

引文格式:王鹏,刘静,刘小利,等.GNSS在地表过程研究中的应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(12):2159-2180.

DOI:10.13203/j.whugis20220113

Citation: WANG Peng, LIU Jing, LIU Xiaoli, et al. Application of GNSS in the Study of Earth Surface Processes[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(12): 2159-2180. DOI: 10.13203/j.whugis20220113



GNSS在地表过程研究中的应用

王鹏¹ 刘静^{2,3} 刘小利⁴ 刘志军^{2,3}

1 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室,北京,100029

2 天津大学地球系统科学学院,天津,300072

3 天津大学表层地球系统科学研究院,天津,300072

4 中国地震局地震研究所,湖北 武汉,430071

摘要:地球表层系统是地球系统中与人类关系最密切的部分,以地表系统为研究对象的地表过程研究越来越重要。将地球物理和大地测量等手段创新性地运用于地表过程的研究逐渐成为一个新的学科交叉发展方向。全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)观测技术因其具有高精度、全天候、大范围 and 准实时的特点,被广泛应用于地表过程研究中。从长期地壳形变、地震周期形变、大气可降水量、荷载响应、岩浆及火山活动、滑坡监测和反射测量等方面简要介绍了GNSS技术在地表过程研究中的应用现状,并对未来发展方向进行了讨论。研究表明,鉴于GNSS在观测技术方面的优势,应加强其在地表过程研究中的应用。

关键词:GNSS;地表过程;地壳形变;地震周期;荷载响应;大气可降水量

中图分类号:P223

文献标识码:A

收稿日期:2023-01-16

DOI:10.13203/j.whugis20220113

文章编号:1671-8860(2024)12-2159-22

Application of GNSS in the Study of Earth Surface Processes

WANG Peng¹ LIU Jing^{2,3} LIU Xiaoli⁴ LIU Zhijun^{2,3}

1 State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2 School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China

3 Institute of Surface-Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China

4 Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

Abstract: The earth surface system is the part of the earth system that is most closely related to human beings. The study of surface processes is becoming more and more important in earth system research. The innovative application of geophysics and geodesy to surface processes has gradually become a new interdisciplinary development direction. Global navigation satellite system (GNSS) observation technology is widely used in the study of surface processes because of its characteristics of high accuracy, all-weather, large range and quasi-real-time. In this paper, the application of GNSS technology in the study of surface processes is briefly introduced from the aspects of long-term crustal deformation, coseismic and post-seismic deformation, atmospheric precipitable water, load response, magma and volcanic activity, landslide monitoring and reflection measurement, and then the future development is discussed. The advantages of GNSS in observation technology highlight the importance of GNSS in the earth surface processes research.

Key words: GNSS; earth surface processes; crustal deformation; earthquake cycle; load response; precipitable water vapor

随着经济的发展和科技的进步,全球变化和人类活动对地球系统运行的影响越来越深刻。

由岩石圈、土壤圈、大气圈、水圈和生物圈构成的地球表层系统是地球系统中人类感知最直接和

基金项目:中国地震局地质研究所基本科研业务专项(IGCEA1812);地震动力学国家重点实验室项目(LED2022A03);国家自然科学基金(42030305,4241001018);地震科技星火计划(XH22003C)。

第一作者:王鹏,博士,工程师,主要从事大地测量与地壳形变研究。wpeng0909@126.com

最核心的部分,使得基于地球表层系统的地表过程研究在地球系统研究中的地位越来越重要,所以许多国际组织和重大国际性科学研究计划均以地球表层为主要的研究对象,进而加深对地表过程的理解^[1-4]。

地表过程是地球表层系统随时间、空间变化而产生的整体状态和组分序列结构的变化过程,是地球表层系统圈层中各要素演变和相互作用的过程^[1]。传统地表过程的研究往往是针对单一要素的学科,如水文学、大气科学、土壤学等,各学科相互独立,限制了对整个系统的全面理解,而当前更强调地表要素间系统性的有机关联,将自然过程与人文过程有机结合,从而应对环境变化对科学提出的挑战^[1-2],如构造-气候-地表过程相互作用的交叉研究,不仅极大促进了构造地貌学科的迅猛发展,更推动了新技术、新方法在地球科学中的广泛应用^[5]。特别是2001年美国国家研究理事会在出版的《地球科学基础研究机遇》一书中首次提出“地球关键带”的概念,将“地球关键带”作为一个整体来研究,从而突破了传统研究的局限,有助于对整个地球表层系统的组成、功能以及各个要素之间相互作用的全面理解。

地表过程的研究离不开对地球表层系统各要素的仪器观测,观测研究一直是地球表层系统科学发展的重要手段^[6],以全球、区域(流域)为单元建立分布式的观测网已成为地球表层系统观测的主流方向^[7]。近几十年,将地球物理、大地测量等手段创新性地运用于地表过程的研究逐渐成为一个新的学科交叉发展方向,而其中的全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)作为一种20世纪80年代发展起来的新兴大地测量技术,因其在理解构造运动、地壳形变和地球动力学方面的巨大潜力而受到广泛关注^[8]。

GNSS是能在地球表面或近地空间的任何地点为用户提供全天候的三维坐标和速度以及时间信息的空基无线电导航定位系统,其组成包括美国的全球定位系统(global positioning system, GPS)、俄罗斯的格洛纳斯(GLONASS)、欧洲空间局的伽利略(Galileo)和中国北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)4大全球系统,以及区域和增强系统等^[9]。GNSS不仅具备高精度、全天候、大范围和准实时等观测优势,而且其卫星信号能穿透多个大气圈层经地面反射而携带包含大气、土壤、植被等信息,从而广泛应用于自然和人为过程各类灾害调查,包

括地震、海啸、火山、冰冻圈、极端天气、海平面上升、气候变化和水文等^[8,10],特别是近些年连续及高频(1 Hz及以上)GNSS的利用使人们对地表过程的时间演化有了更进一步的认识。但是,由于轨道精度等客观条件的限制,GLONASS、Galileo和BDS的定位精度尚不能满足毫米级形变监测的需求^[11],本文将以GPS为主,兼顾其他导航系统,对GNSS技术在地表过程中的相关研究应用进行回顾和评述,在此基础上结合国内外最新研究进展,对未来的发展方向提出展望和讨论。

1 GNSS在长期地壳形变中的应用

大地测量学能够实现局部到全球尺度地壳形变的精确测量,有助于人们更好地理解板块构造运动、板块边界和内部形变、地震周期形变以及火山活动等过程和动力学机理,而上述研究对防灾减灾至关重要。板块边界及内部的长时间尺度的震间形变主要代表强震震间弹性地壳的应变累积以及震后下地壳和上地幔的长期粘弹性松弛。目前已有多个国家建立了自己的板块观测系统,如美国的GAGE(geodesy advancing geosciences and earthScope)、日本的GEONET(GNSS earth observation network system)以及中国的大陆构造环境监测网络(crustal movement observation network of China, CMONOC)等,上述观测系统以其观测技术的先进性、观测站点的密集性、观测手段的多样性和观测区域的宽泛性等特点在世界上处于领先地位^[12-15],为相邻板块之间、板块(大陆)内部运动特征以及板块(大陆)内部各块体之间的协调运动提供了更广区域、更细节以及时间演化上(如连续和高频GNSS观测)的更精细刻画^[13]。

1.1 水平运动

在板块的长期运动监测方面,美国的GPS研究走在了世界前列。早期北美洲由于GPS台站比较稀疏,往往将三角测量、甚长基线干涉、流动与连续GPS观测相结合来研究长期形变特征,时间跨度也不尽相同^[16-18]。随着不同机构及科研项目对GPS观测投入力度加大及融合汇聚,至今已形成了超2 170个台站的庞大网络,高密度台站分布获得的速度场不仅在空间上清晰刻画了北美地区的现今构造运动特征,而且近30 a的长时间序列更使人们在时间尺度上对该地区构造演化有了更深入的了解^[13]。日本列岛拥有世界上最密集的GPS网络,基于大约1 200个连续GPS

(continued GPS, cGPS)台站获得的相对于稳定欧亚板块下的速度场及应变率分布结果,显示应变率大的地区大多与板块边界和活火山有关,同时发现了新濶-神户构造带,地壳形变的精确观测为地震和其他地壳活动的数值模拟提供了重要参数^[15, 19]。

中国地处欧亚板块东部,分布着广泛的板块边界形变,特别是印度板块向欧亚板块持续碰撞挤压,导致青藏高原地壳的缩短和隆升,改变了整个亚欧大陆的构造格局,深深影响着中国大陆甚至整个亚洲的气候及环境变化,同时也为应用GNSS研究地表过程及各要素提供了一个理想场所。因得天独厚的地理优势,中国GNSS研究起步虽然较晚但发展很快,特别是伴随中国地壳运动观测网络及CMONOC的建设^[12, 20],省级以及关键地区连续GNSS台站的加密观测和流动台站的定期复测,使得中国在中国大陆构造运动方面取得了一系列丰硕的成果^[21-31]。文献[22]首次完整展示了在印度-欧亚板块碰撞的背景下整个中国大陆相对于稳定的欧亚板块的形变特征,特别是青藏高原的向北运动、高原东南部绕东喜马拉雅构造结的顺时针旋转以及东部地区向东南方向的运动。文献[27]利用25年2576个GPS数据得到了印度-欧亚地区的速度场,并更新了主要断层的大地测量滑动速率,认为无论是刚性块体模型^[32-33]还是连续形变模型^[24]都不能有效地解释该地区的观测结果。文献[21]发表了迄今为止最密集的中国大陆及周边地区地壳运动速度场结果,揭示了大陆活动构造运动学和动力学更精细的特征,对中国大陆特别是青藏高原及周边地区的形变样式提出了新的认识,为深入研究青藏高原形成过程与动力学机制以及定量评估中国大陆地震危险性奠定了坚实基础。

1.2 垂向运动

这里的垂向运动是指地壳甚至岩石圈等的构造运动导致的垂向形变及相应海平面变化。在地壳运动的GNSS时间序列中通常包含有上述构造形变和诸如模型残差、环境变化和地表荷载变化等非构造形变,往往通过数学分析^[34]或者模型改正^[35]的方法去除其中的非构造形变干扰从而获得真正的地壳形变。长时间尺度的GNSS时间序列不仅能获得现今地壳运动的高精度三维速度场,揭示构造活跃地区地壳垂向形变特征,而且有助于反演构造演化历史及深部动力过程^[28, 36-37],如中国学者基于GPS数据揭示青藏高

原地区差异性垂直形变^[28]以及华北地区现今垂直运动是新构造运动继承的特点^[38]。同时,大范围、高精度的GNSS数据与验潮仪测得的相对海平面变化结果相结合,可以进一步校正获得全球范围的绝对海平面变化,但也需考虑冰后期均衡调整的影响^[39-40]。

1.3 地面沉降

地面沉降是自然和人类活动共同作用而导致的地表高度的逐渐下降,其自然原因包括沉积物压实以及对晚更新世冰盖融化的延迟反应,人为原因包括地下水、油气及矿物开采等^[41]。虽然地面沉降速度缓慢,短期内不会对人类生命构成威胁,但累积效应明显,特别是在人口较密集的地区及沿海低洼城市。全球变暖导致的海平面上升与地面沉降一起共同加剧了这一影响,成为摆在各国政府和科学家面前的一道亟待解决的难题。文献[42]利用意大利半岛中北部区域cGPS台站得到的垂直速度场,识别出2个主要沉降区域,沉降速率最大为15 mm/a,在与2006年之前利用合成孔径雷达和水准测量技术获得的数据进行对比后,认为沉降速率是恒定的,甚至在某些情况下是减小的。文献[43]基于北美东部沿海地区cGPS台站数据,发现弗吉尼亚州和南卡罗来纳州之间的现今沉降速率大约是长期地质活动速率的两倍,认为其与该地区地下水过度开采有关。当前,地面沉降的大地测量监测大多基于GNSS、GRACE(gravity recovery and climate experiment)卫星和合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)的联合应用,利用GNSS观测数据对高空间分辨率InSAR观测数据进行验证和校准^[44-46],同时辅以GRACE获得的地下水储量变化引起的垂向形变^[47]。长期的地面沉降监测研究不仅为人口密集地区水资源政策的制定提供依据,而且有助于沿海地区减轻洪水导致的土地损失,预测未来的风暴潮灾害影响。

2 地震周期形变

地震是地球内部构造运动的重要表现形式之一,是地表过程的重要影响因素,如大地震能够导致大量的山体滑坡,将岩石碎屑物带到河流系统中,从而改变流域的侵蚀速率和侵蚀模式,进而影响山脉的地貌演化^[48-49]。同时,地震滑坡也能破坏和侵蚀植被和土壤,从而增加流域颗粒有机碳的输运和埋藏,影响全球碳循环^[50-51]。自

文献[52]在研究1906年美国旧金山地震的基础上提出了弹性回跳理论后,大地测量方法在地震周期形变研究中发挥着越来越重要的作用。传统地震仪虽能有效记录余震活动,但对断裂带震后滑移或区域尺度壳幔响应过程等无震、微弱但动态的信号并不敏感,而GNSS因其能够记录包括震间应变累积、同震形变及震后瞬态过程等这一完整的地震周期,已成为研究与地震有关形变的主要大地测量方法之一,极大推动了人们对断层活动的物理过程及机制、岩石圈甚至是上地幔软流圈流变结构的深入认识^[53],为中国防震减灾工作提供了丰富的基础资料。

2.1 震间形变

大陆断裂的震间形变主要表现为断裂的震间闭锁和蠕滑两种模式^[54]。大多数发震断层表现为断层浅部的非均匀凹凸体呈现闭锁状态,随着断层两侧块体的持续相对运动,凹凸体上的应变能不断累积并在达到极限时发生破裂而产生地震;而断层在深部的形变则以稳态无震滑移为主。少数断层某些特定位置的浅部蠕滑段在震间表现为缓慢运动,由于不会产生明显的弹性波,所以上述断层运动无法用常规地震仪器监测到^[54-55]。当前,高时空分辨率的大地测量数据(如GNSS、InSAR等)不仅能够捕获与断层浅部凹凸体应变累积和蠕滑相对应的地表形变,而且能够识别断层的闭锁或蠕滑段落、刻画其时间演化过程,为强震孕育过程、断层的地震周期行为等方面的研究提供约束^[56-60]。

虽然大陆断裂以上地壳脆性层闭锁、深部蠕滑为主要的震间形变方式,但是对于板块边界断裂(特别是俯冲带),慢滑移事件是应变释放的一个重要来源。该现象首次在日本的GPS时间序列中观测到,其特征是滑动时间持续了近1 a时间^[61],之后在卡斯卡迪亚等全球多个俯冲带也观测到该现象^[62-65]。长期的GPS资料显示,慢滑移事件呈现周期性变化,如卡斯卡迪亚俯冲带的GPS时间序列结果显示:稳定、长期的滑动速率被短暂的、方向相反的周期性滑移所分割,滑移方向的变化持续1到2周,大约13~16个月发生一次^[41, 62]。目前对于板块边界俯冲带周期性慢滑移及震颤的原因尚无统一认识^[66-68],而在过去的20年时间里就有多次Mw 8.5以上地震发生在大型俯冲带区域并引发海啸(如2004年苏门答腊岛地震、2010年智利地震、2011年日本地震等),近期学者更多关注应用GNSS资料解释地震周

期中的摩擦性质和滑动行为^[69]。

2.2 同震形变及破裂过程

大地震破裂面的同震位移分布为地表破裂野外调查、地震危险性分析等提供基础数据,而同震动态破裂过程能有效再现破裂的传播特性,对深入研究地震孕育、地震成核及致灾机理具有重要意义^[70]。当一次大地震发生后,最先得到的是基于地震台网的震源机制解及远震体波的发震断层位置和沿断层面的滑动分布的初步结果。震源机制解可以给出该地震的矩震级大小、发震断层的节面解和发震深度等信息,而基于远震体波、近场强震动台站等数据的联合反演能进一步约束发震断层的走向、断层倾角及沿断层面的滑动分布等震源破裂时空过程。虽然远震数据能反演断裂深部的位移分布及动态破裂过程,但对于具有多个断层面滑动时的断层确切位置并不敏感,同时宽频带地震仪在大地震的近场会出现饱和现象,在这种情况下需要使用强震台的数据,而大地测量数据能很好地反演出浅层区域断层的滑动分布,同时能够弥补InSAR时间分辨率低的问题,并能给出级联破裂或断层越过障碍物继续向前传播的情形^[71-73]。而基于震前和震后的GNSS三维空间数据的差值,不仅可以获得震中附近区域的三维形变场,而且可以反演得到地震的震源参数,如破裂的几何形状、震级大小及破裂面上的滑动分布,其精确程度依赖于GNSS台站在断裂周边分布的疏密程度和采样频率^[74-78]。文献[79]在2002年德纳里山Mw 7.9地震后首次报道了应用GPS对地震运动进行1 Hz的高频测量,随着1 Hz甚至更高采样频率的GNSS台站投入使用,为精细研究地震破裂过程及深部震源参数提供了新的渠道,研究表明高频GNSS反演结果与传统地震研究基本一致,且比强震动数据反演的滑移分布结果更清晰,1 Hz的GNSS数据对累积位移分布更敏感^[80-82]。在之后的十几年时间里,连续(高频)GNSS在反演大地震同震形变、破裂过程、地震海啸预警等方面得到越来越多的应用,表现出巨大潜力^[83-89]。

2.3 震后形变

早在20世纪60年代末,文献[90]通过对1966年美国Parkfield震后的地面运动监测发现了震后形变,其位移量远远超过了同震地表位移,且以对数的方式衰减,与余震活动的减少相对应。大地震的震后形变是同震破裂对岩石圈应力扰动的结果,也是地球岩石圈逐渐恢复到稳

定运动状态时应力持续释放的阶段^[41, 91]。震后形变主要由以下机制控制:发生在震后短期及近场的震后余滑和孔隙弹性松弛,以及后期和远场下地壳和上地幔的黏弹性松弛,但很难清楚地区分这些不同的松弛机制在何时以及何地发生^[54]。基于 GNSS 数据的地震震后形变研究可以限定断裂带及围岩的力学性质,探索地球深部岩石圈流变结构,为后续地震危险性分析提供重要依据^[92],近十几年世界范围大震级地震的发生及连续 GNSS 台站日益增多,为上述机制的研究提供了机遇。

震后余滑是同震破裂以外的断层上滑动行为的震后松弛过程,不同断层的耦合结构控制着余滑的方式及分布范围,基本上分布于孕震深度及附近区域,在近断层的 GNSS 台站上现象最明显^[54]。分析震后余滑驱动机制及衰减特性,有助于加深对断层摩擦行为的理解,指导震后重建工作^[93]。文献[94]利用震后的 cGPS 数据研究了 2017 年墨西哥 Chiapas 地震的同震过程和震后形变,认为震后 6 个月的形变主要以同震破裂周围几个区域的余滑为主,余震主要集中在主震破裂和震后余震引起的库仑应力增加区域,认为余震可能是由震后余滑驱动的。文献[95]根据 2015 年尼泊尔 Mw 7.8 Gorkha 地震震后新建的 12 个 cGPS 台站与距震中 1 000 km 范围内的 GPS 台站进行联合解算,认为该次地震震后形变范围从破裂带向北延伸了超过 150 km,在震后的一年多时间里释放的总弹性应变相当量于 Mw 7.3~7.5 地震,远大于所有余震所释放的总量,使得喜马拉雅主逆冲断裂带重新加载,提高了该断裂的地震危险性。文献[96]基于 2015 年智利 Illapel 地震震后几个小时开展的流动 GPS 观测还发现早期震后余滑与同震破裂具有空间互补性,同时发现前 2 h 的震后形变量约占前 12 h 总形变量的 50%,第 1 个半天的形变量约占震后 3 d 形变量的 60%,并且非常早期的地表位移并不严格遵循传统意义上的对数或指数衰减,而用幂函数模型可以更好地描述,为研究大地震的早期震后形变提供了新的思路。

孔隙弹性回弹是同震破裂引起的应变扰动导致孔隙流体压力的变化,孔隙压力随时间达到静水平衡时带来的地壳形变^[97]。基于弹性位错模型中不同泊松比的排水模型和不排水模型预测的地表形变差值可以用来估算反弹位移^[98-99],由于其持续时间较短,形变相对较小,孔隙弹性效应往往被忽略^[91]。但最近 cGPS 的研究表明,

震后余滑效应的研究需考虑孔隙弹性回弹的影响^[100-101],如文献[102]利用 2011 年日本 Tohoku Mw 9.0 地震震后的 GPS 数据重新确定了不排水和排水模型中的泊松比,获得了孔隙弹性回弹造成的地表位移,认为近场垂向数据的拟合需加入孔隙弹性回弹的影响。而文献[103]也认为应重视孔隙弹性回弹效应,应用 GPS 模拟了 2012 年哥斯达黎加 Mw 7.6 俯冲带地震的地下水文响应,结果显示孔隙弹性回弹发生在多个时间尺度上,相关的垂直形变可达 2 cm,如果不考虑由于地下水流造成的形变,可能导致高达 40% 的误差。

粘弹性松弛是岩石圈与粘性软流圈耦合作用对同震应力加载在地表的响应,主要作用于地震中远场的下地壳和上地幔区域,其持续时间较长,一般为几年甚至上百年的时间^[104]。震后开展流动或连续 GNSS 已广泛应用于大地震造成的粘弹性松弛效应研究中,如推断下地壳和上地幔的粘滞系数,不仅可以为区域壳幔粘滞结构模型及介质结构属性提供约束,还可为区域运动学模型和动力学模型的构建提供流变结构方面的参考^[105-107]。文献[108]利用尼泊尔和中国西藏地区 4 a 的三维 GPS 数据,研究了 2015 年 Gorkha Mw 7.8 地震引起的震后形变,认为近场震后形变在前 2 a 以震后余滑为主,2 a 后以粘弹性松弛为主,而在远场,整个地震震后观测形变主要受粘弹性机制控制,此外还获得了西藏下地壳和上地幔的粘滞系数,并对当地的地震危险性进行了分析。文献[109]对 2008 年汶川 Mw 7.9 地震震后 9 a 的 GPS 时间序列数据进行分析,结果显示青藏高原东部岩石圈的流变结构与果冻三明治模型一致,一个相对脆弱的下地壳下边是一个较强的上地幔,但并不支持青藏高原东部低粘度的下地壳流模型。

3 GNSS 反演大气可降水量研究

水以液态、固态和气态 3 种相态在地球大气、海洋和陆地之间循环,其中气态水(水汽)是水循环中最活跃的成分,可以在大气中快速移动,并通过蒸发和凝结等过程对大气能量进行重新分配,是地-气间水分、热量、动量交换和辐射传输过程的主要成分,是大气能量的主要来源^[110],在短时间尺度上推动天气系统的发展,在长时间尺度上影响气候变化。水汽在地表过程中发挥着重要作用,进而对气象、农业、生态和社会经济等方面都有很重要的研究意义。

大气折射率与水汽含量有直接关系,GNSS信号经大气传输时受大气折射而产生天顶湿延迟,可用于反演大气可降水量(precipitable water vapor, PWV),从而探测大气中水汽含量变化,精度可达毫米量级^[111-112],且具有可连续观测、时间分辨率高和观测成本低的特点。文献[111-112]提出“GPS气象学”的概念,详细介绍了基于GPS技术反演大气水汽的原理,并利用GPS数据获得大气综合水汽含量,同时对加权平均温度进行了量化。科罗拉多大学Rocken的实验表明,长基线(基线长度大于500 km)的GPS数据及精密星历可以将反演的大气降水量的精度提高至毫米级^[113-114]。文献[115]提出了一种获取绝对PWV的方法,它不需要采用水汽辐射计作为差分基准站,反演精度可达到1~1.5 mm。然而,上述结果还是多条卫星信号上的水汽信息投影到测站天顶方向上的均值,无法反映三维空间的水汽分布情况。文献[116]应用层析成像技术处理GPS数据来获得对流层倾斜湿延迟并进行验证,进而得到局部密集GPS网络对流层折射率的4D图像,促使该领域得到更多科研人员的关注^[117-121]。此后,国内外学者在对流层模型构建^[122-124]、映射函数^[125-127]以及大气加权平均温度模型^[128-132]等方面进行研究,提高了GNSS信号预测PWV的准确性。同时,国内许多学者利用不同地区GNSS的天顶对流层延迟(zenith tropospheric delay, ZTD)数据反演高精度的PWV做了大量的工作^[133-137],如文献[134-136]基于中国武汉地区的GPS气象网资料,在无气象要素的情况下研究用ZTD直接推算出高精度PWV,建立了武汉地区ZTD与PWV的转换模型,认为直接推算的可降水量可以作为气象短期预报的参考依据。近年来,由于基于GNSS获得的PWV数据具有高精度、高时间分辨率以及全天候观测等诸多优势,常被用于再分析资料的水汽产品精度^[138-141]以及GNSS水汽与再分析资料水汽融合方面的研究^[142-144]。

4 GNSS对荷载的响应

地壳形变是对施加在地球表面的力的响应。GNSS能够精确测量地壳的形变,在接收构造信号的同时也在记录着诸如大气、海洋、水文和冰冻圈等物质质量重新分布带来的非构造荷载信号。虽然上述信号在GNSS的水平和垂向的3个维度中都存在,但这种荷载对垂直分量的影响最大。对荷载响应的研究,一方面可以将非构造运

动从总的地壳运动中分离出来,从而获得固体地球学家所关心的构造运动信息,另一方面可以对不同的非构造信号进行分析,研究其响应规律,进而探讨其在地表过程中的作用。

4.1 大气和海洋荷载的响应

大气荷载形变是地球对大气质量重新分布引起的地壳响应,分为两部分:一部分是由于太阳、月球引力及热力作用引起的大气压周期性涨落给地球表面施加的附加力而导致的形变,称为大气潮汐荷载形变;另一部分是非潮汐成分,称为大气非潮汐荷载形变。已有的研究表明,大气荷载对垂直方向引起的地表位移影响最大,在高纬度地区比在低纬度地区影响更大,最大影响量值甚至达到厘米级^[35, 145-147]。海洋荷载同样分为两部分:由海洋潮汐引起的地表周期性形变导致的海洋潮汐荷载和由于地表风驱动力、大气压力、热量和水动力过程导致的海洋非潮汐荷载。海洋荷载对低纬度地区的岛屿和沿海地区影响最大,对垂向振幅的影响最大可达2~3 mm^[35, 146, 148-149]。

大气荷载和海洋荷载往往应用于连续GNSS时间序列的分析,通过模型数据以确定垂向位移的季节性变化的来源^[150-152]。如文献[153]利用格陵兰岛周边GPS网络观测发现由于冰盖质量减少而导致地壳稳定隆升的同时还存在明显的年际变化,在大气压力、海底压力、大陆水储量荷载导致的垂向位移变化中,气压变化的贡献率最大,因此有必要在反演格陵兰岛冰质量变化时进行非冰荷载的校正。文献[154]认为在海洋非潮汐荷载的校正中,高分辨率的区域POLSSM模型(proudman oceanographic laboratory storm surge model)比全球ECCO模型(estimating the circulation and climate of the oceans model)的校正结果更好。文献[155]比较了3个处理中心生产的5个GPS数据产品后发现,残余GPS时间序列中有5%~30%的散射可以用大气负荷来解释,但该比例因数据产品的不同而差异很大。

4.2 水体荷载及循环

水循环是联系大气水、地表水、地下水和生态水的纽带^[156],水资源特别是淡水资源对于人类社会和自然环境的可持续发展至关重要,不断增长的人口及淡水资源短缺已成为21世纪摆在各国政府面前一个亟待解决的课题。大气和水文过程以及由于人为原因导致的地表和地下水的消耗将会影响水体分布和量的变化,进而作用于固体地球表面引起地壳形变成水体荷载及其循环。

文献[157]发现喜马拉雅地区的 GPS 时间序列和地震活动均表现出强烈的季节性变化,认为是由恒河流域水量的季节性变化导致,并在此基础上研究这种变化与地震活动性的关系。文献[158]利用美国加利福尼亚州及周边 900 余个 GPS 台站的垂向运动推断等效水厚度的变化,发现密集的 GPS 台站布设使 GPS 反演精度优于 GRACE 反演结果,且该模型比陆地同化水文模型中观测到的水量更大,山区地表水厚度季节性变化为 0.6 m,而向两侧进入平缓地区的地表水厚度急剧减小至 0.1 m 左右。之后有学者基于美国西部 cGPS 时间序列研究了该地区严重干旱而导致的水储量损失及伴随的地表抬升,发现该地隆升的中值为 5 mm,总损失水量约为 2 400 亿 t,相当于整个地区 10 cm 厚的水层^[159],海岸山脉的垂直隆升降低了圣安德烈斯断层上的有效正应力,有利于断层破裂,进而可能影响未来的地震活动,而内华达山脉南部的隆升主要由于人为抽取地下水,而非单纯的造山活动^[160]。中国西南四川、云南省属于典型的季风气候区,具有明显的干湿季节特征,是应用 GNSS 研究季节性垂向运动和水体荷载的理想场所,有学者基于 GNSS、水文荷载模型以及降水数据相关性分析^[37, 161-165],认为地表垂向季节性变化主要由水文质量荷载引起,降水表现出显著的年周期性,与 GNSS 垂向时间序列具有较强的相关性。GNSS 时间序列不仅可以用于研究季节性荷载等长期变化,也可用于飓风降水或洪水造成的水荷载的瞬时现象,如 2017 年 8 月 26 日飓风哈维在美国德克萨斯州休斯顿西南部登陆,其降雨量创下了历史记录,并导致该州东南部大部分地区出现大规模洪水,当地 cGPS 台站结果显示:哈维登陆后,地表高度平均下降了 1.8 cm,并在接下来一个月时间里逐渐恢复到飓风前的水平^[166]。

4.3 冰川的荷载及流动

在过去的一个多世纪里,温室效应导致了大量的冰川融化,造成海平面的上升,对沿海地区社会经济、自然环境及生态系统等有着重大影响。末次冰期以来冰川的均衡调整(glacial isostatic adjustment, GIA)将导致长时间尺度地幔及地壳的位移,带来地幔物质的重新分布^[167],进而影响地壳运动、海平面变化及地球内部应力状态的调整等。应用 GNSS 等方法对冰川进行高分辨率观测,有助于冰川流动和冰盖变薄的运动学和动力学研究,进而对深入理解冰川变化幅

度、机制及气候响应方面具有重要意义^[41]。

冰川区域的现今 GNSS 垂向运动是现代冰川荷载变化与冰川均衡调整的组合。一方面,需要将上述两种信号区分开来,得到现代冰川融化导致的 GNSS 垂向运动信号及相应的冰川融化速率和质量损失,进而估算对全球海平面上升的影响。如格陵兰冰原覆盖格陵兰岛约 84.7% 的地区,为北半球最大冰体,全球气候变暖导致该冰原在过去 10 a 内曾发生 3 次重大极度融冰现象,引起各国科学家广泛关注,基于格陵兰冰原及周边 GPS 垂向运动估算了冰川流失速度^[168]和 GIA 导致的抬升速率^[169],发现垂向抬升速率比预测的 GIA 速度要高得多,该隆升主要是由固体地球对当代冰川质量损失的瞬时弹性响应导致^[170]。另一方面,可以利用上述组合信号约束地球的流变结构^[171-173],如文献[173]应用美国阿拉斯加东南部的 GNSS 资料,通过改变岩石圈厚度、软流圈厚度和软流层黏度来寻找最佳拟合结果,获得软流层厚度为 230 km、黏度为 3×10^{19} Pa·s 的地球模型。

同时,国内外学者应用包括 GNSS 在内的多种监测手段开展了对冰川运动状态的研究^[174-177],对研究气候变化和冰川灾害预警具有重要意义。如对阿拉斯加 Kennicott 冰川的运动进行监测时发现,当冰川内和冰川下的水储量增加时,冰川流速增大,并提出这种加速是由于基底孔隙压力的增加促进了基底的运动,而持续的高融化速度并不能带来持续的快速基底运动^[178]。利用 GPS 和地震波形数据对南极洲西部 Whillans 冰流的粘滑运动行为的研究,揭示冰川运动具有与传统地震破裂模型类似的表现形式,其中的应力累积、摩擦滑动及破裂速度可以同地震触发机制互为补充^[176, 179]。

5 GNSS 研究岩浆及火山活动

火山活动及其岩浆演化是地表过程的重要组成部分,在岩石形成、地球深部动力过程及地形地貌改造方面发挥着重要作用,同时火山活动及喷发对环境及气候具有重要影响,威胁着人们的生命和财产安全,因此对火山活动及喷发的监测具有重要意义。以 GNSS 为代表的大地测量方法在岩浆运移及火山活动研究中发挥着重要作用。

一方面,连续 GNSS 可以对火山进行高频且连续的观测,能够在喷发前几分钟到几个月探测到前兆信号,作为早期预警和减轻火山灾害的基础^[180-182]。文献[181]利用在意大利的 Stromboli

火山附近布设的3个以1 Hz频率采样的cGPS台站研究了2003年的两次形变事件,为是否发出海啸滑坡警告提供第一手资料,第一次用大地测量数据模拟了浅层岩浆库。文献[182]显示火山喷发前一段时间的形变速度较快,但喷发期间形变可以忽略不计,认为几年到几星期的火山动荡信号可能表明火山的重新苏醒,但需将火山喷发产生的形变与火山地震形变区别开来^[183]。中国是一个多火山的国家,其中长白山天池火山是目前世界上具有再次喷发潜在危险的近代火山之一,历史上有过多次喷发记录^[184],2002年开始不仅火山地震数量明显,而且震级也在逐渐增大,基于流动GPS、水准和InSAR的研究显示长白山天池火山区正处于膨胀上升的状态,并对岩浆囊进行了模拟^[184-185],而2011年日本宫城地震使长白山火山处于体膨胀区,有利于火山的喷发^[186]。

另一方面,火山在喷发前通常会经历与地壳岩浆储层压力有关的隆起期,导致火山内部和周围地面膨胀^[187-189],通常应用球状、椭球状或基台状等模型模拟上述过程,而岩浆从深源向浅源运移的过程是幕式的,浅层地壳岩浆储层的压力和体积随时间的变化都会影响喷发潜力的评估^[190-191],如文献[190]在实验数据和数值模拟的基础上,建立了中硅火成岩的生成模型。该模型针对俯冲相关的岩浆活动,但对其他板块构造环境(包括大陆裂谷带)产生的岩浆活动具有普遍适用性。近些年,为了将地表形变与岩浆储存条件的变化联系起来,火山地面形变的建模中越来越多地引入粘弹性模型来模拟岩浆系统升高时的热状态。文献[192]比较了与弹性、粘弹模型相关的随时间变化的形变模式,显示在粘弹性模型中,形变机制、压力或体积对最终的形变分布有显著影响,最终认为岩浆储层演化以及火山造成的危害,在根本上与形变机制的选择和地壳形变方式相关。文献[193]提出了一种与岩浆室演化有关的地表形变的新模型,综合了岩浆注入、喷发、冷却和结晶,以及地壳粘弹性形变等过程,将喷发记录的地质数据与大地测量数据相结合,可以对火山岩浆系统的规模和状态进行更严格的约束。

6 GNSS用于滑坡监测

滑坡及其导致的次生灾害往往会带来巨大的人员伤亡和财产损失,因此滑坡监测及其发生机制的研究越来越受到各国政府的重视^[194-195]。

大多数滑坡事件使地表发生几厘米到几米的有限距离的位移,但是偶尔也会造成灾难性的长距离移动(数百米到几千米),特别是在山区和植被稀疏的地区^[41],所以滑坡监测对认识其运动学和动力学过程,预测可能由暴雨、地震等引发的灾难性滑坡事件至关重要。大多数滑坡的运动具有偶发性,通常发生在地震、暴雨等事件之后,如2008年汶川地震就造成了约 $6 \times 10^9 \text{ km}^3$ 的滑坡碎屑物^[196-197]。也有些滑坡以每天几厘米的速度持续移动,例如科罗拉多州西部的Slumgullion滑坡,每天的移动距离达到了2 cm^[198]。随着大地测量型GNSS设备成本的降低,许多滑坡正在通过连续GNSS进行监测,其精度可达到5 mm/d^[199]。文献[200]第一次观察到与缓慢移动的山体滑坡有关的季节性运动,在中国台湾中部地区26个cGPS测点中,有8个表现出约3~15 mm/a的长期滑坡运动,约占震间形变的20%,同时认为长期和季节性的震间运动是由缓慢移动的滑坡引起的,因此如果不考虑地表过程,会导致对震间地壳应变的过高估计。文献[201]展示了一种利用cGPS进行长期厘米级滑坡监测的方法,同时显示降雨事件在高精度GPS滑坡监测中发挥着重要的作用。而文献[202]以Chiu-fen-erh-shan滑坡为研究对象,将GPS数据与邻近强震台的数据进行比较,结果表明cGPS数据对理解滑移动力学发挥着重要作用。

7 基于GNSS反射测量的地表过程研究

GNSS天线直接接收到的卫星信号是大地测量中最有价值的信号,可用于定位、导航、形变监测等。此外,GNSS天线还会捕捉地面反射信号,其中包含了周围环境的信息,特别是在低仰角观测时。GNSS干涉反射测量(GNSS interferometric reflectometry, GNSS-IR)就是综合应用GNSS接收到的直接和反射信号的一种方法,如图1所示,位于水平散射面上的GNSS天线接收到直接信号和反射信号之间的干涉测量, e 为卫星的仰角。在文献[203]提出信噪比数据可以作为多路径信号分析的工具后,GNSS-IR技术已广泛应用于雪深监测、近地表土壤湿度反演、植被生长(植物含水量变化)及水(海)平面高度等地表过程研究的多个方面^[204]。

7.1 积雪厚度监测

雪是区域和全球气候系统的一个重要组成

部分,也是水文循环中的一个关键储存单元,在水文循环中起着重要作用。雪水当量(snow water equivalent, SWE)是雪密度和积雪厚度的乘积,代表了径流的潜在可用水量,是水文研究中一个重要参数,对积雪厚度的研究有助于建立更精确的气象水文模型。

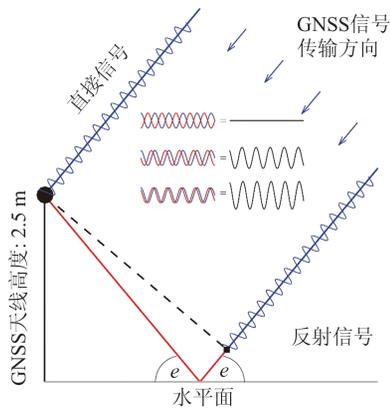


图1 GNSS-IR测量原理示意图^[205]

Fig. 1 Principles of GNSS-IR^[205]

文献[206]在原理上计算了在不同厚度的介质覆盖地表时GPS接收机的反射信号和直接信号之和所产生的相对接收功率,进而通过案例证明GPS反射测量在推断积雪厚度方面的应用潜力。然而上述研究仅适用于特殊设计的天线,如何应用为监测地壳运动而广泛架设的大地测量型GNSS接收机和天线摆在了科学家面前。文献[207]发展了基于板块运动监测的GPS接收机和天线的信噪比(signal to noise ratio, SNR)数据反演积雪厚度的算法,借助现场观测设备及人工观测获得的积雪厚度和雪密度的结果,对科罗拉多州两次暴风雪过程进行监测,证明大地测量型GPS接收机获得的数据与传统雪传感器的现场观测结果非常一致。文献[208-209]通过物理上的正演模型和统计上的反演模型将未知的雪特征参数化,量化观测参数敏感性,对草地、高山和森林3种不同的地形进行了评估,从精度和准确性方面评价反演性能。文献[210]从基于GPS的积雪厚度时间序列中估算雪的密度,进而计算SWE,通过与人工观测数据进行比较,评估了基于GPS的积雪厚度、雪密度和SWE数据在美国PBO(plate boundary observatory)站点应用的准确性。

近几年对积雪厚度和SWE的研究更加专注于影响因素的分析和新算法的应用。文献[211]利用气候预测数据作为约束参数,将GPS日积雪厚度快速转化为SWE,并对SWE估计与验证过

程的影响因素进行评价,认为在积雪监测设备缺乏区域可以实现雪水当量快速估计。文献[212]提出了一种利用GNSS三频载波相位的积雪厚度反演方法,利用基于密度的空间聚类方法、噪声算法和归一化方法,结合反射面地形特征对积雪厚度进行估计,结果显示对Galileo和BDS具有更好的反演性能,提高了空间分辨率。而文献[213]采用基于深度学习的方法,结合卫星观测、现场数据和GNSS-IR估计,对2008—2017年美国阿拉斯加地区GNSS数据进行了训练和测试,结果表明,深度置信网络模型优于线性方法和传统神经网络模型,显示基于深度学习的方法具有很好的应用前景。

7.2 土壤水分含量反演

土壤水分含量是水循环中关键变量之一,代表土壤颗粒之间单位体积的含水量,是植被的主要水源,在天气预报、洪水预报和含水层补给研究中具有重要意义。由于土壤水分含量在空间和时间上都是变化的,因此很难对该参数提供良好的估计。现场测量能提供高时间分辨率的土壤水分含量单点精度,但无法大面积开展;而基于卫星数据的再分析产品,其空间分辨率为几千米至几十千米。相比之下,GNSS-IR的探测范围为周边1 000 m²,是对上述数据集的一个很好补充。

GNSS-IR的土壤湿度反演主要基于多路径相位变化的最小二乘估计,通过正演模型将这些相位估计转换为土壤水分^[41]。美国科罗拉多大学的Larson研究小组基于为研究地壳形变和构造运动而连续运行的数以千计的大地测量型GPS接收机,结合原地土壤水分探测器测试了SNR监测土壤水分的能力,发现GPS干涉反射(GPS interferometric reflectometry, GPS-IR)能很好地反映土壤表层5 cm的水分变化,同时可以从时间细节上推断降雨事件期间和之后的土壤湿度变化^[214-215],进而解决了原地土壤水分探测器覆盖面积小、卫星遥感观测信号穿透深度浅的问题。文献[216]采用正演模型来检验影响SNR变化的有效反射镜高度、振幅和相位3个干涉指标与近地表土壤水分的关系,认为由GPS数据导出的相位是土壤水分变化的最佳度量。然而,在某些环境下,植被对GNSS-IR土壤水分反演的影响必须加以考虑,文献[217]利用11个GPS站点的原地土壤水分观测数据,通过一种利用SNR干涉图振幅变化来调整植被效应的算法,降低了实测数据与GNSS-IR获得的土壤水分之间的误差。

文献[218]对包括GNSS-IR在内的土壤水分的测量技术、检索方法、产品和应用进行了详细的综述,并讨论了最新进展、未来展望和面临的挑战。

7.3 植被(含水量)变化

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,在全球物质能量的循环中起着重要的调节作用。植被指数是对地表植被状况的简单、有效和经验的度量,往往由星载光学多光谱观测数据获得的,能反映大面积植被的健康状况。在已定义的40多种植被指数中,归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)最为常用,广泛应用于植被生长状态、植被覆盖度等方面。但由于遥感卫星观测的时间分辨率较低,植被指数(如NDVI)获得的时间分辨率为几周到几个月。此外,光学遥感观测受云层覆盖的影响较大,进一步降低了基于遥感卫星的植被指数的时间分辨率,而GNSS-IR技术不受云层的干扰,可以提供连续的高时间分辨率的植被生长参数估计。

文献[219]基于2个农业试验点和9个PBO网络GPS台站的数据,认为GPS测得的地面反射多路径幅值与NDVI呈负相关。但上述研究仅基于定性角度,文献[220]提出了一种基于SNR的植被含水量(vegetation water content, VWC)测量方法,应用大地测量型GPS接收器和天线,得出SNR数据的振幅与VWC呈近似线性关系,但其最高阈值为 1 kg/m^2 。美国科罗拉多大学的Larson及其合作者开发出了一种基于反射振幅的植被日指标,即归一化微波反射指数(normalized microwave reflection index, NMRI),结果显示:NMRI、NDVI与VWC之间存在明显的线性关系,利用NMRI就可以预测VWC^[221-222]。而文献[223]通过对美国西部184个GPS站点NMRI和NDVI的分析指出,虽然NMRI数据滞后于NDVI,但由于NMRI是一种连续、全天候、接近实时的微波测量方法,所以从中提取的物候信息是基于光学指数(如NDVI)的很好补充。文献[224]首次利用BDS的SNR数据,获得了中国北京一个小麦种植区的土壤水分变化和小麦生长状况,通过现场观测数据的对比分析,显示负归一化幅度与NDVI表现出较好的相关性,得到的小麦高度与原位小麦高度变化基本一致,反演结果较好地反映了小麦作物高度从快速变化到相对稳定再到收获的过程。

7.4 水(海)平面监测

传统上,沿海地区往往用验潮仪来监测海平

面变化,然而该设备测量的是相对海平面而不是绝对海平面变化。GNSS-IR测得的海平面结果可以放在统一的参考框架下,因此可以利用长期的绝对海平面高度观测结果来研究气候变化^[225]。GNSS-IR监测水位变化是通过分析距离水体不到100 m的连续GNSS站数据,方法类似于积雪厚度监测,反射获得的SNR信号可以用来监测相位中心与反射面之间的高度变化。

美国科罗拉多大学的Larson团队^[226]在该方面做了大量的工作,取得了一系列成果:如首次利用单台接收GPS信号的大地测量型接收机的多路径理论和SNR数据获取的海平面高度,相比于附近的验潮仪观测结果,GPS-IR测量精度在5~10 cm,随着观测时间的增长及影响因素的剔除,应用GPS-IR反射测量的精度也会相应提高^[227-228]。文献[229]对同时接收GPS和GLONASS信号的SNR和相位延迟数据进行分析,认为相位延迟结果与验潮仪测得的海平面数据一致性较好,但是建议避免使用L2波段信号,同时考虑了风速的影响。也有研究者将小波变换方法应用到SNR数据估计海平面高度的研究中来,取得了不错的研究效果^[230-231]。文献[232]将GNSS与卫星测高结果放在同一个框架中,研究GNSS-IR在测量沿海海平面绝对变化方面的潜力,结果精度为1.5 cm。近年来,GNSS-IR广泛应用于自然灾害(如地震导致的海啸、风暴潮)导致的海平面变化^[233-234]以及风浪谱和风向^[235]等的研究,对沿海地区海啸、风暴潮等极端自然灾害的早期监测和预警具有重要意义。

8 结 语

本文从长期地壳形变、地震周期形变、大气可降水量、荷载响应、火山活动及干涉反射测量等多个领域回顾了GNSS技术在地表过程研究中的应用,虽然上述领域无法涵盖GNSS技术应用的方方面面,但也使人们一窥该技术在地表过程研究应用范围之广,同时得到如下认识:

1) 目前,中国现有的GNSS台站大多基于流动观测,该观测方式虽然能节省建设及运维成本,如通过两到三次的重复测量就能以毫米级精度快速厘定大范围、快速形变的造山带地壳形变,但不利于物理现象的持续记录,无法形成长时间序列的动态变化特征,进而使得从中总结规律性认识变得困难,而过去20~30 a地震大地测量学的一些经典研究,如慢地震^[62,236],往往基于

连续 GNSS 观测。1 Hz 甚至更高频 GNSS 在实时地震预警和提供独立地震震级评估方面表现出巨大潜力^[237]。因此在未来工作中,应加大连续及高频 GNSS 台站的观测力度,优化数据传输共享网络的构建,加强 GNSS 解算精度和时效,发挥 GNSS 在地震、海啸预警、火山活动监测以及极端天气预测等方面的重要作用。

2)虽然连续 GNSS 能提供高精度单点定位、连续的实时甚至是高频的时间序列,但由于其自身的价格、运维条件及成本决定了其现阶段无法实现中国全境甚至是关键地区的高密度覆盖,如在青藏高原这一重要大陆构造形变地区 GNSS 台站非常稀疏甚至是空白,所以在加强 GNSS 台站(特别是连续 GNSS 台站)空间分布及时间复测的基础上,需与其他地球物理、大地测量手段如地震波形数据、精密水准测量、InSAR 及 GRACE 重力卫星数据等联合应用^[71, 75, 238-239],以弥补 GNSS 台站分布稀疏的不足,实现对科学问题的综合分析。

3)虽然 GNSS 坐标、时间序列及速度场信息都是经过严密的算法解算及物理模型校正,以期得到真实的地表运动,但还是会受到诸如季节性水体加载(如雨、雪)、土壤冻融以及人为造成的地面沉降等因素的影响,即使应用长时间序列对噪声、季节性荷载等加以约束,也很难对深部动力学机制进行精确约束^[21],甚至偏差较大^[240]。需要提出新的深部动力学模型来对现有 GNSS 数据进行约束和解释,同时采用新的如深度学习等反演算法提高反演精度。

总之,GNSS 技术的出现和发展不仅对大地测量学的研究带来了一场革命,可以以 0.1 s 到几十年时间尺度测量地表三维位移形变场,而且极大促进了地球表层系统科学的发展及系统内各学科间的交叉融合,搭建起了整个地表系统的组成与功能以及各个要素之间相互作用全面理解的一个桥梁。如今,GNSS 在地学中的应用已得到广泛认可,相信随着连续、高频 GNSS 台站的不断建设,多种地球物理、大地测量手段的综合运用,多学科模型的交叉融合,GNSS 技术必将在地表过程研究中得到越来越广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] Ding Yongjian, Zhou Chenghu, Shao Ming'an, et al. Studies of Earth Surface Processes: Progress and Prospect[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(4): 407-419. (丁永建,周成虎,邵明安,等. 地表过程研究进展与趋势[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(4): 407-419.)
- [2] Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Han Tianding, et al. Opportunities and Challenges of Studies Across Land Surface Processes to Land Surface System Sciences [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(4): 443-455. (丁永建,张世强,韩添丁,等. 由地表过程向地表系统科学研究跨越的机遇与挑战[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(4): 443-455.)
- [3] Leng Shuying, Song Changqing. Review of Land Surface Geographical Process Study and Prospects in China [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(6): 600-606. (冷疏影,宋长青. 陆地表层系统地理过程研究回顾与展望[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(6): 600-606.)
- [4] Reid W V, Chen D, Goldfarb L, et al. Earth System Science for Global Sustainability: Grand Challenges[J]. *Science*, 2010, 330(6006): 916-917.
- [5] Liu Jing, Zhang Jinyu, Ge Yukui, et al. Tectonic Geomorphology: An Interdisciplinary Study of the Interaction Among Tectonic Climatic and Surface Processes [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(30): 3070-3088. (刘静,张金玉,葛玉魁,等. 构造地貌学:构造-气候-地表过程相互作用的交叉研究[J]. *科学通报*, 2018, 63(30): 3070-3088.)
- [6] Peng Ping, Zhu Liping. Observations of Land Surface Processes of the Tibetan Plateau Based on the Field Stations Network [J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35(6): 97-102. (彭萍,朱立平. 基于野外站网络的青藏高原地表过程观测研究[J]. *科技导报*, 2017, 35(6): 97-102.)
- [7] Xu Ziwei, Liu Shaomin, Che Tao, et al. Operation and Maintenance and Data Quality Control of the Heihe Integrated Observatory Network [J]. *Resources Science*, 2020, 42(10): 1975-1986. (徐自为,刘绍民,车涛,等. 黑河流域地表过程综合观测网的运行、维护与数据质量控制[J]. *资源科学*, 2020, 42(10): 1975-1986.)
- [8] Bock Y, Melgar D. Physical Applications of GPS Geodesy: A Review [J]. *Reports on Progress in Physics Physical Society (Great Britain)*, 2016, 79(10): 106801.
- [9] Ning Jinsheng, Yao Yibin, Zhang Xiaohong. Review of the Development of Global Satellite Navigation System [J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2013, 1(1): 3-8. (宁津生,姚宜斌,张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. *导航定位学报*, 2013, 1(1): 3-8.)
- [10] Larson K M. Unanticipated Uses of the Global Positioning System [J]. *Annual Review of Earth and*

- Planetary Sciences*, 2019, 47: 19-40.
- [11] Wang Min, Shen Zhengkang. Present-Day Tectonic Deformation in Continental China: Thirty Years of GPS Observation and Research[J]. *Earthquake Research in China*, 2020, 36(4): 660-683. (王敏, 沈正康. 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, 2020, 36(4): 660-683.)
- [12] Gan Weijun, Li Qiang, Zhang Rui, et al. Construction and Application of Tectonic and Environmental Observation Network of China's Mainland[J]. *Journal of Engineering Studies*, 2012, 4(4): 324-331. (甘卫军, 李强, 张锐, 等. 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, 2012, 4(4): 324-331.)
- [13] Herring T A, Melbourne T I, Murray M H, et al. Plate Boundary Observatory and Related Networks: GPS Data Analysis Methods and Geodetic Products [J]. *Reviews of Geophysics*, 2016, 54(4): 759-808.
- [14] Wang Tan, Li Yu, Zhang Rui, et al. GPS in Earthquake Monitoring in China: Current Situation and Prospect [J]. *Journal of Seismological Research*, 2021, 44(2): 192-207. (王坦, 李瑜, 张锐, 等. GPS在我国地震监测中的应用现状与发展展望[J]. 地震研究, 2021, 44(2): 192-207.)
- [15] Sagiya T. A Decade of GEONET: 1994—2003 the Continuous GPS Observation in Japan and Its Impact on Earthquake Studies [J]. *Earth, Planets and Space*, 2004, 56(8): xxix-xli.
- [16] Shen Z K, King R W, Agnew D C, et al. A Unified Analysis of Crustal Motion in Southern California, 1970—2004: The SCEC Crustal Motion Map [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B11): B11402.
- [17] Thatcher W, Foulger G R, Julian B R, et al. Present-Day Deformation Across the Basin and Range Province, Western United States [J]. *Science*, 1999, 283(5408): 1714-1718.
- [18] Wdowinski S, Smith-Konter B, Bock Y, et al. Diffuse Interseismic Deformation Across the Pacific-North America Plate Boundary [J]. *Geology*, 2007, 35(4): 311.
- [19] Sagiya T, Miyazaki S, Tada T. Continuous GPS Array and Present-Day Crustal Deformation of Japan [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2000, 157(11): 2303-2322.
- [20] Niu Zhijun, Ma Zongjin, Chen Xinlian, et al. Crustal Movement Observation Network of China [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 2002, 22(3): 88-93. (牛之俊, 马宗晋, 陈鑫连, 等. 中国地壳运动观测网络[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(3): 88-93.)
- [21] Wang M, Shen Z K. Present-Day Crustal Deformation of Continental China Derived from GPS and Its Tectonic Implications [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(2): e2019JB018774.
- [22] Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, et al. Present-Day Crustal Deformation in China Constrained by Global Positioning System Measurements [J]. *Science*, 2001, 294(5542): 574-577.
- [23] Li Qiang, You Xinzhaoh, Yang Shaomin, et al. High-Precision and High-Density GPS Monitoring of Structural Deformation in Chinese Mainland—Current Velocity Field [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2012, 42(5): 629-632. (李强, 游新兆, 杨少敏, 等. 中国大陆构造变形高精度大密度GPS监测—现今速度场[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(5): 629-632.)
- [24] Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. Continuous Deformation of the Tibetan Plateau from Global Positioning System Data [J]. *Geology*, 2004, 32(9): 809.
- [25] Zhao B, Huang Y, Zhang C H, et al. Crustal Deformation on the Chinese Mainland During 1998—2014 Based on GPS Data [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2015, 6(1): 7-15.
- [26] Wang W, Qiao X J, Yang S M, et al. Present-Day Velocity Field and Block Kinematics of Tibetan Plateau from GPS Measurements [J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 208(2): 1088-1102.
- [27] Zheng G, Wang H, Wright T J, et al. Crustal Deformation in the India-Eurasia Collision Zone from 25 Years of GPS Measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(11): 9290-9312.
- [28] Liang S M, Gan W J, Shen C Z, et al. Three-Dimensional Velocity Field of Present-Day Crustal Motion of the Tibetan Plateau Derived from GPS Measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(10): 5722-5732.
- [29] Rui X, Stamps D S. A Geodetic Strain Rate and Tectonic Velocity Model for China [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20(3): 1280-1297.
- [30] Wang Min, Shen Zhengkang, Niu Zhijun, et al. Current Crustal Movement and Active Block Model in Chinese Mainland [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2003, 33(S1): 21-32. (王敏, 沈正康, 牛之俊, 等. 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, 2003, 33(S1): 21-32.)
- [31] Shen Z K, Lü J N, Wang M, et al. Contemporary Crustal Deformation Around the Southeast Borderland of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysi-*

- cal Research: Solid Earth*, 2005, 110(B11): B11409.
- [32] Meade B J. Present-Day Kinematics at the India-Asia Collision Zone[J]. *Geology*, 2007, 35(1): 81.
- [33] Thatcher W. Microplate Model for the Present-Day Deformation of Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B1): B01401.
- [34] Mao A L, Harrison C G A, Dixon T H. Noise in GPS Coordinate Time Series [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104 (B2) : 2797-2816.
- [35] Dong D, Fang P, Bock Y, et al. Anatomy of Apparent Seasonal Variations from GPS-Derived Site Position Time Series[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B4): 9-16.
- [36] Beavan J, Denys P, Denham M, et al. Distribution of Present-Day Vertical Deformation Across the Southern Alps, New Zealand, from 10 Years of GPS Data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(16): L16305.
- [37] Hao M, Freymueller J T, Wang Q L, et al. Vertical Crustal Movement Around the Southeastern Tibetan Plateau Constrained by GPS and GRACE Data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 437: 1-8.
- [38] Zhao Bin, Nie Zhaosheng, Huang Yong, et al. Vertical Motion of North China Inferred from Dense GPS Measurements[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014, 34(5): 35-39. (赵斌, 聂兆生, 黄勇, 等. 大规模 GPS 揭示的华北地区现今垂直运动 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2014, 34(5): 35-39.)
- [39] Kleinherenbrink M, Riva R, Frederikse T. A comparison of Methods to Estimate Vertical Land Motion Trends from GNSS and Altimetry at Tide Gauge Stations[J]. *Ocean Science*, 2018, 14(2): 187-204.
- [40] Hammond W C, Blewitt G, Kreemer C, et al. GPS Imaging of Global Vertical Land Motion for Studies of Sea Level Rise[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126 (7) : e2021JB022355.
- [41] Morton J Y T, van Diggelen F, Spilker J J, et al. Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2021.
- [42] Baldi P, Casula G, Cenni N, et al. GPS-Based Monitoring of Land Subsidence in the Po Plain (Northern Italy) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 288(1/2): 204-212.
- [43] Karegar M A, Dixon T H, Engelhart S E. Subsidence Along the Atlantic Coast of North America: Insights from GPS and Late Holocene Relative Sea Level Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43 (7) : 3126-3133.
- [44] Bürgmann R, Hilley G, Ferretti A, et al. Resolving Vertical Tectonics in the San Francisco Bay Area from Permanent Scatterer InSAR and GPS Analysis [J]. *Geology*, 2006, 34(3): 221.
- [45] Osmanoglu B, Dixon T H, Wdowinski S, et al. Mexico City Subsidence Observed with Persistent Scatterer InSAR [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(1): 1-12.
- [46] Du Z Y, Ge L L, Ng A H M, et al. Long-Term Subsidence in Mexico City from 2004 to 2018 Revealed by Five Synthetic Aperture Radar Sensors [J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30 (15): 1785-1801.
- [47] Guo J M, Zhou L, Yao C L, et al. Surface Subsidence Analysis by Multi-temporal InSAR and GRACE: A Case Study in Beijing[J]. *Sensors*, 2016, 16(9): 1495.
- [48] Wang J, Howarth J D, McClymont E L, et al. Long-Term Patterns of Hillslope Erosion by Earthquake-Induced Landslides Shape Mountain Landscapes [J]. *Science Advances*, 2020, 6 (23) : eaaz6446.
- [49] Wang J, Jin Z D, Hilton R G, et al. Controls on Fluvial Evacuation of Sediment from Earthquake-Triggered Landslides[J]. *Geology*, 2015, 43(2): 115-118.
- [50] Wang J, Hilton R G, Jin Z D, et al. The Isotopic Composition and Fluxes of Particulate Organic Carbon Exported from the Eastern Margin of the Tibetan Plateau [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 252: 1-15.
- [51] Wang J, Jin Z D, Hilton R G, et al. Earthquake-Triggered Increase in Biospheric Carbon Export from a Mountain Belt[J]. *Geology*, 2016, 44(6): 471-474.
- [52] Reid H F. The Mechanics of the Earthquake, the California Earthquake of April 18, 1906 [J]. *Carnegie Institute, Washington D C*, 1910, 2: 3-56
- [53] Segall P, Davis J L. GPS Applications for Geodynamics and Earthquake Studies [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1997, 25: 301-336.
- [54] Scholz C H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2018.
- [55] Harris R A. Large Earthquakes and Creeping Faults [J]. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55(1): 169-198.
- [56] 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.
- [57] Savage J C. A Dislocation Model of Strain Accumu-

- lation and Release at a Subduction Zone[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1983, 88(B6): 4984-4996.
- [58] McCaffrey R. Time-Dependent Inversion of Three-Component Continuous GPS for Steady and Transient Sources in Northern Cascadia[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(7): L07304.
- [59] Jolivet R, Lasserre C, Doin M P, et al. Shallow Creep on the Haiyuan Fault (Gansu, China) Revealed by SAR Interferometry[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B6): B06401.
- [60] Li Y C, Nocquet J M, Shan X J, et al. Heterogeneous Interseismic Coupling Along the Xianshuihe-Xiaojiang Fault System, Eastern Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(11): e2020JB021187.
- [61] Hirose H, Hirahara K, Kimata F, et al. A Slow Thrust Slip Event Following the Two 1996 Hyuganada Earthquakes Beneath the Bungo Channel, Southwest Japan[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(21): 3237-3240.
- [62] Dragert G, Wang K, James T S. A Silent Slip Event on the Deeper Cascadia Subduction Interface[J]. *Science*, 2001, 292(5521): 1525-1528.
- [63] Miller M M, Melbourne T, Johnson D J, et al. Periodic Slow Earthquakes from the Cascadia Subduction Zone[J]. *Science*, 2002, 295(5564): 2423.
- [64] Ohta Y, Freymueller J T, Hreinsdóttir S, et al. A Large Slow Slip Event and the Depth of the Seismogenic Zone in the South Central Alaska Subduction Zone[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 247(1/2): 108-116.
- [65] Outerbridge K C, Dixon T H, Schwartz S Y, et al. A Tremor and Slip Event on the Cocos-Caribbean Subduction Zone as Measured by a Global Positioning System (GPS) and Seismic Network on the Nicoya Peninsula, Costa Rica[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, 115(B10): B10408.
- [66] Brown K M, Tryon M D, De Shon H R, et al. Correlated Transient Fluid Pulsing and Seismic Tremor in the Costa Rica Subduction Zone[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 238(1/2): 189-203.
- [67] Lowry A R. Resonant Slow Fault Slip in Subduction Zones Forced by Climatic Load Stress[J]. *Nature*, 2006, 442(7104): 802-805.
- [68] Shen Z K. Pole-Tide Modulation of Slow Slip Events at Circum-Pacific Subduction Zones[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95(5): 2009-2015.
- [69] Zhao B, Bürgmann R, Wang D Z, et al. Aseismic Slip and Recent Ruptures of Persistent Asperities Along the Alaska-Aleutian Subduction Zone[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3098.
- [70] Xu Caijun, Wang Leyang. Progress of Joint Inversion of Geodetic and Seismological Data for Seismic Source Rupture Process[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(4): 457-462. (许才军, 王乐洋. 大地测量和地震数据联合反演地震震源破裂过程研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(4): 457-462.)
- [71] Hartzell S, Mendoza C, Ramirez-Guzman L, et al. Rupture History of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan, China, Earthquake: Evaluation of Separate and Joint Inversions of Geodetic, Teleseismic, and Strong-Motion Data[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2013, 103(1): 353-370.
- [72] Wald D J, Heaton T H, Hudnut K W. The Slip History of the 1994 Northridge, California, Earthquake Determined from Strong-Motion, Teleseismic, GPS, and Leveling Data[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86(1B): S49-S70.
- [73] Ma K F. Spatial and Temporal Distribution of Slip for the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 91(5): 1069-1087.
- [74] Xu Caijun, He Ping, Wen Yangmao, et al. Coseismic Deformation and Slip Distribution for 2011 Tohoku-Oki Mw 9.0 Earthquake: Constrained by GPS and InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(12): 1387-1391. (许才军, 何平, 温扬茂, 等. 日本2011 Tohoku-Oki Mw 9.0级地震的同震形变及其滑动分布反演: GPS和InSAR约束[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(12): 1387-1391.)
- [75] Shen Z K, Sun J B, Zhang P Z, et al. Slip Maxima at Fault Junctions and Rupturing of Barriers During the 2008 Wenchuan Earthquake[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2: 718-724.
- [76] Wang Q, Qiao X J, Lan Q G, et al. Rupture of Deep Faults in the 2008 Wenchuan Earthquake and Uplift of the Longmen Shan[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4: 634-640.
- [77] Wang M, Wang F, Jiang X, et al. GPS Determined Coseismic Slip of the 2021 Mw 7.4 Maduo, China, Earthquake and Its Tectonic Implication[J]. *Geophysical Journal International*, 2021, 228(3): 2048-2055.
- [78] Yu S B. Preseismic Deformation and Coseismic Dis-

- placements Associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 91(5): 995-1012.
- [79] Larson K M, Bodin P, Gomberg J. Using 1-Hz GPS Data to Measure Deformations Caused by the Denali Fault Earthquake [J]. *Science*, 2003, 300(5624): 1421-1424.
- [80] Bock Y, Prawirodirdjo L, Melbourne T I. Detection of Arbitrarily Large Dynamic Ground Motions with a Dense High-Rate GPS Network [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(6): L06604.
- [81] Ji C, Larson K M, Tan Y, et al. Slip History of the 2003 San Simeon Earthquake Constrained by Combining 1-Hz GPS, Strong Motion, and Teleseismic Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(17): L17608.
- [82] Miyazaki S, Larson K M, Choi K, et al. Modeling the Rupture Process of the 2003 September 25 Tokachi-Oki (Hokkaido) Earthquake Using 1-Hz GPS Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(21): L21603.
- [83] Yin Haitao, Zhang Peizhen, Gan Weijun, et al. Deformation Process of Near-Site Surface During Wenchuan Earthquake with Ms 8.0 Measured by High-Frequency GPS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(26): 2621-2626. (殷海涛, 张培震, 甘卫军, 等. 高频 GPS 测定的汶川 Ms 8.0 级地震震时近场地表变形过程 [J]. *科学通报*, 2010, 55(26): 2621-2626.)
- [84] Chai Haishan, Chen Kejie, Wei Guoguang, et al. Coseismic Deformation Monitoring Using BDS-3 and Ultra-High Rate GNSS: A Case Study of the 2021 Maduo Mw 7.4 Earthquake [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 946-954. (柴海山, 陈克杰, 魏国光, 等. 北斗三号与超高频 GNSS 同震形变监测: 以 2021 年青海玛多 Mw 7.4 地震为例 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(6): 946-954.)
- [85] Chen K J, Avouac J P, Geng J H, et al. The 2021 Mw 7.4 Madoi Earthquake: An Archetype Bilateral Slip-Pulse Rupture Arrested at a Splay Fault [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(2): e2021GL095243.
- [86] Delouis B, Nocquet J M, Vallée M. Slip Distribution of the February 27, 2010 Mw = 8.8 Maule Earthquake, Central Chile, from Static and High-Rate GPS, InSAR, and Broadband Teleseismic Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(17): L17305.
- [87] Yue H, Lay T. Inversion of High-Rate (1 sps) GPS Data for Rupture Process of the 11 March 2011 Tohoku Earthquake (Mw 9.1) [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(7): L00G09.
- [88] Galetzka J, Melgar D, Genrich J F, et al. Slip Pulse and Resonance of the Kathmandu Basin During the 2015 Gorkha Earthquake, Nepal [J]. *Science*, 2015, 349(6252): 1091-1095.
- [89] Vigny C, Socquet A, Peyrat S, et al. The 2010 Mw 8.8 Maule Megathrust Earthquake of Central Chile, Monitored by GPS [J]. *Science*, 2011, 332(6036): 1417-1421.
- [90] Smith S W, Wyss M. Displacement on the San Andreas Fault Subsequent to the 1966 Parkfield Earthquake [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1968, 58(6): 1955-1973.
- [91] Guo Rumeng, Yang Haozhe, Tang Xiongwei, et al. A Review on Satellite Geodesy Applied to Image the Earthquake Cycle Deformation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 799-806. (郭汝梦, 杨浩哲, 汤雄伟, 等. 卫星大地测量成像地震周期形变研究综述 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(6): 799-806.)
- [92] Nur A, Mavko G. Postseismic Viscoelastic Rebound [J]. *Science*, 1974, 183(4121): 204-206.
- [93] Lienkaemper J J, DeLong S B, Domrose C J, et al. Afterslip Behavior Following the 2014 M 6.0 South Napa Earthquake with Implications for Afterslip Forecasting on Other Seismogenic Faults [J]. *Seismological Research Letters*, 2016, 87(3): 609-619.
- [94] Guo R M, Zheng Y, Xu J Q, et al. Seismic and Aseismic Fault Slip Associated with the 2017 Mw 8.2 Chiapas, Mexico, Earthquake Sequence [J]. *Seismological Research Letters*, 2019, 90(3): 1111-1120.
- [95] Liu-Zeng J, Zhang Z, Rollins C, et al. Postseismic Deformation Following the 2015 Mw 7.8 Gorkha (Nepal) Earthquake: New GPS Data, Kinematic and Dynamic Models, and the Roles of Afterslip and Viscoelastic Relaxation [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(9): e2020JB019852.
- [96] Liu K, Geng J H, Wen Y M, et al. Very Early Postseismic Deformation Following the 2015 Mw 8.3 Illapel Earthquake, Chile Revealed from Kinematic GPS [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(11): e2022GL098526.
- [97] Peltzer G, Rosen P, Rogez F, et al. Postseismic Rebound in Fault Step-Overs Caused by Pore Fluid Flow [J]. *Science*, 1996, 273(5279): 1202-1204.
- [98] Jónsson S, Segall P, Pedersen R, et al. Post-Earthquake Ground Movements Correlated to Pore-Pressure

- sure Transients [J]. *Nature*, 2003, 424 (6945) : 179-183.
- [99] Peltzer G, Rosen P, Rogez F, et al. Poroelastic Rebound Along the Landers 1992 Earthquake Surface Rupture[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B12): 30131-30145.
- [100] Hu Y, Bürgmann R, Freymueller J T, et al. Contributions of Poroelastic Rebound and a Weak Volcanic Arc to the Postseismic Deformation of the 2011 Tohoku Earthquake [J]. *Earth, Planets and Space*, 2014, 66(1): 106.
- [101] Yang H Z, Guo R M, Zhou J C, et al. Transient Poroelastic Response to Megathrust Earthquakes: A Look at the 2015 Mw 8.3 Illapel, Chile, Event[J]. *Geophysical Journal International*, 2022, 230(2): 908-915.
- [102] Panuntun H, Miyazaki S, Fukuda Y, et al. Probing the Poisson's Ratio of Poroelastic Rebound Following the 2011 Mw 9.0 Tohoku Earthquake[J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 215(3): 2206-2221.
- [103] McCormack K, Hesse M A, Dixon T, et al. Modeling the Contribution of Poroelastic Deformation to Post-seismic Geodetic Signals[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(8): e2020GL086945.
- [104] Bürgmann R, Dresen G. Rheology of the Lower Crust and Upper Mantle: Evidence from Rock Mechanics, Geodesy, and Field Observations[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2008, 36: 531-567.
- [105] Sun T, Wang K L, Iinuma T, et al. Prevalence of Viscoelastic Relaxation After the 2011 Tohoku-Oki Earthquake[J]. *Nature*, 2014, 514(7520): 84-87.
- [106] Zhao B, Bürgmann R, Wang D Z, et al. Dominant Controls of Downslip Afterslip and Viscous Relaxation on the Postseismic Displacements Following the Mw 7.9 Gorkha, Nepal, Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(10): 8376-8401.
- [107] Huang M H, Bürgmann R, Freed A M. Probing the Lithospheric Rheology Across the Eastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 396: 88-96.
- [108] Tian Z, Freymueller J T, Yang Z Q. Spatio-Temporal Variations of Afterslip and Viscoelastic Relaxation Following the Mw 7.8 Gorkha (Nepal) Earthquake [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 532: 116031.
- [109] Wang M, Shen Z K, Wang Y Z, et al. Postseismic Deformation of the 2008 Wenchuan Earthquake Illuminates Lithospheric Rheological Structure and Dynamics of Eastern Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(9): e2021JB022399.
- [110] Kiehl J T, Trenberth K E. Earth's Annual Global Mean Energy Budget [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(2): 197-208.
- [111] Bevis M, Businger S, Chiswell S, et al. GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays Onto Precipitable Water [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33(3): 379-386.
- [112] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, 97(D14): 15787-15801.
- [113] Rocken C, Hove T V, Johnson J, et al. GPS/STORM—GPS Sensing of Atmospheric Water Vapor for Meteorology [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1995, 12(3): 468-478.
- [114] Rocken C, Ware R, Van Hove T, et al. Sensing Atmospheric Water Vapor with the Global Positioning System [J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20(23): 2631-2634.
- [115] Duan J P, Bevis M, Fang P, et al. GPS Meteorology: Direct Estimation of the Absolute Value of Precipitable Water [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1996, 35(6): 830-838.
- [116] Flores A, Ruffini G, Rius A. 4D Tropospheric Tomography Using GPS Slant Wet Delays [J]. *Annales Geophysicae*, 2000, 18(2): 223-234.
- [117] Haji Aghajany S, Amerian Y. Three Dimensional Ray Tracing Technique for Tropospheric Water Vapor Tomography Using GPS Measurements [J]. *Journal of Atmospheric and Solar—Terrestrial Physics*, 2017, 164: 81-88.
- [118] Braun J, Rocken C, Liljegren J. Comparisons of Line-of-Sight Water Vapor Observations Using the Global Positioning System and a Pointing Microwave Radiometer [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(5): 606-612.
- [119] Wang Y C, Ding N, Zhang Y, et al. A New Approach of the Global Navigation Satellite System Tomography for any Size of GNSS Network [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 617.
- [120] Liu Min, Guo Peng, Ye Qixin, et al. The 3D Tomography Technique and Application of Water Vapor Using Ground-Based GPS Networks in Shanghai [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2010, 51(3): 299-308. (刘敏, 郭鹏, 叶其欣, 等. 上海地区地基GPS水汽三维层析技术和初步应用 [J]. *天文学报*, 2010, 51(3): 299-308.)

- [121]Zhang Shuangcheng, Liu Jingnan, Ye Shirong, et al. Retrieval of Water Vapor Along the GPS Slant Path Based on Double-Differenced Residuals [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(1): 100-104. (张双成, 刘经南, 叶世榕, 等. 顾及双差残差反演 GPS 信号方向的斜路径水汽含量[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(1): 100-104.)
- [122]Landskron D, Böhm J. VMF3/GPT3: Refined Discrete and Empirical Troposphere Mapping Functions [J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(4): 349-360.
- [123]Leandro R, Santos M, Langley R. UNB Neutral Atmosphere Models: Development and Performance [C]//National Technical Meeting of the Institute of Navigation, California, USA, 2006.
- [124]Li W, Yuan Y B, Ou J K, et al. A New Global Zenith Tropospheric Delay Model IGGtrop for GNSS Applications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(17): 2132-2139.
- [125]Boehm J, Niell A, Tregoning P, et al. Global Mapping Function (GMF): A New Empirical Mapping Function Based on Numerical Weather Model Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(7): L07304.
- [126]Boehm J, Schuh H. Vienna Mapping Functions in VLBI Analyses [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(1): L01603.
- [127]Boehm J, Werl B, Schuh H. Troposphere Mapping Functions for GPS and Very Long Baseline Interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Operational Analysis Data [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B2): B02406.
- [128]Ding M H. A Second Generation of the Neural Network Model for Predicting Weighted Mean Temperature [J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(2): 61.
- [129]Huang L K, Liu L L, Chen H, et al. An Improved Atmospheric Weighted Mean Temperature Model and Its Impact on GNSS Precipitable Water Vapor Estimates for China [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(2): 51.
- [130]Ding M H. A Neural Network Model for Predicting Weighted Mean Temperature [J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(10): 1187-1198.
- [131]Yao Y B, Zhu S, Yue S Q. A Globally Applicable, Season-Specific Model for Estimating the Weighted Mean Temperature of the Atmosphere [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(12): 1125-1135.
- [132]Wang J H, Zhang L Y, Dai A G. Global Estimates of Water-Vapor-Weighted Mean Temperature of the Atmosphere for GPS Applications [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D21): e2005jd006215.
- [133]Qu Jianguang, Liu Jiyu, Han Zhongyuan. Research on the Calculating Directly Water Vapor Value Using Zenith Tropospheric Delay Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(7): 625-628. (曲建光, 刘基余, 韩中元. 利用天顶对流层延迟数据直接推算水汽含量的研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(7): 625-628.)
- [134]Wang Yong, Liu Yanping, Liu Lintao, et al. The Study of Directly Calculating Precipitable Water Vapor with Zenith Tropospheric Delay of GPS Network [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2007, 23(5): 510-514. (王勇, 刘严萍, 柳林涛, 等. 区域 GPS 网对流层延迟直接推算可降水量研究[J]. 热带气象学报, 2007, 23(5): 510-514.)
- [135]Wang Yong, Liu Yanping, Liu Lintao, et al. The Study of Calculating Precipitable Water Vapor Using GPS Zenith Tropospheric Delay Without Meteorological Data [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2007, 32(3): 122-124. (王勇, 刘严萍, 柳林涛, 等. 无气象要素的 GPS 对流层延迟推算降水量的研究[J]. 测绘科学, 2007, 32(3): 122-124.)
- [136]Wang Yong, Liu Lintao, Hao Xiaoguang, et al. The Application Study of the GPS Meteorology Network in Wuhan Region [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36(2): 141-145. (王勇, 柳林涛, 郝晓光, 等. 武汉地区 GPS 气象网应用研究[J]. 测绘学报, 2007, 36(2): 141-145.)
- [137]Yi Zhenghui, Wang Shuaimin, Wang Yong, et al. Research on Seasonal Transition Model of GNSS Zenith Tropospheric Delay Calculating Precipitable Water Vapor [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2017, 37(8): 830-834. (易正晖, 王帅民, 王勇, 等. GNSS 对流层延迟推算降水量的季节转换模型研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(8): 830-834.)
- [138]Hagemann S, Bengtsson L, Gendt G. On the Determination of Atmospheric Water Vapor from GPS Measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D21): e2002jd003235.
- [139]Wang Y, Yang K, Pan Z Y, et al. Evaluation of Precipitable Water Vapor from Four Satellite Products and Four Reanalysis Datasets Against GPS Measurements on the Southern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(15): 5699-5713.
- [140]Zhang W X, Lou Y D, Huang J F, et al. Multiscale Variations of Precipitable Water over China Based on 1999 - 2015 Ground-Based GPS Observations

- and Evaluations of Reanalysis Products[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(3): 945-962.
- [141]Zhang Y L, Cai C S, Chen B Y, et al. Consistency Evaluation of Precipitable Water Vapor Derived from ERA5, ERA-Interim, GNSS, and Radiosondes over China [J]. *Radio Science*, 2019, 54(7): 561-571.
- [142]Xiong Z H, Sang J Z, Sun X G, et al. Comparisons of Performance Using Data Assimilation and Data Fusion Approaches in Acquiring Precipitable Water Vapor: A Case Study of a Western United States of America Area[J]. *Water*, 2020, 12(10): 2943.
- [143]Zhang B, Yao Y B, Xin L Y, et al. Precipitable Water Vapor Fusion: An Approach Based on Spherical Cap Harmonic Analysis and Helmert Variance Component Estimation [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(12): 2605-2620.
- [144]Zhao Q Z, Du Z, Yao W Q, et al. Hybrid Precipitable Water Vapor Fusion Model in China[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2020, 208: 105387.
- [145]van Dam T M, Herring T A. Detection of Atmospheric Pressure Loading Using Very Long Baseline Interferometry Measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, 99 (B3) : 4505-4517.
- [146]van Dam T M, Wahr J, Chao Y, et al. Predictions of Crustal Deformation and of Geoid and Sea-Level Variability Caused by Oceanic and Atmospheric Loading [J]. *Geophysical Journal International*, 1997, 129(3): 507-517.
- [147]Gong Guodong, Hua Xianghong, He Xiaoxing, et al. Analysis of Regional Characteristics of Environment Load Effect in GPS Coordinate Time Series [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2017, 37(9): 961-967. (龚国栋, 花向红, 贺小星, 等. GPS坐标时间序列中地表环境负载效应区域特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(9): 961-967.)
- [148]Dam T V, Collilieux X, Wuite J, et al. Nontidal Ocean Loading: Amplitudes and Potential Effects in GPS Height Time Series[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(11): 1043-1057.
- [149]Liu Jingnan, Zhang Huayi, Liu Yanxiong, et al. Progress of Ocean Tide Loading Inversion Based on GNSS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1): 9-14. (刘经南, 张化疑, 刘焱雄, 等. GNSS研究海潮负荷效应进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(1): 9-14.)
- [150]Dach R, Böhm J, Lutz S, et al. Evaluation of the Impact of Atmospheric Pressure Loading Modeling on GNSS Data Analysis [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(2): 75-91.
- [151]Tregoning P, van Dam T M. Atmospheric Pressure Loading Corrections Applied to GPS Data at the Observation Level [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(22): L22310.
- [152]Tregoning P, van Dam T M. Effects of Atmospheric Pressure Loading and Seven-Parameter Transformations on Estimates of Geocenter Motion and Station Heights from Space Geodetic Observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110(B3): B03408.
- [153]Liu L, Khan S A, van Dam T M, et al. Annual Variations in GPS-Measured Vertical Displacements near Upernavik Isström (Greenland) and Contributions from Surface Mass Loading [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122 (1) : 677-691.
- [154]Williams S D P, Penna N T. Non-tidal Ocean Loading Effects on Geodetic GPS Heights [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(9): L09314.
- [155]Martens H R, Argus D F, Norberg C, et al. Atmospheric Pressure Loading in GPS Positions: Dependency on GPS Processing Methods and Effect on Assessment of Seasonal Deformation in the Contiguous USA and Alaska [J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94 (12): 115.
- [156]Lu Guihua, He Hai. View of Global Hydrological Cycle [J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17 (3): 419-424. (陆桂华, 何海. 全球水循环研究进展[J]. 水科学进展, 2006, 17(3): 419-424.)
- [157]Bettinelli P, Avouac J P, Flouzat M, et al. Seasonal Variations of Seismicity and Geodetic Strain in the Himalaya Induced by Surface Hydrology [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 266 (3/4) : 332-344.
- [158]Argus D F, Fu Y N, Landerer F W. Seasonal Variation in Total Water Storage in California Inferred from GPS Observations of Vertical Land Motion [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(6): 1971-1980.
- [159]Borsa A A, Agnew D C, Cayan D R. Ongoing Drought-Induced Uplift in the Western United States [J]. *Science*, 2014, 345(6204): 1587-1590.
- [160]Argus D F, Landerer F W, Wiese D N, et al. Sustained Water Loss in California's Mountain Ranges During Severe Drought from 2012 to 2015 Inferred from GPS [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(12): 10559-10585.

- [161] Jiang W P, Yuan P, Chen H, et al. Annual Variations of Monsoon and Drought Detected by GPS: A Case Study in Yunnan, China [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 5874.
- [162] Zhan W, Li F, Hao W F, et al. Regional Characteristics and Influencing Factors of Seasonal Vertical Crustal Motions in Yunnan, China [J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 210(3): 1295-1304.
- [163] Sheng Chuanzhen, Gan Weijun, Liang Shiming, et al. Identification and Elimination of Non-tectonic Crustal Deformation Caused by Land Water from GPS Time Series in the Western Yunnan Province Based on GRACE Observations [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(1): 42-52. (盛传贞, 甘卫军, 梁诗明, 等. 滇西地区 GPS 时间序列中陆地水载荷形变干扰的 GRACE 分辨与剔除 [J]. 地球物理学报, 2014, 57(1): 42-52.)
- [164] Ding Yihang, Huang Dingfa, Shi Yueling, et al. Determination of Vertical Surface Displacements in Sichuan Using GPS and GRACE Measurements [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(12): 4777-4788. (丁一航, 黄丁发, 师悦龄, 等. 利用 GPS 和 GRACE 分析四川地表垂向位移变化 [J]. 地球物理学报, 2018, 61(12): 4777-4788.)
- [165] Hu Shunqiang, Wang Tan, Guan Yahui, et al. Analyzing the Seasonal Fluctuation and Vertical Deformation in Yunnan Province Based on GPS Measurement and Hydrological Loading Model [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(8): 2613-2630. (胡顺强, 王坦, 管雅慧, 等. 利用 GPS 和水文负载模型研究云南地区垂向季节性波动变化和构造变形 [J]. 地球物理学报, 2021, 64(8): 2613-2630.)
- [166] Borsa A A, Mencin D, van Dam T M. The Weight of a Storm: What Observations of Earth Surface Deformation Can Tell Us About Hurricane Harvey [J]. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2017, 23: 2872.
- [167] Wang Hansheng, Wu Patrick, Xu Houze. A Review of Research in Glacial Isostatic Adjustment [J]. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(6): 1958-1967. (汪汉胜, Wu Patrick, 许厚泽. 冰川均衡调整 (GIA) 的研究 [J]. 地球物理学进展, 2009, 24(6): 1958-1967.)
- [168] Jiang Y, Dixon T H, Wdowski S. Accelerating Uplift in the North Atlantic Region as an Indicator of Ice Loss [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3: 404-407.
- [169] Khan S A, Sasgen I, Bevis M, et al. Geodetic Measurements Reveal Similarities Between Post - Last Glacial Maximum and Present-Day Mass Loss from the Greenland Ice Sheet [J]. *Science Advances*, 2016, 2(9): e1600931.
- [170] Bevis M, Wahr J, Khan S A, et al. Bedrock Displacements in Greenland Manifest Ice Mass Variations, Climate Cycles and Climate Change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(30): 11944-11948.
- [171] Larsen C F, Motyka R J, Freymueller J T, et al. Rapid Viscoelastic Uplift in Southeast Alaska Caused by Post-Little Ice Age Glacial Retreat [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237(3/4): 548-560.
- [172] Elliott J L, Larsen C F, Freymueller J T, et al. Tectonic Block Motion and Glacial Isostatic Adjustment in Southeast Alaska and Adjacent Canada Constrained by GPS Measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, 115(B9): B09407.
- [173] Hu Y, Freymueller J T. Geodetic Observations of Time-Variable Glacial Isostatic Adjustment in Southeast Alaska and Its Implications for Earth Rheology [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(9): 9870-9889.
- [174] Zwally H J, Abdalati W, Herring T, et al. Surface Melt-Induced Acceleration of Greenland Ice-Sheet Flow [J]. *Science*, 2002, 297(5579): 218-222.
- [175] Das S B, Joughin I, Behn M D, et al. Fracture Propagation to the Base of the Greenland Ice Sheet During Supraglacial Lake Drainage [J]. *Science*, 2008, 320(5877): 778-781.
- [176] Pratt M J, Winberry J P, Wiens D A, et al. Seismic and Geodetic Evidence for Grounding-Line Control of Whillans Ice Stream Stick-Slip Events [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2014, 119(2): 333-348.
- [177] Ai Songtao, Wang Zemin, E Dongchen, et al. Surface Movement Research of Arctic Glaciers Using GPS Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(11): 1337-1340. (艾松涛, 王泽民, 鄂栋臣, 等. 利用 GPS 的北极冰川运动监测与分析 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(11): 1337-1340.)
- [178] Bartholomaeus T C, Anderson R S, Anderson S P. Response of Glacier Basal Motion to Transient Water Storage [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1: 33-37.
- [179] Roeoesli C, Helmstetter A, Walter F, et al. Meltwater Influences on Deep Stick-Slip Icequakes near the Base of the Greenland Ice Sheet [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2016, 121(2): 223-240.
- [180] Liu Z, Dong D N, Lundgren P. Constraints on

- Time-Dependent Volcanic Source Models at Long Valley Caldera from 1996 to 2009 Using InSAR and Geodetic Measurements[J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 187(3): 1283-1300.
- [181] Mattia M, Rossi M, Guglielmino F, et al. The Shallow Plumbing System of Stromboli Island as Imaged from 1 Hz Instantaneous GPS Positions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(24): L24610.
- [182] Sigmundsson F, Hreinsdóttir S, Hooper A, et al. Intrusion Triggering of the 2010 Eyjafjallajökull Explosive Eruption[J]. *Nature*, 2010, 468(7322): 426-430.
- [183] Gu Guohua, Wang Wuxing. Crustal Motions Observed from GPS Observations for the M 6.9 Earthquake in Hawaii and the Eruption of the Kilauea Volcano in 2018[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(8): 1191-1197. (顾国华, 王武星. GPS测得的2018年夏威夷6.9级地震与火山喷发地壳运动[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(8): 1191-1197.)
- [184] Zhang Hengrong, Liu Guoming, Wu Chengzhi, et al. Preliminary Study on the Active State of Changbaishan Tianchi Volcano[J]. *Seismology and Geology*, 2003, 25(S1): 109-120. (张恒荣, 刘国明, 武成智, 等. 长白山天池火山监测与火山活动状态的初步分析[J]. 地震地质, 2003, 25(S1): 109-120.)
- [185] Chen Guohu, Shan Xinjian, Moon W M, et al. A Modeling of the Magma Chamber Beneath the Changbai Mountains Volcanic Area Constrained by InSAR and GPS Derived Deformation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(4): 1085-1092. (陈国浒, 单新建, Wooil M. Moon, 等. 基于InSAR、GPS形变场的长白山地区火山岩浆囊参数模拟研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1085-1092.)
- [186] Wang Fan, Shen Zhengkang, Wang Yanzhao, et al. Influence of March 11th, 2011 Miyagi Mw 9.0 Earthquake on Volcanic Activities in Its Surrounding Areas[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(14): 1080-1083. (王凡, 沈正康, 王阎昭, 等. 2011年3月11日本宫城Mw 9.0级地震对其周边地区火山活动的影响[J]. 科学通报, 2011, 56(14): 1080-1083.)
- [187] Biggs J, Pritchard M E. Global Volcano Monitoring: What Does It Mean when Volcanoes Deform? [J]. *Elements*, 2017, 13(1): 17-22.
- [188] Dzurisin D, Lisowski M, Wicks C W. Continuing Inflation at Three Sisters Volcanic Center, Central Oregon Cascade Range, USA, from GPS, Leveling, and InSAR Observations[J]. *Bulletin of Volcanology*, 2009, 71(10): 1091-1110.
- [189] Parks M M, Biggs J, England P, et al. Evolution of Santorini Volcano Dominated by Episodic and Rapid Fluxes of Melt from Depth[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5: 749-754.
- [190] Annen C, Blundy J D, Sparks R S J. The Genesis of Intermediate and Silicic Magmas in Deep Crustal Hot Zones[J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(3): 505-539.
- [191] Wiebe R A, Collins W J. Depositional Features and Stratigraphic Sections in Granitic Plutons: Implications for the Emplacement and Crystallization of Granitic Magma [J]. *Journal of Structural Geology*, 1998, 20(9/10): 1273-1289.
- [192] Head M, Hickey J, Gottsmann J, et al. The Influence of Viscoelastic Crustal Rheologies on Volcanic Ground Deformation: Insights from Models of Pressure and Volume Change [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(8): 8127-8146.
- [193] Townsend M. Linking Surface Deformation to Thermal and Mechanical Magma Chamber Processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 577: 117272.
- [194] Huang Runqiu. Large-Scale Landslides and Their Sliding Mechanisms in China Since the 20th Century [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 433-454. (黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.)
- [195] Zhang Duo, Wu Zhonghai, Li Jiacun, et al. An Overview on Earthquake-Induced Landslide Research[J]. *Journal of Geomechanics*, 2013, 19(3): 225-241. (张铎, 吴中海, 李家存, 等. 国内外地震滑坡研究综述[J]. 地质力学学报, 2013, 19(3): 225-241.)
- [196] Yin Y P, Wang F W, Sun P. Landslide Hazards Triggered by the 2008 Wenchuan Earthquake, Sichuan, China[J]. *Landslides*, 2009, 6(2): 139-152.
- [197] Xu C, Xu X W, Yao X, et al. Three (Nearly) Complete Inventories of Landslides Triggered by the May 12, 2008 Wenchuan Mw 7.9 Earthquake of China and Their Spatial Distribution Statistical Analysis[J]. *Landslides*, 2014, 11(3): 441-461.
- [198] Delbridge B G, Bürgmann R, Fielding E, et al. Three-Dimensional Surface Deformation Derived from Airborne Interferometric UAVSAR: Application to the Slumgullion Landslide [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(5): 3951-3977.
- [199] Malet J P, Maquaire O, Calais E. The Use of Global Positioning System Techniques for the Continuous Monitoring of Landslides: Application to the

- Super-Sauze Earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France)[J]. *Geomorphology*, 2002, 43(1/2): 33-54.
- [200] Hsu Y J, Chen R F, Lin C W, et al. Seasonal, Long-Term, and Short-Term Deformation in the Central Range of Taiwan Induced by Landslides[J]. *Geology*, 2014, 42(11): 991-994.
- [201] Wang G Q. GPS Landslide Monitoring: Single Base Vs. Network Solutions—A Case Study Based on the Puerto Rico and Virgin Islands Permanent GPS Network [J]. *Journal of Geodetic Science*, 2011, 1(3): 191-203.
- [202] Wu J H, Lin H M. Analyzing the Shear Strength Parameters of the Chiu-fen-erh-shan Landslide: Integrating Strong-Motion and GPS Data to Determine the Best-Fit Accelerogram [J]. *GPS Solutions*, 2009, 13(2): 153-163.
- [203] Axelrad P, Comp C J, Macdorran P F. SNR-Based Multipath Error Correction for GPS Differential Phase [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(2): 650-660.
- [204] Jin Shuanggen, Zhang Qinyun, Qian Xiaodong. New Progress and Application Prospects of Global Navigation Satellite System Reflectometry (GNSS+R) [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1389-1398. (金双根, 张勤耘, 钱晓东. 全球导航卫星系统反射测量(GNSS+R)最新进展与应用前景[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1389-1398.)
- [205] Larson K M. GPS Interferometric Reflectometry: Applications to Surface Soil Moisture, Snow Depth, and Vegetation Water Content in the Western United States[J]. *WIREs Water*, 2016, 3(6): 775-787.
- [206] Jacobson M D. Dielectric-Covered Ground Reflectors in GPS Multipath Reception—Theory and Measurement[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3): 396-399.
- [207] Larson K M, Gutmann E D, Zavorotny V U, et al. Can We Measure Snow Depth with GPS Receivers? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(17): L17502.
- [208] Nievinski F G, Larson K M. Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Depth Estimation: Part I: Formulation and Simulations [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 6555-6563.
- [209] Nievinski F G, Larson K M. Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Depth Estimation: Part II: Application and Validation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 6564-6573.
- [210] McCreight J L, Small E E, Larson K M. Snow Depth, Density, and SWE Estimates Derived from GPS Reflection Data: Validation in the Western U. S [J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(8): 6892-6909.
- [211] Wang Jiatong, Hu Yufeng, Li Zhenhong, et al. Rapid Estimation of Snow Water Equivalent Using GPS-IR Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(11): 1666-1676. (王佳彤, 胡羽丰, 李振洪, 等. 利用 GPS-IR 技术快速估计雪水当量[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(11): 1666-1676.)
- [212] Zhang Z Y, Guo F, Zhang X H. Triple-Frequency Multi-GNSS Reflectometry Snow Depth Retrieval by Using Clustering and Normalization Algorithm to Compensate Terrain Variation [J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(2): 52.
- [213] Wang J W, Yuan Q Q, Shen H F, et al. Estimating Snow Depth by Combining Satellite Data and Ground-Based Observations over Alaska: A Deep Learning Approach [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124828.
- [214] Larson K M, Small E E, Gutmann E, et al. Using GPS Multipath to Measure Soil Moisture Fluctuations: Initial Results [J]. *GPS Solutions*, 2008, 12(3): 173-177.
- [215] Larson K M, Small E E, Gutmann E D, et al. Use of GPS Receivers as a Soil Moisture Network for Water Cycle Studies [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(24): L24405.
- [216] Chew C C, Small E E, Larson K M, et al. Effects of Near-Surface Soil Moisture on GPS SNR Data: Development of a Retrieval Algorithm for Soil Moisture [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 537-543.
- [217] Small E E, Larson K M, Chew C C, et al. Validation of GPS-IR Soil Moisture Retrievals: Comparison of Different Algorithms to Remove Vegetation Effects [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(10): 4759-4770.
- [218] Edokossi K, Calabria A, Jin S G, et al. GNSS-Reflectometry and Remote Sensing of Soil Moisture: A Review of Measurement Techniques, Methods, and Applications [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 614.
- [219] Small E E, Larson K M, Braun J J. Sensing Vegetation Growth with Reflected GPS Signals [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(12): L12401.
- [220] Wan W, Larson K M, Small E E, et al. Using Geodetic GPS Receivers to Measure Vegetation Water

- Content[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(2): 237–248.
- [221] Larson K M, Small E E. Normalized Microwave Reflection Index: A Vegetation Measurement Derived from GPS Networks[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(5): 1501–1511.
- [222] Small E E, Larson K M, Smith W K. Normalized Microwave Reflection Index: Validation of Vegetation Water Content Estimates from Montana Grasslands[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(5): 1512–1521.
- [223] Evans S G, Small E E, Larson K M. Comparison of Vegetation Phenology in the Western USA Determined from Reflected GPS Microwave Signals and NDVI[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(9): 2996–3017.
- [224] Zhang S C, Wang T, Wang L X, et al. Evaluation of GNSS-IR for Retrieving Soil Moisture and Vegetation Growth Characteristics in Wheat Farmland [J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2021, 147(3): 04021009.
- [225] Wöppelmann G, Marcos M. Vertical Land Motion as a Key to Understanding Sea Level Change and Variability [J]. *Reviews of Geophysics*, 2016, 54(1): 64–92.
- [226] Larson K M, Löfgren J S, Haas R. Coastal Sea Level Measurements Using a Single Geodetic GPS Receiver[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(8): 1301–1310.
- [227] Larson K M, Ray R D, Nievinski F G, et al. The Accidental Tide Gauge: A GPS Reflection Case Study from Kachemak Bay, Alaska[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(5): 1200–1204.
- [228] Larson K M, Ray R D, Williams S D P. A 10-Year Comparison of Water Levels Measured with a Geodetic GPS Receiver Versus a Conventional Tide Gauge [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, 34(2): 295–307.
- [229] Löfgren J S, Haas R. Sea Level Measurements Using Multi-frequency GPS and GLONASS Observations [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2014, 2014(1): 50.
- [230] Wang X L, Zhang Q, Zhang S C. Water Levels Measured with SNR Using Wavelet Decomposition and Lomb-Scargle Periodogram [J]. *GPS Solutions*, 2017, 22(1): 22.
- [231] Wang X L, Zhang Q, Zhang S C. Sea Level Estimation from SNR Data of Geodetic Receivers Using Wavelet Analysis [J]. *GPS Solutions*, 2018, 23(1): 6.
- [232] Peng D J, Feng L J, Larson K M, et al. Measuring Coastal Absolute Sea-Level Changes Using GNSS Interferometric Reflectometry [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(21): 4319.
- [233] Peng D J, Hill E M, Li L L, et al. Application of GNSS Interferometric Reflectometry for Detecting Storm Surges[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(2): 47.
- [234] Larson K M, Lay T, Yamazaki Y, et al. Dynamic Sea Level Variation from GNSS: 2020 Shumagin Earthquake Tsunami Resonance and Hurricane Laura [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(4): e2020GL091378.
- [235] Wang X L, He X F, Shi J, et al. Estimating Sea Level, Wind Direction, Significant Wave Height, and Wave Peak Period Using a Geodetic GNSS Receiver [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 279: 113135.
- [236] Rogers G, Dragert H. Episodic Tremor and Slip on the Cascadia Subduction Zone: The Chatter of Silent Slip [J]. *Science*, 2003, 300(5627): 1942–1943.
- [237] Shan Xinjian, Yin Hao, Liu Xiaodong, et al. High-Rate Real-Time GNSS Seismology and Early Warning of Earthquakes [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(8): 3043–3052. (单新建, 尹昊, 刘晓东, 等. 高频GNSS实时地震学与地震预警研究现状[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(8): 3043–3052.)
- [238] Fu Y N, Freymueller J T. Seasonal and Long-Term Vertical Deformation in the Nepal Himalaya Constrained by GPS and GRACE Measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B3): B03407.
- [239] Hao M, Wang Q L, Shen Z K, et al. Present Day Crustal Vertical Movement Inferred from Precise Leveling Data in Eastern Margin of Tibetan Plateau [J]. *Tectonophysics*, 2014, 632: 281–292.
- [240] Riddell A R, King M A, Watson C S. Present-Day Vertical Land Motion of Australia from GPS Observations and Geophysical Models [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(2): e2019JB018034.