

DOI:10.13203/j.whugis20220204



文章编号:1671-8860(2022)06-0807-13

# 中国大陆强震孕育过程关联的地壳形变及孕震晚期逼近发震过程识别问题

江在森<sup>1,2</sup> 邵志刚<sup>1</sup> 刘晓霞<sup>1</sup> 邹镇宇<sup>1</sup> 武艳强<sup>3</sup>

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:**基于地壳形变观测研究,概略回顾了中国大陆地壳形变时空动态特征及其与强震活动的关系、与强震孕育过程关联的多尺度地壳形变动态特征,以及震前各类型变异常信息提取方面的进展和认识。目前能给出明确时间尺度(10年和更短)强震预测的地壳形变有效依据仍不足,需有效识别孕震晚期强震源逼近发震的过程,推进中国大陆强震预测在较短时间尺度的进展。结合几次强震前全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)观测到的较显著的地壳形变转入非弹性变形状态的分析,讨论了在观测技术已取得显著进步条件下,逐步实现对孕震晚期强震源逼近发震过程有效识别的可能性及相关问题。

**关键词:**地壳形变;中国大陆强震;孕震晚期;逼近发震过程

中图分类号:P315

文献标志码:A

构造地震全过程中的地壳形变与地震能量积累-释放的物理过程直接关联<sup>[1]</sup>,研究地震地壳形变过程是认识地震的重要技术途径之一。20世纪60年代中国开展地震监测预报初期,大地测量学的理论方法和技术开始应用于中国大陆地震监测预报和科学的研究,1969年在“地壳形变与地震”专论<sup>[2]</sup>上开始研究地壳形变与地震的关系,并用于地震预测探索,在陈鑫连先生的主导下诞生了地壳形变测量学科,发展为地震大地测量学<sup>[3]</sup>,至今已有50多年。地壳形变测量作为地震监测的主要技术之一,为中国地震分析预报业务提供了丰富的观测资料,为开展中国大陆地震机理和地震预测的科学的研究提供了重要观测基础支持。随着观测技术进步和观测资料积累,在研究中国大陆构造动力环境下的地壳运动与构造变形、与强震孕育发生过程关联的地壳形变,以及地震前的孕震形变异常识别和预测方法等方面取得了一些重要进展和成果积累。本文对几十年来取得的进展和成果做了回顾和归纳,并针对中国大陆强震预测需求,讨论了在观测技术获取地壳形变时空动态信息能力显著提升的条件

下,基于地壳形变观测识别孕震晚期逼近发震过程的可能性和相关问题。

## 1 中国大陆地壳形变时空分布特征及其与强震活动的关系

构造地震孕育发生全过程无论是震前应变积累、震时应变释放还是震后调整都必然发生相应的地壳形变。但由于地壳运动与形变是长时期持续不断发生的,要从观测结果中认识构造地震孕育过程的地壳形变,特别是逼近发震过程的地壳形变,既需要认识构造地震孕育的物理过程,还需要研究构造区域的地壳运动与形变的基本特征,进而识别出与构造地震孕育过程直接关联的地壳形变。中国开展地壳形变测量早期就直接采用一些大地测量精密技术如精密水准测量、三角测量(激光测距)、基线丈量等用于区域地壳运动和形变场监测及活动断裂带断层运动变形的动态监测。此外,还有倾斜、应变等由仪器探头直接耦合或固定于地壳岩石的高精度(量级可达 $10^{-9}$ 以上)定点连续形变监测,以及流动

收稿日期:2022-05-20

项目资助:国家自然科学基金(41904092, 41974011);中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2020IEF0506, CEAIEF2022010101);国家重点研发计划(2018YFE0109700)。

第一作者:江在森,博士,研究员,主要从事大地形变与现今地壳运动、地震预测等方面研究。jiangzaisen@126.com

重力监测区域重力场变化和台站连续重力观测获得的重力固体潮汐和非潮汐动态变化。20世纪90年代后不断发展的全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)等技术开始广泛应用于大地测量,使大区域地壳运动、地壳形变观测能力得到显著提升。本文利用几十年积累的观测资料,包括GNSS等新的大地测量观测资料,研究了中国大陆这一特殊的中国大陆构造区地壳运动、地壳形变的一些主要时空特征,在此基础上分析了中国大陆强震孕育过程关联的地壳形变动态特征。

### 1.1 中国大陆地壳运动和地壳形变的一些主要特征

#### 1.1.1 地壳运动和地壳形变的空间分布特征

##### 1) 中国大陆地壳水平运动和构造变形基本(图式)特征

从GNSS观测结果可以得到中国大陆水平运动速度场,同时也能显示出边界动力作用和内部多块体构造介质环境下中国大陆整体和主要构造区带地壳变形特征。中国大陆整体无旋转基准的水平运动速度场扣除了中国大陆的刚体旋转运动,可反映中国大陆内部变形所呈现的相对运动图像<sup>[4-6]</sup>(中国大陆GNSS水平运动速度场见本文资源附件:<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220204>)。该图像显示了印度板块推挤、青藏高原内部地壳变形和物质东移等地壳运动衰减和分化特征,以及新疆南北天山构造带以南北向地壳缩短为主的强构造变形区带特征;同时也显示了对中国大陆东部受到太平洋板块俯冲影响的边界特征,以及华北地区的张家口-渤海断裂带的左旋走滑构造变形特征等。GNSS给出的中国大陆地壳相对运动变形图像客观反映了中国大陆构造变形受印度板块推挤作用的影响是最大的,太平洋板块的俯冲对东北、华北地区有明显影响,菲律宾板块对华南的影响不明显。

大区域地壳水平相对运动与变形主要受板块运动与相互作用控制,中国大陆内部的活动地块运动以边界带变形为主,且呈现与构造动力背景相联系的地壳运动和变形协调的有序性<sup>[4-16]</sup>。由GNSS获得的相对运动和地壳形变(应变率场)与晚第四纪以来的构造地质活动方式基本一致,且主应变率与活动断裂的交角、主压-主张比例等可对中国大陆不同构造区的构造变形特征做出定量描述<sup>[4-5,13-18]</sup>(中国大陆GNSS应变率场

见本文资源附件:<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220204>)。

##### 2) 地壳运动与地壳形变强度的空间差异分区特征

中国大陆地壳相对运动和地壳形变强度的空间差异显著,总体上西部强、东部弱,山区强、平原(盆地或稳定地台)弱。地壳运动观测网络给出的地壳水平运动速度场和应变率场、大面积水准网复测给出的垂直运动速度场和速度梯度场以及中国大陆流动重力监测网给出的重力变化场等都呈现大体相同的特征。地壳相对运动强弱差异与活动构造学给出的中国大陆构造分区一致<sup>[4-5,19-20]</sup>。

##### 1.1.2 地壳运动和形变随时间分布特征

区域水准监测网复测资料给出的地壳垂直运动随时间的动态变化显著。由不同期次观测获得的地壳垂直运动速率不仅量值差异显著,而且还会出现运动方向的反转,造成垂直运动空间梯度方向的反转。从长趋势(较长时间累积)来看,地壳垂直运动以山地相对上升、盆地相对下沉的继承运动为主,但几年尺度的动态变化存在继承运动与逆继承运动(山区相对盆地下降)的交替变化<sup>[17,21]</sup>。

GNSS给出的地壳水平相对运动总体上时程变化比垂直运动相对稳定,能够长期保持大体一致的方向性。从主应变率方向与主干构造断裂带的关系来看,大部分与活动构造给出的构造变形背景一致,但有些断裂带的主应变率方向与构造变形背景存在一定的角度偏差<sup>[5,19,22-23]</sup>。不同复测期次给出的地壳运动速度量值有一定幅度变化,这也导致不同时段的应变率参数空间分布图像也有一定(GNSS观测精度可检测出)的变化<sup>[14]</sup>,表明震间地壳水平形变也存在不稳定性,只是没有垂直运动那样突出。下文会涉及大地震引起构造关联区域显著的地壳水平运动和地壳形变响应变化。

中国大陆流动重力监测网给出的重力变化场图像在不同时段通常是多变的,其变化趋势不稳定,但能够反映构造运动的强弱状态<sup>[24]</sup>。重力变化场高梯度带的展布常常与区域内主要断裂带的分布大体一致或相关,因而重力变化场较长时间的动态变化能够反映构造运动的增强或减弱<sup>[24-25]</sup>。与垂直运动速度场以山地上升、盆地下沉作为继承性构造运动背景类似,较长时间的重力场累积变化场也有一定的长期背景趋势,通常

与区域重力布格异常空间分布趋势大体一致,可为重力场变化的背景场提供参考<sup>[25-27]</sup>。

总体而言,地壳形变、重力观测的长时间累积变化的趋势与活动构造地质学结果比较一致,而较短时间尺度的结果则可能存在明显差异。水平相对运动和水平形变的时程变化有相对稳定的趋势,但也存在非稳定的动态变化,而垂直差异运动和地壳垂直形变的时程不稳定变化较突出,其原因可能是地壳顶面是自由面,与水平相对运动变形是在地壳乃至岩石圈层横向围压中发生的情况不同。但垂直运动与水平运动也存在关联性,如在挤压逆冲断裂构造环境下的水平相对运动增强会引起挤压断裂带区域垂直运动上升,反之则引起垂直运动下降。目前看到的垂直运动的相对更不稳定特征还可能与垂直运动观测资料积累时间短、复测周期较长以及垂直运动量级比水平运动小有关。

### 1.1.3 地壳运动时空动态变化可能反映的构造动力作用和应力-应变场的动态变化

以 2004-12-26 苏门答腊 Mw 9.3 巨震为例,GNSS 观测到的同震响应形变不仅影响到中国大陆的华南、西南、川滇地块南部等区域<sup>[22,28]</sup>,而且由印度的 IISC(班加罗尔)至中国青藏高原南部的 LHSA(拉萨)北东向地壳缩短运动在 2004—2005 年显著增强,随后青藏块体北东向运动在 2005—2006 年显著增强<sup>[29-30]</sup>。此观测结果表明,中国大陆边界动力作用具有时程动态,印证了中国大陆地震构造动力源于板块边界构造动力作用向中国大陆内部的扩展和转移的观点。

中国大陆多时段重力变化场也在一定程度上反映中国大陆周边板块动力作用及大区域构造变形和分区构造活动的动态特征,重力场随时间的变化也显示印度板块对中国大陆的碰撞作用可能是非完全稳定状态<sup>[20]</sup>,这里不展开介绍。

## 1.2 地壳运动和地壳形变时空分布与地震活动的宏观关系

### 1.2.1 地壳形变空间分布与强震地点分布

区域地壳形变强弱的空间分布总体上与地震活动强弱一致,地壳形变强烈的地区也是中强以上地震活动频度较高的地区。通过大面积水准复测获得的垂直运动速率分布图显示,强震往往发生在垂直差异运动显著的垂直运动速率高梯度带(或有隆起区与之伴生)或其边缘<sup>[17,21,31-32]</sup>。在中长期强震危险区预测中,由中国地壳垂直运动速率图划分的垂直运动速率高梯度带有较好

的应用效果<sup>[32]</sup>。GNSS 观测获得的地壳水平应变率场显示,大地震通常发生在数年以上与构造变形背景相一致的大尺度水平应变率场高值区边缘地带的活动断裂段。地震震例表明,以走滑为主的大地震通常发生在与断层走滑错动相对应的大尺度剪应变高值区的边缘,如 2001 年昆仑山口西 8.1 级<sup>[19]</sup>、2010 年玉树 7.1 级<sup>[33]</sup>、2014 年于田 7.3 级<sup>[33]</sup>、2017 年九寨沟 7.0 级<sup>[33]</sup>和 2021 年玛多 7.4 级地震<sup>[34]</sup>;以倾滑为主的大地震则发生在与发震断裂构造力加载方向一致的大尺度挤压应变高值区的边缘<sup>[5,35-36]</sup>,以正断为主的大地震则发生在发震断裂垂直方向的拉张应变高值区的边缘,如 2008 年于田 7.3 级地震<sup>[33]</sup>。流动重力观测结果显示,强震也通常发生在与构造分布关联的重力显著变化区,或发生在与构造断裂带大体一致的高梯度带上<sup>[37]</sup>。

### 1.2.2 区域地壳形变场随时间强弱变化与强震活动

由多期监测网复测获得的区域地壳形变场都存在强弱动态变化,而强震活动通常发生在区域地壳形变增强之后,如上文提到由水准测量观测结果给出的青藏块体东部和南北地震带多测区垂直形变场继承运动与逆继承运动的交替变化,这种变化与区域地震群体活动涨落有一定的呼应关系,区域强震活动通常出现在继承性运动增强之后<sup>[16,20]</sup>。据此曾在 2000 年推测中国大陆西部下一个强震活跃幕可能在 2005 年前后开始<sup>[26]</sup>,2004 年更新资料后,南北地震带估计可能在 2007 年左右进入下一次较强地震活跃时段,已被 2008 年后南北地震带先后发生的汶川 8.0 级、玉树 7.1 级、芦山 7.0 级、九寨沟 7.0 级和玛多 7.4 级地震印证。而在 2008 年汶川地震之前,基于 GNSS 连续观测基准站监测到 2005—2006 年青藏块体相对华北东北地块的北东向运动显著增强,也导致跨南北地震带大尺度的北东向展布的 GNSS 站间基线缩短加速<sup>[30]</sup>。流动重力观测结果显示,强震也通常发生在出现较大范围的区域性重力变化异常、重力场变化的正值和负值相差幅度加大、整体空间分布差异增大之后<sup>[34]</sup>。

## 2 强震孕育过程关联的多尺度地壳形变及震前形变异常

地壳形变时空分布与地震活动的宏观关系包括地壳形变高值区-带结合构造分布,可为强震发生地点的预测提供一些参考依据,但时间尺度

信息弱。区域形变场时程动态强弱信息可为区域地震群体活动涨落提供一些参考依据,但在逼近强震危险的地点方面缺乏约束,不能满足进一步的地震预测需求。地震预测,特别是期望有减灾实效的地震预测预报,更需要捕获到与将发生的逼近发震进程确有关联的地壳形变动态信息。地震分析预报人员通常会把强震前在一定范围内观测到的一些明显的地壳形变动态变化与孕震过程联系起来,虽然未必能从理论机制上确认与孕震过程有物理关联,但也是推动地震预测进步的研究方向。下面结合有关强震震例作概略回顾。

## 2.1 强震前区域地壳形变场动态变化

### 2.1.1 GNSS观测到的强震前区域地壳运动和形变动态特征

1)昆仑山口西8.1级地震(2001-11-14发生在青藏块体中北部巴颜喀拉地块北边界的东昆仑断裂)

当时已有中国地壳运动观测网络GNSS区域网1999年、2001年复测结果以及中国大陆26个GNSS基准站连续观测结果。震前区域网观测的应变率场显示,此次地震发生在中国大陆GNSS应变率场最大规模的第二剪应变率负值(东西向剪切变形)高值区西边缘<sup>[18-19]</sup>。震前区域地壳运动变形分析表明,发震地段是巴颜喀拉地块东向运动滞后的地段,显示了震前该断层段强闭锁阻碍该地块运动的现象,认为该地震的孕育发生不仅是东昆仑断裂中段的断层积累能量发震行为,还可能反映地块活动行为<sup>[19]</sup>。另外,跨发震断裂的LHSA(拉萨)—DLHA(德令哈)北东向GNSS基线及连接其他站计算的应变参数时间序列曲线显示,在震前出现停顿几个月、而震后恢复回到原趋势的现象<sup>[38-39]</sup>。

2)汶川8.0级地震(2008-05-12发生在巴颜喀拉地块东边界的龙门山断裂带中-北段)

汶川地震发生在1999—2007年中国大陆GNSS应变率场最大规模的东西向分量应变挤压高值区的东边缘,而龙门山断裂区构造变形的主动力是巴颜喀拉地块向东运动的推挤,这与区域构造变形背景一致的大尺度形变特征强烈的昆仑山口西地震类似。更高分辨率的区域应变率场显示,汶川地震破裂带在震前地壳形变微弱,但在2004—2007年龙门山断裂南段至汶川地震震中出现了局部的面应变压缩高值区,东西向挤压应变高异常值区也沿鲜水河断裂北侧延伸到

龙门山南段。GNSS区域应变率场的主应变方向与龙门山断裂走向夹角接近45°,显示震前断裂带地壳变形是以剪切为主,这与现今地质构造以挤压为主的变形认识不符,与汶川地震同震位移场显示的以逆冲为主的应变释放特征也不对应<sup>[30,40]</sup>。1999—2007年龙门山断裂带滑动亏损积累以右旋走滑为主,且2004—2007年平行断裂方向的右旋滑动亏损显著增强,而垂直断裂方向滑动亏损没有变化<sup>[41]</sup>,区域水平相对运动结果也显示,2004—2007年龙门山断裂西侧出现较大范围的北东向运动增强<sup>[42]</sup>。2001年昆仑山口西地震破裂带长达426 km,其同震及震后影响地壳形变响应的范围很大,川滇地块中部的GNSS站都能检测到,但在龙门山断裂带西北侧约140 km的2个仅有的GNSS站在震前都没有响应,这可能是孕震晚期断裂带应变积累的弹性变形趋于极限状态的反映。

3)芦山7.0级地震(2013-04-20发生在巴颜喀拉地块东边界龙门山断裂的南段)

在2008年汶川地震后,根据汶川地震同震GNSS位移场显示的龙门山断裂南段与中北段差异以及断裂东侧的GNSS连续站时序数据,及时判断出龙门山断裂南段仍处于闭锁状态,闭锁深度虽不及汶川地震前的龙门山断裂中北段,但强闭锁已达发震层深度<sup>[43]</sup>,具备发生强震的应变能积累条件。针对龙门山断裂南段地震危险性,中国地震局及时组织布设了GNSS临时连续观测小网,对其加强形变监测<sup>[44]</sup>,观测到了汶川地震破裂使巴颜喀拉地块东边界中北段大尺度解锁后,巴颜喀拉地块东向运动对龙门山断裂南段构造力加载显著增强的变形过程,捕获了芦山地震全过程,包括近场的地壳形变。从GNSS连续观测中提取到震中附近的GNSS站在震前相对华南地块东向位移,出现与汶川地震震后效应反向的、约2年的停滞或减缓变化,这种偏离原趋势的异常与芦山地震震中距大致成反比<sup>[45]</sup>,在震前短临阶段(20~2天)呈短周期异常变化<sup>[46]</sup>。

### 2.1.2 水准测量观测到的强震前区域垂直形变动态变化

在20世纪90年代以前,区域水准网监测是区域形变监测的主要技术手段,但由于大部分地区复测周期较长,观测到强震前垂直形变场动态演化过程的震例并不多。这些较少的例子表明,强震孕育过程伴随着垂直形变场的动态变化。

1)唐山7.8级地震(1976-07-28发生在河北平

原带的唐山地块内的次级断层上)

应用精密水准重复测量和跨断层形变观测资料,研究得到唐山地震区域震前 22 年至震后 9 年间地壳形变场的时空演化过程,该过程表明震前 5~1 年,唐山周围地区形变明显,而在以唐山为中心的地区出现形变极为缓慢的“形变空区”,与 3 级以上地震构成的“地震围空区”相吻合。此外,距断层 40~80 km 的跨断层资料和距震中 150~200 km 的跨断层形变资料显示,震前形变特征明显不同,表现为震前震源区存在“断层闭锁区”。“形变空区”“地震围空区”和“断层闭锁区”在空间上相互重叠,且垂直形变场在震前有分数维度的降维现象。利用 1954—1985 年唐山地区 18 期精密水准资料计算水准点相对稳定度,结果表明,地壳不稳定区先出现在外围,由外向内扩展包围震源区,震源区出现不稳定但不失稳;经过短暂稳定后,又出现由外向内的第 2 次不稳定过程,导致了震源区的失稳<sup>[47]</sup>。综合利用唐山地震前后区域水准和边角网观测资料,获取唐山地震震前和同震三维形变分布,结果显示,震前变形与同震变形存在一定程度的非对称现象。垂直形变显示,震前跨唐山断裂带有大范围隆升,同震表现为发震断裂北西侧隆升、南东侧下沉;水平形变显示,震前沿唐山断裂带存在逆时针扭转,同震呈现右旋错动应变释放。这种震前与同震非对称性与 1999 年 Hector Mine Mw 7.1 地震 Camp Rock 断层变形的非对称性类似,汶川地震和芦山地震也出现此类非对称现象<sup>[48]</sup>。

2)门源 6.4 级地震(1986-08-24 发生在北祁连断裂带中段的冷龙岭断层上)

在跨北祁连断裂带中段,通过一条 120 km 的水准测线(扁都口-青石咀)复测得到垂直形变剖面,该剖面可清晰反映门源地震孕育发生过程的地壳形变。分段垂直形变显示,1979—1983 年冷龙岭断层处局部(约 30 km)隆起最显著,该隆起与 1983—1986 年出现的局部凹陷有一定对称性。累计形变显示,1971—1979 年在冷龙岭断层处已出现局部隆起,到 1983 年该隆起幅度显著增大,到 1986 年(门源地震后复测)该隆起大部分下降,到 1989 年没有显著变化,而到 1995 年整个形变剖面曲线已很平展。分析认为,震前出现变化较显著的局部压性隆起为震前异常,震后出现相应的凹陷是地震引起应力释放后松弛的响应。较显著的垂直形变在地震前后一定时段内方可观测得到。另外,在冷龙岭断层出现局部隆起的过

程中,与冷龙岭断层相距约 60 km 的另一条断层也出现了更显著的变化,表明孕震晚期不仅发震断层可能出现异常,还可能引起同断裂系的断层响应<sup>[17,49]</sup>。

## 2.2 强震前区域重力场的动态变化

随着南北地震带、华北、天山等重点区域流动重力监测不断加强以及观测资料和分析预报在实践中探索认识的积累,监测区域重力场变化在年度以上强震中期危险区预测中取得了较好的应用效果。通过对 2008 年汶川 8.0 级地震、2010 年玉树 7.1 级地震、2013 年芦山 7.0 级等地震的预测、分析和研究,对强震前重力场动态变化过程归纳如下:(1)区域重力场出现较大范围的变化异常,重力场变化的正值和负值相差幅度加大,整体上空间分布差异增大;(2)显著的重力变化差异分布与主要构造分布相关联,重力场变化的高梯度带与主要断裂构造带基本一致,或出现与主构造关联的重力变化的四象限分布特征等;(3)区域重力场经历大范围高值异常变化后明显减弱,从而出现一定范围和幅度的局部重力变化异常区,预示地震危险性更为迫近,这通常在未来强震震中区或附近形成;(4)强震危险地点通常在局部高值(正值或负值)异常区或其边缘,或在高梯度带拐弯的位置<sup>[37]</sup>。在地震年度危险区预测实践中,通过重力场变化可以成功预测一些震例,但其异常演化过程对发震时间的预测仍然难以确定,如某些重点监测区为 10 年尺度地震危险区,重力场出现异常动态变化甚至反复出现多年,而强震并未预期而至。

## 2.3 强震前跨断层形变和定点连续形变的异常变化

跨断层形变测量是在活动层上的地面布设小尺度(跨度约几十米至数百米)观测场地,定点连续形变观测则是将仪器探头固定于地壳岩石上,以更小的尺度定点连续观测地壳形变随时间变化情况,二者都是中国开展地震监测早期就开始应用的技术。

### 2.3.1 强震前跨断层形变的异常变化

跨断层形变监测开展至今几十年来,在多次较大地震(包括唐山、海城、孟连、丽江、张北、汶川、芦山等)震前都观测到大量显著的前兆性异常,有些地震震前还观测到一些巨幅异常,达到正常变形幅度的 10 倍以上。如 1975 年海城地震前金县水准,1976 年唐山地震前的宁河、大灰厂、张山营、牛口峪等多处跨断层形变异常<sup>[47]</sup>,1996

年丽江7.0级地震前永胜短水准等,都在震前观测到了巨幅异常,对强震的中短期预测有特殊价值<sup>[50]</sup>。1976年唐山地震前,宁河水准记录到唐山地震前从平稳到突出异常以及同震和震后变化过程<sup>[51]</sup>。2008年汶川地震前,浦江观测到形变曲线的显著异常,该场地从1977年开始观测,形变曲线一直比较稳定,仅在1995—1996年因修路造成了显著变化,但2001年昆仑山口西地震后张性趋势转平,反映了压性活动增强的变化,这种显著的压性变化在汶川地震前已经出现<sup>[52]</sup>。此外,汶川地震震中附近的耿达跨断层短水准在震前出现大幅度变化(存疑)。2001年昆仑山口西地震后,鲜水河断裂带跨断层基线出现同步左旋走滑趋势减缓甚至反向的趋势折转,该异常持续到2006年。中国地震局监测预报司当时已对此断层形变高度关注,组织了异常核实,并邀请专家组开展了专门研究。此断层在近场为逆向走滑运动,GNSS速度剖面显示其在远场为左旋走滑运动,近场与远场运动不一致。经回溯性研究认为,此现象是处于不同孕震阶段的多断裂系统共同作用的结果<sup>[14]</sup>。由于鲜水河断裂某些段目前存在断层蠕滑的变形特征,所以巴颜喀拉块体东向加速时,鲜水河断裂表现为左旋走滑运动减缓甚至逆向走滑;而龙门山断裂北段由于孕震晚期抑制了巴颜喀拉块体东向加速,所以速度剖面仍表现为左旋走滑运动。在后来对汶川地震的总结研究中,这被认为是汶川地震前最过硬、最能说得清的中期异常<sup>[52]</sup>。2013年芦山Ms 7.0地震前也出现了震前大幅度变化的群体异常,如汤家坪水准和格婆、墟虚跨断层短基线等<sup>[50]</sup>。

### 2.3.2 强震前定点连续形变的动态变化

定点连续形变观测也在大量震例中显示了震前出现的显著或可识别的前兆性异常。1987年鸟什Ms 6.4地震前,钻孔应变旬均值在1986年10月出现巨幅突跳变化;1998年张北6.2级地震前,距震中约60 km的张家口台站倾斜仪EW分量在1995年8月、1996年7月和1997年9月—11月均发生大幅度变化,虽不能完全排除降雨或者更换仪器的影响,但仍呈现完整的中期、中短期和短临的异常形态过程<sup>[53-54]</sup>;2021年漾濞地震前1年多,石屏水平摆NS向、通海垂直摆NS向、楚雄垂直摆NS向和弥渡水管NS向观测都开始出现异常,2020年10月—11月又分别出现楚雄、云龙钻孔应变和永胜水管观测异常<sup>[55]</sup>。

总结几十年地震监测预测实践和震例可知,

跨断层形变在中短期尺度的前兆异常获取上有较好表现,而定点连续形变的优势是在短期和临震尺度能够捕获到前兆性异常,定点形变观测到的异常可用于发震时间预测。

## 3 基于地壳形变对中国大陆强震孕育晚期逼近发震过程识别的问题讨论

几十年来,虽然各类地壳形变观测在大量强震前获取了与孕震过程关联的地壳形变动态信息,包括提取到大量的地震中短期和短临异常,但与中国大陆地震预测要做出明确的地点、强度和发震时间预测的需求差距还很大。目前主要的问题在于还不能基于动态观测有效识别出孕震晚期逼近发震的过程,即使在震前观测到大量前兆异常也很难做出明确地震三要素预测。这是实现对强震较短时间尺度有效预测需解决的关键问题。

### 3.1 中国大陆构造动力环境强震孕育基本特征及强震预测着重点

中国大陆构造区内有众多不同级别的活动地块及活动断裂交错分布,在边界板块构造及内部构造动力作用下,不仅发育走滑剪切、倾滑挤压、拉张正断和混合多类型的孕震构造,而且从大区域到具体孕震断层的构造力加载不稳定性明显,中国大陆内部发震构造应变积累速率比板块边缘低得多,强震复发周期长(平均在千年以上)。基于震间稳定应变积累和强震复发周期的比较成熟的定量预测方法,应用于中国大陆强震预测的时间误差太大,目前国际上推广应用的地震预测主要是30年尺度的地震风险概率预测。中国大陆强震预测包括10年尺度预测,虽然可用大震重复周期、离逝率、震间应变积累评估等提供一定的参考,但获取逼近10年尺度的预测依据重点是要基于动态观测判识潜在强震源是否进入孕震晚期逼近发震状态。中期(数年)和短临预测更是要以基于动态观测对孕震晚期强震源逼近发震过程的有效识别为重点前提。

### 3.2 识别构造地震孕育晚期逼近发震过程的科学思路问题

#### 3.2.1 对构造地震孕育晚期逼近发震过程的有限认识

构造地震的科学研究对其形成机理和孕育发生过程已形成了较完整的认识,但相对不清楚

的是震源区介质从稳定的弹性应变能积累完成到中短期至临震这一阶段。一些较有影响的孕震模型在孕震过程和前兆机理解释等方面都给出了理论认识,如以岩石破裂时介质特性变化为研究对象的扩容模型<sup>[56]</sup>、裂隙串通模型<sup>[57]</sup>和裂隙雪崩生长-失稳模型<sup>[58]</sup>,以震源区介质特征为研究对象的坚固体模型<sup>[59]</sup>、震源硬化模型<sup>[60]</sup>和组合-硬化模型<sup>[61]</sup>。虽然不同孕震模型认识不一,但学者们一致认为震源区介质在经历弹性变形阶段后到发生地震前要经历非弹性变形阶段,而不是只经历弹性变形就直接发生地震破裂。因此,判断震源区地壳介质是否出现了非弹性变形是十分重要的。

### 3.2.2 识别构造地震孕育晚期逼近发震过程的科学思路问题

在构造地震孕育过程中,震源区介质经历弹性变形阶段后要转入非弹性变形阶段,基于这一共识,通过动态观测识别出孕震过程转入非弹性变形阶段的孕震源;若确能有效识别,则进一步加强监测的时空密度,可能获得实际强震源在非线性变形阶段至发震时刻的演变过程,为从理论上认识孕震晚期逼近发震过程提供实际观测数据支持。另外,在构造力持续作用下,发育形成的强震源具有一定规模的积累应变能量,而在发生地震大破裂前,震源区应力水平要升高并形成应力集中,从而使孕震断层应力突破其破裂错动强度,这也是比较一致的认识。而在中国大陆这一大尺度复杂构造区,存在大量处于不同孕育发展阶段的潜在震源,且会相互影响。因此,开展地震预测需要有效判定出逼近发震的强震源,总体上需要根据“场源结合—以场求源”<sup>[62]</sup>的基本框架,发展形成一套科学思路的主线,如“边界动力加载一大-中尺度动态场—应力应变增强-集中区—强震危险段”的强震预测时空逼近<sup>[13]</sup>,可在研究探索中进一步改进和拓展,细化为一定的技术路线,使之对实际强震预测分析研判起到更加具体的指导作用。第一步判断孕震源区地壳介质进入非弹性变形阶段的转折点,可依据震间孕震断层弹性变形阶段的理论模型,识别孕震断层区地壳形变分布是否明显偏离了震间地壳形变模式<sup>[63-64]</sup>。

### 3.3 基于地壳形变观测有效识别中国大陆强震孕育晚期逼近发震过程的可能性

#### 3.3.1 GNSS 观测到的不同尺度的地壳形变发

生显著变化的现象

2008 年汶川 8.0 级地震前,GNSS 观测到在大尺度构造变形增强状态下,龙门山断裂带保持变形微弱状态,且对 2001 年昆仑山口西大地震影响无响应,GNSS 主应变率方向明显偏离断裂带震间应变积累以挤压变形为主的方向,2004—2007 年断裂的右旋滑动亏损显著增强而挤压滑动亏损没有变化等(§2.1 已具体介绍)。另外,1999—2004 年龙门山断裂带的地壳运动速度与稳定的华南地块没有明显差异,在离开断裂带约 100 km 西侧的巴颜喀拉地块内部才显示速度差异,这些都可以用汶川地震震源区地壳变形已进入非弹性变形阶段来解释。川滇地区高分辨率应变场显示,东西向挤压应变高值区在 2004—2007 年延伸到龙门山断裂南段,且在汶川地震微观震中出现了局部面应变高值区,位错反演也显示龙门山断裂带中北段与南段闭锁深度有明显差异,因而对大尺度构造应力增强的地壳变形响应产生明显差异,在龙门山断裂带仍处于弹性变形状态的南段与已进入非弹性变形状态的中北段的交界点(汶川地震微观震中),容易形成应力集中,这就可以解释汶川地震破裂是从微观震中开始向东北扩展的单侧破裂。

2013 年芦山 7.0 级地震震中附近分布着多个 GNSS 站,其东向位移在芦山地震前出现与汶川地震震后效应反向的、约 2 年的停滞或减缓变化,也可用震源区地壳变形进入了非弹性变形状态来解释。此外,在 2011 年日本东北 9.0 级地震前,日本海岸 GNSS 连续站位于地震破裂带正西侧,其西向运动在 2003 年前后出现趋势转折,速率减缓约 3~6 mm/a,与相邻段形成明显差异<sup>[65]</sup>,也可解释为该地震的震源区地壳进入非弹性变形或硬化状态,使太平洋板块西向俯冲推挤引起的日本东海岸运动受到了一定的阻滞。

#### 3.3.2 从地壳形变时空动态有效识别强震孕育晚期逼近发震过程的可能性

上述 3 个震例在孕震晚期逼近发震阶段,GNSS 观测到很有限的显著地壳形变现象,其共同的特征是震源断裂段对构造力加载的地壳变形响应在震前数年均呈微弱状态,导致孕震断裂段附近地壳相对运动受阻而滞后。2011 年日本东北 9.0 级地震的震源尺度大,才可能影响到距离震源约 140 km 的东海岸 GNSS 站运动速率显著改变;2013 年芦山 7.0 级地震虽然震源尺度小,但 GNSS 站点靠近发震断层(包括余震区),才能

观测到震源区最后弹性变形阶段转入非弹性变形的过程;1976年唐山7.8级地震前5年内,震源周围垂直形变也出现了形变极缓慢状态的“形变空区”现象<sup>[47]</sup>。上述3次地震前的观测资料虽然还不能对孕育晚期逼近发震过程给出完整的观测约束,但却显示了可能性和希望,通过一定的有效尺度地壳相对运动与形变动态监测,可能识别到孕震晚期震源区介质转入非弹性阶段的过程,这对强震预测向短时间尺度推进有重要意义。不过,要充分估计孕震晚期逼近发震过程的复杂性和有效识别的科学难度,以及不同的强震孕育构造环境的差异性,需要有一定时空密度的GNSS等观测支持。上述3个震例可能都具有不同的有利条件,而震源区介质从转入非弹性变形阶段之后到临近发震,还有很多问题待研究解决,如震源演化到进入地震主破裂不可逆转状态会出现什么现象。若确能有效识别震源区介质转入非弹性变形阶段,就突破了第一个重要的关口。

上述3个震例的有限资料也体现了GNSS观测的突出优势,它能从多尺度相对运动与地壳形变时空动态来探测出孕震源区的地壳变形状态,为研究强震孕育过程提供了新的观测基础。地震观测技术发展至今,已经可以为孕震晚期逼近发震的强震源识别提供可能的观测技术支撑。因此,中国大陆强震预测不能还停留在以前兆异常和地震对应的经验统计为主要依据的状态,而应适时向以孕震晚期逼近发震过程提供强震预测科学依据的方向推进。这个推进过程可能是艰难的,可能需要从多方面科学布局,如组合发挥各种观测技术优势,优化监测系统(使时空分辨率和观测精度达到对震源区地壳变形动态有效监测的要求),应用新观测技术(如高精度光纤应变观测)以及重点支持地震科研等。

#### 4 结语

50多年来,地壳形变测量研究已取得很大发展和进步,在地震孕育发生过程、孕震过程关联的地壳形变动态信息提取,以及强震中长期、中期、大形势和短临预测的形变动态异常提取和震例研究等方面取得了很多重要进展和科研成果,本文仅做有限的概略回顾介绍。但从思考问题和推动进步的角度来看,地壳形变观测的主要应用目标是地震预测,实现中国大陆强震预测,包括明确的10年和更短时间尺度预测所需的地壳

形变观测有效依据仍显不足。根据中国大陆特殊的孕震构造动力环境下潜在强震源数量多、分布广、强震孕育周期长、震间构造力加载相对不稳定的背景条件,从实现有减灾实效的强震预测的需求考虑,结合近年来几次强震前GNSS已部分观测到孕震晚期逼近发震过程显著地壳形变动态变化的实际震例,在现阶段监测获取地壳形变时空动态分布的技术能力已提升的条件下,通过提高监测时空分辨能力和加强孕震晚期的非线性形变等研究探索,逐步推进对孕震晚期逼近发震过程的有效识别是可能的,这也是解决强震预测向较短时间尺度有效预测推进的关键。

#### 参考文献

- [1] Reid H F. The Mechanism of the Earthquake[M]// The State Earthquake Investigation Commission. The California Earthquake of April 18, 1906. Washington D C: The Carnegie Institution of Washington, 1910
- [2] Chen Xinlian. My Fate with the Earthquake for Half My Life [M]. Beijing: Seismological Press, 2011 (陈鑫连. 半生震缘[M]. 北京: 地震出版社, 2011)
- [3] Zhou Shuoyu, Wu Yun, Jiang Zaisen. Earthquake Geodesy [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2017 (周硕愚, 吴云, 江在森. 地震大地测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2017)
- [4] Yang Guohua, Jiang Zaisen, Wu Yanqiang, et al. No-Net-Rotation on Crustal Movement of Chinese Mainland and Its Application [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 2005, 25(4): 6-10 (杨国华, 江在森, 武艳强, 等. 中国大陆整体无净旋转基准及其应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(4): 6-10)
- [5] Jiang Zaisen, Yang Guohua, Wang Min, et al. On Crustal Movement in Chinese Mainland and Its Relationship with Strong Earthquakes [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2006, 26(3): 1-9 (江在森, 杨国华, 王敏, 等. 中国大陆地壳运动与强震关系研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(3): 1-9)
- [6] Jiang Zaisen, Liu Jingnan. The Method in Establishing Strain Field and Velocity Field of Crustal Movement Using Least Squares Collocation [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(5): 1109-1117 (江在森, 刘经南. 应用最小二乘配置建立地壳运动速度场与应变场的方法[J]. 地球物理学报, 2010, 53(5): 1109-1117)
- [7] Li Yanxing, Hu Xinkang, Kang Laixun. Current

- Activity Characteristics of the Fault Zone Along the North Margin of West Qinling Mountain Revealed by GPS Measurements [J]. *Earthquake Research in China*, 1999, 15(4): 295–303 (李延兴, 胡新康, 康来迅. GPS 测量所揭示的西秦岭北缘断裂带现今活动特征 [J]. 中国地震, 1999, 15(4): 295–303)
- [8] Li Yanxing, Yang Guohua, Li Zhi, et al. The Movement and Strain State of Active Blocks in Chinese Mainland [J]. *Science in China (Ser. D)*, 2003, 33(S1): 65–81 (李延兴, 杨国华, 李智, 等. 中国大陆活动地块的运动与应变状态 [J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003, 33(S1): 65–81)
- [9] Li Yanxing, Li Jinling, Zhang Jinghua, et al. The Research Progress in Elastic Plate Motion Model [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(4): 1201–1208 (李延兴, 李金岭, 张静华, 等. 弹性板块运动模型研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1201–1208)
- [10] Zhang Peizhen, Deng Qidong, Zhang Guomin, et al. Strong Earthquake Activity and Active Blocks in Chinese Mainland [J]. *Science in China (Ser. D)*, 2003, 33(S1): 12–20 (张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块 [J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003, 33(S1): 12–20)
- [11] Wang Qi. Current Crustal Movement in Chinese Mainland [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2003, 25(5): 541–547 (王琪. 中国大陆现今地壳运动研究 [J]. 地震学报, 2003, 25(5): 541–547)
- [12] Jiang Zaisen, Zhang Xi, Chen Bing, et al. Characteristics of Recent Horizontal Movement and Strain-Stress Field in the Crust of North China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000, 43(5): 657–665 (江在森, 张希, 陈兵, 等. 华北地区近期地壳水平运动与应力应变场特征 [J]. 地球物理学报, 2000, 43(5): 657–665)
- [13] Jiang Zaisen, Zhang Xi, Zhang Jing. Research on Dynamic Image Extraction of Crustal Deformation and Strong Earthquake Forecasting Technology [M]. Beijing: Seismological Press, 2013 (江在森, 张希, 张晶. 地壳形变动态图像提取与强震预测技术研究 [M]. 北京: 地震出版社, 2013)
- [14] Jiang Zaisen. Research on the Relationship Between the Tectonic Deformation and the Strong Earthquake in the Chinese Mainland Using Dynamic Geodetic Data [D]. Wuhan: Wuhan University, 2012 (江在森. 利用动态大地测量资料研究中国大陆构造形变与强震关系 [D]. 武汉: 武汉大学, 2012)
- [15] Yang Guohua, Xie Juemin, Han Yueping. Current Horizontal Deformation and Kinematic Mechanism of Major Tectonic Units and Boundary Zones in North China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(5): 645–653 (杨国华, 谢觉民, 韩月萍. 华北主要构造单元及边界带现今水平形变与运动机制 [J]. 地球物理学报, 2001, 44(5): 645–653)
- [16] Yang Guohua, Han Yueping, Wang Min. Characteristics of the Horizontal Crustal Movement of North China in the Last Decade [J]. *Earthquake Research in China*, 2003, 19(4): 324–333 (杨国华, 韩月萍, 王敏. 近 10 年华北地壳水平运动的若干特征 [J]. 中国地震, 2003, 19(4): 324–333)
- [17] Jiang Zaisen, Zhang Xi, Cui Duxin, et al. Recent Horizontal Movement and Deformation in the Northeast Margin of Qinghai-Tibet Block [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(5): 636–644 (江在森, 张希, 崔笃信, 等. 青藏块体东北缘近期水平运动与变形 [J]. 地球物理学报, 2001, 44(5): 636–644)
- [18] Jiang Zaisen, Ma Zongjin, Zhang Xi, et al. Horizontal Strain Field and Tectonic Deformation of Chinese Mainland Revealed by Preliminary GPS Result [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(3): 352–358 (江在森, 马宗晋, 张希, 等. GPS 初步结果揭示的中国大陆水平应变场与构造变形 [J]. 地球物理学报, 2003, 46(3): 352–358)
- [19] Jiang Zaisen, Zhang Xi, Zhu Yiqing, et al. Regional Tectonic Deformation Background Before Ms 8.1 Earthquake of Kunlun Mountain Pass West [J]. *Science in China (Ser. D)*, 2003, 33(S1): 163–172 (江在森, 张希, 祝意青, 等. 昆仑山口西 Ms 8.1 地震前区域构造变形背景 [J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003, 33(S1): 163–172)
- [20] Li Hui, Shen Chongyang, Sun Shaoan, et al. Dynamic Gravity Change in Recent Years in Chinese Mainland [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, 29(3): 1–10 (李辉, 申重阳, 孙少安, 等. 中国大陆近期重力场动态变化图像 [J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(3): 1–10)
- [21] Jiang Zaisen, Wang Shuangxu, Zhao Zhencai. The Characteristic of Recent Geodetic Deformation and Earthquake in North-South China Seismic Belt and East of the Qinghai-Xizang Plate [J]. *Earthquake Research in China*, 1997, 13(2): 139–150 (江在森, 王双绪, 赵振才. 南北地震带和青藏块体东部近期大地形变与地震特征 [J]. 中国地震, 1997, 13(2): 139–150)
- [22] Wang Min, Zhang Peizhen, Shen Zhengkang, et al. Far-Field Coseismic Displacements Associated with the Great Sumatra Earthquakes of December 26, 2004 and March 29, 2005 Constrained by Global Po-

- sitioning System [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(3): 365–368 (王敏, 张培震, 沈正康, 等. 全球定位系统(GPS)测定的印尼苏门答腊巨震的远场同震地表位移[J]. 科学通报, 2006, 51(3): 365–368)
- [23] Su Yongjun, Li Yan. Response of IGS Stations' Time Series to Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Geomatics*, 2013, 38(3): 51–54 (宿勇军, 李艳. IGS 基准站时间序列对汶川地震的响应[J]. 测绘地理信息, 2013, 38(3): 51–54)
- [24] Zhu Yiqing, Jiang Zaisen, Chen Bing, et al. Study on Evolution of Gravity Field and Earthquake Prediction in the North–South Seismic Belt and the Eastern Qinghai–Xizang Block [J]. *Earthquake Research in China*, 2001, 17(1): 56–69 (祝意青, 江在森, 陈兵, 等. 南北地震带和青藏块体东部重力场演化与地震特征[J]. 中国地震, 2001, 17(1): 56–69)
- [25] Zhu Yiqing, Liang Weifeng, Chen Shi, et al. Study on Mechanism of Gravity Field Change in North-eastern Margin of Qinghai–Tibet Plateau [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(3): 1–6 (祝意青, 梁伟峰, 陈石, 等. 青藏高原东北缘重力变化机理研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(3): 1–6)
- [26] Jiang Zaisen, Ding Ping, Wang Shuangxu, et al. Large Scale Deformation Monitoring and Earthquake Forecasting in Western China [M]. Beijing: Seismological Press, 2001 (江在森, 丁平, 王双绪, 等. 中国西部大地形变监测与地震预测[M]. 北京: 地震出版社, 2001)
- [27] Zhu Yiqing, Liang Weifeng, Li Hui, et al. On Gravity Field Variations and Geodynamic Characteristics in Chinese Mainland [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(3): 246–250 (祝意青, 梁伟峰, 李辉, 等. 中国大陆重力场变化及其引起的地球动力学特征[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(3): 246–250)
- [28] Department of Earthquake Monitoring and Prediction of China Earthquake Administration. The Mw 8.7 Earthquake in Sumatra, Indonesia, 2004 and Its Impact on the Chinese Mainland [M]. Beijing: Seismological Press, 2005 (中国地震局监测预报司. 2004年印度尼西亚苏门答腊8.7级大地震及其对中国大陆地区的影响[M]. 北京: 地震出版社, 2005)
- [29] Jiang Zaisen, Yang Guohua, Fang Ying, et al. Study on the Relations Between Distribution of Crustal Movement and Strong Earthquakes Using GPS Survey [J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2007, 37(7): 32–42 (江在森, 杨国华, 方颖, 等. 利用GPS观测结果研究地壳运动分带动态及其与强震关系[J]. 国际地震动态, 2007, 37(7): 32–42)
- [30] Jiang Zaisen, Fang Ying, Wu Yanqiang, et al. The Dynamic Process of Regional Crustal Movement and Deformation Before Wenchuan Ms 8.0 Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(2): 505–518 (江在森, 方颖, 武艳强, 等. 汶川8.0级地震前区域地壳运动与变形动态过程[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 505–518)
- [31] Zhang Zusheng, Yang Guohua, Bo Wanju, et al. Study on Vertical Crustal Deformation Rate Gradient, Fault Deformation Rate Variation and Strong Earthquake Risk Region [J]. *Earthquake Research in China*, 1996, 12(4): 347–357 (张祖胜, 杨国华, 薄万举, 等. 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[J]. 中国地震, 1996, 12(4): 347–357)
- [32] Wang Shuangxu, Jiang Zaisen, Zhang Sixin. Characteristics of the Recent Vertical Deformation and the Regional Stress Field in Qilian Moutian–Hexi Corridor [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 1997, 17(1): 45–51 (王双绪, 江在森, 张四新. 邯连山–河西走廊现今垂直形变特征与区域应力场[J]. 地壳形变与地震, 1997, 17(1): 45–51)
- [33] Wu Yanqiang, Jiang Zaisen, Zhu Shuang, et al. GNSS Deformation Characteristics and Its Relationship with  $M \geq 7.0$  Strong Earthquakes in Western China [J]. *Earthquake Research in China*, 2020, 36(4): 756–766 (武艳强, 江在森, 朱爽, 等. 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[J]. 中国地震, 2020, 36(4): 756–766)
- [34] Jiang Weiping, Xu Caijun, Li Zhiwei, et al. Using Space Observation Techniques to Study Temporal and Spatial Characteristics of Seismogenic Process, Occurrence and Deformation of the Qinghai Madoi Mw 7.4 Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(2): 495–508 (姜卫平, 许才军, 李志伟, 等. 利用空间观测技术研究青海玛多7.4级地震孕育发生变形时空特征[J]. 地球物理学报, 2022, 65(2): 495–508)
- [35] “Researches on Earthquake Risk Regions and Losses Prediction of China Continent During 2006–2020” Project Team. *Researches on Earthquake Risk Regions and Losses Prediction of China Continent During 2006–2020* [M]. Beijing: Seismological Press, 2007 (“2006–2020年中国大陆地震危险区与地震灾害损失预测研究”项目组. 2006–2020年中国大陆地震危险区与地震灾害损失预测研究[M]. 北京: 地震出版社, 2007)
- [36] Wu Yanqiang, Jiang Zaisen, Yang Guohua, et al.

- Evolution Characteristics of Strain Rate Field Reflected by GPS Data Before Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(5): 20–25 (武艳强, 江在森, 杨国华, 等. 汶川地震前 GPS 资料反映的应变率场演化特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(5): 20–25)
- [37] Zhu Y, Zhan F B, Zhou J, et al. Gravity Measurements and Their Variations Before the 2008 Wenchuan Earthquake [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010, 100(5B): 2815–2824
- [38] Department of Earthquake Monitoring and Prediction of China Earthquake Administration. Study on Short-term Earthquake Forecasting Methods of GPS, Satellite Remote Sensing and Earth Changing Magnetic Field [M]. Beijing: Seismological Press, 2006 (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报方法研究[M]. 北京: 地震出版社, 2006)
- [39] Hou Hesheng, Jiang Zaisen. On Micro-Dynamic Deformation Informations Obtained from GPS Observations During Kunlun Mountain Ms 8.1 Earthquake in 2001 [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2008, 28(3): 9–13 (侯贺晟, 江在森. 基于 GPS 观测的昆仑山 8.1 级地震微动态变形研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(3): 9–13)
- [40] Wu Y Q, Jiang Z S, Zhao J, et al. Crustal Deformation Before the 2008 Wenchuan Ms 8.0 Earthquake Studied Using GPS Data [J]. *Journal of Geodynamics*, 2015, 85: 11–23
- [41] Zhao Jing. Study on the Deformation Process of the Wenchuan and Lushan Earthquakes Based on GPS Data [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2021 (赵静. 基于 GPS 资料研究汶川与芦山地震变形过程[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2021)
- [42] Zou Zhenyu, Jiang Zaisen, Wu Yanqiang, et al. Dynamic Characteristics of Crustal Movement in North-South Seismic Belt from GPS Velocity Field Before and After the Wenchuan Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(5): 1597–1609 (邹镇宇, 江在森, 武艳强, 等. 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[J]. 地球物理学报, 2015, 58(5): 1597–1609)
- [43] Zhao Jing, Jiang Zaisen, Wu Yanqiang, et al. Study on Fault Locking and Fault Slip Deficit of the Longmenshan Fault Zone Before the Wenchuan Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(9): 2963–2972 (赵静, 江在森, 武艳强, 等. 汶川地震前龙门山断裂带闭锁程度和滑动亏损分布研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2963–2972)
- [44] Wu Yanqiang, Jiang Zaisen, Wang Min, et al. Preliminary Results of Strain Accumulation and Coseismic Displacement Field Before Lushan M 7.0 Earthquake Monitored by GPS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(20): 1910–1916 (武艳强, 江在森, 王敏, 等. GPS 监测的芦山 7.0 级地震前应变积累及同震位移场初步结果[J]. 科学通报, 2013, 58(20): 1910–1916)
- [45] Wang Q X, Xu X W, Jiang Z S, et al. A Possible Precursor Prior to the Lushan Earthquake from GPS Observations in the Southern Longmenshan [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 20833
- [46] Feng Wei. Analysis of the Crustal Displacement Characteristics in Stages Before Earthquake by Using GPS Data [D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, 2016 (冯蔚. 利用 GPS 资料分析震前地表位移阶段性特征[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2016)
- [47] Zhou Shuoyu, Shi Shunying, Shuai Ping. Study on Temporal and Spatial Distribution, Evolution Characteristics and Mechanism of Crustal Deformation Field Before and After Tangshan Earthquake [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1997, 19(6): 559–565 (周硕愚, 施顺英, 帅平. 唐山地震前后地壳形变场的时空分布、演化特征与机理研究[J]. 地震学报, 1997, 19(6): 559–565)
- [48] Chang Liu, Wu Yanqiang, Yang Bo, et al. Characteristics of 3D Surface Deformation Characteristics and Seismogenic Fault Inversion of 1976 Tangshan M 7.8 Earthquake [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220159 (畅柳, 武艳强, 杨博, 等. 唐山 7.8 级地震三维地表形变和断层运动特征研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220159)
- [49] Chen Bing, Jiang Zaisen, Che Shi, et al. Study of Triggering Action Between Mani(Ms 7.9) and Kunlun(Ms 8.1) Great Earthquakes and Their Dynamic Background [J]. *Earthquake Research in China*, 2003, 19(1): 1–7 (陈兵, 江在森, 车时, 等. 玛尼 7.9 级地震对昆仑山口西 8.1 级地震的触发作用及动力背景初探[J]. 中国地震, 2003, 19(1): 1–7)
- [50] Zhang Licheng, Bo Wanju. Multi-Means Deformation Monitoring and Earthquake Prediction [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2022, 42(3): 234–239 (张立成, 薄万举. 多手段形变监测与地震预报[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(3): 234–239)
- [51] Zhao Guoguang, Zhang Chao. Quasi-Static Defor-

- mation Accompanied by Precursory Creep and Post-Seismic Fault Slip—A Model and Some Observation Examples [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1981, 3(3): 217–230 (赵国光, 张超. 伴随前兆蠕动和震后滑动的准静态形变: 模型与观测实例[J]. 地震学报, 1981, 3(3): 217–230)
- [52] Monitoring and Prediction Department of China Seismological Bureau. Scientific Research Report on Wenchuan Ms 8.0 Earthquake [M]. Beijing: Seismological Press, 2009 (中国地震局监测预报司组织. 汶川 8.0 级地震科学研究报告[M]. 北京: 地震出版社, 2009)
- [53] Bo Wanju. Study on Relation Between Crust Deformation Anomaly and Disturbances [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 30(1): 5–8 (薄万举. 形变异常与干扰关系的再认识[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(1): 5–8)
- [54] Bo Wanju, Hua Caihong. Exploration of the Index of Crustal Deformation Precursor of Strong Earthquakes [J]. *Earthquake*, 2001, 21(1): 25–32 (薄万举, 华彩虹. 地形变强震前兆指标探讨[J]. 地震, 2001, 21(1): 25–32)
- [55] Zhang Yan, Zhao Ying, Shi Heqing, et al. Analysis on Characteristics of Fixed Point Deformation Data Before Yangbi M 6.4 Earthquake in Yunnan Province [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2022, 42(3): 221–224 (张燕, 赵莹, 施贺青, 等. 云南漾濞 M 6.4 地震前定点形变资料特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(3): 221–224)
- [56] Nur A. Dilatancy, Pore Fluids, and Premonitory Variations of  $t_s/t_p$  Travel Times [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1972, 62(5): 1217–1222
- [57] Whitcomb J H, Garmany J D, Anderson D L. Earthquake Prediction: Variation of Seismic Velocities Before the San Francisco Earthquake [J]. *Science*, 1973, 180(4086): 632–635
- [58] Mjachkin V I, Brace W F, Sobolev G A, et al. Two Models for Earthquake Forerunners [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1975, 113(1): 169–181
- [59] Mei Shirong. Development of Research on the Physical Model of Earthquake Precursor Field and the Mechanism of Precursors' Time-Space Distribution [J]. *Earthquake*, 1995, 15(S1): 2–22 (梅世蓉. 地震前兆场物理模式及前兆分布特征与机制研究进展[J]. 地震, 1995, 15(S1): 2–22)
- [60] Chen Lide. Evidence of Theory, Test and Observation for Source Hardening Model [J]. *Earthquake*, 2000, 20(1): 1–9 (陈立德. 震源硬化模型的理论、实验及观测事实依据[J]. 地震, 2000, 20(1): 1–9)
- [61] Che Zhaohong, Fan Yan. Precursory Characters and Earthquake Preparation Mechanism of Ground Deformation and Gravity Before Strong Earthquakes in North China [J]. *Earthquake Research in China*, 1999, 15(1): 46–53 (车兆宏, 范燕. 华北强震地形变及重力前兆特征与孕震机理[J]. 中国地震, 1999, 15(1): 46–53)
- [62] Zhang Guomin, Luo Lange. Some Progress in Comprehensive Earthquake Prediction and Prospects [J]. *Earthquake*, 1990, 10(5): 25–32 (张国民, 罗兰格. 地震综合预报的某些进展与展望[J]. 地震, 1990, 10(5): 25–32)
- [63] Savage J C, Burford R O. Geodetic Determination of Relative Plate Motion in Central California [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, 78(5): 832–845
- [64] Meade B J. Block Models of Crustal Motion in Southern California Constrained by GPS Measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(B3): B03403
- [65] Chen Guangqi, Wu Yanqiang, Jiang Zaisen, et al. Characteristics of Seismogenic Model of Mw 9.0 Earthquake in Tohoku, Japan Reflected by GPS Data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(3): 848–856 (陈光齐, 武艳强, 江在森, 等. GPS 资料反映的日本东北 Mw 9.0 地震的孕震特征[J]. 地球物理学报, 2013, 56(3): 848–856)

## Crustal Deformation Associated with Seismogenic Process of Chinese Mainland Strong Earthquakes and Identification of Approximation to Seismogenic Process in the Late Seismogenic Stage

JIANG Zaisen<sup>1,2</sup> SHAO Zhigang<sup>1</sup> LIU Xiaoxia<sup>1</sup> ZOU Zhenyu<sup>1</sup> WU Yanqiang<sup>3</sup>

1 Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2 China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

3 The First Crust Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China

**Abstract:** This paper briefly reviews the temporal and spatial characteristics of crustal deformation and its relationship with strong earthquakes in Chinese mainland based on geodetic observations. It also introduces the progress and understanding of extracting multi-scale crustal deformation characteristics associated with seismogenic process and various deformation anomalies before earthquakes in Chinese mainland. However, it is still insufficient that the effective basis for the crustal deformation can give the prediction of strong earthquakes in a clear time scale of 10 years and shorter. In order to promote the progress of continental strong earthquake prediction in a short time scale, it is necessary to effectively identify the process of strong source approaching earthquake in late seismogenic stage. Based on the analysis that the crustal deformation information observed by global navigation satellite system(GNSS) before several strong earthquakes, the crustal deformation state in the focal region of the late pregnancy earthquake could be transferred to the inelastic deformation state. Considering the factors such as the progress of observation technology, the possibility and related problems of the effective identification of the late pregnancy earthquake approaching to the strong source are discussed.

**Key words:** crustal deformation; continental strong earthquakes; late stage of strong earthquake preparation; approximation to seismogenic process

**First author:** JIANG Zaisen, PhD, professor, specializes in large-scale current crustal deformation and earthquake forecasting. E-mail: jiangzaisen@126.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (41904092, 41974011); the Special Fund for Basic Scientific Research of the Institute of Earthquake Forecasting (2020IEF0506, CEAIEF2022010101); the National Key Research and Development Program of China (2018YFE0109700).

**引文格式:** JIANG Zaisen, SHAO Zhigang, LIU Xiaoxia, et al. Crustal Deformation Associated with Seismogenic Process of Chinese Mainland Strong Earthquakes and Identification of Approximation to Seismogenic Process in the Late Seismogenic Stage[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(6):807-819.DOI:10.13203/j.whugis20220204(江在森,邵志刚,刘晓霞,等.中国大陆强震孕育过程关联的地壳形变及孕震晚期逼近发震过程识别问题[J].武汉大学学报·信息科学版,2022,47(6):807-819.DOI:10.13203/j.whugis20220204)