

江在森,武艳强,邹镇宇,等,2020. GNSS 在中国大陆的地震预测应用研究进展与展望. 中国地震,36(4):693~707.

GNSS 在中国大陆的地震预测 应用研究进展与展望

江在森^{1,2)} 武艳强³⁾ 邹镇宇¹⁾ 方颖¹⁾
魏文薪¹⁾ 刘晓霞¹⁾ 赵静²⁾

1) 中国地震局地震预测研究所,北京 100036

2) 中国地震台网中心,北京 100045

3) 中国地震局第一监测中心,天津 300180

摘要 GNSS 技术的快速发展为地震预测研究提供了前所未有的大尺度、高精度的观测结果,为强震变形模型的发展提供了可靠的观测约束。本文针对 GNSS 技术在中国大陆地震预测中的应用,系统梳理了断裂带滑动特征描述、变形场动态演化解析、应变集中过程识别、潜在震源危险程度判断等方面的研究进展。通过典型震例总结了 GNSS 资料在长、中、短临不同的地震预测阶段的应用。针对地震中长期预测,基于构造动力过程给出了强震危险性时空逼近的科学思路,即“板块边界动力作用—大-中尺度动态形变场—应力应变增强/集中区—孕震危险段中短期危险性的时空逼近”的过程。在此基础上,针对 GNSS 监测能力提升、地震孕育过程相关的多尺度地壳形变动态信息获取、GNSS 多参量动力学模型构建及产出等问题进行了讨论和发展展望。总体而言,GNSS 技术的应用显著增强了我国地震预测的地壳形变观测基础支撑,丰富了对大陆地震孕育发生物理过程的科学认识,推动了大陆地震预测科学思路和预测方法的发展,并促进了地震预测由经验预测向物理预测的拓展。

关键词: 强震变形过程 GNSS 应变率场 断层闭锁程度 强震孕育晚期 强震物理预测

[文章编号] 1001-4683(2020)04-0693-15 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

中国作为全球大陆强震最多、地震灾害风险严重的国家,近 50 多年来一直将地震监测预报作为国家防震减灾的重要工作任务。在长期艰辛的探索中,发展了具有中国特色的长、中、短临渐进式地震预测思路,形成了经验预测为主的多学科综合预测体系。具体而言,我国地震预测工作包括地震中长期危险区预测、地震大形势和年度地震趋势预测、地震短期及临震预测等 3 个工作环节。能否作出有效的地震预测,不仅要有地震孕育发生过程的理论认识和有效预测方法支持,更依赖于先进观测技术获取孕震过程相关联的可靠、精细信息。GNSS 观测在获取大、中尺度地壳变形方面突破了传统大地测量技术的尺度(10^2km)和精度

[收稿日期] 2020-07-06; [修定日期] 2020-08-26

[项目类别] 国家重点研发计划(2018YFC1503606)、国家自然科学基金(41974011)共同资助

[作者简介] 江在森,男,1956 年生,研究员,主要从事大地测量、地壳形变分析等工作。E-mail:jiangzaisen@126.com

(10^{-6})的局限,实现了从全球板块运动到区域地壳形变场动态观测的能力。由于构造地震孕育发生的能量主要来源于地壳相对运动与变形造成的弹性应变能积累,GNSS技术则是描述应变积累的有效工具。自从中国大陆GNSS观测资料产出后,便及时地应用于实际地震预测工作中,特别是中国地壳运动观测网络和中国大陆构造环境监测网络项目实施以来,大量高时空分辨率的GNSS结果更是在我国地震预测的3个主要工作环节均得到广泛应用,在应用研究探索中发展了与地震孕育过程相关联的多尺度地壳形变信息提取方法和地震预测思路。本文系统回顾了基于GNSS观测资料在中国大陆开展地震预测应用研究的过程,梳理了近20年来取得的主要进展,并对存在问题和未来展望做了讨论。

1 技术思路与方法

近20年来,GNSS资料被广泛应用于国家科技计划重点项目(如“973”、科技支撑/攻关项目重点研发专项)和地震行业专项以及中国地震局重点项目中,极大地促进了相关科学研究和实际地震预测工作,逐步发展形成了从GNSS观测成果中提取地震孕育过程关联的多尺度地壳形变信息的方法,相关结果在中长期地震危险区、地震大形势以及地震短期预测中得到广泛应用。

1.1 地震中长期危险区预测应用研究

按我国长、中、短临渐进式地震预测预报总体思路,地震中长期危险区预测的主要任务是划定未来10年至数年中国大陆发生强震危险性较高的地段范围,其中,国家防震减灾法规定的重点监视防御区以10年尺度地震重点危险区预测为基础。此外,为了更好地开展长、中、短临大地震危险性逼近研判,有时也开展未来3~5年大地震危险区预测(M7专项工作组,2012)。由于中国大陆地震区带分布广、潜在强震源数量大(大约1000以上)、大地震复发周期长(平均超千年)(江在森,2017),因此确定未来10年左右地震重点危险区是最终实现有减灾实效的地震预测工作的基础。

地震所释放的能量主要源于地壳发生变形产生的弹性应变能积累,利用大地测量技术研究地壳应变积累速率和状态是地震中长期危险区预测的基本途径之一。GNSS能够精确观测到不同时空尺度的地壳运动与变形,可为地震断裂带孕震断层段的构造变形与应变积累状态研究提供直接的观测约束,从而为地震危险性估计提供支持。

1.1.1 针对活动断裂带潜在强震源断层分段分析

研究表明,中国大陆的强震主要发生在活动地块边界带(张培震等,2003;张国民等,2004)。基于弹性回跳理论和断层位错模型(Savage et al,1973;Meade et al,2005),可通过研究孕震断层闭锁强度和应变积累程度判断发震断层段是否进入孕震晚期,进而分析逼近发震的紧迫程度。根据块体模型,活动断裂带变形的构造动力主要源于其两侧块体相对运动加载,由于断裂闭锁程度不同导致地块相对运动加载响应的形变分布不同(Savage et al,1973;Meade et al,2005)。从地震变形的角度,孕震早期变形主要发生在断层两侧狭窄的范围,而越到晚期(越来越接近下一次地震时)断层两侧变形范围越宽、变形越平缓,这种变形随离开断层距离而衰减的分布主要是由断层闭锁状态决定的。

1.1.1.1 活动断裂带断层变形分段解析分析

活动断裂带断层变形分段解析分析,可采用较常用的跨断裂带GNSS速度剖面投影分

析方法(Shen et al, 2005), 基于多分段的剖面投影结果可直接得到断层不同段落的滑动速率和变形梯度, 从而判断应变积累程度高的地段。根据位错理论, 对跨断层剖面投影数据做反正切函数拟合可反演断层滑动速率和闭锁深度分布(Savage et al, 1973), 这种简单的解析模型给出的闭锁深度可由地壳上部脆性块体间推挤和深部韧性层拖曳 2 种力源综合影响来解释(邹镇宇等, 2015a)。为了研究非直立断层的闭锁深度, 多位学者给出了相对复杂的通用模型(Segall, 2010; 邹镇宇等, 2015b、2018)。

从地表形变方面解读, 断层闭锁深度越深, 断层两侧形变梯度就越小、随距离衰减越慢、变形宽度越大, 因此可通过分析不同断层段地壳变形宽度的差异估计其应变积累程度的强弱(魏文薪等, 2012)。同时, 还可用较简单的线性模型方法, 沿断层两侧分段计算运动和应变参数, 提取剪切变形异常强度比 S_A (剪应变占跨断裂带总扭动量的比值) 和扩张变形异常强度比 E_A (扩张应变占跨断裂带总扩张量的比值), 给出断层闭锁积累应变程度高的断层段(江在森等, 2005)。这种基于活动断裂带计算分段线性变形参数和运动参数的方法, 也可用于从多期资料动态变化中判断危险性逼近的断层段(张晶等, 2009; 魏文薪等, 2012)。

1.1.1.2 多块体-边界断层非震位错模型反演分析

非震位错模型, 也称为负位错模型, 是研究震间期断层应变积累程度的有效方法。负位错模型假设块体内部点的运动由块体旋转(刚体运动)与块体边界断层闭锁产生滑动亏损引起的地表弹性变形之和, 构成模型对块体运动(也可包含变形)设整体参数、对断层闭锁引起的变形用响应函数来描述, 从而反演给出更细致的断裂带断层闭锁程度和滑动亏损分布(赵静等, 2012; McCaffrey et al, 2000), 并可给出滑动亏损积累速度并进而可计算地震矩积累量(张希等, 2013)。模型反演给出的断层闭锁程度和滑动亏损分布可直接用于活动断裂带分段地震危险性评估。

1.1.2 区域地壳形变场动态变化分析

由 GNSS 观测结果直接解算各观测站的三维速度, 可进一步计算应变率场, 综合较大区域地壳形变动态、活动地块边界带断裂带的变形特征和震源断层的局部孕震形变场结果, 从形变场时空动态变化中识别强震危险地段, 从而将预测时间尺度向 10 年或更短时间尺度逼近。

1.1.2.1 多期地壳运动速度场变化分析

GNSS 地壳运动速度场的分布图像直观, 被广泛应用。当研究多期速度场动态变化时, 为使不同期次速度场具有可比性, 需解决的一个关键问题是选取多期速度场所跨时间段地壳运动稳定的基准。研究表明可采用拟准检定法(QUAD)来实现, 但为了避免系统偏移分群对稳定点筛选的影响, 宜对 QUAD 检定的初选指标做基准偏移改进(邹镇宇等, 2015b)。通常在地壳运动稳定地区, 特别是保持刚体运动或内部变形微弱的块体(如华南地块), 更容易筛选出更多的稳定站点, 并获得较理想的高稳定性基准参考。在此基础上, 可通过构建函数模型描述具有较高稳定性的、统一参考基准的多期地壳运动速度场的动态变化特征, 通过多期次速度场的分期分析和差分分析, 更清晰地反映地壳运动的动态变化。综合多期速度场动态变化和区域构造运动背景, 识别块体运动增强/减弱或方向偏转动态变化以及块体边界带差异运动增强/减弱情况等特征, 进一步判识应变积累增强/减弱的区段, 从而为地震危险区预测提供参考。

1.1.2.2 多期应变率场变化分析

在 GNSS 技术应用于地震业务之前,由传统大地测量获取的区域形变场可用于地震中长期危险区预测,特别是大面积水准测量获得的垂直运动速度场,研究表明强震通常发生在地壳垂直运动的速度高梯度带(张祖胜等,1996),其在确定 1996~2005 年全国地震重点监视防御区的危险区时发挥了重要作用,经检验为有效的判定依据。

由于 GNSS 站点分布的非均匀性,直接用测站速度计算应变率受站点密度影响显著(江在森等,2000),为获得可靠结果,可以选择建立区域连续分布速度场模型(江在森等,2010),进而按照应变与位移的偏导关系直接整体解算应变率场(江在森等,2003)。应变率场解算方法较多,大尺度形变场研究宜采用连续应变场整体解算方法中抗差性高的方法(Wu et al, 2011),对于更大区域应变场计算宜采用球面应变场方法(石耀霖等,2006;武艳强等,2009a)。针对 GNSS 应变率场,单期结果可从应变率方向、应变率大小、剪切/张压性质等特征,结合构造背景、构造断裂的关系作出分析,判识现今变形强弱及其与构造变形背景的关系;多期应变率场的分析则可进一步研究区域构造变形增强或减弱以及方向偏转特征,不仅要关注应变率增强区带,还要关注变形弱化带,综合判识可能的应力应变增强/集中区。

1.2 地震大形势及年度趋势预测应用探索

地震中长期危险区预测的目标是给出未来 10 年或稍长时间内可能发生强震的备选区,中短期(1 年内)到临震预报主要是针对重点目标区开展强化跟踪监视,争取实现发震时间预测。地震大形势和年度地震趋势预测是衔接地震中长期危险区预测与地震中短临期预测的中间环节,大形势预测的主要任务目标包括:①预测未来 1~3 年或稍长时间中国大陆地震活动趋势(升高或降低)、活动水平(强震多发或个别发生以及最大震级水平);②预测未来 1~3 年或稍长时间中国大陆强震活动的主体区。年度地震趋势预测主要基于地震形势预测结果给出年度地震趋势、水平估计,明确年度地震重点危险区。

GNSS 观测资料的优势在于大尺度的空间可比性,这正是地震大形势预测所关注的问题,GNSS 能否为地震大形势预测作更大贡献,重点在于能否有效提取高精度、大尺度地壳运动动态变化信息。由于大形势预测目标是区域地震活动状态和趋势,因此在研究大区域 GNSS 形变场方面要着眼于宏观特征,主要技术思路和方法包括以下几个方面:

(1) 获取中国大陆周边板块运动动态的变化信息。因大陆内部地震的能量与周边板块动力作用向大陆内部的延伸和传递密切相关,周边板块运动动态变化可能影响中国大陆未来几年地震活动总体趋势、水平。在技术上可通过分析跨周边板块的 GNSS 基线的时序变化,了解周边板块动力作用是否增强;由于 GNSS 年周期以内的波动受非构造因素影响显著,因而大于年周期的趋势性变化更值得关注。

(2) 活动地块地壳运动动态监视。提取活动地块间相对运动参数时序变化,分析活动地块相对运动在不同方向的增强或减弱情况,为活动地块边界带动力加载动态提供大尺度形变约束(江在森等,2009)。

(3) 重点构造带和活动地块边界相对运动监视。提取跨块体边界带的 GNSS 基线或多站应变时序特征,识别构造带、活动地块边界带地壳运动强弱动态和分段差异。

(4) 中国大陆地壳应变率场动态特征跟踪分析。基于中国大陆地壳应变率场与构造动力背景关联的基本格局、分区特征(江在森等,2003、2006a;杨国华等,2003、2005),分析研究

GNSS 应变率场动态特征(武艳强等,2011)。

上述(2)~(4)获取的动态信息可用于强震活动主体区带的分析。同时,上述方法也可用于年度地震趋势和重点危险区的预测,只是关注的时间尺度和空间尺度需要适当缩小。

1.3 短期地震预测应用探索

3 个月以内的地震短期预测和临震预测具有很强的科学挑战性。从 GNSS 连续观测资料中提取较短时间尺度的地壳运动动态变化信息,面临的问题是 GNSS 观测时序数据中较短周期的非构造噪声影响(黄立人等,2007),因此在提取动态信息时需注意尽量抑制短周期非构造噪声的影响。

(1)GNSS 位移时序、基线时序和 3 站或多站变形参数(通常采用应变参数)时序(江在森等,2006b),可用于地壳相对运动与变形动态信息提取。需要注意的是直接做 GNSS 站位移时序分析时,为抑制共模误差等噪声影响,可先转换为较稳定的区域基准的时间序列再进行分析。

(2)多站形变单元时序信息分离分析,通过建立模型分离提取 GNSS 形变单元的刚体运动、应变(均匀变形)和残余的非规则变形几种时序(武艳强等,2009b),结合构造背景作针对性分析。

(3)对提取的 GNSS 地壳相对运动变形时序结果做噪声滤波(需避免滤波过程中年尺度以内更短尺度的构造运动信息受损问题),针对滤波后的时间序列结果进行运动特征分析(Bedford et al,2020)。

从以上提取的地壳相对运动时序变化识别异常,主要基于正常情况下这些时序变化具有线性趋势,出现显著偏离线性趋势则视为异常。这种偏离线性趋势既可能表现为对原趋势的加快,也可能是减缓,均可能是异常的表现。

(4)采用时频分析方法提取的 GNSS 地壳相对运动时序定频段信息,探索提取逼近临震的地壳变形时序信息,如 HHT 变换(冯蔚,2016;Chen et al,2014)和小波分解(敬少群等,2012)等方法。

2 实际应用情况和相关认识

随着我国 GNSS 监测站网的发展和监测能力的提升,GNSS 在地震预测业务中的应用越来越广泛,推动了地壳变形与地震孕育过程的关联性研究,进一步促进了 GNSS 技术在我国地震监测预报业务中的应用。

2.1 孕震过程相关的地壳运动与变形研究进展和认识

GNSS 观测扩展了大地测量技术对地壳运动与变形研究的空间尺度,使得可从多空间尺度来研究与孕震过程相关联的地壳运动与变形的动态特征问题,为地震预测提取科学依据。从“九五”到“十三五”国家科研项目以及中国地震局重点科研项目和近 20 年的实际应用,不仅发展了 GNSS 信息提取方法,更取得了认识上的进展。

2.1.1 地壳相对运动与变形时空分布的相对稳定性与动态性

获取、识别与孕震过程关联的多尺度地壳运动与变形的动态变化,首先需要认识地壳运动与变形时空分布的基本特征。

(1)地壳运动与变形空间非均匀分布,但具有相对稳定性。中国大陆内部呈现活地块运

动与边界带变形为主的地壳运动特征,其变形具有协调有序性(李延兴等,2003、2007;张培震等,2003;王琪,2003;江在森等,2003、2006a、2010、2013;杨国华等,2001、2003、2005)。

(2)多尺度的地壳水平相对运动既有相对稳定性(运动方向和速度),同时又有时间过程的动态性。特别是由于中国大陆内部复杂的相对小尺度的构造块体系统,使得孕震断层的构造加载具有相对动态性。GNSS能够监测到周边板块与中国大陆的相对运动也存在动态变化(江在森等,2009),尽管动态变化比长期平均运动速率小很多,但也表明中国大陆周边板块构造动力输入的加载并不是定常平衡的;较小尺度的地壳运动与变形相对其长期背景值的动态变化更为显著。从研究地震孕育过程和获取地震预测的科学依据角度,研究地壳运动变形的动态变化十分重要。

(3)GNSS等大地测量技术获得的现今多尺度地壳变形与地质学给出的构造运动结果既有总体上的一致性,同时也显示一定的差异性。因此,大地测量资料获得的断层运动、块体运动观测结果不一定与构造地质学成果完全一致,这种不一致性对地震预测研究同样具有重要意义(Wu et al,2015),这正是大地测量资料能反映的观测时段的动态性的体现。同时,大地测量结果在用于估计发震断层震间期应变积累速度时也需注意地壳运动变形非完全稳定性的影响。

2.1.2 从活动断裂带地壳变形分布估计孕震断层段长期应变积累程度

(1)基于弹性回跳理论及相关认识,构造地震的能量积累主要是由于孕震断层闭锁限制了其两侧块体的相对运动而导致的弹性应变积累。在震间期,从早期到中、晚期因断层闭锁导致的跨断裂带地壳变形梯度减小、变形宽度加大,这种跨断裂带地壳变形分布反映了积累能量水平和断层应力水平。一条活动断裂带不同的断层段可能处于不同孕震阶段,其地壳变形梯度和宽度差异反映了长时间尺度应变积累程度的差异。因此,大地测量资料作为观测约束能够给出活动断裂带不同分段的地震长期危险性的估计。

(2)由于震间期断层愈合、闭锁程度增强是一个缓慢的过程,因此地震长期危险性评估对应的时间尺度较大,特别是大陆地震对应的震间应变积累期更长,难以给出10年尺度的预测结果。因此,此类研究属于背景性预测,其意义有两方面:一是识别出断层强闭锁、应变积累程度高的断层段具备发生强震的可能(但时间不一定在10年尺度之内);二是识别出断层闭锁程度不高或尚未达孕震晚期的断层段,判断其10年尺度发生大地震的可能性较低。

2.1.3 从地壳运动动态变化中识别、提取孕震危险性逼近的信息

(1)研究区域的继承性地壳运动。继承性地壳运动具有长期相对稳定的方向,导致活动断裂带闭锁的发震断层受构造力持续加载、弹性应变持续积累。继承性运动增强表现为促进构造应变积累增强的动态变化,预示区域地震危险性增强,虽然不一定发生地震,但会加快地震孕震过程。另一方面,GNSS观测到的地壳运动的动态变化,既有与继承性构造运动方向一致的增强变化,也可能是减弱的变化。出现减弱的变化则可能延缓潜在震源发生地震。

(2)继承性地壳运动与变形的增强或减缓,需从较大空间尺度来判识,不能仅从小尺度上判定。例如,从GNSS观测得到印度板块相对中国大陆地壳运动在2004~2005年显著增强、青藏高原NE向运动在2006年后显著增强,这种构造运动增强会加快南北地震带已逼近发震危险的潜在震源的孕震进程,汶川大地震即是在这样的动力背景下发生。但由于龙门

山断裂带处于强闭锁状态,跨龙门山断裂带小尺度的地壳运动增强现象不明显。

(3)地壳运动与变形的动态变化同时还包括形变方向的变化,特别是大地震孕育晚期由于较大尺度断层强闭锁,弹性应变积累可能出现主变形方向偏转,如 2008 年汶川地震前地壳运动增强主要是巴颜喀拉地块东部东向运动增强,大区域地壳运动资料显示 2004~2007 年存在 NE 向地壳运动增强现象(邹镇宇等,2015b)。

2.1.4 从应变率场的动态变化中辨识存在潜在强震源的发震危险性

基于地壳连续介质假设的应变率场结果中不仅包含真实的地壳连续变形,也包含某些断层蠕滑的影响,后者在应变率图像上表现为局部高梯度特征。

(1)地震通常发生在与构造变形背景相一致的大尺度水平应变率场高值区的边缘,且这种较大规模的应变率高值分布具有数年以上的持续发展。如 2008 年的汶川地震就发生在中国大陆最大面积的 EW 向分量应变率压性区东边缘(Wu et al,2015),这与汶川地震的构造动力源自巴颜喀拉地块东向运动推挤一致。2001 年昆仑山口西 M_s 8.1 地震发生在其震前中国大陆最大面积的第二剪应变率高值区的边缘(江在森等,2003),也与发生昆仑山口西地震的东昆仑断裂带左旋走滑活动的构造变形背景一致。

(2)震级强度在 6 级及稍强的地震可能发生在高应变率区,此时高应变区的规模不一定很大。如 2003 年祁连山断裂带中段的民乐 6.1 级地震,发生在震前给出的青藏块体东北缘地区高应变极值区(江在森等,2001);2006 年宁洱 6.4 级地震,发生在震前给出的南北地震带应变率场中新出现的最大剪应变率高值区(江在森等,2008)。

(3)以上 GNSS 应变率场分布与强震地点的关系用于实际地震预测时,可与活动地块边界带主干断裂带结合,重点关注剪应变率高值区边缘和大型走滑断裂交界部位、张应变率高值区边缘与大型正断层的交界部位、压应变率高值区边缘与大型逆断层交界部位等地点(武艳强等,2011、2020)。

2.1.5 大地震危险性相关的活动断裂带高应力状态危险段的可能判据

(1)在大尺度地壳运动增强背景下,区域地壳变形主方向的偏转可能对未来强震具有指示意义,主应变率方向与活动断层(通常是活动地块边界带)走向关系不一致,表明其偏离了长期正常的应变积累背景状态,在一定程度上反映了长期构造力作用下相应主方向地壳弹性应变达到高值、通过改变主变形方向来对构造力持续加载做出响应,这表明该断裂带已处于极高应力状态危险状态。

(2)强闭锁相关联的断裂带的变形动态特征,对于未来大地震研判具有指示意义。在大尺度构造应力作用增强的背景下,强锁定断层段由于处于高应变积累状态对构造加载的响应已很弱,而与其关联的断裂带可能出现局部强烈形变,使得一定区域的地壳变形的非均匀性增强。例如,在大尺度构造应力作用增强背景下,汶川地震发生前鲜水河断裂带表现出显著持续的剪应变率高值调整过程,而龙门山断裂带却保持弱变形状态,对后续汶川地震危险性研判具有指示意义。

2.1.6 大地震引起构造应力场调整变化对断裂带应变积累的影响

(1)大地震的发生直接引起区域应力应变场调整变化,需要考虑大地震的应力应变场调整是否对其他孕震断层有促进作用。针对如 10 年尺度预测结果,若对长期应变积累背景的变形为减缓影响(“负影响”,即相对“卸载”),则地震危险性亦缓解;若对长期应变积累背景

的变形为增强影响(“正影响”,即进一步“加载”),则地震危险性增强(江在森等,2009)。

(2)断裂带对大地震引起的区域构造应力场调整变化响应呈现差异性特征,需要关注不协调的“受阻”弱响应或不响应地带的强震危险。如昆仑山大地震引起大范围调整,无论从构造关联还是从离开破裂带的距离来看,龙门山断裂西北侧的 GNSS 站点与川滇地块内部的站点相比均应当更容易响应,但其却表现出不响应、不协调特征,预示着长期应变积累的变形过程在该地带处于极高值,继续加载可能面临破裂。

2.1.7 GNSS 时序动态变形特征与强震孕育过程的关联性

GNSS 时序曲线在扣除非构造影响后具有准线性趋势,但研究表明一定尺度的地壳运动出现偏离准线性趋势的情况并不少见,这种显著变化(偏离超过一定的限度)对短期地震预测具有一定的指示意义。

(1)相对长趋势有增强或减弱的趋势转折(如数年间线性趋势改变)以及数月或年尺度的较显著变化,反映了地壳运动的调整过程。例如,相对于原有准线性趋势表现为增强趋势变化(年速率加大)的动态变化,可使孕震断裂构造力加载增强,导致大地震孕育进程加速。2008年汶川地震前,大尺度地壳运动便具有该特征(江在森等,2009)。

(2)在大震前数月至年尺度,跨发震构造尺度的地壳相对运动可能减缓,反映正常相对运动“受阻”或是在大尺度构造动力加载增强状态下,存在发震断层近震源区弹性变形弱化现象。在2001年昆仑山口西地震前,GNSS 观测到这种情况较为明显(江在森等,2006b、2013)。

(3)由于 GNSS 观测在年尺度以内至更短时间尺度,非构造噪声复杂且影响显著,有效提取更短时间尺度的地壳运动的动态信息难度较大。一些学者通过时频处理来提取特殊频段信息,与地震前短临阶段进行探索并取得明显进展。例如2011年日本 M9.0 地震,通过希尔伯特黄变换提取特定频信号,识别到多次地震前短期阶段位移方向有序偏转的阶段性变化(Chen et al,2014)。用此方法也提取到2013年芦山 M7.0 地震前和2016年门源 M6.4 地震前震中附近部分站点位移类似的短临变化(冯蔚,2016;Feng et al,2016)。另外,Bedford 等(2020)通过分析2011年日本9.0级地震前的 GNSS 时序结果,识别出了时间达数月尺度、空间范围达上千千米的多个站点准同步的震前短时振荡现象。

2.2 GNSS 在地震预测应用中的初步成效

GNSS 拓展了大地测量观测能力,所获取的多尺度地壳运动与构造变形动态信息在地震中长期危险区预测、地震大形势和年度地震趋势预测以及地震短期预测中已取得初步成效,发挥着不可替代的重要作用。

(1)在地震中长期危险区预测方面的应用。首先基于 GNSS 资料对活动断裂带的断层分段应变积累程度做出定量估计,为进入孕震晚期的潜在强震源断层段评估提供了重要依据。在此基础上,GNSS 观测获得的速度场、应变率场动态结果,结合重力场动态特征,为进一步识别10年到数年尺度强震危险地点提供了关键信息,显著增强了中长期地震重点危险区预测的形变科学依据。例如,与2006~2020年地震重点危险区相比,2016~2025年地震重点危险区预测的精细程度明显提高(前者在14.9%的中国大陆面积上划分26个地震重点危险区,后者在13.2%的中国大陆面积上划分41个危险区)。2017年九寨沟7.0级地震未发生在2006~2020年地震重点危险区内,但在2016~2025年地震重点危险区内,且属于2016

年后给出的紧迫程度最高等级的少数危险区之一。在 2016~2025 年地震重点危险区预测研究中,断层闭锁段识别、断层应力状态的判定等主要创新点均大量采用了 GNSS 资料。

(2) 在地震大形势预测方面的应用。GNSS 提供了其他技术不可替代的观测数据和分析结果,在描述大陆周边板块相对运动状态、大陆内部块体相对运动特征等方面为地震大形势研判提供了重要依据。在地震大形势跟踪研究报告中,GNSS 基线时序显示 2004~2005 年印度板块相对中国大陆的运动比 1995~2003 年显著增强(江在森等,2009、2013),青藏高原 2006 年后 NE 向运动增强以及跨南北地震带多条 GNSS 基线反映 NE 向地壳缩短增强(江在森等,2009),这些对中国大陆地震趋势预测有重要意义的信息只能依靠 GNSS 观测才能获取。2004 年 12 月苏门答腊发生 M_w 9.3 大地震后,由 GNSS 观测及时给出的该地震的影响场,结合 2001 年昆仑山口西 M_s 8.1 地震影响场,综合 GNSS 流动观测结果,大形势报告连续 2 年(汶川地震之前)给出了南北地震带中段为应力应变增强区(江在森等,2009),并判定龙门山断裂带为昆仑山口西大地震影响的显著弱响应区(江在森等,2012)。汶川大地震后,基于 GNSS 观测给出的地壳变形响应结果,分析认为龙门山南段在汶川地震过程没有解锁,同时认为汶川地震使巴颜喀拉地块东边界的龙门山断裂带南段构造加载显著增强、地壳弹性应变积累速度显著加大。据此,中国地震局地震预测研究所在龙门山断裂南段布设了 10 个临时 GNSS 连续站,获取了 2013 年芦山 M_s 7.0 地震的地壳变形动态过程连续观测结果(Wu et al, 2013),为震后地震趋势判定提供了明确依据。芦山地震后又根据 GNSS 观测与跨断层形变资料,分析识别了川滇地块及其东边界构造动力加载增强及分段响应差异特征,提出了川滇地块东边界中部强震危险性增强的判断;在国家科技支撑计划重点课题支持下,地震预测研究所又及时布设了 17 个站组成的 GNSS 连续测网,于 2014 年 3~4 月观测运行,获取到了 2014 年 8 月鲁甸 M_s 6.5 地震的断层运动和区域地壳形变动态特征(魏文薪等,2018),为震后区域地震趋势判定提供了关键依据。

(3) 在短期以内地震预测方面应用的探索。该阶段的地震预测特别是临震预测的科学挑战性较大,基于 GNSS 连续站观测资料,部分专家研究提取地壳运动微动态信息,并在地震短期预测的回溯性研究和应用中不断探索。2001 年昆仑山口西 M_s 8.1 地震发生后,江在森等(2006b)和侯贺晟等(2008)开始探索从 GNSS 连续站时序数据发现异常变化信息,从跨东昆仑断裂带的基线(如拉萨-德令哈基线)和多站点应变参数时序曲线中提取了数月尺度、反映地壳运动受阻性质的异常信息。另外,在 2003 年巴楚-伽师 6.8 级地震前也有个别基线时序曲线显示了相对运动受阻的异常。随着中国大陆构造环境监测网络和一些区域 GNSS 的资料产出,云南省地震局、新疆维吾尔自治区地震局利用更密集的 GNSS 观测开展地震短期预测跟踪,进行了富有成效的研究探索,特别是云南省地震局形变测量中心利用 GNSS 观测资料进行地震短期跟踪预测实践,得到了长期在地震分析预报一线专家的高度认可。

(4) 推动了我国大陆地震预测科学思路和预测方法的发展,在一定程度上促进了地震预测由经验预测向物理预测的拓展。在 GNSS 应用初期,专家学者普遍认可几年的观测结果与地质学百万年尺度的结果有较好的一致性,近年来越来越多的 GNSS 观测结果表明,多尺度的地壳运动不仅具有稳定性,还存在可信的动态变化,而且地壳运动的动态变化与多时间尺度孕震过程存在关联。我国老一代地震专家十分重视地震预测科学思路问题,提出了不少重要的科学思路,如长、中、短临渐进式预测,场的动态监视与源的过程追踪相结合、以场

求源等地震危险性时空逼近预测的科学思路等等。但受当时的地震观测基础和观测数据局限,难以给出有观测技术支撑的、可操作的地震预测时空逼近的实践过程。在“十一五”国家科技支撑计划重点项目论证中,适时提出了推动地震预测从经验预测向物理预测拓展的定位,又在以场求源等科学思路基础上,提出从构造动力过程进行强震危险性时空逼近的科学思路,即板块边界动力作用—大-中尺度动态形变场—应力应变增强/集中区—孕震危险段中短期危险性的时空逼近强震预测过程。同时,明确了按此科学思路进行地震危险性预测相应的支撑技术方法,使地震预测科学思路向可操作性发展。江在森等(2013)研发了从经验预测向物理预测拓展的“强震动力动态图像预测技术”,对地震预测向物理预测拓展有促进作用;在“十二五”国家科技支撑计划重点课题中又开展了“基于构造动力过程的地震大形势预测关键技术”研发。总体而言,“十一五”以来我国地震预测已在逐步向物理预测拓展,其中 GNSS 技术的应用起到非常重要的作用。

3 问题讨论与未来展望

地震预测极具挑战性,是尚待解决的世界性科学难题,目前尚处于初期的科学探索阶段(陈运泰,2009)。为进一步发挥 GNSS 技术在地震预测研究和业务工作中的作用,下面对相关问题和未来展望做初步讨论和展望。

3.1 相关问题讨论

GNSS 观测得到了前所未有的、与地震孕育发生过程相关联的信息,在地震预测方面需重点关注 2 个问题,一是 GNSS 观测获取的地壳运动变形信息能否满足地震预测应用需求;二是 GNSS 获取的多尺度的地壳运动变形动态信息与孕震过程的关联性能否支撑地震物理预测向前发展。

3.1.1 GNSS 观测能否满足地震预测业务需求

相比于传统大地测量技术,GNSS 能够获得多尺度地壳运动和形变动态信息,但与地震预测对孕震过程信息的需求相比仍存在较大的差距。

(1)GNSS 作为观测技术用于动态监测地壳运动变形,其时空分辨力目前并不能完全满足地震预测的需求。在观测精度上,虽然 GNSS 观测将传统大地测量的相对精度由 10^{-6} 提高了 2~3 个量级,但测站运动速度的绝对精度未突破 mm 级,同时各种噪声的影响使得获取空间高分辨率的地壳变形微动态弱信号动态信息的能力不足。

(2)中国大陆构造环境监测网络建成后,虽然 GNSS 观测网点数量、密度均有很大提升,但中国大陆地震区带分布广,GNSS 站点分布密度仍然严重不足。以 GNSS 观测为约束、采用位错模型反演断层闭锁深度和滑动亏损分布为例,要获得较高精度的断层闭锁深度需要高精度、高分辨率的地表形变观测约束。美国南加州开展地震研究的主要断裂带 GNSS 站,其平均间距已加密至 2km 左右(Smith et al,2011),在中国大陆重点监测区的活动断裂带近场 GNSS 站点密度目前明显不足(Zou et al,2019),反演获得的断层闭锁和滑动亏损的精度普遍偏低。

(3)在地震大形势预测研究中,亟需开展中国大陆板块边界的微动态研究,但由于境外没有足够的共享 GNSS 连续站,此项工作的展开受到了制约。例如,多年来进行的周边强震对中国大陆地震活动影响的研究,十分重视印度板块对欧亚板块东、西 2 个“触角”(构造

结)的动力作用,但缺乏足够的地表运动观测约束。

(4)GNSS 连续观测时序数据中包含的非构造噪声影响明显且成因复杂,虽然已对非构造噪声开展了研究并取得了一些成果,但难以清除这些非构造噪声而保留同频段的构造变形信息,这使得 GNSS 在提取地震前短临阶段有效构造变形信息的能力受限。

3.1.2 多尺度的地壳运动变形动态信息与孕震过程关联性的认识

(1)由于中国大陆地壳运动动态变化的复杂性,导致对中国大陆及其各重点监测区地壳运动背景场、动态场和异常场的认识不足。研究地壳运动与地震孕育过程的关联性,一个基本思路为:背景场—动态场—异常场,即先建立长期地壳运动变形正常状态的背景场,再获取动态场,进一步识别异常场及其与孕震过程的关联。由于中国大陆内部是由相对小地块拼合起来的复杂构造系统,同时周边板块动力复杂多样,使得多尺度地壳运动的不稳定性更突出。GNSS 观测覆盖时间跨度有限,观测期间受内部和周边大地震的影响,还受正在孕震晚期断层强闭锁的影响,在这些复杂情况下如何建立中国大陆和各分区地壳运动背景场,进而基于 GNSS 观测获取动态场和识别异常场,仍有待深入研究。

(2)GNSS 作为定量评估活动断裂带断层闭锁程度的主要地表观测约束,虽然基于位错模型反演计算断层闭锁和滑动亏损是较成熟的技术,但由于中国大陆地壳运动并不像板块边缘那样稳定,导致以不同期 GNSS 速度场为约束的反演结果有时存在难以解释的差异,因此需要研究地壳运动分布的动态的影响因素,至少需要给出合理选取和评估用于断层闭锁程度反演的 GNSS 速度场资料的选取原则(赵静等,2015)。

(3)从大尺度 GNSS 观测的地壳运动与变形动态结果判识应力应变增强/集中区,尚缺乏可操作的技术途径。判识大区域构造应力场动态变化中形成的应力集中现象的意义在于其应力集中与逼近发震的潜在强震危险源的关联,锁定中短期内有可能发震的危险地点。在近年的地震形势跟踪中,当出现一些突出情况(如昆仑山口西、苏门答腊和汶川地震后),也做过一些尝试并取得一定效果,但要形成可操作的技术途径并直接在实际中应用,尚需深入研究。

(4)在现阶段地震预测跟踪研判中,最为现实的一个难点为,对地震预测规定的长期和中短期,获取逼近发震危险程度很关键的应力应变状态信息的能力不足。GNSS 观测获取与孕震有关联的地壳运动动态信息,多属于增强发震的可能性或加快孕震过程之类,但却难以给出逼近发震危险的程度。这与 GNSS 观测在相对震源尺度上的空间分辨率不足、精度还未达到足够高等有关,因而制约了其获取直接反映震源发育进程信息的能力。

总体上,大陆地震预测的相关理论、方法严重不足,其中主要问题仍然是中国大陆构造动力环境的极其复杂性,真正能用于中国大陆震前孕震形变场的模型尚待研究。

3.2 对未来发展的展望

GNSS 应用于地震监测的观测能力还有很大的上升空间,今后仍需不断缩小与地震预测需求的差距,进一步推进地壳运动变形动态信息与孕震过程关联性的认识,并为发展地震物理预测方法做出贡献。

3.2.1 GNSS 地壳运动监测能力的提升

未来,GNSS 观测将以连续密集观测站为主,可极大提高地壳运动监测的时空分辨率,进而观测到多尺度高精度的地壳运动动态信息。

(1)GNSS 技术系统的快速发展有望进一步提高精密定位精度,包括我国的北斗系统应用,多系统联合解算,以期对非构造噪声的抑制能力有所提升,从而使获取的地壳运动动态信息的精准度显著提高。

(2)硬件的进步和低成本化,加之社会文明的进步,在地震重点监测区布设高密度的GNSS 站网将有望成为现实,周边板块运动和主要构造区的监测能力不足等问题也将随之解决。

(3)在GNSS 连续观测达到高度密集的重点监测区,将有条件对GNSS 观测结果空间域滤波与时间域滤波结合处理,可在一定程度削弱非构造噪声的影响,提高实际地壳运动观测的精度和分辨能力。

3.2.2 获取与地震孕震过程关联的多尺度地壳运动变形动态场能力的提升

GNSS 观测台网密度、布局的提升以及地壳变形分辨率的提高,将进一步提升与孕震过程关联的地壳运动动态信息的获取能力。

(1)对地壳运动变形的监视将会发展成为以更高空间分辨率和较短时间步长的多参量动态场结果,为地震预测研究提供更大支撑。

(2)动态变形场的空间分布模型将由连续变形假设的几何变形模型,发展成为非连续变形力学耦合模型,给出更真实的地壳应力应变动态结果。

3.2.3 发展基于GNSS 观测的大陆地震物理预测的多参量动态图像

GNSS 观测的大力发展,将会真正提升地壳变形的时空分辨,获取可靠的动力动态图像。

(1)GNSS 大尺度地壳相对运动和周边板块相对运动的微动态监视能力将进一步提高。在此基础上,通过构建物理模型并与构造力加载关联,以反映周边板块动力输入和大陆内部地块之间相互作用的构造力动态过程。

(2)产出基于GNSS 观测动态约束的活动地块边界带动力动态图像。考虑断层深浅部耦合和介质物性,以活动地块相对运动为断裂带动力输入约束,构建重点活动地块边界带动力模型,给出主活动断裂带应力应变动态图像。

(3)以GNSS 观测为主要动态约束,在相关地学研究全面进步的基础上,借助数值模拟技术建立不断逼近真实的中国大陆多层级的岩石圈三维构造应力应变动态场,综合融入边界动力输入、深浅部构造耦合及壳幔耦合、介质纵横向差异、发震构造带潜在强震源状态等,通过不断更新多种动态观测约束下的模型结果,获取三维构造应力应变动态图像结果。

4 主要结论

本文系统梳理了GNSS 在中国大陆强震预测中的研究进展与应用探索,并对存在的问题和未来的发展进行了分析,得到如下初步认识:

(1)GNSS 结果表明,多尺度的地壳运动、变形不仅存在稳定性,同时还存在明显的动态变化特征;这种多尺度地壳运动变形动态变化中含有与地震孕育过程关联的动态信息。

(2)基于GNSS 观测资料,针对地震中长期危险区预测、地震大形势及年度地震趋势预测和短期地震预测,形成了主要技术思路和基本方法。即重点关注断裂带闭锁,滑动速率的空间差异;通过板块边界动力—大-中尺度动态形变场—应力应变增强/集中区—孕震危险区中短期危险性的时空逼近强震科学思路,使地震预测科学思路向可操作性发展。

(3) GNSS 技术在我国地震预测工作中发挥了重要作用,例如在中长期危险区预测方面,为活动断裂带潜在强震源所处孕震阶段评估提供了观测约束;为地震大形势预测提供了板块相对运动动态、大陆块体运动动态和大区域应变率场动态等结果,开展了时间序列偏离背景准线性状态的探索应用等。

(4) 在多尺度地壳运动变形动态变化与强震孕育过程关联性方面取得一些新认识。例如,基于活动断裂带地壳变形分布估计孕震断层段长期应变积累程度、从地壳运动动态变化中提取孕震危险性逼近信息、从应变率场的动态演化中判识潜在强震源的发震危险性、对孕震断裂带高应力状态危险段的判识、大地震对孕震断裂带应变积累的影响的解析、GNSS 时序动态中包含的与强震孕育过程关联的动态变化提取等等。

(5) 针对 GNSS 观测技术本身的观测精度、提升地壳变形分辨能力以及 GNSS 观测站网密度不足等方面进行了讨论,在此基础上对 GNSS 的应用前景做了展望。

总体而言,GNSS 技术的应用显著增强了我国地震预测的观测基础支撑,丰富了对大陆地震孕育发生物理过程的科学认识,推动了大陆地震预测科学思路和预测方法的发展,并对促进地震预测由经验预测向物理预测的拓展发挥了重要作用。今后,GNSS 技术将在高精度、高分辨率地壳形变信息提取、构建反映震源区变形力学过程的物理模型等方面发挥重要作用,并为发展地震物理预测方法做出贡献。

致谢:感谢“中国地壳运动观测网络”和“中国大陆构造环境监测网络”为课题组的研究工作提供数据支持,感谢中国地震局第一监测中心陈长云博士对文稿撰写的帮助。

参考文献

- 陈运泰,2009. 地震预测:回顾与展望. 中国科学: D 辑, **39**(12):1633~1658.
- 冯蔚,2016. 利用 GPS 资料分析震前地表位移阶段性特征. 硕士学位论文. 北京:中国地震局地震预测研究所.
- 侯贺晟,江在森,2008. 基于 GPS 观测的昆仑山 8.1 级地震微动态变形研究. 大地测量与地球动力学, **28**(3):9~13.
- 黄立人,符养,2007. GPS 连续观测站的噪声分析. 地震学报, **29**(2):197~202.
- 江在森,2017. 地震大地测量学——强震预测科技途径、问题与展望. 见:周硕愚,吴云,江在森,等. 地震大地测量学. 武汉:武汉大学出版社.
- 江在森,方颖,武艳强,等,2009. 汶川 8.0 级地震前区域地壳运动与变形动态过程. 地球物理学报, **52**(2):505~518.
- 江在森,刘经南,2010. 应用最小二乘配置建立地壳运动速度场与应变场的方法. 地球物理学报, **53**(5):1109~1117.
- 江在森,马宗晋,张希,等,2003. GPS 初步结果揭示的中国大陆水平应变场与构造变形. 地球物理学报, **46**(3):352~358.
- 江在森,牛安福,王敏,等,2005. 活动断裂带构造变形定量分析. 地震学报, **27**(6):610~619.
- 江在森,武艳强,2012. 地壳形变与强震地点预测问题与认识. 地震, **32**(2):8~21.
- 江在森,杨国华,王敏,等,2006a. 中国大陆地壳运动与强震关系研究. 大地测量与地球动力学, **26**(3):1~9.
- 江在森,杨国华,王双绪,等,2008. 区域形变场及其与强震关系研究. 见:中国地震局监测预报司. 强地震中期预测新技术物理基础及其应用研究. 北京:地震出版社.
- 江在森,杨国华,张晶,等,2006b. GPS 观测技术在地震短期预报中的应用研究. 见:中国地震局监测预报司. GPS、卫星遥感及地球变化磁场地震短期预测方法研究. 北京:地震出版社.
- 江在森,张希,陈文胜,等,2000. 地形变资料求解应变值的尺度相对性问题研究. 地震学报, **22**(4):352~359.
- 江在森,张希,崔笃信,等,2001. 青藏块体东北缘近期水平运动与变形. 地球物理学报, **44**(5):636~644.
- 江在森,张希,张晶,等,2013. 地壳形变动态图像提取与强震预测技术研究. 北京:地震出版社.
- 敬少群,刘春平,王佳卫,等,2012. 小波变换在深井水位异常识别中的应用. 地震研究, **35**(2):171~176.
- 李延兴,杨国华,李智,等,2003. 中国大陆活动地块的运动与应变状态. 中国科学: D 辑, **33**(增刊 1):65~81.
- 李延兴,李金岭,张静华,等,2007. 弹性板块运动模型研究进展. 地球物理学进展, **22**(4):1201~1208.

- M7 专项工作组, 2012. 中国大陆大地震中-长期危险性研究. 北京: 地震出版社.
- 石耀霖, 朱守彪, 2006. 用 GPS 位移资料计算应变方法的讨论. 大地测量与地球动力学, **26**(1): 1~8.
- 王琪, 2003. 中国大陆现今地壳运动研究. 地震学报, **25**(5): 541~547.
- 魏文薪, 江在森, 武艳强, 等, 2012. 利用 GPS 数据研究川滇块体东边界主要断裂带运动特性. 武汉大学学报·信息科学版, **37**(9): 1041~1044, 1063.
- 魏文薪, 江在森, 邵德胜, 等, 2018. 2014 年鲁甸 6.5 级地震 GPS 同震位移及反演分析. 地球物理学报, **61**(4): 1258~1265.
- 武艳强, 江在森, 杨国华, 2009a. 利用最小二乘配置在球面上整体解算 GPS 应变场的方法及应用. 地球物理学报, **52**(7): 1707~1714.
- 武艳强, 江在森, 杨国华, 等, 2009b. 利用 GPS 时间序列对块体运动进行空间信息分离. 地震研究, **32**(3): 306~311.
- 武艳强, 江在森, 杨国华, 等, 2011. 汶川地震前 GPS 资料反映的应变率场演化特征. 大地测量与地球动力学, **31**(5): 20~25, 29.
- 武艳强, 江在森, 朱爽, 等, 2020. 中国大陆西部 GNSS 变形特征及其与 $M \geq 7.0$ 强震孕育的关系. 中国地震, **36**(4): 756~766.
- 杨国华, 韩月萍, 王敏, 等, 2003. 中国大陆几个主要地震活动区的水平形变. 大地测量与地球动力学, **23**(3): 42~49.
- 杨国华, 江在森, 武艳强, 等, 2005. 中国大陆整体无净旋转基准及其应用. 大地测量与地球动力学, **25**(4): 6~10.
- 杨国华, 谢觉民, 韩月萍, 2001. 华北主要构造单元及边界带现今水平形变与运动机制. 地球物理学报, **44**(5): 645~653.
- 张国民, 马宏生, 王辉, 等, 2004. 中国大陆活动地块与强震活动关系. 中国科学: D 辑, **34**(7): 591~599.
- 张晶, 江在森, 方颖, 等, 2009. 形变综合观测对地表构造变形的定量分析. 地震, **29**(2): 32~39.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等, 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学: D 辑, **33**(增刊 1): 12~20.
- 张希, 郝明, 贾鹏, 等, 2013. 全国主要构造区 GPS 水平运动负位错反演与应变积累特性. 地震研究, **36**(1): 1~8.
- 张祖胜, 杨国华, 薄万举, 等, 1996. 地壳垂直形变速率梯度、断层形变速率变化与强震危险区研究. 中国地震, **12**(4): 347~357.
- 赵静, 江在森, 牛安福, 等, 2015. 川滇菱形块体东边界断层闭锁程度与滑动亏损动态特征研究. 地球物理学报, **58**(3): 872~885.
- 赵静, 江在森, 武艳强, 等, 2012. 汶川地震前龙门山断裂带闭锁程度和滑动亏损分布研究. 地球物理学报, **55**(9): 2963~2972.
- 邹镇宇, 江在森, 武艳强, 等, 2015a. 针对一般倾角的走滑/倾滑位移理论公式的改进. 大地测量与地球动力学, **35**(3): 460~463, 468.
- 邹镇宇, 江在森, 武艳强, 等, 2015b. 基于 GPS 速度场变化结果研究汶川地震前后南北地震带地壳运动动态特征. 地球物理学报, **58**(5): 1597~1609.
- 邹镇宇, 江在森, 武艳强, 等, 2018. 利用带倾角断层形变公式研究川滇块体东边界断裂带形变特征. 武汉大学学报·信息科学版, **43**(11): 1688~1695.
- Bedford J R, Moreno M, Deng Z G, et al, 2020. Months ~ long thousand ~ kilometre ~ scale wobbling before great subduction earthquakes. *Nature*, **580**(7805): 628~635.
- Chen C H, Wen S, Liu J Y, et al, 2014. Surface displacements in Japan before the 11 March 2011 $M9.0$ Tohoku-Oki earthquake. *J Asian Earth Sci*, **80**: 165~171.
- Feng W, Ren J W, Jiang Z S, 2016. GPS station short-term dynamic characteristics of micro displacement before Menyuan $M6.4$ earthquake. *Geod Geodyn*, **7**(4): 237~244.
- McCaffrey R, Long M D, Goldfinger C, et al, 2000. Rotation and Plate locking at the southern Cascadia subduction zone. *Geophys Res Lett*, **27**(19): 3117~3120.
- Meade B J, Hager B H, 2005. Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements. *J Geophys Res Solid Earth*, **110**(B3): B03403.
- Savage J C, Burford R O, 1973. Geodetic determination of relative plate motion in central California. *J Geophys Res*, **78**(5): 832~845.
- Segall P, 2010. *Earthquake and Volcano Deformation*. Princeton: Princeton University Press.
- Shen Z K, Lü J N, Wang M, et al, 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. *J Geophys Res Solid Earth*, **110**(B11): B11409.

- Smith K B, Sandwell D T, Shearer P. 2011. Locking depths estimated from geodesy and seismology along the San Andreas Fault System: Implications for seismic moment release. *J Geophys Res*, **116**:B06401.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Wang M, et al, 2013. Preliminary results pertaining to coseismic displacement and preseismic strain accumulation of the Lushan M_s 7.0 earthquake, as reflected by GPS surveying. *Chin Sci Bull*, **58**(28):3460~3466.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Yang G H, et al, 2011. Comparison of GPS strain rate computing methods and their reliability. *Geophys J Int*, **185**(2):703~717.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Zhao J, et al, 2015. Crustal Deformation before the 2008 Wenchuan M_s 8.0 Earthquake studied using GPS Data. *J Geodyn*, **85**:11~23.
- Zou Z Y, Jiang Z S, Cui Y J, et al, 2019. Study on the layout of GNSS sites for strike-slip faults. *Geophys J Int*, **219**(2):1131~1137.

Progress and Prospect of Earthquake Forecasting Based on GNSS Data in China

Jiang Zaisen^{1,2)} *Wu Yanqiang*³⁾ *Zou Zhenyu*¹⁾ *Fang Ying*¹⁾ *Wei Wenxin*¹⁾
*Liu Xiaoxia*¹⁾ *Zhao Jing*²⁾

1) Institute of Earthquake Forecasting, CEA, Beijing 100036, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

3) The First Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China

Abstract The development of GNSS observations have provided unprecedented large-scale and high-precision data which has acted as the model constraints for earthquake forecasting research. In this paper, we summarized the research progress of the application of GNSS in earthquake forecasting in the Chinese mainland, including the fault slipping feature description, dynamic deformation field analysis, strain concentration process identification, rupture risk judgment of the potential focal, and etc. Taking some typical earthquake events as examples, we analyzed the applications of GNSS data in the long-term, medium-term, short-term and imminent-stage earthquake forecasting. For the mid-long-term forecasting, a scientific idea of the time-space approximation for the strong earthquake are presented, that is, the process of plate boundary dynamic loading to large-medium scale dynamic deformation adjustment, to stress-strain concentration, to temporal and spatial approximation of the short and to medium-term rupture risk. On this basis, issues such as the improvement of GNSS monitoring capabilities, the identification of multi-scale crustal deformation dynamic information that related to the earthquake process, the construction of multi-parameter dynamic models with GNSS data are discussed and prospected. In general, the GNSS surveying has significantly enhanced the acquisition capability of the crustal deformation information for earthquake forecasting in the Chinese mainland, and enriched the scientific understanding of the physical process for the continental earthquake. Meanwhile, it has promoted the scientific ideas and methods developments for the continental earthquake forecasting, and accelerated the earthquake forecasting expansion from empirical to physical stage.

Keywords: Deformation process of strong earthquakes; GNSS strain rate field; Degree of fault locking; Late stage of strong earthquake; Strong earthquake forecasting based on physical mechanism