

甘肃兰州—天水—武都地区重力场及其 时空动态演化特征^{*}

徐云马^{1,2}, 祝意青², 梁伟锋², 程宏宾², 刘 练²

(1 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026 2 中国地震局第二地形变监测中心, 西安 710054)

摘要: 系统分析了甘肃南部兰州—天水—武都地区 2000~2006 年期间的流动重力测量资料, 研究了该地区重力场的时空动态演化特征。结果表明: 重力场变化与该区活动断裂构造密切相关; 重力场有规律的变化与区域应力—应变场的微动态活动有关; 相邻两期重力的动态变化对测区内发生的 2003 年 11 月岷县 5.2 级、2004 年 9 月岷县 5.0 级地震及测区近邻 2006 年 6 月武都、文县间 5.0 级地震均有较好反映。

关键词: 重力场演化; 地壳运动; 构造活动; 甘肃

中图分类号: P315.72+6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2008)01-0064-06

0 引言

流动重力测量反映的是区域重力场的非潮汐变化信息, 它包括构造变形和非构造变形、区域介质密度变化和地壳内部的物质迁移等综合因素引起的重力变化。

为了研究重力场非潮汐变化的时空特征及其与甘肃南部兰州—天水—武都地区(下简称兰天武地区)构造变动及地震活动的关系, 自 1985 年以来, 甘肃省地震局使用高精度 LCR-G 型重力仪, 每年开展 1~2 次兰天武地区地震重力测量, 获得了连续 20 多年的高精度重力观测成果, 积累了丰富的流动重力观测资料。孟万辉等(1991)和孟夏等(2001)相继对 1991~1999 年的流动重力观测资料进行了分析, 得到靠近震中的测点的重力值有明显变化的结论。祝意青等(2005)从动态的观点研究了 2003 年 11 月 13 日甘肃岷县 5.2 级地震孕育发生过程中的重力场演化特征, 认为: 从统一算基准获得的重力观测资料, 较完整地反映了岷县 5.2 级地震孕育、发生过程中出现的流动重力前兆信息。笔者在上述工作的基础上, 利用甘肃省地震局 2000~2006 年的流动重力观测资料, 系统分析研究了兰天武地区 2000~2006 年期

间重力场的时空动态演化特征, 探讨了地面重力变化与地壳运动、构造活动及地震的关系, 研究了其变化机理, 以期为兰天武地区地学基础研究和潜在地震危险性趋势分析提供帮助。

1 测区概况及资料处理

兰天武地区所处的大地构造部位属于秦岭褶皱系, 区内构造十分复杂, 断裂纵横交错, 其中西秦岭北缘断裂(左旋逆走滑)、临潭—宕昌断裂(左旋逆走滑)、礼县—罗家堡断裂(左旋正走滑)、光盖山—迭山北麓断裂、光盖山—迭山南麓断裂、迭部—白龙江断裂(左旋逆走滑)和文县断裂(左旋逆走滑)等主干断裂近几年中强震活动频繁, 在测区内的天水、卓尼、岷县和武都地区都发生过中强破坏性地震(图 1)。

资料处理包括: ① 用中国地震局实用化攻关推广的应用软件 IGAD 进行拟稳平差, 统一起算基准, 拟稳点采用点位稳定且受外界干扰比较小的一些测点; ② 为了有效消除系统误差, 提高平差结果的精度, 得到最佳、合理的解算结果(孙少安等, 1999; 祝意青等, 2004), 在统一平差解算各点重力值的同时, 解算出各期重力变化一次项的周期误差等参数的区域适应解; ③ 用最小二

* 收稿日期: 2007-06-06

基金项目: 科技部“强震监测预报与预警技术研究”课题资助

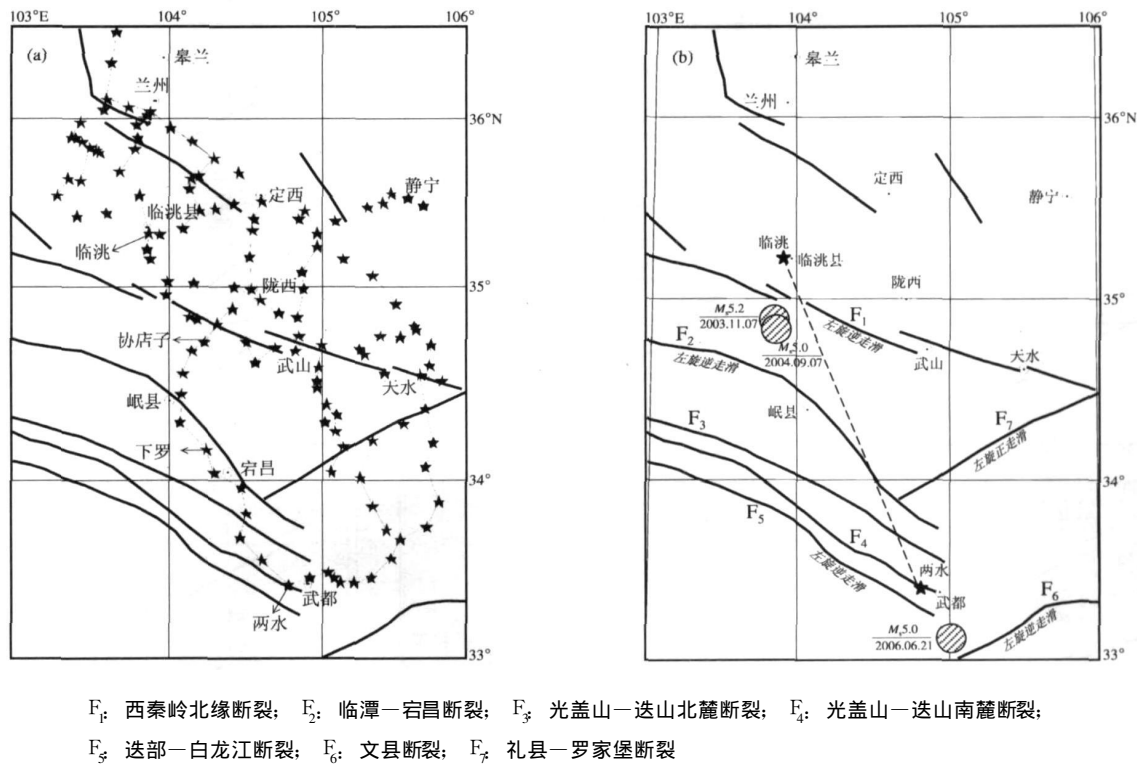


图 1 兰天武地区重力测量路线及构造略图
(a) 重力测量点位、路线图 (根据实测重力点绘制); (b) 构造略图、震中及跨断层剖面示意图

乘配置对重力观测数据进行拟合推估, 突出显示构造因素的重力效应 (祝意青等, 2001)。

各期资料的平差精度见表 1。表 1 表明, 自 2000 年以来重力点值的平均精度为 $(8.6 \sim 12.0) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 精度比较高, 观测资料可靠。

表 1 兰天武地区重力测量情况 (LCR-G 型重力仪)			
使用仪器编号		观测时间 年—月	点值平均精度 / $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
G808	G818	2000—07	8.6
G808	G818	2001—05	8.8
G808	G818	2002—05	10.2
G808	G818	2003—04	12.0
G808	G818	2004—04	10.5
G808	G818	2004—07	11.3
G808	G843	2005—06	10.9
G808	G818	2006—06	11.1

2 区域重力场的时空动态演化特征

2.1 相邻两期区域重力场的动态变化

笔者绘制了测区各时段的重力变化等值线图 (图 2)。通过分析区域重力场的时空动态演化过

程, 可以得出以下几点认识:

(1) 图 2 较清晰地反映了重力异常由弱至强的增强过程, 重力年变化量从开始的 $(-20 \sim +20) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 逐渐增加至 $(-50 \sim +50) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。从空间上看, 重力变化等值线在西秦岭北缘断裂南北两侧表现出较明显的差异性。

(2) 从多期重力变化等值线图来看, 对于兰天武地区, 2000 ~ 2001、2001 ~ 2002 这两期重力变化相对较小, 在 $(-20 \sim +20) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 之间, 表明该时段内兰天武地区构造运动处于较弱水平; 2002 ~ 2003、2003 ~ 2004、2004 ~ 2005 这三期重力变化较大, 都在 $(-50 \sim +50) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 之间, 表明区域构造活动处于较强水平, 在这期间相继发生了 2003 年 11 月 13 日岷县 $M_{\text{s}}5.2$ (103.9°E 34.7°N) 和 2004 年 9 月 7 日岷县 $M_{\text{s}}5.0$ (103.9°E 34.7°N) 地震; 2005 ~ 2006 这一期重力变化在 $(-40 \sim +20) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 之间, 相对前三期有所减弱, 但比 2000 ~ 2001、2001 ~ 2002 强, 期间在测区南部临近地区发生了 2006 年 6 月武都、文县间 $M_{\text{s}}5.0$ (105.0°E $\text{N}3.1^{\circ}\text{N}$) 地震, 这表明该时段内区域构造仍处于较高水平。

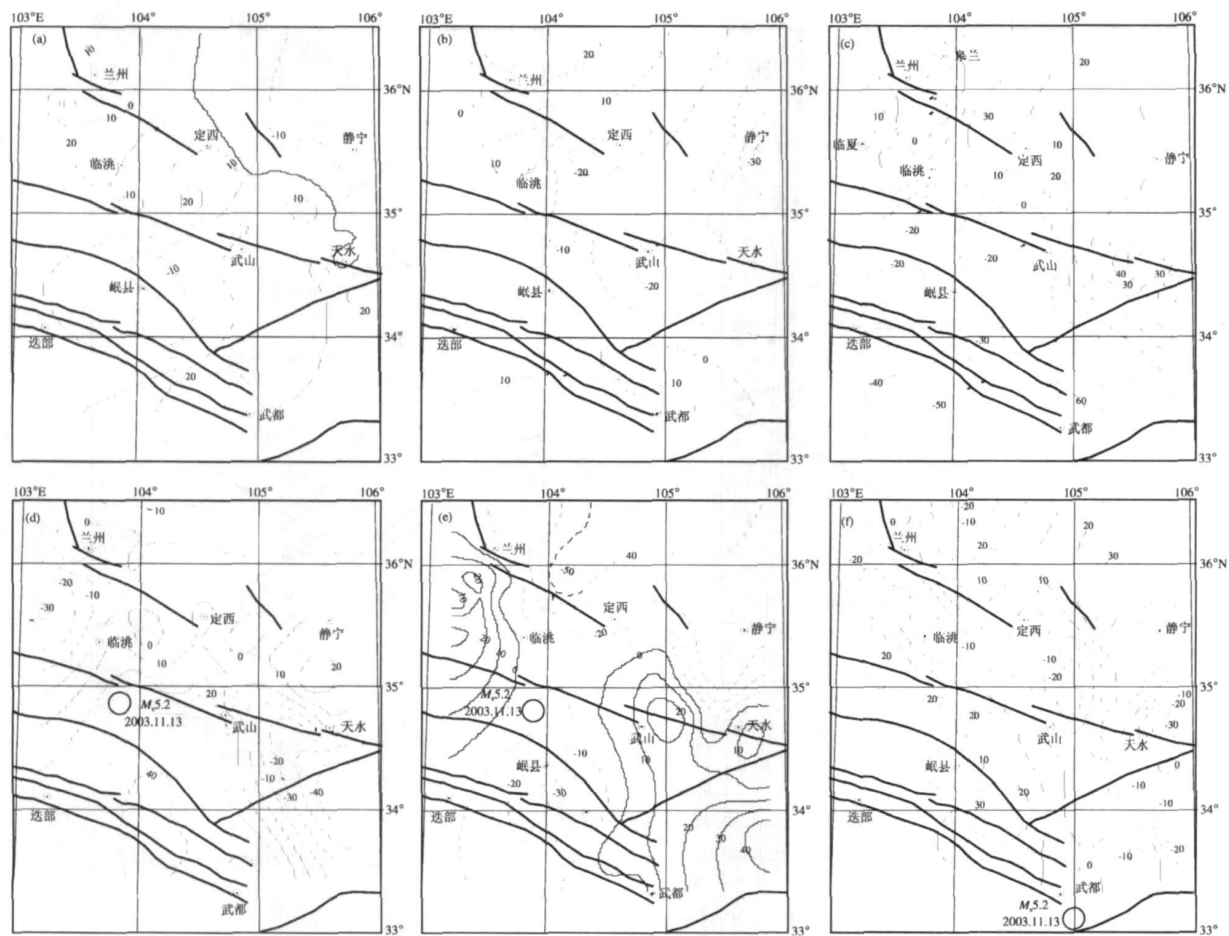


图 2 2000 ~ 2006 年兰天武地区重力变化等值线 (10^{-8} m/s^2)

(a) 2000-07 ~ 2001-05 (b) 2001-05 ~ 2002-05 (c) 2002-05 ~ 2003-04
(d) 2003-04 ~ 2004-04 (e) 2004-04 ~ 2005-06 (f) 2005-06 ~ 2006-06

(3) 相邻两期重力的动态变化对测区内发生的岷县 2003 年 5.2、2004 年 5.0 级地震及测区近邻 2006 年武都、文县间 5.0 级地震均有较好反映。2002 ~ 2003 年和 2003 ~ 2004 年均表现为测区南部重力变化较为剧烈，并在西秦岭北缘断裂附近形成重力变化梯度带。2002 ~ 2003 年测区南部重力变化自西向东逐渐增加，2003 ~ 2004 年出现反向变化，在反向变化过程中，西秦岭北缘断裂南侧附近连续发生岷县 5.2 和 5.0 级地震。2004 ~ 2005 年重力变化总体表现为自南向北逐渐减少。在测区南部有 2 个重力变化显著区，一是西秦岭北缘断裂中段附近天水—武山—通渭地区局部重力异常及其伴生的重力变化高梯度带；二是武都地区东西两侧出现了一对 $+40 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 和 $-30 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 变化的局部重力异常区（武都、文县间 5.0 级地震发生在重力由正值向负值变化的零值线附

近）。2005 ~ 2006 年重力出现反向变化，在反向变化过程中发生武都、文县间 5.0 级地震；这一期间天水—武山—通渭地区局部重力异常较为剧烈。

(4) 2003 ~ 2004 年重力出现反向变化，在反向变化过程中西秦岭北缘断裂南侧附近发生岷县 5.2 级地震，可以看出此时震中附近仍处于应力高积累过程中；在发生 2004 年 9 月的 5.0 级地震后，震中附近重力变化平缓，应力松弛。说明该地区的应力积累没有在一次地震中释放完。

(5) 从空间上看，在西秦岭北缘断裂两侧重力变化等值线表现出较明显的差异性，其南北两侧附近的重力变化表现为正、负交替变换。岷县 5.2、5.0 级地震都发生在西秦岭北缘断裂带附近。

2.2 较长时期的重力场空间分布

为了进一步分析兰天武地区较长趋势的重力变化，了解重力变化的累积量，我们绘制了 2000

~2006 年重力变化等值线图 (图 3)。

2000~2006 年较长时间的重力变化表明, 西秦岭北缘断裂北侧重力变化较为显著, 重力正值变化与负值变化最大差异值达 $(50 \sim 60) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 天水—武山—临洮一带形成重力负—正—负—正—负的变化梯度带, 显示这是一个值得注意的异常区域, 存在发生中强震的趋势性背景。

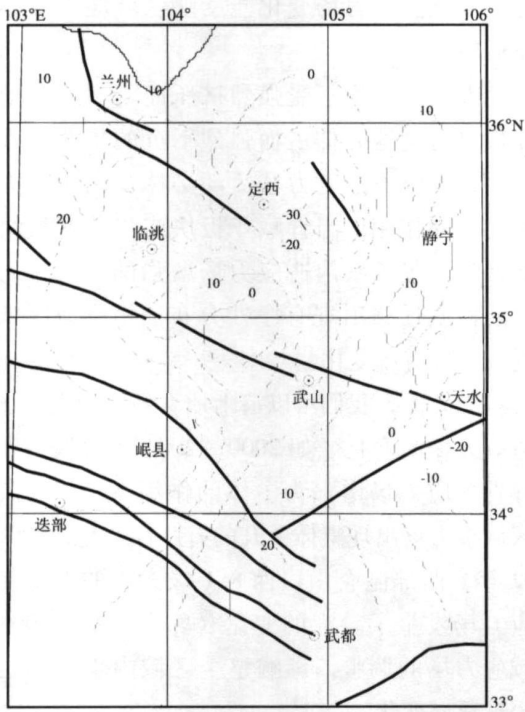


图 3 兰天武地区较长时期重力变化等值线图 (10^{-8} m/s^2)

2.3 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。由于点位变化和观测等原因, 我们只对靠近震中、变化比较大的异常测点绘制重力点值变化时序图, 各点值变化均相对于 2002 年 (图 4)。(1) 下罗测点位于西秦岭北缘断裂南侧, 重力点值变化具有较强的时序性。2003~2004 年在其重力变化时序曲线反向过程中发生了岷县 5.2 级地震, 并在 2004~2005 年再次反向的过程中发生了岷县 5.0 级地震 (图 4 a)。

(2) 协店子测点的重力变化具有较明显的累积过程, 2002~2006 年间累积变化量达到了 $40 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 其中 2005~2006 年这一期就达到了 $35 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 对应了 2006 年 6 月的武都、文县间

5.0 级地震。该测点对地震与区域重力场变化的关系有较好的反映。

2.4 重力等值线剖面变化

为了更好地看清晰裂构造在地震活动中的动态变化, 选择两水 (33.423°N 104.816°E) 至临洮 (35.377°N 103.850°E) 之间 (图 1 b 中虚线所示) 绘制了等值线剖面图 (图 5)。该剖面基本沿测量路线, 可信度高。剖面跨越了西秦岭北缘断裂、临潭—宕昌断裂和光盖山—迭山北麓断裂。在剖面图中可以清晰地看出西秦岭北缘断裂、临潭—宕昌断裂重力变化异常明显, 断裂两侧的重力变化有较强的差异性, 而岷县 5.2、5.0 级地震就发生在这两条断层之间, 说明地震活动与断层活动有密切的关系 (张赤军等, 1994; 何文贵等, 2006)。

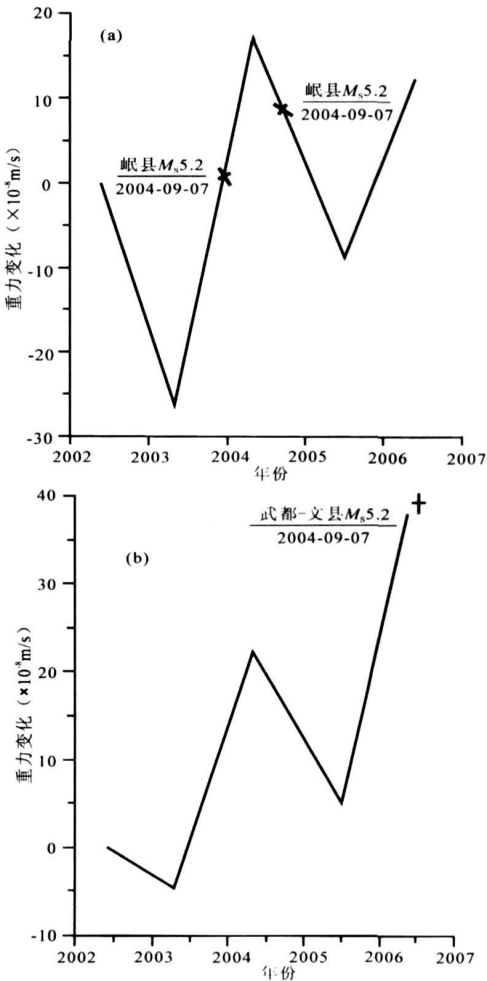


图 4 重力点值变化时序图 (a) 下罗测点; (b) 协店子测点

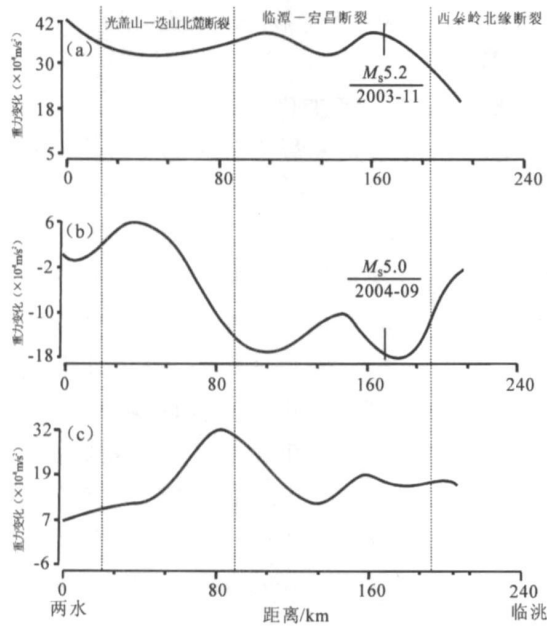


图 5 重力跨断层变化图 (2003 ~ 2006)

3 分析与讨论

3.1 重力场变化与构造活动的关系

地震活动与现今地质构造，特别是第四纪以来的新构造活动关系密切。而地质构造与深部构造之间又有着密切的联系，甚至受深部构造控制。利用重力资料对研究区的构造活动进行研究，能比较全面地认识该地区的地质构造活动背景及其与地震的关系。

兰天武地区 2000 年以来 1 年尺度的重力场时空动态变化表明，该地区各期重力变化量差异较大，年变化量在 $(-50 \sim 40) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 范围内，基本以西秦岭北缘断裂带为界，南强北弱。据腾锐增等 (1994)、袁道阳等 (1999) 的研究：西秦岭北缘断裂早期为一条压性断裂，大约自中更新世以来转变为以左旋走滑为主、兼具正断分量，是一条全新世活动断裂。

多年重力变化累积量的空间分布与构造活动较为密切，从 6 年尺度的重力场变化可以看出：测区中部西秦岭北缘断裂一带重力正值变化明显，重力变化等值线的基本走向总体上与呈 NWW 向的西秦岭北缘断裂走向成 90° 垂直，与区域主压应力方向 (NEE) 基本一致 (江在森等，2006)，与腾锐增等 (1994)、袁道阳等 (1999) 的研究结果

一致。说明西秦岭北缘断裂带是兰天武地区构造活动比较强烈的一条断裂带。

3.2 重力场变化与区域应力场的关系

重力场与构造应力场内在关系的理论研究 (向文等，1999；祝意青等，2004) 表明，重力变化与构造应力之间有着密切的联系。当区域构造应力场发生强弱变化时，重力场图像也会随之出现时空变化。重力场变化能反映区域应力场的微动态活动。

兰天武地区位于受强烈挤压而剧烈抬升的青藏亚板块与受地壳伸展而强烈下沉的华北亚板块之间，其区域构造应力场活动必然受制于两大亚板块的共同作用。当青藏亚板块或华北亚板块活动加强时，在区域构造应力场增强的过程中，地壳中的物质迁移出现有序性分布，相应区域重力场也出现有序变化。

在图 2 上，我们可以清晰地看到这种重力场随构造应力场的变化。如 2000 ~ 2001 年时段，在以西部青藏应力场增强为主体的作用下，兰天武地区区域重力场出现整体上升的有序性变化；2001 ~ 2002 年，西部昆仑山口西 8.1 级大震的发生使地壳应力场发生了较大的变化 (郭良迁等，2004)，区域应力场的调整，影响整个区域内重力场也随之出现反向变化。

3.3 重力场变化与地震活动的关系

在地震孕育过程中，随着震源区应力的不断积累，地壳内部的物质发生迁移、地壳内部密度发生变化，从而导致该处地表的重力发生变化。主要表现为重力场空间分布的有序性变化、局部重力异常区及伴生的重力变化高梯度带的出现、重力点值随时间的演化。分析兰天武地区的重力场演化过程可以发现，该地区重力场变化多次反向，重力变化空间梯度较大，测区内多次发生 5 级以上的地震。

兰天武地区的重力点值变化对区内所发生的中等以上地震有很好的反映。如岷县 2003 年 5.2 级、2004 年 5.0 级地震前，震中附近的下罗测点出现明显的重力异常变化，震后反向恢复；2006 年的武都、文县间 5.0 级地震前，协店子测点出现明显的重力异常累积变化过程。

4 结语

(1) 2000~2006 年间的重力变化等值线图清晰地反映了重力异常的增强过程, 其中西秦岭北缘断裂北侧重力变化较为显著, 重力正值变化与负值变化最大差异值达 $(50 \sim 60) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 表明重力场变化与地震活动及该区的活动断裂构造有密切的关系。

(2) 相邻两期重力的动态变化对测区内发生的岷县 5.2、5.0 级地震及测区近邻武都、文县间 5.0 级地震均有较好反映。

(3) 天水—武山—临洮地区局部重力异常较为剧烈, 值得注意和加强监测。

参考文献:

- 郭良迁, 张祖胜, 李延兴, 等. 2004. 昆仑山口西 $M_s=8.1$ 级地震的形变应变场研究 [J]. 地球物理学报, 247 (6): 1068—1075.
- 何文贵, 周志宇, 马尔曼, 等. 2006. 岷县—卓尼 5.0 级地震的基本特征和地质背景研究 [J]. 地震研究, 29 (4): 373—377.
- 江在森, 杨国华, 王敏, 等. 2006. 中国大陆地壳运动与强震关系

- 研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 26 (3): 1—9.
- 孟万辉, 孟夏. 1991. 兰州—天水—武都地区重力场变化及其与地震的关系 [J]. 西北地震学报, 21 (3): 326—330.
- 孟夏, 孟万辉, 徐敬文, 等. 2001. 流动重力测量结果及其与地震的关系 [J]. 西北地震学报, 23 (1): 74—77.
- 孙少安, 项爱民. 1999. 区域重力场相对基准的建立 [J]. 地壳形变与地震, 19 (1): 78—81.
- 腾锐增, 金瑶全, 李西侯, 等. 1994. 西秦岭北缘断裂带新活动特征 [J]. 西北地震学报, 16 (2): 85—90.
- 向文, 李辉. 1999. 重力场与构造应力场内在关系的理论研究 [J]. 地壳形变与地震, 19 (1): 32—36.
- 袁道阳, 杨明. 1999. 西秦岭北缘断裂带的位移累积滑动亏损特征及其破裂分段性研究 [J]. 地震研究, 22 (4): 382—389.
- 张赤军, 刘根友, 方剑. 1994. 断层活动的重力效应 [J]. 地壳形变与地震, 14 (3): 1—8.
- 祝意青, 陈兵, 张希, 等. 2001. 景泰 5.9 级地震前后重力变化特征研究 [J]. 中国地震, 17 (4): 356—363.
- 祝意青, 胡斌, 朱桂芝, 等. 2005. 民乐 6.1、岷县 5.2 级地震前区域重力场变化研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 25 (1): 24—29.
- 祝意青, 李辉, 朱桂芝, 等. 2004. 青藏块体东北缘重力场演化与地震活动 [J]. 地震学报, 26 (增刊): 71—78.
- 祝意青, 王双绪, 江在森, 等. 2003. 昆仑山口西 8.1 级地震前重力变化 [J]. 地震学报, 25 (3): 291—297.

Gravity Field and Its Dynamic Evolutional Characteristics In Lanzhou-Tianshui-Wudu Area, Gansu

XU Yun-ma², ZHU Yi-qing², LIANG Wei-feng², CHENG Hong-bin², LU Lian

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

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

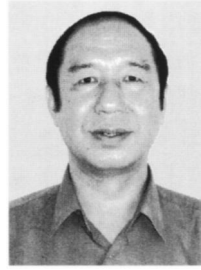
Abstract

The mobile gravity data in Lantianwu area during 2000~2006 is systematically analyzed and dynamically evolutionary characteristics in time and spatial domains of gravity field is researched. From the research results we have had following understandings. The change of gravity field is closely relative to tectonic of active fracture. The change of gravity may be relative to micro-dynamic situation of stress-strain field. The Minxian $M_s 5.2$, $M_s 5.0$ and Wudu $M_s 5.0$ earthquakes are closely relative to the followed two dynamic patterns of gravity field.

Key words: Lantianwu area; evolution of gravity field; movement of crust; tectonic activity



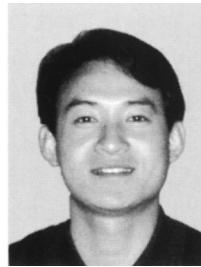
杨国华 中国地震局第一监测中心研究员。1982年毕业于武汉测绘学院大地测量系。现主要从事地震预测、地壳动力学及GPS应用技术研究。



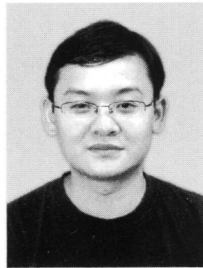
张宏志 中国地震局地球物理所副研究员。1978年毕业于北京大学地球物理系。主要从事数字地震观测资料处理、参数测定及相关研究工作。



杨清湖 台湾省屏东县消防局防灾企划课课长。1989年毕业于警官学校消防系,2006年9月起在屏东科技大学土木工程系攻读硕士学位。主要从事消防与灾害防救企划工作。



王志勇 山东科技大学讲师。2001年毕业于山东科技大学测量工程专业,获学士学位;2007年毕业于山东科技大学摄影测量与遥感专业,获博士学位。主要从事微波遥感、InSAR及D-InSAR数据处理、摄影测量与遥感等方面的研究工作。



傅再扬 福建省地震局信息网络与应急指挥中心工程师。1996年毕业于防灾技术高等专科学校地球物理专业,2003年取得福州大学计算机科学与技术专业本科学历。主要从事地震应急指挥中心技术系统管理与维护工作。



蔡辉腾 福建省地震局,工程师。2006年毕业于重庆大学土木工程学院防灾减灾工程与防护工程专业,获硕士学位。主要从事地震工程和结构抗震等方面的研究工作。



刘仕锦 四川省地震局康定地震中心站工程师。1991年毕业于北京地震技术专科学校(现为防灾技术学院)。主要从事地震分析预报研究和科技档案管理工作。



徐云马 中国地震局第二监测中心工程师。1998年毕业于长安大学测量工程系。现主要从事重力和地形变研究工作。