

冯建林、檀玉娟、秦建增等,2016,2000~2004 年山西重力场变化及小波多尺度分解,中国地震,32(1),83~92。

# 2000~2004 年山西重力场变化及 小波多尺度分解

冯建林 檀玉娟 秦建增 黄邦武 张瑞敏 谢汝一

中国地震局地球物理勘探中心,郑州市文化路 75 号 450002

**摘要** 利用山西流动重力测网资料和《GDPAS-MRG》软件,得到了 2002 年太原、2003 年洪洞 2 次  $M_L 5.0$  地震前后不同时空尺度的重力场动态变化图像,并利用小波变换方法将 2000~2004 年的山西重力场动态变化进行了多尺度分解,对不同时空小波尺度下的重力场变化进行了分析。结果表明:①这 2 次地震均发生在重力变化梯度带的“0”等值线附近;②通过小波变换可获得不同尺度下的重力场变化,且随着阶次的增加,深部构造活动信息更加突出。

**关键词:** 山西测网 重力场变化 小波变换 多尺度分解

[文章编号] 1001-4683(2016)01-0083-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

山西地震带历史地震和现代地震均比较活跃,历来是国家重点监测防御区之一,为了有效监测山西地区地壳运动,中国地震局地球物理勘探中心于 1991 年在该区布置了地震重力监测网(图 1),每年用 2 台 LCR-G 重力仪进行不少于 2 期的高精度观测,为研究该区域的重力场时变特征提供了资料,并取得了一系列研究成果(李天生等,1998;冯建林等,2006、2013),本文在上述工作的基础上,利用山西地震重力监测网 2000~2004 年的观测资料和《GDPAS-MRG》软件,通过拟稳平差方法将 2000~2004 年来的重力资料统一处理,获得了 2002 年 9 月 3 日太原  $M_L 5.0$  地震、2003 年 11 月 25 日洪洞  $M_L 5.0$  地震前后不同时空尺度的重力场变化,并用小波变换方法将 2000~2004 年的山西重力场动态变化进行多尺度分解,获得了不同小波尺度下的重力场的累积变化。

## 1 测网概况与资料处理

山西地震重力监测网于 1991 年开始运行,当时测点主要分布在山西中南部地区,1997 年将测网扩大至山西北部(图 1),其中共有 80 个测点,90 个测段,自北向南依次跨越了六棱山北麓断裂、恒山北麓断裂、交城断裂、太谷断裂、离石断裂、罗云山山前断裂、中条山南麓断

[收稿日期] 2015-10-09; [修定日期] 2015-12-24

[项目类别] 中国地震局震情跟踪合同制项目(2015010206)、中国地震局“三结合”项目(150201)、中国地震局地球物理勘探中心青年科学基金(YFGEC2014005)共同资助

[作者简介] 冯建林,男,生于 1977 年,工程师,主要从事流动重力测量与研究。E-mail:dfdqwl@163.com

通讯作者:秦建增,男,生于 1963 年,高级工程师,主要从事地震预测研究。E-mail:jzqin@163.com

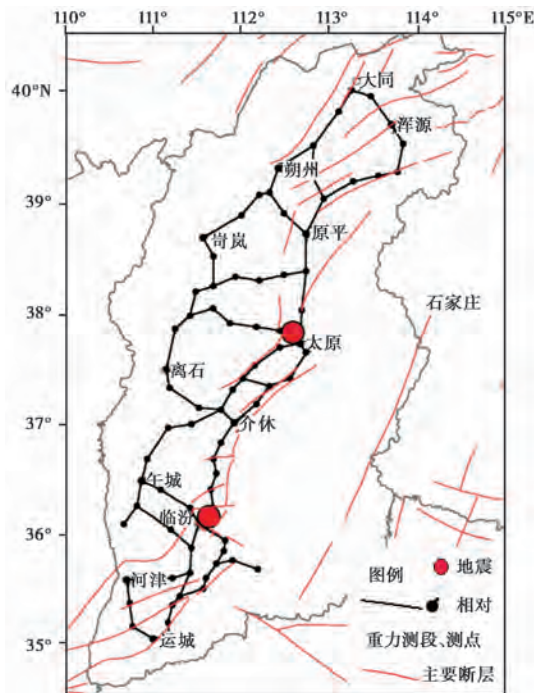


图1 山西地震重力监测网及构造略图

裂等主要活动断裂,基本覆盖了  $35^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $110.5^{\circ}\text{E}\sim 114.0^{\circ}\text{E}$  的空间范围,对 4.5 级以上地震具有较好地监测能力(贾民育等,2000;项爱民等,2007)。

对 2009 年以前观测资料均以离石测点为起算点进行经典平差处理,由于离石测点并不是绝对重力测点,没有考虑起算基准的扰动,这样不利于地震重力异常信息的提取(祝意青等,2001a、2001b、2007a、2007b;胡斌等,2006;高好林,2013),本文用《GDPAS-MRG》软件,采用拟稳平差方法求得各测点重力平差值及其精度,基于平差结果对重力值同点位求差,并采用 Nature Neighbor 方法将 2000~2004 年的多期重力变化差值进行网格化,然后利用小波变换将 2000~2004 年的山西重力场进行多尺度分解,较好地消除了地壳浅表和局部异常源的干扰,突出了地壳深部和区域异常信息。

## 2 重力场变化及小波多尺度分解

研究区域重力场随时间的变化,须以相同的时间为基准,本文以 2000 年 9 月的观测资料为基准,其它各期同一时段的观测资料按时序分别与该时间基准的结果进行差分,这些差分结果之间具有连续性和累积性,可以更好地突出观测区域重力场的动态演化特征(孙少安等,2012)。

### 2.1 重力场累积变化

2000 年 9 月~2001 年 9 月(图 2(a)):测区重力场变化较平缓,最大变化幅值在  $-20 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  左右,以太原为界形成北正南负的变化格局。

2000 年 9 月~2002 年 9 月(图 2(b)):2000 年 9 月~2001 年 9 月形成的一正一负 2 个

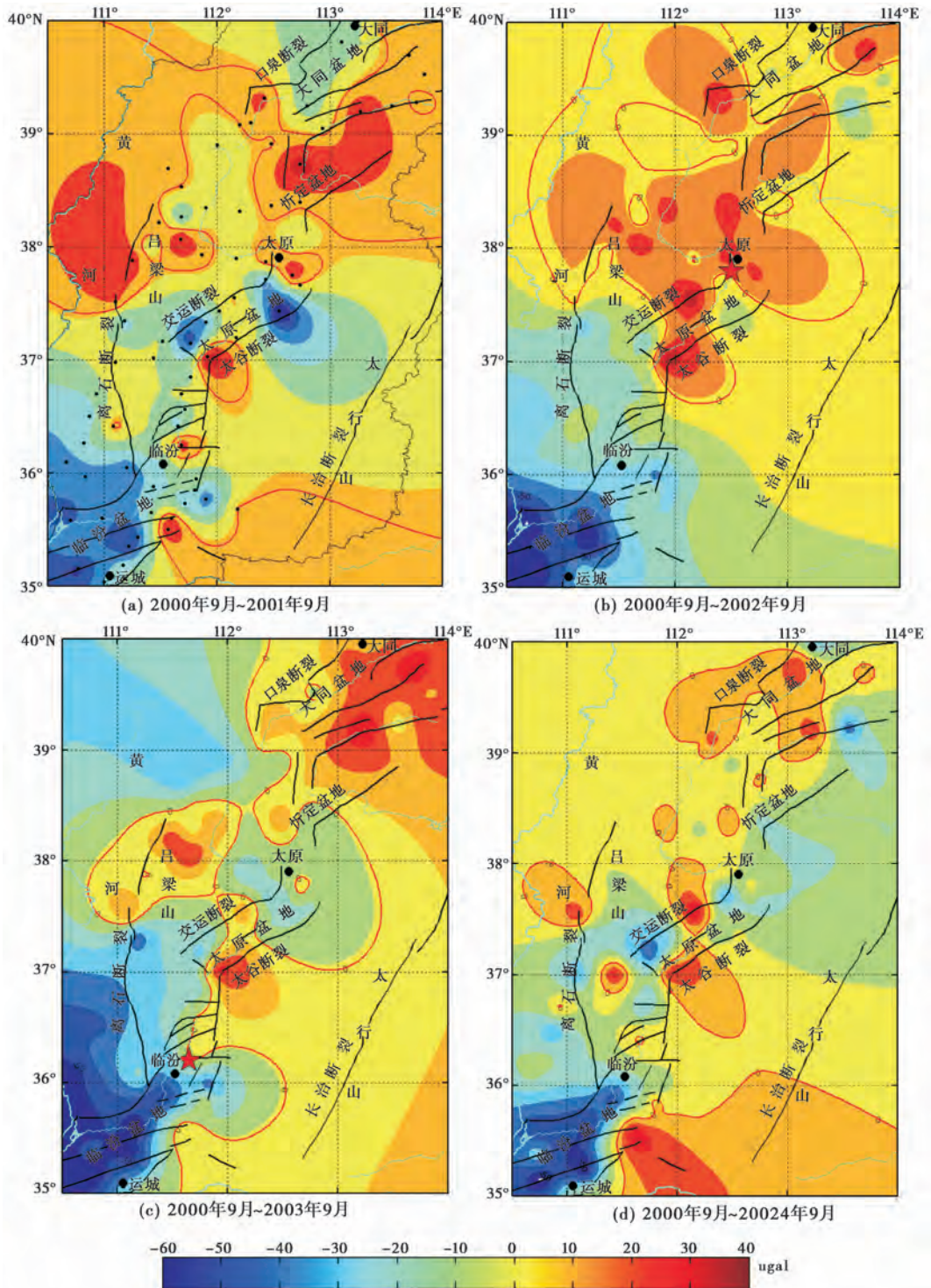


图2 山西测网重力变化等值线图

单位:  $\times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ , 等值线间隔:  $10 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ , 红线为 0 等值线, 黑色圆点代表重力测点, 红五角星为地震震中(下同)

重力变化异常区的变化幅度达  $50 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , 并在 2 个异常区之间形成近 NS 向的重力变化高梯度带, 而且图 2(a) 中出现在太原、介休附近的 2 个“0”等值线在本期连在一起, 并在太原以北发生转折, 太原  $M_L 5.0$  地震发生在“0”等值线拐弯部位, 震中附近太原、介休之间的测点的重力场测值也已由负变正。

2000 年 9 月~2003 年 9 月(图 2(c)): 测区北部重力值持续上升, 南部以临汾为中心的重力值持续下降, 幅值在  $-70 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  左右, 并形成重力变化高梯度带; 太原至介休间的“0”等值线继续向南扩展, 并在临汾以北洪洞附近发生拐弯, 拐弯部位发生了洪洞  $M_L 5.0$  地震, 且震中附近的介休至洪洞之间的重力场由下降改为上升变化态势。

2000 年 9 月~2004 年 9 月(图 2(d)): 山西中北部重力场变化不大, 中南部仍然继续下降, 但变化幅度有所减小, 在  $-30 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  左右, 可见震后测区重力场处于恢复调整状态。

## 2.2 重力场小波多尺度分解结果

小波分析方法是 1984 年由法国地球物理学家 Grossman and Morlet 提出的, 是目前发展比较成熟的数据处理方法, 在布格重力异常、流动重力异常的处理中, 已有过很多探索和研究(侯遵泽等, 1997; 杨文采等, 2001; 朱桂芝等, 2004; 刘少明等, 2004; 祝意青等, 2005; 玄松柏等, 2012; 刘芳等, 2013; 郭树松等, 2014)。该方法的优点是: 可将信号分解成不同尺度的成分, 对重力异常场进行分离, 为解释重力场变化与深度、密度变化的关系提供了较为简便的方法。

利用小波分解的 Mallat 塔式算法, 在 Matlab 下选用二维重力异常分解的双正交小波基函数“bior3.5”将 2000~2004 年山西重力场变化进行多尺度分解, 通过功率谱分析可得到 1 阶、2 阶、3 阶和 4 阶小波变换所反映的大致深度分别为: 4~6km、12~15km、25~30km、40~50km, 图 3(a~d)~6(a~d) 是 2000~2004 年的山西测网重力异常 1~4 阶小波变换图, 由图 3~6 可以看出:

(1) 利用小波变换分解重力异常时, 1 阶、2 阶小波变换等值线圈闭总体范围小, 变化量也较小, 主要反映了上地壳浅层各种因素引起的重力场高频变化只是小尺度的重力场变化。

(2) 随着阶次的增加, 在 3 阶小波变换中, 1、2 阶小波变换中的许多弱小细节已不存在, 深部构造活动信息更加突出, 主要呈较大范围的区域性变化。在 4 阶小波变换中, 这个特点更为明显, 即浅部异常变化小, 深部异常变化较为明显(刘芳等, 2013)。

(3) 从更长时间尺度(2000 年 9 月~2004 年 9 月)看, 4 阶小波变换中: 忻定盆地中重力场的上升幅度逐渐减小, 太原盆地中似“四象限”特征明显, 临汾盆地中重力场的下降幅度逐渐增大。

(4) 在 3 阶、4 阶小波变换中, 这 2 次地震均发生在重力变化高梯度带“0”等值线附近, 可见由小波变换分离出的重力异常作为分析重力场变化图像的辅助手段, 可为将来可能发生中强地震的地点提供判据(祝意青等, 2005; 郭树松等, 2014)。

## 3 结论与讨论

地震的孕育和发生与地球内部的形变及物质迁移密切相关, 国内不少学者对地震前后的重力变化进行过有益的研究与探讨(陈运泰等, 1980; 祝意青等, 2001a、2001b、2005、2007a、2007b、2012、2013、2015; 张晶等, 2001; 胡斌等, 2006; 李辉等, 2009; 王武星等, 2009; 申

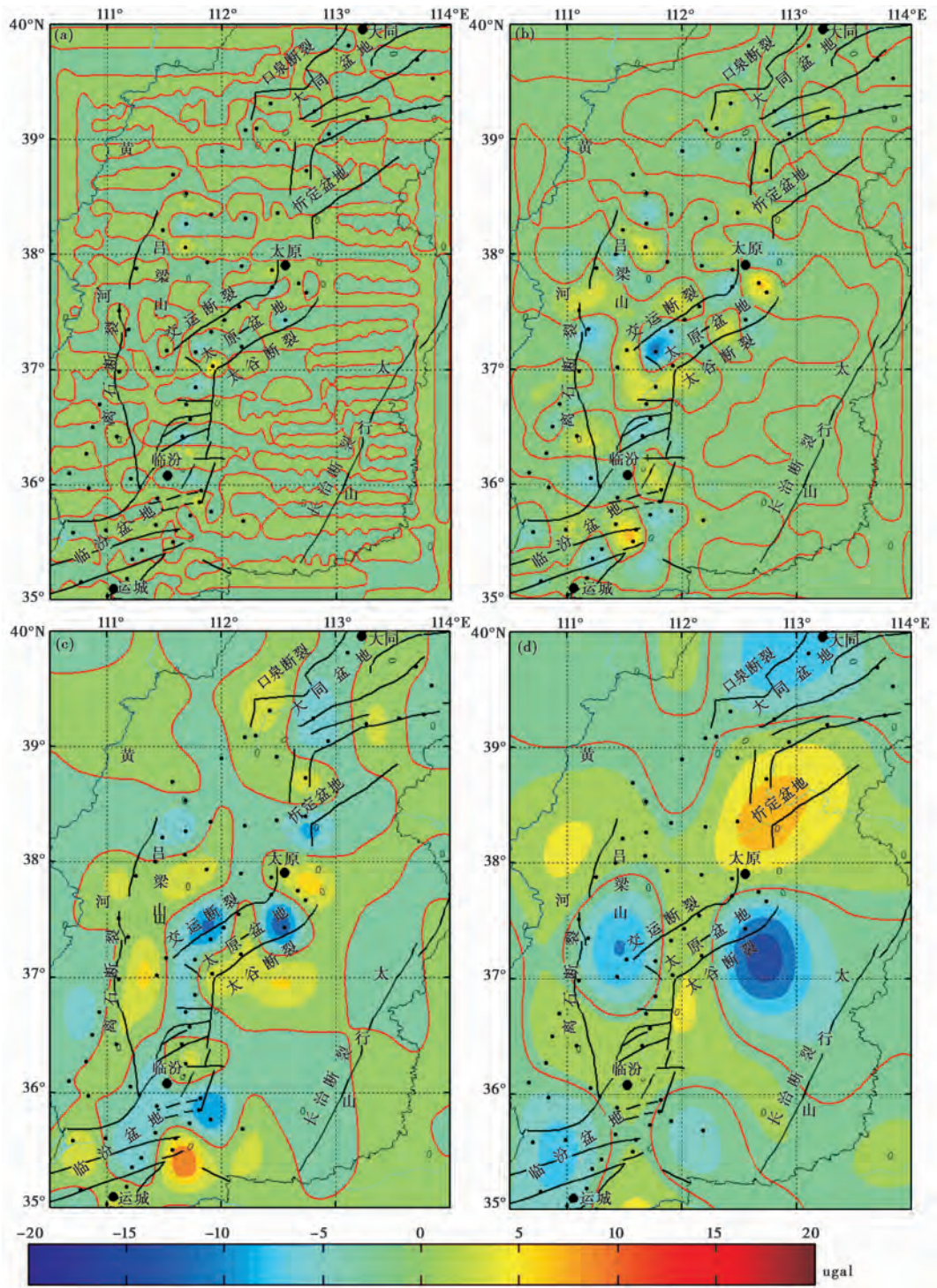


图3 山西测网 2000 年 9 月~2001 年 9 月重力异常 1~4 阶小波变换细节图(单位: $\times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

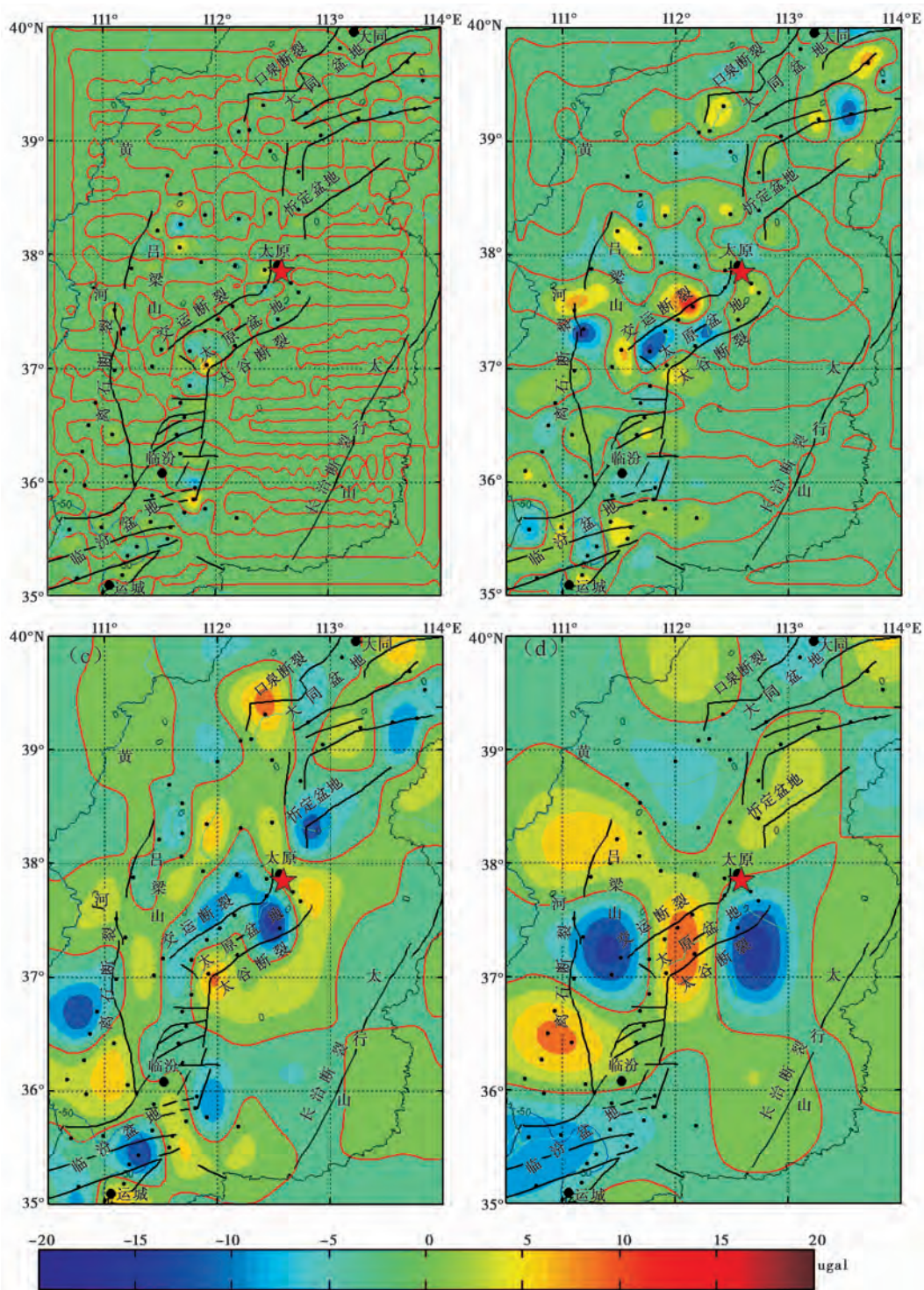


图4 山西测网 2000年9月~2002年9月重力异常 1~4阶小波变换细节图(单位: $\times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

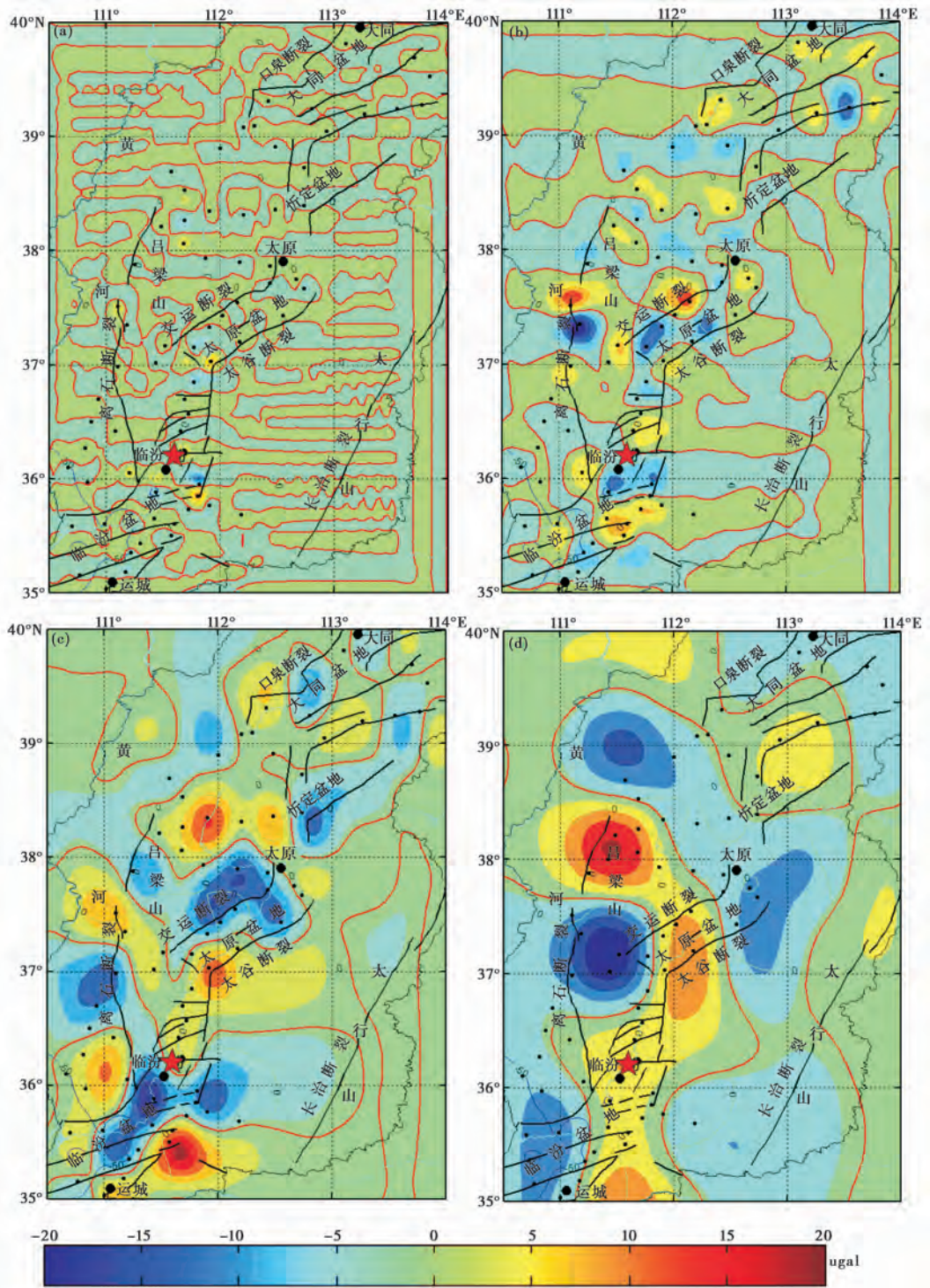


图 5 山西测网 2000 年 9 月~2003 年 9 月重力异常 1~4 阶小波变换细节图(单位: $\times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

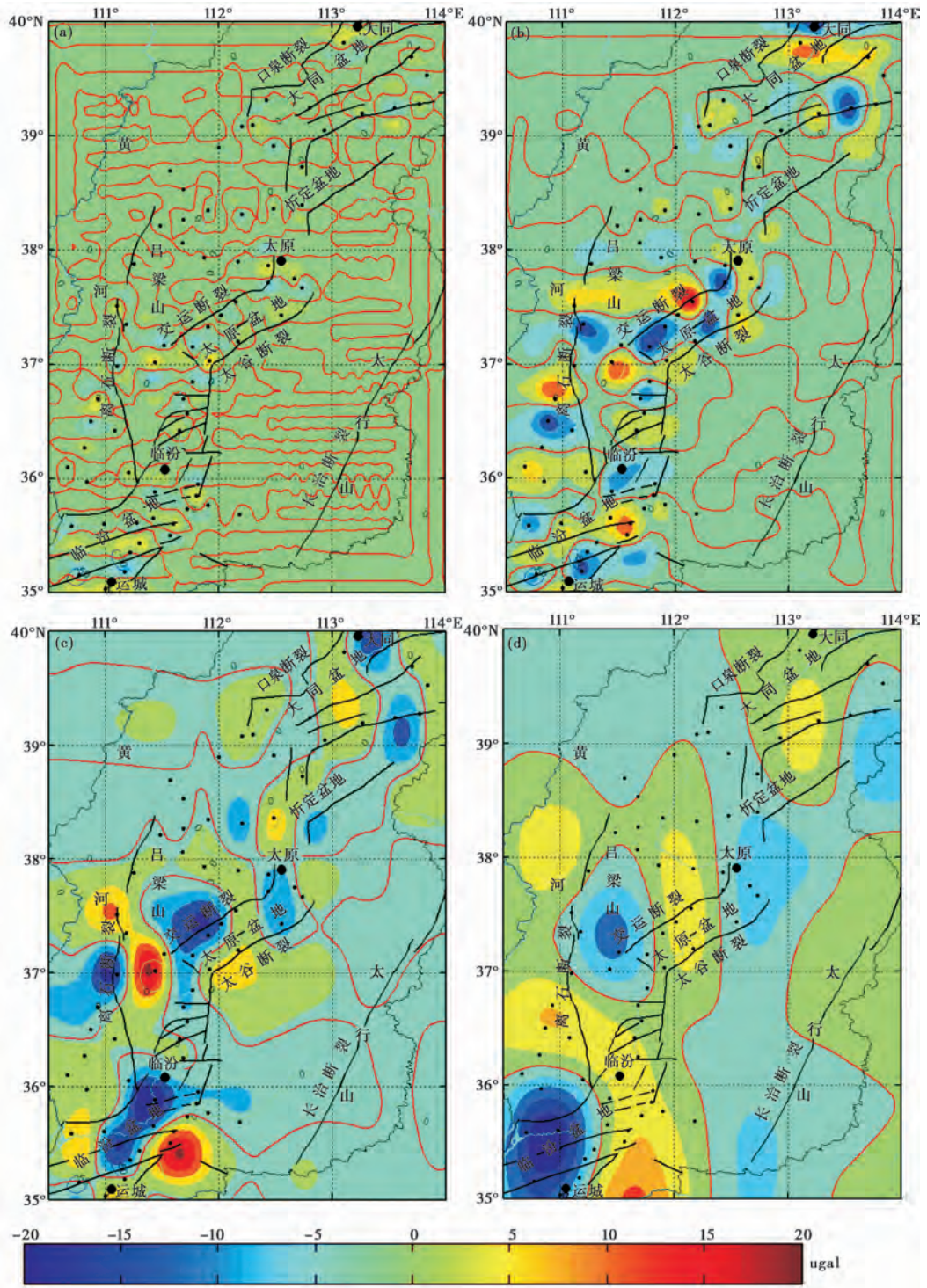


图6 山西测网2000年9月~2004年9月重力异常1~4阶小波变换细节图(单位: $\times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )



重阳等,2010;刘代芹等,2011;郝洪涛等,2012;高好林,2013;郑兵等,2014),研究结果表明:重力变化梯级带及“0”等值线区域是地震发生的有利场所。本文主要分析了2000~2004年的山西重力场累积变化和小波多尺度分解结果,得出以下主要结论:

(1)2002年太原  $M_L$ 5.0 地震及2003年洪洞  $M_L$ 5.0 地震发生前后,震中区附近重力场变化过程大致如下:局部负值变化→局部正值变化→在正向变化的过程中发震,而且这2次地震均发生在重力变化高梯度带的“0”等值线附近。

(2)小波多尺度分解可以获得不同小波尺度下的重力场变化,且随着阶次的增加,1、2阶小波变换中的许多弱小细节已不存在,3阶、4阶小波变换深部构造活动信息更加突出,主要呈较大范围的区域性变化。

**致谢:**感谢湖北省地震局玄松柏副研究员在小波变换计算方面的帮助,感谢审稿专家为本文进一步完善所提出的有价值的修改意见。

## 参考文献

- 陈运泰、顾鼎浩、卢造勋,1980,1975年海城地震与1976年唐山地震前后的重力变化,地震学报,2(1),21~31。
- 冯建林、孙少安、秦建增等,2013,绝对重力控制下的山西地震带2009~2012年重力场动态变化,大地测量与地球动力学,33增(1),49~52。
- 冯建林、赵兵、黄邦武等,2006,山西地区几次地震前后的重力场变化,山西地震,128(4),20~22。
- 高好林,2013,关中地区3次中小地震前后的重力变化,中国地震,29(3),367~376。
- 郭树松、刘芳、祝意青,2014,小波多尺度分解在地震预测中的应用,大地测量与地球动力学,34(4),34~38。
- 郝洪涛、李辉、孙少安,2012,华北地区流动重力观测资料的初步清理,大地测量与地球动力学,32(6),54~58。
- 侯遵泽、杨文采,1997,中国重力异常的小波变换与多尺度分析,地球物理学报,40(1),85~95。
- 胡斌、祝意青、田勤俭等,2006,关中地区重力场及其时空动态演化特征,中国地震,22(2),172~181。
- 贾民育、詹洁晖,2000,中国地震重力监测体系的结构与能力,地震学报,22(4),362~366。
- 李辉、申重阳、孙少安等,2009,中国大陆近期重力场动态变化图像,大地测量与地球动力学,29(2),1~10。
- 李天生、范文、张文玉等,1998,晋中南地区的重力场变化,华北地震科学,16(1),24~28。
- 刘代芹、李杰、王晓强等,2011,利用重力资料与GPS数据研究伽师及邻区近期地壳运动特征,中国地震,27(2),182~191。
- 刘芳、祝意青、陈石,2013,华北时变重力场离散小波多尺度分解,中国地震,29(1),124~131。
- 刘少明、申重阳、孙少安等,2004,小波多尺度分解特征分析,大地测量与地球动力学,24(2),34~41。
- 申重阳、李辉、孙少安等,2010,2008年于田  $M_s$ 7.3地震前重力场动态变化特征分析,大地测量与地球动力学,30(4),1~7。
- 孙少安、康开轩、黄邦武,2012,关于区域重力场变化基准的思考,大地测量与地球动力学,32(1),18~20。
- 王武星、石耀霖、张晶等,2009,河北文安5.1级地震前后重力场动态变化,地震,29(2),40~45。
- 项爱民、孙少安、李辉,2007,流动重力运行状态及质量评价,大地测量与地球动力学,27(6),109~114。
- 玄松柏、邢乐林、谈洪波等,2012,中国大陆2000~2007年重力场变化多尺度分解,大地测量与地球动力学,32(3),8~15。
- 杨文采、施志群、侯遵泽等,2001,离散小波变换与重力异常多重分解,地球物理学报,44(4),534~540。
- 张晶、孙柏成,2001,张北  $M_s$ 6.2地震前重力异常及异常机制探讨,地震,21(2),75~78。
- 郑兵、易天阳、杨洋等,2014,2013年芦山7.0级地震前后重力场变化特征,中国地震,30(4),543~550。
- 朱桂芝、祝意青、唐文等,2004,河西地区重力动态变化的二维离散小波多尺度分解,大地测量与地球动力学,24(1),46~49。
- 祝意青、陈兵、张希等,2001a,景泰5.9级地震前后的重力变化研究,中国地震,17(4),356~363。
- 祝意青、胡斌、朱桂芝等,2005,民乐6.1级、岷县5.2级地震前区域重力场变化,大地测量与地球动力学,25(1),24~29。
- 祝意青、江在森、陈兵等,2001b,南北地震带和青藏块体东部重力场演化与地震特征,中国地震,17(1),56~69。
- 祝意青、李辉、胡斌等,2007a,用双三次样条函数模拟青藏高原东北缘重力场动态图像,中国地震,21(2),165~171。

祝意青、梁伟峰、李辉等,2007b,中国大陆重力场变化及其引起的地球动力学特征,武汉大学学报(信息科学版),**32**(3), 246~249。

祝意青、梁伟峰、湛飞并等,2012,中国大陆重力场动态变化研究,地球物理学报,**55**(3),804~813。

祝意青、闻学洋、张晶等,2013,华北中部重力场的动态变化及其强震危险含义,地球物理学报,**56**(2),531~541。

祝意青、付广裕、梁伟峰等,2015,鲁甸  $M_s$ 6.5、芦山  $M_s$ 7.0、汶川  $M_s$ 8.0 地震前区域重力场时变,地震地质,**37**(1),319~328。

## Dynamic change of gravity field and wavelet multi-scale decomposition in Shanxi from 2000~2004

*Feng Jianlin Tan Yujuan Qin Jianzeng Huang Bangwu Zhang Ruimin Xie Ruyi*  
Geophysical Exploration Center, CEA, Zhengzhou 450002, China

**Abstract** By using the software of GDPAS-MRG, we got the gravity field variation of different time and space scales before and after the 2002 Taiyuan earthquake, and the 2003 Hongdong earthquake. We then performed a wavelet multi-scale decomposition of 2000~2004 gravity field variation of Shanxi Province, and analyzed the accumulative changes of different time and space scales of gravity field in terms of wavelet transform. The above results demonstrate that: (1) The two earthquakes just occurred in the gravity gradient belt and zero line. (2) We can obtain the dynamic variation of different space-time scales of gravity field using wavelet transform, and many weak details are enhanced when the order is increased.

**Key words:** Shanxi Digital Seismic Network Dynamic changes of gravity field Wavelet transform Multi-scale decomposition