



植被茂密山区地质灾害遥感解译方法研究

王 绚¹ 范宣梅¹ 杨 帆¹ 董秀军¹

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

摘要:受茂密植被覆盖的影响,采用传统的光学遥感影像解译方法无法实现对历史地质灾害的准确识别与精细遥感解译。近年来,激光雷达技术(light detection and ranging, LiDAR)的发展为植被茂密山区地质灾害解译带来了新途径。以九寨沟震区为例,基于高精度机载LiDAR数据,采用红色立体地图(red relief image map, RRIM)数据处理方法,避免了数字高程模型(digital elevation model, DEM)山体阴影的不利影响,提出了崩塌、滑坡和泥石流灾害的地貌识别标志与遥感解译方法,提高了植被茂密山区地质灾害遥感解译的精度与准确性。共解译九寨沟震区熊猫海区域震前地质灾害311处,总面积约11.8 km²,在此基础上分析了震前地质灾害的空间分布特征,可以为九寨沟震区地质灾害防治与风险评价提供数据支撑。

关键词:九寨沟地震;地质灾害;遥感解译;激光雷达技术;红色立体地图

中图分类号:P237

文献标志码:A

传统的地质灾害调查主要依赖于野外调查。自20世纪90年代以来,遥感与地理信息技术的发展为大范围地质灾害调查与数据分析提供了高效、快捷的手段。现代滑坡遥感识别常用数据类型有航空影像、可见光-近红外卫星影像、合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)以及激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)数据等^[1-3]。然而,受植被覆盖的影响,基于普通光学影像的山区地质灾害(崩塌、滑坡和泥石流)遥感解译存在较大误差。近年来,LiDAR技术逐渐被用于山区地质灾害识别^[4]。机载LiDAR是一种集激光、全球定位系统和惯性导航系统3种技术与一身的系统^[1,5-6],适用于带状目标地形图测量、城市三维建模、森林资源调查、水利以及电力领域和山区地质灾害调查。

早在20世纪初期,文献[7]就利用机载LiDAR技术调查了1998年日本福岛核灾难前后某地区的浅层滑坡;文献[8]对巴布亚新几内亚利希尔的一个金矿区利用机载LiDAR生成数字高程模型(digital elevation model, DEM),并绘制了地貌图,以识别矿区的人为和天然滑坡;文献[9]利用LiDAR数据成功分析了美国爱达荷州南部两处滑坡的地貌和变形破坏特征;文献[10]利用

LiDAR技术解译了华盛顿州西雅图市的历史滑坡,并分析了滑坡的演化过程与特征。文献[11]基于LiDAR技术开发了滑坡自动识别方法,对识别森林地区大型深层滑坡效果显著。LiDAR技术虽然在中国起步较晚,但随着国民经济的发展和国家对地质灾害防治的重视,已成为了山区(特别是植被茂密区域)地质灾害调查的有力工具。文献[12]利用机载LiDAR数据,结合高精度航空影像对海地地震诱发的滑坡进行了解译;文献[13]基于LiDAR技术提取了滑坡识别参数,并结合智能分类算法成功识别了长江三峡秭归段千将坪滑坡及其周边区域的滑坡;文献[14]利用LiDAR点云数据生成的DEM对福建省三明市泰宁县开善乡池潭村山体滑坡进行了分区,并计算了各区的方量;文献[15]提出了一种基于LiDAR技术的高分辨率数字地形模型和基于分形理论的滑坡识别算法,解决了山区滑坡快速识别问题。

总而言之,与常规的光学影像相比,LiDAR技术不但能提供极高分辨率的地形数据,而且对于植被茂密山区具有明显优势,可以去除植被的影响,直接获取地面地形信息,从而实现精细的地貌特征与地表形变分析,为植被茂密山区灾害调查与研究提供了新途径。本文以九寨沟震区

收稿日期:2020-02-14

项目资助:国家自然科学基金创新研究群体科学基金(41521002);四川省国土资源科研项目(KJ-2018-22)。

第一作者:王绚,硕士生,主要从事地质灾害易发性、危险性评价研究。592228598@qq.com

通讯作者:范宣梅,博士,研究员。fxm_cdut@qq.com

熊猫海周边地质灾害为例,基于高精度机载LiDAR数据,采用红色立体地图(red relief image map, RRIM)数据处理方法,提出了崩塌、滑坡和泥石流灾害的地貌识别标志与遥感解译方法,建立了震前地质灾害数据库,并在此基础上分析了震前地质灾害的空间分布特征。

1 研究区概况

2017-08-08,四川省阿坝藏族自治州九寨沟发生Ms 7.0级地震,触发了1 883处同震地质灾害^[16-17],造成九寨沟景区景观损毁严重,景区公路

及栈道均不同程度受损。熊猫海及周边区域是受灾最严重的区域之一。因此,本文选取熊猫海周边约52 km²作为研究区域(见图1)。研究区位于九寨沟县漳扎镇九寨沟国家森林公园内(103.82°E, 33.20°N),岩性以生物碎屑灰岩与灰质白云岩为主,具有深切峡谷地貌,因此在震前地质灾害就十分发育^[18-22]。然而,该区域植被覆盖率高达80.39%^[23],普通光学影像无法辨识植被下的真实地形,造成对该区域震前地质灾害的位置、特征与发育分布规律的认识十分不足,导致无法深入研究九寨沟震区震前与同震及震后地质灾害的关系与时空演化规律。

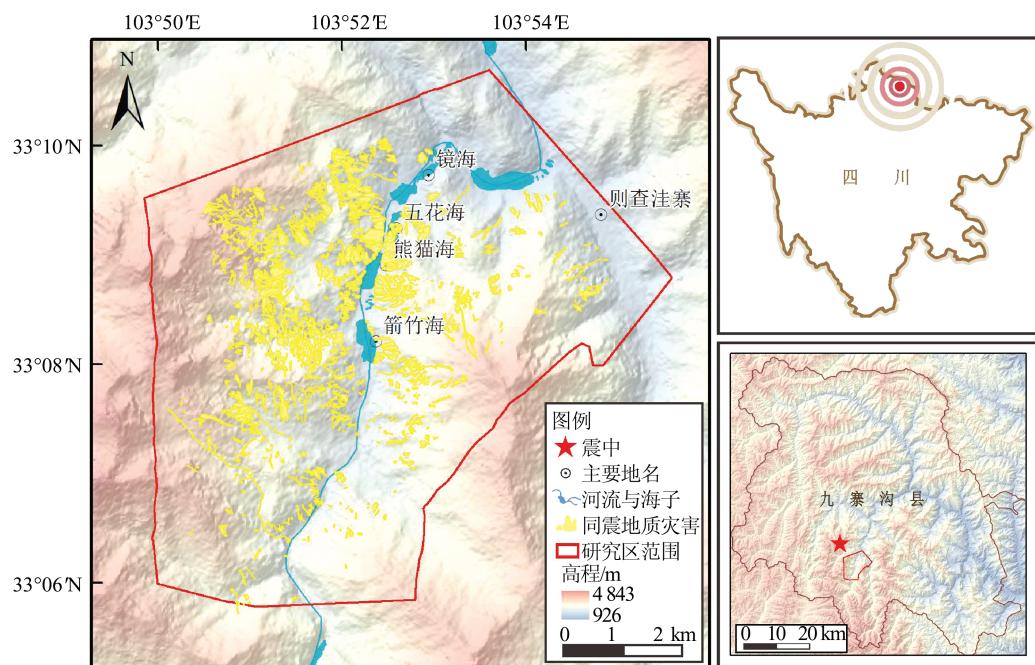


图1 研究区地理位置及地震概况

Fig.1 Geographical Location and Earthquake Survey of the Study Area

2 研究方法

2.1 数据来源

本文采用机载LiDAR技术获取九寨沟景区五花海-日则沟区域的点云数据(四川测绘地理信息局提供),生成了高精度DEM(0.5 m),数据获取时间为2018年10月。机载LiDAR技术与传统航测相比,不仅速度与精度更高,而且自动化程度高,受天气影响小。相比传统卫星航测生成的DEM,机载LiDAR技术获取的点云数据处理后得到的DEM精度可达0.1~0.5 m,且去除植被影响后,能反映真实地形,更有利于辨识区域地质构造和地质灾害。研究区震前DEM精度为12.5 m,生成的山体阴影图如图2所示,震前DEM精

度较低,无法用其进行历史地质灾害解译。震后LiDAR DEM精度较高,清晰地反映了研究区的地貌特征。因此,本文主要基于震后LiDAR DEM的三维地形与地貌特征,进行震前滑坡的解译。值得指出的是,九寨沟地震诱发的同震滑坡绝大部分为浅表层滑坡且数量有限(如图2(a)中的无植被区域),因此不会对震前地形产生明显影响。采用震后高精度LiDAR DEM仍然可以获取震前历史地质灾害,特别是大型地质灾害的地貌特征,帮助识别和解译震前地质灾害。

2.2 基于红色立体地图的DEM数据处理方法

基于DEM的滑坡识别一般是通过生成山体阴影图、坡度图、坡向图以及地形粗糙度图等获取地貌特征,从而进行滑坡解译。使用ArcGIS

栅格表面工具生成山体阴影图时,需要输入太阳光入射角与太阳高度角,不同的角度造成山体的阴影在不同方位,这会在一定程度上影响滑坡的识别(阴影区的滑坡常无法识别)。为了更好地识别滑坡,文献[24]提出了RRIM这种基于三维数据的二维可视化方法,其由地形正开度、地形负开度与坡度叠加形成。RRIM方法可补充现有地形可视化手法的不足,并将环境光的影响应用于地形显示,使目视解译能够更清晰地辨认地貌差别,更有利于山区地质灾害的识别与精准解译。

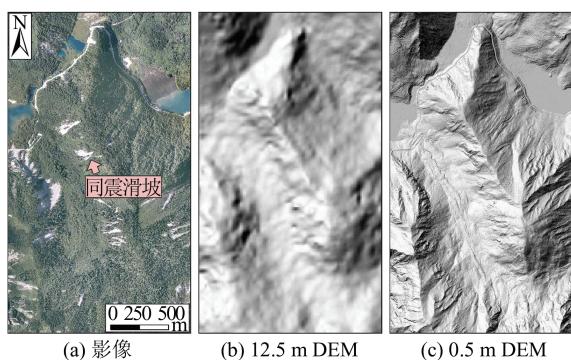


图 2 影像、12.5 m 与 0.5 m DEM 生成的山体阴影图对比
Fig.2 Comparison of Optical Image, Maps Generated by 12.5 m and 0.5 m DEM Hillshade

2.2.1 地形开度

文献[25]提出通过计算一定步长内的最大天顶角与天底角来表现地面的凹凸程度,即地形开度。地形负开度表示曲面的凹度,取值范围一般在 0~2 之间,值越大说明该处地形越向内凹,在图像上负开度值最大的区域一般为河流、山谷及冲沟等。地形正开度表示曲面的凸度,取值范围一般在 0~2 之间,值越大说明该处地形越向外凸,在图像上正开度值最大的区域一般为山脊与坡顶。地形开度具有与光源无关的特性,因此可消除其他可视化方法中地形阴影的不利影响,而且计算结果受 DEM 噪点干扰的影响要比其他参数小。

地形开度以栅格 DEM 计算,基于一个栅格点与 8 个方向的目标栅格点以直线相连,以半径 L 为步长,得到 8 个方向的地形断面。分别计算 8 个方向目标栅格点的最大天顶角与天底角。地形正开度为 8 个方向上最大天顶角的平均值,地形负开度则为 8 个最大天底角的平均值。地形正开度值越高,说明地形越凸;地形负开度值越高,说明地形越凹。地形开度使地形的凹凸更加明显,突出了微地貌信息^[26]。

2.2.2 RRIM 图

根据文献[24]提出的公式计算脊谷指数 I :

$$I = \frac{O_p - O_n}{2} \quad (1)$$

式中, O_p 为地形正开度; O_n 为地形负开度。

脊谷指数的取值范围一般为 -1~1。当脊谷指数为正时,值越大代表该处地形越凸,在图像上亮度越高,如山脊等区域;当脊谷指数为负时,值越小代表该处地形越凹,在图像上越暗,如道路、湖泊与侵蚀沟等区域。在脊谷指数图上,地质灾害源区与堆积区的明暗界线十分清晰,并且可以通过观察源区的光暗程度,细致地区分出滑坡后缘、崩塌后壁等灾害源区的界线。

将脊谷指数 I 与地形坡度叠加,且脊谷指数 I 图层以渐变灰色表示,地形坡度以渐变红色表示。生成 RRIM 图的流程如图 3 所示,先根据 DEM 计算出地形正开度、地形负开度及坡度,再采用式(1)计算脊谷指数 I ,将坡度图层叠加在脊谷指数图层之上,调整两个图层的色带以及透明度,最后得到可以清晰辨认地质灾害边界的 RRIM 图。根据文献[24, 27]的经验,选用红色为底是因为红色对人眼来说较为显眼,能最大限度地展现细微的地貌信息。通过 RRIM 展现的详细地貌信息,更有利于辨识植被覆盖地区的地质灾害。

为了说明 RRIM 方法较山体阴影图的优点,本文选取九寨沟漳扎镇某区域进行了对比分析。由图 4 可见,由于植被覆盖,通过震前普通光学影像无法辨识地质灾害。通过震后高精度遥感影像可以准确获取同震滑坡范围(植被破坏区域),但依然无法解译震前地质灾害。通过 LiDAR DEM 可以确定地质灾害的范围,但 RRIM 方法能够更好地反映地质灾害的地貌特征,实现精细遥感解译。此外还可发现,DEM 精度越高,RRIM 效果越好。可见,高分辨率 LiDAR 数据结合 RRIM 的方法可以很好地帮助精细解译植被茂密地区的地质灾害。

3 山区地质灾害识别标识与遥感解译方法

山区地质灾害解译主要是通过遥感影像、山体阴影或其他可视化图像上地质灾害的形态、阴影、纹理以及色调等进行^[28]。历史地质灾害往往被植被覆盖,因此较难通过可见光影像解译。此外,图像的分辨率对于识别山区地质灾害也十分

重要。根据山区常见地质灾害——崩塌、滑坡和泥石流的地貌特征,可以进行地质灾害的识别与解译。本文总结了各类地质灾害的地貌解译特征,并对比了RRIM图和山体阴影图,可见RRIM图能够更清晰地展现微地貌特征,有助于地质灾害的精细解译(见图5)。

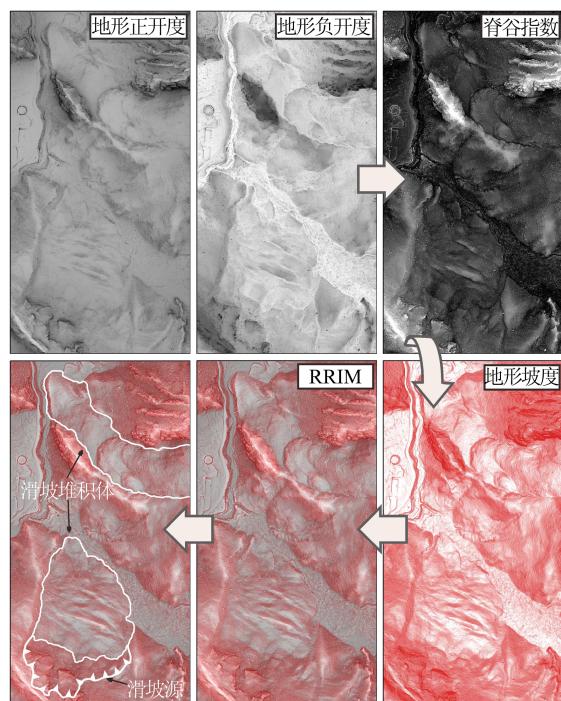


图3 RRIM生成过程图及滑坡解译

Fig.3 RRIM Process and Landslide Interpretation

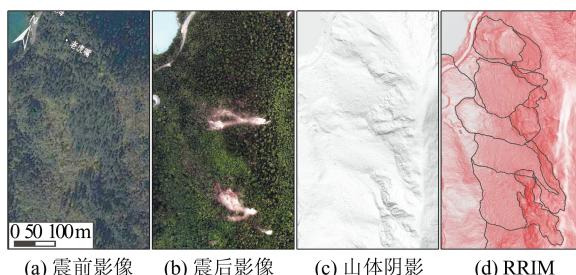


图4 影像、山体阴影图与RRIM图对比

Fig.4 Comparison of Image, Hillshade and RRIM

3.1 崩塌解译特征

崩塌灾害地貌特征明显,多发育在陡坡或岩体破碎并存在临空面的区域,常成群发育,具有明显的崩塌后壁与崩塌堆积体。崩塌后壁陡峭且可见破碎的岩体结构,色调偏暗,部分崩塌后缘可见参差线状崩塌陡坎。崩塌体通常破碎成碎块堆积于坡脚,形成锥状岩堆(崩塌倒石锥),图像呈粗糙点状,通过高分辨率的DEM数据甚至可辨识堆积碎块石的形态与粒径。在RRIM图中,可明显观察到崩塌后壁粗糙嶙峋的岩体结构

普遍呈暗红色,坡体下方崩塌倒石锥图像上呈细点状,颗粒感小且均匀,颜色也较后壁浅,崩塌后壁与崩塌堆积体分界线十分明显。从图5的崩塌示例图中可见坡面发育多个崩塌灾害。

3.2 滑坡解译特征

滑坡灾害通常呈簸箕形或舌形的平面形态,个别滑坡可见滑坡壁、滑坡舌、滑坡台阶、封闭洼地等地貌特征。滑坡按照物质组成可划分为岩质滑坡与土质滑坡^[29],其中土质滑坡后缘呈圈椅状,具有圆弧形滑面,后缘常见平行于滑坡壁的弧形拉张裂隙,前缘常见由于隆起形成的鼓张裂隙与滑坡体向两侧扩散形成的扇形裂隙;岩质滑坡边界通常由各组结构面控制,呈折线形,滑坡前缘常有局部滑塌,后缘常见由节理发育形成的拉张裂隙^[30]。崩塌与岩质滑坡的区别一般通过后壁的形态区分,滑坡的后壁形态往往呈弧形或折线形,并向后凹陷,而崩塌后壁主要受岩体结构面控制,常表现为陡直的破碎岩壁。

基于DEM生成的山体阴影等可视化图像中,可根据圈椅状后壁、山脊线是否连续、坡体的突然凹陷、中前缘地形隆起等地貌特征进行滑坡辨识。主要识别标志为前缘的较大规模滑塌变形与圈椅状后壁,以及后缘的拉裂缝。在高精度影像上前缘变形呈高亮度显示,后缘拉裂缝表现为线状或条带状阴影或高亮度影像特征,而滑坡后壁色调偏暗。在RRIM图中,滑坡后壁与周围坡体相比,亮度更暗,颜色更深,滑坡堆积体则颜色较浅,亮度变大,图像较滑坡后壁均匀。土质滑坡后壁呈弧形,堆积体可见高亮度条状图像,即堆积体上的地形隆起;岩质滑坡后壁呈折线形,可见控制滑坡的结构面,岩质滑坡堆积体的图像较土质滑坡堆积体粗糙,呈细小点状。由图5滑坡示例可见滑坡后壁呈明显的圈椅状,滑坡体有明显下错,且下方堆积体呈高亮状态。

3.3 泥石流解译特征

泥石流通常发育在地质陡峻、纵坡降大的山区,典型泥石流流域可划分为物源区、流通区与堆积区。泥石流按照流域形态可划分为沟道泥石流与坡面泥石流。其中,沟道泥石流流域呈扇形或狭长条形,沟谷地形,沟长坡缓,规模较大;坡面泥石流流域呈斗状,无明显流通区,沟短坡陡,规模较小。泥石流最典型的识别标志为泥石流的堆积区,常见于沟口,呈圆弧扇形,即泥石流堆积扇,质感细腻且色调较浅,扇体上常见侵蚀沟,表现为线状阴影。通常在沟口发现堆积扇即

可说明沟内曾爆发过泥石流,沟内常可发现较多的崩塌、滑坡等灾害形成的堆积体,即泥石流物源区。在 RRIM 图中,泥石流堆积扇呈高亮度状态,堆积扇颜色一般呈浅红-白色,容易与周围山

体区分开。沟口可见明显的弧形扇缘,扇体上可见线形深色侵蚀沟。如图 5 中泥石流示例,沟道出口有明显的泥石流堆积扇,并且能清楚识别到扇体上的侵蚀沟。

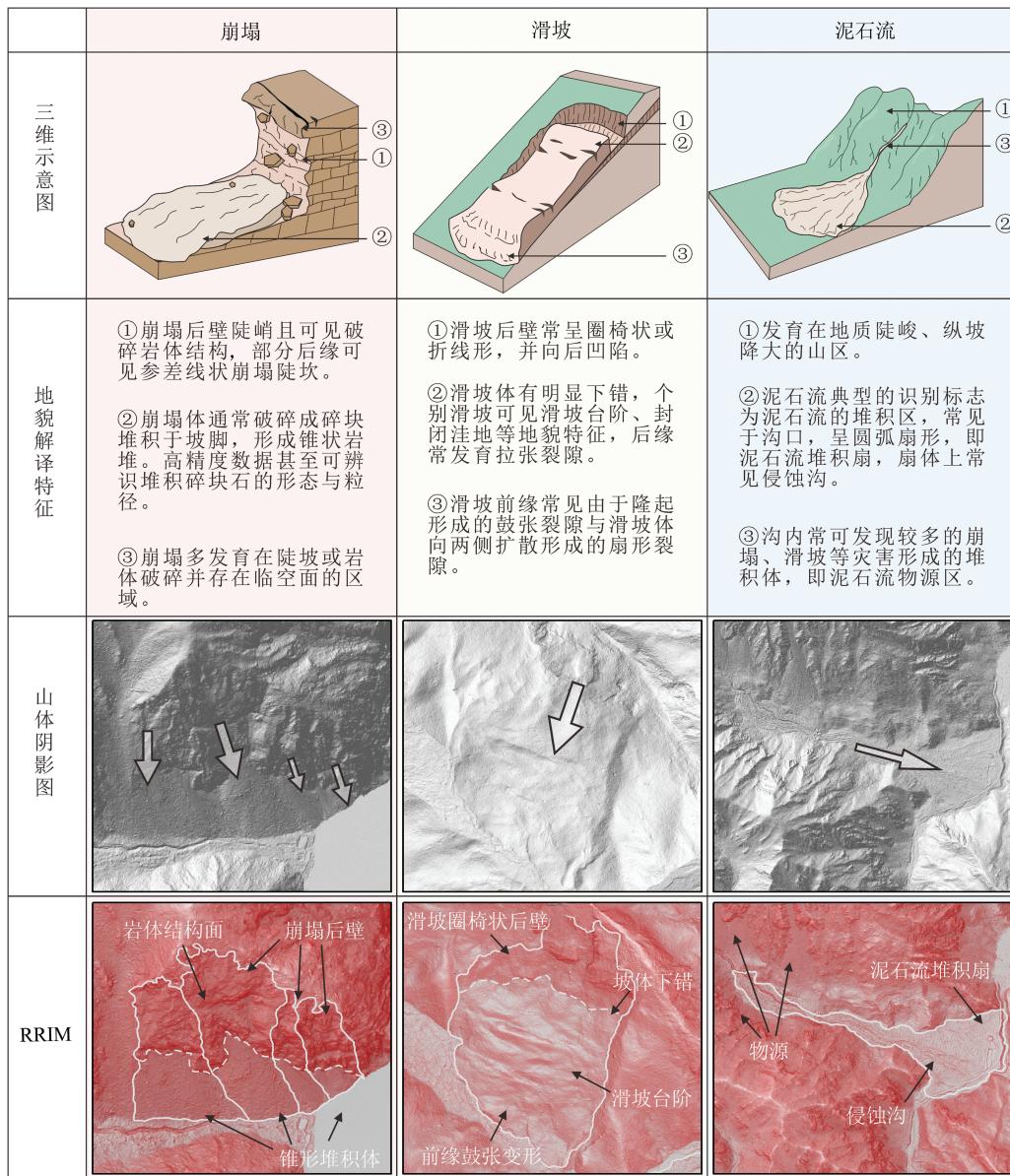


图 5 山区地质灾害地貌解译特征示意图

Fig.5 Characteristics of Geohazards Interpretation in Mountainous Areas

4 震前地质灾害解译结果及分布特征

4.1 震前地质灾害解译结果

首先使用 SAGA GIS 中 Topographic Openness 工具利用基于 LiDAR 点云数据生成的研究区 DEM 分别生成地形正开度与地形负开度栅格文件;再通过 ArcGIS 栅格表面工具栏中的坡度工具生成地形坡度栅格文件,然后在栅格计算器

中根据式(1)计算得到脊谷指数 I 栅格文件。选择相应色带后,将脊谷指数 I 与地形坡度进行叠加,并根据研究区地形情况对两个图层的透明度、亮度、对比度进行调整,得到关于研究区的 RRIM 图(见图 6)。从图 6 中可以清晰地看出区域内震前地质灾害的发生范围以及其源区与堆积区的分界线。

采用人工目视解译方法对研究区震前地质灾害进行解译。人工目视解译是利用图像的影

像特征与空间特征,与多种非遥感信息资料相结合,根据逻辑推理与相关地质信息分析出地质灾害的范围、位置的常见基础人工解译方法^[31]。解译的同时,根据灾害的特征,参考文献[18, 27, 32]的地质灾害分类方法,对震前地质灾害进行细致分类(见表1),将地质灾害分为崩塌、岩质滑坡、土质滑坡、沟道泥石流、坡面泥石流5种类型。研究区震前地质灾害总面积约11.8 km²,共311处,解译结果见图7。数量与规模上岩质崩塌以绝对优势占主导地位,这也符合本文研究区以灰岩为主的岩性情况。滑坡也以岩质滑坡为主,而崩塌泥石流与沟道泥石流数量与面积大致相同。

4.2 验证解译结果

根据文献[18, 19, 22]对九寨沟景区震前灾害的研究,对比解译结果,可以验证解译的准确性。文献[18-19]在研究九寨沟景区地质灾害的研究时,受到数据精度与景区植被丰富、地势险峻的限制,识别出熊猫海及周边范围的地质灾害共计8处,文献[20]则是基于九寨沟景区泥石流

治理工程,对九寨沟景区部分泥石流进行了研究,位于本文研究区的仅3条。而本文基于高分辨率去植被DEM与RRIM图,识别出311处震前地质灾害。从图8中可以看出,基于RRIM图解译的311处灾害包括了文献[18-20]标记的灾害点,且类型相同,并对其范围进行了细化。

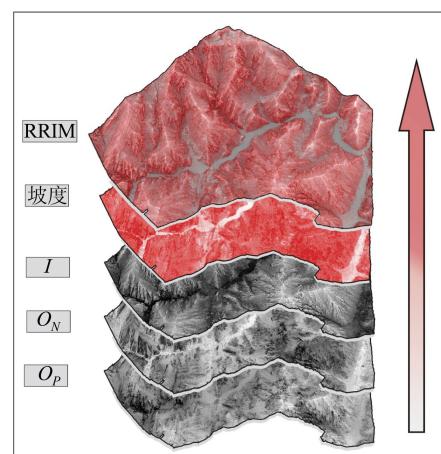


图6 研究区RRIM图

Fig.6 RRIM Map of the Study Area

表1 灾害分类及数量统计

Tab. 1 Hazards Classification and Quantity Statistics

类型	特征	数量	面积/ km ²
崩塌	有明显崩塌壁,且崩塌壁呈明显的紫-灰白色(坡度>60°),崩塌体颗粒比较粗糙,大部分规模较小	244	5.84
岩质滑坡	滑坡后壁呈圆弧形且有明显的基岩出露,堆积体颗粒比较粗,前缘一般呈扇形	35	2.45
土质滑坡	滑坡后壁呈圆弧形,堆积体颗粒比较细,堆积体上偶可见滑坡台阶,前缘一般呈扇形	11	0.87
沟道泥石流	形成区呈漏斗状,物源主要来自松散的崩滑堆积,流通区呈峡谷形态,沟床坡降大,堆积区为明显的扇形	11	1.26
坡面泥石流	有明显的崩塌形成区,坡度>60°,流通区不明显,但有明显的冲积区	14	1.40

4.3 震前地质灾害分布特征

九寨沟震区地质灾害主要以岩质崩塌为主,受植被影响较小,因此未考虑植被因素,且震前灾害发育时间跨度较大,结合前人对地质灾害分布规律的研究^[16-17, 33],本文只选取6个地形因子:高程、坡度、坡向、地形粗糙度、曲率以及LF(landform fuzzy)对震前研究区地质灾害的分布特征进行分析,生成的因子栅格图见图9。其中,LF是根据简单的地貌列表对研究区内的DEM位置进行模糊分类,主要从相对位置和功能上进行分类,本文将地貌单元划分为13种类型,可通过SAGA GIS计算得到。其余因子均通过ArcGIS计算得到。

通过ArcGIS软件的重分类功能与空间统计分析功能将各因子进行分级,并计算每个因子各分级的面积及分级内灾害的面积,结果见图10。可以看出,震前灾害集中发育于高程2 600~

3 000 m范围内,即坡体中下部,且坡度在40°~45°时灾害集中发育,符合地质灾害发育普遍规律^[33]。研究区震前地震灾害发育的优势坡向在东与南东两个方向,且在地面粗糙度为1~1.4时地质灾害较发育,尤其是粗糙度为1~1.2时,震前灾害发育比较明显。曲率将研究区分为凹(<0)、凸(>0)、平(=0)3类区域,且凹值越小,区域凹陷程度越大,凸值越大,区域凸起程度越大。研究发现,曲率为-0.5~0与0.5~1范围内,即在轻微凹陷与一般凸起的区域,震前灾害较发育。同时,从图10中可以看出,在13个地貌类型中,坡脚洼地和坡肩凸坡震前地质灾害集中发育。

5 结语

本文利用高精度LiDAR点云数据,采用RRIM数据处理方法,避免了光源、阴影、植被等

因素的干扰,提出了山区地质灾害的地貌识别标志与遥感解译方法。本文在九寨沟震区地质灾害集中发育的熊猫海区域进行了震前地质灾害解译,建立了震前地质灾害数据库,以更好地分析该区域地质灾害的时空演化规律,为预测该区域的未来地质灾害提供数据支撑。主要结论如下:

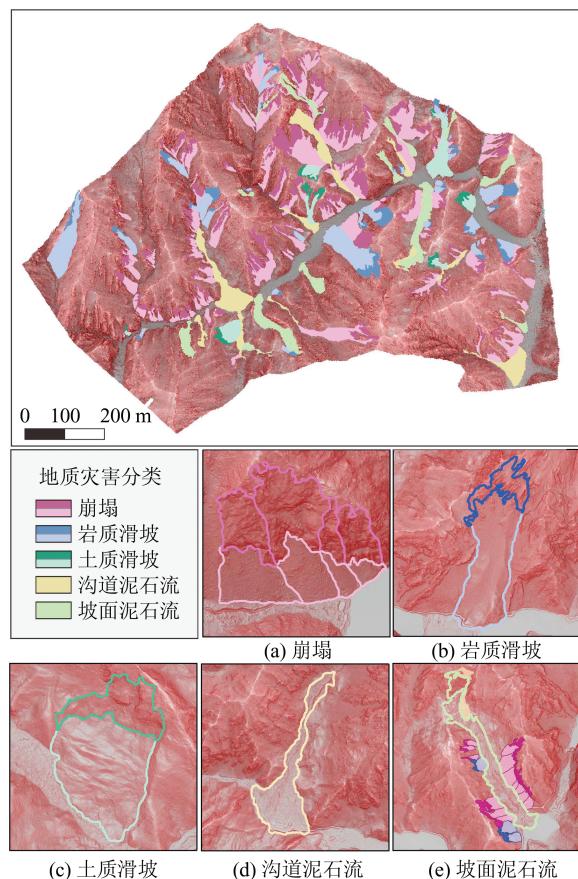


图7 震前各类别地质灾害解译
Fig.7 Interpretation of All Kinds of Pre-earthquake
Geohazards

1)高分辨率 LiDAR 数据结合 RRIM 的方法在识别植被茂密山区地质灾害方面具有独特的优势,可精准反映地质灾害的地貌特征,有助于地质灾害准确识别与解译。

2) 总结了山区常见地质灾害——崩塌、滑坡和泥石流的地貌解译特征：崩塌的主要识别标志为陡峭且可见破碎岩体结构的崩塌后壁与下方的锥形堆积体(崩塌倒石锥)，堆积体在图像上表现为粗糙点状或粒状，在高精度图像上甚至可以辨识堆积碎块石的形态与粒径；滑坡的主要识别

标志为滑坡前缘的较大规模滑塌变形与圈椅状后壁,在高精度图像上前缘变形呈高亮度显示,凹陷的后边缘色调偏暗;泥石流的主要识别标志为泥石流堆积扇,常见于沟口,质感细腻且色调较浅,沟内常可发现较多的崩塌、滑坡等灾害形成的堆积体。

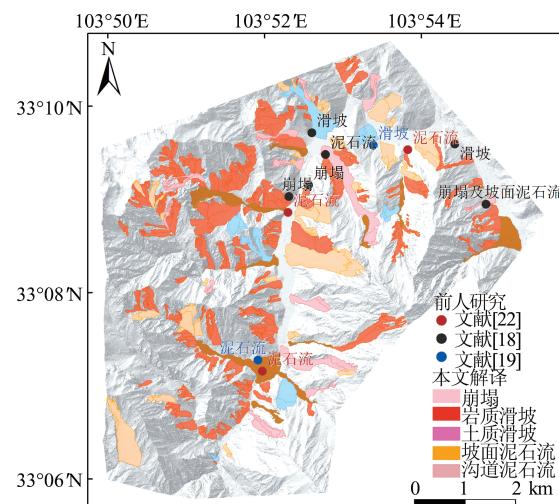


图8 解译所得震前灾害与实地考察对比
Fig.8 Interpretation of Pre-earthquake Geohazards and
Comparison of Field Investigation

3)在九寨沟熊猫海区域,共解译出震前地质灾害311处,总面积约11.8 km²,并将其分成5类:崩塌、岩质滑坡、土质滑坡、沟道泥石流和坡面泥石流,其中以崩塌为主。震前地质灾害主要分布在高程2 600~3 000 m范围内,坡度40°~45°、坡向东和南东及地面粗糙度1~1.2的区域。

RRIM 图凸显了地形变化,不仅对地质灾害的解译具有显著效果,也可应用于侵蚀沟与岩体结构面的识别等。

值得注意的是,RRIM图虽然能展示细微的地貌信息,但其缺陷在于缺少定量化的其他地形信息。为补充其他地形信息,可将RRIM图与其他地形参数图层进行叠加,如与等高线图层进行融合,可补全高程信息。同时,DEM精度越高,RRIM图展现的地貌信息越丰富;当DEM精度较低时,RRIM图无法放大细微地貌特征。而在进行图层的叠加时,脊谷指数图层与坡度图层的透明度、对比度、亮度等参数均可根据不同解译要求进行调整。

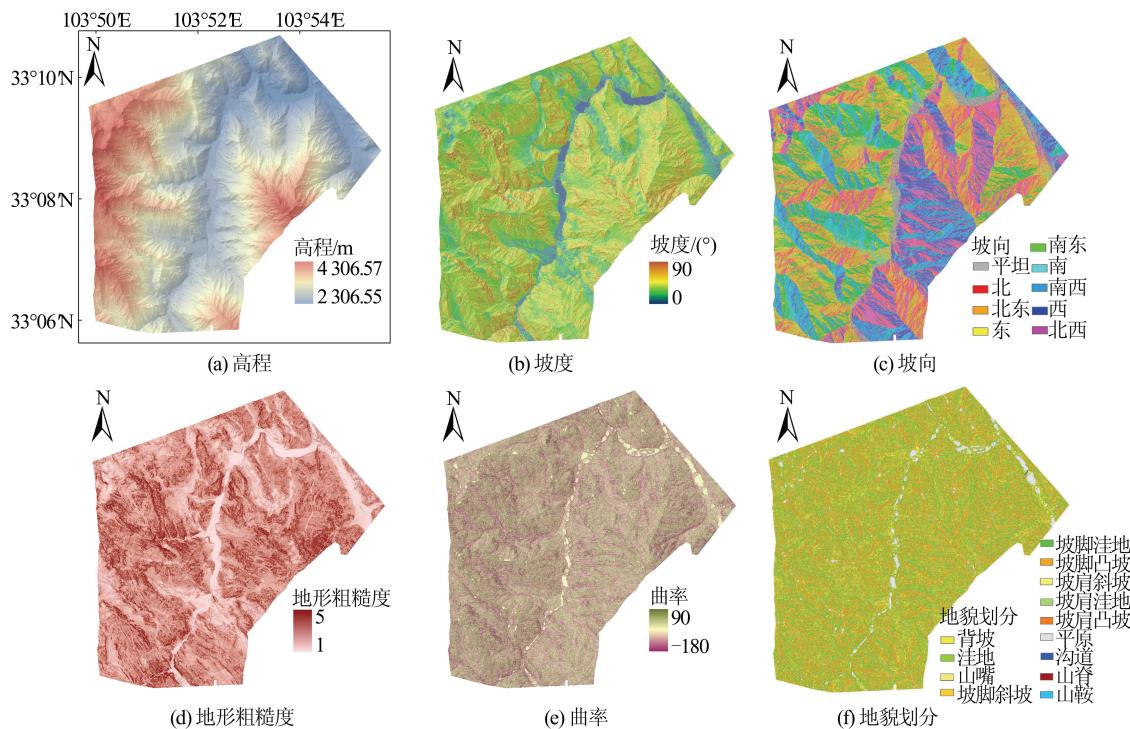


图9 研究区因子栅格图

Fig.9 Factor Grids of the Study Area

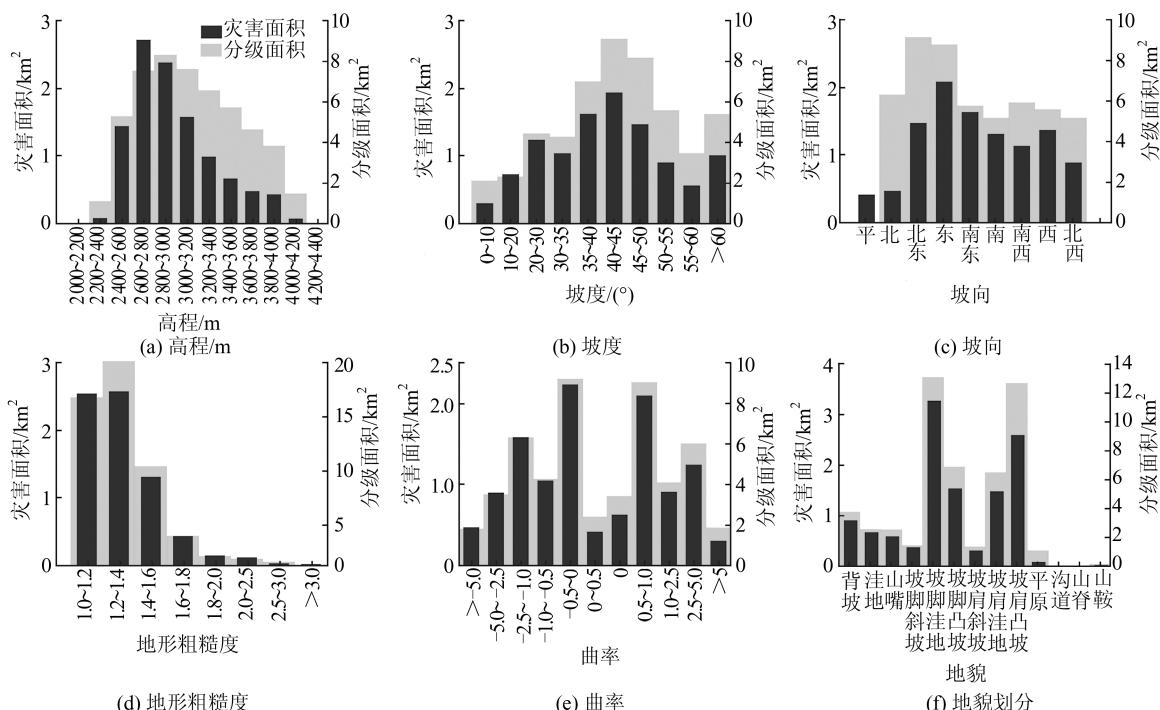


图10 因子分级统计图

Fig.10 Factor Grading Statistics

参 考 文 献

- [1] Xiao Yanfeng. Application of LiDAR Technology in Aerial Survey [J]. *Railway Survey and Design*, 2010(4): 19-21(肖雁峰. 机载激光雷达技术(LiDAR)在航测中的应用实践[J]. 铁道勘测与设计, 2010(4):19-21)
- [2] Wang Yunnan, Ren Guangming, Wang Jiazhui, et al. Overview of Explanation and Interpretation on Landslide in Remote Sensing Image [J]. *Northwest Hydropower*, 2017(1):17-21(王云南, 任光明, 王家柱, 等. 滑坡遥感解译研究综述[J]. 西北水电, 2017(1):17-21)

- 2017(1):17-21)
- [3] Li Zheng, Li Yongshu, Guo Jiawei, et al. An Automatic Landslide Interpretation Model of UAV Imagery Based on Bow [J]. *Remote Sensing Information*, 2016, 31(5):24-29(李政, 李永树, 郭加伟, 等. 词袋特征支持下的无人机影像滑坡解译模型[J]. 遥感信息, 2016, 31(5):24-29)
- [4] 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)
- [5] Hou Feng. Thorough Introduction of LiDAR and Overview of Its Application [J]. *Science Mosaic*, 2014(4):95-100(侯峰. LiDAR 详细介绍及其应用举例综述[J]. 科技广场, 2014(4):95-100)
- [6] Zhang Yufang, Cheng Xinwen, Ou Yangping, et al. The Data Processing Technology and Application of Airborne LiDAR [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2008, 5(1):119-124(张玉方, 程新文, 欧阳平, 等. 机载 LiDAR 数据处理及其应用综述[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(1):119-124)
- [7] Chigira M, Duan F, Yagi H, et al. 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*, 2004, 1(3):203-209
- [8] Haneberg W C, Creighton A L, Medley E W, et al. 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, 2005
- [9] Glenn N F, Streutker D R, Chadwick D J, et al. Analysis of LiDAR-Derived Topographic Information for Characterizing and Differentiating Landslide Morphology and Activity [J]. *Geomorphology*, 2006, 73(1/2):131-148
- [10] Schulz W H. Landslide Susceptibility Revealed by LiDAR Imagery and Historical Records, Seattle, Washington [J]. *Engineering Geology*, 2007, 89(1/2):67-87
- [11] Lin C W, Tseng C M, Tseng Y H, et al. Recognition of Large Scale Deep-Seated Landslides in Forest Areas of Taiwan Using High Resolution Topography [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 62:389-400
- [12] Shen Yonglin, Li Xiaojing, Wu Lixin. Detection of Haiti Earthquake Induced Landslides from Aerial Images and LiDAR Data [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2011(1):20-24(沈永林, 李晓静, 吴立新. 基于航空影像和 LiDAR 数据的海地地震滑坡识别研究[J]. 地理与地理信息科学, 2011(1):20-24)
- [13] Chen Gang, Chen Weitao, Li Xianju. Extraction Method of Landslide Identification Parameters Based on Airborne LiDAR Technology [J]. *Geospatial Information*, 2013(6):16-17(陈刚, 陈伟涛, 李显巨. 基于机载 LiDAR 技术的滑坡识别参数提取方法[J]. 地理空间信息, 2013(6):16-17)
- [14] Nie Jing. Research on Landslide Disaster Based on LiDAR Point Cloud Data: Taking the Case of Taining Landslide Disaster [D]. Nanchang: Donghua University of Technology, 2017(聂晶. 基于 LiDAR 点云数据的滑坡灾害研究: 以泰宁山体滑坡为例[D]. 南昌: 东华理工大学, 2017)
- [15] Lai Zili, Chen Jianping, Xiang Jie, et al. Landslide Extraction Based on Fractal and LiDAR Data [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, 43(6):112-117(赖自力, 陈建平, 向杰, 等. 分形理论和 LiDAR 数据的滑坡识别[J]. 测绘科学, 2018, 43(6):112-117)
- [16] Fan X, 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
- [17] 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)
- [18] Xu Maoqi, Zhang Daquan, Zhou Xiaoluo, et al. The Preliminary Study on the Explosive Soil Erosion in the Jiuzhaigou Catchment of Sichuan, China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 5(2):1-7(徐茂其, 张大泉, 周晓骆, 等. 九寨沟流域突发性重力侵蚀初步研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(2):1-7)
- [19] Ding Zhaoyu. Using Remote Sensing Images to Reveal the Adverse Geological Phenomena in Jiuzhaigou Tourist Area [J]. *Remote Sensing Information*, 1989(3):24-26(丁照宇. 利用遥感图像揭示九寨沟旅游区的不良地质现象[J]. 遥感信息,

- 1989(3):24-26)
- [20] Wang Jingrong, Tian Zhaoyi, Zeng Siwei, et al. History, Reality and Future of Jiuzhaigou Collapse and Debris Flow [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1985(1): 75-77(王景荣, 田昭一, 曾思伟. 九寨沟崩塌和泥石流的历史、现实和未来 [J]. 水土保持通报, 1985(1):75-77)
- [21] Comprehensive Investigation Team of Qinghai Tibet Plateau of Chinese Academy of Sciences. Investigation Summary of Debris Flow in Jiuzhaigou [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1985(1): 75-77(中国科学院青藏高原综合考察队. 九寨沟泥石流的考察纪要[J]. 水土保持通报, 1985(1):75-77)
- [22] Liu Suqing, Tang Bangxing, Cui Peng, et al. Debris Flow Control and Its Benefits in Jiuzhaigou [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1998(柳素清, 唐邦兴, 崔鹏, 等. 九寨沟泥石流治理及其效益[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1998)
- [23] Lan Zhenjiang, Cai Hongxia, Zeng Tao, et al. Biomass Distribution of the Major Plant Communities in Jiuzhaigou Valley, Sichuan [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2004, 10(3): 299-306(蓝振江, 蔡红霞, 曾涛, 等. 九寨沟主要植物群落生物量的空间分布[J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(3):299-306)
- [24] Chiba T, Kaneta S, Suzuki Y. Red Relief Image Map: New Visualization Method for Three Dimensional Data [J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, 37(B2): 1 071-1 076
- [25] Yokoyama R, Shirasawa M, Pike R J. Visualizing Topography by Openness: A New Application of Image Processing to Digital Elevation Models [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2002, 68(3): 257-266
- [26] Zhang Ling, Yang Xiaoping, Wei Zhan Yu, et al. Overview of Visualization Methods of Three Dimensional Topographic Data [J]. *Seismology and Geology*, 2014, 36(1):275-284(张玲, 杨晓平, 魏占玉, 等. 三维数据的二维可视化方法综述[J]. 地震地质, 2014, 36(1):275-284)
- [27] Görüm T. Landslide Recognition and Mapping in a Mixed Forest Environment from Airborne LiDAR Data [J]. *Engineering Geology*, 2019, 258: 105155
- [28] Xu Chong, Dai Fuchu, Chen Jian, et al. Identification and Analysis of Secondary Geological Hazards Triggered by a Magnitude 8.0 Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(4): 745-762(许冲, 戴福初, 陈剑, 等. 汶川 Ms 8.0 地震重灾区次生地质灾害遥感精细解译[J]. 遥感学报, 2009, 13(4):745-762)
- [29] Liu Guangrun, Yan Echuan, Lian Cao. Discussion on Classification of Landslides [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, 10(4):339-342(刘广润, 晏鄂川, 练操. 论滑坡分类[J]. 工程地质学报, 2002, 10(4):339-342)
- [30] Li Weile, Xu Qiang, Lu Huiyan, et al. Tracking the Deformation History of Large-Scale Rocky Landslides and Its Enlightenment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7):1 043-1 053(李为乐, 许强, 陆会燕, 等. 大型岩质滑坡形变历史回溯及其启示[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(7):1 043-1 053)
- [31] Yang Quan, Liu Xiangnan. The Present Research Condition and Development Trend of Remotely Sensed Imagery Interpretation [J]. *Remote Sensing of Land and Resources*, 2011, 16(2): 7-10(杨桄, 刘湘南. 遥感影像解译的研究现状和发展趋势 [J]. 国土资源遥感, 2011, 16(2):7-10)
- [32] Cruden D M, Varnes D J. Landslides: Investigation and Mitigation[R]. U. S. National Academy of Sciences, Washington D C, USA, 1996
- [33] Huang Runqiu, Li Weile. Research on Development and Distribution Rules of Geohazards Induced by Wenchuan Earthquake on 12th May, 2008 [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(12):2 585-2 592(黄润秋, 李为乐. “5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12):2 585-2 592)

Remote Sensing Interpretation Method of Geological Hazards in Lush Mountainous Area

WANG Xuan¹ FAN Xuanmei¹ YANG Fan¹ DONG Xiujun¹

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

Abstract: **Objectives:** Traditional methods for remote sensing interpretation are difficult to identify historical geohazards covered by dense vegetation. For the purpose of interpreting the pre-seismic geohazards in the area of Panda Sea, Jiuzhaigou, and analyze the characteristics and distribution law, we propose a new methodology for geomorphologic identification masks and remote sensing interpretation regarding collapse, landslide and debris flow. **Methods:** Based on high-resolution LiDAR(light detection and ranging) data and data processing method of RRIM(red relief image map). RRIM is formed by the superposition of positive openness, negative openness and slope. RRIM method can supplement the shortcomings of the existing terrain visualization techniques, and apply the influence of environmental light to the terrain display, so that the visual interpretation can clearly identify the differences of landforms, and is more conducive to the identification and accurate interpretation of geohazards in mountainous areas. **Results:** Aiming at the Panda Sea area, which is the most seriously affected by Jiuzhaigou earthquake, the RRIM method is used to interpret the pre-seismic geohazards. A total of 311 pre-earthquake pre-seismic geohazards are interpreted and classified according to their characteristics, then are analyzed for spatial distribution. **Conclusions:** The verified results show that the high-resolution LiDAR data combined with RRIM is of great significance to improve the interpretation of geohazards of mountainous area with dense vegetation coverage, and provide data support for the geohazards prevention and risk assessment of the earthquake area in Jiuzhaigou.

Key words: Jiuzhaigou earthquake; geological hazards; remote sensing interpretation; LiDAR; RRIM

First author: WANG Xuan, postgraduate, specializes in geological hazards susceptibility and risk assessment. E-mail: 592228598@qq.com

Corresponding author: FAN Xuanmei, PhD, researcher. E-mail: fxm_cdut@qq.com

Foundation support: The Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (41521002); Land and Resources Research Program of Sichuan Province (KJ-2018-22).

引文格式: WANG Xuan, FAN Xuanmei, YANG Fan, et al. Remote Sensing Interpretation Method of Geological Hazards in Lush Mountainous Area[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(11):1771-1781. DOI:10.13203/j.whugis20200044(王绚,范宣梅,杨帆,等.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,2020,45(11):1771-1781. DOI:10.13203/j.whugis20200044)