



# 中国流动重力监测与地震预测

祝意青<sup>1</sup> 刘芳<sup>1</sup> 张国庆<sup>1</sup> 赵云峰<sup>1</sup> 魏寿春<sup>1</sup>

1 中国地震局第二监测中心,陕西 西安,710054

**摘要:**主要介绍中国大陆流动重力监测网布局、重力测量数据处理及重力前兆信息提取方法、流动重力监测结果所反映的区域重力场动态变化图像及所揭示的构造活动特征。在大量观测资料的基础上,研究重力异常变化与地震孕育发生关系,探索地震预测的研究思路、途径和方法,并积极利用重力观测资料进行地震中期危险性预测研究,及时将研究成果用于震情会商及年度地震趋势预测,为强震预测和年度危险区划定提供了重力学前兆依据。指出了流动重力监测中仍存在的问题,并提出了利用时变重力监测资料推进地震预测研究的设想和思考。

**关键词:**流动重力;数据处理;重力变化;构造活动;地震预测

中图分类号:P315

文献标志码:A

地球重力场是反映物质迁移的基本物理场,直接反映地球内部构造运动、地表质量迁移的本质和过程。地震、火山活动等地球动力学过程都会引起一定程度的地球重力场变化<sup>[1-7]</sup>。重力场对质量运动或变化信号敏感,适合定量研究各种地球系统过程的时空特性。高精度的地表重力场观测由于距离地壳内部场源近、观测位置固定重复、观测仪器精度高等特点,有利于发现与地壳内部场源直接相关的物理信号。

地震研究不仅依赖相关基础理论的发展,更依赖地震前后时空完整的高精度观测资料。流动重力观测获得的重力时变信号能较好地反映深部物质运移与地壳密度变化等构造活动信息,强震前区域重力场可能会观测到显著的重力异常变化特征,通过对重力时变信号的深入分析,能捕获到与孕震区物性变化有关的物理信息,利用高精度重力测量数据分析震前重力异常变化的时空分布特征,有助于判定未来大震的高风险区域,是利用重力手段开展地震预测的基本出发点。

## 1 流动重力监测网布局

### 1.1 重力网布局思路

流动重力监测网是进行地震重力测量的基

础,是直接为地震预报服务的。地震监测预报业务能力的提升离不开高精度、高时空分辨率的重力场变化监测资料,而建设布局科学合理的台网是获取此类监测资料的前提。根据历史地震资料,地震学家在中国大陆划出了几十条地震带,涉及地域极广。在这些地震带上都布设密集的地震重力监测网是不切实际的,不仅自然条件和监测能力不允许,实际上也是不必要的。因此,按照地震工作的方针,只在有一定经济建设规模、人口比较稠密、社会影响显著的主要地震带布设相对密集的重力监测网,如南北地震带、天山地震带、华北地震带等。重力监测网的布设始终坚持服务于中强以上地震预测,尤其是强震/大震预测这一主题。

流动重力测量是对已经建立的重力点按观测程序进行联测,定期进行重复观测,形成重力场变化观测网络,并辅以绝对重力观测加以控制,获得高精度重力场的空间和时间变化。

### 1.2 重力网布局概况

地震重力监测网是全国地震前兆监测系统的一个重要组成部分和主要监测手段,主要用于精确监视区域重力场的动态演化,并用于地震孕育、发展、发生过程的追踪,为地震预报和相关的地球动力学研究服务。

中国大陆的流动重力测量工作始于 1966 年邢台地震后,1981 年后得到长足发展。1981 年前主要使用石英弹簧重力仪,测量精度在  $30\sim40 \mu\text{Gal}$ ,之后引进 LaCoste-Romberg 高精度重力仪,精度在  $10 \mu\text{Gal}$  内。1990 年前后,中国大陆的主要活动构造带或地震危险地区陆续建立了 30 多个区域重力监测网,形成了由近 4 000 个点组成的定期复测重力监测网,区域网各自独立,呈网状或条状,平均范围小于  $300 \text{ km} \times 300 \text{ km}$ <sup>[8-9]</sup>。1998 年,中国地震局与原国家测绘局、原总参谋部测绘局和中国科学院等四部委共建了中国地壳运动观测网络工程(下简称网络工程),该工程建成了中国大陆统一的全国地震重力基本网<sup>[10-11]</sup>。

2008 年汶川 8.0 级地震后,中国地震局高度重视流动重力监测与预报工作,认为各区域地震重力监测网覆盖区域较小,捕捉地震前兆的能力有限,大部分监测网虽然分布在中国大陆的一些主要活动构造带上,但强度不够、监测能力不足,如川滇地区的许多地震都发生在监测网外<sup>[8-9]</sup>。另外,各区域重力监测网彼此独立、自成体系,缺乏有效的联测和绝对重力基准控制,降低了观测资料的内在精度,不能得到区域重力场变化的绝对量,严重影响了观测资料的有效应用,使其不能在地震预报中发挥更大作用。因此,有必要将区域重力监测网连接成整体,建成统一重力观测基准,使地震重力监测网建设和观测技术得到快速发展<sup>[12-13]</sup>。在华北强震震情监视与跟踪、中国大陆地球物理场综合观测、中国大陆构造环境监测网络等重大项目资助下,对零散分布的地震重力监测网进行了多次整体结构优化改造,在重力网布局思路上不断创新,为中国大陆成功分布的地表重力场监测预报工作奠定了重要基础。2010 年,由相对重力联测网和绝对重力控制网组成的中国大陆整体重力测量网<sup>[13]</sup>建成,每年定期开展观测。

21 世纪以来,中国大陆发生了 8 次 7 级以上大震,包括 2001 年昆仑山口西 8.1 级、2008 年汶川 8.0 级和于田 7.3 级、2010 年玉树 7.1 级、2013 年芦山 7.0 级、2014 年于田 7.3 级、2017 年九寨沟 7.0 级和 2021 年玛多 7.4 级地震,除了发生在青藏高原腹地的 2001 年昆仑山口西 8.1 级震中附近没有重力测点外,其他 7 次大震的震中附近均有一定的重力测点,尤其是 2008 年汶川 8.0 级、2013 年芦山 7.0 级和 2017 年九寨沟 7.0 级地震,震中四周均有重力监测点,这为可靠地提取强震前的重力变化前兆信息打下了良好基础<sup>[9-11]</sup>。

## 2 重力数据处理

利用重力时变资料进行地震分析预测研究需要进行重力测量数据处理。只有通过必要的数据处理,从观测资料中提取可靠的重力变化信息,才能实现观测资料的价值。数据处理的目的是获得真实的重力测量值,描述重力场演变过程,从观测资料中获取反映地震孕育发生过程中的重力变化信息。重力观测资料的质量既依赖监测成果质量,也依赖处理资料方法,不同的资料处理方法可能会得到差异较大的结果,这在资料分析中尤为重要。

流动重力测量一般成网状布设,它包括基准点上的绝对重力测量以及联测点间的相对重力联测。相对重力联测具有机动灵活、省时省力、经济成本低等优点,能快速获取地震重点监视区的区域重力场变化。但相对重力联测获得的观测数据是相邻测点间的重力段差,需进行数据处理,又称平差。依据最小二乘原理进行平差,可以合理消除网中各种不符值,削弱偶然误差,消除系统误差,评定测量精度,同时获得流动重力测网中各点的重力值等。在平差之前需要进行预处理,包括对观测值进行固体潮、气压、一次项、仪器高改正等。

进行重力网平差,首先需要选择适当的平差基准,重力网平差基准的选择将直接影响重力场变化结果分析的可靠性<sup>[14]</sup>。重力网平差基准的选择可以有不同方式,包括经典平差、自由网平差和拟稳平差<sup>[15-16]</sup>。(1)当网内有 2 个以上绝对重力点时,一般采用经典平差,选取绝对重力点值作为平差的起算基准;(2)当网中无绝对重力控制、且多期测网测点或网型存在一定变化、但测网内存在部分稳定的重力测点时,通常采用拟稳平差;(3)当网中无绝对重力点、前后两期测网的测点和网型无大变化时,通常采用自由网平差。

1997 年以前,中国地震局各施测单位独立的重力测网基本没有绝对重力点,地震重力的数据处理与分析工作由各单位对其测区进行,重力网数据处理无法满足经典平差方法的需求,因此,区域重力网的数据处理通常采用自由网平差与拟稳平差。1998—2009 年,网络工程的重力网采用绝对重力控制的经典平差,其他区域网由于缺少绝对重力观测点仍采用自由网平差与拟稳平差。2010 年以来,中国大陆流动重力监测网是由

相对重力联测网和绝对重力控制网共同组成的,将中国大陆构造环境监测网络重力网与各施测单位的区域重力测网连接成整体,形成中国大陆流动重力统一观测网。因此,重力数据的处理从各省区地震重力网的独立计算,发展到相邻省区联合处理的整体平差计算,既扩大了研究区范围,又能有效提取各省区交界地带的重力场变化信息<sup>[17]</sup>。

综合利用地面绝对重力、相对重力资料的整体处理分析方法,获得测区内以绝对重力为基准的区域重力场变化。数据处理的重点是将绝对重力观测资料与同期的相对重力观测资料结合,其中绝对重力点构成高精度控制网,相对重力观测视为与该网的定期联测,形成具有绝对基准的区域动态监测网。具体数据处理步骤为:(1)使用中国地震局LGADJ软件对重力观测数据进行统一平差计算<sup>[18]</sup>;(2)采用稳健估计法对少数存在误差较大的观测段差实行降权处理和粗差剔除,利用计算程序自动优化、合理确定各台仪器的先验方差后进行整体平差计算<sup>[19-20]</sup>;(3)重力网平差采用弱基准,若基准点有误差、甚至异常,易从平差结果中发现,从而降低误差影响,且可通过平差使基准点重力值得到改善<sup>[19-20]</sup>;(4)实测标定仪器的一次项<sup>[21]</sup>,在野外作业中使用基线场的标定值,但随着测区的不同和观测时间的变化,重力仪的格值系数会发生变化,尤其是CG-5/6型重力仪格值系数会产生较大变化,应利用测网中的绝对重力点控制解算出区域适定解,精确标定仪器的格值系数,获取可靠重力变化<sup>[22]</sup>;(5)采用贝叶斯方法提供的非线性零漂计算模型对仪器非线性漂移的漂移率变化进行估算,消除仪器零漂的影响<sup>[23]</sup>;(6)用最小二乘配置等方法对重力观测数据进行拟合推估和滤波<sup>[9,11]</sup>,以便突出显示构造因素的重力效应。

### 3 重力变化与构造运动及地震活动

根据流动重力监测情况和重力数据处理结果,可以获得不同时空尺度的区域重力场,作为分析研究重力场动态变化图像的依据,利用最小二乘配置、小波分析、双三次样条分析等方法,提取可靠重力场变化信息,系统分析研究多时空尺度的区域重力场动态变化图像演化特征与规律。

#### 3.1 重力场时空演化特征

由于地壳介质的非均匀性和构造运动过程的复杂性,区域重力场的时空动态变化具有明显的不均匀性<sup>[11-13]</sup>,主要表现为:

1)区域重力监测网范围不同,在不同时空尺度上的重力场动态变化图像存在明显差异。中国大陆整体重力网的观测资料能反映强震活动的主体区,高密度的地震重点监视区重力网的观测资料能反映出发震构造活动引起的局部重力异常。

2)不同时段的重力场在空间分布上表现出明显的差异性。在无显著变化时段,重力场空间分布比较零散,重力变化没有明显的规律性;在显著变化时段,区域重力场空间分布则表现出大范围的有序性变化和局部异常的相对集中性。

3)重力场变化与所处的地质构造环境等因素有关,沿块体构造活动带呈分区变化现象,一般表现为山区重力负值变化、盆地重力正值变化的继承性构造运动。

#### 3.2 重力变化与构造活动的关系

地表重力场动态变化主要由地表观测点的位置变化、变形运动以及地球内部因构造块体变形运动的密度变化效应叠加引起,包含了丰富的构造运动信息<sup>[24-28]</sup>。

1)重力场变化能够较好地反映测区内主要构造断裂的构造运动过程。由于构造形变沿活动断裂带分布,当块体构造单元运动速率发生改变时,易在其边缘地区出现与地质构造线一致的重力变化梯度带,反映了块体构造单元的相对运动。

2)重力场变化与地壳深部活动断裂构造密切相关,区域重力场变化较显著的梯度带走向与深部构造活跃断裂带走向基本一致,构造单元的边缘往往容易出现重力等值线形态的转折和密集,形成重力变化高梯度带。

3)重力变化能较好地反映与地震孕育发生有关的断层构造活动,在震中区附近出现不同形态、不同规模的局部重力异常区及其伴生的重力变化梯度带。

总之,区域重力场动态变化与构造活动存在密切联系,重力资料能较好地反映在区域构造应力场和震源应力场作用下断层活动引起的重力效应。

#### 3.3 地震孕育、发生过程的重力场变化特征

1966年邢台地震后,中国开始重力场时变的观测研究。20世纪70年代观测到1975年海城7.3级、1976年唐山7.8级等几次大震前重力变化,证实了震前重力异常的存在<sup>[1]</sup>;20世纪90年代观测到1995年中缅交界7.3级地震前出现约

110  $\mu\text{Gal}$  重力异常<sup>[28]</sup>, 1996 年丽江 7.0 级地震前震中附近出现约 120  $\mu\text{Gal}$  重力异常<sup>[8]</sup>; 近年来观测到 2008 年汶川 8.0 级和于田 7.3 级、2010 年玉树 7.1 级、2013 年芦山 7.0 级、2014 年于田 7.3 级、2017 年九寨沟 7.0 级和 2021 年玛多 7.4 级等大震前后重力变化<sup>[25-32]</sup>。

根据中国大陆不同时空尺度的区域重力场

演化特征与规律<sup>[28-37]</sup>, 有学者提出以时空区域重力场作为分析重力场动态变化图像的依据, 利用不同时空尺度的重力场变化, 如相邻两期重力变化、年尺度重力变化、累积重力变化等, 选取重力场变化趋势、重力异常形态、重力异常区的范围、持续时间、异常量级等作为判定指标, 综合进行地震孕育发生的预测, 具体见表 1。

表 1 重力异常与地震孕育发生的关系

Tab.1 Relation Between Gravity Anomaly and Earthquake Inoculation

震级	潜在发震地点的重力场特征	趋势特征	异常范围/km	持续时间	异常量级/ $\mu\text{Gal}$
5	重力变化高梯度带	出现局部异常区	$\geq 100$	0.5~1 a	$\geq 50$
6	与构造活动有关的重力变化高梯度带转弯部位, 四象限分布特征中心附近	出现局部异常区	$\geq 200$	1~3 a 或更长	$\geq 80$
7	与块体边界有关的重力变化高梯度带转弯部位, 四象限分布特征中心附近	出现正、负局部异常区	$\geq 400$	3~5 a 或更长	$\geq 100$
8	与一级块体边界有关的重力变化高梯度带转弯部位, 四象限分布特征中心附近	出现正、负局部异常区	$\geq 600$	5 a 或更长	$\geq 120$

由表 1 可知, 要了解地震孕育、发生过程的重力场变化特征, 应从重力异常变化特征、空间范围、异常持续时间和异常量级 4 个因素来考虑。

1) 强震发生之前, 区域重力场出现大范围的有序性变化, 震源区附近产生与地震孕育发生有关的局部重力异常区, 并沿区域主要发震构造断裂带出现显著重力变化梯度带。由于孕震构造环境的差异, 不同地震的重力变化响应具有明显差异。

2) 强震易发生在与构造活动有关的重力变化正、负异常区过渡的高梯度带上, 重力变化等值线的拐弯部位或四象限中心附近。强震前震中区及其附近观测到明显的区域性重力异常及重力变化高梯度带, 可能是地震孕育过程中观测到的重力前兆信息。

3) 地震震级与重力异常变化的范围、持续时间和变化量级密切相关<sup>[17]</sup>。一般来讲, 观测资料积累的时间越长越有利于判断强震发震震级, 重力变化的空间分布特征与发震地点有关; 震前重力异常变化覆盖范围越大, 则震级越大; 震前重力异常变化量级越大, 则震级越大; 震前 2~3 a 的观测对发震时间预测非常关键, 6 级以上地震相邻两期重力变化显著, 2 a 以上的累计重力变化更为显著, 5 级地震不存在这种现象。

大量研究成果表明<sup>[28-37]</sup>, 区域构造活动引起的重力时变异常是与地震孕育发生相关的前兆异常之一, 特别是对于 6 级以上地震的孕震过程。

## 4 重力时变与强震预测

获取可靠的地震前兆信息是实现地震预测的前提。实践证明, 通过对重力时变信号的深入分析, 能捕获与孕震区物性变化有关的物理信息, 是利用重力手段开展地震预测的基本出发点。

在地震预测实践方面, 中国地震局于 20 世纪 90 年代就对滇西和河西地区利用流动重力观测资料进行了地震预测研究探索, 观测到滇西地区 1992 年永胜 5.1 级和 5.4 级、1993 年大姚 5.3 级地震前的重力场变化, 1996 年丽江 7.0 级地震前的重力异常变化, 并对这几次地震曾进行了一定程度的预测<sup>[5,8]</sup>。1995 年甘肃永登 5.8 级和 2000 年甘肃景泰 5.9 级地震前, 河西地区也观测到明显的重力异常变化, 并对这两次地震均进行了较准确的中期预测<sup>[38-39]</sup>。21 世纪以来, 李辉等<sup>[11]</sup>利用网络工程重力观测资料获得的 1998 年以来中国大陆 2~3 a 尺度重力场动态变化图像, 较好地反映了中国大陆地壳构造运动和主要强震活动的基本轮廓。祝意青等<sup>[24]</sup>利用 1998—2008 年期间网络工程的重力观测数据, 获得中国大陆地区以绝对重力为统一算基准的重力场动态变化图像, 认为中国大陆重力场变化与构造活动断裂和与强震孕育发展有着密切联系, 强震易发生在沿构造活动断裂出现的重力变化正、负异常区过渡的高梯度带上以及重力变化等值线的拐弯部位。此外, 祝意青等<sup>[25]</sup>还利用网络工程 1998—2005 年

期间的重力资料对2008年汶川8.0级和于田7.3级等大震做出了准确的中期预测。

### 1) 2008年四川汶川8.0级地震预测<sup>[29-30]</sup>

预测的主要依据:1998—2005年期间的累积重力变化表明,川滇菱形块体内部出现大范围的重力正值变化异常区,川滇菱形块体北部的四川地区出现较大范围的重力负值变化异常区,两异常区的升降差异变化超过100  $\mu\text{Gal}$ ,并在马尔康-汶川-成都一带形成重力变化高梯度带(图1)。

预测情况:发震时间:2007—2008年;发震地点:(103.7°E, 31.6°N)为中心,半径200 km;震级:6~7级。

结果:2008年5月12日,汶川8.0级地震(103.4°E, 31.0°N)发生在预测区内,预测震中位置距离汶川8.0级震中72 km,在北川与映秀两个极震区之间(图2),时间、地点正确,震级提到7级。

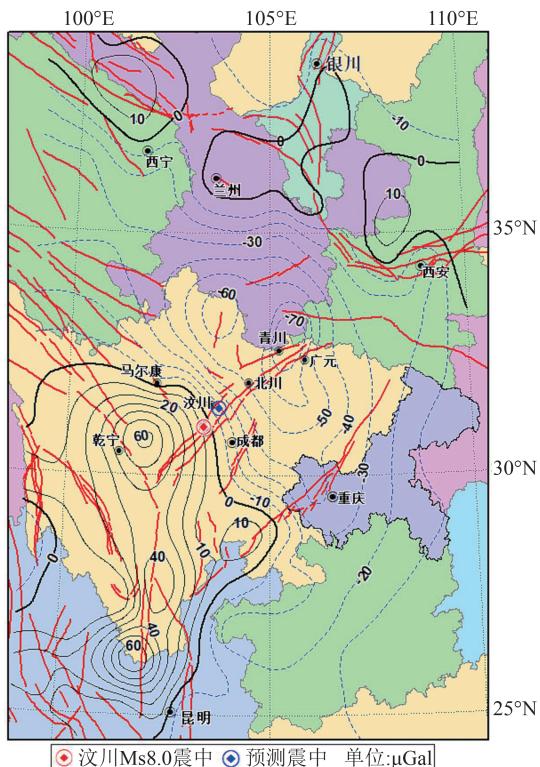


图1 汶川Ms 8.0地震前(1998—2005年)重力场变化

Fig.1 Gravity Changes Before the Wenchuan Ms 8.0 Earthquake (1998—2005)

### 2) 2008年新疆于田7.3级地震预测<sup>[24,31]</sup>

预测依据:1998—2005年较长时期的重力变化表明,新疆与西藏交界地区出现了显著重力异常变化,最大变化差异量超过90  $\mu\text{Gal}$ ,并在新疆于田-和田一带沿构造块体边界带形成显著的重力变化梯度带。

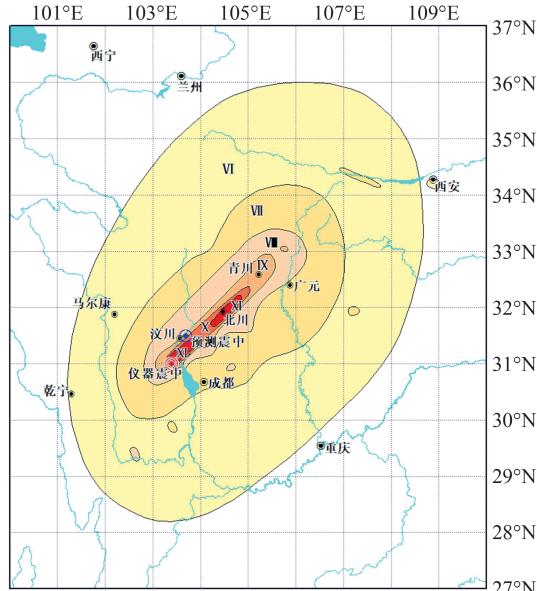


图2 汶川Ms 8.0地震预测震中与地震烈度图<sup>[25]</sup>

Fig.2 Predicted Epicenter and Earthquake Intensity of the Wenchuan Ms 8.0 Earthquake<sup>[25]</sup>

预测情况:发震时间:2007—2008年;发震地点:(80.0°E, 36.0°N)为中心,半径200 km;震级:6~7级。

结果:2008年3月21日,于田7.3级地震(81.6°E, 35.6°N)发生在预测区内,预测震中位置距离于田7.3级震中149 km,这在地震监测能力比较弱的地区是很准确的(新藏交界地区测点间距100~200 km,测点较稀)。

2008年汶川地震后,中国地震局重力学科管理部加强了重力监测预报研究工作,积极探索利用重力观测资料进行地震年度危险性预测,充分利用日益丰富的重力观测资料,在精细处理区域重力网观测资料的基础上,深入细致地研究区域重力场的动态演化特征与规律,从复杂多变的重力异常现象中寻找构造活动和地震前兆信息,开展震例回溯研究,跟踪分析区域性重力场的异常变化及其可能的中短期异常信息,提出了多种在强震前有预报意义的不同时空尺度的重力场变化特征模式<sup>[2,13,35-36]</sup>。在强震预测方法和判别指标的基础上,利用重力场动态变化资料对重点监视区的地震危险性进行年度预测和震后趋势判定,在全国地震重点危险区强震地点判定中发挥了重要作用,取得了一定程度的减灾实效<sup>[17,40-41]</sup>,对近年来发生的2013年芦山7.0级和岷县6.6级、2014年鲁甸6.5级和于田7.3级、2016年门源6.4级、2017年九寨沟7.0级、2020年伽师6.4级、2021年漾濞6.4级和2022年门源

6.9 级地震等均进行了年度预测<sup>[29-35]</sup>,尤其是强震发震地点的判定。表 2 列出了近年来,利用重

力观测资料对中国 2013 年以来 10 多次强震预测的情况。

表 2 2013 年以来 6 级以上强震年度预测情况

Tab.2 Midterm Prediction Information of More than 6 Strong Earthquakes Since 2013

预测震中	预测震级	预测时窗	发震地点	实际震级/级	实际震中	发震时间
102.2°E, 30.2°N	6 级左右	2013 年	四川芦山	7.0	103.0°E, 30.3°N	2013-04-20
105.2°E, 35.5°N	6~7 级	2011—2013 年	甘肃岷县	6.6	104.2°E, 34.5°N	2013-07-22
81.6°E, 35.6°N	7 级左右	2014 年	新疆于田	7.3	82.5°E, 36.1°N	2014-02-12
102.1°E, 28.8°N	7 级左右	2014 年	云南鲁甸	6.5	103.3°E, 27.1°N	2014-08-03
102.2°E, 37.5°N	6 级左右	2016 年	青海门源	6.4	101.62°E, 37.68°N	2016-01-21
75.7°E, 39.3°N	6~7 级	2016 年	新疆阿克陶	6.7	74.04°E, 39.27°N	2016-11-25
85.5°E, 43.5°N	6 级左右	2016 年	新疆呼图壁	6.2	86.35°E, 43.83°N	2016-12-08
101.9°E, 34.7°N	6~7 级	2016—2017 年	四川九寨沟	7.0	103.82°E, 33.20°N	2017-08-08
75.8°E, 39.6°N	6~7 级	2020 年	新疆伽师	6.4	77.21°E, 39.83°N	2020-01-19
100.5°E, 25.8°N	6 级左右	2020 年	云南漾濞	6.4	99.87°E, 25.67°N	2021-05-21
101.2°E, 37.8°N	6 级左右	2021—2022 年	青海门源	6.9	101.26°E, 37.77°N	2022-01-08

由表 2 可以看出,近年来利用流动重力资料对西部有监测能力地区发生的 6 级以上强震/大震均进行了较准确的中期预测,但也存在强震漏报的情况,如 2017-11-18 西藏米林 6.9 级、2020-07-23 西藏尼玛 6.6 级等地震均发生在青藏高原重力监测能力较弱的地区,不能进行有效监控。

总的来说,流动重力观测资料能较好地反映出地震孕育发生过程中的重力异常变化,尤其是 6 级以上的强震。通过对流动重力观测资料及时进行缜密分析与研究,有可能对未来强震/大震做出较准确的中期预测,尤其是强震地点的判定。如 2022 年青海门源 6.9 级地震地点的预测(见表 2),地震发生在预测的祁连—海原断裂带冷龙岭段,预测的震中位置距离门源 6.9 级震中不到 10 km,基本上一致。

## 5 问题与展望

获取可靠的地震前兆信息是实现地震预测的前提。重力变化测量是当前大地测量中最精密和困难的工作,地震监测获取的是微伽级变化。观测技术很重要,数据处理也十分关键,由于目前主要以绝对重力控制下的相对重力测量为主,因此,数据处理显得格外重要,应加强数据处理与分析,确保第一手资料的可靠性。此外,不同环境及物理因素导致的重力变化也要考虑,如环境变化、地下水、气压、冰后回弹等。

### 5.1 问题

在各种自然灾害中,地震是对人类生活影响最严重的自然灾害之一。通过地震监测预报能预测大震何时何地发生,对于造福人类来讲是非常重要的。地震监测的最终目的是为地震预报服务,虽然重力时变监测目前已在中国大陆的地震监测与研究中取得了较为成功的经验,但距离地震预测预防等减灾需求尚有不足,主要存在以下问题:

1) 重力变化监测网布局分布不均匀。重力监测点主要分布于南北地震带与大华北地区,而在青藏高原及其周缘地区分布较少,时空分辨率不够,不足以实现对块体边界带的有效监测,所得到的重力变化监测信息是残缺不全的,对 6 级强震仍不完全具备监测能力,不能有效地捕捉到强震孕育发生过程中出现的完整前兆信息。

2) 绝对重力控制程度较低。绝对重力与相对重力没有进行准同步测量,重力监测网缺少足够的绝对重力控制以及对相对重力测量仪器的格值系数精确标定。

3) 地面重力与卫星重力缺少有效融合。卫星重力测量主要依托 GRACE/GRACE-FO 卫星观测资料,虽填补了青藏高原腹地无人区等观测空白,但未能与陆地重力测量形成有效融合,且囿于权限,只能获取国外机构提供的预处理结果,不能获取第一手原始观测资料。

4) 新技术应用不足。重力观测仪器设备的核心传感器大都是 20 世纪研发的弹簧传感器,核心技术已逐渐落后,不能满足获取微小重力变化

的需求。近年来,超导重力仪观测技术已发展成熟,但在现有地震重力监测台网中的装备很少,地震监测应用不足;量子重力仪发展快速,相关产品已具备较高的可用性,但目前尚未在地震重力监测中得到应用。

5)时变重力数据分析和研究中,构造和水的影响是造成地面重力变化最大的因素,一些地下水、地表变形、局部近地表水储量变化等干扰因素难以被精确剔除,如何扣除掉地下水等对重力变化的影响和贡献,有效提取反映构造和动力学变化的信号是亟待加强的工作。

## 5.2 展望

地震预报一直是世界公认的科学难题,地震机理极其复杂,但并不是完全不可知的。地震的发生本是地下构造运动由慢变快的变形过程,问题在于是否能观测、记录到,即使观测到了,又能否识别<sup>[42]</sup>。从科学技术上讲,实现有效的地震预测预报,首先需要对地震机理、地震孕育发生的物理过程有全面完整的认识;然后需要能够有效地监视地震孕育、发生过程,以便根据孕震过程的发震阶段进行地震预测。这两点一方面是科学理论,一方面是技术能力。近年来,中国地震局注重地震重力监测预报队伍建设与人才培养,一方面加强重力变化机理研究,另一方面对中国大陆地震重力观测网进行整体优化完善,加强地震监测能力建设,流动重力在地震预测预报中发挥着越来越重要的作用,虽取得了多次中期预测成功案例,但目前仍存在地震孕育发生过程中的重力变化机理认识不清、重力观测技术需进一步提高等问题。从长远发展来看,应加强以下工作:

1)发展高精度绝对重力观测技术代替流动相对重力观测技术;发展低漂移(超导)或无漂移式定点连续观测技术代替弹簧式定点连续观测技术;发展低空卫星重力观测技术弥补地面重力观测技术的不足<sup>[35]</sup>。

2)加强协作,发挥多部门优势,联合大学、科学院所开展中国大陆重力场时变及强震孕育发生机理研究,深化强震发生机理的认识。

3)在中国地震科学实验场的高风险区,建立高密度的绝对重力观测网络或具有良好绝对重力控制的相对重力观测网络,开展密集的强化监测,这有可能揭示高风险区震中附近的地下结构分布特征,提取强震/大震孕育过程中震源变化伴随的绝对重力变化信号,获取高精度绝对重力动态变化图像,为地震孕育环境和孕育过程监测

提供前所未有的强大支持。

未来,随着观测技术的进步、重力场时空监测分辨力的增强,强震孕育发生过程中的重力变化机理研究的深入,时变重力观测将进一步提高其在地震分析预报中的能力,服务于中国防震减灾事业的发展需要。

致谢:陈鑫连先生一直关心地震监测预报工作,他经常来中国地震局第二监测中心进行交流、指导,在与陈先生的交往中,深深感受了陈先生的平易近人和对中国防震减灾事业发展的远见卓识。在陈鑫连先生九十华诞之际,谨以此文表达深深敬意!

## 参 考 文 献

- [1] Chen Yuntai, Gu Haoding, Lu Zaoxun. Variations of Gravity Before and After the Haicheng Earthquake, 1975 and the Tangshan Earthquake, 1976 [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1980, 2(1): 21-31 (陈运泰, 顾浩鼎, 卢造勋. 1975年海城地震与1976年唐山地震前后的重力变化[J]. 地震学报, 1980, 2(1): 21-31)
- [2] Chen S, Liu M, Xing L L, et al. Gravity Increase Before the 2015 Mw 7.8 Nepal Earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(1): 111-117
- [3] Zhu Yiqing, Xu Yunma, Lü Yipei, et al. Relations Between Gravity Variation of Longmenshan Fault Zone and Wenchuan Ms 8.0 Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(10): 2538-2546 (祝意青, 徐云马, 吕弋培, 等. 龙门山断裂带重力变化与汶川8.0级地震关系研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(10): 2538-2546)
- [4] Shen Chongyang, Li Hui, Sun Shaoan, et al. Characteristic Analysis of Dynamic Gravity Change Before Yutian Ms 7.3 Earthquake, 2008 [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 30(4): 1-7 (申重阳, 李辉, 孙少安, 等. 2008年于田Ms 7.3地震前重力场动态变化特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(4): 1-7)
- [5] Jia Minyu, Xing Canfei, Sun Shaoan. Two-Dimension Pictures of Gravity Change in Western Yunnan and Their Relations to the Earthquakes Above Magnitude 5 (Ms) [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 1995, 15(3): 9-19 (贾民育, 邢灿飞, 孙少安. 滇西重力变化的二维图象及其与5级(Ms)以上地震的关系[J]. 大地测量与地球动力学, 1995, 15(3): 9-19)
- [6] Jia Minyu, Zhan Jiehui. The Structure and Ability of the China Seismological Gravity Monitoring System [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2000, 22(4): 360-

- 367 (贾民育, 詹洁晖. 中国地震重力监测体系的结构与能力[J]. 地震学报, 2000, 22(4): 360-367)
- [7] Xu Caijun, Yin Zhi. Progress in Inversion for Tectonic Stress-Strain Fields Using Geodetic Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(10): 1135-1146 (许才军, 尹智. 利用大地测量资料反演构造应力应变场研究进展[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(10): 1135-1146)
- [8] Wu Guohua, Luo Zengxiong, Lai Qun. The Variation Characteristics of Gravity Anomaly in the Earthquake Prediction Test Site in Western Yunnan Before and After the Ms 7.0 Lijiang Earthquake [J]. *Journal of Seismological Research*, 1997, 20(1): 101-107 (吴国华, 罗增雄, 赖群. 丽江 7.0 级地震前后滇西实验场的重力异常变化特征[J]. 地震研究, 1997, 20(1): 101-107)
- [9] Zhu Yiqing, Liu Fang, Li Tieming, et al. Dynamic Variation of the Gravity Field in the Sichuan-Yunnan Region and Its Implication for Seismic Risk [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(11): 4187-4196 (祝意青, 刘芳, 李铁明, 等. 川滇地区重力场动态变化及其强震危险含义[J]. 地球物理学报, 2015, 58(11): 4187-4196)
- [10] Xu Houze. Function of Gravimetry in CMONOC [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2003, 23(3): 1-3 (许厚泽. 重力观测在中国地壳运动观测网络中的作用[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(3): 1-3)
- [11] Li Hui, Shen Chongyang, Sun Shaoan, et al. Dynamic Gravity Change in Recent Years in China Continent [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, 29(3): 1-10 (李辉, 申重阳, 孙少安, 等. 中国大陆近期重力场动态变化图像[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(3): 1-10)
- [12] Li Hui, Xu Rugang, Shen Chongyang, et al. Fractal Characteristics of Seismological Dynamic Gravity Network in Northern China [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 30(5): 15-18 (李辉, 徐如刚, 申重阳, 等. 大华北地震动态重力监测网分形特征研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(5): 15-18)
- [13] Shen Chongyang, Zhu Yiqing, Hu Minzhang, 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 (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)
- [14] Sun Shaoan, Kang Kaixuan, Huang Bangwu. Thinking on Datum of Regional Gravity Field Variation [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(1): 17-20 (孙少安, 康开轩, 黄邦武. 关于区域重力场变化基准的思考[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(1): 17-20)
- [15] Chen Zhaohui, Zhang Shuangxi, Liu Jinzhao, et al. Comprehensive Analysis and Research of Classic Adjustment and Quasi-Stable Adjustment in Mobile Gravity Network [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(11): 1693-1702 (陈兆辉, 张双喜, 刘金钊, 等. 地震重力网经典平差与拟稳平差综合分析与研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(11): 1693-1702)
- [16] Wei Shouchun, Zhu Yiqing, Liang Weifeng, et al. Impact on Gravity Data Analysis of Network Structure [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(10): 1063-1067 (魏寿春, 祝意青, 梁伟峰, 等. 网形结构对重力数据分析结果的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(10): 1063-1067)
- [17] 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, 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)
- [18] Liu Shaofu, Liu Dongzhi, Li Hui. Adjustment of High Precision Gravity Measurements and Its Software [J]. *Earthquake*, 1991, 11(4): 57-66 (刘绍府, 刘冬至, 李辉. 高精度重力测量平差及其软件[J]. 地震, 1991, 11(4): 57-66)
- [19] Liu Shaofu, Li Hui, Liu Dongzhi. Correlative Problem of Measurement Adjustment of Lcr Gravimeter [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 1990, 10(2): 67-73 (刘绍府, 李辉, 刘冬至. 拉科斯特重力仪测量平差中的相关问题[J]. 大地测量与地球动力学, 1990, 10(2): 67-73)
- [20] Yang Yuanxi, Guo Chunxi, Liu Nian, et al. Datum and Quality Control for Synthetic Adjustment of Absolute and Relative Gravity Networks [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2001, 10(2): 11-14 (杨元喜, 郭春喜, 刘念, 等. 绝对重力与相对重力混合平差的基准及质量控制[J]. 测绘工程, 2001, 10(2): 11-14)
- [21] Liang Weifeng, Liu Fang, Zhu Yiqing, et al. Research on the Effect of one Degree Term of Chromatic Polynomial of Gravimeter on Gravity Dynamic Change [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2015, 35(5): 882-886 (梁伟峰, 刘芳, 祝意青, 等. 重力仪一次项系数对重力场动态变化的影响研

- 究[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(5): 882-886)
- [22] Hao Hongtao, Li Hui, Sun Heping, et al. Application of Zero Drift Correct and Detection of Scale Parameters of CG-5 Gravimeter[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(9): 1265-1271 (郝洪涛, 李辉, 孙和平, 等. CG-5重力仪零漂改正及格值系数检测应用研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(9): 1265-1271)
- [23] Chen S, Zhuang J C, Li X Y, et al. Bayesian Approach for Network Adjustment for Gravity Survey Campaign: Methodology and Model Test[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(5): 681-700
- [24] Zhu Yiqing, Liang Weifeng, Zhan Feibing, et al. Study on Dynamic Change of Gravity Field in China's Mainland[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(3): 804-813 (祝意青, 梁伟峰, 湛飞并, 等. 中国大陆重力场动态变化研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(3): 804-813)
- [25] Zhu Yiqing, Fu Guangyu, Liang Weifeng, et al. Spatial-Temporal Gravity Changes Before the Ludian Ms 6.5, Lushan Ms 7.0 and Wenchuan Ms 8.0 Earthquakes [J]. *Seismology and Geology*, 2015, 37(1): 319-330 (祝意青, 付广裕, 梁伟峰, 等. 鲁甸Ms 6.5、芦山Ms 7.0、汶川Ms 8.0地震前区域重力场时变[J]. 地震地质, 2015, 37(1): 319-330)
- [26] Zhu Yiqing, Li Tieming, Hao Ming, et al. Gravity Changes Before the Menyuan, Qinghai Ms 6.4 Earthquake of 2016[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(10): 3744-3752 (祝意青, 李铁明, 郝明, 等. 2016年青海门源Ms 6.4地震前重力变化[J]. 地球物理学报, 2016, 59(10): 3744-3752)
- [27] Zhu Yiqing, Liang Weifeng, Zhao Yunfeng, et al. Gravity Changes Before the Jiuzhaigou, Sichuan, Ms 7.0 Earthquake of 2017[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(10): 4124-4131 (祝意青, 梁伟峰, 赵云峰, 等. 2017年四川九寨沟Ms 7.0地震前区域重力场变化[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 4124-4131)
- [28] Wu Guohua, Luo Zengxiong, Lai Qun, et al. Gravity Variation in the Western Yunnan Earthquake Prediction Test Site (Wyepts) Before the Ms 7.3 Earthquake Occurrence on the Border Between China and Myanmar to the West of Menglian, Yunnan Province [J]. *Earthquake*, 1998, 18(2): 146-154 (吴国华, 罗增雄, 赖群, 等. 云南孟连中缅边境Ms 7.3地震前滇西实验场的重力变化[J]. 地震, 1998, 18(2): 146-154)
- [29] Zhu Yiqing, Liang Weifeng, Xu Yunma. Medium-Term Prediction of Ms 8.0 Earthquake in Wenchuan, Sichuan by Mobile Gravity [J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2008, 38(7): 36-39 (祝意青, 梁伟峰, 徐云马. 重力资料对2008年汶川Ms 8.0地震的中期预测[J]. 国际地震动态, 2008, 38(7): 36-39)
- [30] Zhu Y, Zhan F B, Zhou J, et al. Gravity Measurements and Their Variations Before the 2008 Wenchuan Earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010, 100(5B): 2815-2824
- [31] Zhu Yiqing, Xu Yunma, Liang Weifeng. Medium-Term Prediction of Yutian, Xinjiang Ms 7.3 Earthquake in 2008[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2008, 28(5): 13-15 (祝意青, 徐云马, 梁伟峰. 2008年新疆于田Ms 7.3地震的中期预测[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(5): 13-15)
- [32] Hu Minzhang, Hao Hongtao, Han Yufei, et al. Gravity Flexural Isostasy Background of the 2021 Madoi (Qinghai) Ms 7.4 Earthquake and Gravity Change Before the Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(9): 3135-3149 (胡敏章, 郝洪涛, 韩宇飞, 等. 2021年青海玛多Ms 7.4地震的重力挠曲均衡背景与震前重力变化[J]. 地球物理学报, 2021, 64(9): 3135-3149)
- [33] Zhu Yiqing, Wen Xueze, Sun Heping, et al. Gravity Changes Before the Lushan, Sichuan, Ms=7.0 Earthquake of 2013 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(6): 1887-1894 (祝意青, 闻学泽, 孙和平, 等. 2013年四川芦山Ms 7.0地震前的重力变化[J]. 地球物理学报, 2013, 56(6): 1887-1894)
- [34] Zhu Yiqing, Zhao Yunfeng, Li Tieming, et al. Dynamic Variation of Gravity Field Before and After the Minxian-Zhangxian Ms 6.6 Earthquake on July 22, 2013, Gansu, China[J]. *Seismology and Geology*, 2014, 36(3): 667-676 (祝意青, 赵云峰, 李铁明, 等. 2013年甘肃岷县漳县6.6级地震前后重力场动态变化[J]. 地震地质, 2014, 36(3): 667-676)
- [35] Zhu Yiqing, Zhang Yong, Zhang Guoqing, et al. Gravity Variations Preceding the Large Earthquakes in the Qinghai-Tibet Plateau from 21st Century [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(7): 622-632 (祝意青, 张勇, 张国庆, 等. 21世纪以来青藏高原大震前重力变化[J]. 科学通报, 2020, 65(7): 622-632)
- [36] Shen Chongyang, Tan Hongbo, Hao Hongtao, et al. Mechanism of Precursory Gravity Change Before Yaoan Ms 6.0 Earthquake in 2009 [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(2): 17-22 (申重阳, 谈洪波, 郝洪涛, 等. 2009年姚安Ms 6.0地震重力场前兆变化机理[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(2): 17-22)

- [37] Shen Chongyang, Xing Lelin, Tan Hongbo, et al. The Absolute Gravity Change in the Eastern Margin of the Qinghai-Tibetan Plateau Before and After Yushu Ms 7.1 Earthquake in 2010 [J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(6): 2348-2357 (申重阳, 邢乐林, 谈洪波, 等. 2010玉树Ms 7.1地震前后青藏高原东缘绝对重力变化[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(6): 2348-2357)
- [38] Jiang Zaisen, Zhu Yiqing, Wang Qingliang, et al. On Fault Deformation and Geodynamic Characteristics During Seismogenic Progress of Yongdeng Mw 5.8 Earthquake [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1998, 20(3): 262-271 (江在森, 祝意青, 王庆良, 等. 永登5.8级地震孕育发生过程中的断层形变与重力场动态图象特征[J]. 地震学报, 1998, 20(3): 262-271)
- [39] Zhu Yiqing, Chen Bing, Zhang Xi, et al. Gravity Variation Research Before and After Jingtai Ms=5.9 Earthquake [J]. *Earthquake Research in China*, 2001, 17(4): 356-363 (祝意青, 陈兵, 张希, 等. 景泰5.9级地震前后的重力变化研究[J]. 中国地震, 2001, 17(4): 356-363)
- [40] Fu G Y, Gao S H, Freymueller J T, et al. Bouguer Gravity Anomaly and Isostasy at Western Sichuan Basin Revealed by New Gravity Surveys [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(4): 3925-3938
- [41] Hu Minzhang, Hao Hongtao, Li Hui, et al. Quantitative Analysis of Gravity Changes for Earthquake Prediction [J]. *Earthquake Research in China*, 2019, 35(3): 417-430 (胡敏章, 郝洪涛, 李辉, 等. 地震分析预报的重力变化异常指标分析[J]. 中国地震, 2019, 35(3): 417-430)
- [42] Ma Jin. On “Whether Earthquake Precursors Help for Prediction do Exist” [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(S1): 409-414 (马瑾. 从“是否存在有助于预报的地震先兆”说起[J]. 科学通报, 2016, 61(S1): 409-414)

## Mobile Gravity Monitoring and Earthquake Prediction in China

ZHU Yiqing<sup>1</sup> LIU Fang<sup>1</sup> ZHANG Guoqing<sup>1</sup> ZHAO Yunfeng<sup>1</sup> WEI Shouchun<sup>1</sup>

1 The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, China

**Abstract:** This paper mainly introduces the layout of mobile gravity monitoring network in China, and the gravity measurement data processing and extraction method of gravity precursor information. Mobile gravity monitoring results can reflect the image of dynamic evolution of regional gravity field and its tectonic activity characteristic. Based on a large number of observation data, the relationship between gravity variation and earthquake preparation is studied, and the ideas, ways and methods of earthquake prediction research are explored. The mid-term earthquake risk prediction research is carried out by using gravity observation data, and its results are used for earthquake consultation and annual earthquake trend prediction in time, which provide bases for the prediction of strong earthquakes and the delineation of annual dangerous areas in China. This paper points out the existing problems in mobile gravity monitoring in China, and puts forward the idea and thinking of using time-varying gravity monitoring data to promote seismic prediction research.

**Key words:** mobile gravity; data processing; gravity variation; tectonic activity; earthquake prediction

**First author:** ZHU Yiqing, PhD, professor, specializes in gravity and geodynamics and earthquake prediction. E-mail: zhuyiqing@163.com  
**Corresponding author:** LIU Fang, PhD, senior engineer. E-mail: liu\_fang1213@sohu.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (U1939205, 41874092, 41904082).

**引文格式:** ZHU Yiqing, LIU Fang, ZHANG Guoqing, et al. Mobile Gravity Monitoring and Earthquake Prediction in China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 820-829. DOI: 10.13203/j.whugis20220127 (祝意青, 刘芳, 张国庆, 等. 中国流动重力监测与地震预测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(6): 820-829. DOI: 10.13203/j.whugis20220127)