

利用多源遥感数据监测自然现象与人为活动相关的地表形变

C. Tolomei¹, 魏恋欢², 敖萌², 刘善军², 刘国明³, 王一安², C. Bignami¹, G. Ventura¹, L. Beccaro¹, S. Atzori¹, E. Trasatti¹, S. Salvi¹

(1) 意大利国家地球物理和火山学研究所, 罗马, 意大利

(2) 东北大学, 沈阳, 中国

(3) 长白山火山国家野外科学观测研究站, 吉林省地震局, 长春, 中国

摘要

在欧空局与中国科技部联合发起的 Dragon 计划 (ID: 95348) 框架下, 意大利国家地球物理与火山学研究所 (INGV) 联合东北大学、中国矿业大学、吉林省地震局和吉林大学, 利用多源遥感数据开展地表形变监测合作研究。在 Dragon-4 和 Dragon-5 积累的经验基础上, 中意联合团队致力于识别、量化和解释由火山活动、流体运移、斜坡运动及人为工程活动引起的地表形变, 为地质灾害风险评估与预警提供科学依据。本年度研究围绕五个方向展开: 斜坡形变监测中土壤水分干扰的物理机制与校正、大形变梯度滑坡的稳健相位解缠、泥石流灾害定量风险评估、大型斜拉桥的形变-应力联合解译、以及海底火山喷发前兆信号的遥感探测。研究综合运用多时相 InSAR、数值模拟和有限元分析方法, 融合 Sentinel-1A、TerraSAR-X 和 COSMO-SkyMed 等多源 SAR 影像及无人机摄影测量数据。

在斜坡形变监测方面, InSAR 时间序列中常出现与季节性土壤水分变化一致的周期性振荡信号, 严重影响真实形变提取。本研究以黄泥坝子滑坡周边斜坡为试验区, 利用 132 景 Sentinel-1A 和 44 景 TerraSAR-X 影像开展形变监测。通过微波辐射计观测建立了土壤水分-介电特性-穿透深度-相位延迟耦合模型, 从物理机制角度阐明了水分变化产生虚假形变信号的完整过程。定量分析表明, Sentinel-1A 形变与土壤水分的相关系数达 0.638, 形变对水分变化的响应滞后 (2.13 天) 显著短于对降雨的滞后 (4.78 天), 证实土壤水分是产生虚假形变的直接因素。成果已发表于 IEEE TGRS。

大形变梯度区域相位解缠精度不足是制约 InSAR 滑坡监测的另一关键瓶颈。本研究提出了相位梯度率约束最小费用流 (PGR-MCF) 方法, 通过时间叠加估计相位梯度率, 并将其作为先验约束引入 MCF 解缠网络的弧段权重计算。以郭卜滑坡为试验区, 利用 91 景 Sentinel-1 影像生成的 264 幅干涉图进行验证, 三个 GNSS 监测点的定量评价表明, PGR-MCF 方法的 RMSE 较所有现有方法降低 69% 以上。成果已发表于 ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing。

在泥石流风险评估方面, 以抚顺五道沟泥石流沟为案例, 提出了 MassFlow 数值模拟与 Abaqus 有限元分析相结合的建筑物脆弱性与风险评估方案。利用无人机获取的 0.5 m 分辨率 DEM 模拟不同降雨重现期下的泥石流动力过程, 耦合流速和堆积深度构建三维物理脆弱性函数。评估结果表明, 千年一遇极端降雨情景下约 57% 的建筑物将遭受不同程度破坏, 其中 14% 面临完全毁坏。成果已发表于 Landslides。

在工程结构健康监测方面, 以沈阳三好桥为研究对象, 提出了升降轨时序 InSAR 融合

与有限元建模相结合的桥梁形变-应力评估方案。利用 30 景升轨 TerraSAR-X 和 29 景降轨 COSMO-SkyMed 影像，通过线性回归分离季节性热形变与长期结构形变，采用 SVD 融合获取桥梁二维形变场。将 InSAR 反演的竖向形变作为边界位移约束输入有限元模型，揭示关键应力集中位于桥墩支座、塔梁连接处和索梁交汇处，InSAR 结果与有限元模拟高度一致（偏差小于 1 mm）。成果已发表于 IEEE JSTARS。

在火山形变监测方面，本研究聚焦 2021–2022 年洪阿汤加-洪阿哈阿帕伊 (HTHH) 海底火山喷发。综合利用 Sentinel-2A 光学影像、Sentinel-1A SAR 影像和 Planet SkySat 影像，揭示了喷发期间岛屿东北部出现新主火山口。对 44 景 Sentinel-1A 影像的 SBAS-InSAR 处理表明，2021 年 12 月喷发前新火山口区域已发生最大累计 LOS 形变达 6.4 cm 的显著位移，岩浆侵入活动可能早在 2020 年 5 月即已开始，在时间序列中表现为长达 19 个月的持续形变过程。成果已发表于 *Bulletin of Volcanology*。

与流体开采和注入相关的形变分析对自然灾害评估和地下资源可持续利用具有重要意义。利用 SBAS 技术处理 2021–2025 年 Sentinel-1 降轨影像，对松辽盆地大庆油田的研究揭示了开采区广泛的地面抬升，速率最高达 40 mm/yr，并沿一条断裂带呈现从抬升向沉降 (–20 mm/yr) 的明显转变。区内 GNSS 站水平分量仅约 2 mm/yr，据此将 LOS 速度投影至垂直方向，用于结合油气储层深度进行源模型反演。

此外，团队已启动对海南岛的研究。该区域断裂体系发育、火山活动频繁且地震灾害显著，同时海口正经历快速城市化和海南自由贸易港建设，关键基础设施常邻近活动断裂带。拟采用 MT-InSAR 技术处理覆盖海口和三亚的 COSMO-SkyMed (CSK) 和 COSMO 第二代 (CSG) 高分辨率升降轨数据，处理工作将在 Dragon-6 项目第三和第四年开展。

致谢

Sentinel-1 数据由欧空局免费提供，ALOS-2 数据由日本宇航局 (JAXA) 通过 EO-RA4 项目 (项目编号 ER4A2N061) 提供，COSMO-SkyMed 由意大利航天局 (ASI) 提供 (项目编号 4304)。