地块的阻挡以及上部物质的重力作用下,与四川地块形成僵持对峙格局,因此地表浅层物质并未能产生大规模横向运动。

2) 汶川地震前 10 年为上述地震孕育的第 2, 3, 4 阶段。首先,由于深部物质遇到坚硬四川地块的阻挡后,不断沿龙门山地块与四川地块交接处向上迁移,造成龙门山断裂带上部震源附近物质逐渐积累,应力在震源附近亦不断积累,震源区地块不断硬化。因此与远震源区相比,近震源区密度变化表现相对平静。其次,随着应力作用的持续,远震源区运动继续加剧,在应力场继续作用下,震源体进一步硬化,但其膨胀硬化幅度减缓,内部刚度增大,震源介质弹性模量增加,近震源区越来越难以发生形变,达到震前平静期。最后,应力不断在震源区附近积累,达到一定程度后震源区附近岩石开始微破裂、膨胀,深部物质密度略微减小。由于破裂是由深到浅的,此阶段破裂未能达到浅部,因此震前 1—3 年浅部的形变依然不明显。

总之,地壳的分层运动过程以及改进的组合-硬化模式所揭示的形变机制在一定程度上既解释了大范围形变场在孕震期间的演化过程,又解释了震源区震前相对平静的特点;既反映了远场和近场的动力学过程,又反映了震源区介质密度变化的过程.总体来说,该孕震模式对“近震源区震前短期无明显异常形变”以及“震前平静期的存在”作出了合理的解释,解决了我们所提出的“为什么震前短期在近震源区反而看不到显著形变异常”的问题.

汶川地震震前的形变特征具有一定的普遍性,因此对该地震震前形变特征及其机制的探索研究对地震预报等具有重要意义,为研究龙门山地区深部地壳活动及形变机制提供了一种可行方法.但仍存在一些问题,例如:由于反演问题的非唯一性和不稳定性等原因,造成所得出的结果未必非常贴近实际情况;由于地下环境的复杂性,对震前形变机制的解释仍然不尽完善.这些问题有待进行更深入的探索和研究.

中国地震局地震研究所申重阳研究员提供了丰富的重力资料,玄松柏助理研究员对反演程序方面给予了指导,审稿专家对本文提出了宝贵意见,在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- 薄万举,华彩虹. 2001. 地形变强震前兆指标探讨[J]. 地震, 21(1): 25–32.
- Bo W J, Hua C H. 2001. Exploration of the index of crustal deformation precursor of strong earthquakes[J]. *Earthquake*, 21(1): 25–32 (in Chinese).
- 车兆宏,范燕. 1999. 华北强震地形变及重力前兆特征与孕震机理[J]. 中国地震, 15(1): 46–53.
- Che Z H, Fan Y. 1999. Precursory characters and earthquake preparation mechanism of ground deformation and gravity before strong earthquake in North China[J]. *Earthquake Research in China*, 15(1): 46–53 (in Chinese).
- 陈石,王谦身,祝意青,蒋长胜,卢红艳,王武星. 2011. 汶川 $M_s8.0$ 震前区域重力场变化与震质中研究[J]. 地球物理学进展, 26(4): 1147–1156.
- Chen S, Wang Q S, Zhu Y Q, Jiang C S, Lu H Y, Wang W X. 2011. Regional gravity variation before Wenchuan $M_s8.0$ earthquake and epicentroid research[J]. *Progress in Geophysics*, 26(4): 1147–1156 (in Chinese).
- 陈祖安,林邦慧,白武明,程旭,王运生. 2009. 2008 年汶川 8.0 级地震孕震机理研究[J]. 地球物理学报, 52(2): 408–417.
- Chen Z A, Lin B H, Bai W M, Chen X, Wang Y S. 2009. The mechanism of generation of May 12, 2008 $M_s8.0$ Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(2): 408–417 (in Chinese).
- 高东东,吴勇,姜丽丽,古广华. 2012. 德阳市城区地下水动态特征及成因分析[J]. 四川地质学报, 32(1): 74–79.
- Gao D D, Wu Y, Jiang L L, Gu G H. 2012. Groundwater regime in the Deyang urban and its genesis[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 32(1): 74–79 (in Chinese).
- 郭增建,秦保燕. 1991. 地震成因和地震预报[M]. 北京:地震出版社: 46–106.
- Guo Z J, Qin B Y. 1991. *The Seismogenesis and Prediction of Earthquake*[M]. Beijing: Seismological Press: 46–106 (in Chinese).
- 何志堂,闫会杰,雷鹏,唐志明,康胜军. 2010. 地下水变化对大地原点重力影响的估算[J]. 测绘标准化, 26(3): 10–12.
- He Z T, Yan H J, Lei P, Tang Z M, Kang S J. 2010. The calculation about the influence of underwater on the geodetic origin gravity[J]. *Standardization of Surveying and Mapping*, 26(3): 10–12 (in Chinese).
- 江在森,方颖,武艳强,王敏,杜方,平建军. 2009. 汶川 8.0 级地震前区域地壳运动与变形动态过程[J]. 地球物理学报, 52(2): 505–518.
- Jiang Z S, Fang Y, Wu Y Q, Wang M, Du F, Ping J J. 2009. The dynamic process of regional crustal movement and deformation before Wenchuan $M_s8.0$ earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(2): 505–518 (in Chinese).
- 柯小平,王勇,许厚泽. 2009. 三维密度分布的遗传算法反演[J]. 大地测量与地球动力学, 29(1): 41–45.

- Ke X P, Wang Y, Xu H Z. 2009. 3D density inversion with genetic algorithm[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **29**(1): 41–45 (in Chinese).
- 李媛, 牛安福, 赵静, 刘希康. 2015. 汶川地震前龙门山区域地壳密度动态变化分析[J]. *地震*, **35**(1): 77–90.
- Li Y, Niu A F, Zhao J, Liu X K. 2015. Dynamic variations of crustal density in the Longmenshan area before the 2008 Wenchuan 8.0 earthquake[J]. *Earthquake*, **35**(1): 77–90 (in Chinese).
- 刘天佑. 2007. 位场勘探数据处理新方法[M]. 北京: 科学出版社: 100–102.
- Liu T Y. 2007. *New Data Processing Methods for Potential Field Exploration*[M]. Beijing: Science Press: 100–102 (in Chinese).
- 牛安福, 张凌空, 闫伟, 吉平. 2012. 汶川地震近震源区地形变短期前兆现象的解析[J]. *地震*, **32**(2): 52–63.
- Niu A F, Zhang L K, Yan W, Ji P. 2012. On the short-term precursory phenomena of ground deformation associated with the 2008 $M_s8.0$ Wenchuan earthquake[J]. *Earthquake*, **32**(2): 52–63 (in Chinese).
- 申重阳, 朱思林, 甘家思, 徐菊生, 刘序俨, 林继华, 王志鹏, 郭逢英. 2000. 福建中部和东南沿海地壳内部密度变化分布特征的研究[J]. *地壳形变与地震*, **20**(2): 50–55.
- Shen C Y, Zhu S L, Gan J S, Xu J S, Liu X Y, Lin J H, Wang Z P, Guo F Y. 2000. Study on distribution characteristics of crustal density change in middle and southeastern coast of Fujian[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, **20**(2): 50–55 (in Chinese).
- 申重阳, 吴云, 甘家思. 2001. 从地壳运动角度分析大陆强震机理的一种物理方法[J]. *中国地震*, **17**(1): 70–81.
- Shen C Y, Wu Y, Gan J S. 2001. A physical method of analyzing the continental strong earthquake mechanism from crustal movement[J]. *Earthquake Research in China*, **17**(1): 70–81 (in Chinese).
- 申重阳, 吴云, 秦小军, 孙少安. 2003. 华北地区地壳密度变化特征的初步研究[J]. *大地测量与地球动力学*, **23**(1): 29–34.
- Shen C Y, Wu Y, Qin X J, Sun S A. 2003. Characteristics of crustal density change in North China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **23**(1): 29–34 (in Chinese).
- 申重阳, 李辉, 孙少安, 刘少明, 玄松柏, 谈洪波. 2009. 重力场动态变化与汶川 $M_s8.0$ 地震孕育过程[J]. *地球物理学报*, **52**(10): 2547–2557.
- Shen C Y, Li H, Sun S A, Liu S M, Xuan S B, Tan H B. 2009. Dynamic variations of gravity and the preparation process of the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(10): 2547–2557 (in Chinese).
- 沈正康, 王敏, 甘卫军, 张祖胜. 2003. 中国大陆现今构造应变率场及其动力学成因研究[J]. *地学前缘*, **10**(特刊): 93–100.
- Shen Z K, Wang M, Gan W J, Zhang Z S. 2003. Contemporary tectonic strain rate field of Chinese continent and its geodynamic implications[J]. *Earth Science Frontiers*, **10**(Suppl): 93–100 (in Chinese).
- 滕吉文, 白登海, 杨辉, 闫雅芳, 张洪双, 张永谦, 阮小敏. 2008. 2008 年汶川 $M_s8.0$ 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).
- 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).
- 吴雪芳, 田世华, 吴国华. 1992. 重力变化与地壳形变、地下水关系的研究[J]. *地震学报*, **14**(增刊): 653–660.
- Wu X F, Tian S H, Wu G H. 1992. The relationships between gravity variation and crustal deformation and groundwater research[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **14**(Suppl): 653–660 (in Chinese).
- 吴翼麟, 牛安福, 李爱萍. 1993. 孕震区形变异常临近地震时的有序度研究[J]. *地壳形变与地震*, **13**(3): 7–13.
- Wu Y L, Niu A F, Li A P. 1993. Researches on ordering of crustal deformation anomalies prior earthquake in its prepa-

- ration region[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, **13**(3): 7–13 (in Chinese).
- 徐云马, 祝意青, 程宏宾. 2008. 1998—2004 年滇西地区重力场演化与 $M_s \geq 6.0$ 地震[J]. 大地测量与地球动力学, **28**(2): 51–55.
- Xu Y M, Zhu Y Q, Cheng H B. 2008. Relations between changes of gravity field and $M_s \geq 6.0$ earthquakes in western Yunnan during 1998–2004[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **28**(2): 51–55 (in Chinese).
- 玄松柏, 申重阳, 孙少安, 刘杰, 李辉, 刘少明. 2008. 地下密度变化三维反演的遗传算法研究[J]. 大地测量与地球动力学, **28**(1): 36–40.
- Xuan S B, Shen C Y, Sun S A, Liu J, Li H, Liu S M. 2008. On genetic algorithm for 3D inversion of underground density changes[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **28**(1): 36–40 (in Chinese).
- 玄松柏, 谈洪波, 冯建林, 申重阳, 李辉. 2013. 山西断陷盆地及其邻区 1999—2008 年地壳物质密度变化[J]. 大地测量与地球动力学, **33**(5): 7–10.
- Xuan S B, Tan H B, Feng J L, Shen C Y, Li H. 2013. Crustal material density change beneath Shanxi rift and its adjacent areas from 1999 to 2008[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **33**(5): 7–10 (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).
- 张立成, 余敏, 孙东颖. 2009. 汶川 $M_s 8.0$ 级强震震前龙门山断裂带断层形变异常分析[J]. 华北地震科学, **27**(1): 34–38.
- Zhang L C, Yu M, Sun D Y. 2009. Analysis on fault deformation anomaly of Longmenshan fault zone before $M_s 8.0$ Wenchuan strong earthquake[J]. *North China Earthquake Sciences*, **27**(1): 34–38 (in Chinese).
- 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 冉勇康. 2008. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, **51**(4): 1066–1073.
- Zhang P Z, Xu X W, Wen X Z, Ran Y K. 2008. Slip rates and recurrence intervals of the Longmenshan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **51**(4): 1066–1073 (in Chinese).
- 中国地震局监测预报司. 2009. 汶川 8.0 级地震科学研究报告[M]. 北京: 地震出版社: 46–106.
- Department of Earthquake Monitoring and Prediction, China Earthquake Administration. 2009. *Research Report of Wenchuan $M_s 8.0$ Earthquake*[M]. Beijing: Seismological Press: 46–106 (in Chinese).
- 祝意青, 韩海华, 郭树松. 2008. 沂沭断裂带重力场及时空动态演化特征[J]. 大地测量与地球动力学, **28**(6): 61–67.
- Zhu Y Q, Han H H, Guo S S. 2008. On gravity field and its dynamically evolutionary characteristics of Yishu fault zone [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **28**(6): 61–67 (in Chinese).
- 祝意青, 徐云马, 吕弋培, 李铁明. 2009. 龙门山断裂带重力变化与汶川 8.0 级地震关系研究[J]. 地球物理学报, **52**(10): 2538–2546.
- Zhu Y Q, Xu Y M, Lü Y P, Li T M. 2009. Relations between gravity variation of Longmenshan fault zone and Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(10): 2538–2546 (in Chinese).
- 朱志澄. 1999. 构造地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 40–43.
- Zhu Z C. 1999. *Structural Geology*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 40–43 (in Chinese).
- Bilham R. 2005. Coseismic strain and the transition to surface afterslip recorded by creepmeters near the 2004 Parkfield epicenter[J]. *Seismol Res Lett*, **76**(1): 49–57.
- Li Y G, Oldenburg D W. 1996. 3-D inversion of magnetic data[J]. *Geophysics*, **61**(2): 394–408.
- Li Y G, Oldenburg D W. 1998. 3-D inversion of gravity data[J]. *Geophysics*, **63**(1): 109–119.
- Linde A T, Gladwin M T, Johnston M J S. 1992. The Lomapieta earthquake, 1989 and earth strain tidal amplitudes: An unsuccessful search for associated changes[J]. *Geophys Res Lett*, **19**(3): 317–320.
- Montesinos F G, Arnoso J, Vieira R. 2005. Using a genetic algorithm for 3-D inversion of gravity data in Fuerteventura (Canary Islands)[J]. *Int J Earth Sci*, **94**(2): 301–316.



反演、地壳形变机制和跨断层形变方面的研究工作。

李媛 中国地震局第一监测中心助理工程师, 2012年山东师范大学生物科学专业毕业, 获理学学士学位; 2015年中国地震局地震预测研究所地球物理学专业毕业, 获理学硕士学位, 现主要从事重力



地震观测技术的研究工作, 现主要从事地震活动性和地震危险性方面的研究工作。

李昌琰 中国地震局地球物理研究所在读博士研究生, 2010年西安交通大学自动化专业毕业, 获工学学士学位; 2013年中国地震局地震研究所防灾减灾工程及防护工程专业毕业, 获工学硕士学位, 曾从事



方面的研究工作。

邵延秀 中国地震局兰州地震研究所助理研究员, 2007年兰州大学地质工程专业毕业, 获工学学士学位; 2010年中国地震局兰州地震研究所构造地质学专业毕业, 获理学硕士学位, 现主要从事活动构造



结构动力反应分析等方面的研究工作, 辽宁省土木建筑学会会员。

白泉 沈阳工业大学建筑与土木工程学院副教授, 1997年东北大学矿山建设(工业与民用建筑)专业毕业, 获工学学士学位; 2009年东北大学结构工程专业毕业, 获工学博士学位, 现主要从事随机荷载模拟及

注: 何现启、梁建宏、冯丽丽、张红才的简介分别见本刊 Vol. 36, No. 3; Vol. 37, No. 1; Vol. 37, No. 4; Vol. 36, No. 4.