

祝意青,申重阳,刘芳,等,2020. 重力观测地震预测应用研究. 中国地震,36(4):708~717.

重力观测地震预测应用研究

祝意青¹⁾ 申重阳²⁾ 刘芳¹⁾ 徐云马¹⁾
李辉²⁾ 郭树松¹⁾ 赵云峰¹⁾

1) 中国地震局第二监测中心, 西安 710054

2) 中国地震局地震研究所, 武汉 430071

摘要 通过强震震例阐述了重力观测在地震预测中的作用,分析了强震震间期与同震及震后重力场变化特征、区域重力场变化及其与强震活动的关系。强震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的重力变化梯度带;强震一般发生在重力变化高梯度带转弯附近或重力变化四象限分布特征中心附近;重力场动态变化图像能够较清晰地反映强震孕育、发展、调整过程的重力变化信息,并基于震例提出了强震震前重力变化的“场-源-带”基本模式。最后,提出我国重力监测预报发展中仍存在的问题,并对利用重力监测资料开展地震预测预报研究进行了展望。

关键词: 重力观测 重力变化 构造活动 地震前兆 地震预测

[文章编号] 1001-4683(2020)04-0708-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地球重力场作为地球最基本的物理场之一,是地球内部、地表及外部空间物质分布与地球本身旋转运动信息的综合反映。地球表面测定的重力场包含着测量位置、地球内部物质分布以及固体潮随时间变化等信息。

为探索重力场时间变化与地震的关系,自1966年邢台地震后,中国开始了流动重力观测和区域重力场随时间变化的监测预报研究。其中,20世纪70年代是重力测量的重要历史阶段,主要是观测到1975年海城7.3级、1976年唐山7.8级等几次大震前的重力变化,佐证了震前重力异常变化的存在(卢造勋等,1978;陈运泰等,1980;李瑞浩等,1997)。以往的流动重力测网基本是以各省、市、自治区的属地为单元自成体系,彼此独立,布设在活动断裂带及其周围。这种分散的地震重力监测网有的成条状,有的成网状,平均范围不超过300km×300km,观测信息的空间密度严重不足,不能很好地捕捉到强震孕育发生过程中的完整前兆信息(祝意青等,2008b)。1998年,国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”的实施,首次建立了由400个测点、25个绝对点组成的覆盖中国大陆的重力场变化监测网络。2008年汶川8.0

[收稿日期] 2020-06-12; [修定日期] 2020-09-07

[项目类别] 国家自然科学基金(41874092、41674018、61627824)、国家重点研发计划项目(2018YFC1503305)共同资助

[作者简介] 祝意青,男,1962年生,研究员,主要从事重力学、地球动力学及地震监测预报研究。

E-mail: zhuyiqing@163.com

级地震后,中国地震局系统总结了地球重力场观测的优势和局限性,认识到有必要将区域重力测网连接成整体,并统一观测基准,按照“全国成场、区域成网”的思路,统筹现有的常规流动重力测量任务,将以往分散的区域重力网连接在一起。2010年,随着国家重大科技基础设施项目“中国大陆构造环境监测网络”的建设实施和“中国大陆地球物理场综合观测”等项目的建设,实现了覆盖整个中国大陆、包括101个绝对重力点、约4000个相对重力联测点和80个连续重力台站的中国地震重力监测网(祝意青等,2018),为中国大陆成场分布的地表重力场监测预报工作奠定了重要基础,并取得了卓有成效的成果,该监测网观测到了2008年汶川8.0级、2013年芦山7.0级、2017年九寨沟7.0级等大震前后的重力变化(李辉等,2009;申重阳等,2009;祝意青等,2008a、2013、2017)。一些学者通过地面重力异常变化数据,结合特定区域的地震地质资料,对一些大地震进行了准确的年度中期预测(祝意青等,2008a、2013、2015、2017;申重阳等,2012;张国庆等,2018)。

1 强震孕育、发展、调整过程的重力变化特征

重力场随时间变化与地震的孕育发生有着内在密切联系。已有的研究成果表明,重力场动态变化能较好地反映强震孕育、发展、调整过程的重力变化特征,特别是对于6级以上地震的孕育发生过程,重力异常变化较为明显,是可靠的前兆物理参数之一(顾功叙等,1997;李辉等,2009;Shen et al, 2012; Kuo et al, 1999; Zhu et al, 2010、2012、2018; Fu et al, 2014; Chen et al, 2016)。

1.1 地球重力场变化的描述模型和方法

地球内部最基本的物理运动分为地球内部介质的变形运动(位移、速度、加速度变化等)和介质本身的物质运动(密度变化),其地表约束量可利用大地测量手段从地表附近直接或间接测定。大量研究表明,形变与密度变化关系密切。本文主要介绍陈运泰等(1980)提出的重力变化理论及申重阳等(2007)提出的形变与密度变化的耦合运动理论。

陈运泰等(1980)提出的重力变化理论是在Walsh(1975)、Reilly等(1976)研究的基础上发展提出的。Walsh(1975)首次分析了由于形变引起的局部重力变化,通过假定介质为具有相同密度的均匀体且形变足够小,导出了参考点空间固定条件下变形-重力变化的积分表达式。随后,Reilly等(1976)研究发现,Walsh导出的变形-重力变化理论关系式存在错误,他们在此基础上给出了修正的形变-重力变化理论关系式,但给出的仍是忽略了形变区下表面变化引起的重力变化。为解释1975年海城7.5级地震和1976年唐山7.8级地震的震前重力变化机理,陈运泰等(1980)在Reilly等(1976)研究工作的基础上,利用局部区域泊松方程,进一步导出了连续变形体 V (内部含有空穴)引起的地表观测点重力变化的一般理论关系式(考虑地面变形和高程变化)。

陈运泰等(1980)给出的一般公式,即位于地表的某一固定点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 由于形变体的形变而产生的重力变化为

$$\delta g = -G \iiint_V \frac{z \nabla \cdot (\rho \vec{u})}{R^3} dV + G \iint_S \frac{z \rho \vec{u} \cdot \vec{n}}{R^3} dS - 2\pi G \left(\frac{4}{3} \rho_E - \rho \right) h \quad (1)$$

其中, δg 为地表重力变化, G 为万有引力常数, R 为变形点源 Q 至地表观测点 P 的距离, z 为变形点深度, ρ 为介质密度, \vec{u} 为变形点位移矢量, S 为连续变形体的外表面。 \vec{n} 为外表面的法

线矢量, ρ_E 为地球平均密度 (5.517g/cm^3), h 为地表观测点因变形引起的高程变化。

式(1)中,等式右边第一项的物理含义可以理解为形变区内介质因形变引起的密度变化重力效应,第二项为从形变区 V 的里侧流到形变区外部的物质质量所引起的重力效应,第三项为形变产生的高程变化所引起的重力效应。

上述理解在形变区介质密度 ρ 为均匀的情况下是成立的,但是,若形变区 V 内的介质密度为不均匀分布,则式(1)右端第一项完全表达式应为

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = \rho \nabla \cdot \vec{u} + \vec{u} \cdot \text{grad} \rho = \rho \theta + \vec{u} \cdot \text{grad} \rho \quad (2)$$

其中, $\theta = \nabla \cdot \vec{u}$ 为积分区域内任一点的体应变, $\text{grad} \rho$ 为形变区域内的密度梯度矢量。

由式(2)可以看出,在介质密度不均匀的情况下,除式(1)右端的第二、第三项之外,地壳变形引起的地表重力变化还包括式(2)右端项的体应变变化(密度变化)影响和密度梯度带的位移变化影响。由于构造运动和重力分异等作用的长期影响,地球介质的密度分布是非常不均匀的,其不均匀性不仅表现在莫霍面、康德拉斯面等水平密度界面(梯度带)的存在,还表现在构造边界带等一系列横向密度界面(密度梯度带)的大量存在。

申重阳(2005)、申重阳等(2007)将陈运泰等(1980)研究成果推广到一般时空域,认为地壳形变和密度变化是地壳运动的2种最基本形式。从实际地壳运动来说,地壳及其内部一定地质构造体,在地壳外部动力和物质交换的不断作用下,地壳内部产生变形,促使地壳内部物质发生调整和改变(密度变化),同时地壳内部密度的变化又促使地壳内部形变的调整和改变,两者互为耦合,相互作用,使地壳处于不断变化的过程中。形变与密度变化的耦合运动理论(申重阳等,2007),其独到之处在于可依据耦合模式分离变形与密度变化的转换关系,有利于形变与重力数据的统一反演解算;给出的地表观测点重力变化不以静态高程变化做校正,而是以地表重力变化与形变变化测定的时空结构来精确测定。

1.2 典型强震震间期与同震及震后重力场变化特征

2008年汶川地震前,祝意青等(2008a、2008c)曾利用流动重力观测资料,对2008年四川汶川8.0级和新疆于田7.3级地震进行了准确的中期预测,尤其是大震地点的判定。近年来,中国地震局重力观测技术管理部系统深入地开展了强震孕育发生过程中的重力场变化特征、重力场时变与强震活动关系研究等,总结了强震震间期与同震及震后重力场变化特征(李辉等,2009;申重阳等,2009、2011;祝意青等,2009、2012、2013、2014a、2014b、2017),主要认识如下。

1.2.1 强震震间期重力场变化特征

(1)判断重力场变化是正常态还是异常态时,需仔细分析区域重力场的动态演变过程,不仅要观察重力场变化图像反映的非均匀程度,还要注意到重力场变化与布格重力和均衡重力背景场的关系。

(2)强震易发生在与块体边界构造活动有关联的重力变化正、负异常区过渡的高梯度带上,即重力变化等值线的拐弯部位附近或重力变化四象限中心附近,构造活动断裂带由于其差异运动强烈导致构造变形非连续性最强,有利于应力的积累而孕育地震。

(3)强震前,重力场出现较大范围的区域性重力异常,并在震中附近形成一定范围和幅度的与地震孕育发生有关的局部重力异常区。

(4)地震震级与重力异常变化的持续时间、幅值及范围密切相关。一般来讲,重力变化

异常持续的时间越长,异常变化量级和异常范围越大,其对应的震级越大。分析重力异常变化,不仅要看短期(相邻2期或1年尺度)变化,也要分析长期(多年尺度)累积变化。5级地震短期重力变化较为显著,累积变化没有增强;6级以上地震短期重力变化显著,2年尺度以上的累积变化更为显著(祝意青等,2008b、2018)。

1.2.2 同震及震后重力场变化特征

当某地发生地震后,该地区是否还有更大地震或强震发生,是人们极为关注的问题。重力观测技术管理部在大量同震及震后重力变化研究的基础上,总结出同震及震后效应、震后调整、继承性新异常和新异常4种同震及震后的重力场变化特征(祝意青等,2010、2016)。

(1)同震及震后效应特征:当某地一个地震发生后,区域重力场变化平缓或减弱,震中附近出现反向恢复变化,表明近期内震源区及其附近不会有更大地震或强震发生。

(2)震后调整变化特征:地震发生后,区域重力场总体变化与背景场反向,这种过程是震后恢复调整变化的过程。在这种变化过程中,某些局部地区可能会出现重力异常,但这种异常为“安全”的异常,不是新的地震前兆表现。

(3)继承性新异常特征:地震发生后,区域重力场总体变化仍朝同方向持续发展,并产生新的局部重力异常区,表明测区内仍存在强震发生的可能。

(4)新异常:当某地一个强震发生后,会引起地下应力的重新排列或分布,导致附近或相邻断裂(段)应变积累的非线性加速,从而可能触发与构造活动有关的、具有新的重力异常变化背景地区的潜在强震提前发生。

2 重力场资料应用于强震危险区预测

2.1 区域重力场动态图像演化特征与规律

区域重力场处于动态变化之中,不同时空尺度的重力场变化极其复杂。重力观测技术管理部在重力网整体优化布局、重力网整体平差计算技术的基础上,建立了多时空尺度的区域重力场(不同时间、空间尺度),分析研究多时空尺度的区域重力场动态图像演化特征与规律(李辉等,2009;申重阳等,2009、2011、2012;祝意青等,2009、2012、2013、2018),主要认识如下。

(1)区域重力场处于动态变化之中,不同时空尺度的重力场动态图像是不一样的。大区域空间尺度的重力变化能较好地判定构造活动的主体地区,时空密度高的重点监视区重力观测资料能清晰地反映出震中位置附近构造活动引起的局部重力异常。能否准确判定强震发震地点与重力观测的时空密度有关。

(2)重力场在不同时段空间分布表现出明显的差异性。无显著变化时段,空间分布比较零散,没有规律性。在显著变化时段,重力场空间分布则呈现有序的趋势性变化和相对集中的局部重力异常。

(3)重力场变化与活动构造断裂密切相关,重力场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,活动构造断裂或者块体的边缘附近往往易出现重力等值线形态的转折和密集,形成高梯度带。

(4)重力变化沿构造活动块体具有分区变化格局。一般表现为盆地地区重力正值变化,山地地区重力负值变化。



2.2 重力异常变化在地震预测中的应用

通过大量强震震例的分析与总结,李辉等(2009)、祝意青等(2009、2012)、申重阳等(2009、2011)研究提出了利用多时空尺度重力场变化(相邻两期重力变化、累积重力变化等),根据重力场变化趋势(重力场变化与背景场关系等)、重力异常的持续时间、幅度、范围及重力异常变化梯度特征等进行强震危险性预测方法,在我国西部的强震预测中取得了一定实效,对2008年汶川8.0级和于田7.3级、2012年新源-和静6.6级、2013年芦山7.0级和岷县漳县6.6级、2014年于田7.3级、2016年门源6.4级和阿克陶6.7级、2017年九寨沟7.0级等强震均进行了准确的年度地震中期预测。利用重力观测资料对中国10多次强震预测方面的情况,如表1所示。

表 1 2008 年以来 6 级以上强震年度预测情况

预测震中	预测震级(M_s)	预测时窗	实际震级(M_s)	实际震中	发震时间 (年-月-日)
36.0°N,80.0°E 附近	6~7 级	2007~2008 年	新疆于田 7.3 级	35.6°N,81.6°E	2008-03-21
31.6°N,103.7°E 附近	6~7 级	2007~2008 年	四川汶川 8.0 级	31.0°N,103.4°E	2008-05-12
25.6°N,100.2°E 附近	6~7 级	2009 年	云南姚安 6.0 级	25.6°N,101.1°E	2009-07-09
43.6°N,84.3°E 附近	6 级以上	2012 年	新疆新源 6.6 级	43.4°N,84.8°E	2012-06-30
30.2°N,102.2°E 附近	6 级左右	2013 年	四川芦山 7.0 级	30.3°N,103.0°E	2013-04-20
35.5°N,105.2°E 附近	6~7 级	2011~2013 年	甘肃岷县 6.6 级	34.5°N,104.2°E	2013-07-22
35.6°N,81.6°E 附近	7 级左右	2014 年	新疆于田 7.3 级	36.1°N,82.5°E	2014-02-12
28.8°N,102.1°E 附近	7 级左右	2014 年	云南鲁甸 6.5 级	27.1°N,103.3°E	2014-08-03
			四川康定 6.3 级	30.3°N,101.7°E	2014-11-22
37.5°N,02.2°E 附近	6 级左右	2016 年	青海门源 6.4 级	37.68°N,101.62°E	2016-01-21
39.3°N,75.7°E 附近	6~7 级	2016 年	新疆阿克陶 6.7 级	39.27°N,74.04°E	2016-11-25
43.5°N,85.5°E 附近	6 级左右	2016 年	新疆呼图壁 6.2 级	43.83°N,86.35°E	2016-12-08
34.7°N,101.9°E 附近	6~7 级	2016~2017 年	四川九寨沟 7.0 级	33.20°N,103.82°E	2017-08-08

自2007年以来,中国地震局重力学科利用中国大陆地壳运动观测网络重力资料 and 全国重点危险区的地震重力观测资料开展中国大陆地震预测,流动重力的预报准确率达40%以上。2008年以来中国大陆发生了6次7级以上大震,流动重力均出现明显的异常变化。我们曾利用流动重力复测资料,对2008年汶川和于田、2013年芦山、2014年于田、2017九寨沟5次大震进行了较准确的年度预测,对2010年玉树地震进行了中长期危险性判定。特别是对汶川与芦山地震的中期预测(图1、2),2次地震均发生在预测的龙门山断裂带上(祝意青等,2020)。

总体来说,强震或大震发生之前,地面重力观测资料能不同程度地反映出强震孕育发生过程中的重力异常变化。通过对重力观测资料多年的地震预测效果检验,认为对地面重力观测资料进行认真、深入细致地分析与研究,有可能对未来强震或大震做出准确的中期预测,尤其是发震地点的判定。

3 基于强震震例得到的震前重力变化基本模式

基于大量强震震例得到的震前重力变化表明,强震前区域重力场出现大范围的有序性

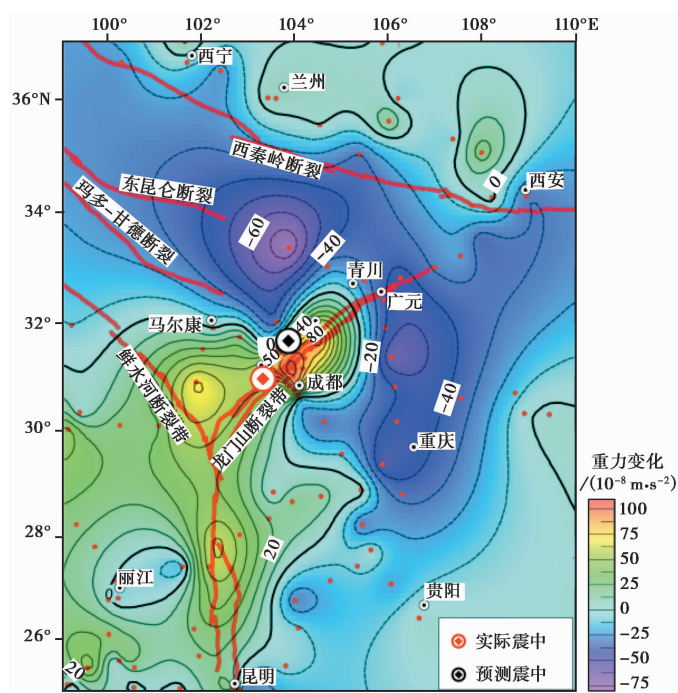


图 1 汶川 8.0 级地震前重力场变化(1998~2005 年)

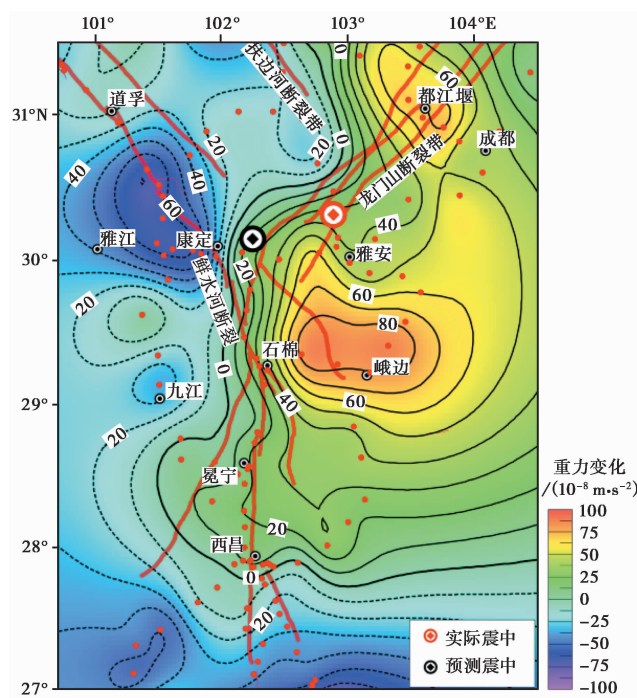


图 2 芦山 7.0 级地震前重力场变化(2010~2012 年)

变化(场兆),震源区产生与地震孕育发生有关的局部重力异常区(源兆),并沿发震构造活动断裂带出现重力变化高梯度带或四象限分布变化特征,地震发生在重力变化高梯度带上(李辉等,2009;申重阳等,2009、2011;祝意青等,2009、2012、2013、2014b、2017、2020)。由此,得到震前重力场变化的“场-源-带”基本模式。

3.1 强震发生在重力场变化高梯度带转弯附近

(1)强震前区域重力场出现大范围的有序性变化,这可能是强震前区域应力场增强引起深部物质运移与变迁产生的区域性重力异常,是“场兆”变化引起的。如2008年汶川8.0级地震前,自川西高原向川滇地块出现了由负向正的空间大尺度范围内的有序性变化;2013年芦山7.0级地震前,自川西高原向四川盆地出现了由负向正的有序性变化;2017年九寨沟7.0级地震之前,自川西高原向甘肃陇南地区出现了由负向正的有序性变化(祝意青等,2008a、2013、2017)。

(2)强震前震源区附近产生了与地震孕育发生有关的局部重力异常区,这可能是深部孕震环境变化的信息,是“源兆”变化引起的。如汶川地震前,在震中东部,沿汶川-北川-成都环绕龙门山断裂带,产生了 $80\times 10^{-8}\text{m/s}^2$ 的重力高值变化异常区;芦山地震前,在震中南部的汉源-峨边地区产生了 $80\times 10^{-8}\text{m/s}^2$ 的重力高值变化异常区;九寨沟地震前,在震源区附近产生了 $-60\times 10^{-8}\text{m/s}^2$ 的低值变化异常区(祝意青等,2008a、2013、2017)。

(3)强震一般发生在与构造活动断裂走向基本一致的重力变化高梯度带上,尤其是梯度带变化的转弯处附近,是由“构造”活动引起的。如汶川8.0级地震发生在龙门山断裂带高值异常区的重力变化梯度带上;芦山7.0级地震发生在沿龙门山断裂带走向的重力变化高梯度带向沿抚边河断裂带走向的重力变化高梯度带的转弯部位;九寨沟7.0级地震发生在重力变化高梯度带与东昆仑断裂东段的塔藏断裂和岷江断裂交汇处附近(祝意青等,2008a、2013、2017)。

3.2 强震发生在重力场变化四象限分布特征中心附近

强震前,首先是区域重力场出现大范围的有序性变化及沿主要构造断裂出现重力变化高梯度带,随后沿发震构造断裂出现四象限分布特征,强震发生在重力场变化四象限分布特征中心附近。这可能是由于强震前区域应力场增强引起深部物质运移与变迁产生的区域性重力异常,并沿块体边界断裂出现显著重力变化梯度带,是“场兆”变化和“孕震构造”活动引起的;临震前沿发震构造断裂出现四象限分布特征,是“源兆”变化与“发震构造”活动引起的。

2016年1月门源 $M_s6.4$ 地震前,2011年5月~2014年5月期间测区内先出现了较大空间范围的区域性重力异常,沿祁连山断裂带出现了延伸长、变幅大的重力变化高梯度带;至临近发震前的2014年5月~2015年5月期间,区域重力变化相对上期明显减弱,围绕震中区的祁连山发震构造断裂带呈现出四象限分布特征的重力异常变化(祝意青等,2016)。

2016年12月呼图壁 $M_s6.2$ 地震前,2014年5月~2015年5月期间测区重力变化总体趋势为自南向北出现由负向正逐渐增加的趋势性变化,沿发震构造的准格尔南缘断裂出现重力变化高梯度带;临震前的2015年5月~2016年5月期间,区域重力变化相对上期明显减弱,且围绕震中区的准格尔南缘断裂形成了一个明显的重力变化梯度带及四象限分布特征(隗寿春等,2020)。

4 问题与展望

4.1 存在的问题

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。目前,中国的地震重力网由绝对重力测量控制网、连续重力观测网和相对重力联测网组成。该网已在地震监测预报,特别是中期预报中发挥了重要作用,对于 21 世纪以来青藏高原地区发生的多次大震,我们不仅观测到了区域重力场的时间变化,而且还做了准确的中期预测(江在森等,2003;李辉等,2009;祝意青等,2020)。

近年来,虽然地面重力观测数据在地震中期地震危险性分析中发挥了重要作用,但在台网布局、观测技术、地震科学认识等方面距离防震减灾现代化的要求仍有较大差距,主要存在以下问题:

(1)地面重力测量使用的绝对重力仪器装备严重不足,地面重力监测网绝对重力控制较弱,尤其是我国的青藏高原地区,存在大量的监测空白区。并且,绝对重力与相对重力未进行准同步观测,不能有效地消除相对重力仪器标定系统引起的测量误差,从而无法提取可靠的绝对重力变化信息。

(2)以超导重力仪为代表的微漂移、高稳定性仪器装备数量缺乏。连续重力站网台站数量少、空间分辨率低,仪器的零漂较大,缺乏足够标定,不足以实现对块体边界带等重点地区的监测。

(3)在震前重力场变化机理解释方面,虽然先后提出过质量迁移、密度变化等模式,在深入理解重力场变化的物理机制等方面取得了一定的进展,但目前的观测网布局和测量技术制约着其在地震预测方面的应用。

4.2 展望

虽然地震预报是世界公认的科学难题,但探索地震孕育的奥秘是地震工作者的责任与义务。地震是地球构造活动的一种形式,地震的孕育和发生必然伴随有地壳形变、内部质量迁移等过程,引起重力场变化。重力场信号具有一定的深部构造运动反应能力和地表信号的抗干扰能力,可以捕捉强震孕育发生的相关信号。目前,根据地面重力场在时空上的演变特征,并结合当地的地震构造背景,对某些强震前的重力变化进行跟踪,能较好地圈定未来强震可能发生的地点和震级。但目前绝对重力仪偏少,相对重力仪因受弹簧漂移的制约,使地面流动重力观测和定点台站的连续重力观测数据大打折扣。因此,从长远发展来看,应发展高精度绝对测定技术代替流动相对测定技术;发展无漂移或低漂移(超导)式台站连续观测技术代替弹簧式台站连续观测技术;发展空间(尤其是低空、卫星+航空)重力观测技术,弥补地面重力观测技术的不足。未来,随着台网布局的完善、整体重力观测技术的提高,重力观测在地震预测研究中会发挥越来越重要的作用。

致谢:流动重力测量工作人员精心观测获得了高质量资料,江在森研究员为本文的完善提出了中肯建议,匿名审稿专家提出了宝贵意见,在此一并致谢。

参考文献

陈运泰,顾浩鼎,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.

- 顾功叙, Kuo J T, 刘克人, 等, 1997. 中国京津唐张地区时间上连续的重力变化与地震的孕育和发生. 科学通报, **42**(18): 1919~1930.
- 江在森, 张希, 祝意青, 等, 2003. 昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震前区域构造变形背景. 中国科学(D辑), **33**(S1): 163~172.
- 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**(3): 1~10.
- 李瑞浩, 黄建梁, 李辉, 等, 1997. 唐山地震前后区域重力场变化机制. 地震学报, **19**(4): 399~407.
- 卢造勋, 方昌流, 石作亭, 等, 1978. 重力变化与海城地震. 地球物理学报, **21**(1): 1~8.
- 申重阳, 2005. 地壳形变与密度变化耦合运动探析. 大地测量与地球动力学, **25**(3): 7~12.
- 申重阳, 李辉, 2007. 研究现今地壳运动和强震机理的一种方法. 地球物理学进展, **22**(1): 49~56.
- 申重阳, 李辉, 孙少安, 等, 2009. 重力场动态变化与汶川 $M_s 8.0$ 地震孕育过程. 地球物理学报, **52**(10): 2547~2557.
- 申重阳, 谈洪波, 郝洪涛, 等, 2011. 2009年姚安 $M_s 6.0$ 地震重力场前兆变化机理. 大地测量与地球动力学, **31**(2): 17~22, 47.
- 申重阳, 邢乐林, 谈洪波, 等, 2012. 2010玉树 $M_s 7.1$ 地震前后青藏高原东缘绝对重力变化. 地球物理学进展, **27**(6): 2348~2357.
- 瞿寿春, 祝意青, 赵云峰, 等, 2020. 呼图壁 $M_s 6.2$ 地震前后重力变化特征分析. 地震地质, **42**(4): 923~935.
- 张国庆, 祝意青, 梁伟锋, 等, 2018. 2008年和2014年两次于田 $M_s 7.3$ 地震前区域重力变化特征. 地震, **38**(4): 14~21.
- 祝意青, 付广裕, 梁伟锋, 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): 319~330.
- 祝意青, 郭树松, 刘芳, 2010. 攀枝花 6.1、姚安 6.0 级地震前后区域重力场变化. 大地测量与地球动力学, **30**(4): 8~11, 18.
- 祝意青, 李铁明, 郝明, 等, 2016. 2016年青海门源 $M_s 6.4$ 地震前重力变化. 地球物理学报, **59**(10): 3744~3752.
- 祝意青, 梁伟锋, 徐云马, 2008a. 重力资料对2008年汶川 $M_s 8.0$ 地震的中期预测. 国际地震动态, (7): 36~39.
- 祝意青, 梁伟锋, 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, 梁伟锋, 赵云峰, 等, 2017. 2017年四川九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前区域重力场变化. 地球物理学报, **60**(10): 4124~4131.
- 祝意青, 申重阳, 张国庆, 等, 2018. 我国流动重力监测预报发展之再思考. 大地测量与地球动力学, **38**(5): 441~446.
- 祝意青, 王庆良, 徐云马, 2008b. 我国流动重力监测预报发展的思考. 国际地震动态, (9): 19~25.
- 祝意青, 闻学泽, 孙和平, 等, 2013. 2013年四川芦山 $M_s 7.0$ 地震前的重力变化. 地球物理学报, **56**(6): 1887~1894.
- 祝意青, 徐云马, 梁伟锋, 2008c. 2008年新疆于田 $M_s 7.3$ 地震的中期预测. 大地测量与地球动力学, **28**(5): 13~15, 132.
- 祝意青, 徐云马, 吕戈培, 等, 2009. 龙门山断裂带重力变化与汶川 8.0 级地震关系研究. 地球物理学报, **52**(10): 2538~2546.
- 祝意青, 张勇, 张国庆, 等, 2020. 21世纪以来青藏高原大震前重力变化. 科学通报, **65**(7): 622~632.
- 祝意青, 赵云峰, 李铁明, 等, 2014a. 2013年甘肃岷县漳县 6.6 级地震前后重力场动态变化. 地震地质, **36**(3): 667~676.
- 祝意青, 赵云峰, 刘芳, 等, 2014b. 新疆新源、和静交界 6.6 级地震前的重力变化. 大地测量与地球动力学, **34**(1): 4~7.
- Chen S, Liu M, Xing L L, 2016. Gravity increase before the 2015 $M_w 7.8$ Nepal earthquake. Geophys Res Lett, **43**(1): 111~117.
- Fu G Y, Gao S H, Freymueller J T, et al, 2014. Bouguer gravity anomaly and isostasy at western Sichuan Basin revealed by new gravity surveys. J Geophys Res Solid Earth, **119**(4): 3925~3938.
- Kuo J T, Zheng J H, Song S H, et al, 1999. Determination of earthquake epicentroids by inversion of gravity variation data in the BTTZ region, China. Tectonophysics, **312**(2~4): 267~281.
- Reilly W I, Hunt T M, 1976. Comment on 'An analysis of local changes in gravity due to deformation' by J. B. Walsh. Pure Appl Geophys, **114**(6): 1131~1133.
- Shen C Y, Li H, Sun S A, et al, 2012. Temporal gravity changes before the 2008 Yutian $M_s 7.3$ earthquake. Geod Geodyn, **3**(1): 19~26.
- Walsh J B, 1975. An analysis of local changes in gravity due to deformation. Pure Appl Geophys, **113**(1): 97~106.
- Zhu Y Q, Liang W F, Zhang S, 2018. Earthquake precursors: spatial-temporal gravity changes before the great earthquakes in the Sichuan-Yunnan area. J Seismol, **22**(1): 217~227.
- Zhu Y Q, Liu F, Cao J P, et al, 2012. Gravity changes before and after the 2010 $M_s 7.1$ Yushu earthquake. Geod Geodyn, **3**(4): 1~6.

Zhu Y Q, Zhan F B, Zhou J C, et al, 2010. Gravity measurements and their variations before the 2008 Wenchuan earthquake. Bull Seism Soc Am, **100**(5B): 2815~2824.

Application of Earthquake Prediction Based on Gravity Observation

*Zhu Yiqing¹⁾ Shen Chongyang²⁾ Liu Fang¹⁾ Xu Yunma¹⁾ Li Hui²⁾
Guo Shusong¹⁾ Zhao Yunfeng¹⁾*

1) Second Crust Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, China

2) Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, China

Abstract In this paper, we take some examples of strong earthquakes as case studies to discuss the application of gravity observation in earthquake prediction in the period of earthquake preparation, co-seismic and post-seismic stages through study of the variation characteristics of gravity field, regional gravity field and its relationship with strong earthquake activity. Before the strong earthquake, the regional gravity field shows orderly change in a large range. The local gravity anomaly area related to the earthquake preparation is generated near the source area, and a significant gravity change gradient belt appears along the main seismogenic structural fault zone in the area. The strong earthquake generally occurs near the turning of the high gradient belt of gravity field change or the four quadrant distribution characteristic center. The dynamic variation image of gravity field can clearly reflect the information of gravity change in the process of strong earthquake preparation, development and adjustment. Based on the study of earthquake cases, the basic model of “field-source-belt” of gravity change before strong earthquake is put forward. Finally, the problems in the development of gravity monitoring and prediction in China are pointed out, and the prospect of using gravity monitoring data to carry out earthquake prediction and prediction research is discussed.

Keywords: Gravity observation; Gravity change; Tectonic movement; Earthquake precursor; Earthquake prediction