



移动阅读

赵聪, 铁永波, 梁京涛, 2023. 基于机载 LiDAR 技术的泥石流物源侵蚀量定量评价研究[J]. 沉积与特提斯地质, 43(4): 808–816. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.09004](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.09004)

ZHAO C, TIE Y B, LIANG J T, 2023. Quantitative evaluation of debris flow provenance erosion based on Airborne Lidar Technology[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(4): 808–816. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.09004](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.09004)

基于机载 LiDAR 技术的泥石流物源侵蚀量定量评价研究

赵 聪¹, 铁永波², 梁京涛^{1*}

(1. 四川省地质调查院 稀有稀土战略资源评价与利用四川省重点实验室, 四川 成都 610081; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 610218)

摘要: 泥石流物源是形成泥石流的三大基本条件之一, 物源侵蚀堆积变化量则是衡量泥石流规模和频率的重要指标, 然而目前采用常规技术手段仍难以实现对物源侵蚀堆积变化的定量研究。针对这一问题, 本文以西昌市邛海水厂后山冲沟泥石流为例, 采用机载 LiDAR 技术建立了该流域雨季前后的高精度数字高程模型(DEM), 并基于此开展了泥石流物源侵蚀量定量评价研究。结果表明: 邛海水厂后山冲沟流域总体过火面积达 65%, 流域内主要发育坡面堆积物源、崩滑堆积物源以及沟道堆积物源; 两期次高精度 DEM 数据差分叠加可实现泥石流物源侵蚀量的估算, 该沟雨季前后泥石流物源侵蚀减少量为 12 209 m³, 物源侵蚀变化呈分布区域广、数量多、散状发育的特点; 泥石流物源的启动以坡面堆积物源侵蚀为主, 侵蚀厚度多在 0.5 m 以内; 邛海水厂后山冲沟泥石流在今后一段时间内将以高频泥石流为主。

关键词: 高精度 DEM; 泥石流; 机载激光雷达; 物源侵蚀

中图分类号: P237; P642.23

文献标识码: A

Quantitative evaluation of debris flow provenance erosion based on Airborne Lidar Technology

ZHAO Cong¹, TIE Yongbo², LIANG Jingtao^{1*}

(1. Sichuan Geological Survey/Evaluation and Utilization of Strategic Rare Metals and Rare Earth Resource Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610081, China; 2. Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, China)

Abstract: The material source is one of the three basic conditions for the formation of debris flow, and the change in erosion accumulation of the material source is an important index to measure the scale and frequency of debris flow. Currently, conventional techniques are still unable to achieve quantitative research on the change in source erosion accumulation. To solve this problem, this paper takes the gully debris flow at the back of the Qionghai water plant in Xichang City as an example, based on two periods of optical images and high-precision DEM (Digital Elevation Model) by LiDAR before and after the rainy season, carries out quantitative evaluation of debris flow provenance erosion. The results show that: the fire area of the basin is 65%, and there are slope

收稿日期: 2021-04-30; 改回日期: 2021-09-04; 责任编辑: 黄春梅

作者简介: 赵聪(1994—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事地质灾害遥感调查监测相关研究。E-mail: 735069327@qq.com

通讯作者: 梁京涛(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事遥感地质、水工环地质研究工作。E-mail: 550124235@qq.com

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(41772324); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190640); 四川省地质灾害隐患遥感识别监测(2020年)项目(510201202076888)

erosion provenance, landslide provenance and gully accumulation sources in the basin. According to the superposition analysis of two high-precision DEM datasets, the source erosion amount of debris flow before and after the rainy season is 12209 cubic metres. The source erosion area is characterized by wide distribution, large number and scattered development. The debris flow is mainly caused by slope material source erosion, and the majority of the erosion thickness is within 0.5 m. Therefore, there will be high frequency debris flow in the future.

Key words: High precision DEM; debris flow; airborne LiDAR; source erosion

0 引言

泥石流是一种能在短时间内冲出大量固体松散物质的特殊洪流,以其突发性、强致灾性、周期复发性等特征,严重威胁着山区人民的生命财产安全(Alexander, 1989; 刘希林和莫多闻, 2001)。物源作为泥石流形成的三大基本条件之一,对泥石流的规模、频率以及致灾程度等起着决定性的控制作用(潘聪, 2015)。因此,众多国内外学者对泥石流物源展开了大量研究工作,例如泥石流物源的界定(Varnes, 1978; 徐弘, 1995; 杨顺, 2014)、采用现场调查法(周必凡等, 1991; 张佳佳, 2018)和遥感解译法(Tang et al, 2011; 常鸣等, 2014)的物源储量评估以及物源动储量估算(蒋忠信, 1994; 谢谟文等, 2011; 方群生等, 2016; 张友谊等, 2020)等方面取得了较为丰硕的成果。

机载激光雷达(LiDAR)是一种利用激光获取目标地表高精度三维坐标的新型遥感技术手段(Axelsson, 1999),由于该技术具有“穿透植被”、获取真实地形地貌信息的优势,可作为一种新的技术手段应用于高植被覆盖山区地质灾害隐患识别与调查研究领域。早在本世纪初期,Chigira 等(2004)便首次利用机载 LiDAR 技术识别了日本福岛某区域浅层滑坡;此后,国外研究学者相继在巴布亚新几内亚利希尔(Hanberg et al, 2005)、美国爱达荷州(Glenn et al, 2006)以及华盛顿州(Schulz, 2007)等地区成功利用机载 LiDAR 技术识别了区内滑坡以及变形破坏特征;机载 LiDAR 技术在国内起步相对较晚,近年来,随着我国国民经济的不断发展,国内学者也相继在长江三峡库区、九寨沟等地区开展了基于机载 LiDAR 技术的地质灾害隐患调查研究工作(李显巨, 2012; 刘圣伟等, 2012; 余金星等, 2018; 董秀军等, 2020; 王绚等, 2020),通过提取微地貌地形信息,实现滑坡等灾害体的识别圈定,取得了较为理想的应用效果。

目前泥石流物源侵蚀堆积以及动储量估算研

究多是在现场调查以及遥感解译等手段的基础上,采用经验公式对某一片区的泥石流物源储量以及侵蚀动态变化情况进行评估,具体应用于单一泥石流,评估结果存在一定偏差。本文以西昌市邛海水厂后山冲沟泥石流为例,将机载 LiDAR 技术应用于泥石流物源侵蚀量定量评价研究,充分发挥机载 LiDAR 技术在获取高精度地形参数方面的优势,识别流域内过火区分布、物源分布、物源侵蚀堆积变化等特征,估算物源侵蚀量并评估该泥石流发展趋势,可为泥石流物源动态演变和定量研究提供科学参考。

1 区域概况

邛海水厂后山冲沟位于泸山景区南侧,沟口地理坐标为(27°49′25.03″ N, 102°16′40.94″ E)。该区地处世界闻名的攀西大裂谷中,地质构造复杂,出露地层主要为白垩系钙质粉砂岩、泥灰岩,侏罗系长石石英砂岩、泥岩。该地区属于亚热带西南季风气候,多年平均降雨 1 013.5 mm,降雨集中于 6~9 月,占全年的 76%,雨型多为暴雨。该沟流域形态呈细长形,支沟较为发育,流域整体面积约 0.71 km²,主沟长度 1 810 m,相对高差 688 m,主沟纵比降为 380‰。

2020 年 3 月 30 日,四川省凉山彝族自治州西昌市经久乡发生大规模森林火灾,火势沿泸山景区蔓延,大火致使整个泸山景区原有的茂密植被受损严重。邛海水厂后山冲沟流域内也分布大面积过火区域,地表大片裸露,坡表堆积了大量灰烬,加之该沟主沟道纵比降较大,在 2020 年 7 月至 9 月间,暴雨多次导致了小规模泥石流的发生,严重威胁邛海西岸人民群众的生命财产安全(图 1)。

2 高精度数字高程模型的构建

2.1 机载 LiDAR 数据获取

受“3.30”森林火灾的影响,邛海水厂后山冲沟在雨季(6 月~9 月)曾暴发多次小规模火后泥石

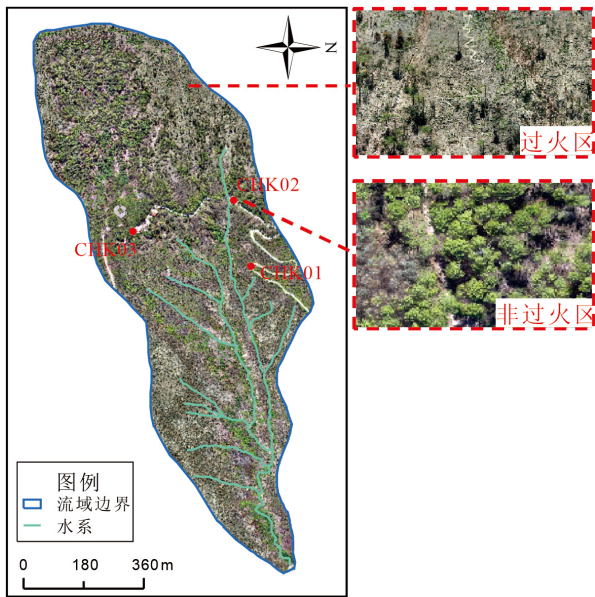


图1 研究区无人机光学影像(2020年6月)

Fig. 1 Optical image of UAV in study area (June 2020)

流,为借助机载 LiDAR 技术手段对该沟泥石流物源侵蚀堆积估算模型展开系统研究,研究人员分别于 2020 年 6 月和 10 月开展了两次机载 LiDAR 飞行作业。获取雨季前后该沟的无人机光学航空影像以及激光点云数据,并基于此建立高精度 DEM 模型,用于解译识别区内各物源类型的分布面积以及发育程度,将泥石流暴发前后两期次 DEM 模型数据叠加分析该沟流域的形态参数,对物源侵蚀量进行定量研究,从而评价分析该沟泥石流现状及发展趋势。

为了确保两期次 DEM 模型叠加分析成果的准确性,两次机载 LiDAR 飞行作业采用的无人机、机载 LiDAR 系统、飞行航线、GPS 基站、现场控制点位置选取等均保持一致。其中采用的无人机及机载 LiDAR 系统为六旋翼无人机搭配 SE-J500C 型机载 LiDAR 系统,飞行速度为 8 m/s,飞行高度为 500 m。获取的光学影像分辨率为 0.1 m,原始激光点云平均密度不低于 70 点/平方米。

此外,为保证机载 LiDAR 点云数据精度能够满足后续分析要求,两次无人机作业时均在相同位置布设了三处检查点用于精度评估,具体位置如图 1 所示。表 1 为两次无人机作业检查点误差统计表,结果表明,两次作业的机载 LiDAR 点云平面精度和高程精度最大误差均处于 0.1 m 以内。

2.2 机载 LiDAR 数据精细化处理

数据处理采用 TerraSolid 软件,经航带平差、数据去噪、滤波等一系列操作后,为去除斜坡表部植被、输电线路、火烧后残存树干等影响,将激光点云数据初始分类为地面点点云以及非地面点点云。

斜坡微小地貌信息的精度将直接决定地质灾害评价的准确度(余金星等,2018)。因此,为尽可能保留流域内物源侵蚀、堆积等微地貌变化特征,还需结合初始点云高程晕染图和 DOM 影像,利用局部点云分类参数调整以及手动分类等措施,着重对主沟道及两侧斜坡区域进行精细化处理,并基于此构建了泥石流暴发前后分辨率优于 0.2 m 的高精度 DSM 和 DEM 模型(图 2)。依据植被剔除之后的 DEM 模型(图 2b 和图 2d),邛海水厂后山冲沟流域整体长条形边界形态、主沟道两侧支沟发育、主沟道下切侵蚀较为严重、主沟道纵比降大、整体陡峭、局部崩滑物源堆积等原先被地表植被所遮蔽的微地貌特征得以显现。

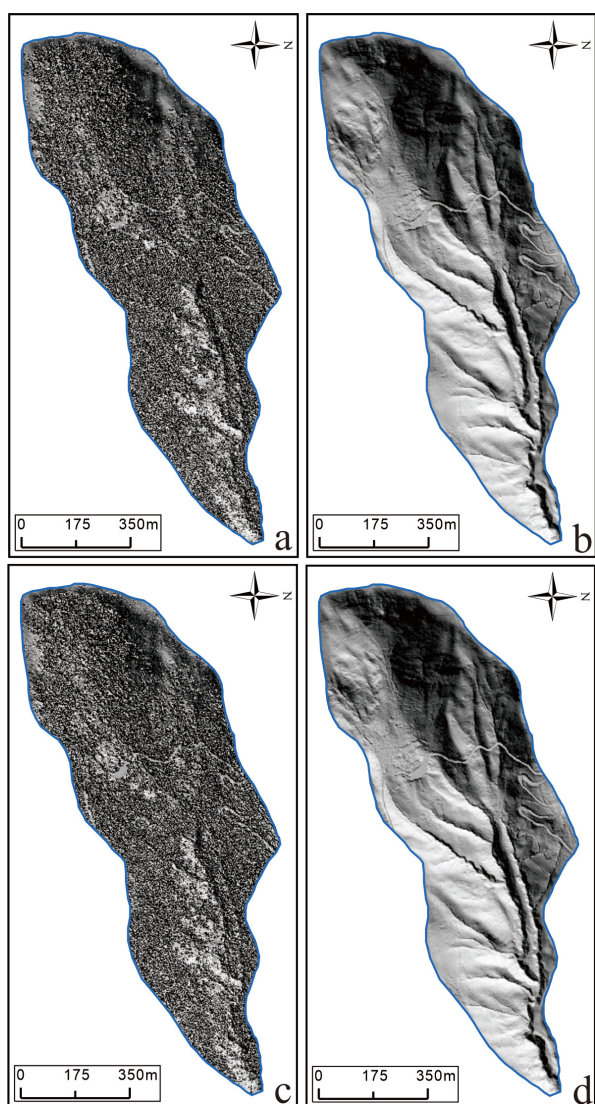
3 物源侵蚀估算模型及泥石流发展趋势分析

3.1 过火区面积及泥石流物源分布解译

在第一次机载 LiDAR 飞行所获取的光学影像基础上,可依据植被受损情况对该沟流域内过火区与非过火区分布状况进行详细解译,过火区影像色调呈土黄色,区内植被极其稀疏,斜坡表部可见多处松散堆积物分布,非过火区影像色调呈深绿色,区内植被茂密,未见明显松散堆积物分布(图 1)。图 3 为邛海水厂后山冲沟过火区分布解译图,区内

表 1 两次无人机作业检查点误差统计表
Table 1 Error statistics of checkpoints during two UAV operations

检查点编号	检查点实测坐标值			第一次飞行点云坐标误差 (m)			第二次飞行点云坐标误差 (m)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
CHK01	526 477.369	3 078 813.760	1 772.339	-0.012	-0.019	0.085	0.023	0.033	0.031
CHK02	526 280.729	3 078 734.270	1 830.969	0.041	0.026	0.063	0.047	-0.031	0.009
CHK03	526 372.060	3 078 500.440	1 848.938	0.018	-0.009	0.021	-0.037	0.025	-0.033



a. 第一次飞行 DSM; b. 第一次飞行 DEM; c. 第二次飞行 DSM; d. 第二次飞行 DEM。

图2 邛海水厂后山冲沟两期次 DSM 与 DEM

Fig. 2 DSM and DEM for two periods of Houshan gully of Qionghai water plant

过火区面积较大, 主要分布于流域中下游; 仅流域中上部的公路内侧局部斜坡以及中下游主沟道两侧斜坡植被保持良好, 为非过火区。该沟流域整体面积为 0.71 km^2 , 过火区面积为 0.46 km^2 , 非过火区面积为 0.25 km^2 , 过火区占流域总面积达 65% (图4)。

图5为基于光学影像以及高精度 DEM 模型的邛海水厂后山冲沟泥石流物源分布及分区解译图。该沟流域内主要分布崩滑堆积物源、沟道堆积物源以及灰烬和表层松散堆积物构成的坡面堆积物源, 其中流域内分布三处崩滑堆积物源, 主要

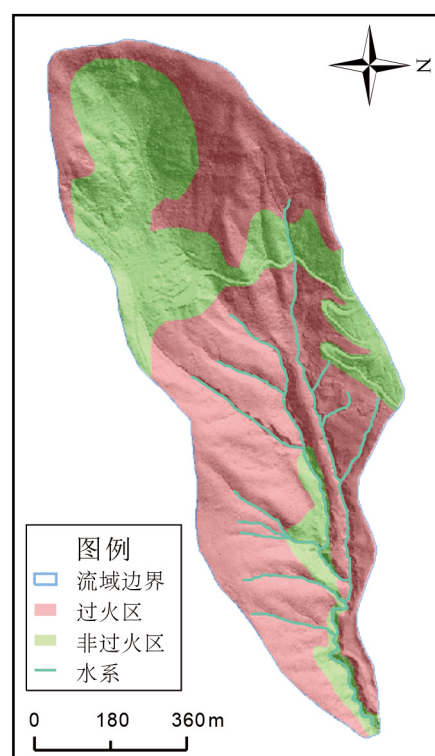


图3 过火区分布解译图

Fig. 3 Interpretation map of fire area distribution



图4 过火区分布野外验证照片

Fig. 4 Field verification photo of fire area distribution

沿主沟道中游两侧斜坡分布; 沟道堆积物源主要分布于流域中下游主沟道内; 由于坡面堆积物源于该沟流域内广泛且散状分布, 具体分布位置及面积无法通过常规遥感手段解译识别。下文将详细阐述通过两期次 DEM 叠加分析, 坡面物源等各类型物源的分布情况, 以及侵蚀堆积变化情况。

根据该沟整体流域形态以及物源分布情况, 可将该沟泥石流划分为形成区、流通区以及堆积区, 流域中上游大部分区域为该泥石流的形成区, 形成区内广泛分布的坡面堆积物源以及部分崩滑堆积

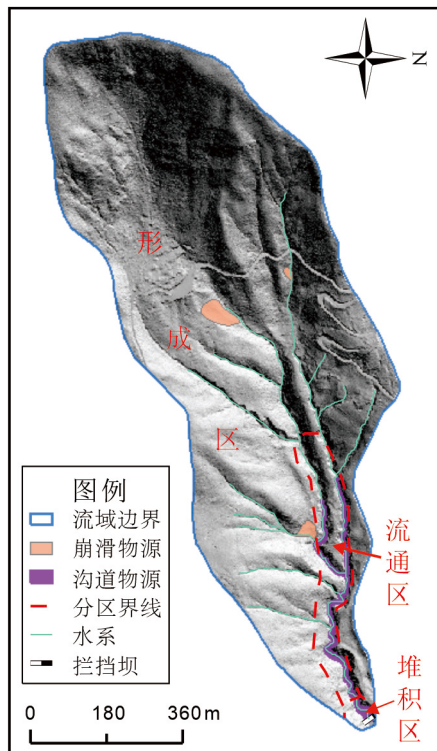


图5 泥石流物源分布及分区解译图

Fig.5 Interpretation map of debris flow zoning and provenance distribution

物源为该沟泥石流主要贡献物源类型;流域中下游主沟道区域为该泥石流的流通区,大量泥石流物质经此通道于沟口堆积,沟口拦挡坝内侧区域即为该泥石流堆积区。

3.2 物源侵蚀估算模型及分析

为发挥机载 LiDAR 建立的高精度 DEM 在获取分析泥石流流域参数、物源发育分布特征等方面的潜力,可将雨季前后两期次高精度 DEM 叠加差分,从而分析该沟流域内泥石流物源方量侵蚀堆积变化。

为尽量避免两期次 DEM 的非地形高程变化导致的叠加分析误差,采用“不动剖面法”(冯增文, 2015),选取 DEM 未发生变化的区域,以雨季前的 DEM 为基准,将雨季后所获取的 DEM 与其匹配,以保证两期 DEM 数据匹配后的精度。

通过雨季前后两期次 DEM 叠加差分分析,便可获得该沟流域内泥石流物源方量侵蚀堆积变化解译图(图6)。该图中差分结果为正值,即红色区域,表明该区域为物源堆积;差分结果为负值,即蓝色区域,表明该区域为物源侵蚀;灰色区域为无明显变化区;流域内物源侵蚀变化区域分布具有区域

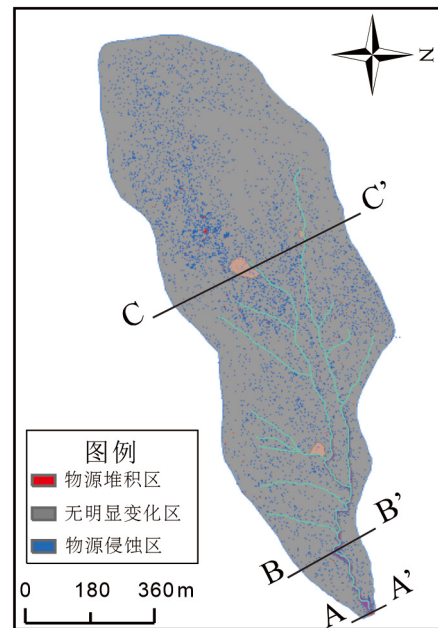


图6 泥石流物源侵蚀堆积变化图

Fig.6 Variation chart of erosion and accumulation of debris flow provenance

广、数量多、散状发育的特点。

如图6所示,邛海水厂后山冲沟在雨季泥石流暴发前后区内地形整体变化不大,大部分区域地形未见明显变化,经计算,流域内物源方量减少量为 $12\,209\text{ m}^3$,物源侵蚀区分布面积远大于物源堆积区分布面积。该沟物源侵蚀区主要集中分布于流域中下游主沟道两侧斜坡以及流域上游右侧斜坡,由前文可知,两期次 DEM 差分分析物源侵蚀区即可有效识别散状发育的坡面物源具体分布位置,该沟流域内物源侵蚀区除局部地区为崩滑堆积物源、沟道堆积物源分布,其余绝大部分区域均为坡面堆积物源分布。此外,该沟沟口处可见物源堆积区集中分布,该处物源方量明显增多,为泥石流堆积物沿沟口拦挡坝内侧淤积所致。

为进一步分析流域内不同物源类型侵蚀程度,分别于沟口、流域下游以及流域中游布置 A-A'、B-B'、C-C'三条剖面,对比分析三条剖面在泥石流发生前后地形变化(图6)。图7为位于该沟沟口的 A-A'剖面图,由该剖面可知,该处主沟道右侧斜坡现有地形下切深度约 $2\sim 3\text{ m}$,为崩滑堆积物源受流水冲刷侧蚀所致,主沟道沟口位置的新近泥石流堆积物厚度仅 0.5 m 左右,根据野外调查结果,发现沟口的新近泥石流堆积物厚度较薄。这是因为新建的拦挡坝高度约为 $10\sim 15\text{ m}$,同时主沟道较窄,导

致拦挡坝内侧的库容较小,当发生较大规模的泥石流后,为了确保泥石流治理工程的正常运行,需要

对沟口的新近泥石流堆积物进行人工清淤,经过人工清淤后,沟口新近泥石流堆积物的厚度也就相对较薄(图8)。

图9为流域下游处的B-B'剖面图,该剖面所处斜坡地形在泥石流发生前后的变化较小。主沟道和左侧局部斜坡仅经历轻微下切,沟道堆积物源和左侧斜坡的坡面堆积物源分布明显。受泥石流活动影响,该处沟道物源以及坡面物源整体发生侵蚀,侵蚀厚度多在0.2~0.5 m。

流域中游处的C-C'剖面如图10所示,该剖面位于流域中游,切割了多处坡面堆积物源和崩滑堆积物源。整体来看,该剖面所处斜坡在泥石流发生前后的地形基本没有明显变化。然而,可以观察到坡面物源和崩滑物源的分布位置有轻微下切的迹象,坡面物源下切侵蚀厚度一般多为0.2~0.5 m,崩滑物源下切侵蚀厚度为1~2 m。

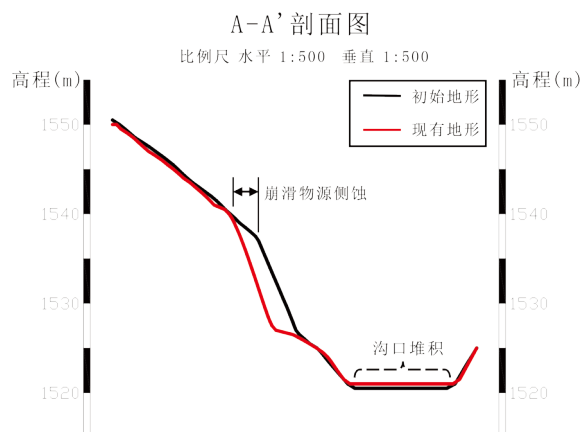


图7 A-A'剖面示意图

Fig. 7 A-A'section

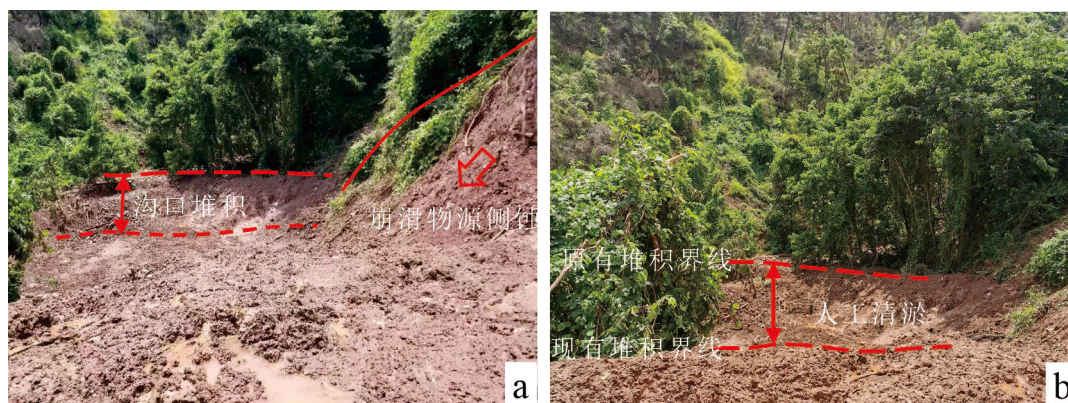


图8 沟口物源变化野外验证照片

Fig. 8 Field verification photos of provenance changes in gully mouth

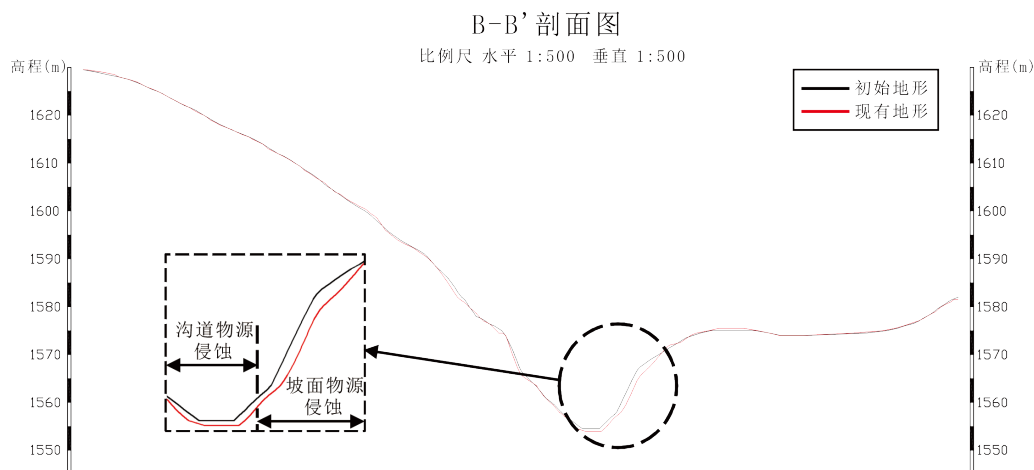


图9 B-B'剖面示意图

Fig. 9 B-B'section

根据野外调查,受森林大火影响,该泥石流流域内植被覆盖相对较差,坡面物源分布较为广泛,主沟道中下游多处可见坡面物源以及沟道物源下切侵蚀迹象分布,厚度一般多在 1 m 以内,流域中游局部可见崩滑堆积体发育,堆积体受流水侵蚀冲刷作用,局部发育新近次级溜滑,溜滑体参与泥石流活动,厚度多在 1~2 m 不等。该泥石流物源侵蚀变化程度野外验证结果与室内解译分析结果基本

一致(图 11)。

3.3 火后泥石流成因与发展趋势分析

根据之前的描述,基于机载 LiDAR 技术对邛海水厂后山冲沟泥石流调查分析,结果显示该流域内过火面积达 65%。大火导致区内斜坡表部分布大量灰烬以及扰动的碎块石土松散层所构成的坡面堆积物源。泥石流物源的启动以灰烬层和松散堆积层的侵蚀为主(厚度多在 0.5 m 以内),随着水

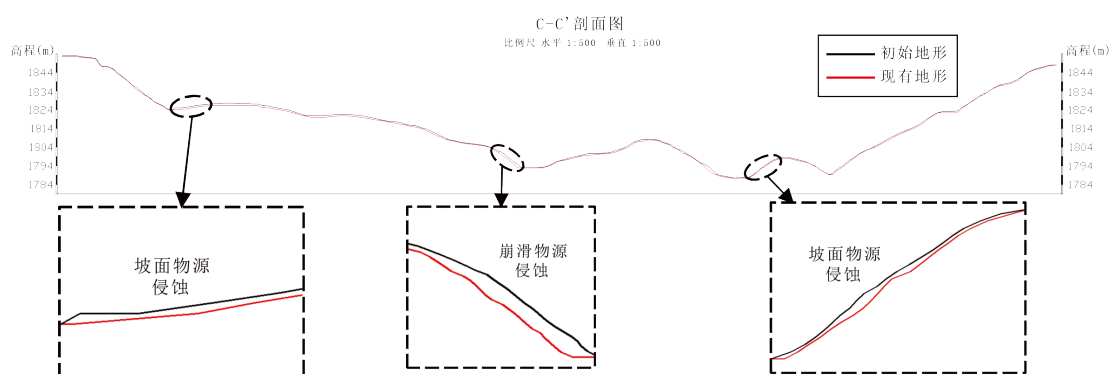


图 10 C-C'剖面示意图

Fig. 10 C-C' section

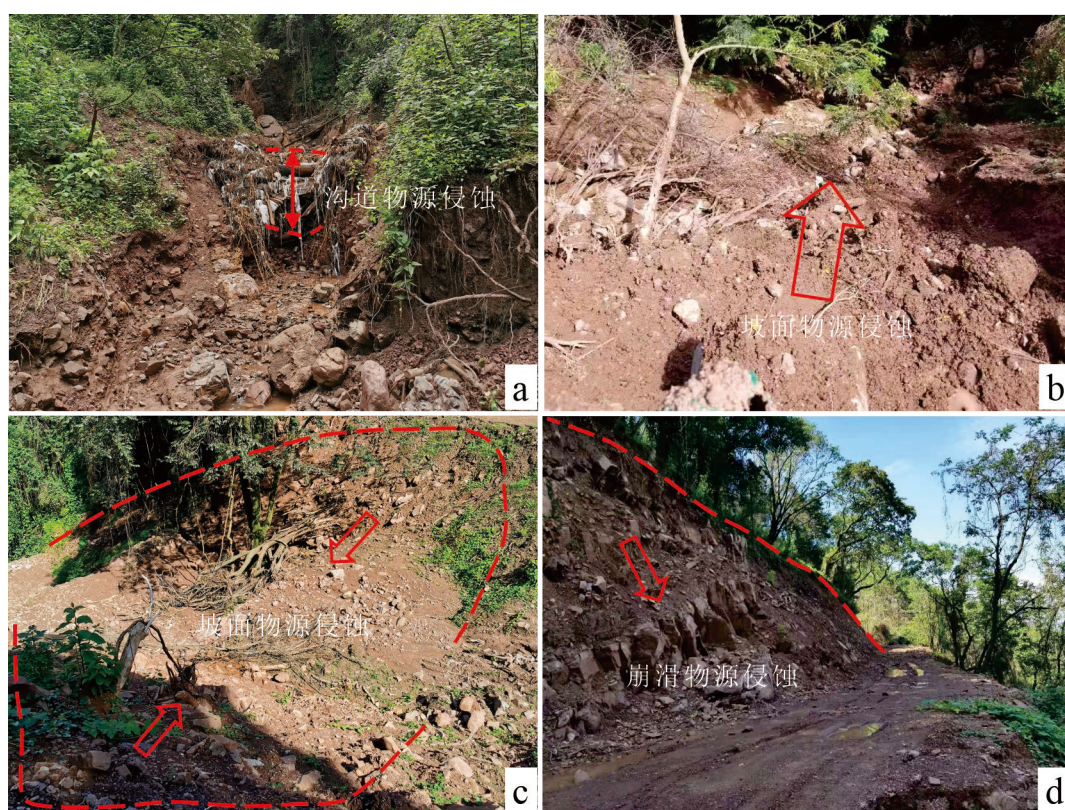


图 11 流域中下游物源变化野外验证照片

Fig. 11 Field verification photos of provenance changes in the middle and lower reaches of the basin

流携带的灰烬、泥沙等裹挟量的逐渐增多,流体进入主沟道侵蚀能力逐渐增强,加之主沟道纵比降较大,沟道堆积物也将不断下切侵蚀(现场调查沟道堆积物源下切侵蚀深度多在 1~2 m)。崩滑堆积物源往往也是随着主沟道侵(刨)蚀坡脚形成临空面(现有调查临空面高度多在 2~3 m),进而产生次级溜滑启动。最终,坡面堆积物源、沟道堆积物源以及崩滑堆积物源依次启动,形成火后泥石流运动。

虽然该流域内坡面堆积物源厚度一般仅在 0.5 m 以内,但由于分布面积较为广泛,导致区内坡面堆积物源储量仍较大。同时,由于火烧后泥石流灾害的频发,强大的冲击力和磨蚀力使得主沟道遭受反复的下切和侧视,崩滑堆积体的临空面不断提高,呈逐级牵引后退式发育,区内崩滑堆积物源也将不断增多。因此,在今后一段时期内,邛海水厂后山冲沟泥石流演化趋势仍以高频泥石流为主。

4 讨论与结语

目前,机载 LiDAR 技术在地质灾害调查中的应用更多是发挥了机载 LiDAR 技术“穿透植被”的优势,利用单期数据呈现植被覆盖下的地表形态以及微地貌特征,从而精细化地识别滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害隐患。除此之外,多期次机载 LiDAR 高精度 DEM 数据差分叠加分析能够掌握灾害体的各种变形特征,从而准确评估地质灾害的现状以及发展趋势,是机载 LiDAR 技术在地质灾害调查研究中的另一个重要研究方向。

根据前文研究可知,误差在多期次高精度 DEM 数据的叠加分析中是必然存在的,但在采用相同的无人机飞行系统、数据采集系统、飞行参数、GPS 基站等,并确保点云数据密度和精度的前提下,选择“线性匹配”或者“不动剖面匹配”等配准方式将多期次 DEM 配准后,再进行差分计算,能够最大程度地避免数据误差对分析结果的影响。本文采用机载 LiDAR 技术构建了西昌市某泥石流沟的高精度数字高程模型,雨季前后两期次数字高程模型的差分叠加结果与野外验证情况基本一致,最大程度地反映了流域内物源的动态变化情况,以及该沟火后泥石流的成因与发展趋势,应用效果较为理想。主要结论如下:

(1)采用机载 LiDAR 技术构建泥石流暴发前后的高精度数字高程模型,并在此基础上建立物源侵蚀估算模型,能够精确掌握泥石流物源动态变化

情况。该技术手段能够克服在评估泥石流物源侵蚀情况和估算动储量时,采用传统经验公式法容易导致结果出现偏差的缺陷。

(2)经久乡森林火灾导致邛海水厂后山冲沟流域过火面积达 65%,流域内主要发育坡面堆积物源、崩滑堆积物源以及沟道堆积物源三类物源,雨季期间泥石流物源侵蚀减少量为 12 209 m³,物源侵蚀变化区呈分布区域广、数量多、散状发育的特点。泥石流物源的启动以灰烬层和松散堆积层构成的坡面堆积物源侵蚀为主,侵蚀厚度多在 0.5 m 以内。由于坡面物源分布广泛,该沟流域内物源储量较大,在今后一段时间内,邛海水厂后山冲沟泥石流将以高频泥石流为主。

References

- Alexander D, 1989. Progress in physical geography[J]. Urban Landslides, 13 (2): 157-191.
- Axelsson P, 1999. Processing of laser scanner data-algorithms and applications[J]. ISPRS J Photogramm Remote Sens, 54 (2-3): 138-147.
- Chigira M, Duan F, Yagi H, et al., 2004. Using an airborne laser scanner for the identification of shallow landslides and susceptibility assessment in an area of ignimbrite overlain by permeable pyroclastics[J]. Landslides, (1): 203-209.
- Hanberg W C, Creighton A L, Medley E W, et al., 2005. Use of LiDAR to assess slope hazards at the Lihir Gold Mine, Papua New Guinea[R]. International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, British Columbia, Canada.
- Glenn N F, Streutker D R, Chadwick D J, et al., 2006. Analysis of LiDAR-Derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity[J]. Geomorphology, 73 (1/2): 131-148.
- Schulz W H, 2007. Landslide susceptibility revealed by LiDAR imagery and historical records, Seattle, Washington[J]. Engineering Geology, 89 (1/2): 67-87.
- Tang C, Zhu J, Ding J, et al., 2011. Catastrophic debris flows triggered by a 14 August 2010 rainfall at the epicenter of the Wenchuan earthquake[J]. Landslides, 8 (4): 485-497.
- Varnes D J, 1978. Slope movement type and process[J]. Special Report, 176: 11-33.
- Chang M, Tang C, Jiang Z L, et al., 2014. Dynamic Evolution Process of Sediment Supply for Debris Flow Occurrence in Longchi of Dujiangyan, Wenchuan Earthquake Area[J]. Mountain Research, 32 (1): 89-97 (in Chinese with English abstract).
- Dong X J, Xu Q, She J X, et al., 2020. Preliminary Study on Interpretation of Geological Hazards in Jiuzhaigou Based on Multi-source Remote Sensing Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 45 (3): 432-441 (in Chinese with English

abstract).

- Fang Q S, Tang C, Wang Y, et al., 2016. A Calculation Method for Predicting Dynamic Reserve and the Total Amount of Material Source of the Debris Flows in the Wenchuan Meizoseismal Area[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 36 (6) : 1008 – 1014 (in Chinese with English abstract).
- Feng Z W, 2015. Multi-phase DSM for the Dynamic Monitoring of Geological Hazard and Environment[D]. Beijing: China University of Geosciences.
- Jiang Z X, 1994. Aquantitative Forecast to Reserves Change of Solid Loose Materials in Debris Flow Ravine[J]. Mountain Research, 12 (3) : 155 – 162 (in Chinese with English abstract).
- Li X J, 2012. Research of the Landslide Recognition Based on LiDAR Technology in the Complex Geological Environment Area[D]. Wuhan: China University of Geosciences.
- Liu S W, Guo D H, Chen W T, et al., 2012. The application of airborne lidar technology in landslide investigation and monitoring of Three Gorges Reservoir Area[J]. Geology in China, 39 (2) : 507 – 517 (in Chinese with English abstract).
- Liu X L, Mo D W, 2002. Debris Flow and Its Subject Attribute [J]. Journal of Natural Disasters, 3 (10) : 1 – 5 (in Chinese with English abstract).
- Pan C, 2015. Study on Startup Mode of Slope Material Sources and Dynamic Reserves Prediction of Qipan Gully Debris Flow in Wenchuan County[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University.
- She J X, Cheng D X, Liu F, et al., 2018. Application of Airborne LiDAR Technology in Geological Disaster Investigation — Taking the Jiuzhaigou Ms 7.0 Earthquake in Sichuan Province as an Example[J]. Earthquake Research in China, 34 (3) : 435 – 444.
- Wang X, Fan X M, Yang F, et al., 2020. Remote Sensing Interpretation Method of Geological Hazards in Lush Mountainous Area[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 45 (11) : 1771 – 1781 (in Chinese with English abstract).
- Xie M W, Liu X Y, Wang Z F, et al., 2011. A 3-D remote sensing system based on assessment of debris flow and impact area simulation[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 38 (03) : 115 – 119 (in Chinese with English abstract).
- Xu H, 1995. An Estimation Model for Critical Accumulation of Porous Solid Mass in Debris Flow Study[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 30 (2) : 212 – 217 (in Chinese with English abstract).
- Yang S, 2014. Study on the movable criticle model of solid material under hydro-dynamical condition in debris flow area[D]. Beijing: University of the Chinese Academy of Sciences.
- Zhang J J, Liu J K, Gao B, et al., 2018. Characteristics of Material Sources of Galongqu Glacial Debris Flow and the Influence to ZhaMo Road[J]. Journal of Geomechanics, 24 (1) : 106 – 115 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y Y, Yuan Y D, Gu C Z, et al., 2020. Review of Evaluation Methods for Debris Flow Resource Reserves in Areas Affected by Earthquakes[J]. Mountain Research, 38 (3) : 394 – 401 (in Chinese with English abstract).
- Zhou B F, Li D J, Luo D F, et al., 1991. Guidelines for Debris Flow Control[M]. Beijing: Science Press.

附中文参考文献

- 常鸣, 唐川, 蒋志林, 等, 2014. 强震区都江堰市龙池镇泥石流物源的遥感动态演变[J]. 山地学报, 32 (1) : 89 – 97.
- 董秀军, 许强, 余金星, 等, 2020. 九寨沟核心景区多源遥感数据地质灾害解译初探[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 45 (3) : 432 – 441.
- 方群生, 唐川, 王毅, 等, 2016. 汶川极震区泥石流流动储量及总物源量计算方法研究[J]. 防灾减灾工程学报, 36 (6) : 1008 – 1014.
- 冯增文, 2015. 基于多期 DEM 的地质灾害与环境动态监测[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 蒋忠信, 1994. 泥石流固体物质储量变化的定量预测[J]. 山地研究, 12 (3) : 155 – 162.
- 李显巨, 2012. 基于 LiDAR 技术的复杂地质环境区滑坡识别研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 刘圣伟, 郭大海, 陈伟涛, 等, 2012. 机载激光雷达技术在长江三峡工程库区滑坡灾害调查和监测中的应用研究[J]. 中国地质, 39 (2) : 507 – 517.
- 刘希林, 莫多闻, 2002. 论泥石流及其学科性质[J]. 自然灾害学报, 3 (10) : 1 – 5.
- 潘聪, 2015. 汶川县七盘沟泥石流斜坡物源启动模式及动储量预测研究[D]. 成都: 西南交通大学.
- 余金星, 程多样, 刘飞, 等, 2018. 机载激光雷达技术在地质灾害调查中的应用——以四川九寨沟 7.0 级地震为例[J]. 中国地震, 34 (3) : 435 – 444.
- 王绚, 范宣梅, 杨帆, 等, 2020. 植被茂密山区地质灾害遥感解译方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 45 (11) : 1771 – 1781.
- 谢谟文, 刘翔宇, 王增福, 等, 2011. 基于三维遥感系统的泥石流土方量计算及影响范围模拟[J]. 水文地质工程地质, 38 (03) : 115 – 119.
- 徐弘, 1995. 泥石流松散固体物质临界集聚估算模型研究[J]. 西南交通大学学报, 30 (2) : 212 – 217.
- 杨顺, 2014. 水动力作用下泥石流源区固体物质可移动判别模型研究[D]. 北京: 中国科学院大学.
- 张佳佳, 刘建康, 高波, 等, 2018. 藏东南嘎龙曲冰川泥石流的物源特征及其对扎墨公路的影响[J]. 地质力学学报, 24 (1) : 106 – 115.
- 张友谊, 袁亚东, 顾成壮, 2020. 震区泥石流物源储量评价方法综述[J]. 山地学报, 38 (3) : 394 – 401.
- 周必凡, 李德基, 罗德富, 等, 1991. 泥石流防治指南[M]. 北京: 科学出版社.