

中国科技核心期刊 《中国科学引用文数据库》来源期刊 Caj-cd规范获奖期刊

THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL

同震崩塌滑坡的光学遥感影像多特征融合解译方法

韩 征,方振雄,傅邦杰,吴斌晖,李艳鸽,李常丽,陈光齐

Interpretation method for regional co-seismic collapses based on multi-feature fusion of optical remote sensing

HAN Zheng, FANG Zhenxiong, FU Bangjie, WU Binhui, LI Yange, LI Changli, and CHEN Guangqi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202111008

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation 李文娟, 邵海 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94–99

基于光学遥感技术的高山极高山区高位地质灾害链式特征分析

An analysis on chain characteristics of highstand geological disasters in high mountains and extremely high mountains based on optical remote sensing technology: A case study of representative large landslides in upper reach of Jinsha River 刘文, 王猛, 朱赛楠, 余天彬, 黄细超, 宋班, 江煜, 孙渝江 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 29–39

联合升降轨InSAR 与高分辨率光学遥感的滑坡隐患早期识别

Early identification of hidden dangers of lanslides based on the combination of ascending and descending orbits InSAR and high spatial resolution optical remote sensing: A case study of landslides in Longde County, southern Ningxia 涂宽, 王文龙, 谌华, 李樵民, 耿丹, 王川, 郑健, 杨影 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 72-81

金沙江结合带高位远程滑坡灾害链式特征遥感动态分析

Remote sensing dynamic analysis of chain characteristics of long range and high position landslide in Jinsha River junction zone: A case study of Baige landslide

黄细超, 余天彬, 王猛, 朱赛楠, 宋班, 刘文 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 40-51

面向东川复杂山地泥石流沟谷三维地形建模及特征分析的无人机遥感探测应用研究

Application research of unmanned aerial vehicle remote sensing detection for 3D terrain modeling and feature analysis of debris flow gullies in complex mountainous area of Dongchuan

毕瑞,甘淑,李绕波,胡琳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 91-100

基于高分遥感影像的泥石流潜在形成区识别方法探讨

Probing into the techniques recognizing potential debris flow formation regions 苏轶君 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 22-31



DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202111008

韩征,方振雄,傅邦杰,等.同震崩塌滑坡的光学遥感影像多特征融合解译方法 [J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(6):103-113.

HAN Zheng, FANG Zhenxiong, FU Bangjie, *et al.* Interpretation method for regional co-seismic collapses based on multi-feature fusion of optical remote sensing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 103-113.

同震崩塌滑坡的光学遥感影像多特征融合解译方法

韩 征^{1,2},方振雄¹,傅邦杰¹,吴斌晖¹,李艳鸽^{1,3},李常丽¹,陈光齐⁴ (1. 中南大学土木工程学院,湖南长沙 410075; 2. 轨道交通工程结构防灾减灾湖南省重点 实验室,湖南长沙 410075; 3. 重载铁路工程结构教育部重点实验室,湖南长沙 410075; 4. 九州大学工学府,福冈 819-0372,日本)

摘要: 同震崩塌滑坡的解译及定位是震区灾后恢复工作中需要重点解决的问题,如何在灾害快速、自动解译的基础上,不断提高解译精度,是目前同震崩塌滑坡解译的研究热点之一,也是促使地质灾害早期识别向智能化、科学化发展的必要前提。文章在团队前期所提出的遥感影像局部阈值二值化方法的基础上,针对同震崩塌滑坡解译结果假阳率偏高的问题,分析了假阳性地物的光学和几何特点,提出了融合目标区域光学影像灰度特征、区域坡度信息、*NDVT*指数特征及解译地物主轴特征的同震崩塌滑坡多特征融合解译方法。为验证所提出模型的准确性,以2014年云南鲁甸地震龙头山镇为研究区,利用震后获取的高分一号(GF-1)卫星影像数据及数字高程模型对该同震崩塌滑坡进行了解译识别,结果表明,文中提出的方法准确解译出了同震崩塌滑坡区域,并有效去除了假阳性地物干扰,提高了解译精度。 关键词:遥感影像解译;同震崩塌滑坡;二值化分割;多特征策略;蒙特卡洛迭代 中图分类号: P642.21 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2022)06-0103-11

Interpretation method for regional co-seismic collapses based on multi-feature fusion of optical remote sensing

HAN Zheng^{1,2}, FANG Zhenxiong¹, FU Bangjie¹, WU Binhui¹, LI Yange^{1,3}, LI Changli¹, CHEN Guangqi⁴
(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China; 2. Key Laboratory of Hunan
Province for Structural Disaster Prevention and Mitigation of Rail Transit Engineering, Changsha, Hunan 410075, China;
3. Key Laboratory of Heavy-duty Railway Engineering Structure, Ministry of Education, Changsha, Hunan 410075, China;
4. Kyushu University School of Engineering, Fukuoka 819-0372, Japan)

Abstract: Interpretation of co-seismic collapse landslides is a key problem that needs to be solved in the post-disaster recovery work in earthquake areas. The issue regarding continuously improvement of interpretation accuracy for rapid and automatic interpretation of disasters is currently a hot topic, which is also a prerequisite to promote the development of early recognition of geological disasters towards intelligence and scientific. Based on the local threshold binarization method of remote sensing

收稿日期: 2021-11-03; 修订日期: 2022-01-28 投稿网址: https://www.zgdzzhyfzxb.com/

基金项目:国家重点研发计划专项(2018YFC1505401);国家自然科学基金面上项目(52078493);湖南省自然科学基金优秀青年项目 (2021JJ20057);湖南创新型省份建设专项经费资助项目(2020RC3002);长沙市科技计划项目(kq2106018)

第一作者:韩 征(1986-),男,福建永安人,博士,教授,博士生导师,主要从事地质灾害防治与数值模拟方面的研究工作。 E-mail: zheng_han@csu.edu.cn

通讯作者:李艳鹆(1984-),女,河南巩义人,博士,副教授,博士生导师,主要从事灾害风险评价与遥感解译方面的研究工作。 E-mail:liyange@csu.edu.cn

image proposed by the team in the early stage, this paper analyzes the optical and geometric characteristics of false positive features and proposes a fusion for the high false positive rate of the interpreted results of co-seismic mountain collapse. The multi-feature fusion interpretation method of the co-seismic mountain collapse with the gray feature of the optical image of the target area, the regional slope information, the *NDVI* feature and the interpretation of the main axis feature of the ground feature. In order to verify the accuracy of the proposed model, based on the 2014 Ludian earthquake in Yunnan, a case study was carried out in the Longtoushan town area. The Gaofen-1 (GF-1) satellite image data obtained after the earthquake and the digital elevation model were used for the earthquake in this area. The interpretation and recognition of the collapse of the cracked mountain shows that the method proposed in this paper accurately interprets the collapsed area of the cracked mountain body, effectively removes the false positive ground object interference, and improves the accuracy of interpretation. **Keywords**; remote sensing image interpretation; co-seismic collapse; binary segmentation; multi-feature strategy; Monte-

Carlo iteration

0 引言

我国是世界上受地震灾害影响最为严重的国家之一。尤其是青藏高原、四川盆地、云贵高原等第一、第 二级阶梯艰险山区, 地震不仅能够在震时造成严重的破 坏, 同时也引发大量的同震崩塌滑坡, 造成严重的破 坏^[1]。以 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸地区 6.5 级地震为 例, 同震崩塌滑坡灾害所造成的死亡和失踪人数约占总 人数的 30%^[2-4]。此外, 同震崩塌滑坡形成的堰塞坝和 松散堆积物也是导致溃坝洪水、次生泥石流等链生灾 害的主要诱因^[5-6], 使得主震后一段时间内地质灾害发 灾趋势显著增强。因此, 如何准确、快速地对同震崩塌 滑坡进行识别和定位是灾后恢复与建设所需优先解决 的问题之一。

在遥感技术广泛运用于地质灾害领域前,同震崩塌 滑坡的调查通常以人工踏勘为主。虽然识别结果详细 准确,但效率较低,且震后区域地形陡峭、人力难至、危 险性较高,因此覆盖面和适用性受限[7-8]。随着遥感技 术逐渐成熟,星载和机载的光学遥感影像等数据获取成 本显著降低,基于光学遥感影像提取区域内同震崩塌滑 坡、泥石流等灾点信息的技术已成为主要手段。例如, 汶川地震之后,遥感手段就广泛用于同震地质灾害的解 译中,为同震地质灾害的快速编目提供了有力支撑⁹⁹。 总体而言,现有的识别方法可以分为三类:(1)变化检测 方法。这种方法需要有同一位置的两期或多期遥感数 据,找出因同震崩塌滑坡引起的变化区域,数据源可以 是二维光学影像,也可以是三维地形数据[10-11]。变化 检测对新生崩塌体的应用效果较好,但是需要具有时间 序列的遥感数据,通常此类数据较难获取;(2)机器学习 方法。常用的有贝叶斯、逻辑回归、支持向量机和人工 神经网络等算法[12-13]。这类方法在数据准备部分需要 提取所使用数据的各类相关特征,然后使用各种分类器 进行同震崩塌滑坡识别,其自动化程度相较于前述方法 更高。但机器学习方法的特征选择和超参数调试工作 量较大;(3)特征阈值方法。这种方法多使用基于像素 的方法或基于对象的多尺度分割方法,对同震崩塌滑坡 区域的光谱、纹理、地貌或地形等特征进行统计,设置 一种或者多种阈值进行崩塌体识别^[14-16]。其判断精度 高,工作量相对较小,但是由于其判断标准为特定区域 特定特征的统计值,目前,无论是规范还是已有研究都 未形成统一标准。

目前基于光学遥感影像解译同震崩塌滑坡已逐 渐发展成为一种较为可行的解决方案。我们在前期研 究[17-19]中,针对传统二值化分割方法[20-21]在遥感影像 解译中所存在的受高灰度地物干扰等问题,提出了基于 蒙特卡洛迭代来对全色波段影像进行随机分块,并对局 部影像采用大津(Otsu)方法进行二值化分割,从而区分 震裂物源前景与其他地物背景。该方法能够克服目前 基于全局阈值二值化分割方法在区域影像光照不均、 山体阴影遮挡或复杂地物背景等因素对解译结果的干 扰。但是,该方法依然存在误报率(或假阳率)较高的问 题,即一些相似灰度的地物被误判为同震崩塌滑坡。我 们在研究[19]中发现,以2008年汶川地震北川地区的解 译结果为例,误判为同震崩塌滑坡的地物通常是一些裸 露的河漫滩、开垦的斜坡等与同震崩塌滑坡具有相似 的灰度特征的地物,尤其是在地形 DEM 模型分辨率较 低时,无法利用我们所提出的光学影像与地形坡度的融 合方法进行区分。因此,如何进一步降低解译结果中的 假阳性问题,从而提高同震崩塌滑坡解译精度是目前需 要研究与解决的关键问题。

围绕上述问题,本研究针对复杂艰险山区地质灾害 区域遥感影像特点和已有解译方法中产生的假阳性地 物几何特征进行了分析,进而提出了一种遥感影像多特 征策略融合的同震崩塌滑坡解译方法。该方法在我们 已提出的局部阈值二值化识别分析的方法基础^[18]上,进 一步引入归一化植被指数(*NDVI*)特征^[22-25]和主轴特 征^[26-27],通过融合地形坡度特征、主轴轴向特征、 *NDVI*特征,来排除灰度特性与同震崩塌滑坡相似的平 缓区域对解译结果的干扰、河岸边裸露的河漫滩等沿 水系流向的长条形地物的干扰以及植被区对识别结果 的干扰,从而实现高精度同震崩塌滑坡的检测解译识 别。最后,以 2014年云南鲁甸地震龙头山镇区域为研 究区,利用震后获取的高分一号(GF-1)卫星影像数据及 数字高程模型对该区域同震崩塌滑坡进行了解译识别, 从而验证本文所提出的方法的准确性和可行性。

1 方法与模型

本研究首先利用局部阈值二值化方法对影像同震 崩塌滑坡进行初步解译,再针对识别结果出现的假阳性 地物,通过坡度信息、主轴特征因子和 NDVI 指数进行 二次分析与判断。通过目标区域的坡度筛选,排除灰度 特性与同震崩塌滑坡相似的平缓区域对解译结果的干 扰;辅以目标区域的主轴分析,排除长条形地物对解译 结果的干扰;最后结合目标区域的 NDVI 指数特征,避 免将高植被覆盖区域误检为同震崩塌滑坡,进而提高同 震崩塌滑坡解译精度。方法具体操作流程见图 1。



图 1 方法流程示意图 Fig. 1 Schematic diagram of the proposed method

1.1 局部阈值二值化

同震崩塌滑坡识别的本质是对光学影像中潜在的 物源区域进行分割操作。针对同一幅影像上不同部 分具有不同灰度的现象,利用单一的全局阈值无法对 影像细节做出较好地分割。因此,本研究采用局部阈 值二值化方法对影像进行初步分割,来进行同震崩塌 滑坡识别。

局部阈值二值化方法首先利用蒙特卡洛迭代来对 影像进行随机分块,对分块后的局部影像采用经典大津 (Otsu)二值化方法来区分识别目标的前景与背景。根 据蒙特卡洛迭代结果的置信度来判断像元是否属于崩 塌体。基于全色影像与地形数据融合的崩塌体识别方 法具体操作思路如下:

(1)对H×W大小的影像进行蒙特卡洛随机分块, 共设置N步蒙特卡洛计算步,H和W分别指代影像随 机分块的高度和宽度。

(2)通过每次计算步获得的蒙特卡洛随机分块图像(大小为H×W)。

(3)对上述图像块进行经典大津(Otsu)二值化阈值 处理,获得每个像元在第k次蒙特卡洛计算步的二值化 分割结果f_k(x,y),其中k < N。

(4)对每次蒙特卡洛计算步获得的像元分割结果进 行二值化概率分布统计。

$$p(x,y) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} f_k(x,y)$$
(1)

(5)设置置信度*T_P*为概率阈值,大于*T_P*为前景目标, 小于*T_P*则为背景杂波。我们在研究^[18]中发现,当*T_P* = 0.80具有较好的效果,即假设 100 次蒙特卡洛迭代计算 中,某像元有 80 次以上被判识为目标前景,则该像元在 最终结果中被判为同震崩塌滑坡。

基于局部阈值二值化的全色影像同震崩塌滑坡识 别方法的具体思路如图 2 所示。

1.2 多特征策略融合

同震崩塌滑坡的影像灰度特征与裸露的土壤极为 相似,但裸露的土壤不一定是同震崩塌滑坡,如裸露 的河漫滩、开垦的斜坡地、泥土道路等地物。这些地物 很难有效地与同震崩塌滑坡进行区分,致使我们在研 究^[17]中提出的方法在同震崩塌滑坡解译结果上假阳率 偏高,导致检测的准确性受到影响。

为了排除这些误判为同震崩塌滑坡的假阳性地物 干扰,研究首先引入地形坡度策略对初步识别结果进行 筛选。但是,受数字高程模型 DEM 精度的限制,地形



图 2 全色影像局部阈值二值化初步检测流程图 Fig. 2 Flow chart of collapse identification for panchromatic image based on local threshold binarization

坡度策略虽然能够去除少部分地形的干扰,但在河漫 滩、坡脚等处仍然可能存在误判。因此,在地形坡度策 略的基础上,研究引入了主轴特征对识别方法加以补 充。最后,考虑到植被区对最终结果的影响,研究尝试 结合以下特征策略(地形坡度、主轴轴向、NDVI指数) 对初步的检测结果进行二次筛选,尝试进一步降低同震 崩塌滑坡识别假阳率。

1.2.1 地形坡度特征

地形坡度表征每个像元到与其相邻的像元方向上 的最大高程变化率。通常来说,坡度值越小,地势越平 坦;坡度值越大,地势越陡峭。考虑到同震崩塌滑坡的 发育特征,即通常发育在坡度较陡的山体,我们沿用已 有研究^[18]所建议的5°坡度作为阈值分界,对初步检测结 果进行过滤,去掉坡度较缓的区域。

1.2.2 主轴轴向特征

同震崩塌滑坡的滑移方向多为由高到低的滑流,因此,其主轴轴向应当具有明显的方向性。同震崩塌滑坡 受重力因素影响,其发生移动一般表现为从山坡到山谷 的运动,多为从上到下的直线式滑行,通常轴向特征表 现为近竖直向。沿山道路的主轴轴向则多以横向为主, 为此通过目标体的主轴轴向可以有效区分同震崩塌滑 坡与道路。此外,河岸边裸露的河漫滩的主轴方向也多 为横向。因此,可以根据地物的主轴轴向特征降低裸露泥土道路、河漫滩对同震崩塌滑坡检测识别检测的影响。

目标区域主轴轴向的计算过程如图 3 所示。



Fig. 3 Schematic diagram of calculating spindle characteristics

设影像中的目标区域为 *R*, 一共有 *N* 个像素, (*x*, *y*) 处的像素值为*f*(*x*, *y*)。则目标的质心定义为目标像素 坐标的均值(*x*, *y*):

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{(x,y)\in R} x f(x,y)$$
(2)

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{(x,y)\in R} yf(x,y) \tag{3}$$

则中心矩m_{i,j}定义为:

$$m_{i,j} = \sum_{(x,y)\in R} \sum_{(x-\bar{x})^{i}} (y-\bar{y})^{j} f(x,y)$$
(4)

其中,*i*为x轴方向的阶数,*j*为y轴方向的阶数。

目标的惯性矩定义为:

$$I(\theta) = \sum_{(x,y)\in R} \overline{AC}^2 f(x,y)$$

=
$$\sum_{(x,y)\in R} \sum_{(x,y)\in R} \left[(y-\bar{y})\cos\theta + (x-\bar{x})\sin\theta \right]^2 \cdot f(x,y) \quad (5)$$

其中,惯性主轴定义惯性矩 *I*(θ)为最小的方向,对 *I*(θ) 求导:

(8)

$$I'(\theta) = \sum_{(x,y)\in\mathbb{R}} \sum 2[(y-\bar{y})\cos\theta + (\bar{x}-x)\sin\theta] \cdot [-(y-\bar{y})\sin\theta + (\bar{x}-x)\cos\theta] \cdot f(x,y)$$

=
$$\sum_{(x,y)\in\mathbb{R}} \sum \{[(x-\bar{x})^2 - (y-\bar{y})^2]\sin 2\theta - 2(x-\bar{x})(y-\bar{y})\cos 2\theta\} \cdot f(x,y) = (m_{2,0} - m_{0,2})\sin 2\theta - 2m_{1,1}\cos 2\theta$$
(6)

 $\langle \theta | = 0 \overline{\eta}$ 得:

可以发现,式(2)—(7)有两个解

 $\theta_1 = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{2m_{1,1}}{m_{2,0} - m_{0,2}} \right]$

$$\arctan 2\theta = \frac{2m_{1,1}}{m_{2,0} - m_{0,2}} \tag{7}$$

(7)
$$\theta_2 = \frac{1}{2} \arctan\left[\frac{2m_{1,1}}{m_{2,0} - m_{0,2}}\right] + \frac{\pi}{2}$$
 (9) 为了区别最大值和最小值,求 *I*(θ)的二阶导数,得

 $I''(\theta) = [2(m_{2,0} - m_{0,2})\cos 2\theta + 4m_{1,1}\sin 2\theta] \cdot f(x,y) \quad (10)$

将 θ 和 θ 分别代入式(9)中进行计算,当 $I''(\theta)$ > 0时, θ,即为所求的惯性主轴方向,主轴轴向示意图如 图4所示。



图 4 主轴轴向特征示意图 Fig. 4 Schematic diagram of spindle axial characteristics

利用主轴特征对解译结果进行修正的步骤中,关键 在于如何得到主轴的位置以及确定主轴端点的坐标和 高程。文中方法具体如下:首先计算得到目标区域的主 轴轴向^[28-30],再对主轴进行遍历即可解算出主轴线与 图形的交点,此交点即为主轴的端点,进而获得主轴线 在图像中的坐标位置、求解出图形的长短主轴、对应图 形顶点以及轴向。再与高程数据图融合即可求得主轴 端点的坐标以及高程,计算得到目标高度差、纵横比、 方向走势等信息参数。通过规定目标区域长短轴比值 和高差比的阈值,对同震崩塌滑坡和长条形的地物进行 区分,从而解译出同震崩塌滑坡的位置,其中设定的阈 值针对不同研究区域应单独考虑确定阈值。

1.2.3 NDVI 指数特征

通常,当山体在地震作用下形成同震崩塌滑坡时, 由于山体瞬时发生整体失稳,导致失稳区域地表的植被 会被大面积破坏,使得植被覆盖度显著降低,与周边环 境形成明显差异。同震崩塌滑坡区域与周边环境在植 被稀疏覆盖度的显著差异,可以从一定程度上反映出同 震崩塌滑坡的分布情况^[31-32]。由于植被对近红外波段 具有较强的反射性,而在红光波段则具有较强的吸收 性,因此,可以利用该特性来区分植被区与非植被区。

目前,归一化植被指数 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)是衡量植被稀疏覆盖度常用的度量 方式,还可以反映出植物冠层的背景情况[33-35],如土壤 潮湿地面、雪、岩石等。其值表征可见光红光波段与近 红外波段的反射率差值与二者之和的比值:

$$NDVI = \frac{\rho_{\rm nir} - \rho_{\rm red}}{\rho_{\rm nir} + \rho_{\rm red}}$$
(11)

式中, ρ_{nr} 表示近红外波段反射率, ρ_{red} 表示红光波段反射 率。一般来说, NDVI 取值在-0.1~0.1 的区间内。

关于确定 NDVI 区分植被、土壤、岩石或雪的阈 值,目前通常根据经验确定,张华等^[36]为了反映 NDVI 的动态变化,按照等间距法,将 NDVI进行分级,分别 为: 植被覆盖低取值在 (0, 0.2]、中低 (0.2, 0.4]、中 (0.4, 0.6]、中高(0.6, 0.8]和高(0.8, 1]。统计表明,当 NDVI 处于 [-1,0) 一般指示地面覆盖类型为云、水、雪等,这 些地物通常对可见光表现出高反射;当 NDVI 接近 0 时 表示和两者几乎相等,指示没有植被覆盖,地表被裸露

(9)

的土壤或者岩石覆盖;当 NDVI 处于 (0,1] 通常指示该 地有植被,其植被覆盖度与该值呈现正相关^[37]。本研究 取 NDVI 数值在 [-0.1,0.1] 区间内的区域为同震崩塌滑 坡区域,从而降低植被覆盖高的区域被误检为同震崩塌 滑坡区域的可能性。

2 实例验证

2.1 研究区概况

以 2014 年 8 月云南鲁甸地震龙头山镇区域为研究 案例,文中开展同震崩塌滑坡的解译识别方法的验证。 该研究区位于云南省昭通市鲁甸县。该区域曾于北京 时间 2014 年 8 月 3 日 16 时 30 分发生了 6.5 级地震,震 源深度达 12 km^[38-39]。地震的震区属于高山峡谷地貌, 由于正处在雨季,地震引发了严重的滑坡、泥石流、滚 石以及堰塞湖等次生灾害,同震崩塌滑坡较为发育。

2.2 数据来源

区内地形环境复杂、地物类型多样、山体破坏显 著,存在着多处局部型同震崩塌滑坡物源。原始数据包 括:震后鲁甸地区高分一号卫星影像数据及鲁甸地区数 字高程模型(http://glovis.usgs.gov/),影像拍摄日期为2014 年 8 月 20 日,本研究使用的原始数据参数信息如表 1 所示。

原始数据	谱段范围/um	空间分辨率/m	
	0.45 - 0.90	2.00	
高分一号(GF-1) 卫星影像数据	0.45 0.50	2.00	
	0.45 ~ 0.52		
	0.52 ~ 0.59	8.00	
	0.63 ~ 0.69	0.00	
	$0.77 \sim 0.89$		
数字高程模型DEM	-	30.00	

表 1 原始数据参数信息表 Table 1 Information of the input data

2.3 解译结果分析

本研究以鲁甸地震为实验案例验证局部阈值二值 化结合特征策略的同震崩塌滑坡解译方法的可行性。 图 5 为鲁甸县龙头山镇区域地理位图。

首先,运用局部阈值二值化分割方法对该研究区域 全色影像进行 50次蒙特卡洛步计算,设定置信概率 *T_P* = 0.80,获得该研究区域的局部二值化分割结果图, 如图 6 所示。经过局部阈值二值化分割之后,高分一号 全色影像被分为前景和背景两部分。从分割结果来看, 前景中包含较多细小斑块,且存在大量的假阳性崩塌解 译结果,与实际情况不符。究其原因,可能是该研究区 的全色影像数据中地物整体偏暗,地物间色差并不明



图 5 鲁甸县龙头山镇影像(影像数据来源于高分一号卫星 2014 年 8 月 20 日影像数据)

Fig. 5 Image of Longtoushan Town, Ludian County (Image from GF-1 dataset, on August 20, 2014)

显,局部阈值二值化方法不能有效的区分出同震崩塌滑 坡目标与周围背景,导致检测结果中存在着大量的杂波 噪声。





因此,本研究在初步分割结果基础上引入多特征策略融合方法。首先结合研究区 DEM 数据引入区域坡度信息,获得融合坡度信息的改进二值化局部阈值分割的同震崩塌滑坡识别结果,如图 7 所示。

从图中可知,引入坡度信息之后,去除了少量地势 平坦区域的虚假杂波结果。通过对比分析,前景中仍然 包含有长条形地物和植被区导致的假阳性结果,整体识 2022 年



图 7 融合坡度信息的判定结果 Fig. 7 Judgment result of fusion slope information

别效果有待进一步提升。

以融合坡度信息的局部阈值二值化分割结果为基础,继续引入主轴轴向特征对同震崩塌滑坡进行识别筛选,获得结果如图 8 所示。从图中可看出,基于主轴轴向特征的同震崩塌滑坡识别方法进一步去除了细小斑点噪声,一定程度上抑制了长条形地物和细小斑点噪声对识别结果的影响。但本质上依然还存在高植被覆盖区域导致的误报率偏高问题。为了解决这个问题,本研究引入 NDVI 指数特征对上述结果进一步筛选。以[-0.1, 0.1]为 NDVI 指数阈值,对上述判定结果进行修正,获得融合 NDVI 指数特征的同震崩塌滑坡分割效果图,如图 9 所示。



0 50 100 m

图 8 融合主轴轴向特征的判定结果 Fig. 8 Judgment result of fusion spindle axial feature

观察以上的判定结果可得,局部阈值二值化的结果 经过融合地形坡度特征,主轴特征以及 NDVI 指数特征 判定后,图像的干扰噪声明显减少。其中融合坡度特 征,主要去除坡度低于 5% 的缓坡区域干扰;针对崩塌 体的主轴特征为纵向,而沿山道路、裸露河漫滩等干扰



50 100 m



地物主轴特征多为横向的特点,引入主轴特征,实现了 排除横向主轴地物干扰的目的;针对高植被覆盖地区 发生山体震裂崩塌概率相对较小的特点,引入 NDVI 指 数筛选,主要去除此类高植被覆盖区域对识别结果的 影响。

2.4 精度验证

为验证同震崩塌滑坡的识别结果,对光学遥感影像 进行了人工目视解译。同震崩塌滑坡在光学遥感影像 上具有与非灾害地形不同的影像特征,可以从三个方面 进行判断:颜色、色调特征,同震崩塌滑坡会破坏原始 地表覆盖,在遥感图像上表现为地表覆盖的颜色连续性 发生变化,对于新发生的崩塌山体,山体表面无植被覆盖 且物质构成疏松,地表反射率较强,在影像上的色调较 浅;图像纹理方面,纹理是图像上色调的变化频率,崩塌 体不同部位的形态、色调都有所差异,所以崩塌体在纹 理上呈现出无规则状态;形状特征,在遥感图像上,崩塌 体通常表现为双沟同源、圈椅、椭圆等特殊的平面形态。

基于以上特征,并结合地形的高程数据,我们对检测区域进行了人工目视解译,同时为保证目视解译结果的准确性,文中以研究区发生震裂崩塌灾害前的影像数据(图10)作为参照进行目视解译。共识别出该区域内16个同震崩塌滑坡,识别结果如图11中的红色区域所示。其中,标记为蓝色的3处道路沿线的小型岩土裸露区域由于其遥感影像特征与同震滑坡的特征相似,无法确定其是同震崩塌滑坡或是施工产生的挖方边坡,且由于时间较久无法现场核实和筛查。因此,为了更合理地说明文中提出方法的有效性,文中将这三处疑似区域作为假阳性地物进行考虑。

针对上节基于局部二值化结合多特征策略的同震 崩塌滑坡识别结果与目视解译结果进行统计量化对比

· 109 ·



图 10 研究区震前影像(影像数据来源于 WorldView-2 卫星 2011 年 12月6日影像数据)

100 m

Fig. 10 Pre-earthquake images in the study area (Image from WorldView-2 dataset, on December 6, 2011)



图 11 目视解译结果示意图(红色区域为同震崩塌滑坡,蓝色区域为挖 方边坡等疑似地物)

Fig. 11 Schematic diagram of visual interpretation results (pink polygons are the co-seismic collapses, red polygons are the suspected objects due to excavation)

分析,由对比结果可知,基于局部二值化结合多特征策 略(地形坡度特征、主轴轴向特征、NDVI 特征)的方法 准确的识别出了所有同震崩塌滑坡目标,去除了假阳性 地物的干扰,提高了检测准确性,有效地提高了同震崩 塌滑坡解译识别的精度。

由表2可知,基于全色影像局部阈值二值化和地形 坡度特征的同震崩塌滑坡识别真阳率已达100%,而假 阳率高达156.3%。主轴轴向特征的引入,进一步将同 震崩塌滑坡假阳率降低至112.5%,在地形坡度特征基 础上对同震崩塌滑坡误检数量进行了有效控制。NDVI 指数特征的引入将同震崩塌滑坡假阳率从112.5%降低 至 23.1%。可以看出本方法最终的解译结果,无法识别 出同期影像中存在的道路挖方边坡等疑似区域,有必要 通过现场勘察进行进一步筛查。

	表 2 参	佥测解译效果统计
Table 2	Detection a	nd interpretation effect statistics

识别 阶段	方法	崩塌 数量	真阳率 /%	假阳数	假阳率 /%
1	局部阈值二值化、 地形坡度特征(图7)	41	100	25	156.3
2	局部阈值二值化、地形坡度特征、 主轴轴向特征(图8)	34	100	18	112.5
3	局部阈值二值化、地形坡度特征、 主轴轴向特征、NDVI指数特征(图9)	16	100	3	23.1
4	目视解译(图11)	16	-	_	-

可以发现,从所去除假阳性结果的数量上看,利用 NDVI 指数是更为有效的手段,表明相比地形坡度特征 以及解译目标几何形态的主轴特征,本案例中同震崩塌 滑坡在植被稀疏覆盖度上的差异更为显著,植被区对同 震崩塌滑坡识别的影响较大。但对于其他区域而言,通 过 NDVI 指数特征去除假阳性结果是否最为有效仍有 待进一步研究。因此,在实际工作中,应该将地形坡度 特征、主轴特征、NDVI 特征进行综合考虑,从而尽可能 地去除解译结果中假阳性地物干扰,对结果进行修正, 提高同震崩塌滑坡的识别精度。

3 讨论

(1)文中运用多特征融合策略来对同震崩塌滑坡识 别结果开展进一步的判定分析,特征策略的获取精度可 能对识别结果精度产生一定影响,主要表现为识别结果 与真实同震崩塌滑坡边界不统一。因数据资源有限,本 文采用的 DEM 数据分辨率为 30 m,其分辨率相对于影 像数据(分辨率2m)较低且不匹配,故在系统计算主轴 端点高程时,无法实现1m级别的高程计算。采用更高 精度 DEM 数据能够较为准确的描述特征位置的高程 信息,或许能够进一步提高同震崩塌滑坡解译的精度。 因此,在后续的工作研究中将开展尝试运用高精度的 DEM 数据来参与同震崩塌滑坡识别工作,进一步验证 DEM 精度对识别效果的影响。

(2)文中选取 NDVI 的阈值为 [-0.1, 0.1], 此阈值是 针对鲁甸山体震裂崩塌地区,经过实验比选以及参考相 关文献最终确定,对于其他山体震裂崩塌区域并不具有 准确适用性,但仍可作为参考,在此阈值基础上加以调 整,确定不同区域的 NDVI 划分阈值。由于时间和资源 的限制,本研究并未能够针对不同研究区域进行 NDVI 特征分析,后续可开展不同研究区域 NDVI 特征的对比 分析。

(3)文中案例研究所采用的云南鲁甸县龙头山镇的 同震崩塌滑坡影像,研究区实际覆盖区域面积10.5 km², 大型同震崩塌滑坡共16处。利用文中提出的光学遥感 影像多特征融合解译方法能够有效识别该区域内的同 震崩塌滑坡。而对于更广区域的遥感影像,考虑到其背 景更为复杂,所包含的崩塌滑坡也不仅限于同震所产生 的,因此本方法是否有效仍有待进一步验证。一种可行 思路是将整幅高分一号影像分割为若干幅10 km²的子 图像,并分别对每个子图像利用本文所述方法进行同震 崩塌滑坡解译,但文中建议的*NDVI*指数阈值[-0.1,0.1] 是否适合各子图像,还需要进行研究和论证,这也是下 一步研究中所需要重点解决的问题。

(4)研究主要从同震崩塌滑坡的发育地形、几何形态以及植被分布差异三个考量出发,选择地形坡度特征、主轴特征、NDVI指数特征来进行同震崩塌滑坡的 遥感影像解译。除此之外,高山峡谷地区地震诱发崩塌 滑坡的一些典型规律理论上也可以作为附加特征进行 融合解译。例如,许强等^[40-41]指出汶川地震诱发滑坡 具有"背坡面效应",即在与发震断裂带近于垂直的沟 谷斜坡中,在地震波传播的背坡面一侧的滑坡发育密度 明显大于迎坡面一侧。这些前期研究所得到的同震崩 塌滑坡分布的规律,也可为遥感影像解译结果的进一步 修正提供支撑。

4 结论

文中针对目前同震崩塌滑坡的光学遥感影像识别 方法中存在假阳率偏高的问题,开展了基于多源遥感 数据融合的同震崩塌滑坡识别方法研究,相比于传统同 震崩塌滑坡识别方法,有效提升了识别精度。具体结论 如下:

(1)针对传统的全局阈值二值化导致的识别精度 低、前景和背景区分不明显等问题,本研究介绍了基于 全色影像局部阈值二值化的同震崩塌滑坡识别方法,利 用了该方法对大尺度影像进行分割操作,避免了利用单 一的全局阈值无法对影像细节做出较好的分割的问题。

(2)针对局部阈值二值化方法识别假阳率仍然较高 等问题,本研究引入了多特征策略组(地形坡度特征、 主轴轴向特征、NDVI指数特征)来进行同震崩塌滑坡 的识别。通过多特征策略,有效地排除了灰度特性与同 震崩塌滑坡相似的平缓区域、长条形地物以及植被覆 盖区对识别结果的影响,进一步降低假阳率,提高识别 准确性。

(3) 文中研究依托 2014 年云南鲁甸地震龙头山镇

区域,对同震崩塌滑坡识别方法进行实例例证。结果表明,基于蒙特卡洛迭代计算的局部阈值二值化结合多特征策略方法,能够有效避免传统二值化方法识别精度低、无法区分同震崩塌滑坡区与非同震崩塌滑坡区的问题,可以有效提升同震崩塌滑坡的识别精度。

参考文献(References):

- [1] 范一大,吴玮,王薇,等.中国灾害遥感研究进展[J]. 遥感学报,2016,20(5):1170-1184. [FAN Yida, WU Wei, WANG Wei, et al. Research progress of disaster remote sensing in China [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5):1170-1184. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 常昊,张吕.云南鲁甸Ms6.5级地震震区滑坡易发性分析
 [J].中国地质灾害与防治学报,2017,28(2):38-48.
 [CHANG Hao, ZHANG Lyu. Analysis of Susceptibility causes of landslides triggered by earthquake in Ludian Ms6.5 earthquake region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(2):38-48. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 曹颖,黄江培,钱佳威,等.利用时移层析成像方法揭示与2014年云南鲁甸M_s6.5地震有关的P波速度变化[J].地球物理学报,2021,64(5):1569-1584. [CAO Ying, HUANG Jiangpei, QIAN Jiawei, et al. Application of time-lapse seismic tomography based on double-difference tomography to reveal P wave velocity changes related to the 2014 Ludian M_s6.5 earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics,2021, 64(5):1569-1584. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 韩继冲,张朝,曹娟.基于逻辑回归的地震滑坡易发性 评价——以汶川地震、鲁甸地震为例[J].灾害学,2021, 36(2):193-199. [HAN Jichong, ZHANG Zhao, CAO Juan. Assessing earthquake-induced landslide susceptibility based on logistic regression in 2008 Wenchuan earthquake and 2014 Ludian earthquake [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(2):193-199. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 胡华,吴轩,张越.基于模拟试验的强降雨条件下花岗 岩残积土斜坡滑塌破坏机理分析[J].中国地质灾害 与防治学报,2021,32(5):92-97.[HU Hua,WU Xuan, ZHANG Yue. Experimental study on slope collapse characteristics of granite residual soil slope under heavy rainfall[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2021,32(5):92-97. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 魏正发,张俊才,曹小岩,等.青海西宁南北山滑坡、崩 塌成因及影响分析[J].中国地质灾害与防治学报,2021, 32(4):47-55. [WEI Zhengfa, ZHANG Juncai, CAO Xiaoyan, et al. Causes and influential factor analysis of landslides and rockfalls in north & south mountain areas of Xining City,

Qinghai Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(4): 47 – 55. (in Chinese with English abstract)]

- [7] 龙玉洁,李为乐,黄润秋,等.汶川地震震后10 a绵远河流域滑坡遥感自动提取与演化趋势分析[J].武汉大学学报·信息科学版,2020,45(11):1792-1800.[LONG Yujie, LI Weile, HUANG Runqiu, et al. Automatic extraction and evolution trend analysis of landslides in Mianyuan River basin in the 10 years after Wenchuan earthquake [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(11):1792-1800. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 孙国庆,陈方,于博,等. 2001—2017年尼泊尔中部地区滑坡变化及其影响因素[J].中国科学院大学学报,2020,37(3):308-316. [SUN Guoqing, CHEN Fang, YU Bo, et al. Landslide change and its influence factors in central Nepal from 2001 to 2017 [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(3):308-316. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 许冲,戴福初,陈剑,等.汶川Ms8.0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):754-762. [XU Chong, DAI Fuchu, CHEN Jian, et al. Remote sensing fine interpretation of secondary geological disasters in the hardest hit areas of Wenchuan Ms8.0 earthquake [J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(4):754-762. (in Chinese)]
- [10] LU P, QIN Y Y, LI Z B, et al. Landslide mapping from multisensor data through improved change detection-based Markov random field [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 231: 111235.
- [11] LI Z B, SHI W Z, LU P, et al. Landslide mapping from aerial photographs using change detection-based Markov random field [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 187: 76 – 90.
- [12] STUMPF A, KERLE N. Object-oriented mapping of landslides using Random Forests [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(10): 2564 - 2577.
- [13] VAN DEN EECKHAUT M, KERLE N, POESEN J, et al. Object-oriented identification of forested landslides with derivatives of single pulse LiDAR data [J]. Geomorphology, 2012, 173/174: 30 – 42.
- [14] MARTHA T R, KERLE N, JETTEN V, et al. Characterising spectral, spatial and morphometric properties of landslides for semi-automatic detection using object-oriented methods [J]. Geomorphology, 2010, 116(1/2): 24 - 36.
- [15] SUN W Y, TIAN Y S, MU X M, et al. Loess landslide inventory map based on GF-1 satellite imagery [J]. Remote Sensing, 2017, 9(4): 314.
- [16] LESHCHINSKY B A, OLSEN M J, TANYU B F. Contour Connection Method for automated identification and classification of landslide deposits [J]. Computers &

Geosciences, 2015, 74: 27 - 38.

- [17] LI Y G, CHEN G Q, HAN Z, et al. A hybrid automatic thresholding approach using panchromatic imagery for rapid mapping of landslides [J]. GIScience & Remote Sensing, 2014, 51(6): 710 - 730.
- [18] HAN Z, SU B, LI Y G, et al. An enhanced image binarization method incorporating with Monte-Carlo simulation [J]. Journal of Central South University, 2019, 26(6): 1661 – 1671.
- [19] HAN Z, LI Y G, DU Y F, et al. Noncontact detection of earthquake-induced landslides by an enhanced image binarization method incorporating with Monte-Carlo simulation [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 219 – 241.
- [20] CASTELLANOS F J, GALLEGO A J, CALVO-ZARAGOZA J. Unsupervised neural domain adaptation for document image binarization [J]. Pattern Recognition, 2021, 119: 108099.
- [21] XIONG W, ZHOU L, YUE L, et al. An enhanced binarization framework for degraded historical document images [J].
 EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2021, 2021(1): 13.
- [22] 皮新宇,曾永年,贺城墙.融合多源遥感数据的高分辨率城市植被覆盖度估算[J].遥感学报,2021,25(6): 1216-1226. [PI Xinyu, ZENG Yongnian, HE Chengqiang. High-resolution urban vegetation coverage estimation based on multi-source remote sensing data fusion [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(6): 1216-1226. (in Chinese with English abstract)]
- [23] ASHOK A, RANI H P, JAYAKUMAR K V. Monitoring of dynamic wetland changes using NDVI and NDWI based landsat imagery [J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2021, 23: 100547.
- [24] 陈安,李景吉,黎文婷,等. 2001—2018年雅砻江流域 植被NDVI时空动态及其对气候变化的响应[J].水土 保持研究, 2022, 29(1): 169-175. [CHEN An, LI Jingji, LI Wenting, et al. Spatiotemporal of NDVI in the Yalong River basin from 2001 to 2018 and its response to climate change [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 169-175. (in Chinese with English abstract)]
- [25] SHEN J X, EVANS F. The potential of landsat NDVI sequences to explain wheat yield variation in fields in western Australia [J]. Remote Sensing, 2021, 13(11): 2202.
- [26] 岳思聪,赵荣椿,王庆.基于象素主轴方向灰度变化特征的特征点检测算法[J].西北工业大学学报,2008,26(2):162-167.[YUE Sicong, ZHAO Rongchun, WANG Qing. Feature point detection using intensity variations along pixel principal orientation axes [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2008, 26(2):162-167. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 杨雨奇,高晓光,冯晓毅,等.基于主轴分析和团块特征

提取的ISAR目标检测方法 [J].西北工业大学学报, 2010, 28(5): 689-694. [YANG Yuqi, GAO Xiaoguang, FENG Xiaoyi, et al. A new method for ISAR target detection based on chief axis analysis and block feature extraction [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2010, 28(5): 689-694. (in Chinese with English abstract)]

- [28] 郝军保,邵磊.惯性主轴方向的最佳判别[J].连云港职业大学学报,1993,6(1):92-95.[HAO Junbao,SHAO Lei. The best discrimination of the direction of inertia spindle [J]. Journal of Lianyungang Technical College, 1993, 6(1):92-95.(in Chinese)]
- [29] 蔡建乐.用特征矩阵的伴随矩阵求解惯量主轴方向[J]. 大学物理, 1995, 14(9): 21-22. [CAI Jianle. A calculation for the principal axes of inertia by adjoint matrix of eigen matrix [J]. College Physics, 1995, 14(9): 21-22. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 罗斌. 灰度图象的惯性主轴方向特征[J]. 安徽大学学 报(自然科学版), 1998, 22(4): 40-42. [LUO Bin. Least inertia moment axis of grey scale image [J]. Journal of Anhui University (Natural Sciences), 1998, 22(4): 40-42. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 周智勇.基于Landsat遥感影像的围场县植被覆盖时空格局变化[J].水文地质工程地质,2020,47(6):81-90.
 [ZHOU Zhiyong. Change in temporal-spatial pattern of vegetation coverage in Weichang County based on Landsat remote sensing image[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(6):81-90. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 贺军亮,韦锐,李丽,等.基于时间序列植被指数资料的承德市植被覆盖时空演变分析[J].水文地质工程地质,2020,47(6):91-98. [HE Junliang, WEI Rui, LI Li, et al. Temporal and spatial evolution of vegetation cover in Chengde based ontime series NDVI data [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(6):91-98. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 杜春雨,范文义.叶面积指数与植被指数关系研究
 [J].林业勘查设计,2013(2):77-80. [DU Chunyu, FAN Wenyi. Research and analysis of the correlation between leaf area index and vegetation index [J]. Forest Investigation Design, 2013(2):77-80. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 潘霞,高永,汪季,等.植被指数遥感演化研究进展[J]. 北方园艺,2018(20):162-169. [PAN Xia, GAO Yong, WANG Ji, et al. Review on vegetation index using remote sensing evolution [J]. Northern Horticulture, 2018(20):162-

169. (in Chinese with English abstract)]

- [35] 张慧,李平衡,周国模,等.植被指数的地形效应研究进展[J].应用生态学报,2018,29(2):669-677.[ZHANG Hui,LI Pingheng, ZHOU Guomo, et al. Advances in the studies on topographic effects of vegetation indices [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(2):669-677. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 张华,李明,宋金岳,等.基于地理探测器的祁连山国家公园植被NDVI变化驱动因素分析[J].生态学杂志,2021,40(8):2530-2540.[ZHANG Hua, LI Ming, SONG Jinyue, et al. Analysis of driving factors of vegetation NDVI change in Qilian Mountain National Park based on geographic detector [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(8): 2530-2540. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 武正丽. 2000~2012年祁连山植被覆盖变化及其对气候 的响应研究[D].兰州:西北师范大学, 2014. [WU Zhengli. The research of the vegetation change and the sensitivity between NDVI and climatic factors in Qilian Mountains from2000to2012 [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 周庆, 吴果. 鲁甸6.5级地震崩滑地质灾害分布与成因探讨[J]. 地震地质, 2015, 37(1): 269-278. [ZHOU Qing, WU Guo. Seismic landslides and seismogenic structure of the 2014 Ludian m_s6.5 earthquake [J]. Seismology and Geology, 2015, 37(1): 269-278. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 田颖颖,许冲,徐锡伟,等.2014年鲁甸M_s6.5地震震前与同震滑坡空间分布规律对比分析[J].地震地质,2015, 37(1):291-306.[TIAN Yingying, XU Chong, XU Xiwei, et al. Spatial distribution analysis of coseismic and pre-earthquake landslides triggered by the 2014 Ludian m_s6.5 earthquake [J]. Seismology and Geology, 2015, 37(1):291-306. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 许强,李为乐.汶川地震诱发滑坡方向效应研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(增刊1): 7-14.
 [XU Qiang, LI Weile. Study on the direction effects of landslides triggered by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(Sup 1): 7-14. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 许强,李为乐.汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究
 [J].工程地质学报,2010,18(6):818-826. [XU Qiang, LI Weile. Distribution of large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2010,18(6):818-826. (in Chinese with English abstract)]