

# GPS 在我国地震监测中的应用现状与发展展望<sup>\*</sup>

王 坦<sup>1,2</sup>, 李 瑜<sup>2</sup>, 张 锐<sup>2</sup>, 师宏波<sup>2</sup>, 王阅兵<sup>2</sup>

(1. 首都师范大学, 北京 100048; 2. 中国地震台网中心, 北京 100045)

**摘要:**回顾了 GPS 技术应用于我国地震监测中的发展历程, 重点从 GPS 数据处理与时间序列、中国大陆构造变形速度场与应变率场、中国大陆活动地块运动定量化和地震研究等方面, 介绍了 GPS 在我国地震监测中的应用现状, 并针对当前面临的问题与挑战, 进行了讨论, 从地震预测研究、基础研究、GPS 台网监测布局和 GPS 解算精度与时效 4 个方面, 对 GPS 在我国地震监测中的发展进行了展望。

**关键词:** GPS; 地震监测; 陆态网络; 应用现状; 发展展望

**中图分类号:** P315.725

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2021)02-0192-16

## 0 引言

地壳运动与地震有着密切的关系, 因此, 对地壳运动的监测一直是地震预测预报研究的重要依据和手段。但受限于观测技术和精度, 1966 年邢台地震后至 1998 年, 我国主要是采用传统大地测量方法开展大地形变测量 (王琪等, 2020), 包括水准测量、激光测距和三角测量等。传统大地测量效率低, 观测周期长, 长期以来只能在某些点和小范围进行监测, 难以对大范围、特别是断层带的形变场实施动态监测。虽然也曾有研究人员通过大规模人工观测获取中国大陆垂直形变图像 (张祖胜等, 1989; 薄万举等, 2007), 但在时空分辨率和精度上并不能满足构造变形研究和地震预测的需要, 严重制约了地震监测预报的发展。

20 世纪 90 年代初出现的 GPS 对地观测技术为大地测量和地壳运动监测带来了一场革命。GPS 高精度、大范围 and 准实时的地壳运动观测结果, 使得多种空间尺度、多种时间分辨率和宽频率域的现今地壳运动观测成为可能 (赖锡安等, 2004)。随着人们对导航定位性能要求的不断提升, 以及航天、通信及卫星导航技术本身的发展, 原始 GPS 在性能上的局限性已越来越明显, 新一代 GNSS, 如现代化的 GPS、不断改造的 GLONASS 以及新建

的欧盟 Galileo、我国的北斗卫星导航系统 (BDS), 都有了新的改进, 处于迅速发展之中。现今的导航定位技术无论在空间与时间的覆盖性上还是在精度上, 都取得了革命性的进步, 应用领域得到了极大拓宽, 这些给我们带来前所未有的机遇的同时, 也向我们提出了新的挑战。本文主要对 GPS 技术应用于我国地震监测的 30 年历史和取得的成就进行了回顾和评述, 并在此基础上, 结合国外的最新研究进展, 对当前面临的困境进行总结, 并提出了未来的发展方向。

## 1 GPS 观测台网

### 1.1 早期观测

我国最早的 GPS 地壳运动观测网是中国地震局 1988 年建设的滇西地震预报实验场 GPS 观测网 (王琪, Seeber, 1998)。在 20 世纪 90 年代初, 我国地震部门陆续在川滇、河西走廊 (黄立人, 马青, 2003)、青藏高原 (游新兆, 王启梁, 1994; 蔡宏翔等, 1997; 陈俊勇等, 2001; 张培震等, 2002a)、新疆天山 (王琪等, 2003)、华北 (李延兴, 赵承坤, 1998)、福建东南沿海 (刘序俨等, 1999) 等地区零星地开展了小范围、定期观测的 GPS 地壳运动监测研究工作 (1988—1997 年)。同一时期, 中国科学院上海天文台建设的国家攀登

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2021-02-08.

基金项目: 中国大陆构造环境监测网络运维资助.

第一作者简介: 王坦 (1991-), 工程师, 主要从事地壳形变观测技术研究和地震站网运管信息化工作.

E-mail: twang@seis.ac.cn

计划项目“现今地壳运动与动力学”建成了覆盖中国大陆 22 个点位的 GPS 观测网,该网分别于 1992、1994 和 1996 年进行了 3 期联测,大部分测点的速度精度都优于  $3\text{ mm/a}$  (朱文耀等, 1998; 李延兴等, 2000; 孟国杰, 2001)。国家测绘局完成了国家 A、B 级网共 800 多个点位的布设和观测,东部较密,西部稀疏,主要服务于国民经济建设。总参测绘局完成了国家 GPS 一、二级网 500 多个点位的布设和观测,均匀地分布于全国各地。

以上这些早期观测通常都采用流动观测模式进行(王小亚等, 2002),每次观测时长在 1 到数天,主要关注于一些局部区域的形变特征,难以提供全国尺度连续的地壳运动特征。

## 1.2 中国地壳运动观测网络

1998 年,“九五”期间,由中国地震局牵头启动实施了国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络工程项目”(简称“网络工程”)。整个工程由基准网、基本网、区域网和数据传输与分析处理系统 4 大部分组成。基准网是网络工程的基本框架,由 25 个 GPS 连续观测站构成;基本网由 56 个定期复测的 GPS 站组成;区域网由 1 000 个不定期复测的 GPS 站组成;数据系统由 1 个数据中心和 3 个数据共享子系统构成。网络工程在中国大陆建立了由 25 个连续 GPS 基准站,56 个基本站和 1 000 个流动 GPS 区域站组成的 GPS 监测网络。(张祖胜, 2001; 牛之俊等, 2002; 陈俊勇, 1997)。基准站相邻站间距离平均约为 700 km,主要功能是监测中国大陆一级块体。基准站相邻站间 GPS 基线长度年变化率测定的精度优于  $2\text{ mm/a}$  (王琪等, 2003; 游新兆等, 2001)。基本站作为基准站的补充,主要用于一级块体本身及块体间的地壳变动的监测。它与基准站一起均匀布设,平均站距约为 350 km,相邻站间 GPS 基线每期测定精度:水平分量优于 5 mm,垂直分量优于 15 mm。区域站中约 700 个站集中分布在主要构造带和地震带上,用于监测其活动状况,为地震预测预报服务;约 300 个站均匀分布在全国,作为基准站和基本站的补充,相邻站间 GPS 基线每期测定精度:水平分量优于 5 mm,垂直分量优于 15 mm。网络工程以监测地壳运动服务于地震预报为主要目标,并兼顾大地测量和国防建设的需要,以 GPS 技术为主,辅之以 VLBI、SLR、重力和水准观测,其规模、观测密度和精度等方面都将中

国大陆 GPS 地壳运动观测水平推向了一个新高度。

## 1.3 中国大陆构造环境监测网络

作为网络工程的延伸,“十五”期间建成的中国大陆构造环境监测网络(简称“陆态网络”)(甘卫军等, 2007, 2012; 游新兆, 马海建, 2012),使得我国大陆连续运行的 GPS 基准站由网络工程的 25 个扩展到 260 个,区域流动 GPS 观测站点由 1 000 个扩充至 2 000 个。一期工程的基本站在二期工程中将不再单独存在,其原有的 55 个定期观测的 GPS 基本站,除部分被升级改造为连续观测基准站外,其余站点归入 2 000 个区域站之中。

基准站布设方面,在中国大陆的 20 个主要活动块体上各布设 3 个基准站,共计 60 站;在我国总长约 32 000 km 的活动断层上平均每 200 km (大致为一个 8 级地震的断裂破裂长度)布设 1 个基准站,共计 160 站;为实现对活动强烈的主要断裂的有效监测,在地震活动最为强烈的中国大陆西部地区布设垂直于断裂的密集线状观测台阵和以监测慢地震为目标的断裂两侧的成对台阵,共计 32 站;在中国大陆周边海域的岛礁上布设相应台站,共计 4 站;在监测块体涉及的中国大陆周边国家布设相应台站,共计 4 站。基准站站间距缩小至 160 ~ 350 km,水平分量测定精度优于  $2\text{ mm/a}$ 。

区域站在网络工程的基础上新增 1 000 个,采用按需要不定期复测的方法以补充基准站的不足。新建的区域站中,有 400 个区域站组成 50 个跨越主要活动断裂带的密集线状观测点阵,用于研究断层结构和形变特征;300 个用于 25 个地震危险区的加密,点间距 30 ~ 70 km;另 300 个在全国均匀分布。全国的大部分地区区域站的平均间距缩小至 100 km 左右,有可能监测到 5 级地震产生的变形。区域站坐标变化量测定精度:水平分量优于 5 mm,垂直分量优于 10 mm。

陆态网络与美国 PBO 和日本 GEONET 地球观测网络一同成为世界上性能指标最先进的三大地壳运动观测网络,成为国际地球科学研究与发展的基础平台(甘卫军等, 2012)。陆态网络在建站技术、观测技术、集成技术及其综合应用方面,实现了与世界先进水平同步发展。在布网设计上,采取基准站与区域站有机结合的方式,形成自成特色的站网体系,台站的空间分布达到与国外同类网络相同的水平,时间分辨率在重点地区接近

世界先进水平。陆态网络所采取的整体规划、统一布局、重点布设、统一标准的建设模式,在充分发挥整体性优势的同时,更具针对性和实用性,并保证了高质量数据的产出,提高了国家投资效益。陆态网络的建成实现了对中国大陆主要活动块体和活动断层的覆盖,为获取中国大陆地壳运动细部特征提供基础,使我国综合利用空间对地观测技术,监测大陆岩石圈、大气圈动态变化,特别是与地震有关的变形监测的水平达到国际先进(甘卫军等,2012)。与此同时,中国地震局自2009年开始,针对地震重点危险区和重点监视区,先后实施了华北强震强化跟踪监测项目、综合地球物理场观测计划(青藏高原东缘地区和鄂尔多斯地块周缘地区)和大华北地区项目等,不断完善GPS观测。

#### 1.4 GPS 数据资源共享与发展

中国地震局自2014年开始以陆态网络为纽带,逐步开展了同气象、测绘和国土等部门的全国GPS数据资源共享工作。截至2020年,已形成含陆态网络260个共计超过2000个连续GPS观测站的全国共享GPS观测网,进一步扩大了监测范围,提升了监测能力,提高了资源利用率。东部GPS流动观测逐步以共享站代替,重点加强西部地区GPS流动观测,实现了GPS观测网络的大发展。至此,中国大陆GPS观测实现了从全国大范围空间覆盖以流动观测为主向固定连续站发展的进步。连续观测不仅实现了高时间分辨信息的获取,同时由于GPS包含的非构造不规则的周期信息,连续观测还实现了震间长期高精度地壳运动速率的获取。

这些日益丰富的GPS观测与研究,开拓了中国大陆现今地壳运动-变形和动力学研究新领域,直接支持了大陆动力学、地震科学、地震大地测量学(周硕愚等,2017)和地震预测的创新,同时也为中国大陆的地壳运动和地球动力学研究提供了十分重要的基础资料和约束条件。

## 2 GPS 在我国地震监测中的应用现状

### 2.1 GPS 数据处理与时间序列

#### 2.1.1 GPS 数据处理软件

目前,用于地壳运动研究的GPS数据处理主要采用的是精密单点定位软件(如GIPSY软件、

Panda软件)、双差定位软件(如GAMIT软件)和同时具备这两种功能的软件(如Bernese软件)(顾国华等,2001,2005,2007)。

精密单点定位(PPP, Precise Point Positioning)技术由美国喷气推进实验室(JPL)的Zumberge等(1997)提出。它是通过外部高精度卫星轨道数据和钟差产品,对单个测站的非差导航卫星观测伪距值及载波相位观测值进行处理,获得分米级、厘米级甚至毫米级定位结果的一种导航数据处理技术。Zumberge等(1997)还基于平方根滤波方法研制出精密单点定位解算软件GIPSY并进行相关实验,单天解的精度为:水平方向1 cm,高程方向2 cm。经过20多年的快速发展,国内外学者研发出了许多成熟的PPP软件。瑞士伯尔尼大学天文研究所在其研制的BERNESE5.0中添加了PPP.PCF模块,可进行GPS/GLONASS PPP解算(Dach *et al.*, 2007)。武汉大学刘经南等基于信息平方根滤波法(SRIF)研制出PPP解算软件PANDA(Liu, Ge, 2003; 赵齐乐等, 2005)。

双差定位即在两测站之间以及两颗卫星之间分别做差,是较早出现的、成熟的高精度定位方法,广泛应用于高精度GPS测量数据处理软件。因为要做差,就需要选择基准站和流动站,选择参考卫星和非参考卫星。双差定位有松组合模型(LCM, Loosely Combined Model)和紧组合模型(TCM, Tightly Combined Model)两种。现在主流的方法是松组合模型,在每个卫星导航系统内分别独立选择各自的参考卫星,只在系统内组建双差观测方程,再联合不同系统的双差方程进行组合定位解算。紧组合模型,即在多系统组合定位时,不同的GNSS系统在组双差观测方程时,只选取某一颗卫星作为参考卫星,其它卫星均与其做差,这样可以形成系统内和系统间的双差观测值(张小红等,2016)。在松组合模型中,各个系统的观测值相互独立,实现简单,已被广泛采用。但是,松组合模型没有考虑不同GNSS之间的相关性,没有充分利用多系统观测数据,不能真正意义上实现GNSS高精度相对定位中GNSS系统间的兼容和互操作性。相比之下,紧组合模型充分考虑了不同GNSS系统间的融合处理,减少了参考卫星的个数,增加了观测值的个数,提

高了定位模型强度以及相对定位的精度、可靠性和可用性。

### 2.1.2 GPS 坐标时间序列

GPS 在地震监测研究中的基础应用主要是通过高精度、自动化、快速甚至实时的 GPS 观测数据处理,得到地壳形变的时间序列和空间分布信息。通过长时间的 GPS 坐标时间序列处理,进行数据补缺、粗差剔除、噪声分析、功率谱分析、共模误差分析、阶跃修复和震后弛豫形变等手段,可获取前兆信息,进而研究地壳运动机理或模型。

为了对 GPS 坐标时间序列进行分析,需要建立相应的时间序列模型。Davis 等 (2012) 提出的对数模型目前被广泛应用于 GPS 坐标时间序列分析领域,其数学模型如下 (Blewitt, Lavallée, 2002; Langbein, 2008; Montillet, Yu, 2015; 黄立人, 2006; 贺小星, 2013; 侯晓伟, 2018; 许家琪, 2019):

$$y(t_i) = a + bt_i + c\sin(2\pi t_i) + d\cos(2\pi t_i) + e\sin(4\pi t_i) + f\cos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_j} g_j H(t_i - T_{h_j}) + \sum_{j=1}^{n_h} h_j H(t_i - T_{h_j}) t_i + v_i \quad (1)$$

式中:  $a$  为截距;  $b$  为线性速率;  $c\sin(2\pi t_i) + d\cos(2\pi t_i) + e\sin(4\pi t_i) + f\cos(4\pi t_i)$  为周年半周年变化;  $\sum_{j=1}^{n_j} g_j H(t_i - T_{h_j})$  为同震阶跃;  $\sum_{j=1}^{n_h} h_j H(t_i - T_{h_j}) t_i$  为非同震阶跃 (仪器变更);  $v_i$  为观测噪声。该公式包括了测站的线性速率  $b$  (该值即为后面比较的速度场的值)、周年变化半周年变化、同震阶跃和非同震阶跃。

基于上述对 GPS 时间序列的分析,扣除粗差,并对 GPS 时间序列中的阶跃 (地震同震、仪器更换等原因造成的) 进行探测和剔除,最终得到相对“干净”的 GPS 站点位置时间序列 (图 1)。

### 2.1.3 GPS 基线时间序列

GPS 站点数据解算还可获得基线时间序列 (图 2)。由于 GPS 基线时间序列能在一定程度上削弱系统误差和共模噪声的影响,可以明显提高形变场观测精度,因此比单个测站坐标时间序列能更灵敏地反映周围构造环境的变化,连续观测点日误差仅为约 1 mm,在断层两侧成对设立 GPS

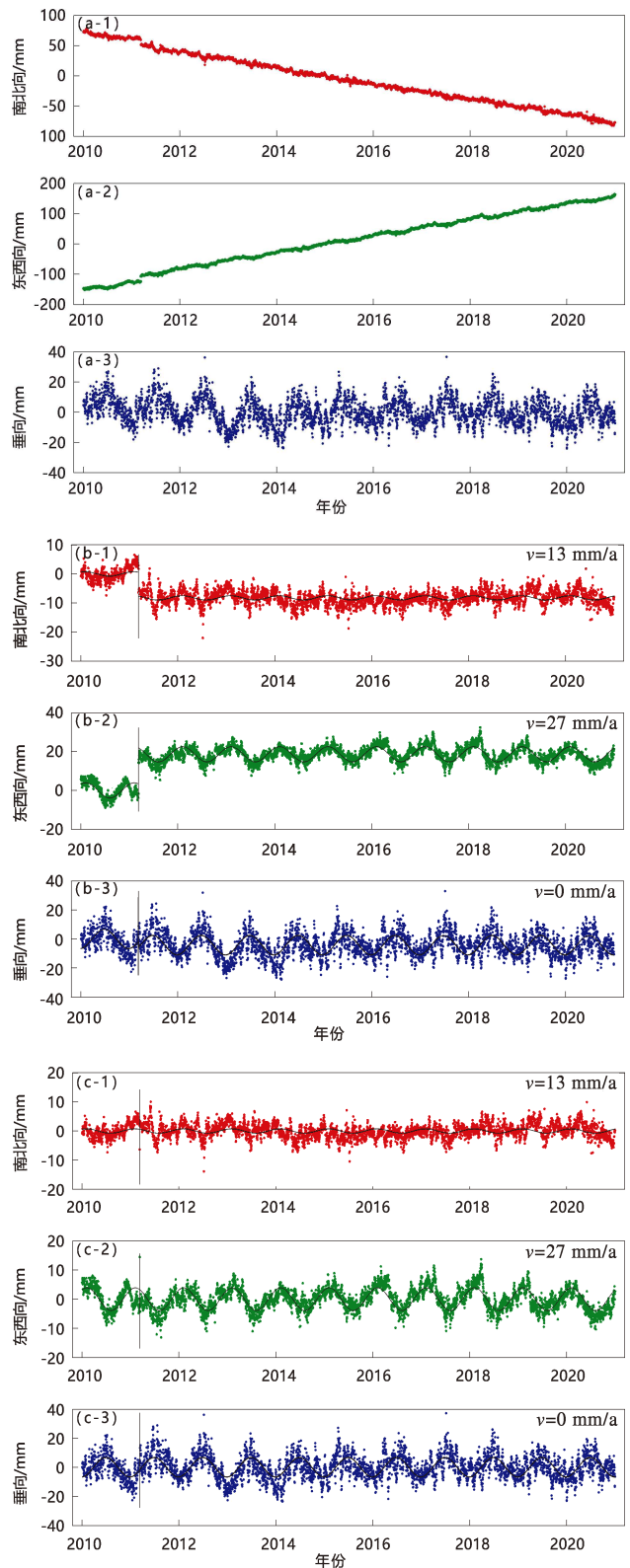


图 1 GPS 站点位置原始序列 (a)、去除线性序列 (b) 以及去除线性 + 阶跃序列 (c)

Fig. 1 Original time series of GPS site location (a), time series after linear detrending (b), and time series after linear detrending and step (c)

可以用来有效监测断层内、特别是脆韧转换带内的细微形变变化,捕捉断裂带上与构造运动相关的精确时空信息(王敏等,2008;张风霜等,2011)。王敏等(2008)利用跨鲜水河断裂的两对 GPS 连续观测点资料,获得了跨鲜水河断裂高精度形变场(误差约 1 mm)的动态演化轨迹。该轨迹清晰地反映了鲜水河断裂乾宁段和道孚段形变场的明显不同,揭示当前断裂南段转换层强度可能高于北段,对应于更长的发震周期。

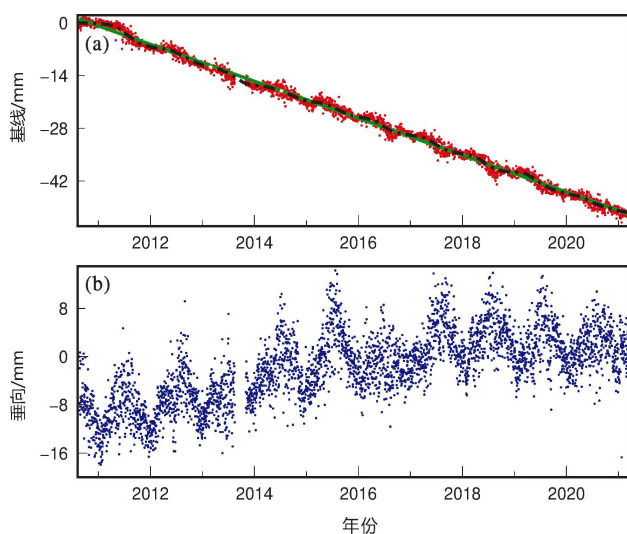


图2 基线时间序列

Fig. 2 Baseline time series

## 2.2 中国大陆构造变形速度场与应变率场

自 1988 年中德合作滇西地震预报实验开展 GPS 地壳形变监测以来,获取中国大陆构造变形的完整图像始终是研究人员们最基础、最重要的科学目标。中国大陆地壳运动与变形监测经历了监测区域由小到大、站点由稀疏到相对密集的一个发展过程,与之相对应的是地壳运动速度场的不断完善和精化(王敏,沈正康,2020)。

### 2.2.1 水平速度场

早期的 GPS 测站十分稀疏,区域控制范围极其有限,人们对中国大陆整体的构造形变特征认知不够。在前人工作基础上,王琪等(2001, 2002, 2006)和 Wang (2001a)首次利用国内及周边国家地区的 229 个 GPS 观测站资料进行统一解算,获得了更为精细的中国大陆地区地壳运动水平速度场,在国际上产生重要影响。马宗晋等(2001)利用 1998—2001 年基准站和基本站观测

约束了中国大陆一级构造块体的运动特征。王敏等(2003)通过分析中国地壳运动观测网络 GPS 数据特别是 1999 年与 2001 年区域网数据,初步得到了中国大陆地壳运动速度场,并用统计分析的方法从高密度台站速度场中区分出 9 个独立活动块体和 2 个广泛形变带,求出活动块体刚体运动欧拉极和相邻块体间相互运动速率。牛之俊等(2005)利用 3 期及其他一些区域流动观测结果共 1 199 个观测站点,通过 GAMIT 软件得到中国大陆现今地壳运动速度场。该速度场清晰地揭示了不同地块的变形方式差异,最明显的特征是,青藏高原和川滇地区绕东喜马拉雅构造结顺时针旋转, GPS 观测的速度矢量在西藏东部向北运动,到川西一带转为向 SEE 向,到云南地区逐渐转为向 SSE、SW 方向运动。此外中国西部速度矢量由南向北逐渐递减,表明其青藏高原的地壳缩短吸收了绝大部分印度和欧亚板块之间的相对运动,剩余部分则被天山及以北的地壳缩短所吸收。Gan 等(2007)用青藏高原及周边 726 个 GPS 站,对青藏高原现今地壳运动给出了精准的描述和推断,认为整个青藏高原的刚性旋转可以被描述为相对欧亚框架下的  $(24.38 \pm 0.42)^\circ \text{N}$ 、 $(102.37 \pm 0.42)^\circ \text{E}$ 、 $(0.7096 \pm 0.0206)^\circ/\text{Ma}$  欧拉矢量,刚性旋转组件吸收了至少 50% 的来自印度板块向东北的推力,并主导了北部的向东挤压。

由于 2008 年陆态网络的实施, GPS 站点密度得到极大提升,我国的 GNSS 观测资料日趋丰富,中国大陆构造变形图像由最初的几十个点发展至目前的几千个点。李强等(2012a, b)以网络工程 1 056 个区域站 1998—2007 年观测资料及陆态网络 2 056 个区域站 2009 和 2011 年两期观测资料为基础,剔除其中位移异常站,实际选取总计 1 979 个测站,利用 GAMIT、GIPSY、Bernese、Panda 独立计算等权合并,尽可能增强观测结果的可靠性,绘制出了空间分辨率高,构造变形特征更为丰富、翔实的中国大陆地区地壳运动水平速度场。Zheng 等(2017)利用 1991—2015 年 2 574 个 GPS 速度场测量数据,给出了印度—欧亚大陆最完整、准确和最新的速度场。Xu 和 Stamps(2019)等利用 1996—2017 年陆态网络 GPS 数据,产出了可靠的速度场,并据此估计了中国大陆的地震活动率。Wang 等(2020)对近 25 年超过



4 000 个GPS 观测点的数据资料进行了严格处理,得到了当前最新、最精细的中国大陆地壳运动速度场,更进一步地印证了印度与欧亚板块相对运动被青藏高原变形所吸收,变形发生在整个青藏高原,而不仅在少数断裂带上,呈现近南北向缩短,东西向拉长,绕喜马拉雅东构造结和秦岭构造结发生明显的顺时针旋转特征。

### 2.2.2 垂向速度场

在垂向速度场方面,甘卫军课题组利用青藏高原及其周边十多年的流动和连续 GPS 资料,对青藏高原现今地壳运动,尤其是垂向地壳运动进行研究,并分析探讨青藏高原现今隆升状况与长期地形的相关性及其所反映的地球动力学含义,揭示了青藏高原相对其北部稳定块体的整体隆升趋势(Liang *et al.*, 2013; 梁诗明, 2015)。Hao 等(2016)通过对青藏高原东南部连续 GPS 站和 GRACE 数据联合分析,确定了青藏高原东南部的垂直地壳运动速率,揭示了青藏高原东南部正在经历隆升,而川南—云南南部相对于北部地区正在下沉的现象,这也是地壳均匀伸展假设所不能解释的。Zhan 等(2017)利用 2010—2016 年 235 个 GPS 连续站的数据分析了大空间尺度的中国大陆地壳垂向运动,又以云南和天津两个典型地区为重点研究区域进行了重点分析,对中国大陆垂向运动以及周期性特征和区域性差异给出了定量描述。

随着网络工程、陆态网络的建设,我国的 GPS 观测资料日趋丰富,中国大陆构造变形图像由最初的几十个点发展至目前的几千个点,为定量、精细研究块体运动、断层活动提供了数据基础, GPS 观测资料已全面、系统、精确地展示出中国大陆地区地壳构造变形的方式及幅度。

### 2.2.3 应变率场

GPS 速度场反映的是构造活动的运动学特征,应变率场给出的是变形样式和强度,在一定程度上反映了构造应力场特征。在 GPS 点位分布不均匀的地区,利用 GPS 速度场计算的应变率场能更好地描述构造变形特征(王敏, 沈正康, 2020)。另外,不同的应变矢量,可以反映不同方向的变形分布(武艳强等, 2020)。应变率场研究对于地震危险性评估具有重要意义,利用 GPS 资料获取地壳运动与应变积累一直是国内外重视的地震中

长期预测的技术途径(王静, 2019)。计算应变率场的方法有很多(Shen *et al.*, 1996; 李延兴等, 2001; 杨少敏等, 2012; 石耀霖等, 2006; 沈正康等, 2003; 黄立人, 王敏, 2003; 江在森等, 2003, 2010; 武艳强等, 2009, 2011),使用相同或类似的 GPS 资料求应变,不同研究者给出的结果会有显著差别(石耀霖, 朱守彪, 2006)。不同应变率计算方法有其各自的特点,在具体使用中,需要根据区域大小、地质资料、GPS 站点数量及空间分布选择合适的方法。

根据动态的应变率场图像再计算即可得到主应变、面膨胀和剪应变,这对研究区域应变积累过程具有重要意义。通过剪应变可以比较直观、清楚地显示出,中国大陆内部不同构造单元对周边板块和板内深部构造动力共同作用的变形响应。中国大陆地区最大剪应变率以南北地震带为界,呈西强东弱态势,中国大陆内部剪应变率最大的三个区域依次是喜马拉雅、昆仑山断裂带、阿尔金山断裂带,藏南、羌塘地块中西部部分地区、昆仑山中部至鲜水河—安宁河—小金断裂带一带、东天山等属最大剪应变率高值区(李延兴等, 2003; 江在森等, 2001, 2003; 沈正康等, 2003; 王敏, 沈正康, 2020)。另外,安宁河、小江断裂带、鄂尔多斯东北角、祁连山和天山的剪应变值也相对较高。

通过 GPS 推算的现今地壳应变场的空间变化与大陆强震具有较好的对应关系(张培震等, 2003)。1995 年以来发生的  $M_s \geq 6$  地震的震中一般都分布在剪应变高值区,尤其是 2001 年昆仑山口西  $M_s 8.1$  地震,正好发生在面膨胀应变率和最大剪应变率高值区边缘的梯度带上(Lin *et al.*, 2002)。随着观测精度的进一步提高和站点密度的增加, GPS 必将在地壳构造变形和地球动力学研究以及地震预测中发挥越来越大的作用。

## 2.3 中国大陆活动地块运动量化

中国大陆岩石圈新生代和现代构造变形的最显著特征是巨大的晚第四纪活动断裂十分发育,将中国大陆切割成为不同级别的活动块体(邓起东等, 2002)。活动地块边界构造活动强烈,内部相对稳定,绝大多数强烈地震都发生在地块边界的构造带上。根据晚第四纪构造变形、地震活动和地球物理场的差异,可以将中国大陆分成

若干活动地块, GPS 所揭示的中国大陆现今地壳运动场清晰地表现出了分块特征, 不同的活动地块具有不同的水平运动和变形方式 (黄立人, 王敏, 2003)。

丁国瑜和卢演传 (1986) 根据地震资料、活动构造资料首次定量研究了我国大陆内部各个块体的相对运动和总的变形情况, 获得了百余个观测段上断层滑动平均速率矢量的水平投影值, 从地质学角度揭示了断层的长期滑动速率。张培震等 (2002b, 2003) 结合测震、活动构造及 GPS 资料, 将中国大陆及其邻区划分为 22 个活动地块, 并定量描述了每个地块运动的速率大小和方位。李延兴等 (2003) 利用 1 598 个 GPS 观测站资料, 从地壳运动与应变的角度, 定量计算了各地块的运动参数和应变参数。

随着 GPS 观测资料的不断积累, 尤其是号称“世界屋脊”的青藏高原地区 GPS 观测资料的增多, 为研究其构造变形模式提供了有力的数据支持。

国外学者应用已发表的 GPS 速度场数据, 从块体运动的角度进一步量化了青藏高原以及周边滑动断裂带的运动速率。基于 Zhang 等 (2004) 发表的青藏高原地区 GPS 速度场数据, Meade (2007) 将其与地质观测数据整合到内部一致的三维区域尺度模型中, 对弹性上地壳的弹性行为进行解释, 绘制出了青藏高原及周边地区地壳运动各地块边界滑动速率图; Thatcher (2007) 同样选取了其中 349 个 GPS 站的速度, 利用准刚性块模型, 将青藏高原及其周围地区划分成 11 个块体。

GPS 的出现与发展, 为量化研究现代板块内部活动构造提供了前所未有的机遇, 其与地震地质资料的结合发展, 丰富和完善了现代板块内部活动构造理论, 为定量研究地震危险性分析提供了依据 (Shen *et al.*, 2005; 王阆昭等, 2008; 杨少敏等, 2008; Zhao *et al.*, 2017a; Wang *et al.*, 2017; Zheng *et al.*, 2017)。

## 2.4 地震研究

GPS 可以准确测定地震引起的永久的静态同震形变场, 为研究地震的同震破裂分布、断层几何结构提供重要约束, 弥补远场地震波形对发震断层几何结构不敏感的缺点。此外, 高精度、高频率的 GPS 监测扩充了强地面运动观测的频带范围,

不存在振幅饱和、曲线漂移等缺点, 已成为地震仪的有效补充。GPS 观测也被广泛用于震后形变监测和震后机理研究等方面, 而以震后形变为约束, 可以探讨断层的余滑性质、下地壳/上地幔的流变性, 为断层的运动学研究和区域地球动力学研究提供依据, 是对岩石力学实验、冰后回弹等手段探测结果的检验和补充 (刁法启, 2011; 刘刚等, 2020; 赵斌等, 2020)。

### 2.4.1 同震形变场

中国境内的 GPS 台网已经成功观测到中国大陆及其周边地区多次地震的同震形变场, 如 2004 年印尼苏门答腊发生  $M_w 9.3$  地震 (王敏等, 2006)、2008 年汶川  $M_s 8.0$  地震 (Wang, 2011; 伍吉仓等, 2020) (图 3)、2011 年日本  $M_w 9.0$  宫城地震 (王敏等, 2011)、2015 年尼泊尔  $M_s 8.1$  地震 (李瑜等, 2015; 赵斌等, 2015) 等大地震, 以及 2010 年青海玉树  $M_s 7.1$  地震 (Meng *et al.*, 2013)、2013 年四川芦山  $M_s 7.0$  地震 (Jiang *et al.*, 2014)、2014 年新疆于田  $M_s 7.3$  地震 (梁洪宝等, 2018)、2014 年云南鲁甸  $M_s 6.5$  地震 (魏文薪等, 2018)、2015 年新疆皮山  $M_w 6.4$  地震 (He *et al.*, 2016)、2016 年新疆阿克陶  $M_w 6.6$  地震 (Li *et al.*, 2019)、2017 年四川九寨沟  $M_s 7.0$  地震 (Zhao *et al.*, 2018; 王阅兵等, 2018; Liu *et al.*, 2019) 等。值得一提的是 GPS 在汶川地震同震三维形变场的测定、同震滑动分布模型的反演中发挥了至关重要的作用, 大大促进了对汶川地震发震机理的认识 (Wang, 2011b; 顾国华, 王武星, 2011; 殷海涛等, 2010; 赵静等, 2018)。

### 2.4.2 高频 GPS 应用

GPS 与强震仪同址观测, 可利用加速度和位移的关系, 来弥补两种观测手段的不足, 即通过高频 GPS 来矫正强震记录, 以强震记录来提高高频 GPS 的采样率和精度, 达到联合反演地震波的影响过程, 这在近年应用较为广泛。Larson 等 (2003) 最早成功利用 1 Hz GPS 观测数据进行研究, 复原了 2002 年德纳利 (Denali)  $M_w 7.9$  地震的远场地震波, 并与强震仪记录比较, 认为 1 Hz GPS 观测资料可以联合地震观测资料反演研究地震破裂过程。此后, 外国学者 Ji 等 (2004)、Bock 等 (2004)、Miyazaki 等 (2004)、Emore 等 (2007)、Bilich 等 (2008)、Davis 和 Smalley (2009) 和国

内学者殷海涛等 (2010)、Shi 等 (2010)、方荣新 (2010)、张小红等 (2016)、申文豪等 (2019) 也先后利用高频 GPS 数据进行了相关研究, 推动了高频 GPS 在地震研究中的广泛应用。Geng 等

(2019, 2020) 将并置的高频 GNSS、加速度计和陀螺仪 3 种仪器进行融合, 以期发挥每种仪器的优势。融合 3 种观测数据的地震大地测量学方法, 在保证观测稳定性的条件下, 将观测近场形变精度

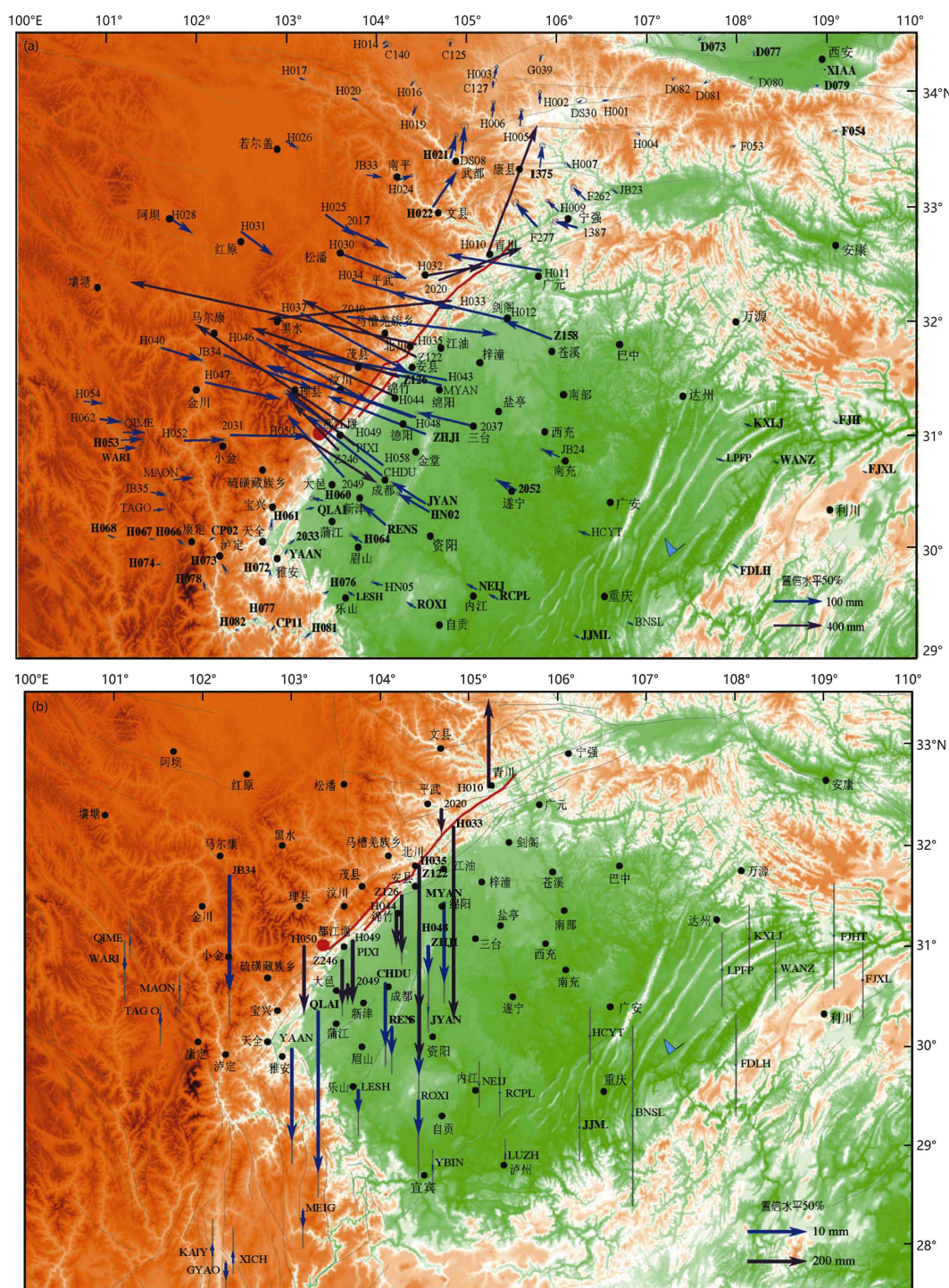


图3 汶川  $M_s 8.0$  地震 GPS 同震水平 (a)、垂直 (b) 位移场  
(国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组, 2008)

Fig. 3 GPS co-seismic displacement field caused by the Wenchuan  $M_s$ 8.0 earthquake:  
(a) horizontal, (b) vertical (according to CMONOC Project Team, 2008)



提高至毫米量级,这对于大地震震源机制的研究,乃至地震预警与烈度速报工程都具有重要意义。

#### 2.4.3 GPS 震后形变监测

随着 GPS 观测台网的建设和发展,国内也积累了非常丰富的震后形变观测资料,为震后形变监测和震后机理研究提供了丰富的数据基础,可模拟震后应变应力时空发展过程,为地震预测提供参考。2001 年昆仑山口西  $M_w 7.8$  地震是网络工程建成后发生的首次大地震(赵斌等, 2020)。通过网络工程 GPS 测站和震后加密观测,国内学者首次使用 GPS 技术大面积高密度监测地震同震位移和震后断层蠕动(任金卫,王敏, 2005),观测到了昆仑山断裂带南、北两侧震后形变的不均一性(Ryder *et al.*, 2010; 贺鹏超等, 2018; Liu *et al.*, 2019)。2008 年汶川  $M_s 8.0$  地震后, GPS 观测站的数量较之前有很大的提升,观测到明显的地震后变形,垂直于断层方向的形变在 2013 年后衰减到几乎为零,直到 2013 年 5 月的观测中,明显的右旋运动并没有明显衰减(Xu *et al.*, 2014)。2015 年尼泊尔  $M_s 8.1$  地震后, Zhao 等(2017b)利用 GPS 观测资料,首次提出藏南地区幔黏弹性松弛在震后早期也在起作用,并分析得到印度—藏南黏滞系数存在明显的横向差异,与青藏高原东缘具有相似性(Huang *et al.*, 2014; 赵斌等, 2020)。

#### 2.5 广泛的影响

GPS 观测技术从 20 世纪 90 年代初发展至今,其应用在中国大地上已遍地开花,不论是在军事测绘保障、交通运输导航、灾害天气预报方面,还是在地质科学研究、地震预测预报等领域,都发挥了巨大的作用,并产生了广泛而深刻的影响(姜卫平, 2017; 陈增强等, 2000; 王小亚, 2002; 尹继尧等, 2007; 魏明耀等, 2010; 徐韶光等, 2011)。

GPS 的出现,在时空尺度上极大地提升了大地测量监测地球表层运动与变形的能力。全国尺度的 GPS 观测网络(网络工程、陆态网络等)的建成并投入使用,实现了对板块及其边界带运动的监测,建立了空间大地测量板块运动模型;区域性和板内重要断裂带运动的监测和研究,提高了对板缘地震和板内地震构造环境的认识,推动了大陆动力学研究的进展。时空监测能力的提高,

大大增强了动力学研究的高精度地壳运动观测约束,使位错反演时所依据的地球模型更接近真实的地球,断层模型更加复杂多样,适应了不同时空尺度大地测量反演的需要,推动了位错理论的发展与应用,使我国在相关领域的研究跃入国际先进行列。

### 3 面临的问题

#### 3.1 地震监测预报难题尚未解决

GPS 观测因建立了全球统一参考基准而保证了大空间尺度观测结果具有可比性及高精度特性,对地震同震形变、震后形变以及震间形变等各个方面的研究起到非常重要的作用(周硕愚等, 2006, 2007, 2015; 吴云等, 2003; 顾国华等, 2003, 2012; 薄万举, 2013; 张晓亮等, 2006; 冒爱泉等, 2008)。然而,地震监测预报遇到的困难远远超出人们的预期,是世界性的科学难题,目前尚处于初期的科学探索阶段(陈运泰, 2009)。相比于传统大地测量技术, GPS 能够获得多尺度地壳运动和形变动态信息,但与地震预测对孕育过程信息的需求相比仍存在较大的差距(江在森等, 2020)。从国内到国外, GPS 在地震预测方面的应用都面临相似的困境。在地震预测研究方面,国内外的研究实例均表明基于震间期 GPS 资料反演的闭锁程度/滑动亏损分布与大地震发生地点具有对应关系,当 GPS 观测资料的空间分辨率满足要求时,此类工作对于强震地点和震级预测具有指示意义。这些回溯性研究为 GPS 应用于中长期地震预测指明了方向。

#### 3.2 基础研究缺乏突破

地震工作者基于震前 GPS 资料针对强震孕育晚期的研判一直在进行着有益的探索(武艳强等, 2020):如基于强震前 GPS 形变场空间分布与强震发生地点关系的探索(剪切变形分布与走滑型强震的关系、正应变分布与倾滑型强震的关系等);大地震同震及震后影响的显著弱响应区与后续强震的关系探索;强震前地壳变形模式与同震应变释放模式的非对称特征探索等。但目前此类研究多为现象总结和定性机理分析,尚缺乏有效的数理模型支持(周硕愚等, 2006)。

基于 GPS 时序资料进行震源异常的探索一直

被广大地震工作者所关注,多位学者研究认为基于 GPS 时序结果,在 2011 年日本“3·11”地震前观测到了几年尺度的偏离原有趋势的异常现象(回溯性研究)(Ozawa *et al.*, 2012; Yokota, Koketso, 2015)。另外,基于 GPS 时序资料的强震短临异常探索也在积极探索中,比如 GPS 方向角指数方法、变形参数时序变化与强震关系等。目前此类研究多为零散的现象总结,尚缺乏合理有效的定性或定量数理模型支持。

综合而言,基于 GPS 资料的强震地点预测取得了一些进展(江在森,武艳强,2012),具有一定的理论模型支撑,亟需加大科研投入,发展适合于中国的板内地震孕育模型、复杂断层系统强震孕育模型、多活动地块组合的强震孕育模型。另一方面,基于 GPS 资料对于强震孕育晚期判断及短临预测方面,积累了一些观测现象,除了继续积累震例外,亟需加大科研支撑,尽快发展起有效的解析或数值模型。

### 3.3 站点密度有待提高

现今活动断层滑动速率和闭锁深度的判定是进行地震危险性地点预测的基础。在我国西部大多数活动断裂及其附近, GPS 站点的间距在 80 ~ 150 km,而断层滑动引起的地表位移变化大的地方一般在断层两边 100 km 的范围内。因此,以现有的 GPS 站点密度无法可靠地反演断层参数,判断断层活动的性质,因此也无法对地震危险性做出可靠的判断。在几次大地震之前,连续 GPS 站由于距离震中较远没有发现异常,而区域站发现了明显的异常。目前,国际上应用于地震监测的最具代表性的地壳形变站网是美国(南加州地区)和日本的 GPS 观测网。其中美国(南加州地区)采用“重点地区密集观测”策略,观测站沿重点断裂带周边布设,间距达 2 ~ 5 km;日本采用“全域网格式均匀分布”策略,在陆地范围内,观测站平均间距约为 17 km,同美国、日本的 GPS 观测网相比,国内在站间距方面还有很大差距。

### 3.4 GPS 解算精度和时效有待提高

GPS 观测极大地提高了地壳运动水平方向监测能力,但受限于 GPS 系统设计与当前数据解算水平,垂向运动精度、数据解算时效和非构造因素剔除等诸方面仍相当薄弱。

## 4 发展方向

### 4.1 强化地震预测研究目标导向

(1) 强化中长期地震预测,完善 GPS 在发震地点和震级预测的方法和应用。目前, GPS 在地震中长期预测中的应用都获得广泛的认同(江在森等, 2020)。研究人员一致认为, GPS 的观测与弹性位错理论吻合很好,成功地解释了地震的孕育和破裂过程。GPS 研究获得的断裂滑动速率、闭锁程度、地震矩积累程度等可应用于地震的中长期预测,能较好地确定中长期地震的震级和地点。

(2) 加强 GPS 用于短临预测的实践探索与研究。GPS 在地震中长期预测中的应用已经基本获得大部分认可,但是在地震短临预测中的应用还存在较大的分歧。地震前兆是有的,问题在于是否能观测、记录到,即使观测到了,又是否能识别(马瑾, 2016)。有些专家认为 GPS 由于时空分布不足以及精度的问题,开展短临预测还存在困难,但有些专家对此呈乐观态度。GPS 应用于地震短临预报缺乏具有信服力的证据,但值得大力探索。目前, GPS 短临预测研究还相对较少(Chen *et al.*, 2014; 冯蔚, 2016; Feng *et al.*, 2016; Bedford *et al.*, 2020),需要加强。短临预测主要依靠 GPS 连续观测资料,这对 GPS 连续观测数据的处理和应用方法提出了新的挑战,需要探索、发展 GPS 在短临预测跟踪中的数据处理方法和应用方法的研究。

(3) 强化断层滑动行为的精细化研究,分析地震危险性。基于密集的 GPS 观测资料(包括速度场、基线或应变率),以震间 GPS 运动速度场为约束,研究主要活动断裂滑动速率、应变和地震能量积累,并根据地震目录统计断裂带的地震矩释放情况,从而分析评估区域地震危险性。重点加强与地震地质(古地震考察)、地震精定位等相关研究的交叉融合。

(4) 提高断层滑动瞬态变化过程的监测能力。基于密集连续 GPS 观测站,构建跨断层基线及观测网,识别并提取出断层滑动行为随时间的变化特征,进而研究断层瞬态变形过程与地震活动的关系。

(5) GPS 分析研究要从地表到地下,从运动学到动力学转换。GPS 观测到的是地表的运动,要

分析预测地下的地震活动, 需要加强深部应变、应力变化分析, 甚至要从运动学研究转换到动力学研究。

(6) 加强 GPS 与 InSAR、地震波等多元数据、多学科融合应用。各学科的数据都有自己的优势和劣势, GPS 可以观测大尺度的长期构造变形以及近场形变数据, InSAR 可获取近场形变的面场变化, 并对高程变化敏感 (Gong *et al.*, 2019), 加强 GPS 与 InSAR 资料的融合、提高垂向位移信号的信噪比应该是未来努力的方向, 而统计地震资料获得的地震平静期和空区信息对预测很有帮助。综上认为, 将 GPS 与 InSAR、地震波等多元数据融合应用, 可以降低地震分析预测的不确定性。

#### 4.2 加强基础研究和基础性工作

要从明确定位、重点工作领域、规划布局 and 推进举措等方面加强 GPS 用于地震监测预报的基础研究工作。一是明确基础研究工作定位。要以支撑地震监测预报为导向, 开展应用目标明确的基础研究工作。二是明确基础性工作重点领域。围绕地震成因理论、地震观测技术和强震潜在危险性等关键科学问题, 注重长、中、短临和不同空间尺度相结合, 强调地质学、地球物理学和大地测量等多学科的综合, 持续推进 GPS 地震学基础性工作, 为基础研究和技术创新夯实工作基础。三是加强谋划布局。开展 GPS 地震应用工作研讨, 梳理凝练未来基础研究和基础性工作的重点领域和科学选题, 研究提出未来项目、平台、设施布局建议。四是明确推进举措。出台进一步加强 GPS 地震学科基础工作的指导意见, 探索建立跨学科、面向基础研究的指导机构, 强化基础性工作人才队伍、实验室建设和项目支持, 推进科技数据资源共享、共用。

#### 4.3 统筹数据资源, 优化 GPS 监测布局

(1) 充分利用连续站资源, 适当减少东部地区的流动观测。近几年 GPS 流动监测得到显著加强, 主要构造带和重点地震监测区域基本实现了每年一期的复测。但从目前数据处理情况看, 对于东部地区地壳运动与变形较小的地区, 以当前实际 3 mm 左右的 GPS 流动观测精度来看, 这样密集的重复观测意义不大, 特别是华北、东北、华南地区采用大量的土层观测墩, 其稳定性存在显著的沉降与倾斜, 难以真实反映地壳构造运动的实际状态。在全国 GPS 资源共享基础上, 进行共

享连续站点数据质量筛查, 挑选出能够用于地壳运动监测的站点, 可代替部分流动观测。部分区域如华北和华南的连续站点密度比陆态网络流动站点密度还要大, 因此, 充分利用连续站观测资料, 适当减少这些区域流动观测, 不仅省时省力, 而且可获取连续观测数据, 能较好地分析该区域形变。应对历史上发生过强震的重大断裂 (如郯庐断裂) 加强数据分析, 必要时增补流动观测。

(2) 加强西部地区观测密度。现有的 GPS 观测网在布局上存在东西部布网观测的不均衡性, 东部相对密集, 而地壳构造运动强烈的广大西部地区相对稀疏。现有 100 ~ 300 km 的基准站密度, 80 ~ 150 km 流动站的密度, 要实现对地震发生的块体边界带和主要断层的密集连续监测, 尤其是西部地区还远不够, 有必要持续加大西部流动 GPS 观测或连续观测站的密度。建议进一步统筹、优化现有资源配置, 通过加密建站在短期内实现站点间距 50 ~ 80 km, 远期内 (5 ~ 10 年) 西部地区站点间距达到 30 ~ 50 km, 针对重大断裂带最好达到 10 km 间距。若空间分布密度在短时间内不能实现, 可以在西部地区适当增加观测频次, 至少每年观测一期, 重点危险区可一年进行 2 ~ 3 次复测。

(3) 构建活动块体边界带的综合观测体系。大陆强震主要发生在活动块体边界带上, 单纯依靠 GPS 技术不可能捕捉到全部地震孕育释放的信息, 应建立 GPS、InSAR、定点形变、重力、测震、流体、地磁等综合观测体系, 甚至进行多学科同址观测, 以期发挥多种技术优势, 增加约束信息, 进行相互比对验证。定点形变仪、地震仪、重力仪的观测资料的应用, 还可以拓宽 GPS 监测的时间尺度, 获取三维动态形变场, 提高地壳形变分辨能力, 对开展断层构造运动、地震能量积累、地震破裂、震后形变、断层蠕滑等典型动力学过程跟踪研究具有重要意义。

(4) 加强地震重点危险区细部观测, 获取精细变形特征。根据中国大陆地震重点危险区的研判结果, 地震危险信度和紧迫程度高或相对较高的危险区, 连续 GPS 站间距可适当加密至 25 km 左右。对西部十年尺度危险区, 要获取断层闭锁特征、应变积累速率, 可以采用流动站加密观测为主, 辅以新建临时固定观测站。喜马拉雅东构造结, 由于临近南北地震带, 其动态作用与川滇地区强震的孕育、发生密切相关, 需要重点强化

观测。喜马拉雅西段存在  $M9$  强震风险,会对整个青藏高原及中国大陆的动力学环境产生重大影响,也需要强化对该区的连续监测能力。

(5) 在“十四五”期间,推进 GPS 台站加密建设。利用“一带一路”和“川滇国家地震科学实验场”等重大项目的推进实施,实现全国和主要是重点区域 GPS 连续台站观测密度的显著提升。

#### 4.4 重视基础工作,加强 GPS 解算精度和时效

首先,要开发自主产权的 GPS 数据处理软件。目前的 GPS 数据处理主要依赖于国外的 GAMIT、Bernese、GIPSY 等软件。从长远发展看,我国需要自主研发一套能够进行 GPS 数据处理的软件,以提升国内 GPS 数据处理分析的水平;同时,通过数据处理软件的研发,培养一批 GPS 数据处理分析的专业技术人才,探索提高 GPS 数据解算精度、时效和剔除非构造影响因素的方法。

其次,加强对全国垂直形变场研究。加强对 GPS 垂向形变分量数据的研究,结合区域水准复测资料,分析 GPS 应用于地壳垂向运动监测的可行性;同时还要分析不同区域地壳垂向活动与地震活动之间的关系。

此外,还要加强 GPS 从业人员的素质培养。GPS 观测资料解算过程相对复杂,需要从业人员具备较扎实的专业背景、长期的技术储备和稳定的工作团队。为此,需要建立相对稳定的 GPS 数据处理、分析预报的从业人员队伍,制定教育培训计划,定期开展 GPS 相关业务的培训,同时加强从业队伍的工作团队建设,在实际工作中通过团队合作提高人员素质。

## 5 结语

GPS 对地观测技术为大地测量和地壳运动监测带来了一场革命。全国尺度上短时间获取地壳运动的定量结果,不仅对地球几何形变的定量研究、地震动态形变过程监测、地球动力学和断裂带微小地壳形变观测研究等方面有着重要的推动作用,同时为地震危险区的预测、地震前兆的观测和长、中、短、临的地震预测提供了更好的方法和手段,使地震预报从经验预报向物理预报推进成为可能。

虽然当前 GPS 在地震预报上的应用主要还是提供中长期预报信息,但也在一些地震的预测和研判中发挥了巨大的作用,如 2016 年新疆阿克陶

6.7 级地震 ( $39.27^{\circ}\text{N}$ ,  $74.04^{\circ}\text{E}$ , 震源深度 10 km) 和新疆呼图壁 6.2 级地震 ( $43.83^{\circ}\text{N}$ ,  $86.40^{\circ}\text{E}$ , 震源深度 6 km)。相信随着全国 GPS 数据资源的共享、十四五规划、川滇试验场等国内一系列 GPS 项目的推进, GPS 多手段的联合,数据处理技术、基础研究和针对地震预测基础研究的突破(顾国华, 2008), 地震短临预测水平将会得到大幅度提高。

#### 参考文献:

- 薄万举,章思亚,刘宗坚,等. 2007. 大地形变资料用于地震预测的回顾与思考[J]. 地震, 27(4): 68-76.
- 薄万举. 2013. GPS 展示的中国大陆主要相对变形特征及强震活动研究[J]. 地球物理学进展, 28(2): 599-606.
- 蔡宏翔,宋成骅,刘经南. 1997. 青藏高原 1993 和 1995 年地壳运动与形变的 GPS 监测结果分析[J]. 中国科学: 地球科学, 27(3): 233-238.
- 陈俊勇,王泽民,庞尚益,等. 2001. 论珠穆朗玛峰地区地壳运动[J]. 中国科学: 地球科学, 31(4): 265-271.
- 陈俊勇. 1997. 中国地壳运动观测网络简介[J]. 测绘通报, (2): 8-11, 15.
- 陈运泰. 2009. 地震预测: 回顾与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 39(12): 1633-1658.
- 陈增强,胡瑞华,刘立嵩. 2000. 中国地壳运动观测网络在地球科学研究中的应用前景[J]. 地球科学进展, 15(4): 421-425.
- 邓起东,张培震,冉勇康,等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学: 地球科学, 32(12): 1020-1030.
- 刁法启. 2011. 基于 GPS 观测的同震、震后形变研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院.
- 丁国瑜,卢演传. 1986. 对我国现代板内运动状况的初步探讨[J]. 科学通报, 31(18): 54-57.
- 方荣新. 2010. 高采样率 GPS 数据非差精密处理方法及其在地震学中的应用研究[D]. 武汉: 武汉大学.
- 冯蔚. 2016. 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.
- 甘卫军,李强,张锐,等. 2012. 中国大陆构造环境监测网络的建设与应用[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 4(4): 16-23.
- 甘卫军,张锐,张勇,等. 2007. 中国地壳运动观测网络的建设及应用[J]. 国际地震动态, (7): 43-52.
- 顾国华,牛红叶,孟国杰,等. 2001. 中国地壳运动观测网络 GPS 数据处理进展[J]. 全球定位系统, 26(1): 5-13.
- 顾国华,王武星. 2011. 区域网 GPS 观测得到的汶川大地震前后的地壳垂直运动[J]. 地震, 31(3): 1-8.
- 顾国华,张晶,王武星. 2003. GPS 空间大地测量在地震预测研究中的最新进展[J]. 全球定位系统, 28(1): 9-13.
- 顾国华,张晶,王武星. 2005. 中国地壳运动观测网络 GPS 观测得到的地壳运动结果[J]. 测绘通报, (7): 2-8.
- 顾国华. 2007. GNSS(GPS)观测研究地壳运动的新进展[J]. 国际地震动态, (7): 9-15.



- 顾国华. 2008. GNSS 科学发展与前景[J]. 全球定位系统, 33(4): 4-9, 13.
- 顾国华. 2012. 地壳形变与地震前兆探索回顾和展望[J]. 地震, 32(2): 22-30.
- 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  $M_s 8.0$  级地震的同震位移场[J]. 中国科学: 地球科学, 38(10): 1195-1206.
- 贺鹏超, 王敏, 王琪, 等. 2018. 基于 2001 年  $M_w 7.8$  可可西里地震震后形变模拟研究藏北地区岩石圈流变学结构[J]. 地球物理学报, 61(2): 531-544.
- 贺小星. 2013. GPS 台站时间序列分析及其地壳形变应用[D]. 上海: 东华理工大学.
- 侯晓伟. 2018. 高精度 GPS 用于地壳形变研究分析[D]. 西安: 长安大学.
- 黄立人, 马青. 2003. 祁连山—河西走廊地区的现今水平形变[J]. 大地测量与地球动力学, 23(4): 9-13.
- 黄立人, 王敏. 2003. 中国大陆构造块体的现今活动和变形[J]. 地震地质, 25(1): 23-32.
- 黄立人. 2006. GPS 基准站坐标分量时间序列的噪声特性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 26(2): 31-33, 38.
- 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[J]. 地球物理学报, 3(5): 1109, 1116-1117.
- 江在森, 马宗晋, 张希, 等. 2001. 青藏块体东北缘水平应变场与构造变形分析[J]. 地震地质, 23(3): 337-346.
- 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[J]. 地球物理学报, 46(3): 352-358.
- 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[J]. 中国地震, 36(4): 693-707.
- 江在森, 武艳强. 2012. 地壳形变与强震地点预测问题与认识[J]. 地震, 32(2): 8-21.
- 姜卫平. 2017. 卫星导航定位基准站网的发展现状、机遇与挑战[J]. 测绘学报, 46(10): 1379-1388.
- 赖锡安, 黄立人, 徐菊生. 2004. 中国大陆现今地壳运动[M]. 北京: 地震出版社.
- 李强, 韩宇飞, 宁百齐, 等. 2012a. 基于陆态网络 GPS 数据的电离层空间天气监测与研究[J]. 地球物理学报, 55(7): 2193-2202.
- 李强, 游新兆, 杨少敏, 等. 2012b. 中国大陆构造变形高精度高密度 GPS 监测——现今速度场[J]. 中国科学: 地球科学, 42(5): 629-632.
- 李延兴, 黄城, 朱文耀, 等. 2000. 中国大陆水平运动特征与动力学分析[J]. 地震, 20(S1): 29-34.
- 李延兴, 黄城, 胡新康, 等. 2001. 板内块体的刚性弹塑性运动模型与中国大陆主要块体的应变状态[J]. 地震学报, 23(6): 565-572.
- 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[J]. 中国科学: 地球科学, 33(S1): 65-81.
- 李延兴, 赵承坤. 1998. 华北地区 GPS 监测网建设, 地壳水平运动与应力场及地震活动性的关系[J]. 中国地震, 14(2): 116-125.
- 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[J]. 科学通报, 60(36): 3606-3616.
- 梁洪宝, 武艳强, 陈长云. 2018. 2014 年新疆于田  $M_s 7.3$  地震同震位移及位错反演研究[J]. 地球物理学报, 61(12): 4817-4826.
- 梁诗明. 2015. 基于 GPS 观测的青藏高原现今三维地壳运动研究[J]. 国际地震动态, (7): 40-42.
- 刘刚, 乔学军, 王琪. 2020. 强震变形的地震大地测量监测与研究[J]. 中国地震, 36(4): 718-728.
- 刘序俨, 郭逢英, 林继华, 等. 1999. 福建沿海地壳运动与 GPS 测量结果初步分析[J]. 福建地震, 19(1): 40-47.
- 马瑾. 2016. 从“是否存在有助于预报的地震先兆”说起[J]. 科学通报, 61(4): 409-414.
- 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[J]. 科学通报, 46(13): 1118-1120.
- 冒爱泉, 张金华, 胡伍生, 等. 2008. GPS 地壳形变和前兆信息与地震预测[J]. 现代测绘, 31(5): 3-6.
- 孟国杰. 2001. 基于全球定位系统的现今地壳运动与形变研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 牛之俊, 马宗晋, 陈鑫连. 2002. 中国地壳运动观测网络[J]. 大地测量与地球动力学, 22(3): 88-93.
- 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[J]. 科学通报, 50(8): 839-840.
- 任金卫, 王敏. 2005. GPS 观测的 2001 年昆仑山口西  $M_s 8.1$  地震地壳变形[J]. 第四纪研究, 25(1): 34-44.
- 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[J]. 地球物理学报, 62(1): 115-129.
- 沈正康, 王敏, 甘卫军, 等. 2003. 中国大陆现今构造应变率场及其动力学成因研究[J]. 地学前缘, 10(S1): 93-100.
- 石耀霖, 朱守彪. 2006. 用 GPS 位移资料计算应变方法的讨论[J]. 大地测量与地球动力学, 26(1): 1-8.
- 王静. 2019. GPS 应变率场计算方法研究进展[J]. 地震, 39(2): 124-136.
- 王敏, 李强, 王凡, 等. 2011. 全球定位系统测定的 2011 年日本宫城  $M_w 9.0$  级地震远场同震位移[J]. 科学通报, 56(20): 13-16.
- 王敏, 沈正康, 甘卫军, 等. 2008. GPS 连续监测鲜水河断裂形变场动态演化[J]. 中国科学: 地球科学, 38(5): 575-581.
- 王敏, 沈正康, 牛之俊, 等. 2003. 现今中国大陆地壳运动与活动块体模型[J]. 中国科学: 地球科学, 33(S1): 21-32, 209.
- 王敏, 沈正康. 2020. 中国大陆现今构造变形: 三十年的 GPS 观测与研究[J]. 中国地震, 36(4): 660-683.
- 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[J]. 科学通报, 51(3): 365-368.
- 王琪, Seeber. 1998. 红河断裂的 GPS 监测与现代构造应力场[J]. 大地测量与地球动力学, 18(2): 49-56.
- 王琪, 牛之俊, 石俊成. 2003. 中国地壳运动观测网络基本网观测精度研究[J]. 大地测量与地球动力学, 23(3): 11-15.
- 王琪, 乔学军, 游新兆. 2020. 中国地震大地测量——半个世纪的历程与科学贡献[J]. 中国地震, 36(4): 647-659.
- 王琪, 张培震, 马宗晋. 2002. 中国大陆现今构造变形 GPS 观测数据与速度场[J]. 地学前缘, 9(2): 415-429.
- 王琪, 张培震, 牛之俊, 等. 2001. 中国大陆现今地壳运动和构造变形[J]. 中国科学: 地球科学, 31(7): 529-536.

- 王琪,张培震. 2006. 用 GPS 研究中国大陆现今的地壳变形[J]. 科学观察,1(6):43.
- 王琪. 2003. 中国大陆现今地壳运动研究[J]. 地震学报,25(5):541-547.
- 王小亚,朱文耀,符养,等. 2002. GPS 监测的中国及其周边现时地壳形变[J]. 地球物理学报,45(2):198-209.
- 王小亚. 2002. GPS 在地球物理方面的应用[D]. 上海:中国科学院研究生院(上海天文台).
- 王闯昭,王恩宁,沈正康,等. 2008. 基于 GPS 资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率[J]. 中国科学:地球科学,38(5):582-597.
- 王闯兵,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[J]. 地球物理学报,61(1):161-170.
- 魏明耀,张浪静,郭强. 2010. GPS 技术在震后地质灾害监测中的应用[J]. 测绘科学,35(S1):192-194.
- 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[J]. 地球物理学报,61(4):1258-1265.
- 吴云,孙建中,乔学军,等. 2003. GPS 在现今地壳运动与地震监测中的初步应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版),28(S1):79-82.
- 伍吉仓,宋鑫友,胡风鸣,等. 2020. 联合 GNSS 和 InSAR 观测位移反演 2008 年汶川大地震断层位错模型参数[J]. 中国地震,36(4):767-779.
- 武艳强,江在森,杨国华,等. 2009. 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[J]. 地球物理学报,52(7):1707-1714.
- 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[J]. 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[J]. 中国地震,36(4):756-766.
- 徐韶光,熊永良,黄丁发,等. 2011. 长距离动态 GPS 数据处理在地震监测中的应用研究[J]. 测绘科学,36(2):88-90.
- 许家琪. 2019. GNSS 坐标时间序列噪声模型建立影响因素研究[D]. 南昌:东华理工大学.
- 杨少敏,兰启贵,裴兆生,等. 2012. 用多种数据构建 2008 年汶川特大地震同震位移场[J]. 地球物理学报,55(8):2575-2588.
- 杨少敏,李杰,王琪. 2008. GPS 研究天山现今变形与断层活动[J]. 中国科学:地球科学,38(7):872-880.
- 殷海涛,张培震,甘卫军,等. 2010. 高频 GPS 测定的汶川  $M_s 8.0$  级地震震时近场地表变形过程[J]. 科学通报,55(26):2621-2626.
- 尹继尧,徐平,吴培稚,等. 2007. GPS 数据用于地震短临预测的数据处理初步探索[J]. 地震地磁观测与研究,28(5):50-56.
- 游新兆,杜瑞林,王琪,等. 2001. 中国大陆地壳现今运动的 GPS 测量结果与初步分析[J]. 大地测量与地球动力学,21(3):1-8.
- 游新兆,马海建. 2012. 国家重大科技基础设施项目——“中国大陆构造环境监测网络”建设成果展示[J]. 科技成果管理与研究,(6):78-82.
- 游新兆,王启梁. 1994. 青藏高原 1993 年 GPS 观测成果的精度分析[J]. 地壳形变与地震,14(3):27-33.
- 游新兆,杨少敏,王琪. 2012. 中国大陆地壳运动观测研究进展[J]. 地震,32(2):31-39.
- 张风霜,武艳强,孙东颖. 2011. 中国大陆 GPS 连续观测站基线时间序列分析[J]. 地震,31(4):86-97.
- 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[J]. 中国科学:地球科学,33(S1):12-20.
- 张培震,王琪,马宗晋. 2002a. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场[J]. 地学前缘,9(2):442-450.
- 张培震,王琪,马宗晋. 2002b. 中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场与活动地块[J]. 地学前缘,9(2):430-441.
- 张小红,郭斐,郭博峰,等. 2012. 利用高频 GPS 进行地表同震位移监测及震相识别[J]. 地球物理学报,55(6):1912-1918.
- 张小红,吴明魁,刘万科. 2016. BeiDou B2/Galileo E5b 短基线紧组合相对定位模型及性能评估[J]. 测绘学报,45(S2):1-11.
- 张晓亮,江在森,王敏,等. 2006. 利用 GPS 连续站资料研究地壳运动与地震的关系[J]. 大地测量与地球动力学,26(4):63-68.
- 张祖胜,耿世昌,陈德民,等. 1989. 现代地壳垂直形变速率[M]//马杏垣. 中国岩石圈动力学地图集. 北京:中国地图出版社.
- 张祖胜. 2001. 中国地壳运动观测网络[J]. 中国基础科学,(3):45-49.
- 赵斌,杜瑞林,张锐,等. 2015. GPS 测定的尼泊尔  $M_w 7.9$  和  $M_w 7.3$  级地震同震形变场[J]. 科学通报,60(S2):2758-2766.
- 赵斌,王敏,胡岩,等. 2020. 中国及邻域强震震后变形监测及岩石流变性质研究[J]. 中国地震,36(4):806-816.
- 赵静,刘杰,任金卫,等. 2018. 汶川 8.0 级地震前 GPS 与跨断层资料反映的运动与变形演化特征[J]. 中国地震,34(3):31-44.
- 赵齐乐,刘经南,葛茂荣,等. 2005. 用 PANDA 对 GPS 和 CHAMP 卫星精密定轨[J]. 大地测量与地球动力学,25(2):113-116,122.
- 周硕愚,吴云,江在森,等. 2017. 地震大地测量学[M]. 武汉:武汉大学出版社.
- 周硕愚,吴云,施顺英,等. 2006. GPS 对地震预报的推进和问题研究[J]. 大地测量与地球动力学,26(3):111-117.
- 周硕愚,吴云,施顺英,等. 2007. 现今地壳运动动力学基本状态与地震可预报性研究[J]. 大地测量与地球动力学,27(4):92-99.
- 周硕愚,吴云. 2015. 由震源到动力学系统——地震模式百年演化[J]. 大地测量与地球动力学,35(6):911-918.
- 朱文耀,程宗颐,王小亚,等. 1998. 中国大陆地壳运动的背景场[J]. 天文学进展,16(4):346-348.
- Bedford J R, Moreno M, Deng Z, et al. 2020. Months – long thousand – kilometre – scale wobbling before great subduction earthquakes[J]. Nature,580(7805):628-635.
- Bilich A, Cassidy J F, Larson K M. 2008. GPS Seismology: Application to the 2002  $M_w 7.9$  Denali fault earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,98(2):593-606.
- Blewitt G, Lavallée D. 2002. Effect of annual signals on geodetic velocity[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth,107(B7):ETG 9-1-ETG 9-11.
- Bock Y, Prawirodirdjo L, Melbourne T I. 2004. Detection of arbitrarily large dynamic ground motions with a dense high-rate GPS network[J]. Geophysical Research Letters,31(6):177-182.
- Chen C H, Wen S, Liu J Y, et al. 2014. Surface displacements in Japan

- before the 11 March 2011  $M_{\text{w}} 9.0$  Tohoku – Oki earthquake [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 80(2):165 – 171.
- Dach R, Hugentobler U, Fridez P. 2007. Bernese GPS Software Version 5.0[M]. Bern: Astronomical Institute, University of Bern.
- Davis J L, Wernicke B P, Tamisiea M E. 2012. On seasonal signals in geodetic time series[J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 117(B1):B0143.
- Davis J P, Smalley J R. 2009. Love wave dispersion in central North America determined using absolute displacement seismograms from high-rate GPS[J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 114(B11):292 – 310.
- Emore G L, Haase J S, Choi K, *et al.* 2007. Recovering seismic displacements through combined use of 1 – Hz GPS and strong – motion accelerometers[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(2):357 – 378.
- Feng W, Ren J, Jiang Z. 2016. GPS station short-term dynamic characteristics of micro displacement before Menyuan  $M_{\text{w}} 6.4$  earthquake [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 7(4):237 – 244.
- Gan W, Zhang P, Shen Z K, *et al.* 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements [J]. *Journal of geophysical research solid earth*, 112(B8):B08416.
- Geng J, Wen Q, Chen Q, *et al.* 2019. Six-degree-of-freedom broadband seismogeodesy by combining collocated high-rate GNSS, accelerometers, and gyroscopes[J]. *Geophysical Research Letters*, 46(2):708 – 716.
- Geng J, Wen Q, Chen Q. 2020. Six-degree-of-freedom seismogeodesy by combining collocated high – rate GNSS, accelerometers and gyroscopes[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts.
- Gong W, Zhang Y, Li T, *et al.* 2019. Multi-sensor geodetic observations and modeling of the 2017  $M_{\text{w}} 6.3$  Jinghe earthquake [J]. *Remote Sensing*, 11(18):2157.
- Hao M, Freymueller J T, Wang Q, *et al.* 2016. Vertical crustal movement around the southeastern Tibetan Plateau constrained by GPS and GRACE data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 437(3):1 – 8.
- He P, Wang Q, Ding K, *et al.* 2016. Source model of the 2015  $M_{\text{w}} 6.4$  Pishan earthquake constrained by interferometric synthetic aperture radar and GPS: Insight into blind rupture in the western Kunlun Shan[J]. *Geophysical research letters*, 43(4):1511 – 1519.
- Huang M H, Roland Bürgmann, Freed A M. 2014. Probing the lithospheric rheology across the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 396(6):88 – 96.
- Ji C, Larson K M, Tan Y, *et al.* 2004. Slip history of the 2003 San Simeon earthquake constrained by combining 1-Hz GPS, strong motion, and teleseismic data [J]. *Geophysical research letters*, 31(17):169 – 188.
- Jiang Z, Wang M, Wang Y, *et al.* 2014. GPS constrained coseismic source and slip distribution of the 2013  $M_{\text{w}} 6.6$  Lushan, China, earthquake and its tectonic implications [J]. *Geophysical Research Letters*, 41(2):407 – 413.
- Liu J N, Ge M R. 2003. PANDA software and its preliminary result of positioning and orbit determination [J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 8(2):603.
- Langbein J. 2008. Noise in GPS displacement measurements from Southern California and Southern Nevada[J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 113(B5):B05405.
- Larson K M, Bodin P, Gomberg J. 2003. Using 1 – Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali fault earthquake[J]. *Science*, 300(5624):1421 – 1424.
- Li J, Liu G, Qiao X, *et al.* 2018. Rupture characteristics of the 25 November 2016 Aketao earthquake ( $M_{\text{w}} 6.6$ ) in eastern Pamir revealed by GPS and teleseismic data [J]. *Pure Appl Geophys*, 175(2):573 – 585.
- Liang S, Gan W, Shen C, *et al.* 2013. Three – dimensional velocity field of present – day crustal motion of the Tibetan Plateau derived from GPS measurements[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 118(10):5722 – 5732.
- Lin A, Fu B, Guo J, *et al.* 2002. Co-seismic strike – slip and rupture length produced by the 2001  $M_{\text{s}} 8.1$  Central Kunlun earthquake [J]. *Science*, 296(5575):2015 – 2017.
- Liu G, Xiong W, Wang Q, *et al.* 2019. Source characteristics of the 2017  $M_{\text{s}} 7.0$  Jiuzhaigou, China, earthquake and implications for recent seismicity in eastern Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 124(5):4895 – 4915.
- Meade B J. 2007. Present – day kinematics at the India – Asia collision zone[J]. *Geology*, 35(1):81 – 84.
- Miyazaki S, Larson K M, Choi K, *et al.* 2004. Modeling the rupture process of the 2003 September 25 Tokachi-Oki (Hokkaido) earthquake using 1-Hz GPS data[J]. *Geophysical Research Letters*, 31(21):L21603.
- Montillet J P, Yu K. 2015. Modeling geodetic processes with levy – stable distribution and FARIMA[J]. *Mathematical Geosciences*, 47(6):627 – 646.
- Meng G, Ren J, Su X, *et al.* 2013. Coseismic deformation of the 2010  $M_{\text{w}} 6.9$  Yushu earthquake derived from GPS Data[J]. *Seismological Research Letter*, 84(1):57 – 64.
- Ozawa S, Nishimura T, Munekane H, *et al.* 2012. Preceding, coseismic, and postseismic slips of the 2011 Tohoku earthquake, Japan [J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 117(B7):B07404.
- Ryder I, Bürgmann R, Sun J. 2010. Tandem afterslip on connected fault planes following the 2008 Nima-Gaize (Tibet) earthquake [J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 115(B3):B03404.
- Shen Z K, Jackson D D, Ge B X. 1996. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements[J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 101(B12):27957 – 27980.
- Shen Z K, Lü J, Wang M, *et al.* 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 110(B11):B11409.
- Shi C, Lou Y, Zhang H, *et al.* 2010. Seismic deformation of the  $M_{\text{w}} 8.0$  Wenchuan earthquake from high-rate GPS observations [J]. *Advances in Space Research*, 46(2):228 – 235.
- Thatcher W. 2007. Microplate model for the present-day deformation of Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 112(B1):534 – 535.

- Wang M, Shen Z K. 2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2): e2019JB018774.
- Wang Q. 2001a. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements [J]. *Science*, 294(5542): 574–577.
- Wang Q. 2011b. Rupture of deep faults in the 2008 Wenchuan earthquake and uplift of the Longmen Shan [J]. *Nature Geoscience*, 4(9): 634–640.
- Wang Y, Wang M, Shen Z K. 2017. Block-like versus distributed crustal deformation around the northeastern Tibetan plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 140(11): 31–47.
- Xu C J, Fan Q B, Wang Q, *et al.* 2014. Postseismic deformation after 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Survey Review*, 46(339): 432–436.
- Xu R, Stamps D S. 2019. A geodetic strain rate and tectonic velocity model for China [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(3): 1280–1297.
- Yokota Y, Koketsu K. 2015. A very long-term transient event preceding the 2011 Tohoku earthquake [J]. *Nature communications*, 6(1): 1–5.
- Zhan W, Li F, Hao W, *et al.* 2017. Regional characteristics and influencing factors of seasonal vertical crustal motions in Yunnan, China [J]. *Geophysical Journal International*, 210(3): 1295–1304.
- Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, *et al.* 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data [J]. *Geology*, 32(9): 809–812.
- Zhao B, Bürgmann R, Wang D, *et al.* 2017b. Dominant controls of down-dip afterslip and viscous relaxation on the postseismic displacements following the  $M_w 7.9$  Gorkha, Nepal, earthquake [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(10): 8376–8401.
- Zhao B, Zhang C, Wang D, *et al.* 2017a. Contemporary kinematics of the Ordos block, North China and its adjacent rift systems constrained by dense GPS observations [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 135(3): 257–267.
- Zhao D, Qu C, Shan X, *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 [J]. *Tectonophysics*, 726(4): 86–99.
- Zheng G, Wang H, Wright T J, *et al.* 2017. Crustal deformation in the India-Eurasia collision zone from 25 years of GPS measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(11): 9290–9312.
- Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, *et al.* 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks [J]. *Journal of Geophysical Research*, 102(B3): 5005.

## GPS in Earthquake Monitoring in China: Current Situation and Prospect

WANG Tan<sup>1,2</sup>, LI Yu<sup>2</sup>, ZHANG Rui<sup>2</sup>, SHI Hongbo<sup>2</sup>, WANG Yuebing<sup>2</sup>

(1. Capital Normal University, Beijing 100048, China)

(2. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

### Abstract

In this paper we firstly review the development of application of GPS technology to earthquake monitoring in China, and then describe mainly GPS application to the following aspects: data processing, time series, velocity field and strain-rate field of the tectonic deformation of the Chinese mainland, quantification of the movement of active blocks in the Chinese mainland, and seismological research. Finally, we discuss the problems and challenges we are currently facing in GPS in earthquake monitoring in China, and put forward prospects from four aspects: earthquake prediction research, basic research, GPS network monitoring layout, and GPS solution accuracy and timeliness.

**Keywords:** GPS; earthquake monitoring; CMONOC; current situation of GPS application; development prospect