

李大虎, 丁志峰, 梁明剑, 李军, 苏琴. 2014. 四川地区流动重力资料的位场分离与异常特征提取. 地震学报, 36(2): 261-274. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.02.011.

Li D H, Ding Z F, Liang M J, Li J, Su Q. 2014. Field separation and anomaly feature extraction of mobile gravity data in Sichuan area. *Acta Seismologica Sinica*, 36(2): 261-274. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.02.011.

四川地区流动重力资料的位场分离与异常特征提取^{*}

李大虎^{1,2),†} 丁志峰¹⁾ 梁明剑²⁾ 李军³⁾ 苏琴²⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国成都 610041 四川省地震局

3) 中国成都 610059 成都理工大学地球物理学院

摘要 用于监测四川地区重力场随时间变化的流动重力测网于2008年5月12日汶川 $M_s 8.0$ 地震后进行了全面改造, 形成了新的闭合环线并对整网点位每年实施2次重力观测工作。该文以2010—2012年获取的5期流动重力资料为基础, 分别采用小波多尺度分解和三维视密度反演等位场分离方法, 对测区内重力场的动态变化进行多层次分解及异常特征提取, 以探求四川测区范围内重力异常动态变化特征以及地震前后不同深度范围内密度变化情况与重力场响应之间的关系。结果表明, 对同一期资料进行小波分解得到不同阶次的细节图像, 揭示了不同深度处重力异常动态变化特征; 分解结果同时也表明了四川测区范围内重力场的变化形态与川内特有的断裂构造格架和深部结构环境及过渡带特征密切相关。通过对不同时期的差分重力异常资料进行三维视密度反演对比研究发现, 在地震前后四川测区范围内由浅到深密度变化呈现出不同程度的差异, 震区附近出现较为明显的横向密度变化特征且浅层物质密度局部性的异常变化差异较为突出, 测区范围内中上地壳深度层密度反演切片显示出的趋势性差异基本上反映了地震前后测区内地下物质的动态变化趋势, 因此, 深刻认识不同深度范围内重力场的动态演化特征, 对研究壳内物质密度变化以及与地震的孕育和发展有关的深部介质环境具有积极的意义。

关键词 四川地区 流动重力 小波多尺度分解 三维视密度反演 密度变化

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.02.011 中图分类号: P312.1 文献标志码: A

Field separation and anomaly feature extraction of mobile gravity data in Sichuan area

Li Dahu^{1,2),†} Ding Zhifeng¹⁾ Liang Mingjian²⁾ Li Jun³⁾ Su Qin²⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

3) Geophysical Institute of Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

* 基金项目 中国地震局地震科技星火计划项目(XH12041Y)和四川省地震局地震科技专项(LY1312)联合资助。

收稿日期 2013-01-19 收到初稿, 2013-12-05 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: lixiang2006@sina.com

Abstract: The mobile gravity measuring network for monitoring the Sichuan area gravitational field varying along with the time has made an overall transformation after the Wenchuan $M_{\text{S}}8.0$ earthquakes on 12 May 2008, forming a new closed loop with gravity observation to all of the point locations twice every year. Taking five-issue mobile gravity data in the period of 2010—2012 as the foundation, this paper detects dynamic change of gravitational field in multi-scale decomposition and extracts anomaly features by using wavelet multi-scale decomposition and the 3-D apparent density inversion, so as to search for dynamic change characteristics of gravity anomaly and the relationship between the range of density variation and the gravity field response within different depths before and after the earthquake in Sichuan measuring area. The results show that different order details chart got from wavelet decomposition on the same stage gravity data reveals dynamic change characteristics of gravity anomaly in the different depth. Decomposition results also show that changes of gravitational field are closely related with fracture structure framework, deep structure and characteristics of transitional zone in Sichuan measuring area. Comparison of 3-D apparent density inversions based on the differential gravity anomaly data of different periods suggests density change is different from shallow to deep depth before and after an earthquake. Variation of transverse density characteristics is obviously presented nearby the seismic region, and anomalous change difference in the density of shallow matter is especially prominent. The apparent density slice maps within the depth of the middle-upper crust of the testing area shows trend differences, which basically reflects the dynamic change process of underground substances before and after the earthquake. Therefore deep understanding of gravity dynamic evolution characteristics in the different depth bounds is of positive significance to study the matter density change in the crust and deep medium environment related to the pregnancy and development of the earthquake.

Key words: Sichuan area; mobile gravity; wavelet multi-resolution decomposition; apparent density inversion; density change

引言

地震活动与重力变化的关系与地壳形变和密度分布状态紧密地联系在一起。由于地震的孕育和发展伴随着构造活动、质量迁移和密度变化等物理过程，这些过程都会引起地球重力场的非潮汐变化，主要表现为重力场空间分布的变化、局部重力异常区及伴生的重力高梯度带的出现等(陈运泰等, 1980; 顾功叙等, 1997)。而定期流动重力测量得到的相邻两期资料差分重力异常则主要与测量间隔期内的地表垂直形变、地壳密度结构改变、深部物质迁移和构造变形等因素有关(陈石等, 2011)。近年来, 地震学者在国内一些比较关注的地震活动区已连续开展了流动重力的测量和研究工作, 并逐步积累了一些较好的震例(申重阳等, 2003, 2009; 玄松柏等, 2010)。特别是汶川 $M_{\text{S}}8.0$ 地震后, 灾后恢复重建工作对四川省内流动重力网进行全面改造形成了新的观测网络。科学分析和正确认识震后几年内新获取的重力观测资料, 不但对研究四川测区内重力场异常变化特征与壳内物质密度的

分布关系十分重要, 而且对该地区潜在地震的跟踪预测和地震活动的趋势分析将起到积极的作用。

然而, 重力变化场从属性上归于位场, 也是一个叠加场, 存在场的体积效应和等效效应。如何将测区内重力场的动态变化分解为表示不同深度、不同尺度的场源体在地表产生的重力场的异常变化特征, 对解释重力场变化与深度、密度变化之间的关系显得尤为重要。异常场提取方法在传统意义上归为两种: 一种以划分区域场和局部场的“二分”形式; 另一种为突出某些异常信息为主的方法, 也叫场的转换法。这些方法都有一个共同的缺陷, 即这些方法大多是“二分”的定性的异常分解, 在不同分解的信息中有可能相互渗透, 导致在分解和转换中都会存在“伪”信息(Boschetti *et al*, 2001; Møller *et al*, 2007)。此外, 对重力场变化与深度、密度分布的关系研究, 在很大程度上取决于流动重力监测网的完整状况和对重力观测数据的处理程度。首先, 在2008年汶川地震之前, 四川地区的流动重力测网分为3个相对独立的区域, 即龙门山地区、甘孜地区和西昌地区, 并大多都是支线联测未连成一体, 难以满足四川测区重力场的动态分析和监测预报工作的需要; 其次, 数年来对四川境内流动重力资料的位场分离和异常特征提取尚不多见。虽然对四川境内龙门山地区、川西地区不同时段的重力动态演化曾有过研究, 但仍处于对各个测网原始观测数据的优化处理和解释等方面(祝意青等, 2009, 2010)。至今, 对汶川 $M_s 8.0$ 地震后全省范围内新建成的流动重力测网资料的处理分析及深入研究尚不多见, 国内对三峡库首区、河西地区的重复测量得到的重力变化资料进行多尺度分析也只是停留在对分解结果的定性解释方面(朱桂芝等, 2004; 刘少明等, 2005), 对于不同深度引起重力异常动态变化的密度横向变化情况始终没有给出一个清楚的答案, 而地下不同深度处的密度变化特征对揭示震源体的变化过程具有重要的参考意义。鉴于不同地区特有的地质构造环境与地震活动特征导致重力场的变化存在很大的地域差异, 因此, 对多地震的四川地区而言, 开展联合测网重力资料的位场分离与异常特征分析十分必要。

为了探求四川测区范围内重力异常动态变化特征, 以及地震前后不同深度范围内密度变化特征与重力异常响应之间的关系, 本文收集了新建成的四川流动重力网2010—2012年所获取的5期重力观测资料(2010年8月、2011年3月、2011年9月、2012年4月和2012年9月), 首先利用小波多尺度分解对2011年9月资料(简称为1109期)进行分解得到不同小波阶次结果与重力异常变化之间的联系, 达到对不同深度重力场变化进行分离的目的; 然后为进一步验证分解效果和反演计算地震前后各深度层密度横向变化趋势情况, 采用基于位场分离和延拓的三维视密度反演方法, 对2010—2012年的5期差分重力异常观测资料进行处理计算, 反演得到了反映地震前后壳内不同深度的视密度变化的切片信息图, 并分别对不同位场分离方法得到的结果进行了解释。

1 测区概况及资料处理

四川省流动重力网建于20世纪80年代初期, 起初分为3个相对独立的区域, 分别包涵成都、甘孜、西昌这3个相对独立的测网; 后因基础建设点位受到一定影响, 部分线路因无法进行观测而丢弃, 2008年汶川地震导致成都网全网损毁不能观测, 灾后恢复重建对流动重力测网进行了全面改造, 并重新勘选、新建62个流动重力站, 共同组成了目前四川地区新的流动重力测网。新网由近180个点位构成, 形成9个闭合环线, 覆盖面积约10万

平方千米。目前新网涵盖了四川境内的鲜水河、安宁河、则木河、龙门山等主干断裂的大部分区域。整个测网能实现全面观测，并形成闭合环线，同时实现了覆盖四川主干断裂沿线大中城市和重要经济开发区域，尤其是为近些年来研究川内地震活动（如2002年新龙 $M_s 5.3$ 地震、2008年汶川 $M_s 8.0$ 地震、2008年攀枝花 $M_s 6.1$ 地震、2010年道孚 $M_s 5.1$ 地震、2011年炉霍 $M_s 5.3$ 地震及2012年宁蒗-盐源 $M_s 5.7$ 地震）与重力动态变化以及捕捉地震前可能出现的重力异常信息提供了重要的基础资料。图1给出了四川地区流动重力测网及构造略图。

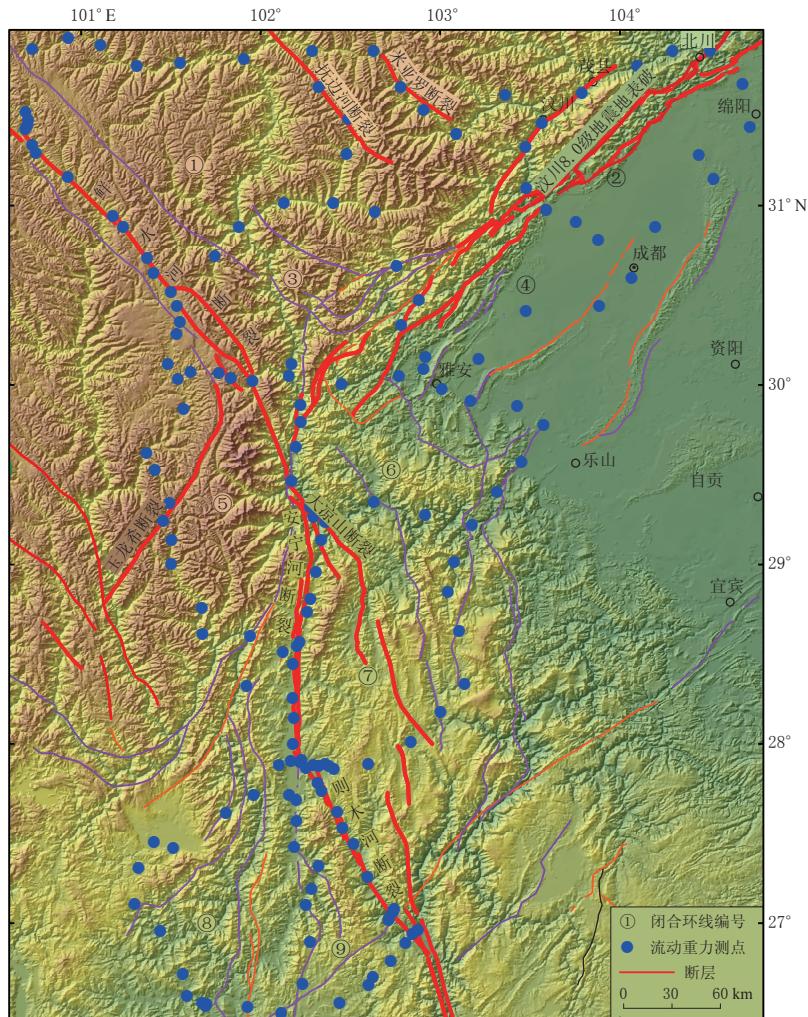


图1 四川地区流动重力测网及构造略图

Fig. 1 Sketch of mobile gravity measuring network and tectonic setting in Sichuan region

2 流动重力资料的位场分离

在对流动重力资料进行分解之前，为了使整个数据处理规范化、系统化，将导出的原始数据先按照李辉等(2009)方法进行预处理，具体步骤如下：观测资料的处理采用中国地震局实用化攻关推广的应用软件(LGADJ)进行，采用统一起算基准的拟稳平差计算方法，

选取测区中点位比较稳定的测点作为统一起算拟稳基准。拟稳点重力变化差异较小, 反映的重力场合理, 有利于监测区域可靠重力变化信息的提取。总体来说, 汶川地震之后新建的流动测网重力计算精度较高, 观测资料可靠, 并且观测周期较之以往缩短一半、资料的时效性强, 因此有利于测区内可靠重力变化信息的提取(表1)。在完成上述处理之后, 采

表 1 2010—2012 年四川地区重力测量情况

Table 1 Gravity measurements of Sichuan region during 2010—2012

观测年份	期次	仪器型号	观测日期	点值的平均精度 ($10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)
2010	No1	LCR-843, LCR-829	2010-08	9.6
2011	No1	LCR-854, LCR-132	2011-03	8.9
	No2	LCR-843, LCR-132	2011-09	9.0
2012	No1	LCR-843, LCR-132	2012-04	8.0
	No2	LCR-843, LCR-132	2011-09	7.8

用 Kriging 法将测区范围内(26.5° — 32°N , 100.5° — 104.5°E)离散数据网格化成 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 的数据后拟合插值得到流动重力测区重力异常等值线图(李振海, 汪海洪, 2010)。在位场数据处理方面, 小波多尺度分解方法用于布格重力异常进行分解较为常见, 但用于流动重力异常的分解却较少出现。孙少安等(2002)曾对 17 期重力资料进行了平差处理及解释, 他们用 1999 年以前各期资料的综合平差结果作为网区重力场变化基准, 将各期单独平差结果与基准相减, 得到了各期重力变化, 并剔除了各期中个别变化特别大且已知变化原因的测点。刘少明等(2005)利用上述处理方法后的重力资料进行重力场分离时采用了小波分解, 并结合三峡地区的构造活动状况对分解结果进行解释。本文同样采用了上述数据处理方法, 先对四川流动重力测网(1991—2012 年)所有的历史点位进行清理, 统一观测点位的编号和基准点(石棉点)后, 再将计算得到各期资料的平差结果作为网区重力场变化基准, 最后将各期单独平差结果与基准相减, 得到了各期重力变化。由于篇幅所限, 本文先以 1109 期数据为例, 对其采用小波多尺度分解进行位场分离, 研究新建成的四川流动重力测网范围内不同尺度意义下的重力场变化特征。

2.1 小波多尺度分解结果与解释

首先以 1109 期观测资料为例, 根据图中等值线的场值大小及疏密差异可以反映出该研究区重力场由北东高过渡到西南低的总体变化特征(图 2a), 仅在川北东范围内的汶川附近和川西北泸定附近存在低重力异常变化圈闭, 位于四川盆地西南缘、大凉山断块东边界的马边—荣经断裂带控制了重力变化正异常区的西南边界; 然后应用小波多尺度分析将该期数据(研究区范围为 26.5° — 32°N , 100.5° — 104.5°E)分解成不同尺度意义下的重力场变化。根据杨文采等(2001)对重力异常小波分解结果的讨论认为, 一阶小波细节对应浅部环境变化引起的重力场高频变化, 二阶小波细节对应中上地壳介质运动引起的重力场变化, 三阶—四阶小波细节对应中下地壳介质运动引起的重力场变化, 四阶小波逼近对应莫霍面附近介质运动引起的重力场变化。由于不同阶次的小波细节反映了不同深度介质密度的变化信息, 阶次越高所反映的密度变化情况也就越深。通过对比分析并结合已有的研究成果(刁博等, 2007; 李大虎等, 2011), 本文选用四阶小波进行场的分离得到不同细节的小波多尺度分解成果(图 2b—f)。

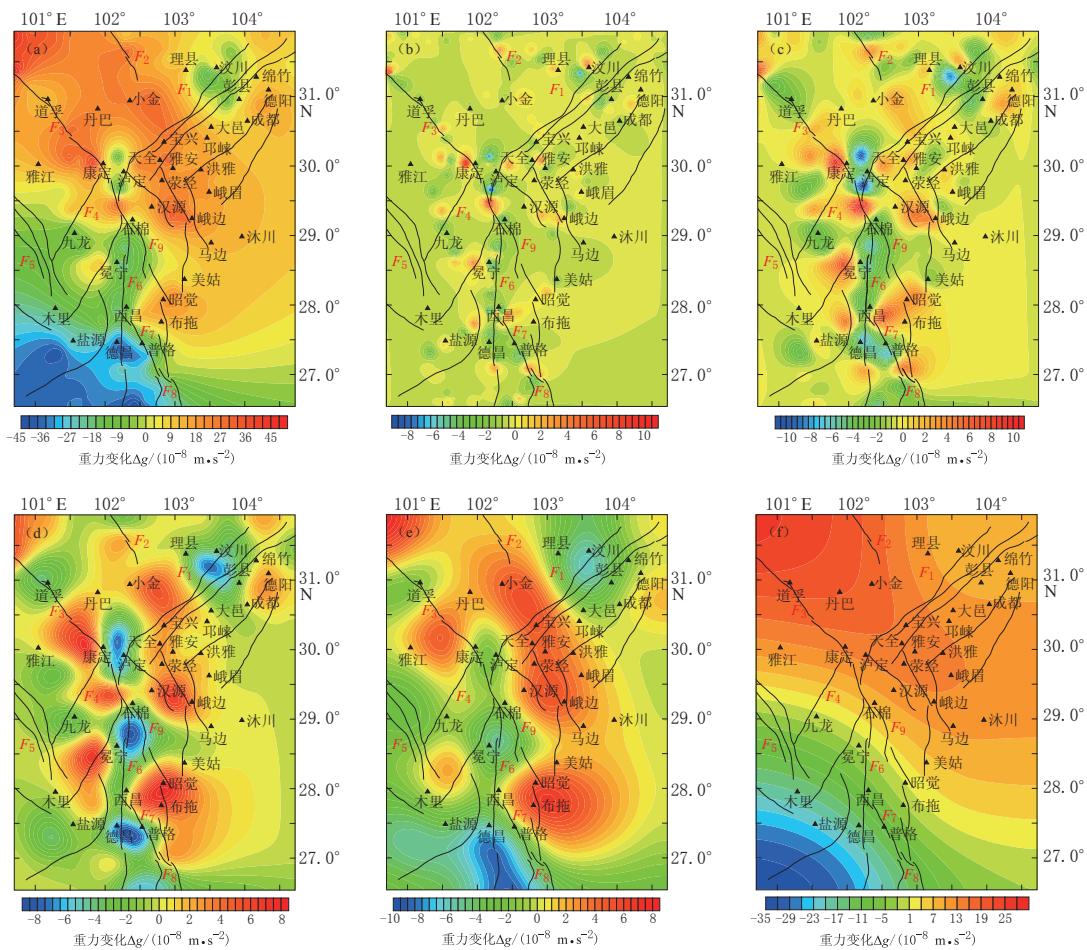


图 2 1109 期小波多尺度分解结果(单位: 10^{-8} m/s^2)

(a) 重力场变化等值线图; (b) 一阶细节; (c) 二阶细节; (d) 三阶细节; (e) 四阶细节; (f) 四阶逼近
 F_1 : 龙门山断裂; F_2 : 抚边河断裂; F_3 : 鲜水河断裂; F_4 : 玉农希断裂; F_5 : 理塘断裂;
 F_6 : 安宁河断裂; F_7 : 则木河断裂; F_8 : 小江断裂; F_9 : 大凉山断裂

Fig. 2 Wavelet multi-scale decomposition results of 1109-issue gravity measurements (unit: 10^{-8} m/s^2)

(a) Contour map of gravitational field variation; (b) The first-order details; (c) The second-order details;
(d) The third-order details; (e) The fourth-order details; (f) The fourth-order approximation
 F_1 : Longmenshan fault; F_2 : Fubianhe fault; F_3 : Xianshuihe fault; F_4 : Yunongxi fault; F_5 : Litang
fault; F_6 : Anninghe fault; F_7 : Zemuhe fault; F_8 : Xiaojiang fault; F_9 : Daliangshan fault

从对流动重力数据的小波多尺度分解结果总体来看, 对同一期资料进行小波分解得到的不同阶次的小波细节揭示了不同深度处重力异常变化特征。根据一阶小波细节图(图 2b)可以看出重力场高频变化信息, 其等值线圈闭范围较小且孤立存在, 沿着断裂带附近串珠状异常发育, 如康定、泸定—冕宁和西昌等地。相对于图 2a 来说, 一阶细节反映出的重力变化区的趋势变化规律虽并不明显, 但是随着小波阶数的增加, 由图 2c, d 所显示出的等值线形态变化进一步加大, 而其圈闭数量在减少。例如在二阶细节图中(图 2c), 龙门山断裂带南北两段出现了正负异常变化区, 宝兴一天全均位于正异常变化区范围内, 这一变化特征在图 2d 中体现得更为明显, 而汶川 $M_s 8.0$ 地震震源区及周边则呈现出低异常

变化特征, 该区域的重力场变化可能与其深部构造差异密切相关。图 2 中, 位于安宁河断裂带附近的石棉—冕宁—德昌一带负异常变化呈条带状出现, 位于图形左边的川西北地区的九龙和雅江附近的正负异常变化分界特征逐渐清晰。在三阶细节图中(图 2d), 位于图右边的川东地区的正重力变化区圈闭特征尤为明显, 龙门山断裂带南段的宝兴—天全—荥经—汉源一带及大凉山块体南缘的昭觉、布拖等地均出现了不同程度的重力正异常变化。图 2c, d 显示最为明显的是位于重力场变化转折及分叉部位的康定—泸定地区, 它们既是深部断裂与浅层断裂的交汇部位, 同时也是地震活动较为强烈的地区。在四阶细节中(图 2e), 川西南的负重力异常变化区继续向右扩展, 几乎占据测区范围的二分之一。除了位于锦屏山断裂附近的木里地区还存在部分正异常圈闭外, 其它地区都逐渐呈现了负异常变化。而位于攀西一带原本为负异常变化范围也在逐渐扩大。从图 2e 中还可以看出, 则木河—小江断裂成为正负重力变化范围的分界线愈加明显。在四阶逼近图中(图 2f), 正负异常区分别继续扩大, 川东北正重力变化和川西南负重力变化分别控制了整个图形的二分之一。需要注意的是, 对于图 2c-d 中康定—九龙一带重力场变化出现两个明显的相对重力低变化带, 在二阶至四阶次的小波细节图上均有较为明显的显示。该处特定的重力场变化特征除了与其所处区域的玉农希断裂的展布格局相关外, 还与断裂带上地震活动密切相关, NE 向展布的玉农希断裂被 NW 向的鲜水河断裂和理塘断裂所夹持, 且玉农希断裂作为贡嘎山断块的西边界断裂迄今已发生 3 次 $M_s \geq 5.0$ 地震, 如 1955 年康定-折多塘 $M_s 7.5$ 地震、1975 年康定-九龙 $M_s 6.2$ 地震就发生在该处附近。这种特定的地震构造环境和地震活动特征对该区域内不同小波尺度下特有的重力场变化存在一定的影响, 不同小波细节所反映出重力场的变化特征也同样表明了川内特有的“Y”型断裂构造格架与地壳深部结构及过渡带特征和重力场的变化存在紧密联系。

2.2 视密度反演结果

2010—2012 年, 四川测区范围内先后发生了 2010 年道孚 $M_s 5.1$ 地震、2011 年炉霍 $M_s 5.3$ 地震及 2012 年宁蒗-盐源 $M_s 5.7$ 地震等一系列中强地震。而基于小波分解的位场分离只是定性地反映了四川测区范围内不同尺度意义下重力场的变化特征, 虽然功率谱斜率可以计算出小波细节及其逼近的异常场源的平均深度, 但也只是在统计意义上的估计。因此, 为了探求地震前后四川测区不同深度范围内密度的横向变化情况, 同时也为了进一步验证小波多尺度分解的可靠性与合理性, 我们又采用了视密度反演的方法, 得到了不同时期地壳不同深度处层密度的横向异常变化信息切片。

同样采用四川地区流动重力测网 2010—2012 年 5 期的重力观测资料(2010 年 8 月、2011 年 3 月、2011 年 9 月、2012 年 4 月、2012 年 9 月)经过平差处理之后, 再插值得到相邻两期重力场差分变化图(图 3a-d), 最后分别对其进行三维视密度反演。本文所采用的视密度反演是一种基于位场分离和延拓的三维视密度反演方法(徐世浙等, 2009), 首先应用场分离的切割法对观测到的重力变化场进行不同深度层源的切割分离; 由于常用的傅里叶变换法及其变种的下延深度一般不超过资料点距的 3—5 倍, 故又采用大深度向下延拓方法将各层的场延拓至相应的深度; 最后反演得到了各深度层密度变化的近似分布情况(Fedi, Florio, 2002; Burchfiel, 2003; Cooper, 2004)。设地下某深度层的厚度为 h , 将该层分割为许多个有限延伸的大小相同的垂直小棱柱体, 设小棱柱体的密度为 σ_j , 长、宽分别为 a 和 b , 厚度为 h , 深度层面的重力为 $g(u, v)$, 则在频率域中有

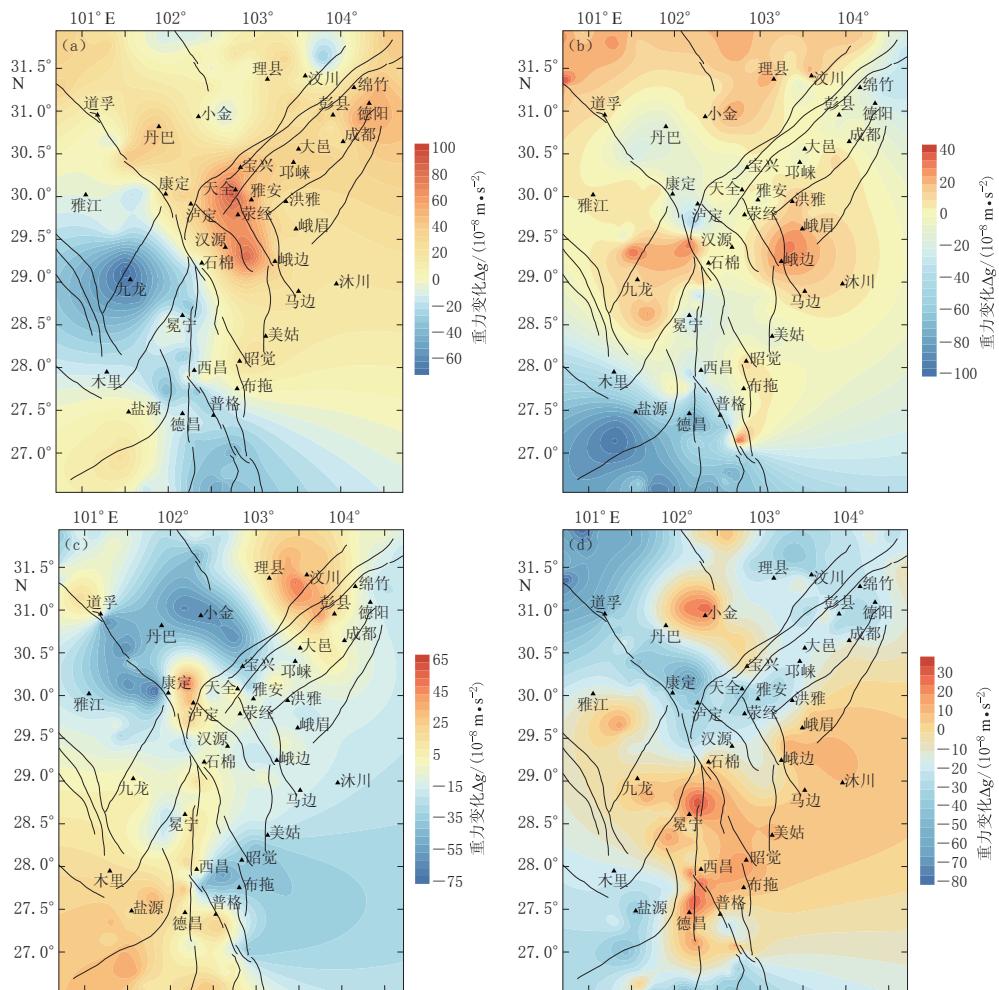


图 3 2010—2012 年重力场变化等值线图(单位: 10^{-8} m/s^2)

(a) 2010-08—2011-03; (b) 2011-03—09; (c) 2011-09—2012-04; (d) 2012-04—09

Fig. 3 Contour map of gravitational field variation (in unit of 10^{-8} m/s^2) during 2010—2012

(a) 2010-08—2011-03; (b) 2011-03—09; (c) 2011-09—2012-04; (d) 2012-04—09

$$g(u, v) = 2\pi G \frac{4}{uv} \sin\left(\frac{au}{2}\right) \sin\left(\frac{bv}{2}\right) \frac{1 - e^{-hr}}{r} \sum_{j=1}^{MN} \sigma_j e^{-i(u x_{0j} + v y_{0j})}, \quad (1)$$

式中, $g(u, v)$ 表示 $g(x, y)$ 的频谱; u, v 分别为 x, y 方向的波数; G 为万有引力常数; $r = \sqrt{u^2 + v^2}$; x_{0j}, y_{0j} 为各个棱柱体的中心坐标. 由于已将该深度层产生的重力异常向下延拓到该层顶面, 可以近似认为层面每一点的重力异常值仅为这个点所在的那个小棱柱体所产生, 而周围其它小棱柱体在该点产生的场可以近似地忽略. 因此由公式

$$\sigma_j = F^{-1} \frac{g(u, v)}{2\pi G \frac{4}{uv} \sin\left(\frac{au}{2}\right) \sin\left(\frac{bv}{2}\right) \frac{1 - e^{-hr}}{r}}, \quad (2)$$

可以反演出各个棱柱体的视密度, 从而得到该深度层的视密度分布. 式(2)中 F^{-1} 表示傅里叶反变换.

根据大量模型试验和实际资料的应用效果分析, 切割半径 r 得到的局部场可以近似地代表该深度 r 以上的地层重力场响应(文百红, 程方道, 1990), 本文在对切割半径进行选取时充分考虑了四川省区域构造特征、地震目录统计及中小地震的重新定位结果。根据四川省历史地震目录和台网观测报告中给出的测区内震源深度统计资料表明, 5—20 km 深度范围内的中、强地震占所有震源深度参数的 73%, 属浅源地震(唐荣昌, 韩渭宾, 1993)。再结合近些年来四川地区中小地震的双差重新定位结果表明, 川西高原和四川盆地的震源深度主要集中在 0—15 km 范围内, 15 km 以下地震稀少(朱艾澜等, 2005; 马宏生等, 2008)。因此, 本文切割半径的选取分别为 5, 10, 20 km 不等, 计算得到不同时期四川流动重力测网范围内各深度层视密度变化的分布情况。

从图 3a 可以看出, 2010 年 8 月—2011 年 3 月整个测区重力变化为 -70×10^{-8} — 100×10^{-8} m/s², 重力变化自西南向北东呈现趋势性变化。成都测区则呈现出正异常变化趋势, 甘孜测区的重力变化较为平缓。其中九龙地区出现了密集的重力等值线圈闭, 数值达到 -49.3×10^{-8} m/s², 且自 NE 向 SE 沿着鲜水河断裂的走向出现了正负重力变化梯级带。道孚—炉霍一带的重力变化正异常值还处于增加的状态, 位于天全—汉源一带的重力变化数值达到 95.1×10^{-8} m/s²。西昌—德昌一带的重力变化介于两者之间。图 3b 反映了 2011 年 3—9 月整个测区重力变化情况, 重力变化为 -100×10^{-8} — 40×10^{-8} m/s²。从图 3b 可以看出, 成都测区和甘孜测区内的重力各自呈现出串珠状正值异常圈闭特征, 其中位于甘孜测区炉霍虾拉沱地区的重力变化数值达到 47.5×10^{-8} m/s², 说明了炉霍—道孚一带正处于炉霍 $M_{S}5.3$ 地震震后的恢复过程之中。而鲜水河南段断裂与龙门山断裂南段的交汇处石棉—九龙一带的田湾地区重力异常由负值向正变化, 变化数值达到 33.9×10^{-8} m/s²。西昌测区闭合环线(图 1 中环线编号⑧)及以西地区重力变化较为剧烈, 在盐源附近呈现出重力梯级带特征。从图 3c 可以看出, 2011 年 9 月—2012 年 4 月整个测区重力变化为 -75×10^{-8} — 65×10^{-8} m/s², 成都测区除汶川附近区域及甘孜测区的康定—泸定一带重力变化比较剧烈, 并呈现出明显的重力高等值线圈闭异常外, 其余区域均呈现重力负异常变化特征, 如小金—丹巴—雅江一带。而西昌测区范围内的重力场变化形态被则木河—小江断裂所控制。该断裂以西的中高山区呈现正异常值变化, 如盐源弧形构造带和木里地区。过了西昌盆地以东则呈现出重力负值变化。图 3d 反映了 2012 年 4—9 月整个测区重力变化情况, 重力变化的总体趋势与上期(2011 年 9 月—2012 年 4 月)反向, 数值为 -80×10^{-8} — 35×10^{-8} m/s²。尤其是甘孜测区和西昌测区范围内的重力变化特征较为明显, 盐源盆地一带重力负异常变化量级达 -37.8×10^{-8} m/s², 并在其附近出现了重力梯级带。这与 2012 年 6 月 24 日宁蒗彝族自治县和凉山彝族自治州盐源县交界处($27.7^{\circ}\text{N}, 100.7^{\circ}\text{E}$)发生 $M_{S}5.7$ 地震震后调整关系密切。龙门山断裂与鲜水河断裂交汇处的三岔口附近, 如康定—泸定地区则表现出重力负异常变化, 安宁河—则木河断裂带地区重力变化十分显著, 冕宁和西昌盆地附近形成新的串珠状正异常变化区, 数值从 25.7×10^{-8} — 29.9×10^{-8} m/s² 不等。反映了该断裂带以及附近依然存在显著的构造活动。

为了便于对比研究测区范围内地震前后不同深度层密度异常变化趋势, 对 2010—2012 年所获取的 5 期差分重力异常数据进行位场数据处理和反演计算, 得到了不同深度层的视密度反演结果(图 4)。

图 4a 为 2011 年 3 月相对于 2010 年 8 月 5 km 深度层密度的变化情况。从图中可以看

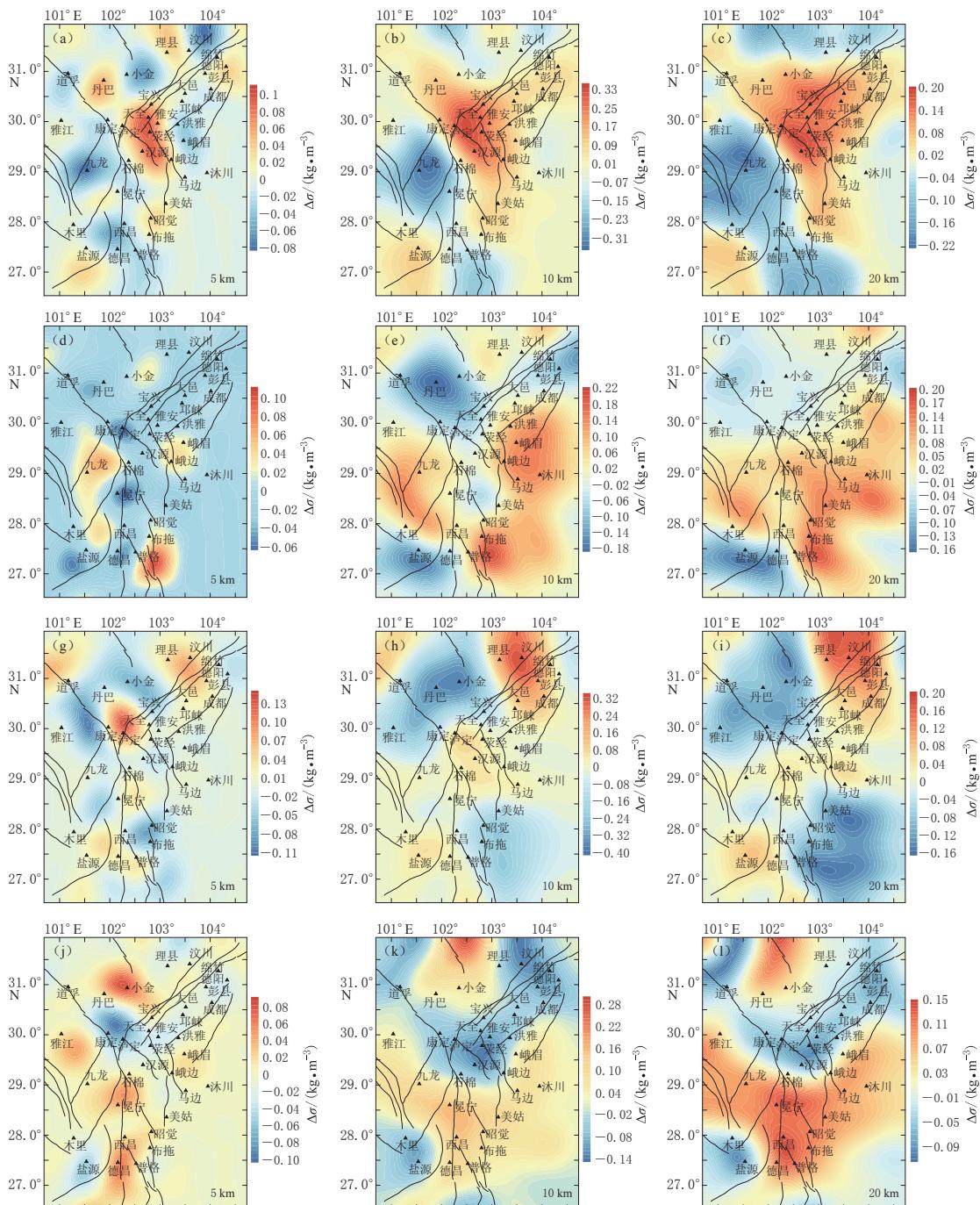


图 4 2010—2012年观测区不同深度层视密度反演结果(单位: kg/m^3)

(a)–(c) 2010-08—2011-03; (d)–(f) 2011-03—09; (g)–(i) 2011-09—2012-04; (j)–(l) 2012-04—09

Fig. 4 Apparent density inversion results of the layers at the depths of 5, 10 and 20 km during the 2010—2012

(a)–(c) 2010-08—2011-03; (d)–(f) 2011-03—09; (g)–(i) 2011-09—2012-04; (j)–(l) 2012-04—09

出, 道孚、小金及九龙附近存在范围较小的负密度变化, 丹巴—天全—汉源—昭觉一带存在正密度变化区, 而炉霍正处于正负密度变化梯级带附近, 2011年4月10日发生的炉霍 $M_{S}5.3$ 地震影响范围包含道孚、八美地区。图4b显示的10 km深度层的正密度变化趋势较5 km深度层更为明显, 而道孚和炉霍附近的负密度异常圈闭减弱, 等值线出现了局部的扭曲变形, 沿鲜水河—安宁河断裂带的正负密度异常分区逐渐清晰。到了20 km深度层密度变化(图4c), 与10 km深度层密度变化异常区范围差异不大, 但正负密度的变化趋势则更为明显。因此, 局部性的密度异常变化差异在一定程度上说明了中上地壳深度范围内出现的密度调整和改变, 这主要与该区炉霍 $M_{S}5.3$ 地震的孕育和发展存在一定的联系, 且区内深大断裂的分布格局和展布形态对该区密度变化趋势的影响作用明显。

图4d为2011年9月相对于2011年3月5 km层密度的变化情况。道孚附近负密度变化范围进一步扩大至丹巴和雅江一带, 震后炉霍附近则出现了小范围正密度变化区域, 从10 km(图4e)和20 km(图4f)深度层密度的变化情况看出这种区域更为明显, 这也说明了炉霍 $M_{S}5.3$ 震后鲜水河断裂北段地下物质发生了运移和改变, 而鲜水河断裂的中南段的道孚—泸定一带则出现了负密度异常变化区。

图4g为2012年4月相对于2011年9月5 km深度层密度的变化情况。与图4d中所显示的位于盐源附近的负密度异常区明显不同的是, 图4g中盐源附近开始出现正密度异常变化区, 自盐源盆地向东到达德昌—普格一带, 该正异常变化区的边界形态受到则木河—小江断裂所控制, 这种特质在图4h和图4i中均有体现, 这与宁蒗—盐源 $M_{S}5.7$ 地震震前地下物质向震中区运移有关。

图4j为2012年9月相对于2012年4月5 km深度层密度的变化情况。图中正密度变化占据主导地位, 整个四川测区不但在龙门山断裂与鲜水河断裂的交汇处出现了负异常圈闭外, 而且在盐源盆地附近又重新出现了负密度异常变化区, 其范围与盐源弧形构造带走向近似一致。从10 km(图4k)、20 km(图4l)深度层密度图中可以看出盐源附近负密度变化趋势在增加, 范围也进一步扩大至木里和理塘一带, 这在一定程度上也说明了宁蒗—盐源 $M_{S}5.7$ 地震震后恢复过程中地下物质沿安宁河断裂向德昌—西昌—冕宁一带运移。

综上, 不同深度层的视密度反演结果(图4)所显示出的测区范围内不同深度层密度反演切片, 基本上反映了测区范围内地震前后地下物质的动态变化趋势和演化过程。局部性的密度异常变化所显示出的趋势性差异在一定程度上说明了中上地壳深度范围内出现的密度调整和改变。因此, 深刻认识不同深度异常变化情况对揭示震源区附近物质的运移以及动态变化过程都具有重要的参考意义。

3 讨论与结论

流动重力测量主要反映区域重力场变化特征。在地震孕育过程中, 随着震源区应力的不断积累, 使得地壳内部的物质发生迁移而使壳内密度发生变化, 从而使地表观测到的重力发生变化。本文利用2008年汶川 $M_{S}8.0$ 地震后新建成的四川流动重力网2010—2012年所获取的观测资料, 开展了基于小波多尺度分解和三维视密度反演等位场分离和异常特征的提取研究。结果表明, 小波多尺度可以有效分离出不同尺度意义下的重力场变化特征; 分解结果同时也表明四川测区范围内重力场的变化形态, 与四川特有的断裂构造格架和深部结构及过渡带特征密切相关。通过对不同时期的差分重力异常资料进行三维视密度反演

对比研究发现，在地震前后四川测区范围内由浅到深密度变化呈现出不同程度的差异，震区附近出现较为明显的横向密度变化特征，且浅层物质密度局部性的异常变化差异较为突出。测区范围内中上地壳深度层密度反演切片显示出的趋势性差异基本上反映了地震前后测区内地下物质的动态变化趋势。

尽管重力异常的位场分离方法对重力资料处理与反演成像研究等方面起着重要的作用，但是，要想对重力异常变化特征达到较为清楚的认识或判断，除了对观测数据进行必要的位场分离方法的研究外，关键还要有坚实可靠的观测数据和科学合理的监测网络。在2008年汶川 $M_S 8.0$ 地震之前，四川地区的重力测网彼此独立分布，虽分别覆盖了成都、甘孜和西昌3个测区，但缺少公共点的控制；而且有些测点位于川西高原地带，受交通不便和气候条件的限制，使得有些测点虽每年重复观测但点位并不一致。这些都会对观测数据的质量产生不同程度的影响，加之各独立测网的空间控制范围较小、观测密度不足，不能清晰地反映出区域重力变化的完整信息；因此汶川 $M_S 8.0$ 地震后的灾后恢复重建过程中将支线联测网连成一体，形成了新的覆盖全川重点监视区的流动重力测网。至今，联合测网所积累的各期数据质量和精度较以往有了很大的提高，这都有利于在今后工作中对四川测区范围内可靠重力异常变化信息的提取。相信随着时间的推移和观测数据的积累，结合区内地质构造特征、地震活动情况，对流动重力数据进行异常提取和动态分析研究会有更快的进展。值得注意的是，尽管新建成的四川范围内的流动测网目前已具备9个闭合环线，覆盖了四川主要的发震断层和地震危险区，但四川华蓥山断裂尚未被四川重力测网所覆盖，川滇交界东段莲峰断裂带附近的宜宾—金阳一带的重力观测至今还是空白，而该区近年来中小地震活动较为频繁，地震危险性同样不容忽视。例如，2013年2月19日四川省内连续发生了8次地震，其中有2次($M_S 4.9$ 、 $M_S 3.1$)发生在四川宁南—云南巧家交界的莲峰断裂附近，因此建立和强化该区重力环网观测工作，对区内潜在地震预测和地震活动的趋势分析尤为重要。

在本文的撰写过程中，先后与中国地震局地震研究所邢乐林副研究员及中国科学院测量与地球物理研究所周江存副研究员进行了多次有益的探讨，中国地震局地球物理研究所陈石副研究员在数据成图方面给予了大力支持和帮助，审稿专家对本文在数据处理方面给予了有益地指导并提出了宝贵的意见。作者在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 陈石, 王谦身, 祝意青, 蒋长胜, 卢红艳, 王武星. 2011. 汶川 $M_S 8.0$ 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 $M_S 8.0$ earthquake and epicentroid research[J]. *Progress in Geophysics*, 26(4): 1147-1156 (in Chinese).
- 陈运泰, 顾浩鼎, 卢造勋. 1980. 1975年海城地震和1976年唐山地震前后重力变化[J]. 地震学报, 2(1): 21-31.
- Chen Y T, Gu H D, Lu Z X. 1980. Variations of gravity before and after the Haicheng earthquake, 1975 and the Tangshan earthquake, 1976[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2(1): 21-31 (in Chinese).
- 刁博, 王家林, 程顺有. 2007. 重力异常小波多分辨分析分解阶次的确定[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 32(4): 564-568.
- Diao B, Wang J L, Cheng S Y. 2007. The confirmation of decomposition level in wavelet multi-resolution analysis for gravity anomalies[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 32(4): 564-568 (in Chinese).

- 顾功叙, 郭宗汾, 刘克人, 郑金涵, 卢红艳, 刘端法. 1997. 中国京津唐张地区时间上连续的重力变化与地震的孕育和发生[J]. 科学通报, 42(18): 1919-1930.
- Gu G X, Guo Z F, Liu K R, Zheng J H, Lu H Y, Lu D F. 1997. Time continuity of gravity variation in the BJTZ region and earthquake development and occurrence[J]. *Chinese Science Bulletin*, 42(18): 1919-1930 (in Chinese).
- 李大虎, 何强, 李才明, 屈进红. 2011. MATLAB 与 C++混合编程实现航磁异常提取的小波分析方法研究[J]. 地震研究, 34(2): 121-126.
- Li D H, He Q, Li C M, Qu J H. 2011. Research on wavelet analysis method of magnetic anomaly extraction based on MATLAB and C++ mixed programming[J]. *Journal of Seismological Research*, 34(2): 121-126 (in Chinese).
- 李辉, 申重阳, 孙少安, 王晓权, 项爱民, 刘少明. 2009. 中国大陆近期重力场动态变化图像[J]. 大地测量与地球动力学, 29(3): 1-10.
- Li H, Shen C Y, Sun S A, Wang X Q, Xiang A M, Liu S M. 2009. Dynamic gravity change in recent years in China Continent[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 29(3): 1-10 (in Chinese).
- 李振海, 汪海洪. 2010. 重力数据网格化方法比较[J]. 大地测量与地球动力学, 30(1): 140-144.
- Li Z H, Wang H H. 2010. Comparison among methods for gravity data gridding[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 30(1): 140-144 (in Chinese).
- 刘少明, 申重阳, 孙少安, 陈步云. 2005. 三峡库首区重复重力资料的小波分解与构造活动[J]. 大地测量与地球动力学, 25(1): 13-18.
- Liu S M, Shen C Y, Sun S A, Chen B Y. 2005. Wavelet decomposition of repeated gravity data and tectonic activities in front area of Three Gorges reservoir[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 25(1): 13-18 (in Chinese).
- 马宏生, 张国民, 周龙泉, 刘杰, 邵志刚, 夏红. 2008. 川滇地区中小震重新定位于速度结构的联合反演研究[J]. 地震, 28(2): 29-38.
- Ma H S, Zhang G M, Zhou L Q, Liu J, Shao Z G, Xia H. 2008. Simultaneous inversion of small earthquake relocation and velocity structure in Sichuan-Yunnan area[J]. *Earthquake*, 28(2): 29-38 (in Chinese).
- 申重阳, 李辉, 付广裕. 2003. 丽江 7.0 级地震重力前兆模式研究[J]. 地震学报, 25(2): 163-171.
- Shen C Y, Li H, Fu G Y. 2003. Study on a gravity precursor mode of Lijiang earthquake with $M_{S}7.0$ [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 25(2): 163-171 (in Chinese).
- 申重阳, 李辉, 孙少安. 2009. 重力场动态变化与汶川 $M_{S}8.0$ 地震孕育过程[J]. 地球物理学报, 52(10): 2547-2557.
- Shen C Y, Li H, Su S A. 2009. Dynamic variations of gravity and the preparation process of the Wenchuan $M_{S}8.0$ earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(10): 2547-2557 (in Chinese).
- 孙少安, 项爱民, 李辉. 2002. 长江三峡库首区重力场变化与构造活动[J]. 大地测量与地球动力学, 22(3): 56-59.
- Sun S A, Xiang A M, Li H. 2002. Changes of gravity field and tectonic activity in front region of the Three Gorges project[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 22(3): 56-59 (in Chinese).
- 唐荣昌, 韩渭宾. 1993. 四川活动断裂与地震[M]. 北京: 地震出版社: 33-38.
- Tang R C, Han W B. 1993. *Sichuan Active Fault and Earthquake* [M]. Beijing: Seismological Press: 33-38 (in Chinese).
- 文百红, 程方道. 1990. 用于划分磁异常的新方法: 插值切割法[J]. 中南矿冶学院学报, 21(3): 229-334.
- Wen B H, Chen F D. 1990. A new interpolating cut method for identifying regional and local fields of magnetic anomaly [J]. *Journal of Central-South Institute of Mining and Metallurgy*, 21(3): 229-334 (in Chinese).
- 徐世浙, 余海龙, 李海侠, 田钢, 杨金玉. 2009. 基于位场分离与延拓的视密度反演[J]. 地球物理学报, 52(6): 1592-1598.
- Xu S Z, Yu H L, Li H X, Tian G, Yang J Y. 2009. The inversion of apparent density based on the separation and continuation of potential field[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(6): 1592-1598 (in Chinese).
- 玄松柏, 申重阳, 李辉. 2010. 丽江 7.0 级地震前后地壳密度动态变化三维反演[J]. 大地测量与地球动力学, 30(1): 14-20.
- Xuan S B, Shen C Y, Li H. 2010. On 3D inversion for crustal density change before and after Lijiang $M_{S}7.0$ earthquake [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 30(1): 14-20 (in Chinese).

- 杨文采, 施志群, 侯遵泽. 2001. 离散小波变换与重力异常多重分解[J]. 地球物理学报, **44**(4): 534-541.
- Yang W C, Shi Z Q, Hou Z Z. 2001. Discrete wavelet transform for multiple decomposition of gravity anomalies[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **44**(4): 534-541 (in Chinese).
- 朱艾斓, 徐锡伟, 周永胜, 尹京苑, 甘卫军, 陈桂华. 2005. 川西地区小震重新定位及其活动构造意义[J]. 地球物理学报, **48**(3): 629-636.
- Zhu A L, Xu X W, Zhou Y S, Yin J Y, Gan W J, Chen G H. 2005. Relocating of small earthquakes in western Sichuan, China and its implications for active tectonics[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **48**(3): 629-636 (in Chinese).
- 朱桂芝, 祝意青, 唐文, 程宏宾. 2004. 河西地区重力动态变化二维离散多尺度分解[J]. 大地测量与地球动力学, **24**(1): 46-49.
- Zhu G Z, Zhu Y Q, Tang W, Cheng H B. 2004. Multiscale decomposition of 2D discrete wavelet of dynamic gravity variation in Hexi region[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **24**(1): 46-49 (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 M8.0 earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(10): 2538-2546 (in Chinese).
- 祝意青, 苏琴, 梁伟锋, 刘芳. 2010. 川西地区重力变化与汶川地震[J]. 大地测量与地球动力学, **30**(2): 1-5.
- Zhu Y Q, Su Q, Liang W F, Liu F. 2010. Gravity variation of western Sichuan and Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **30**(2): 1-5 (in Chinese).
- Boschetti F, Hornby P, Horowitz F G. 2001. Wavelet based inversion of gravity data[J]. *Exploration Geophysics*, **32**(1): 48-55.
- Burchfiel B C. 2003. New technology: New geological challenges[J]. *Geol Soc Amer Today*, **14**(2): 4-10.
- Cooper G. 2004. The stable downward continuation of potential field data[J]. *Exploration Geophysics*, **35**(2): 260-265.
- Fedi M, Florio G. 2002. A stable downward continuation by using the ISVD method[J]. *Geophys J Int*, **151**(1): 146-156.
- Møller M J, Olsen H, Ploug C, Strykowski G, Hjorth H. 2007. Gravity field separation and mapping of buried quaternary valleys in Lolland, Denmark using old geophysical data[J]. *J Geodyn*, **43**(2): 330-337.