

DOI: 10.13203/j.whugis20130748

文章编号: 1671-8860(2014)10-1135-12

利用大地测量资料反演构造应力应变场研究进展

许才军^{1,2} 尹 智^{1,2}

¹ 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

² 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

摘要: 综述了近10多年来国内外利用大地测量资料反演研究构造应力应变场的理论成果及最新进展,重点讨论了重力场与应力应变场的关系,总结了利用大地测量数据反演构造应力应变场的研究内容和应用领域,并分析了存在的问题。对利用大地测量资料反演构造应力应变场的研究进行了展望,大地测量技术的发展将会继续推动利用大地测量数据反演构造应力应变场理论的完善和应用的深入,建议构建弹性、粘弹性和弹塑性的利用地面重力数据确定地壳构造应力应变场的解析模型,联合多类数据反演时变地壳构造应力应变场,进一步加强研究时变地壳应力应变场和地震应力触发机制之间的关系。

关键词: 构造应力应变场;重力场;大地测量资料;联合反演

中图法分类号:P227

文献标志码:A

地球物质迁移及其动力学机制是地球科学的前沿研究课题,而地壳应力应变场是地球物质迁移的物理基础,反映了地震断层的活动程度,是地震断层受力状态的重要定量指标,也是深入研究板内地震及板间地震的力学驱动机制的重要参数。现代大地测量技术如GNSS、InSAR和重力探测卫星的发展,使得物质迁移的地壳应力应变场响应研究达到了一个新阶段。连续GNSS的动态监测范围可以从地壳表层向下扩展到地球内部介质特性和破裂,向上扩展到对流层、电离层介质特性探测,在时间分辨率上相对传统的定位测量技术有了极大的提高。InSAR可以监测震前、同震、震间及震后连续动态地壳形变信息,在空间分辨率上也有极大的改进。新一代地球重力探测卫星如CHAMP、GRACE和GOCE卫星为实时获取局部重力场变化提供了重要的技术手段,尤其是通过对GRACE重力场模型的时间序列分析,可以提取强震发生全过程的重力场变化,进而可分析认识地震的孕育、发生和致灾过程。本文主要综述了近10多年来国内外利用大地测量资料反演研究构造应力应变场的理论成果及最新进展,对进一步的研究内容及方法进行了展望。

1 利用大地测量资料研究构造应力应变场的模型

构造运动泛指因地球内力引起的地球表层(即岩石圈,主要是地壳)的机械运动,如大洋板块的漂移和俯冲、大陆壳的破裂及相对错移、区域性的隆起和沉降、地质体的变形和变位等^[1]。构造应力是指导致各种构造运动的应力^[2]。本文涉及的构造运动主要指地壳运动变形和地震活动,其中地震活动属于局部构造运动,是在板块运动变形过程中产生的区域构造应力作用下积累的大量应变能达到一定程度时,导致地壳岩层突然破裂、错动的一种现象。地壳构造应力的积累是地震发生的原因,而地震的发生又会引起地壳应力应变场的改变,两者相互联系和影响,因此需要对这两种构造运动引起应力应变场的变化进行建模。

大地测量技术能够监测到地壳构造运动的位移场和重力场的微变化,从而研究各种构造运动引起的应力应变场。针对不同构造运动的研究,已存在不同的理论模型,根据这些模型的复杂程度,又分为解析模型、半解析模型和数值模型,其所能解决问题的复杂程度依次增强,同时构建模

收稿日期: 2013-12-06

项目来源: 地震行业科研专项资金资助项目(201308009); 国家973计划资助项目(2013CB733303); 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放基金资助项目(12-02-012)。

第一作者: 许才军,教授,博士,博士生导师,长江学者。主要研究方向为大地测量学与地球动力学。E-mail: cjxu@sgg.whu.edu.cn

型的繁琐程度也依次增加。在不同地球物理问题的研究过程中,通常也是首先构建解析模型,之后发展出半解析模型和数值模型。以下根据构造运动的种类,介绍利用大地测量数据研究应力应变场的模型。

1.1 利用地壳测量资料研究地壳构造应力应变场

利用 GPS 观测数据研究地壳大范围的应变场分布时,地壳的厚度相比于横向面积的尺度可以忽略,所以常用二维球壳模型处理。这类研究主要分为两类方法:局部方法和整体方法。局部方法首先划分网格或块体,在划分的单元内按照块体应变计算公式获得局部应变场,然后再合成整体应变场分布,如 Savage 方法、广义应变花法和板块弹性运动模型。整体方法首先建立位移场与点位的函数关系,然后在网格点对位置求偏导数,直接获取应变场分布,如多面函数法、球谐函数法、Kriging 插值法和最小二乘配置法。用上述两类方法求得地壳的应变场以后,利用逆胡克定律即可得到地壳应力场分布。

石耀霖等^[3]利用中国大陆的 GPS 数据比较了广义应变花法、Savage 方法、球谐函数法和 Kriging 插值法。比较结果显示,不同方法得到的结果在细节上具有显著的差异,即使同一种方法,如果选取的参数不同,也会有不同的结果。Wu 等^[4]通过模拟实验比较分析了分片法、多面函数法、球谐函数法和最小二乘配置法,通过对算法稳健性和对数据稀疏程度的依赖程度研究发现,最小二乘配置法是最优的方法。许才军等^[5]基于模型的无偏性和有效性等概念,对块体的刚性旋转运动模型、旋转应变模型进行辨识,结果表明,考虑块体弹性运动模型比刚体模型更符合实际,适用范围更广。此外,还可以利用格林函数法求解三维地壳内部应力场^[6,7]。对于具有复杂地质结构的三维地壳运动,一些学者则采用数值模型研究地壳构造应力应变场。许才军^[8]研究了大地测量反演构造应力场的理论与方法,提出将地表大地测量观测值及其函数值作为边界约束条件应用到构造应力场的反演,推导了大地测量反演线弹性构造应力场的三维有限元最小二乘数学模型,研究了边界约束条件、介质参数以及断裂带单元划分对构造应力场反演结果的作用。Zheng 等^[9]利用有限元数值模拟的方法分别计算了在 GPS 作为边界约束下,青藏高原及周边区域的连续体模型和含断层的不连续体模型的运动状态和应力场分布,讨论了断层活动在青藏高原的运动学和

动力学过程中所起的重要作用。

1.2 利用地壳测量资料研究地震同震应力变化

位错模型已成为利用大地测量资料研究震源机制的有效手段。利用地震位错模型研究地震同震应力的常用方法是通过地表的位移场反演断层面的滑动分布,然后根据反演的滑动分布计算同震应力变化。在位错模型的研究中,许多学者给出了不同方法或者不同方面的解析解^[10-17],其中应用最广泛的是 Okada^[10,11] 和 Okubo^[12,13] 的解析解。Okada^[10]总结并整理了前人的研究成果,排除了前人研究中存在的错误,给出了完整、简洁、实用的地表同震形变计算公式,适用于计算任何剪切与引张位错引起的位移、应变与倾斜变形。Okada^[11]还给出了地球内部同震变形的计算公式。Okubo^[12,13]利用类似于 Okada^[10] 的表达方式研究了点源和有限断层产生的同震位场变化与重力变化。Okada^[10,11] 和 Okubo^[12,13] 的计算式已成为平面半空间位错理论的经典表达式。上述的位错理论均是将断层划分为矩形单元,难免在构造曲面断层时产生孔隙和重叠现象,从而在这些断层面的间断位置发生高应变和应力集中现象^[18]。因此,基于平面半空间角位错理论的三角元位错解析模型近年来得到了迅速发展。弹性全空间的角位错理论最初由 Yoffe^[19] 提出,之后,Comninou 等^[20]推导了角位错在半无限空间中的位移解析解;Jeyakumaran 等^[21]给出了三角形位错元在弹性半无限空间中产生的应变场和位移场计算公式;Meade^[22]定义了三角元节点的排序方案,用以计算多个三角元产生的形变场。之后,基于三角形位错元的解析解在地震研究中得到广泛应用。Jiang 等^[23]改进了 Meade^[22] 的计算程序,使计算速度提高了约 13 倍。

基于格林函数法, Wang 等^[24,25]编写了一系列计算程序,主要包括 EDGRN/EDCMP 和 PSGRN/PSCMP。其中,PSGRN/PSCMP 考虑了地球自重效应,用于计算断层位错在垂向分层半无限空间模型引起的地表同震和震后位移、应变、大地水准面变化和重力变化。Sun^[26] 和 Sun 等^[27]提出和发展了球体位错理论,编写和发布了分层球体位错计算程序^[28],计算对称地球模型中任意地震位错在地球表面产生的同震位移、应变、大地水准面变化和重力变化。由于格林函数法本身在计算任意间断面的理论还不成熟,所以此方法一般用于计算垂向分层的介质模型。Fu 和 Sun^[29,30]基于球体位错模型研究了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,不过他们的推导过程只将地球的横向不均匀结构做了一阶近似。

断层面上可能存在局部障碍体,地壳介质可能横向不均匀,测站所在的位置也可能存在地形效应,在这些情况下的复杂地震形变必须要使用数值模型处理。Masterlark^[31]采用有限元方法,相对于均匀各向同性的泊松体半无限空间弹性介质,设置不同的介质参数,试验地表形变结果的敏感性,发现地表的形变扰动超过了GPS观测误差,说明介质结构对地表形变值的影响很大。Hearn和Bürgmann^[32]设置了一个在分层地球模型中的剪切断层,研究了不同的介质参数对断层滑动分布反演结果的影响。他们发现,考虑了剪切模量随深度而增加的介质模型以后,反演得到的震源位置和地震能量相比弹性半无限空间的均匀介质模型都发生了明显改变。Dubois等^[33]分析了介质结构和流变性质的横向不均匀性对地震形变周期的影响,结果显示,当考虑地震破坏区域的流变不均匀性和弹性分层介质模型时,反演得到的滑动分布和区域应力变化比弹性半无限空间均匀介质的情况都发生了明显的改变。Trasatti等^[34]采用三维有限元模型对L'Aquila地震的同震形变场进行拟合,分别考虑介质的横向不均匀和地形效应,反演得到滑动分布,也与半无限空间均匀介质的反演结果进行对比,结果显示,反演结果差异的最大因素是介质的横向不均匀性,而不是地形效应,差异能够达到20%。

1.3 利用大地测量资料研究地震震后应力变化

地震发生以后会产生震后形变,释放剩余的应变能,断层以缓慢的速度继续滑动。震后阶段主要有三种应力释放模型:余滑模型、孔隙回弹模型和粘弹性松弛模型。这三种震后应力释放机制分别发生在弹性介质、孔隙介质和粘弹性介质中,由于震后形变的介质模型相对复杂,所以与震后形变有关的模型通常是基于分层介质的半解析模型和基于三维介质的数值模型。

在三种震后形变机制中,震后余滑目前主要通过速率状态摩擦定律模型来解释,实验数据和大地测量观测结果均对这一理论模型提供了证据^[35]。孔隙介质包括孔隙流体和骨架固体,同震应力变化引起孔隙流体压力发生明显的梯度变化,理论研究和大地测量观测结果显示,孔隙流体扩散和等效应力的耦合作用造成地表形变随时间变化^[36]。粘弹性松弛的本构方程包括非线性模型和线性模型,非线性模型指幂指数定律,线性模型则是利用胡克元件(弹簧)和牛顿元件(阻尼器)

组合构建力学系统来仿真和分析,常见的线性粘弹模型有Maxwell体、Kelvin体、标准线性体和Burgers体。目前,已有的粘弹松弛半解析模型基本采用线性本构方程,包括一维分层介质模型和三维介质模型。

Barbot和Fialko^[37]基于广义粘弹塑性流变理论提出了一种统一模型,描述三维介质中的震后余滑、孔隙回弹和粘弹性松弛的震后形变机制。在其模型中,三种震后形变机制释放弹性体中的能量,产生相应的非弹性应变。比如,粘弹性松弛、断层蠕滑和孔隙回弹释放的能量大小分别等于地壳中的偏应力值、剪应力值和应力张量的迹。这种统一模型使得在利用大地测量数据研究震后松弛的研究中,能够采用统一的形式描述本构关系,在同时考虑介质自重影响、非线性流变本构关系和介质参数的任意空间分布的情况下,研究三种震后形变机制的相互作用。另外,他们还给出了一种有效的三维介质半解析计算方法,避免了数值模型在构建模型时存在的复杂性和耗时性。

震后形变是震后余滑、孔隙回弹和粘弹性松弛三种机制共同作用的结果,所以利用大地测量数据反演震后形变机制的困难之处在于解的不唯一性。例如,对于1992年发生在美国加利福尼亚的Landers地震,其震后形变机制还存在争论,Peltzer等^[38]认为主要是孔隙回弹引起的,Pollitz等^[39]认为是下地壳和上地幔的粘弹性松弛作用,Fialko等^[40]则认为是孔隙回弹和震后余滑的共同作用。对发生在2002年的Denali地震震后形变机制进行研究,利用大地测量数据反演的结果也表明这三种机制均有可能是产生震后形变的原因^[41]。解决反演解的不唯一性是这类研究的一个重点问题,这需要在反演过程中联合更多类的数据,以提高反演结果的稳健性^[42]。

2 利用重力数据研究构造应力应变场

2.1 利用重力数据研究地震应力变化

地球重力场恢复和气候实验(GRACE)任务由美国国家航空和航天局(NASA)与德国航空航天中心(DLR)联合实施。GRACE卫星于2002年3月17日发射,获得的重力观测资料用于恢复全球时变重力场,检测地球系统的物质迁移。地震引起的地壳应力应变场变化是物质迁移的一种形式,不过GRACE卫星离地面约300km,空间分辨率有限,仅对较大尺度的长波信号敏感,而同

震重力变化的高阶信息较为丰富。目前,科研人员还不能直接利用卫星重力信号用于地震的应力应变场反演,而主要针对 GRACE 能否探测同震和震后信号进行了研究。

Sun 和 Okubo^[43] 研究了 1964 年和 2002 年阿拉斯加地震以及 2003 年日本北海道地震,通过比较同震重力信号正演结果和 GRACE 观测精度得出结论:大于 Mw9.0 的剪切型地震或者大于 Mw7.5 的张裂型地震所产生的同震重力变化可以被 GRACE 探测到,这个结论被随后发生的 2004 年苏门答腊 Mw9.3 地震所证实。Mikhailov 等^[44]用统计假设检验的方法研究了阿拉斯加俯冲带的闭锁区域,探讨了卫星重力数据包括 GRACE 和 GOCE 对地壳构造运动所产生重力变化的可识别性,认为首个 GRACE 重力模型 GGM-01S 的精度足以检测到 1964 年阿拉斯加地震的同震重力变化。Han 等^[45]首次利用卫星重力观测资料检测到大地震引起的同震重力变化,他们根据 2004 苏门答腊 Mw9.3 地震区域上空的 GRACE 星间跟踪数据 (Level-1) 提取出了由地震断层错动引起的重力变化“正-负”异常信号,推测是由地震导致洋底地壳膨胀引起的。De Viron 等^[46]根据模拟实验探讨了从 GRACE 时变重力场中提取出同震信号变化的可能性,并用实际 GRACE 数据检测北海道 Mw8.3 地震和苏门答腊 Mw9.3 地震,结果证明能够提取出这两个地震的同震重力变化信号。自 2002 年发射以来,GRACE 在其观测任务期间已经成功检测到 2004 苏门答腊 Mw9.3 地震、2010 智利 Mw8.8 地震和 2011 日本 Mw9.0 地震这三个典型大地震的同震重力变化以及震后重力变化。

地震引起的重力变化除了反映在 GRACE 数据直接提取的“正-负”信号模式外,还能更加敏感地反映在提取出的同震重力梯度变化上。Li 和 Shen^[47]用 GRACE 时变重力场的水平梯度分量来检测同震变化效应,指出重力水平梯度分量的“正-负-正”模式能够更加敏感地探测到倾滑型大地震引起的同震变化效应,且基于 2004 苏门答腊地震实例进行了验证。孙文科和周新^[48]采用球形地球模型提出一种计算同震垂线偏差变化的方法,并将其应用于 GRACE 观测重力数据的解析研究,利用位错理论及计算方法,研究了 2011 日本东北大地震和 2010 智利地震产生的垂线偏差变化,根据数值计算和结果说明两个地震的同震垂线偏差变化可以被 GRACE 检测出来,且垂线偏差相比大地水准面对断层模型更加敏感。

2.2 利用重力数据研究地壳运动的构造应力场

地壳厚度相比构造运动的尺度小很多,因此通常将地壳作为薄板处理,并采用相应水平面内的力学平衡条件建模。平衡方程涉及的体力项包括两类。一类是重力势能 (gravitational potential energy, GPE) 的水平空间梯度。其中,GPE 是岩石圈内各个平面位置下部的静岩应力在深度方向上的积分值。关于 GPE 的最新相关研究都是针对大尺度的地壳构造变形^[49],只有少数研究针对局部地壳的构造变形^[50]。二维平衡方程中的另一类体力项是地壳的水平牵引力,由地壳底部的地幔对流引起,是产生动力学构造地形的原因。在关于大尺度板块构造变形的研究中,地壳水平牵引力对地壳应力场的影响与 GPE 的影响程度相当^[51,52]。

如果能够准确估计上述二维地壳模型中的两种体力项,就可以通过求解平衡方程得到地壳的应力参数,估计地壳的应力场。地壳处于均衡状态时,地幔流的牵引力可以忽略^[53],这时只需要尽量准确地估计 GPE 的水平空间梯度。目前,计算 GPE 的方法分为两类,一类是通过岩石圈厚度和密度分布资料计算,另一类根据大地水准面计算。其中,大地水准面是重力场的一种描述形式,是间接的重力观测值,利用大地水准面高计算 GPE 进而估计地壳应力场是利用大地测量数据计算地壳构造应力场的一种方法。在较早的研究中,Coblentz^[54]、Sandiford 和 Coblentz^[55]、Flesch 等^[56,57]利用大地水准面高来计算 GPE,计算模型为:

$$\Delta U = -\frac{\Delta Ng^2}{2\pi G} \quad (1)$$

式中, G 是万有引力常数; g 是重力加速度; ΔU 是根据大地水准面计算得到的 GPE。Haxby 和 Turcotte^[58]指出,当研究区域的构造运动主要是由均衡补偿效应引起时才能使用式(1)。Ghosh 等^[53]也对这个计算模型的适用性进行了分析,认为当研究区域没有动力学构造运动,或者计算 GPE 的积分参考面上静岩压力变化缓慢时,可以将大地水准面作为 GPE 的近似估计。在这些适用条件下,Humphreys 和 Coblentz^[59]用大地水准面近似估计 GPE,然后计算了北美板块的区域构造应力。Ghosh 等^[53]利用大地水准面计算构造应力场的方法研究了全球范围的构造应力场,他们分别采用 Crust2.0 地壳密度模型和 EGM96 地球重力场的大地水准面计算结果估计 GPE,然后计算全球构造应力场,比较两种结果以后,发现

大部分区域的符合程度不好,说明这种方法只适用于区域构造应力场的计算。Camelbeeck 等^[60]改进了利用大地水准面高计算 GPE 的方法,他们将大地水准面高的二阶空间导数作为 GPE 的近似,应用 EGM2008 地球重力场模型的大地水准面高计算欧洲西部的局部构造应力场,结果与应力观测资料和震源机制符合较好。

国内的相关研究中,游永雄^[61]最早尝试通过重力数据研究地壳构造应力场,他将地壳作为二维薄板处理,建立水平面内的力学平衡方程,其中包含地壳的构造应力参数和密度参数又通过无限平板产生重力异常的数学模型,将平衡方程中的密度参数与重力异常参数建立联系,从而建立了利用重力观测值研究地壳构造应力的数学模型,推导得到分别由重力异常和垂线偏差计算地壳构造应力的理论公式。向文和李辉^[62]基于游永雄^[61]的研究结果,推导了利用均衡重力异常计算地壳构造应力场和应力降的公式。除了上述的解析模型以外,晁定波等^[63]和许才军^[42]提出并研究了四维整体大地测量(包含重力数据)有限单元法,将大地测量模型和固体力学方程的有限单元法结合在一起,构建数值模型,用包含重力观测值的大地测量资料作为约束反演地壳应力应变场。之后,国内学者的研究大部分根据游永雄^[61]的解析公式,从现象上分析重力场和地壳应力应变场之间的关系。曹学伟等^[64]利用重力资料研究了华北地区的构造应力场;戴王强等^[65]根据陕西省的 GPS 资料和重力资料研究了重力场和应变场的分布和变化特征,说明两者之间存在相关性;祝意青等^[66]利用中国大陆的重力资料研究了中国大陆重力场变化引起的动力学特征,其中也包含中国大陆重力场变化与地壳应力场之间的相关现象;段虎荣等^[67]用数值模拟的方法分别研究了地壳水平运动和垂直运动产生的重力场变化,并比较了利用 GPS 资料理论计算的重力变化与 GRACE 卫星观测得到的重力变化,结果显示它们具有一致性。

3 大地测量资料反演研究构造应力应变场的具体应用分析

3.1 大地测量资料反演构造应力应变场在区域地球动力学研究中的应用

大地测量观测资料是地球内部动力过程在地表的输出信号,根据大地测量观测资料,同时结合地球动力学模型,能够反演动力学参数,解释地球

动力学现象。作为构造运动活跃的地理单元,青藏高原的动力学机制一直是国际地学界的研究热点,近年来,大地测量资料已广泛应用于青藏高原局部地区的动力学研究,且解决了一些争论问题。在青藏高原南缘,尼泊尔地区的地震活动周期和地震活动规律一直存在争议,即为什么在同一个位置连续发生了多次小地震以后仍然能够发生大地震。Feldl 和 Bilham^[68]利用 GPS 资料并通过模拟实验研究了该区域地震释放应变能的方式。他们构造青藏高原的边界元模型,利用 GPS 资料反演青藏高原和印度板块交界面的滑动速率、几何形状以及闭锁位置,然后根据这些动力学参数模拟板块交界面上的滑动-闭锁-地震过程,建立了地震释放应变能和破裂长度、震级之间的函数模型。他们根据模型说明这个地区的小地震只能释放少量的应变能,而残余应变能足以引发大地震,从而解释了之前关于这个问题的争论,并预测这些地震的复发周期大约为 500 a。

由于板块几何结构和动力学过程复杂,利用大地测量资料研究板块构造运动通常采用数值模型。曹学伟^[69]基于有限单元法,利用 2005~2006 年 GPS 观测资料研究了华北地区的应力应变场分布特征,并解释了该区域的地球动力学现象。他将一部分 GPS 观测值作为位移边界条件,用最小二乘方法求解介质参数和边界力,目标函数是地表 GPS 观测点的模型计算值与观测值的残差平方和。反演结果显示了华北地区的应力场分布状态,应变能密度变化较以往变化不大,主应力与深度、最大差应力值与深度均呈现从浅部到深部有逐渐增大的趋势。

3.2 利用大地测量资料反演构造应力应变场在地震危险性评估的应用

活动断层地震危险性评估是指利用反映活动断层长期习性的各种参数,结合其深部构造环境、现代运动状态和近断层应力应变等资料,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^[70]。其中,地震学和地质学提供深部构造环境的研究成果,库仑应力分析技术计算近断层的应力应变状态,利用大地测量资料获得的构造应力应变场则提供了现代运动状态,这些研究成果的结合能够实现地震危险性的评估。地震危险性评估研究主要涉及地震产生的时空特征,即发震位置的判断^[71,72]和地震复发周期的特点^[73~75]。

一些研究认为,地震发生之前,断层附近的应力应变场会产生异常变化,因此通过大地测量资

料研究构造应力场,对地震进行短期预报。刁桂苓等^[76]通过对对比分析四川汶川地震和台湾集集地震前的CMT解、震源区附近的中小地震震源机制解和用GPS资料反演的应力场,发现汶川地震和集集地震前均出现局部应力场转换现象,并且这种转换出现在震中附近地区且集中,在主震前的几个月,认为这很可能是强震孕育到临界破裂过程的征兆。江在森等^[77]和王双绪等^[78]认为,断层形变异常除具有典型的 α - β - γ 相的异常外,还有趋势转折、台阶、突跳等异常类型,这些异常对地震地点和时间预测均有贡献,并据此研究判定中短期危险区,实现对2000年景泰5.9级地震较成功的短期预报。无震滑动引起的地表形变能够被大地测量技术观测到,反映的是断面上的剪切应力状态的变化,除了能够发生在震后的应力调整过程^[79-80],也会出现在地震发生之前^[81,82],因此也被认为是一种地震前兆信号。Ogata^[83]研究了发生在同一区域内的三次连续地震,即M6.8 Chuetsu地震、M6.9 Noto Hanto地震和M6.8 Chuetsu-oki地震,通过分析它们发震前的地震数据和GPS观测数据,认为三次地震前均出现了无震滑动引起的地表形变异常,并解释了三者之间的应力触发机制。

3.3 利用地测量资料反演构造应力应变场在火山活动性研究的应用

地壳区域应力应变场的改变同时影响区域内的地震活动性和火山活动性^[84,85],利用大地测量资料能够研究区域应力应变场的变化和地震、火山活动之间的相互作用,为研究火山的活动性提供一种有效途径。

东非大裂谷是构造运动活跃的地理单元,曾经历过多种类型的构造运动,比如大地震、火山喷发、岩浆倾入和微震群,并且发生位置十分接近。2007~2008年间,坦桑尼亚北部的Lake Natron地区在20 km²的范围内发生了上述所有类型的构造运动,由InSAR数据得到的地表形变场为研究它们之间的物理机制提供了丰富的大地测量资料。Baer等^[86]、Calais等^[87]和Biggs等^[88]对2007年7~8月间发生的事件序列构建动力学模型,研究了地堑边缘断层、Gelei岩脉和Gelei岩浆囊之间相互作用的动力学机制。2008~2010年间,Oldoinyo Lengai火山喷发, Biggs等^[89]又加入这个时段的大地测量数据,研究地堑边缘断层和Gelei岩脉之间的相互作用以及对Oldoinyo Lengai火山喷发事件的触发机制,他们根据地表形变数据和动力学模型计算了区域应力应变场的

变化,分析认为,Gelei岩脉扩张和Oldoinyo Lengai火山喷发是由于深部的一个新岩浆系统侵入上部地壳引起的。

国内学者主要针对长白山地区的火山进行了相关研究。2011年3月11日,日本宫城Mw 9.0级大震后的两天,九州岛上新燃岳火山发生大规模喷发。为了探讨此次火山喷发是否是受地震触发所致,以及地震是否同样也会造成富士山火山和长白山火山的喷发,王凡等^[90]根据由同震GPS位移场计算得到3个火山地区地表面的应变值,以及由地震造成的区域应力应变场模型计算的表面应变值,发现三个火山区均处于面应变膨胀区,据此分析认为长白山火山的活动性增加。陈国浒^[91]等利用GPS、InSAR数据获取长白山地区的形变场,并反演岩浆囊参数,研究了长白山地区的火山活动机制。除此之外,季灵运等^[92,93]、许才军等^[94]利用InSAR资料研究了其他一些火山的活动性规律。

4 研究展望

4.1 利用地面重力数据研究构造应力应变场的(粘)弹(塑)性地壳模型构建

地球主要分为三层:地壳、地幔和地核,地幔又进一步可以分为上地幔、过渡层和下地幔三个层区,另外从力学上考虑重力均衡现象,上地幔必须存在物质可以沿水平方向流动的地层,并称其为软流层^[95]。大地测量学研究的地球结构主要是地壳和软流层,通常认为两者分别是弹性体和粘弹性体。大地测量数据包括几何观测量(GPS、InSAR和水准数据)和物理观测量(重力)。相比于GPS、InSAR和水准数据这些地表的几何观测量数据,属于物理观测量的重力数据包含了更加丰富的地壳内部信息,这无疑对于稳健研究地球内部的动力学运动如深部地壳的构造应力应变场是有利的。

根据§2.2的介绍,综观已有的根据重力反演地壳应力应变场的模型,目前的解析模型均将地壳视为流体,然后通过流体静力平衡求解地壳的应力场分布。然而,真实的地壳介质属性更接近于弹性体,因此用流体表示地壳会存在模型误差。在数值模型方面,虽然四维大地测量的有限单元法能够将地壳视为弹性体,并且能够联合GPS资料和重力资料反演地壳的应力应变场,但是构建数值模型是费时和繁琐的,从而降低了模型的实用性。可见,目前还缺少利用重力资料反

演地壳应力应变场的弹性体解析模型,因此构建此类模型是必要的。

另外,近年来,利用重力资料反演地壳应力场的模型中,重力数据是通过大地水准面引进,而大地水准面根据全球重力场模型计算,反映重力场的中长波特征,对于地壳构造运动产生的重力变化不敏感,只有长时间累积的重力信号才能被重力卫星探测到,并被考虑在重力场模型中^[44],这降低了模型的时间分辨率。然而,地面重力数据则能够反映高时间分辨率的重力场短波特征,其中包含地壳形变的信号。因此,要想利用重力数据反演高时间分辨率的地壳构造应力应变场,需要采用地面重力数据。这样的模型也有利于将来与GPS数据联合反演地壳构造应力应变场。

因此,需要完善联系地面重力和弹性地壳构造应力应变场的解析模型,并在此基础上建立粘弹性、弹塑性的利用地面重力数据确定地壳构造应力应变场的解析模型。

4.2 联合多类数据反演时变地壳构造应力应变场

一个物理事件的发生伴随各种信号场的变化,其在空间域和时间域上均具有特定的模式,且能被观测到。反演工作是根据这些观测到的信息求解信号源的物理结构,除了与接收到的观测信息有关以外,还依赖于信号经过的介质。地壳构造运动会产生地表位移场和空间重力场的变化,前者为几何量,后者为物理量。因此,为了得到稳健可靠的地壳构造应力应变场反演结果,需要尽可能联合多类数据,并根据弹性理论或者非弹性理论构建准确的介质模型。

为了更加精确地研究复杂区域的局部应力应变场,必须考虑各种因素的影响,比如构建基于粘弹塑性理论的非均匀介质结构,融合多源观测数据和约束条件,如大地测量几何观测量(如GPS和InSAR)、物理量(重力)和震源机制解,完善联合反演的理论研究,以重力变化为物理约束和地震矩等为地震约束,且联合三维地表时变位移反演地壳应力应变场的时变规律,建立相应的联合反演模型。

通过异质地表形变多源观测资料的融合处理获取地表形变的时空特征,建立我国地壳应力背景场和时变地壳应力应变场模型,联合物质迁移引起的重力变化(物理约束)、动态形变的几何约束以及地震震源机制解的约束,反演时变地壳应力应变场参数,进一步建立中国大陆时变地壳应力应变场模型。上述工作能够充分利用地壳的地

表信息、深部信息以及物理机制研究和构建我国大陆地壳的时变应力应变场模型,有助于更完整地认识地壳应力应变场的时空演化规律。

4.3 时变地壳应力应变场与地震应力触发机制研究

地震的孕育、发生及震后调整过程必然伴随有地壳形变发生,且是地震过程中最直观的现象。相比于地壳构造运动引起的大尺度形变,地震引起的地壳变形一般属于局部形变,不过强震引起的地壳变形十分明显,甚至能够引起地壳大尺度的变形,如发生在2004年的苏门答腊安达列地震,产生的同震形变可以在震中距达到4500 km处用GPS观测到^[96-99]。地震破裂产生的形变是地壳快速释放应变能的特殊形式,对地壳应力应变场的研究需要精确估计地震的影响,所以对地震尤其是强震激发的地壳应力应变场的时变特征建模十分必要,可以针对强震引起的物质迁移构建地表形变和地球局部重力场时变模型。

研究显示,同震滑动和震后余滑之间存在物理机制的联系,两者在断层面上的空间分布具有互补性,因此两个过程的大地测量观测数据能够互为“物理机制约束”^[100,101]。类似地,地壳构造运动不同时段之间的大地测量资料之间也存在物理机制的联系,并以此作为约束进行地壳构造应力应变场的反演研究。比如地震震源机制解是根据同震地震波资料或者大地测量资料计算得到的,其反映的是地震发震时刻的地壳应力场状态,而发震时刻与地壳构造运动在时间域上是分离的,所以用震源机制解来约束地壳构造运动正是一种物理机制约束,该物理机制认为发震时刻与相邻时段的地壳构造应力场状态是一致的。并且引入震源机制解也是在地壳应力应变场研究中加入地震波数据的一种途径。通过时变应力应变场来研究地震周期中不同时段的应力转移模式,从而研究地震应力触发机理,可以为更完整地认识地壳应力场的时空演化过程以及为定位未来潜在地震危险段提供科学依据。

参 考 文 献

- [1] Ye Junlin, Huang Dinghua, Zhang Junxia. Introduction to Geology [M]. Beijing: Peking Press, 1996: 126(叶俊林, 黄定华, 张俊霞. 地质学概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1996: 126)
- [2] Li Siguang. Introduction to Geomechanics [M]. Beijing: Science Press, 1973: 12(李四光. 地质力学概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1973: 12)
- [3] Shi Yaolin, Zhu Shoubiao. Discussion on Method of

- Calculating Strain with GPS Displacement Data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2006, 26(1):1-8(石耀霖, 朱守彪. 用GPS位移资料计算应变方法的讨论[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(1): 1-8)
- [4] Wu Y, Jiang Z, Yang G, et al. Comparison of GPS Strain Rate Computing Methods and Their Reliability[J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 185(2): 703-717
- [5] Xu Caijun, Wen Yangmao. Identification of Models for Crustal Movement and Strain of Blocks [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2003, 23(3): 50-55(许才军, 温扬茂. 活动地块运动和应变模型辨识[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(3): 50-55)
- [6] Zhang Yongzhi, Wu Xiaoli, Wang Weidong, et al. The Tectonic Stress Variation Derived by Using Green's Function Based on GPS Data Before Wenchuan Ms=8.0 Strong Earthquake[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1): 11-15(张永志, 吴小利, 王卫东, 等. 基于GPS观测的格林函数法研究汶川8.0级强震前构造应力场变化[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 11-15)
- [7] Zhang Yongzhi, Duan Hurong, Wang Weidong, et al. Tectonic Stress Variation of Fenwei Basin Derived from GPS Data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(2): 44-47(张永志, 段虎荣, 王卫东, 等. 用GPS数据研究汾渭盆地构造应力场变化[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(2): 44-47)
- [8] Xu Caijun. The Kinematics Models of Crustal Movement and Tectonic Stress Field in the Tibetan Plateau [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2002(许才军. 青藏高原地壳运动模型与构造应力场[M]. 北京: 测绘出版社, 2002)
- [9] Zheng Y, Chen Y, Fu R, et al. Simulation of the Effect of Faults Movement on Stress and Deformation Fields of Tibetan Plateau by Discontinuous Movement Models[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(5): 1 199-1 212
- [10] 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): 1 135-1 154
- [11] Okada Y. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1992, 82(2): 1 018-1 040
- [12] Okubo S. Potential and Gravity Changes Raised by Point Dislocations[J]. *Geophysical Journal International*, 1991, 105(3): 573-586
- [13] 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): 7 137-7 144
- [14] Yang X, Davis P M. Deformation Due to a Rectangular Tension Crack in an Elastic Half-space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1986, 76(3): 865-881
- [15] Chinnery M A. The Deformation of the Ground Around Surface Faults[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1961, 51(3): 355-372
- [16] Chinnery M A. The Stress Changes that Accompany Strike-slip Faulting[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1963, 53(5): 921-932
- [17] 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(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)
- [18] Meade B J. Algorithms for the Calculation of Exact Displacements, Strains, and Stresses for Triangular Dislocation Elements in a Uniform Elastic Half Space[J]. *Computers & Geosciences*, 2007, 33(8): 1 064-1 075
- [19] Yoffe E H. The Angular Dislocation[J]. *Philosophical Magazine*, 1960, 50(5): 161-175
- [20] Comninou M, Dundurs J. The Angular Dislocation in a Half Space[J]. *Journal of Elasticity*, 1975, 5(3/4): 203-216
- [21] Jeyakumaran M, Rudnicki J W, Keer L M. Modeling Slip Zones with Triangular Dislocation Elements [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1992, 82(5): 2 153-2 169
- [22] Meade B J. Algorithms for the Calculation of Exact Displacements, Strains, and Stresses for Triangular Dislocation Elements in a Uniform Elastic Half Space[J]. *Computers & Geosciences*, 2007, 33(8): 1 064-1 075
- [23] Jiang G, Xu C, Wen Y, et al. Inversion for Coseismic Slip Distribution of the 2010 Mw 6.9 Yushu Earthquake from InSAR Data Using Angular Dislocations [J]. *Geophysical Journal International*, 2013, doi:10.1093/gji/ggt141.
- [24] Wang R, Martín F L, Roth F. PSGRN/PSCMP—A New Code for Calculating Co- and Post-seismic Deformation, Geoid and Gravity Changes Based on the Viscoelastic-Gravitational Dislocation Theory [J]. *Computers & Geosciences*, 2006, 32(4): 527-541

- [25] Wang R, Marín F L, Roth F. Computation of Deformation Induced by Earthquakes in a Multi-layered Elastic Crust—FORTRAN Programs EDGRN/ED-CMP[J]. *Computers & Geosciences*, 2003, 29(2): 195–207
- [26] Sun W. Potential and Gravity Changes Caused by Dislocations in Spherically Symmetric Earth Models [J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo*, 1992, 67: 89–238
- [27] Sun W, Okubo S. Surface Potential and Gravity Changes Due to Internal Dislocations in a Spherical Earth—I. Theory for a Point Dislocation[J]. *Geophysical Journal International*, 1993, 114(3): 569–592
- [28] Fu Guangyu, Sun Wenke. Overall Design and Specific Structure of the Computing Codes for Coseismic Deformations on a Layered Spherical Earth[J]. *Earthquake*, 2012, 32(2): 73–87(付广裕, 孙文科. 球体位错理论计算程序的总体设计与具体实现[J]. 地震, 2012, 32(2): 73–87)
- [29] Fu G, Sun W. Surface Coseismic Gravity Changes Caused by Dislocations in a 3-D Heterogeneous Earth [J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 172(2): 479–503
- [30] Fu G, Sun W. Effects of Earth's Lateral Heterogeneity on Co-seismic Gravity Changes at Deformed Earth Surface and Space-fixed Point[J]. *Chinese Journal Geophysics*, 2012, 55(8): 2 728–2 746
- [31] Masterlark T. 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]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B11): 2 540
- [32] Hearn E H, Bürgmann R. The Effect of Elastic Layering on Inversions of GPS Data for Coseismic Slip and Resulting Stress Changes: Strike-Slip Earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95(5): 1 637–1 653
- [33] Dubois L, Feigl K L, Komatsch D, et al. Three-dimensional Mechanical Models for the June 2000 Earthquake Sequence in the South Iceland Seismic Zone[J]. *Tectonophysics*, 2008, 457(1/2): 12–29
- [34] Trasatti E, Kyriakopoulos C, Chini M. Finite Element Inversion of DInSAR Data from the Mw 6.3 L'Aquila Earthquake, 2009 (Italy)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(8): L8306
- [35] Freed A M, Bürgmann R, Calais E, et al. Implications of Deformation Following the 2002 Denali, Alaska, Earthquake for Postseismic Relaxation Processes and Lithospheric Rheology[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B1): B1401
- [36] Coussy O. Problems of Poroelasticity[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003:113–150
- [37] Barbot S, Fialko Y. A Unified Continuum Representation of Post-seismic Relaxation Mechanisms: Semi-analytic Models of Afterslip, Poroelastic Rebound and Viscoelastic Flow[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 182(3): 1 124–1 140
- [38] Peltzer G, Rosen P, Rogez F, et al. Poroelastic Rebound Along the Landers 1992 Earthquake Surface Rupture[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B12): 30 131–30 145
- [39] Pollitz F F, Peltzer G, Bürgmann R. Mobility of Continental Mantle: Evidence from Postseismic Geodetic Observations Following the 1992 Landers Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, 105(B4): 8 035–8 054
- [40] Fialko Y. Evidence of Fluid-filled Upper Crust from Observations of Postseismic Deformation Due to the 1992 Mw 7.3 Landers Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2004, 109(B8): B8401
- [41] Johnson K M, Bürgmann R, Freymueller J T. Coupled After Slip and Viscoelastic Flow Following the 2002 Denali Fault, Alaska Earthquake[J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 176 (3): 670–682
- [42] Xu Caijun. Progress of Joint Inversion on Geodesy and Geophysics[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(6): 555–561(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)
- [43] Sun W, Okubo S. Coseismic Deformations Detectable by Satellite Gravity Missions: A Case Study of Alaska (1964, 2002) and Hokkaido (2003) Earthquakes in the Spectral Domain[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2004, 109 (B4): B4405
- [44] Mikhailov V, Tikhotsky S, Diament M, et al. Can Tectonic Processes be Recovered from New Gravity Satellite Data? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 228(3/4): 281–297
- [45] Han S, Shum C K, Bevis M, et al. Crustal Dilatation Observed by GRACE After the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake [J]. *Science*, 2006, 313 (5 787):658–662
- [46] De Viron O, Planet I, Mikhailov V, et al. Retrieving Earthquake Signature in Grace Gravity Solutions [J]. *Geophysical Journal International*,

- 2008, 174(1): 14-20
- [47] Li J, Shen W. Investigation of the Co-seismic Gravity Field Variations Caused by the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake Using Monthly GRACE Data [J]. *Journal of Earth Science*, 2011, 22(2): 280-291
- [48] Sun Wenke, Zhou Xin. Calculation Method of Change of Vertical Deflection and Its Application of Large Earthquake [J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2012(6): 96(孙文科, 周新. 同震垂线偏差变化的计算方法及其在大地震研究中的应用[J]. 国际地震动态, 2012(6): 96)
- [49] Naliboff J B, Lithgow-Bertelloni C, Ruff L J, et al. The Effects of Lithospheric Thickness and Density Structure on Earth's Stress Field [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 188(1): 1-17
- [50] Pascal C, Cloetingh S A P L. Gravitational Potential Stresses and Stress Field of Passive Continental Margins: Insights from the South-Norway Shelf [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277(3/4): 464-473
- [51] Ghosh A, Holt W E, Wen L, et al. Joint Modeling of Lithosphere and Mantle Dynamics Elucidating Lithosphere-mantle Coupling [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(16): L16309
- [52] Faccenna C, Becker T W. Shaping Mobile Belts by Small-scale Convection [J]. *Nature*, 2010, 465(7298): 602-605
- [53] Ghosh A, Holt W E, Flesch L M. Contribution of Gravitational Potential Energy Differences to the Global Stress Field [J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 179(2): 787-812
- [54] Coblenz D D, Richardson R M, Sandiford M. On the Gravitational Potential of the Earth's Lithosphere [J]. *Tectonics*, 1994, 13(4): 929-945
- [55] Sandiford M, Coblenz D. Plate-scale Potential-energy Distributions and the Fragmentation of Ageing Plates [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 126(1/3): 143-159
- [56] Flesch L M, Holt W E, Haines A J, et al. Dynamics of the Pacific-North American Plate Boundary in the Western United States [J]. *Science*, 2000, 287(5454): 834-836
- [57] Flesch L M, Haines A J, Holt W E. Dynamics of the India-Eurasia Collision Zone [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2001, 106(B8): 16 435-16 460
- [58] Haxby W F, Turcotte D L. On Isostatic Geoid Anomalies [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1978, 83(B11): 5473-5478
- [59] Humphreys E D, Coblenz D D. North American Dynamics and Western U. S. Tectonics [J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(3): G3001
- [60] Camelbeeck T, De Viron O, Van Camp M, et al. Local Stress Sources in Western Europe Lithosphere from Geoid Anomalies [J]. *Lithosphere*, 2013, 5(3): 235-246
- [61] You Yongxiong. A Research on the Conversion of Gravity Field into Regional Tectonic Stress Field [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1994(S2): 259-271(游永雄. 重力场转换区域构造应力场的研究[J]. 地球物理学报, 1994(S2): 259-271)
- [62] Xiang Wen, Li Hui. Study on the Inner Region of Gravity to Tectonic Stress Fields [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 1999, 19(1): 32-36(向文, 李辉. 重力场与构造应力场内在关系的理论研究[J]. 地壳形变与地震, 1999, 19(1): 32-36)
- [63] Chao Dingbo, Xu Caijun, Liu Dajie. Finite Element Method of Four Dimensional Integrated Geodesy [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1997(1): 9-15(晁定波, 许才军, 刘大杰. 四维整体大地测量的有限单元法[J]. 测绘学报, 1997(1): 9-15)
- [64] Cao Xuewei, Dang Yaming, Zhang Chuanyin, et al. Research on the Tectonic Stress Field in North China with Gravity Data [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010, 35(3): 40-42(曹学伟, 党亚民, 章传银, 等. 利用重力资料研究华北地区构造应力场[J]. 测绘科学, 2010, 35(3): 40-42)
- [65] Dai Wangqiang, Gao Haolin, Dou Mali, et al. Recent Variation Characteristics of Gravity and Strain Fields within Middle Region of Shanxi [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007, 27(6): 105-108, 128(戴王强, 高好林, 窦玛丽, 等. 陕西中部地区近年来重力和应变场变化特征研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(6): 105-108, 128)
- [66] Zhu Yiqing, Liang Weifeng, Li Hui, et al. On Gravity Field Variations and Geodynamic Characteristics in Mainland of China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(3): 246-250(祝意青, 梁伟峰, 李辉, 等. 中国大陆重力场变化及其引起的地球动力学特征[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(3): 246-250)
- [67] Duan Hurong, Zhang Yongzhi, Xu Haijun, et al. Characteristics of Gravity Change Caused by Crustal Vertical Movement in Western China [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(3): 25-28(段虎荣, 张永志, 徐海军, 等. 中国西部地壳垂直运动引起的重力场空间变化特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(3): 25-28)
- [68] Feldl N, Bilham R. Great Himalayan Earthquakes and the Tibetan Plateau [J]. *Nature*, 2006, 444

- (7 116): 165-170
- [69] Cao Xuewei. Study on Inversion of Regional Tectonic Stress Field and Models Based on Geodesy Data[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2010(曹学伟. 基于大地测量资料的区域构造应力场反演及模型研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2010)
- [70] China Seismological Bureau. Tutorial of China Earthquake Active Fault Detection Technology System[S]. Beijing, 2005(中国地震局. 中国地震活动断层探测技术系统技术教程[S]. 北京, 2005)
- [71] Deng J, Sykes L R. Evolution of the Stress Field in Southern California and Triggering of Moderate-size Earthquakes: A 200-year Perspective[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B5): 9 859-9 886
- [72] Nalbant S S, McCloskey J, Steacy S, et al. Stress Accumulation and Increased Seismic Risk in Eastern Turkey[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 195(3/4): 291-298
- [73] Smith B, Sandwell D. Coulomb Stress Accumulation Along the San Andreas Fault System[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B6): 2 296
- [74] Parsons T. M ≥ 7.0 Earthquake Recurrence on the San Andreas Fault from a Stress Renewal Model [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B12): B12305
- [75] Smith-Konter B, Sandwell D. Stress Evolution of the San Andreas Fault System: Recurrence Interval Versus Locking Depth[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(13): L13304
- [76] Diao Guiling, Xu Xiwei, Chen Yugao, et al. The Precursory Significance of Tectonic Stress Field Transformation Before the Wenchuan Mw 7.9 Earthquake and the Chi-Chi Mw 7.6 Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(1): 128-136(刁桂苓, 徐锡伟, 陈于高, 等. 汶川 Mw 7.9 和集集 Mw 7.6 地震前应力场转换现象及其可能的前兆意义[J]. 地球物理学报, 2011, 54(1): 128-136)
- [77] Jiang Zaisen, Zhu Yiqing. On Fault Deformation and Geodynamic Characteristics During Seismogenic Progress of Yongdeng Mw 5.8 Earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1998, 20(3): 264-271(江在森, 祝意青. 永登 5.8 级地震孕育发生过程中的断层变形与重力场动态图像特征[J]. 地震学报, 1998, 20(3): 264-271)
- [78] Wang Shuangxu, Jiang Zaisen, Chen Wensheng, et al. Fault Deformation Anomaly and Medium and Short-term Prediction of Jianguo Ms 5.9 Earthquake[J]. 2001, 23(2): 151-158(王双绪, 江在森, 陈文胜, 等. 景泰 5.9 级地震的断层形变异常及中短期预报[J]. 地震学报, 2001, 23(2): 151-158)
- [79] Barbot S, Fialko Y, Bock Y. Postseismic Deformation Due to the Mw 6.0 2004 Parkfield Earthquake: Stress-driven Creep on a Fault with Spatially Variable Rate-and-state Friction Parameters[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2009, 114(B7): B7405
- [80] Ergintav S, Mcclusky S, Hearn E, et al. Seven Years of Postseismic Deformation Following the 1999, M=7.4 and M=7.2, Izmit-Düzce, Turkey Earthquake Sequence[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2009, 114(B7): B7403
- [81] Segall P, Desmarais E K, Shelly D, et al. Earthquakes Triggered by Silent Slip Events on Kilauea Volcano, Hawaii[J]. *Nature*, 2006, 444(7 116): 235
- [82] Ogata Y. Seismicity and Geodetic Anomalies in a Wide Area Preceding the Niigata-Ken-Chuetsu Earthquake of 23 October 2004, Central Japan[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B10): B10301
- [83] Ogata Y. Pre-seismic Anomalies in Seismicity and Crustal Deformation: Case Studies of the 2007 Noto Hanto Earthquake of M6.9 and the 2007 Chuetsu-oki Earthquake of M6.8 After the 2004 Chuetsu Earthquake of M6.8[J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 186(1): 331-348
- [84] Walter T R, Amelung F. Volcanic Eruptions Following M ≥ 9 Megathrust Earthquakes: Implications for the Sumatra-Andaman Volcanoes[J]. *Geology*, 2007, 35(6): 539-542
- [85] Velasco A A, Hernandez S, Parsons T, et al. Global Ubiquity of Dynamic Earthquake Triggering [J]. *Nature*, 2008, 46(1): 375-379
- [86] Baer G, Hamiel Y, Shamir G, et al. Evolution of a Magma-driven Earthquake Swarm and Triggering of the Nearby Oldoinyo Lengai Eruption, as Resolved by InSAR, Ground Observations and Elastic Modeling, East African Rift, 2007[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 272(1/2): 339-352
- [87] Calais E, D'Oreye N, Albaric J, et al. Strain Accommodation by Slow Slip and Dyking in a Youthful Continental Rift, East Africa [J]. 2008, 456(7 223): 783-787
- [88] Biggs J, Amelung F, Gourmelen N, et al. InSAR Observations of 2007 Tanzania Rifting Episode Reveal Mixed Fault and Dyke Extension in an Immature Continental Rift[J]. *Geophysical Journal International*

- ternational, 2009, 179(1): 549-558
- [89] Biggs J, Chivers M, Hutchinson M C. Surface Deformation and Stress Interactions During the 2007-2010 Sequence of Earthquake, Dyke Intrusion and Eruption in Northern Tanzania[J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 195(1): 16-26
- [90] Wang Fan, Shen Zhengkang, Wang Yanzhao, et al. Influence of the March 11, 2011 Mw 9.0 Tohoku-oki Earthquake on Regional Volcanic Activities[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011(14): 1 080-1 083
(王凡, 沈正康, 王彦昭, 等. 2011年3月11日本宫城Mw9.0级地震对其周边地区火山活动的影响[J]. 科学通报, 2011(14): 1 080-1 083)
- [91] Chen Guohu, Shan Xinjian, Moon W M, et al. A Modeling of the Magma Chamber Beneath the Changbai Mountains Volcanic Area Constrained by InSAR and GPS Derived Deformation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008(4): 1 085-1 092
(陈国浒, 单新建, Moon W M, 等. 基于InSAR、GPS形变场的长白山地区火山岩浆囊参数模拟研究[J]. 地球物理学报, 2008(4): 1 085-1 092)
- [92] Ji Lingyun, Xu Jiandong, Zhao Bo, et al. Present-day Activity of Ashikule Volcanic Group from InSAR[J]. *Seismology and Geology*, 2013(3): 532-541
(季灵运, 许建东, 赵波, 等. 利用InSAR技术研究新疆阿什库勒火山群现今活动性[J]. 地震地质, 2013(3): 532-541)
- [93] Ji Lingyun, Lu Zhong, Wang Qingliang, et al. Deformation Characteristics and Magma Chamber Parameters and Agung Volcano by SBAS-InSAR[J]. *Journal of Seismological Research*, 2013(3): 313-318
(季灵运, 露中, 王庆良, 等. 利用SBAS-InSAR技术研究印尼Agung火山的形变特征与岩浆房参数[J]. 地震研究, 2013(3): 313-318)
- [94] Xu Caijun, He Ping, Wen Yangmao. Surface Deformation of Mt. Etna, Italy from PSInSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(9): 1 012-1 016
(许才军, 何平, 温扬茂. 利用PSInSAR研究意大利Etna火山的地表形变[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(9): 1 012-1 016)
- [95] Zhou Shiyong. *Modern Seismology*[M]. Beijing: Peking University Press, 2010: 196
(周仕勇. 现代地震学教程[M]. 北京:北京大学出版社, 2010: 196)
- [96] Banerjee P, Pollitz F F, Bürgmann R. The Size and Duration of the Sumatra-Andaman Earthquake from Far-Field Static Offsets[J]. *Science*, 2005, 308(5 729): 1 769-1 772
- [97] Khan S A, Gudmundsson Ó. GPS Analyses of the Sumatra-Andaman Earthquake[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2005, 86(9): 89-94
- [98] Ammon C J, Ji C, Thio H, et al. Rupture Process of the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake[J]. *Science*, 2005, 308(5 725): 1 133-1 139
- [99] Fu G, Sun W. Global Co-seismic Displacements Caused by the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake (Mw 9.1)[J]. *Earth, Planets Space*, 2006, 58(2): 149-152
- [100] Wang L, Hainzl S, Zöller G, et al. Stress- and Aftershock-Constrained Joint Inversions for Coseismic and Postseismic Slip Applied to the 2004 M6.0 Parkfield Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B7): B7406
- [101] Sun J, Johnson K M, Cao Z, et al. Mechanical Constraints on Inversion of Coseismic Geodetic Data for Fault Slip and Geometry: Example from InSAR Observation of the 6 October 2008 Mw 6.3 Dangxiong-Yangyi (Tibet) Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B1): B1406

Progress in Inversion for Tectonic Stress-strain Fields Using Geodetic Data

XU Caijun^{1,2} YIN Zhi^{1,2}

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

2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan 430079, China

Abstract: This paper reviews the progress and the theoretical achievements in stress-strain calculation using geodetic measurements over the past ten years and profiles domestic and international research with a discussion about the relationship between the gravity and stress-strain fields. Studies and applications of stress-strain inversion using geodetic data are summarized, and the outstanding problems are analyzed. The development of geodesy technology will continue pushing for the perfection of the

(下转第1178页)

Investigation to Discontinuity in the IGS Final Ephemeris and Corresponding Treatment

LIU Yanyan¹ YE Shirong¹ JIANG Peng¹ HUANG Zhihua² CHEN Hao³ DU Zhongjin⁴

1 Research Center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China

3 The Ninth Department of Overall Design Chinese Aerospace Science and Industry Group, Wuhan 430040, China

4 Fujian Surveying and Mapping Institute, Fuzhou 350003, China

Abstract: As a consequence of a daily data processing strategy, an adjacent IGS final precise clock product displays discontinuity at the junction of two successive days. This will cause a jump in positioning results for the pseudo-range, and change all the related ambiguities. These non-integer cycle slips will require filtering to make them converge. In this paper, the magnitude of the jump of every satellite for a seven day cycle is investigated in detail. Then, based on the full discussion of the data processing strategy of the IGS center, the reasons for discontinuity and the precision of the final clock product are presented. Two counter measures are proposed: one is to insert the jump in the satellite clock datum into the IGS clock product; the other is to estimate the clock datum for adjacent days. Finally the results of the two processing strategies are presented.

Key words: IGS precise clock; discontinuity of the precise clock product; precise point positioning; ambiguity

First author: LIU Yanyan, PhD, specializes in the theories and methods of high-precision GNSS applications. E-mail: whdxlyy@qq.com

Corresponding author: YE Shirong, PhD, professor. E-mail: srye@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41074008; the National 973 Program of China, No. 2012CB957701; the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China, No. 20120141110025; the MWR Nonprofit Industry Research and Special Projects, No. 201401072; the Research Fund for Informatization of Ministry of Transportation, No. 2013364548200.

(上接第 1146 页)

inversion theory of the crustal stress-strain field using geodetic data. We suggest that the analytically elastic, visco elastic, and elastoplastic crust models relating ground gravity to the stress-strain field can be completely articulated and applied. We also conclude that studies concerning the relationship between spatio-temporal tectonic stress-strain fields and seismic stress triggering in the crust, as well as joint inversion for spatio-temporal tectonic stress-strain fields with multi-source data, should be developed.

Key words: tectonic stress-strain field; gravity field; geodetic data; joint inversion

First author: XU Caijun, professor, PhD. His research interest is geodesy and geodynamics. E-mail: cjxu@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The National Department Public Benefit Research Foundation (Earthquake), No. 201308009; the National Key Basic Research Development (973) Program, No. 2013CB733303; the Open Research Fund of Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education of China, No. 12-02-012.