

飞马无人机在四川省地质灾害隐患遥感识别监测项目中的应用

投稿人：王夏 王德富 范亚军 刘立 盛帅 王之栋

《自然资源部第三地理信息制图院》

摘要：

本文通过四川省地质灾害隐患遥感识别监测项目，介绍了飞马 D2000 无人机开展外业仿地飞行、内业航空影像处理、机载 LiDAR 数据处理的操作流程，以及飞马无人机在该项目中的优势。本文以木里藏族自治县唐央乡瓦朗村滑坡无人机数据成果为例，分析了无人机影像和 LiDAR 成果在地质灾害综合遥感识别中的应用。本项目通过高精度光学遥感+InSAR、无人机航拍+LiDAR、地面调查核实+监测的“三查”体系，采用 ESRI 公司 ArcGIS Server 进行成果发布，构建地质灾害隐患三维管理一张图平台。

关键词：

飞马无人机；倾斜摄影；机载 LiDAR；仿地飞行；地质灾害监测；三维管理平台

1 项目背景

四川省位于我国陆地地势第一级青藏高原和第二级长江中下游平原的过渡带，地貌东西差异大，地形高差悬殊，地质构造复杂，河流切割强烈。近年来受“5.12”汶川特大地震、“4.20”芦山强烈地震、“8.8”九寨沟强烈地震等地震和极端气候的影响，以及人类工程活动对地质环境的扰动加剧，地质灾害显著增多，呈现点多面广、类型多、规模大、成因复杂、发生频率高、防范难度大等特点，地质灾害隐患调查工作实施周期长、效率低、存在盲区等突出问题，新技术、新方法应用程度低。

为全面落实党中央、国务院加强地质灾害防治体系建设新要求，提升四川省地质灾害隐患的风险管控能力，四川省国土空间生态修复与地质灾害防治研究院于 2020 年立项组织实施四川省地质灾害隐患综合遥感识别监测（2020 年）项目。项目计划主要运用由高精度光学遥感+InSAR 的“普查”、机载 LiDAR+无人机航拍的“详查”、地面调查核实+监测的“核查”共同组成的“天空地”一体化的“三查”体系，有针对性地持续开展地质灾害隐患早期识别与监测评价工作，实施基于地质灾害隐患遥感识别监测，使其成为四川省地质灾害防范工作的重要组成部分，并依靠科学技术进步提升四川省地质灾害防治工作的创新能力和科技水平。

2 项目概况

2.1 任务内容

本次项目需收集任务区已有地质灾害详细调查成果资料，采用哨兵雷达数据和高分辨率光学卫星数据，开展川西南地区 1:10 万地质灾害隐患 InSAR 监测和光学遥感筛查，发现和圈定高位地质灾害隐患点或疑似“靶区”。选取任务区高烈度地震扰动区重大泥石流、重大

地质灾害隐患点或处于持续变形的重大工程治理点，开展 1: 5000 机载 LiDAR、无人机航拍数据采集及遥感追踪监测评价，任务量不少于 20km²。结合地质灾害解译、航飞和调查成果，建设地质灾害隐患点三维管理平台。

2.2 测区特点

工作区位于四川省眉山市、乐山市、凉山州、攀枝花共 4 个市（州），共计 39 个县，总面积约 8.77 万平方千米，人口约 1212.6 万。本次工作利用 Sentinel-1、ALOS-2 卫星 SAR 数据，采用 D-InSAR、Stacking、SBAS 三种监测方法。完成 4 个市（州）39 个县（区）的 InSAR 形变隐患提取，共解译疑似地质灾害点 370 处，其中新增地质灾害形变点 253 处，已知灾害形变点 117 处。隐患点分布如图 1 所示。

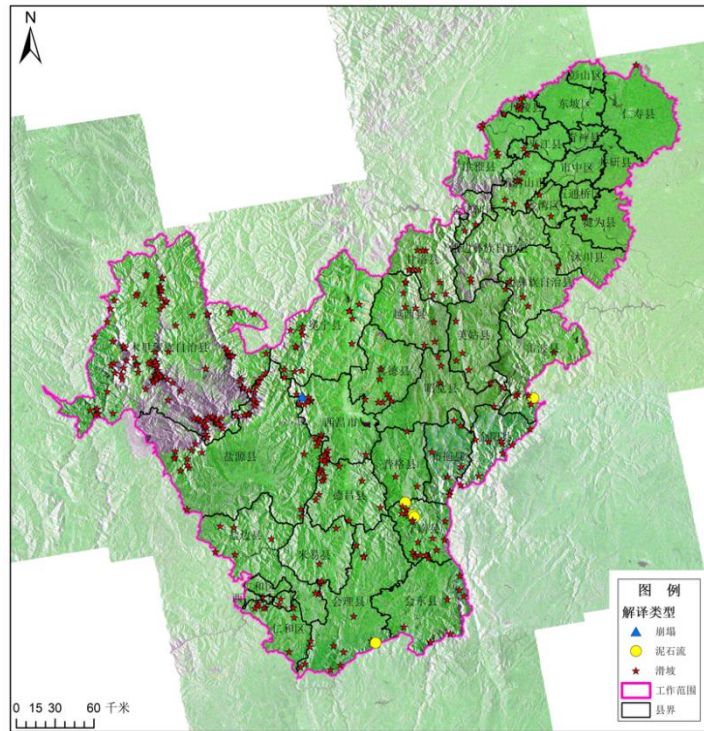


图 1 川西南地区 InSAR 形变隐患分布图

2.3 设备选用

本次任务区分布在四个市州，地形地貌和海拔差异较大。且重点地段地质灾害隐患点多处于高山或峡谷地带，无人机飞行难度较大。因此对无人机飞行平台提出了很高的性能要求，主要包括以下几点：

(1) 飞行平台作业精度航空摄影测量和机载 LiDAR 均需满足 1: 5000 成图精度，具体精度指标见表 1、表 2：

表 1 航飞影像质量要求

调查比例	地形类别	影像分辨率	平面位置中误差
1:5000	平原、丘陵	0.2	2.5
	山地、高山地	0.2	3.7

表 2 点云密度要求

调查比例尺	林分郁闭度	点云密度（点/平方米）
1:5000	[0.7, 1]	[15, 20)
	[0.2, 0.69)	[10, 15)

	[0, 0.2)	[2, 4)
--	----------	--------

(2) 任务区包含平原、丘陵、高原多种地形，尤其是在高原地区，虽本次飞行任务最高起飞海拔仅 3000 米左右，但为了确保任务顺利开展，并保障飞行安全，要求飞行平台具有至少 4500 起飞海拔的能力。

(3) 重点地段地质灾害隐患点多处于高山或峡谷地段，个别隐患点位于断壁处，作业区域高差最大达 1000 余米，故要求飞行平台必须具有稳定可靠的仿地飞行和避障功能。

(4) 航飞任务区普遍地物较少，多为植被、耕地或裸露地表，且地势陡峭，像控点布设困难，故飞行平台应具备高精度 GNSS 差分性能，在免像控模式下仍然能满足精度要求。

(5) 本次飞行任务分布较广，且工期紧张。为保证任务顺利进行，要求飞行平台具备高安全性、高效率、高智能化等特点。

根据数据质量要求，我院在充分考虑任务区地形情况和气候条件后，开展多种航飞平台对比调研，最终选择飞马 D2000 航测系统作为外业航摄平台，选择 D-OP3000 倾斜摄影模块和 D-LiDAR2000 激光雷达载荷为传感器，开展外业航飞（如图 2）。



图 2 飞马 D2000 航测系统 + D-OP3000/D-LiDAR2000

3 技术路线

根据重大地质灾害隐患点情况，分为多个区域开展无人机数据获取。开展任务区空域申请，根据任务区地形地貌、气象等进行航线设计；开展系统综合检校，检查航电系统，消除系统误差和其他干扰因素；开展飞行检校，计算安置角误差，并记录相关误差值；利用无人机搭载激光扫描仪和倾斜相机获取任务区机载 LiDAR 和航空影像，同步开展地面控制测量与飞行期间的基站观测工作；基于基站观测成果（或 CORS 站）成果，开展 POS 解算与后差分处理，生成高精度 POS 成果与航迹线成果；基于高精度 POS 成果、激光测距成果与飞行检校成果联合计算，生成激光点云成果；基于生成的 las 格式的激光点云成果，进行点云初级去噪与航带平差工作；基于控制测量成果，开展坐标转换与高程拟合，将点云转成 CGCS2000 坐标系。

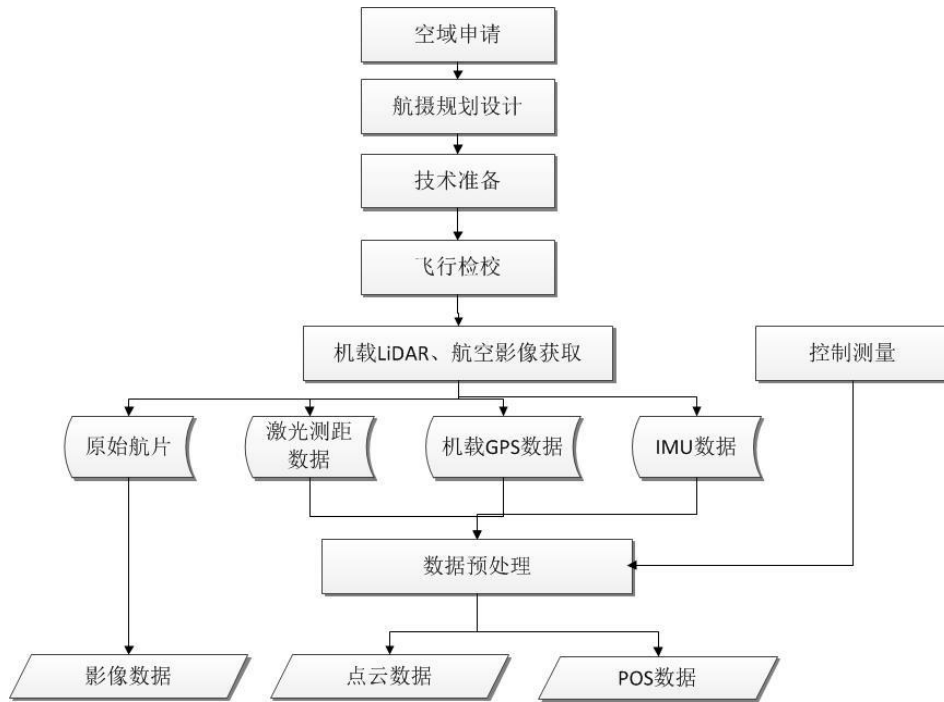


图 3 无人机航空数据获取与处理流程

4 无人机数据获取及处理

4.1 无人机航空数据获取

在室内 InSAR 监测、光学遥感解译基础上，结合野外调查“聚居点、人口集中区、县城、学校、大江大河”等威胁对象，对全域 39 个县遥感结果综合判断，选取了潜在重大地灾风险点、InSAR 典型点、需重点排查但又位于 InSAR 盲区等部位作为重大典型监测区域。

本项工作于 2021 年 4 月至 7 月期间，共获取了 15 个 1:5000 典型点 24 平方千米的平均点云密度为优于 150 点/平方千米的机载 LiDAR 数据和地面分辨率优于 0.2 米的航空影像数据，具体数据获取区域情况如表 3、图 4。

表 3 无人机航测数据情况表

编号	类型	经度	纬度	位置	获取面积 (km ²)
511132210019	滑坡	103° 22' 59.382	29° 16' 44.032"	峨边县白杨乡	0.26
511132210021	滑坡	103° 12' 49.851	29° 5' 56.782"	峨边县勒乌乡	0.96
513435210021	滑坡	102° 50' 0.81"	28° 48' 18.467"	甘洛县吉米镇	2.17
513432210029	滑坡	102° 19' 21.031	28° 19' 23.972"	喜德镇拉克乡	1.14
513432210020	滑坡	102° 24' 22.490	28° 19' 34.832"	喜德镇县城	1.7
513432230034	泥石流	102° 16' 45.124	28° 7' 1.433"	喜德镇红莫镇	0.3
513434220013	崩塌	102° 36' 32.932	28° 49' 24.093"	越西县	0.3
513426210042	滑坡	102° 54' 0.735"	26° 21' 39.288"	会东县老君滩乡	0.99
513426210043	滑坡	102° 54' 38.581"	26° 21' 21.580"	会东县老君滩乡	2.98
513425210035	滑坡	101° 53' 43.744"	26° 8' 59.804"	会理县绿水镇	0.40
510421210031	滑坡	101° 56' 4.702"	26° 48' 4.986"	米易县	0.82
510411220014	崩塌	101° 52' 57.821	26° 14' 52.984"	仁和区	2.18
513422210229	滑坡	100° 36' 52.009"	28° 10' 8.659"	木里县水洛乡古尼村	2.47
513422210030	滑坡	100° 43' 8.271"	28° 14' 21.794"	木里县水洛乡耶伊	2.82

513422210107	滑坡	100° 55' 25.222"	28° 40' 47.713"	木里唐央乡	4.74
--------------	----	------------------	-----------------	-------	------

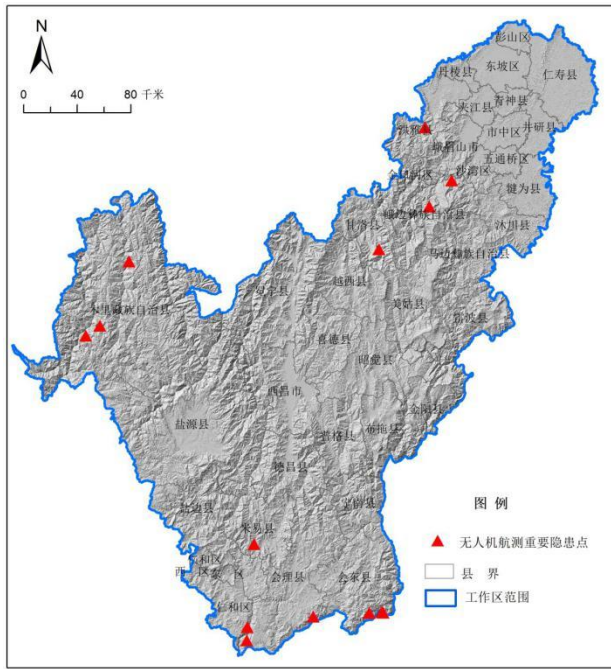


图 4 川西南地区重大地灾隐患点 1:5000 无人机航测位置分布图

4.2 优于 0.2 米航空影像处理

无人机航空影像处理采用 D2000 配套的“无人机管家专业版（测量版）”软件进行，由于项目设计中对 DOM 精度要求较低，本次采用免像控模式进行，对各区域进行空中三角测量，通过光束法区域网整体平差，得到加密点成果；基于加密成果生产数字正射影像。

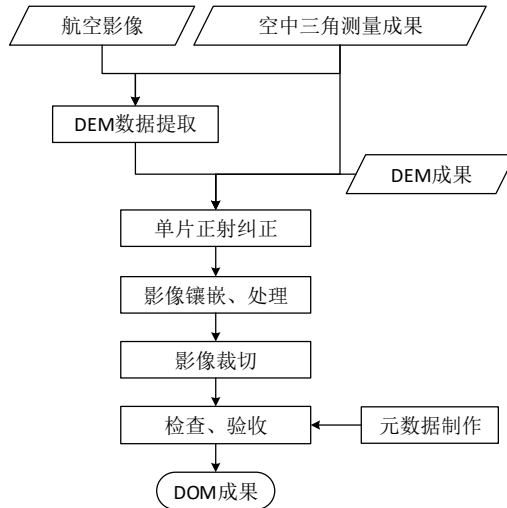


图 5 数字正射影像生产流程图

4.2.1 数据检查和预处理

(1) 原始数据检查。主要包括两部分内容：流动站端下载的原始观测数据；影像。主要检查项有：流动站下载文件是否完整，影像是否有损坏、虚焦、不清晰等现象，还需结合机载 POS 及影像进行数据一致性检查，确认原始影像空中照片和机载 POS 数量一致。

(2) 预处理。预处理主要包括差分解算、坐标转换、数据整理等。为了获取高精度差分 POS，需要进行差分解算，从而实现无控或稀少控制点成图。由于测量成果要求平面坐标系为 CGCS2000，3 度带投影，高程为国家 85 高，需要对 POS 数据进行坐标转换，将经纬度坐标转换为所需平面投影坐标及高程系统。处理数据前，对多架次照片及 POS 进行数据整理，实现照片规范命名及 POS 数据与照片能一一对应。

4.2.2 空中三角测量

利用“无人机管家专业版（测量版）”软件“智拼图”模块，以无人机数码航片及经解算后的高精度 POS 为空中三角测量的原始数据，运用“智拼图”模块进行光束法区域网平差，解算得到航空影像对应的外方位元素。

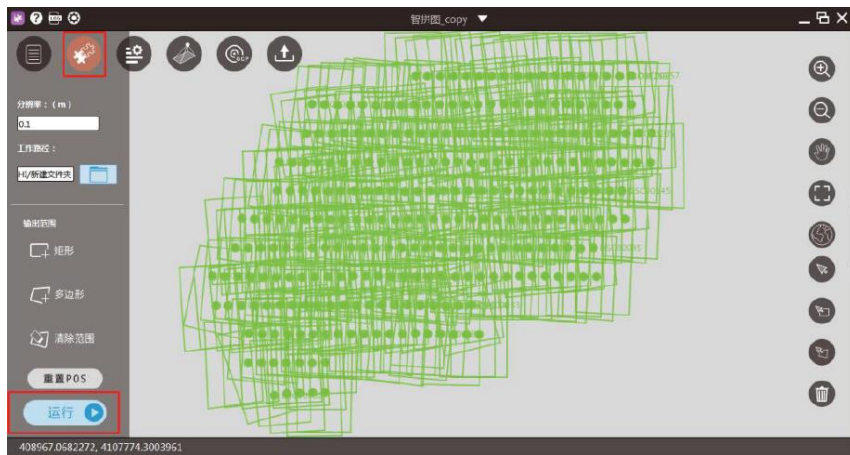


图 6 空中三角测量

4.2.3 数字正射影像生产

平差后，在智拼图主界面进行成果输出，可设置不高于默认值的分辨率，输出路径，及输出范围，即可进行正射影像输出。针对本次项目，将 DOM 成果制作为正射影像遥感解译图（如图 7）。

木里县唐央乡瓦朗村滑坡遥感解译图

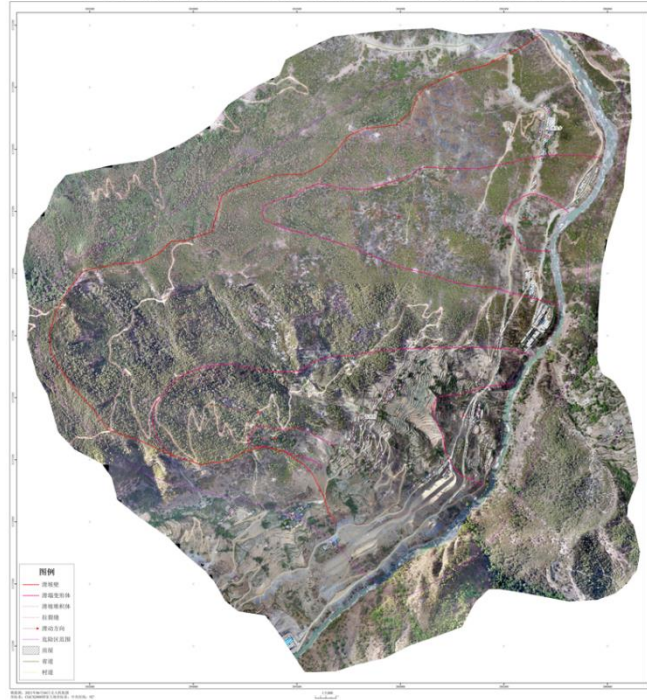


图 7 遥感解译图-DOM

4.3 机载 LiDAR 数据处理

机载 LiDAR 数据处理的目的是基于原始点云数据通过房屋、植被等非地面点剔除，保留地面点并基于此成果生产数字高程模型（DEM），数据处理工艺流程如下图 8 所示。主要包括数据预处理及点云数据后处理两个过程。

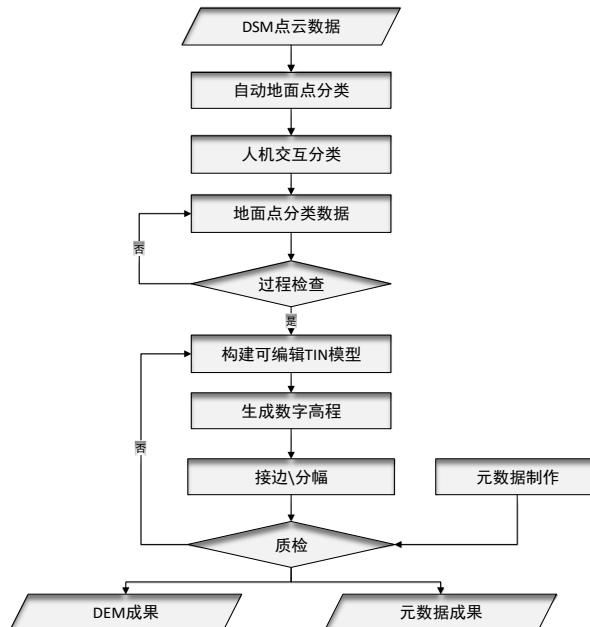


图 8 机载 LiDAR 数据处理生产 DEM 生产工艺流程

4.3.1 数据预处理

数据预处理目的是为数字高程模型生产做好数据准备。包括：数据准备、点云轨迹解算、点云解算、质量检查、去冗余、坐标转换、精度检查、导出标准点云或点云编辑等步骤。完成数据预处理步骤后，可将点云成果导出成标准 LAS 格式。

4.3.2 点云数据后处理

主要包括数据去噪、点云自动分类、点云手动分类、数据编辑、断裂线、点云精度检查、成果输出。

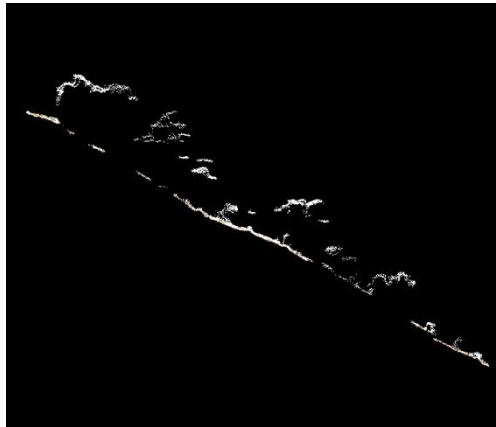


图 9 未去除植被前点云剖面

图 10 去除植被后点云剖面

经过后处理的点云数据可选择输出格式、点云类别，对点云分类成果及 DEM 成果进行输出。针对本次项目，将 DEM 成果制作山体阴影遥感解译图（如图 11）

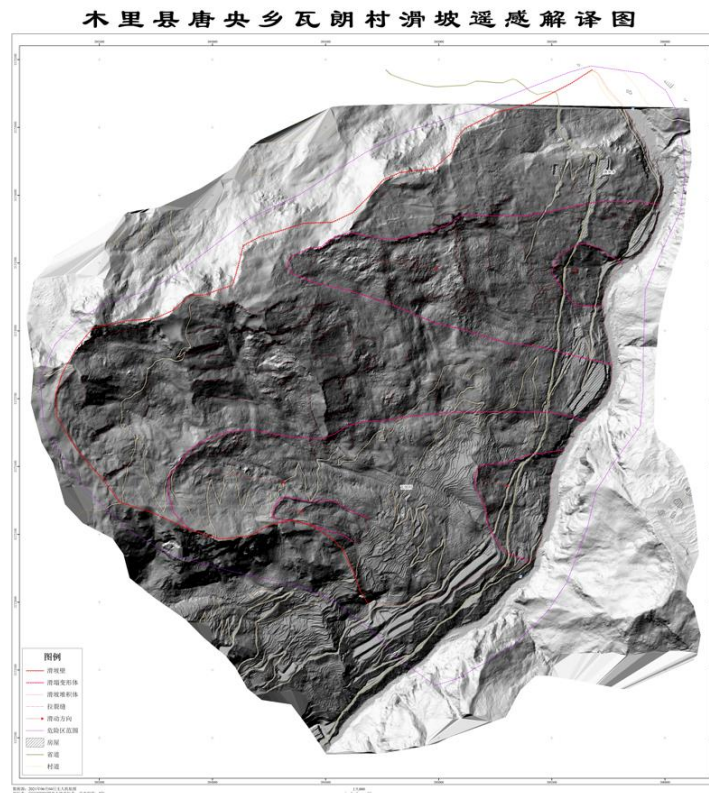


图 11 遥感解译图-DEM

5 无人机数据成果分析

本文将对木里藏族自治县唐央乡瓦朗村滑坡无人机数据成果展开样本分析：

5.1 隐患点概况

瓦朗村滑坡位于里藏族自治县唐央乡，经度 $100^{\circ} 55' 14''$ ，纬度 $28^{\circ} 40' 18''$ 。滑坡位于理塘河右岸第一斜坡带，滑坡前缘直抵河道，后缘至斜坡后缘，坡脚高程 2630m，坡顶高程 3540m，高差约 910m。光学影像上，滑坡整体浅绿色、黄褐色，纹理较粗糙，滑坡平面形态近似呈梨形；滑坡前缘以河道为界，影像上可见滑塌变形迹象，呈灰白色，纹理较粗糙，滑坡挤压河道，河道局部弯曲；滑坡后缘以山脊陡坎为界，影像上可见新近滑塌陡坎，呈灰白色，纹理较粗糙，边界呈圆弧状、陡坎状，边界明显；滑坡两侧以山脊陡坎为界，山脊呈线状分布，坡脚可见早期崩滑堆积体，坡顶发育陡坎，植被覆盖茂密，色调为浅绿色。



图 12 瓦朗村滑坡三维影像图

5.1.1 选用数据源

本次解译采用 2020 年 03 月 24 日的高分一号、2020 年 05 月 05 日高分二号卫星影像和 2021 年 06 月 04 日无人机航测影像，以及 2019 年 01 月 02 日到 2020 年 12 月 30 日哨兵（Sentinel-1A）SAR 卫星数据，开展了瓦朗村滑坡地质灾害遥感特征研究。

表 4 瓦朗村滑坡地质灾害特征研究遥感数据源统计表

序号	日期	数据类型	分辨率 (m)
1	20200324	高分一号	2.0
2	20200505	高分二号	0.8
3	20210604	无人机航空影像	0.1
4	20210604	机载 LiDAR 数据	/
5	20180102~20200714	Sentinel-1A	20

5.1.2 地质环境条件

滑坡所在区域地形地貌为一低山地貌，滑坡前缘发育河道地貌，滑坡中后部微地貌为一中陡斜坡，中前部为一缓坡堆积体。滑坡前缘高程为 2630m，后缘高程 3540m，整体坡度约

为 21° ，滑源区坡度大于 30° ，滑坡堆积区坡度为 $18^{\circ} \sim 28^{\circ}$ 。

5.2 综合遥感识别

5.2.1 光学遥感特征

根据无人机航摄影像（图 13），滑坡体上发育多处次级滑体，其中二级次级滑塌发育 2 处，三级次级滑体发育 3 处。影像上次级滑体一般呈灰褐色、浅绿色，纹理较粗糙，后缘发育下挫陡坎，一般呈弧状。

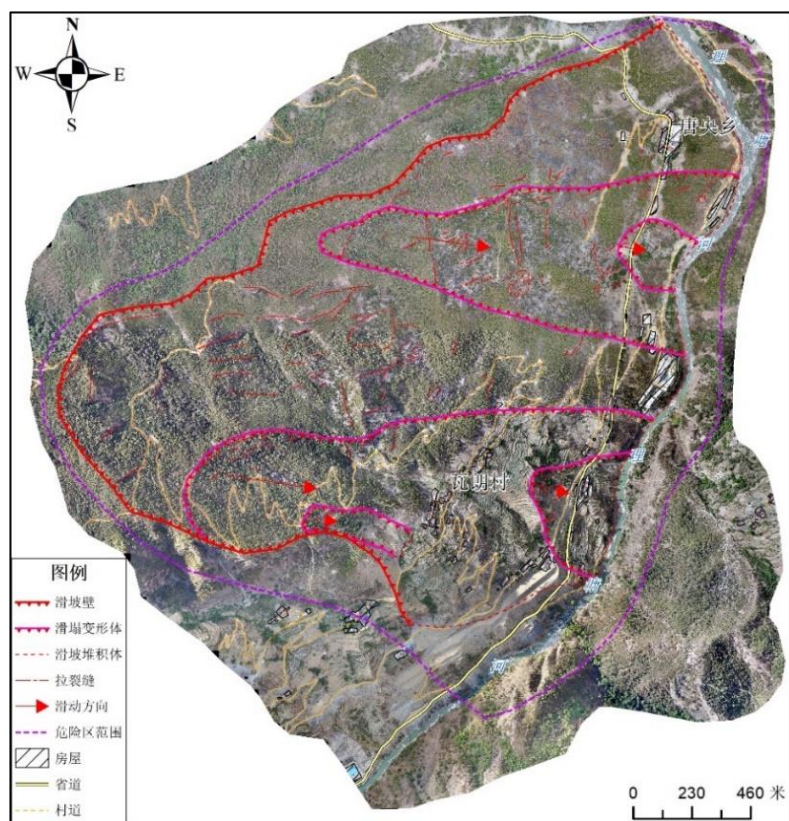


图 13 瓦朗村滑坡无人机影像解译图

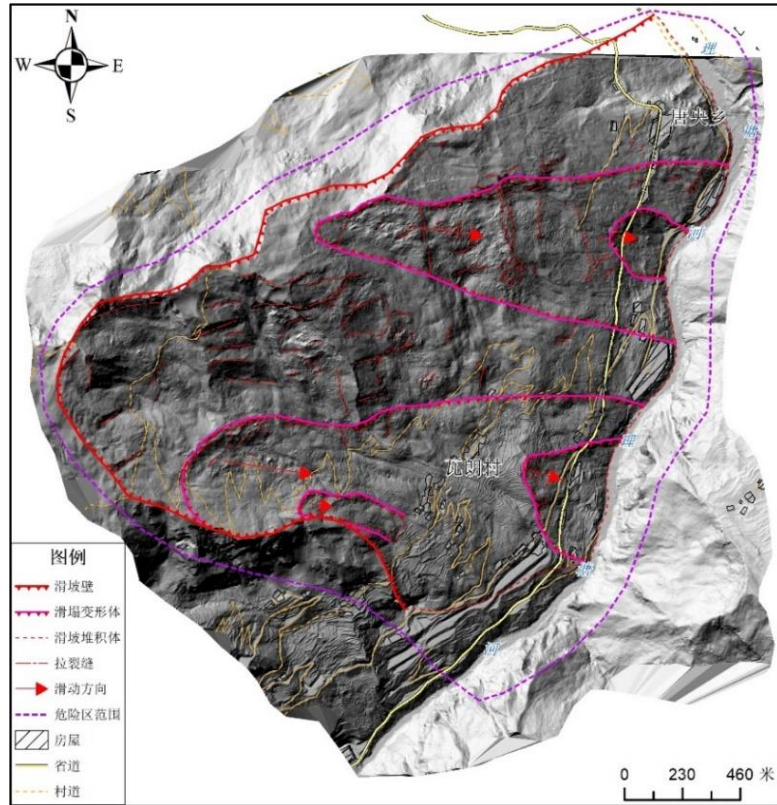


图 14 瓦朗村滑坡无人机 LiDAR 解译图

通过无人机 LiDAR 航摄技术，获取得到滑坡区的高精度 DEM 数据，根据 DEM 数据得到的山体阴影图（图 14），对滑坡的变形特征进行了进一步解译。从图 6-7 可以看出，滑坡边界轮廓清晰，滑坡体为古滑坡体，古滑坡地形特征明显，坡体整体坡度较陡，坡体后缘与两侧滑坡壁明显；滑坡体上发育多处次级滑体，次级滑体一般后缘陡坎发育，多呈不规则状、半圆形或弧形；滑坡上发育多条拉裂缝或拉裂陡坎，大部分走向与主滑方向近垂直。

5.2.2 InSAR 监测形变特征

结合瓦朗村滑坡形变特点，坡体范围内布设了 3 个 InSAR 形变监测点，分别编号为 P1~P3（图 15）。

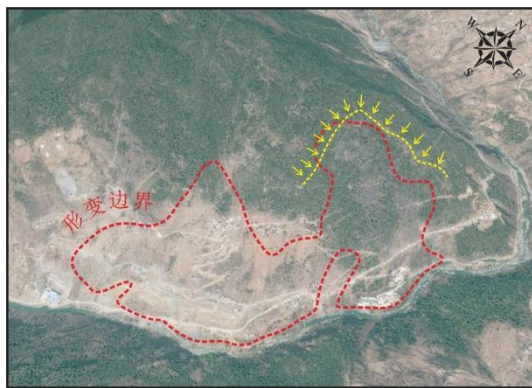


图 15 瓦朗村滑坡 InSAR 形变监测点

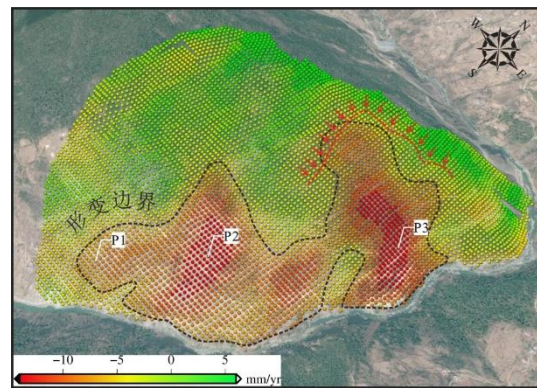


图 16 瓦朗村滑坡 InSAR 形变速率图

唐央乡瓦朗村形变区在监测时段 2017 年 12 月至 2020 年 11 月期间年平均形变速率分布如图 16 所示，其中红色点表示地面远离卫星移动，速率为负值，绿色点代表在监测时段内相对稳定。从图 16 可以看出，古尼村滑坡在监测时段内的年平均形变速率介于 $-14 \sim 6$ mm/year 之间。从图中可以看出，该坡体形变区范围较大，但在监测时段形变速率较小，最

大年平均形变速率不超过 14 mm/year。

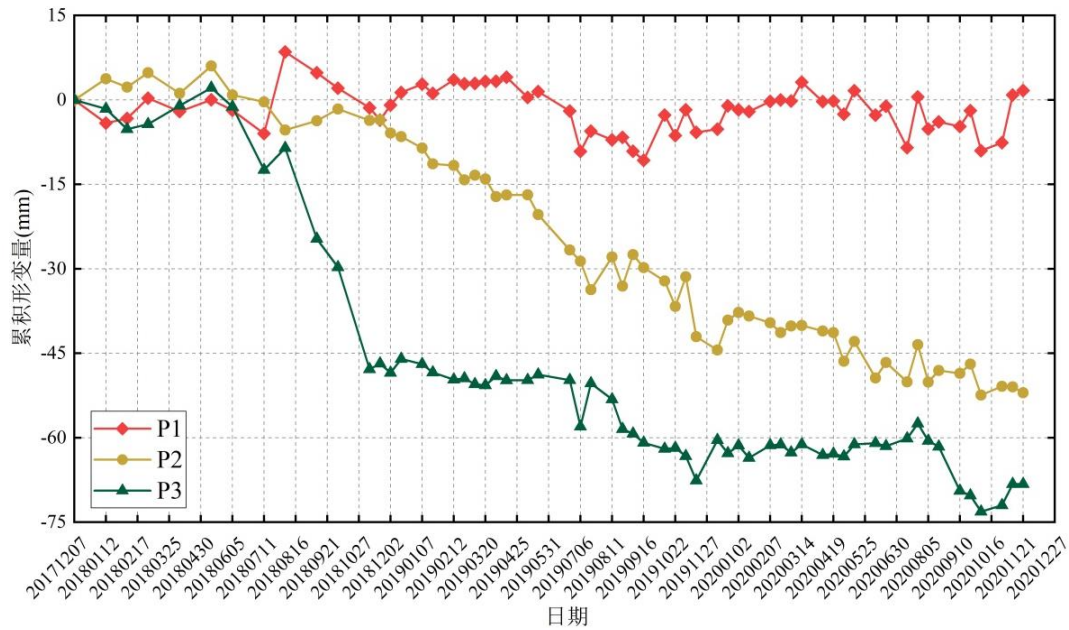


图 17 瓦朗村滑坡 InSAR 监测点形变时间序列曲线

在唐央乡瓦朗村形变区坡体上提取点位形变时间序列,点位分布如图 5-5 所示,为 P1~P3。其中, P1 点位于形变区西南侧形变量较小的区域, P2 位于西南侧明显形变区域, P3 位于形变区东北侧形变最为明显的区域,其中, P3 为形变最为明显形变区域。点 P1~P3 形变时间序列曲线如图 17 所示,从图中可以看出三个点在 2017 年 12 月至 2018 年 6 月期间均处于稳定状态。P1 形变量级较小,在整个监测时段处于相对稳定状态,年平均形变速率为 3.98 mm/year,累积形变量波动变化也较小,最大累积形变量不超过 15 mm。

P2 在 2018 年 6 月之前一致处于稳定状态,累积形变量不超过 5 mm,在 2018 年 6 月之后累计形变量持续增加,在 2018 年 9 月至 2019 年 11 月形变速率较大,2019 年 11 月之后形变速率较之前放缓。P3 处于形变区形变信号最明显的区域,其在监测时段的累积形变量也最大,最大累积形变量达到 68.23 mm,年平均形变速率为 10.76 mm/year。但 P3 点在 2018 年 4 月至 2018 年 12 月期间处于加速形变阶段,2018 年 12 月之后形变速率放缓。

3、综合遥感判识

根据上述解译结果,分析得到瓦朗村滑坡精细化解译图(图 18)。滑坡纵长约 2430m,底宽约 2170m,主滑方向 92° ,平面面积约为 $354.62 \times 10^4 \text{m}^2$,估算体积约为 $8865.58 \times 10^4 \text{m}^3$ 。坡体上发育 5 处次级滑体,其中 2 处二级滑体,3 处三级滑体(表 5);发育拉裂缝 149 处,遍布滑坡后缘、中部及前缘,其中最长 317m。

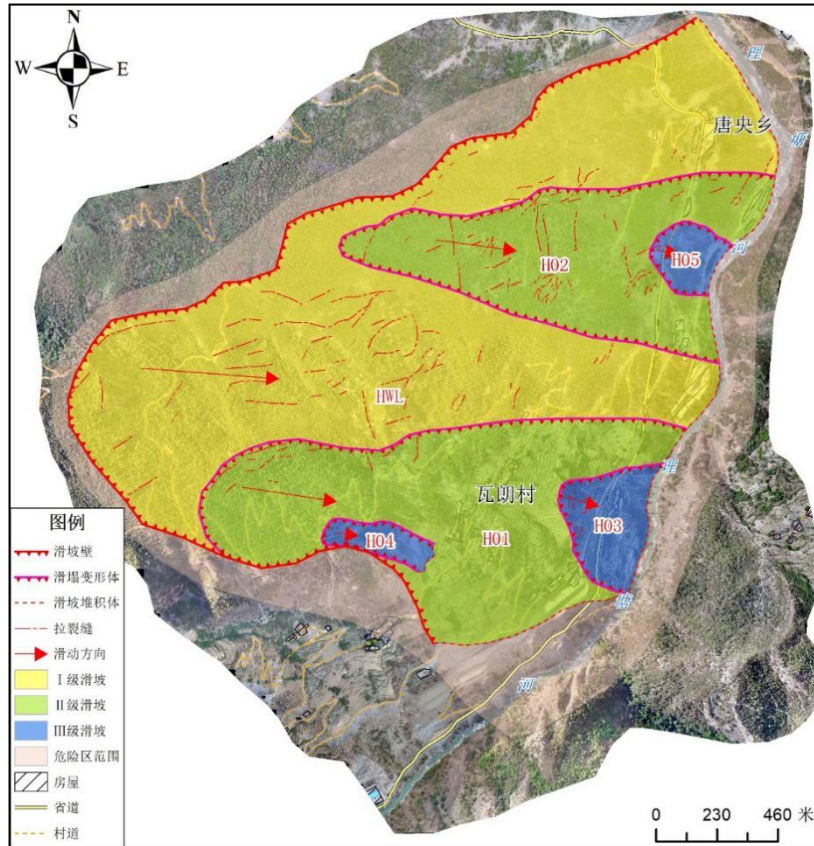


图 18 瓦朗村滑坡精细化解译图

表 5 瓦朗村滑坡次级滑体解译统计表

编号	等级	经度	纬度	面积/m ²
HWL	I 级滑坡	100° 55' 24.811"	28° 40' 35.191"	3546233
H01	II 级滑坡	100° 55' 24.793"	28° 40' 15.610"	1006281
H02	II 级滑坡	100° 55' 42.269"	28° 40' 47.519"	654827
H03	III 级滑坡	100° 55' 45.851"	28° 40' 14.717"	120468
H04	III 级滑坡	100° 55' 14.085"	28° 40' 12.244"	46229
H05	III 级滑坡	100° 55' 56.490"	28° 40' 47.421"	56920

5.3 无人机航摄遥感精细解译

采用 2021 年 06 月 04 日无人机航测影像和机载 LiDAR 数据对瓦朗村滑坡进行精细解译，详细解译了滑坡的边界特征和变形特征。根据滑坡的变形特征，对滑坡的成灾模式、发展趋势和危害情况进行了分析。

5.3.1 边界特征

根据无人机影像及现场调查结果，瓦朗村滑坡边界特征明显。滑坡后缘及两侧以山脊为界，滑坡前缘直抵河道并挤压沟床。结合滑坡边界特征，可以看出滑坡中前部坡度稍缓，堆积体上有大量居民住房，并修建有乡村道路和省道；滑坡中后部植被覆盖茂密，地形稍陡，影像上可见基岩出露，发育基岩陡坎。坡体上的次级滑坡发育，其后缘陡坎清晰可见，形成长大拉裂陡坎。滑坡前缘边界直抵河道，轻微挤压河道，部分区域开垦为耕地。（如图 19）

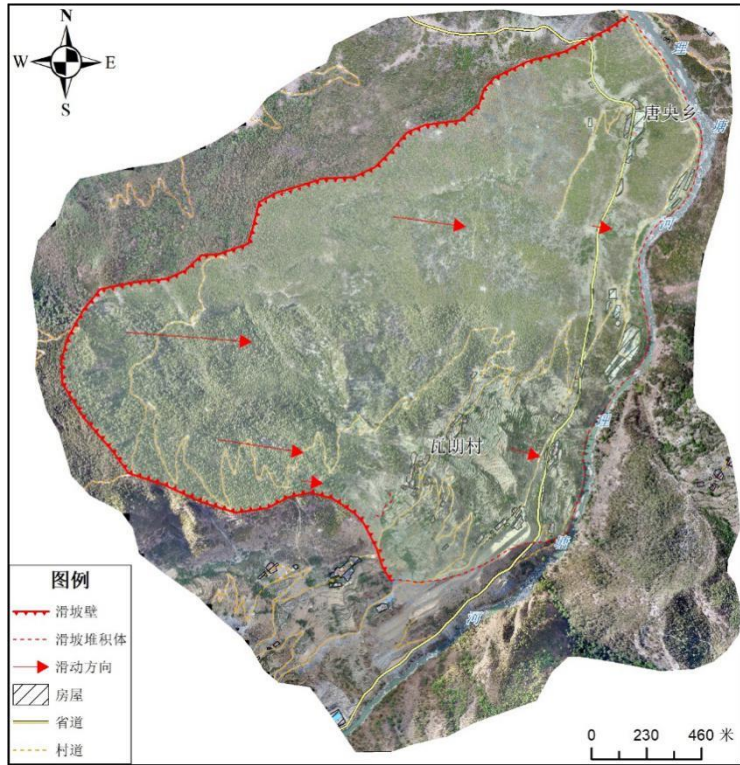


图 19 瓦朗村滑坡边界及分区图

5.3.2 变形特征

据现场调查访问，目前滑坡整体基本稳定，坡体上部发育多处次级滑塌变形，如前所述，滑坡坡表发育 5 处次级滑体，其中 2 处为二级滑体，分别位于滑坡的左侧和右侧；3 处为三级滑体，其中 2 处位于 H01 次级滑坡上，1 处位于 H02 次级滑体上（图 20~图 29）。

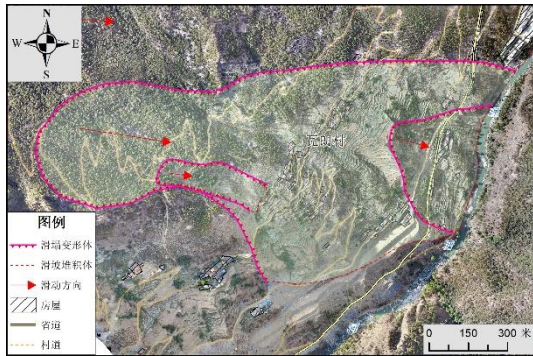


图 20 H01 滑塌无人机影像

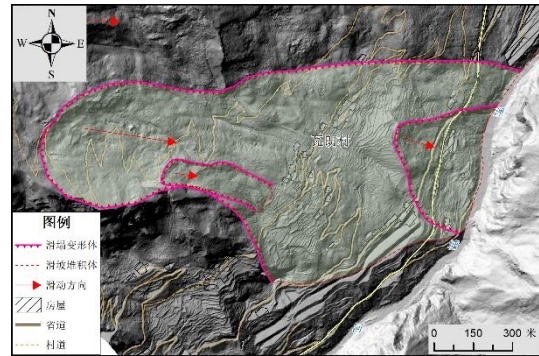


图 21 H01 滑塌 DEM 山体阴影

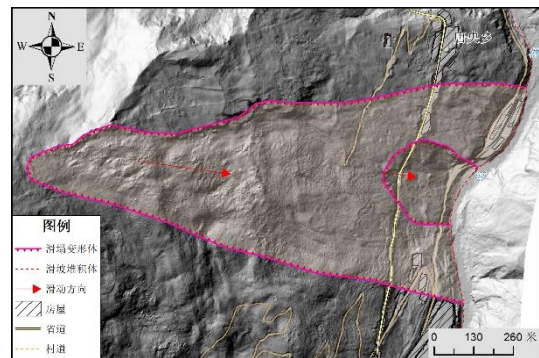
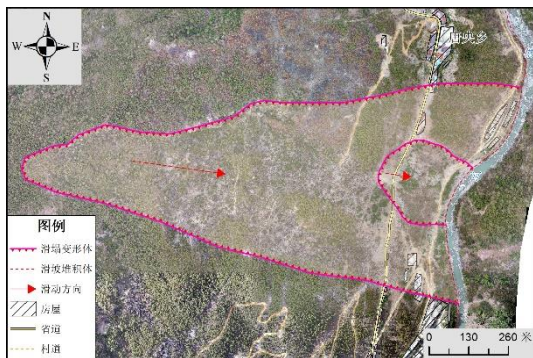


图 22 H02 滑塌无人机影像

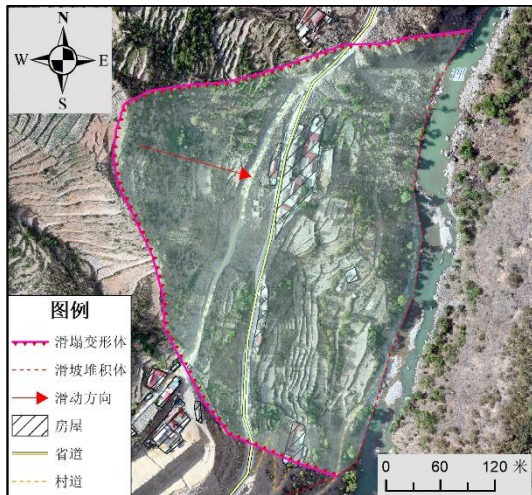


图 23 H02 滑塌 DEM 山体阴影

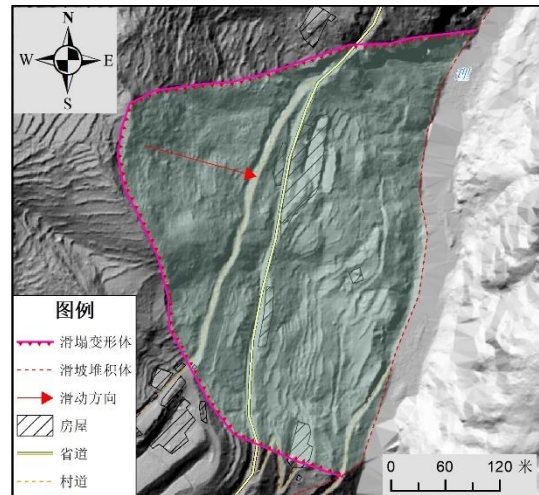


图 24 H03 滑塌无人机影像

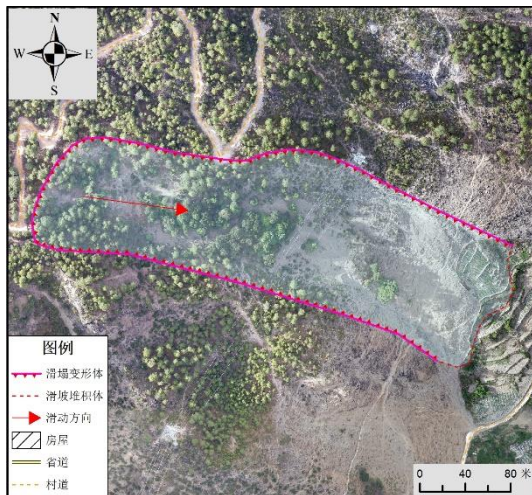


图 25 H03 滑塌 DEM 山体阴影

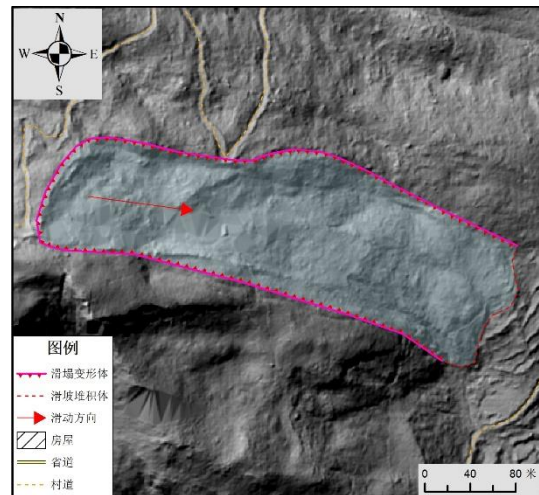


图 26 H04 滑塌无人机影像

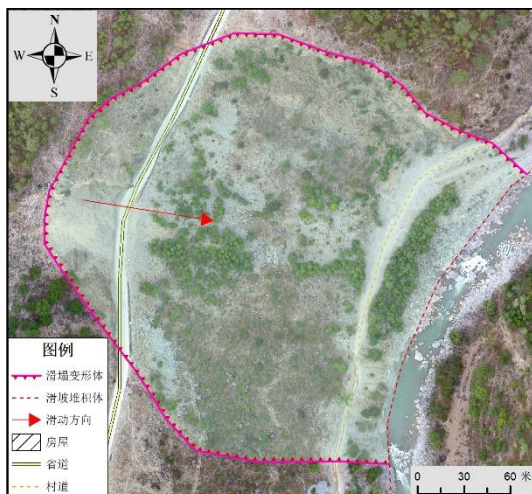


图 27 H04 滑塌 DEM 山体阴影

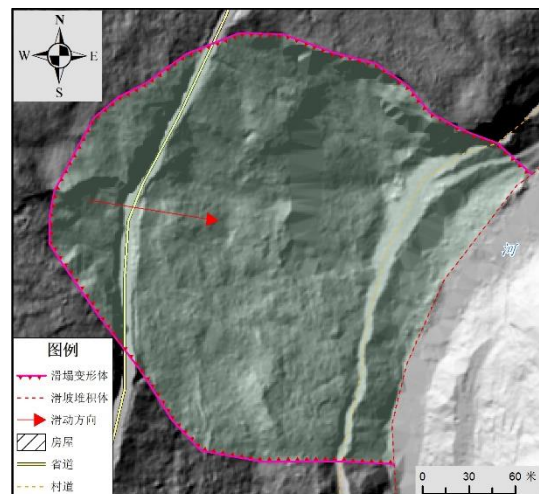


图 28 H05 滑塌无人机影像

图 29 H05 滑塌 DEM 山体阴影

根据综合解译结果，坡表发育拉裂缝或拉裂陡坎 149 条，其中大部分拉裂陡坎位于滑坡左侧中后缘 H02 次级滑体上，该区域变形强烈，受公路开挖影响严重，造成公路错断。

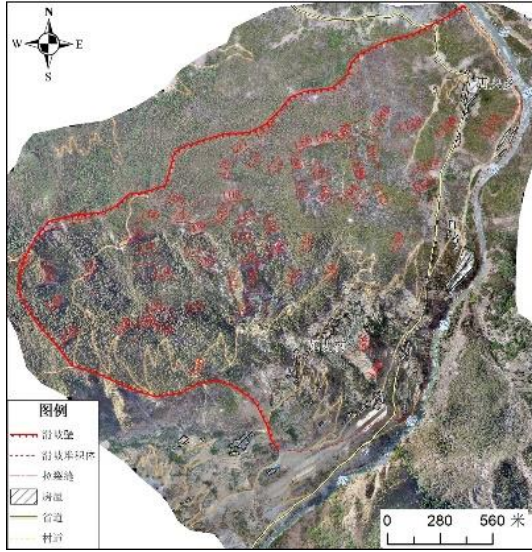


图 30 瓦朗村滑坡拉裂缝无人机影像

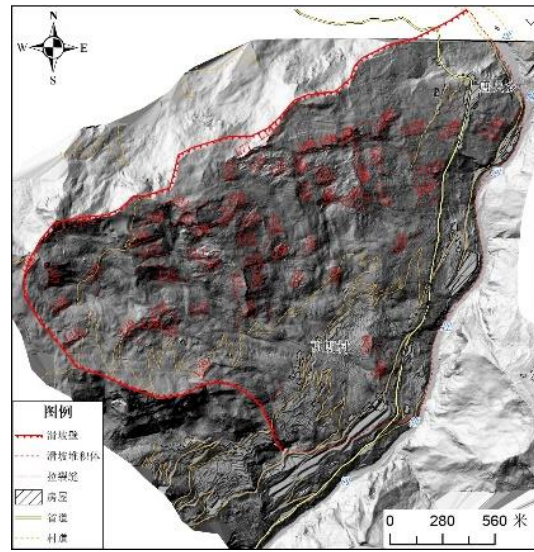


图 31 瓦朗村滑坡拉裂缝 DEM 山体阴影

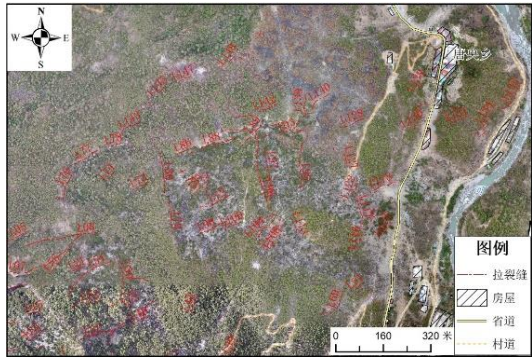


图 32 瓦朗村滑坡变形强烈区拉裂缝无人机影像

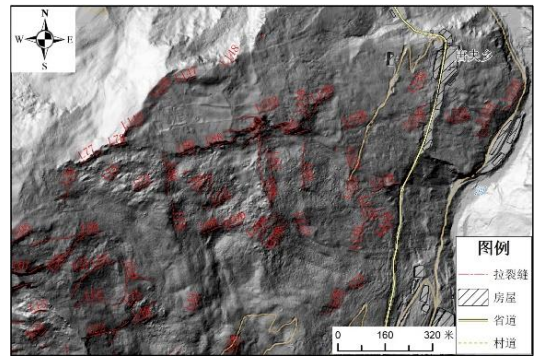


图 33 瓦朗村滑坡变形强烈区拉裂缝 DEM 山体阴影

5.3.3 成灾模式

综合上述滑坡变形特征分析结果,瓦朗村滑坡为一牵引式滑坡。滑坡在内外动力作用下,历史上发生过大规模滑动。其内动力地质作用主要是受断裂构造的影响,导致山体破碎,发育多组优势结构面;外动力作用主要为降雨和人类工程活动,降雨沿优势节理裂隙入渗,产生静水压力,对滑坡的稳定性产生了一定影响,人类工程活动主要为坡脚不规范的公路开挖和削坡建房,为滑坡的发生提供了有利的临空条件。

5.3.4 发展趋势及危害分析

综合分析认为,瓦朗村滑坡目前整体处于基本稳定状态,在长期受内外力作用(地震、降雨)下产生累计效应,存在再次发生大规模滑动的可能性。

现场调查结果显示(图 34~图 37),滑坡表部整体坡度约为 25° ,局部基岩陡壁最大坡度约为 65° ,为一中-高陡斜坡,为一滑坡易发地形;斜坡基岩岩性为石英岩、片岩、千枚岩和变质砂岩,岩体破碎,碎石土胶结度较低,受降雨和风化作用易产生局部滑塌变形;斜坡中前部受公路开挖影响,坡脚产生滑塌变形,临空条件好,利于滑坡堆积体产生二次滑动;斜坡后缘变形迹象明显,岩体较破碎,发育多处滑塌变形体,中后部可见多处下错陡坎;坡体中后部有村道通过,路基外侧因坡表滑塌逐步被掏空,有局部失稳的可能。



图 34 滑坡前缘房屋拉裂变形



图 35 滑坡前缘松散堆积体



图 36 坡体中前部沉降变形公路



图 37 公路外侧局部变形滑塌体

目前，滑坡主要威胁前缘的聚居区、省道和村道。建议对滑坡开展监测预警工作，在滑坡不同部位安装普适性监测仪器，对局部变形强烈且对居民有直接威胁性的滑塌体适时开展工程治理相关工作。

6 成果分发与应用

地质灾害遥感监测成果目录信息发布系统的建设主要分为以下三个步骤：（1）分析已有的目录数据，研究目录数据的展示方式，根据不同类型的目录数据采用按比例尺/分辨率的方式进行显示控制。（2）将目录信息数据采用 ESRI 公司 ArcGIS Server 进行发布，供 B/S 前端浏览器进行调用显示目录数据。（3）通过目录发布系统使用户能使用满足权限要求的遥感监测成果查询服务。

地质灾害遥感监测成果具有种类繁多、数据量大的特点，按照《四川省地质灾害隐患遥感识别监测项目成果入库规定》入库后从数据存储层面可以得到较好的管理，但是要浏览数据或要对数据做进一步浏览分析应用仍然需要特定的桌面软件，为了降低应用门槛，便于多部门协同分析，可以对数据成果进一步整理，并增强相互的关联性，将数据资源服务化，构建地质灾害隐患三维管理一张图平台，变固定数据为“活地图”，在平台上对其进行直接的分析应用。

（1）对于 InSAR 数据成果，可以对其进行形变查询与显示，通过点击需要查询的 InSAR 点位，可以进行监测趋势分析，折线图走向能够更加直观显示地质灾害形变点的形变趋势，如图 38：



图 38 InSAR 监测趋势分析

(2) 传统的矢量点数据无法与图片、图表相结合，常在 GIS 软件中加载，并且无法与真实的地形相结合查看分析，无法做到真实场景下的地质灾害点位的查看与查询，对于本项目成果中的地质灾害隐患点可以进行相关点位的快速搜索、定位，以及显示对应的室内解译成果和室外详细查核成果资料，如图 39 和图 40：

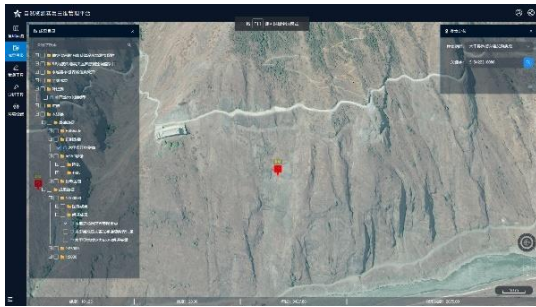


图 39 地质灾害隐患点位查询

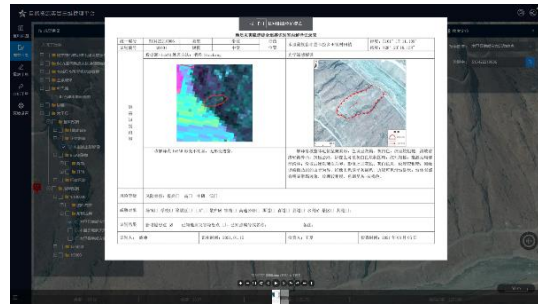


图 40 地质灾害隐患图标资料关联浏览

(3) Lidar 技术是近些年出现的先进的全自动高精度立体扫描技术，它能够快速有效地获取地质构造以及不良地质体三维信息，并推动空间三维数据获取方式向着实时化、动态化、数字化的方向发展。Lidar 影像配合三维地形，可以更好的观察地质灾害隐患点地貌的真实情况，如图 41：



图 41 Lidar 影像+三维地形

(4) 无人机航飞获取的高精度地形数据和正射影像数据能最大程度还原真实地形及地面纹理，通过将无人机成果数据相结合，发布成地形服务，对地形地貌状况的识别更加真是及准确，如图 42。



图 42 DOM+DSM

7 项目总结

本次任务区分布在川西南四个市州，地形地貌和海拔差异较大。且重点地段地质灾害隐患点多处于高山或峡谷地带，无人机飞行难度较大。通过此次项目，在外业航飞作业方面我院得出如下经验：

(1) 川西南地区多为高山峡谷地形，少有平原，尤其是地质灾害隐患点，地形起伏普遍较大。在这种情况下，飞马无人机飞行控制平台提供的在线地形数据精度只有 50m，无法满足安全飞行，故在布设航线时，一定要使用精度更高的 DEM（本次项目使用 20m 精度的四川省 DEM 数据）作为无人机变高飞行的参考数据。

(2) 大江大河沿岸地区，由于其特殊的地貌特征，常有大风天气。当风速过大时，不仅对飞行安全造成威胁，且航拍质量无法保证。在开展此类地区外业航飞作业时，需提前一天查阅天气资料，并在第二天中午 12 点之前开展航飞作业。

(3) 关于起飞点的选择：当作业区域在 2km^2 以内时，可在作业区域任意位置起飞，但起飞点相对整个区域的高差不宜过大；当作业区域在 $2\text{--}4\text{km}^2$ 时，应尽量选择作业区域中心位置起飞，若无法满足，也应尽量靠近中心位置，切勿在作业区域边缘或区域之外起飞；当作业区域大于 4km^2 时，应对作业区域进行分块，分别航飞作业。

(4) 对于坡度较陡的坡面（大于 25 度），如果沿水平方向布设航线，则旁向重叠度不容易把握，易出现断层。为了避免这种情况，在开展此类地形航飞作业时，应沿坡面垂直布设航线。

本文通过飞马 D2000 型号无人机在该项目中的应用，深入探讨了该系列无人机在山区复杂地形下的优势，得出以下几个方面的结论：

(1) 飞马 D2000 无人机具备高精度差分 GNSS，利用飞马 D2000 搭载 D-OP3000 倾斜相机及 D-LiDAR2000 激光模块，在川西南地区开展航飞作业，采用仿地飞行获取高精度航空影像、地面激光数据及高精度 POS 数据，在稀少控制点，甚至免像控模式下，能满足项目精度要求。

(2) 飞马 D2000 无人机智能化集成度较高，配合地面专业无人机管家软件，在航线规划、变高飞行方面表现优异；无人机智能避障功能较强，能在复杂飞行条件下安全避障，并智能返航；无人机起飞海拔达到 5000 余米，配合高原桨，在高海拔地区仍能很好地完成飞行任务。

(3) 得益于飞马强大的后期数据处理软件，外业航飞获取的影像数据和点云数据均能在飞马配套的专业软件内进行解算、拼接、处理以及成果输出。

(4) 结合本次项目无人机获取的 DOM、DEM 以及 DSM，采用 ESRI 公司 ArcGIS Server 进行发布，建设地质灾害遥感监测成果目录信息发布系统，能统一有效地管理无人机航摄成果，

便于多部门协同分析。通过对平台地建设，可以对数据成果进一步整理，并增强相互的关联性，将数据资源服务化，构建地质灾害隐患三维管理一张图平台，变固定数据为“活地图”，在平台上对其进行直接的分析应用。