

# 2001 ~ 2006 年兰州—天水—武都地区 重力场时变小波分析\*

徐云马, 祝意青, 程宏宾, 苏 瑞

(中国地震局第二监测中心, 西安 710054)

**摘要:** 对 2001 ~ 2006 年兰州—天水—武都地区 5 期重力场时变资料进行小波分解, 结合 2003 年 11 月岷县 5.2 级地震、2004 年 9 月岷县 5.0 级地震以及 2006 年 6 月武都、文县间 5.0 级地震进行分析。探讨了无震年份、有震年份及较长时段的重力场时变资料小波分解结果与地震活动之间的关系, 结果表明: 用小波分解方法可有效分离重力场时变的波长成分; 该地区不同层次的重力场时变异常反映了一定尺度意义上不同深度的介质密度的动态变化分布, 说明兰州—天水—武都地区中深部地质构造活动所引起的重力异常变化的 2 阶、3 阶小波细节对 2003、2004、2006 年 3 次  $M_s \geq 5.0$  地震反应明显。

**关键词:** 重力场时变; 构造活动; 小波分析; 兰天武地区

**中图分类号:** P315.72+6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2010)01-0068-07

## 0 引言

小波分析是 20 世纪 80 年代中期发展起来的新兴应用数学理论和方法。它在数学信号、数字图像以及地震资料的处理中都得到了广泛应用, 并取得了良好的效果。小波变换是重力异常多重分解的重要工具。小波分析方法在重力资料处理方面的应用、利用二维离散小波变换的原理以及对应的 MALLAT 式算法对重力场的研究已取得了许多成果 (侯遵泽, 杨文采, 1997; 杨文采等, 2001; 高德章, 侯遵泽, 2000; 宁津生等, 2004; 汪海洪, 2005; 张永志等, 1997; 刘少明等, 2005)。

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 (以下简称兰天武) 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 型重力仪获得了 20 多年的连续高精度重力观测成果, 积累了丰富的流动重力观测资料, 并对兰天武地区重力场时变做了不少研究 (祝意青等, 2005; 徐云马等, 2008; 何文贵等, 2006)。我们运用小波理论与变换方法的多尺度原理, 对比无震年份、有震年份及较长时期重力场时变与地震活动之间的关系,

选择对 2001 ~ 2006 年间 5 期及 2001 ~ 2006 时段的兰天武地区重力场时变进行多层分解, 以获得研究对象的不同细节, 从而达到动态变化场分离的目的。根据重力变化与密度、深度的关系, 该地区深层物质密度的动态变化更为明显, 这种动态变化对认识地震的孕育发展有积极意义。

## 1 测区概况

兰天武地区位于南北地震带中北段, 地处我国环绕青藏高原东北缘的重力异常和地壳增厚梯度带, 同时又位于贺兰—川滇南北构造带与秦岭造山带交汇叠加复合 (西秦岭—松潘大陆) 构造结内。西秦岭—松潘构造结是中国大陆构造的主要地块与造山带聚集、交接、转换部位和东西向中央造山系与南北向贺兰—川滇构造带垂向交汇区, 也是青藏高原北部向大陆内部扩展的前缘 (构造敏感) 部位和中国东西部构造地貌转换过渡的关键部位。兰天武地区的西秦岭岷县—宕昌地区恰好位于该构造结东结点, 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)、光盖山—迭山北麓断裂、光盖山—迭山南麓断裂、迭部—白龙江断

\* 收稿日期: 2009-03-02.

基金项目: 地震科学基金 (A08060) 和国家自然科学基金 (40874035) 联合资助.

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地震活动频繁，在测区内的天水、卓尼、岷县和武都地区都发生过破坏性中强地震（图 1）。

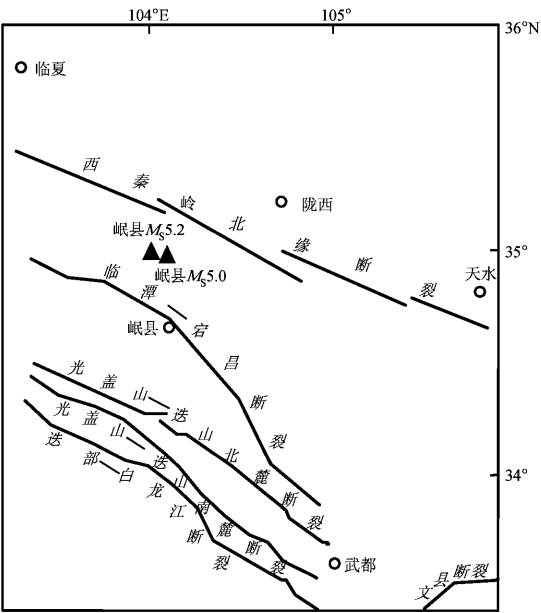


图 1 兰天武地区构造略图

Fig. 1 Tectonic outline of Lanzhou-Tianshui-Wudu area

自 2000 年以来兰天武地区连续发生 2003 年 11 月岷县 5.2 级，2004 年 9 月岷县 5.0 级地震及 2006 年 6 月武都、文县间 5.0 级地震（表 1）。

表 1 近几年在测区内发生的中强地震

Tab. 1 Recent  $M_s \geq 5.0$  earthquakes in the surveying area

| 发震时间<br>年-月-日 | 发震地点     | $\lambda_N$<br>/(°) | $\varphi_E$<br>/(°) | 震级<br>$M_s$ | 震源深度<br>/km |
|---------------|----------|---------------------|---------------------|-------------|-------------|
| 2003-11-13    | 甘肃岷县     | 34.7                | 103.9               | 5.2         | 10          |
| 2004-09-07    | 甘肃岷县     | 34.7                | 103.9               | 5.0         | 19          |
| 2006-06-21    | 甘肃武都、文县间 | 33.1                | 105.0               | 5.0         | 29          |

2 重力场时变的小波分解

2.1 小波分解

为了清晰地分析兰天武地区无震年份、有震年份及较长时期重力场时变与地质构造和地震活动之间的关系，笔者对 2001 ~ 2006 年兰天武地区 5 期重力场时变进行多层分解。数据取样网格间距根据测点间距分别取 5 km、10 km 和 20 km，经过对比最终取为 10 km，并使用最小二乘配置方法对

网格点数据进行拟合。根据低阶小波细节不变准则，小波变换的低阶小波细节并不依赖于所取的阶次，只要通过选取不同阶次  $n$  得到  $n$  阶逼近，就可获得待研究的区域场。利用小波多尺度分解的这一优越性，可以将重力动态变化分解为埋藏较浅、尺度相对较小（即低阶）的场源密度变化和埋藏较深、尺度相对较大（即高阶）的场源密度变化。笔者采用二维离散小波的多尺度分解技术对兰天武地区 2001 ~ 2002 年、2002 ~ 2003 年、2003 ~ 2004 年、2004 ~ 2005 年、2005 ~ 2006 年及 2001 ~ 2006 年 5 年尺度地震发生前后的重力观测数据进行了计算，经分解发现 4 阶小波逼近具有平滑的区域场特征。4 阶小波分解的结果如图 2 ~ 6 所示。

图 2 为 2001 ~ 2006 年兰天武地区重力异常 1 阶小波细节。从图中可以看出：反应兰天武地区由浅层和局部质量变化引起的重力异常变化的 1 阶小波分解结果比较杂乱，具有明显的局部性。2001 ~ 2002 年整体重力变化较小，约为  $\pm 10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ；2002 ~ 2003 年，在两次岷县地震震中附近重力变化较小，约为  $\pm 10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ；2003 ~ 2004 年在地震震中附近重力变化增强，约为  $\pm 25 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，且变化范围明显扩大；2004 ~ 2005 年在地震震中附近重力变化较强，约为  $\pm 25 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，震中附近重力变化范围不大；2005 ~ 2006 年地震震中在测区外，震中附近重力变化幅值和范围都不大；2001 ~ 2006 年重力异常变化比较杂乱，但在两次岷县地震的震中附近还是较明显地反映出重力异常变化。可见重力异常 1 阶小波细节对地震反应不明显，但在震中区附近还是表现出一定的细节变化。

图 3 为 2001 ~ 2006 年兰天武地区重力异常 2 阶小波细节。从图中可以看出：兰天武地区地质构造活动所引起的重力异常变化的 2 阶小波分解结果对地震反应比较明显。2001 ~ 2002 年整体重力变化较小，约为  $\pm 2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ；2002 ~ 2003 年在地震震中附近重力变化约为  $\pm 3 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，且变化范围明显扩大；2003 ~ 2004 年，在两次岷县地震震中附近重力变化约为  $\pm 6 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，且变化范围明显扩大；2004 ~ 2005 年在地震震中附近重力变化约为  $\pm 7 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，震中附近重力变化范围较大；2005 ~ 2006 年在地震震中在测区外，震中附近重力变化幅值和范围较大，约为  $\pm 8 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ；

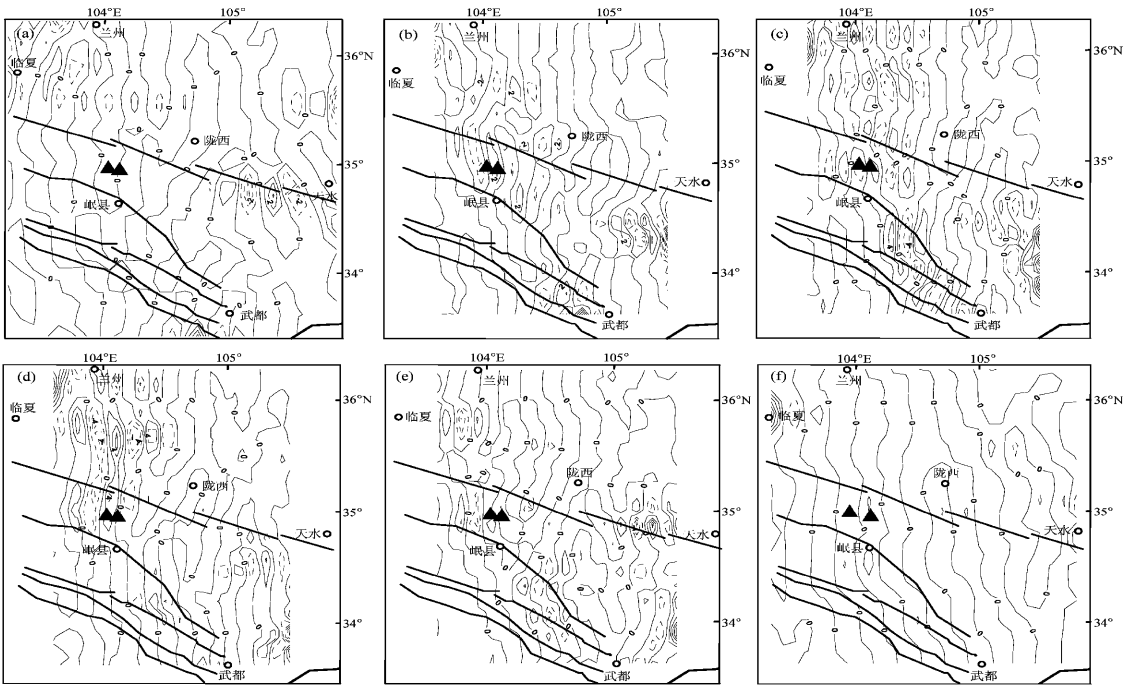


图2 兰天武地区 2001~2006 年重力异常 1 阶小波细节

(a) 2001~2002 年; (b) 2002~2003 年; (c) 2003~2004 年; (d) 2004~2005 年; (e) 2005~2006 年; (f) 2001~2006 年

Fig. 2 1-order wavelet detail of Lanzhou-Tianshui-Wudu area from 2001 to 2006

(a) 2001-2002; (b) 2002-2003; (c) 2003-2004; (d) 2004-2005; (e) 2005-2006; (f) 2001-2006

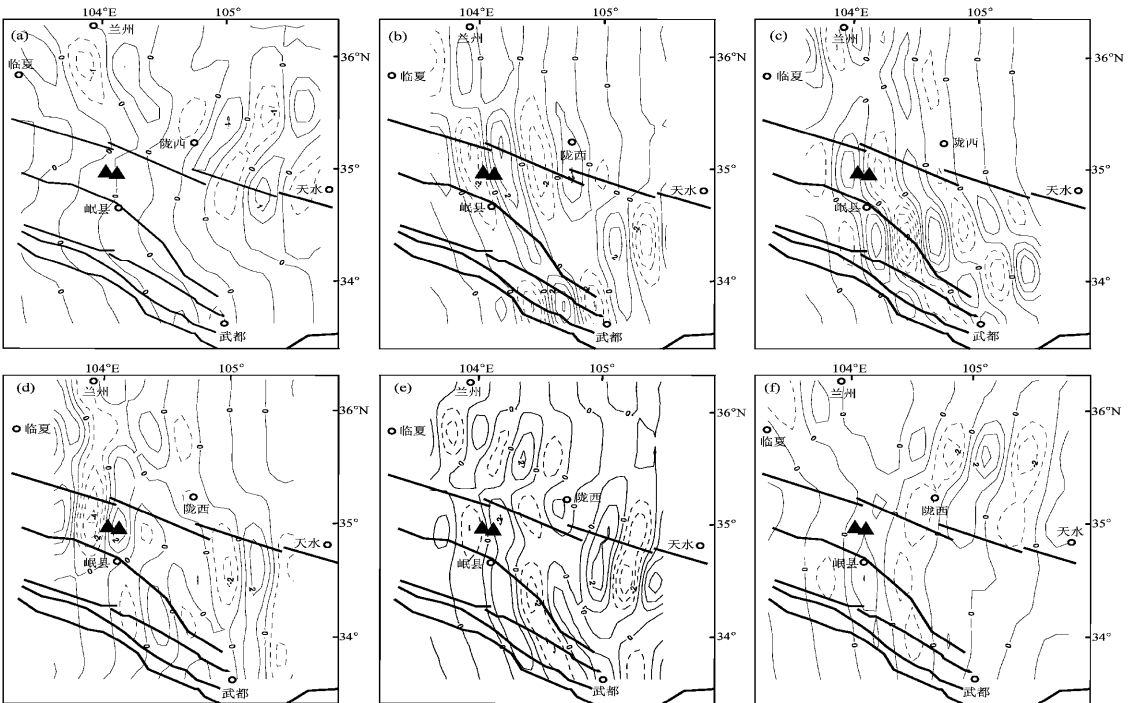


图3 兰天武地区 2001~2006 年重力异常 2 阶小波细节

(a) 2001~2002 年; (b) 2002~2003 年; (c) 2003~2004 年; (d) 2004~2005 年; (e) 2005~2006 年; (f) 2001~2006 年

Fig. 3 2-order wavelet detail of Lanzhou-Tianshui-Wudu area from 2001 to 2006

(a) 2001-2002; (b) 2002-2003; (c) 2003-2004; (d) 2004-2005; (e) 2005-2006; (f) 2001-2006

2001 ~ 2006 年在两次地震震中附近重力变化较大，约  $\pm 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，出现较明显的变化。

图 4 为 2001 ~ 2006 年兰天武地区重力异常 3 阶细节，从图中可以看出：反应兰天武地区中深部物质状态变化所引起的重力异常变化的 3 阶小波分解结果对地震反应比较明显。2001 ~ 2002 年整体重力变化较小，约为  $\pm 0.8 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ；2002 ~ 2003 年，在两次岷县地震震中附近重力变化约为

$\pm 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，对地震反应不明显；2003 ~ 2004 年，在地震震中附近重力变化约为  $\pm 3 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，且变化范围较大；2004 ~ 2005 年，在地震震中附近重力变化约为  $\pm 4 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，震中附近重力变化范围较大；2005 ~ 2006 年地震震中在测区外，震中附近重力变化幅值和范围较大，约  $\pm 2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ；2001 ~ 2006 年，在两次岷县地震震中附近重力变化约为  $\pm 1.5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

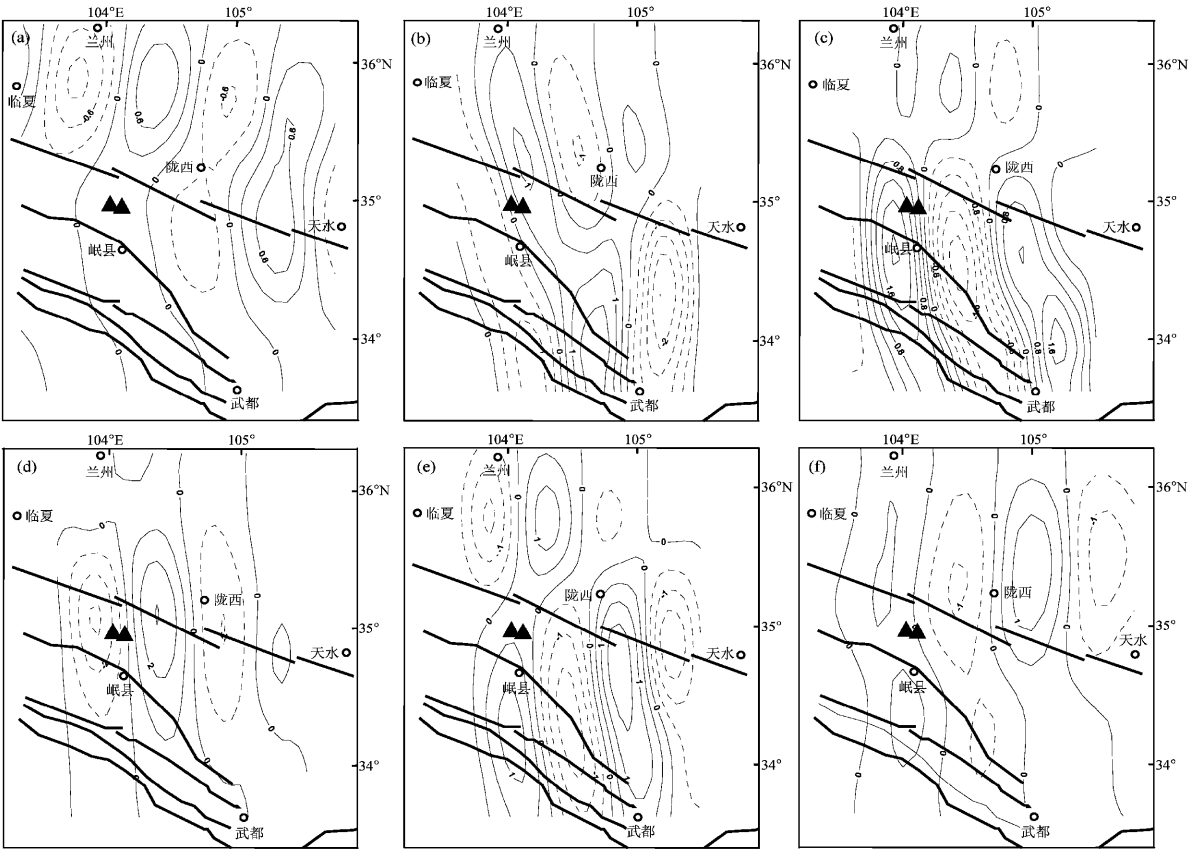


图 4 兰天武地区 2001 ~ 2006 年重力异常 3 阶小波细节

(a) 2001 ~ 2002 年；(b) 2002 ~ 2003 年；(c) 2003 ~ 2004 年；(d) 2004 ~ 2005 年；(e) 2005 ~ 2006 年；(f) 2001 ~ 2006 年

Fig. 4 3-order wavelet detail of Lanzhou-Tianshui-Wudu area from 2001 to 2006

(a) 2001 - 2002；(b) 2002 - 2003；(c) 2003 - 2004；(d) 2004 - 2005；(e) 2005 - 2006；(f) 2001 - 2006

图 5 为 2001 ~ 2006 年兰天武地区重力异常 4 阶小波细节。从图中可以看出：兰天武地区深部物质状态变化所引起的重力异常变化的 4 阶小波分解结果对地震反应不明显，2001 ~ 2002 年整体重力变化较小，约  $\pm 0.4 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ；2002 ~ 2003 年在两次岷县地震震中附近重力变化约为  $\pm 0.3 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ；2003 ~ 2004 年，在地震震中附近重力变化约为  $\pm 0.6 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，且变化范围明显扩大；2004 ~ 2005 年，地震震中附近重力变化约为

$\pm 0.7 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，震中附近重力变化范围较大；2005 ~ 2006 年，两次地震震中在测区外，震中附近重力变化幅值约为  $\pm 0.5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ；2001 ~ 2006 年，在两次地震震中附近重力变化约为  $\pm 0.3 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

图 6 为 2001 ~ 2006 年兰天武地区重力异常 4 阶小波逼近，从图中可以看出：4 阶小波逼近等值线分布呈近东西向有序地正负交错排列，与该地区近东西向的深大断裂的近似，与该地区北西西

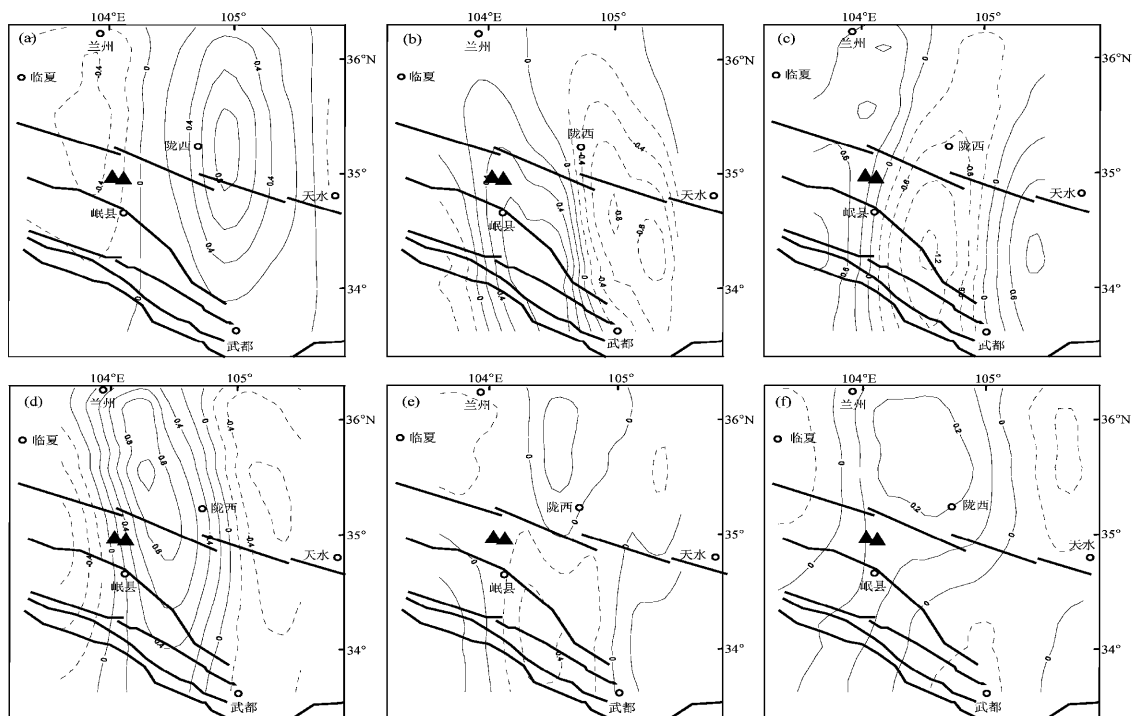


图5 兰天武地区2001~2006年重力异常4阶小波细节

(a) 2001~2002年; (b) 2002~2003年; (c) 2003~2004年; (d) 2004~2005年; (e) 2005~2006年; (f) 2001~2006年

Fig. 5 4-order wavelet detail of Lanzhou-Tianshui-Wudu area from 2001 to 2006

(a) 2001-2002; (b) 2002-2003; (c) 2003-2004; (d) 2004-2005; (e) 2005-2006; (f) 2001-2006

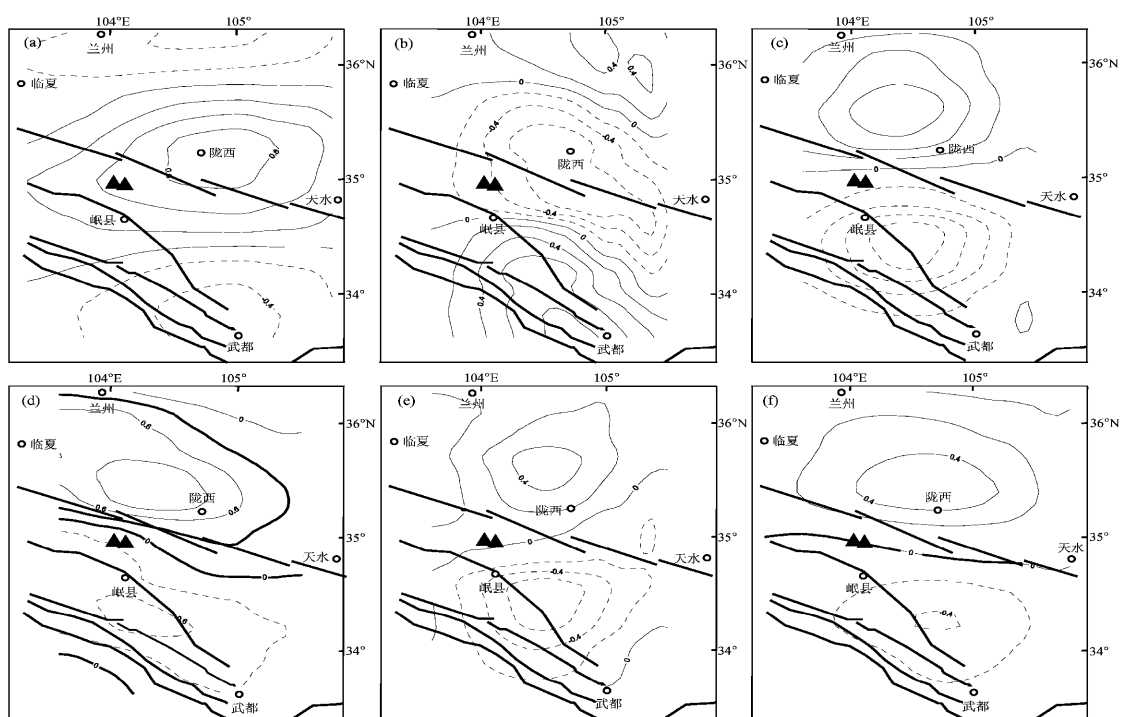


图6 兰天武地区2001~2006年重力异常4阶小波逼近

(a) 2001~2002年; (b) 2002~2003年; (c) 2003~2004年; (d) 2004~2005年; (e) 2005~2006年; (f) 2001~2006年

Fig. 6 4-order wavelet approximation of Lanzhou-Tianshui-Wudu area from 2001 to 2006

(a) 2001-2002; (b) 2002-2003; (c) 2003-2004; (d) 2004-2005; (e) 2005-2006; (f) 2001-2006

向有序分布的布格异常分布也较一致,但是由于数据量不足,图形显示为环形曲线。

## 2.2 结果分析

对比兰天武地区无震年份、有震年份及较长时期重力场时变资料的4阶小波分解结果,可以看出:

(1) 2001~2002年、2002~2003年无震年份的重力场时变4阶小波分解结果的各阶小波细节量级上比较小,但仍可看出一个逐渐增强的趋势,这在一定程度上反映了不同埋深物质运移和地震的孕育过程;

(2) 从2003~2004年、2004~2005年、2005~2006年这3期有震年份资料的重力场时变4阶小波分解结果可以明显看出,兰天武地区中深部地质构造活动所引起的重力异常变化的2阶小波分解结果和3阶小波细节对2003年、2004年、2006年3次地震反应明显,在震中区附近重力异常变化显著,且分解计算结果所反映的密度变化深度与地震资料统计(表1)的深度基本一致,表明地震活动与区域介质密度变化有紧密的联系;

(3) 2001~2006年较长时段的重力场时变4阶小波分解结果表明区域重力场异常变化比较活跃,虽然各阶小波细节从量级上来说较小,但与该时段内的3次地震的响应关系比较好;

(4) 所有时段的4阶小波逼近基本上反映了主场源的动态变化,也体现了该地区的地质构造特征差异,说明该区域背景重力场受到深部深大断裂活动的影响。

## 3 结语

(1) 将小波分析方法应用于兰天武地区无震

年份、有震年份及较长时段资料的重力场时变分析能较有效地分离重力场时变的不同空间波长成分,更清晰地认识重力场变化与地震活动的关系。

(2) 该地区不同层次的重力场时变异常反映了地下不同深度介质在一定尺度意义上的密度的动态变化分布,兰天武地区中深部地质构造活动所引起的重力异常变化的2阶、3阶小波细节对2003、2004、2006年3次 $M_s \geq 5.0$ 地震反应明显。

(3) 由于地形等因素限制,测网点位较稀,在主要断层处布设不够合理,致使数据密度不够,而用数据插值方法又引入了一些虚假信息,降低了整体精度。

## 参考文献:

- 高德章,侯遵泽,唐建. 2000. 东海及邻区重力异常多尺度分解[J]. 地球物理学报,43(6):842-849.
- 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.
- 侯遵泽,杨文采. 1997. 中国重力异常的小波变换与多尺度分析[J]. 地球物理学报,40(1):85-95.
- 刘少明,申重阳,孙少安,等. 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.
- 宁津生,汪海洪,罗志才. 2004. 小波分析在大地测量中的应用及其进展[J]. 武汉大学学报,29(8):659-663.
- 汪海洪. 2005. 小波多尺度分析在地球重力场中的应用研究[D]. 武汉:武汉大学.
- 徐云马,祝意青,梁伟锋,等. 2008. 兰天武地区重力场及其时空动态演化特征[J]. 地震研究,31(1):64-69.
- 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.
- 张永志,丁平,王继英,等. 1997. 河西重力变化的小波分解与地震活动关系的研究[J]. 地壳形变与地震,17(3):26-32.
- 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.

## Wavelet Analysis of the Temporal Gravity Variation in Lanzhou-Tianshui-Wudu Area from 2001 to 2006

XU Yun-ma, ZHU Yi-qing, CHENG Hong-bin, SU Rui

(*Second Crust Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, Shaanxi, China*)

### Abstract

In this paper, we adopt wavelet analysis method to separate different components with different wave length of gravity changes in Lanzhou-Tianshui-Wudu area from 2001 to 2006. The gravity changes were related to the recently-occurred earthquakes, such as  $M_s5.2$  Minxian Earthquake on November 2003;  $M_s5.0$  Minxian Earthquake on September 2003,  $M_s5.0$  Wudu-Wenxian Earthquake on June 2006. Then we discuss the relationship between gravity variations, earthquake activities and tectonic activities. The results show that we can distinguish different gravity changes with different wavelet components by wavelet decomposition, among which 2-order and 3-order wavelet decomposition parts can expose the middle and deep geological and tectonic activities.

**Key words:** temporal gravity variation; tectonic activity; wavelet analysis; Lanzhou-Tianshui-Wudu