

王琪, 乔学军, 2020. 中国地震大地测量——半个世纪的历程与科学贡献. 中国地震, 36(4): 647~659.

中国地震大地测量 ——半个世纪的历程与科学贡献

王琪¹⁾ 乔学军²⁾ 游新兆³⁾

1) 中国地质大学(武汉), 武汉 430074

2) 中国地震局地震研究所, 武汉 430071

3) 中国地震台网中心, 北京 100045

摘要 自 1966 年邢台地震以来, 中国尝试用大地测量手段监测地震变形, 至 1976 年唐山地震, 变形监测到达高潮, 但受地面技术局限, 20 余年可以用于分析震源的震例寥寥。自 20 世纪 90 年代初全面进入空间观测时代以来, 境内或边邻 6 级以上强震大多数有相应的近场变形观测和破裂模型研究, 这其中又以 2001 年昆仑山口西、2008 年汶川和 2015 年廓尔喀 3 次特大地震的变形资料相对完整、破裂特征清晰、理论成果丰富, 成为近期大陆内部最引人注目的大震事件。近 30 年来, 对包括中国台湾在内的 60 余次强震变形的系统研究丰富了人们对区域地震活动性及危险性的认识, 也为青藏高原构造演化研究提供了观测依据与理论参考。半个世纪积累的经验、夯实的基础以及未解的难题更为未来的地震大地测量提供了历史借鉴、前进动力和发展方向。

关键词: 中国大陆 地震变形 空间大地测量

[文章编号] 1001-4683(2020)04-0647-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震威胁人身安全、危及社会稳定, 唐山、汶川地震级别的大震更是灾难。天然地震活动是窥视地球内部的一扇窗口, 大地震更是昭示自然规律的难得机会, 近些年印尼、日本巨震及汶川、廓尔喀特大地震为地球科学发展、减灾技术创新创造了条件。

认识地震成因机制乃至预报地震离不开对地震变形的解析, 地震大地测量应运而生, 围绕震源展开观测模拟, 研究孕震的构造物理及破裂的发生机制, 最早研究震例可追索到美国加州 1863 年海沃德 8 级大震 (Yu et al, 1996)。作为交叉学科, 彼时理论尚待完善, 观测技术更是低下, 百年来成功案例屈指可数, 与后来居上的地震波观测比相形见绌。20 世纪 80 年代初 GPS 横空出世, 到 1989 年美国加州洛马普列塔地震时, 高精度 GPS 崭露头角 (Segall et al, 1990), 到 1992 年加州兰蒂斯地震时已堪当大任 (Hudnut et al, 1994), 此时连续、实时的 GPS 监测呼之欲出, 卫星 InSAR 更是大放异彩 (Massonnet et al, 1993), 基于位错理论的模

[收稿日期] 2020-06-30; [修定日期] 2020-08-26

[项目类别] 国家自然科学基金(41731071)资助

[作者简介] 王琪, 男, 1962 年生, 教授, 主要从事大地测量与构造物理方面的研究。E-mail: wangqi@cug.edu.cn

型建构大行其道 (Segall et al, 1990), 地震大地测量从此走进新时代。

中国与时俱进, 建成“中国大陆构造环境监测网络”, GPS 监测到 7 级玉树、芦山、九寨沟大震、8 级昆仑山、汶川、廓尔喀特大地震以及 9 级苏门答腊、日本巨震。InSAR 研究起步稍晚, 早期数据来源不畅, 处理软件匮乏, InSAR 犹如“旧时王谢堂前燕”; 直到 21 世纪技术瓶颈才逐步打破, 如今 InSAR 早已“飞入寻常百姓家”, 成为专业研究生起步的不二之选。30 年来, 从基础建设到经费投入, 从人才培养到成果产出, 中国均走在世界前列, 从事地震大地测量的科研、教学单位二十有余, 专业队伍远超百人 (不包括中国香港、中国台湾), 是全球减灾事业的新生力量。

本文主要回顾 GPS 和 InSAR 在震源几何、运动学研究方面的进展。限于篇幅, 省略了其他手段 (重力、北斗、高频 GNSS 等) 在此领域的贡献。需要说明的是, 广义的地震大地测量涉及地震变形的全过程, 本文虽没有提及震间、震前和震后阶段中国地震大地测量的发展状况, 但本专辑有专文详解, 敬请关注。

1 从邢台地震到唐山地震

1966 年初云南东川发生 6.5 级地震, 国家测绘总局组织了对震区内大地控制网的复测, 应是国内地震大地测量的开端。当时全国尚无专门机构和专业人员, 好在全国大地控制网大体完成, 及时支撑了此后 10 年 7 次大震的变形监测 (陈运泰等, 1975、1979; 国家地震局地震测量队, 1977; 黄立人等, 1988; 王椿镛等, 1978; 朱成男等, 1976; 曹新菊等, 1985), 至今仍是 中国地震大地测量的骄傲 (表 1)。从邢台地震到唐山地震的这 10 年, 地震大地测量事业蓬勃发展, 招募人员、健全机构, 围绕华夏大地频频显现的灾害性大地震, 广泛开展观测, 判断地震趋势, 任务之艰前所未有, 这个时期观测手段以三边测量和几何水准为主 (重力测量与相关研究不在本文介绍范围, 下同), 测边精度大致在 1 分米左右, 水准点精度可优于厘米, 以如此精度监测形变异常、服务地震预报实属理想, 但用于分析大震震源, 例如发震断层位置、破裂性质还基本可行, 至少对 5 次大震的机制研究发挥了作用, 至今仍不失学术价值。

表 1 常规大地测量时期的 7 级地震观测及研究情况

地震事件	变形监测	震源约束
1966 年邢台 7.2 级	约 33 个三角网点和 10 个水准点	单、多断层均匀位错
1970 年通海 7.7 级	15 个三角网点 36 条边长, 35 个水准点	单、六断层均匀位错
197 年炉霍 7.9 级	13 个三角网点 22 条边长, 1 条水准测线路 (约 35 点)	单断层均匀位错
1974 年永善 7.1 级	5 个三角网点 7 条边长, 1 条水准测线路 (11 点)	无
1975 年海城 7.3 级	11 个三角网点 13 条边长, 2 条水准环线	无
1976 年龙陵 7.4 级	15 个三角网点 15 条边长	无
1976 年唐山 7.8 级	25 个三角网点 61 条边长, 12 条水准环线 (116 点)	单、多断层均匀位错, 形变与地震数据联合反演
1988 年澜沧-耿马 7.6 级、7.2 级	10 个三角网点 16 条边长, 1 条水准测线路 (22 点)	两断层均匀位错
1990 年共和 7.0 级	2 条水准测线路 (27 点)	单断层均匀位错, 水准与地震数据联合反演

为此,黄立人等(1988)拓展了传统测量平差理论,提出适用于变形分析的伪逆法平差算法,陈运泰等(1975)发展了基于断层位错的大地测量反演理论,并首先用于邢台地震变形数据反演,之后又反演了唐山地震的位错模式(陈运泰等,1979),并被推广到通海和炉霍地震的研究(王椿镛等,1978;黄立人等,1988)。这3次地震是那个时期研究比较充分的震例,地表勘察显示其均具有不均匀地表破裂,但以上建模只能约束断层破裂的基本特征,如破裂长度、宽度、平均破裂幅度等,表明以常规测量的精度和站点密度根本无法分辨大震的破裂细节。

改革开放前,10年中就有1969年渤海与1976年松潘7级地震因地形条件有限,未留有任何变形观测记录。改革开放后的前15年,我国7级左右地震仅有3次,分别是1985年乌恰7.3级、1988年澜沧-耿马7.6级、7.2级和1990年共和7.0级地震。乌恰地震震区布设有大地控制网,震后没有复测,澜沧-耿马和共和地震后只组织过小规模变形监测(刘玉权等,1993;巩守文等,1993),无法摆脱地形制约和提高精度,已使传统地震大地测量走到尽头。

时至今日,早先布设的大地控制网业已与全国GPS网联网平差,站点坐标从参心坐标系转换到地心参考系——2000中国大地坐标系,精度也适度提升(杨元喜,2009)。用GPS复测这些站点或可克服传统地震大地测量的先天不足,改善历史地震的研究现状,值得期待。汶川地震的实例表明,借助优化后的大地控制网,可弥补现有GPS站点不足,对一些特定地区(例如2001年昆仑山)的大震研究仍有重要价值(图1)。

2 新时代的地震变形监测

从1992年开始,GPS、InSAR替代常规测量,基本包揽全球陆地及近海地震变形监测任务。空间技术带给地震大地测量最大的变化就是观测灵活、精度高(毫米-厘米)、密度大,极大地方便建立各类量化的震源模型,不仅能有效约束发震断层位置,绝大多数还能分辨出一些破裂细节。新时代中国仍处于全球大陆地震的最高位,这期间十大($M_w > 7.5$)地震中,中国占六席,且2008年汶川地震位列第一,是难得的研究窗口期。1992~2001年间是我国初创阶段,GPS网点稀少,连续站更属凤毛麟角,国外SAR卫星对本区域的观测严重不足、获取不易,相关研究全部被国外垄断。1997年玛尼地震是这段时间最重要的事件,ERS卫星不仅首次展示青藏高原内部活动断层的变形状况(Peltzer et al,1999),更激发国内钻研InSAR技术的强烈动力。几年后王超等(2000)便独立处理ERS卫星资料,首次获取1996年张北地震InSAR图像,掀起了此后20年国内InSAR研究的滚滚热潮。

2001年昆仑山口西8.1级地震恰逢“中国地壳运动观测网络”建成,GPS首次记录到西藏大震变形。由于震区内各类GPS点不足50个,现已公布的34个GPS变形数据中(王永革等,2008),也只有12个靠近400km长的地表破裂带,虽能描述震区变形和断层破裂特征(图1),但对约束破裂分布没有实质帮助,现有模型主要来自InSAR的贡献(Lasserre et al,2005),这种局面到2008年汶川地震时,监测条件大为改观(图1),震后对龙门山地区展开地毯式监测,最多包括438个GPS测站和181个水准点形成的三维位移场(Wang et al,2011),为揭示更为复杂的变形细节和构造特征提供坚实基础(Wang et al,2011)。

除汶川地震,21世纪国内一些中等强震以及境外特大地震也有一些近场或远场GPS观测(Jiang et al,2014;He et al,2016;Li et al,2018;Liu et al,2019;梁洪宝等,2018;李瑜等,2015;赵斌等,2015),最值得提及的是2004年苏门答腊9级巨震(王敏等,2006),尽管远离

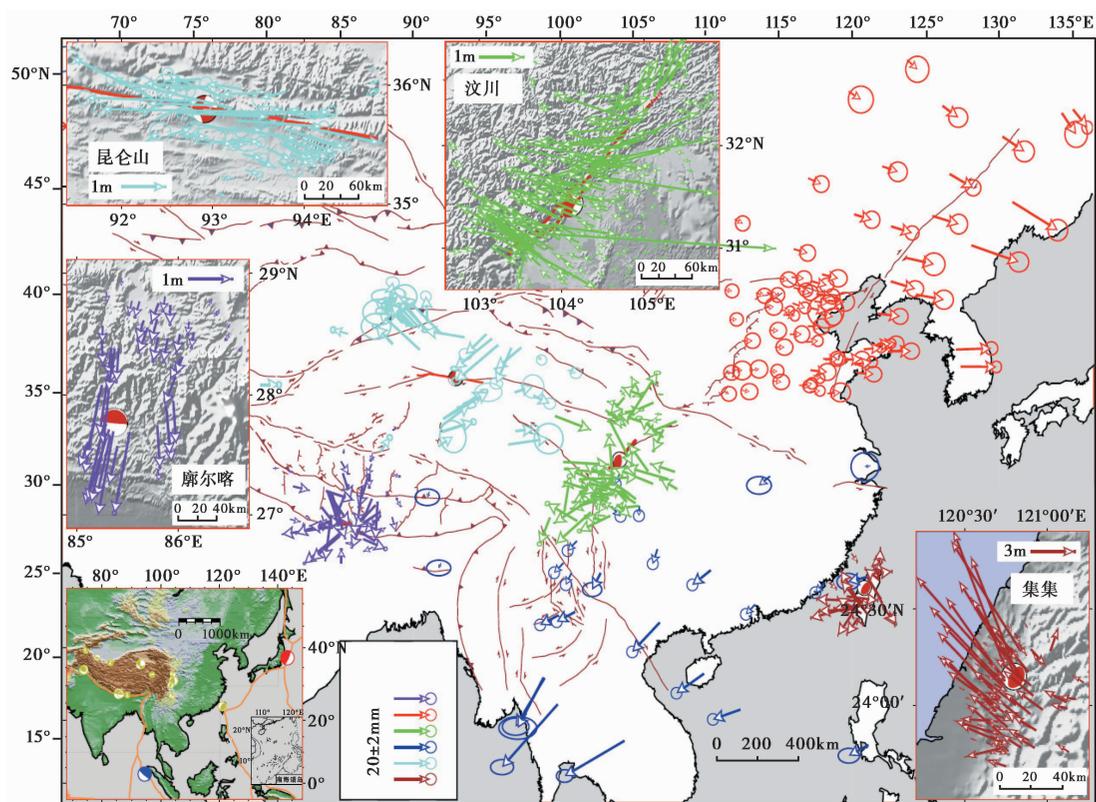


图 1 中国大陆地区特大地震 GPS 形变图

远场同震形变 GPS 观测示意图,用箭头矢量表示位移方向和幅度,椭圆为 1 倍中误差范围;颜色对应震源,蓝:集集地震,绿:昆仑山口西地震,红:汶川地震,棕:廓尔喀地震,黄:日本地震,青:苏门答腊地震;插图为主集集地震、昆仑山口西地震、汶川地震和廓尔喀地震近场位移图;主图所用数据大部分来自文献(王永革等,2008;国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组,2008;王敏等,2006,2011;赵斌等,2015),少量为本文补充;插图中集集地震数据来自 Yang 等(2000),汶川地震数据来自 Wang 等(2011),昆仑山口西和廓尔喀地震近场位移数据大部分为尚未公开的资料

中国大陆数千千米,但“中国地壳运动观测网络”位于华北、华南、西南的 10 个基准站首次记录到厘米级、指向震源的同震位移(图 1)。2011 年日本海沟又一次爆发 9 级地震,“中国大陆构造环境监测网络”位于东北、华北的几十个基准站更清晰、全面地记录到 1~4cm 的东向移动(王敏等,2011)。这些远场变形记录约束震源的价值有限,但对了解板缘巨震的远程效应,理解板缘、板内地震活动性的时空关联具有科学意义。

以国内现有的 GPS 站点密度,对于 $M_w 6.5$ 以上地震,GPS 才有用武之地——独立建模,而 InSAR 甚至可监测低至 $M_w 5.2$ 地震的变形(表 2)。包括中国台湾在内,迄今中国大陆及邻区 50 多次强震具有 InSAR 变形图(表 2),占本文所列目录的绝大多数,涵盖了所有类型,国内尚未涉足的震例仅占目录极少数,值得注意的是近 10 年发生的中小地震仅见国内研究,大震则有国外参与甚至主导。当前国内所用图像资料全部来自国外卫星,主要基于欧洲和日本 SAR 卫星的开放性图像,在国际学术竞争中处于不利地位。

表 2 空间时代中国及邻区地震变形观测目录

事件地点	时间 (年-月-日)	矩震级	破裂 性质	观测状况	事件地点	时间 (年-月-日)	矩震级	破裂 性质	观测状况
西藏尼木	1992-07-30	6.1	正断	ERS-1	青海玉树	2010-04-13	6.9	走滑	ENVISAT ALOS GPS
西藏 定日朋曲	1993-03-20	6.2	正断	ERS-1	缅甸塔莱	2011-03-24	6.8	走滑	ALOS RADASAT-2
云南孟连	1995-07-11	6.8	走滑	JERS-1	印度锡金	2011-09-18	6.9	走滑	GPS
云南丽江	1996-02-03	6.6	正断	JERS-1	中国台湾雾台	2012-02-26	5.9	走滑	GPS
新疆 喀拉山口	1996-11-29	6.6	走滑	ERS-1/2	中国台湾南投	2013-03-27	6.1	走滑	GPS
西藏玛尼	1997-11-08	7.6	走滑	ERS-1/2	四川芦山	2013-04-20	6.6	逆冲	RADARSAT-2 GPS 水准
内蒙古张北	1998-01-10	5.7	走滑	ERS-1/2	中国台湾南投	2013-06-27	6.3	走滑	GPS
印度杰莫利	1999-03-28	6.6	逆冲	ERS-1/2 GPS	中国台湾纵谷	2013-10-31	6.2	走滑	GPS
中国 台湾集集	1999-09-20	7.6	逆冲	ERS-1/2 GPS	新疆民丰	2014-02-14	6.9	走滑	GPS
青海 可可西里	2001-11-14	7.8	走滑	ERS-1/2 GPS	云南鲁甸	2014-08-03	6.2	走滑	RADASAT-2 GPS
西藏双湖	2003-07-07	5.8	正断	ENVISAT	云南景谷	2014-10-07	6.0	走滑	RADASAT-2
新疆昭苏	2003-12-01	6.1	逆冲	ENVISAT	四川康定	2014-11-22	6.2	走滑	Sentinel
俄罗斯 阿勒泰	2003-09-20	7.2	走滑	ENVISAT	尼泊尔廓尔喀	2015-04-24	7.9	逆冲	ALOS-2 Sentinel RADARSAT-2 GPS
中国 台湾成功	2003-12-10	6.8	逆冲	GPS	西藏樟木	2015-05-12	7.3	逆冲	ALOS-2 Sentinel RADARSAT-2 GPS
西藏班戈	2004-03-27	6.0	正断	ENVISAT	新疆皮山	2015-07-03	6.3	逆冲	ALOS- Sentinel GPS
西藏仲巴	2004-07-11	6.2	正断	ENVISAT	塔吉克 穆尔加布	2015-12-07	7.2	走滑	ALOS-2 Sentinel GPS
西藏仲巴	2005-04-07	6.2	正断	ENVISAT	青海门源	2016-01-20	6.0	逆冲	Sentinel
蒙古 哈坦布拉格	2005-07-20	5.2	正断	ENVISAT	中国台湾美浓	2016-02-05	6.4	逆冲	Sentinel GPS
巴基斯坦 克什米尔	2005-10-08	7.6	逆冲	ENVISAT GPS	西藏定结	2016-05-22	5.3	正断	Sentinel
中国 台湾卑南	2003-12-10	6.1	走滑	GPS	吉尔吉斯 苏乌萨米尔	2016-06-26	6.5	逆冲	Sentinel
西藏 日土阿鲁错	2007-05-05	6.1	正断	ENVISAT	青海杂多	2016-10-17	5.9	走滑	Sentinel
云南宁洱	2007-06-02	6.1	走滑	ENVISAT	新疆木吉	2016-11-25	6.6	走滑	Sentinel ALOS-2 GPS
蒙古布锡因	2008-01-09	5.2	正断	ENVISAT ALOS	新疆呼图壁	2016-12-08	6.0	逆冲	Sentinel

续表 2

西藏改则	2008-01-09	6.4	正断	ENVISAT ALOS	四川九寨沟	2017-08-08	6.5	走滑	ENVISAT ALOS GPS Sentinel ADARSAT-2 ALOS-2 高分三号 GPS
新疆于田	2008-03-21	7.1	正断	ENVISAT ALOS GPS	新疆塔什库尔干	2017-05-10	5.5	正断	Sentinel
四川汶川	2008-05-12	7.9	逆冲走滑	ENVISAT ALOS GPS 水准	新疆精河	2017-08-08	6.3	逆冲	Sentinel
西藏仲巴	2008-08-25	6.7	正断	ENVISAT ALOS	西藏米林	2017-11-17	6.3	逆冲	Sentinel GPS
吉尔吉斯奴拉	2008-10-05	6.6	逆冲走滑	ENVISAT ALOS	中国台湾花莲	2018-02-07	6.4	逆冲	Sentinel GPS
西藏当雄	2008-10-06	6.3	正断	ENVISAT	西藏谢通门	2018-12-23	5.6	正断	Sentinel
青海大柴旦	2008-11-10	6.3	逆冲	ENVISAT	四川长林	2019-07-09	5.7	走滑	Sentinel GPS
云南姚安	2009-07-09	5.7	走滑	ENVISAT	新疆阿图什	2020-01-19	6.0	逆冲	Sentinel
青海大柴旦	2009-08-28	6.3	逆冲	ENVISAT	西藏定日	2020-03-20	5.6	正断	Sentinel
中国台湾甲仙	2010-03-04	6.3	逆冲	GPS	新疆民丰	2020-06-25	6.3	正断	Sentinel

1992年尼木地震是最早被 InSAR 观测到的西藏地震 (Elliott et al, 2010), 相邻区域 2008 年又一次发生当雄地震 (Elliott et al, 2010)。这 2 次中等地震发生在近 SN 向亚东-谷露地堑系的正断层, 1993 年、2020 年 2 次定日地震以及 2004~2008 年间 3 次仲巴系列强震则涉及另外 2 条地堑 (Elliott et al, 2010)。同期藏北也发生数次正断型事件, 如 2003~2004 年双湖地震 (Ji et al, 2016)、2007 年阿鲁错地震 (温扬茂等, 2015)、2008 年改则地震及于田地震 (Elliott et al, 2010), 虽早已有大量的震源机制解佐证, 但 InSAR 观测无疑展示了更多的细节。

1996 年新疆康西瓦喀拉山口 7 级地震后 (Qiu et al, 2019), 又紧接发生 4 次走滑型地震。这些大震皆位于松潘-甘孜地块, 其中玛尼地震发生在高原腹地 (Peltzer et al, 1999), 此前只有 1950 年崩错地震与之可比, 不久其东北侧可可西里又发生 8 级地震 (万永革等, 2008), 这 2 次地震虽有丰富地表破裂, 但 InSAR 帮助分析断层深部破裂, 意义格外不同。

2010 年玉树地震是 5 次走滑事件中研究最为充分的一次 (Li et al, 2011), 从 2 颗卫星高清晰、全覆盖干涉图可以提取高精度视线向位移和低精度沿轨方位向位移图像, 现有总计 12 个模型中, 大部分展示 3 个集中破裂区 (例如 Zha et al, 2011), 少量则显示 2 个或 4 个破裂区, 模型在细节上差异明显, 固然此次超剪切破裂事件具有复杂性, 但 InSAR 一维标量数据对模型的约束仍力有不逮 (不及二维 GPS 矢量数据), 建模易受诸如数据降采样、权重比、平滑因子、断层几何等因素的影响也是原因之一。

川滇及南北地震带自 1995 年武定及孟连地震算起, 先后发生多达 10 多次 6 级以上地震, 这段时期内的大部分地震均有质量不等的 InSAR 变形图像。川滇地区植被茂密、地势崎岖, 尤不利于 InSAR 观测, 恰遇多颗卫星接替, 例如孟连地震时, C 波段 ERS-1/2 完全失相干, 幸有 L 波段 JERS 能形成干涉 (Ji et al, 2017a), 类似情况还有 1996 年丽江地震 (Ji et al,

2017);而 2013 年芦山地震、2014 年鲁甸地震时 ENVISAT 和 ALOS 均告失效,难得的是 RADARSAT-2 可用(刘云华等,2014;Niu et al,2020)。

汶川地震 ENVISAT 图像仅覆盖成都平原部分区域,好在 ALOS 图像能覆盖整个震区(Shen et al,2009),虽有部分图像受电离层干扰严重,但整体上仍能反映近场变形的真实形态,完整地揭示出长达 300km 的发震断层破裂分布特征。类似状况也出现在喜马拉雅地区,2005 年克什米尔地震 ENVISAT 影像由于严重失相干,早期只能用像素偏移法解算的三维位移场来约束震源模型(Wang et al,2007),近来借助一些特殊处理方法,可局部恢复干涉条纹(Yan et al,2013)。廓尔喀地震 Sentinel 图像虽能产生完整的干涉条,但干涉条纹实际上扭曲了真实变形,研究者多基于 ALOS-2 干涉图建模(Wang et al,2015)。这些震例,包括 2008 年于田地震(Shan et al,2011),说明陡峭地形、冰川和高植被地貌仍是 C 波段 SAR 卫星的魔。

甘青及西北边域一系列中强地震的 InSAR 图像质量明显高于川滇地区,例如德令哈在 2003~2009 年间连续发生 M_w 6 左右地震,从时空上分为 2003~2004 年和 2008~2009 年德令哈-大柴旦震群,ENVISAT 均给出清晰的干涉图(Elliott et al,2011;Liu et al,2015)。帕米尔东北缘和西南天山出现过 1996~2003 年阿图什-伽师和 2008~2017 年奴拉-木吉 2 个震群,只有后者观测良好(表 2),而 InSAR 在 2015 年塔吉克、2003 年阿勒泰 2 次 M_w 7.2 及中天山 2016~2017 年间昭苏、精河和呼图壁 3 次 M_w 6 级别强震留下较好的图像(Barbot et al,2008;Sangha et al,2017;Gong et al,2019;Wang et al,2019)。值得注意的是,InSAR 观测对喜马拉雅、天山逆冲型地震 SN 向变形不敏感,可能不会记录到全部变形信息,甚至难以观测到 M_w 6.1 以下的地震变形。

基于 InSAR 的模型反演显示,天山、西藏、川滇地区中强地震破裂形态大多简单,基本表现为单一断层面上 10~20km 尺度的集中破裂区。这些破裂集中区,破裂深度 15km 以上、不出露地表,最大错动幅度 1m 左右,应力降在 3~5MPa。但有少量例外,奴拉地震、鲁甸地震和九寨沟地震涉及 2 条断层破裂(Teshebaeva et al,2014;Niu et al,2020;Sun et al,2018),丽江地震与木吉地震则涉及 1 条断层内 2 个区段,具有 2 个分离的破裂点(Ji et al,2017b;Li et al,2018)。

中国台湾地处欧亚-菲律宾板块相互挤压的关键部位,地震频繁,近期最大的地震是 1999 年集集 M_w 7.6 地震,基于遍布全岛的近 300 个 GPS 测站,其中连续站 40 座(Yang et al,2000),密集程度之高、覆盖之完整,少有出其右者。ERS-2 虽能产出同震位移 InSAR 图,但图形数据不完整(Pathier et al,2003),此次震源模拟仍基于 GPS 结果,此后 9 次地震基本也以固定台网 GPS 监测为主,只有最近 2 次用 Sentinel 图像作为参考(表 2)。集集地震及其他地震凸显近距离、高密度、三维 GPS 观测可产出精细模型,在剖析复杂的大震破裂上比 InSAR 观测更优越,这也被汶川地震 GPS 观测实践所验证。

3 科学贡献与挑战

纵观半个世纪中国地震大地测量表现,不仅空间监测的质量大幅提高,大震破裂分布清晰可辨,观测效率也大为提高,不到 30 年就有 60 多个大、小地震具有详细的变形观测记录,遍及整个西部地区。中国仅是见证全球地震大地测量同步发展的一个缩影,据不完全统计,

迄今具有大地测量约束的震例接近 300(早期震例不足 30 个),成功震例成倍增加,遍及除南极大陆的所有陆地。整合这些震例可构建一个信息完备的新型强震分目录,与收录了数以万计强震事件的地震学目录(例如 gCMT)相比,基于大地测量震例虽属九牛一毛,但例例珠玑,其科学贡献主要表现在如下三方面:

(1)优化现今地震目录。目前地震学目录依赖全球地震台网的远场监测,震源定位很大程度取决于地震波到时和传播速度,定位精度在数十千米水平,定位误差与地球内部三维速度结构复杂性有关。大地测量近距离精准观察地震变形,由其推算中小地震震中,精度可在 2~3km 内,因此近场的地震大地测量方法实际上要比远距离遥测的地震学方法准确。经大地测量约束的震源信息可作为现有地震目录的外部检核,尤其是用来评估现有用于定位的波速模型误差。初步对比近 50 个 InSAR 地震定位和 gCMT 定位结果,显示 gCMT 震源位置平均偏差 21km(Weston et al, 2011),EHB 目录中震源位置相对准确(Robert et al, 1998),与 InSAR 结果相比水平偏差减少至 11km,深度系统差为 5km。随着震例不断增加,精密震源分布不断扩大,地震大地测量在修订地球三维速度模型,提高区域小震定位精度,实有远大前程。

(2)强化地震活动性研究。现代地震台网波形使得震源不再限于一点,而是沿断层走向的某一区段、沿倾向的某一层面的破裂形态。但仅用波形反演,模型精准度难以保证。例如汶川破裂的地震波模型彼此差异显著,远不及大地测量模型间良好的一致性(Shen et al, 2009; Wang et al, 2011),而 2008 年、2009 年大柴旦震群大地测量模型破裂位置的确定,轮廓分明、量化清晰,可以判断后续的地震沿高角度、南倾的单一断面向北迁移(Elliott et al, 2011);类似研究还有 2008 年改则地震,清晰的 InSAR 图像有助于分离 M_w 6.4 主震和 M_w 5.9 余震变形,对岩石孔隙水压变化触发余震作了最好诠释(He et al, 2010)。

以汶川地震和廓尔喀地震为例,这 2 次事件的震级相同、性质相似,而依据大地测量模型,汶川破裂面长而窄,沿相距不远两处高倾角断层穿透地表,释放了龙门山中段断层累积的全部应力(Shen et al, 2009);而廓尔喀的破裂面相对短而宽,呈现倾角平缓的破裂方式,以致位于加德满都下方一半左右的喜马拉雅主冲断层安然无恙(Wang et al, 2015)。如此,这两处的地震形势自然有不同解读,未来龙门山地区的地震活动性应向两端发展,而中段趋于平缓;尼泊尔中部大震危险性不会缓解,且向加德满都以南转移。

(3)深化对活动构造的认识。地震是大陆活动构造的基本特征,更透射出大陆演化的万千气象。20 世纪 80 年代, Molnar 等(1984)基于断层调查估算近一个世纪内大震矩张量级青藏高原重要断层滑动速率,此后 Molnar 等(1989)又以 25 年间 38 次强震震源机制解证实青藏高原南缘以挤压变形为主,藏南以拉张为主,藏北到祁连以走滑为主,并结合矩张量分析,具体厘定在青藏内部活动地块的运动趋势,归纳出青藏高原内部地块向东挤出的基本论断,这一系列地震学研究奠定了亚洲活动构造的总基调,其运动学图像为此后 GPS 精准观测所厘定(Wang et al, 2001)。

历史大震少有确定性的记录,可确定的破裂状况仅限于局部地段,更不能及地底,惟有借助各项空间观测,实现了强震和大震破裂机制和分布统一解算,我们才见证了活动断层现今变形、错断过程,全面了解断层震间蠕变、同震错断与周边变形响应、断层浅表形貌与深部结构的关联,进而了解断层应力积累与释放机理,特定区域内地震迁移与应力的分解和造

山演化等基础性问题。

短短 30 年,高新技术让我们能深入研究多次大震事件,观测集集地震、克什米尔地震、汶川地震使我们清楚山前反序断坡破裂如何调节地块间挤压变形,分析集集地震、汶川地震和廓尔喀地震的变形场,使我们明白造山带边缘滑脱构造如何造就中央山脉、龙门山和喜马拉雅;而对玛尼地震、昆仑山地震、玉树地震的研究则勾勒出一条联系昆仑山、鲜水河断层、与 EW 向班公湖-嘉黎对应的大型断裂系统,让我们意识到藏北多条似乎分离的走滑断层的协同如何促使青藏高原向东挤出。

如果观测持续不断,更为精准细致揭示地震变形过程,我们对大陆演化的认识定能更上一层楼。然而既往实践表明,以欧洲和日本卫星为主的地震 InSAR 监测暴露出能力不足和技术短板,至少 25 个 M_w 6.0~7.1 地震错过监测(图 2)或效果不佳,尤其是欧洲和日本的新、旧卫星不能无缝交接,2000~2003 年及 2011~2014 年间问题尤为突出。亚洲复杂的山地环境影响图像效果,例如 C 波段卫星在地形起伏大、植被密集高原边缘地带难有作为,而 L 波段图像精准度低,受电离层干扰严重。着眼未来,实现对整个中国大陆地震带全覆盖,亟需中国 SAR 卫星,扭转图像资料完全依赖国外的局面,而补足短板、兼顾 2 种地形地貌条件的变形监测,需要研发类似 HJ-1C 的 S 波段中国环境监测卫星。

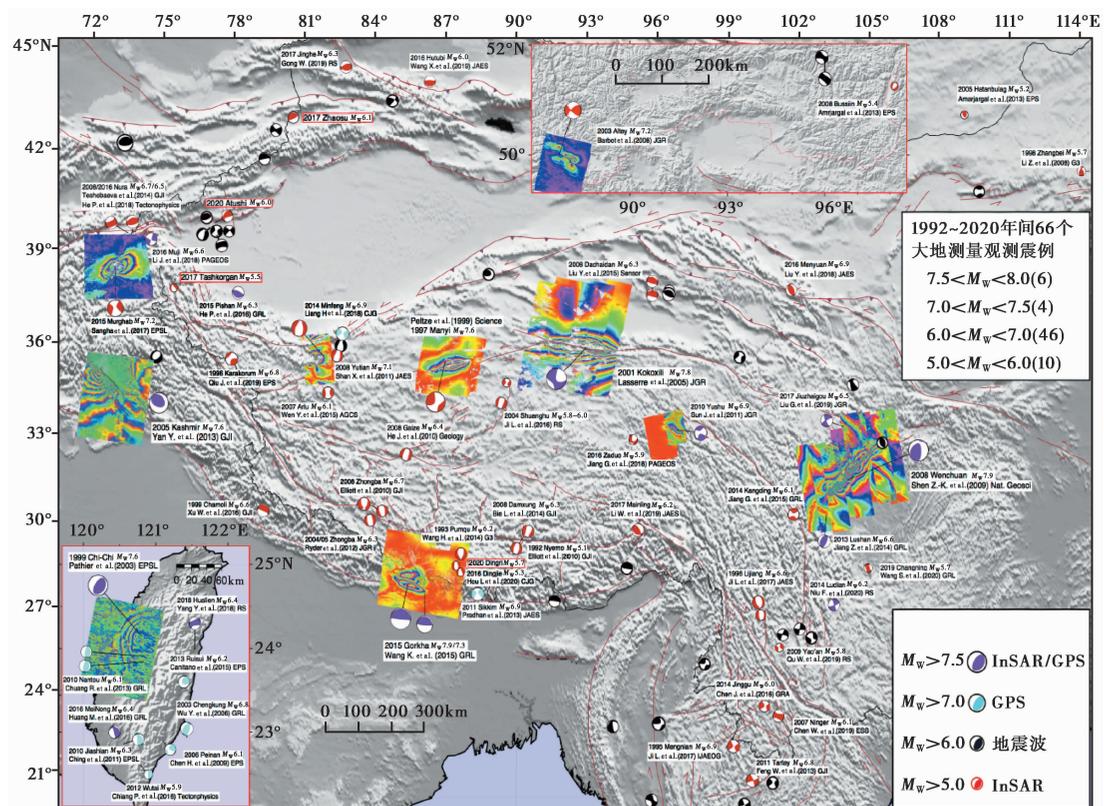


图 2 基于空间观测的地震大地测量研究震例

彩色“沙滩球”为基于空间观测的震源位置及机制解(资料来自 gCMT, Ekström 等(2012)),每个震例仅一份文献供检索(由于篇幅限制,未在文献目录中详列),未附文献震例为本文研究;黑色为地震学观测震例;插入的 InSAR 图仅示意干涉效果,除克什米尔地震来自 Yan 等(2013),其余为本文调绘

4 结论

回顾半个世纪的研究历程,彰显空间技术革命对地震变形监测的巨大推动,目前大地测量观测的60余次震例展示了大震破裂多样性、中强地震相似性,促进了中国大陆地震活动性、孕震机理和构造演化研究。InSAR无疑是大陆地震最适用的监测手段,但仍有三分之一中、小地震由于资料和地理因素没有结果,GNSS是实现高质量监测的充要条件,除中国台湾以外的GNSS网络只有7级以上大震监测能力。未来必须优化国产SAR卫星,使其胜任地震监测,同时加密西部GNSS布网密度,具备高频动态监测能力,如此方能夯实创新性研究的客观基础,使我国真正从防震减灾事业的大国迈向世界强国。

致谢:何平提供昆仑山口西地震InSAR图像资料,陈威提供玉树、于田、阿勒泰、塔吉克、集集、汶川、廓尔喀地震InSAR图像资料,审稿人提供了宝贵评阅意见,在此一并感谢。

参考文献

- 曹新菊,赵城,阳世华,1985. 龙陵地震区的地壳水平形变. 地壳形变与地震, **5**(4):405~410.
- 陈运泰,黄立人,林邦慧,等,1979. 用大地测量资料反演的1976年唐山地震的位错模式. 地球物理学报, **22**(3):201~217.
- 陈运泰,林邦慧,林中洋,等,1975. 根据地面形变的观测研究1966年邢台地震的震源过程. 地球物理学报, **18**(3):164~182.
- 巩守文,王庆良,林继华,1993. 共和6.9级地震垂直形变场位错模式及其演化特征的研究. 地震学报, **15**(3):289~295.
- 国家地震局地震测量队,1977. 海城7.3级地震的地形变. 地球物理学报, **20**(4):251~263.
- 国家重大科学工程“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), **38**(10):1195~1206.
- 黄立人,李建中,1988. 鲜水河断裂带上两次地震的反演研究. 地震研究, **11**(4):361~367.
- 李瑜,刘静,梁宏,等,2015. 全球定位系统测定的尼泊尔 M_w 7.8地震同震位移. 科学通报, **60**(36):3606~3616.
- 梁洪宝,武艳强,陈长云,等,2018. 2014年新疆于田 M_s 7.3地震同震位移及位错反演研究. 地球物理学报, **61**(12):4817~4826.
- 刘玉权,邵德盛,黎伟,等,1993. 1988年澜沧-耿马地震大地形变特征. 地壳形变与地震, **13**(1):69~76.
- 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.
- 万永革,沈正康,王敏,等,2008. 根据GPS和InSAR数据反演2001年昆仑山口西地震同震破裂分布. 地球物理学报, **51**(4):1074~1084.
- 王椿镛,朱成男,刘玉权,1978. 用地形变资料测定通海地震的地震断层参数. 地球物理学报, **21**(3):191~198.
- 王超,刘智,张红,等,2000. 张北-尚义地震同震形变场雷达差分干涉测量. 科学通报, **45**(23):2550~2554.
- 王敏,李强,王凡,等,2011. 全球定位系统测定的2011年日本宫城 M_w 9.0地震远场同震位移. 科学通报, **56**(20):1593~1596.
- 王敏,张培震,沈正康,等,2006. 全球定位系统(GPS)测定的印尼苏门达腊巨震的远场同震地表位移. 科学通报, **51**(3):365~368.
- 温扬茂,许才军,刘洋,等,2015. 升降轨InSAR数据约束下的2007年阿里地震反演分析. 测绘学报, **44**(6):649~654.
- 杨元喜,2009. 2000中国大地坐标系. 科学通报, **54**(16):2271~2276.
- 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**(28~29):2758~2764.
- 朱成男,陈承照,1976. 1974年云南省昭通地震破裂机制. 地球物理学报, **19**(4):317~329.
- Barbot S, Hamiel Y, Fialko Y, 2008. Space geodetic investigation of the coseismic and postseismic deformation due to the 2003 M_w 7.2 Altai earthquake: Implications for the local lithospheric rheology. J Geophys Res Solid Earth, **113**(B3):B03403.
- Ekdström G, Nettles M, Dziewoński A M, 2012. The global CMT project 2004 - 2010: Centroid-moment tensors for 13, 017

- earthquakes. *Phys Earth Planet Inter*, 200~201: 1~9.
- Elliott J R, Parsons B, Jackson J A, et al, 2011. Depth segmentation of the seismogenic continental crust: The 2008 and 2009 Qaidam earthquakes. *Geophys Res Lett*, **38**(6): L06305.
- Elliott J R, Walter R J, England P C, et al, 2010. Extension on the Tibetan Plateau: recent normal faulting measured by InSAR and body wave seismology. *Geophys J Int*, **183**(2): 503~535.
- Gong W Y, Zhang Y F, Li T, et al, 2019. Multi-sensor geodetic observations and modeling of the 2017 M_w 6.3 Jinghe earthquake. *Remote Sens*, **11**(18): 2157.
- He J, Peltzer G, 2010. Poroelastic triggering in the 9-22 January 2008 Nima-Gaize (Tibet) earthquake sequence. *Geology*, **38**: 907~910.
- He P, Wang Q, Ding K H, et al, 2016. Source model of the 2015 M_w 6.4 Pishan earthquake constrained by interferometric synthetic aperture radar and GPS: Insight into blind rupture in the western Kunlun Shan. *Geophys Res Lett*, **43**(4): 1511~1519.
- Hudnut K W, Bock Y, Cline M W, et al, 1994. Coseismic displacements of the 1992 Landers earthquake sequence. *Bull Seismol Soc Am*, **84**(3): 625~645.
- Ji L Y, Xu J, Zhao Q, et al, 2016. Source parameters of the 2003-2004 Bange earthquake sequence, central Tibet, China, estimated from InSAR data. *Remote Sens*, **8**(6): 516.
- Ji L Y, Wang Q L, Xu J, et al, 2017a. The July 11, 1995 Myanmar-China earthquake: A representative event in the bookshelf faulting system of southeastern Asia observed from JERS -1 SAR images. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*, **55**: 43~51.
- Ji L Y, Wang Q L, Xu J, et al, 2017b. The 1996 M_w 6.6 Lijiang earthquake: Application of JERS -1 SAR interferometry on a typical normal-faulting event in the northwestern Yunnan rift zone, SW China. *J Asian Earth Sci*, **146**: 221~232.
- 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.
- Lasserre C, Peltzer G, Crampé F, et al, 2005. Coseismic deformation of the 2001 $M_w = 7.8$ Kokoxili earthquake in Tibet, measured by synthetic aperture radar interferometry. *J Geophys Res Solid Earth*, **110**(B12): B12408.
- Li J, Liu G, Qiao X J, et al, 2018. Rupture characteristics of the 25 November 2016 Aketao earthquake (M_w 6.6) in eastern Pamir revealed by GPS and teleseismic data. *Pure Appl Geophys*, **175**(2): 573~585.
- Li Z H, Elliott J R, Feng W P, et al, 2011. The 2010 M_w 6.8 Yushu (Qinghai, China) earthquake: Constraints provided by InSAR and body wave seismology. *J Geophys Res Solid Earth*, **116**(B10): B10302.
- 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 Y, Xu C J, Wen Y M, et al, 2015. A new perspective on fault geometry and slip distribution of the 2009 Dachaidan M_w 6.3 earthquake from InSAR observations. *Sensor*, **15**(7): 16786~16803.
- Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al, 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, **364**(6433): 138~142.
- Molnar P, Deng Q D, 1984. Faulting associated with large earthquakes and the average rate of deformation in central and eastern Asia. *J Geophys Res Solid Earth*, **89**(B7): 6203~6227.
- Molnar P, Lyon-Caen H, 1989. Fault plane solutions of earthquakes and active tectonics of the Tibetan Plateau and its margins. *Geophys J Int*, **99**(1): 123~153.
- Niu Y F, Wang S, Zhu W, et al, 2020. The 2014 M_w 6.1 Ludian Earthquake: The application of RADARSAT-2 SAR interferometry and GPS for this conjugated ruptured event. *Remote Sens*, **12**(1): 99.
- Pathier E, Fruneau B, Deffontaines B, et al, 2003. Coseismic displacements of the footwall of the Chelungpu fault caused by the 1999, Taiwan, Chi-Chi earthquake from InSAR and GPS data. *Earth Planet Sci Lett*, **212**(1~2): 73~88.
- Peltzer G, Crampé F, King G, 1999. Evidence of nonlinear elasticity of the crust from the M_w 7.6 Manyi (Tibet) earthquake. *Science*, **286**(5438): 272~276.
- Qiu J T, Ji L Y, Liu L, et al, 2019. Seismogenic Fault and tectonic significance of 1996 karakoram Pass earthquake (M_s 7.1) based on InSAR. *Earth Planet Space*, **71**: 108.

- Robert E E, Van Hilst R D, Buland R P, 1998. Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bull Seismol Soc Am*, **88**(3) :722~743.
- Sangha S, Peltzer G, Zhang A L, et al, 2017. Fault geometry of 2015, M_w 7.2 Murghab, Tajikistan earthquake controls rupture propagation: Insights from InSAR and seismological data. *Earth Planet Sci Lett*, **462**:132~141.
- Segall P, Lisowski M, 1990. Surface displacements in the 1906 San Francisco and 1989 Loma Prieta earthquakes. *Science*, **250**(4985) :1241~1244.
- Shan X J, Zhang G H, Wang C S, et al, 2011. Source characteristics of the Yutian earthquake in 2008 from inversion of the coseismic deformation field mapped by InSAR. *J Asian Earth Sci*, **40**(4) :935~942.
- 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.
- Teshebaeva K, Sudhaus H, Ehtler H, et al, 2014. Strain partitioning at the eastern Pamir-Alai revealed through SAR data analysis of the 2008 Nura earthquake. *Geophys J Int*, **198**(2) :760~774.
- Wang H, Ge L L, Xu C J, et al, 2007. 3-D coseismic displacement field of the 2005 kashmir earthquake inferred from satellite radar imagery. *Earth Planets Space*, **59**(5) :343~349.
- 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 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, 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 X H, Xu C J, Wen Y M, et al, 2019. The 2016 M_w 6.0 Hutubi earthquake: A blind thrust event along the northern Tian Shan front. *J Asian Earth Sci*, **173**:79~87.
- Weston J, Ferreira A M G, Funning G J, 2011. Global compilation of interferometric synthetic aperture radar earthquake source models: I. Comparisons with seismic catalogs. *J Geophys Res Solid Earth*, **116**(B8) :B08408.
- Yan Y, Pinel V, Trouvé E, et al, 2013. Coseismic displacement field and slip distribution of the 2005 kashmir earthquake from SAR amplitude image correlation and differential interferometry. *Geophys J Int*, **193**:29~46.
- Yang M, Rau R J, Yu J Y, et al, 2000. Geodetically observed surface displacements of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake. *Earth Planets Space*, **52**(6) :403~413.
- Yu E, Segall P, 1996. Slip in the 1868 Hayward earthquake from the analysis of historical triangulation data. *J Geophys Res Solid Earth*, **101**(B7) :16101~16118.
- Zha X, Dai Z, Ge L, et al, 2011. Fault geometry and slip distribution of the 2010 Yushu earthquakes inferred from InSAR measurement. *Bull. Seismol Soc Am*, **101**:1951~1958.

Earthquake Geodesy in China—Endeavor and Scientific Contribution in A Half Century

Wang Qi¹⁾ Qiao Xuejun²⁾ You Xinzhao³⁾

1) China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2) Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

3) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract Started in 1966 after the Xingtai earthquake, the ground displacements induced by strong earthquakes has been documented by using trigonometrical survey and spirit leveling. The most intensive campaign was implemented for the 1976 catastrophic Tangshan earthquake. Due to the limitation with the conventional methods, only a few of earthquakes have been analyzed geodetically for a kinematic description of their sources in the following twenty years. Since the early 1990s, space geodesy has revolutionized the observation of seismic processes worldwide, and numerous $M > 6.0$ earthquakes in China and adjacent area have been mapped geodetically over subsurface sources for constrain the rupture models. The most successful cases that have sparked a spur of interesting in great ruptures and continental deformation include earthquakes ($M_s > 8.0$) of 2001 Kokoxili, 2008 Wenchuan and 2015 Gorkha, each of which above has been documented in details about near-field coseismic displacements and well-resolved fault geometries and motions that shed much insights into seismotectonics and physical earthquake. The three-decade-long endeavor of earthquake geodesy in China has yielded the well constrained source models of about 60 major earthquakes in mainland China and Taiwan, from which the study on continental seismicity and seismic risk assessment would be benefit. The gained experience, established monitoring infrastructure and unfulfilled task provide historic references, development platforms as well as orientations to guide continuing geodetic missions.

Keywords: Chinese continent; Earthquake deformation; Space geodesy