

引文格式:许才军,熊维,刘传金.利用大地测量观测资料研究青藏高原三维地壳形变及地震危险性评估进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(7):997-1009.DOI:10.13203/j.whugis20230126



Citation: XU Caijun, XIONG Wei, LIU Chuanjin. Progress in Studying of 3D Crustal Deformation and Seismic Risk Assessment of the Tibetan Plateau Using Geodetic Observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(7):997-1009. DOI:10.13203/j.whugis20230126

利用大地测量观测资料研究青藏高原三维地壳形变及地震危险性评估进展

许才军¹ 熊维¹ 刘传金¹

¹ 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘要:青藏高原是一个理想而独特的地球科学天然实验场,青藏高原的地壳形变、物质逃逸模式及地震活动性等科学问题一直是地质学界关注的重点。以全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)和合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)为代表的空间大地测量技术因其时空分辨率高、覆盖范围广、观测精度高特点,被应用于现今的地壳形变监测并在地震研究中起着十分重要的作用。首先,综述了青藏高原三维地壳形变研究进展情况,包括青藏高原地壳水平形变的GNSS研究、综合利用GNSS和水准观测资料的青藏高原地壳垂直形变研究、青藏高原InSAR区域形变研究和融合多源大地测量资料构建青藏高原三维形变场等。其次,结合青藏高原三维地壳形变资料介绍了青藏高原活动断裂地震危险性评估的研究进展,讨论了顾及地震应力扰动的概率性地震危险性评估过程以及大地测量观测在地震危险性评估中所起的作用。今后需要加强青藏高原GNSS监测空区的加密观测工作,综合GNSS和InSAR观测结果精化青藏高原的地壳运动与变形模式;开展断裂带“近全地震周期”的大地测量观测研究,分析断裂带“近全地震周期”的形变特征及断层在地震周期内的形变演化过程;利用地震学、地质学、大地测量学等多源海量数据开展基于机器学习的活动断层地震危险性评估。

关键词:青藏高原;三维地壳形变;GNSS/InSAR;近全地震周期;地震危险性评估

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2023-04-11

DOI:10.13203/j.whugis20230126

文章编号:1671-8860(2023)07-0997-13

Progress in Studying of 3D Crustal Deformation and Seismic Risk Assessment of the Tibetan Plateau Using Geodetic Observations

XU Caijun¹ XIONG Wei¹ LIU Chuanjin¹

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: The Tibetan Plateau is an ideal and unique natural experimental field for geoscience research. Scientific issues related to crustal deformation, material escape pattern, and seismic activity of the Tibetan Plateau attract long-term attention from the geologists. Spatial geodetic techniques represented by global navigation satellite system (GNSS) and interferometric synthetic aperture radar (InSAR), with their high spatiotemporal resolution, widely coverage, and high observation accuracy, have been applied to current crustal deformation measurements and play an essential role in seismological research. First, we review the research progress on three-dimensional crustal deformation in the Tibetan Plateau, including researches related to horizontal crustal deformation using GNSS, vertical crustal deformation study using a combination of GNSS and leveling, regional deformation measurements using InSAR, and the construction of a three-dimensional deformation field using multiple geodetic data. Second, in conjunction with three-dimensional crustal deformation, we review the research progress on seismic risk assessment of active faults in the Tibetan Plateau, and discuss the probabilistic seismic risk assessment that considers earthquake stress perturbation.

基金项目:国家自然科学基金(42074007,42130101)。

第一作者:许才军,博士,教授,主要从事卫星大地测量学、地震大地测量学等方面的教学科研工作。cjxu@sgg.whu.edu.cn

bations. The role of geodetic measurements in seismic risk assessment is also discussed. In the future, more attention should be paid to the following three aspects. First, dense GNSS network should be established in observation gaps to refine the crustal motion and deformation pattern of the Tibetan Plateau. Second, geodetic observations during “quasi-complete seismic cycle” should be conducted to analyze the deformation characteristics and evolution process of fault zones. Third, seismic risk assessment based on machine learning should be developed using multisource data from seismology, geology, and geodetic observations.

Key words: Tibetan Plateau; 3D crustal deformation; GNSS/InSAR; quasi-complete seismic cycle; seismic risk assessment

自始新世(约55 Ma前)以来,印度板块对欧亚板块的持续推挤和俯冲楔入作用导致青藏地区隆升变形。在喜马拉雅地区,印度板块以40~50 mm/a的相对速率俯冲于欧亚板块之下^[1],在50~55 Ma中造就了横亘整条喜马拉雅山脉的巨大俯冲带和地球上最为高耸的高原——青藏高原。青藏高原的形成是地球演化历史上最为壮观的地质事件之一,它不仅以巨大的构造变形造就了平均海拔达4 500 m、区域面积超过250万 km²的“世界屋脊”,而且深刻地影响了整个亚洲乃至全球范围的气候环境、生态格局和自然灾害。印度板块的北向挤压是中国大陆构造变形的的主要驱动力,其不仅造成高原隆升、地壳缩短增厚,还引起高原深部物质向邻区的侧向挤出^[2]。在波澜壮阔的构造变形过程中,中国大陆主要构造格架和活动断裂体系得以形成。青藏高原及邻区现今构造运动依然活跃,地震活动频繁,是中国大陆地震发生最频繁、强度最大的地区,近百年间有300多个震级大于Mw 6.0的地震发生于此^[3]。最近10 a内又先后发生了2015年Mw 7.9廓尔喀强震和2021年Mw 7.4玛多强震,还有2013年四川芦山Mw 6.7地震、2017年九寨沟Mw 6.5地震、2021年漾濞Ms 6.4、2022年门源Mw 6.7、2022年四川泸定Ms 6.8地震等多个地震。青藏高原是一个理想而独特的天然实验场,青藏高原的地壳形变、物质逃逸模式及地震活动性等科学问题一直是地学界关注的重点^[4-12]。

以全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)、干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术为代表的空间大地测量技术的观测精度比常规大地测量提高了2~3个数量级,从根本上突破了常规大地测量受地形制约的局限性,使测定多种空间尺度、多种时间分辨率和宽频率域的现今三维地壳形变成为可能,已发展成为实现大地测量学科各类目标最基本、最适用的技术手段。在时间(0.01 s~100 a)域内基本填补了地震学和地震地

质学之间的科学认知空白域,促进了地球物理学、大地测量学、地质学三大学科的交融,有力地推动了地震大地测量学和地震危险性评估研究的进步。本文将空间大地测量观测为切入点,综述青藏高原地壳形变观测和三维形变场提取的研究现状,探讨大地测量观测在地震危险性评估工作中扮演的角色与取得的成效,并对进一步的研究内容与方法进行展望。

1 青藏高原三维地壳形变研究

地震孕育和发生的过程,本质是地壳长期的差异运动导致应变能积累和突然释放的过程。地壳形变监测是判定断层现今活动状态和认识地震孕育规律的重要途径,对中长期地震预测具有重要的理论和现实意义。在空间大地测量技术出现之前,人们主要利用活动断层地质痕迹及历史地震矩张量反演方法得到的断层滑动速率。然而,根据对地质痕迹和年代学的测定,给出的仅是地质学长时间尺度内的平均值,无法准确描述断层现今活动状态。大地测量是精确量测现今地壳变动最行之有效的方法^[13]。此外,传统大地测量技术(如三角测量、三边测距和水准测量)不仅受地形条件限制,观测精度也有限,难以满足对地震危险性评估的要求。自20世纪80年代以来,以GNSS和InSAR为代表的空间大地测量技术以其高精度、高密度、大范围 and 准实时的技术特点逐渐代替传统测量方法,成为地壳运动监测的主流技术。

1.1 青藏高原地壳水平形变研究

GPS是美国在20世纪80年代发展的GNSS技术,自1980年起,美国在南加州的圣·安德烈斯断层地区开始布设GPS监测网络。青藏高原是中国大陆地壳运动最强烈的地区之一,也是全球陆内地震活动最为频繁的地区之一。自1988年青藏高原东南缘的滇西地震预报试验场开始,中国就以构造变形研究为主要目的进行GPS监测

研究。

随着“九五”国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”的实施,中国在青藏高原地壳形变监测与研究方面取得了丰硕的成果,并在多次强震形变研究中发挥了重要作用。例如,文献[14]综合处理了中国大陆 1992—2001 年的 300 多个 GNSS 站点的地壳运动水平速度场,首次给出了青藏高原及其周边地区的整体地表形变图像。文献[15]根据 1991—1999 年的多个 GNSS 区域监测网和 1998—2000 年“网络工程”基本网的观测资料,联合处理获得了中国大陆水平应变场,结果表明青藏高原及其周边地区和新疆西部地区是中国大陆构造变形最强烈、应变速率值最高的地区。文献[16]利用“网络工程”1999—2004 年 GNSS 观测资料揭示了中国大陆不同构造单元或地块的变形方式或运动速度的分区差异,表明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缩短所吸收。文献[17]利用青藏高原周围约 726 个 GNSS 站点的测量数据,认为整个高原在刚性旋转部分吸收了至少 50% 来自印度板块的东北挤压,导致了高原北部的向东推挤,并推测可能是下地壳流导致。

在“十一五”国家重大科技基础设施工程“中

国大陆构造环境监测网络”建成之后,逐年增加的 GNSS 观测站部署使得青藏高原的地壳形变监测工作取得了显著进展,丰富的地壳水平速度场使青藏高原地壳形变研究不仅可以约束活动地块的整体运动,还能探测主要活动断层的现今构造运动特征(见图 1)。文献[18]获取了青藏高原及其周缘 1 854 个 GNSS 站点速度结果,根据块体模型对 GPS 速度场进行解释,结果显示阿尔金断裂带、鲜水河断裂带、昆仑断裂带、海原断裂带等主要走滑断裂大部分段的滑动速率相对均匀,在 5~12 mm/a 范围内,估计的滑动速率与以往的地质和大地测量结果吻合较好。文献[19]利用 1991—2015 年观测的 2 576 个 GNSS 资料构建中国大陆地壳水平速度场,发现沿青藏高原主要走滑断层的大地测量滑动速率与最近的地质学估计吻合。文献[11]根据过去 25 a 观测的 GPS 数据获取了中国大陆长期地壳速度场,发现青藏高原内部的变形场以连续运动为主,较大的形变梯度仅存在于垂直于印欧板块相对运动的方向,并与少数大型走滑断裂有关。在帕米尔-兴都库什地区,向西挤压的峰值约为 6 mm/a。嘉里断裂和甘孜-玉树断裂之间呈钟形向东挤压,最大挤压速率约为 20 mm/a,青藏高原地壳在印欧板块碰撞驱动下广泛扩张。

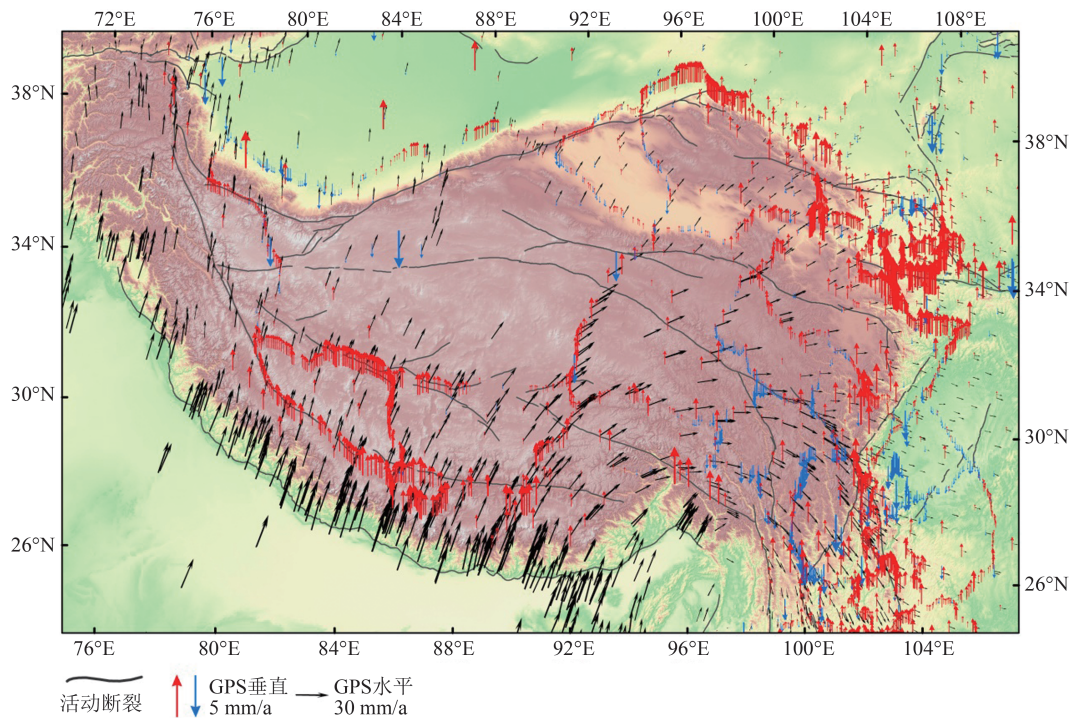


图 1 基于 GNSS 和精密水准观测获取的青藏高原三维地壳形变场^[11-12,20]

Fig. 1 Three-Dimensional Crustal Deformation Field of the Tibetan Plateau Derived from GPS and Leveling Data

1.2 青藏高原地壳垂直形变研究

长期以来,重复精密水准观测一直是地壳垂

直运动监测研究的主要技术方法。中国以地震监测为目的的水准观测工作开始于 1966 年邢台

地震之后。通过对多年、多期精密水准重复观测资料的分析,可以获取中国大陆及重点区域的地壳垂直形变动态变化图像,为强震中长期危险性预测提供依据。然而,精密水准观测存在一些缺陷,如作业效率低、劳动成本高、传递误差大等。随着GNSS垂直分量观测数据处理技术的发展以及观测资料时间跨度的积累,GNSS观测在毫米级地壳垂直运动监测中得到越来越多的应用^[20-23]。与传统的水准观测垂直位移相比,GNSS地壳垂直形变监测各点的精度比较均匀,没有水准垂直位移远程传递误差的影响,并且可以建立全球统一参考基准的垂直位移速度场。综合利用GPS、水准观测资料,联合计算一个区域的地壳垂直运动速度场,既可以解决GPS点位较稀疏的问题,也可以将水准观测垂直位移速度统一归算到全球统一参考基准之上。

近年来,国内外学者综合利用GNSS和水准观测资料,以全球参考框架为基准,研究了青藏高原地区的地壳垂直运动速度场。文献[22]利用青藏高原周边750个GNSS站点的10 a观测数据,获得了高分辨率的三维速度场,表明喜马拉雅山脉的上升速率约为2 mm/a,南麓的隆起速率约为6 mm/a,而中东部隆升速率为1~2 mm/a。其中,龙门山和贡嘎山的隆升速率高达2~3 mm/a,而高原中部、南部的下沉速率为0~-3 mm/a,下沉区域为一系列南北向拉分盆地。文献[23]通过处理青藏高原及其周缘189个连续站和933个流动GNSS站观测数据,获取了1999—2016年的三维地壳变形,结果显示喜马拉雅地区隆升的平均速率约为1.7 mm/a,而青藏高原东北部隆升的平均速率约为1.3 mm/a。文献[24]收集了1970—2012年精密水准观测资料,并以9个GNSS站点的垂直速率为先验约束,获取了青藏高原东缘的垂直地壳速度场。结果显示,大部分地区处于隆升阶段,贡嘎山和西秦岭的隆升速率分别为 5.8 ± 1.0 mm/a和 6.0 ± 1.3 mm/a,而龙门山断裂、大凉山断裂和龙日坝断裂的逆冲速率分别为 4.2 ± 0.5 mm/a、 3.7 ± 0.5 mm/a和 2.8 ± 0.3 mm/a。则木河和小江断裂北段的正断滑动速率分别为 2.3 ± 1.0 mm/a和 2.9 ± 0.4 mm/a。六盘山断裂北段区域为隆升,而六盘山断裂南段附近和川滇中部和南部地形为下沉。文献[25]利用50 a的三期一等水准网成果,分析了中国地壳垂直运动的变化趋势。结果显示,青藏高原南部表现出隆升运动的趋势,最大速率达到 5.4 ± 2.5

mm/a,并且垂直运动速率自南向北逐渐降低。文献[12]则收集了1970—2017年约11.6万km的水准数据和21个GNSS连续站观测数据,并通过联合处理获得了青藏高原及其周边地区的高精度垂直速度场。结果表明,高原南缘、东北缘和东南缘以垂直抬升为主,抬升速率分别为2.0~3.0、1.0~3.8和1.0~2.0 mm/a;甘孜断裂带南段则表现出明显的沉降,其垂直沉降速率为-3.3~0.5 mm/a。文献[20]运用2008—2019年113个连续站和969个流动站GNSS时间序列,构建了青藏高原及其周边地区高精度的高空间分辨率垂直速度场。结果表明,青藏高原南部隆升明显,高原东缘隆升速率为3~5 mm/a,喜马拉雅东构造结隆升速率为3~4 mm/a,秦岭造山带西侧隆升速率约为1 mm/a、东侧沉降速率约为2 mm/a。

1.3 青藏高原InSAR区域形变研究

从青藏高原这一大空间尺度来看,目前中国地震预测预报中可用的GNSS和精密水准观测虽已越来越密、数据也越来越多,但是如果把空间尺度缩小到某条具体的断裂带,则GNSS和精密水准观测的密度还远远不够,即通过现有密度的大地测量观测还较难对特定断裂的地震危险性预测提供紧密的近场约束^[26]。近30 a发展起来的InSAR技术可以通过大陆尺度规模的成像过程来提取活动构造区的应变积累信息^[27]。相对于GNSS和精密水准测量,InSAR能够获取大范围、高时空分辨率的形变信息,并且成本低、速度快、精度高。近几年,利用InSAR高精度震间形变场研究青藏高原断裂带的活动强度和应变积累速率已经逐渐成为研究的热点。

文献[28]基于1992—1999年的欧洲遥感卫星(European remote sensing satellite, ERS)-1和ERS-2影像,使用InSAR技术得到青藏高原西北部喀喇昆仑断裂和阿尔金断裂西段的滑动速率分别为 1 ± 3 mm/a和 5 ± 5 mm/a,InSAR技术得到的低滑动速率与GPS测量结果相符,并且比地质学估计的速率更低。文献[29]利用1992—1999年的ERS-1/2数据,计算获取青藏高原中部共轭断层系统的InSAR形变场,结果表明共轭走滑断层在N10°E方向为5 mm/a的纯剪切收缩运动,在N110°E方向为6 mm/a的右旋剪切运动。文献[30]利用1995—2006年的ERS和欧洲环境卫星(European environmental satellite, Envisat)数据计算得到阿尔金断裂带(94°E)的滑动速率

为 8~10 mm/a、闭锁深度为 7~9 km,结果与 GNSS 测量速率一致,并发现了断层两侧形变不对称的现象。文献[31]使用 1996—2008 年的 ERS-1/2 和 Envisat 数据,获取了鲜水河断裂带西北段的滑动速率为 9~12 mm/a,锁定深度为 3~6 km,这些结果与全新世断层滑动速率和历史地震相符。文献[32]利用 5 个轨道的 Envisat 数据(2003—2008 年)覆盖了 2001 年昆仑山口 8.1 级地震的形变范围,获取了该地震的震后形变时间序列,并讨论了震后形变的后滑移模型和粘弹性松弛模型。文献[33-34]利用 2003—2009 年的 Envisat 数据计算了海原断裂的断层滑动,并发现在老虎山断裂东段可能存在 25 km 长的蠕滑段,蠕滑速率为 2~3 mm/a。文献[35]利用累积 21 a 的 ERS、Envisat 和哨兵 1 号(Sentinel-1)卫星数据,获取了阿尔金断裂中段滑动速率在时空域的变化,发现了约 2 mm/a 的蠕滑速率。文献[36]利用 2014—2021 年间 Sentinel-1 合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)数据,获取海原断裂带全段的震间形变速率场,确定断裂带内各断裂的滑动速率、闭锁状态等运动学参数。文献[37]利用 2014—2021 年间 Sentinel-1 SAR 数据,获取了甘孜玉树-鲜水河断裂带全段的震间形变速率场,发现甘孜玉树断裂的滑动速率为 5~6 mm/a,仅为鲜水河断裂带滑动速率的一半。

1.4 融合多源大地测量资料构建青藏高原三维形变场

InSAR、GNSS 和精密水准测量技术虽然已被广泛应用于地壳形变监测,但三者所提供的观测具有截然不同的时空特性。InSAR 技术可以提供大范围、高空间分辨率的雷达视线向(line of sight, LOS)地表形变场,虽然通过升降轨或融合多个成像几何差异明显的 InSAR 监测结果(如像素偏移量跟踪(pixel offset-tracking, POT)和多孔径雷达(multi-aperture InSAR, MAI)的形变结果)理论上可以获取高精度地表真三维形变结果。但是,青藏高原震间形变的年速率只有毫米级的现今构造运动,无法采用 MAI 和 POT 技术进行监测。GNSS 技术是目前最为常用的地表三维形变监测手段,其水平精度甚至可以达到亚毫米级,但其垂向精度相对较低,且该技术只能提供空间上稀疏点的形变观测,不足以确定千米格网的应变积累成果。而精密水准测量受地形条件和观测成本的制约只能提供沿稀疏离散点的垂直形变信息。在此背景下,将三者融合获取具

有统一基准、高空间分辨率的三维形变场(见图 2)对于研究青藏高原地壳形变具有重要的意义。

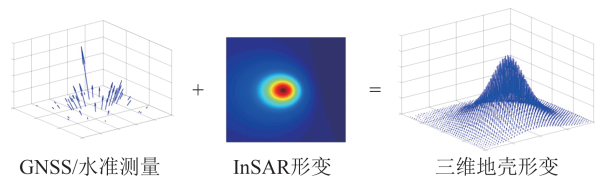


图 2 InSAR、GNSS 和精密水准测量融合获取三维形变
Fig. 2 Fusion of InSAR, GNSS, and Leveling Data to Obtain Three-Dimensional Deformation

众多学者在多源数据提取三维形变场方面开展了大量的探索工作。文献[38]利用 1992—2010 年的 ERS-1/2 和 Envisat 数据,并结合 GNSS 观测结果获取了青藏高原西北部高分辨率的地壳水平形变场,并证实了喀喇昆仑断裂的滑动速率很低(<6 mm/a),且应变率并不集中于主要断层附近。文献[39]利用 12 个轨道的 ERS、Envisat 影像和 208 个 GNSS 观测数据,获取了青藏高原中南部高分辨率速度和应变率场,结果表明高原中部分布广泛的共轭走滑断层滑动速率均较低。文献[40]利用 2014—2019 年的 Sentinel-1 数据和 GNSS 观测,获取了东昆仑断裂玛沁-玛曲段的三维地壳形变场,发现沿玛沁-玛曲段的滑动速率由西向东逐渐变小,从约 8 mm/a 变小到约 2 mm/a,并根据反演的断层闭锁分布图像发现了 4 个地震危险性较高的凹凸体。文献[41]利用升降轨 Sentinel-1 和 GNSS 观测数据获取了青藏高原中北部地壳三维变形,发现了 1997 年玛尼地震和 2001 年昆仑山口地震的震后形变,并反演了东昆仑断裂带的滑动速率与闭锁深度。

2 断裂带地震危险性评估研究

断裂带地震危险性评估是地震大地测量学研究的最终目标之一,是指利用反映活动断层长期活动习性的各种参数,结合深部构造环境、现今运动状态和近断层应力-应变环境等资料,确定未来一定时段内发生中强以上地震的段落(位置)、震级上限和发震概率的过程^[42]。在地震危险性研究的早期阶段,由于人们对地震成因机制的认识不够深入,因此对活动断裂地震的预测主要是描述性的和确定性的^[43],往往参考历史地震的破裂尺度和离逝时间来定性描述断裂带的地震危险性,其地震危险性评估结果不可避免地存在主观性。随着对地震孕育和发生的物理机制

及重复规律认识的不断深入,人们认识到地震往往呈一定规律地在某一断层段重复发生,在此背景下,基于地震复发规律的概率性地震危险性评估^[44]应运而生。经过数十年的发展与完善,地震危险性概率分析方法已成为目前进行活动断裂地震危险性评估的最主要的方法^[45]。利用概率分析方法进行地震危险性评估的主要内容包括:(1)活动断裂的地震危险区判定;(2)描述地震危险区内地震复发特征;(3)使用数学模型定量计算研究区地震发生概率。自20世纪末应力触发理论^[46]提出以来,人们进一步认识到断裂带地震危险性不仅与断层本身活动特征相关,还可能受邻区地震活动的影响,至此,顾及地震应力扰动的概率性地震危险性评估成为活动断裂中长期地震危险性预测的主要发展方向(见图3)。

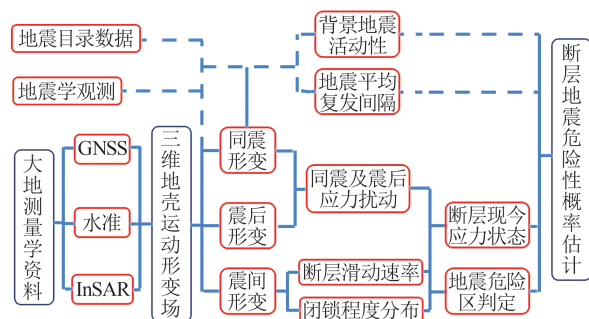


图3 顾及地震应力扰动的概率性地震危险性评估过程

Fig. 3 The Process of Probabilistic Seismic Risk Assessment that Considers Earthquake Stress Perturbations

自空间大地测量技术大规模应用以来,青藏高原地壳形变观测资料空前丰富,极大促进了青藏高原活动断裂地震危险性评估的研究进展。本文主要以大地测量学研究视角,从活动断层潜在危险区判定、历史地震应力扰动、潜在地震复发模式和发震概率数学模型几个方面来探讨断裂带地震危险性概率评估的技术与方法以及大地测量观测在此进程中的作用与贡献。

2.1 活动断层潜在危险区判定

破坏性高震级地震的发生区域往往存在共性特征:大部分的强震发生在活动块体主要边界带;地震发生前该断层段为地震破裂空段,处于高震间闭锁状态;震源区往往处于地震波高速异常区内或高、低速过渡带内;震前震源区附近中小地震稀少^[47]。上述共性特征为活动断层潜在危险区判定提供了重要依据。

在早期的活动断层潜在危险区判定工作中,由于地震学、大地测量学等观测手段的缺失,往往以地质学手段探测的地震破裂空区为主要参

考。近年来,随着大量地震观测台阵的广泛布设,断裂带中小地震的重定位工作^[48]和对中国大陆深部地壳速度结构的精细约束^[49-51]成为现实。研究人员得以综合地质学地震破裂空区、地震波高速异常、中小震活动空区等判定依据研判未来地震危险区位置。然而迄今为止中国大陆的地震观测台阵分布仍呈“东密西疏”的特征,大陆西部相对较低的台站密度直接导致了部分地区深部地壳结构探测结果的较低分辨率^[51]以及相对较低(约10 km)的地震定位精度^[52],从而制约了潜在地震危险区判定工作的可靠性。

在此背景下,以GPS和InSAR技术为代表的空间大地测量技术的广泛应用,为地震危险区判定研究的进一步发展提供了新的契机。空间大地测量技术能够直接获取高精度地表三维形变信息,从而约束活动断层面的震间闭锁状态。特别是2014年欧洲空间局Sentinel卫星升空以来,对中国大陆主要活动断层的全天候、全领域、近实时的形变观测成为可能。近年来,围绕青藏高原及周缘主要断裂带的大地测量震间形变和地震危险性研究持续丰富^[1,36,41,53-54],研究成果约束了包括鲜水河-小江断裂、海原断裂、昆仑断裂等多条主干断层的分段滑动速率与震间闭锁现状。大地测量观测获取的断层震间形变能够较好地勾勒出鲜水河-小江断裂上多个凹凸体的存在^[53],也能探测到海原断裂中段(老虎山断裂)处的浅部无震蠕滑^[54],甚至能描述汶川地震前后龙门山断裂的闭锁程度变化^[55-56],指示了汶川地震之后龙门山断层南段较高的地震危险性,后者也被2013年芦山地震的发生所证实。一系列关于断层震间变形的研究成果为断裂带未来地震危险区域判定工作提供了数据和模型参考。

2.2 地震复发模式和发震概率模型

建立潜在地震复发模式是适当选用概率模型对活动断裂进行地震危险性评价的基础^[43]。地震复发模式的基础是文献^[57]于1910年提出的弹性回跳理论,其认为中等以上地震的复发具有周期性。如果地震目录足够完备,地震事件的大小及时间和空间的统计特征就可以描述断裂带地震原地复发的规律性。在建立地震复发模式之后,则可用对应的概率数学模型描述地震复发规律,从而定量推估特定震级的地震在未来某一时段内发生的概率。

文献^[44]利用泊松概率模型首次系统阐述了地震危险性概率分析方法。该方法认为在一

条断裂带上的地震活动在时间和空间上服从泊松随机分布,并且大小地震的比例关系可由古登堡-里克特复发关系式描述,即地震震级越高,其发生次数呈指数下降。这种方法的特点是认为未来地震发生的概率与上次地震的离逝时间无关。而随着对地震周期研究的深入,人们认识到断层在地震发生之后,其应变能被全部或部分释放,因此需要进行一段时间的震间应力应变加载之后才能孕育下一次地震,因此某一断裂段下次地震发生的可能性将与其上次事件的离逝时间有关。基于时间相关的理论模型,国内外众多研究对地震危险性概率分析方法进行了发展与改进,以期更为合理地反映活动断层的活动特征和地震孕育的基本规律^[45]。目前常用的地震复发模式包括特征地震模式^[58]、时间可预报和滑动可预报模式^[59]、时间-震级可预报模式^[60]等。考虑到活动断层不同分段可能存在级联破裂的可能性,美国加州地震概率工作组^[61]提出了级联破裂模式,并应用于南加州地区的地震危险性评估。类似的研究也被应用于中国川滇地区的多条活动断层^[62-63]。与地震复发模式相对应的,常用的概率函数模型有与时间不相关的泊松分布模型^[44]和与时间相关的实时概率模型^[64]、强震原地准周期复发模型^[65]、顾及地震周期随机变化的布朗过程时间模型^[66]等。

总体而言,不同的地震复发模式和发震概率模型所需要推估的最重要参数即是特定震级地震的平均复发间隔。获取地震平均复发间隔的常用方法主要包括:(1)根据历史地震和古地震目录计算地震平均重复间隔;(2)利用特定震级地震的对应特征(如最大滑动量、地震应力降、地震矩释放量)和断层震间运动特征(如平均滑动速率、应力积累速率、地震矩积累率)估算地震平均复发间隔^[67-68]。在上述方法的实践过程中,地质学和传统地震学手段被广泛应用,例如地质学手段(如地震探槽、古地震地表破裂厘定)在完善历史地震目录,特别是古地震目录过程中具有不可替代的作用^[47];地震学技术则被广泛应用于约束现今地震活动的破裂特征,或使用重复地震法确定断层深部滑动速率^[69-70]。

大地测量技术在地震平均复发间隔判定过程中同样大有用武之地。迄今为止,大地测量技术已成功监测中国大陆及邻区超过 50 次的地震活动^[52],甚至可用于约束 $M_w < 5$ 的地震破裂模型^[71],在优化地震目录、剖析地震活动性、深化认

识活动构造等方面作出了重大贡献^[72]。特别是对于同震滑动复杂的大震强震(如汶川地震、玛多地震等),大地测量观测获取的高精度地表形变场能够可靠约束其滑动分布的细部特征^[73-74],从而在判定地震破裂区域、地震同震滑动量、应力降和地震矩释放量方面给出精确依据。而且,大地测量观测能够给出活动断层不同段落的现今滑动速率^[36,41]和闭锁程度分布^[53,75],从而精确厘定断层震间应力积累速率、地震矩积累率等运动特征。

2.3 历史地震应力扰动

传统的地震危险性概率评估模型是建立在地震数据统计和不同假设的基础上的,未能较好地考虑地震孕育发生的规律^[45]。随着对地震发生的物理和力学机制研究的深入,人们认识到断裂带地震危险性不仅与断层本身活动特征相关,还可能受邻区地震活动的影响,至此历史地震活动对周边断层产生的库仑应力变化逐渐成为断层地震危险性评估的重要因素,并可通过断层震间应力积累速率换算为对地震复发间隔的定量影响,从而在断层地震危险性概率分析模型中发生作用^[76-78](见图 4)。

地震发生之后,其释放的应力并不会凭空消失,而会通过地震同震和震后过程传播至周边区域,从而对邻区断层面应力水平产生影响,此即为地震应力触发理论^[79]。众多研究基于应力触发理论研究了地震间的相互作用^[80-83]、历史地震对周边断裂带的应力影响^[84-86]以及后续的断裂带危险性估计^[46,87]。

从作用时间角度而言,地震库仑应力变化包括同震应力变化和震后应力变化两部分,二者均与大地测量观测密不可分。地震同震滑动模型是库仑应力计算的基础,而丰富的大地测量观测是精确厘定地震同震模型的重要条件。而且,震后应力变化与地震震后形变直接相关。在传统地震学涉足较少的地震震后形变研究中,大地测量技术独当一面,不仅能通过震后余滑约束断层面摩擦属性,更能通过约束震后粘弹性松弛过程获得地震邻区岩石圈深部流变结构,而岩石圈深部流变结构正是震后库仑应力变化分析的最重要参数之一。经过数十年的持续观测和震例积累,基于大地测量观测的岩石圈流变学研究已能定量描绘青藏高原及邻区深部流变结构的初步特征:青藏高原存在粘滞系数相对较低的中下地壳,而高原周边的克拉通地块(如四川盆地、柴达

木盆地、印度板块)则具有强度较高的中下地壳,这与高原内部较高的缩短增厚速率及较强的地

震活动相对应,亦为青藏高原周缘历史地震震后应力变化的研究提供了先决条件。

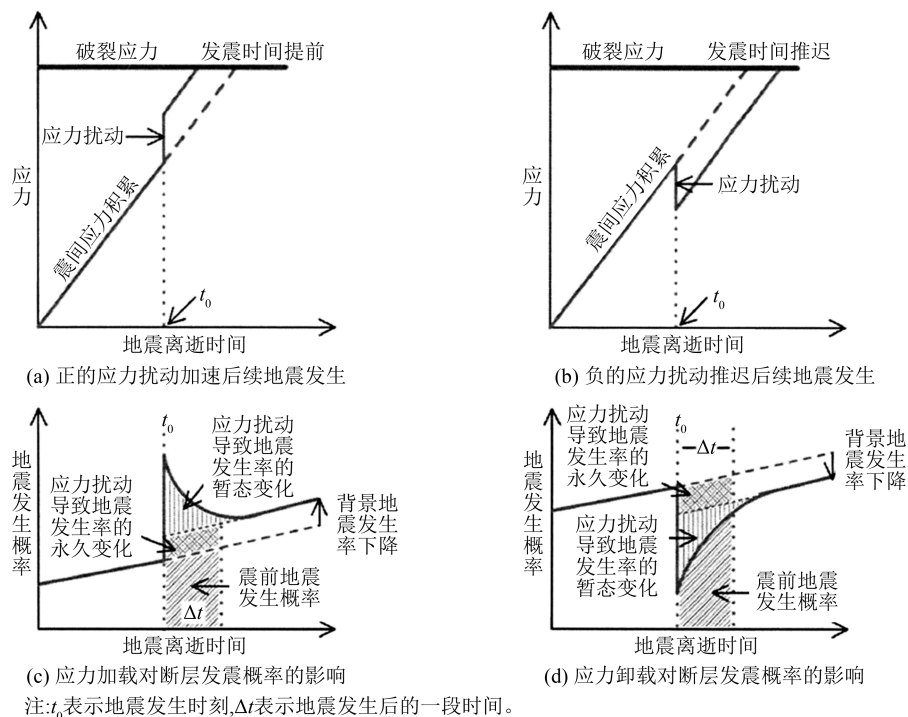


图4 历史地震产生的库仑应力变化可能影响后续地震的发生^[45]

Fig. 4 Coulomb Stress Change Caused by Historical Earthquakes Could Affect the Occurrence of Subsequent Earthquakes

3 展望

3.1 建立青藏高原地区现今高分辨率三维地壳形变场

若将各研究机构自行加密的点(未予公开)排除在外,目前位于中国大陆西部地区的GNSS观测点平均间距接近50 km。如此观测密度很难有效捕获断层震间形变和地震地壳形变信息,从而难以为后续地震危险性评估工作提供有效依据。为了弥补GNSS观测空间分辨率的不足,一方面需要进一步加强青藏高原GNSS监测空区内的加密观测工作,另一方面需要挖掘InSAR技术潜能。InSAR其视线向(line of sight, LOS)的形变观测,在大部分区域亚厘米-厘米级的观测精度和中国西部的崇山峻岭均对InSAR形变监测效果提出了挑战。可以基于多时相InSAR技术,利用覆盖青藏高原地区的33个轨道(17个升轨和16个降轨)Sentinel-1卫星SAR数据获取研究区的雷达LOS形变场;收集整理并加密观测青藏高原地区GNSS资料,融合升降轨InSAR和GNSS建立青藏高原地区高空间分辨率的三维地壳形变场,实现覆盖青藏高原的千米分辨率的三维形变;通过高空间分辨率的三维地壳

形变场计算青藏高原地区高分辨应变率场,使用三维球面弹性块体模型反演获取主要断层滑动速率,依据应变率和断层滑动率的空间分布检验块体运动模型与连续变形模型,探讨青藏高原的地壳形变模式及形变机制。

3.2 断裂带“近全地震周期”的大地测量观测

对于大地测量技术而言,完整观测断裂带全地震周期(包括同震、震后和长期震间过程)形变过程还遥不可及。目前研究认为活动断层的完整地震周期短则数十年(如智利西侧的板块逆冲带),长则数百至数千年(如龙门山断裂)。上述时间尺度对大规模应用至今仅20余年的空间大地测量观测而言鞭长莫及。但如果将长期震间过程简化为稳定不变或线性变化(忽略因闭锁深度逐渐增加导致的近场弹性形变的非线性变化),仅细致考虑同震形变和震后演化过程,此种“近全地震周期”的形变观测对大地测量技术来说并非无能为力。

以孕育了2021年玛多地震的昆仑山口-江错断裂为例,其西侧在2001年可可西里地震中发生破裂,其同震形变和近20 a的震后变形均由SAR卫星影像和附近的GNSS观测点所记录。玛多地震的同震及早期震后形变结果则更为丰富,

不仅有 12 d 重访周期的 Sentinel-1 卫星影像数据可供使用,还可获取远近场结合的 GNSS 连续站和流动站监测资料。目前,对于该断层的监测空区位于两次地震破裂之间约 200 km 长的断层中段。若能坚持对 2001 年可可西里地震和 2021 年玛多地震的震后形变监测直至其衰减至震间形变水平(此时断层面闭锁强度较低,处于震间形变早期),并同时开展针对昆仑山口-江错断层中段的 GNSS 加密观测获取其震间变形特征(此时断层面闭锁强度较高,处于震间形变后期),将能获得断裂带“近全地震周期”的形变特征,此时人们对断层在地震周期内的形变演化的认识定能更上一层楼。

3.3 基于机器学习的活动断层地震危险性评估

近年来,以深度神经网络算法为代表的机器学习技术已广泛应用于多源、复杂、海量的数据分析研究并取得显著成效^[88],此类技术尤其适用于挖掘隐藏在大量数据中的有效信息。活动断层地震危险性评估研究涉及多种学科(如地震学、地质学、大地测量学等)的大量数据资料,且各类数据与特定地震发生的具体物理联系尚未完全明确。在此背景下,机器学习技术应较为适合用于地震危险性评估问题的研究。目前已有根据深度学习技术,利用地震目录、地震活动统计特征对地震危险性进行概率分析的尝试^[89-90],但目前基于大地测量观测数据进行机器学习建模的地震危险性评估工作尚未见报道。随着机器学习技术的进步以及包括大地测量观测资料在内的多源观测资料的不断积累,基于机器学习的活动断层地震危险性评估研究可能成为地球物理学和地震学研究中新的热点。

参 考 文 献

- [1] Avouac J P, Meng L S, Wei S J, et al. Lower Edge of Locked Main Himalayan Thrust Unzipped by the 2015 Gorkha Earthquake[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(9): 708-711.
- [2] 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): 809-812.
- [3] Teng J, Wei S, Sun K, et al. Relative Motion Across the Eastern Tibetan Plateau: Contributions from Faulting, Internal Strain and Rotation Rates [J]. *Tectonophysics*, 2013, 584: 240-256.
- [4] Tapponnier P, Xu Zhiqin, Roger F, et al. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*. 2001, 294(5547):1671-1677.
- [5] Houseman G, England P. Finite Strain Calculations of Continental Deformation: 1. Method and General Results for Convergent Zones[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91 (B3) : 3651-3663.
- [6] Teng J, Wei S, Sun K, et al. The Characteristics of the Seismic Activity in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau of China [J]. *Tectonophysics*, 1987, 134(1/2/3): 129-144.
- [7] Avouac J, Tapponnier P. Kinematic Model of Active Deformation in Central Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20: 895-898.
- [8] Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. Surface Deformation and Lower Crustal Flow in Eastern Tibet[J]. *Science*, 1997, 276(5313): 788-790.
- [9] Gao Y, Wu Z, Liu Z, et al. Seismic Source Characteristics of Nine Strong Earthquakes from 1988 to 1990 and Earthquake Activity Since 1970 in the Sichuan-Qinghai-Xizang (Tibet) Zone of China [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2000, 157 (9) : 1423-1443.
- [10] Wu C, Tian X, Xu T, et al. Deformation of Crust and Upper Mantle in Central Tibet Caused by the Northward Subduction and Slab Tearing of the Indian Lithosphere: New Evidence Based on Shear Wave Splitting Measurements [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 514: 75-83.
- [11] 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.
- [12] Wu Y, Zheng Z, Nie J, et al. High-Precision Vertical Movement and Three-Dimensional Deformation Pattern of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127: e2021JB023202.
- [13] Lai X A, Wu X H, Seeber G, et al. The First Epoch Western Yunnan GPS Survey: Data Reduction and Analysis with Geonap Software[J]. *Earthq Res China*, 1992, 6(1) : 68-90.
- [14] 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.
- [15] Jiang Zaisen, Ma Zongjin, Zhang Xi, et al. Horizontal Strain Field and Tectonic Deformation of Chinese Mainland Revealed by Preliminary GPS Result [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(3) : 352-358. (江在森, 马宗晋, 张希, 等. GPS 初步结果

- 揭示的中国大陆水平应变场与构造变形[J]. 地球物理学报, 2003, 46(3): 352-358.)
- [16] Niu Zhijun, Wang Min, Sun Hanrong, et al. The Latest Observation Results of Current Crustal Movement Velocity Field in Chinese Mainland [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(8): 839-840. (牛之俊, 王敏, 孙汉荣, 等. 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, 2005, 50(8): 839-840.)
- [17] Gan W, Zhang P, Shen Z K, et al. Present-Day Crustal Motion Within the Tibetan Plateau Inferred from GPS Measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112: B08416.
- [18] 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.
- [19] 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 (JGR)*, 2017, 122(11): 9290-9312.
- [20] Zhao Q, Chen Q, van Dam T V, et al. The Vertical Velocity Field of the Tibetan Plateau and Its Surrounding Areas Derived from GPS and Surface Mass Loading Models [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2023, 609: 118107.
- [21] Liu Jingnan, Yao Yibin, Shi Chuang, et al. Preliminary Research on Characteristic of Present-Day Vertical Deformation of Chinese Mainland [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 2002, 22(3): 1-5. (刘经南, 姚宜斌, 施闯, 等. 中国大陆现今垂直形变特征的初步探讨[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(3): 1-5.)
- [22] Gan W. 3D 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.
- [23] Pan Y, Shen W B, Shum C, et al. Spatially Varying Surface Seasonal Oscillations and 3-D Crustal Deformation of the Tibetan Plateau Derived from GPS and GRACE Data [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 502: 12-22.
- [24] 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.
- [25] Guo Xinwei, Guo Chunxi, Nie Jianliang, et al. Vertical Movement Model in Chinese Mainland Based on First Order Leveling Results [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(3): 361-368. (郭鑫伟, 郭春喜, 聂建亮, 等. 一等水准成果构建的中国大陆垂直运动模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(3): 361-368.)
- [26] Gan Weijun, Cheng Penggen, Zhou Demin, et al. Observation of a GPS Profile Across Main Faults on Northeast Margin of Tibetan Plateau and Data Analysis [J]. *Seismology and Geology*, 2005, 27(2): 177-187. (甘卫军, 程朋根, 周德敏, 等. 青藏高原东北缘主要活动断裂带GPS加密观测及结果分析[J]. 地震地质, 2005, 27(2): 177-187.)
- [27] Qu Chunyan, Shan Xinjian, Song Xiaogang, et al. The PSInSAR Technique and Its Application to the Study on Crustal Deformation of the Haiyuan Fault Zone [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(4): 984-993. (屈春燕, 单新建, 宋小刚, 等. 基于PSInSAR技术的海原断裂带地壳形变初步研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(4): 984-993.)
- [28] Wright T, Parsons B, England P, et al. InSAR Observations of Low Slip Rates on the Major Faults of Western Tibet [J]. *Science*, 2004, 305(5681): 236-239.
- [29] Taylor M, Peltzer G. Current Slip Rates on Conjugate Strike-Slip Faults in Central Tibet Using Synthetic Aperture Radar Interferometry [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111: B12402.
- [30] Jolivet R, Cattin R, Chamot-Rooke N, et al. Thin-plate Modeling of Interseismic Deformation and Asymmetry Across the Altyn Tagh Fault Zone [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L02309.
- [31] Wang H, Wright T, Biggs J. Interseismic Slip Rate of the Northwestern Xianshuihe Fault from InSAR Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36, L03302.
- [32] Wen Y, Li Z, Xu C, et al. Postseismic Motion After the 2001 Mw 7.8 Kokoxili Earthquake in Tibet Observed by InSAR Time Series [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B8): B08405.
- [33] Jolivet R, Candela T, Lasserre C, et al. The Burst-Like Behavior of Aseismic Slip on a Rough Fault: The Creeping Section of the Haiyuan Fault, China Short Note [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105(1): 480-488.
- [34] Jolivet R, Lasserre C, Doin M P, et al. Spatio-Temporal Evolution of Aseismic Slip Along the Haiyuan Fault, China: Implications for Fault Frictional Properties [J]. *Earth and Planetary Science Letters*,

- 2013, 377/378: 23-33.
- [35] Xu C J, Zhu S. Temporal and Spatial Movement Characteristics of the Altyn Tagh Fault Inferred from 21 Years of InSAR Observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(8): 1147-1160.
- [36] Huang Z, Zhou Y, Qiao X, et al. Kinematics of the 1 000 km Haiyuan Fault System in Northeastern Tibet from High-Resolution Sentinel-1 InSAR Velocities: Fault Architecture, Slip Rates, and Partitioning [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 583: 117450.
- [37] Qiao Xin. Along-Strike Variation in Fault Structural Maturity and Seismic Moment Deficits on the Yushu-Ganzi-Xianshuihe Fault System Revealed by Strain Accumulation and Regional Seismicity [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 596: 117799.
- [38] Wang H, Wright T. Satellite Geodetic Imaging Reveals Internal Deformation of Western Tibet [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L07303.
- [39] Wang H, Wright T J, Liu-Zeng J, et al. Strain Rate Distribution in South-Central Tibet from Two Decades of InSAR and GPS [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(10): 5170-5179.
- [40] Zhu L, Ji L, Liu C. Interseismic Slip Rate and Locking Along the Maqin-Maqu Segment of the East Kunlun Fault, Northern Tibetan Plateau, Based on Sentinel-1 Images [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021, 211: 104703.
- [41] Zhao D, Qu C, Burgmann R, et al. Large-Scale Crustal Deformation, Slip-Rate Variation, and Strain Distribution Along the Kunlun Fault (Tibet) from Sentinel-1 InSAR Observations (2015—2020) [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127(1): e2021JB022892.
- [42] China Earthquake Administration. Stipulation on Technical System for China Earthquake Active Fault Surveying [M]. Beijing: Seismological Press, 2005. (中国地震局. 中国地震活动断层探测技术系统技术规程[M]. 北京:地震出版社, 2005.)
- [43] Zhang Yongqing, Xie Furen. Progress and Prospect on the Seismic Hazard Assessment of Active Faults [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2007, 2(1): 64-74. (张永庆, 谢富仁. 活动断裂地震危险性的研究现状和展望[J]. 震灾防御技术, 2007, 2(1): 64-74.)
- [44] Cornell C A. Engineering Seismic Risk Analysis [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1968, 58: 1583-1606.
- [45] Jiang Guoyan. Evaluation of Seismic Risk of Active Faults by Coulomb Fracture Criterion [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013. (江国焰. 利用库仑破裂准则评估活动断层地震危险性[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.)
- [46] Stein R S, Barka A A, Dieterich J H. Progressive Failure on the North Anatolian Fault Since 1939 by Earthquake Stress Triggering [J]. *Geophysical Journal International*, 1997, 128(3): 594-604.
- [47] Xu Xiwei, Wu Xiyun, Yu Guihua, et al. Seismological Signatures for Identifying $M \geq 7.0$ Earthquake Risk Areas and Their Preliminary Application in the Mainland of China [J]. *Seismology and Geology*, 2017, 39(2): 219-275. (徐锡伟, 吴熙彦, 于贵华, 等. 中国大陆高震级地震危险区判定的地震地质学标志及其应用[J]. 地震地质, 2017, 39(2): 219-275.)
- [48] Lü Yuejun, Xie Zhuojuan, Peng Yanju, et al. Map of Epicenter Distribution of Moderate and Small Earthquakes in China and Its Adjacent Areas [M]. Beijing: Seismological Press, 2016. (吕悦军, 谢卓娟, 彭艳菊, 等. 中国及邻近地区中小地震震中分布图[M]. 北京:地震出版社, 2016.)
- [49] Zheng Dan. Inversion of S-wave Velocity Structure in Northeastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau by P-wave Receiving Function and Rayleigh Surface Wave [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015. (郑丹. 利用P波接收函数和瑞利面波联合反演青藏高原东北缘S波速度结构[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.)
- [50] Bao X, Song X D, Eaton D, et al. Episodic Lithospheric Deformation in Eastern Tibet Inferred from Seismic Anisotropy [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47: e2019GL085721.
- [51] Jiang C X, Yang Y J, Zheng Y. Penetration of Mid-crustal Low Velocity Zone Across the Kunlun Fault in the NE Tibetan Plateau Revealed by Ambient Noise Tomography [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 406: 81-92.
- [52] Wang Qi, Qiao Xuejun, You Xinzhaoh. Earthquake Geodesy in China-Endeavor and Scientific Contribution in a Half Century [J]. *Earthquake Research in China*, 2020, 36(4): 647-659. (王琪, 乔学军, 游新兆. 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, 2020, 36(4): 647-659.)
- [53] Jiang G Y, Xu X W, Chen G H, et al. Geodetic Imaging of Potential Seismogenic Asperities on the Xianshuihe-Anninghe-Zemuhe Fault System, Southwest China, with a New 3D Viscoelastic Interseismic Coupling Model [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2015, DOI: 10.1002/

- 2014JB011492.
- [54] 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, DOI: 10.1029/2011JB008732.
- [55] Zhao Jing, Wu Yanqiang, Jiang Zaisen, et al. Fault Locking and Dynamic Deformation of the Longmenshan Fault Zone Before the 2013 Lushan Ms 7.0 Earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2013, 35(5): 681-691. (赵静, 武艳强, 江在森, 等. 芦山地震前龙门山断裂带闭锁程度与变形动态特征研究[J]. 地震学报, 2013, 35(5): 681-691.)
- [56] Zhao Jing, Jiang Zaisen, Wu Yanqiang, et al. Study on Fault Locking and Fault Slip Deficit of the Longmenshan Fault Zone Before the Wenchuan Earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(9): 2963-2972. (赵静, 江在森, 武艳强, 等. 汶川地震前龙门山断裂带闭锁程度和滑动亏损分布研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2963-2972.)
- [57] Reid H F. The Mechanism of the Earthquake, in the California Earthquake of April 18, 1906 [R]. Washington D C: Carnegie Institution, 1910.
- [58] Schwartz D P, Coppersmith K. Fault Behavior and Characteristic Earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89: 5681-5698.
- [59] Shimazaki K, Nakata T. Time-Predictable Recurrence Model for Large Earthquakes[J]. *Geophysical Research Letters*, 1980, 7(4): 279-282.
- [60] Papazachos B C. A Time- and Magnitude-Predictable Model for Generation of Shallow Earthquakes in the Aegean Area [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1992, 138(2): 287-308.
- [61] Working Group on California Earthquake Probabilities. Earthquake Probabilities in the San Francisco Bay Region, 2000—2030[R]. California: US Geological Survey, 1999.
- [62] Ran Hongliu, Zhou Bengang. Application of Brownian Model in the Northwestern Beijing, China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 26(S1): 96-102. (冉洪流, 周本刚. 布朗模型在北京西北地区的应用[J]. 地震学报, 2004, 26(S1): 96-102.)
- [63] Cheng Jia, Xu Xiwei, Chen Guihua. A New Prediction Model of Seismic Hazard for the Sichuan-Yunnan Region Based on the Occurrence Rate of Large Earthquakes [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(3): 1170-1182. (程佳, 徐锡伟, 陈桂华. 基于特大地震发生率的川滇地区地震危险性预测新模型[J]. 地球物理学报, 2020, 63(3): 1170-1182.)
- [64] Wen Xueze, Zhang Peizhen. Earthquake Recurrence Models and Associated Problems [M]//Institute of Geology, State Seismological Bureau. Research of Active Fault (5). Beijing: Seismological Press, 1996: 1-11. (闻学泽, 张培震. 地震的原地复发模式理论及其有关问题[M]//国家地震局地质研究所. 活动断裂研究(5). 北京:地震出版社, 1996: 1-11.)
- [65] Nishenko S, Buland R. A Generic Recurrence Interval Distribution for Earthquake Forecasting[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1987, 77(4): 1382-1399.
- [66] Ellsworth W, Matthews M, Nadeau R, et al. A Physically-Based Earthquake Recurrence Model for Estimation of Long-Term Earthquake Probabilities [C]//Workshop on Earthquake: State of the Art and Directions for the Future, Rome, Italy, 1999.
- [67] Ward S. A Multidisciplinary Approach to Seismic Hazard in Southern California [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84: 1293 - 1309.
- [68] Smith B, Sandwell D. Coulomb Stress Accumulation Along the San Andreas Fault System[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B6): :2296.
- [69] Li Le, Chen Qifu, Niu Fenglin, et al. Quantitative Study of the Deep Deformation Along the Southern Segment of the Xianshuihe Fault Zone Using Repeating Microearthquakes [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(11): 4138-4148. (李乐, 陈棋福, 钮凤林, 等. 鲜水河断裂带南段深部变形的重复地震研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(11): 4138-4148.)
- [70] Li Le, Chen Qifu, Niu Fenglin, et al. Estimates of Deep Slip Rate Along the Xiaojiang Fault with Repeating Microearthquake Data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(10): 3373-3384. (李乐, 陈棋福, 钮凤林, 等. 基于重复微震的小江断裂带深部滑动速率研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(10): 3373-3384.)
- [71] Wang S, Jiang G, Lei X, et al. Three $M_w \geq 4.7$ Earthquakes Within the Changning (China) Shale Gas Field Ruptured Shallow Faults Intersecting with Hydraulic Fracturing Wells [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127: e2021JB022946.
- [72] Luo H, Wang T, Wei S. Systematic Comparison of InSAR and Seismic Source Models for Moderate-Size Earthquakes in Western China: Implication to the Seismogenic Capacity of the Shallow Crust [J].

- Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127:e2022JB024794.
- [73] 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(9): 634-640.
- [74] Xiong Wei. Coseismic Slip and Early Afterslip of the 2021 Mw 7.4 Maduo, China Earthquake Constrained by GPS and InSAR Data[J]. *Tectonophysics*, 2022, 840: 229558.
- [75] Li Y C, Nocquet J, Shan X, et al. Heterogeneous Interseismic Coupling Along the Xianshuihe-Xiaojiang Fault System, Eastern Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126: e2020JB021187.
- [76] Hardebeck J. Stress Triggering and Earthquake Probability Estimates [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109:B04310.
- [77] Parsons T. Significance of Stress Transfer in Time-Dependent Earthquake Probability Calculations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: B05S02.
- [78] Parsons T, Ogata Y, Zhuang J C, et al. Evaluation of Static Stress Change Forecasting with Prospective and Blind Tests [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 188(3): 1425-1440.
- [79] Stein R S. Earthquake Conversations [J]. *Scientific American*, 2003, 288(1): 72-79.
- [80] Martínez-Díaz J J, Capote R, Tsigé M, et al. Seismic Triggering in a Stable Continental Area: The Lugo 1995-1997 Seismic Sequences (NW Spain) [J]. *Journal of Geodynamic*, 2006, 41:440-449.
- [81] Xiong X, Shan B, Zheng Y, et al. Stress Transfer and Its Implication for Earthquake Hazard on the Kunlun Fault, Tibet [J]. *Tectonophysics*, 2010, 482: 216-225.
- [82] Jia K, Zhou S, Zhuang J, et al. Did the 2008 Mw 7.9 Wenchuan Earthquake Trigger the Occurrence of the 2017 Mw 6.5 Jiuzhaigou Earthquake in Sichuan, China? [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(4): 2965-2983.
- [83] Wang Jianjun. Probing Coulomb Stress Triggering Effects for a Mw > 6.0 Earthquake Sequence from 1997 to 2014 Along the Periphery of the Bayan Har Block on the Tibetan Plateau [J]. *Tectonophysics*, 2017, 694: 249-267.
- [84] Nalbant S, McCloskey J. Stress Evolution Before and After the 2008 Wenchuan, China Earthquake [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 307(1/2): 222-232.
- [85] Parsons T, Ji C, Kirby E. Stress Changes from the 2008 Wenchuan Earthquake and Increased Hazard in the Sichuan Basin [J]. *Nature*, 2008, 454 (7203) : 509-510.
- [86] Xiong W, Chen W, Zhao B, et al. Insight into the 2016 Menyuan Mw 5.9 Earthquake with InSAR: A Blind Reverse Event Promoted by Historical Earthquakes [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2019, 176(2): 577-591.
- [87] Shan B, Xiong X, Wang R J, et al. Coulomb Stress Evolution Along Xianshuihe-Xiaojiang Fault System Since 1713 and Its Interaction with Wenchuan Earthquake, May 12, 2008 [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 377:199-210.
- [88] Zhu Junqing, Sun Ke. Research Progress of Machine Learning Based on Multi-source Data in Earthquake Prediction [J]. *Earthquake Research in China*, 2022, 38(4): 691-707. (朱俊清, 孙珂. 基于多源数据的机器学习在地震预测中的研究进展 [J]. *中国地震*, 2022, 38(4): 691-707.)
- [89] Asencio-Cortés G, Martínez-Álvarez F, Troncoso A, et al. Medium-Large Earthquake Magnitude Prediction in Tokyo with Artificial Neural Networks [J]. *Neural Computing and Applications*, 2017, 28 (5): 1043-1055.
- [90] Asencio-Cortés G, Morales-Esteban A, Shang X, et al. Earthquake Prediction in California Using Regression Algorithms and Cloud-Based Big Data Infrastructure [J]. *Computers and Geosciences*, 2018, 115: 198-210.