

谈洪波、申重阳、邢乐林等,2013,玉树 $M_s 7.1$ 地震同震效应模拟与绝对重力检验,中国地震,29(1),116 ~ 123。

玉树 $M_s 7.1$ 地震同震效应模拟 与绝对重力检验

谈洪波¹⁾ 申重阳¹⁾ 邢乐林¹⁾ 李辉¹⁾ 陈石²⁾

1) 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室),武汉市洪山侧路 40 号 430071

2) 中国地震局地球物理研究所,北京 100081

摘要 利用玉树震后地质调查获取的地表破裂位移,参考余震精定位结论以及地震波和 InSAR 反演结果,构建了玉树 $M_s 7.1$ 地震发震断层模型。基于弹性-粘弹分层介质模型中平面矩形位错理论,考虑介质自重的影响,模拟了玉树地震同震形变和重力变化。图像显示,玉树绝对重力点刚好位于同震重力变化极值附近,变化量达到 $25.02 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。通过对震前重力变化以及对两台 FG-5 绝对重力仪的一致性进行讨论,认为实测玉树台 $27.2 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 为同震重力变化,这与基于位错理论的同震模拟结果一致,是对位错理论近场变化的 1 次很好的验证。

关键词: 玉树地震 位错 同震模拟 绝对重力

[文章编号] 1001-4683(2013)01-0116-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

2010 年 4 月 14 日,在青海省玉树藏族自治州发生了 $M_s 7.1$ 地震和 $M_s 6.3$ 强余震,主震震中位置为(33.2°N、96.6°E),震源深度约为 14km(张勇等,2010)。此次地震造成重大人员伤亡,是 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 大地震之后,我国大陆发生的首次 $M 7.0$ 以上地震事件。地震发生于巴彦喀拉块体南边界的甘孜-玉树断裂上,该断裂为一近乎直立的左旋走滑断裂,历史上曾发生过多强震(陈立春等,2010)。地震发生后,中国地震局及时组织进行地震综合科学考察,这其中包括地表破裂带调查和绝对重力测量工作,获取了宝贵的同震位移和重力变化数据。因此,很有必要对这些数据进行相应的模拟与解释。

利用绝对重力仪观测数据检测位错理论同震变化已有先例,如 1998 年日本岩手县 $M 6.1$ 地震时利用绝对重力仪清楚记录了同震重力变化的时间序列,分析结果显示同震重力变化约为 $-6 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,该结果通过平面位错理论可得到较好解释(Tanaka et al, 2001)。Imanishi 等(2004)利用 3 台超导重力仪记录到 2003 年日本十胜冲 $M 8.0$ 地震引起

[收稿日期] 2012-09-14; [修定日期] 2012-11-01

[项目类别] 国家自然科学基金(41104049)、中国地震局青年震情跟踪课题(2012020207)、地震行业科研专项(201008001)、中国地震局玉树地震综合科学考察(2060302)共同资助

[作者简介] 谈洪波,男,1983 年生,硕士,助理研究员,主要从事断层位错运动与重力反演研究。

E-mail: thbhong@163.com

的同震重力变化约 $1 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, 与重力位错理论模拟结果相吻合。王勇等(2004)通过对比分析认为 1996 年丽江 7.0 级地震前后丽江和洱源绝对重力观测结果分别为 $-14.8 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $-10.9 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, 与重力位错理论模拟结果基本一致。以上诸例中测量点离断层均较远, 虽然汶川 $M_s8.0$ 地震时郫县绝对重力点离断层稍近, 但其刚好位于同震重力正负变化的零线附近, 实际测得值为 $0 \pm 2.5 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, 这对利用位错理论来检验同震重力变化十分不利(申重阳等, 2008; 谈洪波等, 2009b)。而玉树绝对重力测点距玉树地震微观震中约 32km, 离地表破裂带仅约 2km(陈立春等, 2010), 直接受到玉树地震孕育过程的影响, 分析、检验该点震前及同震绝对重力变化对深入了解玉树地震孕育过程无疑具有很好的指导意义。

本文拟充分利用地表破裂数据^①(王继等, 2010), 并参考震源机制解(张勇等, 2010)和余震定位结果(刘巧霞等, 2012), 构建合适的发震断层模型。基于粘弹分层半空间位错理论(Wang et al, 2006), 考虑介质分层、粘滞性和自重效应影响, 模拟研究玉树地震同震形变和重力变化特征, 并对绝对重力观测结果进行检验与分析。

1 同震破裂与发震断层

震后的航空照片和高分辨率卫星影像解译及野外考察表明^①(王继等, 2010), 2010 年 4 月 14 日玉树 $M_s7.1$ 地震的地表破裂带总体走向 300° , 长度约 65km, 破裂带分为两部分, 分别为结隆次级地表破裂带和结古次级地表破裂带。两条次级地表破裂带呈左行左阶羽列, 整体走向 $295^\circ \pm 5^\circ$, 其间无地表破裂段长约 17 km。结隆次级地表破裂带西起扎西才仁家 (33.22611°N 、 96.43863°E), 东止于隆宝湖东南侧色那仁杰家附近 (33.16715°N 、 96.58069°E), 长度约 15 km, 最大同震左旋位移值 0.66 m, 平均同震左旋位移值 0.28 m, 地表破裂带以左旋走滑为主, 带有少量倾向北的正断倾滑分量; 结古次级地表破裂带西起洛荣达村西 (33.10842°N 、 96.75491°E), 整体呈 $295^\circ \pm 5^\circ$ 延伸, 东止于桑卡禅古寺附近 (32.94768°N 、 97.04354°E), 以斜列张性破裂和张剪切破裂为主, 东端部加吉娘村向东到禅古寺附近的地表破裂以羽状排列的 NW 向压剪切破裂为主, 存在明显的逆冲垂直分量, 最大垂直位移可达 0.7m(图 1)。张勇等(2010)通过全球地震台网远震宽频带垂向 P 波波数数据反演给出了玉树地震破裂发生在走向 19° 、倾向南西(SW)(倾角为 83°)、长约 50~70km、宽约 30km 的断层面上, 滑动角总体上为 -4° , 与哈佛大学结果基本一致。周慧芳等(2011)利用近场 InSAR 同震形变对发震断层参数进行的反演结果为: 第 1 段长 25km, 宽 14km, 倾角 75° , 走向 119° ; 第 2 段长 37km, 宽 14km, 倾角 75° , 走向 124° 。刘巧霞等(2012)通过对玉树地震余震重新定位发现, 余震震中沿甘孜-玉树断裂带分布, 断层性质为北东倾向的高角度左旋走滑断层, 长约 97km, 并推断帮洞以东段发震断层宽度约为 12km, 断层倾角为 83° , 帮洞以西段发震断层宽度约为 6.5km, 断层倾角减缓为 63° 。

基于以上研究结论, 重点考虑地表破裂和同震位移分布, 经适度简化后, 构建了本文使用的分段断层模型, 其参数见表 1。

① 徐锡伟, 2011, 青海玉树 7.1 级地震科学考察(地震地质)分队验收研究报告

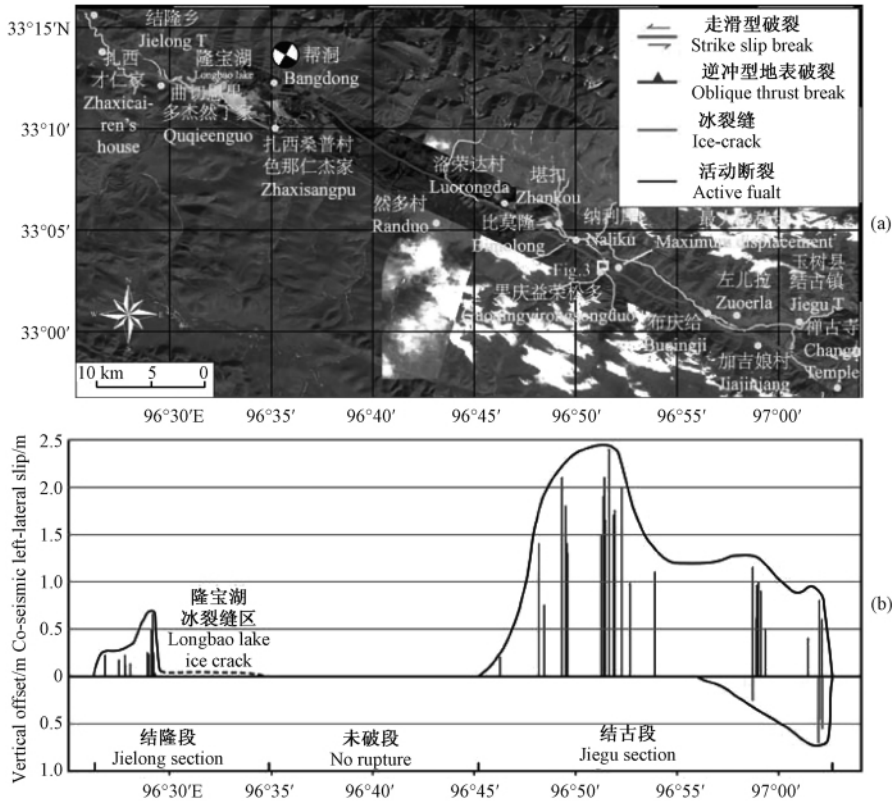


图1 玉树 $M_s 7.1$ 地震地表破裂分布和同震位移分布(据孙鑫喆等(2012))

表1 玉树地震破裂简化模型

分段	分段节点经纬度	长(km)		宽(km)	走向(°)	倾向/倾角(°)	走滑量(m)	倾滑量(m)
		分段长	总长					
结隆段	96.43863°E, 33.22611°N	3.50	17.15	20	289.58	NE/75	0.17	0.0
	96.46829°E, 33.21556°N	2.35			283.69	NE/75	0.32	-0.002
	96.48886°E, 33.21055°N	11.29			295.30	NE/75	0.03	0.0
	96.58069°E, 33.16715°N							
结古段	96.57518°E, 33.19814°N	22.33	59.27	25	296.53	NE/83	0.10	0.0
	96.75491°E, 33.10842°N	9.03			296.82	NE/83	1.40	0.0
	96.82738°E, 33.07179°N	5.74			301.86	NE/83	1.85	0.0
	96.87123°E, 33.04454°N	14.80			294.17	NE/83	0.90	-0.1
	96.99269°E, 32.99004°N	7.36			129.80	WS/83	0.58	0.4
	97.04353°E, 32.94768°N							

2 区域分层介质模型

区域分层介质模型主要参考 crust2.0 模型,并按上地壳、中地壳、下地壳和上地幔分层处理,其模型参数见表2,其中上地幔和下地壳的粘滞系数参考了谭凯等(2007)的结果。

表 2 地壳-上地幔分层结构模型

分层结构	h (km)	v_p ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	v_s ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	η ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	α
上地壳	0.00 ~ 21.52	5.96	3.47	2694.2	∞	1.0
中地壳	21.52 ~ 44.56	6.40	3.70	2850.0	∞	1.0
下地壳	44.56 ~ 67.60	7.10	3.90	3098.4	4.0×10^{19}	0.0
上地幔	67.60 ~ ∞	8.00	4.60	3446.9	1.0×10^{19}	0.0

注: h 为到地表的深度, v_p 为介质中的 P 波波速, v_s 为介质中的 S 波波速, ρ 为介质密度, η 为粘滞系数, α 为介质松弛比, $\alpha=1$ 表示完全弹介质, $\alpha=0$ 表示 Maxwell 黏弹介质

3 玉树地震地表同震效应模拟

基于以上分段断层模型和分层介质模型,考虑介质自重和粘滞性的影响,利用 PSGRN/PSCMP 软件包 (Wang et al,2006),对玉树 $M_s7.1$ 地震地表同震形变和重力变化进行模拟计算,其结果见图 2。

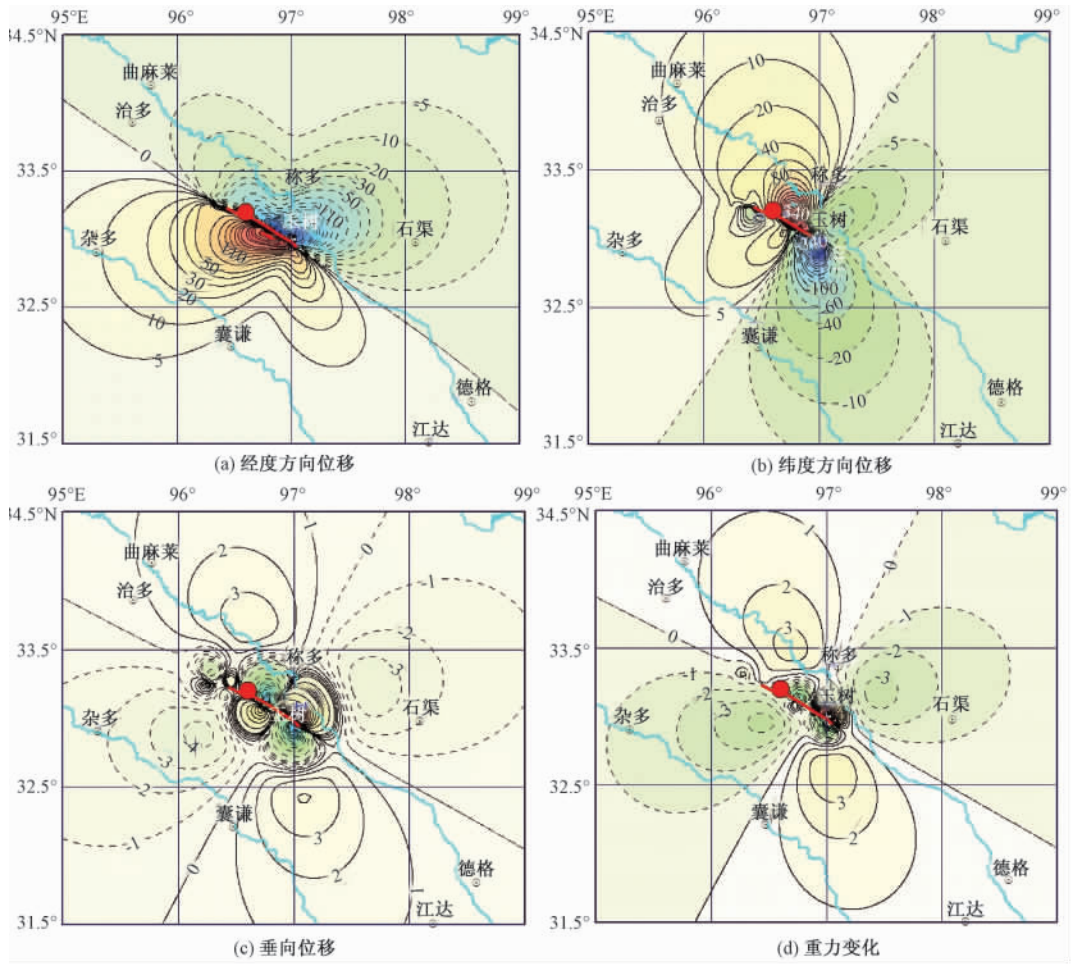


图 2 地表同震效应

形变单位: mm; 重力变化单位: $10^{-8} \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; 红点为微观震中; 红线为地表破裂

地表同震经向位移以发震断层为界(图 2(a)),分成 NE 和 SW 两区域(向东为正),NE 区为负位移,SW 区为正位移,显示出明显的左旋走滑特征,远场等值线具有一定的反对称性。近震区位移较大,最大正值达 430mm,最大负值达 -550mm,位移变化主要集中在断层在地表投影线附近,随距离断层的远近向外迅速衰减;远震区则以近 NEE 和 SWW 方向向外缓慢衰减,至杂多县附近仍有约 9mm 的向东位移。

纬向位移以与断层近乎垂直的 NE-SW 向为界,成 NW 和 SE 两区域分布(向北为正),NW 区为正位移,SE 区为负位移,远场等值线具有一定的反对称性。近震区幅值(80 ~ 350mm, -120 ~ -390mm)快速衰减,远震区衰减较慢,至曲麻莱县附近仍有约 6mm 的向北位移。

垂向位移与重力变化图像类似(垂向位移以指向地心为正)。近震区变化主要集中于断层附近,且以断层为界成正负 4 象限分布,变化幅值在 -190 ~ 130mm 和 $-48 \times 10^{-8} \sim 24 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。远震区变化也呈现正负 4 象限分布,以断层为轴呈现较好的反对称性,且与相邻近震区正负变化相反。杂多县地表出现约 2mm 的抬升,重力值下降 $1 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

4 绝对重力检验

由近场地表重力变化图像可见(图 3),重力变化主要集中于地表破裂带附近,且呈现东强西弱的势态,与地表同震破裂的大小及位置对应较好,结古次级破裂带(33.10842°N 、 96.75491°E) ~ (32.94768°N 、 97.04354°E)附近地表重力变化较大,东北侧最大正变化达 $24 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,西南侧最大负变化达 $-48 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,变化最大值集中于加吉娘村附近,且玉树台绝对重力点刚好位于地表破裂北侧重力变化正极值附近,这对利用绝对重力测量结果检验同震重力变化是十分有利的。

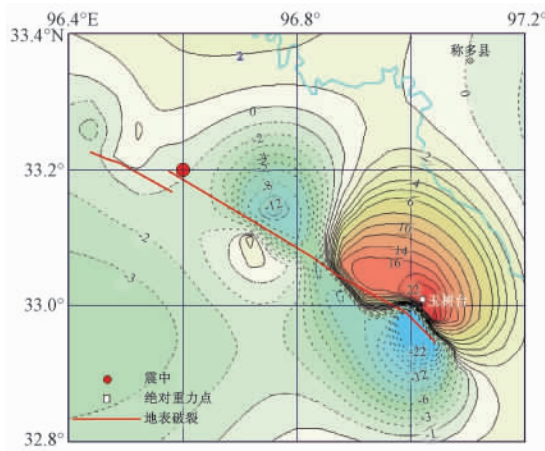


图 3 近场地表重力变化

玉树地震后,中国地震局地震研究所承担了玉树科学考察绝对重力测量任务,获取了玉树绝对重力测点地震前后重力场变化(表 3)。数据采集及后处理采用 Micro-g 公司的 G 软件,对观测结果均经过固体潮、气压、极移、仪器有效高度和海洋负荷等改正,最终各期结果的中误差为 $0.62 \times 10^{-8} \sim 1.00 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。观测资料涉及 FG5-232 和 FG5-214 两套绝对

重力仪。2006年12月及2008年1月FG5-232与FG5-214先后2次在3053#测站进行绝对重力实验比对观测(Xing, 2009)以及2011年的1次比对观测,结果显示2套仪器测量偏差均小于 $2.0 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,不存在系统偏差,说明这2台仪器观测结果具有很好的一致性。另外,目前的位错理论并没有考虑同震引起的地表局部环境变化和重力梯度变化的影响,为消弱这些影响,按照惯例本文给出的是归算到地面1m高度的重力变化值。

从表3给出的绝对重力测量结果来看,地震前2007年5月~2008年5月玉树点绝对重力值变化为 $-0.8 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,变化量很小,说明该区域处于临震锁闭状态。根据汶川 $M_s 8.0$ 地震前成都郫县绝对重力变化(邢乐林等, 2008)和唐山 $M_s 7.8$ 地震前重复重力测量结果(李瑞浩等, 1997)可知,强震发生前重力值表现为持续上升,临震前1~2年重力值增长缓慢或稍有下降,这与玉树地震前重力值变化很小的结论一致。由此可以推断2008年5月29日~2010年4月13日玉树点重力变化应该在 $\pm 2 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 以内,这与同震变化相比可以忽略。因此,本文认为2008年5月29日和2010年5月26日的绝对重力测量结果之差 $27.2 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 为同震变化。

表3 玉树点绝对重力变化

站点名称	测量时间(年-月-日)	邻期时间间隔(年)	绝对重力仪型号	中误差($10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)	重力变化($10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)	垂直梯度(10^{-6} s^{-2})
	2007-05-01	~	FG5-232	1.02	~	-1.63
玉树	2008-05-29	1.0767	FG5-214	0.62	-0.8	-1.75
	2010-05-26	1.9918	FG5-214	1.01	27.2	-1.66

基于弹性-粘弹分层半空间位错理论,考虑介质分层、粘滞性和自重的影响,模拟得到了玉树地震引起的玉树绝对重力点($33.01^\circ \text{N}, 97.02^\circ \text{E}$)同震重力变化为 $25.02 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。考虑到断层模型对模拟结果的影响很大,因此需要对其影响做进一步分析。因在断层模型确定时已充分考虑了地表破裂数据,故在断层位置、长度以及错动量上应该较为准确。但断层倾角仅是根据个别地表数据以及余震分布推测结果得到,其不确定性较大。且玉树绝对重力点离断层很近,近场同震效应主要受与其相近的浅部断层错动影响(谈洪波等, 2008、2009a),东南端两个子断层对其影响最大,因此这里仅考虑这两个子断层倾角变化对该绝对重力点的影响。根据现有研究结果,其倾角应该在 $77^\circ \sim 87^\circ$ 之间,以 1° 为步长,分别给出倾角为 $77^\circ \sim 87^\circ$ 时玉树绝对重力点的模拟同震重力变化为 $27.33 \times 10^{-8} \sim 23.22 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。由此给出基于分层半空间位错理论模拟的玉树绝对重力点同震重力变化为 $25.02 \times 10^{-8} \pm 2.05 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,这与该点实测同震重力变化 $+27.2 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 几乎相等,从而证明了平面位错理论结果与实测绝对重力测量结果在近震区的一致性。

5 结论

本文利用平面矩形位错理论,考虑介质分层、粘滞性和自重的影响,模拟研究了玉树 $M_s 7.1$ 地震同震形变和重力变化,并进行相关分析,主要结论如下:

(1) 同震水平经向位移以发震断层为界,呈现NE区向西运动,SW区向东运动的左旋走滑运动特征;最大正值达430mm,最大负值达-550mm。纬向位移零线似乎与断层走向垂直,ES区向南运动,WN区向北运动;最大正值达350mm,最大负值达-390mm。同震位

移变化主要集中在断层在地表投影线附近,随距离断层的远近向外迅速衰减。

(2) 垂向位移与重力变化图像类似。近震区变化主要集中于断层附近,且以断层为界成正负 4 象限分布。地表下沉区域重力值增加,地表隆起区域重力值减小,可见近场重力同震变化主要受垂直位移影响。

(3) 近场同震重力变化图像显示,玉树绝对重力点刚好位于同震重力变化极值附近,这对利用绝对重力测量结果检验位错理论的同震重力变化非常有利。

(4) 承担观测的两台仪器经过多次对比观测,其结果具有很好的一致性,其观测的玉树地震同震重力变化为 $27.2 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

(5) 基于弹性-粘弹分层半空间位错理论,考虑介质分层、粘滞性和自重的影响,模拟研究了玉树地震引起的玉树绝对重力点同震重力变化为 $25.02 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,并对断层模型的不确定性进行了模拟分析,认为不确定性较大的倾角变化对玉树绝对重力点影响为 $\pm 2.05 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。因实测结果与模拟结果几乎相等,从而证明了平面位错理论模拟结果与实测绝对重力测量结果的在近震区的一致性。

致谢:对玉树地震科考指挥部、中国地震局科技发展司、国家测绘局第一大地测量队、青海省地震局、湖北省地震局的大力支持和协助,以及评审专家给予的中肯意见一并表示感谢。

参考文献

- 陈立春、王虎、冉永康等, 2010, 玉树 $M_s 7.1$ 级地震地表破裂与历史大地震, 科学通报, **55** (13), 1200 ~ 1205。
- 李瑞浩、黄建梁、李辉等, 1997, 唐山地震前后区域重力场变化机制, 地震学报, **19** (4), 399 ~ 407。
- 刘巧霞、杨卓欣、莘海亮等, 2012, 玉树 $M_s 7.1$ 级地震部分余震重新定位及发震构造分析, 地球物理学报, **55** (1), 146 ~ 154。
- 申重阳、李辉、谈洪波, 2008, 汶川 8.0 级地震同震重力与形变效应模拟, 大地测量与地球动力学, **28** (5), 6 ~ 12。
- 孙鑫喆、徐锡伟、陈立春等, 2012, 2010 年玉树地震地表破裂带典型破裂样式及其构造意义, 地球物理学报, **55** (1), 155 ~ 170。
- 谈洪波、申重阳、李辉, 2008, 断层位错引起的地表重力变化特征研究, 大地测量与地球动力学, **29** (4), 54 ~ 62。
- 谈洪波、申重阳、李辉等, 2009a, 断层位错引起的地表形变特征, 大地测量与地球动力学, **29** (3), 42 ~ 49。
- 谈洪波、申重阳、李辉等, 2009b, 汶川大地震震后重力变化和形变的黏弹分层模拟, 地震学报, **31** (3), 491 ~ 505。
- 谭凯、李杰、王琪, 2007, 大地测量约束下的阿尔泰岩石圈流变结构, 地球物理学报, **50** (6), 1713 ~ 1718。
- 王继、陈立春、田勤俭等, 2010, 玉树 7.1 级地震断层地表破裂带应急科考, 中国地震, **26** (4), 464 ~ 467。
- 王勇、张为民、詹金钢等, 2004, 重复绝对重力测量观测的滇西地区和拉萨点的重力变化及其意义, 地球物理学报, **47** (1), 95 ~ 100。
- 邢乐林、李辉、何志堂等, 2008, 成都基准台绝对重力复测结果分析, 大地测量与地球动力学, **28** (6), 38 ~ 42。
- 张勇、许力生、陈运泰, 2010, 2010 年青海玉树地震震源过程, 中国科学: 地球科学, **40** (7), 819 ~ 821。
- 周慧芳、张景发、胡乐银等, 2011, 青海玉树地震的 InSAR 数据同震形变场模拟与参数反演分析, 地球信息科学学报, **13** (3), 418 ~ 423。
- Imanishi Y, Sato T, Higashi T, et al, 2004, A network of superconducting gravimeters detects submicrogal coseismic gravity changes, Science, **306**, 476 ~ 478。
- Tanaka Y, Okubo S, Machida M, et al, 2001, First detection of absolute gravity change caused by earthquake, Geophys Res Lett, **28** (15), 2979 ~ 2981。
- Wang R J, Francisco L M, Frank R, 2006, PSGRN/PSCMP—a new code for calculation co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory, Computers and Geosciences, **32**, 527 ~ 541。

Xing L L, Li H, Li J C, et al, 2009, Comparison of absolute gravity measurements obtained with FG5/232 and FG5/214 instruments, *Geo-spatial Information Science*, **12** (4) ,307 ~310.

Coseismic effect simulation of the Yushu $M_s7.1$ earthquake and absolute gravity inspection

*Tan Hongbo*¹⁾ *Shen Chongyang*¹⁾ *Xing Leling*¹⁾ *Li Hui*¹⁾ *Chen Shi*²⁾

1) Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, China

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

Abstract Using the conclusion of aftershocks relocation, inversion on seismic wave and InSAR results, and surface rupture displacement obtained by geological survey after the earthquake, this paper constructs a faults model of Yushu $M_s7.1$ earthquake. Based on rectangular dislocation theory in elastic-viscoelastic layering medium, we have simulated the co-seismic deformation and gravity change with gravitational effect considered. The pictures show that the absolute gravity measuring point is beside the extremum of coseismic gravity change, and the numerical value reach to $25.02 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. After a discussion about the gravity changes before the earthquake and the coherence consistency between two FG-5 absolute gravimeters, we think that the measured value $27.2 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ at Yushu station is coseismic gravity change. It's coincident with the simulation results based on dislocation theory. So it's good inspection to the near-field changes on dislocation theory.

Key words: Yushu earthquake Dislocation Coseismic simulation Absolute gravity