

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.03.036

CSTR:32310.14.stbcbx.2026.03.036

郑迎凯,周小栋,林敏,等.南方花岗岩区崩岗综合遥感识别:以安溪官桥为例[J].水土保持学报,2026,40(3):86-98.

ZHENG Yingkai, ZHOU Xiaodong, LIN Min, et al. Comprehensive remote sensing identification of Benggang in granite regions of southern China: A case study of Guanqiao, Anxi[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3):86-98.

## 南方花岗岩区崩岗综合遥感识别

—以安溪官桥为例

郑迎凯,周小栋,林敏,聂童春,蔡立业,韩志定,方金梅

(福建省地质科学研究所,福州 350000)

**摘要:** [目的] 崩岗侵蚀是我国南方花岗岩区最严重的土壤侵蚀类型,给生态环境带来巨大危险。传统崩岗调查以人工调查为主,存在效率低、危险性大等缺点,随着现代遥感技术的发展,亟需一套有效的崩岗遥感识别方法。[方法] 以福建安溪县官桥崩岗密集发育地区为研究区,综合运用高分辨率遥感影像、无人机摄影测量、合成孔径雷达等分析处理技术,对研究区崩岗进行多尺度遥感识别,综合运用多源遥感技术并结合野外调查,分析南方花岗岩区崩岗分布规律以及活动特征,总结并评价南方花岗岩区崩岗综合遥感识别方法体系。[结果] 研究识别崩岗总数 104 个,崩岗总面积 2.82 km<sup>2</sup>,其中区内以活动型崩岗为主,面积为 1.97 km<sup>2</sup>,发育密度为 1.82 个/km<sup>2</sup>,崩岗发育的类型以瓢形、爪形为主。综合遥感方法能够有效识别崩岗侵蚀边界、崩岗形态类型、崩岗侵蚀活动阶段,最终在 GIS 平台上进行集成,得到研究区崩岗综合评价成果。[结论] 构建适用于南方花岗岩区崩岗综合遥感识别方法体系,采用该方法进行大范围崩岗调查可以弥补单一方法手段的不足,提高效率,为该区域生态保护、植被恢复和防灾减灾提供技术支撑。研究主要是应用于花岗岩区域内的崩岗,对于其他地质背景下发生的崩岗,该方法体系具有一定普适性。

**关键词:** 花岗岩区;崩岗;综合遥感识别;安溪官桥

中图分类号:P951;P23.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2026)03-0086-13

## Comprehensive Remote Sensing Identification of Benggang in Granite Regions of Southern China—A Case Study of Guanqiao, Anxi

ZHENG Yingkai, ZHOU Xiaodong, LIN Min, NIE Tongchun, CAI Liye, HAN Zhiding, FANG Jinmei

(Fujian Institute of Geological Sciences, Fuzhou 350000, China)

**Abstract:** [Objective] Benggang erosion is the most severe type of soil erosion in the granite regions of southern China, posing a great threat to the ecological environment. Traditional Benggang surveys mainly rely on manual investigation and have drawbacks such as low efficiency and high risk. With the development of modern remote sensing technology, an effective remote sensing identification method system for Benggang is urgently needed. [Methods] The study took the densely developed Benggang area of Guanqiao, Anxi County, Fujian Province as the study area. High-resolution remote sensing images, unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry, synthetic aperture radar, and other analytical techniques were comprehensively applied to conduct multi-scale remote sensing identification of Benggang in the study area. By integrating multi-source remote sensing technology with field investigation, this study analyzed the distribution patterns and activity characteristics of Benggang in the granite regions of southern China, and summarized and evaluated the comprehensive remote sensing identification method system for Benggang. [Results] A total of 104 Benggang were identified, covering a total area of 2.82 km<sup>2</sup>. Among them, active Benggang predominated, with an area of 1.97 km<sup>2</sup> and a development density of 1.82 per km<sup>2</sup>. The main morphological types of Benggang were scoop-shaped and claw-shaped. The comprehensive

收稿日期:2026-01-19

修回日期:2026-02-09

录用日期:2026-02-21

网络首发日期(www.cnki.net):2026-04-27

资助项目:福建省公益性基础性地质调查计划项目(GY20210103)

第一作者:郑迎凯(1994—),男,硕士,工程师,主要从事遥感地质、矿产地质研究。E-mail:zhengyingkai@163.com

通信作者:周小栋(1987—),男,硕士,高级工程师,主要从事区域地质、矿产地质和地质灾害调查研究。E-mail:zhouxd4304@163.com

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

remote sensing method effectively identified Benggang erosion boundaries, morphological types, and erosion activity stages. Finally, the results were integrated on a GIS platform to obtain a comprehensive evaluation of Benggang in the study area. [Conclusion] A comprehensive remote sensing identification method system suitable for Benggang in granite regions of southern China is established. The application of this method to large-scale Benggang surveys can compensate for the limitations of single approaches, improve efficiency, and provide technical support for ecological protection, vegetation restoration, and disaster prevention and mitigation in these regions. This study mainly focuses on Benggang in the granite regions, but the proposed method system also shows certain applicability to Benggang occurring under other geological settings.

**Keywords:** granite regions; Benggang; comprehensive remote sensing identification; Guanqiao, Anxi

Received: 2026-01-19

Revised: 2026-02-09

Accepted: 2026-02-21

Online(www.cnki.net): 2026-04-27

崩岗侵蚀是我国南方热带及亚热带地区侵蚀强度最大,危害最为严重的一种侵蚀类型,被喻为“生态溃瘍”<sup>[1]</sup>。崩岗侵蚀发展速度快,具有突发性、长期性等特点,崩岗侵蚀模数一般达 $3 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$  t/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ )以上,远超南方 $500$  t/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ )容许土壤流失量,已经成为一种严重的环境地质灾害<sup>[2-5]</sup>。同时崩岗侵蚀会破坏土壤形成的稳定层,从而引起崩塌失稳,导致在崩岗大量分布地区极易诱发滑坡、泥石流等地质灾害,严重威胁公共安全<sup>[6-7]</sup>。福建省属于我国南方地区崩岗侵蚀较为严重地区<sup>[8-9]</sup>,而安溪县属于福建省22个水土流失重点县中的5个I类重点治理县。安溪县崩岗主要集中在县城城关西南方向约12 km的官桥-龙门河谷盆地,数量接近全县的1/2,是全省崩岗最发育的地区<sup>[10]</sup>。

崩岗调查目的在于摸清崩岗的类型、分布现状及侵蚀规律,是进行崩岗防治的关键环节<sup>[11]</sup>。2004年水利部组织了全国第一次崩岗普查统计,确认全区共有崩岗23.91万个<sup>[12-13]</sup>。距离上次崩岗调查距今已过去22 a,相关情况发生巨大变化,不合理的人为活动是否导致崩岗新发育或者老崩岗新活动。目前这些情况均未完全掌握,也无相关调查统计,造成当前崩岗现状不明,从而影响管理部门对崩岗防治相关工作。

传统的崩岗调查以人工野外调查为主,存在工作效率低下、人力物力成本高、调查人员人身安全风险高等问题<sup>[14]</sup>,并且在山高林密的地区难以全面反映崩岗侵蚀情况。随着近年来高分辨率遥感影像、无人机摄影测量、合成孔径雷达等现代遥感技术迅速发展,已经成为自然灾害调查分析重要的技术手段,从而能够为现今崩岗调查评价提供技术支撑<sup>[15]</sup>。目前在遥感新方法新技术方面,不少专家学者围绕崩岗开展了研究。在遥感调查方面,刘洁等<sup>[16]</sup>以GF-2号遥感影像为数据源,通过对影像进行光谱增强和纹理增强方法对范围内崩岗进行提取;沈盛或

等<sup>[17]</sup>利用无人机遥感技术对崩岗区域进行快速调查,高效、准确获取区域崩岗信息;但遥感影像受分辨率限制,植被高覆盖区域难以区分土壤侵蚀与崩岗,而无人机调查则更加耗时。在崩岗侵蚀量与崩岗阶段识别方面,刘希林等<sup>[18]</sup>利用三维激光扫描技术以广东五华县莲塘岗崩岗为例,对崩岗侵蚀过程进行定量分析,精准地获取崩岗侵蚀过程侵蚀量信息;谭泽创<sup>[19]</sup>利用无人机LiDAR对崩岗地形进行精细建模,结合建模地形判断崩岗发育阶段。激光扫描技术虽能够准确获取崩岗侵蚀量和判断崩岗阶段,但都需要不同时间多期次的差分计算,在大范围普查工作中并不适用。

因此,为弥补单一方法手段的不足,亟需构建一套崩岗综合遥感识别体系以适用于现代崩岗调查的要求。本文以福建安溪县官桥崩岗密集发育地区为研究区,基于多源遥感影像为主要数据源,综合运用高分辨率遥感影像、无人机摄影测量、合成孔径雷达等分析处理技术,对研究区崩岗进行多尺度遥感识别,并结合野外调查,分析南方花岗岩区崩岗分布规律以及活动特征,总结并评价南方花岗岩区崩岗综合遥感识别方法体系,为区域生态保护、植被恢复和防灾减灾提供技术支撑,也进一步为崩岗成因的研究提供借鉴。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

研究区位于福建省泉州市安溪县官桥地区( $24^{\circ}59'13'' \sim 25^{\circ}02'28''\text{N}$ ,  $118^{\circ}01'50'' \sim 118^{\circ}07'30''\text{E}$ ),总面积约 $57.22$   $\text{km}^2$ 。研究区地形地貌为山地丘陵与小型河谷平原,整体地势为四周高中间低。研究区交通便利,省道S206、S35、S30贯穿南北,省道S207沟通东西。河网主要包括小蓝溪和依蓝溪两条主干水系。在行政区划上,研究区位于官桥镇中心,部分地区位于龙门镇,位于崩岗侵蚀最严重的官桥-龙门河

谷盆地的腹地。

区内主要出露第四纪地层、龙门深成岩体和少量晚侏罗-早白垩世南园组火山岩(图1)。龙门深成岩体主要分布于官桥、龙门一带,呈岩基状产出,侵入南园组火山岩中。岩石类型为正长花岗岩,可进一步划分为含斑细粒、少斑中细粒、中粒、中粗粒正长花岗岩。根据本次区调工铀石U-Pb定年结果,年龄为 $(116.0 \pm 1.4)$ Ma,属早白垩世中期侵入体,形成环境为板块俯冲挤压造山下地壳重熔形成的花岗

岩。由于广泛发育的花岗岩岩体,形成了大量疏松深厚的花岗岩风化壳,为崩岗发育提供充沛的物质来源。研究区崩岗侵蚀严重,在形态上,混合型、瓢形、弧形、爪形与条形崩岗均有分布;在活动性上,以活动型崩岗为主<sup>[20]</sup>。经过多年的治理,崩岗侵蚀情况得到较大改善,裸土面积大为减少,但由于崩岗活动的突发性及危害巨大,随着近年来大量基础设施建设及不合理的农业活动,导致崩岗活动的新发或者老崩岗的重新活动。



注:1为第四系冲洪积层;2为晚侏罗世-早白垩世南园组第3段;3为晚侏罗世-早白垩世南园组第2段;4为早白垩世中期正长花岗岩;5为断层。

图1 研究区地质概况

Fig.1 Geological overview of study area

## 1.2 数据来源及处理

本次的数据来源包括:1)高分辨率遥感影像选取GF-2号、天地图及Google Earth影像作为多种数据来源进行综合对比与解译。GF-2号是2014年8月由中国发射的高分辨率民用遥感卫星,搭载2台全色和多光谱推扫式传感器。其中多光谱传感器空间分辨率为3.2 m,包含蓝、绿、红、近红外4个波段。全色传感器空间分辨率为0.8 m,包含1个波段,光谱范围 $0.45 \sim 0.90 \mu\text{m}$ 。本文采用的影像获取时间为2021年12月29日,云量 $< 1\%$ ,预处理基于Envi 5.6软件进行处理,步骤包括大气校正、影像配准、正射校正,采用Gram-Schmidt Pan Sharpening图像融合方法,将全色波段与多光谱真彩色波段融合,融合后空间分辨率优于1 m,用于对崩岗进行解译;2)无人机采用大疆精灵4RTK,用于对重点调查区域进行航拍调查与三维航拍建模,无人机航空调查的时间为2022年12月5-20日,旁向重叠度为30%,航向重叠度为80%,相对地面航高根据实地情况,在80~120 m进行设置;3)

InSAR数据来源于欧洲航天局(ESA)哥白尼计划下的发射的哨兵1号合成孔径雷达数据(Sentinel-1A)。数据获取自美国宇航局(NASA)体系下阿拉斯加卫星设施数据中心(<https://search.asf.alaska.edu/>, ASF)。本次获取的SAR数据,影像模式为干涉宽条带模式(IW),极化模式为HV的升轨数据,时间跨度为2020年1月17日至2021年12月13日,共25景,详细参数见表1。为消除由轨道误差引起的系统性误差,在InSAR处理中利用Sentinel-1A卫星精密轨道数据。数据保存于ASF网站([https://s1qc.asf.alaska.edu/aux\\_poeorb/](https://s1qc.asf.alaska.edu/aux_poeorb/));4)高程数据和地层岩性数据均来自于本次1:50 000区域地质调查项目。

## 2 研究方法

### 2.1 技术路线

南方花岗岩崩岗区综合遥感识别的核心思想是高分辨率遥感影像解译、无人机航空调查、InSAR形变观测结合野外实地调查对研究区崩岗侵蚀边界、崩岗形态类型、崩岗侵蚀活动阶段进行综合研究,技

术路线见图 2。首先利用高分辨率遥感影像对整体调查区进行遥感解译,得到研究区崩岗分布情况;由于植被覆盖,部分崩岗难以在遥感影像中识别,因此在崩岗侵蚀重点分布区域,进行精细化野外地质调查结合无人机航空调查,进一步圈定崩岗侵蚀边界和划分崩岗形态类型;对 SAR 数据进行处理,利用时序 InSAR 形变数据对研究区进行观测,根据形变数据结合野外调查,确定崩岗侵蚀活动阶段。将崩岗侵蚀边界数据、崩岗形态类型成果数据、崩岗侵蚀活动阶段成果数据三者 GIS 平台上进行集成,建立区域崩岗数据库,最终得到研究区崩岗综合评价成果。

表 1 Sentinel-1A 数据主要参数  
Table 1 Main parameters of Sentinel-1A data

主要参数	数据
成像方式	宽幅成像(IW)
极化方式	垂直-水平极化(HV)
轨道方向/幅号	142/75
波段,波长	C 波段,5.6 cm
轨道方向	升轨
中心入射角/方位角	39.1°/347.6°
时间段	2020-01-17至2021-12-13,共25景 2020-01-17,2020-02-22,2020-03-17, 2020-04-22,2020-05-16,2020-06-21, 2020-07-15,2020-08-08,2020-09-01, 2020-09-25,2020-10-19,2020-11-24, 2020-12-18,2021-01-11,2021-02-28, 2021-03-12,2021-04-17,2021-05-23, 2021-06-16,2021-07-22,2021-08-27, 2021-09-20,2021-10-26,2021-11-19, 2021-12-13

### 2.2 高分辨率遥感影像解译

崩岗在形成和发育的过程中,所在的坡面表现出外部形态各异的现象<sup>[8]</sup>。在花岗岩地区,山体受到侵蚀后,易于形成崩岗,在遥感影像上表现为裸土出露、侵蚀沟出现、山体出现豁口状空洞等特征影像。同时在崩岗形成和发育过程中所在坡面表现出特征的几何形态,如瓢形、爪形、弧形等特征形态。通过利用高分辨率遥感影像可以对存在崩岗进行识别与解译,从而获得研究区崩岗分布情况。研究区典型崩岗遥感影像如下,瓢形崩岗在遥感影像上表现为在坡面上口小腹大,形似葫芦状瓢形的形态(图 3a);爪形崩岗表现为沟头多分叉成多条侵蚀沟的形态,多条侵蚀沟组成爪状产出。在遥感影像上见有在 1 个山体上多条侵蚀沟构成爪状的影像特征(图 3b);弧形崩岗的形成是由于山体两侧的差异侵蚀所形成,在遥感影像上表现为山体线沿边线呈弓形展布,

表现出明显的弧度(图 3c);条形崩岗在遥感影像上表现为山体受到侵蚀后沟道呈单个长条状,或者多个长条状组成,长宽比在 2 倍以上。单条崩岗沟道宽为 68 m,长为 155 m,长宽比为 2.3,认为是条形崩岗(图 3d);混合型崩岗由于土壤侵蚀严重,表现为单个山体被多个形状崩岗侵蚀所形成,先通过遥感影像对其他 4 种类型的崩岗进行解译,若 1 个山体上出现 2 个及以上类型的崩岗,判断为混合型崩岗(图 3e)。通过遥感影像解译出 3 个瓢形崩岗和 3 个爪形崩岗位于 1 个山体上,其所组成则认为是一个混合型崩岗,混合型崩岗侵蚀范围较大,对山体造成大量的水土流失。基于以上,建立研究区崩岗解译标志,利用高分辨率的遥感影像,对全区崩岗进行解译。

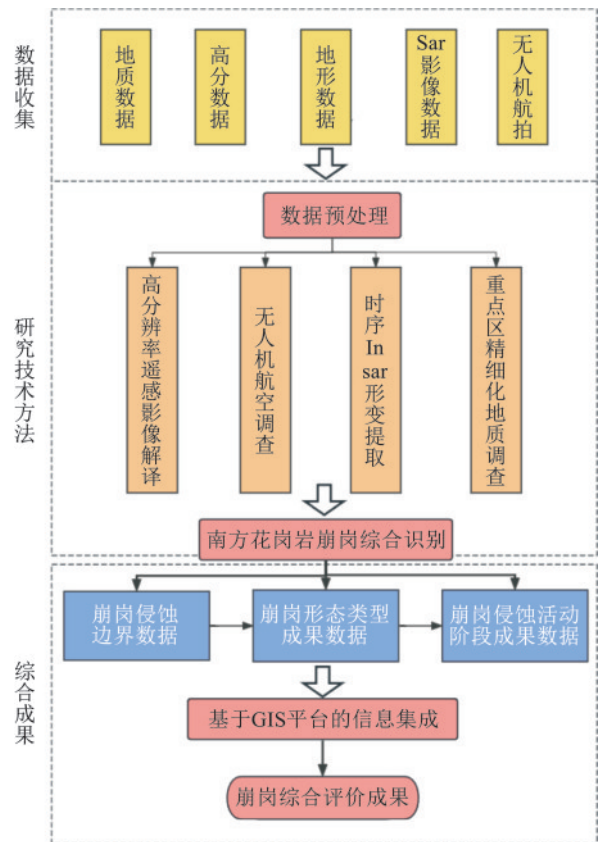


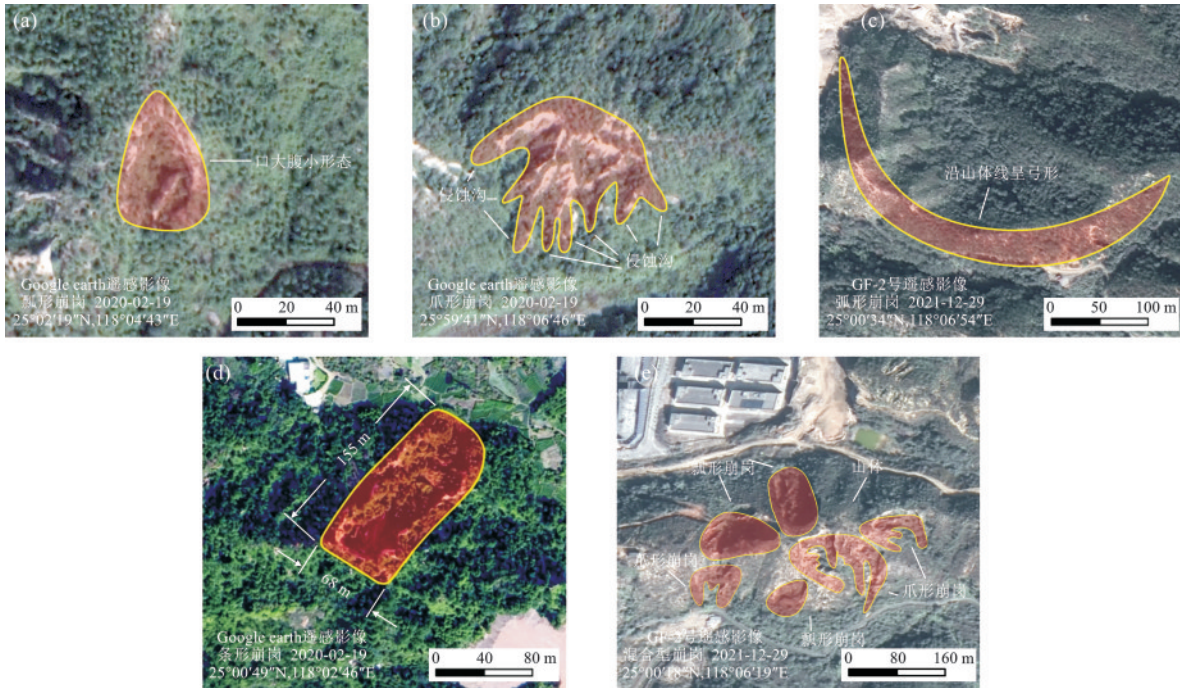
图 2 技术路线  
Fig.2 Technical route

### 2.3 无人机航空调查与三维建模

随着近景摄影测量技术的发展及消费级无人机的普及,无人机航空调查已经逐渐应用于农业、地质及水土保持行业。在外业实地调查过程中,部分崩岗所在地形较为陡峭,植被茂盛,不仅通行困难,并且在调查过程中存在较大的安全隐患,同时在大范围调查崩岗中效率低下。通过利用无人机航空调查可以作为高分辨率遥感影像解译和实地调查的补充,快速获取大范围内崩岗的影像资料,同时可以细

化遥感影像所圈定的崩岗的边界。崩岗所在山坡通行条件较差,实地调查需要耗费大量时间,而通过无

人机调查可以清晰获取崩岗整体的特征,分别为瓢形崩岗与爪形崩岗(图4)。



注:红色部分为勾勒的崩岗形态。下同。

图3 研究区崩岗遥感解译标志

Fig.3 Remote sensing interpretation markers of Bengang in study area

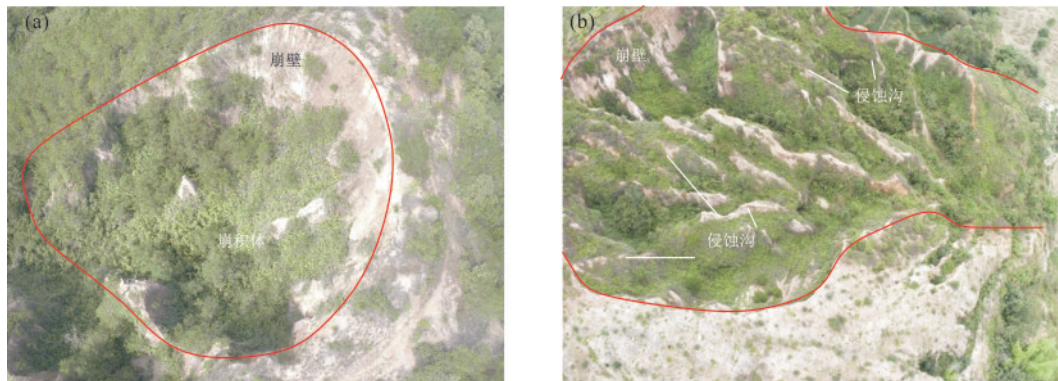


图4 研究区崩岗无人机识别特征

Fig.4 UAV identification features of Bengang in study area

对于植被覆盖较为严重的崩岗,单一的高分辨率遥感影像难以获取崩岗全面信息。由图5a可知,由于植被覆盖严重及影像分辨率的限制,在遥感影像上仅能见到少量裸土处理,难以确定是土壤侵蚀还是崩岗发育,需要进一步调查确认。由图5b可知,无人机调查可以近距离调查以获取更为直观的信息,通过无人机调查确定为发育的崩岗,崩岗类型为瓢形。

同时专业级无人机可以在获取影像资料的同时获取高程信息,在室内对航拍的崩岗数据进行三维建模,对模型进行分析确定区域内崩岗的形态参数以及发育阶段。图5c为无人机航拍建立的

吾宗村崩岗三维实景影像。经过无人机航拍建立的三维实景影像,在室内便可对崩岗进行提取,可清晰圈定此处1个山体存在4处崩岗,提高效率,同时对形成的影像进行存档,形成实景三维崩岗数据库。通过无人机实景影像建模可以不同角度对崩岗进行观测,结合DTM观测崩岗侵蚀形成的崩壁、侵蚀沟等,同时在建模完成后在室内可以对崩岗的高程、侵蚀沟宽度、体积等参数进行测量。图5d为吾宗村崩岗无人机建模形成的高程数据。经测量,吾宗村崩岗高约170 m,整座山体体积约为0.003 4 km<sup>3</sup>,崩岗1崩壁最宽约40 m,崩岗2崩壁最宽约68 m。

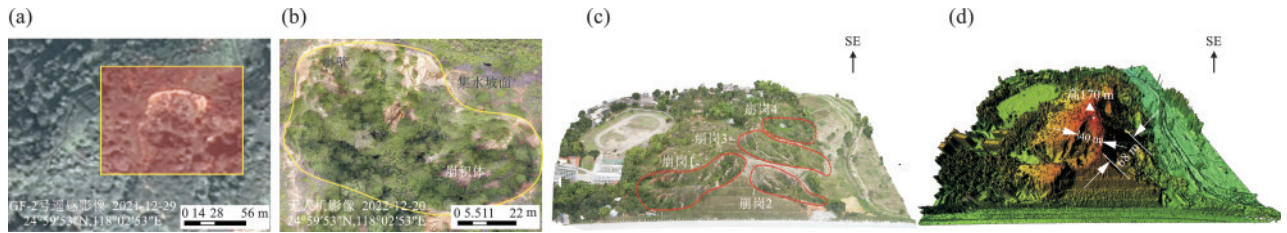


图 5 研究区无人机航空调查与三维建模影像

Fig.5 UAV aerial survey and 3D modeling images of study area

### 2.4 SBAS-InSAR 形变提取

合成孔径雷达(SAR)遥感自身具有的全天候、全天时、高分辨率、多极化、大幅度和有一定的地表穿透能力等特点,已经在早期滑坡识别中广泛应用<sup>[21]</sup>。其中短基线集干涉测量技术(small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR)能以较高的时间分辨率和较密的监测点密度获取地表微小形变信息<sup>[22]</sup>,成为获取滑坡变形信息的关键。

通过 InSAR 技术可以准确提取区域的形变信息,因此可以在大范围内定时定量对崩岗侵蚀情况进行监测,也可以对崩岗风险进行评价评估,对崩岗所处的活动阶段进行判断。本文基于 SARscape 平台对 2020 年 1 月 17 日至 2021 年 12 月 13 日的 25 景哨兵 1 号数据进行 SBAS-InSAR 形变提取,DEM 采用 1:50 000 地形图等高线生成,用于去除地形影响,具体流程见图 6。

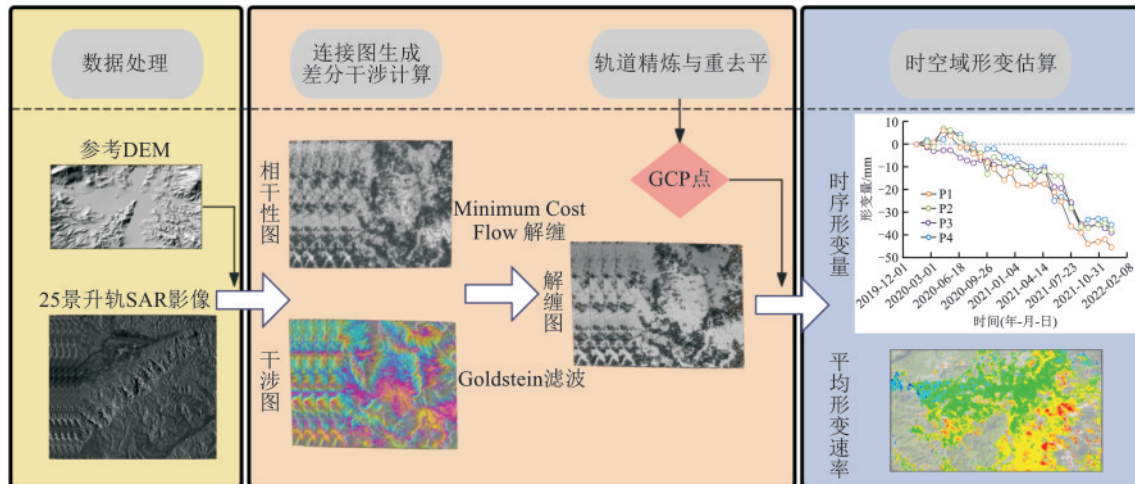


图 6 SBAS-InSAR 数据处理技术流程

Fig.6 SBAS-InSAR data processing workflow

1)数据预处理:数据预处理包括影像的配准和裁剪。先将所有影像数据进行配准,由于 InSAR 计算量较大,为减少电脑计算量,将研究区矢量导入软件中,对获取的 25 景 SAR 数据进行裁剪。

2)连接图生成:将裁剪的 SAR 影像按时间和空间阈值进行分组配对,为提高数据干涉质量,保存数据的相干性,设置时间上最大基线为 120 d,空间上最大基线 120 m,共生成 63 个质量较好的干涉对组合。超级主影像由软件自动选择,选取 2020-05-16 期数据作为超级主影像进行配对,生成的时空基线见图 7。

3)差分干涉计算和:包括干涉图生成,去平、滤波和相位解缠。采用 Minimum Cost Flow 解缠方法和 Goldstein 滤波方法做干涉 workflow,最终生成干涉图,得到研究区相干系数图、滤波后干涉图及解缠结果。

4)轨道精炼与重去平:对干涉结果进行轨道精炼和重去平处理,以消除相位图中的恒定相位和越变相位影响。在重去平中,手动选取 25 个地面控制点(GCP),且满足 GCP 相干性好,远离形变区。

5)时空域形变估算:采用矩阵奇异值分解方法(SVD)获取研究区时间序列形变量和形变速率。最后对时间序列信息进行地理编码,生成研究区 LOS 方向的变形速率,导入 Arcgis Pro 平台中进行集成。

通过 SBAS-InSAR 的反演方法,得到研究区内共 167 244 个形变点,平均 342 个/m<sup>2</sup>。每个形变点中包含计算得到的平均形变速率、总形变量和每期影像的累计形变量。在城区范围内,InSAR 反演得到形变点几乎能保证全覆盖,而在部分地区植被覆盖较高,存在失相干的现象,导致形变点较为稀疏。结合地质图对花岗岩区域和非花岗岩区域内的 InSAR

形变点进行分别统计(图8)。研究区得到的形变速率平均值为-4.95 mm/a, 标准差为 2.87 mm/a, 90%的形变速率位于 0~-10 mm/a, 反映研究区整体处于负变形中。花岗岩区域共计算得到 74 340 个形变点, 形变速率平均值为 -6.08 mm/a, 反映花岗岩区域较其他区域形变更强烈。基于对研究区形变速率

的统计, 从低到高分类为红、橙、黄、绿、蓝、紫 6 个颜色等级。由于本次研究主要关注于负向形变, 将 InSAR 形变点颜色等级进行归类, 红色(<-15 mm/a, 极强变形)、橙色(-10~-15 mm/a, 强变形)、黄色(-5~-10 mm/a, 中等变形)、绿色(0~-5 mm/a, 几乎无变形)。

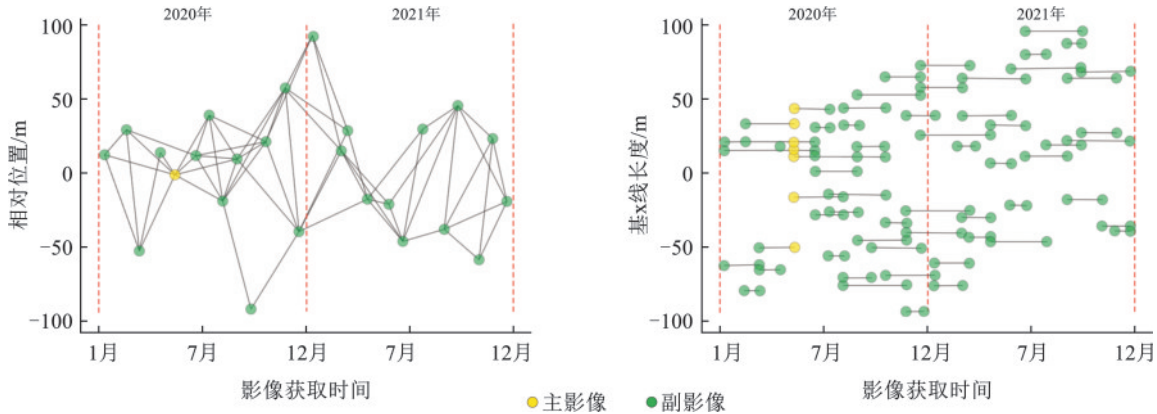


图7 雷达影像干涉对时间-位置关系和时间-基线关系

Fig.7 Time-position relationship and time-baseline relationship of radar image interferometric pairs

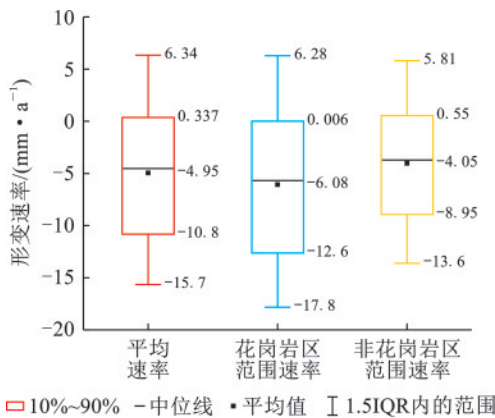


图8 研究区形变速率统计箱状图

Fig.8 Box plot of deformation rates in study area

### 2.5 基于 GIS 平台的信息集成与重点区精细化调查

2.5.1 重点区精细化调查 在基于高分辨率遥感影像解译、无人机航空调查、星载时序 InSAR 监测的基础上, 划定区域内崩岗侵蚀重点区域。对于划定的崩岗侵蚀重点区域进行精细化地面调查, 从而圈定崩岗侵蚀边界; 地面调查结合综合遥感影像特征, 确定崩岗形态类型; 在野外地面调查基础上, 结合时序 InSAR 形变数据, 确定崩岗侵蚀阶段。

2.5.2 基于 GIS 平台的信息集成 通过综合遥感识别, 得到包括高精度光学遥感解译、无人机倾斜摄影调查与三维建模及 InSAR 监测在内的相关崩岗数据, 结合野外地面精细化调查得到的崩岗侵蚀边界数据、崩岗形态类型数据、崩岗侵蚀阶段数据。通过 GIS 平台, 将得到的多源数据最终在 Arcgis Pro 平台中进行集成, 最终得到调查区崩岗综合评价成果。

## 3 结果与分析

### 3.1 “空-天-地”综合遥感识别

基于前文所述方法, 利用高分辨率遥感影像解译、无人机航空调查、星载时序 InSAR“空-天-地”3 种技术对安溪县官桥地区崩岗进行大范围调查和形变监测。根据遥感影像、无人机航拍的解译标志, 结合野外地质调查, 得到研究区崩岗侵蚀边界与形态类型; 通过时序 InSAR 得到研究区大范围形变结果, 将其叠加在之前得到的崩岗侵蚀边界上。

形变速率描述地面目标在监测时段内发生形变的平均快慢, 其随时间的变化是形变-时间曲线的一阶导数, 有助于形变阶段研判, 是评判地质灾害风险的有效指标<sup>[23]</sup>。根据形变速率间接判断崩岗区域内土壤侵蚀速率, 定量判别崩岗所处的活动阶段。

典型崩岗综合遥感识别结果见图 9。由图 9a 可知, 崩岗位于官桥镇吾宗村一带, 山体由似斑状中粗粒正长花岗岩侵入形成厚达数十米的风化壳。在遥感影像上表现为多个崩岗侵蚀的特征; 根据无人机航拍所建立的三维影像结合野外调查, 为 3 个瓢形和 1 个爪形组成的混合型大型崩岗。崩岗由于位于省道边, 经过治理, 靠近公路的一侧修筑边坡防护, 山体上种植改良土壤的树木及防风固土的灌草, 从而改良生态减少水土流失。结合 SBAS-InSAR 得到的形变速率, 整体视向形变速率较低, 表明经过治理, 侵蚀速率已经得到减缓, 范围内平均形变速率为 -3.01 mm/a, 认为此处崩岗为相对稳定型崩岗。

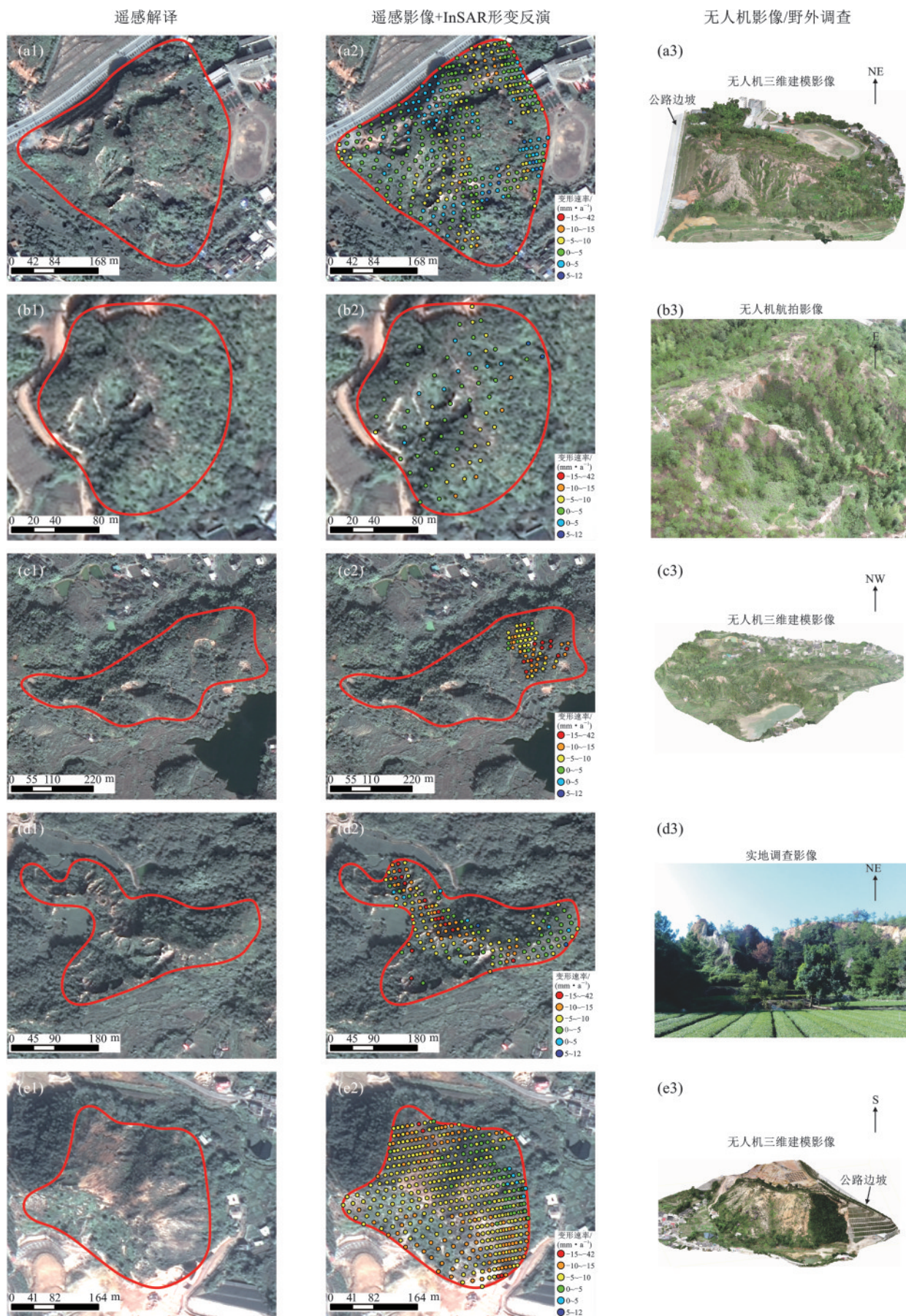


图9 研究区典型崩岗综合遥感识别

Fig.9 Comprehensive remote sensing identification of typical Bengang in study area

由图9b可知,崩岗位于官桥镇周厝一带,遥感影像上形成爪形的特征影像,多条侵蚀沟发育形成“鸡爪形”,侵蚀活动越过分水岭,植被覆盖较高,水土流失较为轻微,结合现场调查与InSAR监测结果,范围内平均形变速率为 $-3.44\text{ mm/a}$ ,反映该区域形变趋势平稳,未见明显位移迹象,表明植被恢复与工程治理措施发挥有效作用,进一步遏制侵蚀扩展,整体处于相对稳定状态。

由图9c可知,崩岗位于龙门镇五房水库一带。植被及茶叶田覆盖严重,在遥感影像上表现为隐约见到多个大小不一的瓢形崩岗。从无人机航拍及重建的三维影像更能清晰识别出多个瓢形崩岗。此处另一侧山体不久前发生滑坡。根据此处的形变速率来看,形变速率较高,范围内计算出64个InSAR形变点,平均速率为 $-11.02\text{ mm/a}$ ,达到强变形等级,显示强烈侵蚀的特征,认为此处为混合型活动崩岗。

由图9d可知,崩岗位于龙门镇大湖山一带。在遥感影像上表现为强烈侵蚀的崩岗特征,叠加形变速率来看,范围内共计算出156个InSAR形变点平均形变速率为 $-8.01\text{ mm/a}$ ,最高形变速率达 $-20.57\text{ mm/a}$ ,达到强变形和极强变形(即形变速率 $< -10\text{ mm/a}$ )的形变点数量为55个,约占总数的35%,显示

出较为强烈的侵蚀特征。结合野外地质调查,认为此处为活动型爪形崩岗。

由图9e可知,崩岗位于龙门镇美内村一带,属于较为早期的活动型崩岗,自上而下形成细沟-深沟-宽沟侵蚀特征。整体变形速率较高,范围内共计算出467个InSAR形变点,平均速率在 $-8.18\text{ mm/a}$ ,达到强变形和极强变形的形变点数量为111个,约占总数的24%。由于此处崩岗发育阶段较为早期,暂未显示出强烈侵蚀的特征,根据所发育宽沟,先将其归类为瓢形崩岗。需要注意的是,崩岗所处山体的水土流失将不断掏空后方公路永久边坡的山体,影响边坡整体稳定性的下降与边坡整体的使用年限。

### 3.2 研究区崩岗遥感识别结果

基于以上的方法对研究区崩岗进行识别,共识别出104处崩岗,部分崩岗由于山体相连而延伸至区外数米至数十米不等。将所识别的崩岗叠加高分辨率遥感影像(图10),崩岗在研究区广泛分布,形成大小不一的崩岗群,主要集中在研究区的东南侧,其次为西北侧。研究区崩岗总面积约 $2.82\text{ km}^2$ ,占全区总面积的4.92%,发育密度为 $1.82\text{ 个/km}^2$ 。崩岗平均面积约为 $0.027\text{ km}^2$ 。



图10 研究区崩岗分布

Fig.10 Distribution of Benggang in study area

基于SBAS-InSAR反演得到研究区视向形变速率叠加本次所获得的崩岗(图11),可以看出,除少量崩岗外,大多数崩岗范围内都存在反演出的形变点。从形变速率来看,绝大多数崩岗范围内视向形变速率较高,反映了土壤侵蚀速率,视向形变速率整体较

高代表水土流失较快,视向形变速率整体较低代表崩岗水土流失较慢处于相对稳定的状态。基于SBAS-InSAR差分干涉测量为判定崩岗所处的阶段提供定量的依据。

基于对整个研究区崩岗的“空-天-地”的综合遥

感识别,在 Arcgis 平台进行集成,得到研究区崩岗的“空-天-地”的综合遥感识别结果(图 12)。从崩岗发育阶段分析,研究区内崩岗以活动型为主,占崩岗总数的 62.5%,面积上为 1.97 km<sup>2</sup>,占总崩岗面积的

70%。区内活动型崩岗的发育反映近些年来崩岗新发育或者老崩岗再活动。从崩岗发育的类型分析,各类型均有发育,以瓢形、爪形为主,占崩岗总数的 60%,其次依次为弧形、混合型和条形。

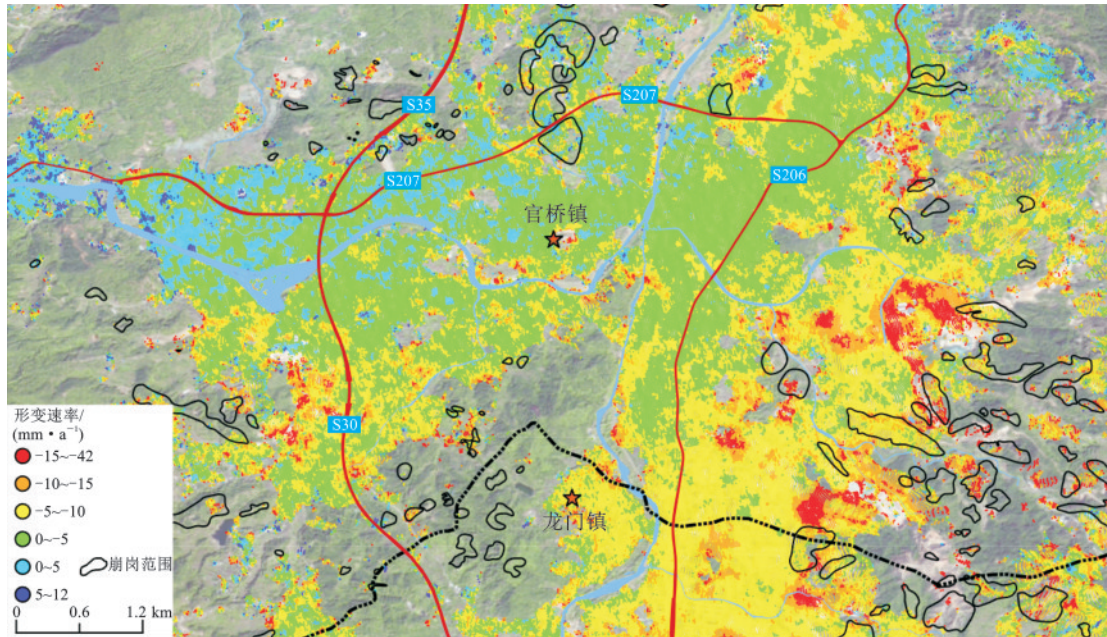


图 11 研究区视向形变速率叠加崩岗分布

Fig.11 Distribution of Benggang with line-of-sight deformation rate in study area

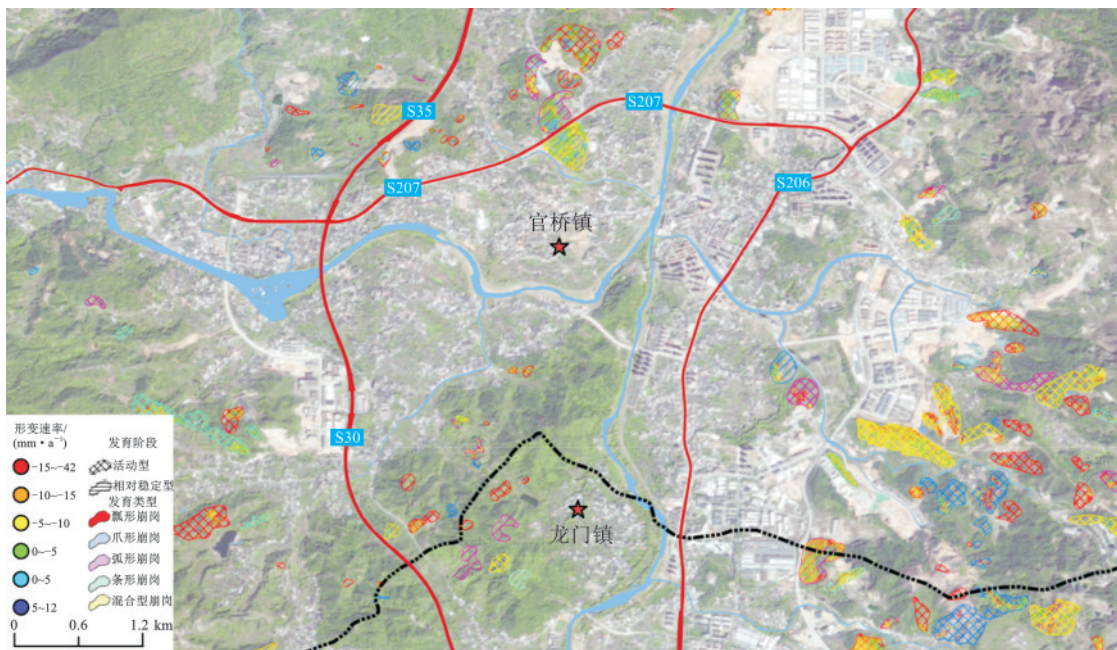


图 12 研究区崩岗综合遥感识别结果

Fig.12 Comprehensive remote sensing identification results of Benggang in study area

### 4 讨论

#### 4.1 南方花岗岩区崩岗综合遥感识别方法

崩岗大量分布于的发育我国南方七省,随着党和国家的重视,经过多年的治理,绝大部分的地区的崩岗侵蚀已经有极大的改善。距离上一轮调查已经过去 22 a,相关情况发生巨大改变,崩岗现状不明直接

影响管理部门对崩岗防治相关工作的规划。

随着新型技术的发展为崩岗调查提供新方法,合理的利用能够高效掌握区域崩岗侵蚀的分布特征。本文运用高分辨率遥感影像、无人机航空调查和 InSAR 技术,应用于南方花岗岩区大范围的崩岗调查中。高分辨率遥感影像能够识别大多数崩岗的侵蚀

边界与发育类型,但由于植被覆盖难以从单一遥感影像中进行判断。因而需要无人机航空调查结合三维实景进行重点调查,对崩岗的侵蚀边界进行进一步的细化,得到更为准确的崩岗侵蚀边界数据。

过去崩岗调查中崩岗发育阶段的划分依靠个人经验进行判断,缺少定量依据。而基于三维激光扫描、RTK或无人机多期次DEM差分的侵蚀量计算,虽然能够获得较为准确的数据,但需要不同时间至少两期的扫描数据,并不适用于大范围的普查工作。基于 Sentinel-1 号数据的 SBAS-InSAR 差分干涉测量可以大范围获取区域形变点,优点在于效率高、成本低、数据易获取,在室内能够完成计算处理。通过 SBAS-InSAR 差分干涉测量得到形变速率点,在 GIS 软件中叠合,用于判定崩岗的活动阶段。活动型崩岗水土流失较为强烈,代表范围中的形变点视向形变速率较高。反之,则为相对稳定型崩岗。

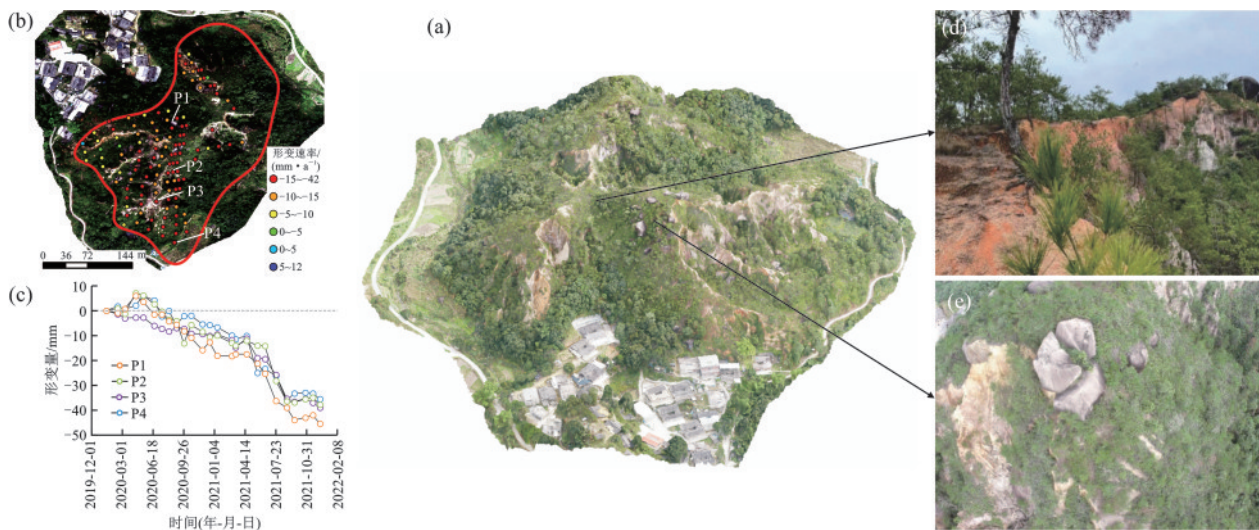
已有研究<sup>[11]</sup>表明,活动型崩岗可进一步划分为初期、中期和晚期,在侵蚀强度上,崩岗侵蚀强度等级,可以按轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈进行划分。通过 InSAR 技术得到的形变速率,可以进一步为划分崩岗的活动性、侵蚀强度提供定量依据。

#### 4.2 综合遥感方法效果分析

本次研究以安溪官桥地区为典型研究区,开展崩岗的综合遥感识别研究。本次识别崩岗总数 104 个,总面积约 2.82 km<sup>2</sup>,占全区总面积的 4.92%,发育

密度为 1.82 个/km<sup>2</sup>。区内崩岗以活动型为主,占总数的 62.5%,面积上为 1.97 km<sup>2</sup>,占总崩岗面积的 70%。区内崩岗发育类型,以瓢形、爪形为主,约占 104 个崩岗总数的 60%,其次依次为弧形 17 个、混合型 15 个、条形 10 个。

本研究以区内竹仔叶崩岗为例,详细说明整个综合遥感识别方法的技术流程。竹仔叶崩岗位于官桥镇镇中心西南方向,距离镇中心约 3.5 km(图 13a)。基于高分辨率遥感影像对其进行识别圈定,叠加 InSAR 技术反演形变监测点(图 13b)。由形变监测点中可知,竹仔叶崩岗分布大量高速率形变点,结合选定的 4 个特征点的形变量(图 13c)可知,2 a 内视向形变量接近 5 cm,代表强烈的水土流失。利用无人机并结合野外实地对其进行精细化调查,建立竹仔叶崩岗三维实景模型图。经测量计算竹仔叶崩岗最高点 258.78 m,最低点为 190.26 m,相对最大高差约为 68.52 m。竹仔叶崩岗所发育的岩性为浅肉红色似斑状中粗粒正长花岗岩。竹仔叶崩岗整体为爪形活动型崩岗,主要由 3 个方向坡顶方向侵蚀,形成系列侵蚀沟、崩壁,在水力侵蚀与重力崩塌相互作用下,形成山体剧烈的水土流失。由图 13d 可知,在坡面与坡顶地表有大量风化后留下粗粒的石英颗粒,由于山体的剧烈水土流失,导致山体中未风化的基岩出露,形成飞来石景观。当基岩周围覆土侵蚀流失后,基岩顺坡滑下,形成崩塌堆,带来地质灾害的隐患。



注:图 a 为竹仔叶崩岗三维实景模型;图 b 为 InSAR 监测结果叠加三维实景模型;图 c 为崩岗特征形变点视向形变量;图 d 为野外调查照片;图 e 为无人机航空调查照片。

图 13 竹仔叶崩岗综合遥感识别

Fig.13 Comprehensive remote sensing identification of Zhuzaiye Benggang

根据此处的形变速率可知,形变速率较高,范围内计算出 120 个 InSAR 形变点,平均速率为 -15.29 mm/a,该速率达到极强变形。同时,已有研究<sup>[24-25]</sup>表明,在 InSAR 反演中超出“平均值±1 倍标准差”之

外,可以被认为明显形变区域。经统计整个研究区经过 InSAR 反演得到平均形变速率为 -4.95 mm/a,标准差为 2.87 mm/a,竹仔叶崩岗平均形变速率为 -15.29 mm/a,已经超出“平均值±3 倍标准差”之

外,显示强烈侵蚀的特征。根据定量分析结果,可将竹仔叶崩岗在可进一步划分为中期活动型崩岗,在侵蚀强度上划分为剧烈侵蚀。

本次研究在安溪官桥构建并验证一套适用于南方花岗岩区崩岗综合遥感识别方法体系,即以高分辨率遥感影像对崩岗进行大范围识别,利用无人机、InSAR技术结合野外实地对重点区域进行精细化调查,利用InSAR技术对崩岗的活动特征进行定量判断,能够有效掌握崩岗侵蚀程度和水土流失情况。

### 4.3 研究局限性与不足

本次多源遥感组合技术为崩岗调查评价提供了新视角,多种技术的组合有助于该区域崩岗的定性和定量分析。本次研究也存在局限性和不足之处:1)对于高植被覆盖区域以及较为早期的崩岗均难以识别,不能完全替代实地人工调查的结果;2)本次主要对形变速率的统计关系从而进一步划分崩岗活动性、侵蚀强度,在将来研究中二者间关系需要更进一步明确;3)利用SBAS-InSAR技术虽能够探测到区域崩岗的变形情况,但受限于在高植被覆盖区域下,数据会失相干,即无法反演出形变点,导致无法对崩岗区域的变形情况进行判断;4)在本次研究中,计算得到大范围且长时间序列的InSAR观测数据,但缺少长时间内对崩岗侵蚀过程的定量分析,在下一步研究中,将进行改进。

## 5 结论

1)综合应用高分辨率遥感影像、无人机摄影测量、合成孔径雷达等分析处理技术,结合野外地质调查,可以有效提取区域崩岗信息,得到区域崩岗分布规律及活动特征,为该区域生态保护、植被恢复和防灾减灾提供数据支撑。

2)综合遥感方法应用在安溪官桥地区,本次识别崩岗总数104个,总面积2.82 km<sup>2</sup>,占全区总面积的4.92%,发育密度1.82个/km<sup>2</sup>。区内崩岗以活动型为主,占崩岗总数的62.5%,面积1.97 km<sup>2</sup>,占总崩岗面积的70%。从崩岗发育的类型看,以瓢形、爪形为主,约占崩岗总数的60%,其次依次为弧形17个、混合型15个、条形10个。

3)构建南方花岗岩区崩岗综合遥感识别方法体系,采用该方法进行大范围崩岗调查可以弥补单一方法手段的不足,提高效率,具有一定的应用价值。

4)本次研究主要应用于花岗岩区域内的崩岗,但由于崩岗发育会形成特定的形态,从而易于被遥感影像结合无人机影像所探测,而崩岗带来的强烈水土流失会产生强烈形变,从而被InSAR差分干涉测量中所识别,因此对于其他地质背景下发生的崩岗,该方法体系具有一定普适性。

### 参考文献:

- [1] 廖义善,唐常源,袁再健,等.南方红壤区崩岗侵蚀及其防治研究进展[J].土壤学报,2018,55(6):1297-1312.  
LIAO Y S, TANG C Y, YUAN Z J, et al. Research progress on Benggang erosion and its prevention measure in red soil region of southern China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(6): 1297-1312.
- [2] 林小慧,黄炎和,林金石,等.基于DPSIR模型的崩岗侵蚀风险评价及时空特征[J].农业工程学报,2023,39(18):123-131.  
LIN X H, HUANG Y H, LIN J S, et al. Risk assessment and spatial-temporal characteristics of Benggang erosion based on DPSIR model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(18): 123-131.
- [3] 邓羽松.南方花岗岩区崩岗特性、分布与地理环境因素研究[D].武汉:华中农业大学,2018.  
DENG Y S. Characteristics, distribution and geographical environmental factors of collapsing gully in granite region of southern China [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.
- [4] LIU X Y, ZHANG X W, KONG L W, et al. Formation mechanism of collapsing gully in southern China and the relationship with granite residual soil: A geotechnical perspective [J]. Catena, 2022, 210: e105890.
- [5] 邓羽松,蔡崇法.红壤丘陵区崩岗侵蚀调查与监测防治技术进展[J].土壤学报,2025,62(2):322-333.  
DENG Y S, CAI C F. Progress of survey, monitoring, and control technology of Benggang erosion in red soil hilly area [J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(2): 322-333.
- [6] 夏栋.南方花岗岩区崩岗崩壁稳定性研究[D].武汉:华中农业大学,2015.  
XIA D. Research on stability of collapsing gully wall in granite region of South China [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [7] 郭飞,蒋广辉,黄晓虎,等.环境因子组合和负样本选取策略对花岗岩区崩岗易发性评价的影响[J].农业工程学报,2024,40(1):191-200.  
GUO F, JIANG G H, HUANG X H, et al. Impact of environmental factor combinations and negative sample selection on Benggang susceptibility assessment in granite areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(1): 191-200.
- [8] 丁光敏.福建省崩岗侵蚀成因及治理模式研究[J].水土保持通报,2001,21(5):10-15.  
DING G M. Causes and control patterns of collapse gully erosion in Fujian Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(5): 10-15.
- [9] DENG Y S, CAI C F, XIA D, et al. Soil Atterberg limits of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region of southern China [J]. Solid

- Earth, 2017, 8(2): 499-513.
- [10] 葛宏力, 黄炎和, 蒋芳市. 福建省崩岗发生的地质和地貌条件分析[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 128-131.  
GE H L, HUANG Y H, JIANG F S. Geologic and geomorphologic conditions for slope collapse occurrences in Fujian[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(2): 128-131.
- [11] 程冬兵, 张晶鑫, 郭飞, 等. 南方崩岗调查内容与方法探讨[J]. 中国水利, 2024(6): 68-72.  
CHENG D B, ZHANG J X, GUO F, et al. Discussion on the content and method of slope collapse investigation in Southern China[J]. China Water Resources, 2024(6): 68-72.
- [12] 李双喜, 桂惠中, 丁树文. 中国南方崩岗空间分布特征[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(1): 83-86.  
LI S X, GUI H Z, DING S W. Features of special layout of hill collapse in South China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2013, 32(1): 83-86.
- [13] 冯明汉, 廖纯艳, 李双喜, 等. 我国南方崩岗侵蚀现状调查[J]. 人民长江, 2009, 40(8): 66-68.  
FENG M H, LIAO C Y, LI S X, et al. Investigation on status of hill collapsing and soil erosion in southern China[J]. Yangtze River, 2009, 40(8): 66-68.
- [14] 张铁洋, 陈峰云, 邓羽松, 等. 基于CORS-RTK结合GIS的崩岗侵蚀调查方法及应用[J]. 中国水土保持, 2019(2): 47-49.  
ZHANG T Y, CHEN F Y, DENG Y S, et al. Study on collapsing gully erosion survey method and application based on CORS-RTK and GIS[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(2): 47-49.
- [15] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957-966.  
XU Q, DONG X J, LI W L. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957-966.
- [16] 刘洁, 廖凯涛, 宋月君, 等. 基于GF-2号卫星数据的崩岗提取研究[J]. 地理空间信息, 2021, 19(11): 85-87.  
LIU J, LIAO K T, SONG Y J, et al. Research on collapsed erosion extraction based on GF-2 satellite images[J]. Geospatial Information, 2021, 19(11): 85-87.
- [17] 沈盛斌, 赵元凌, 程冬兵, 等. 基于无人机遥感技术的崩岗快速调查方法[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(4): 43-47.  
SHEN S Y, ZHAO Y L, CHENG D B, et al. An efficient method of investigating slope collapse by unmanned aerial vehicle remote sensing[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2018, 35(4): 43-47.
- [18] 刘希林, 张大林. 基于三维激光扫描的崩岗侵蚀的时空分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 204-211.  
LIU X L, ZHANG D L. Temporal-spatial analyses of collapsed gully erosion based on three-dimensional laser scanning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(4): 204-211.
- [19] 谭泽创. 基于无人机LiDAR的崩岗侵蚀区点云优化处理与侵蚀量监测研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2025.  
TAN Z C. Optimization of point cloud processing and erosion volume monitoring in Benggang erosion area based on UAV LiDAR[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2025.
- [20] 陈志明, 林敬兰, 许永明, 等. 安溪县崩岗侵蚀防治分区探讨[J]. 亚热带水土保持, 2010, 22(1): 14-18.  
CHEN Z M, LIN J L, XU Y M, et al. Study on the control system for collapsing gully erosion in Anxi County[J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2010, 22(1): 14-18.
- [21] 陆会燕, 李为乐, 许强, 等. 光学遥感与InSAR结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(9): 1342-1354.  
LU H Y, LI W L, XU Q, et al. Early detection of landslides in the upstream and downstream areas of the baige landslide, the Jinsha River based on optical remote sensing and InSAR technologies[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(9): 1342-1354.
- [22] 杨成生, 魏春蕊, 魏云杰, 等. 基于多源遥感影像的西藏白格滑坡失稳前后全过程形变监测研究[J]. 自然资源遥感, 2025, 37(3): 203-211.  
YANG C S, WEI C R, WEI Y J, et al. Whole-process deformation monitoring of the Baige landslide in Tibet before and after instability based on multisource remote sensing images[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2025, 37(3): 203-211.
- [23] 张利军, 贺思睿, 张建东, 等. 多源遥感技术支持下的滑坡地灾隐患识别: 以常澧地区为例[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(2): 173-187.  
ZHANG L J, HE S R, ZHANG J D, et al. Identification of landslide hazards based on multi-source remote sensing technology: A case study of the Changli area in Hunan Province[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(2): 173-187.
- [24] 朱厦, 李强, 倪少峰, 等. 基于SBAS-InSAR技术的龙岩市输电线路周围滑坡灾害监测研究[J]. 遥感技术与应用, 2025, 40(6): 1598-1608.  
ZHU X, LI Q, NI S F, et al. Monitoring research on landslide disasters along power transmission lines in Longyan City using SBAS-InSAR technology[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2025, 40(6): 1598-1608.
- [25] ZHANG X L, GAN S, YUAN X P, et al. Slope deformation monitoring and early identification of disasters in debris flow source area of Baini River, Dongchuan District, China[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: e1000736.