

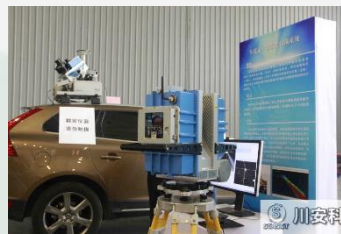


# 四川省安全科学技术研究院

SCASST

Sichuan Academy of safety Science and Technology

## 联合机载LiDAR和无人机光学影像数据的滑坡地表形变监测方法研究 ——以九寨沟芦苇海滑坡为例



电话: 028-85014973

联系邮箱: scasst3d@163.com

地址: 成都市武侯区武科西四路18号安全科技大厦A座8楼

## 目录 CONTENTS

1

**研究背景**

2

**研究方法**

3

**研究区与数据处理**

4

**结果分析与精度评价**

5

**结论**

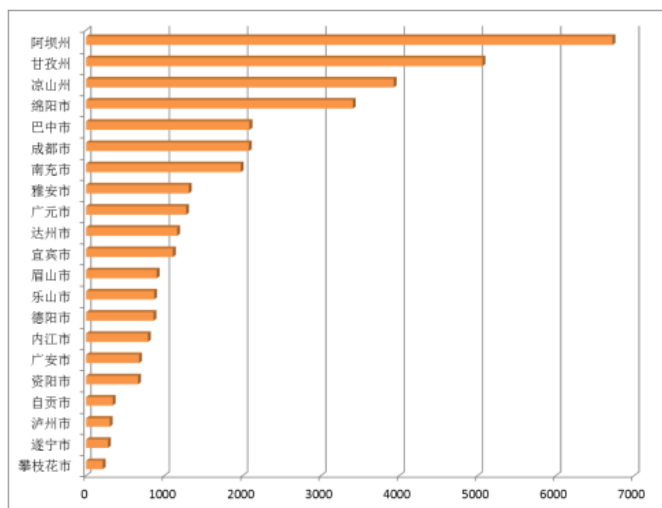
# 一、研究背景

## 四川省地质灾害基本概况

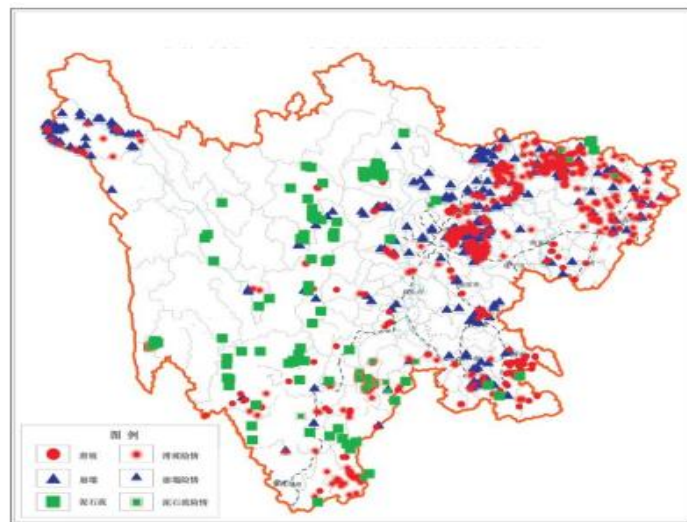
四川省是地质灾害**最发育、最活跃、危害最严重的**的地区之一

**主要类型：滑坡、泥石流和崩塌**

- 截至2020年5月，全省隐患点3.5万余处，威胁140万人，滑坡、泥石流占比70%
- 主要分布在川西高山峡谷区、川西南中高山峡谷区、盆周中低山峡谷区，覆盖21个市州，近97%的国土处于易发区



四川省各市州地质灾害隐患点数量



四川省2015年地质灾害分布图

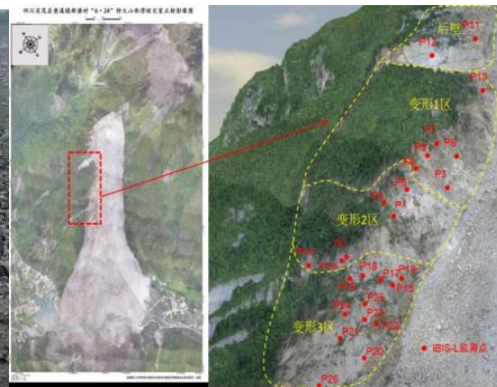
# 一、研究背景

## ► 近年来重大滑坡事件

□ 2013年“7.10”都江堰特大高位山体滑坡  
160多名游客和当地居民被滑坡碎屑掩埋



□ 2017年茂县“6.26”新磨村滑坡灾害  
64户农房被掩埋，83人死亡、失联系。



□ 2019年甘洛“8.14”滑坡灾害  
24人遇险，13人遇难。



# 一、研究背景

## ➤ 滑坡表面变形监测研究现状

主要手段：

□ 大地测量法、GPS监测法、

□ InSAR、无人机技术

✓ 大地测量法

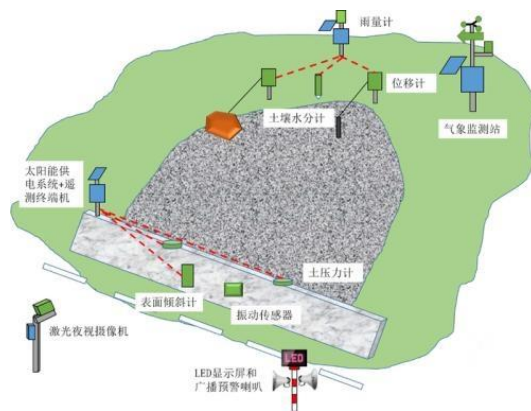
● 高精度、观察网可任意建立。

● 数据处理慢、受地形和气候影响大、点位易遭到破坏

✓ GPS监测法

● 连续、实时、高精度定位

● 仅仅能获取局部点位的变化

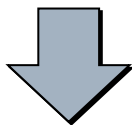


# 一、研究背景

## ➤ 滑坡表面变形监测研究现状

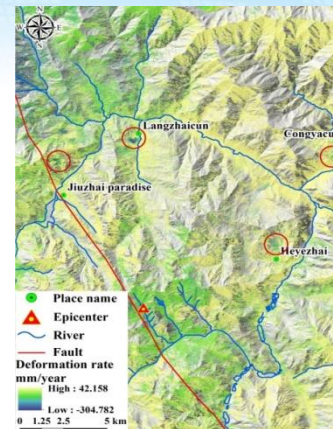
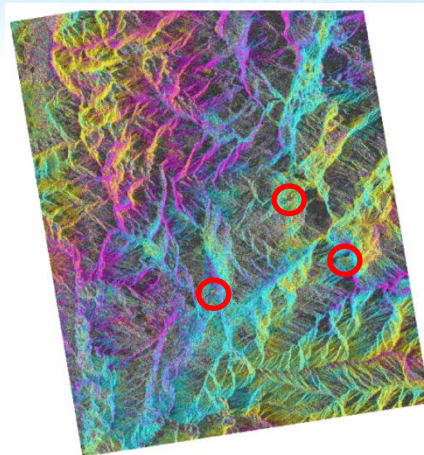
- ✓ InSAR技术 (D-InSAR、时序SAR)
  - 大范围反映地表雷达视线方向形变
  - 费用高昂，对相干性要求高
- ✓ 无人机技术 (光学影像、机载LiDAR)

高精度、非接触、速度快、实时主动

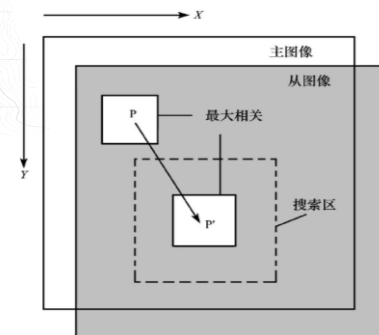


本文研究手段:

- LiDAR-DEM - 多期DEMs高程变化提取
- 无人机 DOM - 归一化互相关滑动位移提取



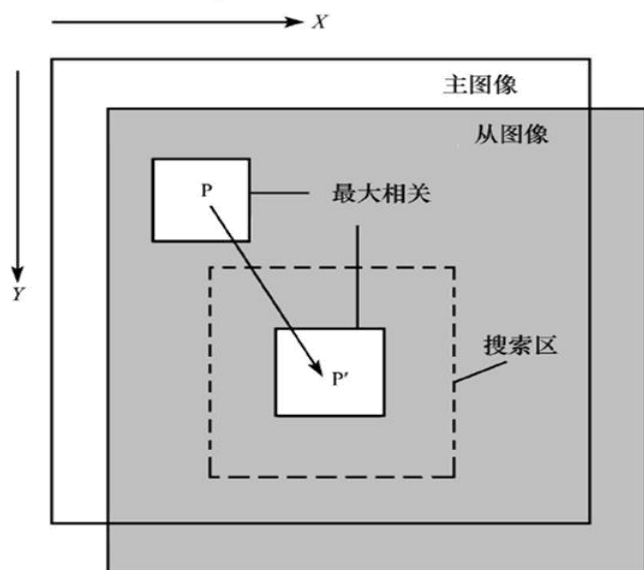
激光雷达系统检校  
点云数据解算  
航带平差  
海量点云组织和可视化  
标准点云输出



## 二、研究方法

### ➤ 无人机DOM影像提取滑坡运动方法

#### ✓ 光学影像归一化互相关方法



取二维脉冲函数的峰值点即可得到两幅影像在滑坡表面的位移量

- 滑坡位移量 $(\Delta x, \Delta y)$ 的表述如下:

$$i_2(x, y) = i_1(x - \Delta x, y - \Delta y) \quad (1)$$

- 在频率域上对(1)式做傅里叶变换:

$$I_2(w_x, w_y) = I_1(w_x, w_y) e^{-j(w_x \Delta x, w_y \Delta y)} \quad (2)$$

- 对式(2)归一化处理, 归一化系数如下:

$$C_{i_1 i_2} = e^{j(w_x \Delta x, w_y \Delta y)} = \frac{I_1(w_x, w_y) I_2^*(w_x, w_y)}{|I_1(w_x, w_y) I_2^*(w_x, w_y)|} \quad (3)$$

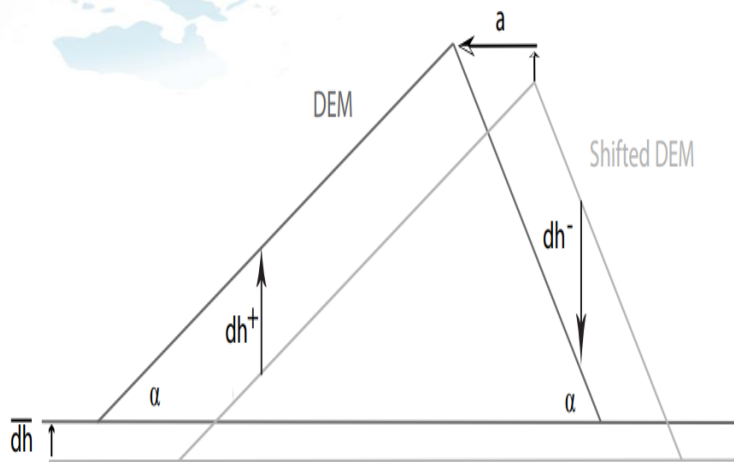
- 傅里叶逆变换后可得:

$$F^{-1} \left\{ e^{j(w_x \Delta x + w_y \Delta y)} \right\} = \delta(x + \Delta x, y + \Delta y)$$

## 二、研究方法

### ➤ LiDAR-DEM提取滑坡高程变化方法

#### ✓ DEMs的空间匹配误差



DEM偏移示意图

待配准DEM与基准DEM的高程偏差 ( $dh$ ) 和坡度 ( $a$ )、坡向 ( $\phi$ ) 存在如下关系:

$$dh / \tan(\alpha) = a \cdot \cos(b - \phi) + c$$

$$c = \frac{\overline{dh}}{\tan(\bar{\theta})}$$

待配准DEM相对于基准DEM在X、Y、Z方向上的偏移量如下:

$$X = a \times \sin(b)$$

$$Y = a \times \cos(b)$$

$$Z = C \times \tan(\bar{\theta})$$

#### ✓ 高程相关偏差改正方法

利用非滑坡体地形区的高程差值与海拔之间的线性关系来校正滑坡上与高程相关偏差。

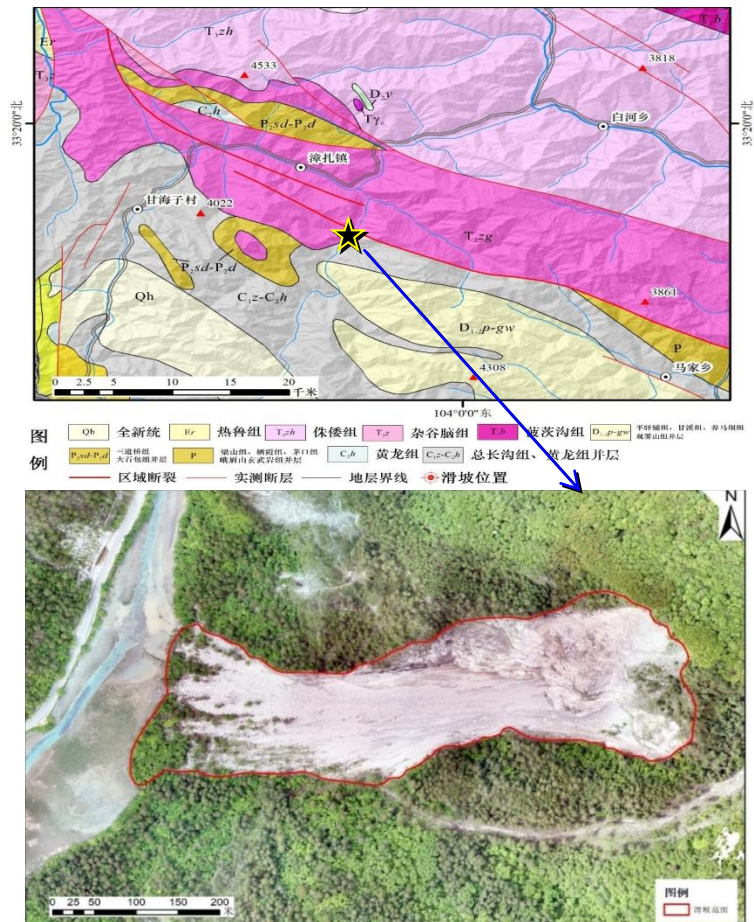


# 三、研究区与数据处理 — 研究区介绍

## ➤ 芦苇海滑坡特征

□ **地理位置：**位于九寨沟县漳扎镇境内，地处岷山南段弓杆岭的东北侧。滑坡区地处川西北倒三角形块体北东侧，区域上主要构造格架由北西西向塔藏断裂以及近南北向的东门沟断裂组成。

□ **滑坡基本特征：**滑坡体上下部宽度相当，总体呈“舌状”。后缘顶点高约2800m，前缘高约2155m，相对高差645m。整个滑体从斜坡的中部剪出，在其解体的过程中，大部分滑体一垮到底堆积于滑坡底部，一部分冲入芦苇海。



# 三、研究区与数据处理-数据处理流程

## ➤ 数据处理流程

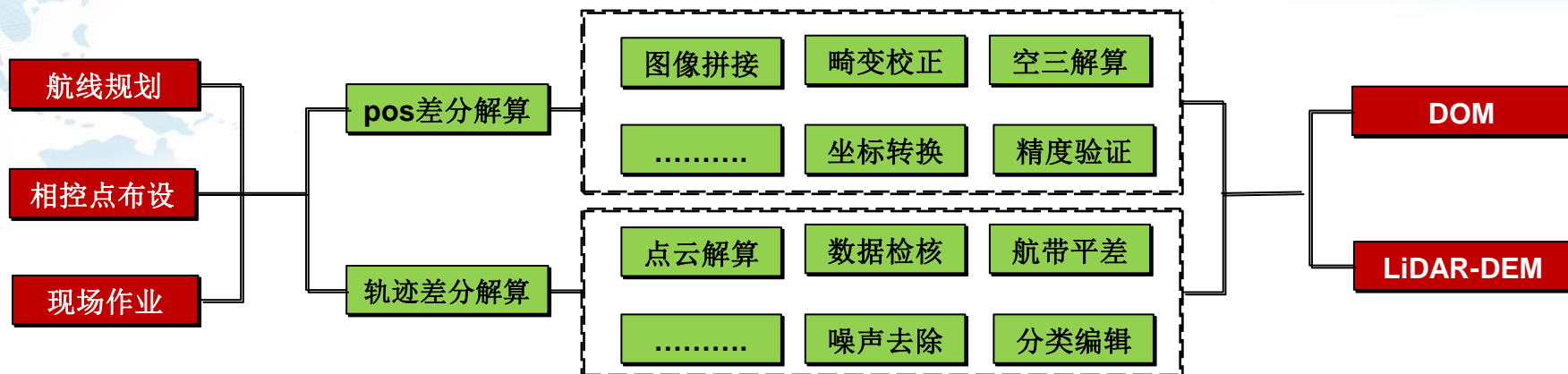
◆ DOM和LiDAR-DEM的提取

◆ 滑坡表面运动位移提取

◆ 滑坡表面高程变化提取

# 三、研究区与数据处理-数据处理流程

## ➤ 芦苇海无人机DOM和LiDAR-DEM的提取流程



**D200, 搭载:**  
**D-CAM300**  
**D-LiDAR200**



航线规划



现场作业



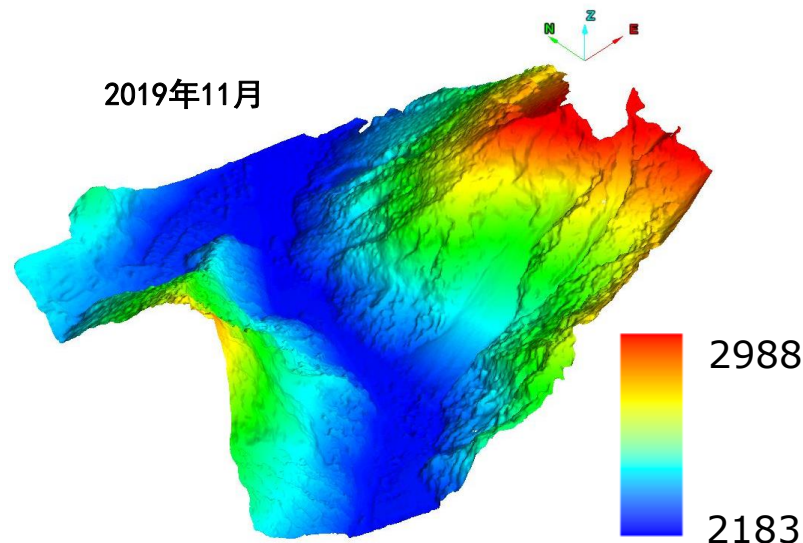
相控点布设



数据处理

### 三、研究区与数据处理-数据处理流程

#### ➤ 芦苇海无人机DOM和LiDAR-DEM的提取流程



Pre-event Image	Post-event Image	数据类型	传感器	间隔 (天)	分辨率 (m)	用途 (m)
2018-11-25	2019-11-23	DOM	D-CAM300	363	0.074	提取滑坡高程变化
		DEM	D-LiDAR200	363	0.5	提取滑坡滑动矢量

# 三、研究区与数据处理-数据处理流程

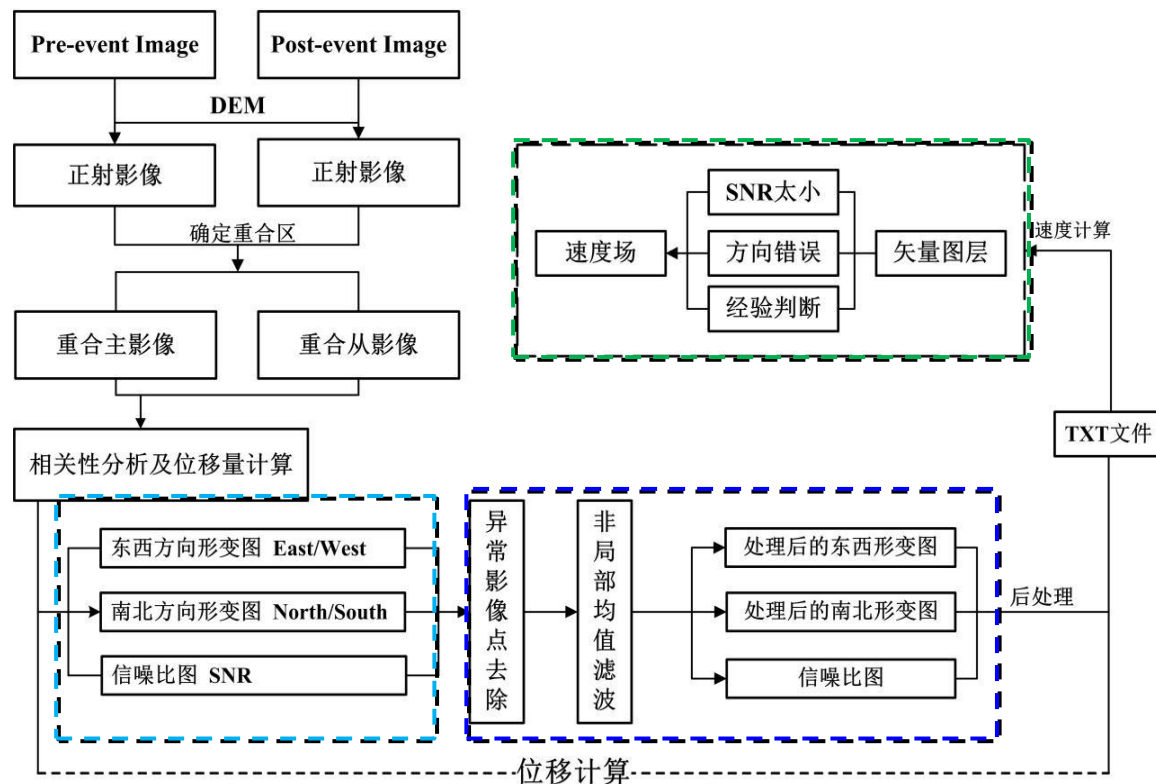
## ➤ 滑坡表面运动位移提取流程

### ✓ 整体流程-关键步骤

- 相关性计算
- 位移分量提取

- 数据滤波
- 异常值去除

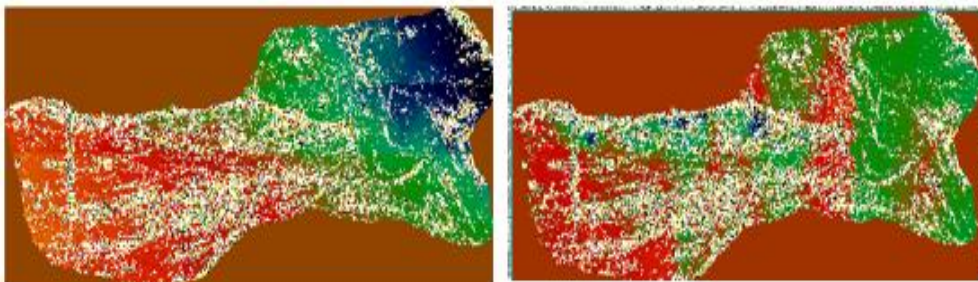
- 位移后处理



# 三、研究区与数据处理-数据处理流程

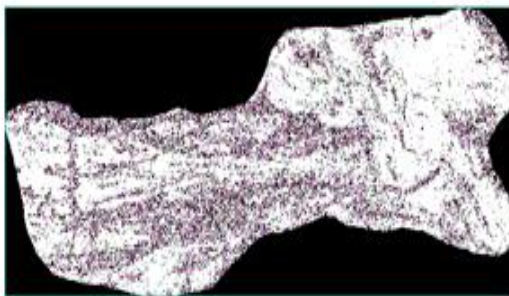
## ➤ 滑坡表面运动位移提取流程

### ✓ 相关性计算及位移分量的获取



a: 东西方向位移分量

b: 南北方向位移方向位移分量



c: 信噪比图

分辨率: **0.74 m**

整像素精度

◆ 初始窗口: **32\*32**

◆ 最终窗口: **16\*16**

亚像素精度

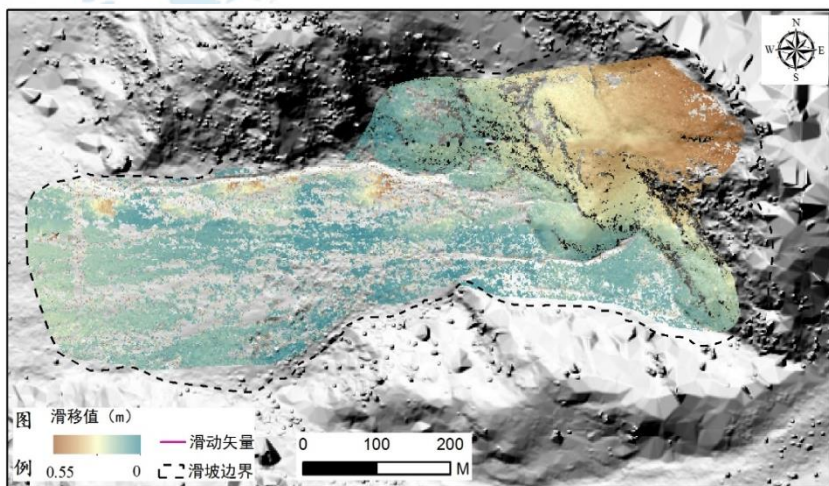
◆ 搜索步长: **10**

◆ 掩模阈值: **0.8**

# 三、研究区与数据处理-数据处理流程

## ➤ 滑坡表面运动位移提取流程

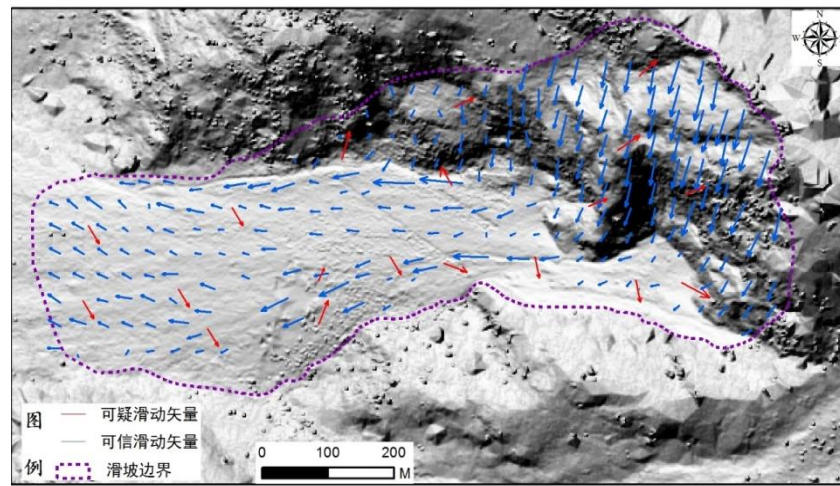
### ✓ 数据滤波和异常值去除



(1) **异常值去除**: 剔除大于3m和信噪比低于0.9的所有“异常”像素。

(2) **图像滤波**: 基于非局部均值算法的滤波方法对位移分量进行滤波处理。

### ✓ 位移信息后处理



(1) 剔除受云或者阴影覆盖的部分像素值

(2) 生成具有方向箭头的**矢量图层**

(3) 剔除与主滑方向偏差**超过20度**像素值

(4) 对所有的像素空值进行插值 (**克里格插值**)

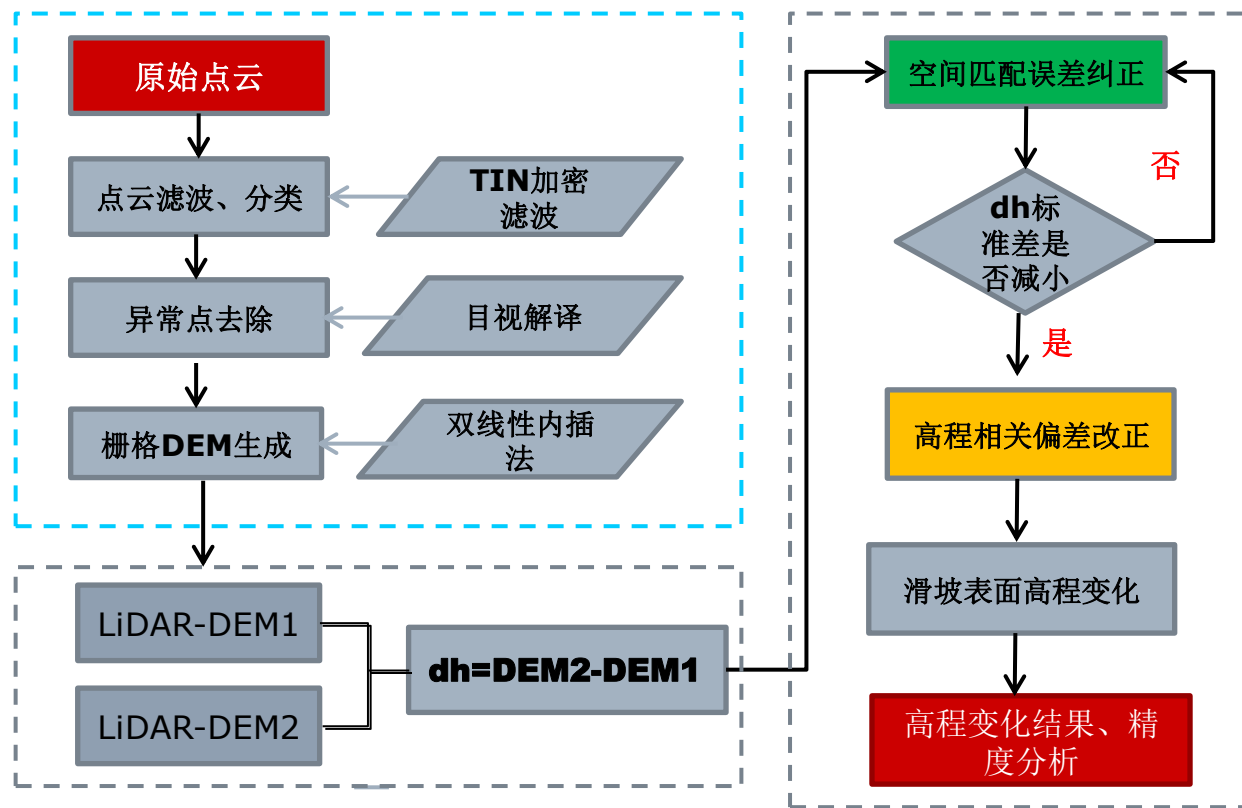
# 三、研究区与数据处理-数据处理流程

## ➤ 滑坡表面高程变化提取流程

### ✓ 整体流程-关键步骤

- 空间匹配误差纠正

- 高程相关偏差纠正

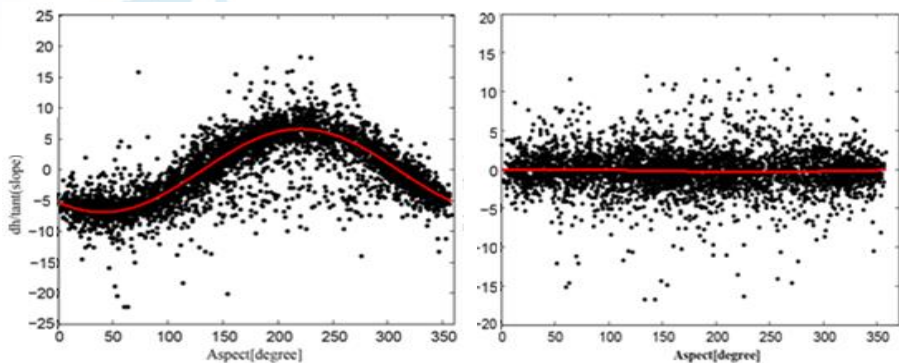




# 三、研究区与数据处理-数据处理流程

## ➤ 滑坡表面高程变化提取流程

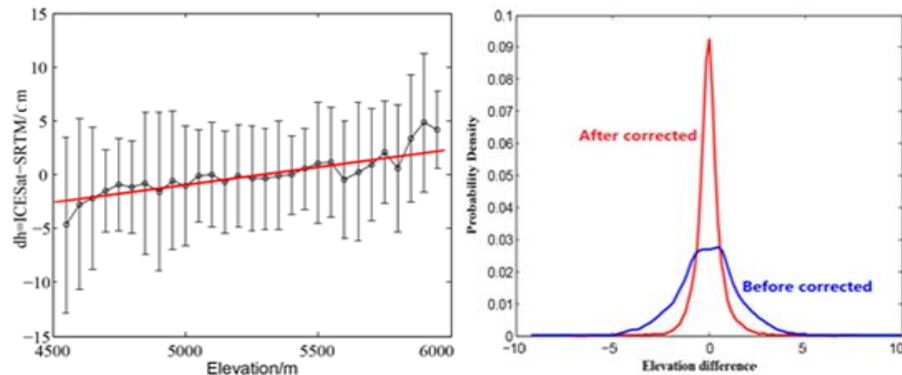
### ✓ 空间匹配误差校正



(a) 未配准前高程差值与坡度的正切比值和坡向的余弦关系 (b) 经过第一次配准后高程差与坡度正切值和坡向的余弦关系

- (1) **校正前**: 两期LiDAR-DEMs间的差值与坡度的正切比值和坡向有明显的余弦关系, 表明DEMs之间存在一定的偏移。
- (2) **校正后**: 余弦关系已基本消失, 表明校正后DEM间对应像素间基本不存在偏移

### ✓ 高程相关偏差校正



(c): 高程相关偏差线性校正

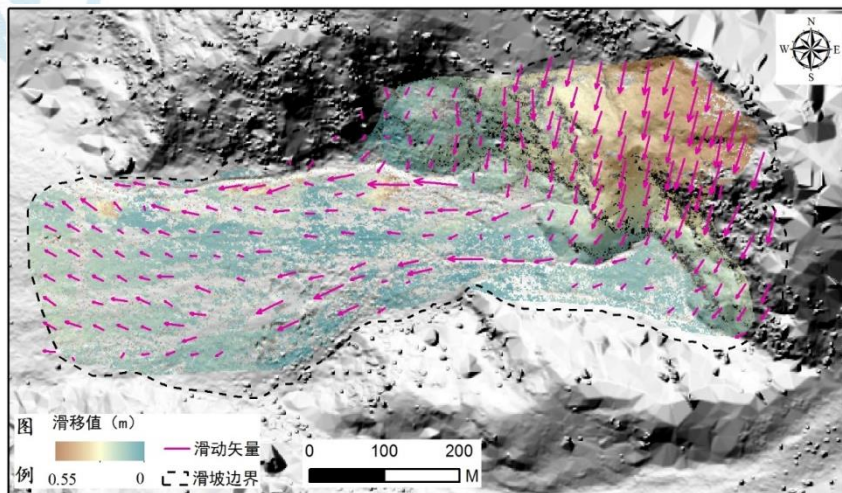
(d): 校正前后高程差值直方分布图

- (1) **校正前**: 海拔与非滑坡体稳定区域高程差值间存在明显的线性关系。
- (2) **校正后**: 非滑坡体稳定区域的dh均值接近0, 标准差明显降低。

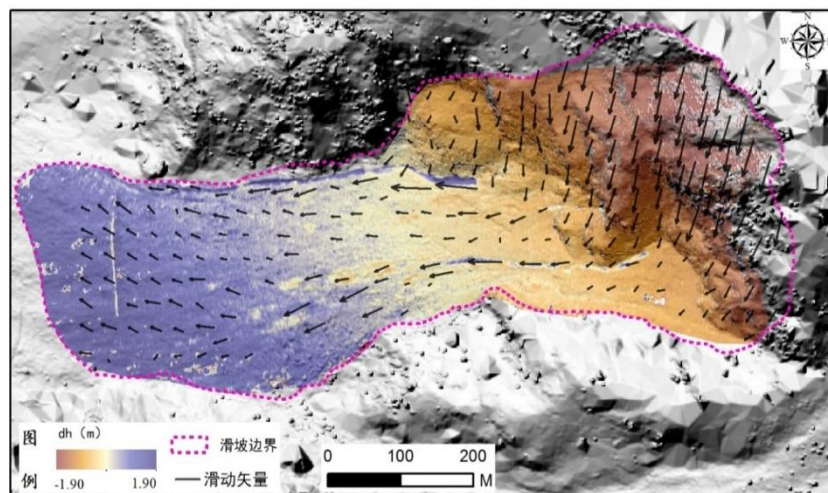
# 四、结果分析与精度评价 — 结果分析

## ➤ 滑坡地表形变分析

2018—2019年间芦苇海滑坡表面位移信息和滑动矢量信息分布图



2018—2019年间芦苇海滑坡在的表面高程变化 (叠加滑移方向)

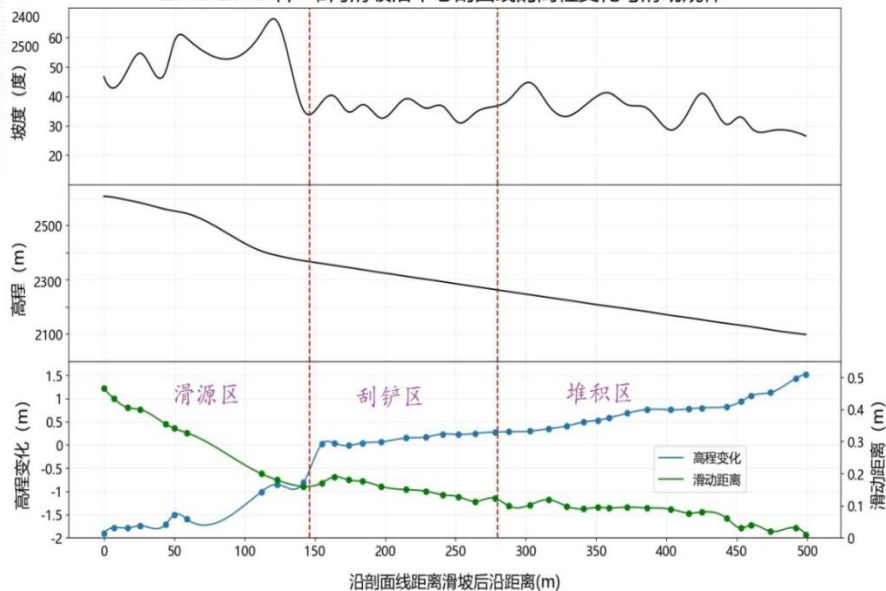


- (1) 整个滑坡体上地表高程有正向变化也有负向变化，但是大部分的高程变化是负向的，这符合滑坡体受重力作用向下沉陷、滑移的特点。
- (2) 相对于滑坡体前缘的变化，滑坡体后缘的高程变化和滑移变化较大，说明滑坡体下部的变化已趋于平缓而上部的运动较活跃，表现为前缓后陡。
- (3) 滑坡体前缘的改变基本一致为正值即表明滑坡体下部向外推移，部分正向变化较大的区域为受力而产生隆起的现象。上部的改变多为负向即发生向下的滑移，且上部的改变值正负交错。

# 四、结果分析与精度评价 — 结果分析

## ➤ 滑坡地表形变分析

2018-2019年芦苇海滑坡沿中心剖面线的高程变化与滑动规律



(1) **滑源区**: 2400m~2800m, 最大高差400米, 最大坡度差30度。最大滑动量约0.55米, 最大下沉量约1.9米。至距滑坡后缘150米处的刮铲区边缘, 滑动量变为0.15米, 下沉量趋于0。

(2) **刮铲区**: 2275~2400m, 形成宽度约为145m, 深度约为2m, 长度约为260m的凹槽。被刮铲物质方量约为 $7.54 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

(3) **滑坡堆积区**: 顶部高程2275m, 底部高程2155m, 相对高差120m, 滑移量为趋于0, 最大堆积高度约为1.5米, 平均厚度约为4m, 堆积方量约为 $14.68 \times 10^4 \text{m}^3$ 。



# 四、结果分析与精度评价 — 精度评价

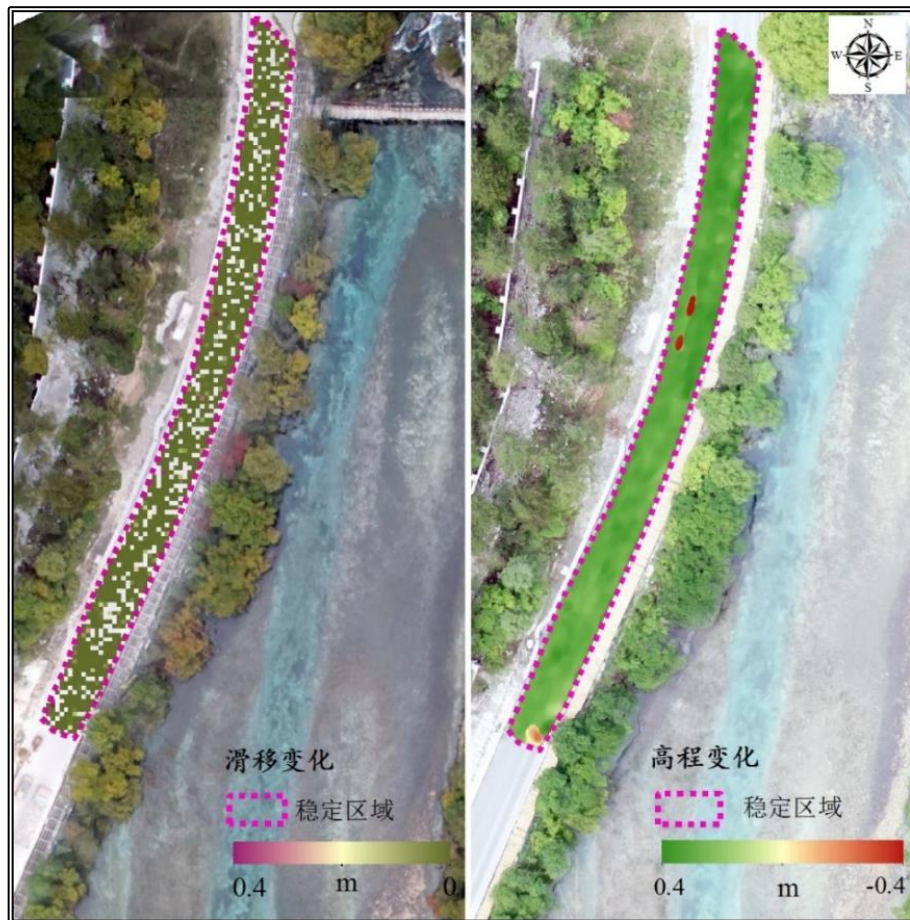
## ➤ 非滑坡稳定区域残余形变

- 非滑坡体稳定区域的误差

$$e_{off} = \sqrt{MED^2 + SE^2}$$

$$SE = \frac{STDV}{\sqrt{N_{eff}}}$$

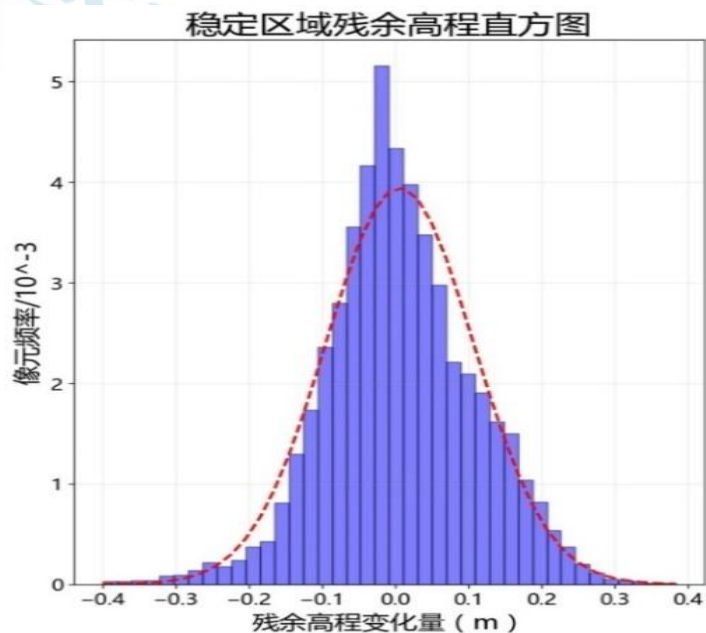
$$N_{eff} = \frac{N_{total} \times PS}{2D}$$



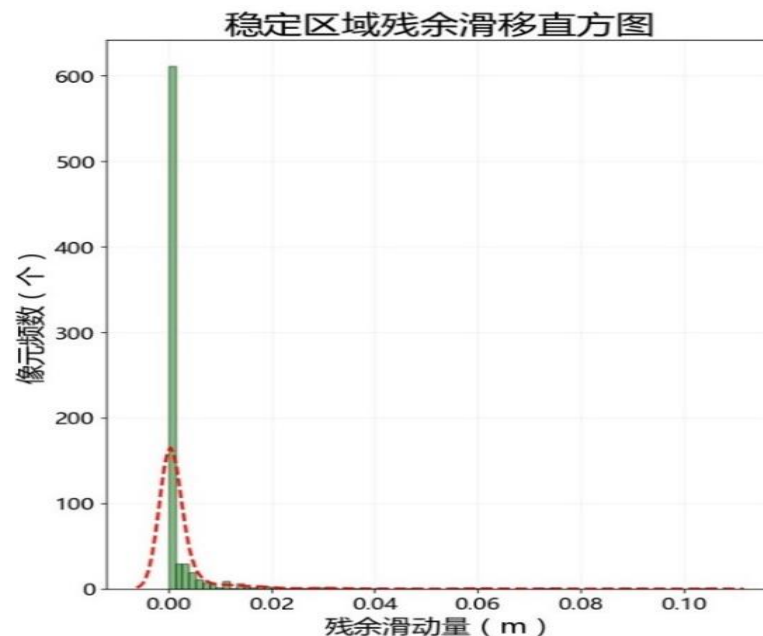
# 四、结果分析与精度评价-精度评价

## ➤ 非滑坡稳定区域残余形变

✓ 非滑坡体dh残余形变



✓ 非滑坡体残余滑动量



	MIN	MAX	MED	STDV	$N_{eff}$	$e_{off}$
高程变化误差	-0.4	0.4	0.019	0.10	7898	0.021
残余滑动位移	0	0.1	0.023	0.085	-	-

## 五、研究结论

- 提取了九寨沟芦苇海滑坡在监测时段的地表形变信息，对滑坡的变化趋势进行了分析。结果表明：
  - 芦苇海滑坡体受重力作用有明显的向下沉陷、滑移特征，滑坡在滑源区域的最大下沉量为1.9米，最大滑移量约0.55米，滑坡沿剖面线向下运动，滑移量逐渐减小，高程差由负转正，经刮铲区到滑坡底部产生堆积，此时滑移量为零，最大堆积高度约为1.5米
  - 滑坡整体滑动趋势为滑源区变形大于下部区域，即后缘大于前缘，说明后缘部分正处于加速拉裂状态，而前缘滑动已经趋于平缓，此时主要的受力带为滑坡体中部。滑坡继续发育，滑坡体中部如果承接上部产生的裂缝而形成新的裂缝，裂缝扩大并在一定区域内形成整体急速下滑，如果中部受力向两侧转移则会减缓滑动或分散滑坡体的压力。因此，整个滑坡体的滑动会继续发育，短期内速度不会急剧提高。

## 五、结论

- 飞马无人机可搭载不同的传感器获取高精度、高分辨率的LiDAR-DEM、DSM和DOM等数据，不仅可对滑坡的形态分布特征、滑坡体周边区域的微地貌特征进行精确的描述，还可对滑坡变化进行长期监测，掌握其随时间的变化特征，并定量获取厚度、滑移量等一系列成果。飞马无人机正朝着重量轻、体积小、精度高、抗干扰能力强的方向迅猛发展，将会更加适应恶劣天气和复杂地形的作业环境，因此飞马无人机技术将在滑坡及其地灾领域拥有广阔的应用前景。



**谢谢!**

**THANKS**