

DOI: 10.12401/j.nwg.2023063

基于动态重力信息的地震前兆与强震短临预报

张茂省^{1,2}, 刘华强^{3,*}, 梁国冰⁴, 冯立¹, 董英², 贾俊², 贾科³, 孙萍萍^{1,2}

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 712000; 2. 自然资源部黄土地质灾害重点实验室/中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 3. 西北工业大学航天学院, 陕西 西安 710072;
4. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 地震预报是当今世界尚未破解的重大科技难题, 短临地震预报是地震预报的难点, 有效的前兆信息则是短临预报的关键。笔者围绕短临地震预报难题, 研制了高精度动态固体潮汐重力仪和大气潮汐重力仪, 成功捕获到 2010~2023 年间的玉树 7.1 级地震、土耳其 7.8 级地震等震前几十个小时的动态重力场变化信息。这些信息再现了强震孕育-发生的过程, 初步揭示短临阶段“基本稳定→闭锁蓄能→震前平静→能量释放”的强震物理机制, 可作为短临地震预报的前兆信息。为实现对短临地震“时-空-强”的准确预报, 提出通过动态重力场变化组网观测和分布式前兆信息数据库建设, 进一步揭示不同类型地震的动态重力信号响应规律, 建立强震发生概率、时间、震中位置及震级预报模型的可行性路径, 渴望破解强震短临预报的世界难题。

关键词: 短临地震预报; 地震前兆; 地震发生机制; 动态重力异常

中图分类号: P65

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0001-18

Earthquake Precursors and Short-impending Prediction of Strong Earthquakes Based on Dynamic Gravity Information

ZHANG Maosheng^{1,2}, LIU Huaqiang^{3,*}, LIANG Guobing⁴, FENG Li¹, DONG Ying², JIA Jun², JIA Ke³, SUN Pingping^{1,2}

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 712000, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Geo-hazard in Loesses Area, Ministry of Natural Resources / Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China;
3. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China; 4. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: How to accurately predict earthquake is a global scientific problem that needs to be solved at present, especially for short-impending earthquake prediction, which has been the hot topic of long-term attention in the earthquake field, and obtaining effective precursor information is the key to forecast this type of earthquake. Currently, it is difficult to predict short-impending earthquake because of the following reasons: firstly, there is lack of universal precursor information which can reflect the occurrence process of strong earthquake; second, the scientific community's understanding of the earthquake initiation mechanism is not comprehensive enough; finally, the earthquake prediction theory and its technical methods have not reached the level of application. In this context, we found that the dynamics of gravitational field at ultra-low frequencies may be highly correlated with the occurrence of short-impending earthquake. Therefore, a high-precision dynamic solid tidal gravimeter

收稿日期: 2023-01-12; 修回日期: 2023-04-10; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFC1504700), 国家自然科学基金重点项目(41641011、41530640)联合资助。

作者简介: 张茂省(1962-), 男, 研究员, 博导, 主要从事地质调查、灾害防治与生态修复研究。E-mail: xjtzms@xjtu.edu.cn。

* 通讯作者: 刘华强(1964-), 男, 高级工程师, 主要从事测控仪器研发工作。E-mail: lhq@nwpu.edu.cn。

and an atmospheric tidal gravimeter were developed to capture gravity anomaly, which can detect the gravitational field changes of $1\sim 10\ \mu\text{Gal}$ at ultra-low frequencies ($1\sim 30\ \text{mHz}$). According to the monitoring, the dynamic gravity field changes of dozens of strong earthquakes from 2010 to 2023 were successfully captured, such as the Yushu earthquake in China (7.1-magnitude), the Turkey earthquake (7.8-magnitude), and Indonesia earthquake (7.4-magnitude), etc. These data have the potential to be used as the precursor information of short-impending earthquake prediction as they can reflect the whole process of earthquake from preparation to occurrence. Furthermore, the physical mechanism of "basic stability \rightarrow occluded energy storage \rightarrow pre-shock calm \rightarrow energy release" for strong earthquake in short-impending stage was further verified. In addition, a plausible approach is proposed to achieve the time-space-intensity prediction for the short-impending earthquake, that means a prediction model of probability, time, location, and magnitude of strong earthquake is constructed based on high-density network observation and distributed precursor information database construction, and finally realize the release of early warning information several hours before the earthquake. This study remains still in the exploration stage, but the in-depth mining of precursor information hidden by the signal of gravity field changes before the earthquake will undoubtedly bring hope to the successful prediction of short-impending strong earthquake.

Keywords: short-impending earthquake prediction; precursor information; earthquake initiation mechanism; dynamic gravity anomalies

为减少地震损失,人类从几千年前就开始探索如何预报地震,例如,中国古代的天象记录、地动仪观测、地理因素考量等。尤其是20世纪60年代以来,世界各国先后开始聚焦地震巨灾风险、应对极端事件和强化社会经济韧性,开展了大量的科学研究和实践活动,取得了丰硕的成果。然而,进入21世纪的20年,连续发生的印尼9.0级地震、日本以东海域9.0级地震、海地7.1级地震以及中国8.0级汶川地震等毁灭性巨大地震灾害均没有得到预报,表明科学技术的高速发展并没有显著地提高人类抵御地震灾害的能力,世界各国当前的地震预报研究尚处于初期的科学探索阶段,短期与临震预报仍是当今世界尚未破解的重大科技难题之一。

中国是世界上地震活动最为频发的国家之一,1966年河北邢台大地震后,地震预报逐步发展起来。建成了多学科地震观测系统,形成了基本覆盖全国的国家地震观测网络,累积了大量的震例并建立地震预报的震例基础,形成了长、中、短、临阶段性渐进式地震预报的科学思路,并在长、中期预报理论方面具有突出成就。尽管中国对1975年海城7.3级地震、1997年至1998年新疆伽师震群、2007年宁夏6.4级地震等做出了较为成功的预报,很大程度上降低了人员伤亡和财产损失,并处于世界领先水平。但中国地震预报成功率并不高,中长期预报的成功率约为30%,7级以上短临地震预报的成功率仅为5%,主要原因是

中国地震预报成功的案例都是经验性的,地震前兆异常样本太少,难以归纳出可信的规律认识。

短期临震预报之所以是困扰科学家的一道世界性难题,主要面临3个核心科学问题:①如何捕获到强震孕育-发生过程中释放的反映强震物理机制的普适性的有效的前兆信息。②人类对地球本身和地震孕育发生机制的认识不足,尤其是短临阶段强震的孕育-发生的机制是什么。③尚未建立有效的短临地震预报理论与技术方法体系,如何构建强震“时-空-强”短临预报模型(Kagan et al., 1987; Keilis-Borok, 2002; 陈运泰, 2009; 毕金孟等, 2017; 马瑾, 2018; Ouzounov et al., 2018; 许忠淮, 2019; Bolton et al., 2020; Tozzi et al., 2020; 尹凤玲等, 2021)。

经过10余年的持续研究,笔者所在团队研制的高精度固体潮汐重力仪与大气潮汐重力仪,能检测到超低频、微弱的($1\sim 30\ \text{mHz}$ 、 $1\sim 10\ \mu\text{Gal}$)时变重力异常信息(图1)。通过西安等地区非连续观测,已经成功捕获到2010年4月14日玉树地震、2013年4月20日四川雅安地震、2018年9月28日印尼地震、2019年4月18日台湾花莲地震、2021年5月22日青海果洛地震、2021年9月16日四川泸县地震、2022年9月5日四川泸定地震、2023年2月6日土耳其地震及2023年2月23日塔吉克斯坦地震等震前几十个小时的超低频动态重力场变化信息,并发现这些异常信号幅值与发震震级正相关,能够再现强震孕育-发

生的过程。这一重大发现为认识地震孕育和发生过程提供了珍贵的数据,为实现地震短临预警预报提供了崭新的思路和途径。

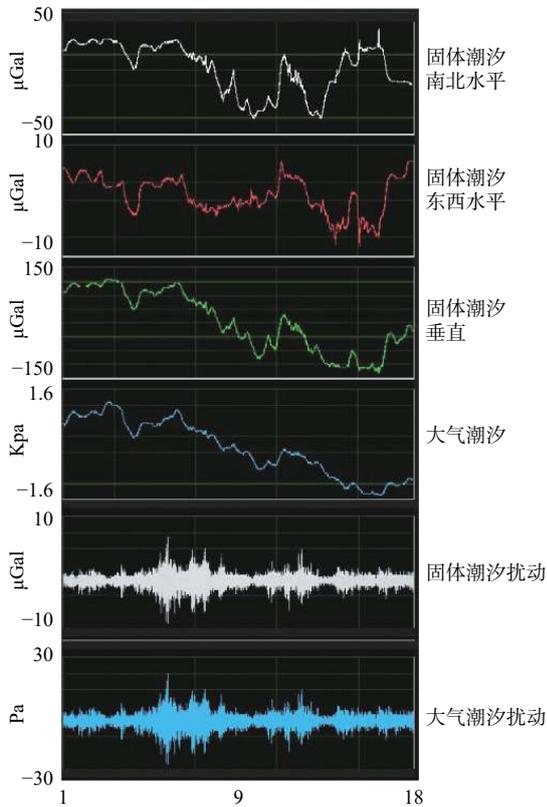


图1 动态重力异常监测数据

Fig. 1 Dynamic gravity anomaly monitoring

1 重力仪与动态重力仪

1.1 重力仪

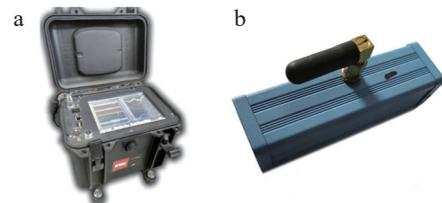
广义的讲,重力是万有引力和离心力的合力。由于地球无时无刻在进行着物质的质量迁移和地月公转,因此重力是动态变化的,故实测的重力是地球引力和离心力、引潮力、负荷重力以及仪器对重力影响的合力。其中地球液核的近周日自由摆动、地球内核运动、固体地球潮汐、海洋潮汐、大气潮汐、地壳的长期形变、构造运动等都会影响重力加速度的变化量。

重力仪是测定重力加速度的仪器,在地震中主要用于监测地震前、中、后的地球重力场变化,主要为地震提供震源深度、地壳结构等有关信息。根据其工作原理和结构,通常可以分为绝对重力仪和相对重力仪。前者测定地球表面上一点的绝对重力值及真实重力场,以此作为基准并进行重复观测以监测重力场的变化,其精度可达到十几 μGal ,如量子、Fg5、

Gphone 绝对重力仪;后者主要用于测量地球重力场的变化(重力异常),其精度能达到 $10\sim 20\ \mu\text{Gal}$,如LCR-G、CG-5 相对重力仪。目前所了解的重力仪尚难以支撑短临地震前兆信息的观测任务。适合野外观测的拉科斯特相对重力仪观测精度仅为 $10\ \mu\text{Gal}$;稳定度高的Fg5 绝对重力仪观测精度仅为 $1\sim 2\ \mu\text{Gal}$;观测精度为 $0.1\sim 0.01\ \mu\text{Gal}$ 的超导重力仪存在不可搬运、稳定度较差和噪声较大的弊端。现有能够捕获超低频动态重力扰动信号的高精度重力仪在数据处理方法上已将这部分异常扰动消除,也不提供原始波形数据。

1.2 动态重力仪

欲破解短临地震预报难题,需要重力仪从动态潮汐中能够检测到地球重力加速度的微变量,这种变化分为潮汐波形异常和扰动出现,扰动量级为 $1\sim 10\ \mu\text{Gal}$,观测信号需覆盖超低频段为 $1\sim 30\ \text{mHz}$,检测精度不低于 $1\text{E}^{-11}\text{ms}^{-2}$ ($0.01\ \mu\text{Gal}$)的动态相对重力仪。笔者所在研究团队研制的动态固体潮汐重力仪与动态大气潮汐重力仪如图2所示。



a.动态固体潮汐重力仪; b.动态大气潮汐重力仪

图2 高精度动态重力仪

Fig. 2 High-precision dynamic gravimeter

动态固体潮汐重力仪(图2a)属于液体悬浮式重力仪,液体悬浮实现动态原理是当重力与浮力几乎相等时处于悬浮状态,此时运动部件的恢复力接近0,固有频率也接近0,因此可以实现超低频振动测量。液体悬浮实现大位移的原理是当液体受到惯性运动时可以在结构中循环流动,就可以测量远大于传感器结构尺寸的超低频位移。液体悬浮式传感器使用一种导电液体来敏感判断细微缓慢的波动状态,将机械波信号转换为个方向的电信号输出。该传感器不受电磁信号干扰,提高记录信号的带宽和信噪比。

在动态固体潮汐重力仪的基础上,考虑到轻便和布网监测以及造价等因素,适当简化装置的部分部件,研制出动态大气潮汐重力仪(图2b)。两款重力仪在原理和功能基本上一致的。

笔者所在团队研制的动态固体潮汐重力仪和动态大气潮汐重力仪精度均优于 $1\text{E}^{-11}\text{ms}^{-2}$ ($0.01\ \mu\text{Gal}$),具

有漂移极低,动态频率范围宽的特点,两款重力仪除了能够以 10Hz/d 采样率实时采集得到原始重力加速度波形数据外,还能检测到超低频、微弱的(1~30 mHz、1~10 μ Gal)时变重力异常信息,其性能参数达到:量程为 $\pm 2g$;测量频率范围为 DC-400 Hz;位移范围为 25 cm;分辨率为 0.01 μ Gal;工作温度为 $-10\sim 50$ $^{\circ}C$;温度控制为 0.005 $^{\circ}$ 。这两款重力仪不受磁场影响,且具有自平横能力,适合移动观测,同时具有漂移极低,精度高、稳定、轻便、智能化,多功能接口适用于多种布设条件,传输于手机与电脑终端显示,更低的数据阈值($M\geq 5.0$)以及造价经济、适用多种监测环境的特点。

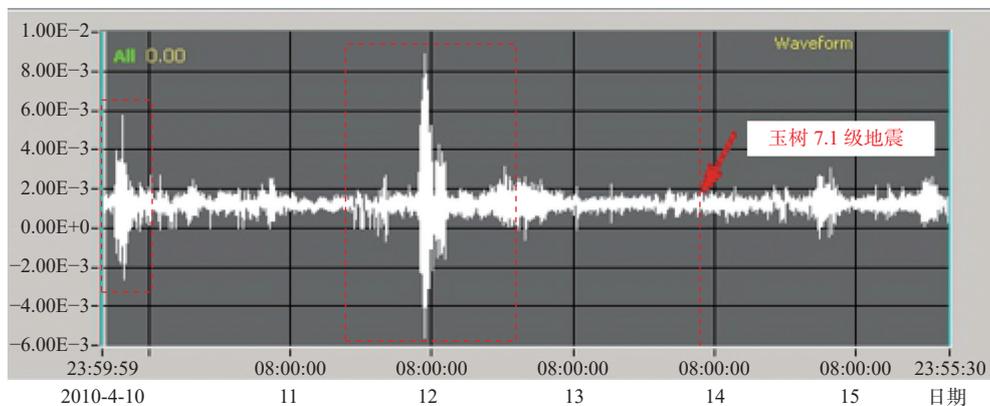
2 典型地震动态重力时变异常信息

2010年以来,笔者所在团队研制的高精度固体潮汐重力仪与大气潮汐重力仪,两款仪器均多次检测到超低频微弱的时变重力异常信息。近年来,由动态重力仪采集了部分典型地震前的动态重力扰动前兆信息,红色虚线所指的是地震发生时刻,红色矩形框是

动态重力扰动信息出现的时间段和异常值区间(图3~图13)。如异常图所示,重力异常信号的背景场曲线平直稳定,其值为 0.3~0.6 mv;扰动的异常场信息则在中轴上下起伏,形成环绕在 0 点的震荡曲线。

2.1 “4·14”玉树 7.1 级地震

2010年4月14日7:49,青海省玉树藏族自治州玉树市(N 33.1 $^{\circ}$, E 96.6 $^{\circ}$)发生地震,最高震级为 Ms7.1级,震源深度为 14 km。在震前约 66 h 和 118 h 两次捕获到了动态重力时变异常信息(图3),震中距为 1 088.25 km,地震前异常信息明显。第一次异常出现在 2010年4月10日2:00~6:00时间段,共计 4 h,峰值为 5.9 mv。异常值在 2~4 mv 区间的持续时间为 3.7 h,异常值在 4~6 mv 区间的持续时间为 0.3 h;第二次异常出现在 2010年4月12日5:45~10:15时间段,共计 4.5 h,峰值为 8.4 mv。异常值在 2~4 mv 区间的持续时间为 2.5 h,异常值在 4~6 mv 区间的持续时间为 0.9 h,异常值在 6~8 mv 区间的持续时间为 0.85 h,异常值大于 8 mv 的持续时间为 0.25 h。



红框表示 2010 年 4 月 10 日 2:00 与 2010 年 4 月 12 日 5:45 出现异常扰动

图 3 玉树 7.1 级地震震前动态重力时变异常图

Fig. 3 Pre-earthquake dynamic gravity time-varying anomaly map of the 7.1 magnitude Yushu earthquake

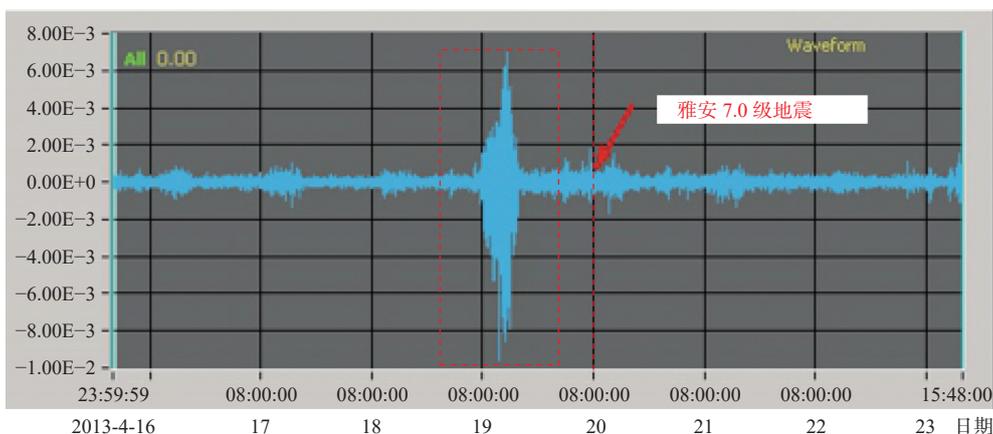
2.2 “4·20”雅安 7.0 级地震

2013年4月20日8:02,四川省雅安市芦山县(N 30.3 $^{\circ}$, E 103.0 $^{\circ}$)发生地震,最高震级为 Ms7.0级,震源深度为 13 km。在震前约 23.7 h 捕获到了动态重力时变异常信息(图4),震中距为 675.90 km,地震前异常信息出现在 2013年4月19日8:20~16:00时间段,共计 7.7 h,峰值为 9.8 mv。异常值在 2~4 mv 区间的持续时间为 4.2 h,异常值在 4~6 mv 区间的持续时间为 2 h,异常值在 6~8 mv 区间的持续时

间为 1.5 h。

2.3 “9·28”印尼 7.4 级地震

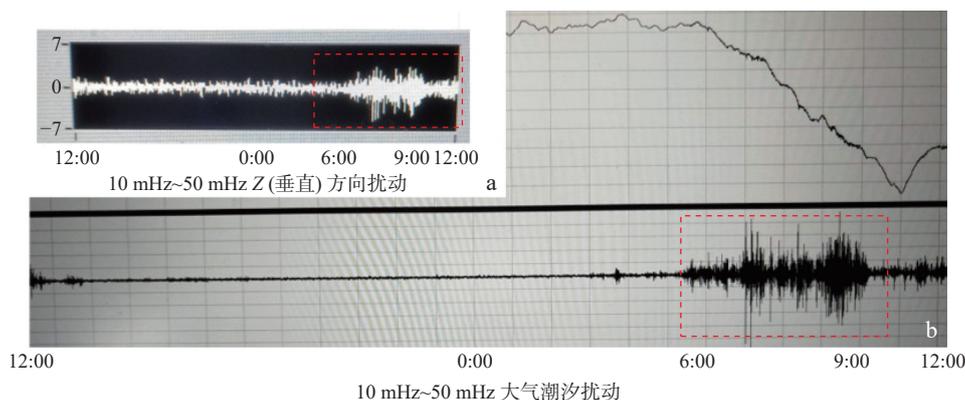
2018年9月28日18:02,印尼苏拉威西省(S 0.25 $^{\circ}$, E 119.90 $^{\circ}$)发生地震,最高震级为 Ms7.4级,震源深度为 10 km。在震前约 83 h 捕获到了动态重力时变异常信息(图5),震中距为 3 992.93 km,地震前异常出现在 2018年9月25日7:00~10:00时间段,共计 3 h,峰值为 5.1 mv。异常值在 2~4 mv 区间的持续时间为 2.7 h,异常值在 4~6 mv 区间的持续时间为 0.3 h。



红框表示 2013 年 4 月 19 日 8 : 20 出现异常扰动

图 4 雅安 7.0 级地震震前动态重力时变异常图

Fig. 4 Pre-earthquake dynamic gravity time-varying anomaly map of the 7.0 magnitude Ya'an earthquake



红框表示 2018 年 9 月 25 日 7 : 00 出现异常扰动

图 5 印尼 7.4 级地震震前动态重力时变异常图

Fig. 5 Pre-earthquake dynamic gravity time-varying anomaly map of the 7.4 magnitude Indonesia earthquake

2.4 “4·18”花莲 6.7 级地震

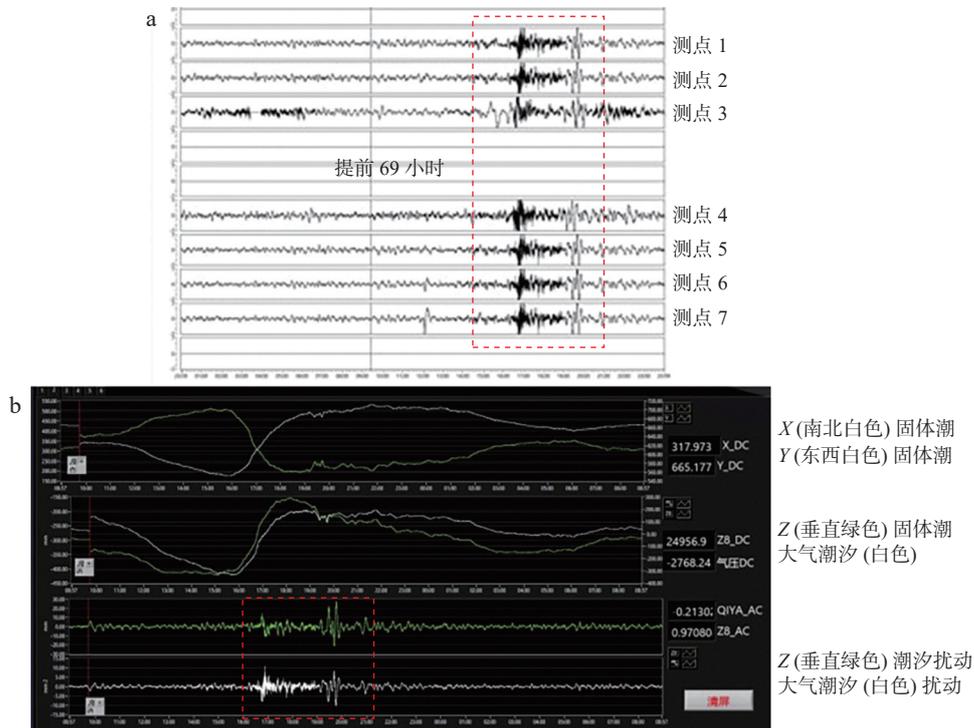
2019 年 4 月 18 日 13 : 01, 中国台湾花莲县海域 (N 24.02°, E 121.65°) 发生地震, 最高震级为 Ms6.7 级, 震源深度为 24 km。在震前约 69 h 捕获到了动态重力时变异常信息(图 6), 震中距为 1 749.46 km, 地震前异常出现在 2019 年 4 月 15 日 16 : 00~21 : 00 时间段, 共计 5 h, 峰值为 10.9 mv。异常值在 2~4 mv 区间的持续时间为 3 h 异常值在 4~6 mv 区间的持续时间为 0.9 h, 异常值在 6~8 mv 区间的持续时间为 0.8 h, 异常值大于 8 mv 的持续时间为 0.3 h。图 6a 为西安地区不同测点的异常信号, 图 6b 为同一测点两款仪器对比的潮汐周期变化及潮汐扰动关系, 可以看出在不同测点与两款仪器的地震前兆信息捕获上都呈现稳定、良好的反馈信息。

2.5 “5·22”玛多 7.4 级地震

2021 年 5 月 22 日 2 : 04, 青海果洛州玛多县 (N 34.39°, E 98.98°) 发生地震, 最高震级为 Ms7.4 级, 震源深度为 10 km。在震前约 63 h 捕获到了动态重力时变异常信息(图 7), 震中距为 926.09 km, 地震前异常出现在 2021 年 05 月 19 日 11 : 00~11 : 30 时间段, 共计 0.5 h, 峰值为 5.7 mv。异常值在 4~6 mv 区间的持续时间为 0.5 h。

2.6 “9·16”泸县 6.0 级地震

2021 年 9 月 16 日 4 : 33, 四川省泸州市泸县 (N 29.20°, E 105.34°) 发生地震, 最高震级为 Ms6.0 级, 震源深度为 10 km。在震前约 56 h 捕获到了动态重力时变异常信息(图 8), 震中距为 607.25 km, 地震前异常出现在 2021 年 9 月 13 日 20:20~次日 02 : 30 时间段,



a.不同测点的重力异常图；b.同一测点两种重力仪的重力异常图；红框表示2019年4月15日16:00出现异常扰动

图6 花莲6.7级地震震前动态重力时变异常图

Fig. 6 Pre-earthquake dynamic gravity time-varying anomaly map of the magnitude 6.7 Hualien earthquake

共计5.83 h, 峰值为3.9 mv。异常值在2~4 mv区间的持续时间为5.83 h。

2.7 “6·1”芦山6.1级地震

2022年6月1日17:00, 四川雅安市芦山县(N 30.37°, E 102.94°)发生地震, 最高震级为Ms6.1级, 震源深度为17 km。在震前约77 h捕获到了动态重力时变异常信息(图9), 震中距为653.81 km, 地震前异常出现在2022年05月29日12:00~17:00时间段, 共计5 h, 峰值为3.9 mv。异常值在2~4 mv区间的持续时间为5 h。

2.8 “6·10”马尔康6.0级地震

2022年6月10日0:03, 四川省阿坝藏族羌族自治州马尔康市(N 32.27°, E 101.82°)发生地震, 最高震级为Ms6.0级, 震源深度为10 km。在震前约6 h捕获到了动态重力时变异常信息(图10), 震中距为642.76 km, 地震前异常出现在2022年6月09日18:00~20:00时间段, 共计2 h, 峰值为9.2 mv。异常值在2~4 mv区间的持续时间为1.57 h, 异常值在4~6 mv区间的持续时间为0.25 h, 异常值在6~8 mv区间的持续时间为0.1 h, 异常值大于8 mv的持续时间为0.08 h。

2.9 “9·5”泸定6.8级地震

2022年9月5日12:52, 四川省甘孜州泸定县

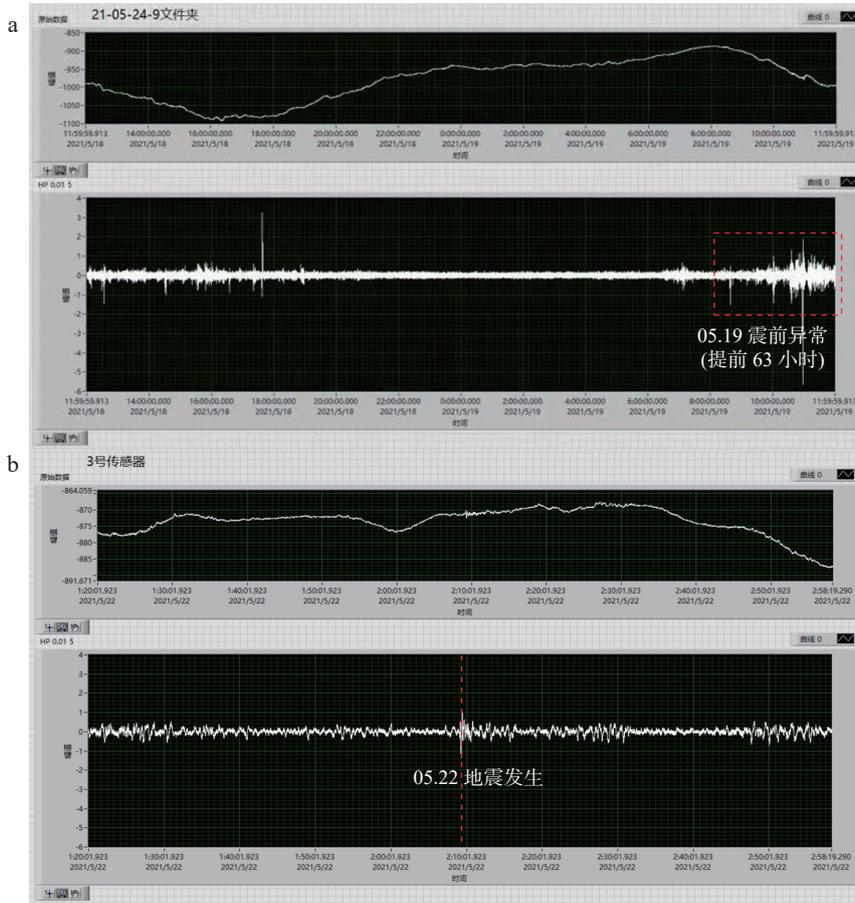
(N 29.59°, E 102.08°)发生地震, 最高震级为Ms6.8级, 震源深度为11 km。在震前约69 h捕获到了动态重力时变异常信息(图11), 震中距为774.72 km, 地震前异常出现在2022年9月2日15:40~17:30时间段, 共计1.8 h, 峰值为2.9 mv。异常值在2~4 mv区间的持续时间为1.8 h。

2.10 “2·6”土耳其7.8级地震

北京时间2023年2月6日9:17(当地时间2月6日4:17), 土耳其(N 37.15°, E 36.95°)发生地震, 最高震级为Ms7.8级, 震源深度为20 km; 随后于北京时间2月6日18:24(当地时间2月6日13:24), 土耳其(N 38.00°, E 37.15°)再次发生地震, 最高震级为Ms7.8级, 震源深度为20 km。在震前约330.2 h、255.4 h两次分别捕获到了对应的动态重力时变异常信息(图12), 震中距为6230 km。

第一次地震前异常出现在2023年1月23日15:00至2023年1月24日4:00时间段, 共计13 h, 峰值为8.5 mv。异常值在2~4 mv区间的持续时间为11.2 h, 异常值在4~6 mv区间的持续时间为1.5 h, 异常值在6~8 mv区间的持续时间为0.2 h, 异常值大于8 mv的持续时间为0.1 h。

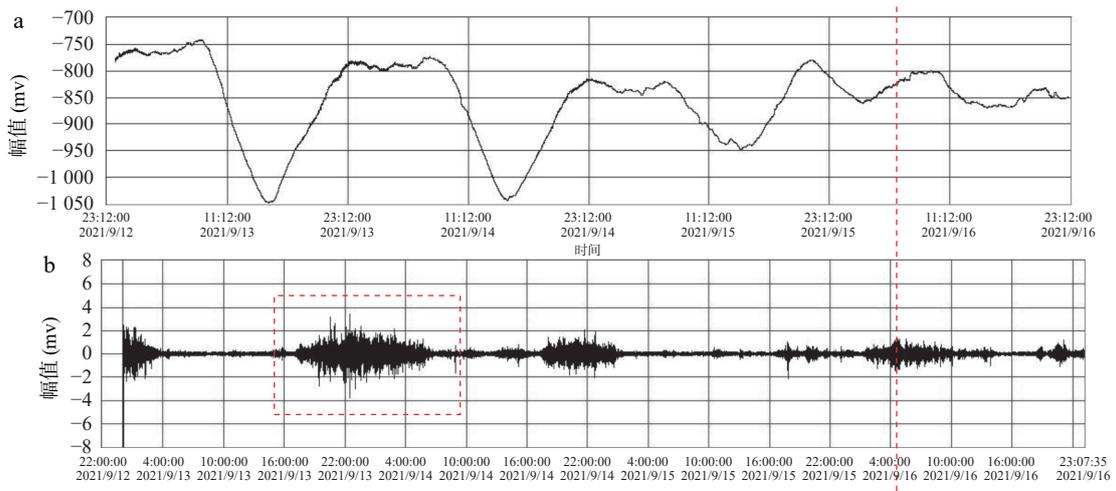
第二次地震前异常出现在2023年1月26日



a.震前动态重力时变异常图; b.同震幅值图; 红框表示 2021 年 05 月 19 日 11: 00 出现异常扰动

图 7 玛多 7.4 级地震震前与同震重力异常图

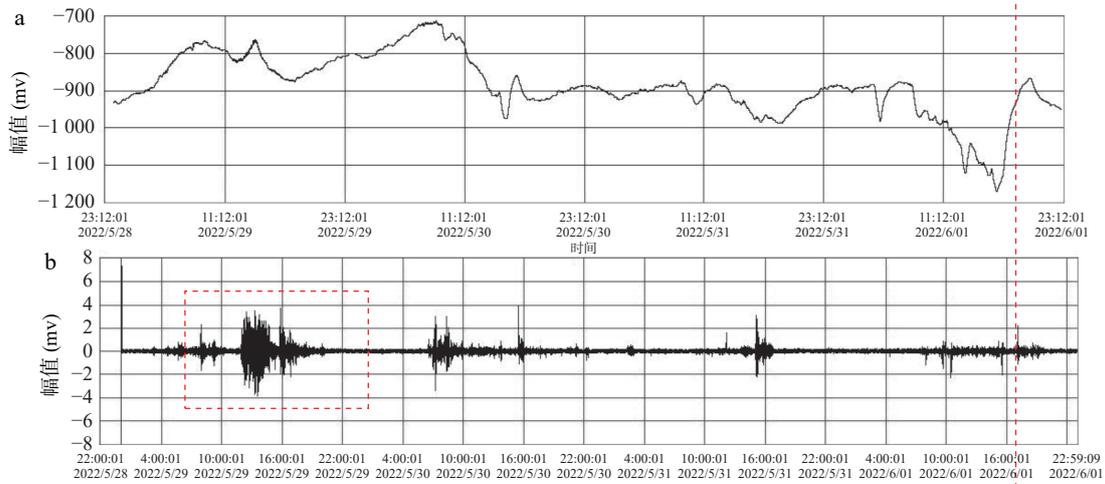
Fig. 7 Pre-earthquake and co-earthquake gravity anomaly map of the 7.4 magnitude Mado earthquake



红框表示 2021 年 09 月 15 日 20 : 20 出现异常扰动

图 8 泸县 6.0 级地震震前大气潮汐周期变化图 (a) 与动态重力时变异常图 (b)

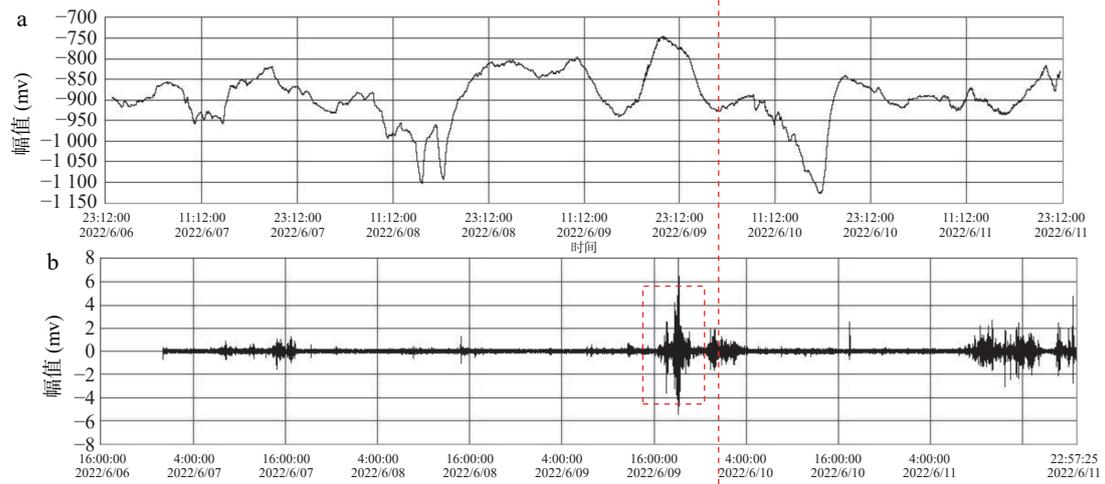
Fig. 8 (a) Pre-earthquake atmospheric tidal cycle variation map and (b) dynamic gravity time-varying anomaly map for the 6.0 magnitude Luxian earthquake



红框显示 2022 年 05 月 29 日 12 : 00 出现异常扰动

图 9 芦山 6.1 级地震震前大气潮汐周期变化图(a)与动态重力时变异常图(b)

Fig. 9 (a) Pre-earthquake atmospheric tidal cycle variation map and (b) dynamic gravity time-varying anomaly map for the 6.1 magnitude Lushan earthquake



红框显示 2022 年 06 月 09 日 18 : 00 出现异常扰动

图 10 马尔康 6.0 级地震震前大气潮汐周期变化图(a)与动态重力时变异常图(b)

Fig. 10 (a) Pre-earthquake atmospheric tidal cycle variation map and (b) dynamic gravity time-varying anomaly map of the magnitude 6.0 Malcom earthquake

22 : 00~2023 年 1 月 27 日 12 : 00 时间段, 共计 14 h, 峰值为 6.4 mv。异常值在 2~4 mv 区间的持续时间为 13.2 h, 异常值在 4~6 mv 区间的持续时间为 0.5 h, 异常值在 6~8 mv 区间的持续时间为 0.3 h。

2.11 “2·23”塔吉克斯坦 7.2 级地震

2023 年 2 月 23 日 08 : 37, 塔吉克斯坦(N 37.98°, E 73.29°)发生地震, 最高震级为 Ms7.2 级, 震源深度为 10 km。在震前约 116.6 h 捕获到了动态重力时变异常信息(图 13), 震中距为 3 215 km, 地震前异常出现在 2023 年 2 月 18 日 12 : 00~19 : 00 时间段, 共计 7 h, 峰值为 7.5 mv。异常值在 2~4 mv 区间的持续时

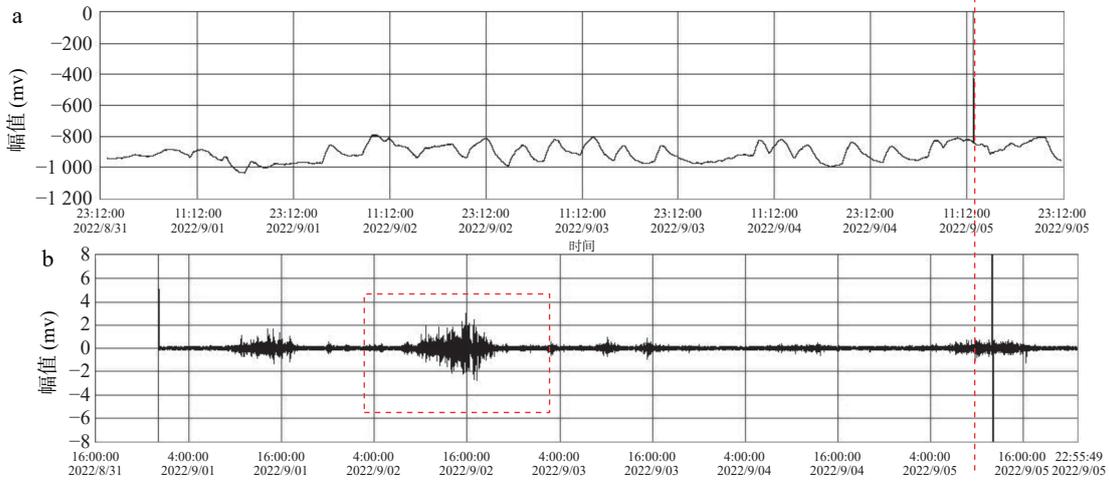
间为 6.3 h, 异常值在 4~6 mv 区间的持续时间为 0.5 h, 异常值在 6~8 mv 区间的持续时间为 0.2 h。

3 动态重力前兆信息特征与强震机制

3.1 动态重力前兆信息特征

3.1.1 动态重力

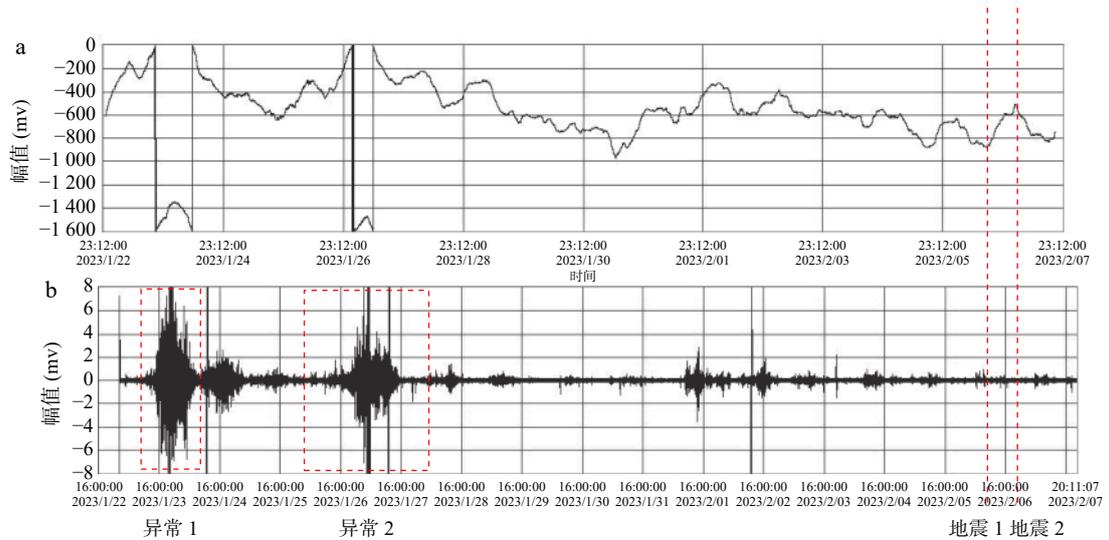
动态重力观测曲线总体上呈正弦波形态, 基本体现了潮汐变化规律(图 1)。其中动态固体潮汐(液体悬浮式)重力仪因稳定性优于动态大气潮汐重力仪, 观测曲线更为平滑, 背景场近乎直线, 包含噪声的异



红框表示 2022 年 09 月 02 日 15 : 40 出现异常扰动

图 11 泸定 6.8 级地震震前大气潮汐周期变化图(a)与动态重力时变异常图(b)

Fig. 11 (a) Pre-earthquake atmospheric tidal cycle variation map and (b) dynamic gravity time-varying anomaly map of the 6.8 magnitude Luding earthquake



红框表示 2023 年 1 月 23 日 15 : 00 与 2023 年 1 月 26 日 22 : 00 出现异常扰动

图 12 土耳其 7.8 级地震震前大气潮汐周期变化图(a)与动态重力时变异常图(b)

Fig. 12 (a) Pre-earthquake atmospheric tidal cycle variation map and (b) dynamic gravity time-varying anomaly map for the 7.8 magnitude Turkey earthquake

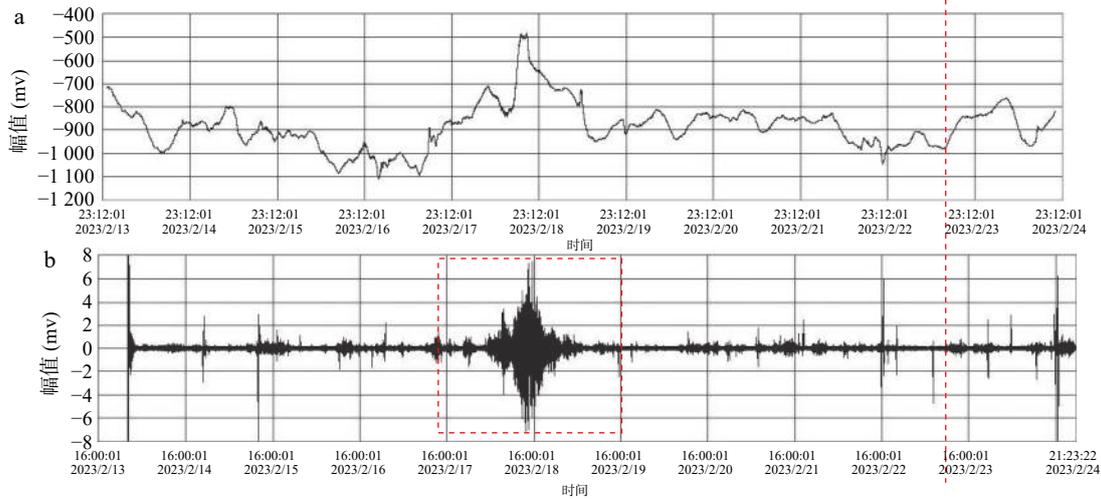
常场信息较少, 识别 6.5 级以上的强震更为精确。大气潮汐重力仪观测曲线涵盖更广的异常信息, 对于震级较小的地震亦有响应, 相应的显示出更多的噪声信息(图 1)。

3.1.2 动态重力时变异常特征

通过数据分析图 3~图 13 动态重力时变异常, 采集到超过正常值 5 倍(异常值 > 2 mv)波动幅度明显畸变, 且持续时间在 20 min 以上的波段识别为动态重力时变异常信号, 其峰值处于 2.5~20.90 mv 区间段,

正态分布集中于 2.5~4 mv 区间段, 特征曲线形态总体呈左右短, 中间高的梭形, 初值-峰值的斜率越大, 异常越典型。

在趋势性变化中, 异常值处于 2~4 mv 的区间段, 异常持续时间为 1.8~13.2 h/次; 异常值处于 4~6 mv 的区间段, 异常持续时间为 0.25~2 h/次; 异常值处于 6~8 mv 的区间段, 异常持续时间为 0.1~1.5 h/次; 异常值大于 8 mv 的区间段, 异常持续时间为 0.08~0.3 h/次, 可见异常值与持续时间呈反比关系。



红框表示 2023 年 2 月 18 日 12 : 00 出现异常扰动

图 13 塔吉克斯坦 7.2 级地震震前大气潮汐周期变化图(a)与动态重力时变异常图(b)
Fig. 13 (a) Pre-earthquake atmospheric tidal cycle variation map and (b) dynamic gravity time-varying anomaly map of the magnitude 7.2 Tajikistan earthquake

2 mv 为异常发生的临界数值; 2~2.9 mv 是异常发生的均一性数值, 即限定性异常信息, 二者为充要关系; 大于 2.9 mv 是异常发生的特异性数值, 即非限定性异常信息, 为异常发生的必要条件。

3.1.3 动态重力时变异常与地震前兆

通过已捕获的动态重力时变异常与强震信息的对应关系分析(表 1), 不难发现, 已捕捉到的动态重力时变异常峰值、异常持续时间、初值-峰值斜率与近年来发生的地震震级等信息有着很强的一一对应关系, 动态重力时变异常可作为强震预报的有效前兆信息。

(1) 这些异常扰动信号的幅值大小与地震震级呈正相关。

(2) 地震发生概率与异常扰动峰值及持续时间呈正相关, 即异常扰动幅值大于 2 mv 且持续在 20 min 以上的前提下, 异常扰动峰值越大、持续时间越长, 地震发生的可能性越大。

(3) 动态重力初值-峰值的斜率数值越大, 异常扰动与强震的对应关系越强。动态重力时变异常扰动对于 6 级~6.5 级地震有较好的显示, 对于 6.5 级以上的地震更为明显。

(4) 一般在异常结束后 15~1 天的时间范围内发生强震。

3.2 短临阶段强震孕育-发生过程与强震物理机制

总体而言, 世界各国探索预报地震的前兆信息十分庞杂, 但都缺乏反映强震物理机制的科学信息, 尚无公认普适的前兆信息, 并且由于地球的不可入性,

导致地震的孕育过程和发生机制的尚无定论, 故不再赘述。地球重力变化是地壳变形与密度变化耦合运动的综合反映, 从时间域和空间域两个方面可较好揭示重力场变化与地震的关系。各国学者基于重力信息探索地震孕育-发生的物理机制取得了诸多成果, 并在中长期地震预测中得到良好的展现, 中国尚处于领先地位。

通过典型地震与捕获到的动态重力信息特征对比分析, 按短期-临震阶段动态重力扰动信息特征, 可以将强震孕育-发生过程与强震物理机制初步划分为 4 个阶段:

(1) “基本稳定”阶段: 动态重力观测曲线基本上呈正弦波, 在没有强震发生的情况下无明显信息扰动, 处于较稳定的状态, 属于动态重力信息的稳定期, 笔者将其定义为两次强震之间“基本稳定”阶段(图 14a)。当然, 该阶段可能会出现一些中小型地震, 不在本次重点研究的之列。

(2) “闭锁蓄能”阶段: 在地震发生前数小时至 30 天的短临阶段出现较明显的动态重力信息扰动, 动态重力信息处于不稳定的状态, 笔者将其定义为强震发生前的“闭锁蓄能”阶段(图 14b)。该阶段可能会出现 2 个或多个动态重力信息扰动, 但其振幅有所不同。

(3) “震前平静”阶段: “闭锁蓄能”阶段之后, 动态重力信息再次处于较稳定的状态, 属于动态重力信息的较稳定期, 笔者将其定义为前兆信息与强震之

表1 典型强震与动态重力时变异常特征对应关系表

Tab. 1 Correspondence between typical strong earthquakes and dynamic gravity time-varying anomaly characteristics

序号	地震名称	发震时刻 (y/m/d h : mm)	异常出现时间 (y/m/d h : mm ~ h : mm)	异常提前 时间(h)	异常幅值(mv) 与持续时间(h)			地震 震级 (M _s)	震源 深度 (km)	震中- 观测点 距离(km)	初值- 峰值 斜率	地震 前兆 信息		
					2~4	4~6	6~8 >8							
1	4·14玉树地震	2010/4/14 7 : 49	2010/4/10 2 : 00~6 : 00 2010/4/12 5 : 45~10 : 15	66 118	3.7 2.5	0.3 0.9	— 0.85	— 0.25	5.9 8.4	7.1	14	1 088.25	5.7 14.3	明显
2	4·20雅安地震	2013/4/20 8 : 02	2013/4/19 8 : 20~16 : 00	23.7	4.2	2	1.5	—	9.8	7.0	13	675.90	6.3	明显
3	9·28印尼地震	2018/9/28 18 : 02	2018/9/25 7 : 00~10 : 00	83	2.7	0.3	—	—	5.1	7.4	10	3 992.93	1.0	明显
4	4·18花蓮地震	2019/4/18 13 : 01	2019/4/15 16 : 00~21 : 00	69	3	0.9	0.8	0.3	10.9	6.7	24	1 749.46	2.9	明显
5	5·22玛多地震	2021/5/22 2 : 04	2021/05/19 11 : 00~11 : 30	63	—	0.5	—	—	5.7	7.4	10	926.09	3.5	明显
6	9·16泸县地震	2021/9/16 4 : 33	2021/9/13 20 : 20~2021/9/14 02 : 30	56	5.83	—	—	—	3.9	6.0	10	607.25	0.8	较明显
7	6·1芦山地震	2022/6/1 17 : 00	2022/05/29 12 : 00~17 : 00	77	5	—	—	—	3.9	6.1	17	653.81	0.8	较明显
8	6·10马尔康地震	2022/6/10 0 : 03	2022/6/09 18 : 00~20 : 00	6	1.57	0.25	0.1	0.08	9.2	6.0	10	642.76	4.7	明显
9	9·5泸定地震	2022/9/5 12 : 52	2022/9/2 15 : 40~17 : 30	69	1.8	—	—	—	2.9	6.8	11	774.72	0.7	较明显
10	2·6土耳其地震	2023/2/6 9 : 17	2023/1/23 15 : 00~2023/1/24 4 : 00 2023/1/26 22 : 00~2023/1/27 12 : 00	330.2 255.4	11.2 13.2	1.5 0.5	0.2 0.3	0.1 —	8.5 6.4	7.8 7.8	20	6 230	4.7 3.5	明显
11	2·23塔吉克斯坦地震	2023/2/23 8 : 37	2023/2/18 12 : 00~19 : 00	116.6	6.3	0.5	0.2	—	7.5	7.2	10	3 215	2.7	明显

间“震前平静”阶段(图 14c)。当然,该阶段与 2 次强震之间“基本稳定”阶段相比扰动一般会更小一些。

(4)“能量释放”阶段:“震前平静”阶段之后,

地震发生,笔者将其定义为“能量释放”阶段(图 14d)。当然,该阶段动态重力扰动信息与“震前平静”阶段一般没有明显区别。

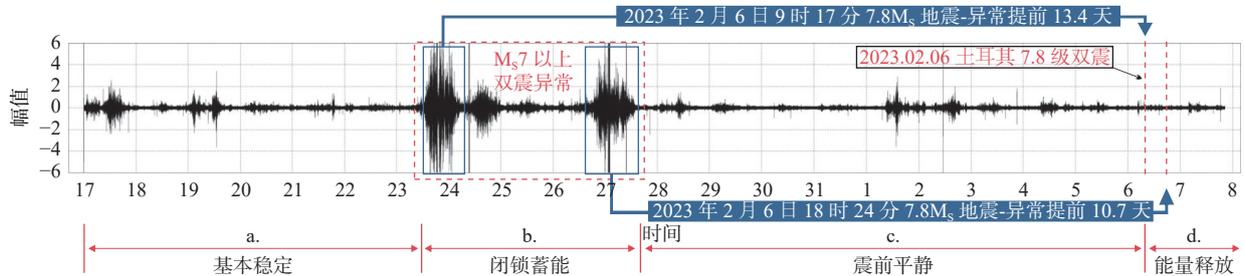


图 14 基于动态重力时变异常的强震孕育和发生过程理论机制图(以 2023 年 2 月 6 日土耳其 $M_s7.8$ 级地震为例)

Fig. 14 Theoretical mechanism of strong earthquake incubation and occurrence process based on dynamic gravity time-varying anomalies (Take the $M_s7.8$ Turkey earthquake of February 6, 2023 as an example)

综上所述,地球及其内部物质和能量的不断运动引起地壳变形与密度变化,通过地球重力观测,尤其是高精度动态时变固体潮汐重力仪和大气潮汐重力仪观测,可以捕获到强震前数小时、数天,或一个月内的超低频、微弱的($1\sim 30$ mHz、 $1\sim 10$ μ Gal)时变重力异常扰动信息。通过 2010 年 4 月 14 日玉树地震到 2023 年 2 月 6 日土耳其地震及 2 月 23 日塔吉克斯坦地震等震前动态重力场变化信息分析,发现这些微弱的时变重力异常扰动信息与强震之间存在一一对应关系,这些信息随时间变化特征能够再现强震孕育-发生的过程,初步揭示了短期-临震阶段“基本稳定-闭锁蓄能-震前平静-能量释放”的强震物理机制,可作为短临地震预报的前兆信息。

4 基于动态重力前兆的强震短临预报途径

4.1 研究思路与技术路线

地震预报是当今世界尚未破解的重大科技难题,短临地震预报是地震预报的难点,有效的前兆信息则是短临预报的关键。经过十余年的研究和观测实践,成功捕获到十多次强震前几十个小时的光速传播的重力场变化信息。这些异常信息为认识地震孕育机制和发生过程、破解地震预报难题提供了新的途径。掌握地震活动的时间、空间和强度规律等信息,对做好地质安全评价、提高地质安全储备有重要意义(张茂省, 2015),但要较为准确地预报强震发生的概率、时间、震中位置及震级,还需要做大量的布网观测和深入的研究工作。

基于动态重力前兆的强震短临预报的总体思路是在进一步提升动态固体潮汐重力仪和大气潮汐重力仪观测精度和稳定性的基础上,结合国家地震观测网,开展更高精度动态重力组网观测,全面捕获强震的分布式时变重力异常信息;采用多学科交叉研究手段,进一步挖掘震前珍贵的动态重力场变化信息,再现强震孕育-发生机制过程,揭示强震孕育-发生机制,构建强震孕育-发生模式和短临预报理论,解析和预测强震可能发生的概率、时间、震中位置及震级;通过预测和实际验证,不断校验预测模型,逐步降低漏报和误报率。技术路线如图 15 所示。

4.2 主要研究内容

4.2.1 进一步提升动态重力仪的性能和稳定性

研制检测精度不低于 $1E^{-11}ms^{-2}$ (0.01 μ Gal)的动态重力仪产品。包括更高精度、更稳定、更轻便、智能化;多功能接口适用于多种布设条件,传输于手机与电脑终端显示;更低的数据阈值($M\geq 5.0$)与警报联动。

4.2.2 动态重力仪组网观测及动态重力数据库建设

结合国家地震台网,动态重力仪器着重布在构造运动活跃、地震频发及重力变化异常的区域。通过组网观测,获取并建立分布式动态重力前兆信息数据库,建立强震与动态重力扰动信息的一一对应关系,揭示强震孕育-发生过程中前兆信息的响应规律。

4.2.3 强震孕育-发生机制与强震短临预报理论研究

基于密集的台网观测,梳理强震前的动态重力时变异常信号,再现强震孕育-发生过程,探索和揭示基于“基本稳定 \rightarrow 闭锁蓄能 \rightarrow 震前平静 \rightarrow 能量释放”基本逻辑的短期-临震阶段强震物理意义及其动力学机制,进而建立强震短临预报理论。

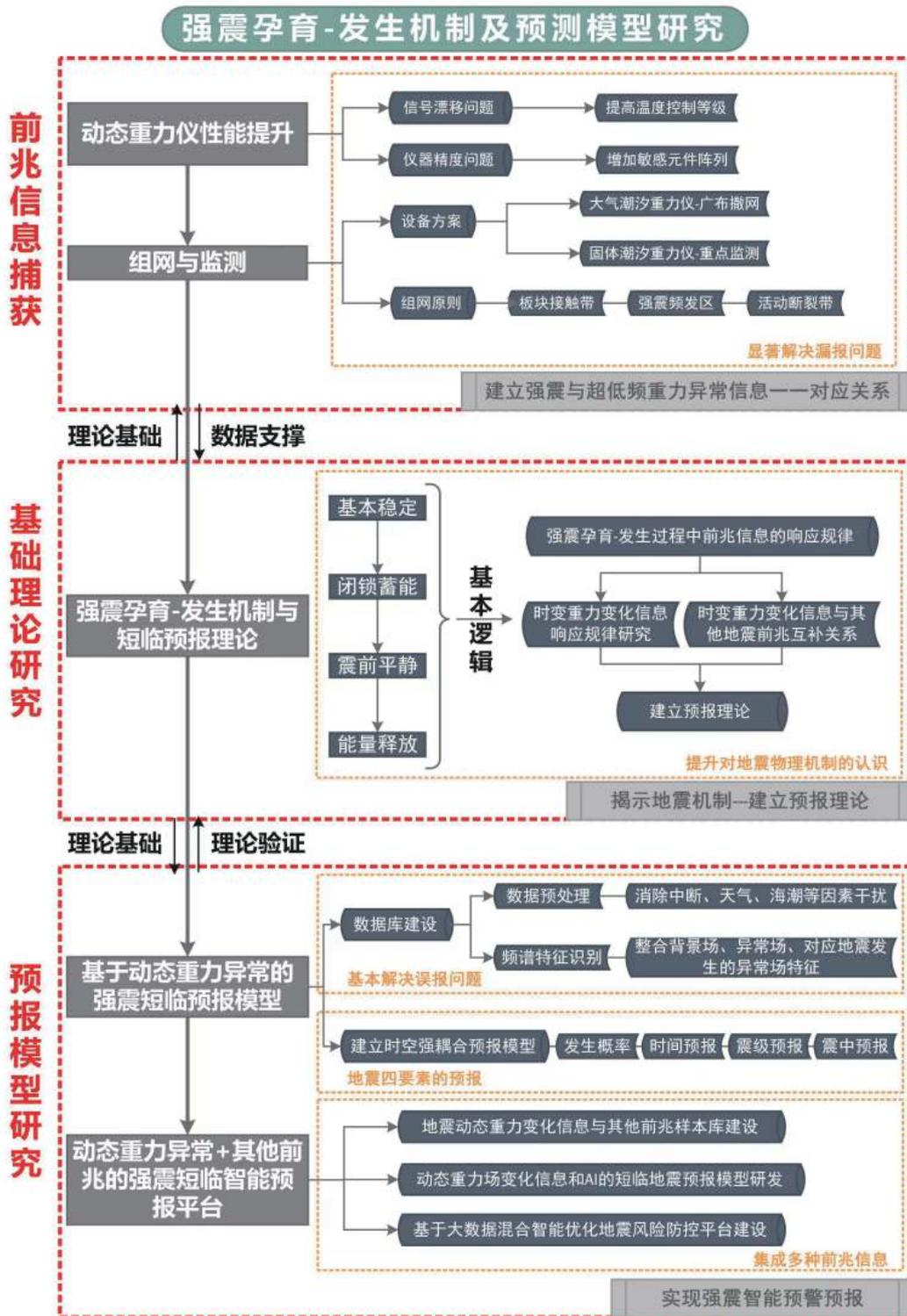


图 15 技术路线图

Fig. 15 Technology roadmap

4.2.4 基于动态重力前兆的短临强震预测模型研究

通过已捕获到的前兆信息-地震对应关系,开展不同类型地震的动态重力信号响应规律研究,筛选可以被动态重力仪识别到的地震类型,分析动态重力前

兆信息的扰动值变幅、出现频次、持续时长等信号特征与强震发生概率、时间、强度和位置之间关系,建立基于时变重力异常的地震预报模型。

基于动态重力前兆的强震发生概率(发生强震的

可能性)可用下式估计:

$$R = a \times \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{N} + b \times \frac{\sum_{i=1}^M D_i}{M} \quad (1)$$

式中: R 表示强震发生概率; G 表示固体潮重力仪异常值; D 表示大气超重力仪异常值; M 表示捕获到动态重力扰动的固体潮重力仪个数; N 表示捕获到动态重力扰动的大气潮重力仪个数; a 表示固体潮重力仪异常值权重系数; b 表示大气潮重力仪异常值权重系数。

动态重力观测时间频率为 10 次/s, 每台仪器 1 h 可获取 36 000 个数据。对每台仪器观测数据在归一化的基础上, 对 1 h 内获取的数据进行滑动平均, 通过进一步研究, 建立强震发生概率预警预报阈值和预报模型。亦可采取异常值大于某一阈值出现的频率来估算强震发生的概率或可能性。

强震发生时间预报可通过进一步挖掘前兆信息—强震发生时间数据, 建立不同强震特征或类型的强震发生时间与前兆信息特征之间的关系, 实现强震前数小时、数天的临震阶段, 或一个月之内的短期阶段预报。强震发生强度或震级预报主要依据前兆信息的幅值与发震震级之间的正相关关系来实现。强震发生的位置可以在组网观测获取分布式前兆信息的基础上, 通过对分布式动态重力扰动值进行空间插值来求解最可能的震中位置, 亦可根据近期小地震频发多发的地域预估强震可能发生的位置。例如, 2023 年 2 月 18 日 22:23 笔者所在研究团队发现了地震前兆, 做出动态固体潮汐重力仪与动态大气潮汐重力仪以及各个监测点“集体响应, 变幅不小, 应该是强震”, “未来三天有可能发生”, “预警: 根据过去 15 天小地震分布情况分析, 估计未来 3 天内, 东南亚或中亚以及中国新疆西部、台湾地区发生强震的可能性较大”内部群预测(图 16)。2023 年 2 月 23 日 08:37 塔吉克斯坦发生 Ms7.2 级地震。前兆出现后不到 5 天发生地震, 比预估的 3 天晚了 2 天, 预估的东南亚或中亚 2 个区域, 一个是准确的。

4.2.5 基于人工智能+震前时变重力异常+其他地震前兆的强震短临预测平台建设与应用

笔者在系统梳理以往地质灾害风险防控的数据依据和传统技术方法的基础上, 初步搭建了基于 AI 的地质灾害风险防控体系建设方案, 提出了从数据层、方法层和应用层 3 个层次构建基于大数据智能混合优化的地质灾害风险防控平台(张茂省, 2019), 这一

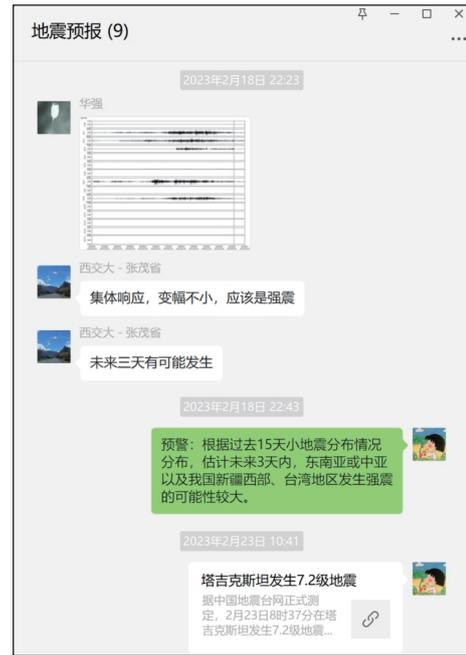


图 16 研究团队内部聊天群关于预报地震的记录图

Fig. 16 A chart of the team's internal chat group about predicting earthquakes

方案同样适用于本次研究。整合典型地震时变重力异常信号与其他地震前兆样本库, 构建多源、异构、实时融合数据库, 基于现代人工智能技术, 开展地震发生的多因素(概率、时间、震中位置、震级)联合特征无监督学习与分析, 建立基于多因素的智能型强震短临预测模型和风险预警应用平台。通过大数据混合智能优化快速估计并反馈可能发生强震的概率、时间、震中位置和震级等信息。

5 讨论

5.1 地震可预报性与研究基础

苏格拉底说: “人类最高的智慧是承认我们自己什么都不知道”。在自然灾害中, 人类对地震的认识最为肤浅。地震预报研究在长期的期盼和质疑中推进, “是否存在有助于预报的地震前兆”是《Science》创刊 125 周年时发布的科学难题之一, 也是地震学研究的“圣杯”(Lomnitz, 1994; Evans, 1997; Geller et al., 1997a, 1997b; Wyss et al., 1997; Sykes, 1999)。

中国是世界上地震活动最为频发的国家之一。1949 年新中国成立以后, 便开展了全国地震烈度预测(远期预报)研究, 1956 年就将地震预报纳入到了全国科学规划。1966 年 3 月邢台大地震造成 8 000 余人死亡和大量的经济损失, 在国家领导人“深入调查, 抓

住邢台不放”的指示下,掀起了多部门大批专业人员调查和研究地震的热潮。渤海地震后,成立了以李四光教授为组长的中央地震工作小组,组建了京津地震工作组。1972年全国地震工作会议提出了“以预防为主,专群结合、土洋结合,多兵联合作战”的工作方针,以及“长期、中期、短期、临震”的试验性强震预报工作程序。1975年由于观测到丰富的前兆信息,成功预报了海城地震,避免了重大人员伤亡。1976年5月成功预报了云南省龙陵县7.3级地震,同年8月成功预报了四川省松潘-平武7.2级地震(马宗晋等,1982)。1976年7月28日唐山7.8级地震虽未成功预报,造成重大人员伤亡,但不可否认的是捕捉到了大量的地震前兆信息。海城、龙陵、松潘等地震的成功预报进一步增强了地震预报工作者的信心。但是,唐山7.8级地震,以及21世纪以来连续发生的印尼9.0级地震、日本以东海域9.0级地震、海地7.1级地震、汶川8.0级地震、土耳其7.8级地震等毁灭性巨大地震灾害却未能得到及时预报。因此,许多国家对地震的防灾减灾原则由“以预防为主”改为“以灾后救助为主”。

在地质灾害防治体系的建设中,自然灾害的早期识别是风险管理的前提(张茂省,2021)。短临地震预报之所以是世界难题,核心是缺乏能够反映强震孕育和发生过程的普适性的有效的前兆信息。高精度动态固体潮汐重力仪和大气潮汐重力仪能够检测到强震前超低频、微弱的(1~30 mHz、1~10 μ Gal)时变重力异常信息,并发现这些异常信号幅值与发震震级正相关,初步揭示了短期-临震阶段“闭锁蓄能→震前平静→能量释放”的强震物理机制,可作为短临地震预报的前兆信息。

中国的现代地震预报自1966年河北邢台大地震后逐步发展起来。经过半个多世纪坚持不懈的研究和探索,建设了多学科(地震学与地球内部物理学、地震地质和活动构造学、地壳形变与大地测量学、地震工程学等)地震观测系统并形成地震预报的观测基础,形成了基本覆盖全国的国家地震观测网络(地震台网、地磁台网、地电台网、重力台网、地下流体观测网、地壳形变台网、强地震动台网等);累积了大量的震例并建立地震预警预报的震例基础,从地震的基本参数、地震地质背景、烈度分布、地震序列、震源机制、地震台网和前兆异常、前兆异常特点等方面进行系统全面编撰;总结了前兆异常特征,建立了经验预报基础,形成了长、中、短、临阶段性渐进式地震预报的科学思

路,并在长、中期预报理论方面具有突出成就;开展了多项临震预报研究,在大地震临震信息方面获得了次声波异常、地应力突跳、虎皮鹦鹉跳跃异常、地电和地磁异常、卫星红外异常、重力高频脉冲等临震预报的手段。

时变重力场观测作为强震危险源早期识别的地球物理手段之一(王武星等,2010;陈石等,2011,2014;祝意青等,2013;Panet et al.,2018),在中国地震观测预报领域应用已具有近40年的实践和发展历史(祝意青等,2012)。近年来,利用流动重力观测资料,中国地震局重力学科专家利用流动重力观测资料对2014年云南鲁甸6.5级、2016年青海门源6.4级、2016年新疆呼图壁6.2级、2017年四川九寨沟7.0级等强震均进行了较好的年度、年中预报(祝意青等,2018)。从现有大量公开的文献研究结果表明地震前的重力场变化信号已经在地震趋势会商中发挥了重要作用,并作为划定年度地震危险性的依据之一(祝意青等,2017;王同庆等,2018;刘代芹等,2021),重力在地震预报中应用现状是中长期观测成果的显现(Chen et al.,2015;毛经伦等,2018)。

中国地震观测台网已经形成,在此基础上,结合板块结合部位、地震与活动断裂活跃程度,布设动态重力监测,获取强震发生前1~30天产生的动态重力场的微量变化,为认识强震孕育-发生机制提供了珍贵的数据,动态重力场的微量扰动或异常信息可作为有效的强震前兆信息,使得未解的短期和临震预报世界难题变为可能。

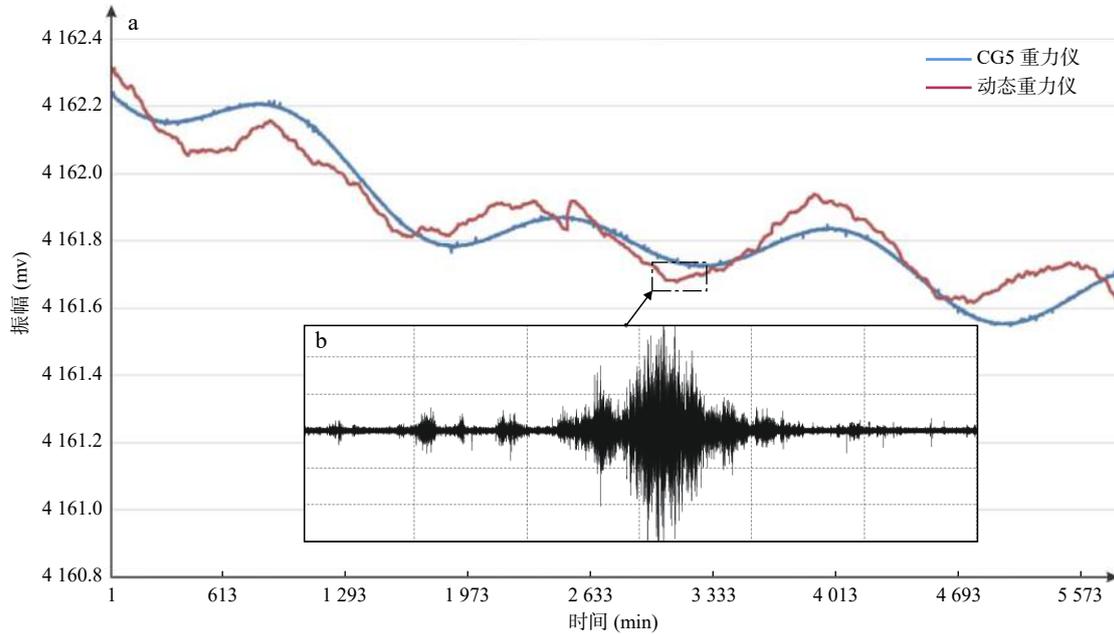
5.2 信息检测精度与异常信息剔除处理

前已述及,2010年以来,笔者所在团队在西安地区已成功捕获到十余次震前的动态重力时变异常信息,那么,为什么国内外鲜有此类报道呢?是其他公司的高精度重力仪没有观测到,或者没有发现吗?这当与仪器的检测精度和异常信息的剔除处理不无关系。

笔者所在团队研制的高精度固体潮汐重力仪与大气潮汐重力仪除了能够以10 Hz/d采样率实时采集得到原始重力加速度波形数据外,还能检测到超低频微弱(1~30 mHz、1~10 μ Gal)的时变重力异常信息。与知名公司同类仪器相比,GWR公司超导绝对重力仪精度最高为0.1~0.01 μ Gal,不适合移动。Lacoste & Romberg公司可移动相对重力仪精度为10 μ Gal,国内清华大学T-1A绝对重力仪达到5 μ Gal。尚未检索到华科、浙工大、中科大的量子绝对重力仪量产报道。将笔者所在研究团队研制的动态重力仪与CG5重力

仪在同一场地做固体潮汐观测对比,结果表明2种仪器获取的原始重力加速度波形趋势基本吻合,只是

CG5采用平均法出图,抹去了细微变化部分,丢掉了可贵的地震前兆信息(图17)。



a.动态重力仪与CG5同场地固体潮汐观测对比图; b.动态重力仪微观潮汐的扰动关系-重力时变异常图

图17 不同重力仪观测数据对比图

Fig. 17 Comparison chart of different gravimeter observation data

国际知名公司的高精度重力仪:一方面也许能够检测到了动态重力信息,只是将宝贵的动态重力扰动信息作为噪音剔除处理了,获得的只是趋势性原始重力加速度值;另一方面,也许也检测到了动态重力信息,但尚未发现动态重力扰动信息与地震之间的关系,从而导致国内外鲜有基于动态重力扰动与强震前兆方面的报道。同时,固体潮汐重力仪和大气潮汐重力仪具有造价经济、自主化程度高、智能化、适用多种环境的特点。两款重力仪已完成多次地震前兆观测与验证,均满足捕获强震前兆信息的要求,具备量产组网观测,获取动态重力场异常信号的条件。

5.3 强震漏报与误报

基于本研究团队在西安地区开展的动态重力观测数据,将实际发生的强震与观测到的动态重力时变异常进行一一对比,会发现仍有一部分震前时变重力信息受仪器精度、布设位置及环境等因素影响并未能完全反应在回传数据上,既有强震的漏报现象,也存在强震的误报问题。地震预报是世界难题,避免强震漏报与误报则是难上加难,但也不是没有解决方案。

5.3.1 进一步提高仪器检测精度和全国乃至全球组网观测,有望大幅减少强震漏报问题

(1)通过施加多层控温技术,提高温度控制等级

($0.01^{\circ}\sim 0.001^{\circ}$),同时增加敏感元件的阵列,做算法叠加,将重力仪检测精度提高到优于 $1E^{-11}ms^{-2}$ ($0.01\mu Gal$),解决信息漂移问题,从而进一步提高两款动态重力仪器精度与稳定性,基本解决有些地震固体潮汐重力异常不明显,有的地震大气潮汐重力异常不明显,以及两款仪器异常都不明显的问题。

(2)通过组网观测,解决目前动态重力仪器的布设观测仅限于西安地区,受地震震级与距离影响,对全国乃至全球所有强震的震前时变重力异常信号难以全部捕获,或捕获到的异常信号较弱的问题。组网观测应依托地震局现有观测网并考虑地震带和活动断裂布设,动态重力仪以简易轻便型的大气潮汐重力仪为主广泛布设,重要位置布设固体潮汐重力仪控制点,提高震前动态重力扰动信号的捕获率和观测精度,显著降低漏报率。

(3)加强发震机制研究,提升对不同类型地震孕育-发生过程的认识。目前捕获到典型前兆异常的地震具有“基本稳定→闭锁蓄能→震前平静→能量释放”的地震孕育-发生过程,也许存在无闭锁蓄能、无动态重力前兆异常的地震类型,还有火山爆发等内动力地质作用引起态重力前兆异常的可能。通过深入研究,逐步解决不同发震机制以及判识火山爆发的前

兆问题。

5.3.2 通过动态重力扰动信息数据库建设和规律研究, 基本解决地震误报问题

(1)消除噪声: 动态重力观测受雷暴、极端天气变化、大气潮汐、引力波、磁场扰动等多因素影响, 优化捕获的动态信号, 消除这些因素影响, 滤除噪声, 提高预报准确率。

(2)优化算法: 前期采用监测异常值大于 2 mv 的手机短信提醒, 导致几乎每天都有 1 次甚至 2 次的提醒。产生这一误报的原因是没有按照动态重力扰动的信号特征设置阈值, 通过分析目前捕获到的地震前兆信息, 其动态重力扰动信号不是偶然出现 1 次或几次, 而是成批出现, 按每秒观测 10 次计算, 连续半小时就会出现 1.8 万次。后期提出了考虑不同仪器和半小时内监测值滑动平均值的发震概率的提醒方法, 误报率显著降低。未来可以进一步将半小时内监测值滑动平均值调整为不同监测值出现的概率, 有望彻底解决误报问题。

(3)建立动态重力扰动信息数据库, 从大量的多种多样前兆信息中辨识强震引起的动态重力信息, 揭示强震孕育和发生过程的动态重力信息的响应规律及物理机制, 逐步提升预报的准确性, 避免强震漏报与误报, 突破强震预报世界难题。

6 结论

(1)地震预报研究尚处于初期的科学探索阶段, 在不断增长的期盼和质疑中继续推进, 但地震预报并不是不可能。笔者所在研究团队研制的固体潮汐与大气潮汐 2 款高精度重力仪, 其检测精度均已经达到 $1 \text{ E}^{-11} \text{ ms}^{-2}$ ($0.01 \text{ } \mu\text{Gal}$), 在检测精度方面满足强震短临预报的需求, 且具有稳定、轻便、可移动、自动化观测的优点, 尤其是价格便宜, 达到了推广应用阶段的要求; 已经成功捕获到十多次强震前几十个小时的动态重力场变化信息, 为认识地震孕育机制和发生过程、破解地震预报难题提供了新的途径。

(2)随着科技进步和大数据、人工智能等技术发展, 通过动态重力仪布网与智能观测和分布式地震前兆信息数据库建设, 完善强震孕育发生机制与强震短临预报理论, 完善基于震前时变重力异常的强震时空强短临预报技术方法, 构建基于人工智能+震前时变重力异常+其他前兆的强震短临预报平台, 有望突破短临地震预报的世界地震预报难题。

(3)必须清晰地认识到: ①强震复发周期长且不规则, 研究期内捕获的数据多少具有不确定性, 该研究存在一定的风险。②强震前兆信息对短临地震预报的作用仍然挖掘之中, 如何融合多种前兆信息, 建立基于震前动态重力扰动与其他地震前兆的强震耦合短临预测模型具有挑战性。③目前获取的动态重力信息主要是在西安地区观测的, 观测点少且集中, 结合地震带特征和地震台网在全国乃至全球布设动态重力仪观测尚需要作大量的工作。

参考文献(References):

- 毕金孟, 蒋长胜. 可操作的地震预测 (OEF) 国际研究动态综述[J]. *中国地震*, 2017, 33(1): 1-13.
- BI Jinneng, JIANG Changsheng. A review on the international research of the Operational Earthquake Forecasting(OEF)[J]. *Earthquake Research in China*, 2017, 33(1): 1-13.
- 陈运泰. 地震预测: 回顾与展望[J]. *中国科学(地球科学)*, 2009, 39(12): 1633-1658.
- CHEN Yuntai. Earthquake prediction: Retrospect and prospect[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2009, 39(12): 1633-1658.
- 陈石, 王谦身, 徐伟民, 等. 从重力异常研究岩石圈内部变形及力学特性进展[J]. *地球物理进展*, 2014, 29(5): 1996-2003.
- CHEN Shi, WANG Qiansheng, XU Weimin, et al. Progress in studying internal deformation and mechanical properties of the lithosphere from gravity anomalies[J]. *Advances in Geophysics*, 2014, 29(5): 1996-2003.
- 陈石, 王谦身, 祝意青, 等. 从重力异常研究岩石圈内部变形及力学特性进展[J]. *地球物理进展*, 2011, 26(4): 1147-1156.
- CHEN Shi, WANG Qiansheng, ZHU Yiqing, et al. Advances in deformation and mechanical properties of lithospheric interior from gravity anomalies[J]. *Geophysical Progress*, 2011, 26(4): 1147-1156.
- 刘代芹, 陈石, 王晓强, 等. 2021 伽师 6.4 级地震前后震源区视密度变化及其构造意义[J]. *地震地质*, 2021, 43(2): 311-328.
- LIU Daiqin, CHEN Shi, WANG Xiaoqiang, et al. Changes in apparent density in the source area before and after the 2021 Gashi 6.4 magnitude earthquake and its tectonic significance[J]. *Earthquake Geology*, 2021, 43(2): 311-328.
- 马瑾. 地震预测战略中若干问题的讨论- 纪念为地震事业奉献一生的梅世蓉先生座谈会[J]. *国际地震动态*, 2018: 22-24.
- MA Jin. Discussion on Some Issues in Earthquake Prediction Strategies-Symposium to commemorate Mr. Shiyong Mei who has dedicated his life to the earthquake industry[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2018: 22-24.
- 马宗晋, 傅征祥, 张郢珍, 等. 1966-1976 中国九大地震[M]. 北京: 地震出版社, 1982, 1-5.

- MA Zongjin, FU Zhengxiang, ZHANG Yingzhen, et al. Nine major earthquakes in China from 1966 to 1976[M]. Beijing: Seismological Press, 1982, 1-5.
- 毛经伦, 祝意青. 地面重力观测数据在震预测中的应用研究与进展[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(3): 236-247.
- MAO Jinglun, ZHU Yiqing. Progress in the application of ground gravity observation data in earthquake prediction[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(3): 236-247.
- 王武星, 石耀霖, 顾国华, 等. GRACE卫星观测到的与汶川Ms8.0地震有关的重力变化[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(8): 1767-1777.
- WANG Wuxing, SHI Yaolin, GU Guohua, et al. Gravity changes associated with the Wenchuan Ms8.0 earthquake as observed by GRACE satellite[J]. *Journal of Geophysics*, 2010, 53(8): 1767-1777.
- 王同庆, 陈石, 梁伟锋, 等. 2016年门源MS6.4地震前的区域重力场变化与定量参数分析[J]. *地震地质*, 2018, 40(2): 349-360.
- WANG Tongqing, CHEN Shi, LIANG Weifeng, et al. Regional gravity field changes and quantitative parameter analysis before the 2016 Menyuan MS6.4 earthquake[J]. *Earthquake Geology*, 2018, 40(2): 349-360.
- 许忠淮. 应重视大地震预测物理基础的研究[J]. *地震*, 2019, 39(2): 11-18.
- XU Zhonghuai. In Search of a New Physical Basis for Large Earthquake Prediction[J]. *Earthquake*, 2019, 39(2): 11-18.
- 尹凤玲, 蒋长胜, 姜丛. 年尺度地震预测模型的国际研究现状[J]. *地球与行星物理论评*, 2021, 52(1): 54-60.
- YIN Fengling, JIANG Changsheng, JIANG Cong. Research progress of next-year earthquake forecasts in the world[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2021, 52(1): 54-60.
- 张茂省. 地质灾害风险管理理论方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 1-412.
- ZHANG Maosheng. Geological hazard risk management theory and practice[M]. Beijing: Science Press, 2021: 1-412.
- 张茂省, 贾俊, 王毅, 等. 基于人工智能(AI)的地质灾害防控体系建设[J]. *西北地质*, 2019, 52(2): 103-116.
- ZHANG Maosheng, JIA Jun, WANG Yi, et al. Construction of geological disaster prevention and control system based on AI[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): 103-116.
- 张茂省. 再谈地质灾害调查评估是移民搬迁的关键[A]. 秦巴山区地质灾害与防治学术研讨会论文集[C]. 2015: 8-9.
- ZHANG Maosheng. Re-talking about geological disaster survey and assessment as the key to migration relocation[A]. *Proceedings of the Symposium on Geological Disasters and Prevention in the Qinba Mountains*[C]. 2015: 8-9.
- 祝意青, 梁伟锋, 湛飞并, 等. 中国大陆重力场动态变化研究[J]. *地球物理学报*, 2015, 55(3): 804-813.
- ZHU Yiqing, LIANG Weifeng, ZHAN Feibing, et al. Study on the dynamics of gravity field in mainland China[J]. *Journal of Geophysics*, 2015, 55(3): 804-813.
- 祝意青, 梁伟锋, 赵云峰, 等. 2017年四川九寨沟Ms7.0地震前区域重力场变化[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(10): 4124-4131.
- ZHU Yiqing, LIANG Weifeng, ZHAO Yunfeng, et al. Regional gravity field changes before the 2017 Jiuzhaigou Ms7.0 earthquake in Sichuan[J]. *Journal of Geophysics*, 2017, 60(10): 4124-4131.
- 祝意青, 申重阳, 张国庆, 等. 我国流动重力监测预报发展之再思考[J]. *大地测量与地球动力学*, 2018, 38(5): 441-446.
- ZHU Yiqing, SHEN Chongyang, ZHANG Guoqing, et al. Rethinking the Development of Earthquake Monitoring and Prediction in Mobile Gravity[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(5): 441-446.
- 祝意青, 闻学泽, 孙和平, 等. 2013年四川芦山Ms7.0地震前的重力变化[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(06): 1887-1894.
- ZHU Yiqing, WEN Xueze, SUN Heping, et al. SUN Heping. Gravity changes before the Lushan, Sichuan, Ms7.0 Earthquake of 2013[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(06): 1887-1894.
- Bolton D C, Shreedharan S, Rivière J, et al. Acoustic Energy Release During the Laboratory Seismic Cycle: Insights on Laboratory Earthquake Precursors and Prediction[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(8): 1-17.
- Chen S, Liu M, Xing L, et al. Gravity increase before the 2015 Mw 7.8 Nepal earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 43(1): 111-117.
- Evans R. Assessment of schemes for earthquake prediction[J]. *Geophysical Journal International*, 1997, 131(3): 413-420.
- Geller R J. Earthquake prediction: a critical review[J]. *Geophysical Journal International*, 1997a, 131(3): 425-450.
- Geller R J, Jackson D D, Kagan Y Y, et al. Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 1997b, 275(5306): 1616-1616.
- Kagan Y Y, Knopoff L. Statistical short-term earthquake prediction[J]. *Science*, 1987, 236(4808): 1563-1567.
- Keilis-Borok V. Earthquake prediction: State-of-the-art and emerging possibilities[J]. *Annual review of earth and planetary sciences*, 2002, 30(1): 1-33.
- Lomnitz C. Fundamentals of earthquake prediction[M]. John Wiley & Sons, 1994.
- Ouzounov D, Pulinet S, Jann-Yenq L, et al. Multiparameter Assessment of Pre-Earthquake Atmospheric Signals[M]. Washington D C: Amer Geophysical Union, 2018: 339-359.
- Panet I, Bonvalot S, Narteau C, et al. Migrating pattern of deformation prior to the Tohoku-Oki earthquake revealed by GRACE data[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(5): 367-373.
- Sykes L R, Shaw B E, Scholz C H. Rethinking earthquake prediction[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1999, 155(2): 207-232.
- Tozzi R, Masci F, Pezzopane M. A stress test to evaluate the usefulness of Akaike information criterion in short-term earthquake prediction[J]. *Scientific reports*, 2020, 10(1): 1-9.
- Wyss M, Aceves R L, Park S K, et al. Cannot earthquakes be predicted[J]. *Science*, 1997, 278(5337): 487-490.