

引用格式: 匡萱, 余斌, 陈龙, 董秀军. 基于无人机测量的泥石流固体颗粒图像识别与泥石流预警[J]. 山地学报, 2023, 41(5): 733-747.

KUANG Xuan, YU Bin, CHEN Long, DONG Xiujun. Recognition of geo-materials composition by UAV measurements and its application to early warning of debris flow [J]. Mountain Research, 2023, 41(5): 733-747.

基于无人机测量的泥石流固体颗粒图像识别与泥石流预警

匡萱, 余斌*, 陈龙, 董秀军

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 强震导致崩塌与滑坡碎屑物在泥石流流域内广泛堆积, 挤压侵占天然沟道, 完全改变了沟床物源级配构成, 泥石流激发降雨临界值急剧降低。震后泥石流物源粒径和沟道宽度的变化直接改变了震后泥石流启动过程及机制。泥石流预警模型并未考虑震后泥石流物源组成的动态变化作为主控因素, 需要进一步改进。本文现场调查了泸定 9·5 地震后泥石流沟的形成区及流通堆积区松散堆积物组成, 采用无人机航测采集岩土粒径, 结合 PCAS 软件进行泥石流粒径识别, 分别通过系统误差、高度误差及坡度误差三个方面进行误差分析, 探讨无人机航测泥石流形成区沟道粒径方法的准确性; 对泸定大渡河流域得妥乡内的洛进沟和两岔河沟进行粒径测量, 结合泥石流 1 h 预报模型和改进的精细化泥石流 1 h 预报模型, 得到这两条沟震前震后的综合降雨临界值, 发现强震后泥石流流域颗粒粒径明显减小, 两条泥石流沟的激发临界降雨量都大幅降低; 通过误差分析, 得到无人机近地观测结合软件测量研究区域内泥石流沟道形成区物源粒径的方法与人工现场测量之间的误差较小, 可以用于泥石流物源粒径识别, 且由于强震后泥石流的激发降雨临界值是一个动态变化过程, 采用无人机可以高效识别泥石流沟道物源的变化。

关键词: 泸定 9·5 地震; 无人机测量; PCAS 软件; 粒径

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

震后山区是泥石流重灾区, 泥石流危险性增大、破坏力强。例如, 2022 年 9 月 5 日, 四川省甘孜州泸定县发生 $M_s 6.8$ 级地震, 地震产生 3600 余处滑坡及崩塌^[1], 大量松散固体物质堆积在泥石流沟谷, 震后泥石流异常发育。又如, 2008 年汶川地震后, 岷江河谷沿线发生大规模泥石流灾害^[2], 其中以北川县 9·24 泥石流灾害以及 8·13 特大泥石流灾害^[3-4]最为典型。震后泥石流的预警和防治对保障强震区人民生命财产安全十分重要。

震后泥石流激发降雨阈值从地震次年的最低值开始, 呈逐年上升的趋势。震后初期, 停积在沟谷坡

脚的松散固体物质为泥石流提供了丰富的物源, 泥石流激发降雨阈值接近最低值, 但随着震后不同规模与场次的泥石流侵蚀搬运, 沟谷内岩土碎屑储量逐年下降, 降雨阈值渐渐恢复到震前水平^[5]。

震后泥石流激发降雨阈值与泥石流物源粒径有关。研究表明^[6], 强震导致岩土碎屑物在坠落滚动过程中堵塞河道, 导致沟谷束窄; 因重力分选作用, 泥石流形成区物源粒径相对较小, 低频低值降雨就可启动沟道物源形成泥石流; 随着后续洪水或泥石流侵蚀搬运, 沟道拓宽, 沟道存留的物源粒径逐渐粗化, 激发泥石流的临界降雨量增大。例如, 已有研

收稿日期(Received date): 2023-09-14; 改回日期(Accepted date): 2023-10-20

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(U21A2032)。[National Natural Science Foundation of China(U21A2032)]

作者简介(Biography): 匡萱(2000-), 女, 四川广安人, 硕士研究生, 主要研究方向: 泥石流灾害预警。[KUANG Xuan(2000-), female, born in Guang'an, Sichuan province, M. Sc. candidate, research on debris flow disaster warning] E-mail: 2820459704@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 余斌(1966-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向: 泥石流灾害防治。[YU Bin(1966-), male, Ph. D., professor, research on debris flow disaster prevention] E-mail: yubin08@cdut.cn

究^[3]根据汶川地震前后气象站记录雨量分析指出,该区域泥石流起动的前期累积雨量和小时雨强都有较大幅度的降低;也有研究^[7]通过对汶川地震区和台湾集集地震的研究,指出地震前后降雨阈值的比值随着地震中地面峰值加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)的增加呈幂函数减小的趋势,以及地震后降雨阈值的比值随雨季次数的增加而线性增长的趋势。

泥石流形成区固体颗粒粒径是强震后泥石流精细化预警的重要参数。传统泥石流预警是基于前期降雨量、降雨强度等气象参数,统计分析某一泥石流流域发生泥石流的可能性^[8-9],而这些预警模型并未将震后泥石流物源组成的动态变化作为主控因素,仅能通过改进的精细化泥石流 1 h 预报模型^[10]对强震区的泥石流进行预警。在进行沟谷泥石流预警时,对泥石流固体颗粒粒径的测量多以现场实地调查为主,使用人工野外现场卷尺测量的方法工作量大、影响因素多,且部分测量地点具有安全隐患,难以到达。如何快速准确地获得泥石流沟道粒径的相关数据对泥石流的研究意义重大。无人机摄影-软件测量相结合的方法,可以高效准确地获得泥石流物源粒径数据。例如,将 ImageJ 图像处理软件应用到泥石流固体颗粒粒径及圆度的提取^[11],为获得泥石流基础数据提供了新的技术支持。本文采用 PCAS (Particles (Pores) and Cracks Analysis System),即孔隙(颗粒)及裂隙图像识别与分析系统,来获取泥石流物源粒径数据,该系统软件对颗粒和孔隙具有较好的识别效果,可用于不同类型的颗粒或孔隙研究分析。例如,使用 PCAS 系统分析滑坡破碎屑流堆积体影像数据,可以得到高精度的堆积体颗粒粒径分布情况^[12-13];基于 SEM (Scanning Electron Microscopy) 利用 PCAS 系统进行白云岩的孔隙结构分析,定量反应孔隙特征,获得孔隙参数^[14];使用 PCAS 统计计算崩塌堆积体粒径,研究崩积体粒度分布与堆积特征^[15];使用 Ar-SEM 及 PCAS 定量表征页岩孔隙^[16]等。

本文采用 PCAS 系统,对无人机航拍泥石流沟道图像进行固体颗粒粒径识别,提取泥石流形成区沟道宽度数据,修订强震后泥石流预警模型。研究结果可为强震区防灾减灾提供技术支持。

1 研究区域地质环境背景

泸定县地处青藏高原向四川盆地过渡地带,新构造运动强烈,此次泸定 $M_s 6.8$ 地震震中位于鲜水河断裂带南东段磨西断裂附近,震源深度为 16 km,地理坐标为北纬 29.59° ,东经 102.08° ^[17](图 1)。

本文以大渡河沿岸甘草沟、瓦斯沟、磨西河沟口、两岔河沟、王家沟及洛进沟为研究区。在两岔河沟及洛进沟的形成区、甘草沟及磨西河沟口的堆积区进行现场调查和无人机测量,分别获得四条泥石流沟形成区、堆积区的有关数据,用于软件误差分析及强震后泥石流预警。王家沟沟道内地势陡峭,因道路被同震滑坡崩塌破坏,只能到达沟口;但沟口旁 20 m 有隧道施工,大型起重设备及高压电线等造成无人机信号丢失,无法开展无人机摄影测量工作;瓦斯沟形成区呈沟道深切 V 型且沟道较长,无人机信号接收弱,也未能开展无人机摄影工作。

研究区内主要出露花岗岩、石英岩、云母片岩、砂板岩以及第四系松散堆积物。由于构造运动强烈,区内岩层破碎、裂隙发育、表层风化程度较高。研究区总体地形特点为西高东低,为典型的高山峡谷地貌,属于热带湿润季风气候与川西高原山地湿润气候过渡带,降雨主要集中在 6—9 月^[17]。

震中附近的洛进沟和两岔河沟处于鲜水河-滇东地震带,得妥镇大渡河两岸的同震崩滑密集发育区,总体以高位崩塌和浅表层滑坡为主^[17-18],滑坡图像如图 2 所示。

2 无人机摄影测量方法及误差

本文使用大疆精灵 4PRO2.0 无人机获取研究区影像;为使航拍数据具有较高分辨率,根据不同沟道实际情况设置了 5 m、10 m、20 m、40 m 和 80 m 五个航拍高度,借助 Pix4Dmapper 软件将无人机影像数据快速生成数字正射影像模型(Digital Orthophoto Model, DOM)和数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)。不同航拍高度条件下,软件根据影像测得的平均高度及其他因素,自动计算得到不同分辨率模型;以甘草沟为例,5 m、10 m、20 m、40 m 和 80 m 高度的影像模型分辨率分别为 0.15 cm、0.3 cm、0.6 cm、1.13 cm 和 2.08 cm (见

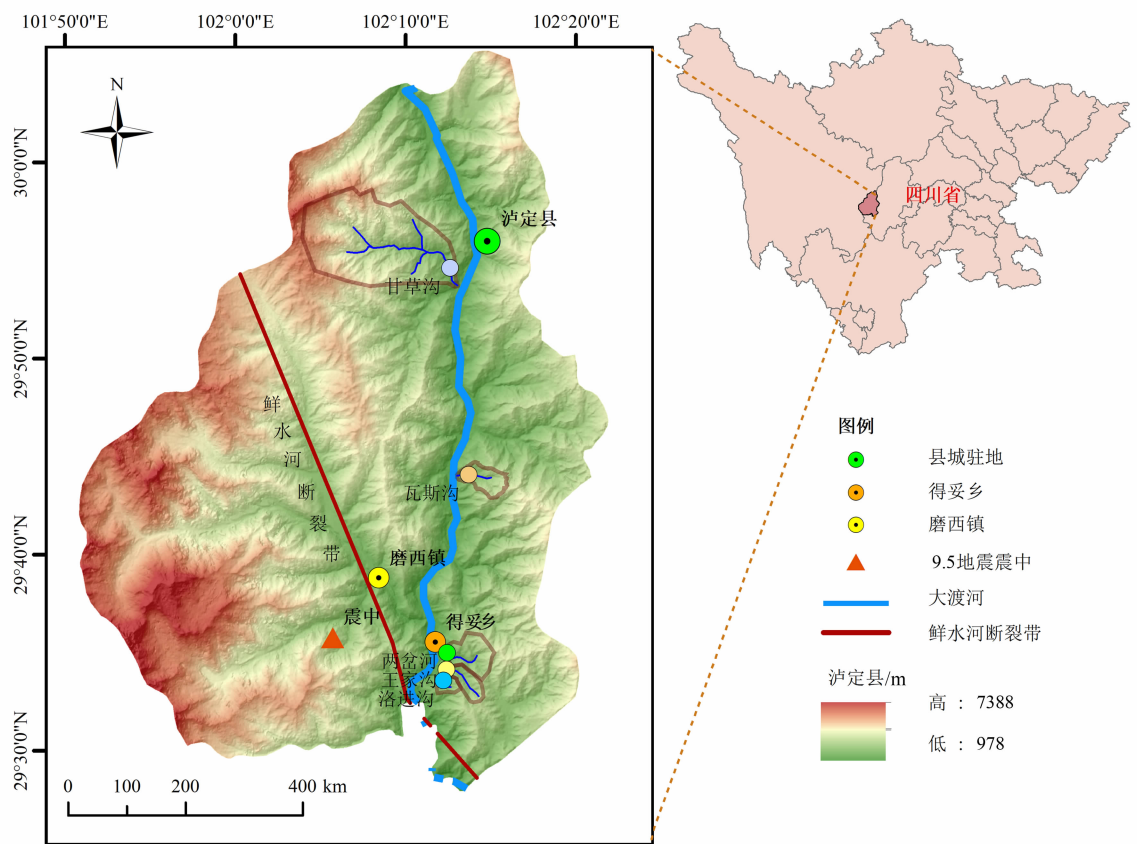


图1 研究区域泥石流流域分布图

Fig.1 Distribution of debris flow basin in the study area

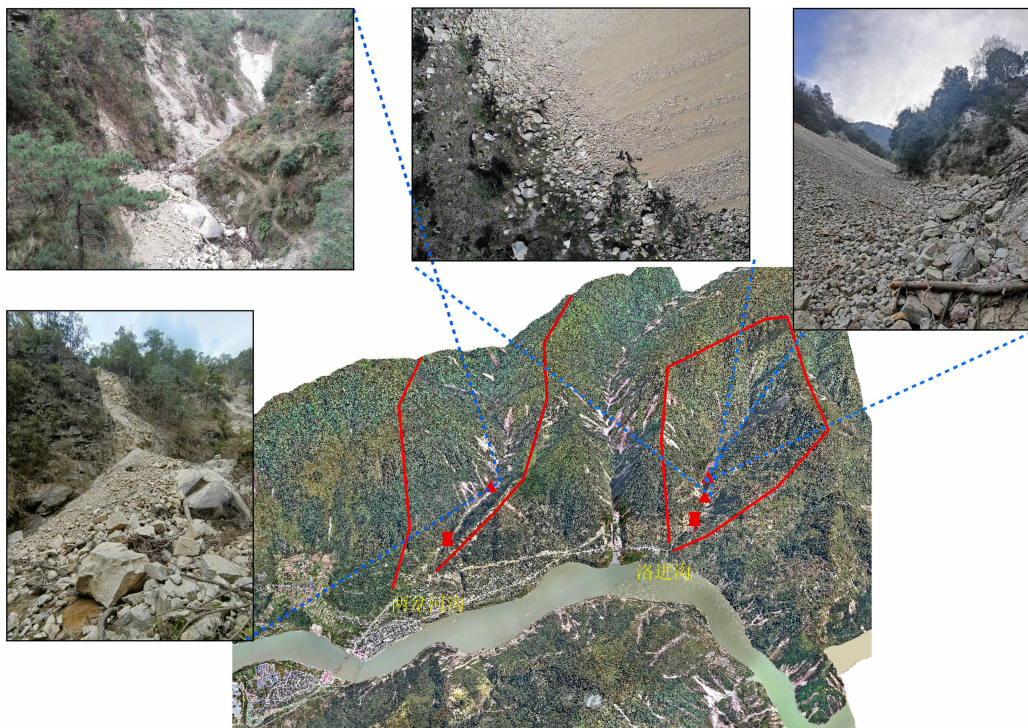


图2 洛进沟与两岔河某处形成区的同震崩滑

Fig.2 Co-seismic collapse of the Luojin gully and the Liangchahe gully

表 1 不同航拍高度下得到的理论与实际分辨率

Tab. 1 Theoretical and actual resolutions obtained at different aerial heights

航拍高度/m	地面分辨率/cm	
	理论	实际
5	0.14	0.15
10	0.27	0.30
20	0.55	0.60
40	1.10	1.13
80	2.19	2.08

表 1 中地面实际分辨率)。在此基础上,利用 ArcGIS(Geographic Information System) 软件基于数字模型进行人工影像测量,再使用 PCAS 软件基于无人机拍摄图像进行粒径测量。为探究无人机航测震后沟谷泥石流形成区物源粒径的准确性,通过以下几个误差进行研究。

2.1 系统误差

无人机测量误差的影响因素较多,一是无人机硬件的性能造成相机分辨率和无人机稳定性差异,产生不同的图像清晰度、镜头畸变、底片变形等系统误差;二是环境因素,如测量区域大小、风力等气象条件以及地形起伏变化情况和日照强度等;三是图像处理因素,包括航摄设计效果、控制点精度、数据处理质量等^[19]。

首先在研究区域内的甘草沟、洛进沟、瓦斯沟等的五条泥石流沟道的堆积区及形成区进行 5 m 航拍高度无人机粒径航测。5 m 航拍高度下的影像图合成的 DOM 模型地面分辨率可达 0.15 cm,所测粒径值大小更接近真实粒径值大小,可以作为只受系统误差影响而不受其他误差因素影响的影像图资料。分别在 8 个不同位置放置 30 ~ 50 cm 的卷尺(图 3),得到卷尺测量真实值与航拍 5 m 软件测量值之间的误差,8 处误差范围为 -11.25% ~ 12.5%,绝对值平均误差为 6.86%,这表明系统带来的误差较小,约为 10%,为可以接受的误差。

2.2 航拍高度及分辨率

在其他因素不变的情况下,航高越低,地面分辨率就越高,能识别的颗粒粒径就越小。但是对于同样范围大小的研究区域,较低的航高会导致像片数量较多,会增加内、外业工作量,且当航高较低时,安



图 3 卷尺长度测量影像

Fig. 3 Image of measuring tape length

全风险也相对较高,因此需要根据研究内容的需要,综合考虑工作量和安全等因素,确定最佳航拍高度。由公式(1)可计算得到不同飞行高度下的理论地面分辨率。表 1 为理论计算与实际航拍得到的分辨率对比表。理论上考虑到环境影响,实际得到的地面分辨率略大于理论分辨率。使用实际得到的地面分辨率,以甘草沟为例,通过以下两种方法来分析高度误差,得到可测粒径值和无人机航拍高度的关系。

$$GSD = \frac{a}{f} \times H \quad (1)$$

式中, GSD (Ground Sample Distance)为地面影像分辨率; a 为像元大小; f 为镜头焦距; H 为飞行高度。

2.2.1 影像图栅格及误差

栅格数据作为一种简单、直观的空间数据结构,它将地面划分为单一、均匀的网格,每个网格被定义为具有相应行列号的一个像元^[20],像元大小也是空间分辨率,亦称地面分辨率,因此分辨率 B 在数值上等于每个栅格的大小。根据影像图栅格尺寸,可以获得可测粒径的理论值。颗粒边界的识别误差可能会出现图 4 中的情况:影像中的颗粒边界可能会被虚化到 1 ~ 2 个栅格中,即实际颗粒边界线可能会在虚化栅格内的任意位置,图 4a 一侧的误差为 $0.5 B \sim 1 B$,图 4b 一侧的误差为 $0.71 B \sim 1.41 B$,则颗粒一侧可能产生的误差值为 $0.5 B \sim 1.41 B$,两侧产生的误差为 $1 B \sim 2.8 B$,取最大值和最小值的平均值为 $1.9 B$,因此测量颗粒(D)的误差 $E(\%) = 1.9 B/D$,参考系统误差在 10% 以内是可接受的,则需满足地面分辨率与可测粒径(D)的关系为 $1.9 B/D < 10\%$,即:

$$B/D < 0.053 \quad (2)$$

式中, B 为模型地面分辨率, 即每个栅格的边长大小; D 为可测粒径。

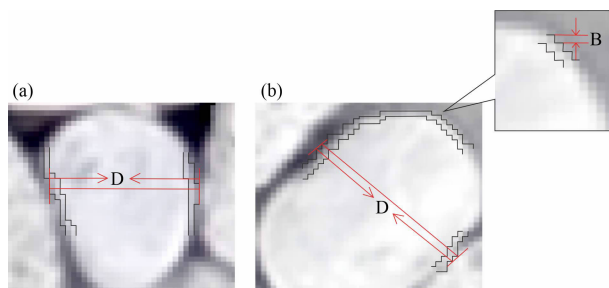


图4 颗粒栅格影像:(a)影像1;(b)影像2

Fig. 4 Particle raster image: (a) image 1; (b) image 2

2.2.2 摄影测量高度及可测粒径

采用 ArcGIS 软件对合成的 DOM 模型进行不同航拍高度的摄影测量, 以获取在可控误差范围内的实际可测粒径。在甘草沟沟道内, 分别在 5 m、10 m、20 m、40 m、80 m 航拍高度下进行了摄影测量, 选取中径粒径为 3~40 cm 的 17 个块石, 测量了各颗粒的粒径值。因 5 m 高度航拍的误差很小, 由此测量得到的粒径值作为标准值, 进行不同航拍高度摄影测量误差对比分析。图 5a 为在 5 m 高度下正射影像图, 测量得到的粒径值为 10.11 cm。

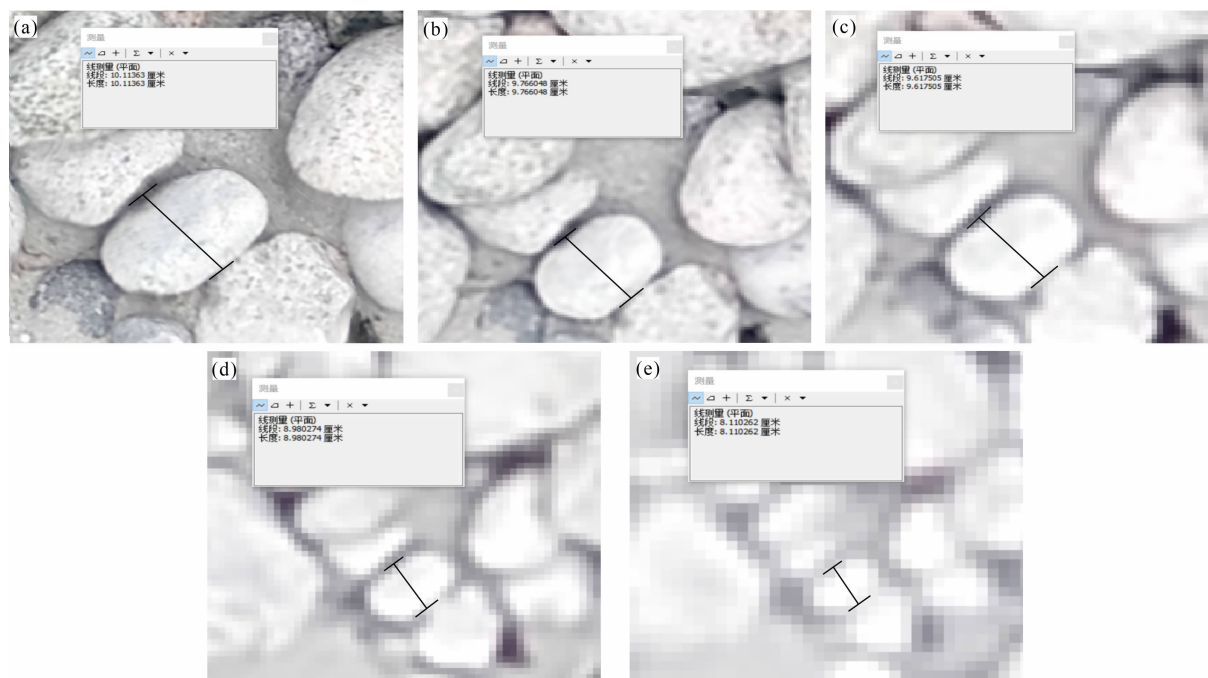


图5 同一颗粒在不同高度下的粒径测量图:(a)5 m;(b)10 m;(c)20 m;(d)40 m;(e)80 m

Fig. 5 Measurement of particle size at different heights of the same particle: (a) 5 m; (b) 10 m; (c) 20 m; (d) 40 m; (e) 80 m

图 5b~e 分别为 10 m、20 m、40 m、80 m 航拍高度下该颗粒的测量图, 与 5 m 航拍高度测量值对比, 误差在 10% 以内时该颗粒粒径为可测粒径。通过全部 17 个块石的测量对比误差分析, 得到不同航拍高度的最小可测粒径值, 再由式 (2) 得到不同航拍高度的最小可测粒径的理论值, 如图 6 中的理论和实际可测粒径线, 实际可测粒径比理论可测粒径略小, 约为理论可测粒径的 71%~87%。此外理论与实际可测粒径线表明无人机航拍高度越低, 可测粒径值越小。

由于实测值是由颗粒粒径大小逼近得到的, 且测量颗粒数量较少, 不能作为准确实测值, 为保证测量准确性, 这里采用式 (2) 的理论计算值。

2.3 坡度误差

摄影测量的地形参数如坡度、坡向、曲率等是连续变化的, 因此无人机航空摄影测量得到的数字模型是摄影区域的平均值^[21], 其中坡度引起误差主要是因为同样的飞行高度下, 较大的坡度导致无人机与地面的摄影距离在不同位置有显著的不同, 即实际测量高度与设定高度在有的位置有较大误差。如图 7 为洛进沟形成区沟道 20 m 高度下合成的数字影像模型, 使用 global mapper 软件查看其 3D 路径剖面, 经测量, 图 7 中①段平均坡度 11.5°, ②段

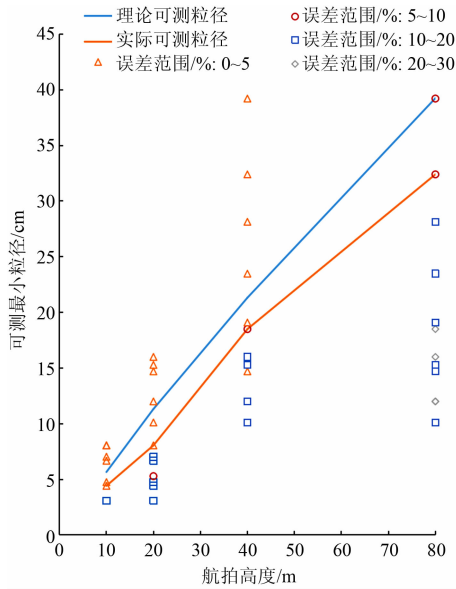


图 6 不同高度近实测最小粒径与理论值关系图
Fig.6 Plot of measured minimum particle size versus theoretical value at different heights

平均坡度 21.5° , 两段在沟道内的最大高差约为 8 m; 而沟道两侧坡面在强震后崩塌、滑坡产生的大量松散固体物源堆积形成了山坡坡度为休止角 (约为 33°) 的斜坡, 形成了狭窄的沟道, 使得斜坡上部 (图 7 中两侧) 的高度更小。无人机在①段起飞时的航拍设定高度为 20 m, 而在②段沟道以及两侧斜坡的

实际拍摄距离远小于 20 m, 造成该区域的平均测量高度远小于 20 m。在没有沟道坡度与斜坡坡度影响下, 20 m 的航拍高度无人机影像合成数字模型的地面分辨率为 0.6 cm (表 1 中甘草沟堆积区小坡度下的分辨率); 但图 7 中的洛进沟模型分辨率达到了 0.24 cm, 造成同样的设置飞行高度, 得到不同的模型分辨率, 图 7 影像中的可测量粒径仍然可以由分辨率 $B = 0.24 \text{ cm}$ 结合公式 (2) 确定, 并且在本文的校验中证实了这一点, 见文中 2.2 节。

坡度引起误差的另外一个原因是在图像识别过程中, 较大坡度将影响真实的颗粒粒径测量。研究区 5 条泥石流沟道中, 在不同坡度位置人工现场实测了 6~8 个颗粒的中值粒径, 并与人工摄影测量进行对比。如图 8, 当坡度大于 15° 时, 摄影测量误差超过 10%, 且误差随着坡度的增加而增大。考虑坡度误差影响, 将摄影测量的颗粒粒径值除以相对应的坡度余弦值, 得到更接近真实的摄影测量粒径值:

$$D_0 = D / \cos \theta \quad (3)$$

式中, D_0 为坡度修正后的近真实值; θ 为颗粒所在位置斜坡坡度 ($^\circ$)。如图 8, 在考虑坡度误差并用公式 (3) 校正后, 各坡度下的摄影测量误差都在 10% 以内, 可以满足精度要求。

2.4 PCAS 软件测量泥石流颗粒粒径

通过上述系统、高度及坡度误差分析发现, 无人

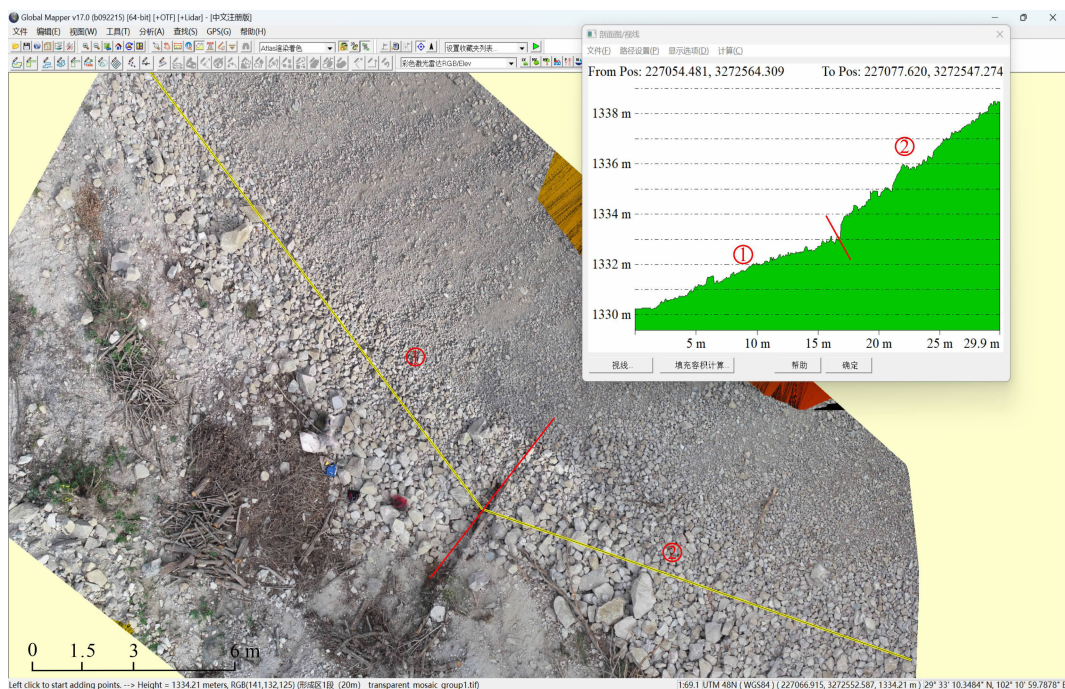


图 7 洛进沟某段形成区模型路径剖面图

Fig. 7 Path profile of the formation zone of a section of the Luojin gully

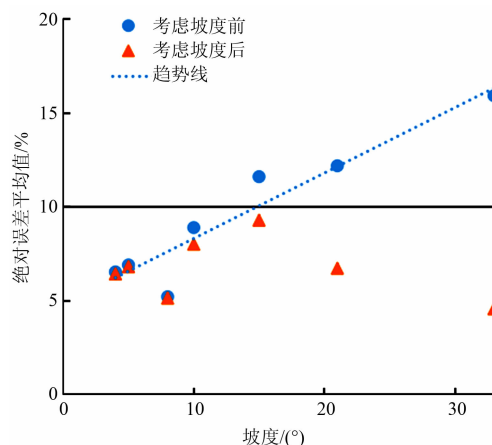


图8 考虑坡度前、后的误差关系

Fig. 8 Error relations before and after considering the slope

机航测得到的高清正射影像图可以用于泥石流物源粒径分析,其综合误差值在可接受范围内。为实现更高效、准确的泥石流粒径测量,可以使用孔隙(颗粒)与裂隙图像识别与分析系统(PCAS)测量泥石流物源颗粒。为研究 PCAS 系统测量粒径的可行性,将研究区内的洛进沟、两岔河、甘草沟及磨西河沟口人工现场实测粒径(各 50 ~ 100 个)与影像图人工测量、PCAS 软件测量结果对比。沟床起动型泥石流的形成是因为较大的洪水冲刷、搬运泥石流沟道表面的粗颗粒(粗化层^[22])进而起动下层的固体物质形成泥石流,夹杂在粗化层中的细小颗粒对泥石流的起动影响很小;在使用上述三种方法进行泥石流粒径的测量时,都忽略夹在粗化层中的细小颗粒,选择粗化层平均粒径进行研究。下面以甘草沟堆积区为例进行对比方法测试。

2.4.1 人工现场测量

测量泥石流沟道内颗粒粒径时,选择不受沟道水流、树枝干扰,颗粒相对均匀,颗粒特征具有代表性的区域进行测量。如图 9,选取的甘草沟堆积区面积约 7 m × 3 m、平均坡度为 4° 的小区域进行人工卷尺测量,实测粒径 100 个,颗粒平均中径粒径为 20.6 cm。

2.4.2 人工影像测量

使用 ArcGIS 进行不同高度下(5 m、10 m、20 m、40 m、80 m)航拍影像的人工测量,共测量颗粒中径粒径 30 个,计算得到不同高度航拍影像相应的平均中径粒径,以及人工影像测量误差(图 10)。人工影像测量方法与现场卷尺测量方法类似,选取同样区域的代表性颗粒进行测量。因人工影像测量颗粒与



图9 甘草沟堆积区测量区域示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the measuring area of the Gancuo gully deposit area

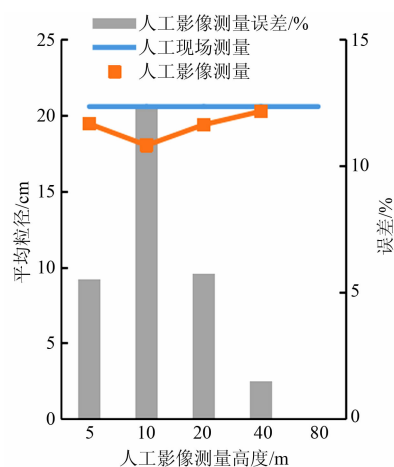


图10 不同高度人工影像测量结果

Fig. 10 Results of artificial image measurements at different heights

人工现场测量颗粒不完全重合,人工影像测量因边界影响也有较小的误差,但总体误差基本控制在 10% 以内,与现场测量基本一致。需要说明的是,前面已经得出的不同高度可测量的最小粒径理论值,因此若某区域的测量平均粒径值小于某高度对应最小测量理论值,则该高度的测量值不具有实际意义,不再考虑其测量结果。如图 10,甘草沟的实际平均粒径为 20.6 cm,80 m 高度下可测最小粒径 D 为 39.25 cm,因此 80 m 高度下的影像测量值无参考价值,没有在图 10 中。

2.4.3 PCAS 软件测量

PCAS 软件通过将图像二值化、矢量化处理,可

以计算颗粒、孔隙以及裂隙的面积、数目、长宽、形状系数等统计参数^[23-24]。由于 40 m、80 m 高度的无人机图像过于模糊,无法用于软件测量,本文采用 5 m、10 m、20 m 的无人机图像进行图像截取测量,测量结果发现这三个高度的测量结果非常接近,误差主要为人工处理二值图像时的人为误差,图 11 为 5 m 的无人机航拍图像的 PCAS 软件测量过程与结果。

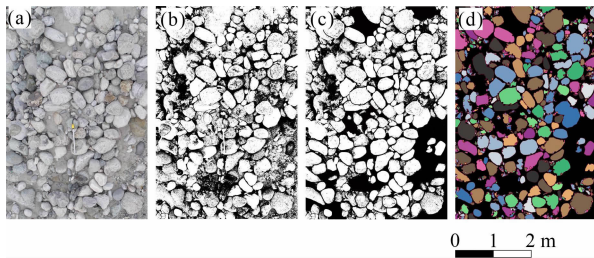


图 11 甘草沟 5 m 高度下 PCAS 图像处理过程:

(a) 裁剪后的正射影像图; (b) 图(a)的二值图;
(c) PS 处理后的二值图; (d) 二次二值化图像

Fig. 11 Process of PCAS image processing at 5 m height in the Gancuo gully: (a) cropped orthophoto; (b) binary map of Fig. (a);
(c) PS processed binary map; (d) secondary binarized image

PCAS 软件处理流程主要包括以下几个部分^[23-24]。

(1) 正射影像图获取。采用无人机获取泥石流沟道内固体颗粒正射影像图。

(2) 图像预处理(裁剪)。由于获得的无人机正射影像图像素过大,存在较多干扰物,如树木、水流、光线阴影等,进行软件测量时,选取固体颗粒相对均匀、较符合研究需要(本文主要针对泥石流起动物源粒径大小)的部分,截取进行测量。如图 11a,图像为泥石流沟道内的代表性颗粒。

(3) 图像二值化。每个像素点通过红黄蓝(RGB)三种颜色、不同的 RGB(0~255)取值构成,在图像识别过程中,将识别颗粒的某一像素点 RGB 值作为标准值 X ,其他像素点 RGB 值为 P , d 为 P 与 X 之间的差值:

$$d = |X - P| \quad (4)$$

图像处理过程中,为达到最好的识别效果,经过多次测试,最终设置一个阈值 T ,当 $d > T$ 时,该像素点识别为空隙,相反,当 $d < T$ 时,系统识别为颗粒^[24],得到图 11b 所示结果。

(4) 人工二值图加工处理(PS 处理)。由于环

境、光照等影响因素,颗粒与空隙之间会出现类似的颜色,干扰软件识别效果,造成颗粒识别不全或者颗粒边界模糊、颗粒与颗粒黏结为一体的不利情况。为解决这个问题,需要进行人工干预,即使用修图软件进行人工处理,得到图 11c 效果。

(5) 颗粒粒径识别。以经典的种子算法处理细小的杂点,设置最小面积阈值,以腐蚀运算处理重合颗粒。首先根据多个重叠颗粒的目视效果,设置最佳封闭半径(element radius),当颗粒重叠部分像素小于封闭半径时将其识别为两个颗粒;相反,当颗粒重叠部分大于封闭半径时,将其识别为一个颗粒,最后归还腐蚀像素点,进行识别颗粒的各项物理参数的统计^[25-26]。

(6) 颗粒粒径统计结果的处理。由于软件识别得到的固体颗粒相对于人工统计,其统计精度更高、结果更精细、数据量更大,且主要体现在对细小粒径的统计上;而现场实测粒径一般是选取该区域具有代表性的粗颗粒,即某个范围的粒径值占大多数的颗粒。因此,软件测量得到的固体颗粒平均中径值相对于现场实测和人工影像测量较小,需主动过滤掉对泥石流起动影响较小的小颗粒进行校正。

本文采用的过滤方法为设定颗粒下限粒径,去掉小颗粒,确保识别的颗粒粒径代表粗颗粒粒径。

颗粒下限粒径 D^* 的取值方法:通过人工影像测量 30 个固体颗粒得到该区域的平均粒径值(这里选用 5 m 高度的测量值)作为代表粒径 D_1 (两岔河由于拍摄环境限制只获取到 20 m 高度影像,故只能采用该数据),提出粒径系数概念,由下式获得颗粒下限粒径:

$$D^* = aD_1 \quad (5)$$

式中, a 为下限粒径系数。

通过甘草沟、洛进沟、两岔河及磨西河沟口等 4 条沟的代表粒径和 PCAS 软件测量颗粒粒径,在不同的下限粒径系数 a 条件下,得出软件测量修正的平均颗粒粒径。如图 12 为不同下限粒径系数 0.3~0.8 下的 PCAS 软件测量修正平均颗粒粒径误差图。当误差为 0 时,洛进沟、甘草沟、两岔河和磨西河沟口的粒径系数分别为 0.475、0.618、0.582、0.575。粒径系数 a 越小,软件测量的粒径平均值越小;相反,粒径系数 a 越大,软件测量的粒径平均值越大;因此从 0.3~0.8,软件测量平均值从小于人工摄影测量平均值,逐步演变为大于人工摄影测量

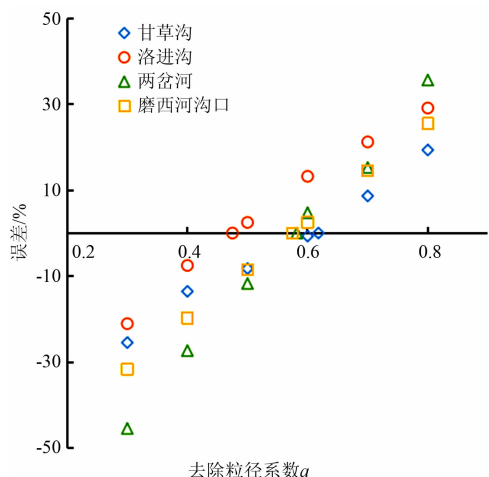


图 12 不同下限粒径系数与绝对平均误差值关系

Fig. 12 Relation between lower particle size coefficients and absolute mean error values

平均值,软件测量误差从负误差逐渐过渡到正误差。但粒径系数 a 在不同的流域测量中因平均粒径不同而不同,如图 13 得到代表粒径 D_1 和粒径系数 a (误差为 0 时不同沟道的粒径系数) 以及不同流域的粒径差 ($\Delta = D_1 - D^*$) 之间的关系,由于人工视觉上区分较小颗粒与较大颗粒时,往往由颗粒的相对差别决定,因此在颗粒粒径较小时,下限粒径与平均粒径相差的绝对值比较接近(如图 13 中的 $D_1 - \Delta$ 值关系)。图 13 中 D_1 和 Δ 之间有良好的线性关系,由 Δ 趋势线可以得到 D_1 与 Δ 之间的线性关系,由式(5)即可得到 D_1 与下限粒径系数 a 之间的函数关系:

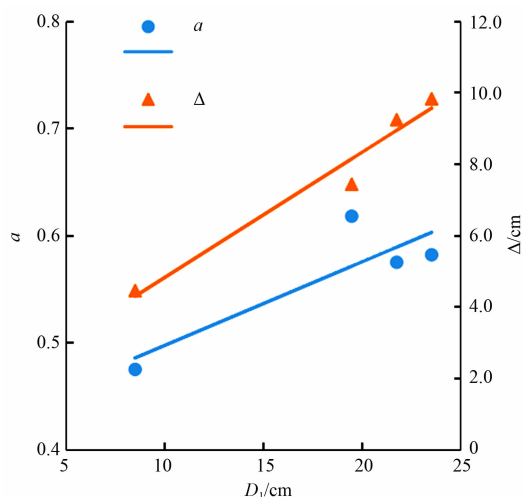
图 13 D_1 与 a, Δ 的关系图

Fig. 13 Relationships of D_1 and a, Δ

$$a = 0.6494 - 1.323/D_1 \quad (6)$$

$D_1 > 2.04$ cm, 当 $D_1 \leq 2.04$ cm 时,因为粒径较小,视觉上的绝对值区别有较大改变,式(6)不再适用。在 $D_1 < 5$ cm 时,因粒径较小,采用人工影像测量 30 ~ 50 个粗颗粒,即可作为粗颗粒粒径。

由于在不同摄影高度下人工影像测量得到的代表粒径 D_1 值不同,则由式(6)可以得到洛进沟、甘草沟、两岔河以及磨西河沟口在不同摄影高度下的待定系数 a ,再由式(5)可计算出不同摄影高度下的下限粒径值 D^* 及软件测量平均值 D' ,将其与人工现场测量平均值 D 对比,验证该方法的准确性。如图 14,分别为甘草沟、洛进沟、两岔河和磨西河沟口不同摄影高度下软件测量平均值 D' 与人工现场测量平均值的误差分析图,从图中可以看出每条沟软件测量平均值的误差都在 10% 以内,通过式(5)确定下限粒径系数 a 方法是可行的。

图 14 中甘草沟和磨西河测量区域为泥石流堆积区,用于测试方法的准确性。如表 2,人工影像测量使用的 5 m 高度影像(两岔河为 20 m 高度影像),误差 1 和误差 2 分别为软件测量值与人工现场测量值、软件测量值与人工影像测量值的绝对误差。软件测量与人工现场测量误差较小,因此软件测量方法可以用于泥石流形成区物源粒径调查。

3 研究区地震前后泥石流预警

2022 年 9 月 5 日泸定 $M_s 6.8$ 地震,诱发了大量滑坡、崩塌,主要分布在磨西镇及海螺沟流域内、得妥镇湾东村附近以及得妥镇大渡河两岸^[17]。本文现场调查了洛进沟、两岔河的泥石流形成区固体物源粒径,并根据泥石流预警模型给出了这两个泥石流流域的震前震后的降雨预警临界值。这两个泥石流流域位于得妥乡内,强震使得该区域地表岩石较为破碎,多处发生崩塌、滑坡,形成了更多、更细小的泥石流沟道物源,在短历时强降雨的激发下更容易形成泥石流,泥石流起动机理为沟床起动^[8]。通过无人机航拍影像结合 PCAS 系统测量以及人工现场测量得到了洛进沟和两岔河震后固体物源平均中径粒径。

3.1 震前泥石流预警

震前泥石流预报采用沟谷泥石流通用 1 h 降雨预报模型^[8],预警模型主要由泥石流形成区的地

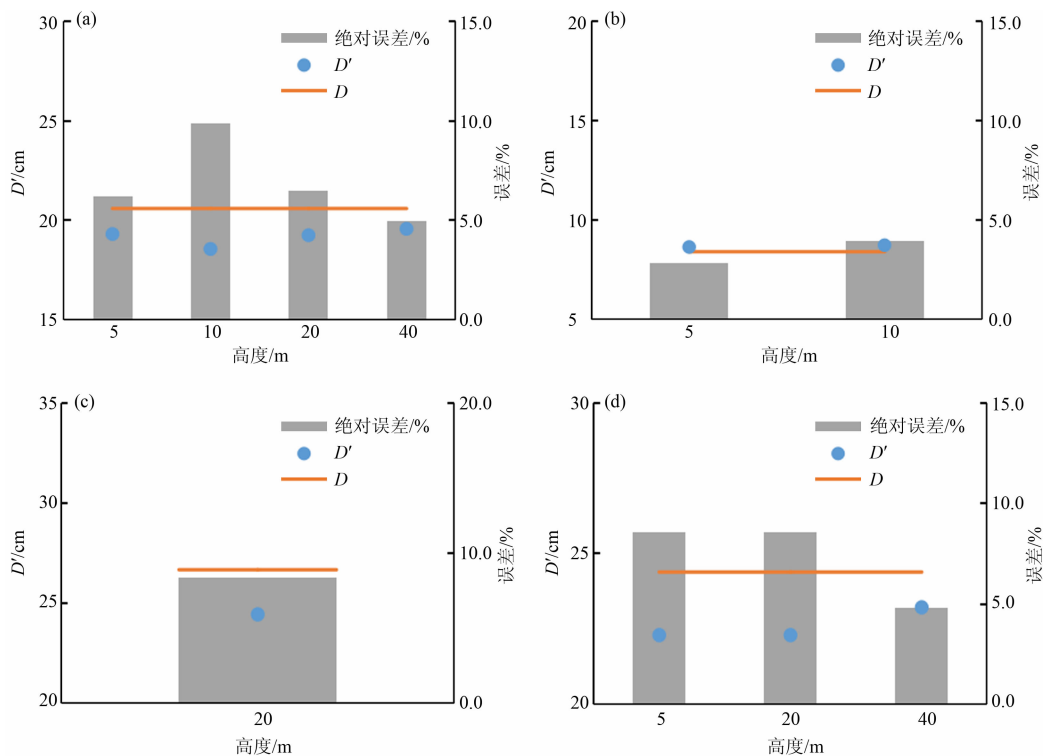


图 14 不同泥石流沟 D' 和 D 值误差图:(a) 甘草沟;(b) 洛进沟;(c) 两岔河沟;(d) 磨西河沟口

Fig. 14 D' and D error plots of different flow gullies;

(a) the Gancao gully; (b) the Luojin gully; (c) the Liangchahe; (d) the Moxi River gully

表 2 人工影像测量、软件测量结果与人工现场测量结果误差对比

Tab. 2 Comparison of errors between manual image, software and manual field measurement results

沟道	测量值					
	人工现场测量	人工影像测量		软件测量		
	D/cm	D_1/cm	误差/%	D'/cm	误差 1/%	误差 2/%
甘草沟	20.60	19.46	-5.53	19.32	-6.21	-0.01
洛进沟	8.40	8.49	1.07	8.64	2.86	0.02
两岔河	26.65	23.51	-11.78	24.42	-8.37	0.04
磨西河沟口	24.39	21.74	-10.87	22.3	-8.57	0.03

形、地质和降雨因子组成,其表达式为:

$$T = FJ\left(\frac{A}{A_0}\right)^{0.2} = J\left(\frac{A}{L^2}\right)\left(\frac{A}{A_0}\right)^{0.2} \tag{7}$$

$$G = F_0 C_1 C_2 C_3 C_4 \tag{8}$$

$$R = \frac{R^*}{R_0 C_v} = \frac{B + 12.5I}{R_0 C_v} \tag{9}$$

$$P = RT^{0.2}/G^{0.5} \geq C_r \tag{10}$$

式中, T 为泥石流形成区地形因子; F 为泥石流形成区形状系数; J 为泥石流形成区沟床纵比降; A 为泥石流形成区面积; A_0 为单位面积; L 为形成区沟道

长; G 为地质因子; F_0 为泥石流形成区平均坚固系数; C_1, C_2, C_3, C_4 分别为构造(断裂带)、地震烈度、物理风化和化学风化修正因子; R 为降雨因子; R^* 为综合降雨临界值; R_0 为当地年平均降雨量,泸定地区年平均降雨为 1080 mm^[27]; C_v 为当地 10 min 降雨变差系数,查阅当地水文手册获得泸定地区 10 min 降雨变差系数 $C_v=0.46$; B 为泥石流暴发前期降雨量; I 为泥石流激发 1 h 降雨量; P 为预警值; C_r 为判据临界值。泥石流发生的临界值有三个,分别是 $C_{r1} = 0.28$ ^[28]、 $C_{r2}=0.35$ 和 $C_{r3}=0.47$,分别对

应黄色预警、橙色预警和红色预警。

洛进沟和两岔河沟都位于大渡河流域泸定县得妥乡,本文震前的降雨数据来自于 2013- 06-20、2013-07-31 两次得妥乡群发性泥石流^[29]。由于未见有与本文两条泥石流沟当时相关的泥石流事件报道,推测在这两次群发性泥石流发生时,洛进沟与两岔河沟并未发生泥石流。由两次降雨事件的前期累积降雨量、1 h 激发雨量作为本文两条泥石流沟的主要降雨参数;通过地形图量取泥石流形成区面积 A 、沟床纵比降 J 、沟道长度 L ;通过地质图获得其岩性、断裂带位置,计算获得两条泥石流沟的地形因子 T 和地质因子 G ;由式(9)和(10)计算可得综合降雨临界值 R^* ,三个预警综合降雨临界值(R_1^* 、 R_2^* 、 R_3^* 分别对应黄色预警、橙色预警和红色预警)见表 3。根据式(9)中 R^* 与 B 、 I 关系,以 B 为横坐标, I 为纵坐标,得到洛进沟与两岔河沟的震前降雨预报模型,图 15a 和图 15b。起动泥石流的山洪是在坡面产流再汇流形成的,而坡面超渗产流需要一定的降雨强度,即超过最小 1 h 降雨量。由于本文中激发泥石流的降雨特征与蒋家沟泥石流的降雨特征相近,都为短历时强降雨,则根据多地的最小降雨强度

数据得出 10 min 预警模型中的最大、最小修正方法,取平均值并参考蒋家沟的最小 10 min 降雨量^[9],本文采用的最小 1 h 降雨量计算方法如下:

$$I_m = \frac{R^*}{60}$$

(11)

式中, I_m 为最小 1 h 降雨量。

由式(11)可得洛进沟和两岔河沟最小 1 h 降雨量,三个预警最小 1 h 降雨量(I_{m_1} 、 I_{m_2} 、 I_{m_3} 分别对应黄色预警、橙色预警和红色预警)见表 3 和图 15a、图 15b 中横线部分。

3.2 震后泥石流预警

通过访问调查和现场踏勘判断,洛进沟与两岔河沟在 2022 年强震未发生泥石流,可以采用泥石流精细化预报模型^[10]对两条沟进行震后泥石流预警。该预警模型是在泥石流 10 min 和 1 h 精细化预警模型基础上,引入了泥石流形成区沟道宽度和颗粒粒径参数,建立了改进的精细化泥石流 10 min 和 1 h 沟谷泥石流预警模型,得到了新的地形、地质因子和模型预警值,其中 1 h 预警模型的地形因子、地质因子、预警判断式如下:

$$T = J\left(\frac{A}{L^2}\right)\left(\frac{A}{W^2}\right)^{0.2}$$

(12)

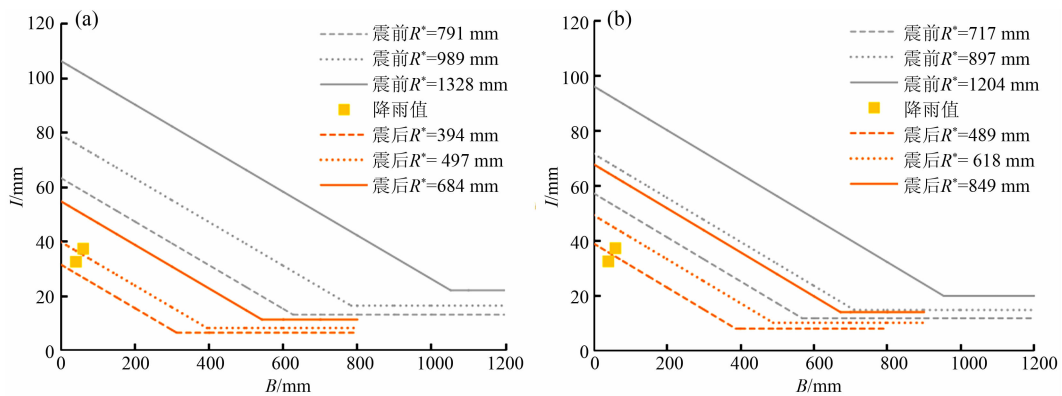


图 15 泥石流震前、震后预警模型: (a) 洛进沟; (b) 两岔河沟

Fig. 15 Pre-and post-shock prediction model: (a) the Luojin gully; (b) the Liangchahe gully

表 3 洛进沟、两岔河沟预警降雨参数

Tab. 3 Rainfall parameters of the early warning for the Luojin gully and the Liangchahe gully

泥石流沟	地震前后	R^*/mm			$I_m/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$		
		R_1^*	R_2^*	R_3^*	I_{m_1}	I_{m_2}	I_{m_3}
洛进沟	震前	791	989	1328	13.19	16.48	22.14
	震后	394	498	685	6.57	8.30	11.41
两岔河沟	震前	717	897	1204	11.96	14.95	20.07
	震后	489	618	849	8.15	10.30	14.15

$$G = \frac{D}{D_0} \quad (13)$$

$$P' = RT^{0.2}/G^{0.38} \geq C_r \quad (14)$$

式中, W 为泥石流形成区沟道平均宽度; D 为泥石流形成区粗化层颗粒平均中径粒径; D_0 为粗颗粒粒径分界值, $D_0 = 2 \text{ mm}$ 。 P' 为新的预警值; C_r 为判据临界值, 判据临界值有三个, 分别是 $C_{r_4} = 0.19^{[14]}$ 、 $C_{r_5} = 0.24$ 和 $C_{r_6} = 0.33$, 分别对应黄色预警、橙色预警和红色预警。

通过人工现场测量、无人机摄影人工测量和 PCAS 软件测量获得洛进沟和两岔河某段形成区的震后固体物源平均中值粒径, 最终以人工现场测量为准, 平均中值粒径分别为 8.40 cm 和 15.13 cm ; 形成区沟道平均宽度分别为 1.43 m 和 4.4 m , 计算得到洛进沟和两岔河沟震后地形因子 T 和地质因子 G 。由式(9)和(14)计算得到震后综合降雨临界值 R^* 及三个预警综合降雨临界值 (R_1^* 、 R_2^* 、 R_3^* 分别对应黄色预警、橙色预警和红色预警) 见表 3; 由公式(11)可得洛进沟和两岔河沟最小 1 h 降雨量及三个预警最小 1 h 降雨量 (I_{m_1} 、 I_{m_2} 、 I_{m_3} 分别对应黄色预警、橙色预警和红色预警), 见图 15(a) 和 (b) 中横线部分, 数据见表 3。根据公式(9)中 R^* 与 B 、 I 关系, 以 B 为横坐标, I 为纵坐标, 得到洛进沟和两岔河沟震后泥石流预警图, 见图 15(a) 和 (b)。

由图 15 可知, 研究区震后的临界雨量相比于震前大幅降低, 由表 3 可计算得到洛进沟震后泥石流综合降雨临界值仅为震前的 $49.8\% \sim 51.5\%$, 两岔河沟震后泥石流综合降雨临界值仅为震前的 $68.2\% \sim 70.5\%$, 其降低程度的不同与崩塌滑坡物源固体颗粒粒径大小和沟道宽度有关, 粒径越小, 沟道越狭窄, 越容易起动力形成泥石流, 其降雨临界值降低越多。此次泸定 $9 \cdot 5$ 地震最高地震烈度可达 IX 度, 这两条沟的 PGA 值为 $0.31 \sim 0.39 \text{ m/s}^2^{[30]}$, 根据式(15)^[7] 计算得到的地震前后降雨阈值的比值 r 为 $42.7\% \sim 60.0\%$, 该值与表 3 中洛进沟和两岔河沟地震前后的临界降雨量比值接近, 说明本文研究结果与文献[7]的结果基本一致, 符合强震区泥石流的演化规律。

$$r = 0.106G'^{-1.48} \quad (15)$$

式中, r 为震后临界降雨量与震前临界降雨量的比值; G' 为无量纲 PGA。

4 不足与问题

尽管本文中无人机摄影测量的精度较高, 能满足震后泥石流物源粒径调查的需要, 但无人机的测量过程与方法仍存在一定的局限性。通过无人机测量泥石流形成区物源粒径的过程中, 需要较好的无人机信号才能完成测量。但是在两岔河沟距离沟口较远的泥石流形成区, 因为沟道深陡, 无人机信号时好时坏, 仅进行了 20 m 高度摄影测量, 当颗粒粒径较小时则无法满足测量精度; 又如在王家沟沟口处隧道施工的大型起重设备及高压电线严重影响了无人机信号, 完全无法进行无人机测量。因此, 更高级的无人机可以在无人机弱信号下完成摄影, 或在无人机信号较好的地区开展工作, 都是将来工作的首要选择, 是保障强震区在震后泥石流快速准确预警的基础。

本文采用的大疆精灵 4Pro 设备不具备 RTK 功能, 同时因为部分泥石流形成区沟道无法到达现场, 因此本文未进行控制点布设。根据在其他可以到达的沟道人工放置的卷尺进行系统误差对比分析, 所合成的模型分辨率已达到研究需要, 但使用更先进的无人机或通过添加控制点提高模型精度进而获得高精度测量结果, 仍是今后强震区泥石流物源粒径调查的发展方向。

强震区泥石流物源丰富, 泥石流物源的厚度可能较大, 表明泥石流物源可能不会一次被全部搬运, 而表层以下的物源粒径不同, 因此物源厚度对泥石流的预警准确性存在一定影响, 尤其是发生泥石流后紧接着再次发生泥石流时的误差很大。本文无人机航拍测量方法中无法测量泥石流物源厚度, 对调查阶段的泥石流预警影响相对较小, 可以忽略。但是对泥石流发生后紧接着可能发生的泥石流预警, 没有通过进一步的新的无人机摄影测量, 可能会漏报泥石流的发生, 需要谨慎使用预警临界值。此外, 由于洛进沟与两岔河沟到目前为止仍未发生泥石流, 本文对两条沟的预警准确性仍需等待将来泥石流发生后进行验证, 并开展新的测量对比泥石流发生前后的颗粒粒径和沟道宽度变化, 进一步精细化判断泥石流流域在强震后及泥石流发生后的演化。

5 结论

本文现场调查了泸定 9·5 地震后泥石流沟的形成区及堆积区松散堆积物组成,采用无人机摄影-软件测量相结合的方式对泥石流粒径识别,通过系统、高度及坡度误差分析,探讨了无人机航测泥石流形成区沟道粒径方法的准确性,并对研究区的洛进沟、两岔河沟进行了震前、后预警,得到了如下结论。

(1)通过无人机摄影结合软件测量研究区泥石流沟道颗粒粒径的方法与人工现场测量粒径值的方法对比,误差较小,基本都在 10% 以内,可以用于泥石流形成区颗粒粒径测量。

(2)强震后泥石流形成区颗粒粒径大幅减小,激发泥石流的临界降雨量大幅降低,洛进沟震后泥石流综合降雨临界值仅为震前的 49.8% ~ 51.5%,两岔河沟震后泥石流综合降雨临界值仅为震前的 68.2% ~ 70.5%。

(3)强震后泥石流的激发降雨临界值是一个动态变化过程,会随着强震后雨季与暴雨次数和未来新的地震而发生变化。后续对该区域的预警要在每一年雨季后或新的地震后进行沟道物源粒径及沟道宽度的测量,采用无人机摄影结合软件测量泥石流沟道物源粒径变化的方法可以达到事半功倍的效果。

参考文献 (References)

- [1] 范宣梅, 王欣, 戴岚欣, 等. 2022 年 $M_s6.8$ 级泸定地震诱发地质灾害特征与空间分布规律研究[J]. 工程地质学报, 2022, **30** (5): 1504 - 1516. [FAN Xuanmei, WANG Xin, DAI Lanxin, et al. Characteristics and spatial distribution pattern of $M_s6.8$ Luding Earthquake occurred on September 5, 2022 [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, **30** (5): 1504 - 1516] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2022-0665
- [2] 颜照坤, 李勇, 黄润秋, 等. 汶川 $M_s8.0$ 地震驱动的同震及震后地质灾害空间分布[J]. 四川地震, 2011(4): 1 - 7. [YAN Zhaokun, LI Yong, HUANG Runqiu, et al. The spatial distribution of coseismic geological disasters triggered by the 2008 Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2011 (4): 1 - 7]
- [3] 唐川, 梁京涛. 汶川震区北川 9.24 暴雨泥石流特征研究[J]. 工程地质学报, 2008, **16** (6): 751 - 758. [TANG Chuan, LIANG Jingtao. Characteristics of debris flows in Beichuan epicenter of the Wenchuan Earthquake triggered by rainstorm on September 24, 2008 [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, **16** (6): 751 - 758]
- [4] 许强. 四川省 8·13 特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. 工程地质学报, 2010, **18** (5): 596 - 608. [XU Qiang. The 13 August 2010 catastrophic debris flows in Sichuan province: Characteristics, genetic mechanism and suggestions [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, **18** (5): 596 - 608]
- [5] SHIEH C L, CHEN Y S, TSAI Y J. Variability in rainfall threshold for debris flow after the Chi-Chi earthquake in central Taiwan, China [J]. International Journal of Sediment Research, 2009, **24** (2): 177 - 188.
- [6] ZHANG S, ZHANG L M. Impact of the 2008 Wenchuan earthquake in China on subsequent long-term debris flow activities in the epicentral area [J]. Geomorphology, 2017, **276**: 86 - 103. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.10.009
- [7] YU Bin, WU Yufu, CHU Shengming. Preliminary study of the effect of earthquakes on the rainfall threshold of debris flows [J]. Engineering Geology, 2014, **182**: 130 - 135. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.04.007
- [8] 余斌, 朱渊, 王涛, 等. 沟床起动型泥石流预报研究[J]. 工程地质学报, 2014, **22** (3): 450 - 455. [YU Bin, ZHU Yuan, WANG Tao, et al. Prediction model for occurrence of debris flow in channels with runoff initiation mechanism [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, **22** (3): 450 - 455] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2014.03.014
- [9] 余斌, 朱渊, 王涛, 等. 沟床起动型泥石流的 10 min 降雨预报模型[J]. 水科学进展, 2015, **26** (3): 347 - 355. [YU Bin, ZHU Yuan, WANG Tao, et al. Research on the 10-minute rainfall prediction model for debris flows [J]. Advances in Water Science, 2015, **26** (3): 347 - 355] DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.03.006
- [10] 余斌, 杨凌威, 刘清华, 等. 基于沟床宽度与颗粒粒径的泥石流精细化预报模型[J]. 地球科学, 2020, **45** (4): 1447 - 1456. [YU Bin, YANG Lingwei, LIU Qinghua, et al. A precise prediction model on debris flows caused by runoff mechanism based on channel width and particle size [J]. Earth Science, 2020, **45** (4): 1447 - 1456] DOI: 10.3799/dqkx.2019.131
- [11] 赵岩, 郑娇玉, 郭鹏, 等. ImageJ 软件在泥石流固体颗粒分析中的应用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, **51** (6): 877 - 881. [ZHAO Yan, ZHENG Jiaoyu, GUO Peng, et al. Applications of the ImageJ software in analysis of solid grains in a debris flow gully [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2015, **51** (6): 877 - 881] DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2015.06.020
- [12] 彭双麒, 许强, 李骅锦, 等. 基于高精度图像识别的堆积体粒径分析[J]. 工程地质学报, 2019, **27** (6): 1290 - 1301. [PENG Shuangqi, XU Qiang, LI Huajin, et al. Grain size distribution analysis of landslide deposits with reliable image

- identification [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, **27**(6): 1290–1301 DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2018–305
- [13] 彭双麒, 许强, 郑光, 等. 白格滑坡-碎屑流堆积体颗粒识别与分析[J]. *水利水电技术*, 2020, **51**(2): 144–154. [PENG Shuangqi, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. Recognition and analysis of deposit body grain of Baige landslide-debris flow [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, **51**(2): 144–154] DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2020.02.017
- [14] 刘朋恩, 刘文连, 许汉华, 等. 基于 SEM 及 PCAS 的白云岩溶蚀孔隙结构量化评价研究[J]. *地质灾害与环境保护*, 2023, **34**(1): 59–63. [LIU Peng'en, LIU Wenlian, XU Hanhua, et al. Quantitative evaluation of dolomite dissolution pore structure based on SEM and PCAS [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2023, **34**(1): 59–63]
- [15] 徐今星, 杨根兰, 梁凤, 等. 崩积体粒径的图像识别与分析[J]. *科学技术与工程*, 2021, **21**(26): 11084–11093. [XU Jinxing, YANG Genlan, LIANG Feng, et al. Image recognition and analysis of the particle size of collapsed deposits [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, **21**(26): 11084–11093]
- [16] 闫高原, 韦重韬, 宋昱, 等. 基于 Ar-SEM 及 PCAS 页岩孔隙结构定量表征[J]. *地球科学*, 2018, **43**(5): 1602–1610. [YAN Gaoyuan, WEI Chongtao, SONG Yu, et al. Quantitative characterization of shale pore structure based on Ar-SEM and PCAS [J]. *Earth Science*, 2018, **43**(5): 1602–1610] DOI: 10.3799/dqkx.2017.525
- [17] 张佳佳, 陈龙, 李元灵, 等. 2022 年 9 月 5 日泸定 $M_s6.8$ 地震的同震地质灾害发育特征及主控因素分析[J]. *地震学报*, 2023, **45**(2): 167–178. [ZHANG Jiajia, CHEN Long, LI Yuanling, et al. Development characteristics and controlling factors of co-seismic geo-hazards triggered by the Luding $M_s6.8$ earthquake on September 5, 2022 [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2023, **45**(2): 167–178] DOI:10.11939/jass.20220215
- [18] LIU Xuemei, SU Pengcheng, LI Yong, et al. Spatial distribution of landslide shape induced by Luding $M_s6.8$ earthquake, Sichuan, China: Case study of the Moxi Town [J]. *Landslides*, 2023, **20**: 1667–1678. DOI: 10.1007/s10346–023–02070–2
- [19] 彭桂花. 基于无人机航空摄影测量 DOM 制作质量控制[J]. *测绘与空间地理信息*, 2022, **45**(9): 195–197. [PENG Guihua. Quality control of orthophoto production based on UAV aerial photogrammetry [J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2022, **45**(9): 195–197]
- [20] 殷俊. 基于 BIM 三维构件的隧道施工进度精细化管理研究[D]. 南京: 东南大学, 2020: 10. [YIN Jun. Study on lean management of tunnel construction schedule based on BIM three-dimensional components [D]. Nanjing: Southeast University, 2020: 10] DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2020.002150
- [21] 刘学军, 卢华兴, 仁政, 等. 论 DEM 地形分析中的尺度问题[J]. *地理研究*, 2007, **26**(3): 433–442. [LIU Xuejun, LU Huaxing, REN Zheng, et al. Scale issues in digital terrain analysis and terrain modeling [J]. *Geographical Research*, 2007, **26**(3): 433–442]
- [22] 韩林, 余斌, 鲁科. 泥石流暴发频率与其形成区块石粒径的关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, **20**(9): 1149–1156. [HAN Lin, YU Bin, LU Ke. Relationship of frequency of debris flows and the particle size in the channel [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(9): 1149–1156]
- [23] LIU Chun, SHI Bin, ZHOU Jian, et al. Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: Application on SEM images of clay materials [J]. *Applied Clay Science*, 2011, **54**(1): 97–106. DOI: 10.1016/j.clay.2011.07.022
- [24] 刘春, 许强, 施斌, 等. 岩石颗粒与孔隙系统数字图像识别方法及应用[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(5): 925–931. [LIU Chun, XU Qiang, SHI Bin, et al. Digital image recognition method of rock particle and pore system and its application [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(5): 925–931] DOI: 10.11779/CJGE201805018
- [25] GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital image processing* [M]. New Jersey: Publishing House of Electronics Industry, 2017: 31.
- [26] YU Weiwei, HE Fei, XI Ping. A rapid 3D seed-filling algorithm based on scan slice [J]. *Computers and Graphics*, 2010, **34**(4): 449–459. DOI: 10.1016/j.cag.2010.05.005
- [27] 邓辉. 基于遥感和 GIS 的泸定县生态地质环境质量评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2011: 10. [DENG Hui. Assessment of eco-geological environment quality in Luding based on GIS and RS [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011: 10]
- [28] 陈文鸿, 余斌, 柳清文, 等. 北京山区泥石流的单沟预报[J]. *长江科学院院报*, 2023, **40**(1): 94–100 + 115. [CHEN Wenhong, YU Bin, LIU Qingwen, et al. Forecast of single ditch debris flow in mountainous area of Beijing [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, **40**(1): 94–100 + 115] DOI: 10.11988/ckyyb.20210760
- [29] 沈毅, 露丹. 泸定县泥石流灾害特征及降水因子分析[J]. *高原山地气象研究*, 2014, **34**(2): 81–85 + 90. [SHEN Yi, LU Dan. Characteristics of debris flow disaster and precipitation factor analysis in Luding [J]. *Plateau and Mountain Meteorological Research*, 2014, **34**(2): 81–85 + 90] DOI: 10.3969/j.issn.1674–2148.2014.2.016
- [30] 王玉婕, 张丽芬, 孙晓丹, 等. 2022 年四川泸定 $M_s6.8$ 地震近场强震动模拟[J]. *大地测量与地球动力学*, 2023, **43**(5): 441–446 + 516. [WANG Yujie, ZHANG Lifan, SUN Xiaodan, et al. Near-field strong motion simulation of the 2022 Luding $M_s6.8$ earthquake in Sichuan province [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2023, **43**(5): 441–446 + 516] DOI: 10.14075/j.jgg.2023.05.001

Recognition of Geo-Materials Composition by UAV Measurements and Its Application to Early Warning of Debris Flow

KUANG Xuan, YU Bin^{*}, CHEN Long, DONG Xiujun

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Strong earthquakes lead to extensive accumulation of debris from rockfalls and landslides in debris flow basins, followingly which squeezes and encroaches on natural debris flow gully, completely changing the composition of geo-materials on gully bed, and sharply reducing the threshold of debris flow initiation induced by rainfall. Changes in grain sizes and channel widths in post-earthquake gullies directly altered the process and mechanism of post-earthquake debris flow motivation; however, available debris flow warning models did not interpret the dynamic changes in the composition of geo-source of debris flow as a main control factor, which needs to be improved and justified.

In this study, debris flow gullies in the post-shock areas of the Sichuan Luding Earthquake on September 5 of 2022 were surveyed in their section of forming, transporting and accumulating debris flow; unmanned aerial vehicles (UAVs) were used to photograph geo-materials, followed by PCAS software to be used to identify particle sizes by image recognition; the accuracy of the UAV approach to measurement of grain size in the forming section was addressed through three aspects of error analysis of systematic error, height error and slope error, respectively.

The geo-materials in the Luojin gully and the Liangchahe gully at Detuo town in the Daduhe River basin of Luding county, Sichuan province of China was remotely photographed and then interpreted for image recognition for cases study; the comprehensive rainfall threshold for pre-shock debris flow as well as post-shock debris flow in the two gullies were estimated by combination of 1-hour prediction model of debris flow and a refined 1-hour prediction model. It was found that the particle size in the two gullies decreased evidently after the shock, along with significant decreases in rainfall thresholds.

By error analysis, it was obtained that the UAV approach of near-earth observation combined with software to determine the particle sizes of geo-materials in the source areas of debris flow gullies had minor deviations as compared with in-situ measurement, justifying the applicability of the UAV approach; moreover, since the rainfall threshold of post-shock debris flow exhibited a dynamic change, using UAV approach in any field survey to collect geo-material information is a matter of time-saving and efficiency.

Key words: the Luding “9.5” earthquake; UAVs observation; PCAS software; particle size

(责任编辑 朱颖彦 李嵘)