引文格式:许光煜,温扬茂,王乐洋,等.大地测量地球物理联合反演现状与展望[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(10):1939-1947.DOI:10.13203/j.whugis20240130

Citation: XU Guangyu, WEN Yangmao, WANG Leyang, et al. Current Status and Prospects of Joint Inversion on Geodesy and Geophysics[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(10): 1939-1947. DOI: 10.13203/j.whugis20240130

大地测量地球物理联合反演现状与展望

许光煜[1] 温扬茂[2] 王乐洋[1] 许才军[2]

1 东华理工大学测绘与空间信息工程学院,江西 南昌,330013

2 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘 要:近年来,高精度、高分辨率空间大地测量观测使大地测量地球物理联合反演进入一个崭新的发展阶段。对大地测量地球物理联合反演研究进行阶段性梳理和总结。首先,介绍了大地测量地球物理联合反演的内涵和研究对象;其次,回顾了大地测量地球物理联合反演的发展历史;然后,引入地震震源机制、地震破裂模型和地壳运动速度场反演等典型案例,分析了大地测量地球物理联合反演的现代应用;最后,展望了大地测量地球物理联合反演的未来挑战。

关键词:大地测量地球物理联合反演;发展历程;应用案例;未来挑战

中图分类号:P22 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-05-05

DOI:10.13203/j.whugis20240130 **文章编号**:1671-8860(2025)10-1939-09

Current Status and Prospects of Joint Inversion on Geodesy and Geophysics

XU Guangyu[1] *WEN Yangmao*[2] *WANG Leyang*[1] *XU Caijun*[2]

1 School of Surveying and Geoinformation Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

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

Abstract: Joint inversion on geodesy and geophysics, which integrates geodetic observations with geophysical modeling, has emerged as a powerful interdisciplinary approach for investigating Earth system processes. We present a comprehensive review of its conceptual framework, core principles, and research scope along three main dimensions. A historical overview traces the evolution of this paradigm in both international and domestic research contexts. The review focuses on three representative application areas: seismic source parameters inversion, kinematic rupture process modeling, and reconstruction of crustal deformation velocity fields. Key methodological challenges are identified, including issues related to data heterogeneity, model coupling, and uncertainty quantification. Strategies for advancing integrated inversion techniques are proposed, with an emphasis on fostering synergies between geodetic precision and geophysical modeling. This work also highlights the potential of joint inversion on geodesy and geophysics to support national strategic needs in natural hazard mitigation and geodynamic monitoring, and its critical role in the development of next-generation Earth observation systems.

Key words: joint inversion on geodesy and geophysics; development history; application case; future challenge

地球物理反演是在地球物理学中利用地球表面观测到的物理现象推测地球内部介质物理状态的空间变化及物性结构的一个分支[1]。由于观测数据中的噪声、模型参数与观测数据之间物理关系的非线性以及参数的无约束组合,地球物理反演问题通常具有非唯一解。传统上,解决地球物理反演解非唯一性的方法是引入外部约束,如引入模型参数的先验信息、增加正则化约束

基金项目:国家自然科学基金(42374003,42130101,42564002,2104008);江西省自然科学基金(20252BAC240262)。

第一作者:许光煜,博士,副教授,主要从事地震周期形变监测与建模研究。gyxu@ecut.edu.cn

通信作者:温扬茂,博士,教授。ymwen@sgg.whu.edu.cn

等,但模型的模糊性特征仍然存在。而联合多个数据集能够通过克服每个地球物理方法的内在限制显著改善地球物理反演的结果,有效减少模型模糊性[2]。

但是,由于联合反演的观测数据不只限于地球物理观测,也包括大地测量、摄影测量与遥感观测等数据,因此地球物理联合反演这个名称并不能确切地表达其内涵。随着高精度、高分辨率的空间大地测量观测(包括全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)、合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)、激光测卫、甚长基线干涉测量、影像大地测量和卫星重力测量等)的出现,大地测量地球物理联合反演问题(理论)应运而生。

文献[3]首次提出了大地测量地球物理联合反演,它指的是以大地测量观测为基础,结合地球物理观测,利用地球物理学建立的模型联合反演其参数[4-9]。大地测量地球物理联合反演为地球科学提供地球动力学(数学物理)模型,推动了地球内部运动机制的深入研究。在资源勘探和管理中通过对地下结构和性质的研究,该反演方法可以有效地指导勘探活动,寻找潜在的资源储量,同时在地震[10-15]、火山喷发[16]和滑坡[17-18]等地质灾害的预测方面有重要作用。

1 大地测量地球物理联合反演发展历史

国际上最早利用大地测量观测来解决的地球物理问题是地震震源机制反演[19],文献[19]利用三角网观测到的地表水平位移反演确定地震断层物理参数。文献[20]利用三角网观测数据构建二维螺旋位错模型,以此反演确定了美国加利福尼亚中部的相对板块运动。文献[21]根据三角观测数据计算得到了美国加利福尼亚南部地区应变结果。随着GNSS的出现,利用GNSS获得的大地测量数据开始广泛应用于地壳形变研究[22]。文献[23]利用地表水准和GNSS观测的地表位移反演计算了青藏高原应变场和应力场。文献[24]利用2018年Mw 8.2斐济地震的GNSS震后形变观测研究地幔粘度结构。文献[25]首次利用InSAR技术恢复了1992年美国兰德斯地震的同震形变场,此后InSAR成为地壳形变研究中重要的观测数据源。文献[26]利用InSAR震后形变观测对2001年Mw 7.8中国青海可可西里地震震后形变机制进行研究,反演了震后余滑和上地幔粘滞系数。文献[27]联合GNSS和InSAR观测反演确定了2008年Mw 7.9中国四川汶川地震的同震滑动分布模型。文献[28]根据地面形变观测研究了1966年中国河北邢台地震的震源过程,属于中国最早利用大地测量观测资料进行大地测量地球物理联合反演的研究。大地测量观测作为大地测量地球物理联合反演的核心数据,其优势在于其能准确监测地表的长期动态形变信息和地表重力变化信息,这些变化是地下形变源(构造或非构造运动)或地球内部的密度分布不均匀在地表的响应。

在文献[3]之前,大地测量地球物理联合反演概念尚未有明确的命名,文献[3]首次使用了大地测量地球物理联合反演。此后,大地测量地球物理联合反演被广泛应用于解决地球物理建模问题,这些问题具有一个相同的特征,即从不同观测数据中确定一致的模型参数。在联合反演框架中结合具有敏感性和分辨率互补特性的数据集,可以克服单一数据集反演过程中存在的问题,如分辨率有限和解非唯一性等。

2 大地测量地球物理联合反演研究现状

大地测量地球物理联合反演涉及3个关键研究内容:函数模型、随机模型(相对权比)和反演算法(图1),下文分别从这3个方面阐述大地测量地球物理联合反演的研究现状。

2.1 联合反演函数模型

目前常见的大地测量地球物理联合反演模型包括:地震震源机制联合反演模型(大地测量和地震波数据联合)、地震破裂过程联合反演模型(大地测量和地震波数据联合)、地壳运动速度场和应变率场联合反演模型(大地测量和地震矩张量数据联合)等(见表1)。其中,Okada[29-30]、Okubo[31]等基于位错理论推导了断层错动引起的地表位移和重力变化等经典表达式,成为了地震同震变形反演断层参数和滑动分布研究、震后形变反演震后余滑或下地壳和上地幔粘滞性系数研究、震间形变反演断层面滑动亏损研究中广泛

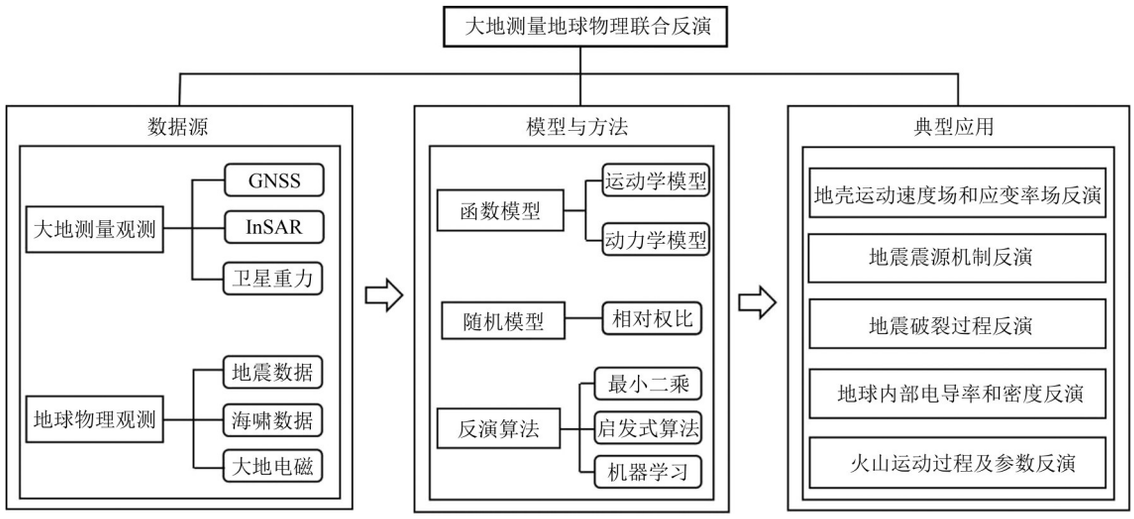


图1　大地测量地球物理联合反演关系图

Fig. 1　Relationship Diagram of Joint Inversion on Geodesy and Geophysics

使用的物理模型。

大地测量地球物理联合反演的数学模型可以分为两类:

1)非线性模型,例如地震震源参数反演模型[32-33]。

2)线性模型。通用函数模型可以表示为:

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x_1,x_2,\cdots,x_m) \\ f_2(x_1,x_2,\cdots,x_m) \\ \vdots \\ f_n(x_1,x_2,\cdots,x_m) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{d_1} \\ e_{d_2} \\ \vdots \\ e_{d_n} \end{bmatrix} \tag{1}$$

表1　目前主要的大地测量地球物理联合反演问题

Table 1　Current Major Problems in Joint Inversion on Geodesy and Geophysics

大地测量地球物理联合反演问题	大地测量数据	地球物理数据
地壳运动速度场和应变率场反演[34]	GNSS	地震数据
地震震源机制反演[35]	GNSS、InSAR	地震数据
地震破裂过程反演[36]	GNSS、高频GNSS、InSAR	地震数据、强震仪记录、海啸波记录
断层滑动速率反演[37]	GNSS、InSAR	重复地震目录
地球内部电导率和密度反演[38]	重力数据	地震数据、大地电磁数据
火山岩脉侵入时空变化过程反演[39]	GNSS	地震数据
岩浆囊参数反演[40]	GNSS	地震数据
地幔成分与热状态反演[41]	地球平均质量和转动惯量	地震数据

式中,$d_i(i=1,2,\cdots,n)$表示n种不同类型的观测数据;$f_i(x_1,x_2,\cdots,x_m)(i=1,2,\cdots,n)$表示由模型参数$x$构成的函数;$x_j(j=1,2,\cdots,m)$表示大地测量地球物理联合反演模型参数;$e_{d_i}(i=1,2,\cdots,n)$表示观测误差。

2.2　联合反演随机模型

通用随机模型表示为:

$$\begin{bmatrix} e_{d_1} \\ e_{d_2} \\ \vdots \\ e_{d_n} \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} 0,\sigma_1^2 P_1^{-1} \\ 0,\sigma_2^2 P_2^{-1} \\ \vdots \\ 0,\sigma_n^2 P_n^{-1} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中,$\sigma_1^2(i=1,2,\cdots,n)$表示不同类型观测数据的单位权方差;$P_i(i=1,2,\cdots,n)$表示不同类型观测值在联合反演中的权值。

联合反演中相对权比的确定至关重要,不同的权比表示各类观测数据对反演结果不同的贡献程度。针对大地测量地球物理联合反演问题中相对权比的确定,文献[3]提出了4种固定数据间权比的方法:(1)将权比参数作为未知参数进行反演;(2)根据先验信息固定数据权比;(3)利用赫尔默特方差分量估计方法确定权比;(4)不考虑数据权比,给不同类型数据赋予相同权比。文献[42-43]提出能够同时处理不同数据集相对权比、正则化、线性模型参数和非线性模型参数的全贝叶斯算法和线性-非线性贝叶斯反演方法。

2.3　联合反演算法

针对大地测量地球物理联合反演问题中的非线性模型,目前大多数研究主要采用粒子群算

法[44]、模拟退火算法[45]、遗传算法[46]和神经网络算法[47]等启发式算法进行求解,而线性模型主要采用约束最小二乘方法进行求解。基于求解模型参数后验概率密度的贝叶斯反演方法,能够同时对大地测量地球物理联合反演中的线性和非线性模型进行求解[44-45]。随着人工智能技术的发展,机器学习算法在大地测量地球物理联合反演领域得到广泛应用,它可以解决常规算法在数据融合、特征提取、模型优化等方面无法解决的复杂反演问题。

文献[44]分析了InSAR资料用于地震震源参数反演的参数特点,提炼了适合地震震源参数反演问题的颗粒群优化算法技术路线。文献[45]提出了一种三步法的贝叶斯后验概率密度统计方法,用于解决地震断层滑动分布反演问题,该方法旨在克服全贝叶斯和线性-非线性贝叶斯反演方法中存在的收敛困难的问题。文献[48]将变分理论引入地震断层滑动分布反演研究,提出了一种变分贝叶斯地震断层滑动分布反演方法。

3 大地测量地球物理联合反演的现代应用

3.1 联合大地测量、地震学、地球物理学数据反演地震震源机制

地震震源机制是描述地震震源特征的一系列物理量,包括震源深度、发震断层走向、倾角、滑动角等,早期主要通过反演地震波数据获得地震震源机制解,目前已经有许多特定算法的变体,用于从体波、面波或自由震荡数据的波形中获得地震震源机制[49-55]。20世纪90年代,一些研究者开始利用GNSS记录到的近场同震地表形变观测反演地震震源机制[56]。1993年,文献[25]首次利用InSAR技术恢复了1992年美国兰德斯地震的同震形变场,之后众多研究者开始尝试利用InSAR记录到的同震地表形变的视线向观测反演地震震源机制[57]。重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment,GRACE)卫星的发射使人们能得到大尺度的全球时变重力场,并且有机会观测到质量重分布引起的同震重力变化。一些学者尝试使用GRACE卫星数据反演地震震源机制[58-59]。文献[33]提出了一种基于贝叶斯框架的地震震源机制联合反演算法,并开发了贝叶斯地震分析工具。文献[60]提出了一种利用地震波和InSAR数据联合反演地震震源机制的方法,该方法考虑了三维地壳模型。随着观测种类的丰富,联合多源观测数据反演地震震源机制成为一种趋势。

3.2 联合大地测量、地震学、地球物理学数据反演地震破裂过程

地震破裂过程是地震破裂过程中断层面滑动的时空演化过程,是研究震源特性的重要参数,早期主要通过地震波形数据进行地震破裂过程反演[61-63],随着大地测量观测能够提供近场同震形变记录,联合大地测量和地震波数据的地震破裂过程反演成为研究热点[64-67]。GNSS技术除了能够提供低频静态观测记录的地表永久位移,还可以通过高频动态观测记录地震破裂过程,因此也被用来作为一种近场波形观测数据[68]。InSAR观测能够帮助地震波数据更好地约束断层的位置和几何形态[69]。文献[13]联合静态GNSS同震位移、InSAR、高频GNSS波形数据和地震波数据反演了2020年Mw 7.4墨西哥瓦哈卡州地震破裂过程。文献[34]联合GNSS、强震仪和海啸数据反演了2017年Mw 8.2墨西哥特旺特佩克地震破裂过程。联合大地测量和地震波数据反演地震破裂过程能够有效利用大地测量观测的近场优势和地震波数据所携带的时间演化信息实现互补,最大程度地恢复震源信息。

3.3 联合GNSS数据和地震矩张量反演地壳运动速度场和应变率场

确定地壳应变率场是当前国际地球科学领域的一个重要问题,也是人们了解全球地壳运动及其动力学机制的重要途径。早期,单独使用地震矩张量数据,利用Kostrov公式[70]可以计算地震应变率参数。单独使用GNSS速度场数据,利用由大地坐标系中计算应变公式推广得到的大地坐标速度场计算地壳应变率张量公式可以反演地壳应变率张量与旋转率张量参数。通过双三次贝塞尔插值方法,利用GNSS速度场和地震矩张量数据可以联合反演地壳运动速度场和应变率场。文献[3]、文献[71]分别联合GNSS速度场和地震矩张量数据反演了中国大陆及其邻区和美国西部的地壳运动速度场。

4 大地测量地球物理联合反演研究展望

4.1 大地测量地球物理联合反演:从静态到动态

从时间维度来看,大地测量地球物理联合反演问题中使用的大地测量观测以静态数据为主,地球物理观测数据以动态数据为主。目前,大地

测量地球物理联合反演领域针对特定研究对象,主要将数据使用限定在某一时段内,例如单独研究地震周期中的同震阶段,而不是将地震周期这一连续过程建立统一模型进行参数求解。虽然同震阶段中地震震源机制反演问题大多采用静态GNSS和InSAR观测联合地震波形数据,但是动态高频GNSS同震位移波形数据也常用于联合地震波形数据联合反演地震破裂过程。随着大地测量观测数据的不断积累,如何充分利用时间序列大地测量观测数据中包含的额外信息,将大地测量地球物理联合反演逐步从静态反演向动态反演发展是一个必要且重要的过程。文献[72]根据永久GNSS观测网络扩建在时空上为地壳形变量提供了足够的数据,提出一种用网络滤波模型来估计断层滑动时空分布的方法,该模型是大地测量反演从静态发展到动态的重要成果。文献[73]提出一种基于主成分分析的GNSS位移时间序列反演断层滑移时空分布的方法。文献[74]提出一种基于变分贝叶斯独立分量分析的InSAR时间序列地表形变信号提取方法。以上研究表明,充分利用大地测量时间序列观测数据能够刻画出地壳形变更为真实、全面的特征。以上研究成果能够为大地测量地球物理联合反演往动态反演发展提供思路。

4.2　大地测量地球物理联合反演与地球动力学

GNSS、InSAR和卫星重力等技术在地球科学的广泛应用,使人们能够进一步探索地球内部动力学过程。目前大地测量地球物理联合反演采用的建模方法主要集中在运动学反演领域,而研究结果通常需要给出相应的动力学解释,两者之间存在一定程度的割裂。文献[75]基于有限元方法对2021年Mw 7.4中国青海玛多地震破裂过程进行了动力学模拟,恢复了玛多地震的一阶破裂特征。文献[76]提出了一种基于应力驱动的余滑和粘弹性松弛模型的贝叶斯反演方法,并将其应用于2011年Mw 9.0日本东北大地震震后形变的动力学模拟。以上研究表明,除了要为运动学模型寻找合适的动力学解释,更需要进一步发展动力学模拟方法,最终有效解释运动学观测和地球物理过程。

4.3　利用人工智能求解大地测量地球物理联合反演问题

近年来,人工智能技术得到了快速发展,深度学习逐渐在各个不同领域得到了应用。大地测量地球物理联合反演中存在着大量的多源观测数据,因此将人工智能与大地测量地球物理联合反演相结合能够更好地处理大数据分析问题。目前,已有不少学者尝试利用深度学习方法解决大地测量地球物理联合反演问题。针对同震阶段,文献[47]考虑到常用的求解断层参数反演问题的非线性反演方法存在需要先验信息、解算会陷入局部最小值、求解复杂耗时等不足,提出了一种基于深度残差网络的数据驱动型断层参数反演方法。文献[77]考虑到现有的求解地球内部结构的全波形反演算法计算耗时的问题,提出了一种基于U形神经网络的快速波形建模方法。文献[78]提出了一种集成了卷积神经网络、图注意力神经网络和混合密度网络的深度学习方法,利用高频GNSS位移波形数据实时快速确定地震震源位置、震级和震源机制。

以上研究中解决的反演问题都存在一些共同特点:

1)大地测量和地球物理观测数据充足,能够标记出感兴趣的形变信号,容易生成深度学习的模拟数据;

2)常规方法求解此类问题遇到瓶颈,较难实现突破。将深度学习引入大地测量地球物理联合反演领域,能够推动数据驱动方法的发展,充分利用海量大地测量和地球物理观测数据中包含的信息,从一个新的数据视角解决常规方法无法解决的问题。

5　结　语

随着大地测量观测数据(特别是GNSS、InSAR)的日益增多、数据质量的提高以及数据开放和共享模式的逐步成熟,基于大地测量观测的地球物理联合反演研究正在进入一个新的发展阶段。虽然大地测量观测为联合反演模型提供了高精度、高分辨率的数据输入,提高了研究者们求解地球物理模型参数的能力,然而在实际研究中仍然存在大地测量观测对地球物理参数分辨率有限、反演问题解不唯一、地球物理模型存在简化等问题需要解决。同时,从静态大地测量地球物理联合反演发展到动态联合反演、将反演结果与地球动力学相联系以及提高人工智能在大地测量地球物理联合反演中的应用等方面需要进一步探索。

参　考　文　献

[1]　许才军,陈庭,张丽琴,等. 地球物理大地测量反

演理论与应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2015.
XU Caijun, CHEN Ting, ZHANG Liqin, et al. Joint Inversion Theory Geophysics and Geodesy and Its Application [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2015.

[2] VOZOFF K, JUPP D L B. Joint Inversion of Geophysical DataFree[J]. *Geophysical Journal International*, 1975, 42(3): 977-991.

[3] XU C J, DING K H, CAI J Q, et al. Methods of Determining Weight Scaling Factors for Geodetic - Geophysical Joint Inversion[J]. *Journal of Geodynamics*, 2009, 47(1): 39-46.

[4] BOSSLER J D. A Note on the Meaning of Generalized Inverse Solutions in Geodesy[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, 78(14): 2616-2617.

[5] XU C J, GONG Z, NIU J M. Recent Developments in Seismological Geodesy[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2016, 7(3): 157-164.

[6] 陈运泰,林邦慧,王新华,等. 用大地测量资料反演的1976年唐山地震的位错模式[J]. 地球物理学报,1979,22(3):201-217.
CHEN Yuntai, LIN Banghui, WANG Xinhua, et al. A Dislocation Model of the Tangshan Earthquake of 1976 from the Inversion of Geodetic Data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1979, 22(3): 201-217.

[7] 许才军. 大地测量联合反演理论和方法研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2001,26(6):555-561.
XU Caijun. Progress of Joint Inversion on Geodesy and Geophysics[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(6): 555-561.

[8] 周旭华,许厚泽,吴斌,等. 用GRACE卫星跟踪数据反演地球重力场[J]. 地球物理学报,2006,49(3):718-723.
ZHOU Xuhua, XU Houze, WU Bin, et al. Earth's Gravity Field Derived from GRACE Satellite Tracking Data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(3): 718-723.

[9] 方楠,孙凯,黄传超,等. 联合InSAR和地震波数据反演甘肃积石山Ms 6.2地震震源时空破裂过程[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2025,50(2):333-343.
FANG Nan, SUN Kai, HUANG Chuanchao, et al. Joint Inversion of InSAR and Seismic Data for the Kinematic Rupture Process of the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu,China) Earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(2): 333-343.

[10] 许才军,王晓航,温扬茂,等. 地震大地测量确定凹凸体研究进展与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(10):1701-1712.
XU Caijun, WANG Xiaohang, WEN Yangmao, et al. Progress and Prospects of Seismic Geodetic Determination of Asperities[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1701-1712.

[11] 许才军,贺克锋. 地震周期形变的大地测量研究进展和展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(11):1736-1755.
XU Caijun, HE Kefeng. Advancements in Earthquake Cycle Deformation Research Based on Geodetic Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(11): 1736-1755.

[12] XU G Y, XU C J, WEN Y M, et al. The Complexity of the 2018 Kaktovik Earthquake Sequence in the Northeast of the Brooks Range, Alaska[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(19): e2020GL088012.

[13] WEN Y M, XIAO Z H, HE P, et al. Source Characteristics of the 2020 Mw 7.4 Oaxaca, Mexico, Earthquake Estimated from GPS, InSAR, and Teleseismic Waveforms[J]. *Seismological Research Letters*, 2021, 92(3): 1900-1912.

[14] YANG J Y, XU C J, WEN Y M, et al. Complex Coseismic and Postseismic Faulting During the 2021 Northern Thessaly (Greece) Earthquake Sequence Illuminated by InSAR Observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(8): e2022GL098545.

[15] HE K F, WEN Y M, XU C J, et al. Fault Geometry and Slip Distribution of the 2021 Mw 7.4 Maduo, China, Earthquake Inferred from InSAR Measurements and Relocated Aftershocks[J]. *Seismological Research Letters*, 2022, 93(1): 8-20.

[16] GUO Q, XU C J, WEN Y M, et al. The 2017 Noneruptive Unrest at the Caldera of Cerro Azul Volcano (Galápagos Islands) Revealed by InSAR Observations and Geodetic Modelling[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(17): 1992.

[17] LIU Y X, XU C J, LIU Y. Monitoring and Forecasting Analysis of a Landslide in Xinmo, Mao County, Using Sentinel-1 Data[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2019, 30(1): 85-96.

[18] SONG C, YU C, LI Z H, et al. Triggering and Recovery of Earthquake Accelerated Landslides in Central Italy Revealed by Satellite Radar Observations [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 7278.

[19] KASAHARA K. Fault Origin Model of Earthquakes, with Special Reference to the Tango Earth-

quake, 1927[J]. *Journal of Physics of the Earth*, 1958, 6(1): 15-22.

[20] 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.

[21] SAVAGE J C. Strain Accumulation in Western United States[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1983, 11: 11-41.

[22] SEGALL P, DAVIS J L. GPS Applications for Geodynamics and Earthquake Studies[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1997, 25: 301.

[23] 许才军, 晁定波, 刘经南, 等. 用大地测量资料反演青藏高原构造应力场的初步尝试[J]. 测绘学报, 1997, 26(2): 3-8.
XU Caijun, CHAO Dingbo, LIU Jingnan, et al. A Preliminary Attempt to Inverse the Tectonic Stress Field of Qinghai-Tibet Plateau with Geodetic Data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1997, 26(2): 3-8.

[24] PARK S, AVOUAC J P, ZHAN Z W, et al. Weak Upper-Mantle Base Revealed by Postseismic Deformation of a Deep Earthquake[J]. *Nature*, 2023, 615(7952): 455-460.

[25] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, et al. The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry[J]. *Nature*, 1993, 364: 138-142.

[26] WEN Y M, LI Z H, XU C J, 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): 2011JB009043.

[27] XU C, LIU Y, WEN Y, et al. Coseismic Slip Distribution of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan Earthquake from Joint Inversion of GPS and InSAR Data[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010, 100(5B): 2736-2749.

[28] 陈运泰, 林邦慧, 林中洋, 等. 根据地面形变的观测研究1966年邢台地震的震源过程[J]. 地球物理学报, 1975, 18(3): 164-182.
CHEN Yuntai, LIN Banghui, LIN Zhongyang, et al. The Focal Mechanism of the 1966 Hsingtai Earthquake as Inferred from the Ground Deformation Observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1975, 18(3): 164-182.

[29] OKADA Y. Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75(4): 1135-1154.

[30] OKADA Y. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space[J]. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 1992, 82(2): 1018-1040.

[31] OKUBO S. Gravity and Potential Changes Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1992, 97(B5): 7137-7144.

[32] WRIGHT T J, LU Z, WICKS C. Source Model for the Mw 6.7, 23 October 2002, Nenana Mountain Earthquake (Alaska) from InSAR[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(18): 2003GL018014.

[33] FUNNING G J, PARSONS B, WRIGHT T J. Fault Slip in the 1997 Manyi, Tibet Earthquake from Linear Elastic Modelling of InSAR Displacements[J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 169(3): 988-1008.

[34] XU C J, WANG H, LIU J N. Present-Day Crustal Deformation Field in China Continent Inverted from GPS Observations, Earthquake Moment Tensor and Quaternary Fault Slip Rates[J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2003, 8(2): 736-744.

[35] VASYURA-BATHKE H, DETTMER J, STEINBERG A, et al. The Bayesian Earthquake Analysis Tool[J]. *Seismological Research Letters*, 2020, 91(2A): 1003-1018.

[36 MELGAR D, RUIZ-ANGULO A, GARCIA E S, et al. Deep Embrittlement and Complete Rupture of the Lithosphere During the Mw 8.2 Tehuantepec Earthquake[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11: 955-960.

[37] PENG W, RADIGUET M, PATHIER E, et al. Fault Coupling on a Creeping Thrust Fault: Joint Inversion Using Geodetic Data and Repeating Earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2023, 128(9): e2023JB026843.

[38] MOORKAMP M, HEINCKE B, JEGEN M, et al. A Framework for 3-D Joint Inversion of MT, Gravity and Seismic Refraction dataFree[J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 184(1): 477-493.

[39] SEGALL P, LLENOS A L, YUN S H, et al. Time-Dependent Dike Propagation from Joint Inversion of Seismicity and Deformation Data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(11): 5785-5804.

[40] CANNAVÒ F, SCANDURA D, PALANO M, et al. A Joint Inversion of Ground Deformation and Focal Mechanisms Data for Magmatic Source Modelling

[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2014, 171(8): 1695-1704.

[41] KHAN A, CONNOLLY J A D, TAYLOR S R. Inversion of Seismic and Geodetic Data for the Major Element Chemistry and Temperature of the Earth's Mantle[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B9): 2007JB005239.

[42] FUKUDA J, JOHNSON K M. A Fully Bayesian Inversion for Spatial Distribution of Fault Slip with Objective Smoothing[J]. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 2008, 98(3): 1128-1146.

[43] FUKUDA J, JOHNSON K M. Mixed Linear-Non-Linear Inversion of Crustal Deformation Data: Bayesian Inference of Model, Weighting and Regularization Parameters Free[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 181(3): 1441-1458.

[44] 冯万鹏,李振洪. InSAR资料约束下震源参数的PSO混合算法反演策略[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(4): 1189-1196.
FENG Wanpeng, LI Zhenhong. A Novel Hybrid PSO/Simplex Algorithm for Determining Earthquake Source Parameters Using InSAR Data[J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(4): 1189-1196.

[45] SUN J B, SHEN Z K, BÜRGMANN R, et al. A Three-Step Maximum a Posteriori Probability Method for InSAR Data Inversion of Coseismic Rupture with Application to the 14 April 2010 Mw 6.9 Yushu, China, Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(8): 4599-4627.

[46] VELEZ M L, EUILLADES P, CASELLI A, et al. Deformation of Copahue Volcano: Inversion of InSAR Data Using a Genetic Algorithm[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2011, 202(1/2): 117-126.

[47] ZHAO X, WANG C, ZHANG H, et al. Inversion of Seismic Source Parameters from Satellite InSAR Data Based on Deep Learning[J]. *Tectonophysics*, 2021, 821: 229140.

[48] SUN L X, WANG L Y, XU G Y, et al. A New Method of Variational Bayesian Slip Distribution Inversion[J]. *Journal of Geodesy*, 2023, 97(1): 10.

[49] STUMP B W, JOHNSON L R. The Determination of Source Properties by the Linear Inversion of Seismograms[J]. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 1977, 67(6): 1489-1502.

[50] Patton H. J. Source and Propagation Effects of Rayleigh Waves from Central Asian Earthquakes[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1978.

[51] AKI K, PATTON H. Determination of Seismic Moment Tensor Using Surface Waves[J]. *Tectonophysics*, 1978, 49(3/4): 213-222.

[52] PATTON H. Reference Point Equalization Method for Determining the Source and Path Effects of Surface Waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1980, 85(B2): 821-848.

[53] WARD S N. A Technique for the Recovery of the Seismic Moment Tensor Applied to the Oaxaca, Mexico Earthquake of November 1978[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1980, 70(3): 717-734.

[54] FITCH T J, MCCOWAN D W, SHIELDS M W. Estimation of the Seismic Moment Tensor from Teleseismic Body Wave Data with Applications to Intraplate and Mantle Earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1980, 85(B7): 3817-3828.

[55] DZIEWONSKI A M, CHOU T A, WOODHOUSE J H. Determination of Earthquake Source Parameters from Waveform Data for Studies of Global and Regional Seismicity[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1981, 86(B4): 2825-2852.

[56] LISOWSKI M, PRESCOTT W H, SAVAGE J C, et al. Geodetic Estimate of Coseismic Slip During the 1989 Loma Prieta, California, Earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(9): 1437-1440.

[57] FENG W P, SAMSONOV S, QIU Q, et al. Orthogonal Fault Rupture and Rapid Postseismic Deformation Following 2019 Ridgecrest, California, Earthquake Sequence Revealed from Geodetic Observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(5): e2019GL086888.

[58] WANG L, SHUM C K, SIMONS F J, et al. Coseismic and Postseismic Deformation of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake Constrained by GRACE Gravimetry[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(7): 2012GL051104.

[59] HAN S C, RIVA R, SAUBER J, et al. Source Parameter Inversion for Recent Great Earthquakes from a Decade-Long Observation of Global Gravity Fields[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(3): 1240-1267.

[60] WESTON J, FERREIRA A M G, FUNNING G J. Joint Earthquake Source Inversions Using Seismo-Geodesy and 3-D Earth Models Free[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 198(2): 671-696.

[61] WALD D J, HELMBERGER D V, HEATON T

H. Rupture Model of the 1989 Loma Prieta Earthquake from the Inversion of Strong-Motion and Broadband Teleseismic Data[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1991, 81(5): 1540-1572.

[62] KIKUCHI M, KANAMORI H. Rupture Process of the Kobe, Japan, Earthquake of Jan. 17, 1995, Determined from Teleseismic Body Waves[J]. *Journal of Physics of the Earth*, 1996, 44(5): 429-436.

[63] YAGI Y, KIKUCHI M. Source Rupture Process of the Kocaeli, Turkey, Earthquake of August 17, 1999, Obtained by Joint Inversion of Near-Field Data and Teleseismic Data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(13): 1969-1972.

[64] DELOUIS B. Joint Inversion of InSAR, GPS, Teleseismic, and Strong-Motion Data for the Spatial and Temporal Distribution of Earthquake Slip: Application to the 1999 Izmit Mainshock[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(1): 278-299.

[65] WEI S, BARBOT S, GRAVES R, et al. The 2014 Mw 6.1 South Napa Earthquake: A Unilateral Rupture with Shallow Asperity and Rapid Afterslip[J]. *Seismological Research Letters*, 2015, 86(2A): 344-354.

[66] YE L L, BAI Y F, SI D J, et al. Rupture Model for the 29 July 2021 Mw 8.2 Chignik, Alaska Earthquake Constrained by Seismic, Geodetic, and Tsunami Observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127(7): e2021JB023676.

[67] YUE H, SHEN Z K, ZHAO Z Y, et al. Rupture Process of the 2021 M 7.4 Maduo Earthquake and Implication for Deformation Mode of the Songpan-Ganzi Terrane in Tibetan Plateau[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(23): e2116445119.

[68] MELGAR D, PÉREZ-CAMPOS X, RAMIREZ-GUZMAN L, et al. Bend Faulting at the Edge of a Flat Slab: The 2017 Mw 7.1 Puebla-Morelos, Mexico Earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(6): 2633-2641.

[69] BARNHART W D, HAYES G P, WALD D J. Global Earthquake Response with Imaging Geodesy: Recent Examples from the USGS NEIC[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(11): 1357.

[70] Kostrov B V. Seismic Moment and Energy of Earthquakes, and Seismic Flow of Rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics*, 1976, 13(1): 23-44.

[71] SHEN-TU B, HOLT W E, HAINES A J. Intraplate Deformation in the Japanese Islands: A Kinematic Study of Intraplate Deformation at a Convergent Plate Margin[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100(B12): 24275-24293.

[72] SEGALL P, MATTHEWS M. Time Dependent Inversion of Geodetic Data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B10): 22391-22409.

[73] KOSITSKY A P, AVOUAC J P. Inverting Geodetic Time Series with a Principal Component Analysis-Based Inversion Method[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2010, 115(B3): B03401.

[74] GUALANDI A, LIU Z. Variational Bayesian Independent Component Analysis for InSAR Displacement Time-Series with Application to Central California, USA[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(4): e2020JB020845.

[75] WEN Y M, CAI J F, HE K F, et al. Dynamic Rupture of the 2021 Mw 7.4 Maduo Earthquake: An Intra-Block Event Controlled by Fault Geometry[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2024, 129(1): e2023JB027247.

[76] FUKUDA J, JOHNSON K M. Bayesian Inversion for a Stress-Driven Model of Afterslip and Viscoelastic Relaxation: Method and Application to Postseismic Deformation Following the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(5): e2020JB021620.

[77] YANG Y, GAO A F, AZIZZADENESHELI K, et al. Rapid Seismic Waveform Modeling and Inversion with Neural Operators[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5906712.

[78] LIN X K, XU C J, JIANG G Y, et al. A Hybrid Deep Learning Model for Rapid Probabilistic Earthquake Source Parameter Estimation with Displacement Waveforms from a Flexible Set of Seismic or HR-GNSS Stations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5923416.