

祝意青,徐云马,吕弋培等. 龙门山断裂带重力变化与汶川 8.0 级地震关系研究. 地球物理学报, 2009, 52(10): 2538~2546, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.012

Zhu Y Q, Xu Y M, Lü Y P, et al. Relations between gravity variation of Longmenshan fault zone and Wenchuan M_s 8.0 earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(10): 2538~2546, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.012

龙门山断裂带重力变化与汶川 8.0 级地震关系研究

祝意青^{1,2}, 徐云马², 吕弋培³, 李铁明⁴

1 中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量学重点实验室, 武汉 430077

2 中国地震局第二监测中心, 西安 710054

3 四川省地震局, 成都 610000

4 中国地震局地质研究所, 北京 100029

摘要 利用成都地区 1996~2008 年绝对重力和相对重力观测资料获得区域重力场时空动态变化结果, 系统分析了龙门山断裂带重力场变化特征及其与汶川 8.0 级地震的关系。①重力变化与龙门山断裂构造活动存在密切空间联系, 重力测量较好地反映了伴随活动断层的物质迁移和构造变形引起的地表重力变化效应。②成都地区重力场动态图像较完整地反映了 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震孕育、发生过程中出现的流动重力前兆信息。③映秀及北川重力点值时序变化累积量达 $120 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 较好地反映了汶川地震前映秀和北川两个极震区附近的重力测点随时间的剧烈波动性上升变化。④汶川地震前, 龙门山断裂带东侧的四川盆地相对稳定, 而较显著的重力变化发生在龙门山断裂带西侧的川西高原上。

关键词 龙门山断裂带, 汶川地震, 重力异常, 地壳运动, 构造活动

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.012

中图分类号 P315

收稿日期 2009-04-30, 2009-09-27 收修定稿

Relations between gravity variation of Longmenshan fault zone and Wenchuan M_s 8.0 earthquake

ZHU Yi-Qing^{1,2}, XU Yun-Ma², LÜ Yi-Pei³, LI Tie-Ming⁴

1 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2 Second Crust Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, China

3 Seismological Bureau of Sichuan Province, Chengdu 610000, China

4 Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract The observed results of repeated absolute and relative gravity measurements in Chengdu arear during 1996~2008 are systemically analyzed, and then discuss the relationship between gravity variation of Longmenshan fault zone and Wenchuan M_s 8.0 earthquake. The results show as follows. ①The change of gravity field is closely relative to tectonic movement of Longmenshan fault zone. The change of surface gravity field caused by the active faults associated with the mass transfer and structural deformation can be effectively reflect by gravity measurements. ②The dynamic images of gravity field in Chengdu arear base on absolute gravity measurements can express the precursory gravity information during the seismogenic process of the Wenchuan M_s 8.0 earthquake. ③The temporal changes' value of gravity point (Yingxiu, Beichuan) cumulate to $120 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ shows that gravity field near meizoseismal region have

基金项目 国家自然科学基金项目(40874035)和中国地震局“中国大陆 7.8 级大地震中长期危险性预测研究”项目资助。

作者简介 祝意青, 男, 1962 年生, 研究员, 主要从事重力学与地球动力学及地震预测研究. E-mail: zhuyiqing@163.com

fast increased after the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake. ④ Before Wenchuan earthquake, the gravity anomaly in the Sichuan Basin on the east side of Longmenshan fault zone is relative stability, and the gravity anomaly in the West Sichuan Plateau on the west side of Longmenshan fault zone is significant changes.

Keywords Longmenshan fault zone, Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake, Gravity anomaly, Crust movement, Tectonic movement

1 引言

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^[1~4]. 1996 年以来,为监测成都地区与地震有关的重力变化,四川省地震局每年用两台高精度 LCR-G 型重力仪在龙门山断裂带上开展了地震重复重力测量,已获得了 1996~2008 年 13 期的流动重力观测结果. 为了对成都地区重力测量提供绝对基准,以及监测成都地震基准台的绝对重力变化,中国科学院测量与地球物理研究所、国家测绘局第一测量大队、中国地震局地震研究所用 FG5 高精度绝对重力仪,于 1996、2001、2002、2003、2007 及 2008 年在该地区进行了多期成都地震基准台的绝对重力重复测量^[5,6]. 这为地区重力变化与地震关系的研究该提供了重要的基础观测资料. 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级大震发生在龙门山断裂带上的成都地震重力测网附近,流动重力较好地观测到震中附近及龙门山断裂带上的重力变化.

2 测区概况及资料处理

龙门山断裂带地处青藏高原东部边缘,主要由 3 条断裂组成,自西往东分别为后山断裂(茂汶—汶川断裂)、中央断裂(北川—映秀断裂)和前山断裂(江油—灌县断裂). 龙门山断裂带既是巴颜喀拉地块与华南地块的分界带,又属于中国大陆南北地震构造带的一部分. 龙门山断裂分为南、中、北 3 段(泸定—灌县、灌县—北川、北川—广元段),历史上中强地震主要集中在中南段,北段地震活动水平十分弱. 根据历史文字记载及现代地震仪器记录,龙门山断裂北段北川以北未发生过 6 级以上地震,而断裂的中南段在过去的约 350 年中至少发生过 4 次 6~ $6\frac{1}{2}$ 级强震,分别是 1657 年 4 月 21 日汶川 $6\frac{1}{2}$ 级、1941 年 6 月 12 日康定金汤 6 级、1958 年 2 月 8 日北川 $6\frac{1}{4}$ 级、以及 1970 年 2 月 24 日大邑西 6.3

级地震. 图 1 是根据实测重力点绘制的重力测量路线及构造略图,监测网跨越了龙门山断裂带.

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,采用经典平差计算方法. 数据处理的关键是将成都地震基准台的绝对重力观测资料与流动重力观测资料相结合,以绝对重力点作为统一起算基准,在此基础上严密、可靠地解算出各流动重力点的变化,从而获得成都地区重力场的动态变化. 绝对重力资料处理中作了地球潮汐、光速、局部气压、极移、垂直梯度等改正,相对重力资料处理中作了固体潮、气压、一次项、仪器高等改正.

由于成都重力网的复测时间与成都地震基准台绝对重力的观测时间不同步,所以我们对成都地震基准台绝对重力值进行了内插^[5,6],求取每期重力基准的起始值.

各期资料的平差精度见表 1. 重力点值的平均精度为 $(9.2 \sim 14.8) \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,观测资料可靠.

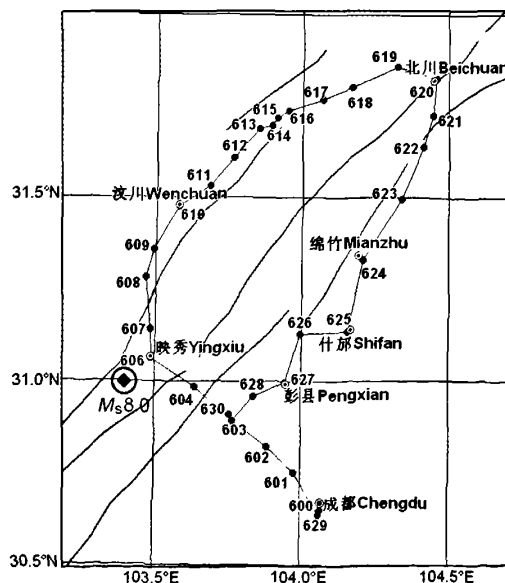


图 1 龙门山地区重力测量路线及构造略图

Fig. 1 The gravity surveying route and tectonic outline of Longmen Mountain area

表 1 成都地区重力测量情况(LCR—G 型重力仪)

Tab. 1 Accuracies of the gravimetry in Chengdu area (gravity meter LCR-G)

使用仪器	观测时间	点值平均精度	使用仪器	观测时间	点值平均精度
G793、G854	1996-05	12.9	G793、G854	2003-04	12.8
G999、G1027	1997-04	13.6	G793、G1003	2004-05	13.6
G999、G1003	1998-06	11.7	G793、G1003	2005-05	14.8
G999、G1003	1999-06	12.7	G793、G1003	2006-03	12.2
G829、G843	2000-05	11.8	G829、G843	2007-06	10.8
G999、G1003	2001-05	14.5	G1003、1132	2008-07	9.2
G793、G854	2002-04	13.9			

3 区域重力场的时空动态演化特征

在深入研究成都地区(30.5°N~31.9°N, 103.4°E~1104.5°E)相邻两期区域重力场的动态图像后(图 2),认为重力场变化有如下特征:

第一,重力场变化的时段划分.从图 2 可以看出,重力变化在有些年份显著,有些年份不显著.我们把变化值在 $(-30\sim+30)\times 10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 之间,且正负变化异常区的范围都比较小的时段,称为无显著变化时段.无显著变化阶段,重力变化平缓,如 1996~1997、1997~1998、1999~2000、2006~2007 四个时段.其他时段均有一定的重力变化,其中 2003~2004 时段,重力正值变化与负值变化最大差异值达 $90\times 10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 之多,可认为是有显著变化的时段.

第二,显著变化时段的重力场分布特征.重力场在不同时段在空间分布上表现出明显的差异性.无显著变化时段,空间分布比较分散,没有明显的规律性.在显著变化时段,重力场空间分布则出现有规律的变化和相对集中性.如:2001~2002、2003~2004、2004~2005、2005~2006 年.尤其是 2003~2004 年,重力场出现区域性的趋势变化,重力变化自西向东逐渐增强,表现为龙门山断裂带以西的川西高原重力负值变化,龙门山断裂带以东的四川盆地重力正值变化,并沿龙门山断裂带形成重力变化高梯度带.

第三,重力变化与构造活动的关系.多年来的重力场时空动态变化表明,成都地区重力变化比较剧烈,重力变化波动性比较大,剧烈活动期年变化差异运动量大都在 $60\times 10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 以上.由重力变化与断裂分布可以看出:在重力变化显著时段,重力变化等值线的基本走向总体上与呈 NE 向的龙门山断裂

带走向基本一致.

第四,虽然区域重力场处于动态变化之中,等值线图具有复杂多样性,但从等值线图在时间发展上的变化,仍可以看出一个明显的特征,即区域重力场有序性增强的变化过程中,伴随着出现了映秀和北川两个局部重力异常变化区.深入分析这一变化有着重要意义,映秀和北川是这次汶川地震破坏最严重的两个极震区.

综上所述,汶川地震孕育发生阶段,成都地区重力场出现自西向东有序性变化的区域性重力异常,并产生了与龙门山断裂带密切相关的重力变化高梯度带及与地震孕育发生有关的映秀局部重力异常区.

2008 年 7 月只监测到四川盆地部分测点.2008 年 5 月汶川地震发生后,龙门山断裂带及其西侧的重力点由于道路不畅通,加之房屋毁损、地表严重变形,大部分测点无法观测.

4 较长时期的重力变化

4.1 重力场变化

为了进一步分析成都地区较长趋势的重力变化,了解重力变化的累计量,分别绘制了 1996~2001、2001~2004、2004~2007 和 1998~2007 年重力变化等值线图(图 3).

(1) 1996~2001 年重力变化总体趋势自西向东逐渐减小,并在映秀附近出现 $70\times 10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的局部重力异常变化;2001~2004 和 2004~2007 年重力变化十分剧烈,整个测区存在 $120\times 10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 以上的重力差异变化,它突出反应了汶川地震前区域重力场的剧烈变化.2001~2004 及 2004~2007 年的重力变化,不仅反映了自西向东重力逐渐增大或减小的有序性区域性重力异常剧烈变化,而且还反映了北川、映秀以及彭县的局部重力异常变化,沿

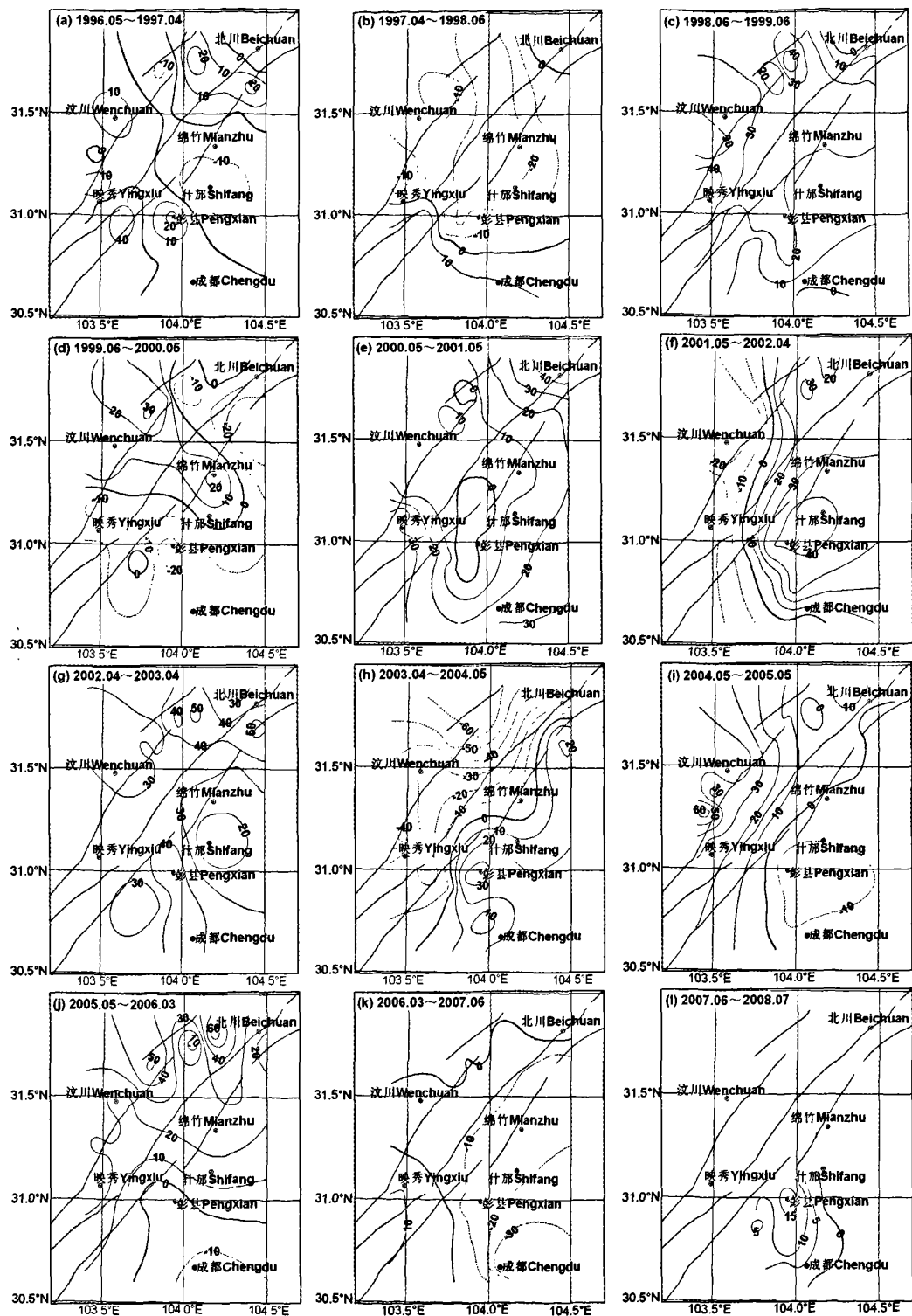


图 2 成都地区重力变化等值线图(单位: $10^{-8}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)
(a) 1996.05~1997.04;(b) 1997.04~1998.06;(c) 1998.06~1999.06;(d) 1999.06~2000.05;(e) 2000.05~2001.05;
(f) 2001.05~2002.04;(g) 2002.04~2003.04;(h) 2003.04~2004.05;(i) 2004.05~2005.05;
(j) 2005.05~2006.03;(k) 2006.03~2007.06;(l) 2007.06~2008.07.

Fig. 2 Contours of gravity variation in Chengdu area from 1996 to 2006(Unit: $10^{-8}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)

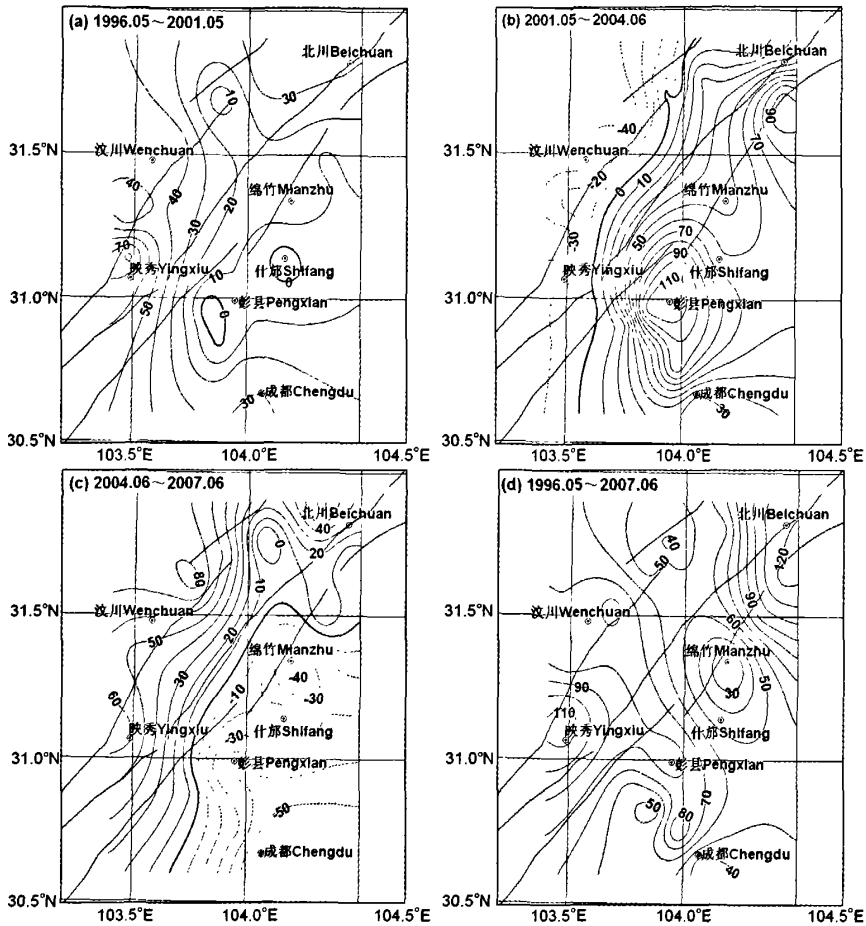


图3 成都地区较长时期重力变化等值线图(单位: $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

(a) 1996.06~2001.05; (b) 2001.05~2004.06; (c) 2004.06~2007.06; (d) 1996.05~2007.06.

Fig. 3 Contours of the longer trend gravity variation in Chengdu area (Unit: $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

龙门山断裂带出现的重力变化高梯度带反映了强震孕育发生过程中龙门山断裂构造活动活跃。

(2) 1996~2007年,整个测区重力正值变化,重力变化主要表现局部重力异常区的剧烈变化。映秀及北川地区重力出现 $110 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 以上的局部重力剧烈变化,重力场变化较好地反映了这两个地区震前存在显著的深部物质运移和密度变化。

4.2 重力点值时序变化

重力点值时序变化能较好地突出异常测点的动态变化。对映秀和北川两个极震区附近的测点,我们绘制了重力点值变化时序图(图4)。

(1) 映秀附近的606及607两个测点,自1996年以来两测点准同步地呈波动性上升变化。1996~1998年重力变化平缓,1998~2001年快速上升达 $60 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 之多,2001~2006年波动性上升累积量分别为 $104 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $113 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;

2006~2007年缓慢上升变化,上升累积量分别为 $114 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $118 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。表明该地区自1998年以来构造活动剧烈,引起地下物质密度变化,造成地面重力急剧增加。

(2) 北川附近的620及621两个测点,自1996年以来两测点也呈准同步地呈波动性上升变化。1996~2000年重力变化平缓,2000~2003年快速上升累积量分别为 $100 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $107 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 2003~2007年波动性缓慢上升,上升累积量分别为 $121 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $119 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,该地区重力变化出现异常的时间相对较晚,但上升速度较快,重力上升累积量与映秀附近测点基本一致。

映秀及北川附近部分测点时间的变化,较好地反映汶川地震前映秀和北川两个极震区附近的重力测点随时间的剧烈波动性上升变化,重力累积变化量为 $(110 \sim 120) \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

4.3 龙门山断裂带两侧的相对重力时间变化

为了分析龙门山断裂带的深部构造活动,我们绘制了龙门山断裂带东、西两侧的重力点均值随时间的变化和龙门山断裂带两侧(西侧相对东侧)重力相对差异运动随时间变化的曲线图(图 5)。

(1)我们把断裂带西侧的 608、609、610、611、612、613、614、615 等 8 个重力点求取均值变化作为川西高原的重力变化,断裂带东侧的 623、624、625、626、627、628、630、603 等 8 个重力点求取均值变化作为四川盆地的重力变化。可以看出(图 5a),断裂带东、西两侧,1996~1998 年重力变化平缓,1998~2003 年波动式上升达 $60 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 之多;2003 年后,东、西两侧重力变化出现明显不一致,断裂带东侧的四川盆地重力变化平缓,断裂带西侧的川西高原出现先快速下降(2003~2004 年),后快速上升(2004~2006 年)的变化,重力变化达 $80 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 之多。这表明,汶川地震前,四川盆地相对稳定,而较显著的重力变化发生在龙门山断裂带以西的川西高原上。

(2)把上述断裂带西侧相对于东侧的相对重力

变化作为龙门山断裂带两侧的重力差异运动。可以看出(图 5b),1996~1999 年断层两侧基本无变化,1999~2001 年断层西侧相对上升达 $30 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,2001~2004 年快速下降达 $90 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 之多,2004~2006 年又快速上升,2006~2007 年变缓。这清楚地显示出断裂两侧的重力变化由稳态→加速下降→转折上升(发震)的过程。龙门山断裂带两侧显著的相对重力异常变化较好地反映了汶川地震孕育发生过程中的时序进程变化。

5 重力变化与汶川 8.0 级地震

流动重力测量反映的是区域重力场的非潮汐变化信息,地壳厚度的差异、地壳密度的变化和地壳深部物质的迁移等构造信息都可由重力场的变化反映出来,重力场的时空动态演化特征可作为研究现今地壳构造与地震孕育发生相互关联提供一定的根据。

2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s 8.0$ 强烈地震发生在龙门山断裂带上,该地震是近 50 年以来发生在我国

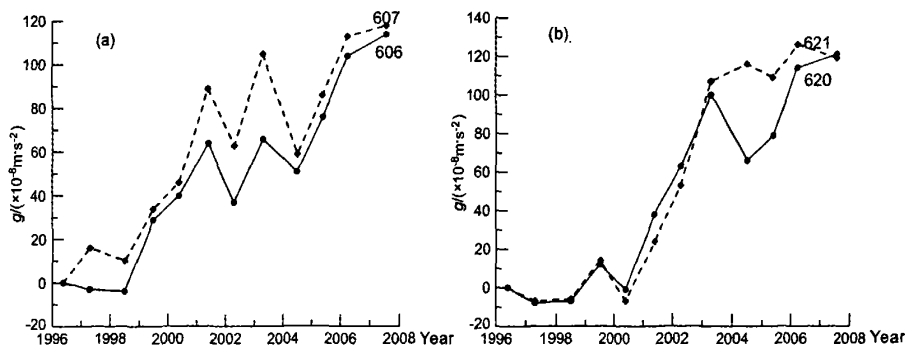


图 4 部分重力点值变化时序图

(a) 映秀附近测点; (b) 北川附近测点。

Fig. 4 Gravity time-variation at some station

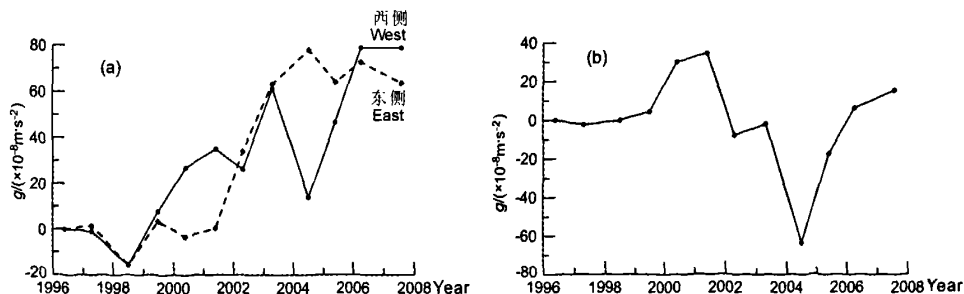


图 5 龙门山断裂两侧的重力差异变化图

(a) 断层两侧的重力点均值时变曲线; (b) 断层两侧的相对重力变化。

Fig. 5 Curves of relative gravity difference in bilateral side of Longmen Mountain faults zone

大陆内部破坏性最严重的一次地震. 分析成都地区重力场的时空动态演化可以发现, ①2001 年以前, 1 年尺度的重力场变化较为平缓. 2001 年后重力场主要表现为自西向东区域性有序性变化及映秀、北川局部异常的出现, 重力变化较显著的梯度带走向为北东向与龙门山断裂带走向基本一致. 2001~2002 年重力变化表现为自西向东逐渐增加的有序性变化, 这可能是 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震后巴颜喀拉地块东部向东的运动增强引起的大空间尺度的趋势性变化^[7,8]; 2003~2004 年重力变化表现为更为强烈的自西向东逐渐增加的有序性变化, 并形成与龙门山断裂带走向基本一致的重力变化高梯度带; 2004~2005 年重力变化反向, 重力变化主要表现为自西向东逐渐减小的有序性变化及映秀附近局部重力异常区的出现; 2005~2006 年重力变化主要表现为北川附近局部重力异常变化. 重力场变化由大空间尺度的自西向东趋势性增加发展为自西向东趋势性减小及映秀和北川局部重力异常的出现, 反映了大震前的区域构造活动剧烈和局部应力集中. ②1996~2001 年、2001~2004 年和 2004~2007 年, 3 年以上尺度的重力变化显示出重力变化具有一定的趋势累积变化, 尤其是 2001~2004 年重力场整体表现自西向东趋势性增加的剧烈变化, 重力差异变化多达 $150 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 并沿龙门山断裂带形成重力变化高梯度带, 2004~2007 年重力变化仍很剧烈, 重力差异变化达 $120 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 之多, 但变化趋势相反. 汶川地震发生在龙门山断裂带的重力变化高梯度带上, 在时间序列上, 地震发生在重力场的反向恢复变化过程中. 这与以往震例研究的结果, 地震一般发生在重力场的反向恢复变化过程中的情况基本一致^[9~11]. ③1996~2007 年较长时期的背景性重力变化较好地突出了映秀和北川两个极震区的显著重力异常. 发生在全国其他地区的强震, 震前重力场也都出现了显著的异常变化, 如 1976 年唐山 7.8 级、2001 年昆仑山口西 8.1 级地震前, 震源区及附近均出现显著的重力异常变化.

重力点值时序变化和龙门山断裂两侧的重力变化较好地反映了汶川地震孕育发生的重力变化过程. ①重力点值时序变化在空间上表现出一定的有序, 先是映秀出现快速上升变化, 后是北川, 2006 年同步出现快速上升, 2007 年同步出现上升速率减缓. 地震发生在重力快速变化后的转缓变化过程中. 汶川 8 级地震的震源机制解也表明, 地震破裂面是从震中映秀开始破裂向北东方向传播, 后是北川

破裂, 形成沿映秀—北川断裂分布的地表破裂带^[12,13]. ②龙门山断裂东、西两侧的重力变化, 1996~2003 年准同步波动式上升, 2003~2007 年断裂东侧的四川盆地相对稳定, 而震前较显著的重力变化发生在龙门山断裂带以西的川西高原上. 川西高原是低密度区, 由于地壳结构的软弱^[14,15]而发生强震前地壳变形与密度变化引起的重力效应; 四川盆地是高密度区, 由于刚性好、不易变形而对川西高原的向东扩展起着阻挡作用.

断裂带两侧的重力相对变化主要是构造应力作用下活动断层两盘的物质变迁和构造变形差异运动产生的重力效应. 在四川地区活动构造断裂带附近, 尤其是龙门山断裂带附近, 布格重力异常图和地壳等厚图都表现为梯度陡变带, 说明龙门山断裂带地表构造和深部构造都位于变异带上, 是物质变迁和构造变形差异运动强烈的地带^[15,16]. 龙门山断裂带两侧的重力相对差异运动清楚地显示出断裂两侧的重力变化由稳态→加速下降→转折上升(发震)的过程, 较好地反映了区域构造应力场作用下断层构造活动引起的重力效应. 龙门山构造活动断裂带由于布格重力异常和密度分布存在明显差异, 易产生急剧的重力变化, 最有利于应力的积累而孕育强震.

6 结 语

地震从孕育到发生是一个从应力积累到能量释放的过程. 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, 致使地壳内部密度发生变化, 从而使得该处地表的重力值发生变化. 成都地区 1996~2008 年的重力观测资料较完整地反映了区域重力场时空动态演化特征与龙门山断裂带构造活动及汶川 8.0 级地震的关系.

(1)重力场变化与龙门山断裂构造活动密切相关. 在显著变化时段, 区域重力场空间分布出现自西向东的有序性变化和沿龙门山断裂带的重力变化高梯度带; 汶川地震前, 龙门山断裂带东侧的四川盆地相对稳定, 而较显著的重力变化发生在龙门山断裂带西侧的川西高原上, 这表明汶川 8.0 级大震前的主要构造变形与能量积累在震中西侧的川西高原. 龙门山断裂带两侧的重力相对差异运动清楚地显示出断裂两侧的重力变化由稳态→加速下降→转折上升(发震)的过程.

(2)重力变化对汶川地震有较好的前兆反映. 我

们曾利用网络重力资料给出了川滇地区重力场变化图像及其与汶川大地震的关系^[17],汶川地震前区域重力场呈现一种空间大尺度范围内的有序性变化和相对集中性,地震发生在汶川—成都的重力变化高梯度带与龙门山断裂交汇附近地区。四川成都重力网是跨龙门山断裂带的独立小网。成都重力网重力场变化,较好地反映了自西向东重力逐渐增大或减小的有序性重力异常变化及映秀和北川的局部重力异常变化,汶川震中位于重力变化高梯度带上。成都重力网由于控制范围较小,只能反映龙门山断裂的急剧变化和震中附近的局部重力异常变化,不能完整地给出大震活动引起的大范围区域重力场变化图像^[17~19]。虽然这两种资料的时空分辨率不同,但反映汶川大地震孕育过程基本一致。

(3)映秀及北川重力点值时序变化累积量达 $120 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,汶川地震前 10 年重力开始出现上升变化,5 年前活动最为剧烈,而临震前的活动则比较弱。这表明大地震的应变积累是一个长期的过程,很可能在此次汶川大地震孕育的最后阶段,在孕震区的龙门山断裂带附近区域存在地壳内部密度变化趋于极限后难以再发生显著变化的相持阶段。经分析,成都重力网每年的复测时间相对固定在少雨的 4~6 月进行,以减少观测资料受季节变化的影响。距汶川震中以东 17 km 处建有紫坪铺水库(在都江堰与映秀之间)^[20],水域区离 604 和 606 号测点的距离均大于 5 km,根据三峡水库蓄水前后的精密重力测量和坝区库水荷载、地壳变形、地下水位变化以及降雨等各种因素引起的重力效应研究表明,水库蓄水引起的重力效应存在,但量级和范围均有限,其影响范围离库岸约 5 km;地下水位变化的重力效应只存在于局部地带,不具区域性^[21]。而且紫坪铺水库 2005 年 9 月开始蓄水^[20],而重力变化主要发生在 2005 年 9 月以前,这表明重力变化是可靠的。

(4)汶川 8.0 级地震发生在一条现今并不活动的龙门山构造带上,大震发生前地表变形不显著,未见有浅表层异常活动,即浅层过程与地震发生的深层过程并不匹配^[8]。龙门山断裂带附近重力出现显著变化,较好地反映了这次强烈地震“孕育”、发生和发展的深层动力过程。①青藏高原内部的地壳物质向东扩展,由于受到强硬的四川盆地的阻挡,中、下地壳塑性物质以塑性流变的方式在龙门山及其以西的川西高原堆积,并有可能向四川盆地以北和以南的地区“流出”,导致高原的中、下地壳显著增厚,引起地下物质密度增加,使龙门山产生重力上升变化。

②中、下地壳和地幔盖层物质以地壳低速层、低阻层(深 20~25 km)为第一滑移面,以上地幔软流层顶面为第二滑移面,且在四川盆地深部“刚性”物质阻隔下,深部壳、幔物质以高角度在龙门山构造带和四川盆地的耦合地带向上运移^[8],引起龙门山断裂带附近重力显著变化。

参考文献(References)

- [1] 孙和平. 重力场的时间变化与地球动力学. 中国科学院院刊, 2004, **19**(3): 189~193
Sun H P. Temporal variation of gravity field and geodynamics. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (in Chinese)*, 2004, **19**(3): 189~193
- [2] Hunt T M. Gravity variations associated with the 1968 Inangahua earthquake. *J. Geo I. Geophys*, 1970, **13** (4): 1050~051
- [3] Li R H, Fu Z. The gravity changes before and after the Tangshan earthquake ($M = 7.8$) and dilatation process. *Tectonophysics*, 1983, **97**: 159~169
- [4] 陈运泰, 顾浩鼎, 卢造勋. 1975 年海城地震和 1976 年唐山地震前后的重力变化. 地震学报, 1980, **2**(1): 21~31
Chen Y T, Gu H D, Lu Z X. Variations of gravity before and after the Haicheng earthquake, 1975 and the Tangshan earthquake, 1976. *Acta Seismologica Sinica (in Chinese)*, 1980, **2**(1): 21~31
- [5] 张为民, 王 勇, 詹金刚等. 1996~2003 年中国大陆高精度绝对重力观测. 地球物理学进展, 2005, **20**(1): 204~210
Zhang W M, Wang Y, Zhan J G, et al. High accuracy absolute gravity observation in Chinese main land during 1996~2003. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2005, **20**(1): 204~210
- [6] 邢乐林, 李 辉, 何志堂等. 成都基准站绝对重力复测结果分析. 大地测量与地球动力学, 2008, **28**(6): 38~42
Xing L L, Li H, He Z T, et al. Analysis of repeatet absolute gravity surveying results at Chengdu seismostation. *Journal of Geodesy and Geodynamics (in Chinese)*, 2008, **28**(6): 38~42
- [7] 江在森, 方 颖, 武艳强等. 汶川 8.0 级地震前区域地壳运动与变形动态过程. 地球物理学报, 2009, **52**(2): 505~518
Jiang Z S, Fang Y, Wu Y Q, et al. The dynamic process of regional crustal movement and deformation before Wenchuan Ms8.0 earthquake. *Chinese J. Geophys (in Chinese)*, 2009, **52** (2): 505~518
- [8] 滕吉文, 白登海, 杨 辉等. 2008 年汶川 Ms8.0 地震发生的深层过程和动力学响应. 地球物理学报, 2008, **51**(5): 1385~1402
Teng J W, Bai D H, Yang H, et al. Deep processes and dynamic responses associated with the Wenchuan Ms8.0 earthquake of 2008. *Chinese J. Geophys (in Chinese)*, 2008, **51**(5): 1385~1402
- [9] 祝意青, 王双锦, 江在森等. 昆仑山口西 8.1 级地震前重力变化. 地震学报, 2003, **25**(3): 291~297

- Zhu Y Q, Wang S X, Jiang Z S, et al. Gravity variation before Kunlun mountain pass western $M_{s8.1}$ earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2003, **25**(3): 291~297
- [10] 祝意青, 李 辉, 朱桂芝等. 青藏块体东北缘重力场演化与地震活动. *地震学报*, 2004, **26**(增): 71~78
- Zhu Y Q, Li H, Zhu G Z, et al. Gravitational field evolution and seismicity in the northeastern margin of Tibetan Plateau. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2004, **26**(Suppl.): 71~78
- [11] 江在森, 张 希, 祝意青等. 昆仑山口西 $M_{s8.1}$ 地震前区域构造变形背景. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, **33**(增刊): 163~172
- Jiang Z S, Zhang X, Zhu Y Q, et al. Regional tectonic deformation background before $M_{s8.1}$ earthquake on the west of Kunlun Mountain pass. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2003, **33**(B04): 163~172
- [12] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青等. 汶川 $M_{s8.0}$ 地震地表破裂带及其发震构造. *地震地质*, 2008, **30**(3): 597~629
- Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. The $M_{s8.0}$ Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, **30**(3): 597~629
- [13] 王卫民, 赵连锋, 李 娟等. 四川汶川 8.0 级地震震源过程. *地球物理学报*, 2008, **51**(5): 1403~1410
- Wang W M, Zhao L F, Li J, et al. Rupture process of the $M_{s8.0}$ Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(5): 1403~1410
- [14] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽等. 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. *地球物理学报*, 2008, **51**(4): 1066~1073
- Zhang P Z, Xu X W, Wen X Z, et al. Slip rate and recurrence intervals of the Longmenshan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(4): 1066~1073
- [15] 楼 海, 王椿镛, 吕智勇等. 2008 年汶川 $M_{s8.0}$ 级地震的深部构造环境. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, **38**(10): 1207~1220
- Lou H, Wang C Y, Lu Z Y, et al. Deep tectonic condition of the $M_{s8.0}$ Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2008, **38**(10): 1207~1220
- [16] 张季生, 高 锐, 曾令森等. 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*, 2009, **52**(2): 572~578
- Zhang J S, Gao R, Zeng L S, et al. Relationship between characteristics of gravity and magnetic anomalies and the earthquake in Longmenshan range and adjacent areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2): 572~578
- [17] 祝意青, 梁伟锋, 徐云马. 重力资料对 2008 年汶川 $M_{s8.0}$ 地震的中期预测. *国际地震动态*, 2008, (7): 36~39
- Zhu Y Q, Liang W F, Xu Y M. Medium-Term prediction of $M_{s8.0}$ earthquake in Wenchuan, Sichuan by mobile gravity. *Recent Developments in World Seismology* (in Chinese), 2008, (7): 36~39
- [18] 贾民育, 詹洁辉. 中国地震重力监测体系的结构与能力. *地震学报*, 2000, **22**(4): 360~367
- Jia M Y, Zhan J H. The structure and ability of the china seismological gravity monitoring system. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2000, **22**(4): 360~367
- [19] 祝意青, 王庆良, 徐云马. 我国流动重力监测预报发展的思考. *国际地震动态*, 2008, (9): 19~25
- Zhu Y Q, Wang Q L, Xu Y M. Thoughts on the development of Earthquake Monitoring and Prediction in mobile gravity. *Recent Developments in World Seismology* (in Chinese), 2008, (9): 19~25
- [20] 张致伟, 程万正, 阮 祥等. 汶川 8.0 级地震前龙门山断裂带的地震活动性和构造应力场特征. *地震学报*, 2009, **31**(2): 117~127
- Zhang Z W, Cheng W Z, Ruan X, et al. Seismicity and tectonic stress of the Longmenshan fault zone before 2008 Wenchuan $M_{s8.0}$ earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2009, **31**(2): 117~127
- [21] 孙少安, 项爱民, 朱 平等. 三峡水库首次蓄水引起的重力变化及其机制的初步研究. *地震学报*, 2006, **28**(5): 485~492
- Sun S A, Xiang A M, Zhu P, et al. Gravity change and its Mechanism after the First water impoundment in Three Gorges Project. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2006, **28**(5): 485~492

(本文编辑 汪海英)