



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782 CN 11-2021/P

球形地球模型的地震位错理论及其应用

孙文科 付广裕 周新 徐长仪 唐河 董杰 周江存 杨君妍 王武星 刘泰

Seismic dislocation theory of spherical Earth model and its application

Sun Wenke, Fu Guangyu, Zhou Xin, Xu Changyi, Tang He, Dong Jie, Zhou Jiangcun, Yang Junyan, Wang Wuxing, Liu Tai

引用本文:

孙文科, 付广裕, 周新, 徐长仪, 唐河, 董杰, 周江存, 杨君妍, 王武星, 刘泰. 2022. 球形地球模型的地震位错理论及其应用. *地震学报*[J], 44(4): 711–731. DOI: 10.11939/jass.20210134

Sun W K, Fu G Y, Zhou X, Xu C Y, Tang H, Dong J, Zhou J C, Yang J Y, Wang W X, Liu T. 2022. Seismic dislocation theory of spherical Earth model and its application. *Acta Seismologica Sinica*[J], 44(4): 711–731. DOI: 10.11939/jass.20210134

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20210134>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非对称地震矩张量时间域反演:理论与方法

A time-domain inversion for the asymmetric seismic moment tensor: Theory and method
地震学报. 2017, 39(2): 155–175 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.02.001>

一种基于贝叶斯理论的P波双参数地震预警方法

An early earthquake alarming method using seismic P-wave double-parameter based on Bayesian theory
地震学报. 2021, 43(2): 227–236 <https://doi.org/10.11939/jass.20200124>

青藏高原及周边地壳均衡模式与强震活动

Crustal isostasy model and strong earthquakes in the Tibetan Plateau and its surroundings
地震学报. 2018, 40(3): 341–350 <https://doi.org/10.11939/jass.20170225>

多因素形变异常诊断方法及其动力学来源分析

Identification of multifactor deformation anomaly and analysis of its dynamic sources
地震学报. 2020, 42(6): 707–718 <https://doi.org/10.11939/jass.20200018>

利用地震光照成像法研究青藏高原东南缘岩石圈断面结构及其动力学意义

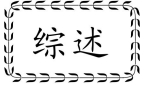
Structure of lithospheric discontinuities beneath the southeast margin of Tibetan Plateau revealed by seismic daylight imaging and its dynamic significance
地震学报. 2019, 41(5): 549–568 <https://doi.org/10.11939/jass.20190037>

基于地震探测的盐源盆地构造特征及动力学意义

Structural characteristics of Yanyuan basin deduced from seismic survey and its dynamic implication
地震学报. 2021, 43(5): 569–583 <https://doi.org/10.11939/jass.20200119>

孙文科, 付广裕, 周新, 徐长仪, 唐河, 董杰, 周江存, 杨君妍, 王武星, 刘泰. 2022. 球形地球模型的地震位错理论及其应用. 地震学报, 44(4): 711-731. doi: 10.11939/jass.20210134.

Sun W K, Fu G Y, Zhou X, Xu C Y, Tang H, Dong J, Zhou J C, Yang J Y, Wang W X, Liu T. 2022. Seismic dislocation theory of spherical Earth model and its application. Acta Seismologica Sinica, 44(4): 711-731. doi: 10.11939/jass.20210134.



球形地球模型的地震位错理论及其应用*

孙文科¹⁾ 付广裕²⁾ 周新³⁾ 徐长仪⁴⁾ 唐河¹⁾
董杰⁵⁾ 周江存⁶⁾ 杨君妍⁷⁾ 王武星⁷⁾ 刘泰⁷⁾

- 1) 中国北京 100049 中国科学院大学地球与行星科学学院
- 2) 中国北京 100083 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院
- 3) 中国北京 100085 应急管理部国家自然灾害防治研究院
- 4) 中国北京 100029 中国科学院地质与地球物理研究所
- 5) 中国北京 100036 中国测绘科学研究院
- 6) 中国武汉 430071 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院
- 7) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

摘要 地震位错理论是研究地震断层滑动与地球物理场变化之间关系的理论,是震源机制、地球内部构造、地震预测等基本地球物理问题与大地测量、地球物理观测数据之间的联系纽带。被广泛使用的半无限空间介质模型的位错理论,由于其几何模型的限制,在地震变形和地球动力学等应用研究中会导致一定程度的误差。此外,现代大地测量技术可以在全球和区域尺度上精确地观测地震变形,亟需一个适用于全球地震变形研究的地震位错理论。为此,本团队基于球形地球模型,经过多年系统性研究,建立了地震位错理论新体系。所构建的球形地球模型的地震位错理论,促进了全球地震变形和地球动力学变化的研究,是近年来地球物理学领域取得的重要理论进展之一。本文简要地介绍了国内球形地球模型地震位错理论的发展及其应用研究。首先,介绍了弹性球形地球模型、三维不均匀地球模型和黏弹地球模型的位错理论;其次,介绍球形地球模型的位错理论在地球动力学变化研究、断层与地下介质结构反演和地震大地测量学研究方面的相关应用;最后,对球形地球模型的位错理论的发展方向作出展望。

关键词 位错理论 球形地球 黏弹性 地壳变形 横向非均匀 全球动力学变化
doi: 10.11939/jass.20210134 **中图分类号:** P315.3, P315.01 **文献标识码:** A

* 基金项目 国家“QR”专项(110400EA42)、科学出版基金(第030号)、中科院/外专局创新团队基金(KZZD-EW-TZ-19)、国家自然科学基金面上项目(41174063, 41474059, 41874013, 41574021, 41274098, 41874026)和国家自然科学基金委青年项目(41704080、41604067)共同资助。

收稿日期 2021-08-10 收到初稿, 2021-12-08 决定采用修改稿。

作者简介 孙文科, 教授, 大地测量学与地球物理学专家, 主要从事地震位错理论及时变重力场应用等研究, e-mail: sunw@ucas.ac.cn



Seismic dislocation theory of spherical Earth model and its application

Sun Wenke¹⁾ Fu Guangyu²⁾ Zhou Xin³⁾ Xu Changyi⁴⁾ Tang He¹⁾
Dong Jie⁵⁾ Zhou Jiangcun⁶⁾ Yang Junyan⁷⁾ Wang Wuxing⁷⁾ Liu Tai⁷⁾

1) *College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

2) *School of Geophysics and Geoinformation Systems, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*

3) *National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management, Beijing 100085, China*

4) *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

5) *Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100036, China*

6) *Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China*

7) *Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*

Abstract: Seismic dislocation theory is the theory of studying the relationship between seismic fault slip and geophysical field change, and also it is the link between the source mechanism, the internal structure of the Earth, earthquake forecasting and other basic geophysical problems and geodetic-geophysical observation. The widely used dislocation theory of the semi-infinite medium model, due to the limitation of its geometric attribute, will riskily result in a certain degree of oversight and even fault in the application of seismic deformation and geodynamics analysis. In addition, modern geodesy technology can accurately observe seismic deformation on global and regional scales, and a suitable seismic dislocation theory born for global seismic deformation study is urgently required. For this purpose, our team has developed a new system of seismic dislocation theory based on the spherical Earth model through many years of systematic research. The establishment of such theory has promoted the study of global seismic deformation and geodynamic process, and expanded the study of earthquake-induced global geodynamic changes. This informative article briefly introduces the domestic development and application of seismic dislocation theory of spherical Earth model. The first section introduces the dislocation theory of elastic spherical Earth model, three-dimensional inhomogeneous Earth model and viscoelastic Earth model. The second section introduces the relevant applications of the dislocation theory of spherical Earth model in geodynamic change, fault and underground structure inversion and others in seismological geodesy. The seismic dislocation theory of the spherical Earth model has promoted the study of global seismic deformation and geodynamic changes. It is one of the important theoretical advances in the field of geophysics in recent years.

Key words: seismic dislocation theory; spherical earth; viscoelasticity; crustal deformation; lateral inhomogeneity; global dynamics changes

引言

地震是地球内部应力场作用下,断层发生摩擦、失稳及破裂的物理过程(Scholz, 1998)。从 Reid (1910) 提出弹性回跳理论、Love (1911) 建立经典地球弹性力学到 Steketee (1958) 将位错理论引入地震学,地球物理学家们逐渐建立了弹性动力学理论(地震波动理论),并将

该理论用于解释地球自由震荡和地震波等资料(如 [Alterman *et al*, 1959](#); [Gilbert, MacDonald, 1960](#); [Ben-Menahem, Toksöz, 1962](#); [Aki, 1964](#))。与此同时,用于断层破裂完成后静态变形场研究的理论——准静态地震位错理论也逐渐被建立起来,进一步促进了地震循环过程(震间—同震—震后)的研究(如 [Savage, Burford, 1973](#); [Savage, Prescott, 1978](#); [Savage, 1983](#))。

早期的准静态地震位错理论假设地球为无限半空间弹性体介质模型,即忽略了地球曲率和介质不均匀性,得到了断层错动引起的地表变形解析式(如 [Mindlin, Cheng, 1950](#); [Chinnery, 1961](#); [Maruyama, 1964](#); [Weertman, Weertman, 1964](#); [Press, 1965](#))。Okada (1985, 1992)整理了前人的工作,给出了均匀半无限空间模型中位移场及其空间导数的简洁表达式。在此基础上,Okubo (1991, 1992)给出了同震重力和位场变化的解析解。此外,有些研究人员考虑了地球的层状结构但忽略了地球曲率效应,通过汤姆森-哈斯克爾(Thomson-Haskell)传播矩阵方法([Thomson, 1950](#); [Haskell, 1953](#))获得了半无限空间的地表变形响应([Ben-Menahem, Singh, 1968](#); [Jovanovich *et al*, 1974a, b](#); [Rundle, 1980](#); [Roth, 1990](#); [Ma, Kusznir, 1992](#); [Wang *et al*, 2003, 2006](#))。目前以Okada (1985, 1992)、Okubo (1991, 1992)和Wang等(2006)为代表的研究人员所提出的半无限空间介质模型的位错理论已经发展得非常成熟,该理论可被用于计算地震产生的同震和震后变形,包括位移、倾斜、应变、大地水准面和重力变化等,因此广泛用于解释大地测量观测的近场地壳变形,对地震周期变形过程的研究起到了重要作用(如, [Rolandone *et al*, 2006](#); [Amoruso, Crescentini, 2009](#); [Dai *et al*, 2014](#); [Jiang *et al*, 2014](#); [周硕愚等, 2017](#); [Pan, 2019](#))。这些位错理论具有数学上的简洁性和解析性,但是由于半无限空间介质模型与真实地球差异较大,忽略了地球的几何曲率和层状结构效应,其计算结果存在较大的模型误差,不适于研究地震造成的大区域和全球尺度的地震变形、地球动力学变化等科学问题([Sun, Okubo, 2002](#); [孙文科, 2012b](#); [Dong *et al*, 2014](#))。

另一方面,传统大地测量手段(水准、三角网、三边网等)记录了地震引起的地壳变形([Savage, Hastie, 1969](#))。以准静态位错理论为基础,通过反演这些观测数据可以确定发震断层的几何参数和滑动分布,以理解地震的震源过程([Savage, Hastie, 1969](#); [陈运泰等, 1975, 1979](#))。然而,现代大地测量技术,特别是甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, 缩写为 VLBI)、全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite Systems, 缩写为 GNSS)、合成孔径雷达干涉(interferometric synthetic aperture radar, 缩写为 InSAR)、卫星测高、高精度卫星重力测量(包括: challenging mini-satellite payload, 缩写为 CHAMP; gravity recovery and climate experiment, 缩写为 GRACE; gravity field and steady-state ocean circulation explorer, 缩写为 GOCE; GRACE follow-on, 缩写为 GFO)等观测技术的出现和发展,使传统大地测量发生了革命性变化,进而催生了动力大地测量学研究,使我们能够以更高的精度和全球尺度研究地球内部结构、动力学过程和地震变形问题,有力地推动了地球科学的发展([许厚泽, 王广运, 1989](#); [孙文科, 1989, 2002](#); [胡明城, 2000](#); [陈俊勇, 2003](#); [Marotta, 2003](#); [Chao, 2003](#); [李建成等, 2006](#); [周硕愚等, 2008](#); [Krynski, 2012](#); [Bock, Melgar, 2016](#); [Fernández *et al*, 2017](#); [Pepe, Calò, 2017](#); [Braitenberg, 2018](#); [Giorgi *et al*, 2019](#); [Larson, 2019](#); [姚宜斌等, 2020](#); [Freymueller, 2021](#); [Wiesemeyer, Nothnagel, 2021](#))。现代观测技术克服了传统大地测量方法固有的局限性,具有全球、全天候、实时和连续的观测能力,为科学研究提供了规则、稠密和高质量的测量数据([Wdowinski, Eriksson, 2009](#); [Salvi *et al*, 2012](#); [Li *et al*, 2015](#); [Zhou *et al*, 2015](#); [Spaans, Hooper, 2016](#); [Zhu, 2016](#); [姚宜斌等, 2020](#))。特别是,现代大地测量技术可以观测地震周期

中不同阶段的变形,弥补了地震学与构造地质学之间的观测空白,逐步成为地壳运动及地震周期变形研究中不可或缺的观测手段(Segall, Davis, 1997; Allen, Ziv, 2011; Matsuo, Heki, 2011; Glennie *et al*, 2013; Meigs, 2013; Herring *et al*, 2016; Van Camp *et al*, 2017; Biggs, Wright, 2020; Wang, Shen, 2020). 对于上述大空间尺度的地震周期变形问题,基于半无限空间模型的地震位错理论不再适用,需要一个更适合的理论,如基于球形地球模型的地震位错理论,以开展震源机制、内部结构与断层反演、观测数据解释等科学问题的精细研究.

随着观测技术的不断更新,基于分层球形地球模型的地震位错理论经国内外多个研究团队的研究得以不断发展.例如,考虑地球曲率和径向不均匀性,在球坐标下可以采用传播矩阵(Thomson, 1950; Haskell, 1953)或龙格-库塔方法(Gilbert, Backus, 1966, 1968)得到地表同震变形(Wason, Singh, 1972; Israel, Ben-Menahem, 1974; Dahlen, 1974).但这些工作均对地球模型进行了不同程度的简化,如忽略了地球的固态内核结构、自引力和重力效应及介质的可压缩性等.Sun (1992)以及Sun和Okubo (1993)首次基于球对称、非自转、理想弹性和各向同性(spherically symmetric non-rotating elastic isotropic,缩写为SNREI)地球模型(Dahlen, 1968),考虑了介质的自引力和重力、可压缩性等多种因素,解决了同震重力变化和同震位移等问题,建立了球形地球模型位错理论的基本理论框架.同一时期,美国以Pollitz团队为代表,其对自重效应予以近似处理,用简正模方法独立研究了同震和震后变形问题(Pollitz, 1992, 1996, 1997);欧洲以Sabadini, Vermeersen和Spada团队为代表,他们也使用简正模方法研究了类似的问题,但其早期的工作并未同时考虑介质的可压缩和自重效应(Sabadini *et al*, 1984; Spada *et al*, 1992; Piersanti *et al*, 1995; Vermeersen *et al*, 1996; Cambiotti *et al*, 2009).需要指出的是,在以上研究组中孙文科团队最早针对包含固态内核-液态外核-固体地幔分层结构的地球模型,以严谨的理论同时考虑了介质的可压缩性、自引力和重力效应,提出了球形地球弹性位错理论的基本框架,并经过其学生和合作者得以不断发展和完善,最终构建了一个新的球形地球模型位错理论体系.该团队提出的基于球形地球模型的地震位错理论,开拓了全球地震变形及地震引起的动力学变化研究的新方向,扩展了现代大地测量在地震研究中的应用范围,深化了对地震破裂和震后变形机制的认识,取得了一系列创新性成果,主要包括以下两部分:

- 1) 建立了一套新的地震位错理论,推进了全球地震变形研究.定义了地震位错勒夫(Love)数和格林(Green)函数,构建了解决球形地球模型的地震变形问题的基本理论框架;发展了基于层状弹性地球模型、三维不均匀弹性地球模型和层状黏弹性地球模型的地震位错理论,并给出了不同变形物理量的渐近解;解决了同震和震后重力变化、位移、应变、库仑应力变化及其三维效应等问题.

- 2) 拓展了上述理论的应用范围,开拓了地震引起的动力学变化研究的新方向.发展了基于上述理论的断层滑动、位错勒夫数、黏弹性结构的反演方法;估计了GRACE卫星对地震重力变化的检测潜力;建立了同震垂线偏差变化理论,拓展了GRACE的应用范围;提出了地震引起的地球膨胀和质心偏移理论;定量分析了全球地震产生的地球自转、体积、势能等动力学因子变化;推进了全球地震变形以及相关地球动力学变化研究.

该团队关于地震位错理论和相关应用目前共发表了近100篇科学论文,这些论文分散于众多文献中.为了使广大科研人员,特别是地震科研人员,能够较全面地了解该理论,本文将就该位错理论成果作一个报道性介绍.需要特别声明的是,本文不是对地震位错理论的国

内外发展历史进行全方位总结和回顾,而是针对本团队所建立的球形地球模型地震位错理论的研究成果加以概括性介绍,以期阐明本理论的基本面貌及相关应用的最新进展,并对位错理论的发展方向作出展望。

本文首先简要介绍球形位错理论的创建过程,包括弹性位错理论的提出、三维横向非均匀理论的创建、黏弹性位错理论的发展和完善;然后介绍地震位错理论的应用,包括全球地震变形场的解释、断层模型和地下结构的反演以及对空间大地观测技术的应用拓展等;最后对位错理论的发展方向进行简要讨论。

1 球形地球模型地震位错理论的发展

地震位错理论是研究震源机制、反演断层、解释观测数据等的必要理论基础,在震学、地球动力学、大地测量学中占有核心地位。地震位错理论需要基于一定的地球模型来建立,它相当于地震震源与地震变形之间的系统函数,从理论上给出地球在地震力源作用下的变形响应。由于位错理论的计算精度取决于地球模型,地球模型的准确与否将直接影响理论计算精度及其适用范围。所以,基于合理的地球模型来建立位错理论具有重要科学意义。

为精确地计算同震和震后变形、合理地解释全球大地测量观测数据、更准确地反演断层滑动分布,本团队在研究中采用了球形地球模型,并据此建立了地震位错理论新体系。新位错理论包含地球曲率、层状结构效应、黏弹性效应、三维非均匀效应等,在物理上更严谨、更合理,同时适用范围更宽泛。

而建立球形地球模型的位错理论需要采用与半无限空间位错理论不同的研究思路和数学方法,需要在球坐标系中求解地震变形的偏微分方程组,解决积分变换、级数收敛、积分稳定性等一系列数学问题。根据观测技术以及理论本身的发展,本研究团队先后针对一维分层弹性球形地球模型、三维不均匀弹性球形地球模型、一维分层黏弹性球形地球模型建立了不同的理论分支,形成了较完善的地震位错理论体系。

1.1 弹性球形地球模型的地震位错理论

球形地球模型的地震位错理论首先采用一维分层球形弹性地球模型,即球对称、不旋转、弹性和横向各向同性的地球模型(SNREI模型, Dahlen, 1968)。SNREI模型是一大类地球模型,其中1066A模型(Gilbert, Dziewonski, 1975)、PREM模型(Dziewonski, Anderson, 1981)和IASP91模型(Kennett, Engdahl, 1991)等被广泛使用。基于1066A和PREM模型,孙文科等提出了弹性球形地球模型的地震位错理论。采用半解析半数值方法求解地震变形的微分方程组,定义了地震位错勒夫数,克服了勒夫数计算、求和、截断和加速收敛等数值计算困难,给出了四个独立点震源的格林函数(Sun, 1992, 2003, 2004a, b; Sun, Okubo, 1993, 1998; Sun *et al.*, 2006a, 2009),并在此基础上进一步给出了计算任意有限断层在任意位置产生变形的数值积分算法(Sun, Okubo, 1998)。利用该理论可以解释实际地震产生的位移、应变、重力位、重力等的同震变化,为地表同震变形解释、断层破裂反演等研究奠定了基础,目前也已被广泛使用。更重要的是,这些研究搭建了球形地球模型位错理论的理论框架,为后续发展三维地球变形和黏弹性地球变形理论奠定了基础。

团队随后对地表破裂源、地震造成的地球动力学变化等问题进行了研究,扩展了地震位错理论的内涵及其适用范围。例如:孙文科和董杰借助互易定理(Okubo, 1993)推导了地表破裂源产生的地表变形的地震位错勒夫数和格林函数,解决了地表震源的奇异解问题(Sun,

Dong, 2013); 徐长仪和周江存等给出了地震造成的地球体积变化、低阶重力场系数变化、地球自转变化和重力势能变化的计算公式(Zhou *et al.*, 2013, 2014a, 2016; Xu, Sun, 2014; Xu *et al.*, 2014; Xu, Chao, 2017; Xu, 2021); 孙文科、徐长仪和周江存等给出了特大地震造成的地心移动解(Sun, Dong, 2014; Xu, Chao, 2015; Zhou *et al.*, 2015). 近几年周江存等提出了计算位错勒夫数的近似解析解方法, 提高了计算效率, 同时解决了内部格林函数的收敛问题(Zhou *et al.*, 2019a, b, 2020).

迄今为止, 上述弹性球形地球模型的地震位错理论已经得到了广泛的应用. 利用地震变形格林函数, Sun 和 Okubo (1998) 成功地解释了 1964 年阿拉斯加 $M_w 9.2$ 大地震的同震重力变化, 其理论计算结果与观测的重力变化基本吻合, 表明新理论可以合理地解释现代大地测量技术观测到的同震变形. 此外, 为了便于国内科研人员使用该理论, 付广裕和孙文科(2012b) 撰文详细地介绍了球体位错理论计算程序的总体设计与具体实现过程, 并开始科学社区分享其 Fortran 程序, 得到了学界的认可. 更重要的是, 该理论因其物理模型的合理性而优于半无限空间位错理论, 为地球物理学、大地测量学和地球动力学等应用提供了全新的、可靠的理论保证(孙文科, 2012b). 该理论已经成功应用于地震断层破裂反演、地震解释以及火山产生的变形, 并且可以用来解释同震变化(Okubo, 2020). 例如, Imanishi 等(2004) 利用我们团队的球形地球位错理论合理解释了超导重力仪记录到的 2003 年日本十胜冲(Tokachi-Oki) $M_w 8.3$ 地震产生的亚微伽级重力变化, 该研究结果发表在国际著名期刊 *Science* 上, 属于世界上首次报道亚微伽级同震重力变化.

2012 年孙文科系统地总结了弹性地震位错理论与部分应用的研究成果, 撰写了专著《地震位错理论》(孙文科, 2012a), 这是目前国内关于球形地球模型位错理论的唯一专著.

1.2 三维不均匀弹性地球模型的地震位错理论

随着现代大地测量观测精度的日益提高, 真实三维地球结构对地震变形的影响逐步被观测到(Hu *et al.*, 2004; Suito, Freymueller, 2009; Freed *et al.*, 2017; Diao *et al.*, 2018; Tian *et al.*, 2021), 然而上述基于球对称地球模型的地震位错理论却无法体现局部的三维效应. 为了提升地震变形的理论支撑作用、提高对地震变形观测数据的解析能力, 在上述一维球形模型的地震位错理论基础之上, 付广裕等提出了三维不均匀地球模型的地震位错理论(Fu, Sun, 2007, 2008, 2009; Fu *et al.*, 2010; 付广裕, 孙文科, 2012a).

基于微扰方法的三维地球模型的位错理论, 提高了地震变形和重力潮汐的计算精度. 具体地说, Fu 和 Sun (2007) 推导了密度的横向增量对重力潮汐影响的计算公式, 弥补了 Molodenskiy (1980) 理论的不足, 并计算了半日潮重力潮汐因子的全球分布, 为三维地球模型的地震变形研究提供了参考. 之后, 就三维地球模型的地震变形问题, 将实际三维不均匀地球分解成球对称地球模型和对应的横向不均匀增量, 分别进行计算得到球对称解和三维响应, 之后叠加得到最终变形(Fu, Sun, 2007, 2008, 2009; Fu *et al.*, 2010). 球对称解可以直接利用上述球对称地球模型位错理论(Sun, 1992) 计算得到. 三维响应即地球的横向不均匀结构对同震物理场变化的影响可以分为震源的响应和地球横向不均匀结构的响应, 可分别由震源函数的扰动及平衡方程式的变分来求解. 经过理论推导, 给出了六个特殊点源位错引起的位移、重力变化等计算公式(一个垂直走滑位错, 两个相互垂直的倾滑位错, 三个引张位错). 对这些公式进行线性组合即可计算任意位置、任意类型位错产生的同震变化. 依据

36阶P波速度模型, Fu和Sun(2008, 2009)利用岩石试验经验关系式推导出三维S波速度模型和密度模型, 并计算出三种典型类型的点源位错产生的同震重力变化, 其结果显示三维响应与位错类型、震源深度均相关, 其最大响应约占球对称解的0.5%, 且S波速度模型的影响最大. 数值结果同时表明: 三维响应中震源的响应与地球横向不均匀结构的响应处于同一量级, 地球横向不均匀结构对同震位移的贡献达到球对称解的1%—2%(Fu et al, 2010; 付广裕, 孙文科, 2012a).

上述研究成果得到了国内外同行的普遍认可. 发表在*Science*上的Ito和Simons(2011)一文将Fu和Sun(2007)的成果视为潮汐理论研究领域的重要进展加以介绍. 国际大地测量联合会2015年度的Bomford奖获得者Yoshiyuki Tanaka博士在多篇论文中引用上述研究(Tanaka et al, 2006, 2007, 2009), 将其视为位错理论研究领域的前沿进展加以介绍. 在孙文科教授的专著《地震位错理论》序言中, 许厚泽院士用一句话将上述研究总结如下: “……利用变分方法研究了极为困难的三维地球模型的同震变形问题”. 这均说明三维不均匀地球模型的地震位错理论虽然难度很大, 但是它在实际应用中具有重要意义和价值.

1.3 黏弹地球模型的地震位错理论

地球介质除具有弹性性质之外, 其在较长时间尺度上还具有显著的流变特性(Takeuchi, Hasegawa, 1965; Anderson, O'Connell, 1967; 汪汉胜等, 1997; Peltier, 2021); 地震变形除了呈现明显的同震变形外, 还表现出显著的震后变形(Nur, Mavko, 1974; Freed, Bürgmann, 2004; Wang, 2007; Chen et al, 2011). 大地震的震后变形已经被现代大地测量技术清晰地观测到, 例如, GNSS、InSAR和GRACE均可检测到震后信号(Panet et al, 2007; Ryder et al, 2007; Wang et al, 2012; 刘泰等, 2017; Cambiotti, 2020). 为了解释震后变形观测数据, 需要建立基于黏弹性地球模型的地震位错理论.

为此, 很多学者针对黏弹性地球模型加以研究, 提出了相应的计算方法, 例如简正模叠加、回路积分和Post-Widder等方法(Pollitz, 1997; Wang, 1999; Tanaka et al, 2006, 2007; Melini et al, 2008). 然而, 黏弹地球模型的地震位错理论的发展具有一定的挑战性, 对于复杂的黏弹性结构地球模型, 始终存在数值计算困难. 例如: 简正模方法无法处理地球的径向连续结构或介质的可压缩性; 回路积分方法需要针对特定黏弹性模型, 通过数值搜索方法确定积分路径; Post-Widder的实现需要扩展精度函数库. 总之, 简正模分布复杂、积分核数值震荡、收敛慢、计算量大等问题均未得到完美解决(唐河, 孙文科, 2021). 为此, 唐河和孙文科基于上述弹性位错理论的基本思想, 发展和完善了基于黏弹地球模型的地震位错理论(Tang, Sun, 2019; Tang et al, 2020a, b).

黏弹性变形理论的核心是在复数域计算复勒夫数, 并进行逆拉普拉斯(Laplace)变换以得到时域勒夫数. 首先将黏弹性地震变形方程组进行拉普拉斯变换至复数域, 转换为拉普拉斯域内的等效弹性问题, 从而可以利用上述弹性位错理论的处理方案加以解决, 得到复域的地震位错勒夫数和格林函数. 该步骤所使用的计算方法已在弹性理论中得到充分验证, 可以确保计算的准确性. 之后, 在将复域解变换回时间域解时, 需要处理逆拉普拉斯数值积分, 但积分核的震荡特性造成了严重的数值积分困难, 极具挑战性. 为此, 我们对逆拉普拉斯积分核作分式函数近似和级数展开(Valsa, Brancik, 1998; Tang, Sun, 2019; Tang et al, 2020a, b), 得到一个交错级数, 从而使得时域勒夫数的计算表达为沿虚轴采样的复勒夫数之和. 本方法采用的逆拉普拉斯积分方法也已在电气工程等多个领域得到充分验证, 具有很高的计

算精度. 这样, 我们构建了一种新的计算黏弹性地震变形的虚轴积分方法, 这是黏弹地震变形理论的最新方法. 该方法对于任意线性黏弹性地球模型和任意力源类型均适用, 且具有一致的计算精度, 其计算方法实现简单、收敛快, 不需要扩展精度函数库. 因此, 该方法非常适于黏弹性结构的反演研究. 此外, 本团队还发展了黏弹性均质球模型的震后变形解析解. 例如, Tang 和 Sun (2018a, b) 针对有自重和无自重两种可压缩黏弹均质地球模型, 基于对应性原理和解析逆拉普拉斯变换, 首次得到了时间域内位错勒夫数和格林函数的解析形式. 解析的地震变形格林函数阐明了介质参数与变形物理场之间明确的函数关系, 同时也适用于近场地震变形的理论计算. 上述理论的计算程序已发布在本团队开发的“地震变形计算平台” (<http://124.207.150.85:8085/>和 <http://10.16.24.41:8085/>), 成为计算震后变形的核心方法, 适用于解释大地测量观测数据、理解震后变形机理、反演地球内部黏滞结构等科学问题研究.

2 球形地球模型地震位错理论的应用

上述球形地球模型地震位错理论为解决地震变形的相关问题提供了可靠的理论工具. 通过球形地球模型地震位错理论, 既可以根据震源参数计算地震变形, 也可以根据地表变形反演震源参数和地球介质结构. 我们提出的球形地球模型地震位错理论考虑了地球的分层、曲率效应、黏弹性结构、三维非均匀等, 可以在全球地球动力学变化、地球内部黏弹性结构、断层反演等方面得到广泛应用, 为深化地震周期过程的认识和地球动力学变化研究提供了有力支持. 特别是, 由于考虑了地球的球形形状, 新地震位错理论具有研究地震全球动力学变化的独特潜力, 而传统半无限空间理论无法做到. 另一方面, 现代大地测量观测技术提供的全球性的地震周期变形数据, 也需要在球面上进行精细的建模和解释, 以便保持模型的一致性. 上述球形地球模型地震位错理论正好可以满足现代大地测量学和地震学发展的需求, 为地震周期性循环过程的研究提供理论基础.

本团队在发展理论本身的同时, 也就实际的地震变形问题, 特别是特大地震事件, 进行了针对性的理论扩展和应用研究. 例如, 针对地震造成的地球质心、体积、自转和势能变化等相关动力学变化问题, 我们给出相应的计算方法, 并根据实际的断层模型给出其定量结果. 此外, 还针对 GNSS 和 GRACE 这两种非常重要的现代大地测量观测技术, 发展了利用远、近场 GNSS 数据约束断层反演的新方法, 提出了利用 GRACE 震后重力变化反演区域黏弹性结构的新途径. 研究表明: 远场位移可有效地约束断层反演, 综合震后位移以及重力变化可以确定黏弹性参数等. 总之, 地震位错理论应用研究可以大体归纳为以下几点.

2.1 地震引起的地球动力学变化

地震造成的地球内部质量重新分布不仅会引起地表位移和重力等物理场变化, 而且会产生全球动力学变化, 包括地心移动、体积变化、自转变化和势能变化等 (Anderson, 1974; Dahlen, 1977; Chao, Gross, 1987; Soldati, Spada, 1999; Ni *et al.*, 2005). 这些动力学变化对于理解地球内部物质循环、各圈层相互作用及其时空演化具有重要意义. 由于本团队的地震位错理论是基于球形地球模型而建立, 因此该理论具备研究全球动力学变化相关问题的优势.

基于上述球形地球模型位错理论和相应的基本物理定律, 本团队发展了同震地心、地球体积、自转和势能等动力学参数变化的计算方法 (Zhou *et al.*, 2013, 2014a, 2015, 2016; Sun, Dong, 2014; Xu, Sun, 2014; Xu *et al.*, 2014, 2016; Xu, Chao, 2015, 2017, 2019; Xu, 2021). 我们定量分析了几次大地震对地球极移和日长变化的影响, 以及对地球参考框架中的质心

位移和坐标轴指向变化的影响(Zhou *et al.*, 2013, 2014a, 2015, 2016; Xu, Chao, 2015, 2019). 首次将地震作为部分物理激发源, 解释现代大地测量观测的地球膨胀现象, 并联合全球板块运动模型给出了不同时间尺度下的地球膨胀速率, 确定了地震在板块运动中的角色(Xu *et al.*, 2016); 修正了计算同震日长变化的传统公式, 并指出地震造成的地球转动惯量变化的张量迹不为零、不能被省略, 并且提出了相应的数值计算方法(Zhou *et al.*, 2014a); 估计了全球大地震产生的地球自转累积变化, 发现地震对地球自转轴长期漂移具有显著影响, 是不可忽略的, 并基于此提出了地球动力学参数变化新模型(Xu, Chao, 2019).

由于传统的地震学方法无法有效地估计地震产生的势能变化, 本团队还提出了同震地球旋转动能和重力势能的计算方法. 该方法不但适用于剪切型地震, 而且适用于拉张型地震, 为有效地研究同震重力势能变化与构造对应关系提供了理论基础(周江存等, 2017; Xu, Chao, 2017; Xu, 2021). 据此, 我们还分析了不同类型地震所产生的地球重力势能变化特征, 结果表明地震产生的重力势能变化在地球内部的各个深度均有分布(周江存等, 2017; Xu, Chao, 2017). Xu 和 Chao (2017) 估计了全球历史地震产生的净重力势能以及对各圈层的影响, 发现同震重力势能能流密度变化率约为全球平均大地热流的 15%; 并提出地震释放的重力势能可能作为区域热异常物理成因的假设, 对地幔热机和地球长期演化研究具有启示作用.

2.2 断层滑动和介质结构的反演

地震位错理论不仅可以用于解释全球地震变形和地球动力学变化, 还可以用于反演断层滑动、约束震源参数和地下介质结构(Yamasaki, Houseman, 2012; Zhou *et al.*, 2014b). 利用大地测量和地球物理学观测数据对断层滑动分布、地下介质结构进行反演研究已逐渐成为一项常规性工作(Yabuki, Matsu'ura, 1992; Reilinger *et al.*, 2000; Beresnev, 2003; Ide, 2007; Sun, Hartzell, 2014; Diao *et al.*, 2019). 然而, 前人的反演通常是基于均匀或层状半无限空间模型计算的格林函数来进行. 由于地球模型的过分简化必然会把地球模型的误差通过格林函数传递到反演结果中, 从而影响对震源或地下结构的正确约束(Masterlark, 2003; Williams, Wallace, 2015; Gómez *et al.*, 2017; Marchandon *et al.*, 2021), 因此, 本团队使用接近于真实地球的球形地球模型来计算地震变形格林函数, 并以数学上更为严密的和客观的马尔科夫链-蒙特卡洛(Markov chain Monte Carlo)算法来确定正则化因子, 提出了一套基于球形地球位错理论的断层滑动模型反演方法(Zhou *et al.*, 2014b, 2018; 周新, 2017). 利用上述反演方法和应用程序, 我们研究了 2004 年苏门答腊 M_w 9.3 和 2011 年日本东北 M_w 9.0 等地震的同震-震后位移、空间/地面重力变化、断层滑动分布和震后慢滑动等地震变形问题(Zhou *et al.*, 2014b, 2018; 刘泰等, 2017, 2019)以及青藏高原动力学变化问题(周新等, 2018).

地震位错勒夫数和格林函数描述了地球介质对地震断层滑动的物理响应, 反映了地下三维介质的结构信息, 由大地测量观测数据反演的地震位错勒夫数和格林函数, 可以体现研究区域的三维构造特征. 本团队还提出了利用地震变形观测数据反演位错勒夫数和格林函数的方法, 为约束区域三维结构提供了新思路. Sun 等(2006b)提出了利用 GRACE 观测数据反演地震引力位变化勒夫数的基本思想; 杨君妍等进一步发展完善了该反演方法, 并以 2011 年日本东北 M_w 9.0 地震为例, 利用 GRACE 和 GNSS 观测数据, 实际反演了体现局部构造特征的地震位错勒夫数和格林函数, 证实了该理论方法的可行性(Yang *et al.*, 2015; Yang, Sun, 2020; 杨君妍, 孙文科, 2020). 该方法可以用来计算地震多发地区的地震位错勒夫数和

格林函数,用于准确计算该区域的理论地震变形或反演地球局部构造。

应用地震位错理论还可以反演地下的黏弹性参数。黏滞结构是地球最基本物理参数之一,是理解板块运动、俯冲带应力状态、冰后均衡调整(glacial isostatic adjustment,缩写为GIA)等科学问题的关键因素,然而如何精确地确定黏滞参数仍然是地球物理学特别是地球动力学亟需解决的科学问题(Cathles, 1975; Weertman, Weertman, 1975; Forte *et al*, 1991; Fang, Hager, 1996; Cornelio, Violay, 2020; Argus *et al*, 2021)。为此,王武星和张国庆等利用GRACE观测数据以及上述地震位错理论,反演了2004年苏门答腊 M_w 9.3大地震震源区的黏滞参数,揭示了发震断层上盘与下盘黏滞参数的横向差异(Wang *et al*, 2011; 张国庆等, 2015)。针对2011年日本 M_w 9.0地震产生的震后变形,刘泰等(2017)提出了基于不同时间尺度的震后变形来分离断层余滑和黏滞变形的的方法,其结果表明:可以以震后短期观测数据来反演断层余滑分布,以长期观测数据约束黏滞参数;该地震断层余滑两年后基本消失,四年后地幔黏滞性松弛效应超过断层余滑。该成果加深了对震后余滑时空分布和地幔黏滞性结构横向特征的认识。此外,梁明等(2018)还提出基于GNSS观测数据初步估算区域整体黏滞性结构,再利用GRACE观测数据修正深部黏滞系数,然后综合利用这两种观测数据调整黏滞系数,最终确定研究区域黏滞性结构的新方法。另外,陈飞等(2020)的研究结果也显示远场震后变形观测数据对地幔深部黏滞结构比较敏感,因此实际震后变形模拟时需考虑一个随深度变化的黏滞性模型。

2.3 空间观测技术的地震变形应用

重力卫星GRACE是现代大地测量主要技术之一,在地球科学中已经得到了广泛应用(Adam, 2002; Tapley *et al*, 2019; 张岚, 孙文科, 2022)。然而,GRACE能否检测到地震产生的重力变化,以及能否用来研究重力垂线偏差等是科研人员感兴趣但尚未解答的科学问题。另一方面,大地震通常发生在海陆俯冲带上,海域一般缺乏有效的地表变形观测,这使得断层滑动分布的反演变得非常困难。虽然GRACE具有观测包括海域在内的全球地震重力变化的潜力,但是由于缺少相关的理论支持,GRACE观测数据的应用颇为受限。

为此,Sun和Okubo(2004)最早对GRACE的地震变形检测能力进行了估计和预测。通过对地震位错勒夫数的球谐谱分析,他们发现GRACE可以检测出 $M > 9.0$ 剪切型地震或 $M > 7.5$ 张裂型地震的同震重力变化,该结论被随后发生的2004年苏门答腊地震所证实(Han *et al*, 2006)。本项研究成果首次阐明了GRACE对大地震的观测能力和范围,为重力卫星项目的科学规划提供了理论依据。之后,徐长仪等利用该理论和GRACE数据,成功地观测到2013年鄂霍次克海超深源地震 M_w 8.3产生的同震重力变化,为进一步研究超深源地震的震源机制和变形特征提供了大地测量学途径(Xu *et al*, 2017)。

我们发展了计算同震垂线偏差的新方法,为利用GRACE观测数据研究海域大地震变形问题提供了新途径。Sun和Zhou(2012)在上述球形地球模型地震位错理论的基础上,进一步发展了计算同震垂线偏差的新方法,使得利用GRACE观测数据研究海域地震变形问题极为方便。2011年日本东北大地震的研究结果表明,GRACE完全可以检测到大地震产生的垂线偏差变化(Sun, Zhou, 2012),并且该变化对断层滑动模型更为敏感,为利用卫星重力观测数据研究地震断层滑动分布提供了新方法。本研究拓展了GRACE卫星数据的应用范围。

应用本团队的地震位错理论可以合理地解释全球地震变形观测数据如GNSS等。GNSS也是现代大地测量的主要技术之一,可以检测出接近全球范围内的同震和震后变形

(Abidin *et al.*, 2009; Vernant, 2015; Gautam *et al.*, 2020). Fu 和 Sun (2006) 基于上述地震位错理论, 发现 2004 年苏门答腊-安达曼地震在 6 000 km 以外可以产生 1 mm 的同震水平位移, 并可以被 GPS 观测到. 通过理论计算和实际震例研究, 王武星等发现中国大陆远场 GPS 同震位移场对环太平洋俯冲型地震震源机制具有约束能力(Wang *et al.*, 2014). Wang 等(2014) 利用中国地壳运动观测网的 GPS 资料提取了 2011 年日本 $M_w 9.0$ 地震引起的远场同震位移, 并与理论同震位移进行了比较, 其结果表明, 近场位移可以更好地约束断层的几何形态, 而远场 GPS 位移场可以约束断层滑动模型的地震矩. 该研究结果扩展了远场 GPS 观测数据在地震变形研究中的应用潜力(Wang *et al.*, 2014). 此外, 周新等(2018) 以主喜马拉雅逆冲断层为例, 模拟了同震和震间过程产生的大地水准面、重力和重力梯度变化, 其结果显示地表的同震重力变化呈南北两极分布, 足以被陆地重力测量所检测到.

3 讨论与结论

本文提纲挈领地介绍了本团队在球形地球模型的地震位错理论及其应用方面的科学贡献. 该理论体系同时考虑了地球介质的自重效应、可压缩性、黏弹性、径向分层结构等因素, 可以准确地模拟地震产生的位移、重力、应变、大地水准面、库仑应力变化、地球极移、势能变化等物理量, 可归纳为两个方面: ① 基于分层弹性球形地球、三维不均匀弹性地球模型、分层黏弹性地球模型的位错理论; ② 球形地球模型位错理论在研究地震引起的地球动力学变化、反演断层滑动和地下介质结构、解释空间大地测量技术等方面的科学应用.

该理论体系建立了地震震源和变形场之间的理论联系, 为研究震间变形、同震破裂和震后变形等提供了理论工具. 同时, 通过该理论的实际应用, 解释了多个大地震的同震-震后变形数据, 反演了断层滑动模型和地下黏弹性参数, 深化了对地震循环过程的认识, 凸显了球形位错理论在地震学和大地测量学研究中的理论支撑作用和广泛应用前景. 因此, 该理论对于推进地震基础理论进步、提升防震减灾科技支撑能力、推动大地震预测预报、服务我国防震减灾工作等具有重要意义.

限于本文讨论的范围, 对于分层半无限空间模型的位错理论(如, Wang *et al.*, 2006) 以及有限元类地震变形数值计算理论和方法(如, 林晓光, 孙文科, 2014; Cheng *et al.*, 2019) 均未进行更多介绍, 感兴趣的读者请参考其它文献. 就数值类计算方法而言, 它们可以针对更复杂的三维模型给出同震和震后变形的计算结果, 但计算过程一般需要大型机器, 可以预先计算一些三维模型的地震变形格林函数库, 为一般用户进行地震变形观测数据解释以及断层和地下结构反演提供基础数据.

位错理论发展以地球几何模型的逐步完善为主线, 目前以一维规则分层模型和基于微扰方法的三维模型为主. 本文所介绍的三维不均匀弹性地球模型的位错理论也是基于微扰方法建立, 尚不能考虑大幅度的横向非均匀性效应. 我们也正在思考位错理论中包含地球的椭球效应、地形效应、内部介面起伏, 甚至是复杂的横向非均匀性效应. 在一维地震变形理论基础, 借鉴和拓展固体潮理论中的相关方法, 应当可以直接考虑椭球效应、地形和内部界面的起伏, 并求解地震变形微分方程组、建立相关理论和方法. 而针对复杂的横向非均匀性效应, 需要从数学上寻求其它新的方法, 突破微扰方法的限制, 才能基于接近于真实三维地球模型建立相关理论. 此外, 针对三维复杂地球模型, 如何有效结合解析计算和数值计算的优势, 在数值计算中充分利用部分解析计算, 降低三维模型的计算时长, 提出一种“混合

模式”的计算理论和方法,也是一个值得探讨的问题。总之,笔者认为基于更精密的三维地球模型的位错理论和相关应用是本理论的前进方向,准静态位错理论将继续推进地震周期过程、地球内部介质结构和地球内部动力学过程等重要科学问题的深入研究。

感谢审稿专家提出建设性的修改意见。

参 考 文 献

- 陈飞, 刘泰, 付广裕, 余雅文. 2020. 震后 GPS 观测数据揭示的日本 $M_w9.0$ 地震周边地区地幔黏滞性结构垂向变化 [J]. *地球物理学报*, **63**(6): 2210–2220.
- Chen F, Liu T, Fu G Y, She Y W. 2020. Variation of the mantle viscosity around the Tohoku-Oki $M_w9.0$ earthquake revealed by post-seismic GPS data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **63**(6): 2210–2220 (in Chinese).
- 陈俊勇. 2003. 现代大地测量学的进展 [J]. *测绘科学*, **28**(2): 1–5.
- Chen J Y. 2003. On the development of modern geodesy[J]. *Science of Surveying and Mapping*, **28**(2): 1–5 (in Chinese).
- 陈运泰, 林邦慧, 林中洋, 李志勇. 1975. 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*, **18**(3): 164–182.
- Chen Y T, Lin B H, Lin Z Y, Li Z Y. 1975. The focal mechanism of the 1966 Hsingtai (邢台) earthquake as inferred from the ground deformation observations[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **18**(3): 164–182 (in Chinese).
- 陈运泰, 林邦慧, 王新华, 黄立人, 刘妙龙. 1979. 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*, **22**(3): 201–217.
- Chen Y T, Lin B H, Wang X H, Huang L R, Liu M L. 1979. A dislocation model of the Tangshan (唐山) earthquake of 1976 from the inversion of geodetic data[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **22**(3): 201–217 (in Chinese).
- 付广裕, 孙文科. 2012a. 地球横向不均匀结构对地表以及空间固定点同震重力变化的影响 [J]. *地球物理学报*, **55**(8): 2728–2746.
- Fu G Y, Sun W K. 2012a. Effects of earth's lateral heterogeneity on co-seismic gravity changes at deformed earth surface and space-fixed point[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(8): 2728–2746 (in Chinese).
- 付广裕, 孙文科. 2012b. 球体位错理论计算程序的总体设计与具体实现 [J]. *地震*, **32**(2): 73–87.
- Fu G Y, Sun W K. 2012b. Overall design and specific structures of the computing codes for coseismic deformations on a layered spherical earth[J]. *Earthquake*, **32**(2): 73–87 (in Chinese).
- 胡明城. 2000. 现代大地测量学 [J]. *测绘通报*, (5): 3.
- Hu M C. 2000. Modern geodesy[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (5): 3 (in Chinese).
- 李建成, 宁津生, 晁定波, 姜卫平. 2006. 卫星测高在大地测量学中的应用及进展 [J]. *测绘科学*, **31**(6): 19–23.
- Li J C, Ning J S, Chao D B, Jiang W P. 2006. The applications and progress of satellite altimetry in geodesy[J]. *Science of Surveying and Mapping*, **31**(6): 19–23 (in Chinese).
- 梁明, 王武星, 张晶. 2018. 联合 GPS 和 GRACE 观测研究日本 $M_w9.0$ 地震震后变形机制 [J]. *地球物理学报*, **61**(7): 2691–2704.
- Liang M, Wang W X, Zhang J. 2018. Post-seismic deformation mechanism of the $M_w9.0$ Tohoku-Oki earthquake detected by GPS and GRACE observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **61**(7): 2691–2704 (in Chinese).
- 林晓光, 孙文科. 2014. 地形效应和局部地质构造对计算同震形变的影响: 以 2011 年日本东北大地震($M_w9.0$)为例 [J]. *地球物理学报*, **57**(8): 2530–2540.
- Lin X G, Sun W K. 2014. Effects of topography and local geological structure on computing co-seismic deformation: A case study of the 2011 Japan Tohoku earthquake ($M_w9.0$) [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(8): 2530–2540 (in Chinese).
- 刘泰, 付广裕, 周新, 苏小宁. 2017. 2011 年日本 $M_w9.0$ 地震震后形变机制与震源区总体构造特征 [J]. *地球物理学报*, **60**(9): 3406–3417.
- Liu T, Fu G Y, Zhou X, Su X N. 2017. Mechanism of post-seismic deformations following the 2011 Tohoku-Oki $M_w9.0$ earth-

- quake and general structure of lithosphere around the source[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **60**(9): 3406–3417 (in Chinese).
- 刘泰, 付广裕, 邹镇宇. 2019. 2004年苏门答腊地震粘滞性松弛效应对华南地区地壳水平活动的影响[J]. *地震*, **39**(2): 37–45.
- Liu T, Fu G Y, Zou Z Y. 2019. Effect of viscoelastic relaxation following the 2004 Sumatra earthquake on horizontal crustal movement in South China[J]. *Earthquake*, **39**(2): 37–45 (in Chinese).
- 孙文科. 1989. 空间大地测量技术在板块构造及地壳形变中的应用[J]. *地球物理学报*, **32**(3): 339–346.
- Sun W K. 1989. Applications of spatial geodetic in plate structure and crust deformation[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **32**(3): 339–346 (in Chinese).
- 孙文科. 2002. 低轨道人造卫星(CHAMP、GRACE、GOCE)与高精度地球重力场: 卫星重力大地测量的最新发展及其对地球科学的重大影响[J]. *大地测量与地球动力学*, **22**(1): 92–100.
- Sun W K. 2002. Satellite in low orbit (CHAMP, GRACE, GOCE) and high precision earth gravity field: The latest progress of satellite gravity geodesy and its great influence on geoscience[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **22**(1): 92–100 (in Chinese).
- 孙文科. 2012a. 地震位错理论[M]. 北京: 科学出版社: 14–56.
- Sun W K. 2012a. *Seismic Dislocation Theory*[M]. Beijing: Science Press: 14–56 (in Chinese).
- 孙文科. 2012b. 地震位错理论在地震学研究中的作用与存在的问题[J]. *国际地震动态*, (6): 17.
- Sun W K. 2012b. Application of dislocation theories in seismological study and existing problems[J]. *Recent Developments in World Seismology*, (6): 17 (in Chinese).
- 唐河, 孙文科. 2021. 黏弹地球地震变形理论研究进展和展望[J]. *地球与行星物理评论*, **52**(1): 11–26.
- Tang H, Sun W K. 2021. Progress and prospect of deformation theory in the viscoelastic earth[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, **52**(1): 11–26 (in Chinese).
- 汪汉胜, 李国营, 许厚泽. 1997. SNRVEI地球模型连续分布的简正模及其意义[J]. *地球物理学报*, **40**(1): 78–84.
- Wang H S, Li G Y, Xu H Z. 1997. Continuously distributed modes of SNRVEI earth model and their effects[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **40**(1): 78–84 (in Chinese).
- 许厚泽, 王广运. 1989. 动力大地测量学: 研究地球动态变化的新学科[J]. *地球科学进展*, **4**(4): 9–15.
- Xu H Z, Wang G Y. 1989. Dynamic geodesy: A new discipline for studying the dynamic changes of the earth[J]. *Advances in Earth Science*, **4**(4): 9–15 (in Chinese).
- 杨君妍, 孙文科. 2020. 利用大地测量数据反演地震位错 Love 数和格林函数的理论与方法[J]. *地球物理学报*, **63**(8): 2912–2923.
- Yang J Y, Sun W K. 2020. The theory and method of determining dislocation Love number and Green's function using geodetic data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **63**(8): 2912–2923 (in Chinese).
- 姚宜斌, 杨元喜, 孙和平, 李建成. 2020. 大地测量学科发展现状与趋势[J]. *测绘学报*, **49**(10): 1243–1251.
- Yao Y B, Yang Y X, Sun H P, Li J C. 2020. Geodesy discipline: Progress and perspective[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, **49**(10): 1243–1251 (in Chinese).
- 张国庆, 付广裕, 周新, 徐长仪. 2015. 利用震后黏弹性位错理论研究苏门答腊地震(M_w 9.3)的震后重力变化[J]. *地球物理学报*, **58**(5): 1654–1665.
- Zhang G Q, Fu G Y, Zhou X, Xu C Y. 2015. Retrieve post-seismic gravity changes induced by Sumatra earthquake (M_w 9.3) based on the viscoelastic dislocation theory[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(5): 1654–1665 (in Chinese).
- 张岚, 孙文科. 2022. 重力卫星 GRACE Mascon 产品的应用研究进展与展望[J]. *地球与行星物理评论*, **53**(1): 35–52.
- Zhang L, Sun W K. 2022. Progress and prospect of GRACE Mascon product and its application[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, **53**(1): 35–52 (in Chinese).
- 周江存, 孙和平, 徐建桥, 崔小明, 陈晓东. 2017. 重力位能同震变化及其构造意义: 以青藏高原地区为例[J]. *地球物理学报*, **60**(6): 2493–2499.
- Zhou J C, Sun H P, Xu J Q, Cui X M, Chen X D. 2017. Co-seismic change of gravitational potential energy and its tectonic implications: A case study of the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **60**(6): 2493–2499 (in Chinese).

- 周硕愚, 吴云, 姚运生, 杜瑞林. 2008. 地震大地测量学研究[J]. 大地测量与地球动力学, **28**(6): 77–82.
- Zhou S Y, Wu Y, Yao Y S, Du R L. 2008. Research of earthquake geodesy[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **28**(6): 77–82 (in Chinese).
- 周硕愚, 吴云, 江在森. 2017. 地震大地测量学及其对地震预测的促进: 50年进展、问题与创新驱动[J]. 大地测量与地球动力学, **37**(6): 551–562.
- Zhou S Y, Wu Y, Jiang Z S. 2017. Earthquake geodesy and earthquake prediction: Progress, innovations and problems over fifty years[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **37**(6): 551–562 (in Chinese).
- 周新. 2017. 利用大地测量数据反演断层滑移分布的MCMC方法[J]. 大地测量与地球动力学, **37**(10): 996–1002.
- Zhou X. 2017. Markov Chain Monte Carlo method used to invert for fault slip from geodetic data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **37**(10): 996–1002 (in Chinese).
- 周新, 万晓云, 申旭辉. 2018. 主喜马拉雅逆冲带的震间与同震重力场变化[J]. 遥感学报, **22**(增刊1): 100–113.
- Zhou X, Wang X Y, Shen X H. 2018. Coseismic and interseismic gravity field change along the Main Himalaya Thrust[J]. *Journal of Remote Sensing*, **22**(S1): 100–113 (in Chinese).
- Abidin H Z, Andreas H, Kato T, Ito T, Meilano I, Kimata F, Natawidjaya D H, Harjono H. 2009. Crustal deformation studies in Java (Indonesia) using GPS[J]. *J Earthq Tsunami*, **3**(2): 77–88.
- Adam D. 2002. Amazing GRACE[J]. *Nature*, **416**(6876): 10–11.
- Aki K. 1964. Study of Love and Rayleigh waves from earthquakes with fault plane solutions or with known faulting. Part 1. A phase difference method based on a new model of earthquake source[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **54**(2): 511–527.
- Allen R M, Ziv A. 2011. Application of real-time GPS to earthquake early warning[J]. *Geophys Res Lett*, **38**(16): L16310.
- Alterman Z, Jarosch H, Pekeris C L. 1959. Oscillations of the earth[J]. *Proc R Soc Lond A: Math Phys Sci*, **252**(1268): 80–95.
- Amoruso A, Crescentini L. 2009. Slow diffusive fault slip propagation following the 6 April 2009 L’Aquila earthquake, Italy[J]. *Geophys Res Lett*, **36**(24): L24306.
- Anderson D L. 1974. Earthquakes and the rotation of the Earth[J]. *Science*, **186**(4158): 49–50.
- Anderson D L, O’Connell R. 1967. Viscosity of the Earth[J]. *Geophys J Int*, **14**(1/2/3/4): 287–295.
- Argus D F, Peltier W R, Blewitt G, Kreemer C. 2021. The viscosity of the top third of the lower mantle estimated using GPS, GRACE, and relative sea level measurements of glacial isostatic adjustment[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **126**(5): e2020JB021537.
- Ben-Menahem A, Toksöz M N. 1962. Source-mechanism from spectra of long-period seismic surface-waves: 1. The Mongolian earthquake of December 4, 1957[J]. *J Geophys Res*, **67**(5): 1943–1955.
- Ben-Menahem A, Singh S J. 1968. Multipolar elastic fields in a layered half space[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **58**(5): 1519–1572.
- Beresnev I A. 2003. Uncertainties in finite-fault slip inversions: To what extent to believe?(a critical review)[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **93**(6): 2445–2458.
- Biggs J, Wright T J. 2020. How satellite InSAR has grown from opportunistic science to routine monitoring over the last decade[J]. *Nat Commun*, **11**(1): 3863.
- Bock Y, Melgar D. 2016. Physical applications of GPS geodesy: A review[J]. *Rep Prog Phys*, **79**(10): 106801.
- Braitenberg C. 2018. The deforming and rotating Earth: A review of the 18th International Symposium on Geodynamics and Earth Tide, Trieste 2016[J]. *Geod Geodyn*, **9**(3): 187–196.
- Cambiotti G, Barletta V R, Bordonì A, Sabadini R. 2009. A comparative analysis of the solutions for a Maxwell Earth: The role of the advection and buoyancy force[J]. *Geophys J Int*, **176**(3): 995–1006.
- Cambiotti G. 2020. Joint estimate of the coseismic 2011 Tohoku earthquake fault slip and post-seismic viscoelastic relaxation by GRACE data inversion[J]. *Geophys J Int*, **220**(2): 1012–1022.
- Cathles L M. 1975. *Viscosity of the Earth’s Mantle*[M]. Princeton: Princeton University Press: 267.
- Chao B F. 2003. Geodesy is not just for static measurements any more[J]. *Eos, Trans AGU*, **84**(16): 145–150.
- Chao B F, Gross R S. 1987. Changes in the Earth’s rotation and low-degree gravitational field induced by earthquakes[J]. *Geo-*

- phys J Int*, **91**(3): 569–596.
- Chen C H, Yeh T K, Liu J Y, Wang C H, Wen S, Yen H Y, Chang S H. 2011. Surface deformation and seismic rebound: Implications and applications[J]. *Surv Geophys*, **32**(3): 291–313.
- Cheng H H, Zhang B, Huang L Y, Zhang H, Shi Y L. 2019. Calculating coseismic deformation and stress changes in a heterogeneous ellipsoid earth model[J]. *Geophys J Int*, **216**(2): 851–858.
- Chinnery M A. 1961. The deformation of the ground around surface faults[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **51**(3): 355–372.
- Cornelio C, Violay M. 2020. Effect of fluid viscosity on earthquake nucleation[J]. *Geophys Res Lett*, **47**(12): e2020GL087854.
- Dahlen F A. 1968. The normal modes of a rotating, elliptical Earth[J]. *Geophys J Int*, **16**(4): 329–367.
- Dahlen F A. 1974. On the static deformation of an Earth model with a fluid core[J]. *Geophys J Int*, **36**(2): 461–485.
- Dahlen F A. 1977. The balance of energy in earthquake faulting[J]. *Geophys J Int*, **48**(2): 239–261.
- Dai C L, Shum C K, Wang R J, Wang L, Guo J Y, Shang K, Tapley B. 2014. Improved constraints on seismic source parameters of the 2011 Tohoku earthquake from GRACE gravity and gravity gradient changes[J]. *Geophys Res Lett*, **41**(6): 1929–1936.
- Diao F Q, Wang R J, Wang Y B, Xiong X, Walter T R. 2018. Fault behavior and lower crustal rheology inferred from the first seven years of postseismic GPS data after the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **495**: 202–212.
- Diao F Q, Xiong X, Wang R J, Walter T R, Wang Y B, Wang K. 2019. Slip rate variation along the Kunlun fault (Tibet): Results from new GPS observations and a viscoelastic earthquake-cycle deformation model[J]. *Geophys Res Lett*, **46**(5): 2524–2533.
- Dong J, Sun W K, Zhou X, Wang R J. 2014. Effects of Earth's layered structure, gravity and curvature on coseismic deformation[J]. *Geophys J Int*, **199**(3): 1442–1451.
- Dziewonski A M, Anderson D L. 1981. Preliminary reference Earth model[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **25**(4): 297–356.
- Fang M, Hager B H. 1996. The sensitivity of post-glacial sea level to viscosity structure and ice-load history for realistically parameterized viscosity profiles[J]. *Geophys Res Lett*, **23**(25): 3787–3790.
- Fernández J, Pepe A, Poland M P, Sigmundsson F. 2017. Volcano geodesy: Recent developments and future challenges[J]. *J Volcanol Geoth Res*, **344**: 1–12.
- Forté A M, Peltier W R, Dziewonski A M. 1991. Inferences of mantle viscosity from tectonic plate velocities[J]. *Geophys Res Lett*, **18**(9): 1747–1750.
- Freed A M, Bürgmann R. 2004. Evidence of power-law flow in the Mojave desert mantle[J]. *Nature*, **430**(6999): 548–551.
- Freed A M, Hashima A, Becker T W, Okaya D A, Sato H, Hatanaka Y. 2017. Resolving depth-dependent subduction zone viscosity and afterslip from postseismic displacements following the 2011 Tohoku-Oki, Japan earthquake[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **459**: 279–290.
- Freymueller J T. 2021. GPS, tectonic geodesy[G]//*Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Dordrecht: Springer: 558–578.
- Fu G Y, Sun W K. 2006. Global co-seismic displacements caused by the 2004 Sumatra-Andaman earthquake ($M_w 9.1$) [J]. *Earth Planets Space*, **58**(2): 149–152.
- Fu G Y, Sun W K. 2007. Effects of lateral inhomogeneity in a spherical Earth on gravity Earth tides[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **112**(B6): B06409.
- Fu G Y, Sun W K. 2008. Surface coseismic gravity changes caused by dislocations in a 3-D heterogeneous earth[J]. *Geophys J Int*, **172**(2): 479–503.
- Fu G Y, Sun W K. 2009. Effects of Earth's lateral inhomogeneous structures on coseismic gravity changes[J]. *Pure Appl Geophys*, **166**(8): 1343–1368.
- Fu G Y, Sun W K, Fukuda Y, Gao S H. 2010. Coseismic displacements caused by point dislocations in a three-dimensional heterogeneous, spherical earth model[J]. *Geophys J Int*, **183**(2): 706–726.
- Gautam P K, Rajesh S, Kumar N, Dabral C P. 2020. GPS measurements on pre-, co- and post-seismic surface deformation at first multi-parametric geophysical observatory, Ghuttu in Garhwal Himalaya, India[J]. *J Geod Sci*, **10**(1): 136–144.
- Gilbert F, MacDonald G J F. 1960. Free oscillations of the Earth: 1. Toroidal oscillations[J]. *J Geophys Res*, **65**(2): 675–693.
- Gilbert F, Backus G E. 1966. Propagator matrices in elastic wave and vibration problems[J]. *Geophysics*, **31**(2): 326–332.

- Gilbert F, Backus G E. 1968. Elastic-gravitational vibrations of a radially stratified sphere[G]//*Dynamics of Stratified Solids*. New York: American Society of Mechanical Engineers: 82–95.
- Gilbert F, Dziewonski A M. 1975. An application of normal mode theory to the retrieval of structural parameters and source mechanisms from seismic spectra[J]. *Philos Trans R Soc Lond A: Math Phys Eng Sci*, **278**(1280): 187–269.
- Giorgi G, Schmidt T D, Trainotti C, Mata-Calvo R, Fuchs C, Hoque M M, Berdermann J, Furthner J, Günther C, Schuldt T, Sanjuan J, Gohlke M, Oswald M, Braxmaier C, Balidakis K, Dick G, Flechtner F, Ge M, Glaser S, König R, Michalak G, Murböck M, Semmling M, Schuh H. 2019. Advanced technologies for satellite navigation and geodesy[J]. *Adv Space Res*, **64**(6): 1256–1273.
- Glennie C L, Carter W E, Shrestha R L, Dietrich W E. 2013. Geodetic imaging with airborne LiDAR: The Earth's surface revealed[J]. *Rep Prog Phys*, **76**(8): 086801.
- Gómez D D, Bevis M, Pan E N, Smalley R. 2017. The influence of gravity on the displacement field produced by fault slip[J]. *Geophys Res Lett*, **44**(18): 9321–9329.
- Han S C, Shum C K, Bevis M, Ji C, Kuo C Y. 2006. Crustal dilatation observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake[J]. *Science*, **313**(5787): 658–662.
- Haskell N A. 1953. The dispersion of surface waves on multilayered media[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **43**(1): 17–34.
- Herring T A, Melbourne T I, Murray M H, Floyd M A, Szeliga W M, King R W, Phillips D A, Puskas C M, Santillan M, Wang L. 2016. Plate boundary observatory and related networks: GPS data analysis methods and geodetic products[J]. *Rev Geophys*, **54**(4): 759–808.
- Hu Y, Wang K L, He J H, Klotz J, Khazaradze G. 2004. Three-dimensional viscoelastic finite element model for postseismic deformation of the great 1960 Chile earthquake[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **109**: B12403.
- Ide S. 2007. Slip inversion[G]//*Earthquake Seismology: Treatise on Geophysics Volume 4*. Amsterdam: Elsevier: 193–223.
- Imanishi Y, Sato T, Higashi T, Sun W K, Okubo S. 2004. A network of superconducting gravimeters detects submicrogal coseismic gravity changes[J]. *Science*, **306**(5695): 476–478.
- Israel M, Ben-Menahem A. 1974. Residual displacements and strains due to faulting in real Earth models[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **8**(1): 23–45.
- Ito T, Simons M. 2011. Probing asthenospheric density, temperature, and elastic moduli below the western United States[J]. *Science*, **332**(6032): 947–951.
- Jiang Z S, Wang M, Wang Y Z, Wu Y Q, Che S, Shen Z K, Bürgmann R, Sun J B, Yang Y L, Liao H, Li Q. 2014. GPS constrained coseismic source and slip distribution of the 2013 M_w 6.6 Lushan, China, earthquake and its tectonic implications[J]. *Geophys Res Lett*, **41**(2): 407–413.
- Jovanovich D B, Husseini M I, Chinnery M A. 1974a. Elastic dislocations in a layered half-space: I. Basic theory and numerical methods[J]. *Geophys J Int*, **39**(2): 205–217.
- Jovanovich D B, Husseini M I, Chinnery M A. 1974b. Elastic dislocations in a layered half-space: II. The point source[J]. *Geophys J Int*, **39**(2): 219–239.
- Kennett B L N, Engdahl E R. 1991. Traveltimes for global earthquake location and phase identification[J]. *Geophys J Int*, **105**(2): 429–465.
- Kryniski J. 2012. Gravimetry for geodesy and geodynamics-brief historical review[J]. *Rep Geod*, **92**(1): 69–86.
- Larson K M. 2019. Unanticipated uses of the global positioning system[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, **47**(1): 19–40.
- Li X X, Ge M R, Dai X L, Ren X D, Fritsche M, Wickert J, Schuh H. 2015. Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo[J]. *J Geod*, **89**(6): 607–635.
- Love A E H. 1911. *Some Problems of Geodynamics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 102–118.
- Ma X Q, Kusznir N J. 1992. 3-D subsurface displacement and strain fields for faults and fault arrays in a layered elastic half-space[J]. *Geophys J Int*, **111**(3): 542–558.
- Marchandon M, Hollingsworth J, Radiguet M. 2021. Origin of the shallow slip deficit on a strike slip fault: Influence of elastic structure, topography, data coverage, and noise[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **554**: 116696.
- Marotta A M. 2003. Benefits from GOCE within solid Earth geophysics[J]. *Space Sci Rev*, **108**: 95–104.

- Maruyama T. 1964. Static elastic dislocations in an infinite and semi-infinite medium[J]. *Bull Earthq Res Inst Univ Tokyo*, **42**: 289–368.
- Masterlark T. 2003. Finite element model predictions of static deformation from dislocation sources in a subduction zone: Sensitivities to homogeneous, isotropic, Poisson-solid, and half-space assumptions[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **108**(B11): 2540.
- Matsuo K, Heki K. 2011. Coseismic gravity changes of the 2011 Tohoku-Oki earthquake from satellite gravimetry[J]. *Geophys Res Lett*, **38**(7): L00G12.
- Meigs A. 2013. Active tectonics and the LiDAR revolution[J]. *Lithosphere*, **5**(2): 226–229.
- Melini D, Cannelli V, Piersanti A, Spada G. 2008. Post-seismic rebound of a spherical Earth: New insights from the application of the Post-Widder inversion formula[J]. *Geophys J Int*, **174**(2): 672–695.
- Mindlin R D, Cheng D H. 1950. Nuclei of strain in the semi-infinite solid[J]. *J Appl Phys*, **21**(9): 926–930.
- Molodenskiy S M. 1980. The effect of lateral heterogeneities upon the tides[J]. *BIM Fevrier*, **80**: 4833–4850.
- Ni S D, Kanamori H, Helmberger D. 2005. Energy radiation from the Sumatra earthquake[J]. *Nature*, **434**(7033): 582.
- Nur A, Mavko G. 1974. Postseismic viscoelastic rebound[J]. *Science*, **183**(4121): 204–206.
- Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **75**(4): 1135–1154.
- Okada Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **82**(2): 1018–1040.
- Okubo S. 1991. Potential and gravity changes raised by point dislocations[J]. *Geophys J Int*, **105**(3): 573–586.
- Okubo S. 1992. Gravity and potential changes due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **97**(B5): 7137–7144.
- Okubo S. 1993. Reciprocity theorem to compute the static deformation due to a point dislocation buried in a spherically symmetric Earth[J]. *Geophys J Int*, **115**(3): 921–928.
- Okubo S. 2020. Advances in gravity analyses for studying volcanoes and earthquakes[J]. *Proc Jpn Acad Ser B: Phys Biol Sci*, **96**(2): 50–69.
- Pan E N. 2019. Green's functions for geophysics: A review[J]. *Rep Prog Phys*, **82**(10): 106801.
- Panet I, Mikhailov V, Diament M, Pollitz F, King G, De Viron O, Holschneider M, Biancale R, Lemoine J M. 2007. Coseismic and post-seismic signatures of the Sumatra 2004 December and 2005 March earthquakes in GRACE satellite gravity[J]. *Geophys J Int*, **171**(1): 177–190.
- Peltier W R. 2021. Mantle viscosity[G]//*Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Dordrecht: Springer: 1107–1115.
- Pepe A, Calò F. 2017. A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements[J]. *Appl Sci*, **7**(12): 1264.
- Piersanti A, Spada G, Sabadini R, Bonafede M. 1995. Global post-seismic deformation[J]. *Geophys J Int*, **120**(3): 544–566.
- Pollitz F F. 1992. Postseismic relaxation theory on the spherical earth[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **82**(1): 422–453.
- Pollitz F F. 1996. Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth[J]. *Geophys J Int*, **125**(1): 1–14.
- Pollitz F F. 1997. Gravitational viscoelastic postseismic relaxation on a layered spherical Earth[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **102**(B8): 17921–17941.
- Press F. 1965. Displacements, strains, and tilts at teleseismic distances[J]. *J Geophys Res*, **70**(10): 2395–2412.
- Reid H F. 1910. *Mechanics of the Earthquake, the California Earthquake of April 18, 1906*[R]. Washington D C: The State Investigation Commission, Carnegie Institution of Washington: 29–31.
- Reilinger R E, Ergintav S, Bürgmann R, McClusky S, Lenk O, Barka A, Gurkan O, Hearn L, Feigl K L, Cakmak R, Aktug B, Ozener H, Tökoş M N. 2000. Coseismic and postseismic fault slip for the 17 August 1999, $M=7.5$, Izmit, Turkey earthquake[J]. *Science*, **289**(5484): 1519–1524.
- Rolandone F, Dreger D, Murray M, Bürgmann R. 2006. Coseismic slip distribution of the 2003 $M_w 6.6$ San Simeon earthquake, California, determined from GPS measurements and seismic waveform data[J]. *Geophys Res Lett*, **33**(16): L16315.
- Roth F. 1990. Subsurface deformations in a layered elastic half-space[J]. *Geophys J Int*, **103**(1): 147–155.
- Rundle J B. 1980. Static elastic-gravitational deformation of a layered half space by point couple sources[J]. *J Geophys Res:*

Solid Earth, **85**(B10): 5355–5363.

- Ryder I, Parsons B, Wright T J, Funning G J. 2007. Post-seismic motion following the 1997 Manyi (Tibet) earthquake: InSAR observations and modelling[J]. *Geophys J Int*, **169**(3): 1009–1027.
- Sabadini R, Yuen D A, Boschi E. 1984. The effects of post-seismic motions on the moment of inertia of a stratified viscoelastic earth with an asthenosphere[J]. *Geophys J Int*, **79**(3): 727–745.
- Salvi S, Stramondo S, Funning G J, Ferretti A, Sarti F, Mouratidis A. 2012. The Sentinel-1 mission for the improvement of the scientific understanding and the operational monitoring of the seismic cycle[J]. *Remote Sens Environ*, **120**: 164–174.
- Savage J C, Hastie L M. 1969. A dislocation model for the Fairview Peak, Nevada, earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **59**(5): 1937–1948.
- Savage J C, Burford R O. 1973. Geodetic determination of relative plate motion in central California[J]. *J Geophys Res*, **78**(5): 832–845.
- Savage J C, Prescott W H. 1978. Asthenosphere readjustment and the earthquake cycle[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **83**(B7): 3369–3376.
- Savage J C. 1983. A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **88**(B6): 4984–4996.
- Scholz C H. 1998. Earthquakes and friction laws[J]. *Nature*, **391**(6662): 37–42.
- Segall P, Davis J L. 1997. GPS applications for geodynamics and earthquake studies[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, **25**(1): 301–336.
- Soldati G, Spada G. 1999. Large earthquakes and Earth rotation: The role of mantle relaxation[J]. *Geophys Res Lett*, **26**(7): 911–914.
- Spaans K, Hooper A. 2016. InSAR processing for volcano monitoring and other near-real time applications[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **121**(4): 2947–2960.
- Spada G, Sabadini R, Yuen D A, Ricard Y. 1992. Effects on post-glacial rebound from the hard rheology in the transition zone[J]. *Geophys J Int*, **109**(3): 683–700.
- Steketee J A. 1958. On Volterra's dislocations in a semi-infinite elastic medium[J]. *Can J Phys*, **36**(2): 192–205.
- Suito H, Freymueller J T. 2009. A viscoelastic and afterslip postseismic deformation model for the 1964 Alaska earthquake[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **114**: B11404.
- Sun W K. 1992. Potential and gravity changes caused by dislocations in spherically symmetric Earth models[J]. *Bull Earthq Res Inst Univ Tokyo*, **67**(2): 89–238.
- Sun W K. 2003. Asymptotic theory for calculating deformations caused by dislocations buried in a spherical earth: Geoid change[J]. *J Geod*, **77**(7/8): 381–387.
- Sun W K. 2004a. Asymptotic solution of static displacements caused by dislocations in a spherically symmetric Earth[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **109**(B5): B05402.
- Sun W K. 2004b. Short note: Asymptotic theory for calculating deformations caused by dislocations buried in a spherical earth-gravity change[J]. *J Geod*, **78**(1/2): 76–81.
- Sun W K, Okubo S. 1993. Surface potential and gravity changes due to internal dislocations in a spherical Earth: I. Theory for a point dislocation[J]. *Geophys J Int*, **114**(3): 569–592.
- Sun W K, Okubo S. 1998. Surface potential and gravity changes due to internal dislocations in a spherical Earth: II. Application to a finite fault[J]. *Geophys J Int*, **132**(1): 79–88.
- Sun W K, Okubo S. 2002. Effects of earth's spherical curvature and radial heterogeneity in dislocation studies: For a point dislocation[J]. *Geophys Res Lett*, **29**(12): 46-1–46-4.
- Sun W K, Okubo S. 2004. Coseismic deformations detectable by satellite gravity missions: A case study of Alaska (1964, 2002) and Hokkaido (2003) earthquakes in the spectral domain[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **109**(B4): B04405.
- Sun W K, Zhou X. 2012. Coseismic deflection change of the vertical caused by the 2011 Tohoku-Oki earthquake ($M_w 9.0$)[J]. *Geophys J Int*, **189**(2): 937–955.
- Sun W K, Dong J. 2013. Relation of dislocation Love numbers and conventional Love numbers and corresponding Green's func-

- tions for a surface rupture in a spherical earth model[J]. *Geophys J Int*, **193**(2): 717–733.
- Sun W K, Dong J. 2014. Geo-center movement caused by huge earthquakes[J]. *J Geodyn*, **76**: 1–7.
- Sun W K, Okubo S, Fu G Y. 2006a. Green's functions of coseismic strain changes and investigation of effects of Earth's spherical curvature and radial heterogeneity[J]. *Geophys J Int*, **167**(3): 1273–1291.
- Sun W K, Okubo S, Sugano T. 2006b. Determining dislocation Love numbers using satellite gravity mission observations[J]. *Earth Planets Space*, **58**(5): 497–503.
- Sun W K, Okubo S, Fu G Y, Araya A. 2009. General formulations of global co-seismic deformations caused by an arbitrary dislocation in a spherically symmetric earth model: Applicable to deformed earth surface and space-fixed point[J]. *Geophys J Int*, **177**(3): 817–833.
- Sun X D, Hartzell S. 2014. Finite-fault slip model of the 2011 M_w 5.6 Prague, Oklahoma earthquake from regional waveforms[J]. *Geophys Res Lett*, **41**(12): 4207–4213.
- Takeuchi H, Hasegawa Y. 1965. Viscosity distribution within the Earth[J]. *Geophys J Int*, **9**(5): 503–508.
- Tanaka Y, Okuno J, Okubo S. 2006. A new method for the computation of global viscoelastic post-seismic deformation in a realistic earth model (I): Vertical displacement and gravity variation[J]. *Geophys J Int*, **164**(2): 273–289.
- Tanaka Y, Okuno J, Okubo S. 2007. A new method for the computation of global viscoelastic post-seismic deformation in a realistic earth model (II): Horizontal displacement[J]. *Geophys J Int*, **170**(3): 1031–1052.
- Tanaka Y, Klemann V, Fleming K, Martinec Z. 2009. Spectral finite element approach to postseismic deformation in a viscoelastic self-gravitating spherical Earth[J]. *Geophys J Int*, **176**(3): 715–739.
- Tang H, Sun W K. 2018a. Asymptotic co- and post-seismic displacements in a homogeneous Maxwell sphere[J]. *Geophys J Int*, **214**(1): 731–750.
- Tang H, Sun W K. 2018b. Closed-form expressions of seismic deformation in a homogeneous Maxwell earth model[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **123**(7): 6033–6051.
- Tang H, Sun W K. 2019. New method for computing postseismic deformations in a realistic gravitational viscoelastic earth model[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **124**(5): 5060–5080.
- Tang H, Dong J, Sun W K. 2020a. An approximate method to simulate post-seismic deformations in a realistic earth model [C]//*International Association of Geodesy Symposia*. Berlin, Heidelberg: Springer: 1–7.
- Tang H, Zhang L, Chang L, Sun W K. 2020b. Optimized approximate inverse Laplace transform for geo-deformation computation in viscoelastic Earth model[J]. *Geophys J Int*, **223**(1): 444–453.
- Tapley B D, Watkins M M, Flechtner F, Reigber C, Bettadpur S, Rodell M, Sasgen I, Famiglietti J S, Landerer F W, Chambers D P, Reager J T, Gardner A S, Save H, Ivins E R, Swenson S C, Boening C, Dahle C, Wiese D N, Dobslaw H, Tamisiea M E, Velicogna I. 2019. Contributions of GRACE to understanding climate change[J]. *Nat Climate Change*, **9**(5): 358–369.
- Thomson W T. 1950. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium[J]. *J Appl Phys*, **21**(2): 89–93.
- Tian Z, Freymueller J T, Yang Z Q. 2021. Postseismic deformation due to the 2012 M_w 7.8 Haida Gwaii and 2013 M_w 7.5 Craig earthquakes and its implications for regional rheological structure[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **126**: e2020JB020197.
- Valsa J, Brančik L. 1998. Approximate formulae for numerical inversion of Laplace transforms[J]. *Int J Numer Model: Electron Netw Dev Fields*, **11**(3): 153–166.
- Van Camp M, de Viron O, Watlet A, Meurers B, Francis O, Caudron C. 2017. Geophysics from terrestrial time-variable gravity measurements[J]. *Rev Geophys*, **55**(4): 938–992.
- Vermeersen L L A, Sabadini R, Spada G. 1996. Analytical visco-elastic relaxation models[J]. *Geophys Res Lett*, **23**(7): 697–700.
- Vernant P. 2015. What can we learn from 20 years of interseismic GPS measurements across strike-slip faults?[J]. *Tectonophysics*, **644/645**: 22–39.
- Wang H S. 1999. Surface vertical displacements, potential perturbations and gravity changes of a viscoelastic earth model induced by internal point dislocations[J]. *Geophys J Int*, **137**(2): 429–440.
- Wang K L. 2007. Elastic and viscoelastic models of crustal deformation in subduction earthquake cycles[G]//*The Seismogenic*

Zone of Subduction Thrust Faults. New York: Columbia University Press: 540–577.

- Wang K L, Hu Y, He J H. 2012. Deformation cycles of subduction earthquakes in a viscoelastic Earth[J]. *Nature*, **484**(7394): 327–332.
- Wang M, Shen Z K. 2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **125**(2): e2019JB018774.
- Wang R J, Martin F L, Roth F. 2003. Computation of deformation induced by earthquakes in a multi-layered elastic crust: Fortran programs EDGRN/EDCMP[J]. *Comput Geosci*, **29**(2): 195–207.
- Wang R J, Martin F L, Roth F. 2006. PSGRN/PSCMP: A new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory[J]. *Comput Geosci*, **32**(4): 527–541.
- Wang W X, Shi Y L, Sun W K, Zhang J. 2011. Viscous lithospheric structure beneath Sumatra inferred from post-seismic gravity changes detected by GRACE[J]. *Science China Earth Science*, **54**(8): 1257–1267.
- Wang W X, Sun W K, Wu Y Q, Gu G H. 2014. Modification of fault slip models of the M_w 9.0 Tohoku earthquake by far field GPS observations[J]. *J Geodyn*, **75**: 22–33.
- Wason H R, Singh S J. 1972. Static deformation of a multilayered sphere by internal sources[J]. *Geophys J Int*, **27**(1): 1–14.
- Wdowinski S, Eriksson S. 2009. Geodesy in the 21st century[J]. *EOS Trans AGU*, **90**(18): 153–155.
- Weertman J, Weertman J R. 1964. *Elementary Dislocation Theory*[M]. New York: Macmillan: 1–15.
- Weertman J, Weertman J R. 1975. High temperature creep of rock and mantle viscosity[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, **3**(1): 293–315.
- Wiesemeyer H, Nothnagel A. 2021. Very long baseline interferometry[G]//*Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Dordrecht: Springer: 1902–1907.
- Williams C A, Wallace L M. 2015. Effects of material property variations on slip estimates for subduction interface slow-slip events[J]. *Geophys Res Lett*, **42**(4): 1113–1121.
- Xu C Y. 2021. Coseismic changes in the kinetic rotational energy of the Earth from 1976 to 2019[J]. *Geophys J Int*, **224**(2): 1127–1132.
- Xu C Y, Sun W K. 2014. Earthquake-origin expansion of the Earth inferred from a spherical-Earth elastic dislocation theory[J]. *Geophys J Int*, **199**(3): 1655–1661.
- Xu C Y, Chao B F. 2015. Seismological *versus* geodetic reference frames for seismic dislocation: Consistency under momentum conservations[J]. *Geophys J Int*, **200**(2): 1000–1004.
- Xu C Y, Chao B F. 2017. Coseismic changes of gravitational potential energy induced by global earthquakes based on spherical-Earth elastic dislocation theory[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **122**(5): 4053–4063.
- Xu C Y, Chao B F. 2019. Seismic effects on the secular drift of the Earth's rotational pole[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **124**(6): 6092–6100.
- Xu C Y, Sun W K, Chao B F. 2014. Formulation of coseismic changes in Earth rotation and low-degree gravity field based on the spherical Earth dislocation theory[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **119**(12): 9031–9041.
- Xu C Y, Wei D P, Sun W K. 2016. Contribution of coseismic deformations on the current expansion of the Earth[J]. *J Geodyn*, **99**: 10–15.
- Xu C Y, Su X N, Liu T, Sun W K. 2017. Geodetic observations of the co- and post-seismic deformation of the 2013 Okhotsk Sea deep-focus earthquake[J]. *Geophys J Int*, **209**(3): 1924–1933.
- Yabuki T, Matsu'ura M. 1992. Geodetic data inversion using a Bayesian information criterion for spatial distribution of fault slip[J]. *Geophys J Int*, **109**(2): 363–375.
- Yamasaki T, Houseman G A. 2012. The crustal viscosity gradient measured from post-seismic deformation: A case study of the 1997 Manyi (Tibet) earthquake[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **351/352**: 105–114.
- Yang J Y, Sun W K. 2020. Determining dislocation Love number of vertical displacement using GPS observations: Case study of 2011 Tohoku-Oki earthquake (M_w 9.0)[J]. *Geophys J Int*, **222**(2): 965–977.
- Yang J Y, Zhou X, Yi S, Sun W K. 2015. Determining dislocation Love numbers using GRACE satellite mission gravity data[J]. *Geophys J Int*, **203**(1): 257–269.

- Zhou J C, Sun W K, Sun H P, Xu J Q. 2013. Reformulation of co-seismic polar motion excitation and low degree gravity changes: Applied to the 2011 Tohoku-Oki earthquake ($M_w9.0$)[J]. *J Geodyn*, **63**: 20–26.
- Zhou J C, Sun W K, Sun H P, Xu J Q, Cui X M. 2014a. Co-seismic change of length of day based on the point dislocation theory for a SNREI Earth[J]. *J Geodyn*, **79**: 18–22.
- Zhou J C, Sun W K, Dong J. 2015. A correction to the article “Geo-center movement caused by huge earthquakes” by Wenke Sun and Jie Dong[J]. *J Geodyn*, **87**: 67–73.
- Zhou J C, Sun W K, Jin S G, Sun H P, Xu J Q. 2016. Rotation change in the orientation of the centre-of-figure frame caused by large earthquakes[J]. *Geophys J Int*, **206**(2): 999–1008.
- Zhou J C, Pan E N, Bevis M. 2019a. A point dislocation in a layered, transversely isotropic and self-gravitating Earth. Part I: Analytical dislocation Love numbers[J]. *Geophys J Int*, **217**(3): 1681–1705.
- Zhou J C, Pan E N, Bevis M. 2019b. A point dislocation in a layered, transversely isotropic and self-gravitating Earth. Part II: Accurate Green’s functions[J]. *Geophys J Int*, **219**(3): 1717–1728.
- Zhou J C, Pan E N, Bevis M. 2020. A point dislocation in a layered, transversely isotropic and self-gravitating Earth. Part III: Internal deformation[J]. *Geophys J Int*, **223**(1): 420–443.
- Zhou X, Cambiotti G, Sun W, Sabadini R. 2014b. The coseismic slip distribution of a shallow subduction fault constrained by prior information: The example of 2011 Tohoku ($M_w9.0$) megathrust earthquake[J]. *Geophys J Int*, **199**(2): 981–995.
- Zhou X, Cambiotti G, Sun W K, Sabadini R. 2018. Co-seismic slip distribution of the 2011 Tohoku ($M_w9.0$) earthquake inverted from GPS and space-borne gravimetric data[J]. *Earth Planet Phys*, **2**(2): 120–138.
- Zhu X X, Montazeri S, Gisinger C, Hanssen R F, Bamler R. 2016. Geodetic SAR tomography[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, **54**(1): 18–35.