



引文格式:刘小莎,董秀军,钱济人,等.高植被山区泥石流物源LiDAR遥感精细识别方法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(3):400-410.DOI:10.13203/j.whugis20210486

Citation: LIU Xiaosha, DONG Xiujun, QIAN Jiren, et al. Airborne LiDAR-based Debris Flow Material Sources Remote Sensing Recognition in Lush Mountainous Area[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(3):400-410. DOI: 10.13203/j.whugis20210486

高植被山区泥石流物源LiDAR遥感精细识别方法研究

刘小莎^{1,2} 董秀军¹ 钱济人³ 郭晨^{1,2} 赵俊丞³ 詹佳琪³

1 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,四川 成都,610059

2 中铁二院工程集团有限责任公司,四川 成都,610031

3 浙江浙能天然气运行有限公司,浙江 杭州,310052

摘要:泥石流物源识别与计算是科学评估泥石流规模、危害程度以及综合治理的基础,而传统的地面调查和光学遥感手段难以有效识别山区植被茂密覆盖下的泥石流物源。机载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)技术能有效去除植被获取真实的地表形态,为泥石流物源的识别提供了新的解决方案。以九寨沟震区的日则沟泥石流为例,基于高分辨率机载LiDAR数据结合震前卫星影像,开展泥石流物源识别研究,根据物源所处位置和在山体阴影图像上的色彩及纹理差异,将物源分为崩滑物源、坡面物源和沟道物源,并建立各类型物源的机载LiDAR识别标志与遥感解译方法。共解译出日则沟泥石流物源155处,总面积达1.06 km²,占流域总面积的31.56%,在此基础上分析了各类型物源的发育分布规律。为泥石流物源的精确计算提供理论参考和数据支撑,进一步服务于九寨沟震区泥石流的防治与风险评价。

关键词:机载激光雷达;泥石流;物源识别;遥感解译;九寨沟地震

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2022-02-09

DOI:10.13203/j.whugis20210486

文章编号:1671-8860(2024)03-0400-11

Airborne LiDAR-based Debris Flow Material Sources Remote Sensing Recognition in Lush Mountainous Area

LIU Xiaosha^{1,2} DONG Xiujun¹ QIAN Jiren³ GUO Chen^{1,2} ZHAO Juncheng³ ZHAN Jiaqi³

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

2 China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu 610031, China

3 Zhejiang Zhenergy Natural Gas Operation Co. Ltd, Hangzhou 310052, China

Abstract: Objectives: The quantification of debris flow material sources is the basis of scientific evaluation of debris flow scale, degree of disaster and comprehensive management. It is difficult to identify debris flow source under dense vegetation by traditional ground survey and optical remote sensing in lush mountainous areas of southwest China. Methods: Comparatively, airborne light detection and ranging(LiDAR) technology can effectively remove vegetation to obtain high resolution digital elevation model, providing a new solution for debris flow source identification. Taking the Rize basin debris flow in Jiuzhaigou earthquake area as a case study, we propose a new methodology for interpretation debris flow source based on high-resolution LiDAR data. The material sources are divided into slump-mass source, gully sediments source and slope wash source, and we propose geomorphologic identification masks and remote sensing interpretation to regard different types of debris flow source. Results: A total of 155 debris flow material sources in Rize basin debris flow are interpreted, covering an area of 1.06 km², accounting for 31.56% of the total basin. On this basis, the characteristics and distribution law of various types of material sources are analyzed. Conclu-

基金项目:国家自然科学基金(41941019,42072306)。

第一作者:刘小莎,硕士,主要从事地质灾害航空遥感早期识别研究。1391476102@qq.com

通讯作者:董秀军,博士,高级实验师。dongxiujun@cdut.cn

sions: The results provides theoretical reference and data support for the quantification of debris flow source and debris flow prevention and risk assessment of the earthquake area in Jiuzhaigou.

Key words: LiDAR; debris flow; material source recognition; remote sensing interpretation; Jiuzhaigou earthquake

青藏高原东缘地势高差悬殊,地质条件复杂,地质构造活动强烈,地震及地质灾害频发^[1]。尤其是西南山区降雨集中且强度大,泥石流成为该区地质灾害的主要类型之一,造成严重的人员伤亡和经济财产损失^[2-3]。泥石流物源作为其形成和发育的三要素之一^[4-5],是评估泥石流规模及危害程度的基础,也是泥石流防治工程措施的关键依据。物源识别不准,将影响物源计算的准确性,甚至可能导致泥石流防治工程的治理效果达不到预期。汶川地震后已治理的泥石流工程中部分拦砂坝出现满库翻坝的现象,成为失效工程^[6],如北川陈家坝青林沟坝体被泥石流冲毁,汶川牛圈沟泥石流下游拦挡坝已接近淤满^[7]等。

传统的泥石流物源识别主要依靠人工野外调查,存在效率低下、精准度差、调查人员人身安全风险高等问题^[8],已不能满足山区泥石流治理工程设计的需求。随着遥感等非接触式测量技术的飞速发展,利用高分辨率卫星影像开展泥石流物源识别与分析成为主流,如文献[9-10]利用遥感图像开展震后崩塌、滑坡等松散物源解译分析工作,建立泥石流发生与松散物源类型、数量的统计模型。近年来,无人机摄影测量技术逐渐成为了泥石流物源识别与估算的新方法^[11]。虽然光学遥感技术对泥石流物源的研究日益广泛,但是对植被覆盖下的泥石流物源难以有效识别。机载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)能够直接获取精确的地表三维坐标,结合一定的滤波算法可以有效去除地表植被,获取真实地平面云,生成高分辨率数字高程模型(digital elevation model, DEM)^[12]。随着 DEM 分辨率的不断提高,米级、分米级的高分辨率 DEM 可以非常直观地显示微小地貌特征,在地学相关的活动断裂、冰川变化、海岸线测绘、考古等领域已取得较为成功的应用^[13]。尤其是在茂密植被覆盖下的滑坡等地质灾害的调查识别中,机载 LiDAR 有着传统调查方法和光学遥感技术不可比拟的优势^[14-16],但在泥石流物源识别方面的应用较少。

2017 年九寨沟地震触发了数千处崩塌、滑坡等地质灾害,造成大量松散碎屑物质堆积在坡面和沟道中^[17],且震后连续 3 年中有 30 余条沟累计发生了至少 83 次泥石流,严重危害景区的景观、

生态、环境安全^[18]。加之九寨沟景区是地震活动频繁的区域,历史上的强震造成了大量松散物源堆积于坡表及沟内且被植被覆盖。因此,本文选取九寨沟核心景区内的日则沟泥石流为研究对象,基于机载 LiDAR 技术开展泥石流物源的识别工作,利用高分辨率 DEM 结合光学影像对沟内的历史物源以及 2017 年九寨沟地震的同震物源进行识别,在此基础上分析物源的发育分布特征,为下一步泥石流物源的精确计算提供依据。

1 研究区概况

九寨沟地处青藏高原与四川盆地过渡的深切割高山峡谷地带,地势南高北低,附近主要包括岷江断裂、塔藏断裂和虎牙断裂的北西段(见图 1(a))。受地质构造条件的影响,九寨沟在历史上发生了多次强烈地震,是地震活动频繁区域。据中国地震台网中心数据显示,在 2017 年九寨沟地震震中 200 km 范围内,近百年共发生 5 级以上地震 49 次。强震除了造成同震滑坡和崩塌灾害外,还引起山体震裂松动,造成大量松散物源堆积于坡表,加之第四系松散堆积物十分丰富,为泥石流的形成提供了物质基础。九寨沟年内降水集中在 5 月—9 月,约占全年降水量的 75%^[19],常以区域性暴雨的形式出现,实测 24 h 最大暴雨量 50 mm,降水的年变化率较小,约为 10%~15%,降水量随海拔的增高而增加,充沛的降雨尤其是暴雨则为泥石流的形成提供了水力条件。

九寨沟地震触发了 1 883 处同震地质灾害^[20],熊猫海及附近区域是受灾最严重的区域之一,距熊猫海景区 2.5 km 的日则沟泥石流堆积了大量的松散物源,对景区景观、设施、生态环境等具有较大威胁,故本文选取日则沟作为研究区域(图 1(b))。日则沟整体形态呈栎叶形,纵向长约 3.7 km,平均宽度为 1.1 km,流域面积为 3.39 km²。主沟源头高程为 4 300 m,最低点位于日则沟与景区公路交汇处,高程为 2 660 m,相对高差为 1 510 m,主沟沟道长度为 1 900 m,平均纵坡降约 219‰,堆积区地形纵坡比降小于 100‰,大致流向为 120°。沟谷纵坡降较大,沟底及两侧坡脚分布大量崩积物和坡积物,上段沟谷较窄,

沟口地形相对平缓,呈扇形分布。该区域岩性以生物碎屑灰岩与灰质白云岩为主,流域内植被极

其茂盛(见图1(c)、1(d)),覆盖率达80%以上^[21],光学影像无法辨识植被下的泥石流物源特征。

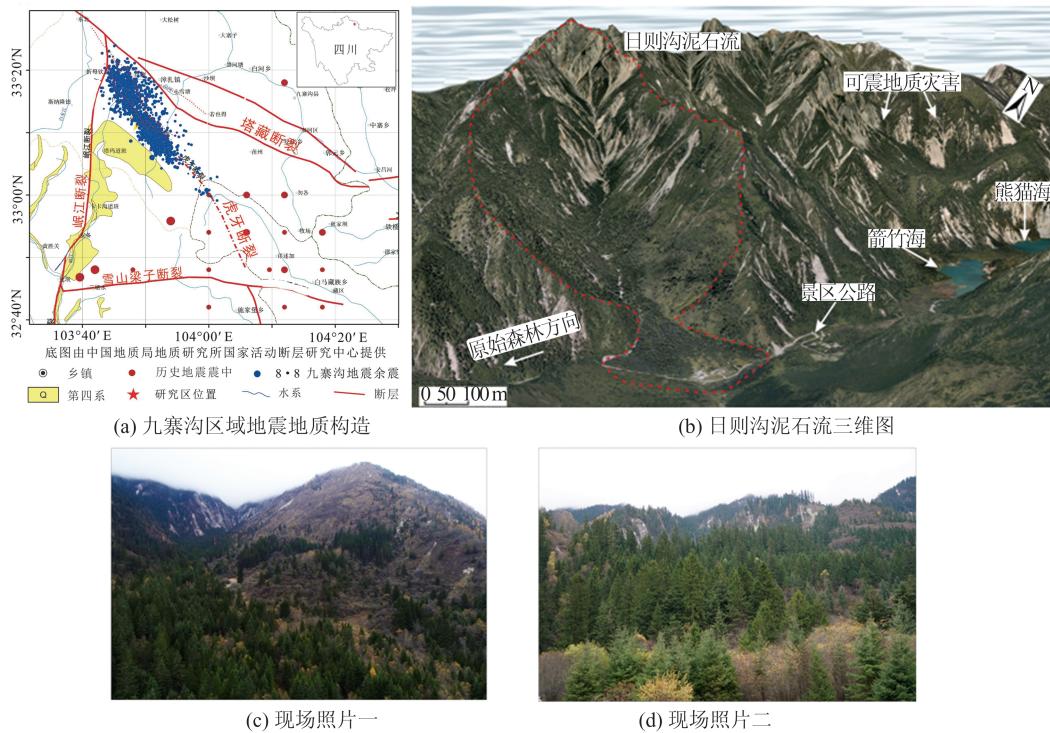


图1 九寨沟区域地震地质构造与日则沟泥石流图

Fig. 1 Geological Structure and Location of Jiuzhaigou and Photos of Rize Basin Debris Flow

2 数据及方法

2.1 数据概况

研究区机载 LiDAR 点云采集时间为 2018 年 10 月,采用直升机搭载 Optech ALTM Gemini 型机载激光雷达系统获取,飞行航高为 1 400 m,飞行速度为 150 km/h,激光脉冲频率为 100 kHz,测距精度优于 20 cm,搭载双频接收的机载 GPS,同时为获取光学影像,同轴搭载飞思 PhaseOne IXU-RS 1000 光学相机。获取的激光点云数据平均密度优于 50 点/m²,点云数据处理采用 Terra-Solid 软件,经点云去噪、滤波、分类后,获取研究区真实地表点云数据,进而利用分类出的地面点构建高精度 DEM,分辨率为 0.5 m;对同轴获取的光学影像采用 Pix4D Mapper 进行处理,制作了研究区正射影像图(digital orthophoto map,DOM),分辨率为 0.2 m,用于辅助泥石流物源的解译以及同震地质灾害的识别。另外,九寨沟地震诱发了大量浅表层的崩塌滑坡等同震地质灾害,下载震前高分辨率卫星影像,分辨率为 2 m,结合震后机载 LiDAR 同轴获取的光学影像,共同开展同震地质灾害的识别解译。数据获取、处理流程及成

果图如图 2 所示。

2.2 研究方法

泥石流物源的识别解译需要在多视角下开展,因此利用机载 LiDAR 生成的高精度 DEM 和 DOM 构建了研究区高精度三维解译场景,在三维空间下进行泥石流物源的解译,可以进一步提高识别的效率和准确率。此次日则沟泥石流的物源识别分为两个层次:一是九寨沟地震导致的滑坡崩塌等同震物源,二是历史上由内外动力地质作用形成的各类物源,简称历史物源。两类泥石流物源主要是通过三维场景下的遥感影像、山体阴影或其他可视化图像上物源的形态、阴影、纹理以及色调等结合专家经验进行识别。同震物源主要通过震前震后的光学影像联合解译,历史物源灾害往往被植被覆盖,仅依靠光学影像数据对泥石流物源进行识别存在一定的局限性,主要利用高精度 DEM 生成的山体阴影图进行解译。另外,由于太阳方位角对 DEM 的山体阴影图有一定影响,因此利用 ArcGIS 软件生成了太阳高度角为 45° 时,太阳方位角分别为 90°、135°、180°、315° 的山体阴影图进行综合分析以提高解译精度,如图 3 所示。

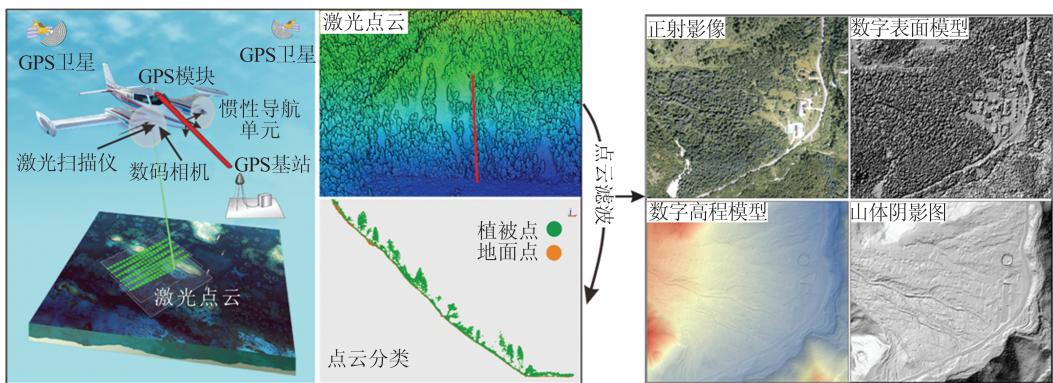


图 2 数据获取、处理流程及成果图

Fig. 2 LiDAR Data Acquisition and Processing, Data Products and Topographic Derivatives

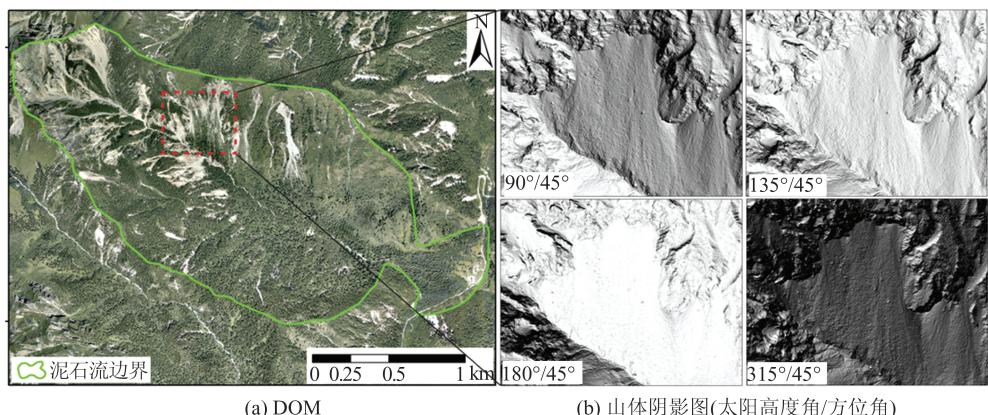


图 3 日则沟泥石流正射影像以及不同太阳方位角生成的山体阴影图

Fig. 3 DOM and Hillshade of Different Azimuths of Rize Basin Debris Flow

3 泥石流物源特征及识别标志

本文对日则沟泥石流的物源识别分为基于光学影像解译的同震物源和基于DEM解译的历史物源,需要指出的是,九寨沟地震诱发的同震地质灾害绝大部分为浅表层崩塌滑坡^[22],因此利用震后的高分辨率DEM在地貌上很难将同震物源和历史物源分开,本文仅从不同影像上对这两类物源进行单独解译,并统一将历史物源作为日则沟泥石流的物源来分析其发育分布特征。

3.1 同震物源的识别

研究区震前植被茂密,震后滑坡区植被大部分被破坏,从色彩、纹理和形状上很容易被识别,可以通过人工目视解译获得准确率较高的同震崩滑物源,解译实例如图4所示,其中发生了同震崩滑灾害的区域往往呈深黄灰色,未发生的区域则为绿色。但在泥石流沟头的物源区往往基岩破碎,从色彩和纹理上不易区分同震物源,需仔细对比震前和震后影像来进行解译。

3.2 历史物源的识别

在对强震区泥石流物源分类的方法中,认可

度较高的分类方法是将物源分为崩滑物源、沟道物源和坡面物源^[6,23-24]。结合九寨沟研究区的特点,对三类物源进行解译标志建立和特征分析。

3.2.1 崩滑物源特征及识别标志

崩滑物源主要来自于地震、降雨等诱发的不同规模的岩土体崩塌或滑坡。多发育于沟道两侧高程较高、坡度较大的陡峭斜坡区域,并顺斜坡堆积于沟道旁岸坡坡体中下部及泥石流沟沟道内,主要分布于沟谷中上游形成区及流通区。在暴雨等极端天气下极易失稳,为泥石流提供物源。

泥石流沟内的崩滑体一般具有明显的地貌特征,从光学特征上只能识别出同震的崩滑灾害。如图5所示,在LiDAR-DEM生成的山体阴影图像上,滑坡平面形态上表现为簸箕形、舌形等,具有明显的滑坡壁、滑坡舌、滑坡台坎、滑坡鼓丘等滑坡特征;而崩塌多位于陡峻的山坡地段,坡度上陡下缓,主要包括物源区和堆积区两部分。一般来说崩滑物源堆积区域与后缘物源区色调、纹理差异较为明显,后壁物源区主要受岩体结构面控制,常表现为陡直的破碎岩壁,色调偏暗,纹理较为粗糙,如图5放大区域所示,堆

积区色调偏亮,颗粒感突出,纹理较为细腻且均匀。在崩滑堆积物源后缘与前缘各选一个点A及A',并绘制A-A'剖面进行分析,临近沟道的崩滑物源前缘一般受泥石流冲刷,临空面较好。

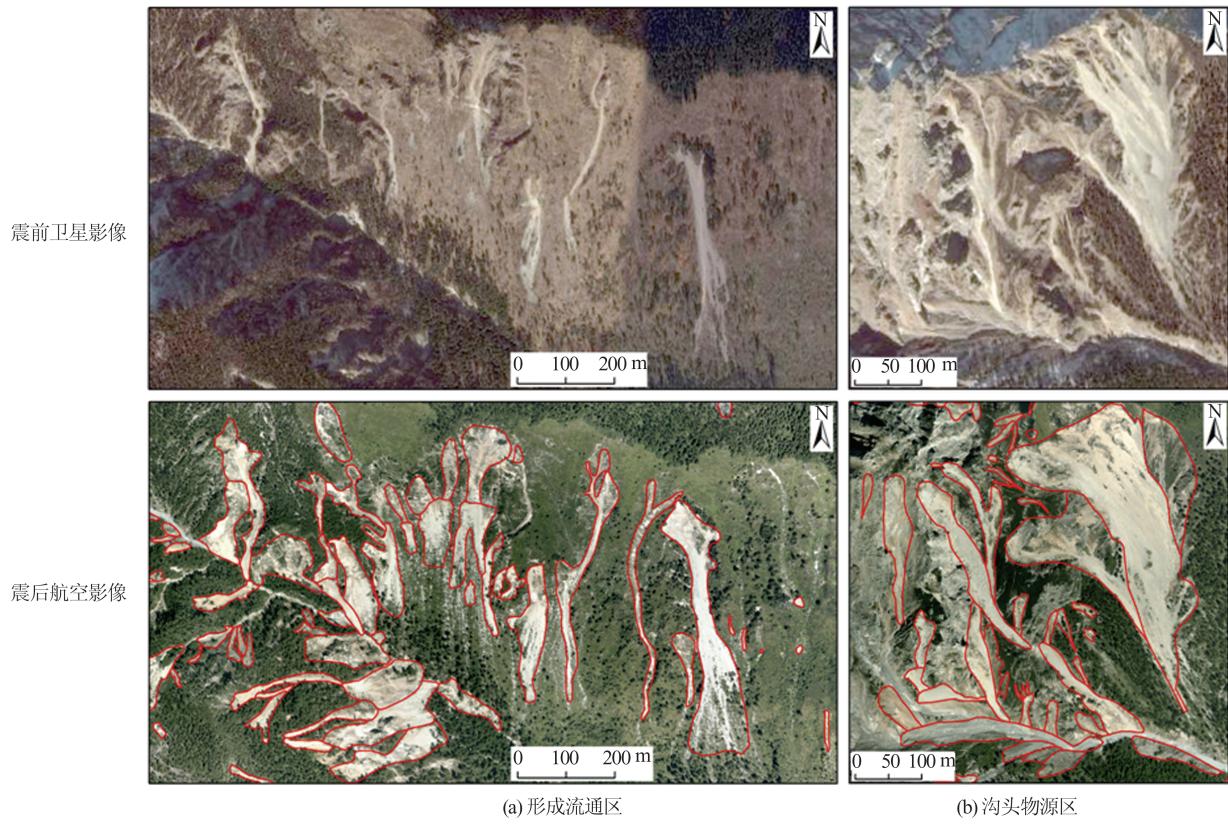


图4 基于震前卫星影像和震后航空影像的同震崩滑物源解译实例

Fig. 4 Examples of Coseismic Material Sources Interpretation Based on High Resolution Pre- and Post-Earthquake Images

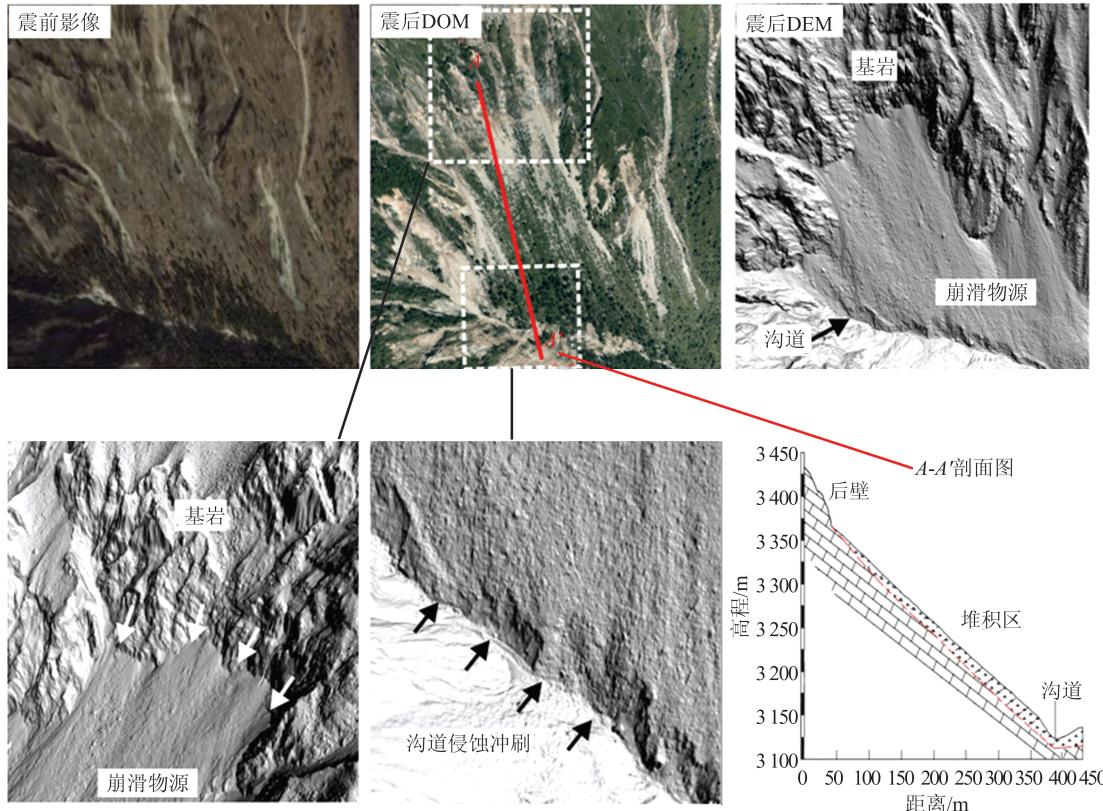


图5 崩滑物源特征及识别标志

Fig. 5 Characteristics of Slump-Mass Sources and Identification Mark

3.2.2 沟道物源特征及识别标志

沟道物源多分布在泥石流沟的中、下游流通区及堆积区沟道底部,主要为早期泥石流活动堆积于沟道内的松散固体物质,其主要组成物质一般为碎块石土、砂砾石土等,分选性较差。沟道物源具有长宽比大的特点,又分为主沟道物源和支沟物源,主沟道物源一般分布面积较大、坡度较为平缓,支沟物源则相反。由于山区泥石流沟沟床纵坡相对较大,沟道相对顺直,在暴雨情况下沟床水动力条件将大大提高,沟道物源被刨蚀和侧蚀,裹挟沟床堆积物形成泥石流。

如图 6 所示,在光学影像上,由于植被覆盖率

高,难以准确判别沟道物源的边界及特征,光谱信息上沟道堆积区域与周围环境基本无差别。在山体阴影图像上,沟道物源受水流冲刷,分布有大量的沟壑,色调明暗变化明显,主要分布在主沟、支沟沟道以及泥石流堆积扇,沟道物源左右两侧大多发育崩滑物源。基于高分辨率 DEM,不仅能准确分辨泥石流沟道物源的边界信息,同时能精确测量泥石流沟道的冲刷程度,包括泥石流沟的切割深度、沟道堆积体上的冲沟发育情况等。选取沟道物源左右两侧各一点 B 及 B',并绘制剖面线 B-B' 进行分析,可得泥石流冲刷形成的沟壑深度达数米至数十米不等。

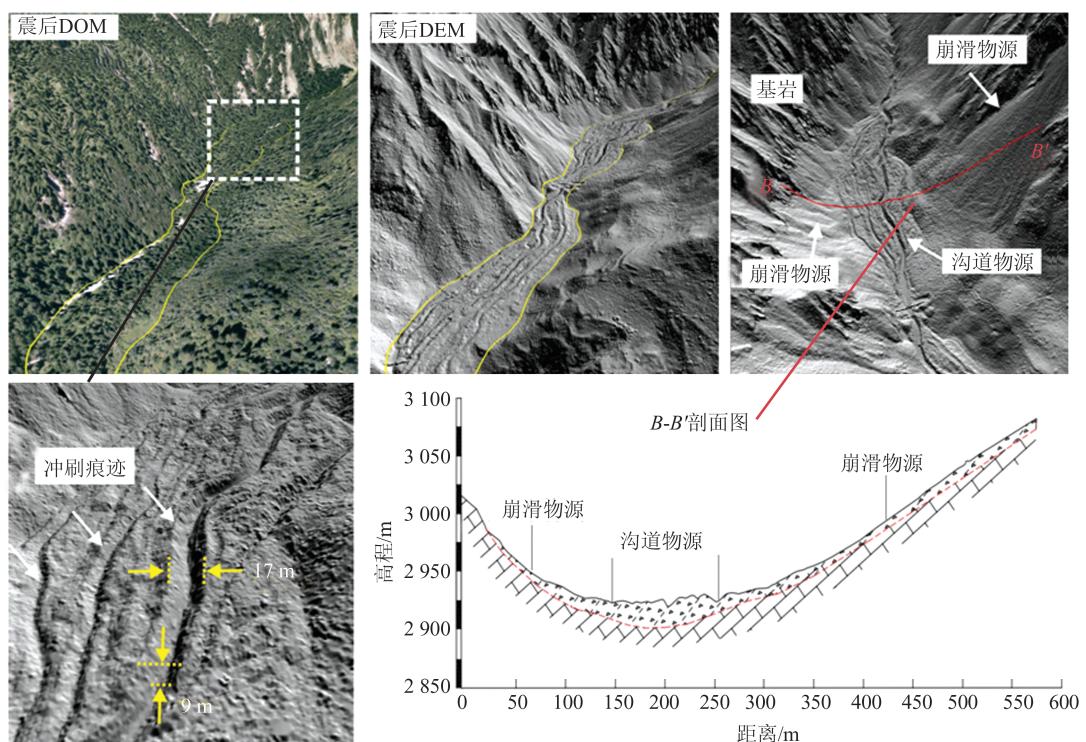


图 6 沟道物源特征及识别标志

Fig. 6 Characteristics of Gully Sediments Sources and Identification Mark

3.2.3 坡面物源特征及识别标志

坡面物源在泥石流流域内一般分布范围较广,主要分布于泥石流沟道上游的形成区及中下游流通区内。大多是区域性长期强烈侵蚀和切割作用形成的崩坡积物,一般较为稳定,以雨水冲刷形成坡面侵蚀物源的方式参与泥石流活动,但能参与到泥石流活动中的固体物质较少。

如图 7 所示,由于坡面物源植被覆盖情况良好,一般在震前震后的光学影像上几乎不能分辨出坡面物源。在滤除植被的 DEM 山体阴影图像上,一般坡面物源与基岩差异较明显,基岩粗糙度较大,颜色稍深,坡面物源则具有较低的粗糙度,纹理细腻,颜色稍浅,部分坡面物源由于固结

程度较差,在雨水的侵蚀下存在明显的冲刷痕迹。选取坡面物源上 C 及 C' 两个点,并绘制 C-C' 剖面进行分析,剖面物源一般厚度较薄。

通过分析 3 类泥石流物源的特征并建立了不同物源的机载 LiDAR 解译标志,形成了泥石流物源三维示意图如图 8 所示。

4 泥石流物源识别结果及分布特征

4.1 泥石流物源识别结果

通过震前卫星影像结合震后机载 LiDAR 光学影像,共识别出同震崩滑物源 175 处,总面积约 0.47 km²,占流域总面积的 13.86%;基于 LiDAR 数据识别出泥石流物源 155 处,总面积

达 1.06 km^2 , 占流域总面积的 31.56%; 其中崩滑物源 88 处, 面积约 0.61 km^2 ; 坡面物源 58 处, 面积

约 0.29 km^2 ; 沟道物源 9 处, 面积约 0.16 km^2 。具体分布情况如图 9 所示。

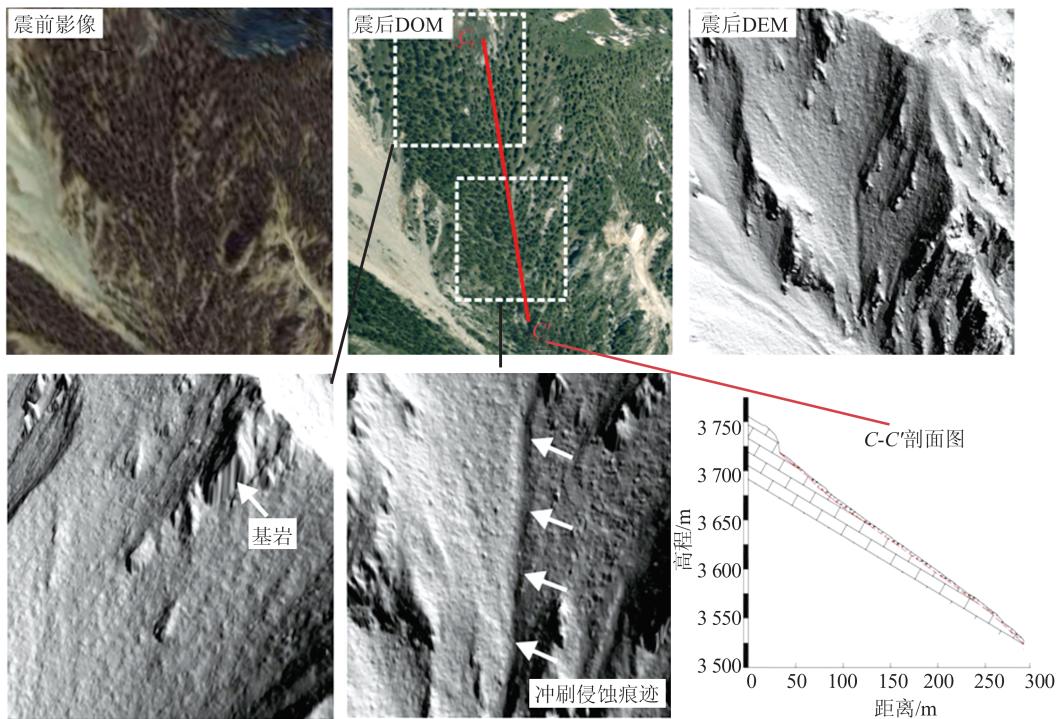


图 7 坡面物源特征及识别标志

Fig. 7 Characteristics of Slope Wash Sources and Identification Mark

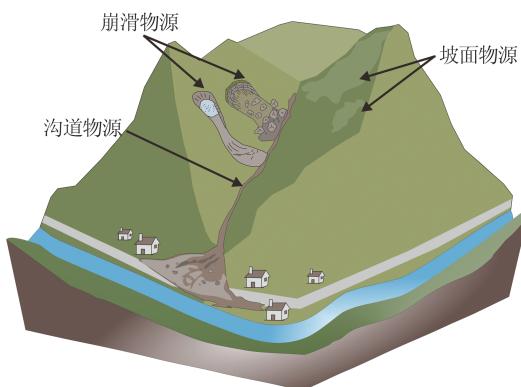


图 8 不同类型物源三维示意图

Fig. 8 3D Diagram of Different Debris Flow Sources

通过识别结果可以看出, 崩滑物源以及沟道物源为日则沟流域的主要物源类型, 崩滑物源主要分布在沟道坡度较陡的岸坡两侧, 高程分布范围约 $2800\sim3900 \text{ m}$ 。崩滑物源参与泥石流的方式主要有两类: 一是受沟道内泥石流物质运动的冲刷掏蚀坡脚, 崩滑堆积体被切脚和揭底进而失稳滑塌进入沟道内参与泥石流活动; 二是受暴雨冲刷, 崩滑堆积体以坡面冲刷或形成沟槽侵蚀的方式参与泥石流活动。

沟道物源主要集中在泥石流形成流通区坡度较缓部位, 以及部分坡度较陡的支沟内, 高程

分布范围约 $2700\sim3600 \text{ m}$ 。沟道物源参与泥石流活动的方式主要为沟床受冲刷作用形成的掏蚀和揭底, 可能参与泥石流活动的沟道物源量主要为沟床底部冲刷和掏蚀部分以及进而引发的两侧岸坡失稳进入沟床参与泥石流运动的物源。

坡面物源主要为两侧坡体上覆盖的崩坡积物, 厚度稍薄, 结构松散, 一般位于下坡中上部, 高程范围约 $3000\sim3900 \text{ m}$ 。坡面物源参与泥石流活动以水土流失的方式为主, 包括斜坡表面的面蚀和沟蚀两种, 可能形成小规模的坡面泥石流或坡面冲沟泥石流。其可能参与泥石流活动的物源量主要受侵蚀强度控制, 而侵蚀强度主要跟降雨量、斜坡结构、斜坡表层岩土体结构特征、斜坡坡度、植被覆盖特征、地震烈度等因素有关。

4.2 物源分布特征

日则沟泥石流的物源主要以崩滑为主, 为揭示各类型物源的分布特点, 本文选取高程、坡度、坡向、地形粗糙度、曲率和距主沟的距离等 6 个因子, 对各类型物源发育分布特征进行分析, 图 10 为 ArcGIS 软件生成各因子栅格图, 其中根据高分辨率 DEM 图上的地貌特征选取侵蚀及切割最明显的沟道作为日则沟泥石流的主沟, 各类型物源的质心到主沟的垂直距离作为距主沟的距离。

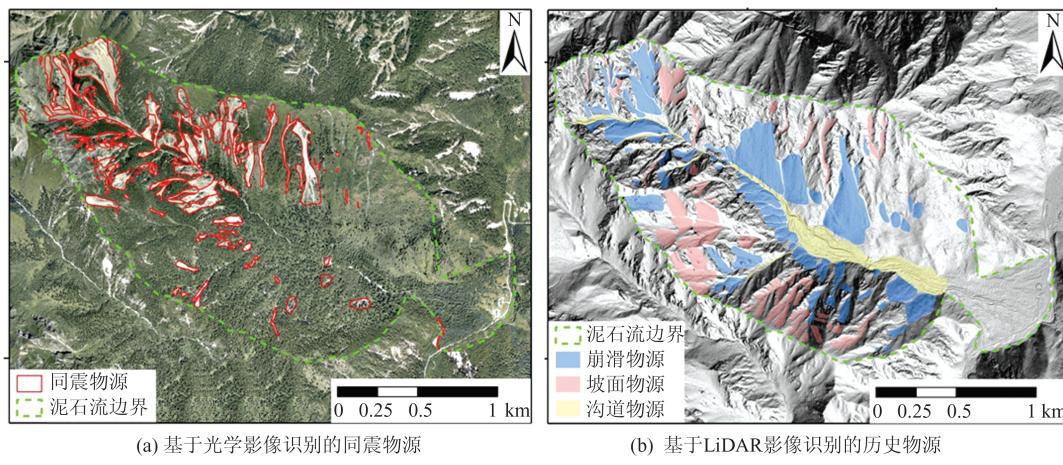


图 9 日则沟泥石流物源解译分布图

Fig. 9 Interpretation of Material Source of Rize Basin Debris Flow

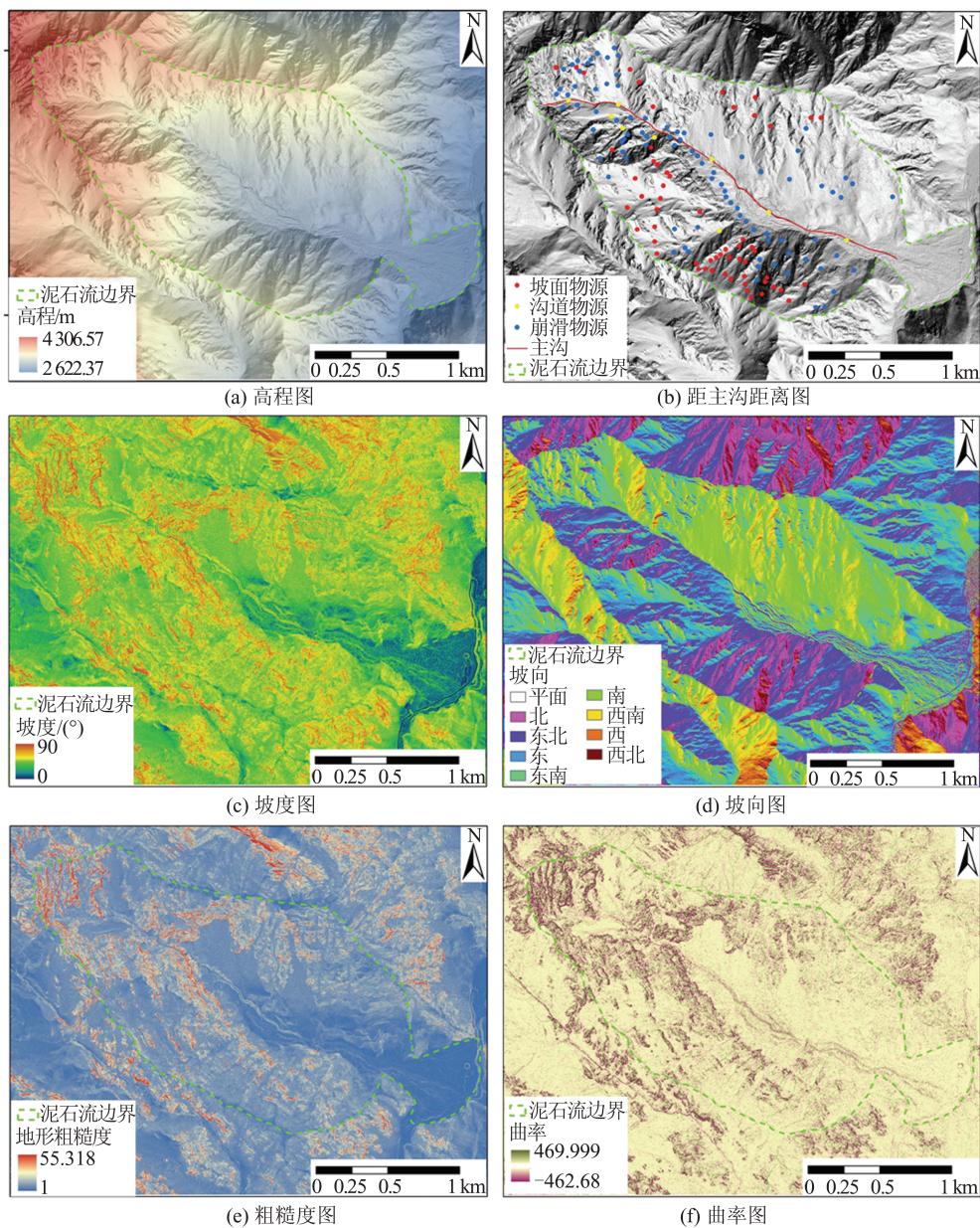


图 10 日则沟泥石流因子栅格图

Fig. 10 Factor Grids of Rize Basin Debris Flow

为进一步研究各类型物源与各因子之间的关系,利用ArcGIS软件的重分类功能对选取的6个因子进行分级,并计算流域内每个因子各分级的面积及分级内各类型物源的面积,如图11所示。结果显示,日则沟泥石流高程范围约为2 660~4 300 m,而物源则集中分布于2 800~3 800 m,其中沟道物源发育于低高程段(<3 000 m),崩滑物源主要分布于2 800~3 200 m,并随高程增加而逐渐减小,坡面物源则集中分布于3 200~3 600 m。在距主沟200 m范围内物源集中发育,崩滑物源随距主沟的距离呈先增加后减小的趋势,在距主沟100~200 m范围内发育最多,坡面物源同样随距主沟的距离呈先增加后减小趋势,但主要发育

于距主沟300~600 m范围内。物源多集中于坡度在25°~45°范围内,尤其是崩滑物源最为典型,而沟道物源则发育于坡度较缓的地带,坡面物源在坡度小于25°基本不发育。日则沟泥石流物源发育的优势坡向为东北、东、东南、南;物源多集中于粗糙度为1~1.4范围内,尤其是在1.2~1.4范围内,崩滑物源和坡面物源均发育比较明显。将研究区曲率分为凹(<0)、凸(>0)、平(=0)三类区域,凹值越小,表明区域凹陷程度越大,凸值越大,表明区域凸起程度越大,结果显示,曲率在[-10,0]和(0,10]范围内,尤其是在[-5,0)和(0,5]范围内,泥石流物源最为发育,且崩滑物源最具代表性。

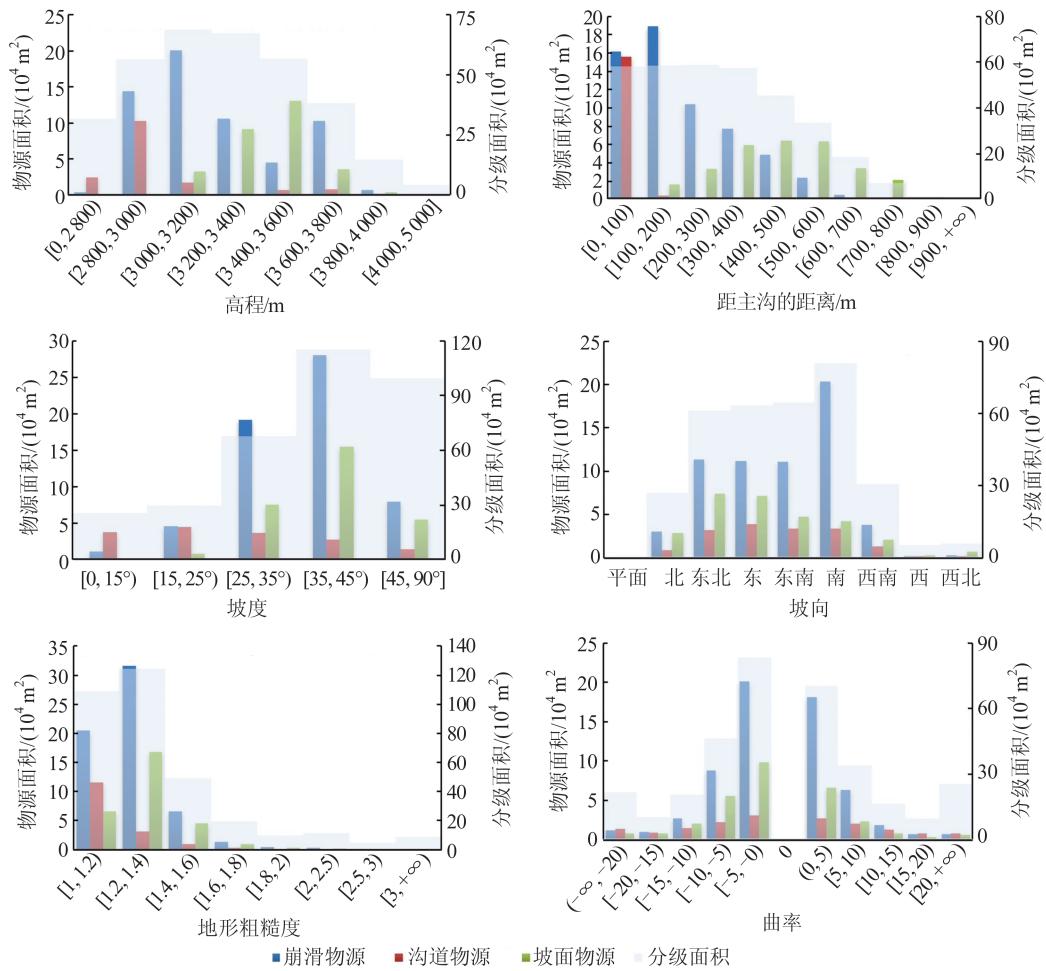


图11 物源类型与各因子分级统计图

Fig. 11 Type of Material Sources and Factor Grading Statistics

5 结语

本文利用机载LiDAR点云数据构建的高分辨率DEM影像,提出了高植被山区泥石流物源的识别标志与遥感解译方法。在九寨沟震区的日则沟泥石流进行了物源的识别解译,分析了各

类型物源的发育分布规律,为物源的定量计算提供理论参考及数据支撑。主要结论如下:

1)将物源划分为崩滑物源、坡面物源以及沟道物源并建立各类型物源识别标志,其中崩滑物源堆积区域与后缘物源区色调、纹理差异较为明显,后壁物源区主要受岩体结构面控制,常表现

为陡直的破碎岩壁,色调偏暗,纹理较为粗糙,而堆积区色调偏亮,颗粒感突出,纹理较为细腻且均匀;沟道物源一般受水流冲刷,山体阴影图像上可见表面分布有大量泥石流冲刷形成的线性沟壑,色调明暗变化明显;坡面物源与基岩差异较明显,基岩粗糙度较大,颜色稍深,坡面物源则具有较低的粗糙度,纹理细腻,颜色稍浅,颗粒感较崩滑物源稍弱,部分坡面物源表面具轻微冲刷痕迹。

2)结合各类型物源的特征和建立的解译标志,通过人工目视解译对日则沟泥石流内的物源进行识别,共解译出日则沟泥石流物源 155 处,总面积达 1.06 km^2 ,占流域总面积的 31.56%,其中崩滑物源 88 处,坡面物源 58 处,沟道物源 9 处。

3)日则沟泥石流物源集中分布于 2 800~3 800 m 高程范围内,并在距主沟 200 m 范围内集中发育,且物源面积随距主沟的距离出现先增加后减小的趋势。在坡度方面,物源多集中于 25° ~ 45° 范围内,尤其是崩滑物源最为典型,而坡面物源在小于 25° 时基本不发育。东北、东、东南、南为物源发育的优势坡向,并且三类物源在粗糙度为 1~1.4 的以及曲率在 $[-5, 0)$ 和 $(0, 5]$ 范围内最为发育,以崩滑物源最具代表性。

在对泥石流物源进行精确识别并分类的基础上,根据不同类型物源的特征,选取适宜的计算方法计算物源量,从而计算出整条泥石流沟内的物源总量,进而建立不同类型物源、区域泥石流总物源的体积-面积经验模型,可以为开展流域内大范围以及相似区域的泥石流物源快速估算提供依据,同时对泥石流应急治理工程(如拦砂坝等)的库容、结构设计具有指导意义。本文研究成果可进一步服务于流域的灾害防治和九寨沟景区发展规划。

参 考 文 献

- [1] Xu Qiang. Understanding and Consideration of Related Issues in Early Identification of Potential Geohazards [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1651~1659. (许强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1651~1659.)
- [2] You Yong, Wu Jishan, Cheng Zunlan. The Causes of Debris-Flow Diversion Dike Burst at the Lower Reaches of the Jiangjia Ravine and the Countermeasures [J]. *Journal of Catastrophology*, 2001, 16(2): 14~17. (游勇, 吴积善, 程尊兰. 蒋家沟下游泥石流导流堤冲决原因及防治对策 [J]. *灾害学*, 2001, 16(2): 14~17.)
- [3] Chen Ningsheng, Huang Na. Emergency Investigation on Debris Flow 8.8 Disaster in Qiaowo Town, Puge County, Sichuan, China [J]. *Mountain Research*, 2018, 36(3): 482~487. [3] (陈宁生, 黄娜. 普格县荞窝镇 8.8 泥石流灾害应急调查研究 [J]. *山地学报*, 2018, 36(3): 482~487.)
- [4] Cui Peng, Ma Dongtao, Chen Ningsheng, et al. The Initiation, Motion and Mitigation of Debris Flow Caused by Glacial Lake Outburst [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6): 621~628. (崔鹏, 马东涛, 陈宁生, 等. 冰湖溃决泥石流的形成、演化与减灾对策 [J]. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 621~628.)
- [5] Peng Shixiong, Chen Weidong. A Three-Parameter Method for Evaluating Debris Flow Hazards [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S1): 3542~3549. (彭仕雄, 陈卫东. 泥石流危险性三要素评估方法 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(S1): 3542~3549.)
- [6] Qiao Jianping, Huang Dong, Yang Zongji, et al. Statistical Method on Dynamic Reserve of Debris Flow's Source Materials in Meizoseismal Area of Wenchuan Earthquake Region [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2012, 23(2): 1~6. (乔建平, 黄栋, 杨宗佶, 等. 汶川地震极震区泥石流物源动储量统计方法讨论 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2012, 23(2): 1~6.)
- [7] Yang Zhihua, Lan Hengxing, Zhang Yongshuang, et al. Research Review on Long-Term Activity of Post-Earthquake Geohazard in Strong Seismic-Disturbed Regions [J]. *Journal of Geomechanics*, 2017, 23(5): 743~753. (杨志华, 兰恒星, 张永双, 等. 强震区震后地质灾害长期活动性研究综述 [J]. *地质力学学报*, 2017, 23(5): 743~753.)
- [8] Xu Qiang, Cui Shenghua, Huang Wei, et al. Construction of a Landslide Knowledge Graph in the Field of Engineering Geology [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1601~1615. (许强, 崔圣华, 黄维, 等. 面向工程地质领域的滑坡知识图谱构建方法研究 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(10): 1601~1615.)
- [9] Lin C W, Shieh C L, Yuan B D, et al. Impact of Chi-Chi Earthquake on the Occurrence of Landslides and Debris Flows: Example from the Chenyulan River Watershed, Nantou, Taiwan, China [J]. *Engineering Geology*, 2004, 71(1/2): 49~61.
- [10] Tang Chuan, Ding Jun, Liang Jingtao. Remote Sensing Images Based Observational Analysis on

- Characters of Debris Flow Source Areas in Beichuan County of Wenchuan Earthquake Epicenter Region [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(1): 1-7. (唐川, 丁军, 梁京涛. 汶川震区北川县城泥石流源地特征的遥感动态分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 1-7.)
- [11] Liang Jingtao. Study on the Early Remot Sensing Identification and Evolution Characteristics of Typical Geological Disaster in High Intensity Earthquake Zone [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. (梁京涛. 高烈度地震区典型地质灾害遥感早期识别及震后演化特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.)
- [12] Dong Xiujun, Deng Bo, Yuan Feiyun, et al. Application of Aerial Remote Sensing in Geological Hazards: Current Situation and Prospects [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(12): 1897-1913. (董秀军, 邓博, 袁飞云, 等. 航空遥感在地质灾害领域的应用: 现状与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(12): 1897-1913.)
- [13] Ma Xiaoxue, Wu Zhonghai, Li Jiacun. LiDAR Technology and Its Application and Prospect in Geological Environment [J]. *Journal of Geomechanics*, 2016, 22(1): 93-103. (马晓雪, 吴中海, 李家存. LiDAR技术在地质环境中的主要应用与展望[J]. 地质力学学报, 2016, 22(1): 93-103.)
- [14] Görüm T. Landslide Recognition and Mapping in a Mixed Forest Environment from Airborne LiDAR Data [J]. *Engineering Geology*, 2019, 258: 105155.
- [15] Guo C, Xu Q, Dong X J, et al. Geohazard Recognition and Inventory Mapping Using Airborne LiDAR Data in Complex Mountainous Areas [J]. *Journal of Earth Science*, 2021, 32(5): 1079-1091.
- [16] Jiang Wandong, Xi Jiangbo, Li Zhenhong, et al. Landslide Detection and Segmentation Using Mask R-CNN with Simulated Hard Samples [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(12): 1931-1942. (姜万冬, 席江波, 李振洪, 等. 模拟困难样本的Mask R-CNN滑坡分割识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(12): 1931-1942.)
- [17] Fan X M, Scaringi G, Xu Q, et al. Coseismic Landslides Triggered by the 8th August 2017 Ms 7.0 Jiuzhaigou Earthquake (Sichuan, China): Factors Controlling Their Spatial Distribution and Implications for the Seismogenic Blind Fault Identification [J]. *Landslides*, 2018, 15(5): 967-983.
- [18] Hu X D, Hu K H, Tang J B, et al. Assessment of Debris-flow Potential Dangers in the Jiuzhaigou Valley Following the August 8, 2017, Jiuzhaigou Earthquake, Western China [J]. *Engineering Geology*, 2019, 256: 57-66.
- [19] Li Xinjuan, Lin Jiayuan, Hu Guisheng, et al. Remote Sensing-based Debris Flow Source Area Extraction Before and After Earthquake for a Typical Mountain Basin in Southwest China: A Case Study in the Shuzheng Village Basin [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2021, 36(3): 638-648. (李昕娟, 林家元, 胡桂胜, 等. 西南山地典型流域地震前后泥石流物源遥感精细识别: 以九寨沟树正寨流域为例[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(3): 638-648.)
- [20] Dai Lanxin, Xu Qiang, Fan Xuanmei, et al. A Preliminary Study on Spatial Distribution Patterns of Landslides Triggered by Jiuzhaigou Earthquake in Sichuan on August 8th, 2017 and Their Susceptibility Assessment [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(4): 1151-1164. (戴岚欣, 许强, 范宣梅, 等. 2017年8月8日四川九寨沟地震诱发地质灾害空间分布规律及易发性评价初步研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 1151-1164.)
- [21] She Jinxing, Xu Qiang, Yang Wunian, et al. Early Identification and Analysis of Earthquake and Geological Hazards in Jiuzhaigou [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(1): 207-216. (余金星, 许强, 杨武年, 等. 九寨沟地震地质灾害隐患早期识别与分析研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(1): 207-216.)
- [22] Wang Xin, Fang Chengyong, Tang Xiaochuan, et al. Research on Emergency Evaluation of Landslides Induced by the Luding Ms 6.8 Earthquake [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(1): 25-35. [22] (王欣, 方成勇, 唐小川, 等. 泸定Ms 6.8地震诱发滑坡应急评价研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 25-35.)
- [23] Zhou Bifan, Li Deji, Luo Defu, et al. Guide to Debris Flow Prevention and Control [M]. Beijing: Science Press, 1991. (周必凡, 李德基, 罗德富, 等. 泥石流防治指南[M]. 北京: 科学出版社, 1991.)
- [24] Tie Yongbo, Hu Kaiheng. Formation of Typical Low-frequency Debris Flow Process Based on Remote Sensing Data—Take Aizi Debris Flow in Ningnan, Sichuan Province as an Example [J]. *Journal of Catastrophology*, 2014, 29(3): 77-80. (铁永波, 胡凯衡. 基于遥感解译的典型低频泥石流形成机制研究: 以四川省宁南县矮子沟泥石流为例[J]. 灾害学, 2014, 29(3): 77-80.)