

文章编号: 0253-3782(2003)03-0291-07

昆仑山口西 8.1 级地震前重力变化^{*}

祝意青¹⁾ 王双绪¹⁾ 江在森²⁾
朱桂芝¹⁾ 李 辉³⁾ 张永志¹⁾

1) 中国西安 710054 中国地震局第二地形变监测中心

2) 中国北京 100036 中国地震局分析预报中心

3) 中国武汉 430071 中国地震局地震研究所

摘要 利用青藏地区 1998~2000 年绝对重力和相对重力观测资料获得的区域重力场空间动态变化结果, 初步分析了该区重力变化特征及其与监测区内 8.1 级大地震的关系。结果表明: ① 昆仑山口西 8.1 级大地震发生在重力负值变化高值区附近的重力变化高梯度带上; ② 8.1 级大地震前的主要构造变形与能量积累在震中的南侧; ③ 主震震中以东重力负值变化高值区的范围与野外地质考察结果的破裂区域吻合得较好; ④ 重力负值变化高值区的分布与 GPS 观测给出的应变场第二剪应变高值区一致。

关键词 绝对重力 相对重力 8.1 级地震 构造变形

中图分类号: P315.72[†] **文献标识码:** A

引言

地震是地壳构造运动过程中内部能量集中释放的一种特殊表现形式, 地壳形变测量给出的地壳形变图象是地壳运动的一种外部表象, 两者都是地球内部物质运动的反映。国内外自开展地震预报研究与实践以来, 都一直十分重视地壳运动和地壳形变的观测与研究。“九五”期间建设并已运行的中国地壳运动观测网络, 填补了中国大陆大范围地壳水平运动和水平形变观测的长期空白。该网络开展的绝对重力测量和相对重力联测构成的中国大陆大范围内统一的重力场观测系统, 可获取与地壳垂直运动密切关联的重力场时空变化(陈章立, 2001)。从 1998~2000 年, 我们已获得了两期绝对重力和相对重力观测的资料。本文以该资料为基础, 初步分析了青藏地区两年来的重力场变化特征及其与监测区内 2001 年 11 月 14 日发生的昆仑山口西 8.1 级地震的关系。

1 重力观测资料及处理

青藏地区于 1998~2000 年进行了两期网络基准站的绝对重力测量和基本站之间的相对重力联测。绝对重力测量工作由中国科学院测量与地球物理研究所采用 FG-5 绝对重力仪观测, 每个基准站上绝对重力测定精度优于 $5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ (张为民等, 2001), 重力测量

* 国家重点基础研究发展项目《大陆强震机理与预测》(G1998040703) 和中国地震局“十五”项目“强震中期预测”共同资助。

2002-07-01 收到初稿, 2003-01-02 收到最后修改稿, 2003-02-01 决定采用。

结果见表 1.

相对重力联测工作由中国地震局第二地形变监测中心组建一个作业小组, 国家测绘局第一测绘大队组建两个作业小组联合完成。每个作业小组用 3~4 台 LCR-G 型重力仪作业, 联测了中国地壳运动观测网络中西部地区的 9 个基准站(西安、西宁、盐池、鼎新、乌鲁木齐、乌什、塔什库尔干、德令哈、拉萨)和 22 个基本站(彬县、通渭、高台、安西、阿左旗、哈密、新源、阿勒泰、库尔勒、喀什、且末、索尔库里、冷湖、格尔木、五道梁、唐古拉山、玉树、然乌、珠峰北、尼玛、狮泉河、甜水海), 共完成 150 个测点。两期的测量路线与测量点完全重合(图 1), 重力段差联测精度优于 $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。为了确保相对重力联测精度, 减少仪器误差影响, 仪器格值均于测前在国家长基线上进行统一的标定; 作业中严格认真, 精心观测, 观测资料都是在 3 天内闭合, 以获得真实可靠的重力观测资料。两期重力联测情况见表 2。

表 1 基准站绝对重力测量结果

站 名	第一期		第二期		两期重力变化量 $/10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
	观测时间 年-月-日	观测精度 $/10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	观测时间 年-月-日	观测精度 $/10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	
西安	1999-06-12	4.88	2000-10-28	2.04	-20.8
西宁	1999-06-20	1.39	2000-10-20	1.24	-7.6
盐池	1999-06-17	1.51	2000-10-23	0.89	-2.0
鼎新	1999-06-22	1.54	2000-10-16	1.10	-19.7
乌鲁木齐	1999-06-27	2.30	2000-09-23	1.74	-14.7
乌什	1999-07-01	2.36	2000-10-08	1.22	-8.5
塔什库尔干	1999-07-07	1.74	2000-10-04	1.28	6.1
德令哈	1999-08-26	1.68	2000-09-06	1.05	-10.5
拉萨	1999-09-01	1.80	2000-09-12	0.90	-12.8

表 2 相对重力测量情况(LCR-G 型重力仪)

测量单位	第一期				第二期			
	使用仪器	观测时间			使用仪器	观测时间		
中国地震局	G793 G853 G854	1998-09-19~1998-12-07			G793 G853 G854	2000-09-01~2000-11-09		
国家测绘局	G796 G920 G922 G1066 G800 G957 G960	1998-09-22~1998-11-16 1999-05-04~1999-07-05			G796 G920 G1066 G1060 G1063 G1065	2002-06-26~2002-09-16		

注: 第一期观测洞错—拉萨—昌都—玉树测线, 由于冰雪封山, 推迟于 1999 年 5~7 月观测。

对 1998~2000 年青藏地区两期的重力资料, 我们用中国地震局实用化攻关推广的应用软件(LGADJ)进行处理: ①首先对每个独立作业单位的资料进行预处理, 合理确定各台仪器的先验方差, 然后把两个单位的资料进行联合平差计算; ②不同于以往地震监测没有绝对重力点, 这次平差计算用西安等 9 个基准站的绝对重力值加以控制, 采用统一的起算基准进行整体经典平差, 以获得各测点的绝对重力值; ③计算结果较好, 两期平均点值精度分别为 $12 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 和 $15 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$; ④绝对重力资料处理中作地球潮汐、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固体潮、气压、一次项、仪器高等改正。

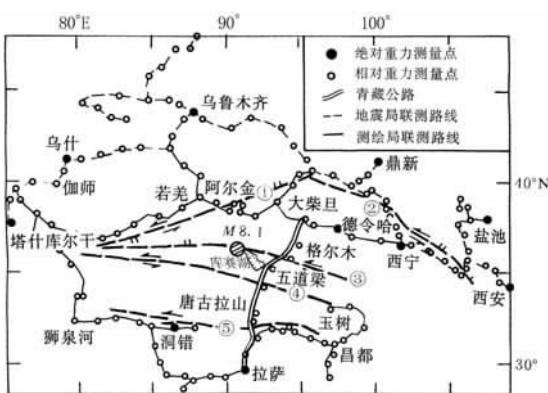


图 1 青藏地区 GPS 网络重力联测路线及构造示意图

① 阿尔金断裂带; ② 祁连山北缘断裂带; ③ 东昆仑断裂带;
④ 拉竹龙—玉树断裂带; ⑤ 改则—丁青断裂带

向的活动断裂带, 它们不仅制约着山系盆地的展布与发育, 而且控制着本区现今构造活动, 成为中强地震带。这些活动断裂带多数是在原有断裂基础上发展起来的, 第四纪以来为走滑或逆走滑性质; 从内部结构看, 各断裂带一般都由许多不相连接的次级断裂斜裂组成; 其左旋走滑运动速率远大于中国东部诸活动断裂(青海省地震局, 中国地震局地壳应力研究所, 1999)。

第四纪以来强烈活动的北西西向断裂主要有祁连山北缘活动断裂带、东昆仑活动断裂带、拉竹龙—玉树活动断裂带、改则—丁青活动断裂带, 具有挤压逆冲-左旋走滑性质; 北东东向断裂主要有阿尔金活动断裂带, 具有强烈的逆冲、推覆与走滑运动。本区构造不仅规模大, 而且新构造活动强烈; 青藏高原处在强烈隆起的垂直运动状态和地壳持续增厚状态。

3 重力变化分析

3.1 区域重力场变化

图 2 是利用 1998~2000 年青藏地区的重力变化资料直接绘制的。不同于地震重力监测网的是, 中国地壳运动观测网络重力联测跨距长(100~200 km), 重力测区范围很大, 但重力测点很少, 用实测重力点值变化进行分析, 能更真实地反映所在区域的重力变化。在分析重力变化等值线图后, 我们得到这样一些认识:

- 新疆南部地区出现了较大的重力正值变化区及伴生的重力变化高梯度带, 异常区长轴呈北东东向, 伽师附近重力变化最大, 达 $52 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。重力变化值由塔里木盆地向山体过渡带逐渐降低, 在盆地向山体过渡地带形成重力变化高梯度带, 1998 年前后在此梯

对于国家测绘局第一测绘大队在两期联测中不一致的部分水准点进行直接剔除, 以有利于可靠观测资料的获得和真实重力变化信息的提取。

2 区域构造与活动背景

被称为地球第三极的青藏高原以其突出的隆起地貌, 独特的地质构造和强烈的新构造变形而受到全世界地学界的瞩目。青藏高原是全球最大的一个新隆起的高原, 区内发育着如图 1 所示的多条北西西走

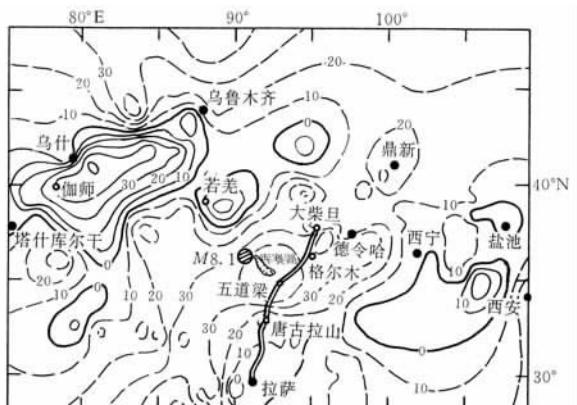


图 2 青藏地区重力变化等值线图。图中实线为正值,
虚线为负值, 单位为 10^{-8} m/s^2

度带附近的伽师地区发生过多次 6 级以上地震(祝意青等, 2001).

2) 从重力变化等值线图中出现的较大范围的局部异常来看, 塔里木盆地正值变化, 并形成局部重力变化异常区; 昆仑山口西 8.1 级震区附近重力负值变化, 形成的局部重力异常变化最为突出, 重力负值变化的极值区在震中的东南; 若羌地区的正值变化与震中附近的负值变化之差最大达 $97 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$; 若羌正值异常区向昆仑山口西 8.1 级地震震中附近负值异常区过渡地带形成的重力变化高梯度带为全区之冠, 五道梁测点重力异常达 $-68 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 表现了昆仑山口西 8.1 级地震前震中区附近重力场变化的相对剧烈.

3) 区域重力场变化空间分布自西向东总体表现为正—负—正—负相间的重力变化, 塔里木盆地是正值变化区; 青藏块体是负值变化区, 昆仑山口西 8.1 级地震震中附近是负值变化最大区. 喜马拉雅块体和新疆北部地区重力负值变化量值较小, 青藏块体东北缘重力变化平缓.

4) 伽师地区震后重力的正值变化和青藏高原地区重力负值变化十分明显. 如果从地质构造背景认真分析一下该区域的这一显著变化, 就不难看出伽师地区反映的是塔里木盆地下沉引起的重力正值变化, 青藏高原地区反映的是青藏高原隆升引起的重力负值变化. 这种大范围区域性的重力异常可能是昆仑山口西 8.1 级地震前大范围区域构造应力场增强引起的地表重力变化.

3.2 重力剖面变化

重力剖面能较好地突出局部地段的重力异常变化. 中国地震局地震研究所于 2002 年 2 月 26 日, 开始对这次 8.1 级大震震中附近的两条重力剖面, 进行震后应急监测. 1998~2000 年的观测资料是以 9 个基准站的绝对重力值作为基准获得的; 2000~2002 年的两条剖面是以德令哈 2000 年的绝对重力值作为基准获得的. 下面对这两条剖面(图 3)进行具体分析.

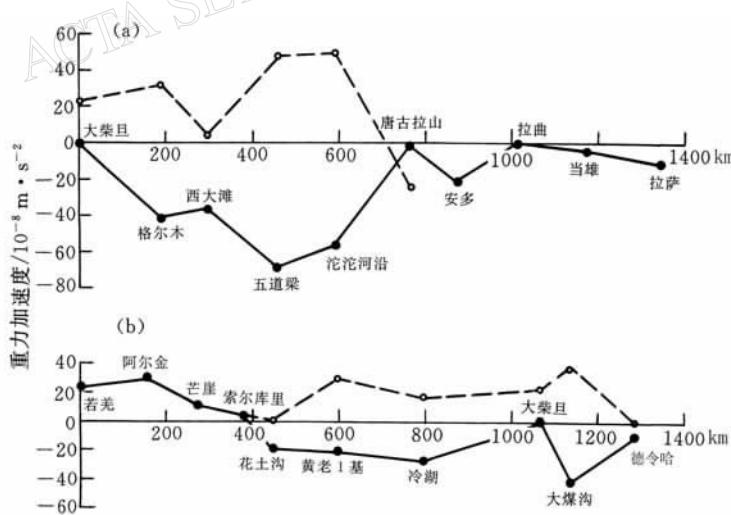


图 3 重力变化剖面图(1998~2000 年)

(a) 南北向; (b) 东西向

3.2.1 格尔木—五道梁—唐古拉山剖面

该剖面第一次观测于 1998 年 11 月 4~9 日, 第二次观测于 2000 年 8 月 7~13 日, 第

三次观测于 2002 年 3 月 7~13 日。

1998~2000 年, 位于 8.1 级大震东侧的近南北向的重力剖面变化表明: 由北向南, 大柴旦—五道梁重力急剧下降, 五道梁—唐古拉山重力快速上升, 唐古拉山—拉萨重力变化平缓。昆仑山口西 8.1 级地震发生在西大滩—五道梁(横跨东昆仑活动断裂带)重力快速下降段, 大地震震中($36.2^{\circ}\text{N}, 90.9^{\circ}\text{E}$)距剖面上的五道梁测点($35.1^{\circ}\text{N}, 93.0^{\circ}\text{E}$)最近, 此处重力变化也最大, 重力变化为 $-68 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。南北向重力剖面横跨测区几条主要活动断裂带, 它较好地反映了跨断裂地段构造变形引起的重力异常变化。重力变化在东昆仑发震构造断裂带变化十分显著, 反映出该断裂在震前构造活动强烈。

2002 年 3 月只观测了大柴旦—唐古拉山地段的重力资料。2000~2002 年的重力剖面变化与震前相反, 表现出震后重力恢复变化。

3.2.2 若羌—阿尔金—大柴旦—德令哈剖面

该剖面第一次观测于 1998 年 10 月 24~31 日, 第二次观测于 2000 年 8 月 24~30 日, 第三次观测于 2002 年 3 月 1~6 日。

1998~2000 年, 位于 8.1 级大震北侧的近东西向重力剖面曲线较南北向剖面曲线变化平缓, 若羌—花土沟重力缓慢下降, 花土沟—冷湖重力变化平缓。地震发生在花土沟—冷湖段, 重力剖面平行于东昆仑发震构造带, 距震中最近的花土沟($38.3^{\circ}\text{N}, 90.8^{\circ}\text{E}$)、黄老 1 基($38.1^{\circ}\text{N}, 91.9^{\circ}\text{E}$)等处重力变化不显著。这也表明了这次 8.1 级大地震前的主要构造变形与能量积累在震中的南侧。

2002 年 3 月只观测了索尔库里—德令哈地段的重力资料。2000~2002 年的重力剖面变化表明, 距震中最近的花土沟—黄老 1 基测段表现出一定的恢复变化, 其它测段变化平缓。

4 重力变化与昆仑山口西 8.1 级地震

地震大都发生在活动板块的边界或活动断裂带上。在这些条带上发生突发性位移(地震)之前, 地面重力场会发生与孕震过程有关的重力变化。重力变化的空间分布与地震地质构造背景和控震构造条件有关(祝意青等, 1999)。

2001 年 11 月 14 日在青藏高原北部 WNW 向展布的东昆仑断裂带上发生的一次罕见的特大地震, 是继 1951 年 11 月 18 日西藏当雄 8.0 级地震后, 发生在中国大陆地区震级最大的地震事件。分析测区的重力场变化可以发现, 8.1 级地震震中附近重力变化异常最大, 并形成重力变化梯度带, 地震发生在重力变化高梯度带上。震中位于昆仑山重力负值变化最大区附近, 空间分布变化表现为, 五道梁($35^{\circ}10'\text{N}, 93^{\circ}03'\text{E}$)地带重力变化幅度和范围大, 格尔木($36^{\circ}26'\text{N}, 94^{\circ}51'\text{E}$)重力变化幅度小且收敛。负值变化低于 $-40 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的区域, 自西向东从震中至格尔木大于 300 km。徐锡伟等(2002)进行的野外考察表明: 这次地震地表破裂带沿库赛湖段西起布格达坂峰东缘($36^{\circ}02'\text{N}, 91^{\circ}08'\text{E}$), 向东经库赛湖北缘, 东止于青藏公路东 70 km 附近($35^{\circ}34'\text{N}, 94^{\circ}48'\text{E}$), 地震地表破裂带沿 $N70^{\circ} \sim 90^{\circ}\text{W}$ 走向线状展布, 全长约 350 km; 宏观震中位于库赛湖东北角山麓地带($35^{\circ}48'\text{N}, 93^{\circ}05'\text{E}$), 破裂带水平位移量中间段($35^{\circ}48'\text{N}, 93^{\circ}05'\text{E}$)大, 向两端有起伏地衰减。重力负值变化低于 $-40 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的范围, 与野外地质考察结果的破裂区域吻合得较好。昆仑山口断裂是本次 8.1 级地震的发震断层, 8.1 级地震前后, 跨发震构造断裂处的重力剖面变化十分显

著,反映出该断裂构造活动剧烈.

据中国地震台网测定,这次地震震中位于布喀达坂峰北(36.2°N 、 90.9°E), $M_s=8.1$. 中国地震局地球物理研究所对这次 8.1 级地震的震源机制和破裂过程进行了研究:这次地震是左旋走滑兼逆断层分量的滑动;滑动位移分布在主震震中以东,总长度 $300\sim400\text{ km}$;最大错距 $9\sim10\text{ m}$,出现在震中以东 60 km 处. 重力负值变化高值区的极值区也位于主震震中以东,地表滑动位移主要分布在重力负值变化高值区内. 哈佛 CMT 目录测定这次地震震中位于库赛湖附近(35.54°N 、 92.75°E), $M_w=7.8$,震中恰好位于重力负值变化高值区的极值区内.

江在森等用最小二乘配置方法对 1991~2000 年全国各类 GPS 观测结果,分别计算了 NE 与 NW 向第一剪应变和 EW 与 SN 向第二剪应变. 8.1 级大地震震中恰好位于第二剪应变负值区量值最高、范围最大的区域,震中在高值区的极值区西北侧,而最大的破裂错距正好是在这一剪切应变高值区的 3.5×10^{-8} 极值区内^①. 重力变化负值的高值区的分布恰好与 GPS 观测给出的应变场第二剪应变高值区一致,且高值区也在 8.1 级大地震震中的东南侧.

5 讨论和结论

2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级地震是近 50 年以来发生在中国大陆内部震级最大的一次地震. 该地区监测资料虽然很少,但中国地壳运动观测网络获得的 1998~2000 年青藏地区的重力变化对这次 8.1 级地震有一定程度的反映.

我们根据 1998~2000 年重力观测获得的重力变化空间分布和剖面变化信息,初步研究了本区的重力变化与 8.1 级地震的关系. 结果表明:① 昆仑山口西 8.1 级大地震发生在重力负值变化高值区附近,震中位于负值变化向正值变化过渡的高梯度带上;② 大震东侧的南北向重力剖面曲线变化剧烈,跨东昆仑断裂的重力变化十分显著,北侧的近东西向重力剖面曲线较平缓,这表明 8.1 级大地震前的主要构造变形与能量积累在震中的南侧;③ 主震震中以东重力负值变化高值区的范围与野外地质考察结果的破裂区域吻合得较好,地表滑动位移主要分布在重力负值变化高值区的极值区内;④ 重力负值变化高值区的分布恰好与 GPS 观测给出的应变场第二剪应变高值区一致,且最高值区也在 8.1 级大地震震中的东南侧.

本文对这次 8.1 级大震的重力变化研究只是初步的. 目前已开始进行了第 3 次中国地壳运动观测网络基本网的相对重力联测. 对 8.1 级大震前后的重力变化机理,尚有待今后更深入的研究.

参 考 文 献

- 陈章立. 2001. 我国地震科技进步的回顾与展望(二)[J]. 中国地震, 17(4): 326~341
- 青海省地震局, 中国地震局地壳应力研究所. 1999. 东昆仑活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社, 18~27
- 徐锡伟, 陈文彬, 于贵华, 等. 2002. 2001 年 11 月 14 日昆仑山库赛湖地震($M_s8.1$)地表破裂带的基本特征[J]. 地震地质, 24(1): 1~13
- 张为民, 王勇, 詹金刚. 2001. 中国地壳运动观测网络基准站绝对重力的测定[J]. 地壳形变与地震, 21(4): 114~116

^① 中国地震局分析预报中心. 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级大地震简介. 震情研究, (4): 79~101.

祝意青, 胡斌, 张永志. 1999. 永登 5.8 级地震前后的重力场动态图像特征研究[J]. 地壳形变与地震, 19(1): 71~77
祝意青, 江在森, 程宏宾. 2001. 西北 GPS 网络重力场变化与地震活动分析[J]. 内陆地震, 15(3): 211~217

GRAVITY VARIATION BEFORE KUNLUN MOUNTAIN PASS WESTERN $M_s8.1$ EARTHQUAKE

Zhu Yiqing¹⁾ Wang Shuangxu¹⁾ Jiang Zaisen²⁾

Zhu Guizhi¹⁾ Li Hui³⁾ Zhang Yongzhi¹⁾

1) The Second Crustal Deformation Monitoring Center, China Seismological Bureau, Xi'an 710054, China

2) Analysis and Prediction Center, China Seismological Bureau, Beijing 100036, China

3) Institute of Seismology, China Seismological Bureau, Wuhan 430071, China

Abstract: The relation between the gravity variation features and $M_s8.1$ earthquake in Qinghai-Tibet monitoring area is analyzed preliminarily, by using spatial dynamic variation results of regional gravity field from absolute gravity and relative gravity observation in 1998 and 2000. The results show that: ① $M_s8.1$ earthquake in Kunlun mountain pass western occurred in the gravity variation high gradient near gravity's high negative variation; ② The main tectonic deformation and energy accumulation before $M_s8.1$ earthquake are distributed at south side of the epicenter; ③ The range of gravity's high negative variation at east of the $M_s8.1$ earthquake epicenter relatively coincides with that rupture region according to field geology investigation; ④ Gravity variation distribution in high negative value region is just consistent with the second shear strain's high value region of strain field obtained from GPS observation.

Key words: absolute gravity; relative gravity; $M_s8.1$ earthquake; tectonic deformation