

申重阳, 祝意青, 胡敏章, 等, 2020. 中国大陆重力场时变监测与强震预测. 中国地震, 36(4): 729~743.

中国大陆重力场时变监测与强震预测

申重阳¹⁾ 祝意青²⁾ 胡敏章¹⁾ 谈洪波¹⁾ 郝洪涛¹⁾
韦进¹⁾ 韩宇飞³⁾ 李辉¹⁾ 汪健¹⁾ 张新林¹⁾
刘少明¹⁾ 王嘉沛¹⁾ 孙凯¹⁾

1) 中国地震局地震研究所地震大地测量重点实验室, 武汉 430071

2) 中国地震局第二监测研究中心, 西安 710054

3) 中国地震台网中心, 北京 100045

摘要 主要回顾了中国大陆重力时变高精度监测与地震预测应用的基本情况。自1966年邢台地震以来,我国就开始采用重力手段监测地壳变动和强震孕育发生过程,致力获取重力场时变的微伽级信息。重力监测主要采用定点流动复测(流动重力)和固定台站连续观测(连续重力)2种方式。重力监测已经历3个发展阶段。1998年以前,重力监测主要沿块体边界、活动断层或历史强震区开展,缺乏绝对测量,一般采用相对测量,通过总结获取了海城7.2级、唐山7.8级、丽江7.0级等一系列地震前的重力动态变化特征,除海城地震外,预测成功震例寥寥。1998年地壳运动网络工程建设以来,由于引入高精度绝对重力测量,开始进行中国大陆重力场的整体监测,获取了汶川8.0级地震前的大尺度变化信息,给出了汶川地震中期预测的有效意见。2010年以来,以陆态网络工程重力网为基础,逐步开展大华北、南北带等各种测网的整合与统一,形成了中国大陆整体重力观测网,对期间发生的一系列6.0级以上地震(如芦山7.0级、门源6.4级、呼图壁6.2级等地震)进行了较为成功的中期预测,为地震机理研究和我国中期地震预测水平提升发挥了重要作用。通过长期的重力观测实践,初步形成了一门专门应用于地震研究的交叉学科——“地震重力学”。

关键词: 重力时变 监测网 高精度 地震预测 发展历程

[文章编号] 1001-4683(2020)04-0729-15 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地球重力场是地球最为基本的物理场之一,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应。由于地球内部质量分布不均匀、不恒定,加上地球在天体之间的运动和自身变形等因素,重力场将随着空间、时间发生变化。因此,重力场包含着测量位置、地球内部物质分布以及固体地球随时间变化(重复或连续测定)等信息。地球重力

[收稿日期] 2020-07-13; [修定日期] 2020-08-26

[项目类别] 国家自然科学基金(41674018、41431069)、国家重点研发项目(2017YFC1500204、2018YFE0206100)和中国地震局监测运行(陆态)项目共同资助

[作者简介] 申重阳,男,1963年生,研究员,主要从事地球重力与地壳运动观测研究以及地震机理研究。

E-mail: scy907@163.com

场时间变化的观测是地震监测研究的重要手段之一。

在国际上,重力时间变化观测研究始于 20 世纪 20 年代。20 世纪 50 年代以来,美国、日本、德国及前苏联等国学者开始利用流动重力测量资料研究地震,如阿拉斯加地震(Barnes, 1966)、新潟地震(Fujii, 1966)、松代震群(Nur, 1974)、因南歌华地震(Hunt, 1970)、松下震群(Kisslinger, 1975)等,他们发现地震前后显著重力变化与地表垂直运动并不遵循自由空气改正规律,地震孕育和发生过程伴随着地下物质的迁移变化。

1960 年代邢台地震之后,我国的重力监测工作也逐步开展起来。我国地面重力观测主要分为流动重力观测(相对联测与绝对测量)和连续重力观测(相对测量)两类,流动重力观测精度可达微伽级或 10 微伽级(优于 30 微伽,1 微伽 = $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$),连续重力观测精度可达 0.1~1 微伽级。经过数十年的建设与完善,逐步形成由 86 个连续重力台(秒或分钟采样)、105 个绝对重力点、约 4000 个相对重力点组成的中国地震重力监测网。该网能有效获取我国大陆重力场变化动态信息,满足我国地震短、中、长期预测需求,为地震科研提供基础观测数据,并可用于我国重力基准维持。

连续重力观测是通过固定或定点台站上的连续观测,获得表示定点台站的重力时间变化,其包含潮汐和非潮汐成分,但一般以潮汐观测为主、兼顾非潮汐变化观测。台站观测的重力时间变化是地震预测研究的基础信息,一方面可用于潮汐研究,为重力台网提供精准的潮汐校正参数或潮汐基准,另一方面可为重力台网中流动观测网非潮汐变化提供约束模型。地球的潮汐变形与其介质的物理特性密切相关,是了解地球内部结构、地震活动的重要依据。自 1957 年国际地球物理年开始,在固定台站上观测重力场潮汐变化便在国际上有计划地开展。随着电子技术和低噪声自动记录的高精度重力仪的问世,使得重力仪逐步成为观测固体潮的主要手段,并与倾斜仪、伸缩仪和地震仪等同时使用,形成综合的地球动力学实验室,如卢森堡 Walferdange 地下实验室。国际大地测量与地球物理联合会(IUGG)自 1997 年开始组织实施全球地球动力学计划,从开始的 19 套到目前的 42 套高精度超导重力仪实施连续固体潮观测,开展地球内部运动和物质分布的反演研究(孙和平等,2017)。

回顾我国地震重力监测研究的发展历程,大体可以分为 3 个阶段。第一阶段为 1966~1997 年期间(邢台 7.2 级—丽江 7.0 级地震),可称为局域观测阶段,由于缺乏高精度绝对观测,该阶段以相对观测或测量为主,重力仪均为弹簧式,观测精度逐步提升,对海城 7.2 级、唐山 7.8 级等地震取得了重要科学总结(陈运泰等,1980;李瑞浩等,1997);第二阶段为 1998~2009 年期间(昆仑山口西 8.1 级—汶川 8.0 级地震),可称为中国大陆观测阶段,由于引进高精度绝对观测,相对测量有了控制,对汶川地震做出了中期预测;第三阶段为 2010 年~今(玉树 7.1 级—九寨沟 7.0 级地震),可称为中国大陆整体观测阶段,期间逐步开展大华北、南北带各种测网的整合与统一,形成了一定规模的中国大陆整体重力观测网,对期间发生的一系列 6.0 级以上地震(如芦山 7.0 级、门源 6.4 级、呼图壁 6.2 级地震)进行了较为成功的中期预测,发现了重力变化与地震孕育的一些经验认识。重力监测与预测研究一直遵循“边观测、边预报、边研究”的基本策略。

1 自邢台 7.2 级至丽江 7.0 级地震的中国大陆局域重力观测

1966~1997 年中国大陆重力监测网如图 1 所示。

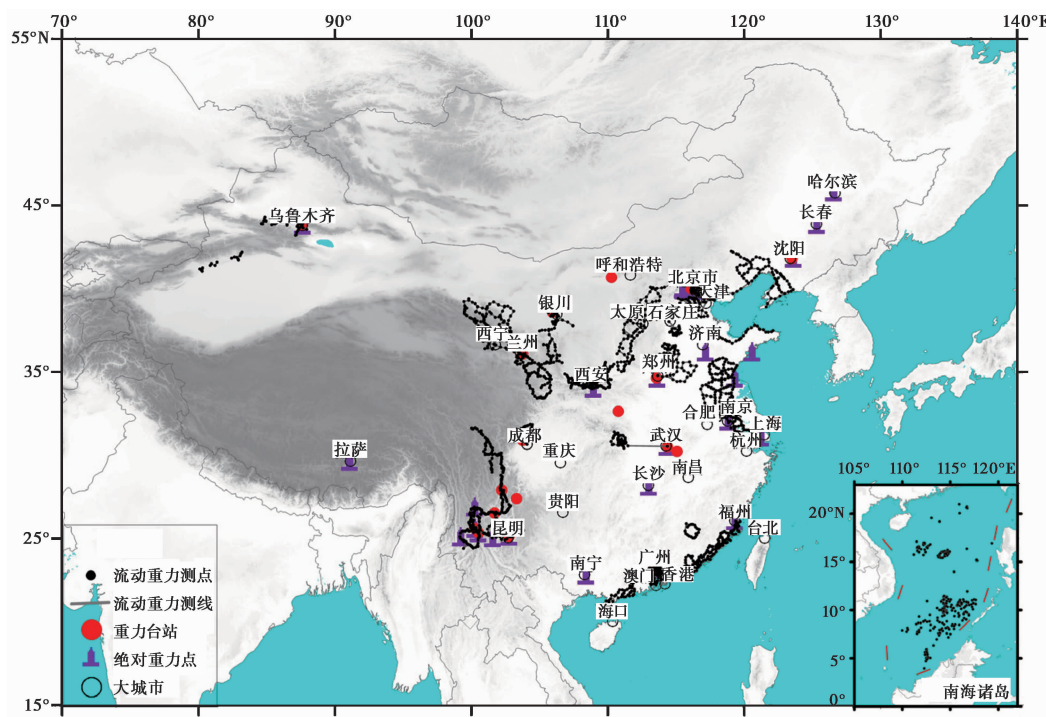


图 1 中国大陆重力局域监测网(1966~1997 年)

1.1 相对重力联测

1966 年邢台地震后,地震部门陆续开展了重力重复观测(流动重力),在全国布置了一批测网或测线,其基本以省级(直辖市、自治区)的属地为单元自成体系,彼此独立,分别设在:①过去曾发生过破坏性地震,现又被划为危险区;②强震频度高的地震带(如南北地震带);③有现代活动断层的地带;④具有重要社会、经济意义地区(如京津唐地区)。首次重力测量为 1966 年末,在宁夏红果子沟地震现场(贺兰山东麓断裂带)设置多个测量标志进行每天复测,时长半个多月,同时开展光电测距、三角测量、基线测量和地面立体摄影测量。截至 1997 年,共有 34 个区域网(平均范围不超过 $300\text{km} \times 300\text{km}$)和 11 条测线,总测点数约 3000 个,平均点距约 26km,每年 1~4 期。1984 年之前,观测仪器主要采用石英弹簧重力仪和 Worden 重力仪(系统误差较大和格值非线性严重);1984 年之后,由于使用引进的 Lacoste & Romberg-G(简称 LCR-G)型金属弹簧重力仪,相对联测精度比石英弹簧重力仪精度提高 1~2 倍,也大大改善了 Worden 重力仪存在的系统误差(重力清理攻关小组,1985)。

经过观测实践,已经积累了许多资料,取得了一些研究成果。在华北、南北地震带和一些构造活动带,通过多年重复测量观测到重力的变化(许厚泽等,1994;贾民育等,2000)。虽然观测信息在空间和时间密度上严重不足,但通过总结仍然得到了一些有意义的、能够反映出孕震相关的部分“前兆”信息。海城地震前,震中西侧盖县-东荒地测段重力变化梯度较大(卢造勋等,1978;陈运泰等,1980),为海城地震短临预报提供了依据;唐山地震前,重力加速演变过程显著(李瑞浩等,1997)。通过总结性研究滇西实验场重力网资料,初步得到了包括丽江 7.0 等地震孕育过程的相关信息(贾民育等,1995;孙少安等,1999;申重阳等,2002、

2003),发现地震往往发生在正、负异常区变换带的零线附近(贾民育等,1995)。我们的研究表明,丽江地震前震中南部部位存在近 SN 向正负变换梯级带(图 2)。

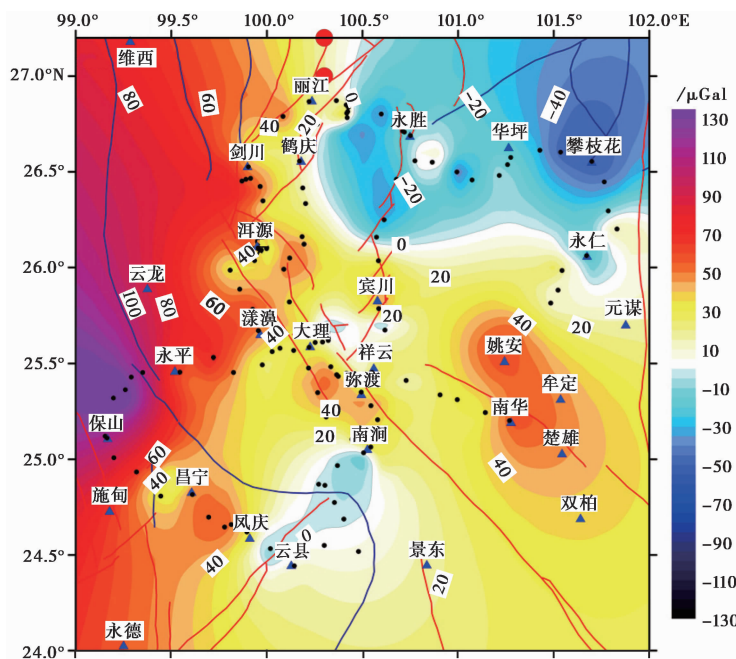


图 2 丽江地震前的典型重力变化(1985 年 4 月~1995 年 4 月)

1.2 连续重力测量(定点相对观测)

我国首个重力固体潮观测站(简称重力站)由中国科学院测量制图研究室于 1959 年在兰州建立(方俊,1984)。1966~1997 年为实验(模拟)测量阶段,地震部门在全国主要构造区和地震带还布设了重力台。1966 年邢台地震至 1970 年,相继建设第一代重力台站(观测始于 1968 年),其中包括湖北武昌、北京北安河、安徽霍山、福建泉州、广东石榴岗等重力站。中国地震局在全国先后共建有 22 个重力台站,主要使用 GS-11、GS-15 型重力仪(15 站)和 DZW 型重力仪(6 站)。

多年观测资料表明,5 级以上大地震前,在重力台站 300km 范围内观测到 50~100 微伽量级的重力变化,重力仪零点漂移偏离背景变化,出现异常的年变化(许厚泽等,1994)。这些变化不是由于仪器、干扰等因素造成的,可能与整个南北地震带构造活动有关。这些观测成果为深入研究其变化原因和机理提供了资料。

1979~1980 年,中国地震局地质研究所使用一台新 GS-15 型重力仪在北京、四川、西藏、云南等地区首先开展重力潮汐系数空间变化的观测,这些观测数据为重力固体潮理论研究提供了基础资料。1979 年中国科学院测量与地球物理研究所、中国地震局地震研究所与比利时皇家天文台合作,用比利时的地球动力学型重力仪(3 台)和 Lacoste & Romberg 重力仪在北京、上海等全国九大城市开展了精密固体潮观测,结果表明模拟固体潮效应的精度达到 0.6 微伽的量级(Melchior 等,1985;许厚泽等,1994)。

1980 年,根据中、美两国开展的科学合作协议,在北京、天津、唐山、张家口地区设置 7 个

固定重力台站和 6 条连接这些台站的重力流动测量线段。由美国提供 TRG-1 型和 LaCoste & Romberg-G 型仪器作定点和流动重复测量,取得一批记录,获得一些中小地震震例成果,并可采用修改的联合膨胀模式(MCDM)解释(顾功叙等,1997)。

在潮汐与地震的关系方面,主要开展固体潮的触发机制问题研究(李瑞浩等,1991)。如松潘 7.2 级地震前半年潮汐因子显著低值,可能与区域介质密度降低或弹性模量变化有关(徐纪人,1983)。

1.3 绝对重力测量

我国早期的绝对重力观测,采用由中国计量院研制的绝对重力仪所测的 12 个点与部分意大利仪器测量结果进行检测,其中 4 个点的偏差分别达 67、70、106、209 微伽(重力清理攻关小组,1985)。

1981~1993 年,我国应用国内外 6 台绝对重力仪,先后在全国 17 个省、市、自治区的 36 个测点上进行了绝对重力观测。参与观测的 6 台绝对重力仪类型为:中国计量科学研究院 NIM-I、NIM-II、意大利 IMGC、德国 JILAG-3、美国 FG5、芬兰 JILAG-5。在国家重力基本网(1985)的一些测点上,其重力值与新测绝对重力值之间存在明显偏差,精度量级为 20~30 微伽(陈益惠等,1996)。

1990~1995 年,中国地震局地震研究所与德国汉诺威大学大地测量研究所合作,使用 JILAG-3 自由落体绝对重力仪,在滇西地震预报实验场(1990、1992、1995)、昆明、武汉(1990)和北京(1990、1992)选定 12 点开展了 27 点次的绝对重力测量,平均精度约 $0.05 \mu\text{m/s}^2$ (贾民育等,1999)。

1995 年年底,中国科学院测量与地球物理研究所率先引进美国生产的 FG5-112 绝对重力仪在我国中西部开展绝对重力测量,精度优于 3 微伽(王勇等,1998)。2004 年,王勇等(2004)比较分析了 1996 年丽江 7.0 级地震前后(1990~1996 年)FG5-212 型和 JILAG 型绝对重力仪的多期观测数据,发现 1995~1996 年的丽江和洱源绝对重力观测结果分别有 -14.8 微伽和 -10.9 微伽的重力变化。

尽管此阶段开展了较多的绝对重力观测,但其主要用于国家基准网(85 网)或国家长短基线,只对极少数区域网(如滇西网)进行了基准控制实验。

2 自昆仑山口西 8.1 级至汶川 8.0 级地震的中国大陆重力监测

1998~2008 年中国大陆重力监测网如图 3 所示。

2.1 流动重力网(相对联测)

1998~2009 年期间流动重力监测可分全国网和区域网(图 3),观测仪器主要采用美国 LCR-G 型重力仪或加拿大 CG5 相对重力仪。

全国网通过中国地壳运动网(2007 年前)或大陆构造环境监测网(2007 年后)、2000 国家基本网、数字化地震观测网(2007 年)等逐步建立,除数字化地震观测网由中国地震局建设运行外,其他均由中国地震局与总参测绘局、中国科学院、国家测绘局等共同建设运行,1~3 年复测 1 次。绝对控制下的相对重力联测共完成 5 期测量(1998、2000、2002、2005、2008 年),1998 年全国网测点 396 个(其中 25 个基准站进行绝对控制测量,56 个基本站和其他联测点进行相对测量),每期测量绝对测量和相对联测点数略有差异,平均点值精度一般

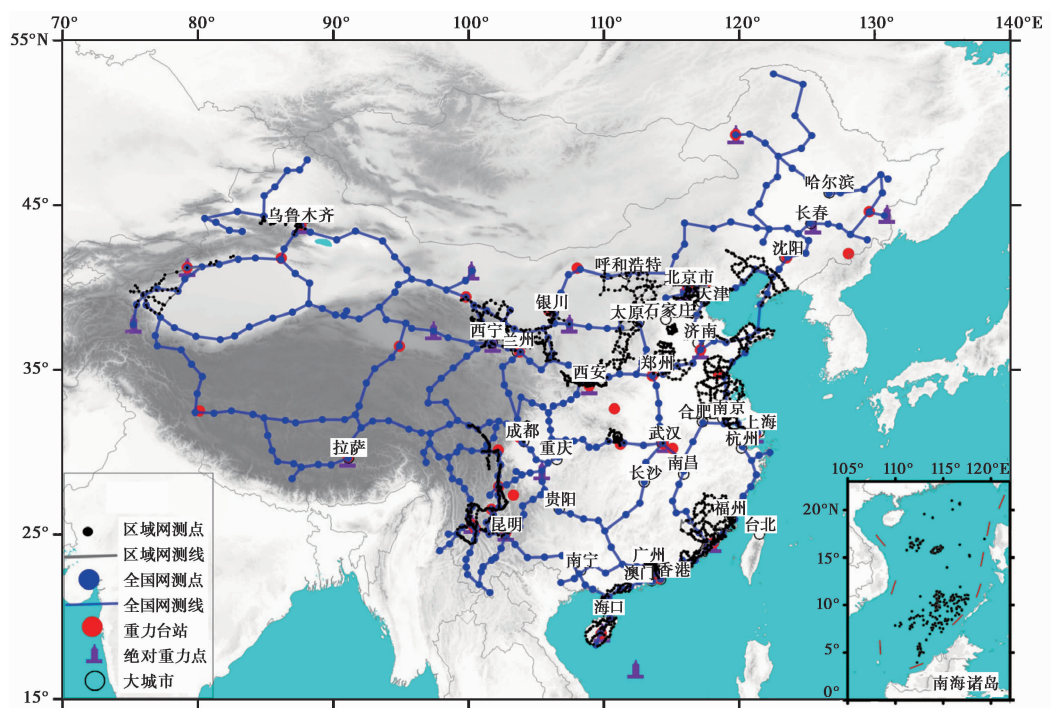


图3 中国大陆重力网(1998~2008年)

优于 $15.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ (李辉等, 2009)。区域网重力联测仍按 1998 年以前的测量方式进行。尽管全国网可为区域网提供一些基准,但实际上这 2 个网彼此独立运行或处于“两张皮”状态。

区域重力网是对以往局域测网的继承与优化(分重点区和一般区)。区域重力测网和测线主要围绕中国大陆主要构造带或地震危险地区建设,分布在我国的华北、南北地震带、郯庐断裂带、东南沿海及新疆等地震多发区或重点监测区。区域网由近 3000 个点或 30 多个小网组成,小网由省地震局或局直属单位分别实施测量,复测周期每年 1~4 期。区域网中绝对重力测量控制点少,尽量采用全国网进行约束。每个作业小组按规范使用 2 台重力仪进行往返观测,测量数据经平差处理给出网中所有点的相对重力联测值。

2003 年,三峡工程首次蓄水前后在库首区开展了精密重力测量工作,获得了特大蓄水过程中的重力变化,显示其主要与蓄水荷载和渗流有关(孙少安等, 2006)。

全国网流动重力观测成果在地震会商中崭露头角,对汶川地震进行了一定程度的中期预测(祝意青等, 2008),震例分析认为其与震前重力梯度带密切相关(申重阳等, 2009; 祝意青等, 2009)。利用区域网资料,对一些 5~6 级地震进行了较好的中期预报,如 2000 年 6 月 6 日景泰 5.9 级地震(祝意青等, 2001),并总结了昆仑山口西 8.1 级地震相关重力变化(李辉等, 2009; 祝意青等, 2013)。

2.2 连续重力测量

1998~2008 年连续重力观测网处于数字化与网络化改造阶段,中国地震局先后在中国大陆建设 39 个重力台站(图 3),主要使用 GS-11、GS-15 型重力仪(15 个站)和 DZW 型重力

仪(6个站),初步形成了集数据自动汇集、数据库管理、仪器远程监控和数据图形化处理为一体的连续重力观测台网。2008年,武汉九峰基准台引入美国超导重力仪SGC053。汶川地震前成都站GS15仪器记录的高频扰动(图4),显示大震主破裂前重力扰动幅度加速增大,可能是热带气旋作用(韦进等,2009)或主破裂预警信号。

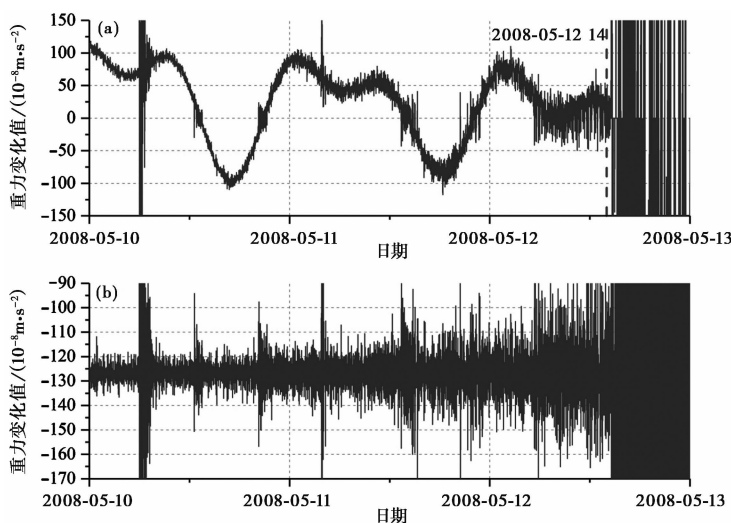


图4 汶川地震前成都台GS15记录的高频重力扰动
(a)原始记录;(b)对原始记录扣除低频潮汐后的剩余变化

2.3 绝对重力测量

自1998年以来,随着国家重大科学工程项目“网络工程”的开展,每2~3年对覆盖中国大陆范围内的25个基准站进行一期绝对重力观测(全国网),均采用美国FG5绝对重力仪(张为民等,2004;刘冬至等,2007),其中FG5-112、FG5-214为2002年国家测绘局引进,FG5-232为2006年9月中国地震局地震研究所引进。测量均按每点次不少于24组、每组100次下落,给出绝对点仪器高度绝对重力值,同时进行垂直梯度测量归算,给出地面点绝对重力观测值。我们曾携FG5-232参加了卢森堡举办的国际/欧洲绝对重力比对(即ECAG2007、ECAG2011),从比测结果(Francis et al,2010、2013)可看出FG5-232性能较好,与卢森堡国际基准偏差均在2微伽以内。FG5-232在国内绝对测点均进行过实测,也定期与国内绝对重力仪进行比测,这说明我国重力台网测定的重力绝对基准是可靠的,并可与国际重力基准接轨或统一。

成都基准台绝对重力测量结果表明,汶川地震前(4期数据)确实发生比较明显的重力趋势上升累积变化(大于20微伽)(邢乐林等,2008)。

3 自玉树7.1级至九寨沟7.0级地震的中国大陆重力整合监测

2009~2019年中国大陆重力整合监测网如图5所示。

3.1 流动重力测量

经过对汶川地震的总结与反思,针对“两张皮”测网缺陷,自2009年开始有计划地对中国大陆重力网进行强化拼接和整合,区域网重点区逐步统一为每年2期,其他地区每年1期。

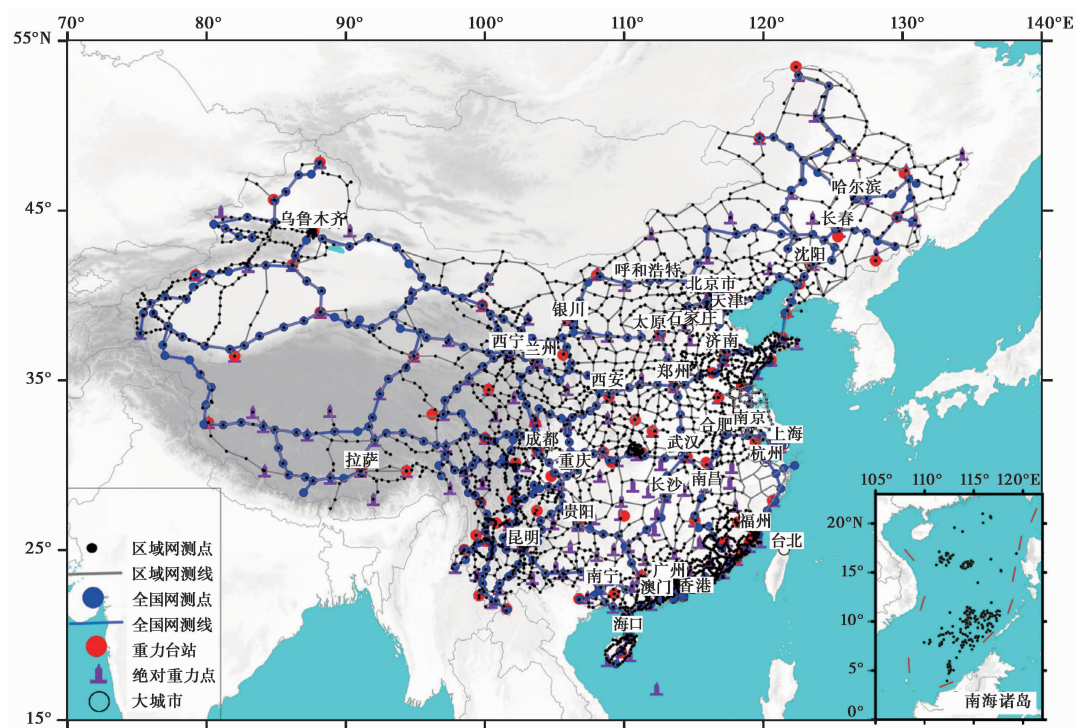


图5 中国大陆整体重力网(2009~2019年)

首先,自2009年下半年开始,利用中国地震局专项对大华北地区各区域网进行整体强化改造,统一联网并实施绝对重力控制(相对联测点900多个,绝对控制测点10个),每年2期;2010年,利用综合地球物理场观测专项对青藏高原东缘(南北地震带)重力测网进行了整体拼接改造、统一联网施测(相对联测点约400个,绝对控制点10个),一般每年1期(除汶川加密网50个测点2期外);2012年开始,利用综合地球物理场观测专项对鄂尔多斯及其周缘测网进行整体改造(约530个相对联测点,10个绝对控制点);2013年,根据综合地球物理场观测的需要对所有区域网进行了统一整体设计,并于2014年开始常态化观测。拼接、改造与优化的全国网和区域网测点尽量整合、连接,逐步形成中国地震重力统一监测网,其中2017年优化网实测7574点次、8412段次、128绝对点次。2018年又对其进行了整体优化设计,形成101个绝对点、4000余个相对联测点测网,2019年开始实测,共5949点次、6787段次、103绝对点次,其成果精度在绝对基准控制下一般优于15微伽($1\text{微伽}=10^{-8}\text{m/s}^2$)。相对联测采用LCR-G型、CG5/CG6型和美国Burris型相对重力仪,全网分为重点监视区和一般监视区两大部分。重点监视区包括南北地震带、大华北地区 and 新疆等地区,平均测点间距20~50km,每年观测2期。一般监视区包括西部、东北和华南部分地区,测点平均间距50~100km,东北地区每年观测1期,西部和华南每一至两年观测1期。值得欣喜的是实现了境内外重力点的建设与联网测量(张锐等,2013)。

重力测量成果在地震形势判定和年度地震会商中发挥了重要作用。姚安6.0级、芦山7.0级、门源6.4级、呼图壁6.2级、九寨沟7.0级等地震均在震前进行了较好的中期预测。其中,首次发现了姚安地震前半年差分变化图像存在以震中为中心的四象限图像(图6(a)),这与震

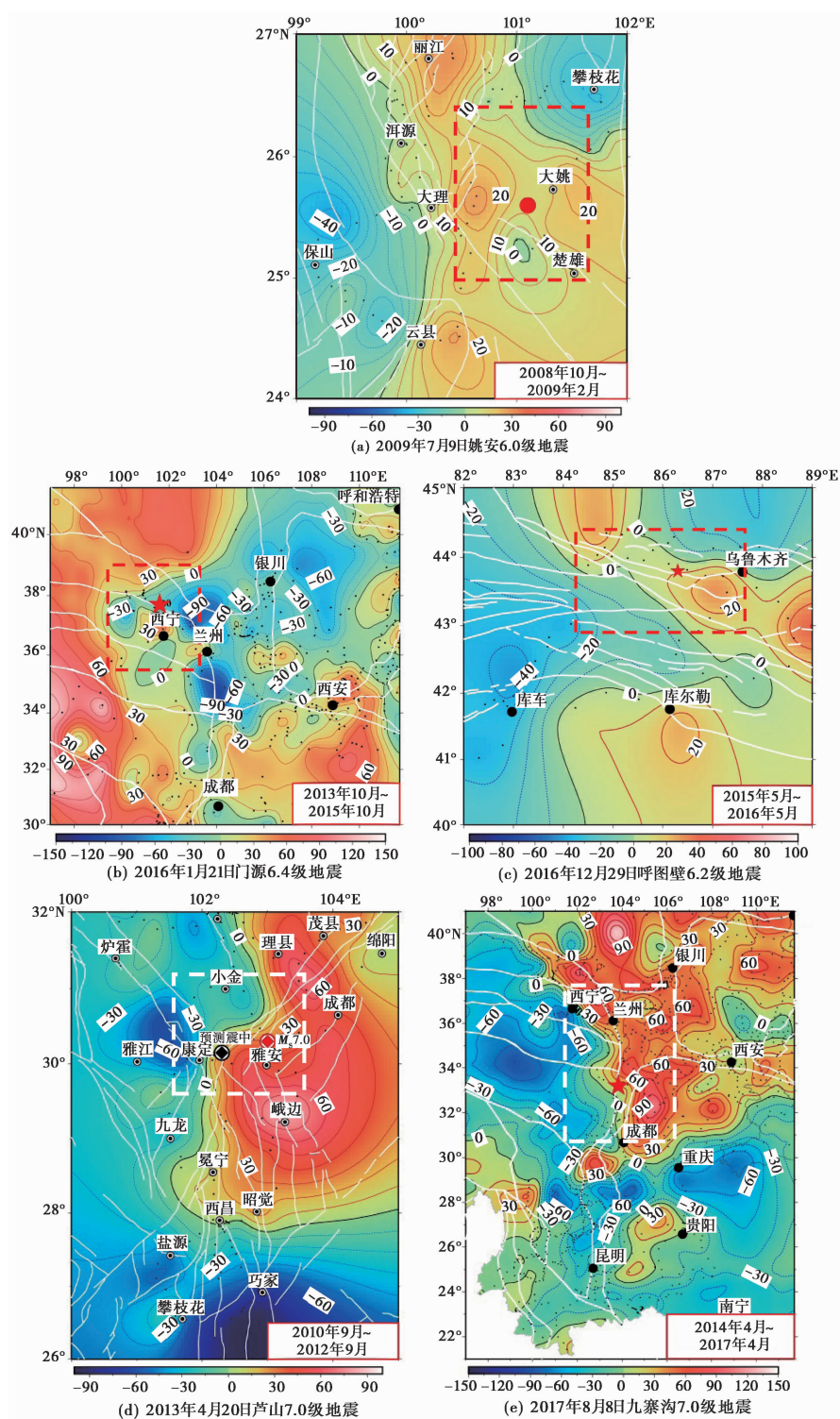


图6 芦山、门源、九寨沟等地震前的典型重力变化(单位:微伽)

源机制解具有一致性,由此提出闭锁剪力模式及其数值研究(申重阳等,2011;黄浩哲等,2019)。通过震例检验(祝意青等,2013),震前的重力梯度变化和四象限特征(可统称为典型重力变化,参见图6)已成为中期地震危险的基本判据与指标(祝意青等,2018)。

3.2 连续重力测量

2009~2019年处于数字化与网络化观测阶段,随着数字地震观测网络、中国大陆构造环境监测网络、中国地震背景场等国家重大科学工程建设以及各省、市自筹经费建设,逐步形成了一个集数据自动汇集、数据库管理、仪器远程监控和数据图形化处理为一体的连续重力观测台网(图5)。截至2019年底,连续重力台站有86个(92套仪器,其中PET&gPhone型61套、DZW型18套、GS15型8套、GWR或iGrav型2套、TRG型3套)。

芦山地震前1个月(2013年3月昆明西南片强震跟踪会议),我们发现区域潮汐因子(2008~2013年2月)趋势变化呈四象限分布(图7),地震发生在四象限中心附近,可用闭锁剪力模式来解释(申重阳等,2011;黄雅等,2020),即震前震源区双力偶闭锁剪力的持续作用可能造成区域介质参数(变形或质量规则迁移)扰动,进而引起潮汐因子规则扰动。

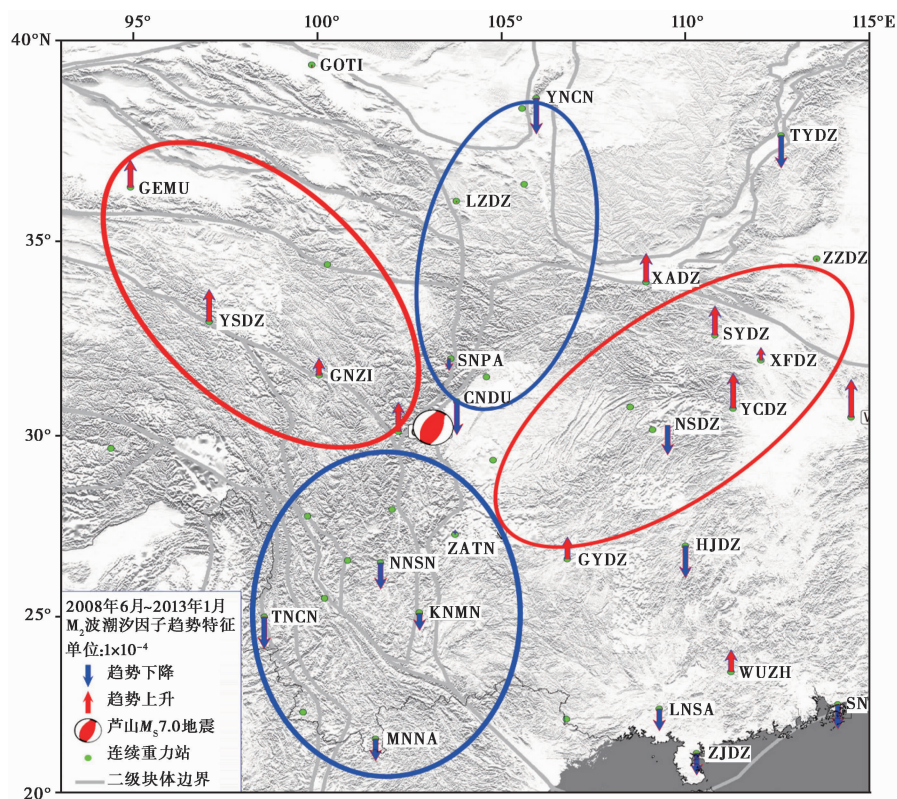


图7 芦山地震前 M_2 波潮汐因子变化空间分布

3.3 绝对重力测量

中国地震局地震研究所于2017年、2018年和2019年又分别引进了FG5-255、259、262等3套绝对重力仪器,并于2020年对FG5-232进行了升级,中国地震局地球物理研究所和中国地震局第一监测中心分别于2013年、2017年引进了A10-034、A10-048绝对重力仪,其

中部分仪器参加了 2017 年底由中国举办的国际绝对重力比测(ICAG2017)。除了利用绝对重力测量进行相对联测网控制外,开始尝试进行连续重力观测仪器的校准(邢乐林等,2010),同时进行相关地学研究(Sun et al,2009;邢乐林等,2017)。

4 讨论与结论

中国大陆重力场时变监测主要服务于地震监测与预报及其相关的科研与国家基础设施建设。综上所述,中国大陆重力时变监测经过 60 余年、3 个阶段的发展,基本形成了较为完善和统一的监测网络,为中国大陆地震活动监测与预测研究提供了基础和保障,为全球地震活动、全球板块及块体运动监测提供了示范。其贡献主要表现在:

(1)采用国际最先进的重力测量设备与技术,根据地震监测目标和效能,逐步建立了一套较为完备的中国大陆重力场时变监测应用体系,形成了重力台网站址遴选、仪器标定检测(含入网)、基准建立、观测运行与质量监控、数据管理、产品产出与数据共享等全链条业务模式和相应标准或规范体系。

(2)积累了较为丰富的观测数据。为满足地震会商与预测等应用需求,准实时产出了监测区不同时空分辨率的高精度重力场动态变化图像,其较客观地勾画了中国大陆现代地壳物质运动的基本轮廓与分区特征,显示了我国东部、中部和西部重力场时变的差异性特点(图 8(a)) and 潮汐参数背景变化空间分布(图 8(b)),也为我国的地球科学研究提供了基础数据。

自 1998~2019 年底,共获得 12 期的全国重力观测数据,其中地壳运动网络工程 5 期(1998 年、2000 年、2002 年、2005 年、2008 年)、数字地震网络 1 期(2006~2007 年)、陆态网络 6 期(2010~2011 年、2013~2014 年、2015~2016 年、2017 年、2018 年、2019 年)。

(3)通过长期地震预测实践,识别和捕获了与强震孕育发生相关的典型重力变化特征,为中期地震预测和会商提供了重要依据,取得了多次中期预测成功案例。一些学者通过震例总结,对重力变化异常的量级和范围与强震的关系进行了统计或量化(贾民育等,2000;祝意青等,2018;胡敏章等,2019),为地震预测提供了实践经验。地壳运动网络给中国大陆重力时变监测带来了地震预测“革命性”突破,近 20 年的流动重力监测和中期地震预测成功经验表明:强震或大震前往往出现重力变化梯度带或上升与下降变化交替的四象限图像,震中位于其相对低值(如零值线)部位,与大范围正重力变化累积有关(祝意青等,2008、2018;李辉等,2009;申重阳等,2009、2011)。尤为可喜的是预测实践中发现了芦山地震前 M_2 波潮汐因子趋势性变化特征。上述现象均可从能量积累和破裂角度提出的大震判别基本准则(申重阳等,2009)和闭锁剪力模式(申重阳等,2011;黄浩哲等,2019)来给予定性或定量解释,为地震预测和机理解释提供了科学依据,即震前孕震源存在的双力偶闭锁剪力的持续作用,走滑型会引起四象限重力变化,倾滑型会引起二象限(梯度带)重力变化。

尽管中国大陆重力时变监测取得了令人瞩目的成就,但就地震灾害预测与减灾等需求来说,仍存在一些不足,如:时空分辨率不够、块体边界监测弱、连续重力与流动重力的融合程度低、绝对重力标定和控制程度低、站网监测的具体科学目标不够清晰、配套观测设施不足等,尤其距解决地震预测的国际难题仍任重道远。建议未来发展着重考虑如下方面:

(1)根据地震监测研究需求与发展目标,引入重力观测与平台新技术(超导、冷原子、卫

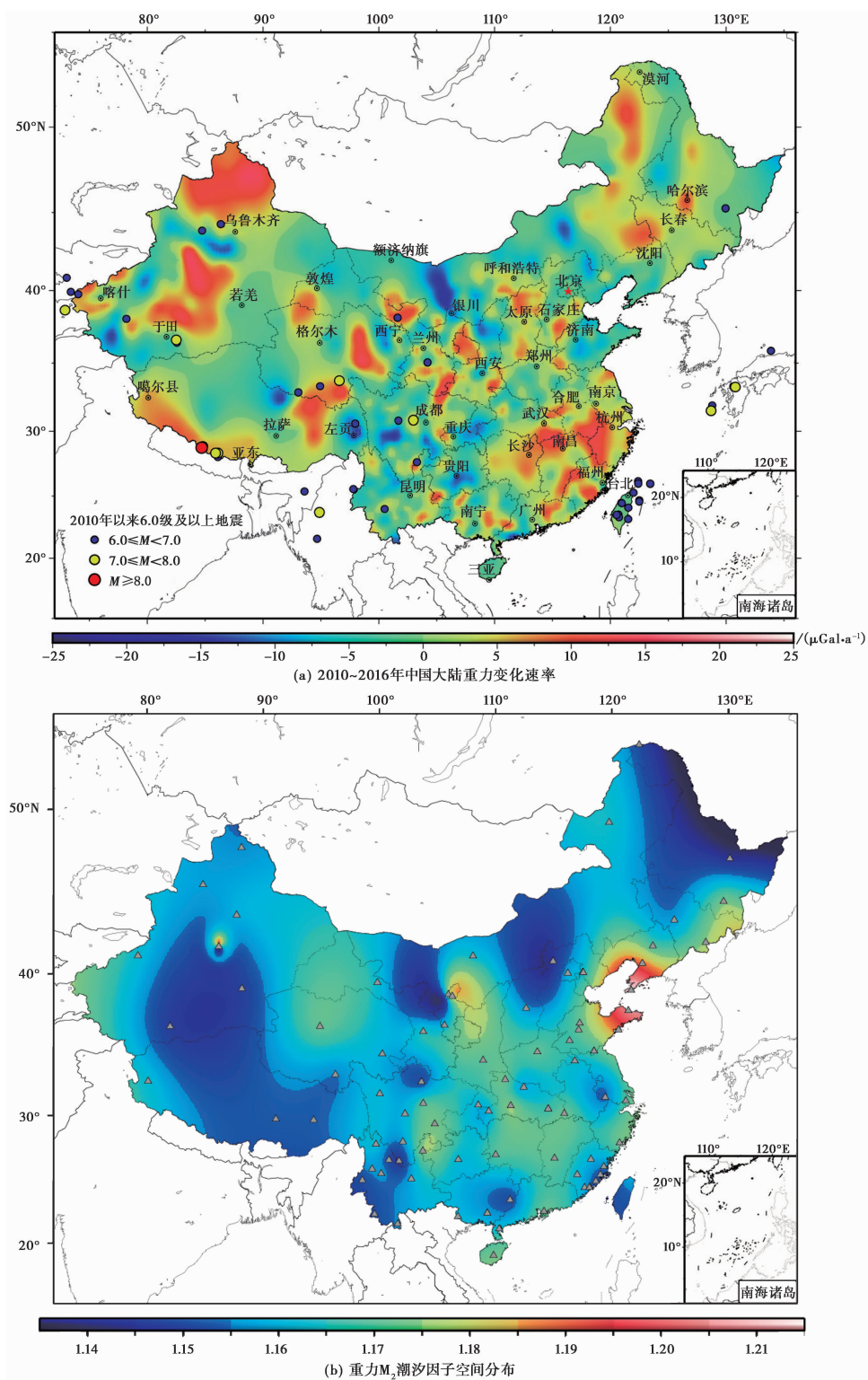


图 8 中国大陆重力学基本图像

星、航空、机器人等),逐步完善与建立重力场时变的空、天、陆地地表、海洋等一体化的多层次立体观测网络。

(2)加强与完善高精度重力仪基准与校标系统建设。建立与完善重力观测的基准体系;随着绝对重力仪的增多,应建设设施完善的绝对重力比测基地,定期进行比对;重力仪的标定目前仍以野外基线为主,需要建立更多标准基线,定期利用绝对重力仪校标相对重力仪;还要逐步建立与完善高精度的室内标定系统,如倾斜法、质量法、高差法、绝对标定法等。

(3)加强重力场源信号识别与干扰因素剔除或弱化研究。除了仪器因素外,干扰因素主要包括地表环境变化(气压、地下水、海潮)对区域重力场的影响。干扰因素剔除或弱化的目的是突出深部构造因素甚至震源孕育效应的信号,以便更好地实现场源信号的物理分离与构造运动信号研究。

(4)加强重力场潮汐与非潮汐变化模型整体解算与信息分离的研究。我们通过仪器观测的非潮汐变化中包含了各种成份,如极移、核幔边界变形、地球自转速度变化、板块运动、地球内部质量移动、地壳运动和地壳应力形成的重力变化等成份,固定台站观测的结果中还可能地球自由振荡等十分有用的地球物理信息,不论从地震预报研究,还是从整个地球动力学的研究角度来看,对这些综合效应进行评价分离是十分有意义的。

(5)开展固体潮在地震预报研究中的一些理论问题的研究。如潮汐应力对地震的触发作用,区域构造应力对固体潮响应的调制作用,固体潮响应与岩石圈横向不均匀性的关系,潮汐应力转化为构造应力的形成和途径等。

(6)有计划地开展不同类型地区的重力(垂直)梯度的测量。我国地形种类繁多,构造复杂,有必要对各类地区,特别是地震活动区的垂直梯度值进行实际测量。

(7)地震预测是国际科学难题,应积极开展国际合作,通过大量震例解剖研究,大力发展基于多种重力观测数据的强震数值预测与应用研究。

致谢: 十分感谢众多重力观测研究人员长期坚持不懈与艰苦努力。

参考文献

- 陈益惠,黄大伦,丘其宪,1996. 我国绝对重力观测结果和重力测量精度. 地球物理学进展, **11**(3):21~39.
- 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.
- 方俊,1984. 固体潮. 北京:科学出版社.
- 顾功叙,刘克人,郑金涵,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.
- 胡敏章,郝洪涛,李辉,等,2019. 地震分析预报的重力变化异常指标分析. 中国地震, **35**(3):417~430.
- 黄浩哲,申重阳,谈洪波,等,2019. 姚安 $M_s 6.0$ 地震典型重力前兆孕震模型量化研究. 大地测量与地球动力学, **39**(4):351~355.
- 黄雅,申重阳,韦进,等,2020. 2013 年芦山 7.0 级地震前重力固体潮参数时空变化研究. 大地测量与地球动力学, **40**(2):165~169,197.
- 贾民育,邢灿飞,李辉,等,1999. 绝对重力测量在云南和北京观测到的重力时间变化. 中国地震, **15**(1):54~64.
- 贾民育,邢灿飞,孙少安,等,1995. 滇西重力变化的二维图象及其与 5 级(M_s)以上地震的关系. 地壳形变与地震, **15**(3):9~19.
- 贾民育,詹洁晖,2000. 中国地震重力监测体系的结构与能力. 地震学报, **22**(4):360~367.
- 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.
- 李瑞浩,孙和平,陈冬生,等,1991. 重力潮汐观测资料的改正和异常背景值的显示问题. 地震学报, **13**(2):259~269.
- 刘冬至,邢乐林,徐如刚,等,2007. FG5/232 绝对重力仪的实验观测结果. 大地测量与地球动力学, **27**(2):114~118.
- 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.
- Melchior P, 方俊, Ducarme B, 许厚泽, 等, 1985. 中国固体潮观测研究. 地球物理学报, **28**(2):142~154.
- 申重阳,李辉,付广裕,2003. 丽江 7.0 级地震重力前兆模式研究. 地震学报, **25**(2):163~171.
- 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,李辉,王琪,等,2002. 滇西重力断层运动时间分布特征的初步研究. 大地测量与地球动力学, **22**(2):68~74.
- 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.
- 孙和平,徐建桥,崔小明,2017. 重力场的地球动力学与内部结构应用研究进展. 测绘学报, **46**(10):1290~1299.
- 孙少安,项爱民,李辉. 1999. 滇西和北京区域重力场演化及其与地震关系的探讨. 地震, **19**(1):97~102.
- 孙少安,项爱民,朱平,等,2006. 三峡水库首次蓄水引起的重力变化及其机制的初步研究. 地震学报, **28**(5):485~492.
- 王勇,许厚泽,张为民,等,1998. 1996 年中国中西部地区高精度绝对重力观测结果. 地球物理学报, **41**(6):818~825.
- 王勇,张为民,詹金刚,等,2004. 重复绝对重力测量观测的滇西地区和拉萨点的重力变化及其意义. 地球物理学报, **47**(1):95~100.
- 韦进,郝洪涛,康开轩,等,2009. 汶川地震前成都台重力的高频扰动. 大地测量与地球动力学, **29**(S1):15~24.
- 邢乐林,李辉,何志堂,等,2008. 成都基准台绝对重力复测结果分析. 大地测量与地球动力学, **28**(6):38~42.
- 邢乐林,李辉,刘子维,等,2010. 利用绝对重力测量精密测定超导重力仪的格值因子. 大地测量与地球动力学, **30**(1):48~50.
- 邢乐林,王林海,胡敏章,等,2017. 时变重力测量确定青藏高原地壳隆升与增厚速率. 武汉大学学报·信息科学版, **42**(5):569~574.
- 许厚泽,王谦身,陈益惠,1994. 中国重力测量与研究的进展. 地球物理学报, **37**(增刊 I):339~352.
- 徐纪人,1983. 潮汐因子变化与 1976 年松潘地震. 地壳形变与地震, **3**(4):38~43.
- 张锐,邹锐,韩宇飞,等,2013. 陆态网络首次境外重力测量. 大地测量与地球动力学, **33**(3):158~159.
- 张为民,王勇,詹金刚,等,2004. 中国地壳运动观测网络中的绝对重力测定. 武汉大学学报·信息科学版, **29**(3):227~230.
- 重力清理攻关小组,1985. 我国重力测量在地震预报研究中的作用和问题. 中国地震, **1**(3):10~16.
- 祝意青,陈兵,张希,等,2001. 景泰 5.9 级地震前后的重力变化研究. 中国地震, **17**(4):356~363.
- 祝意青,梁伟锋,徐云马,2008. 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,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,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,吕弋培,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.
- Barnes D F, 1966. Gravity changes during the Alaska earthquake. J Geophys Res, **71**(2):451~456.
- Francis O, Baumann H, Volarik T, et al, 2013. The European Comparison of Absolute Gravimeters 2011 (ECAG-2011) in Walferdange, Luxembourg; results and recommendations. Metrologia, **50**(3):257.
- Francis O, Van Dam T, Germak A, et al, 2010. Results of the European comparison of absolute gravimeters in Walferdange (Luxembourg) of November 2007. In: Mertikas S P. Gravity, Geoid and Earth Observation. Berlin: Springer, 31~35.
- Fujii Y, 1966. Gravity change in the shock area of the Niigata earthquake, 16 Jun. 1964. Zisin, **19**(3):200~216.
- Hunt T M, 1970. Gravity changes associated with the 1968 Inangahua earthquake. N Z J Geol Geophys, **13**(4):1050~1051.
- Kisslinger C, 1975. Processes during the Matsushiro, Japan, earthquake swarm as revealed by leveling, gravity and spring-flow observations. Geology, **3**(2):57~62.
- Nur A, 1974. Matsushiro, Japan, earthquake swarm: confirmation of the dilatancy-fluid diffusion model. Geology, **2**:217~221.
- Sun W K, Wang Q, Li H, et al, 2009. Gravity and GPS measurements reveal mass loss beneath the Tibetan Plateau: geodetic evidence of increasing crustal thickness. Geophys Res Lett, **36**(2):L02303.

Time-varying Gravity Field Monitoring and Strong Earthquake Prediction on the Chinese Mainland

Shen Chongyang¹⁾ Zhu Yiqing²⁾ Hu Minzhang¹⁾ Tan Hongbo¹⁾ Hao Hongtao¹⁾
Wei Jin¹⁾ Han Yufei³⁾ Li Hui¹⁾ Wang Jian¹⁾ Zhang Xinlin¹⁾ Liu Shaoming¹⁾
Wang Jiapeng¹⁾ Sun Kai¹⁾

1) Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of seismology, CEA, Wuhan 430071, China

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

3) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract The basic situation of monitoring the high precision time-varying gravity field and the application of earthquake prediction in Chinese mainland is reviewed. Since the Xingtai earthquake occurred in 1966, gravity field, especially the micro-gal level information of the time-varying gravity field, started to be applied to monitor the crustal movement and the process of strong earthquake in China. In general, gravity monitoring mainly adopts two methods: fixed-point with mobile re-measurement (Mobile Gravity) and fixed station with continuous observation (continuous gravity). The gravity monitoring history of China can be classified into three stages. Before 1998, gravity monitoring was mainly carried out along tectonic block boundaries, active faults or areas with strong historical earthquakes, usually with relative measurement and without absolute measurement. The dynamic variation characteristics of gravity before a series of earthquakes, such as Haicheng $M7.2$, Tangshan $M7.8$ and Lijiang $M7.0$, were summarized. But few earthquake cases were predicted successfully, except for Haicheng earthquake. After 1998, with the crustal movement network construction, the gravity field of the Chinese mainland has been monitored by the high-precision absolute gravity survey. The large-scale variation information before the Wenchuan $M8.0$ earthquake has been obtained. Effective opinions for the medium-term prediction of the Wenchuan earthquake are given. After 2010, taking the Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC) as the base, several gravity networks such as the North China network and the North and South belt Gravity network were integrated and unified. Then a high-precision and complete gravity observation network over the China started to work. Several earthquakes with $M_s > 6.0$ (such as Lushan $M_s 7.0$, Menyuan $M_s 6.4$, Hutubi $M_s 6.2$, etc.) were successfully predicted in that period. This is helpful for earthquake mechanism study and the medium-term earthquake prediction in China. With the improvement of measurement and long-term practice in gravity observation, a special interdisciplinary subject—" Seismic-gravimetry ", is generated preliminarily.

Keywords: Gravity time-varying; Monitoring networks; High-precision; Earthquake prediction; Development history