

联合雷达遥感与数值仿真的深圳光明特大滑坡事故 时序监测与滑动机理分析

秦晓琼^{1,2}, 黄健明^{1,2}, 黄远钧^{1,2}, 汪驰升¹, 陈湘生^{1,2}

1. 深圳大学 极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室, 深圳 518060;

2. 深圳大学 生态环境部滨海城市水土环境演化重点实验室(筹), 深圳 518060

摘要: 针对2015年深圳光明区(红坳堆土场)特大滑坡事故, 现有研究主要使用光学影像、现场调查以及数值仿真等方法进行事后原因分析, 然而, 此前研究均未能获取滑坡前后的地表变化过程。本研究采用Cosmo-SkyMed雷达卫星影像对红坳堆土场进行时序监测, 联合小基线雷达干涉测量技术(SBAS-InSAR)、阴影恢复三维雷达干涉测量技术(SAR-SFS)以及深度积分连续介质模型等技术, 对2013年—2016年红坳堆土场滑坡前后的地表形变开展了时序分析以及数值仿真研究。首先获取了滑坡前后的地表沉降速率分布和时序曲线, 发现地表形变速率范围约为 $[-40.7, 64.3]$ mm/a, 沉降主要分布在S9区域滑坡后缘。在此基础上, 对事故现场进行数值仿真建模, 使用SAR-SFS DEM减少地形误差, 并通过多时期DEM增量和InSAR形变趋势对比还原滑前蠕变过程, 将DEM作为原始地貌输入, 通过深度积分连续介质模型和库伦模型计算坡面, 并模拟了高速远程滑坡过程中的流体状态。结果表明, 当孔隙水压力系数 λ 为0.6时, 最贴合现场滑坡情况, 其滑带面以上的滑体体积约 3.60×10^6 m³, 最大填土厚度62.7 m。滑坡体具有很强的流动性, 滑坡在前50 s完成主滑, 且后续仍有余滑持续, 产生碰撞动量44000 kg·m/s, 远超人员和建筑安全阈值, 导致了灾难性后果。本研究从雷达遥感和数值仿真双视角揭示了深圳光明红坳堆土场的滑坡机理, 表明超量堆填与孔隙水压力变化是滑坡灾害发生的主因, 对于进一步了解堆土场滑坡的孕灾—灾变过程, 尤其对滑前蠕变及影响因素的分析研究具有重要价值。

关键词: 光明滑坡, SBAS-InSAR, 时序形变, 数值仿真, 滑前蠕变, 滑坡机理, 风险分析

中图分类号: P2

引用格式: 秦晓琼, 黄健明, 黄远钧, 汪驰升, 陈湘生. 2026. 联合雷达遥感与数值仿真的深圳光明特大滑坡事故时序监测与滑动机理分析. 遥感学报, 30(4): 1060–1074

Qin X Q, Huang J M, Huang Y J, Wang C S and Chen X S. 2026. Study on time-series monitoring and sliding mechanism analysis of the catastrophic Shenzhen Guangming landslide via joint radar remote sensing and numerical simulation. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 1060–1074 [DOI: 10.11834/jrs.20265346]

1 引言

2015年12月20日, 深圳市光明区红坳堆土场发生特大滑坡事故, 造成77人遇难、33间房屋被毁, 直接经济损失达8.81亿元(Yin等, 2016)。作为世界上受灾最严重的堆土场滑坡案例之一(高杨, 2018), 对红坳堆土场的形变发展过程、致灾诱因和滑坡机理等开展深入研究具有重要的防灾价值。

滑坡发生后, Yin等(2016)最早开始了事故

调查, 获取了堆土地理条件和土体组成等重要数据。刘传正(2016)结合地质环境对事故的成因机理——“泥垫托筏效应”进行了详细解释, 认为特殊的圈椅状地形、底部积水以及持续填方引起地下水水位上升, 导致了滑面贯通。高杨(2018)基于现场调查、室内试验和数值模拟等方法深入研究了该事故的成灾模式, 发现前缘坡体高水头压力和后部渣土静态液化的超孔隙水压力共同导致了滑带的贯通。张振(2018)通过离心模型实验发现高地下水位和快速堆载共同导致了

收稿日期: 2026-02-06; 预印本: 2026-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42474021); 深圳市科创委可持续发展专项(编号: KCXFZ20230731092803006); 中欧龙计划合作项目(编号: 95436)

第一作者简介: 秦晓琼, 研究方向为城市安全监测与智能感知。E-mail: xqqin@szu.edu.cn

通信作者简介: 汪驰升, 研究方向为InSAR数据处理与分析。E-mail: chishengwang@szu.edu.cn

红坳堆土场的深层低倾角失稳。Ouyang等(2017)采用深度积分连续介质模型模拟了滑坡过程,发现孔隙水压力对滑坡范围及滑体流速具有显著影响。曹政(2020)基于离散元模型分析滑坡演化过程,认为地下水对红坳堆土场稳定性存在重大影响。上述研究中,学者们多数是灾后采用光学影像、现场调查、数值仿真等方法挖掘致灾因素和滑坡机理。然而,多数地质灾害早期都会表现为地表沉降的积累,因此,滑前蠕变观测十分必要,例如坡体沉降加速可能是滑坡发生的前兆。对于突发类滑坡,GNSS、水准监测等基于单点观测的事后调查方法通常人力物力成本较高,且无法获取滑坡发生前的大范围长时序表面形变,限制了学者们对滑前蠕变的分析。

合成孔径雷达干涉测量 InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry) 技术具有大范围对地探测能力,已被广泛应用于地震活动、地壳运动、地面沉降、滑坡等地表监测中(朱建军等,2017)。时序 InSAR 技术更是能以毫米级精度反演地表高相干点的时间序列形变过程(Ferretti等,2001),很大程度上弥补了传统监测手段在监测范围、测点密度以及效率方面的不足,在滑坡监测方面得到广泛应用(王志一等,2018;李媛茜,2021;苏晓军,2024)。其中 SBAS-InSAR (Small Baseline Subset InSAR) 更是被广泛应用于滑坡体、火山、矿区等低相干场景的形变监测中(Berardino等,2002;Kang等,2019;蒋凯等,2024;Qin等,2024)。然而,目前基于雷达遥感影像对红坳堆土场的观测研究相当有限,李晓恩等(2021)探究了 InSAR 滑坡灾害的研究进展,Wang等(2017)使用阴影重建 SFS (Shape from shading) 技术从多景 Cosmo-SkyMed 影像中解算红坳堆土场的多时期 DEM,推断堆填过程中的高程变化,但该技术仅使用了 SAR 影像的强度信息;Niu等(2021)基于滑坡前后两景全极化 PALSAR-两影像开展了滑坡事故边界的提取,使用了 SAR 影像的极化和强度信息。然而,相位也是 SAR 影像中最具价值的信号之一,是 InSAR 技术实现高精度地表观测的关键,此前研究中均未能有效利用。

因此,为获取红坳堆土场的形变分布,填补“12.20”事故的滑前蠕变观测分析。一方面,本研究收集了2013年—2016年的35景 Cosmo-SkyMed 影像,首先对比多时期 SAR 影像变化识别堆填区域,并进行堆填阶段划分;随后,基于 SBAS-InSAR 技

术解算堆土场的形变速率和时序形变,结合降水、含水分布、土体参数和工况信息分析形变原因。在此基础上,本文引入 Landsat 8 光学影像计算了堆填过程中的归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 和植被覆盖度指数 FVC (Fraction of Vegetation Coverage),佐证堆土场的工况进程,从雷达遥感视角重新梳理滑坡孕灾机理与灾变过程。另一方面,由于 InSAR 滑坡观测和解译的可靠度尚未足够成熟,可能对灾害范围和程度产生误判(朱建军,2022),为此,在时序 InSAR 监测基础上,本文采用深度积分介质模型方法进行滑坡建模和数值仿真,该滑坡属于高速远程滑坡,深度积分介质模型采用流体力学方程建模,能够较好地还原其滑动过程中的液化特点。其中,由于滑坡在失稳过程中受孔隙水压力系数影响较大,本文在库伦基底阻力模型中考虑孔隙水压力系数的影响,并讨论了在不同孔隙水压力系数下滑坡滑动情况。最后,计算了每平方米土柱中蕴含的动量,定量评估了滑坡对周围人员和房屋的损害程度,对于深入了解堆土场的滑坡机制和制定防灾策略具有重要意义。

2 研究区域与数据

2.1 自然地理条件

红坳堆土场位于广东省深圳市光明区凤凰社区红坳村,在2013年12月前为废弃多年的采石场,南北长约350 m,东西宽约280 m,整体地势南高北低,南侧山顶最高处海拔为185 m,北侧紧邻海拔约为30 m的工业园区。堆土场在启用前已积蓄了大量积水,蓄水量约达 $9 \times 10^4 \text{ m}^3$ (张振,2018)。2014年2月,堆土场开始收容光明区城市建筑开挖弃土、隧道渣土和建筑垃圾(刘传正,2016)。

红坳堆土场由岩质基底和上覆弃土组成,岩质基底主要为强风化—微风化混合花岗岩,岩质坚硬,易于蓄水。上覆弃土为花岗岩、混合岩及砂岩等地层的风化土料,土体松散,颗粒细腻,99%的弃土颗粒小于6 cm。每年4—9月为降雨集中期,可达全年降雨量的84%,多年平均降雨量约1605 mm。

2.2 工程活动

红坳堆土场原设计库容量和封场标高分别为 $4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和95 m,运营方为提高堆土场库容量,在北侧出口设置了高程为65 m的六级挡土坝,并在

堆填过程中进行碾压。随后以挡土坝为基础，自北向南逐层填埋，每10 m为一级台阶（台阶划分参见图6），直接将渣土倒入第7—9级边坡，碾压夯实频次大幅降低，因此堆土场呈现出前缘密实但后缘松散的二元状态（高杨，2018）。据统计，滑坡发生时红坳堆土场已填至第八级台阶，实际堆填量已达 $5.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、实际标高160 m，分别是设计量的1.46倍和1.68倍。

红坳堆土场滑坡事故前后主要事件节点如下：2014年2月，光明新区城市管理局核发《临时受纳场地证》，红坳受纳场开始建设运营。2014年12月，发现堆土场已受纳土方量约120万方，大量弃土堆放无序，责令停工整改。2015年11月，堆土场出现大量细小裂缝，第四级平台出现局部下沉，随后，抗滑稳定安全系数降至1.10，第三级、第四级台阶平台边坡出现裂纹。2015年12月20日6时，堆土场顶部作业平台出现裂缝，宽约40 cm，长几十米，第三级与第四级台阶之间出现鼓胀开裂。11时20分，第四级台阶发生鼓包并不断移动，现场人员撤离。11时28分，渣土开始滑动，自第三级、四级平台之间凸起的基岩处滑出，滑移700多米后停止，滑坡体沿途推倒并掩埋了红坳村柳溪、德吉程工业园内33栋建筑物，造成重大人员伤亡。截至2016年1月14日完成灾情验收，累计外运土方278万 m^3 。

2.3 研究数据

本文获取了堆土场滑坡前后各阶段的35景Cosmo-SkyMed卫星影像，SAR影像的主要参数如表1所示。本文还获取了2013年—2015年的5景Landsat 8影像数据，其主要参数如表2所示，以及2008年—2024年的Google Earth光学影像数据。

表1 Cosmo-SkyMed影像参数表

Table 1 Parameter of Cosmo-SkyMed image

参数	描述
波段	X-band(3.11 cm)
成像模式	Stripmap(HImage)
分辨率	3 m×3 m
侧视方向	右视
极化方式	HH
轨道方向	Descending
入射角/(°)	32.23
影像数量/景	35
时间范围	2013-12-07—2016-11-29

表2 红坳堆土场Landsat 8参数表

Table 2 Parameters of Landsat 8 for Hong'ao

编号	数据标识	成像日期
1	LC81220442014016LGN01	2014-01-16
2	LC81220442014288LGN01	2014-10-15
3	LC81220442015003LGN01	2015-01-03
4	LC81220442015179LGN01	2015-06-28
5	LC81220442015291LGN01	2015-10-18

3 数据处理方法

3.1 SBAS-InSAR滑前蠕变信息提取

本研究采用SBAS-InSAR技术开展时序形变监测，该方法是由Berardino等（2002）针对低相干地区观测点密度不足问题提出的方法，红坳堆土场处于野外荒地，且滑坡前后地形变化较大，SBAS-InSAR技术能够较好的获取地面信息。对差分干涉图 j 上的任意像素 (x, r) ，其相位可以表示为

$$\delta\phi_j(x, r) = \phi(t_B, x, r) - \phi(t_A, x, r) = \frac{4\pi}{\lambda} (d(t_B, x, r) - d(t_A, x, r)) + \delta\phi_{j, \text{topo}}(x, r) + \delta\phi_{j, \text{res}}(x, r) + \delta\phi_{j, \text{orb}} \quad (1)$$

式中， λ 为SAR影像波长。 $d(t_A, x, r)$ 和 $d(t_B, x, r)$ 分别表示相对于 t_0 时刻在卫星视线方向的累积位移， $\delta\phi_{j, \text{topo}}(x, r)$ 表示与DEM误差相关的残差相位， $\delta\phi_{j, \text{res}}(x, r)$ 指包括噪声、大气延迟以及形变高通分量等残余相位， $\delta\phi_{j, \text{orb}}$ 表示轨道误差残差。

通过式（2）计算形变速率，矩阵形式可表示为

$$v = \frac{\phi_j - \phi_{j-1}}{t_j - t_{j-1}} \quad (2)$$

$$Bv = \delta\phi \quad (3)$$

式中， B 为干涉影像对之间的时间差矩阵，形变速率 v 可通过最小二乘法计算，在多子集的情况下，采用SVD方法进行求解，最后通过对速率的积分获取两景影像间的相对位移。

由于堆土场处于复杂山区，高程起伏大、工程活动多，在数据处理中，本文通过以下4项措施保障监测精度：（1）采用小基线组合（时空基线阈值120 d/2000 m，如图1所示），设置相干阈值为0.25，减少时间去相干影响，使相干点密度提升至35点/ km^2 ；（2）对水体区采用相邻时期DEM差值补全，对植被区采用多视处理（2:2多视比例）增强相干性；（3）结合Landsat影像时序变化，

剔除植被剧烈变化区域的异常相干点（约5%）。（4）考虑到堆土场高程起伏较大，差分干涉相位易受大气延迟影响，引入GACOS数据进行大气相位校正，并采用最小费用流方法进行相位解缠。

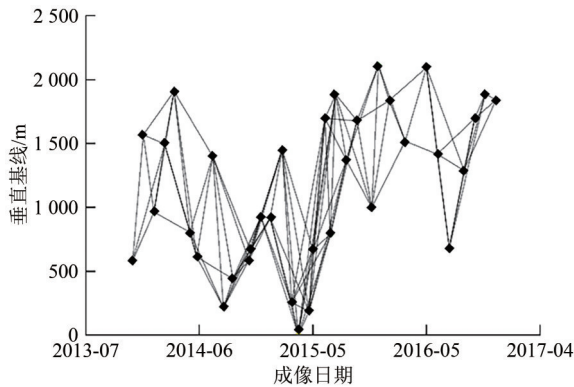


图1 小基线集干涉组合图

Fig.1 Small baseline interference combination

3.2 SAR-SFS多时期DEM解算

SFS (Shape From Shading, 阴影恢复三维) 最早由Horn (1970) 提出, SAR-SFS利用单幅SAR影像的幅度明暗变化反演地面高程, 首先以地面的几何形状参数和SAR影像的回波散射强度为基础建立数学模型, 随后通过对高程增量积分求和来计算地面高程信息。

本研究以多时期Cosmo-SkyMed为输入影像, 基于迭代最小化SFS算法提取了堆土场的多时期DEM, 式(4)所示为最小化成本函数 F :

$$F = \iint \left((I - R(p, q))^2 + \lambda (z_{xx}^2 + z_{xy}^2 + z_{yy}^2) \right) dx dy \quad (4)$$

式中, I 是输入SAR影像的幅度图, z_{xx} 、 z_{xy} 和 z_{yy} 是估计的DEM高程的二阶偏导数, λ 是正则化参数 ($\lambda = 0.3$), p 和 q 分别是通过迭代估计的影像距离向和方位向表面梯度, R 表示伯朗表面反射函数, 通过式(5)、(6)的傅里叶变换重建地形 z :

$$z(\omega) = \frac{a_x^*(\omega)p(\omega) + a_y^*(\omega)q(\omega)}{|a_x(\omega)|^2 + |a_y(\omega)|^2} \quad (5)$$

$$z(\omega) = IFFT(z(\omega)) \quad (6)$$

ω 表示二维频率域坐标, $p(\omega)$ 、 $q(\omega)$ 是傅里叶变换后的最终表面梯度, $a_x^*(\omega)$ 、 $a_y^*(\omega)$ 是 x 和 y 中离散微分算子的傅里叶系数, $z(\omega)$ 是地形 z 的傅里叶变换。

最后, 经过校正和地理编码, 恢复堆土场的DEM。经标定和验证, 从Cosmo-SkyMed影像解算

的21幅时序SAR-SFS DEM中, 随机选取1000个均匀分布于该稳定山体的像素点, 并计算同一像素在21幅DEM中的高程变化离散程度, 得到高程偏差呈正态分布, 标准差为2.3 m。

通过相邻DEM的增量变化, 可以还原滑前蠕变过程中堆填土体变化, 将此DEM作为原始地貌, 可得到高精度的地形仿真。

3.3 联合SFS-DEM和连续介质模型的滑坡仿真

三维粘性不可压缩流体动量守恒运动方程即N-S方程 (Navier-Stokes) 反应了真实流体流动过程的力学规律, 是流体仿真领域的基本方程 (Ouyang等, 2013; Zhou等, 2021)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} = \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (8)$$

式(7)和(8)分别是N-S方程中的质量连续性方程和动量方程, 描述了流体运动过程中遵循着质量守恒和动量守恒定律。其中, ρ 为流体的密度, 在不考虑流体压缩和流动过程的密度演化时可用流体的平均密度 $\bar{\rho}$ 表示。 \mathbf{u} 是流体的三维速度矢量, $\boldsymbol{\tau}$ 为流体的剪切应力张量, \mathbf{g} 是重力矢量。

滑坡灾害中, 最远滑坡距离通常大于最大滑坡体堆积厚度, 这种情况下深度方向的运动分量相比于水平方向的分量并不显著, 因而, 对式(7)和(8)在深度方向上积分, 将三维N-S方程简化为了二维方程, 在不显著牺牲仿真精度的条件下可大幅提升运算效率。

本文使用了考虑孔隙水压力的库伦模型作为基底模型:

$$\tau_b = c + \bar{\rho} g h (1 - \lambda) \tan \theta \quad (9)$$

式中, c 表示粘聚力, $\tan \theta$ 为摩擦系数, $\bar{\rho} g h$ 为正压力。 λ 是孔隙水压力系数, 在完全干燥的岩块中 $\lambda=0$, 饱和状态下的土体 $\lambda=1$, 在高杨(2018)和Ouyang等(2017)的研究中, λ 分别为0.8和0.75时得到最佳拟合效果。

由于堆土场土层松动, 渗水性较好, 事发时土体处于饱和状态, 本研究选取更小的孔隙水压力系数范围(0.3—0.8)和较大的饱和土体平均密度(1800 kg/m^3), 并根据现场的土体样本, 采用测定的内摩擦角和摩擦系数。使用滑前蠕变DEM作为原始地貌输入, 减少DEM误差对滑面计算的

干扰, 采用连续介质模型开展滑面仿真计算, 提升滑坡体滑面计算结果的精度。

4 堆土场变化时序分析

4.1 基于多源遥感影像的堆填阶段划分

本文基于 Landsat 8 影像计算了红坳堆土场的 NDVI 和 FVC 指数, 如图 2 所示, 2015 年 6 月, 堆土场内部的 FVC 指数明显降低, 但外部 FVC 数值反而增加, 可知, 2015 年 1—6 月堆土场经历了大规模堆填改造活动。

堆土场外围 NDVI 指数随时间推移稳步上涨,

表明外围未受到人类活动干扰。在堆土场内部, 2014 年 1 月, 第七、八级边坡 (S7、S8) 底部部分像素为负值, 表示存在水池, 与图 3 中水池的位置对应, 2 月积水范围明显减小, 这是由于运营方采取了直接填埋的方式。对比 Landsat 8 影像, 发现 10 月积水现象已经消失, 表明在这之前主要是将水池填平。2014 年 1 月—10 月, 第二至六级边坡植被指数下降, 原始植被被清除。2015 年 1 月起, 第一至五级边坡 NDVI 指数逐步上升, 表明此时该区域已堆填完成, 并逐步开始喷草复绿, 后续填土重心将转向第七至九级边坡。

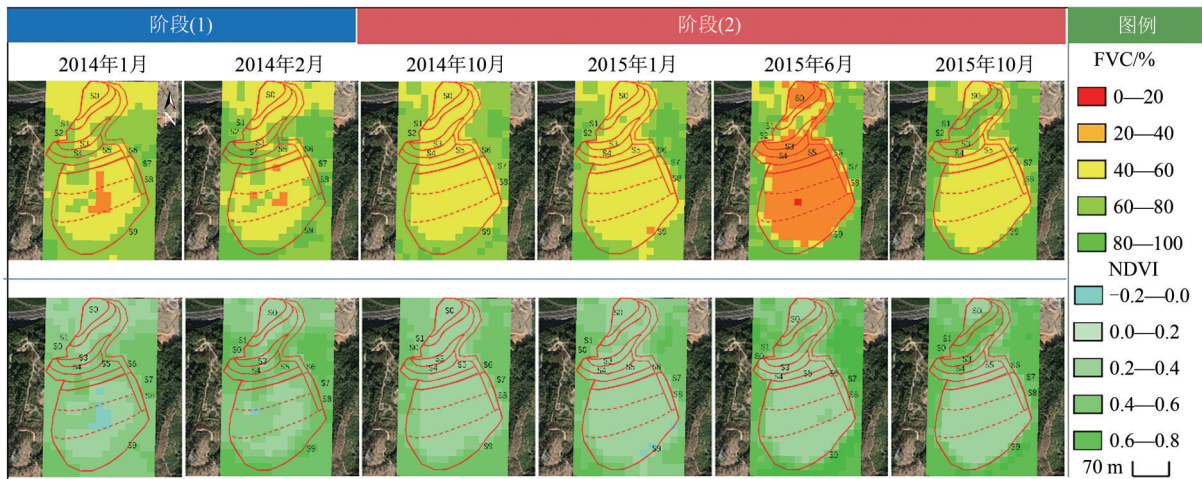


图2 2014年1月—2015年10月红坳堆土场FVC和NDVI时序变化

Fig 2 Temporal Variations of FVC and NDVI at Hong'ao Soil Dump from January 2014 to October 2015

本文将红坳堆土场演变过程划分为 (1) 水池填埋、(2) 台阶成型、(3) 滑坡前后与 (4) 灾后治理四个阶段, 各阶段主要事件描述如表 3 所示。

在阶段 (1) 未将坑内的大量积水抽干, 雨季也未采取有效排水措施, 而是直接覆土填埋形成软基; 阶段 (2) 在软基上继续加高形成台阶、增加自重应力, 且在 SAR 影像中多次发现在运营许可下发前就开展工程活动, 为阶段 (3) 的滑坡事故留下了安全隐患, 事故发生后阶段 (4) 耗费近 1 年完成滑坡改造和撤离工作。

受限于早期数据获取手段, 只有少数文献结合航拍影像、台班记录和现场调查估计了红坳堆土场各时期的堆填量。而 SFS DEM 可以提供堆土场各时期堆填量的客观估计, 有利于开展堆填动态

过程解译。因此, 本文采用 2014 年 6 月—2016 年 1 月的 20 景 Cosmo-SkyMed 影像制作了红坳堆土场的多时期 SFS DEM, 并将相邻日期的 SFS DEM 做差, 计算不同阶段的堆填区和高程增量, 如图 4 所示。

从图 4 中可知, 2016 年 1 月 14 日刚好完成土方转移和灾后验收, 因此 2015 年 12 月—2016 年 1 月多数区域高程增量为负值, 但第四至七级区域的少量增量也有可能是滑体土的残留。尽管图中缺失了第一至三级边坡的变化值, 但前六级边坡在 2014 年 6 月已经基本堆填成型, 后续只是进行外观修整。大致可以认为第七至九级的堆填时段为 2014 年 8—11 月、2014 年 12 月—2015 年 1 月、2015 年 5 月、2015 年 7—12 月。

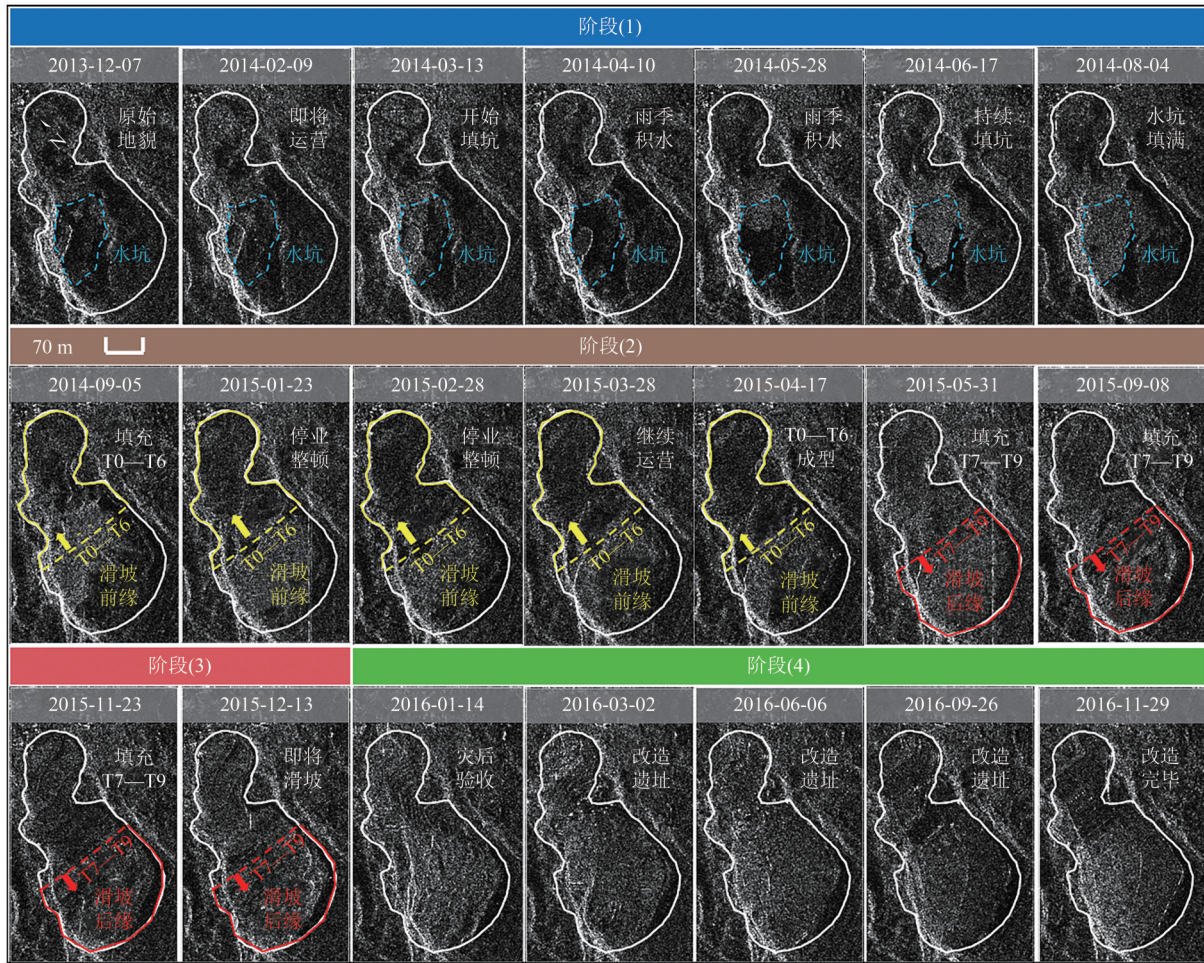


图3 红坳堆土场SAR影像幅度变化(蓝线:水坑堆填;黄线及箭头:T0—T6台阶(滑坡前缘)形成演化轨迹;红线及箭头:T7—T9(滑坡后缘)堆填重心转移方向)

Fig. 3 Amplitude variation of SAR images of Hong'ao soil stockpile (Blue line: puddle filling; yellow line and arrow: evolution trajectory of terrace T0—T6; red line and arrow: direction of filling center shift in T7—T9)

表3 堆土场时间阶段划分表

Table 3 Stage division of Hong'ao incident

阶段	日期	堆填阶段
(1)	2013-12-07—2014-01-08	原始状态,西侧中部存在巨大水池
(1)	2014-02-09	水池位置开始有少量堆填迹象
(1)	2014-03-13	加速堆填水池
(1)	2014-04-10	进入雨季,池内开始积水
(1)	2014-05-28—2014-08-04	全力堆填水池,直到填满消失
(2)	2014-09-05—2014-12-26	堆填重心从水池转移至北侧S0—S6级台阶、挡土坝
(2)	2015-01-23—2015-02-28	堆土场停业整顿
(2)	2015-03-28—2015-04-17	堆土场恢复运营,S1—S6基本成型
(2)	2015-05-19—2015-10-10	堆填重心从北侧转移至南侧S7—S9
(3)	2015-11-23—2015-12-13	11月份开始出现裂纹、沉降等迹象,并于12月20日滑坡
(3)	2016-01-14	救灾行动结束并验收
(4)	2016-03-02—2016-11-29	改建为滑坡遗址公园

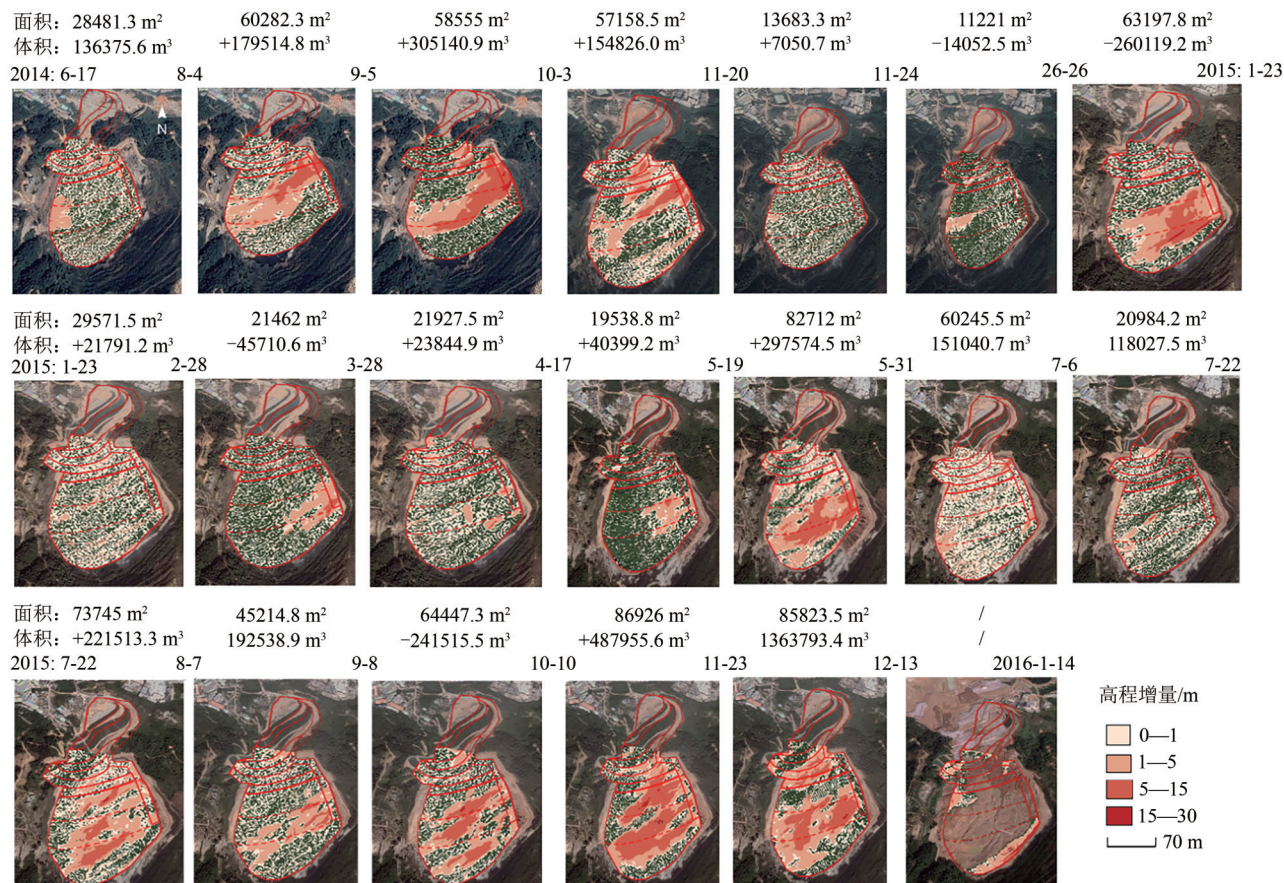


图4 红坳堆土场各时段DEM增量

Fig.4 DEM increment of Hong'ao soil dump at different time periods

4.2 SBAS-InSAR 滑前蠕变分析

应用SBAS-InSAR技术处理2013年—2016年的Cosmo-SkyMed影像获得红坳堆土场LOS形变速率如图5所示, 本文沿用了前期研究(Yin等, 2016)中对红坳堆土场区域的划分标准, 以每级平台(T0—T9)为界将其划分为S0—S9级边坡, 红色实线为上下两级边坡之间的平台, 其中S0属于地面平台, S1起为一级边坡, S7—S9滑坡时仍未填筑完成, 使用红色虚线进行划分。总体来看, SBAS-InSAR技术在红坳堆土场上取得了密集相干点, 但S6—S9西侧出现失相干, 这是由于该位置在堆土场运营早期长期存在积水(图3)。

统计整体和各台阶的LOS形变速率(表4), 发现堆土场形变速率处于 $[-40.7, 64.3]$ mm/a区间, 速率分布服从 $N(7.4, 14.82)$ 。参考Zhang等(2023)在滑坡易发性研究中的沉降速率分级, 将 $V_{\text{LOS}} \in [-5, 5]$ mm/a作为稳定状态的标准, 并以10 mm/a为区间划分形变等级, 依次为轻微、中度

和严重沉降。在观测期间, S0—S6抬升速率以S4为转折界面先降低后升高, S6—S9抬升速率逐渐下降至平稳。然而, 从各台阶的速率分布来看, 所有台阶都存在局部中度至严重的沉降, 因此, 仅根据边坡划分的区域不足以代表各部分的真实形变。

地面平台S0抬升集中分布于台阶T0处, 表明坡脚受到后方土体推挤, 且滑坡面侵入地基, S0平台存在凸起失稳的可能; S1—S2的抬升和沉降在空间上较为均匀, 平均形变速率约14.5 mm/a; S3—S6东西两侧的形变趋势明显不同, 其中S3—S5西半侧稳定, 平均形变速率约-0.1 mm/a, 而S3—S6东半侧轻度抬升, 平均形变速率约11.1 mm/a; S7—S8西侧失相干区域呈中度抬升, 平均形变速率约18 mm/a, 东侧轻微抬升, 平均形变速率约7.1 mm/a, 但东侧靠近便道处存在局部轻微沉降, 约-8.5 mm/a; S9沉降集中在西侧(约-9.6 mm/a)和后缘部分(约-17.4 mm/a), 最大沉降接近-40 mm/a。

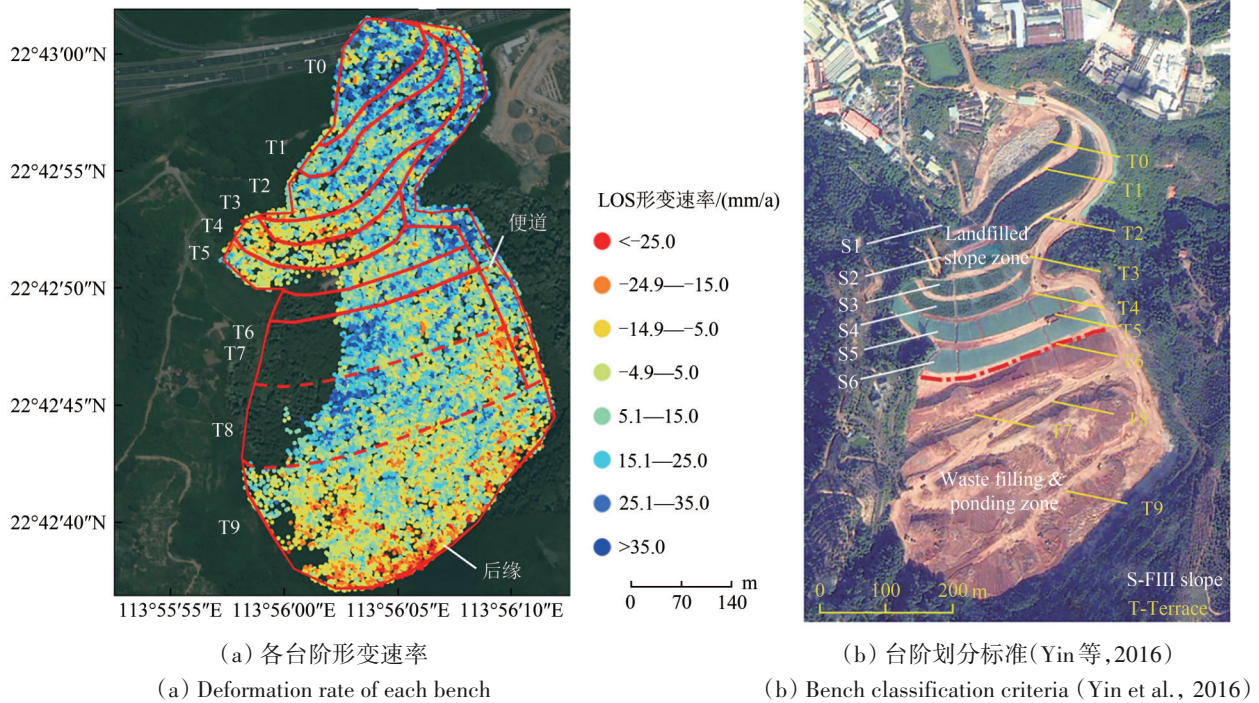


图5 2013年12月—2016年12月红坳堆土场LOS形变速率分布图
 Fig.5 Distribution of LOS deformation rate at Hong'ao soil dump from December 2013 to December 2016

表4 各级边坡LOS速率统计
 Table 4 Statistics of LOS velocity for slopes at all levels

边坡	均值 μ	标准差 δ	最大值	最小值	偏度	峰度	边坡状态
S0	19.2	15.6	55.2	-26.1	-0.165	2.57	中度 ↑↑
S1	17.6	12.9	60.1	-21.0	0.150	3.20	中度 ↑↑
S2	13.8	13.0	64.3	-29.6	0.150	3.40	轻微 ↑
S3	7.1	13.1	56.8	-32.1	0.152	3.24	轻微 ↑
S4	5.0	13.3	51.9	-29.0	0.340	2.90	稳定—
S5	8.4	12.2	46.6	-23.8	0.385	2.83	轻微 ↑
S6	12.8	10.2	42.6	-16.0	0.043	2.87	轻微 ↑
S7	11.2	13.3	44.3	-38.4	-0.182	3.10	轻微 ↑
S8	8.4	12.6	44.7	-40.7	-0.000	3.10	轻微 ↑
S9	-1.6	12.6	44.6	-40.4	-0.04	2.9	稳定—
整体	7.4	14.8	64.3	-40.7	0.067	3.10	轻微 ↑

注：“—”代表区域整体稳定,区域整体在(0,5)[mm/a]、↑代表区域整体形变速率在(5,15)[mm/a]之间、↑↑代表区域形变速率大于15 mm/a。

回顾事故过程可知，红坳堆土场滑坡前1个月曾在S3—S4发现裂缝，且T4平台排水沟处出现局部下沉；滑坡当日，顶部平台（S9）出现长几十米的裂缝，同时S3与S4之间出现鼓胀开裂，最终在S4东侧出现明显鼓包开始滑动。这些现象均与InSAR结果一致：S9北侧与后缘的平均速率差异达到21 mm/a，不均匀形变会引发开裂；S3—S4西侧稳定未受影响，东侧轻微抬升逐渐发展为鼓包，东西两侧约10 mm/a的形变速率差异导致S3与S4之间的开裂；T4平台的局部沉降接近-30 mm/a。

(1) 2014年6—12月，堆填主要集中在T4

(高程约95 m) -T8（高程约140 m），其中T4、T8平台的边缘线与InSAR形变异常区高度重合（T4平台南侧存在-15—-25 mm/a的中度沉降带），对应T4平台与S4边坡的陡坎位置，印证了该区域因地形突变导致的应力集中，是滑坡前裂缝的发育源头。

(2) 2015年1月—5月，填土速率达 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ （DEM增量计算），对应InSAR监测结果中S9区域出现首次沉降加速（从-10 mm/a增加至-20 mm/a），填土集中在T7—T9部分，T7—T9形成了一个东西向凹槽，凹槽地形导致弃土在此处集中堆积（最

大填土厚度约62.7 m)，叠加雨水汇集引发的孔隙水压力升高，成为后缘沉降加速的核心地形诱因。

(3) 2015年6月—12月，在InSAR沉降曲线中，这个阶段沉降速率再次加速，如图6所示，

图5中沉降速率最大达-40.7 mm/a（后缘部分），堆填重心主要集中在S7-S9，发生滑坡前地形图显示S9边坡高程最终达160 m，凹槽区域填土厚度超60 m。

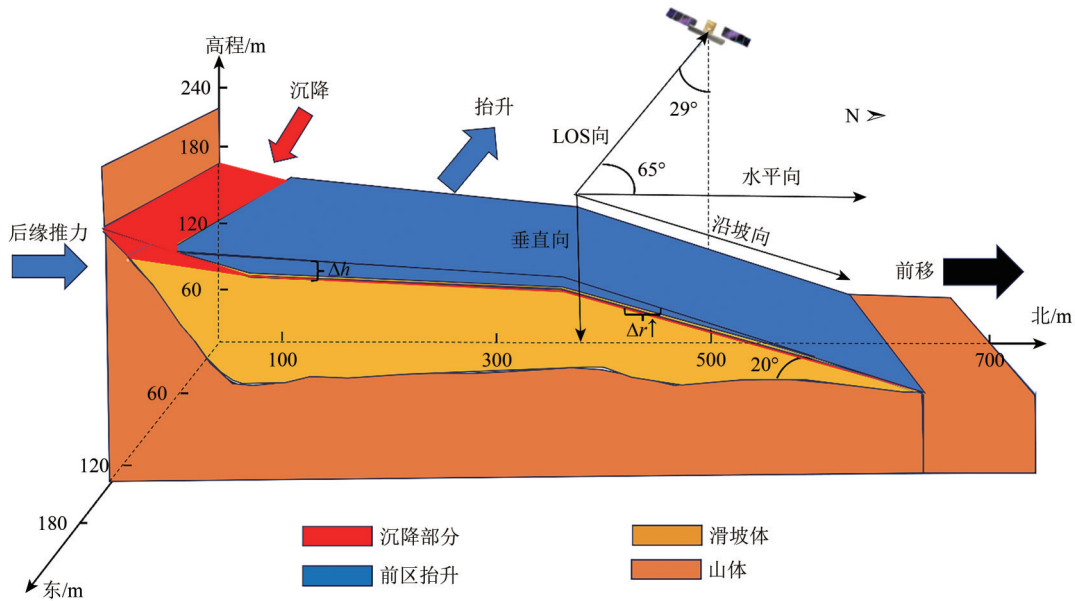


图6 红坳堆土场形变化三维示意图

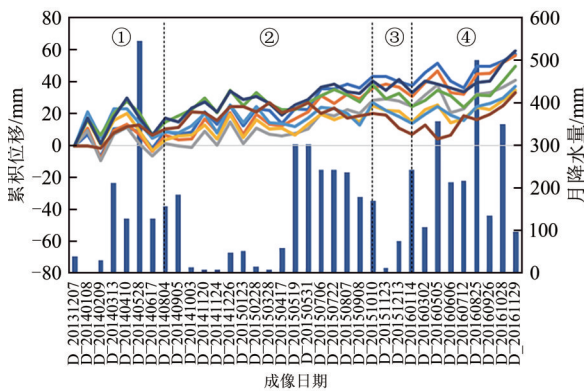
Fig.6 Three-dimensional schematic diagram of deformation at the Hong'ao Soil Dump

本文的研究结果与前期研究具有一致性。

(1) 土体压实度差异引起：受不同时期碾压方式和土体含水率影响，高杨（2018）发现松散的后缘固结沉降空间更大，而密实的前缘土体在饱和水浮力或孔隙水压力的作用下出现抬升。(2) 滑动面贯通前兆所致：当堆土场滑动面被贯通后，Yin等（2016）还原的滑带角度呈现后缘陡峭（55°）、中部和前缘平缓（4°）的状态。

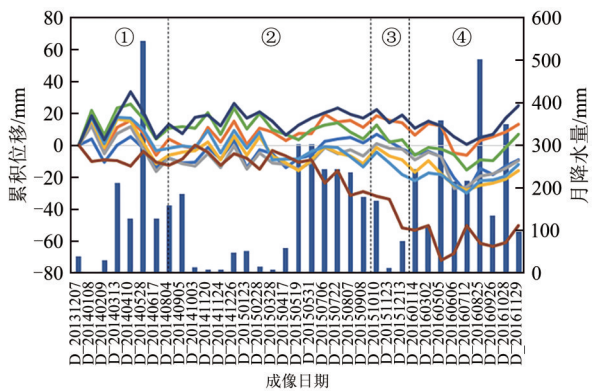
据此我们对滑前蠕变进行了合理推测，如图7

所示，堆土场S9边坡后缘区域表现出明显沉降趋势（最大达-40.4 mm/a），S1—S8边坡区域则以抬升为主（最大达19.2 mm/a）。随着后缘持续堆载，后缘土体沿陡峭滑带下滑，表现为地表下沉，来自后缘的重力分量也推动着前缘沿着近乎水平的滑带面向前滑动。后缘松散土发生滑移时，前缘坡体向前移动 Δr ，填土堆积高度增加 Δh ，因此，中部和前部的移动在SAR视角下呈现出抬升趋势，后缘则是沉降。



(a) 各台阶时序位移曲线(平均样本)

(a) Average sample of the time-series displacement curves for each step



(b) 各台阶时序位移曲线(沉降样本)

(b) Time-series displacement curves for each step (Settlement sample)

■ 降水 ■ S0 ■ S1 ■ S2 ■ S3 ■ S4 ■ S5 ■ S6 ■ S7—S9

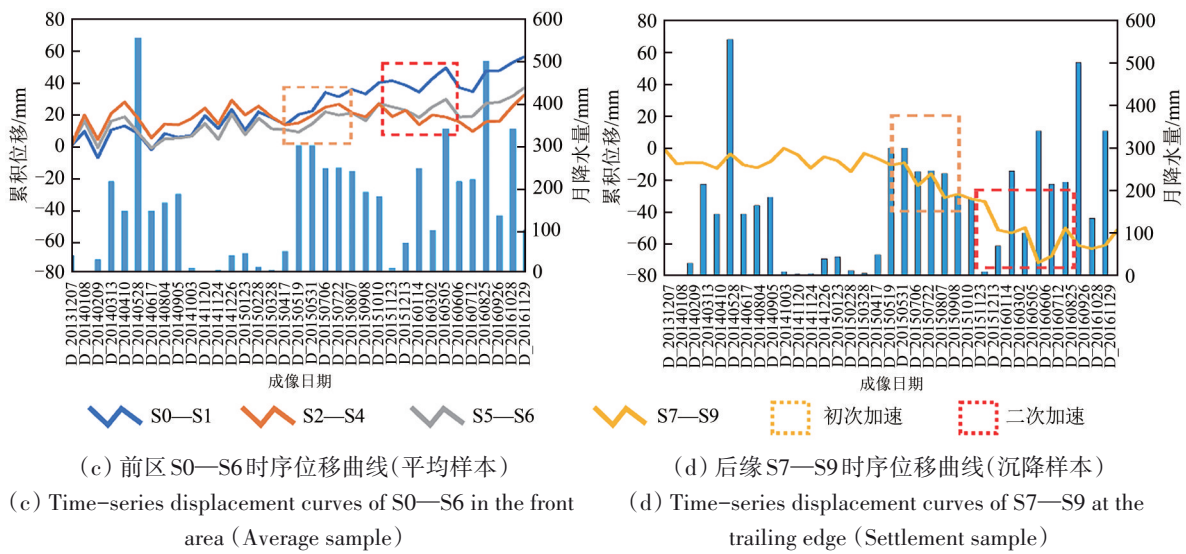


图7 各台阶时序位移曲线及降水组合图

Fig. 7 Time series displacement curve and precipitation combination diagram of each stage

卫星入射角 $\theta \approx 29^\circ$ ，由现场灾情判断，滑坡主滑方向约为北偏东 15° ，滑坡表面与水平地面夹角约 20° ，卫星视线与滑坡水平方向夹角为 65° ，沿坡向形变计算如式 (10) 所示，计算出各台阶沿坡向形变如表 5 所示。

$$X = (X_{\text{los}} * \sin 65^\circ * \cos 29^\circ) / \sin 18^\circ \quad (10)$$

表5 沿坡向形变

Table 5 Deformation along slope aspects

台阶	坡向形变/mm
T1	36.4
T2	33.4
T3	13.5
T4	9.5
T5	15.9
T6	24.3
T7	21.3
T8	17.1
T9	-3.4

4.3 堆土场滑动机理分析

本文选取形变速率在边坡均值附近的 100 个位置随机的相干点作为平均样本；然后，基于 2δ 原则 ($V > |\mu \pm 2\delta|$) 排除各级边坡中可能代表速率异常的相干点 (约占总数的 5%)，再选取 100 个位于最小值附近位置随机的相干点作为沉降样本；最后，计算两类样本的平均时序位移曲线，如图 7 所示。

结合降雨因素分析各阶段形变，如图 7 (a)

所示，图中标记了深圳市月度降水量，并使用了序号标记了表 3 中划分的堆土场运营阶段。在阶段 (1)，堆土场形变在 4—6 月降水作用下发生了剧烈沉降。在阶段 (2)，由于弃土量的大幅增加以及截排水措施失效，致使 S0—S6 台阶的大量弃土在 2015 年 5—10 月吸水填充孔隙，并在地下水位上涨和顶托效应的影响下发生坡面抬升。雨季过后进入阶段 (3)，随着降雨补水的快速减少，S0、S1、S2、S6 开始缓慢排水并固结沉降，而 S3、S4、S5、S7—S9 台阶的排水固结较快并伴随剧烈沉降，导致 11—12 月 S3、S4、S7—9 级边坡出现裂纹。阶段 (4) 中，同样随雨季的到来曲线再次抬升。总体而言，除 2014 年 5 月的历史最强降雨引发了急剧沉降之外，常规雨季对红坳堆土场形变影响均表现为抬升。

由于 S0 与 S1，S2 与 S3、S4，S5 与 S6 相邻且曲线细节相似，本文将相似曲线合并后平均，沉降样本中仅保留沉降特征最显著的 S7—S9 后缘的沉降曲线，如图 7 (d) 所示，发现 S7—S9 沉降存在两次明显加速，分别开始于 2015 年 5 月和 11 月，也对应了填土增速第一和第二高的时段，表明了快速大量堆填且碾压不充分导致了大幅沉降。观察 2015 年 5—8 月 (黄色虚线框) 的形变，发现当 S9 后缘第一次发生沉降时，前缘 S0—S6 同步开始出现抬升，若此为滑坡前兆，表明后缘挤压了前

缘发生水平移动, 滑坡面已被初步贯通; 2015年8—11月, 弃土增速相对放缓, 形变进入稳定期; 2015年11—12月(红色虚线框)随着S8弃土增速再次骤增且集中, 后缘再次开始加速沉降, 随后滑坡发生。

综上所述, 红坳堆土场看似经历了“加速—稳定—加速”的三阶段蠕变模式, 实则后缘两次沉降加速均为快速大量堆填弃土所致, 证实了滑坡是由堆填过快、碾压不充分等工程因素诱发的。

5 滑坡数值仿真评估

本文基于深度积分连续介质模型在Massflow软件中开展了红坳堆土场滑坡数值仿真, 通过对流体方程进行深度方向积分简化, 并在库伦基底阻力模型中考虑孔隙水压力系数, 在建模效率和模拟效果上取得了较好的平衡。

本研究使用了Ouyang等(2017)的5 m分辨

率DEM作为原始地貌, 以及计算的3.5 m分辨率SFS DEM作为滑坡发生前的地貌。SFS DEM虽然缺少了S0—S3的部分, 但考虑到滑坡剪出口位于S4, 而S0—S3并未发生滑移, 仍可作为地形对待。经过DEM投影和高程基准统一、地理配准、5 m分辨率重采样、滑体厚度计算等, 得到滑带面以上的滑体体积约 $3.60 \times 10^6 \text{ m}^3$, 投影面积 $1.03 \times 10^5 \text{ m}^2$, 最大填土厚度62.7 m。

本研究中滑坡仿真的建模参数选取范围如表6所示。由于红坳堆土场须在考虑超孔隙水作用下才会失稳, 故本研究中统一按照饱和状态考虑, 在具体数值上, 取偏大的饱和平均密度($\rho=1800 \text{ kg/m}^3$), 从基底滑带土样本参数中取得的粘聚力($c=7 \text{ kPa}$)和内摩擦角($\theta=14.5^\circ$), 孔隙水压力系数 λ 则在0.3—0.8之间迭代调整以获得最佳拟合效果, 仿真时长定为50 s, 仿真结果如图8所示。

表6 参考文献中红坳堆土场的土体参数范围

Table 6 The range of soil parameters in the Hong'ao dump in the reference literature

文献来源	密度 $\rho/(\text{kg/m}^3)$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\theta/(\text{^\circ})$	孔隙水压力系数 λ
Wang等(2017)	1500	7—10	14.7—17	/
Ouyang等(2013)	1790	4.7	31.9	0.75
Yin等(2016)	1300—2000	7—20	14.5—24.0	/
高杨(2018)	1620—1920	3.6—13.4	14.5—22.0	0.5—0.8
张振(2018)	1440	10—21.6	24.8—28.7	0.39—0.91

注: /表示未测定或提及孔隙水压力系数。

在模拟结果中, 滑体最大厚度与最远滑动距离之比(滑动指数, H/L)均远低于0.3, 表现出极高的流动性, 且随孔隙水压力系数增加 H/L 逐渐降低。当 $\lambda=0.5$ 时, 滑坡堆积体前缘恰好抵达建筑区(如图8(c)所示)。但红坳事故的滑坡范围不止于此, 滑动堆积体在触及北侧建筑后横向扩散了一定范围。因此, 当 $\lambda=0.6$ 时取得了最贴近真实情况的仿真效果。图8(d)中依次在滑源区、流通区、建筑区设置了节点A、B、C, 当 $\lambda=0.6$ 时, 计算各节点的堆积厚度和滑动速度随时间的变化如图9所示。

观察节点厚度变化(图9(a)), 滑源区A点的堆积厚度经历前20 s快速下降后开始收敛, 第50 s时厚度从62.7 m下降至31.2 m。流通区B点在第13 s厚度升至峰值17.3 m, 随后缓慢降至10.3 m。建筑区C点在第30 s开始堆积厚度增加, 厚度达到12 m后稳定, 这个堆积厚度足以掩埋C点的人或

建筑。作为对比验证, 根据高杨(2018)的前期调查, 发现滑源区、流通区和堆积区的滑动体平均厚度分别为35 m、18 m和10 m, 与本文的模拟结果具有较高的一致性。

从滑动速度曲线来看(图9(b)), B点滑动体在第10 s达到峰值流速22.6 m/s, 随后缓慢减速, 第50 s时仍具有17 m/s流速, 我们将仿真时长设置为100 s, 发现除了增加了不到1 m的堆积区厚度和稍微减少滑源区厚度(A点厚度降至26.3 m)外, 对最终滑动范围并无实质影响, 第100 s后B点仍保持了近16 m/s的流速。这些现象表明, 红坳堆土场前50 s只完成了主滑, 后续仍有持续性的余滑发生, 调查报告也显示滑坡总共持续了13 min。最后关注C点滑体流速, 滑坡体在第30 s抵达C点建筑区并与之发生碰撞, 碰撞瞬间速度达到23.6 m/s, 并在10 s内停止。

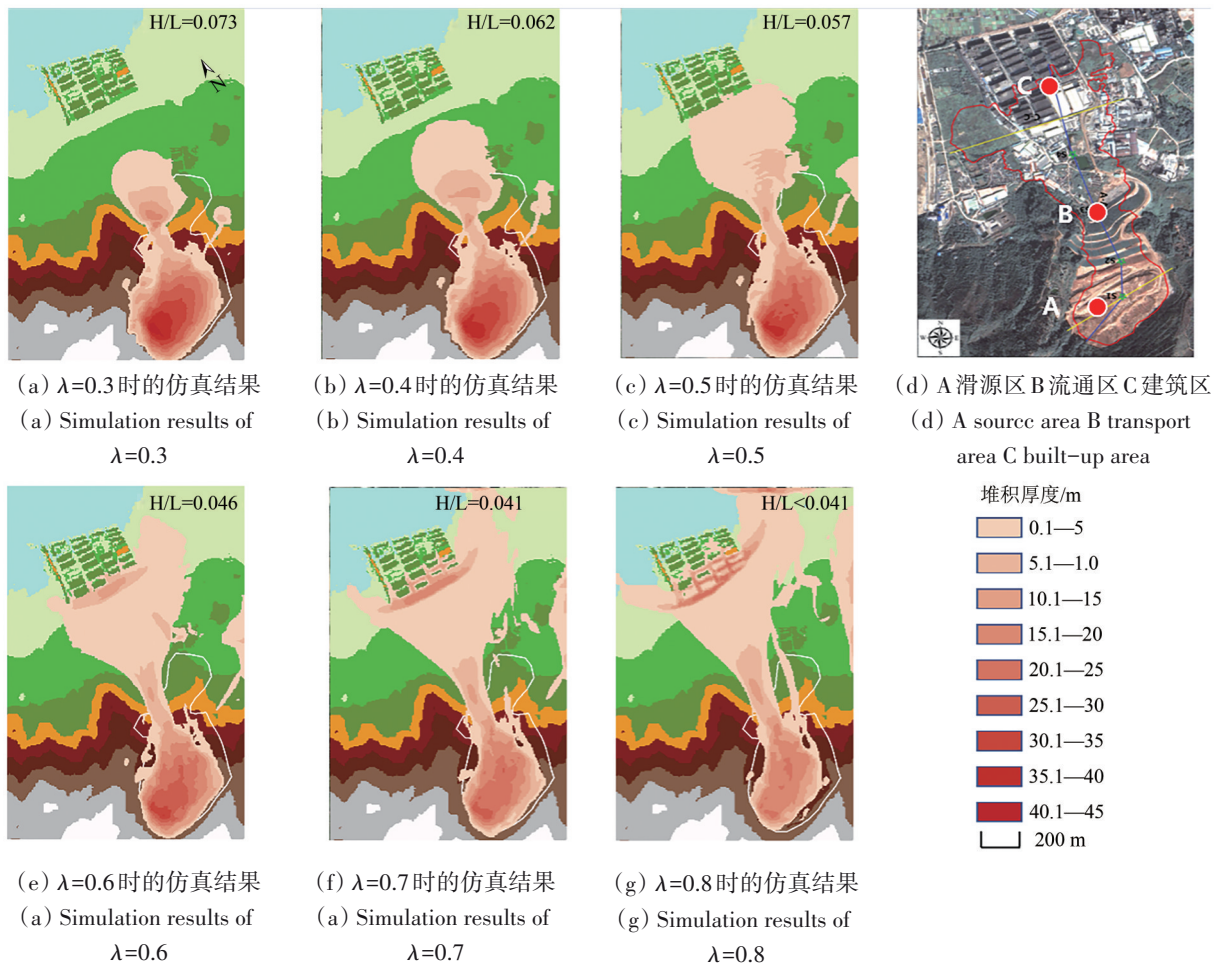


图8 滑坡体堆积厚度变化仿真结果($t=50$ s时)

Fig. 8 Simulation results of accumulation thickness variation of the landslide mass (at $t=50$ s)

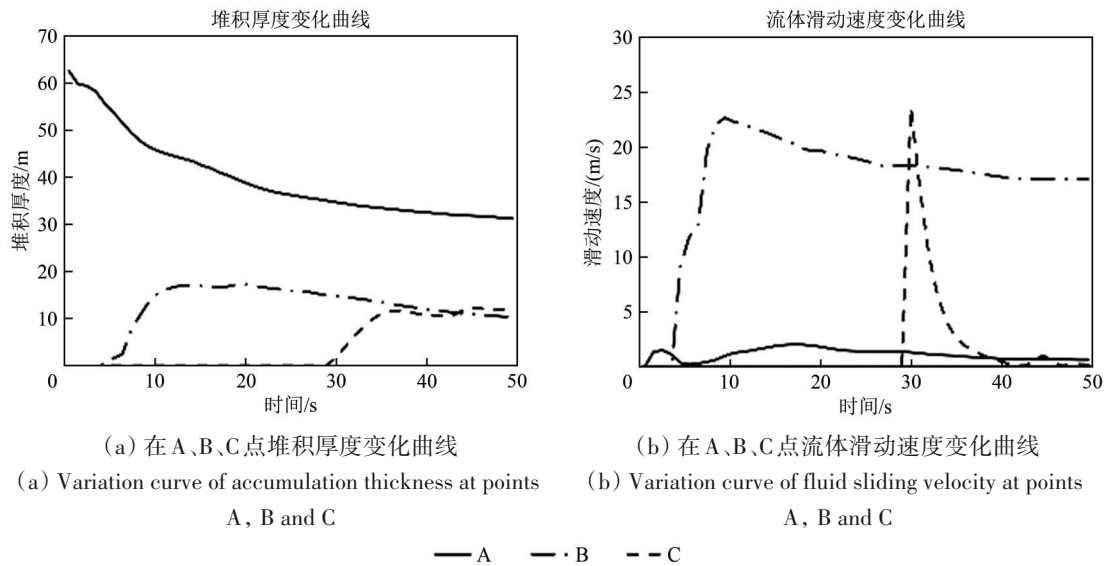


图9 节点堆积厚度与流体速度变化曲线

Fig. 9 Node stacking thickness, fluid velocity variation curve

本文计算了C点建筑区的动量变化情况(图10), 由于滑坡流体与物体冲撞的作用时间很

短, 理论上, 一个静止且体重为60 kg的人经由1200 kg·m/s的冲量作用会立即被加速到72 km/h,

而将 2200 kg 的铁皮厂房从静止加速到 72 km/h 需要 44000 kg·m/s, 这个状态下的人或物体很难在无保护下安然恢复静止, 因此, 分别将 1200 kg·m/s 和 44000 kg·m/s 的动量作为人是否受到严重伤害以及建筑物是否受损的安全阈值, 在图 10 中用虚线标记。以碰撞期间一平方米网格土柱蕴含的动量来评估伤害, 算出最大动量发生在碰撞后第 3 s, 达到了 114006.3 kg·m/s, 远超过人类和建筑的安全阈值。由此可见, 不论从堆积厚度还是从冲量来看, 位于滑坡影响范围内的人员几乎没有生还可能。

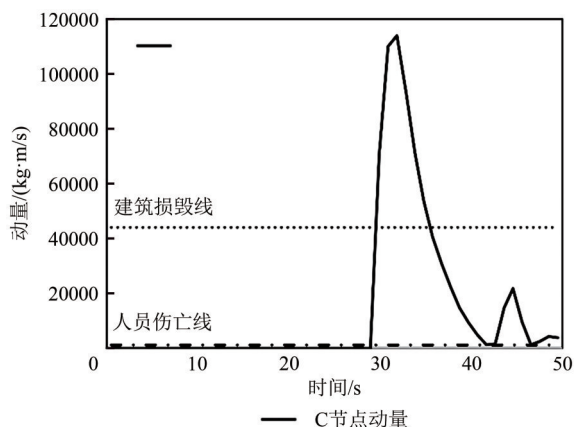


图 10 节点动量变化曲线

Fig.10 Node momentum variation curve

6 结论

本研究基于 2013 年—2016 年的 35 景 Cosmo-SkyMed 影像, 从雷达遥感视角对红坳堆土场滑坡事故开展了滑前蠕变监测分析和滑后仿真评估, 得出以下主要结论:

(1) 观测期间红坳堆土场 LOS 速率分布于 $[-40.7, 64.3]$ mm/a 区间, 其中沉降主要发生在 S9 后缘, 最大沉降速率达到了 -40.4 mm/a。

(2) 红坳堆土场特殊的堆填方式导致其土体密度分布呈现为前缘密实、后缘松散。且积水处理不当使堆土场底部土体抗剪强度下降, T7—T9 台阶超量堆填土方引起后缘沉降, 后缘土体推动前缘沿着底部滑面发生水平移动, 导致雷达视角下的堆土场速率分布呈现后缘沉降, 前缘抬升。

(3) 对比堆填增速与时序曲线发现, 后缘曲线中的两次明显沉降加速刚好对应了堆填增速最快的两个时段, 由此判断滑坡主要是堆填过快、碾压不充分等工程因素所致。结合降雨量进一步

推断, 强降雨会降低土体抗剪强度引发失稳性沉降, 而正常雨量下不会导致失稳, 反而会使土体吸水饱和抬升。

(4) 极限平衡分析表明红坳堆土场在堆载和超孔隙水压双重作用下存在失稳风险。孔隙水压力系数 $\lambda=0.6$ 时, 红坳堆土场前 50 s 完成了主滑, 后续在流通区和滑坡源区仍在发生持续性余滑, 且从 C 节点动量变化的角度评价, 在滑坡堆积范围内, 其产生的动量最大可达 114006.3 kg·m/s, 远大于建筑可以承受的范围 44000 kg·m/s。

参考文献 (References)

- Berardino P, Fornaro G, Lanari R and Sansosti E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2375-2383 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792]
- Cao Z. 2020. Discrete Element Simulation of Shenzhen Guangming Landslide Considering Groundwater. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology (曹政. 2020. 考虑地下水作用下深圳光明滑坡的离散元模拟. 武汉: 华中科技大学) [DOI: 10.27157/d.cnki.ghzku.2020.005808]
- Ferretti A, Prati C and Rocca F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20 [DOI: 10.1109/36.898661]
- Gao Y. 2018. The Study on Long Run-Out Mechanism of Artificial Landfill Landslide—Taking Shenzhen Guangming New District Landslide as an Example. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (高杨. 2018. 人工堆填体滑坡远程滑动机理研究——以深圳光明新区滑坡为例. 北京: 中国地质大学(北京))
- Horn B K P. 1970. Shape from Shading: a Method for Obtaining the Shape of a Smooth Opaque Object from One View. Massachusetts Institute of Technology
- Kang Y., Lu Z., Zhao C., et al. Diagnosis of Xinmo (China) landslide based on interferometric synthetic aperture radar observation and modeling[J]. *Remote Sensing*. 2019. 11(16), 1846 [DOI: 10.3390/rs11161846]
- Jiang K, Yang Y H, Xu Q, Li L, Li P F, Li H L and Chen Q. 2024. Friction residual estimation and landslide risk assessment based on InSAR deformation. *Journal of Engineering Geology*, 32(3): 889-903 (蒋凯, 杨莹辉, 许强, 李林, 李鹏飞, 黎浩良, 陈强. 2024. 基于 InSAR 形变的滑面摩擦残余估计与滑坡危险性评价. 工程地质学报, 32(3): 889-903) [DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2023-0245]
- Li X E, Zhou L, Su F Z and Wu W Z. 2021. Application of InSAR technology in landslide hazard: progress and prospects. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(2): 614-629 (李晓恩, 周亮, 苏奋振, 吴文周. 2021. InSAR 技术在滑坡灾害中的应用研究进展. 遥感学报, 25(2): 614-629) [DOI: 10.11834/jrs.20209297]

- Li Y X, Zhang Y, Su X J, Zhao F M, Liang Y W, Meng X M and Jia J. 2021. Early identification and characteristics of potential landslides in the Bailong River Basin using InSAR technique. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(2): 677-690 (李媛茜, 张毅, 苏晓军, 赵富萌, 梁懿文, 孟兴民, 贾俊. 2021. 白龙江流域潜在滑坡 InSAR 识别与发育特征研究. *遥感学报*, 25(2): 677-690) [DOI: 10.11834/jrs.20210094]
- Liu C Z. 2016. Genetic mechanism of landslide tragedy happened in Hong'ao dumping place in Shenzhen, China. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 27(1): 1-5 (刘传正. 2016. 深圳红坳弃土场滑坡灾难成因分析. *中国地质灾害与防治学报*, 27(1): 1-5) [DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.01.01]
- Niu C Y, Zhang H B, Liu W, Li R S and Hu T. 2021. Using a fully polarimetric SAR to detect landslide in complex surroundings: case study of 2015 Shenzhen landslide. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 174: 56-67 [DOI: 10.1016/J.ISPRSJPRS.2021.01.022]
- Ouyang C J, He S M, Xu Q, Luo Y and Zhang W C. 2013. A MacCormack-TVD finite difference method to simulate the mass flow in mountainous terrain with variable computational domain. *Computers and Geosciences*, 52: 1-10 [DOI: 10.1016/j.cageo.2012.08.024]
- Ouyang C J, Zhou K Q, Xu Q, Yin J H, Peng D L, Wang D P and Li W L. 2017. Dynamic analysis and numerical modeling of the 2015 catastrophic landslide of the construction waste landfill at Guangming, Shenzhen, China. *Landslides*, 14(2): 705-718 [DOI: 10.1007/s10346-016-0764-9]
- Qin X Q, Huang Y J, Wang C S, Jiang K B, Xie L F, Liu R, Shi X G, Chen X S and Zhang B C. 2024. A temporary soil dump settlement and landslide risk analysis using the improved small baseline subset-InSAR and continuous medium model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 128: 103760 [DOI: 10.1016/j.jag.2024.103760]
- Su X J, Zhang Y, Meng X M, Rehman M U, Khalid Z, Zhao F M, Yue D X, Guo F Y and Zhou Z Q. 2024. Potential landslides identification and development characteristics analysis in Hunza valley, along China-Pakistan Economic Corridor based on SBAS-InSAR. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(4): 885-899 (苏晓军, 张毅, 孟兴民, Rehman M U, Khalid, 赵富萌, 岳东霞, 郭富赞, 周自强. 2024. 中巴经济走廊洪扎段潜在滑坡 SBAS-InSAR 早期识别及发育特征分析. *遥感学报*, 28(4): 885-899) [DOI: 10.11834/jrs.20221536]
- Wang C S, Li Q Q, Zhu J S, Gao W, Shan X J, Song J and Ding X L. 2017. Formation of the 2015 Shenzhen landslide as observed by SAR shape-from-shading. *Scientific Reports*, 7(1): 43351 [DOI: 10.1038/srep43351]
- Wang Z Y, Xu S N, Wang N and Ma X Q. 2018. Application of the high resolution optical and SAR remote sensing data images induced by the Jiuzhaigou M7.0 earthquake geological hazards survey. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 29(5): 81-88 (王志一, 徐苏宁, 王娜, 马秀强. 2018. 高分辨率光学和 SAR 遥感影像在震害地质灾害调查中的应用——以九寨沟 M7.0 级地震为例. *中国地质灾害与防治学报*, 29(5): 81-88) [DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.05.14]
- Yin Y P, Li B, Wang W P, Zhan L T, Xue Q, Gao Y, Zhang N, Chen H Q, Liu T K and Li A G. 2016. Mechanism of the December 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization. *Engineering*, 2(2): 230-249 [DOI: 10.1016/J.ENG.2016.02.005]
- Zhang G, Wang S Y, Chen Z W, Liu Y T, Xu Z X and Zhao R S. 2023. Landslide susceptibility evaluation integrating weight of evidence model and InSAR results, west of Hubei Province, China. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 26(1): 95-106 [DOI: 10.1016/J.EJRS.2022.12.010]
- Zhang Z. 2018. Centrifuge Modeling and Failure Mechanism Analysis of Shenzhen 12.20 Catastrophic Landslide. Hangzhou: Zhejiang University (张振. 2018. 深圳光明新区渣土场滑坡离心模型试验及机理分析. 杭州: 浙江大学)
- Zhou Q, Xu Q, Peng D L, Fan X M, Ouyang C J, Zhao K Y, Li H J and Zhu X. 2021. Quantitative spatial distribution model of site-specific loess landslides on the Heifangtai terrace, China. *Landslides*, 18(3): 1163-1176 [DOI: 10.1007/s10346-020-01551-y]
- Zhu J J, Li Z W, Hu J. InSAR Deformation Monitoring Methods and Research Progress [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1717-1733 (朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR 变形监测方法与研究进展. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1717-1733) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170350]
- Zhu J J, Li Z W, Hu J. Research Progress of InSAR in Landslide Monitoring [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(10): 2001-2019 (朱建军, 胡俊, 李志伟, 等. InSAR 滑坡监测研究进展. *测绘学报*, 2022, 51 (10): 2001-2019) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20220294]

Study on time-series monitoring and sliding mechanism analysis of the catastrophic Shenzhen Guangming landslide via joint radar remote sensing and numerical simulation

QIN Xiaoqiong^{1,2}, HUANG Jianming^{1,2}, HUANG Yuanjun^{1,2}, WANG Chisheng¹, CHEN Xiangsheng^{1,2}

1. State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. Key Laboratory of Coastal Urban Soil-Water Environmental Evolution, Ministry of Ecology and Environment (under construction), Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

Abstract: Aiming at the 2015 catastrophic landslide at the Hong'ao Dump in Guangming District, Shenzhen, existing post event studies have predominantly relied on optical imagery, field investigations, and numerical simulations to analyze causal factors. However, traditional creep survey methods (e.g., manual monitoring stakes, inclinometers) fail to capture high temporal resolution deformation data for sudden landslides. People's understanding of its deformation process is still not deep enough, especially the early stage creep characteristics. This study seeks to address this limitation by comprehensively characterizing the full disaster incubation and evolution process especially the pre-sliding creep and its driving factors of the Hong'ao Dump. Radar satellite imagery (35 COSMO-SkyMed images from 2013 to 2016 with 3 m spatial resolution) with all weather and high revisit rate advantages was adopted for time-series monitoring of the Hong'ao Dump, covering the entire filling stage (from 2013 to 2015) and post landslide recovery period (2016) Combined with Small Baseline Subset InSAR (SBAS-InSAR), Shape From Shading SAR (SAR-SFS), and a depth-integrated continuum model, time-series analysis and numerical simulation of surface deformation before and after the landslide were conducted. Specifically, SAR-SFS derived multi-temporal Digital Elevation Models (DEMs, 5 m spatial resolution) which helped restore the pre-sliding creep process and reduce topographic errors in subsequent simulations. Based on optical images, we calculated the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Fractional Vegetation Cover (FVC) to delineate the dump's filling stages and verify the engineering operation timeline; The depth-integrated continuum model coupled with the Coulomb model was applied to simulate the fluid state of the high speed and long runout landslide, with the pore water pressure coefficient (λ) iteratively adjusted within 0.3–0.8 to match onsite observations. The SBAS-InSAR analysis showed that the study area's surface deformation rate ranged from -40.7 mm/a to 64.3 mm/a, with significant settlement concentrated at the S7–S9 area (landslide trailing edge, accounting for 32% of the total dump area), where the maximum settlement rate reached -40.4 mm/a, and two obvious acceleration events (October 2014 and March 2015) were observed, coinciding with the two fastest filling phases (1.2×10^5 m³/month). Numerical simulations indicated that when λ reached 0.6, the model best matched onsite observations: The sliding mass above the slip surface had a volume of about 3.60×10^6 m³, a projected area of 1.03×10^5 m², and a maximum filling thickness of 62.7 m. The landslide exhibited strong fluidity: The main sliding phase completed in 50 s (average speed 18.2 m/s), followed by 120 s of residual sliding, generating a collision momentum of 114006.3 kg·m/s, which is far exceeding safety thresholds for human survival (1200 kg·m/s) and building structures (44000 kg·m/s). From the dual perspectives of radar remote sensing and numerical simulation, this study identifies the coupled effect of excessive and rapid dump filling (filling rate 0.8 – 1.2×10^5 m³/month, without adequate compaction) and elevated pore water pressure ($\lambda=0.6$, reducing soil shear strength by 35%) as the primary cause of the Hong'ao landslide. This work verifies the effectiveness of integrated radar remote sensing and numerical simulation in monitoring dump landslides, and further provides critical insights for predisaster risk assessment and early warning of similar dump sites.

Key words: Guangming Landslide, SBAS-InSAR, time-series deformation, numerical simulation, pre-failure creep, landslide mechanism, risk analysis

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42474021); Sustainable Development Special Program of the Shenzhen Science, Technology and Innovation Commission (No. KCXFZ20230731092803006); Sino-EU Dragon Projects (No. 95436)