

2008年河南封丘4级震群前后重力场时空演化特征

秦建增, 李德庆, 谢汝一, 冯建林, 张瑞敏

(中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002)

摘要:河南封丘4级震群尤其是 $M_L4.8$ 地震前后重力场的变化和动态演化特征的研究表明:震前冀鲁豫测区的重力场出现上升→下降→上升变化可能是较明显的中短期前兆异常反映;封丘地震发生在重力加速变化过程中。重力场动态图像较清晰地反映了孕震区准均匀态→非均匀态→发震的演化过程。震后该区的重力异常没有恢复。还介绍了根据重力异常对封丘地震预测的过程。

关键词:封丘地震;新乡-商丘断裂;重力异常;地震预报

中图分类号: P315.72⁺6 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2010)03-0300-07

The Temporal-spatial Variation Features of Gravity Field before and after the Fengqiu Earthquake Swarm in 2008 in Henan Province

QIN Jian-zeng, LI De-qing, XIE Ru-yi, FENG Jian-lin, ZHANG Rui-min

(Geophysical Exploration Center, CEA, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The variation features of gravity field and seismicity before and after the Fengqiu earthquake swarm are discussed based on the data of gravity monitoring network in border region of Hebei - Henan - Shandong provinces. The results show that the ascent→descent→ascent variations of the gravity field before the earthquake are the obvious reflection of medium-short-term anomalies in the gravity field, and the earthquake occurred during changing stage of acceleration. The dynamic images reflect clearly the evolutionary process of the gravity field in the seismogenic zone, i. e. quasi-homogeneous state→inhomogeneous state→earthquake occurrence. After the earthquakes, the gravity anomalies in this region did not recover. The prediction of Fengqiu earthquake according to the gravity anomalies is presented in the paper also.

Key words: Fengqiu earthquake swarm; Xinxiang - Shangqiu fault; Anomaly of gravity; Earthquake prediction

0 引言

流动重力测量反映的是区域重力场的非潮汐变化,地壳内部的物质迁移、组成地壳物质的密度变化以及地壳构造和地震的形成过程等都可流动重力复测结果中反映出来。重力高梯度带是地壳厚度差异带、深部构造带或密度差异带的反映^[1]。其中密度差异带随区域应力变化而变化,在空间上有较大的自由度,因此重力高梯度带的演化标志着地壳深部密度的变化。而研究重力场的演化特征可为进一

步探讨现今的地壳构造与中强地震的孕育、发生的相互联系提供一定的根据。

2008年1月3日10时18分,河南省封丘(34°56'N, 114°44'E)发生了 $M_L4.3$ 地震,震源深度9 km;3月10日5时45分又在封丘(34°54'N, 114°44'E)发生了 $M_L4.8$ 地震,震源深度7 km;3月20日4时1分封丘(34°56'N, 114°44'E)再次发生了 $M_L4.0$ 地震,震源深度8 km。

本文根据“冀鲁豫测网”的重力场资料,分析封

丘 $M_L 4.8$ 地震前后重力场异常,探讨其变化特征和成因,并介绍根据重力异常对这次地震进行预报的过程。

1 发震构造与深部构造背景分析

封丘 $M_L 4.3、4.8、4.0$ 地震均发生在 NW 向新乡-商丘断裂附近,聊兰断裂南端与该断裂交汇。商丘-新乡断裂西起河南获嘉县峪河口向东经新乡、封丘、黄河、商丘,延伸到安徽境,全长 300 多公里,是华北地区南部一条重要断裂。据地震勘探资料分析,该断裂为一继承性活动断裂,断裂两盘基岩落差为 200 ~ 600 m,新生代断距最大处达 350 m。据中原油田地震勘探资料证实,该断裂在上第三纪晚期曾有过强烈活动,并影响到第四纪地层。

据华北地区潜在震源区划分资料表明,这几次地震的震中区位置处于新乡-商丘 6.5 级地震潜在震源区与东濮 6.5 级地震潜在震源区的交汇部位,1737 年新乡-商丘断裂上曾发生过 5 ½ 级地震,距这 3 次地震的震中仅 35 km 左右。

据地球物理勘探结果表明^[2-3],冀鲁豫地区的地壳上地幔速度结构在纵向和横向上具有明显的不均一性;具有拗陷区地壳介质速度偏低等特征;在聊兰带存在深断裂,成为华北裂谷盆地与鲁西隆起的分界线;在东明-兰考、新乡-郑州存在 Moho 界面出现剧烈变化的梯度带,可能是该地区地震孕育的深部构造背景,封丘 $M_L 4.8$ 地震发生在 Moho 界面梯度变异带上。

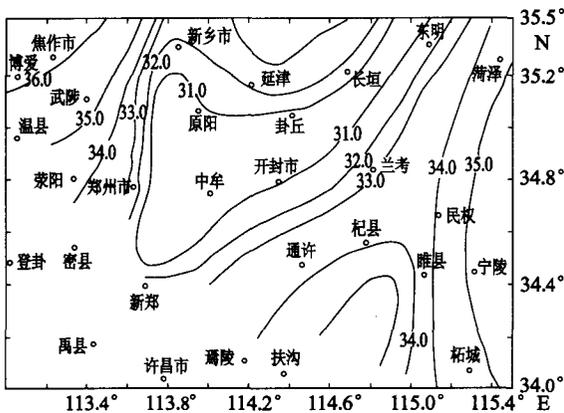


图1 豫鲁地区 Moho 界面埋深等值线图
Fig. 1 The isolines of buried depth of Moho interface in Henan - Shandong border region.

2 重力测网概况及干扰因素分析

2.1 重力测网概况

豫鲁重力测网最早建于 1973 年,当时仅限于豫北地区,称“豫北测网”。1983 年菏泽地震后,该测网扩展到山东西南部,改称“冀鲁豫测网”。1995 年 9 月根据《地震重力重复测量规范》^[4] 的要求,对测网进行了全面改造,重新布设了测点,全部新建了观测平台。该网共有 41 个测点,45 个测段,5 个闭合环^[5]。

1995 年以后,全部观测资料以 1995 年 9 月的观测结果作为基值,计算其随时间的变化。到封丘 $M_L 4.8$ 地震时,共积累了 47 期观测资料。重力复测资料均以郑州为起算点计算各点的相对重力点值,平均点值精度在 $6 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 左右。每年测量 4 期。

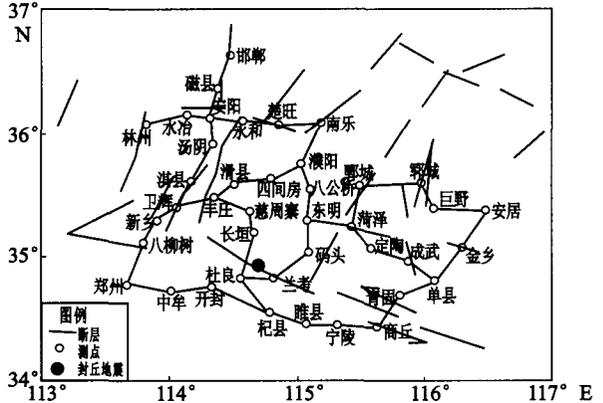


图2 冀鲁豫交界地区构造及重力监测网布设略图
Fig. 2 Distribution of tectonics and gravity monitoring network in the border region of Hebei - Henan - Shandong provinces.

2.2 干扰因素分析

2.2.1 重力测点附近环境状况调查

通过对冀鲁豫测区所有测点附近环境的调查,除了个别测点附近有建筑施工外,绝大多数测点附近没有地下水开采或重大建筑设施的增减。因此环境改变对重力产生的影响可能不会太大。

2.2.2 地下水位变化影响分析

地下水位升降变化对地表重力观测有较大影响,在分析重力与孕震过程有关的变化中应该给予相应的改正,我们使用无限平层改正公式:

$$\Delta g = 42\Delta\rho\Delta h$$

其中 $\Delta\rho$ 为岩石的给水度,因岩石的空隙不同而不同,其变化范围在 0.001 ~ 0.35 之间,砂质粘土为 0.041,粘质粘土为 0.045,潜水层一般在 0.1 ~ 0.3 之间。

随着社会经济的快速发展,对地下水的开采越来越多,华北地区的地下水水位呈下降趋势。比如2006~2008年范县的地下水下降1.47 m,可引起重力值下降。如果给水度按照0.2计算,扰动值约为 $-12 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

对于华北地区,潜水层平均水位小于5 m,水位变化小于3 m,而岩石的空隙度小于0.25,160 m以外无限平层的质量变化,其引力的垂直分量总和不会超过 $1 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。就是说在160 m以外地下水位的较大变化,对重力测量产生的扰动不会太大^[5]。

2.2.3 中原油田开采、注水变化分析

为了研究油田开采、注水对重力变化的影响,我们初步收集了中原油田开采、注水的有关资料。中原油田的油层埋深在1 500~3 900 m之间,注水深度在4 000 m以内。1995年以来月注水量在300~350万吨,而相应的石油月开采量在200~250万吨,月开采量与月注水量相抵能够产生一定的质量盈余,可引起地表重力值增加;另外一方面,油田的注水一般是使用地表或浅层(几百米)地下水注入到较深的地层(1 500~3 900 m),相当于产生一定的质量亏损,这又有引起地表重力值下降的因素。由于重力测点距油井都比较远,一般都超过了160 m,引起的重力扰动会相对小一些。

2.2.4 地壳形变影响分析

华北地区现今突出的动力学表现是新生代盆地发育。在新生代盆地中地壳普遍是继承性地裂陷。在内蒙的呼和浩特-包头地区,垂直形变的最高速率为 $-8 \sim -10 \text{ mm/a}$;在山西断陷带中部,如太原-榆次盆地,垂直形变的速率高达 $-10 \sim -16 \text{ mm/a}$;在山西断陷带南部形变的速率较小;在冀鲁豫地区,据河南省、山东省地震局跨断层的测量结果,垂直形变的速率远远小于 -8 mm/a 。按垂直形变量较大的数据计算,位于新生代盆地中的重力测点由形变而产生的重力最大扰动值约为 $4 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

综上所述,地下水位、石油开采与注水、地壳形变等都可以对重力测量产生扰动,由于它们所产生扰动有正负之分,能够相互抵消,因此估计重力的扰动最大值约为 $\pm 10 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

3 重力场变化特征

3.1 重力点值

2001年6月之前重力场处于平稳状态,点值的上下变化幅度不大,与此相应的是该区地震活动也

比较少。从2001年6月开始测区的重力场出现上升,在此过程中发生了原阳 $M_L 4.5$ 地震;2004年6月至2005年6月重力场出现异常,开始趋势上升,在上升过程中发生了2005年4月27日范县 $M_L 4.3$ 地震,震后重力场的异常有所恢复;2005年12月又开始了新的趋势上升,在上升过程中发生了2006年4月9日范县 $M_L 4.7$ 地震,震后重力场的异常又有所恢复;2008年封丘的3次4级地震尤其是封丘 $M_L 4.8$ 地震前大部分测点(总测点数的85%)出现了不同程度的异常(重力点值的变化量大于该点点值精度的2.5倍即为异常测点),封丘地震后重力场的异常有所恢复(图3)。

2008年3月10日封丘 $M_L 4.8$ 地震之前,点值出现异常过程为:小幅度转折下降-平静-同步或准同步转折的加速上升变化。可能是这次地震的前兆异常。

3.2 重力异常测点百分比

2002年11月以来冀鲁豫交界地区共发生7次4级以上地震(图4),除了2002年11月原阳 $M_L 4.5$ 地震和2008年1月3日封丘 $M_L 4.3$ 地震外,相对于相邻期,重力异常测点所占总测点数的比例都超过20%。由于2008年3月10日、3月20日封丘发生的 $M_L 4.8$ 、 $M_L 4.0$ 地震处于同一个流动重力监测期内,故作为一次地震事件,那么重力异常测点的比例超过20%时,发生4级以上地震的概率为4/6。也就是说,当重力场由相对平静(异常测点比例为5%左右)转变为相对活跃状态时,如果异常测点的比例超过20%,那么在未来3个月之内冀鲁豫交界地区发生4级以上地震的概率就会超过0.67。因此该区地震孕育进入中短期的前兆异常判别指标是:(1)首先,重力场有一次平静过程,异常测点比例小于5%;(2)其次,在重力平静之后,异常测点的比例超过20%;(3)二者同时满足时,3个月之内发生4级以上地震的可能性很大。

3.3 重力场时空动态

3.3.1 封丘 $M_L 4.3$ 地震前的重力演化特征

2007年12月测量结果表明,相对于2007年10月的结果,7个测点表现出异常,所占比例为17%,主要集中下聊兰断裂带南端。测区重力场变化以上升为主,但重力值变化量不大,即重力场表现为相对平静(图5(a))。相对于1995年9月的基期,共有33个异常测点,主要集中下聊兰断裂带的菏泽、鄄城附近和汤西、汤东断裂安阳周围,其中菏泽、鄄城、鄄城三个测点重力的变化量达到95、107、117(单位

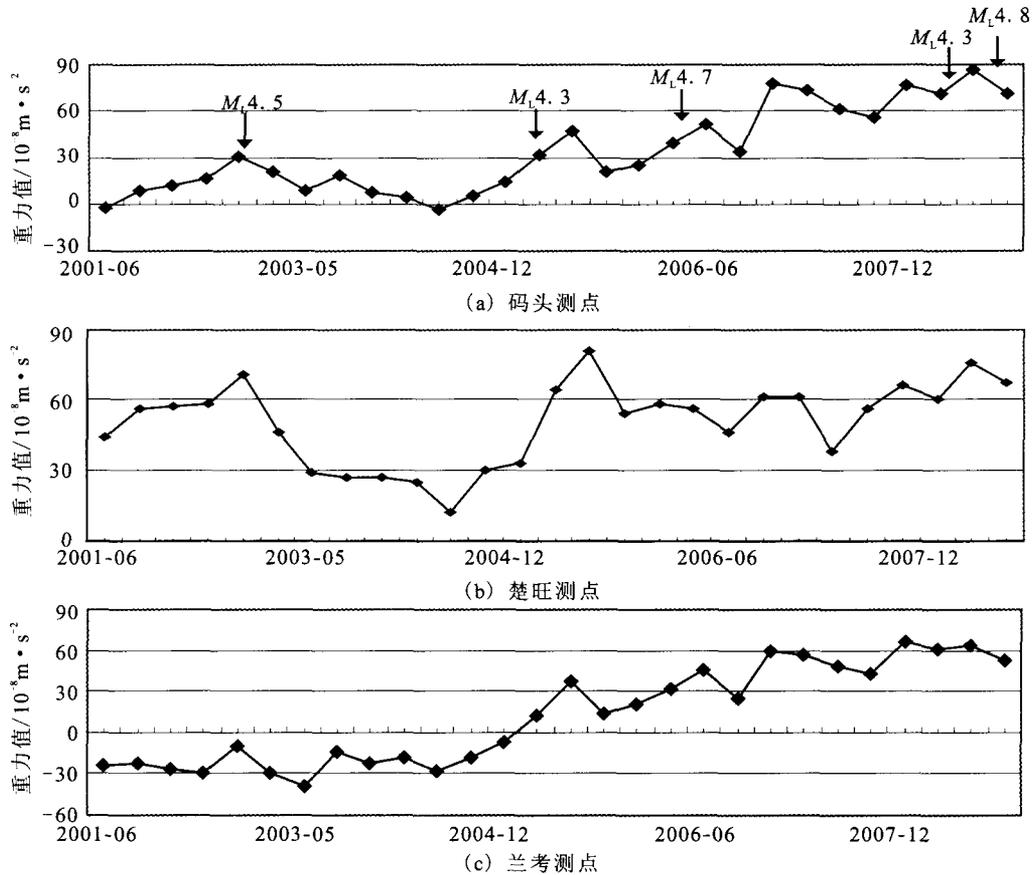


图3 测区部分重力点值变化曲线图

Fig.3 Curves of gravity values at some stations in the surveying area.

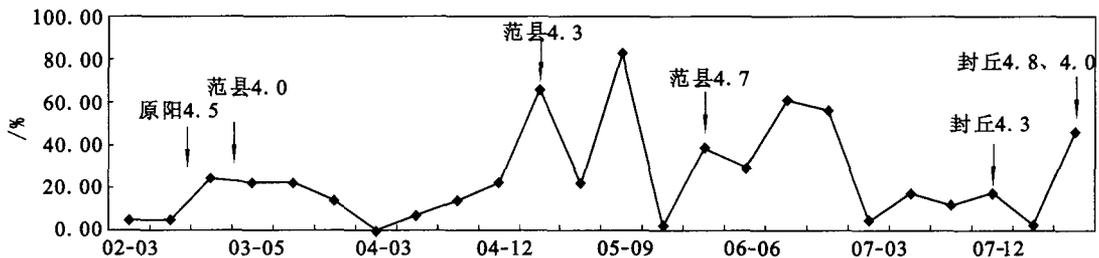


图4 相邻期重力异常测点百分比变化曲线

Fig.4 Curve of gravity anomaly rate among observation stations.

为 $\times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) (图5(b))。

3.3.2 封丘 $M_L 4.3$ 地震后的重力演化特征

2008年1月3日河南封丘 $M_L 4.3$ 地震后,为了追踪震后重力场变化,我们立即组织了地震应急测量,重力观测结果表明:重力场原来上升的趋势有所变化,转为小幅度的下降,仅有单县(-17)1个异常测点,占总测点数的2.4%,其它测点重力值变化量不大,重力场处于相对平静状态。相对于1995年9月的基期,重力场形成密集的东北向梯度带(图6)。

3.3.3 封丘 $M_L 4.8$ 地震前的重力演化特征

2008年2月测量结果表明,相对于2008年1

月,在短短的一个月内,重力场出现大范围、较大幅度的转折变化,变化以上升为主,19个测点出现异常,占总测点数的46%,主要集中于聊兰断裂带西侧,重力值变化量较大的测点有林州(35)、邯郸(38)等(图7(a))。

与1995年9月的基期相比:重力场以上升变化为主,共有35个活动测点,占总测点数的85%。变化量较大的测点有:郟城(127)、菏泽(115)、定陶(91)等,主要集中于聊兰断裂带附近地区,在聊兰断裂带上形成密集的呈东北向展布重力梯度带,与华

北地区的应力场及构造的展布基本一致(图7(b))。

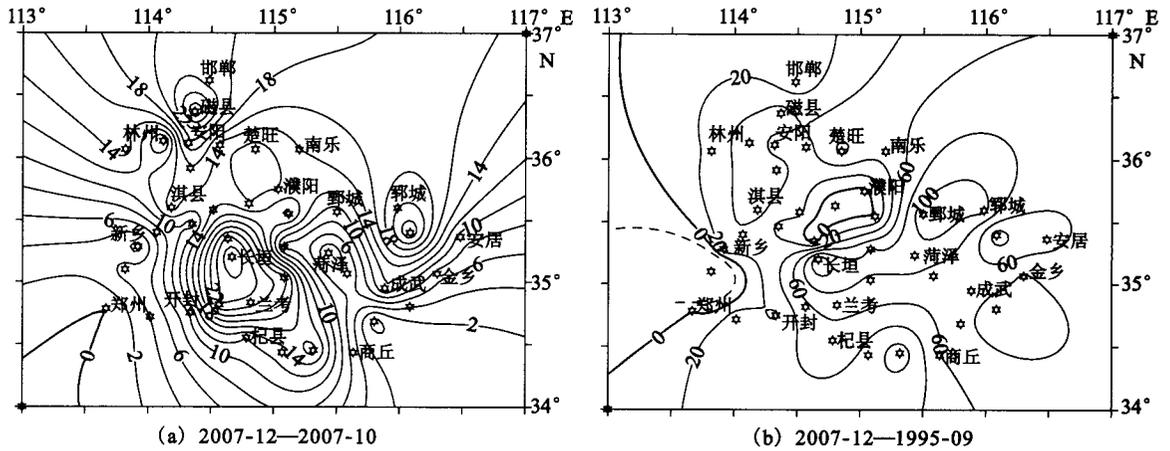


图5 封丘 $M_L4.3$ 地震前重力变化等值线图

Fig. 5 Isolines of gravity changing values before Fengqiu $M_L4.3$ earthquake in the region.

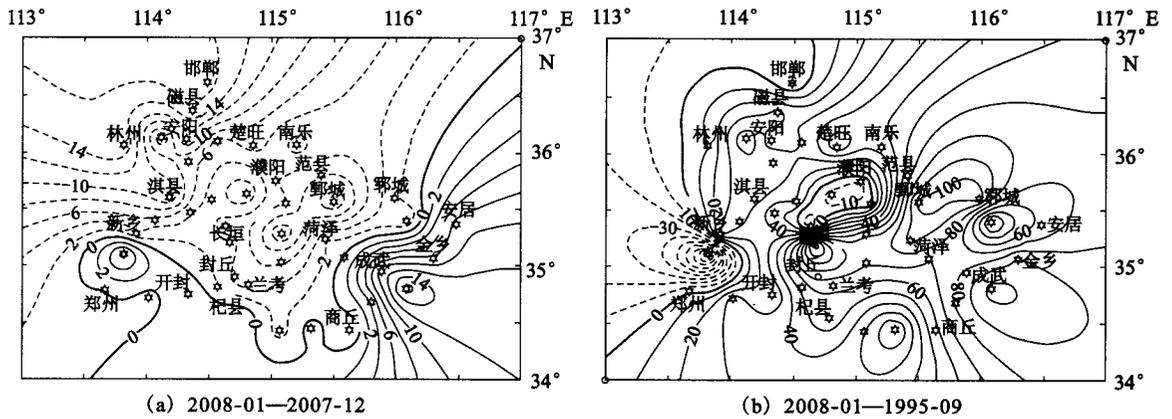


图6 封丘 $M_L4.3$ 地震后重力变化等值线图

Fig. 6 Isolines of gravity changing values after Fengqiu $M_L4.3$ earthquake in the region.

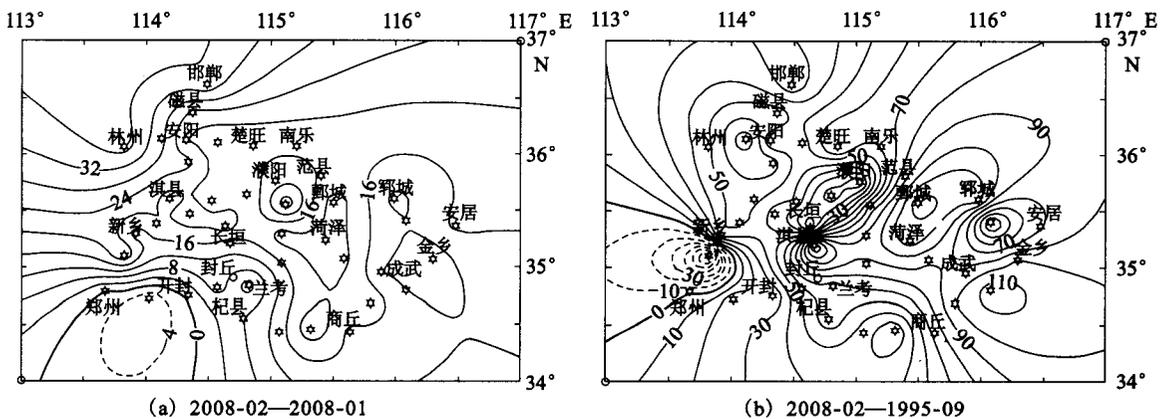


图7 封丘 $M_L4.8$ 地震前重力变化等值线图

Fig. 7 Isolines of gravity changing values before Fengqiu $M_L4.8$ earthquake in the region.

因此,2008年2月28日我们在月会商中指出“冀鲁豫交界地区未来的三个月内具有发生5级左

右地震的可能性”。此后于2008年3月10日、3月20日在封丘分别发生了 $M_L4.8$ 、 $M_L4.0$ 地震,地震发生

在密集重力梯级带上。

3.3.4 封丘 $M_L4.8$ 地震后的重力变化特征

2008年5月11日的测量结果表明,相对于2008年2月的测量结果,重力场再次出现转折,即出现了明显的下降变化,14个测点出现异常,占总测点数的34%,主要集中于聊兰断裂西侧,重力值变化量较大的测点有林州(-43)和八公桥(-33)。重力场明显的下降变化可能是汶川8.0级地震前在冀鲁豫地区的反映。

2008年5月12日四川汶川8.0级大地震后,为了落实汶川大地震后该异常的发展趋势,于5月13-19日进行了应急测量。测量结果表明,相对于2008年5月11日之前的测量结果,重力场出现了反向上升的变化,28个测点出现异常,占总测点数的68%。这可能是汶川8.0级地震后异常的恢复性变化。

2008年7月、9月又进行了2次重力测量,结果表明:测区的重力场在聊兰断裂仍维持着密集的重力梯级带,这表明该区相继发生一系列4级多地震之后,但重力场的变化趋势并没有太大的改变,可能预示着该区仍然有新的地震在孕育的过程中^①。

4 封丘 $M_L4.8$ 地震预报过程

我们在《中国地震局地球物理勘探中心2008年度地震趋势研究报告》^②中指出,根据重力场发展变化趋势以及地震活动性分析,预测:“2008年度及稍长时间内该地区有发生4~5级左右地震的可能性($P=0.7$)”。

2008年1月3日封丘 $M_L4.3$ 地震之后,2008年1月7~15日我们组织了应急测量,复测结果表明地震之后重力场处于平静状态。因此,2008年1月29日在月会商中指出“2008年春节期间及2月份,冀鲁豫交界地区具有发生5级地震背景,但近期发生4级以上地震的可能性不大”。

2008年2月16~24日再次对冀鲁豫交界地区进行重力复测,结果表明重力场出现了大范围、大幅度的上升变化,据以往的震例^[6-12]这种异常变化可能预示该地区孕育着一次中强地震。因此,2008年2月28日我们在月会商中指出“冀鲁豫交界地区未来的三个月内具有发生5级左右地震的可能性”。此后于2008年3月10日、3月20日在封丘分别发生了 $M_L4.8$ 、 4.0 地震。

5 认识与讨论

通过对2002年以来该区4级以上地震与重力场时空演化之间关系的研究,得到了该区地震孕育进入中短期的前兆异常判别指标是:(1)首先,重力场有一次平静过程,异常测点比例小于5%;(2)其次,在重力平静之后,异常测点的比例超过20%;(3)二者同时满足时,3个月之内发生4级以上地震的可能性很大。

封丘 $M_L4.8$ 地震前后,重力场表现出准同步群体性上升→下降→上升的演化过程,地震发生在重力场反向加速变化过程中。重力变化图像较清晰地反映了重力场由“准均匀态”→地震孕育的“非均匀态”→发震→恢复的演化过程。

自20世纪60年代开始,国内外学者就依据地震前后的重力变化进行了多方面的研究,提出了多种地震孕育模型,几乎所有的孕震模型都涉及孕震体震前膨胀阶段^[13]。膨胀是地震孕育过程中的基本物理过程之一,在孕震体膨胀过程中必然引起地表重力的减小。2008年1月该区重力场出现的大范围下降可能是 $M_L4.8$ 地震孕震体膨胀的反映,也就是说重力场的时空演化与孕震过程的膨胀理论是相符合的。

流动重力测量反映的是区域重力场的非潮汐变化,地壳内部的物质迁移、构造活动和地震孕育等过程都可以在流动重力复测结果中反映出来。冀鲁豫交界地区重力场演化与地震活动资料分析中发现,重力变化形态与地壳深部构造活动分布一致,与活动断裂构造密切相关,重力非潮汐变化较显著的梯度带走向与构造活动断裂带走向基本一致,构造单元的边缘往往出现密集的重力等值线,形成高梯度带。

地震活动与现今地质构造,特别是第四纪以来新构造活动关系密切,利用重力资料对本区构造活动进行研究,能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。

对该区重力场时空演化的初步研究表明,流动重力资料得到的重力场演化图像在一定程度上反映了该地区应力场的增强。重力场与构造应力场内关系的理论研究告诉我们,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

① 中国地震局地球物理勘探中心. 2009年度地震趋势研究报告. 2008.

② 中国地震局地球物理勘探中心. 2008年度地震趋势研究报告. 2007.

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^[14]。

[参考文献]

- [1] 王谦身,等 编著. 重力学[M]. 北京:地震出版社,2003:467-474.
- [2] 赵金仁,张先康,张成科,等. 河南林县地震区地壳深部构造背景探讨[J]. 中国地震,1999,15(3):229-236.
- [3] 嘉世旭,张先康,方盛明. 华北裂陷盆地不同块体地壳结构及演化研究[J]. 地学前缘,2001,8(2):259-266.
- [4] 国家地震局,地震重复重力测量规范[S]. 北京:地震出版社,1983.
- [5] 张国民,傅征祥,桂燮泰,等. 地震预报引论[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [6] 秦建增,李清林,郭德科,等. 河南范县 $M_L4.3$ 地震前后的重力场与预测过程[J]. 西北地震学报,2007,29(4):380-384.
- [7] 秦建增,李清林,李德庆,等. 流动重力结果与河南范县 $M_L4.7$ 地震[J]. 华北地震科学,2008,26(1):17-21.
- [8] 李清林,秦建增,冯建林. 河南原阳2002年11月7日 $M_L4.5$ 地震前后的重力场变化[A]//地震研究与工程抗震[G]. 北京:原子能出版社,2003:111-115.
- [9] 李清林,秦建增. 大同5.6级地震前后的重力场变化和深部动力学过程[J]. 地壳形变与地震,2001,19(4):43-51.
- [10] 孟夏,孟万辉,徐敬文,等. 流动重力测量结果与地震的关系[J]. 西北地震学报,2001,23(3):74-77.
- [11] 苏树朋,张跃刚. 河北省文霸网流动重力观测对网区及周边地震的反应[J]. 西北地震学报,2009,31(1):91-96.
- [12] 刘代芹,王晓强,李杰,等. 新疆南天山地区重力场动态演化特征[J]. 西北地震学报,2009,31(2):174-178.
- [13] 梁伟锋,祝意青,刘练,等. 民乐6.1级地震前后的重力变化[J]. 大地测量与地球动力学,2006,26(3):59-64.
- [14] 胡斌,祝意青,田勤俭,等. 关中地区重力场及其时空动态演化特征[J]. 中国地震,2006,22(2):172-181.