



朝鲜第六次核爆后InSAR地表形变测量与分析

曾琪明*, 周子闵, 朱猛, 焦健

北京大学地球与空间科学学院, 遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871

* 联系人, E-mail: qmzeng@pku.edu.cn

2019-03-25 收稿, 2019-06-09 修回, 2019-06-10 接受, 2019-07-31 网络版发表

国家重点研发计划(2017YFB0502703)和北京大学高性能计算校级公共平台资助

摘要 利用InSAR小基线集(SBAS)方法得到了朝鲜第六次核爆后其中心17 km×22 km范围内一些部位不同时刻(2017年9月10日~2018年6月1日每12 d间隔)的累积地表形变量. 将这些测量点依空间相邻关系聚集成14个集合, 按照集合内各点平均相干性进行加权平均得到各集合的累积形变量. 观测结果显示: (1) SBAS-InSAR能有效观测第六次核试验的热辐射后效阶段形变过程, 爆炸中心附近在爆炸后10余天仍存在地表抬升现象, 随后开始下沉, 不同地方下沉速率和下沉量不同; (2) 在冬春季可观测到可能主要因围岩内裂隙水冰冻带来的地表下沉减缓甚至抬升的现象, 2018年5月24日因朝鲜对部分核设施进行爆破使地表形变出现抬升. 研究表明: (1) 第六次核试验的热辐射后效阶段主要表现为围岩受高温高压作用变酥变软, 变质后的围岩在重力作用下被压实并开始下沉, 沉降的时间过程可以用Weibull模型进行拟合分析; (2) 考虑受核爆影响的变质岩层厚度等因素建模分析最大沉降量, 得到了爆炸中心垂直向影响距离约为1800~2300 m, 变质后的岩石形变系数约为 7×10^{-5} ~ 8×10^{-5} , 统计拟合优度为0.8, *P*值接近于0.

关键词 朝鲜第六次核试验, SBAS-InSAR, 地表形变, Weibull模型, 冻融形变

据中国地震台网测定, 北京时间2017年9月3日11时30分, 朝鲜境内发生了 M_L 6.3级地震, 事件发生1 h后, 朝鲜政府宣称成功进行了氢弹试验. 此前, 朝鲜已于2006, 2009, 2013, 2016年1月和9月进行了5次地下核试验, 此次核试验威力远大于前5次. 朝鲜核试验引起了国际社会的广泛关注, 研究者多采用地震学方法对地下核试验进行远区监测, 估计事件的位置及爆炸当量^[1-9], 但受到地震台站数量和分布位置的限制, 事件定位及爆炸当量估算存在较大的不确定性. 合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)遥感可获取大范围高空间分辨率地表形变场, 与地震台记录信息互为补充. 历史上, Vincent等人^[10]首次利用差分干涉(differential interferometric SAR, D-InSAR)方法对美国1992年

内华达核试验事件进行了相对精确的(优于50~100 m)定位; Wei^[11]利用D-InSAR方法估计了第四次朝鲜核试验的位置、腔尺寸和爆炸当量; Wang等人^[12]结合大地测量和星载遥感的方法估计了第六次朝鲜核试验的位置、腔尺寸及爆炸当量, 分析了核爆8 min后的塌落过程; Myers等人^[13]结合InSAR和地震学方法估计了6次朝鲜核试验及核爆后伴随事件的绝对位置. 根据《核爆炸与核试验》^[14]介绍, 地下核爆炸对围岩的整个作用过程, 大致分为4个阶段: (1) 辐射流体力学阶段: 在核反应后形成的辐射波作用下, 爆室内形成冲击波, 迅速充满整个爆室并向四周作用, 该阶段大约持续几微秒; (2) 流体动力学阶段: 爆室内的强冲击波使得周边岩石汽化、液化、粉碎压实等, 产生弹塑性变形, 附近

引用格式: 曾琪明, 周子闵, 朱猛, 等. 朝鲜第六次核爆后InSAR地表形变测量与分析. 科学通报, 2019, 64: 2351-2362

Zeng Q M, Zhou Z M, Zhu M, et al. Measurement and analysis of surface deformation after the sixth nuclear explosion in the Democratic People's Republic of Korea using InSAR (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2351-2362, doi: 10.1360/N972019-00251

坑道遭到破坏,地震效应传向远方,该阶段发生在爆后的几微秒到几百毫秒;(3)静力学阶段:空腔内压力逐渐降低,在重力作用下,空腔上部的岩石开始相继塌落,形成烟囱,该阶段一般发生在爆后几秒到几十分钟;(4)热辐射后效阶段:空腔内压力和温度急剧降低,但仍然明显高于常温常压,通过热传递,热量逐渐耗散,该阶段可以持续几天、几个月甚至几年.已有研究通常观测到前3个阶段,星载SAR干涉虽然是观测核爆炸相关形变的强有力手段,但是也有明显的局限性:如果核试验场植被覆盖度较高,那么SAR相干性会受影响,要观测到核爆第四阶段热辐射后效阶段的形变将面临获取足够数量的星载SAR干涉数据、低相干性和大气效应的干扰等一系列难题. Vincent等人^[10]从内华达核试验后1992~1997年的ERS-1 SAR影像中筛选出数对有效干涉对,基于D-InSAR方法得到不同区域的、爆后持续数年的1~7 cm/a的下沉速率,首次对热辐射后效阶段进行监测. 2011年, Vincent等人^[15]使用1996~1999年的15景ERS-1/2 SAR影像组成的101对干涉对,观测到中国罗布泊核试验场核试验后出现的地表异常抬升现象.但由于覆盖研究区的SAR数据重访时间间隔较长,未观测到时空变化的过程细节.总体而言地下核试验事例非常少,且没有对应的地面观测资料可供比较,上述两个案例对核试验第四阶段的形变观测结果差异明显,核试验场的地质背景也不尽相同,可以说对于核爆后形变规律科学界缺乏深入的认识. 朝鲜第六次核爆威力较大,已有研究表明爆炸中心在爆后出现坍塌,同震形变量级较大,超出InSAR探测的极限^[12],那么是否能够利用InSAR手段观测到核爆后的形变过程.如果能够对核爆第四阶段即热辐射后效阶段开展观测研究,将有助于完整认识朝鲜地下核试验的整个作用过程,对于地球科学和工程研究都具有重要的科学意义.

朝鲜核试验场地处稳定大陆区域的硬岩山区^[16],地形起伏较大,植被覆盖度较高. 2014年以前的3次核爆威力较弱,且星载SAR数据积累少,获取时间间隔长,地表形变可能低于InSAR观测的噪声水平^[11,17],因而未见研究报道. 欧洲太空局(European Space Agency, ESA)于2014年发射的哨兵1号(简称S1)SAR卫星重访周期理论上可达6 d,采用宽覆盖的TOPS模式作为日常工作模式,可对全球陆地高频次获取InSAR影像,为核试验形变观测提供了可能性. 对于朝鲜第四次核爆出现了应用S1及ALOS2 SAR数据的研究论文^[11],但是仍然没有有关爆后形变研究的报道. 小基线干涉测量技术^[18]

(small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR)突破了常规D-InSAR时间失相干、几何失相干因素的限制,可分离大气效应引起的相位误差,被广泛应用于地表形变监测^[19-21]. 本文采用SBAS-InSAR方法,通过对朝鲜第六次核爆后2017年9月10日~2018年6月1日间覆盖研究区的12 d重访周期的S1 B SAR影像进行分析,获取了山脊、山谷等不同地貌部位的累积地表形变量,结合干涉图平均相干性、多时相光学遥感图像等分析,确认了形变结果的合理性,之后对第六次核试验热辐射后效阶段的形变进行了建模分析.

1 朝鲜核试验区概况

朝鲜核试验场建于朝鲜东北部咸境北道吉洲郡,图1(a)所示是核试验场及周边GF2高分辨率假彩色合成图像,图1(b)是核试验场及周边S1 B SAR单视复数(single look complex, SLC)影像的平均幅度图. 我们选择了北纬41.2°~41.4°,东经128.98°~129.18°范围作为研究区. 研究区中有一座横T形的山脉,西侧和中央高,核试验场就建在山脉中. 区域海拔高程约为500~2300 m,区域大部分地方植被覆盖度较高. 核试验场地下主要岩石为伟晶云母花岗岩、细粒花岗岩和闪长岩等硬岩^[16],地处稳定大陆区域.

2 应用SBAS-InSAR测量朝鲜第六次核试验后地表形变

朝鲜核试验场地表植被覆盖严重,地形复杂,面临一系列InSAR时序分析难题. 我们选择更适合自然地表SBAS时序方法^[18]. SBAS方法主要是通过限制干涉对的时间基线和空间基线,以保证构成干涉集合的每一个干涉对都有尽可能高的相干性. 在对集合内的所有干涉对进行常规差分干涉处理后,基于相干性筛选出时序高相干点并建立干涉位相方程组,通过奇异值分解(singular value decomposition, SVD)法求解各位相分量,通常采用时间域和空间域滤波将大气相位和非线性形变相位去除,最终求得每个高相干点上覆盖整个观测时间的形变速率和累积形变量.

本文对ESA提供的22景覆盖研究区的2017年09月10日到2018年06月01日的S1 C波段的SLC数据的第2子条带进行了SBAS-InSAR处理,该数据为降轨数据,轨道号为134,入射角为36°~42°.

计算是利用开源软件GMT5SAR^[22,23]实现的,详细流程步骤见图S3. 处理中关键的参数选择有:(1)以

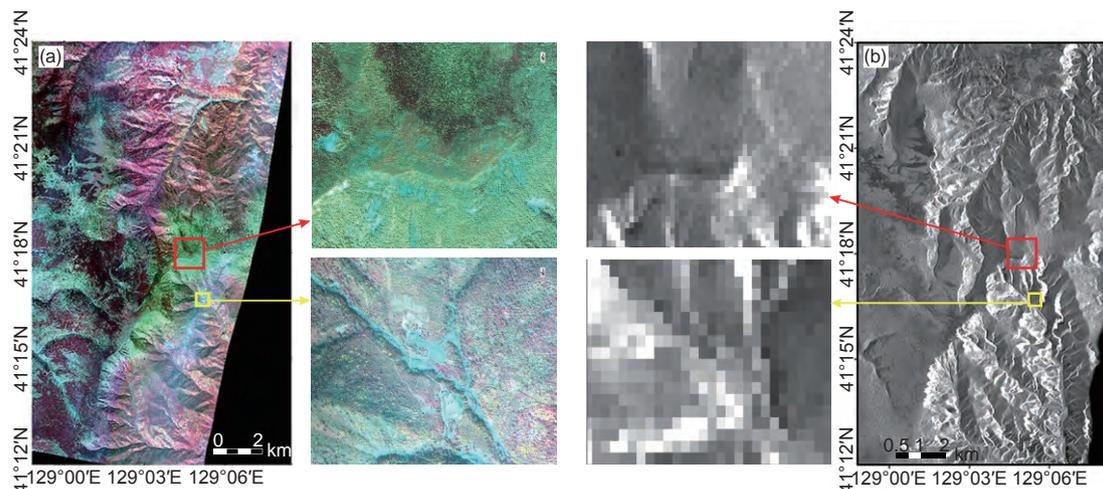


图 1 朝鲜核试验场光学影像图及平均幅度图。(a) 2017年9月27日我国高分2号卫星成像的朝鲜核试验场假彩色合成光学影像图。合成方案(显示颜色(成像波段))是R(IR)-G(R)-B(G)。 (b) S1 B卫星成像的朝鲜核试验场22景不同时间的SAR SLC影像的平均幅度图(表S1、图S1)。红色方框标注了第六次核试验事件空腔位置^[12]，黄色方框标注了核试验2, 3, 4号坑道入口位置(图S2)

Figure 1 Composition image and average amplitude map of the Democratic People’s Republic of Korea (DPRK). (a) Pseudo color composition image of the nuclear test site of the DPRK acquired on September 3, 2017 by GF2 satellite of China. The color composite scheme is R(IR)-G(R)-B(G), R stands for red, IR means infrared, G stands for green, B stands for blue, the color outside of bracket stands for display color band, inside of bracket stands for respect acquiring color band. (b) The average amplitude map of 22 scenes of different time’s SAR SLC images of the nuclear test site acquired by S1 B satellite (detail information see Table S1 and Fig. S1). The red box marks the location of the cavity of the 6th nuclear test event^[12], and the yellow box marks the entrance location of the nuclear test’s tunnel 2, 3 and 4 (detail information see Fig. S2)

2018年1月8日的影像作为主影像，对所有SLC数据配准；(2) 设置的初始时间基线阈值 ≤ 48 d，垂直基线阈值为110 m，得到的干涉图集共64对，时空基线分布如图2中黑色实线或虚线所示；(3) 去除地形相位是采用30 m分辨率的SRTM(shuttle radar topography mission)

DEM数据；(4) 多视处理视数为方位向2视和距离向8视，然后进行了200 m波长半径的高斯滤波；(5) 相位解缠调用Snaphu模块(统计最小费用网络流算法)^[24]，解缠相干性阈值经多次实验最终选择0.13。

对所有的解缠干涉图进行目视检查，发现有21个

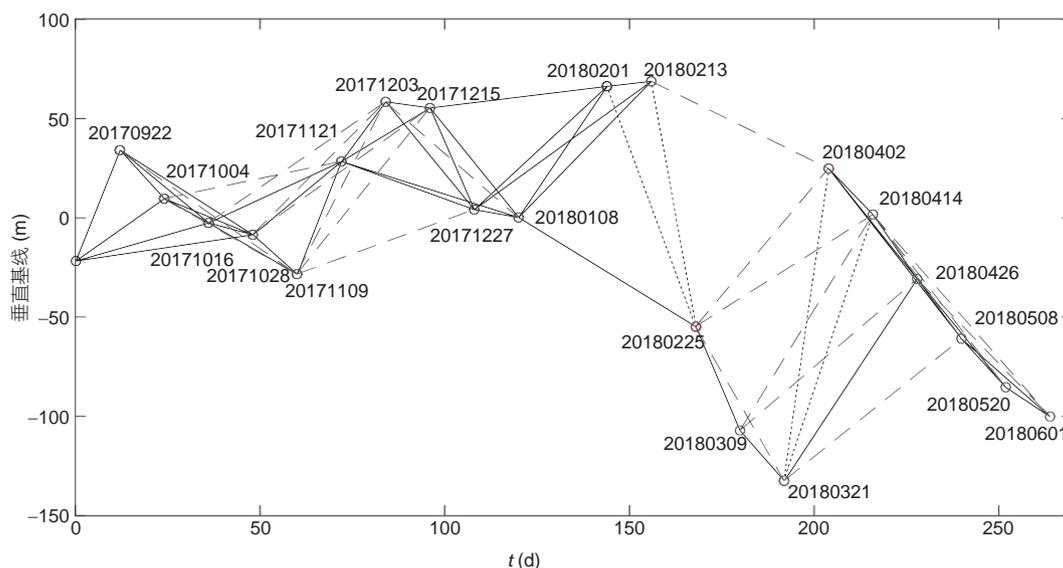


图 2 SBAS时空基线图。黑色实线为初始SBAS干涉对得到的，黑色长虚线为删除的干涉对，短虚线为增补的干涉对
Figure 2 Spatial-temporal baseline chart for SBAS processing. Black solid line stands for the initial SBAS interferograms, black long dot line stands for deleted initial SBAS interferograms, short dot line stands for added interferograms

干涉图(图2中黑色长虚线)存在大量明显的解缠相位跳变和较大面积低相干区域, 将这21个干涉对去除后发现干涉对网络集合中2018年2~4月间的干涉对连接过于单薄, 可能会影响结果的可靠性, 为此对与2~4月数据相关的可能干涉对在确保解缠质量和相干性满足要求的前提下适当放宽时空基线限制, 补充了4个干涉对(图2中短虚线)到SBAS干涉对集合中, 最后形成47个干涉对(图2中黑色实线加短虚线), 研究区干涉集的平均相干性见图S4, 原始干涉图见图S5、数据S1. 基于47个解缠相位图(图S6、数据S2)反演形变, 得到视线向形变时间序列, 对结果进行地理编码得到以第六次朝鲜核爆空腔^[11]为中心的约17 km×22 km范围的研究区内, 分辨率为约100 m×100 m的雷达视线方向(line of sight, LOS)的累积形变图(图3).

同一位置相干性均大于0.13且通过时序分析进一步筛选的测量结果(图S7, 数据S3)中最终保留下来547个高相干点, 大部分成团分布于无植被覆盖的裸岩或建筑区. 高分辨率光学影像展示了部分高相干点的地表覆盖情况(图S8), 定量计算高相干点的春季和夏季NDVI发现, 其值基本上都趋于0(表S3), 属于裸土、岩石或建

筑区. 形变的时间序列表明在朝鲜第六次朝鲜核试验后的8个多月里, 核试验区爆炸后地表形变初始短时间内朝向卫星移动, 然后向远离卫星方向移动(即雷达视线向地表形变为负)的趋势, 最大形变达到181 mm.

从图3中可以看到测量结果高相干点成片分布, 空间上相邻点形变时间序列变化具有类似之处. 为了更好地进行时空分析, 将547个点进行空间聚合, 舍弃了20个零星分布的孤立点(6个像素点的半径范围内高相干点数少于4个), 其余527个的高相干点在空间上聚合为14个集合, 集合内高相干点的地貌类型基本相同. 用集合内各高相干点位置的相干性加权(式(1), (2))得到其中心, 作为各集合的中心位置(图4(a)中的“各区域中心”).

$$LON_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} (corr_j \times lon_j)}{\sum_{j=1}^{n_i} corr_j}, \quad (1)$$

$$LAT_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} (corr_j \times lat_j)}{\sum_{j=1}^{n_i} corr_j}, \quad (2)$$

其中, LON_i , LAT_i 分别是第*i*个集合的中心位置的经度、纬度($i=1, \dots, 14$, 对应图4(a)中1~14). n_i 为第*i*个区域内高

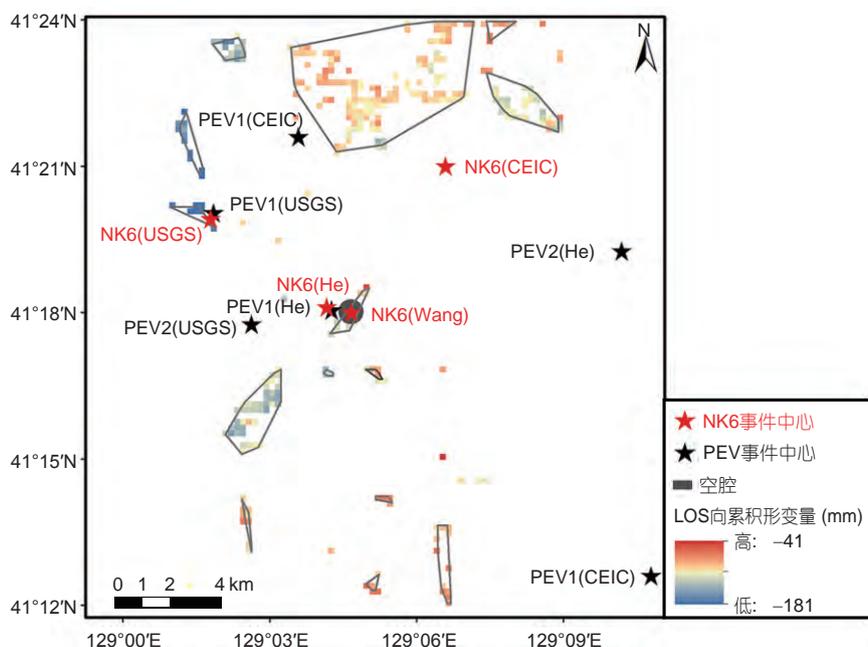


图3 地表视线向累积形变图(2017年9月10日~2018年6月1日). 朝鲜核试验事件中心(NK6)及爆后伴随事件(postexplosion event, PEV)位置(表S2)参考中国地震台网(<http://www.ceic.ac.cn/history>)(CEIC)、美国地质调查局(<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes>)(USGS)、He等人^[8]给出的事件定位, 空腔范围参考Wang等人^[12]. 图上地表形变点像素大小显示有夸大

Figure 3 Surface accumulative displacement in LOS direction from September 10, 2017 to June 1, 2018. The geolocation of nuclear test events of Democratic People's Republic of Korea (NK6) and postexplosion event (refer to Table S2) courtesy from CEIC (<http://www.ceic.ac.cn/history>), USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes>), He et al.^[8] extension of the Nuclear Explosive Cave refers to Wang et al. [12]. The pixel size of the displacement points on the map is been exaggerated

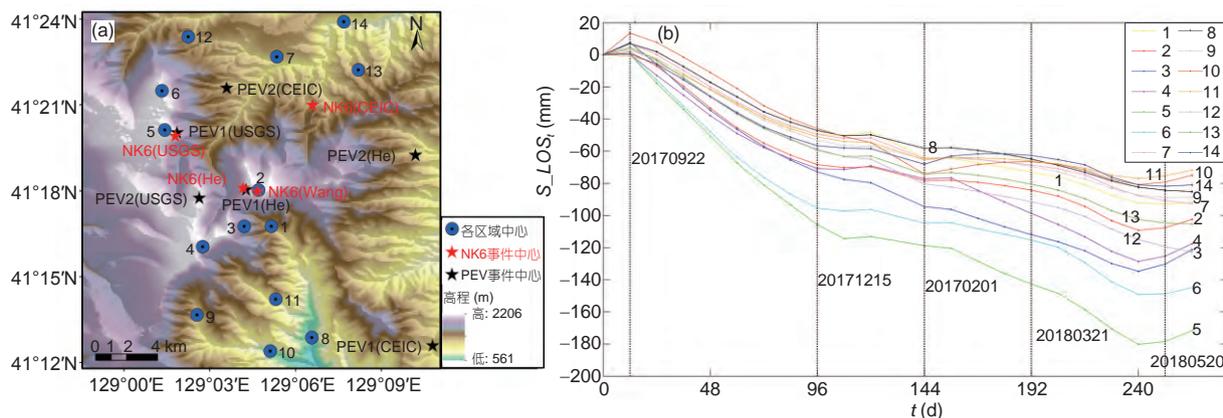


图 4 各集合中心位置及各时段的LOS向累积形变量. (a) 各集合中心位置及地形晕渲图. (b) 各集合各时段的LOS向累积形变量. t 均指各日期距离2017年9月10日的间隔天数

Figure 4 Centroid positions and cumulative LOS deformation along with time of each set. (a) Centroid positions of each set and topographic map. (b) Cumulative LOS deformation in different sets along with time. All horizontal t refers to interval days between each dates and September 27, 2017

相干点个数, lon_j, lat_j 为第*i*个集合中第*j*个像素的经度、纬度.

各集合的形变采用集合内各高相干点形变的相干性加权平均得到

$$S_LOS_i = \sum_{j=1}^{n_i} (corr_j \times defo_j) / \sum_{j=1}^{n_i} corr_j, \quad (3)$$

其中, S_LOS_i 为第*i*个集合的加权平均LOS向累积形变量, $defo_j$ 为第*i*个集合中第*j*个像素点的LOS向累积形变量. 计算得到各区域各时段的LOS向累积形变量时序如图4(b)所示.

从图4(a)中可以看到, 这些集合多分布在山谷、山脊或和缓的山坡. 考虑到这个区域地质基底非常稳定, 没有明显的地壳运动, 研究的时间段内发生的形变直接或者间接地由核爆炸造成. 雷达波是自东向西以约37°的入射角照射地面, 观测的形变负值代表远离传感器方向, 因此可以认为这种形变是以下沉为主, 反之则表示抬升. 各区域累积形变时序结果(图4(b))表明, 在2017年9月10日~2018年6月1日期间, 时间序列上的地表累积形变量可分为两个阶段: (1) 核爆后短时间内部分地区仍有显著的抬升, 这可以认为是热辐射后效阶段空腔中的压力和温度仍高于常温常压造成的, 爆炸中心由于巨大的爆炸造成的坍塌烟囱使得部分能量已得到释放, 但是离爆炸中心较远处的能量释放仍然需要一个过程, 作用于围岩可能使在一段时间内其继续抬升, 不同地貌部位是升是降, 取决于核爆炸的能量传播和后续与围岩的作用. 据文献[14]记载某次核试验前

后温差峰值出现在第15天, InSAR观测这个阶段间隔是12 d, 二者是吻合的, 但是更细致的过程则缺乏数据支持. 爆炸中心处(区域2)距烟囱位置较近, 抬升量接近于0, 9月22日后各区域均开始下沉, 进入第二阶段; (2) 第二阶段各区域的整体趋势相似, 但是沉降速度和沉降量略有不同. 部分区域自2017年12月15日~2018年3月21日, 下沉减缓, 甚至出现小幅度抬升. 朝鲜核试验场所在的咸境北道的温度资料显示多年平均气温11月5日开始低于0°C, 3月24日开始高于0°C(详见补充材料数据S4中表“冻融分析”). 由于岩石内部的降温与回升比地表温度相对滞后, 且当年的实际温度与历史平均温度不同. 可以认为从2017年12月中旬~2018年3月中旬这段时间的形变可能主要是冬季岩石内部裂隙水冰冻膨胀的形变和原有形变的叠加. 从2018年5月8日~6月1日间靠近核试验地下隧道入口处的基地(区域1)及附近区域有抬升现象, 这可能与5月24日朝鲜将核设施炸毁有关.

对于核试验, 不可能获取GPS等地面实测数据用于验证或对比, 但核爆后围岩的升温造成的爆后持续10多天的膨胀、冬季冻融现象引起的抬升及减缓下沉现象在时间序列上的体现, 间接说明了本文结果的可信性.

3 地表形变时空变化的分析

3.1 地表形变随时间变化的分析

3.1.1 Weibull模型拟合形变的时间变化过程

对第二阶段的形变随时间变化进行分析, 不考虑

膨胀阶段(2017年9月10日~2017年9月22日)及冻融阶段(2017年12月15日~2018年3月21日),可以发现地表形变下沉量随时间呈指数增加.利用基于Weibull函数^[25]模型对随时间变化的过程进行拟合,数学表达式为^[26]

$$S_t = -A + (A - B)e^{-k(t)^f}, \quad (4)$$

其中, S_t 为 t 时刻预测的垂直向累积形变量,负值代表下沉. S_t 可由各区域的LOS向累积形变量 S_LOS_t 经式(5)转换得到

$$S_t = S_LOS_t / \cos\theta, \quad (5)$$

其中, θ 为研究区中心像元的入射角,约为 37° . A, B, k, f 为待求参数.各参数的意义:当 $t \rightarrow 0$ 时, $S_0 = -B$, $-B$ 代表初始地表形变量;当 $t \rightarrow \infty$ 时, $S_\infty = -A$,形变量趋于定值 $-A$; k 值为沉降加速因子, k 越大,沉降越快; f 为沉降综合影响因子.

拟合利用OriginPro 8.0软件实现.以区域1为例,垂直向累积形变量 S_t 的拟合曲线如图5所示,实线为拟合曲线,黑色实点是InSAR测量得到的实际累积形变量,圆圈是用于拟合的垂直向累积形变量 S_t .为减小膨胀阶段及冻融阶段对模型参数求解带来的误差,用于拟合的所有累积形变量均与2017年9月22日的累积沉降量作差,冻融阶段的形变量不参与模型拟合.各区域的模

型参数解如表1所示(其他13个区域的拟合曲线见数据S5).

实验结果表明: (1) 2017年9月22日~2018年5月8日期间,基于Weibull函数的沉降模型对研究区垂直向累积形变量拟合程度很高,各区域相关系数平均约0.97; (2) 沉降量模型值接近2017年9月22日~2018年5月8日期间的累积沉降量观测值,表明该区域下沉趋于停止; (3) 2017年9月22日~2018年5月8日期间的最大沉降量预测值及累积沉降量均位于距离空腔西北(区域5)方向约3 km的山脊处,该处靠近USGS定位的朝鲜第六次核试验事件中心及He等人^[8]定位的核爆后的两次伴随事件; (4) 山脊处(区域2, 4, 5等)的沉降量要比山谷(区域8, 10, 11等)大,离事件中心更近的区域(区域2~6)比远处的区域(区域7~14)沉降量更大.

3.1.2 冻融带来的地表形变分析

2017年12月中旬~2018年3月中旬这段时间的形变可能主要是冬季岩石内部裂隙水冻造膨胀的形变和原有形变的叠加,根据模型结果和SBAS-InSAR获取的地表形变结果,垂直方向上的冻融量 F 可近似为冻融时间段内实际测量值与模型模拟值之差:

$$F = S_t - S_w, \quad (6)$$

其中, S_t 为实际测量值, S_w 为沉降模型的结果.冻融量 F

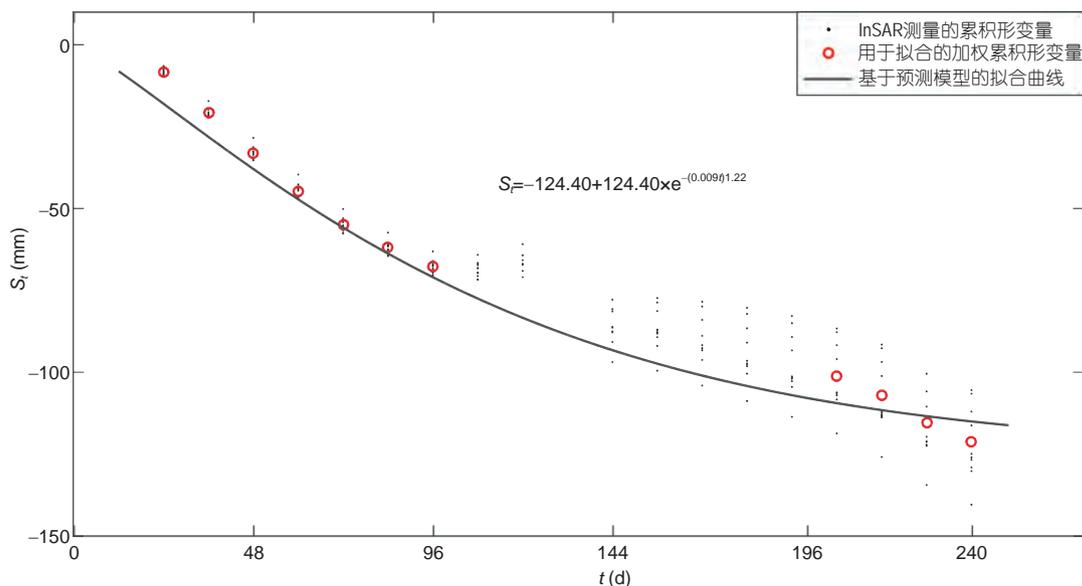


图5 (网络版彩色)地表垂直向累积形变随时间变化的拟合分析(区域1). 2017年9月22日~2018年5月8日,不包括2017年12月15日~2018年3月21日

Figure 5 (Color online) Time-varying fitting analysis of vertical cumulative surface deformation changing (Area 1). From 22 September 2017 to 8 May 2018, not including 15 December 2017 to 21 March 2018

表 1 各集合的模型参数及统计数据

Table 1 Solution of model parameters of each set and statistical data

区域编号	$A(\text{mm})$	$B(\text{mm})$	f	k	R^2	垂直向累积 沉降量(mm)	集合中高 相干点数	平均 相干性	相干性 标准差
1	124.4	0	1.22	0.009	0.97	121.10	10	0.30	0.03
2	127.8		1.53	0.012	0.97	138.78	13	0.27	0.04
3	187.6		1.26	0.009	0.99	178.15	8	0.28	0.10
4	175.8		1.16	0.008	0.98	161.52	69	0.36	0.11
5	230.9		1.20	0.009	0.98	225.96	10	0.40	0.05
6	173.9		1.42	0.012	0.97	187.03	19	0.37	0.09
7	111.6		1.47	0.011	0.98	118.66	255	0.31	0.06
8	105.6		1.62	0.011	0.98	111.91	24	0.28	0.05
9	105.7		1.66	0.011	0.98	113.26	10	0.24	0.02
10	115.3		1.31	0.011	0.94	118.16	5	0.25	0.03
11	90.5		1.71	0.012	0.98	95.32	7	0.27	0.03
12	153.9		1.35	0.008	0.99	148.09	21	0.26	0.02
13	130.3		1.30	0.010	0.97	133.81	64	0.25	0.06
14	91.8		1.84	0.013	0.96	102.14	12	0.34	0.09

增加为冰冻过程，减少为融化过程。冻融过程如图6所示。

结合历史平均气温(补充材料中数据S4中表“冻融分析”)及2018年之后的日温度(图S9)可知: 历史平均气温11月5日开始低于 0° ，由于岩石裂隙水的降温与回升比地表温度相对滞后，冻融量 F 从2017年12月15日才陆

续开始增加, 即有冰冻现象; 2018年2月25日后, 温度波动回升, 各区域冻融量开始下降. 不同海拔、不同地貌部位的冻融情况如下: (1) 海拔高的区域, 冰冻引起的地表抬升量总体大于海拔低的区域, 其中海拔更高的山脊(区域4, 5, 6)的冻融量 F 整体更大, 最大值可达约30 mm. (2) 相同的地貌部位表现出类似的冻融过程: 如

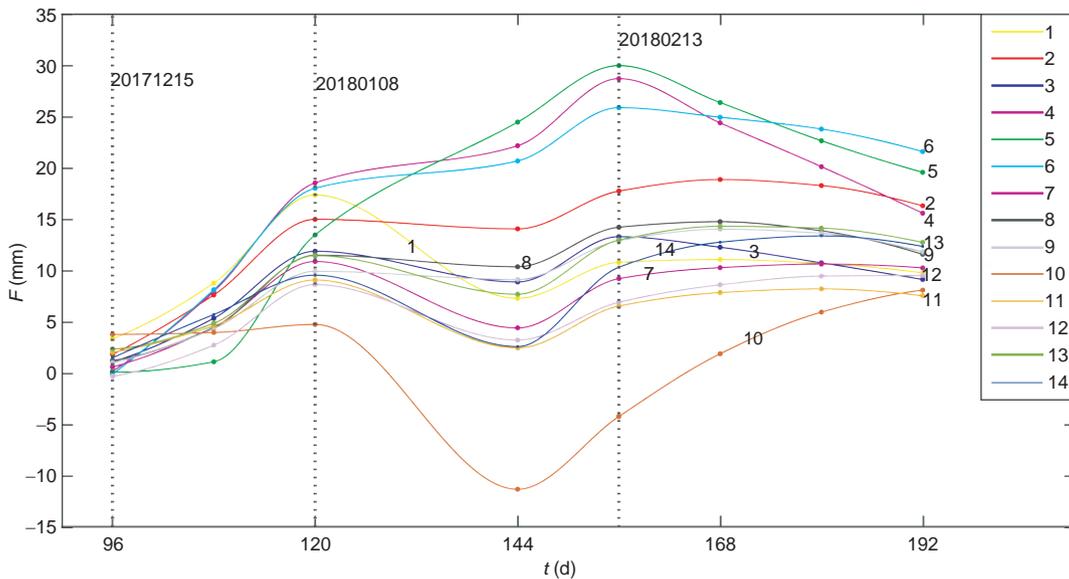


图 6 冻融过程
Figure 6 Freeze-thaw process

核试验基地(1)和北部缓坡(7)海拔接近,均坡度平缓且有建筑分布,有相似的冻融过程:冻融量 F 从2017年12月15日开始增加,在2018年1月8日达到峰值,约10~15 mm,且海拔更高的核试验基地(区域1)整体冰冻量较北部缓坡(区域7)大。(3)不同的地貌部位表现出不同的冻融过程:山谷的冰冻峰值多出现在1月8日前后,而山脊的冰冻峰值多出现在2月13日前后,海拔最低的山谷由于更易积水,冻融量反而比海拔更高的陡坡(区域3)要大。

需要说明的是,我们所能获取的天气数据仅是咸境北道整个区域的日变化温度,而其代表的地点和具体测量处理方法不祥。各点具体的海拔、高程、距海距离等不同,加之各点的模型拟合结果存在一定的误差,各点的温度响应也不尽相同。要研究地表形变与冻融关系则需要各点更准确的温度,并涉及岩石裂隙水含量、海拔高程和坡向等多个因素,目前我们能够收集到的资料不足以开展这方面的定量研究,只能从整体趋势上给出大致的分析,说明该阶段的形变可能主要是冬季岩石内部裂隙水冻造膨胀的形变和原有沉降形变的叠加。

3.2 地表形变空间分布建模分析

对基于Weibull函数的沉降模型得到的3个参数 A, f, k (表1)进行可视化,如图7所示。从图7中观察到,沉降量模型值 A 的空间分布与地貌有关,总体上山脊处大于山谷。而沉降加速因子 k 、沉降综合影响因子 f 的分布与地貌无明显关系,猜测应与岩性、构造和核设施内部结构等有关,但因缺乏详尽的资料,本文不再进一步讨论。

基于此,对第二阶段的最大累积沉降量进一步进行空间分析。岩石受核爆炸高温高压冲击的作用影响

是不均匀的,甚至不是各向同性的,此外核试验设施中存在各种通道,这些通道会显著地影响高温高压冲击的传播。由于缺乏这种冲击作用的变化尺度和核设施的数据资料,无法进行更为复杂的建模,但总体上应该距离远的影响小。因此首先尝试线性均匀衰减的假设:本次爆炸对岩层的影响范围在垂直方向上是对称的,且随着距坑道或空腔距离的增加,地表各点的垂直向影响半径 r 呈线性衰减,则有

$$r(d) = M - pd, \tag{7}$$

其中,待求参数 M 为空腔中心处向下的围岩变质层厚度(垂直方向上), p 为距离衰减系数。根据文献[14],核爆高温高压作用使围岩变软变酥后,假设围岩盖层的重力是地表下沉的主要原因,则垂直向累积形变量 S 与岩层相对高度 H 、距坑道/空腔距离 d 的定量关系如下:

$$S(H, d) = c(r + H) = cM + cH - cpd, \tag{8}$$

其中,待求参数 c 为形变系数,是形变量与围岩变质层垂直向总厚度之比。 H 为地表各点到高程参考面(此处为空腔中心所在水平面^[9])的距离,高程参考面由地面零点的高程与埋藏深度作差得到,综合考虑已有研究结果对第六次朝鲜核爆的埋藏深度估计^[5,9,12,13],我们采用了450^[12]及770 m^[9]的埋藏深度。 H 负值代表海拔低于高程参考面。当 $H > 0$ 时,垂直向影响范围上界受地表面限制。 d 为地表各点到坑道或空腔水平方向上的最短直线距离。本文仅考虑与第六次核爆事件中心所在空腔直接连接的2号坑道及其分支。模型垂直向剖面如图8所示。

空腔附近(区域2)坑道、空腔内爆室等情况复杂不明,难以参与建模分析,因此没有包括在内。对式(8)作多元回归分析发现:2017年9月22日~2018年5月8日期间,不论是观测垂直向累积沉降量,还是Weibull模型结

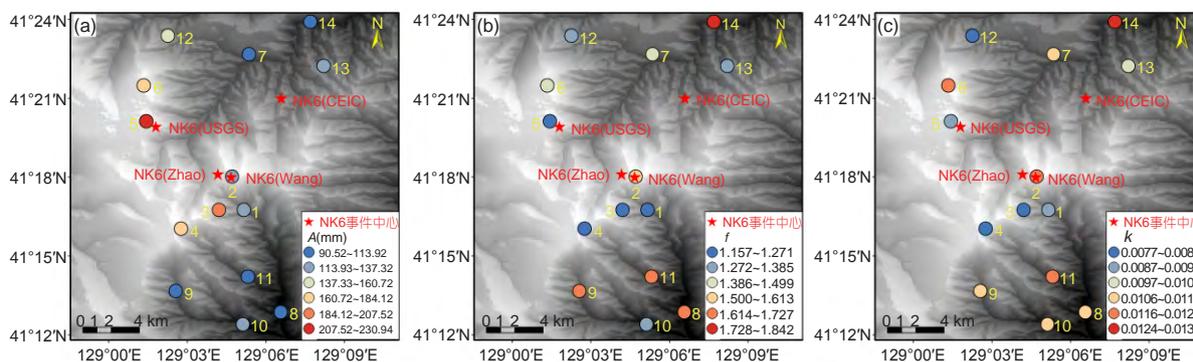


图7 三个Weibull模型参数的空间分布图。(a)最大累积沉降量 A ; (b) f 因子; (c) k 因子

Figure 7 Spatial distribution maps of three Weibull Model parameters. (a) Maximum cumulative deformation; (b) f factor; (c) k factor

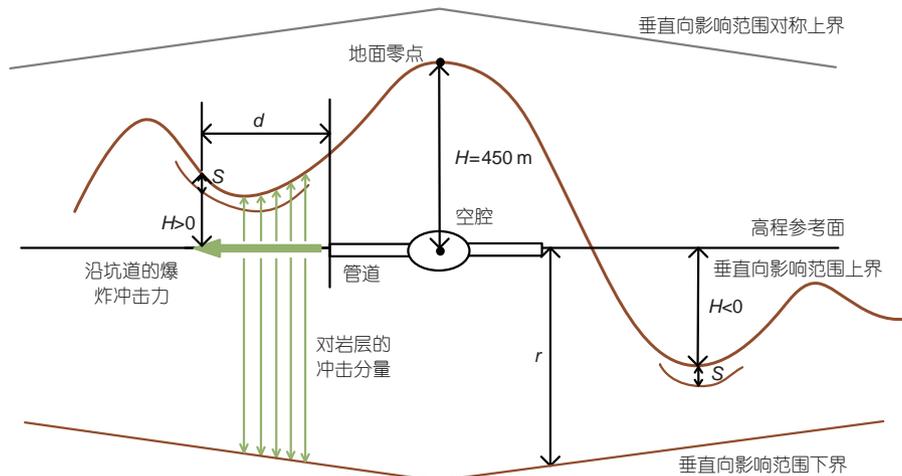


图 8 (网络版彩色)模型垂直向剖面示意图. 图中箭头代表了爆炸冲击力的方向, 较粗的箭头为沿坑道的爆炸冲击力, 较细的箭头为对岩层的垂直冲击分量. S 为变质岩层形变量. H 为地表各点到高程参考面(爆炸中心所在高程面)的距离

Figure 8 (Color online) Schematic diagram of the model vertical profile. The arrow in the figure represents the direction of the explosive impact force. The thicker arrow stands for the explosive impact along the tunnel. And the thinner arrow is the vertical impact component on the rock. S is the vertical deformation of metamorphic rock layer. H is the relative height of a given surface point to the epicenter surface

果A的模型拟合都较好. 模型的3个参量中 M 和 c 的 P 值很低, 即显著度非常高, 但 p 的显著度很低(表S4), 效果不好. 分析原因可能为缺乏地质岩层、构造及核设施内部坑道和门等人工工事分布的具体细节信息, 这些将影响冲击差异尤其是水平方向性差异, 导致建模不确定性很大. 因此我们最后不考虑距离衰减进行了更简单的建模, 也就是说将研究区内的影响范围简化为一个常数, 不考虑垂直向影响范围在距离上衰减的模型如式(9)所示:

$$S(H, d) = c(r + H) = cM + cH. \tag{9}$$

对式(9)作多元回归分析, 统计结果如表2所示. S_{\max} 为2017年9月22日~2018年5月8日期间的垂直向累积沉降量, A 为Weibull模型得到的垂直向最大形变量.

由表2可知: (1) 在2017年9月22日~2018年5月8日期间, 观测垂直向累积沉降量与Weibull模型结果 A 的拟合仍然较好, 拟合优度分别为0.81和0.77, 标准误差

分别为0.018和0.022 m, M, c 两个参数值受模型差异的影响很小, 显著度进一步提高; (2) 形变系数即形变量与围岩变质层垂直向总厚度之比 c 为 $7 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-5}$, 表明为围岩盖层厚度与垂直向形变量成显著的正比关系, 与猜想一致, 即此次地下核试验后存在岩石受高温高压作用而变酥变软后, 受重力驱动为主的地表沉降现象, 不同地貌部位的沉降速率和沉降量差异是由于对应的岩层厚度不同和变质作用造成的可压缩层厚度不同所致; (3) 核爆炸垂直向影响范围约为1800~2300 m, 远小于水平方向影响范围, 推测因爆炸的冲击可沿着坑道传播, 核爆后对围岩的影响上存在各向异性, 且在通道工事方向上高温高压的传播衰减明显小于垂直方向.

4 结论

本文利用SBAS-InSAR方法得到了朝鲜第六次核试验爆后(2017年9月10日~2018年6月1日)不同时刻(约

表 2 不考虑距离衰减的建模回归分析结果

Table 2 Statistical analysis results from the model without distance degrading

		拟合值	P	拟合优度 R^2	标准误差
S_{\max}	M	1947~2267 m	2×10^{-11}	0.81	0.018 m
	c	7×10^{-5}	0.00003		
A	M	1845~2175 m	$1 \times 10^{-10} \sim 2 \times 10^{-10}$	0.77	0.022 m
	c	8×10^{-5}	0.0001		

12 d间隔)的地表累积形变量,证明了12 d重访周期的S1 B SAR时序分析可以观测到较强核试验热辐射后效阶段的形变过程.测量结果显示朝鲜第六次核爆后形变过程可分为两个阶段:(1)第一阶段为爆炸后短时间内周边部分围岩继续膨胀的过程,InSAR观测到不同部位不同程度的形变抬升;(2)第二阶段,围岩受爆炸产生的高温高压作用变酥变软,在重力驱动下开始下沉,不同地貌部位的沉降速率和沉降量不同;冬季叠加在下沉趋势中由围岩裂隙水的冻融造成的形变也可被观测到.下沉形变到5月20日左右趋于停止,第二阶段

的形变总体上可用Weibull模型拟合.分析表明爆炸的变质作用所影响的范围是形变出现的内在条件,重力是爆炸区域地表下沉的外部驱动力.据此模型分析结果证明了不同地貌部位的沉降速率和沉降量差异是由于对应的岩层厚度不同和变质作用造成的可压缩层厚度不同所致,模型统计给出核爆炸变质作用范围约为1800~2300 m,变质层的形变系数约为 $7 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-5}$.形变空间分布呈现出明显的方向性,但是由于缺乏核设施内部坑道和门等人工工事分布的具体细节信息,这种方向性差异目前还难以进行定量分析.

致谢 研究中使用了欧空局(ESA)和中欧合作龙计划项目(32244)提供的Sentinel 1 B SAR数据,中国四维测绘技术有限公司提供的GF2影像,美国地质调查局提供的SRTM DEM数据,美国加州大学圣迭戈分校斯克里普斯海洋研究所Sandwell教授团队开发的开源软件GMTSAR.在与北京大学王腾研究员和台湾大学胡植庆教授的讨论中得到有益启示.感谢审稿专家给出的宝贵意见.作者在此一并致谢.

参考文献

- 1 Fisk M D. Source spectral modeling of regional P/S discriminants at nuclear test sites in China and the former Soviet Union. *Bull Seismol Soc Am*, 2006, 96: 2348–2367
- 2 Hong T K, Baag C E, Choi H, et al. Regional seismic observations of the 9 October 2006 underground nuclear explosion in North Korea and the influence of crustal structure on regional phases. *J Geophys Res-Solid Earth*, 2008, 113: B03305
- 3 Zhang M, Wen L. High-precision location and yield of North Korea's 2013 nuclear test. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 2941–2946
- 4 Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. Seismological investigation of the 2016 January 6 North Korean underground nuclear test. *Geophys J Int*, 2016, 206: 1487–1491
- 5 Zhao L F, Xie X B, He X, et al. Seismological discrimination and yield estimation of the 3 September 2017 Democratic People's Republic of Korea (DPRK) underground nuclear test (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 4163–4168 [赵连锋, 谢小碧, 何熹, 等. 2017年9月3日朝鲜地下核试验的地震学鉴别和当量估计. *科学通报*, 2017, 62: 4163–4168]
- 6 Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. The 9 September 2016 North Korean underground nuclear tests. *Bull Seismol Soc Amer*, 2017, 107: 1–8
- 7 Xie X B, Zhao L F. The seismic characterization of North Korea underground nuclear tests (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2018, 61: 889–904 [谢小碧, 赵连锋. 朝鲜地下核试验的地震学观测. *地球物理学报*, 2018, 61: 889–904]
- 8 He X, Zhao L F, Xie X B, et al. High-precision relocation and event discrimination for the 3 September 2017 underground nuclear explosion and subsequent seismic events at the North Korean test site. *Seismol Res Lett*, 2018, 9: 2042–2048
- 9 Yao J, Tian D, Sun L, et al. Source characteristics of North Korea's 3 September 2017 nuclear test. *Seismol Res Lett*, 2018, 89: 2078–2084
- 10 Vincent P, Larsen S, Galloway D, et al. New signatures of underground nuclear tests revealed by satellite radar interferometry. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 2141
- 11 Wei M. Location and source characteristics of the 2016 January 6 North Korean nuclear test constrained by InSAR. *Geophys J Int*, 2017, 209: 762–769
- 12 Wang T, Shi Q, Nikkhoo M, et al. The rise, collapse, and compaction of Mt. Mantap from the 3 September 2017 North Korean nuclear test. *Science*, 2018, 361: 166–170
- 13 Myers S C, Ford S R, Mellors R J, et al. Absolute locations of the North Korean nuclear tests based on differential seismic arrival times and InSAR. *Seismol Res Lett*, 2018, 89: 2049–2058
- 14 Lü M, Qiao D J, Zhu H J, et al. Nuclear explosion and nuclear test (in Chinese). Beijing: Atomic Energy Press, 2005. 71–91 [吕敏, 乔登江, 朱焕金, 等. 核爆炸与核试验. 北京: 原子能出版社, 2005. 71–91]
- 15 Vincent P, Buckley S M, Yang D, et al. Anomalous transient uplift observed at the Lop Nor, China nuclear test site using satellite radar interferometry time-series analysis. *Geophys Res Lett*, 2011, 38: 23306
- 16 Institute of Geology, State Academy of Sciences, Democratic People's Republic of Korea. *Geology of Korea*. Pyongyang: Foreign Languages Books Publishing House, 1996. 382

- 17 Zebker H A, Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1992, 30: 950–959
- 18 Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2002, 40: 2375–2383
- 19 Tizzani P, Berardino P, Casu F, et al. Surface deformation of Long Valley caldera and Mono Basin, California, investigated with the SBAS-InSAR approach. *Remote Sens Environ*, 2007, 108: 277–289
- 20 Xu W B, Li Z W, Ding X L, et al. Application of small baseline subsets D-InSAR technology to estimate the time series land deformation and aquifer storage coefficients of Los Angeles area (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2012, 55: 452–461 [许文斌, 李志伟, 丁晓利, 等. 利用InSAR短基线技术估计洛杉矶地区的地表时序形变和含水层参数. *地球物理学报*, 2012, 55: 452–461]
- 21 Dong S, Samsonov S, Yin H, et al. Time-series analysis of subsidence associated with rapid urbanization in Shanghai, China measured with SBAS InSAR method. *Environ Earth Sci*, 2014, 72: 677–691
- 22 Sandwell D, Mellors R, Tong X, et al. Open radar interferometry software for mapping surface deformation. *Eos Trans AGU*, 2011, 92: 234
- 23 Sandwell D T, Mellors R, Tong X, et al. GMTSAR: An InSAR Processing System Based on Generic Mapping Tools. *Scripps Institution of Oceanography Technical Report*, 2011
- 24 Chen C W, Zebker H A. Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2002, 40: 1709–1719
- 25 Weibull W. New methods for computing parameters of complete or truncated distributions. *Flygtekn Frsksanstalt Rep*, 1955
- 26 Tu Y H, Wang Z L, Liang Z M, et al. Study on application of modified Weibull model to settlement prediction of foundation (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2005, 26: 621–623 [涂许杭, 王志亮, 梁振森, 等. 修正的威布尔模型在沉降预测中的应用研究. *岩土力学*, 2005, 26: 621–623]

补充材料

- 图S1 第二子条带平均幅度图
- 图S2 核试验场坑道位置图
- 图S3 SBAS-InSAR处理流程图(GMT5SAR)
- 图S4 47个干涉对的平均相干性图
- 图S5 所有原始干涉图
- 图S6 所有干涉图解缠结果
- 图S7 时序各时刻地表形变结果(雷达视线向)
- 图S8 部分高相干点集合的GF2影像
- 图S9 咸境北道气温变化图
- 表S1 遥感数据清单
- 表S2 朝鲜第六次核试验事件及其爆后事件
- 表S3 时序结果测量点NDVI统计值
- 表S4 建模回归分析结果
- 数据S1 原始干涉图文件
- 数据S2 解缠结果文件
- 数据S3 时序结果文件
- 数据S4 数据主要处理过程
- 数据S5 Weibull模型模拟结果

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “朝鲜第六次核爆后InSAR地表形变测量与分析”

Measurement and analysis of surface deformation after the sixth nuclear explosion in the Democratic People's Republic of Korea using InSAR

Qiming Zeng^{*}, Zimin Zhou, Meng Zhu & Jian Jiao

Institute of Remote Sensing and Geographical Information System, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

^{*} Corresponding author, E-mail: qmzeng@pku.edu.cn

We use the small baseline subset (SBAS) method and Sentinel-1B synthetic aperture radar data to obtain the cumulative surface deformation at highly coherent points and different times (12-d intervals from September 10, 2017 to June 1, 2018) following the sixth nuclear explosion conducted by the Democratic People's Republic of Korea (DPRK). The study is conducted for a 17 km×22 km area centered on the explosion. Measurement points are aggregated into 14 sets according to their spatial neighborhood. According to the average coherence of each point in the set, the point deformation is weighted and averaged to obtain the cumulative deformation of each set. The location of each set is also weighted and averaged according to the average coherence of each point in standing for all points in the set. The analysis and discussion in this paper are based on these 14 sets for 14 different regions. Results show that the deformation process in the thermal radiation aftereffect stage of the sixth nuclear test can be effectively observed using interferometric synthetic aperture radar. There was still surface uplift near the epicenter for ~10 d after the explosion, after which the surface began to sink. The sinking rate and total sinking amount varied by location. Meanwhile, the phenomenon of subsidence slowing or even the surface uplifting possibly due to the freeze-thaw cycle of water in underground rock in winter was observed. After May 24, 2018, deformation began to rise because the government of the DPRK bombed the entrance of the nuclear facilities. We indirectly demonstrate the reasonableness and consistency of the observation results via the coherence of high-resolution optical images, meteorological data, and interferograms for the area of the nuclear explosion. The spatial and temporal distributions of surface deformation and their causes are then modeled. The results of modeling analysis are as follows. (1) In the thermal radiation aftereffect stage of the DPRK's sixth nuclear explosion, the surrounding rock softened under high temperature and high pressure, and the surrounding metamorphic rock then compressed under the action of its own gravity and began to sink. This time-varying process is fitted by a deformation prediction model based on the Weibull function, and four parameters—namely the acceleration factor of deformation, comprehensive influence factor of deformation, initial surface deformation, and prediction value of maximum deformation—are obtained. The average correlation coefficient of the fitting curve is about 0.97. Model fitting results show that the sinking deformation tended to stop around May 20. (2) A function model was proposed to analyze the genetic mechanism of surface deformation, where the thickness of the layer of metamorphic rock is taken as the independent variable and the maximum deformation is taken as the dependent variable. The thickness of the layer of metamorphic rock was calculated for explosion burial depths of 450 and 770 m. The vertical impact distance of the explosion from the epicenter was about 1800–2300 m while the deformation coefficient of the metamorphic rock was about 7×10^{-5} – 8×10^{-5} . The statistical fitting degree R^2 is about 0.8 and the P value is close to zero. In conclusion, the scope of the impact of the explosion metamorphism is the intrinsic condition of deformation, and gravity is the driving force of surface subsidence in the explosion area. Differences in the deformation rate and amount in different geomorphological locations are due to different thicknesses of the compressible layer relating to the rock thickness and metamorphism. Such differences have directionality, possibly because the attenuation of high-temperature and high-pressure propagation in the direction of tunnel works is less than that in the direction of surrounding rock.

the sixth nuclear test of Democratic People's Republic of Korea, SBAS-InSAR, surface deformation, Weibull model, freeze-thaw deformation

doi: 10.1360/N972019-00251