DOI:10.14075/j.jgg.2024.12.550

文章编号:1671-5942(2025)12-1253-07

地形因素对 2024 年新疆乌什 M_W7.0 地震同震形变的影响

段虎荣[1]　张　琦[1]　谢宝鹏[1]　张晔瑞[1]　王　巍[1]

1　西安科技大学测绘科学与技术学院,西安市雁塔中路 58 号,710054

摘　要:为模拟地形对同震形变的影响,建立 3 种不同的地形模型。结果显示,与平坦地形相比,凸起地形使平面位移量减少,而凹陷地形使平面位移量显著增加。2024 年新疆乌什 M_W7.0 地震震中区域地形差异较大,真实地形对此次地震同震形变的影响尚不明确。采用谱元法模拟此次乌什地震的同震形变,并将其与 D-InSAR同震位移场进行对比。结果表明,在 E、N、U 方向,地形因素对同震形变的影响分别可达 8.5%、26.9%、6.8%。

关键词:位错理论;地形因素;同震形变;谱元法;乌什 M_W7.0 地震

中图分类号:P315　　**文献标识码**:A

新疆中部地处天山构造带,受印度板块与欧亚板块近南北向挤压作用影响,构造活动显著[1]。2024-01-23 新疆阿克苏地区乌什县发生 M_W7.0 地震(43.15°N,78.65°E),造成严重的人员伤亡和财产损失[2]。基于 D-InSAR 技术获得的同震形变场,学者们采用矩形位错模型反演了断层参数与滑动分布[3-6],其几何参数虽具有一致性,但滑动分布呈现明显差异性(最大滑动量 2.7～4.3 m)[3,5]。值得注意的是,震区位于塔里木盆地北缘与天山南麓交界带,地形高差超过 4 km,而现有反演研究尚未系统考虑复杂地形对位错模型的潜在影响。

为深入研究复杂地形情况下地震波的传播特性,学者们运用了很多先进的数值模拟技术[7]。其中,谱元法(SEM)兼顾有限元法网格的灵活性和伪谱法的高精度、快速收敛特性,能够基于波动方程的弱形式引入地形[8]。但不同学者对地形因素在同震形变中的影响持有不同观点:Lin 等[9]发现汶川地震中地形对同震位移的影响达 9.05%;林晓光等[10]指出东京大地震垂直向位移的 92%受地形控制;Langer 等[11]通过谱元法模拟证实尼泊尔地震位移场显著地受局部地形调制。然而,Trasatti 等[12]和 Williams 等[13]认为,在平缓地形区地形效应可忽略不计,其影响量级低于地壳异质性。SPECFEM-X 软件基于谱元法框架,实现了地震形变场的高效模拟[14]。王金驰等[8]应用该软件分析芦山地震同震形变,发现地形对断层两侧位移的影响分别为 16.8%(沿断层面)和 19.2%(垂直断层面)。但该研究存在 GNSS 数据密度不足、影响量化公式不完善[10]等问题,特别是位移比计算中未建立统一的参照基准(断层两侧位移未独立归一化处理),导致结果可靠性受限。

本文以 2024 年乌什 M_W7.0 地震为研究对象,基于多源反演模型[3-6]构建三维断层系统,结合高精度地形数据,采用改进的谱元法数值模型模拟同震形变场。通过建立修正的位移影响量化公式(以同侧最大位移为归一化基准),系统分析 D-InSAR 观测数据与数值模拟结果的时空关联性,定量评估地形因素对断层参数反演的调制效应,为复杂构造区地震机理研究提供新的分析范式。

1　矩密度张量震源模型

基于谱元法计算同震形变,本质为求解与震源相关的运动方程。本文使用矩密度张量法建立矩形均匀滑动断层模拟震源模型。在非均匀各向异性介质空间(图 1),弹性动力学方程描述了震源断层运动与观测点位移之间的关系:

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2}\boldsymbol{u} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = f \tag{1}$$

收稿日期:2024-12-02

项目来源:中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室开放研究基金(SKLGED2022-5-2)。

第一作者简介:段虎荣,副教授,主要从事大地测量反演研究,E-mail:duanhurong@126.com。

通讯作者:张琦,硕士生,主要从事地震位错研究,E-mail:zq1374@stu.xust.edu.cn。

式中，ρ 为质量；$\boldsymbol{u}$ 为位移张量；$\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量；$\nabla=\left(\frac{\partial}{\partial x},\frac{\partial}{\partial y},\frac{\partial}{\partial z}\right)$；$f$ 为等效面力密度函数。$\boldsymbol{\sigma}$ 可由胡克定律表示为：

$$\boldsymbol{\sigma}=\boldsymbol{C}:\boldsymbol{\varepsilon} \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{C}$ 为刚度张量；$\boldsymbol{\varepsilon}$ 为应变张量，且在模型自由边界 $\partial\Omega$ 满足 $\boldsymbol{\sigma}\cdot\hat{\boldsymbol{n}}=0$，$\hat{\boldsymbol{n}}$ 为模型自由表面的法向量。

震源由断层面上的滑动矢量 $\Delta\boldsymbol{s}$ 定义为：

$$\Delta\boldsymbol{s}=\boldsymbol{s}^{+}-\boldsymbol{s}^{-} \tag{3}$$

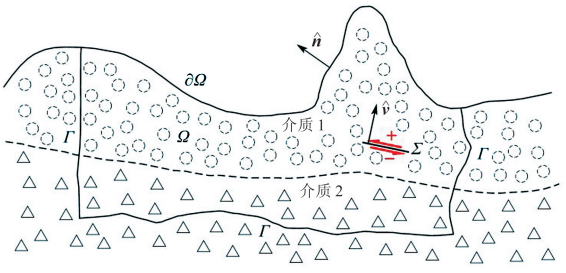
断层相对运动位移矢量的法向分量在断层上必须连续，即 $\hat{\boldsymbol{v}}\Delta\boldsymbol{s}=0$。给定滑动矢量 $\Delta\boldsymbol{s}$ 和断层面法向量 $\hat{\boldsymbol{v}}$，矩密度张量 $\boldsymbol{m}$ 由下式给定：

$$\boldsymbol{m}=\boldsymbol{C}:\hat{\boldsymbol{v}}\Delta\boldsymbol{s} \tag{4}$$

矩密度张量是对称的，即 $\boldsymbol{m}=\boldsymbol{m}^{\mathrm{T}}$。因为滑动仅限于断层面，可用狄拉克函数表示震源：

$$f(\boldsymbol{x})=-\boldsymbol{m}(\boldsymbol{x}_{\Sigma})\cdot\nabla\delta(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_{\Sigma}) \tag{5}$$

式中，$\boldsymbol{x}_{\Sigma}$ 为断层面上定义滑动的位置。



Ω 为模型域，$\partial\Omega$ 为自由边界面，Γ 为吸收边界面，$\hat{\boldsymbol{n}}$ 为自由表面的法向量，Σ 为断层面，$\hat{\boldsymbol{v}}$ 为断层面法向量

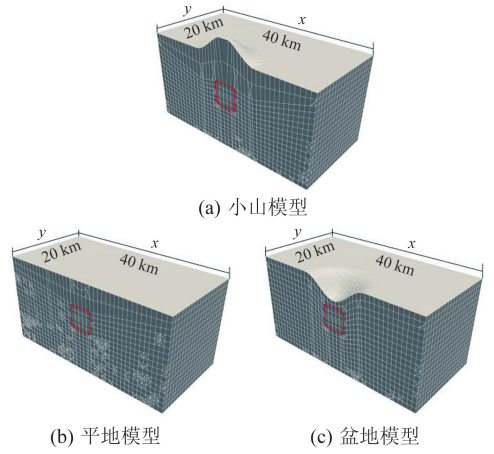
图 1 矩密度张量模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the moment density tensor model

2 数值模拟

在弹性半空间均匀介质中构建 3 种具有小山、平地和盆地特征的模型，尺寸均为 40 km×40 km×20 km，单元格网的平均长度为 1 km。小山与盆地模型的地表曲面函数关于 $z=0$ 对称，3 种模型的最值点对应的高程分别为 4 km、0 km 和 −4 km，包含的格网单元分别为 24 480 个、27 880个和 24 480 个。模型的泊松比为 0.24，杨氏弹性模量为 5.60 GPa，具体见图 2，图中红色矩形表示嵌入模型的 5 km×5 km 垂直断层，该断层走向平行于 x 轴，深度为 5.5 km（以断层上边缘为参考，与无地形表面的距离）。

为体现地形的影响特征，本文将断层运动设定为纯左旋走滑，走滑量为 10 m。利用谱元法模拟的同震位移结果见图 3，从图中第 1 列可以看出，3 种模型的 E 向分量均呈四象限分布，位移场的正负波瓣形态相似，且数值具有对称性。然而，



(a) 小山模型

(b) 平地模型 (c) 盆地模型

图 2 3 种地形模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three terrain models

盆地模型的 E 向分量数值明显大于其他 2 种模型，在第 2 列和第 3 列中也可观察到相同的趋势。从盆地、平地到小山模型，3 个轴向的形变图中位移波瓣的轮廓逐渐变得更圆润，且相邻波瓣之间的距离增大。与平地模型相比，小山模型 E 向、N 向位移分量的中心有 2 个多余的小波瓣。

为进一步探讨地形因素对同震形变的局部放大效应，选择图 3 中各子图的对角线位置的剖面进行分析，剖面线起始点为（−20 km，−20 km），终止点为（20 km，20 km）。由图 4(a)和 4(b)可知，E 向、N 向的位移剖面关于原点中心对称。当 $-7.5\ \mathrm{km}<x<0\ \mathrm{km}$ 时，在 $x=-2.5$ km 处，盆地模型达到位移最大值，而小山模型在该位置达到位移最小值。盆地模型的位移值远大于平地模型，平地模型的位移值大于小山模型，这主要是因为盆地模型的地表中心距震源断层最近，而小山模型最远。当 $-20\ \mathrm{km}<x<-7.5\ \mathrm{km}$ 时，3 种地形之间的位移差异逐渐缩小。由图 4(c)可知，U 向的位移剖面关于纵坐标轴对称。当 $-7.5\ \mathrm{km}<x<0\ \mathrm{km}$ 时，盆地模型的位移值大于平地与小山模型；当 $-20\ \mathrm{km}<x<-7.5\ \mathrm{km}$ 时，3 种地形同震位移量的差异逐渐缩小。

综上，相对于平坦地形，凸起地形使位移场形态分散，位移量的绝对值减少；凹陷地形使位移场形态聚集，位移量的绝对值增加。

3 基于谱元法获取 2024 年乌什 $M_{\mathrm{W}}7.0$ 地震同震形变

3.1 研究区概况

天山山脉位于中亚地区，整体呈 EW 向延展，随着新生代印度板块与欧亚板块的碰撞，天山岩体向盆地扩展，并在推覆体根部逐渐形成迈丹-沙依拉姆断裂[1]。新疆阿克苏地区乌什县地处塔

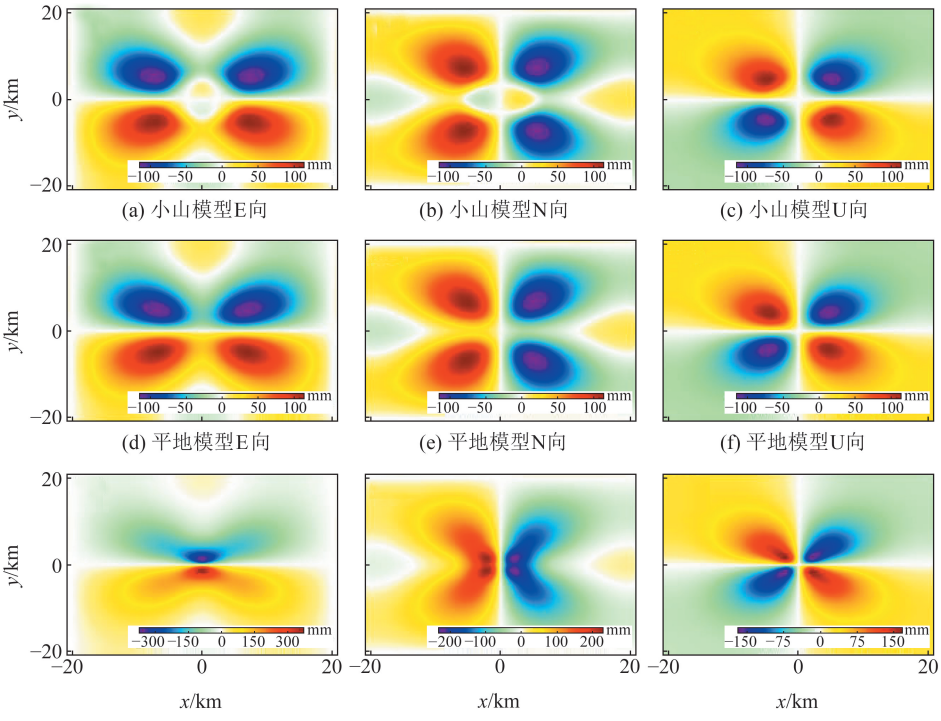


图 3　3 种地形模型的同震形变场

Fig. 3　Co-seismic deformation fields for three terrain models

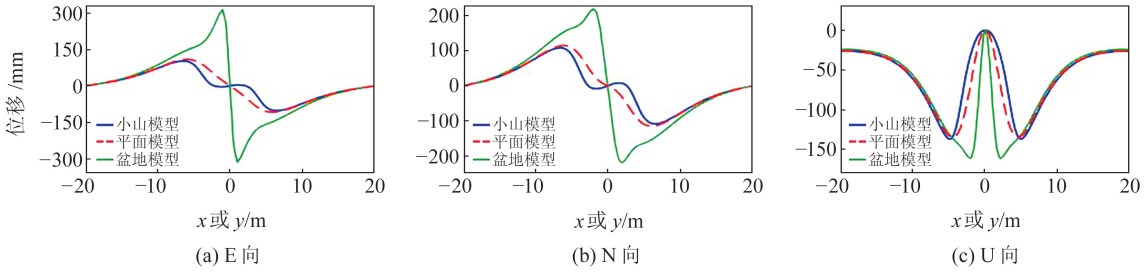


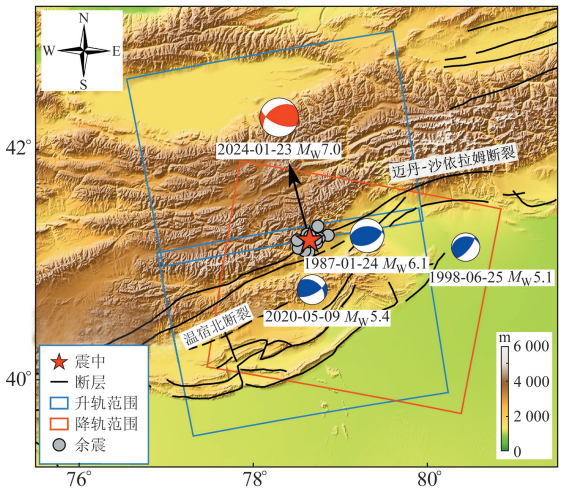
图 4　3 种地形模型的同震形变场剖面

Fig. 4　Co-seismic deformation field profiles for three terrain models

里木盆地西北边缘、天山南麓，三面环山，周围发育有迈丹-沙依拉姆断裂和温宿北断裂。在这些断裂带两侧，海拔高度从约 6 km 急剧下降至约 2 km，地形高差超过 4 km。历史上，该区域发生过多次逆冲型地震，包括 1987 年 M_W6.1、1998 年 M_W5.1、2005 年 M_W5.1、2009 年 M_W5.3 和 2020 年 M_W5.4 地震（图 5）。北京时间 2024-01-23 02:09 乌什县发生 M_W7.0 地震，震源深度 22 km，此次地震震中的地形差异为研究地形因素对地震同震形变的影响提供了良好的条件。

3.2　模型构建

为研究地形因素对地震同震形变的影响，分别建立平均高程平面模型和地形模型（图 6）。2 种模型包含的地下介质均为 4 层（模型的介质信息参考 Crust1.0 数据集），由上到下的深度分别为 0～23 km、23～44 km、44～53 km、53～78 km；

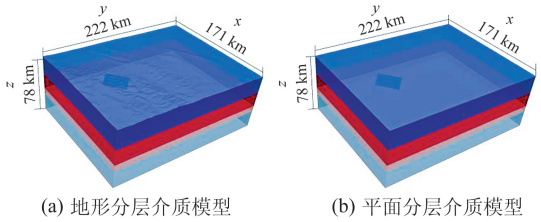


红色沙滩球表示 2024 年乌什 M_W7.0 地震震源机制，蓝色沙滩球表示 GCMT 收录的研究区附近历史上发生的超过 5 级地震的震源机制

图 5　研究区构造背景

Fig. 5　Tectonic background of the study area

材料泊松比分别为 0.24、0.24、0.26、0.28；杨氏模量分别为 8.59 GPa、9.24 GPa、11.83 GPa、17.14 GPa；地形数据选取 ETOPO1，空间分辨率约为 2 km。平面与地形模型的尺寸为 171 km×222 km×78 km，使用六面体单元离散化，平均网格间距为 4 km；平面模型共有44 688个网格单元，56 373个节点；地形模型有43 688个网格单元，49 020 个节点。地震发生后，许多学者基于 D-InSAR 数据反演该地震的断层滑动分布[3-4,6]，结果均表明此次地震的断层滑动以逆冲为主，且伴有少量右旋走滑，断层最大滑动量为 3.5～4.3 m，深度为 5～20 km，在 0～5 km 深度的滑动量接近 0 m。综合上述研究成果，设置断层长度为 30 km，宽度为 15 km，断层上边缘距地表为 5 km，走向为 230°，倾角为 57°，断层面所有单元网格的倾滑量均为 3.7 m，走滑量均为－0.4 m。



(a) 地形分层介质模型 (b) 平面分层介质模型

深蓝色矩形为断层

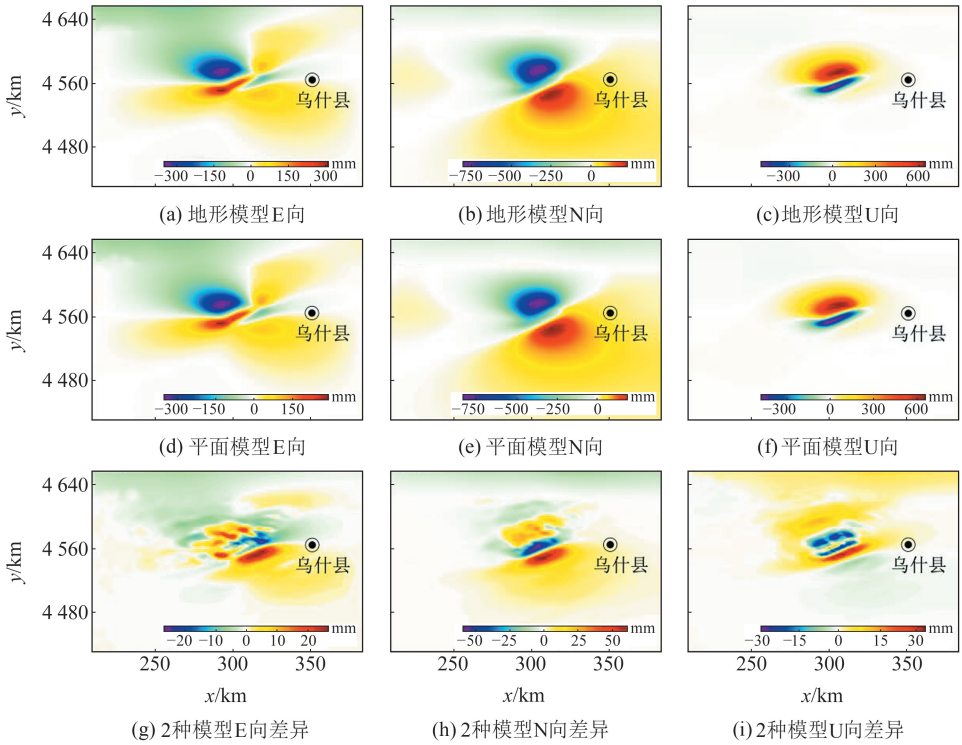
图 6 研究区介质模型

Fig. 6 Medium models of the study area

3.3 结果分析

基于谱元法计算平面模型与地形模型的同震形变，结果见图 7。可以看出，2 种模型在 E 向、N 向和 U 向位移分布的整体形态大致相似，但仍存在差异。以 E 向位移图中第一象限黄色波瓣为例，平面模型的波瓣比地形模型的波瓣更大且更加规则、圆润。地形因素也会改变同震位移的大小。地形模型在 UTM 坐标系下，E 向位移范围为－350～314 mm，N 向位移范围为－815～ 238 mm，U 向位移范围为－497～655 mm。地形模型相对于平面模型而言，E 向位移变化范围为－27～27 mm，N 向位移变化范围为－60～64 mm，U 向位移变化范围为－30～34 mm。

从力学角度分析，地应力场的变化受构造应力、重力应力和地形起伏三者的共同影响。从地形因素来看，本次地震发生在南天山与塔里木盆地之间，二者间存在显著的高差。断层北侧的天山地形对塔里木盆地西北边缘的水平地应力起到了增强作用，地形差异导致了应力的局部积聚[15]。从构造应力因素来看，震中附近压应力轴呈近 SN 向的水平挤压，最优主应力轴则呈现近垂直的拉张状态[1]。塔里木盆地的俯冲作用促使天山山脉隆起，导致该地区的应力场呈现逆冲型特征。此构造背景使得该区域的应力分布复杂，为地震的发生提供了条件。总之，天山和塔里木盆地之间的地形差异及构造应力的作用共同影响了该地区的应力场，从而导致地震的发生，这也解释了谱元法模拟结果中 N 向位移差异最大的原因。



(a) 地形模型E向 (b) 地形模型N向 (c) 地形模型U向

(d) 平面模型E向 (e) 平面模型N向 (f) 平面模型U向

(g) 2种模型E向差异 (h) 2种模型N向差异 (i) 2种模型U向差异

图 7 2 种介质模型的同震位移场及其差异

Fig. 7 Co-seismic displacement fields and their differences for two medium models

4　讨　论

4.1　D-InSAR 与谱元法获取的同震位移对比

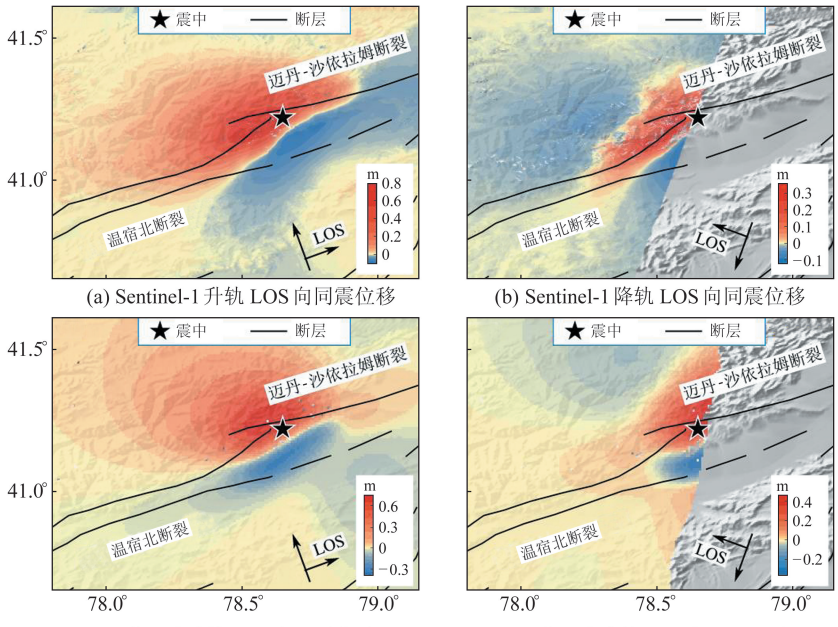
为验证谱元法模拟同震形变的有效性，本文收集了图 5 方框范围的 Sentinel-1 升轨和降轨雷达影像，详细信息见表 1。使用二轨差分干涉技术获取 2024-01-23 乌什 M_W7.0 地震升降轨 LOS 向形变场。为确保配准精度，采用特征点匹配方法对 SAR 影像进行配准，同时对影像在距离向和方位向按 10∶2进行多视处理，以减少相位噪声。在干涉处理过程中，使用 NASA 提供的 SRTM 30 m 分辨率数字高程模型减弱复杂地形引起的相位差异；利用欧洲航空局提供的精密轨道数据去除与平地效应相关的相位差。完成干涉处理后，使用 Goldstein 方法对图像进行滤波，采用 64 像素×64 像素的窗口对图像进行平滑处理，以进一步减少噪声。此外，使用 GACOS 数据对大气延迟进行校正，相位解缠通过最小费用流法实现，当像元的相干性系数大于 0.3 时，获取其绝对相位。最后，将解缠后的相位结果转化为 WGS84 坐标系中的同震位移值。为便于与谱元法模拟结果进行对比，本文将基于谱元法计算的同震形变场转化为 LOS 向位移。

图 8 展示了谱元法与 Sentinel-1 获取的 LOS 向升轨与降轨同震位移场，图中靠近雷达卫星的地表位移为正值，远离雷达卫星的地表位移为负值。升轨情况下，在断层北侧，3 种方法的位移均为正值，发生了抬升，且形态分布一致。Sentinel-1 的最大位移为 0.80 m，基于谱元法的最大位移为 0.77 m。在断层南侧，位移为负值，发生了沉降。谱元法的最大位移为 −0.35 m，Sentinel-1 的最大位移为 −0.12 m。降轨情况下，2 种方法在靠近断层北侧的位移均为正值。Sentinel-1 的最大位移为 0.37 m，谱元法的最大位移为 0.47 m。综上，Sentinel-1 与谱元法获取的 LOS 向同震位移的分布形态一致，能较好地反映地震形变，但两者存在一定的量值差异，主要与观测精度、模型假设和处理方法相关。

表 1　本文使用的 Sentinel-1A 卫星数据

Tab. 1　Sentinel-1A satellite data used in this paper

卫星轨道	轨道编号	主影像时间	辅影像时间	极化方式	时间基线/d
升轨	T56	2024-01-14	2024-01-26	VV	12
降轨	T34	2024-01-13	2024-01-25	VV	12



(a) Sentinel-1 升轨 LOS 向同震位移　(b) Sentinel-1 降轨 LOS 向同震位移

(c) 谱元法升轨 LOS 向同震位移　(d) 谱元法降轨 LOS 向同震位移

图 8　Sentinel-1 与谱元法的 LOS 向同震位移

Fig. 8　LOS direction co-seismic displacements of Sentinel-1 and spectral element method

4.2　改进后的同震形变影响公式

采用林晓光等[10]提出的评价指标衡量地形因素对同震形变的影响：

$$\text{Percentage}=\frac{|\Delta i|}{|j_{\max}|}\times 100\% \tag{6}$$

式中，$|\Delta i|$ 为地形模型与平面模型同震位移之差的绝对值；$|j_{\max}|$ 为考虑地形因素后同震位移绝对值的最大值。在本文中，式(6)无法凸显断层两侧形变的差异信息，使用该公式会导致计算结果不准确。本文对式(6)进行改进，分别计算断层北侧与南侧形变的地形影响幅度。对于断层北侧，用该侧同震位移差异的最值 Δi 除以地形模型下该侧同震位移的最值 $j_{\max}$；断层南侧也采用类似的方法，取两者中的较大数值作为最终结果。

$$\text{Percentage}=\left|\frac{\pm\Delta i}{\pm j_{\max}}\right|\times 100\% \tag{7}$$

以图7中N向位移场为例,利用式(6)计算地形影响幅度,差异图中同震位移绝对值的最大值为64 mm,地形模型同震位移绝对值的最大值为815 mm,地形因素影响幅度的百分比为7.9%。利用式(7)计算地形影响幅度,差异图中断层南侧位移的最大值为64 mm,地形模型同侧区域位移量的最大值为238 mm,地形因素影响幅度的百分比为26.9%;差异图中断层北侧位移的最小值为-60 mm,地形模型同侧区域位移量的最小值为-815 mm,地形因素影响幅度的百分比为7.4%。2种方法计算的地形影响结果差异显著。类似地,可以得到E向、U向的地形影响幅度分别为8.5%、6.8%。综上,在UTM坐标系下,地形因素在E向、N向、U向对同震形变的影响可达8.5%、26.9%、6.8%。

5 结 语

谱元法因其快速收敛性和能够自然引入真实地形特性的优势,被广泛应用于地震数值模拟中。本文使用谱元法计算了小山模型、盆地模型和平地模型的地表同震位移场,发现凸起地形使位移场形态分散,位移量的绝对值减少;凹陷地形使位移场形态聚集,位移量的绝对值增加。2024年新疆乌什M_W7.0地震震中两侧区域高差显著,这为研究地形因素对地震同震形变的影响提供了良好条件。本文构建了震中区域的地形分层模型和无地形分层模型,以探讨地形因素对同震形变的影响。结果表明,地形因素在E向、N向、U向对同震形变的影响可达8.5%、26.9%、6.8%。为验证谱元法在模拟同震形变中的有效性,本文将震区的D-InSAR同震形变场与谱元法结果进行了对比。结果表明,2种方法的同震位移分布形态一致,但存在一定的量值差异。该差异主要源于观测精度、模型假设和处理方法的不同,此外余震贡献和模型断层滑动分布的不均匀性也可能对此产生影响。今后将考虑在模拟中加入余震分量,并将模型断层划分为多个子断层,赋予不同的滑动参数,以获取更精细的位移结果。

参考文献

[1] 刘敬光. 新疆天山及邻区震源机制与应力场空间分布特征[D]. 三河:防灾科技学院,2020(Liu Jingguang. Spatial Distribution Characteristics of Focal Mechanisms and Stress Field in Tien Shan and the Adjacent Areas in Xinjiang[D]. Sanhe: Institute of Disaster Prevention, 2020)

[2] 闫纪元,冯军,张雪华,等. 2024年1月23日新疆阿克苏地区乌什M_S7.1级地震地表变形特征初步调查[J]. 北京大学学报:自然科学版,2025,61(2):388-402(Yan Jiyuan, Feng Jun, Zhang Xuehua, et al. Preliminary Investigation on the Surface Deformation Characteristics of the M_S7.1 Earthquake in Wushi County, Aksu Prefecture, Xinjiang on January 23th, 2024[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2025, 61(2):388-402)

[3] 能懿菡,韩炳权,刘振江,等. InSAR观测揭示的2024年新疆乌什M_W7.0地震地表形变及发震断层模型[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2025,50(2):368-376(Nai Yihan, Han Bingquan, Liu Zhenjiang, et al. Coseismic Surface Displacements and Source Model of the 2024 M_W7.0 Wushi Xinjiang China Earthquake Revealed by InSAR Observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(2): 368-376)

[4] 李雨森,李为乐,许强,等. 2024年新疆乌什M_S7.1地震InSAR同震形变探测与断层滑动分布反演[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2024,51(4):641-653(Li Yusen, Li Weile, Xu Qiang, et al. Coseismic Deformation and Slip Distribution of the 2024 M_S7.1 Wushi Earthquake Based on InSAR Observations[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2024, 51(4): 641-653)

[5] 赵磊,陈志丹,谢磊,等. 2024年1月23日M_W7.0乌什地震InSAR同震形变场和断层滑动分布[J]. 地球与行星物理论评(中英文),2024,55(4):453-460(Zhao Lei, Chen Zhidan, Xie Lei, et al. Coseismic Deformation and Slip Model of the 2024 M_W7.0 Wushi Earthquake Obtained from InSAR Observation[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 2024, 55(4): 453-460)

[6] 柳姣姣,张永志,郝小叶,等. 基于Sentinel-1A的2024年新疆乌什M_W7.0地震地表形变与断层滑动分布反演[J]. 大地测量与地球动力学,2025,45(2):170-176(Liu Jiaojiao, Zhang Yongzhi, Hao Xiaoye, et al. Inversion of Surface Deformation and Fault Slip Distribution of Xinjiang Wushi M_W7.0 Earthquake in 2024 Based on Sentinel-1A[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2025, 45(2): 170-176)

[7] 侯爵,张忠杰,兰海强,等. 起伏地表下地震波传播数值模拟方法研究进展[J]. 地球物理学进展,2014,29(2):488-497(Hou Jue, Zhang Zhongjie, Lan Haiqiang, et al. Progress in Numerical Simulation of Seismic Wave Propagation under an Undulating Surface[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(2): 488-497)

[8] 王金驰,段虎荣,张成浩,等. 芦山M_S7.0地震同震形变的地形效应[J]. 大地测量与地球动力学,2024,44(3):228-233(Wang Jinchi, Duan Hurong, Zhang Chenghao, et al. Topographic Effect on Coseismic Deformation of the Lushan M_S7.0 Earthquake[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2024, 44(3): 228-233)

[9] Lin X G, Sun W K, Zhang H, et al. A Feasibility Study of an FEM Simulation Used in Co-Seismic Deformations: A Case Study of a Dip-Slip Fault[J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 2013, 24: 637-647

[10] 林晓光,孙文科. 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, 2014, 57(8): 2530-2540(Lin Xiaoguang, Sun Wenke. 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, 2014, 57(8): 2530-2540)

[11] Langer L, Gharti H N, Tromp J. Impact of Topography and Three-Dimensional Heterogeneity on Coseismic Deformation [J]. Geophysical Journal International, 2019, 217(2): 866-878

[12] Trasatti E, Kyriakopoulos C, Chini M. Finite Element Inversion of DInSAR Data from the M_W6.3 L'Aquila Earthquake, 2009(Italy)[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38

[13] Williams C A, Wallace L M. The Impact of Realistic Elastic Properties on Inversions of Shallow Subduction Interface Slow Slip Events Using Seafloor Geodetic Data[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(15): 7462-7470

[14] Gharti H N, Langer L, Tromp J. Spectral-Infinite-Element Simulations of Coseismic and Post-Earthquake Deformation [J]. Geophysical Journal International, 2019, 216(2): 1364-1393

[15] Zhang C Q, Cui G J, Zhou H, et al. Influence of Mountain-Valley Morphology on In-Situ Stress Distribution[J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18: 2447-2459

Influence of Topographic Factors on Co-Seismic Deformation of the 2024 M_W7.0 Earthquake in Wushi, Xinjiang

DUAN Hurong[1]　*ZHANG Qi*[1]　*XIE Baopeng*[1]　*ZHANG Yerui*[1]　*WANG Wei*[1]

1　College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, 58 Mid-Yanta Road, Xi'an 710054, China

Abstract: To simulate the impact of terrain on co-seismic deformation, this paper established three different terrain models. The results show that compared with flat terrain, convex terrain reduces the amount of horizontal displacement, while concave terrain significantly increases the amount of horizontal displacement. The terrain difference in the epicentral area of the 2024 Wushi, Xinjiang M_W7.0 earthquake is significant, and the impact of the real terrain on the co-seismic deformation of this earthquake is not yet clear. This paper uses the spectral element method to simulate the co-seismic deformation of the Wushi earthquake and compares it with the co-seismic displacement field of D-InSAR. The results indicate that the impact of terrain factors on co-seismic deformation can reach 8.5%, 26.9%, and 6.8% in the E, N, and U directions, respectively.

Key words: dislocation theory; topographic factor; co-seismic deformation; spectral element method; Wushi M_W7.0 earthquake

Foundation support: Open Research Fund of State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS, No. SKLGED2022-5-2.

About the first author: DUAN Hurong, associate professor, majors in geodetic inversion, E-mail: duanhurong@126.com.

Corresponding author: ZHANG Qi, postgraduate, majors in seismic dislocation research, E-mail: zq1374@stu.xust.edu.cn.

(上接第 1245 页)

electro-mechanical systems (MEMS) inertial measurement unit (IMU) is proposed. Initially, UWB ranging data is optimized using ranging bias correction and Kalman filtering. Subsequently, the complementary strengths of multiple sensors are leveraged through a UWB/IMU fusion model. Experimental results demonstrate that the optimized UWB achieves an improvement in average positioning accuracy from 15.70 cm to 13.75 cm, with the RMSE decreasing from 22.45 cm to 19.70 cm. In non-line-of-sight (NLOS) scenarios, even when UWB signals experience abrupt changes or are lost, the fusion system can still provide continuous and reliable positional information, with an average accuracy of 13.23 cm and an RMSE of 17.90 cm.

Key words: UWB; low-cost IMU; NLOS; integrated navigation; indoor positioning

Foundation support: National Key Research and Development Program of China, No. 2021FBY3901301; Natural Science Foundation of Jiangsu Province, No. BK20220366; Science and Technology Innovation Project of Jiangsu Provincial Department of Natural Resources, No. JSZRKJ202406.

About the first author: ZHOU Zhiling, postgraduate, majors in indoor and outdoor fusion positioning, E-mail: zhouzhiling@njtech.edu.cn.

Corresponding author: GUAN Dongliang, PhD, lecturer, majors in GNSS-R and indoor and outdoor fusion positioning, E-mail: guan.dongliang@njtech.edu.cn.