



平原 M_S 5.5地震与流动重磁应急观测分析

陆汉鹏, 王锋吉, 张刚, 颜启, 李树鹏

The Pingyuan M_S 5.5 earthquake and emergency observation and analysis of the mobile gravity and magnetism

Lu Hanpeng, Wang Fengji, Zhang Gang, Yan Qi, and Li Shupeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzkxjz.2024-025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[上海地震流动观测台综合伺服系统的研发](#)

Research and development of integrated servo system for Shanghai seismic mobile observatory

地震科学进展. 2021(10): 467–471

[地震流动观测实用技术研究](#)

Research on practical technology of transportable seismic observation

地震科学进展. 2020(9): 8–15

[地震重力观测技术的新发展方向：绝对重力与重力梯度一体化观测](#)

The new development direction of seismic gravity observation technology: Integrated measuring of absolute gravity and vertical gravity gradient

地震科学进展. 2023, 53(2): 49–56

[潍坊地震监测中心站青州3.4级地震应急服务工作探讨](#)

Discussion on the emergency service of Weifang earthquake monitoring center station for the Qingzhou $M3.4$ earthquake

地震科学进展. 2023(7): 323–329

[基于重力观测的巴颜喀拉块体强震震级模拟分析](#)

Simulation analysis of strong earthquake magnitude in Bayankala block based on gravity observation

地震科学进展. 2021(11): 481–488

[剑河 \$M\$ 5.5地震前地磁异常特征分析](#)

Analysis of geomagnetic anomalies before the Jianhe M 5.5 earthquake

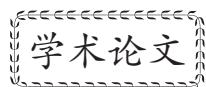
地震科学进展. 2020(5): 12–17



关注微信公众号，获得更多资讯信息

陆汉鹏, 王锋吉, 张刚, 等. 平原 M_S 5.5 地震与流动重磁应急观测分析 [J]. 地震科学进展, 2025, 55(3): 135-142. doi:10.19987/j.dzqxjz.2024-025

Lu H P, Wang F J, Zhang G, et al. The Pingyuan M_S 5.5 earthquake and emergency observation and analysis of the mobile gravity and magnetism[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2025, 55(3): 135-142. doi:10.19987/j.dzqxjz.2024-025



平原 M_S 5.5 地震与流动重磁应急观测分析

陆汉鹏* 王锋吉 张刚 颜启 李树鹏

(山东省地震局, 山东济南 250014)

摘要 介绍了山东平原 M_S 5.5 地震概况及地震地质特征, 详细阐述了震后流动重力、流动地磁应急观测过程及快速反应处置能力, 对震后进行加密观测, 分析重磁资料震前震后的变化特征, 主要利用近几年的流动重力资料, 系统分析了平原 M_S 5.5 地震震前重力场半年尺度差分变化、1~3 年尺度累积变化的动态演化特征, 较好地反映了平原 M_S 5.5 地震孕育、发生过程中出现的流动重力急剧上升变化的异常前兆信息及震后重力场反向恢复的有效理论。最后, 对流动重磁应急观测结果进行分析, 对重力场、应力场及地震关系之间的机理进行了讨论。根据震后应急观测分析, 建议应该继续加强重磁融合分析能力, 提高分析结果的可靠性, 为后续观测及震后进一步分析研判提出可行依据, 也为山东地区震后总结及进一步强化流动监测及地震危险区判定提供参考依据。

关键词 平原地震; 流动重力; 流动地磁; 应急观测

中图分类号: P315.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7780(2025)03-0135-08

doi: 10.19987/j.dzqxjz.2024-025

The Pingyuan M_S 5.5 earthquake and emergency observation and analysis of the mobile gravity and magnetism

Lu Hanpeng, Wang Fengji, Zhang Gang, Yan Qi, Li Shupeng

(Shandong Earthquake Agency, Shandong Ji'nan 250014, China)

Abstract This study provides an overview of the seismic geological characteristics of the M_S 5.5 earthquake in Pingyuan, Shandong. In this study, the rapid response and disposal capabilities after the earthquake, including mobile gravity and geomagnetic emergency observations, were elaborated, and encrypted observations after the earthquake were conducted. It analyzes the changes in gravity and magnetic data before and after the earthquake. The primary use of mobile gravity data in recent years has been to systematically analyze the dynamic evolution characteristics of the half-year scale difference change and the 1~3 year scale cumulative change in the gravity field before the M_S 5.5 earthquake in Pingyuan. It better reflects the abnormal precursor information of the rapid increase in mobile gravity during the development and occurrence of the M_S 5.5 earthquake in Pingyuan and the effective theory of reverse recovery of the gravity field after the earthquake. Finally, the emergency observation results of mobile gravity and magnetism were

收稿日期: 2024-01-31; 采用日期: 2024-05-14。

* 通信作者: 陆汉鹏(1971-), 男, 高级工程师, 主要从事流动野外监测工作。E-mail: luhanpenglx@163.com。



analyzed, and the relationship between the gravitational field, stress field, and earthquakes was discussed. Through post-earthquake emergency observation and analysis, we should continue to strengthen the capability of gravity and magnetic fusion analysis, improve the reliability of the analysis results, provide a feasible basis for subsequent observation and further analysis and judgment after the earthquake, provide a reference basis for post-earthquake summaries, and strengthen mobile monitoring and earthquake risk zone identification in the Shandong region.

Keywords Pingyuan earthquake; mobile gravity; mobile geomagnetism; emergency observation

0 引言

2023年8月6日2时33分,德州市平原县发生 $M_{\text{S}}5.5$ 地震(37.16°N , 116.34°E),震源深度10 km。地震发生后,山东省地震局迅速启动应急响应机制,山东地震台根据《震后12小时山东省地震局地震应急服务响应行动清单》的要求开展工作。

根据监测预报处及山东地震台部署,山东地震台流动观测人员对鲁西北重力网进行应急观测,根据震后会商研判认为,有必要在平原震区周边新增流动磁测点,加密观测聊城—高唐测线,将流动地磁鲁西测线北延到德州平原地区。

任务下达后,山东地震台流动观测人员迅速规划测量方案,震后3小时内,完成流动重力观测设备的检查和人员队伍集结,赴德州平原震中开展流动重力应急观测工作。

1 平原5.5级地震地质构造、烈度分布及破坏概况

1.1 地震地质构造

平原 $M_{\text{S}}5.5$ 地震发生在华北断陷区中部,河北平原带东支,最近的地震断层是陵县—冠县断裂,距离该断层线最短距离约2 km。陵县—冠县断裂是黄骅坳陷和埕宁隆起的分界断裂。该断裂晚更新世以来不活动,属于第四纪早、中期断裂。另外,从数字地震学研究,震源机制解的截面方向以及震后余震精确定位的展布来看,地震的发震断层为北东向。震中5 km范围内平均海拔26 m。

1.2 地震烈度分布

此次地震最高烈度为Ⅷ度(7度),等震线长轴呈北东走向,长轴为24 km,短轴为12 km。Ⅵ度(6度)区及以上面积约 224 km^2 ,涉及山东省德州市平原县王打卦镇、恩城镇、王杲铺镇、三唐乡、龙门街道、桃园街道、腰站镇、王庙镇和德城区黄河涯镇2个区县的9个乡镇(街道)。[图1](#)为其烈度图分布(源自中国地震局防震减灾网新闻资讯图片新闻)。

2 流动重磁应急观测

由于近年重力网优化^[1],鲁西北测区观测密度稀疏并且多年未测,需重新查找往年观测测点并优化观测路线,采用相对重力联测和绝对重力测定相结合的方式,获取同震及震后重力变化结果。观测区域为鲁西北测区,设计东西、南北展开距离约150 km,完全覆盖德州测区及济南、聊城周边。区域内包括28个重力点并联测到最近的泰安、临西绝对重力点提供起算基准,形成鲁西北区域重力观测网。

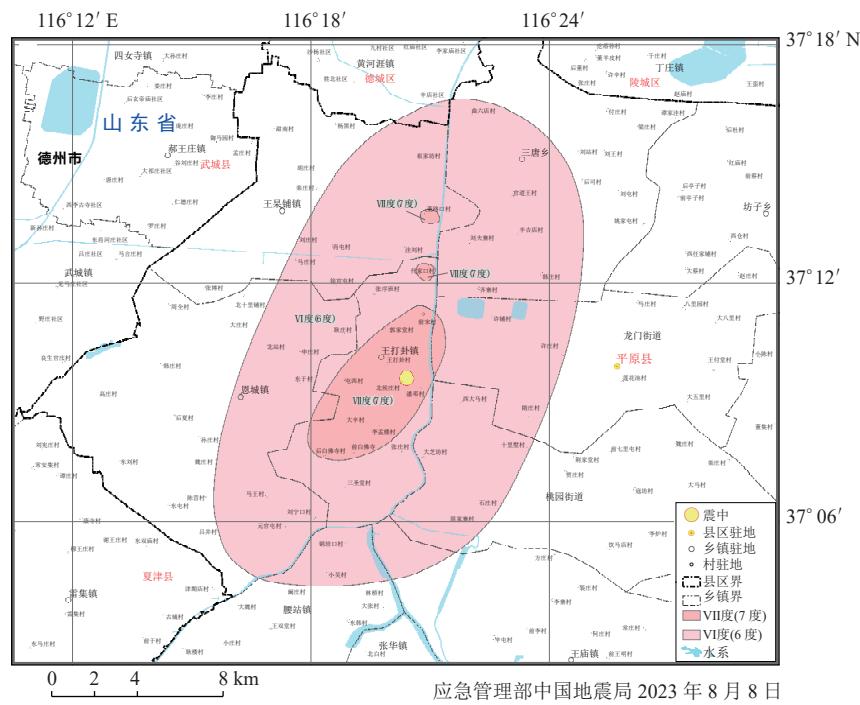
平原 $M_{\text{S}}5.5$ 地震发生后,流动重力观测小组迅速奔赴震中王打卦,首先在震中选点并进行重力测量,然后在周边地区开展应急观测。另一小组开始进行室内资料整理,根据震中周边做出德州及周边济南、聊城区域的施测路线图,完成地震应急监测方案并报监测处。根据监测方案整理完成测点位置、信息点号及点志记,提供给野外观测人员使用。室内人员参加震后会商,根据本期资料计算分析并与历史资料对比,做好资料分析并保持与现场观测人员联系,为地震趋势分析研判提供有力证据。

流动地磁观测组完成流动地磁观测设备检查和人员队伍集结,制定流动地磁应急观测方案,于8月9日开展地磁场总强度绝对测量。

现场流动重力观测人员完成每天的应急观测任务并报送监测处,共完成鲁西北重力网加密观测34个测段的往返观测,室内工作人员完成历史资料整理并与现场测量人员每日进行沟通对接,10天完成了鲁西北重力网加密观测任务。

流动地磁观测组对鲁西测点进行观测,加密观测聊考断裂带北段高唐—聊城7个测点,由高唐测点向北延伸到平原震中以北区域,新增了6个测点进行勘选和测量,总计13个测点,8天完成了流动地磁加密观测任务。

应急观测正值炎炎夏季,作业人员克服天气及庄稼地蚊虫叮咬等重重困难,加班加点,于2023年8月15日完成了全部的观测任务。因平原震中周边

图1 山东平原M_S5.5地震烈度图Fig. 1 Intensity map of M_S5.5 earthquake in Shandong Pingyuan

近年流动重力没有观测,流动地磁是首次观测,为了比较震后观测变化情况,震后1个月后又进行了加密复测,共完成2期加密观测任务。流动地磁复测13个测点,流动重力复测21个测段,增加河北临西绝对重力点。流动重磁应急加密观测测点及路线图如图2(流动重力8月完成34个测段,9月完成21个测段加密观测任务,大部分测段为重复观测)。

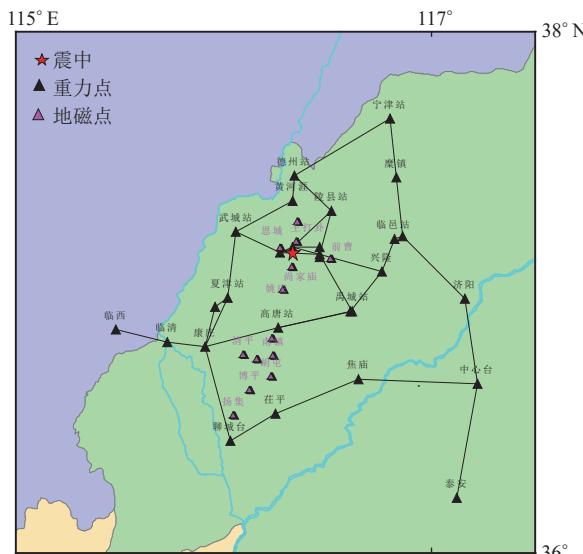


图2 流动重磁应急加密观测测点位置及路线图

Fig. 2 Location and route maps of emergency encrypted observation points for mobile gravity and magnetism

3 资料处理

3.1 流动地磁观测资料处理

合理准确地描述岩石圈磁场的空间分布及时间变化需要尽可能精准地从观测数据中消除各种外源磁场以及地球主磁场的影响。因此,中国地震局制定了观测技术规范以及日变通化、长期变化改正的数据处理流程^①。

为消除地磁观测数据中所包含的地磁场日变化等外源场成份,采用各监测区内邻近地磁台站连续观测分钟值对重点危险区野外观测数据进行日变化改正通化。通化零时为北京时00:00—03:00的平均值,通化日为各监测区观测周期内的磁情变化相对最平静日。通化选择的台站为泰安台,通化数据为泰安台的FHD观测数据,对比台站选择郯城地震台的FHD观测数据。

利用“国际地磁参考模型”对日变化改正通化后的观测数据集进行长期变化通化改正。通化的标准地磁年代为2020.0年代。目前,长期变化通化改正所采用的模型为流动地磁技术管理组发布的NOC模型,该模型每5年发布1次,因此,本文所涉及资料采用的模型为2020.0年代,最终获得山东地区地磁

^① 关于印发《流动地磁测量基本技术要求(试行)》(中震测函[2015]39号)的通知

基本场长期变化改正数据集^[2]。

3.2 流动重力观测资料处理

利用的主要数据为山东地区流动重力观测资料及本次应急观测资料,按照《地震重力测量规范》的相关要求^[3],采用中国地震局流动重力学科组推荐的方法,利用LGADJ软件对相对重力观测数据进行了固体潮改正、气压改正、漂移改正和仪器高度改正等预处理,以山东境内9个绝对重力控制点作为起算基准,采用经典平差方法对测网数据进行了平差计算,得到测网各期重力点的重力值。各期数据相对于基期数据求差得到累积变化量,相邻两期数据后期减前一期重力值得到差分变化量,为分析平原M_S5.5地震前后重力场变化特征,分别以基期为基准,统计了震前3年尺度及震后半年时间的重力场变化。经过必要的插值和滤波处理后,绘制出重力场动态变化图像,得到山东及周边地区最近3年的重力场动态变化图像。

在本次应急重力观测前,均对仪器进行检调及参数标定,确保了观测数据的可靠性。测量结果显示,本次应急流动重力观测,满足精度要求。

4 流动地磁资料分析

4.1 流动地磁变化特征分析

鲁西测区主要沿聊考断裂带及其分支断裂带布

设磁测点,由高唐向南经聊城过黄河至东明,主要监测鲁西南地区聊考断裂带两侧的地磁场变化,共布设20对磁测点^[4]。从鲁西测线地磁剖面年变化图(图3)可看出,鲁西20个测点年变化正常波动变化,测点上升下降幅度和范围比较均衡,上升最大的聊城测点1年上升6nT,属于观测限差范围之内,该区内各地磁测点地磁场变化较平稳,且各测点变化趋势基本一致,空间差异小。2023年6月较2022年6月平均变化仅0.15nT,近3年鲁西20对测点年变化没有异常显现。

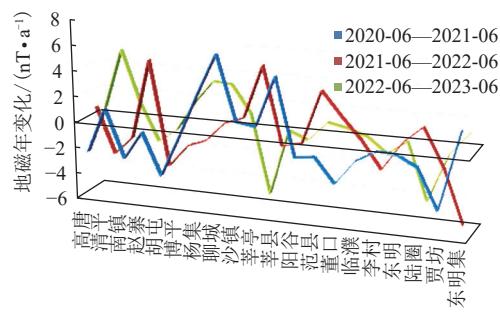


图3 鲁西测线地磁剖面年变化图

Fig. 3 Annual variation map of the geomagnetic profile in western Shandong

鲁西测区近1年单期地磁总强度变化图(图4)表明,测区内各测点变化量均在±2nT左右,沿测线方向无明显梯度带。

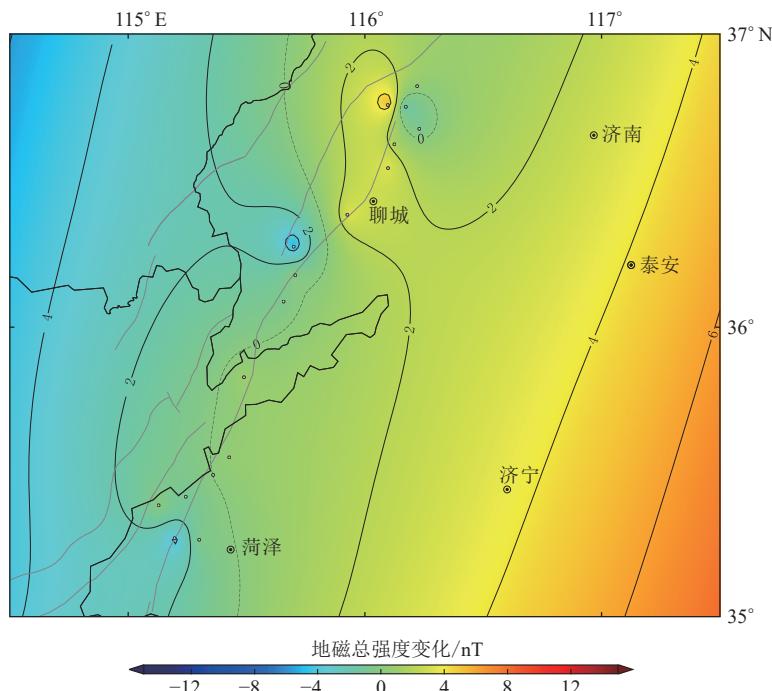


图4 鲁西测区地磁总强度变化图(2022-06—2023-06)

Fig. 4 Map of changes in total geomagnetic intensity in western Shandong measurement area from June 2022 to June 2023

平原M_S5.5地震后,在震中周边80 km范围内进行了2期流动地磁加密观测。结果表明,除胡屯测点外,其他测点变化量约为±2 nT(图5),表明构造活动趋于平稳。

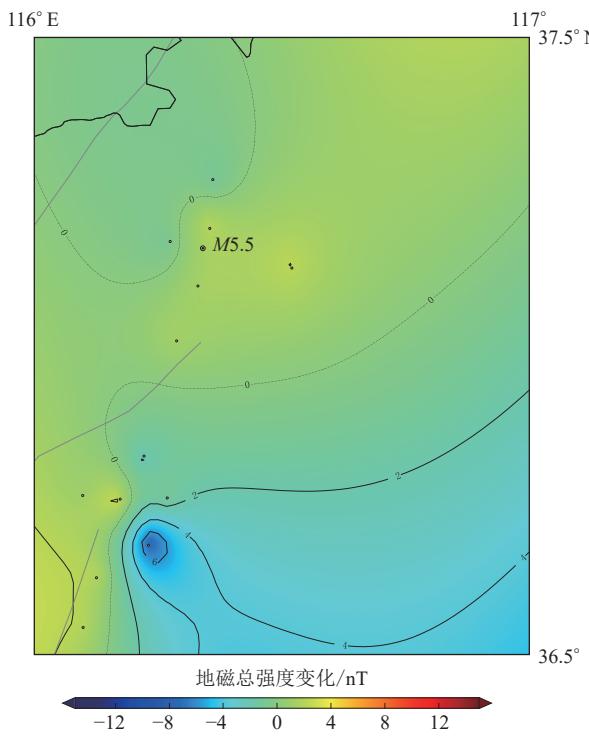


图5 平原周边地磁总强度变化图(2023-08—09)

Fig. 5 Map of changes in total geomagnetic intensity around Pingyuan from August to September 2023

4.2 聊城—平原测线加密观测测点信息及变化统计

根据平原震中周边新建6个地磁测点做出了加密2期变化(表1)。从表1发现,相邻1个月(2023年8—9月)测点变化幅度在0~2 nT之间,变化幅度不大。对原鲁西测线聊城—高唐7个测点在震后进

表1 平原震中地磁测点位置信息变化统计表

Table 1 Changes in the location information of geomagnetic measurement points at the epicenter of the earthquake in Pingyuan

序号	点号	点名	变化量/nT	备注
1	PSDL201	王打卦	2.006	新选
2	PSDL202	前曹	2.0638	新选
3	PSDL203	曲六店	-1.1279	新选
4	PSDL204	恩城	-0.8161	新选
5	PSDL205	尚家庙	1.2565	新选
6	PSDL206	姚庄	1.2148	新选

表2 聊城—高唐地磁测点位置信息变化统计表

Table 2 Location information and changes in Liaocheng-Gaotang geomagnetic survey points

序号	点号	点名	变化量/nT	
			2023-06—08	2023-08—09
1	PSDL050	高唐	-1.1732	-2.3065
2	PSDL051	清平	-3.4284	0.9622
3	PSDL052	南镇	4.3296	-1.1149
4	PSDL053	赵寨	-3.032	2.2021
5	PSDL054	胡屯	10.1926	-8.0851
6	PSDL055	博平	-3.1868	1.9471
7	PSDL056	杨集	-3.7019	1.7980

行了加密观测(表2)。从表2发现,除胡屯测点变化幅度较大外,其他6个测点都在0~4 nT之间。

4.3 聊城北测线震后加密观测变化特征

2023年8月和9月对聊城北测线进行了两次加密观测并绘制了剖面图(图6),从剖面图中可以看出,测线变化幅度除胡屯测点外,基本呈现波动起伏变化。震后8月复测胡屯测点变化较大,9月加密观测后又对现场进行了踏勘落实。胡屯测点位于玉米地内,东南侧有高压线,测点东侧是高压变电站,距离测点220 m左右,震后8月观测相比震前6月上升了10 nT,9月复测相比8月又下降了8 nT,也就是说,又恢复到震前6月观测值的状态,由于震后加密观测期间,测点周边都是玉米地,现场没有注意到干扰源,胡屯测点的突升突降变化仅是单点异常,其他测点变化不大不应该是地震影响的结果。考虑到最后观测又恢复到震前变化的态势,笔者初步分析认

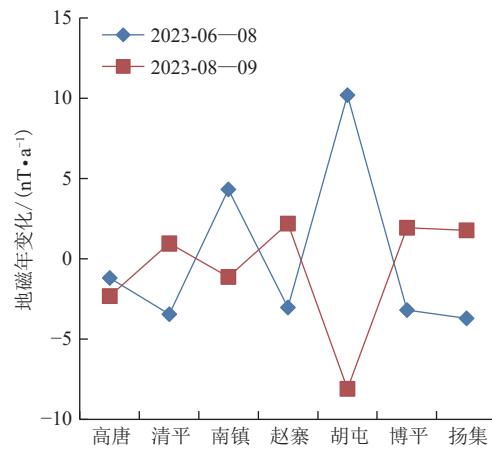


图6 聊城—高唐测线震后地磁剖面变化图

Fig. 6 Geomagnetic profile variation map after the Liaocheng-Gaotang survey line earthquake

为,除了高压线影响之外,8月震后观测胡屯测点时,也受到周边环境其他干扰影响及测量误差等因素所致,分析认为需要在以后的流动地磁观测中加强异常测点核实及深入分析工作。

5 流动重力变化特征分析

5.1 震前半年尺度重力场差分变化特征

2022年下半年至2023年上半年尺度差分变化(图7a)出现鲁西测区的正异常变化,正变化较大的测点区域集中在聊城南部聊城—范县、齐河焦庙—郓城2个测线,其中朝城上升 $40.2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,莘县上升 $43.3 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,茌平上升 $40 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,东平上升 $46.7 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。并且菏泽南部与聊城南部出现正负差异最大达 $100 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的变化,其中菏泽台下降最大达 $61 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。另外,在聊城东南部出现了大面积的负值变化,在枣庄山亭区跨断层水准点两个端点都出现急剧下降变化,北端点下降 $43 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,南端点下降 $53 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。2023年4月8日在跨断层水准点西50 km发生微山3.2级地震,震后流动重力测量组马上对微山震中周边进行了加密观测。从半

年尺度等值线图来看,沿聊城南部至枣庄西部方向出现了正负差异最大达 $100 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的变化。笔者认为,这一变化并不仅仅是微山3.2小震的影响,也预示着可能未来会孕育更大的地震,发生地震危险区域在正负变化的零值线附近或正变化最大的区域。2023年8月6日发生平原M_S5.5地震是在鲁西聊城正变化等值线向北延伸的边缘区域,此区域也是近3年重力观测的空区。

5.2 震前1年尺度重力场累积变化特征

2022年上半年至2023年上半年一年尺度累积变化(图7b)出现大范围的正值累积上升变化,其中鲁西区域累积最大,最大测点是朝城上升 $75 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,平阴、茌平上升 $72 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,聊城台上升 $69 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。因2022年上半年受疫情影响,平阴—郓城测线停测,一年尺度的累加变化从鲁西延伸到济南和德州区域,因鲁西北德州地区近几年未测,德州地区属于重力变化等值线的外延,无法定量分析。聊城—济南方向也出现正值变化较大的区域,其中齐河焦庙上升 $62 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,长清上升 $57 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,济南站上升 $60 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,中心台上升 $46 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,章丘上升

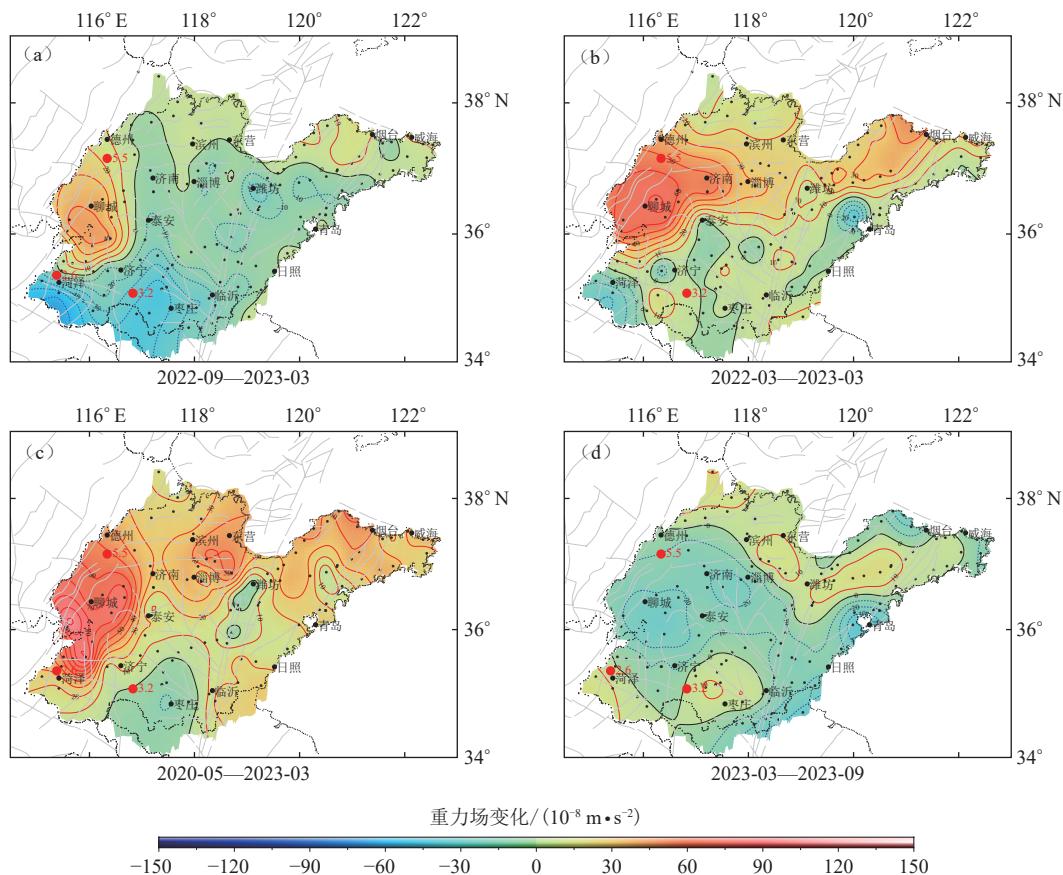


图7 山东省及周边地区重力场动态变化图(差分)(等值线间隔: $10 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

Fig. 7 Dynamic variation of the gravity field in Shandong Province and surrounding areas (Contour interval: $10 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

$48 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

5.3 震前3年尺度重力场累积变化特征

2020年上半年至2023年上半年进行了重力场累积变化的统计和分析(图7c),鲁西测区继续呈现大幅度累积上升变化,累积上升幅度最大的测点有2个:郓城上升 $109 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,朝城上升 $117 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,重力变化上升集中区域分布在聊城—菏泽一带。

5.4 震后重力场变化特征

由2023年上半年至2023年下半年差分变化(图7d)可以看出,山东及周边地区重力场变化逐渐平稳,基本上以负值变化为主,处于震后地下密度减小、地壳应力释放的态势,尤其是鲁西测区聊城南区域在近几年的重力上升增强趋势下,下半年逐渐反向变化,下降幅度小于 $30 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

6 结语与讨论

本次流动重磁应急观测是我们首次开展的地震现场应急处置,也是应对突发性地震的一次检验。笔者对本次地震应急观测全过程及资料进行了总结分析,因流动地磁资料较少,主要对流动重力资料进行了系统化地分析。但是利用重磁资料进行融合分析也是下一步进行震后总结的重点^[5-7]。从文中可以看出,平原 $M_S 5.5$ 地震前重力场半年尺度差分变化、1年和3年尺度的累积变化在平原震中南区域出现正变化增强的趋势,说明平原南区域地下应力挤压,地下物质因不断挤压而堆积,造成地下密度增加引起重力值上升变化。在地震的孕育过程中,由于地壳内部应力的长期作用,应力、应变的积累,孕震区内

介质的物理、力学性质会发生不同程度的变化,这种蠕动变化以地面形变和物质质量变化表现出来,地壳形变会导致地面空间位置的变化,地壳的介质密度也可能会发生不同程度的变化,所有这些变化都将导致重力场的变化,并且通过地表的重力测量反映出来。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,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,相应的区域重力场也出现有序变化^[8-11]。平原 $M_S 5.5$ 地震后重力场出现明显减小平稳变化,重力值减小,地下介质密度减小,地下应力由挤压增强转为拉张松弛过渡阶段。

平原 $M_S 5.5$ 地震是山东省陆地继1995年苍山 $M_S 5.2$ 地震后时隔28年发生的一次中强地震事件,这次流动应急观测比较及时快速,做好震后总结将为山东省地震研究和探索地震预报方法积累宝贵经验财富,工作意义重大。由于平原震中周边近几年没有进行重力联测,虽然震中南80 km聊城南部区域出现正重力变化异常,但是5月中会商没有马上进行异常核实等工作,鲁西流磁测线资料较少近期没有发现异常变化,缺少多手段异常分析佐证资料实属遗憾。为了后期对平原地震震后分析提供可靠依据,在2024年流动观测施测计划中将增加鲁西北流动重力和流动地磁测线,进行加密观测分析和震后总结,增加流动地磁、流动重力的融合分析是以后的重点工作,深入分析流动观测资料,捕捉震后效应,为以后的地震趋势分析提供可信依据。

参考文献

- [1] 陆汉鹏,王锋吉,李树鹏,等.山东重力网建设综述与优化设计[J].地震科学进展,2022, 52(5): 215-221
Lu H P, Wang F J, Li S P, et al. Construction review and optimization design of Shandong gravity network[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2022, 52(5): 215-221
- [2] 陈斌,袁洁浩,王粲,等.流动地磁监测数据处理流程[J].地震研究,2017, 40(3): 335-339
Chen B, Yuan J H, Wang C, et al. Data processing flowchart of Chinese mobile geomagnet monitoring array[J]. Journal of Seismological Research, 2017, 40(3): 335-339
- [3] 国家地震局.地震重力测量规范[M].北京:地震出版社,1997
State Seismological Bureau. Code for seismic gravity measurement[M]. Beijing: Seismological Press, 1997
- [4] 陆汉鹏,佟瑞清,韩海华,等.线性拟合在鲁西流磁资料中的应用[J].四川地震,2013(1): 31-35
Lu H P, Tong R Q, Han H H, et al. Application of geomagnetic trend changes in the west Shandong Province with the method of linear fitting in MatLab[J]. Earthquake Research in Sichuan, 2013(1): 31-35
- [5] 陆汉鹏,张瑞敏,佟瑞清.鲁西重磁场异常变化特征的综合分析[J].华北地震科学,2012, 30(3): 27-33
Lu H P, Zhang R M, Tong R Q. Comprehensive analysis on variation characteristics of gravity field and geomagnetic field in western Shandong Province[J]. North China Earthquake Sciences, 2012, 30(3): 27-33

- [6] 李树鹏, 张春鹏, 李国一, 等. 地下水漏斗对昌邑—新河相对重力观测的影响 [J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(11): 1129-1132
Li S P, Zhang C P, Li G Y, et al. Influence of groundwater funnel on relative gravimetric data in Changyi-Xinhe area[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(11): 1129-1132
- [7] 李树鹏, 祝意青, 贾媛, 等. 沂沐断裂带地区地下水及地面沉降对流动重力观测的影响 [J]. 地震地质, 2022, 44(5): 1203-1224
Li S P, Zhu Y Q, Jia Y, et al. Influence of groundwater and land subsidence on the mobile gravimetry along the Yishu fault zone[J]. Seismology and Geology, 2022, 44(5): 1203-1224
- [8] 廖桂金, 叶东华, 邓志辉, 等. 地震重力异常与地面沉降重力异常的特征分析 [J]. 地震地质, 2022, 44(4): 895-908
Liao G J, Ye D H, Deng Z H, et al. Characteristics of seismic gravity anomaly and ground subsidence gravity anomaly[J]. Seismology and Geology, 2022, 44(4): 895-908
- [9] 申重阳, 祝意青, 胡敏章, 等. 中国大陆重力场时变监测与强震预测 [J]. 中国地震, 2020, 36(4): 729-743
Shen C Y, Zhu Y Q, Hu M Z, et al. Time-varying gravity field monitoring and strong earthquake prediction on the Chinese mainland[J]. Earthquake Research in China, 2020, 36(4): 729-743
- [10] 祝意青, 张勇, 杨雄, 等. 时变重力在地震研究方面的进展与展望 [J]. 地球与行星物理论评, 2022, 53(3): 278-291
Zhu Y Q, Zhang Y, Yang X, et al. Progress of time-varying gravity in seismic research[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 2022, 53(3): 278-291
- [11] 吴琼, 许健生. 地震重力观测技术的新发展方向: 绝对重力与重力梯度一体化观测 [J]. 地震科学进展, 2023, 53(2): 49-56
Wu Q, Xu J S. The new development direction of seismic gravity observation technology: Integrated measuring of absolute gravity and vertical gravity gradient[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2023, 53(2): 49-56