

刘刚, 乔学军, 王琪, 2020. 强震变形的地震大地测量监测与研究. 中国地震, 36(4): 718~728.

强震变形的地震大地测量监测与研究

刘刚¹⁾ 乔学军¹⁾ 王琪²⁾

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) 中国地质大学(武汉), 武汉 430074

摘要 地震大地测量是将大地测量(特别是空间大地测量)与地震学及构造地质学进行融合的新兴交叉学科,其可用于监测地震孕育的地球物理背景场及动态变化过程,对相关形变实现了 $10^2\text{a} \sim 10^{-2}\text{s}$ 的宽频带监测,基本弥补了地震学与构造地质学间的频率空白。以多频带的地震大地测量技术(GNSS、InSAR、高频GNSS)为支撑的陆态网络工程,不仅获得了中国大陆长期的地壳运动图像,而且在强震形变监测中发挥了重要作用。汶川、芦山、尼泊尔廓尔喀及九寨沟等地震的研究成果表明,高频/静态GNSS、InSAR、精密水准相融合的多频大地测量,极大地拓展了地震形变监测的时空频域,促进了大陆型地震的相关研究,为地震预测预警研究奠定了基础。然而,目前使用的地震大地测量资料有限,同时,我国地震大地测量监测网络也有待不断加密和优化。

关键词: 地震大地测量 同震形变 GNSS InSAR

[文章编号] 1001-4683(2020)04-0718-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

半个世纪以来,基于卫星测量系统的空间大地测量学利用各种空间观测手段,实现了对地球表面、浅层、深部及大气层等介质的观测,高精度获取其位置、状态值及其变化。空间大地测量大尺度、全天候、高精度的技术优势,既可以获取广域、长周期的大陆地壳构造运动与变形,亦能测定与地震孕发及后续调整的相关时变形变,填补了地震学观测频带中超长周期至DC(零频)的频带空白,形成了“零频地震学”(Press, 1965)。由此,作为地震学、地球物理学与大地测量学的新的交叉子学科——地震大地测量学,得以提出并于20世纪80年代开始兴起(周硕愚等, 2017)。21世纪初出现的高频GNSS则进一步扩展地震大地测量观测频带的高频端至 10^{-2}s ,与地震学观测相接;同时,结合以静态GNSS和InSAR为代表获取的长周期低频端(10^2a),基本弥补了地震学与构造地质学的频率空区,地震大地测量逐步成为地壳运动及地震研究中不可或缺的一环。

地震大地测量学应运而生,在全球范围内地震大地测量相关手段的大型观测网络也相继建立。20世纪80年代,美国在南加州建立的GPS连续跟踪站组成的观测阵列SCIGN率先观测到了1992年兰德斯 $M_w 7.3$ 地震的同震形变以及明显的震后形变过程(Blewitt et al,

[收稿日期] 2020-07-09; [修定日期] 2020-08-18

[项目类别] 地震科技星火计划(XH20038)、国家自然科学基金(41874018、41731071)和国家重点研发计划(2018YFE0206100)共同资助

[作者简介] 刘刚,男,1984年生,博士,副研究员,主要从事地震大地测量学研究。E-mail: whgpslg@gmail.com

1993);于2003年批准实施的地球透镜计划(Earthscope)已在美国西海岸布设超过1200个GPS连续站点,旨在研究太平洋与北美板块运动、主要断裂带活动特性及火山、海啸、地震危险性。日本于20世纪70年代即开始布设GPS,以监测构造运动与断层活动性,是最早布设GPS台网的国家;自1993年开始布设的GEONET,目前已建成超过1200个GNSS连续站均匀分布于狭长的日本列岛,平均间距优于20km。

中国的空间大地测量台网始于1988年国家地震局建设的滇西实验场(Seeber等,1990;Lai et al,1992),其后近10年主要以各个科研单位自主或合作建设的区域台网为发展(游新兆等,1993;朱文耀等,1997;党亚民等,1998)。至1997年,重大科学工程“中国地壳运动观测网络”(Crustal Movement Observation Network of China,简称CMONOC和网络工程)立项建设(马宗晋等,2001),成为全国统一、大范围、高精度、以地震预测预报为主兼顾大地测量等其他需要的综合性监测网络。经过“中国大陆构造环境监测网络”(陆态网络)项目的强化,目前整个网络包含了GNSS、InSAR、重力、SLR、VLBI等现代大地测量手段,其中,与地壳形变与地震研究紧密相关的GNSS网络达到了可高频记录的连续站点260个、区域站点约2000个,并提供高精度的数据处理及加工产品服务^①。网络工程和陆态网络建成以来成绩斐然,如,首次绘制了中国大陆构造运动图像(Wang et al,2001),并不断精化(牛之俊等,2005;李强等,2012;Wang et al,2020),又如,大陆型强震的地震周期形变特征研究(Shen et al,2009;Wang et al,2011;Diao et al,2018)。本文以陆态网络工程中捕获的地震相关形变为主要对象,以综合观测最为丰富的2008年汶川 M_w 7.9、2013年芦山 M_w 6.6、2015年廓尔喀 M_w 7.8及2017年九寨沟 M_w 6.5地震为例,简述多频大地测量在强震形变监测中的应用与研究。

1 强震形变监测实例

自陆态网络工程建设运行以来,中国发生 $M_s>7.0$ 的强震达13次(包括中国台湾2次),地震大地测量捕获了相关形变,为研究其孕育发生过程及机理提供了丰富的数据约束(图1)。鉴于台网建设的渐进性,观测时空分辨率呈逐步递增的特点。以2008年为界,之前的地震大地测量主要依靠InSAR手段,并辅以少量的GPS流动观测,如2001年昆仑山口西 M_w 7.8地震;之后GNSS站点剧增,并增加高频采样数据,实现了与InSAR共举的点面结合局面。其中更以汶川、芦山、廓尔喀、九寨沟地震为代表,以静态/高频GNSS、InSAR为主要手段的地震大地测量构建了多频带的地震相关形变图像,促进了地震运动学及动力学的发展。

1.1 2008年汶川 M_w 7.9地震

汶川地震是CMONOC建设后第一个观测到丰富地震大地测量数据的8级大震(图2(a))。CMONOC捕获约120个站点(中国地壳运动观测网络项目组,2008),与复测的国家GPS大地控制网、国家天文大地控制网、IGS站点及部分项目建设网点,共同组成了共560个测站的GPS同震数据(Wang et al,2011),最大水平向位移达5.5m左右。ALOS和Envisat亦观测到了LOS向的形变量,其中ALOS提供的8轨L波段PALSAR数据更是完整地覆盖了

^① www.cgps.ac.cn

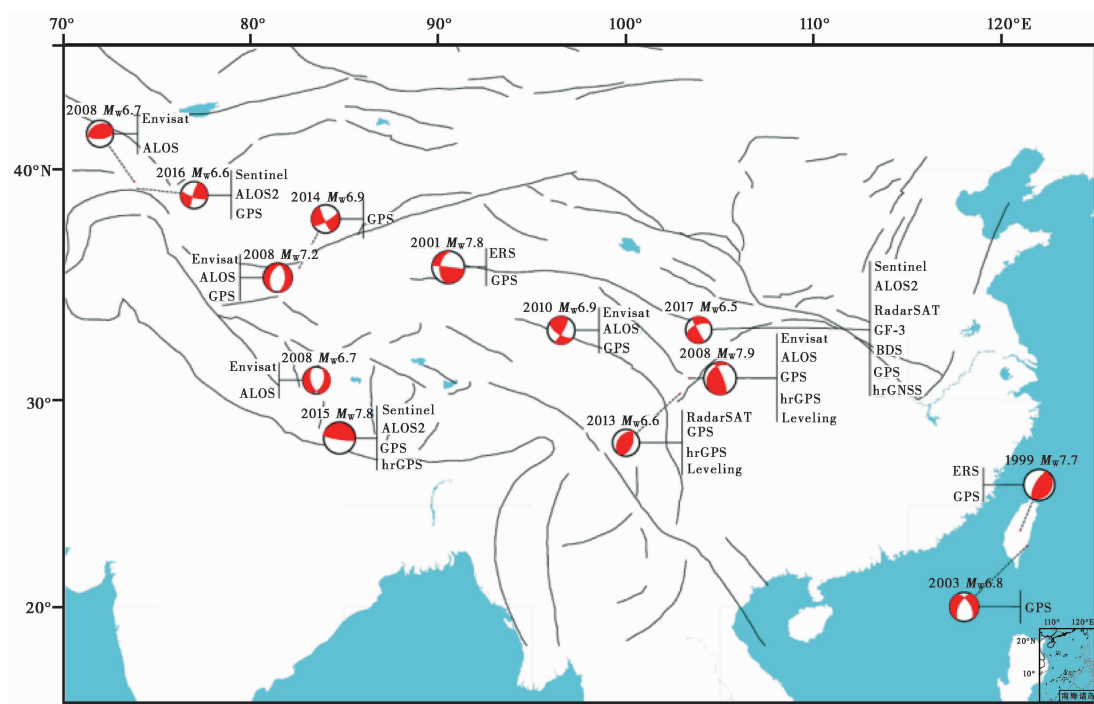


图 1 中国 $M_s > 7.0$ 强震分布及可用的地震大地测量数据统计

整个形变场 (Shen et al, 2009)。由于极震区存在一定的失相干, 形变量在 0.7m 范围内。此外, 184 个精密水准点的观测则提供了高精度的垂向形变特征, 测得最大抬升量约为 4.7m (Wang et al, 2009)。在强地面运动方面, 高频 GPS 首次在我国取得进展, 四川省连续观测网记录到 1Hz 采样的记录, 并展示了此次地震的同震近场动态形变波, 记录到的水平最大峰值位移为 1.27m (殷海涛等, 2010)。这些地震大地测量数据以其多频带响应几乎再现了此次灾害性大震瞬间产生的大范围、大幅度、汇聚式的形变场, 数据丰富程度丝毫不逊色于此国际上任何一次 8 级大震。

地震大地测量成为研究精细震源模型的主要数据来源, 并在内陆地震的成因机理方面产出了富有国际影响力的成果。Shen 等 (2009) 首次将 InSAR 和静态 GPS 同震位移用于此次地震的断层几何产状及滑动量反演, 较好地解释了震源机制由逆冲向走滑转换的几何因素, 并推测位于几何性质变化接合部位的障碍体的破裂, 是由相邻子断层的多次子事件应力加载触发所致。张培震等 (2009)、Zhang 等 (2010) 则依据 GPS 测得龙门山地区现今形变特征及该地震的震源模型, 指出下地壳流主导了川西连续变形及龙门山地壳增厚, 并提出多单元组合模式为此震的孕发机制。Wang 等 (2011) 则利用时空分辨率更高的 GPS、InSAR、水准及强震动观测, 精确地约束了位于深部主控逆冲滑脱层 2~6m 的破裂, 并提出了由大地震滑动调节的地壳缩短模式造就了龙门山的抬升, 从大地测量的角度支持了地壳缩短的造山机制, 与下地壳流模式形成争论。此外, 一系列关于震源模型及其构造意义的成果亦在国内外知名期刊得到发表, 取得了科学与实际意义兼备的丰硕成果 (王敏, 2009; Liu-Zeng et al, 2009; Xu et al, 2010; Tong et al, 2010; 郝明等, 2012; Wan et al, 2017)。其中 CMONOC 发挥的

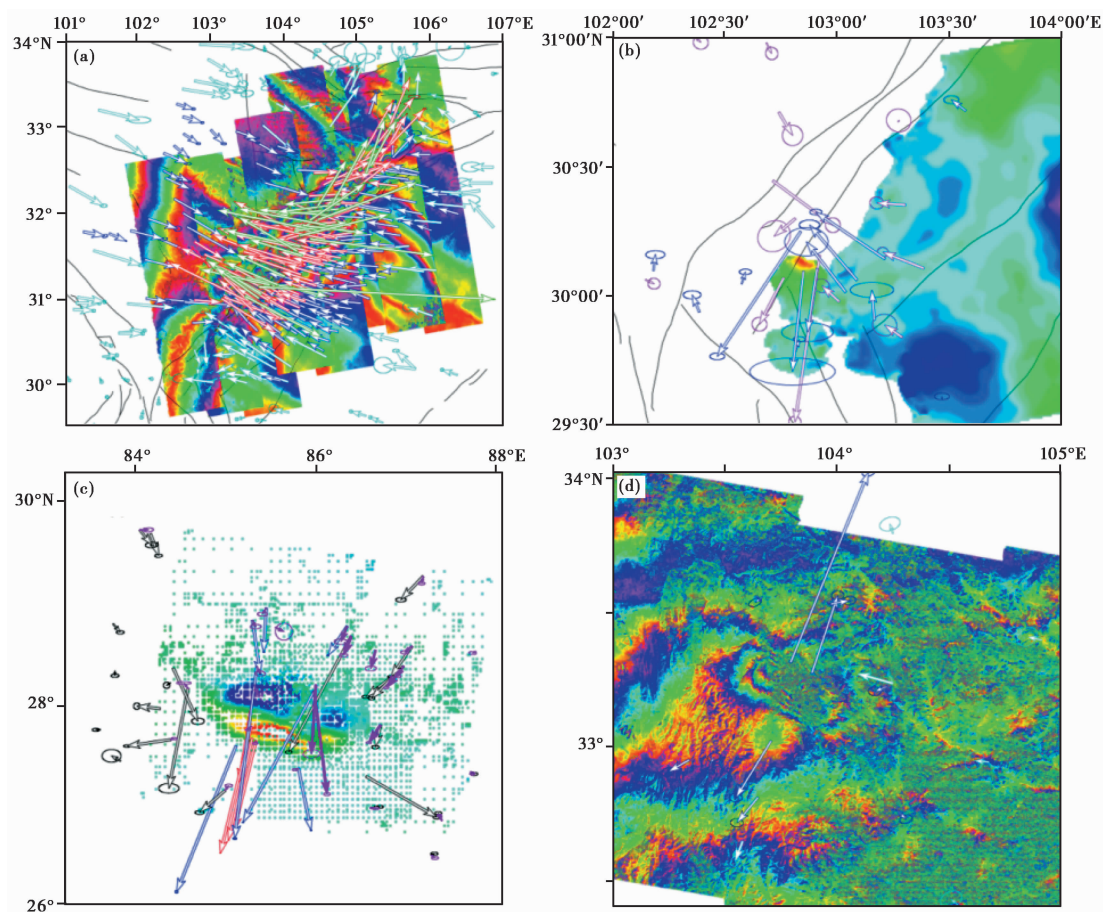


图 2 GNSS 与 InSAR 同震形变场

(a) 2008 汶川地震, 修改自 Wang 等 (2001); (b) 2013 年芦山地震, 修改自 Huang 等 (2019);
(c) 2015 廓尔喀地震, 修改自刘刚等 (2017); (d) 2017 九寨沟地震, 修改自 Liu 等 (2019)

作用不言而喻, 特别是在断层附近由于剧烈变形导致 InSAR 失相关后, GPS 网络捕获的高精度近场位移更显弥足珍贵。然而, 这些成果主要集中在“零频”至超低频端, 高频端数据由于近震记录中断, 其应用主要集中在中远场地壳介质响应 (Yin et al, 2013), 对震源运动学的成果与认识相对薄弱 (Hartzell et al, 2013)。

1.2 2013 年芦山 $M_w 6.6$ 地震

2013 年芦山地震发生于汶川地震未扩展的龙门山断裂带南部区域。本次地震产生可分辨的同震形变场范围仅集中在 200km 内, 地震大地测量观测种类虽多样, 但分辨率稍有欠缺 (图 2(b))。CMONOC 中有 11 个测站观测到同震形变, 包括 2 个测站的高频 GPS 数据, 其中距离震中最近的 H061 台站记录到了约 6cm 水平位移量。与此同时, 中国地震局地震预测研究所布设的 GPS 连续观测网络、四川省 CORS 网也观测到了 29 个测站的同震形变, 其中最大形变量位于距震中 15km 处的 LS05 台站, 水平及垂直向分别达 6.8cm 和 8.4cm (Jiang et al, 2014)。由于正值 Envisat 和 ALOS 卫星退役、新一代 SAR 卫星尚未升空之际, 仅有 RadarSAT-2 观测的 C 波段数据记录到了同震下盘的干涉图像, 最大 LOS 向形变量为 7.7cm

(刘云华等,2014)。跨越龙门山西南段的水准观测揭示出垂向同震位移符合逆冲机制的特点,最大垂直形变量达到 19.8cm(郝明等,2014)。在动态变形方面,CMONOC 连续站点 SCTQ 和 SCXJ 记录到了采样率高达 50Hz 的动态形变波形,水平最大峰值为 5.2cm(Lou et al,2014)。

地震学揭示的芦山地震震源特征并不十分复杂,主要以震中附近的紧凑圆盘式逆冲滑动为主要分布特征(张勇等,2013;刘成利等,2013)。然而,在学界内却因是否将其认定为汶川地震的余震而产生了热烈争论(陈运泰等,2013;徐锡伟等,2013)。地震大地测量数据所约束的精细滑动分布模型,则有助于厘清争论中的部分问题。Jiang 等(2014)发布了利用 CMONOC 及其他 GPS 连续观测网络获得的同震形变场,给出了初步的大地测量震源模型。谭凯等(2015)在其基础上加入了 CMONOC 区域站点、C 级网点及强震观测,反演得到的滑动分布显示在深部存在明显的低倾角破裂。Chen 等(2020b)则补充了部分 GPS 观测及水准观测,依据反射剖面设置了与 RFBT 相同的断坪-断坡-断坪几何产状,其滑动分布模型显示深部与浅部的断坡处均发生了破裂。深部的破裂显示此次地震很有可能造成了与汶川地震同属的主控逆冲滑脱层破裂,具有独立的构造意义。对于余震勾勒的反冲断层是否在同震中破裂尚存疑问,Zhang 等(2016)联合 InSAR、GPS 及强震记录研究发现反冲断层存在近 1m 的滑动,但 Huang 等(2019)利用 GPS、InSAR、水准及强震记录联合反演结果却表明反冲断层的滑动缺乏观测支持。虽然 50Hz 采样的 GPS 数据可将地震大地测量的高频端拓展至近 25Hz,但由于缺乏更多高频 GPS 测站的支持,此次地震的高频端依然处于波形分析及地震要素确定的阶段,对震源运动学的贡献有限。

1.3 2015 年廓尔喀 M_w 7.8 地震

由于地处最具代表性的陆陆碰撞型造山带——喜马拉雅地区的地震空区内,2015 年发生的尼泊尔廓尔喀地震是目前观测较为丰富的 8 级地震(图 2(c))。地震虽发生于尼泊尔境内,但其上盘位于中国藏南地区,并造成了广泛的同震永久形变。CMONOC 网络捕获了 33 个站点的 GPS 数据,包括具有明显同震信号的 4 个高频站点(赵斌等,2015;Wu et al,2016),与美国在尼泊尔境内布设的 14 个连续站点共同提供了永久及动态形变场。CMONOC 记录的最大永久位移(54cm)位于毗邻尼泊尔的 J041 台站,动态位移最大峰值(15cm)发生于 XZZF 台站,是其永久形变的近 5 倍。虽然 C 波段的 Sentinel-1A 仅观测到部分抬升区域的形变,并存在一定的失相关,但 L 波段的 ALOS-2 则记录了地震的整个形变场,LOS 向的最大形变量近 1m(单新建等,2015),与 GPS 给定的最大水平位移 1.88m 及垂直位移 1.27m 相呼应。此外,地震在近场造成了急剧的同震动态变化,5Hz 的 GPS 观测揭示的水平向峰值位移达 2m,垂直向峰值位移达 1.5m,并造成加德满都盆地出现了回响效应(Resonance)(Galetzka et al,2015)。在此次地震中,地震大地测量不仅提供了多频带的多种类(0~2.5Hz),且其可观的数据量亦较历史震例有了巨大进步。

长久以来,喜马拉雅以其独特的构造区位被学界所聚焦,此次地震的发生及充分的观测为研究喜马拉雅逆冲断裂的破裂习性及其造山机制提供了难得的机会,其中一个热点即为主逆冲断裂(MHT)的展布问题。此前,跨青藏高原至高喜马拉雅地区的深反射剖面 INDEPTH 显示印度板块沿着平缓的低倾角 MHT 缓缓插入青藏高原之下(Zhao et al,1993),然而,MHT 平坦的展布难以解释喜马拉雅带急剧变化的高差,对高、低喜马拉雅之下的 MHT 形态认识

不够清晰,其造山机制依然存疑(Pandey et al,1995;DeCelles et al,2001;Wobus et al,2005)。Elliott 等(2016)利用 InSAR 及 GPS 约束断层破裂的几何参数,表明主要滑动量展布于中地壳的断坪-断坡的结合部位,从而揭示 MHT 存在断坡-断坪-断坡的几何产状,并推测该产状的 MHT 独立调节汇聚速率,支持了中地壳的断坡是造成高喜马拉雅地区抬升的主流观点。基于相同的地震大地测量数据,Whipple 等(2016)则表示平坦模型较断坪-断坡模型具有更优的数据拟合度,并利用高角度分支断层对 InSAR 图像中西北面的抬升异常区域进行解释,以支持反序变形(out-of-sequence deformation)为高喜马拉雅的抬升机制。中国学者也进行了相关研究,不但可以辅助震后快速响应与地震危险性分析(Wang et al,2015;Zhang et al,2015;单新建等,2015),还可为断层几何产状提供佐证(谭凯等,2015;Wang et al,2017;Zhang et al,2017),然而以上研究多基于 InSAR 与尼泊尔境内的 GPS 数据,CMONOC 在藏南的 GPS 观测目前尚未发挥其应有的研究价值。此外,此次地震产生的近场高频 GPS 对震源运动学提供了强有力的约束。Galetzka 等(2015)首先利用 5Hz 数据再现了加德满都地区出现的滑动脉冲现象(slip pulse),并以此分析对建筑物造成的不同响应及损害;此后,以高频 GPS 为主要约束的震源运动过程均显示剧烈破裂而导致的动态效应、盆地效应及可能存在的介质差异性(Grandin et al,2015;Liu et al,2016;Yue et al,2016),CMONOC 的高频 GPS 数据亦贡献了可贵的辅助(刘刚等,2015、2017)。

1.4 2017 年九寨沟 M_w 6.5 地震

九寨沟地震是中国大陆 6 级强震中地震大地测量观测手段最为丰富的震例,数据来源涵盖了 GPS 和北斗多模观测提供的静、动态 GNSS 及中国高分三号、Radarsat-2、ALOS-2、Sentinel-1A 多轨道的 InSAR(图 2(d))。CMONOC 连续站点不仅记录了同震、高频 GPS 数据(王阅兵等,2018),其同址观测的北斗地基增强系统也同时记录了包括北斗、GPS 和 GLONASS 的高频数据,7 个站点记录到了永久同震形变,其中 5 个站点则记录到了清晰的动态位移。联合距震中 100km 内的 5 个 CMONOC 区域站点及 5 个 C 级网点,共同获得了 GNSS 的同震形变场(Liu et al,2019)。最大形变量位于 CMONOC 区域站 J416,水平向达 24cm,垂直向达 9cm。Sentinel-1A 升降轨的 InSAR 均观测到了明显的 LOS 向同震形变,最大隆升及沉降形变量达 0.1m 和 0.22m(单新建等,2017)。中国的高分三号卫星(GF-3)首次获取了地震的 C 波段干涉图并完整地覆盖了震区,高精度的 LOS 形变场完全能够媲美在轨的国际主流 SAR 卫星,满足 6 级强震的研究需求(Chen et al,2020a)。多模 GNSS 观测到了此次地震的动态形变,其中北斗系统(BDS)的观测则是其建设运行以来首次捕获中国大陆强震的静、动态形变,且其精度在此次监测中超越了 GPS,由其领衔的多模 GNSS 实时定位精度更是较常规的 GPS 提高了近 50%,实际精度水平位移高达 2~4mm(Li et al,2019)。因此,除了能够观测到极震区最大峰值超 40mm 的动态位移,也能捕获距震中 100km 外的 1cm 左右的微弱波形,为震源运动学提供了珍贵的近场约束。

九寨沟地震是继汶川、芦山地震之后青藏高原东缘再次发生的 7 级强震,不仅造成了学界的震动,还因其位于热门景区内而引起公众的广泛关注。其构造特点、发震原因及机制、震源过程、受灾特征、未来地震危险性等一系列的科学问题迫切需要得到解答。由快速获取的 InSAR 及 GPS 连续观测数据反演的震源模型,相较地震学紧凑圆盘式破裂具有明显的走向展布(张旭等,2017),勾勒出了此前未探明的断层迹线及走向非均匀性(季灵运等,

2017),预测了余震活动趋势(单新建等,2017;陈威等,2018);此外,初步探索了其汶川地震的关系(Zhao et al,2018)及未来地震的危险性(Hong et al,2018),分析了其强地面运动特征(申文豪等,2019)。Sun 等(2018)利用 InSAR 与地震波联合约束了断层模型,解析了可能存在的分支断层及复杂的震源机制,有助于理解虎牙断裂的构造特征。Zhang 等(2018)基于 InSAR 与 GPS 永久形变场反演得到了滑动分布特征,并认为虎牙断裂上一系列地震是松潘地块顺时针运动的体现。Liu 等(2019)则基于最为完备的 GNSS、InSAR 同震形变场,辅以多模 GNSS 提供的动态形变,联合约束了此地震精细的破裂过程,并结合汶川地震的同震、震后形变,构建虎牙断裂上的应力演化图像,指出了依然存在的地震空区及其危险性。CMONOC 对探明此次地震的震源机制及运动学参数无疑具有关键性作用,而我国地震大地测量新技术(BDS、GF-3)的应用则具有里程碑的意义。

2 讨论

自 1998 年 CMONOC 建设以来,多频带地震大地测量在中国地震监测上取得了丰硕的成果,积极推进了中国大陆型强震变形及机制研究。然而,就已有震例的研究程度而言,中国的地震大地测量学与国际顶尖水平依然存在差距,其中数据产出的基础装置——地震大地测量的台网及技术,仍具有进步的空间,主要表现在以下方面。

(1)低频形变场的空间分辨率。地震大地测量的传统优势是对长周期断层运动及地震周期性变形的低频端形变场的高精度监测。SAR 卫星提供的面状形变场较好地改善了地震大地测量的空间分辨率,但受限于仅能观测一维形变、厘米级精度及时间滞后性,尚不可能取代高精度的 GNSS。因此,对地震周期变形的解析能力仍依赖于 GNSS 台网的空间分辨率。目前 CMONOC 的空间分辨率约为 50km,主要特点为东密西疏,虽与人口密集程度相匹配,但对具有强震危险性的西部区域监测存在不足,如青藏、新疆地区的分辨率不足 70km。其次,台网站点分布相对均匀,对重大断裂、特征地震断层的控制不够,难以准确刻画其活动的细节特征。中国地震局开展的地震科学实验场计划在川滇区域加布 200 个 GNSS 连续站,届时将改善该区域主要断裂的空间分辨率。然而,青藏高原内部及周缘其他大型断裂的空间分辨率依然存在较大的优化空间。

(2)高频形变场的时空分辨率。目前,地震大地测量的频带宽度名义上可达 $10^2\text{a} \sim 10^{-2}\text{s}$,但发展及成果多集中在低频端,主要贡献于长周期变形及地震破裂的最终分布样式。高频 GNSS 自 21 世纪初诞生以来,以其高精度、大幅度、绝对基准的优势在震源运动学中取得了大量的应用,已在国际地震大地测量学界占有一席之地。目前高频 GNSS 主要有两类发展方向:①约束震源运动学模型(Galetzka et al,2015);②地震参数的实时确定(Melgar et al,2013)。其发展无不依靠高时空分辨力的地震大地测量台网。日本 GEONET 台网 1200 个连续站点均可记录高频数据,时空分辨率优于 1Hz 及 20km,2011 年日本 M_w 9.1 地震时,高频 GNSS 描述了整个列岛的动态变形过程;美国 NOTA 的 1278 个 GNSS 连续站点可记录 5Hz 数据(甚至加布了强震仪以提高精度与采样率),其在西海岸的时空分辨率不遑多让,UNAVCO 当前已实时计算矩震级以供大震应急之需,且公布静、动态位移也可随时提供下载。目前,中国 CMONOC 网络的 260 个 GNSS 连续站点可记录 1Hz 数据,高频 GNSS 在为数不多的几次地震中仅发挥了辅助确定震源过程的作用,距离独立研究运动学甚至大震预警的目标,还

有待在时空分辨率上做较大的优化。

(3) 三维形变场的构建。三维形变场建立的关键在于垂直形变的精确测定。中国大陆大部分地区垂直运动速率幅度仅为 $1 \sim 4 \text{ mm/a}$, 远小于水平运动, 且存在复杂的非构造因素干扰。因此, 对其测定不仅要求高精度, 且需对累积多年的数据进行分析以分离出构造变形。同震垂直形变信号相对较强, 但如果缺乏垂直速率信息, 仅连续 GNSS 数据具有较高的可靠性, 有效数据量将大打折扣。目前, 垂直形变场的测定多依赖于连续 GNSS、时序 InSAR、水准, 时空分辨率与精度虽能相互补充, 但当前仍各自为战, 数据处理过程繁琐且数据量巨大, 导致垂直形变相关研究发展缓慢。因此, 三维形变场的建立还有待多手段统一的数据融合理论和方法的进一步发展。

3 结论

以中国大陆 4 次强震为缩影, 多频带大地测量在强震监测中呈现出能力逐渐增强、作用愈发关键的发展趋势, 极大地促进了我国地震活动性、强震孕发机制及大陆构造演化等研究。国家重大科技基础设施——“陆态网络”工程是中国地震大地测量发展的基石, 随着国产 BDS 及 GF-3 在地震形变监测中的成功应用, 运行良好的“陆态网络”工程也将继续发挥更为重要的作用, 对其进行不断的技术升级和网络优化应是我国地震监测与应用研究发展的势在必行之举。

致谢: 数据由中国地壳运动观测网络项目组提供, 感谢参与 CMONOC 建设与运行的工作人员。

参考文献

- 陈威, 乔学军, 刘刚, 等, 2018. 基于 GNSS 与 InSAR 约束的九寨沟 $M_s 7.0$ 地震滑动模型及其库仑应力研究. 地球物理学报, **61**(5): 2122~2132.
- 陈运泰, 杨智娴, 张勇, 等, 2013. 从汶川地震到芦山地震. 中国科学: 地球科学, **43**(6): 1064~1072.
- 党亚民, 陈俊勇, 刘经南, 等, 1998. 利用国家 GPS A 级网资料对中国大陆现今水平形变场的初步分析. 测绘学报, **27**(3): 267~273.
- 郝明, 王庆良, 崔笃信, 等, 2012. 根据 GPS 和水准资料反演 2008 年汶川地震同震破裂模型. 地震研究, **35**(3): 323~329.
- 郝明, 王庆良, 刘立伟, 等, 2014. 基于水准数据的芦山 7.0 级地震震间期和同震位移场特征. 科学通报, **59**(36): 3631~3636.
- 季灵运, 刘传金, 徐晶, 等, 2017. 九寨沟 $M_s 7.0$ 地震的 InSAR 观测及发震构造分析. 地球物理学报, **60**(10): 4069~4082.
- 李强, 游新兆, 杨少敏, 等, 2012. 中国大陆构造变形高精度大密度 GPS 监测-现今速度场. 中国科学: 地球科学, **42**(5): 629~632.
- 刘成利, 郑勇, 葛粲, 等, 2013. 2013 年芦山 7.0 级地震的动态破裂过程. 中国科学: 地球科学, **43**(6): 1020~1026.
- 刘刚, 王琪, 乔学军, 等, 2015. 用连续 GPS 与远震体波联合反演 2015 年尼泊尔中部 $M_s 8.1$ 地震破裂过程. 地球物理学报, **58**(11): 4287~4297.
- 刘刚, 杨少敏, 师宏波, 等, 2017. 2015 年尼泊尔地震破裂过程的统一模型. 地球物理学报, **60**(7): 2663~2679.
- 刘云华, 汪驰升, 单新建, 等, 2014. 芦山 $M_s 7.0$ 地震 InSAR 形变观测及震源参数反演. 地球物理学报, **57**(8): 2495~2506.
- 马宗晋, 陈鑫连, 叶叔华, 等, 2001. 中国大陆区现今地壳运动的 GPS 研究. 科学通报, **46**(13): 1118~1120.
- 牛之俊, 王敏, 孙汉荣, 等, 2005. 中国大陆现今地壳运动速度场的最新观测结果. 科学通报, **50**(8): 839~840.
- 单新建, 屈春燕, 龚文瑜, 等, 2017. 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 7.0 级地震 InSAR 同震形变场及断层滑动分布反演. 地球物理学报, **60**(12): 4527~4536.
- 单新建, 张国宏, 汪驰升, 等, 2015. 基于 InSAR 和 GPS 观测数据的尼泊尔地震发震断层特征参数联合反演研究. 地球物理

- 学报, **58**(11):4266~4276.
- 申文豪, 李永生, 焦其松, 等, 2019. 联合强震记录和 InSAR/GPS 结果的四川九寨沟 7.0 级地震震源滑动分布反演及其地震学应用. 地球物理学报, **62**(1):115~129.
- 谭凯, 王琪, 丁开华, 等, 2015. 近场位移数据约束的 2013 年芦山地震破裂模型及其构造意义. 地球物理学报, **58**(9):3169~3182.
- 王敏, 2009. 基于 GPS 同震位移场约束反演 2008 年 5.12 汶川大地震破裂空间分布. 地球物理学报, **52**(10):2519~2526.
- 王阅兵, 甘卫军, 陈为涛, 等, 2018. GNSS 观测的九寨沟 7.0 级地震同震位移初步结果. 地球物理学报, **61**(1):161~170.
- 徐锡伟, 闻学泽, 韩竹军, 等, 2013. 四川芦山 7.0 级强震: 一次典型的盲逆断层型地震. 科学通报, **58**(20):1887~1893.
- 殷海涛, 张培震, 甘卫军, 等, 2010. 高频 GPS 测定的汶川 M_s 8.0 地震震时近场地表变形过程. 科学通报, **55**(26):2612~2626.
- 游新兆, 王启梁, 王琪, 等, 1993. 青藏高原 1993 年 GPS 观测成果的精度分析. 地壳形变与地震, **14**(3):27~33.
- 张培震, 闻学泽, 徐锡伟, 等, 2009. 2008 年汶川 8.0 级特大地震孕育和发生的多单元组合模式. 科学通报, **54**(7):944~953.
- 张旭, 冯万鹏, 许力生, 等, 2017. 2017 年九寨沟 M_s 7.0 地震震源过程反演与烈度估计. 地球物理学报, **60**(10):4105~4116.
- 张勇, 许力生, 陈运泰, 2013. 芦山 4.20 地震破裂过程及其致灾特征初步分析. 地球物理学报, **56**(4):1408~1411.
- 赵斌, 杜瑞林, 张锐, 等, 2015. GPS 测定的尼泊尔 M_w 7.9 和 M_w 7.3 地震同震形变场. 科学通报, **60**(28):2758~2764.
- 中国地壳运动观测网络项目组, 2008. GPS 测定的 2008 年汶川 M_s 8.0 地震的同震位移场. 中国科学(D 辑):地球科学, **38**(10):1195~1206.
- 周硕愚, 吴云, 江在森, 等, 2017. 地震大地测量学. 武汉: 武汉大学出版社.
- 朱文耀, 程宗颐, 熊永清, 等, 1997. 利用 GPS 技术监测青藏高原地壳运动的初步结果. 中国科学:D 辑, **27**(5):385~389.
- Blewitt G, Heflin M B, Hurst K J, et al, 1993. Absolute far-field displacements from the 28 June 1992 Landers earthquake sequence. Nature, **361**(6410):340~342.
- Chen X, Peng J H, Motagh M, et al, 2020a. Co-seismic deformation of the 2017 M_s 7.0 Jiuzhaigou earthquake observed with GaoFen-3 interferometry. Int J Remote Sens, **41**(17):6618~6634.
- Chen Y G, Ding K H, Wang Q, et al, 2020b. A refined slip distribution of the 2013 M_w 6.7 Lushan, China earthquake constrained by GPS and levelling data. Geophys J Int, **222**(1):572~581.
- DeCelles P G, Robinson D M, Quade J, et al, 2001. Stratigraphy, structure, and tectonic evolution of the Himalayan fold-thrust belt in western Nepal. Tectonics, **20**(4):487~509.
- Diao F Q, Wang R J, Wang Y B, et al, 2018. Fault behavior and lower crustal rheology inferred from the first seven years of postseismic GPS data after the 2008 Wenchuan earthquake. Earth Planet Sci Lett, **495**:202~212.
- Elliott J R, Jolivet R, González P J, et al, 2016. Himalayan megathrust geometry and relation to topography revealed by the Gorkha earthquake. Nat Geosci, **9**(2):174~180.
- Galetzka J, Melgar D, Genrich J F, et al, 2015. Slip pulse and resonance of the Kathmandu Basin during the 2015 Gorkha earthquake, Nepal. Science, **349**(6252):1091~1095.
- Grandin R, Vallée M, Satriano C, et al, 2015. Rupture process of the M_w = 7.9 2015 Gorkha earthquake (Nepal): insights into Himalayan megathrust segmentation. Geophys Res Lett, **42**(20):8373~8382.
- Hartzell S, Mendoza C, Ramirez-Guzman L, et al, 2013. Rupture history of the 2008 M_w 7.9 Wenchuan, China, earthquake: evaluation of separate and joint inversions of geodetic, teleseismic, and strong-motion data. Bull Seismol Soc Am, **103**(1):353~370.
- Hong S Y, Zhou X, Zhang K, et al, 2018. Source model and stress disturbance of the 2017 Jiuzhaigou M_w 6.5 earthquake constrained by InSAR and GPS Measurements. Remote Sens, **10**(9):1400.
- Huang Y, Qiao X J, Freymueller J T, et al, 2019. Fault geometry and slip distribution of the 2013 M_w 6.6 Lushan earthquake in China constrained by GPS, InSAR, leveling, and strong motion data. J Geophys Res:Solid Earth, **124**(7):7341~7353.
- Jiang Z S, Wang M, Wang Y Z, et al, 2014. GPS constrained coseismic source and slip distribution of the 2013 M_w 6.6 Lushan, China, earthquake and its tectonic implications. Geophys Res Lett, **41**(2):407~413.
- Lai X A, Wu X H, Seeber G, et al, 1992. The first epoch western Yunnan GPS survey: data reduction and analysis with Geonap software. Earthq Res China, **6**(1):68~90.

- Li X X, Zheng K, Li X, et al, 2019. Real-time capturing of seismic waveforms using high-rate BDS, GPS and GLONASS observations: the 2017 M_w 6.5 Jiuzhaigou earthquake in China. *GPS Solut*, **23**(1): 17.
- Liu C L, Zheng Y, Wang R J, et al, 2016. Rupture processes of the 2015 M_w 7.9 Gorkha earthquake and its M_w 7.3 aftershock and their implications on the seismic risk. *Tectonophysics*, **682**: 264~277.
- Liu G, Xiong W, Wang Q, et al, 2019. Source characteristics of the 2017 M_s 7.0 Jiuzhaigou, China, earthquake and implications for recent seismicity in eastern Tibet. *J Geophys Res: Solid Earth*, **124**(5): 4895~4915.
- Liu-Zeng J, Zhang Z, Wen L, et al, 2009. Coseismic ruptures of the 12 May 2008, M_s 8.0 Wenchuan earthquake, Sichuan: East-west crustal shortening on oblique, parallel thrusts along the eastern edge of Tibet. *Earth Planet Sci Lett*, **286**(3~4): 355~370.
- Lou Y D, Zhang W X, Shi C, et al, 2014. High-rate (1-Hz and 50-Hz) GPS seismology: Application to the 2013 M_w 6.6 Lushan earthquake. *J Asian Earth Sci*, **79**: 426~431.
- Melgar D, Crowell B W, Bock Y, et al, 2013. Rapid modeling of the 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki earthquake with seismogeodesy. *Geophys Res Lett*, **40**(12): 2963~2968.
- Pandey M R, Tandukar R P, Avouac J P, et al, 1995. Interseismic strain accumulation on the Himalayan crustal ramp (Nepal). *Geophys Res Lett*, **22**(7): 751~754.
- Press F, 1965. Displacements, Strains, and Tilts at teleseismic distances. *J Geophys Res*, **70**(10): 2395~2412.
- Seeber G, Lai X, 1990. A GPS survey in the Yunnan earthquake experimental field objectives and first results. In: Vyskocil P, Reigber C, Cross P A. *Global and Regional Geodynamics*. New York: Springer-Verlag, 11~14.
- Shen Z K, Sun J B, Zhang P Z, et al, 2009. Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 2008 Wenchuan earthquake. *Nat Geosci*, **2**(10): 718~724.
- Sun J B, Yue H, Shen Z K, et al, 2018. The 2017 Jiuzhaigou earthquake: a complicated event occurred in a young fault system. *Geophys Res Lett*, **45**(5): 2230~2240.
- Tong X P, Sandwell D T, Fialko Y, 2010. Coseismic slip model of the 2008 Wenchuan earthquake derived from joint inversion of interferometric synthetic aperture radar, GPS, and field data. *J Geophys Res*, **115**(B4): B04314.
- Wan Y G, Shen Z K, Bürgmann R, et al, 2017. Fault geometry and slip distribution of the 2008 M_w 7.9 Wenchuan, China earthquake, inferred from GPS and InSAR measurements. *Geophys J Int*, **208**(2): 748~766.
- Wang K, Fialko Y, 2015. Slip model of the 2015 M_w 7.8 Gorkha (Nepal) earthquake from inversions of ALOS-2 and GPS data. *Geophys Res Lett*, **42**(18): 7452~7458.
- Wang M, Shen Z K, 2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications. *J Geophys Res: Solid Earth*, **125**(2): e2019JB018774.
- Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, et al, 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements. *Science*, **294**(5542): 574~577.
- Wang Q, Qiao X J, Lan Q G, et al, 2011. Rupture of deep faults in the 2008 Wenchuan earthquake and uplift of the Longmen Shan. *Nat Geosci*, **4**(9): 634~640.
- Wang Q L, Cui D X, Zhang X, et al, 2009. Coseismic vertical deformation of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake from repeated levelings and its constraint on listric fault geometry. *Earthq Sci*, **22**(6): 595~602.
- Wang X, Wei S J, Wu W B, 2017. Double-ramp on the Main Himalayan Thrust revealed by broadband waveform modeling of the 2015 Gorkha earthquake sequence. *Earth Planet Sci Lett*, **473**: 83~93.
- Whipple K X, Shirzaei M, Hodges K V, et al, 2016. Active shortening within the Himalayan orogenic wedge implied by the 2015 Gorkha earthquake. *Nat Geosci*, **9**(9): 711~716.
- Wobus C, Heimsath A, Whipple K, 2005. Active out-of-sequence thrust faulting in the central Nepalese Himalaya. *Nature*, **434**(7036): 1008~1011.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Liang H B, et al, 2016. Coseismic deformations of the 2015 M_w 7.8 Gorkha earthquake and interseismic strain accumulation in the Himalayan tectonic belt and Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, **670**: 144~154.
- Xu C J, Liu Y, Wen Y M, et al, 2010. Coseismic slip distribution of the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake from joint inversion of GPS and InSAR data. *Bull Seismol Soc Am*, **100**(5B): 2736~2749.
- Yin H T, Wdowinski S, Liu X Q, et al, 2013. Strong ground motion recorded by high-rate GPS of the 2008 M_s 8.0 Wenchuan earthquake, China. *Seismol Res Lett*, **84**(2): 210~218.

- Yue H, Simons M, Duputel Z, et al, 2016. Depth varying rupture properties during the 2015 M_w 7.8 Gorkha (Nepal) earthquake. *Tectonophysics*, **714~715**: 44~54.
- Zhang G H, Hetland E, Shan X J, 2015. Slip in the 2015 M_w 7.9 Gorkha and M_w 7.3 Kodari, Nepal, earthquakes revealed by seismic and geodetic data; delayed slip in the gorkha and slip deficit between the two earthquakes. *Seismol Res Lett*, **86**(6) : 1578~1586.
- Zhang G H, Hetland E A, Shan X J, et al, 2016. Triggered slip on a back reverse fault in the M_w 6.8 2013 Lushan, China earthquake revealed by joint inversion of local strong motion accelerograms and geodetic measurements. *Tectonophysics*, **672~673**: 24~33.
- Zhang P Z, Wen X Z, Shen Z K, et al, 2010. Oblique, high-angle, listric-reverse faulting and associated development of strain; the Wenchuan earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China. *Annu Rev Earth Planet Sci*, **38**: 353~382.
- Zhang Y, Wang R J, Walter T R, et al, 2017. Significant lateral dip changes may have limited the scale of the 2015 M_w 7.8 Gorkha earthquake. *Geophys Res Lett*, **44**(17) : 8847~8856.
- Zhang Y F, Zhang G H, Hetland E A, et al, 2018. Source Fault and slip distribution of the 2017 M_w 6.5 Jiuzhaigou, China, earthquake and its tectonic implications. *Seismol Res Lett*, **89**(4) : 1345~1353.
- Zhao D F, Qu C Y, Shan X J, et al, 2018. InSAR and GPS derived coseismic deformation and fault model of the 2017 M_s 7.0 Jiuzhaigou earthquake in the Northeast Bayanhar Block. *Tectonophysics*, **726**: 86~99.
- Zhao W J, Nelson K D, Che J, et al, 1993. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet. *Nature*, **366**(6455) : 557~559.

Seismo-geodetic Measurements and Analysis of Some Recent Large Earthquakes

Liu Gang¹⁾ Qiao Xuejun¹⁾ Wang Qi²⁾

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

2) China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract Seismogeodesy is a developing discipline jointing the seismology and tectonics with its ability of determining the geophysical field associated with earthquake-cycle, in which the measured deformation ranging in 10^2 a ~ 10^{-2} s fills-up the gap between seismology and tectonics. The Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC) composed with the multiple space geodesy technologies that are capable of broadband observations not only depicts the image of crustal deformation in China, but also plays an important role in measuring the displacement associated with the large earthquake, such as the 2008 Wenchuan earthquake, 2013 Lushan earthquake, 2015 Gorkha earthquake and 2017 Jiuzhaigou earthquake. For these above earthquakes the geodetic measurements from static/high rate GNSS, InSAR and Leveling construct the coseismic displacement field, and contribute to the studies of source kinematics, intraplate earthquake mechanism, and earthquake early warning. However, the limited resolution of CMONOC at present is not sufficient enough to develop demands of seismogeodesy, and the farther enhancement is needed.

Keywords: Seismogeodesy; Coseismic displacement; GNSS; InSAR