

文章编号: 1008 - 2786 - (2017) 1 - 32 - 07

DOI: 10. 16089 /j. cnki. 1008 - 2786. 000193

基于扇形地形态特征的泥石流危险评估

李彦稷^{1 2 3}, 胡凯衡^{1 2*}

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室 四川 成都 610041;

2. 中国科学院水利部 成都山地灾害与环境研究所 四川 成都 610041; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 泥石流扇形地是山地居民生产生活的重要场所,也是泥石流泛滥危害的场地。科学评估泥石流扇形地的危险性,对扇形地开发具有重要意义。本文以对小江流域大白泥沟为研究对象,通过野外实地调查与成灾分析,结合泥石流扇形地形态特征和泥石流危害频率两个要素,建立了以距扇顶距离、与扇主轴夹角和危害频率为变量的定量扇形地危险性分布模型。结果表明:(1) 泥石流扇形地上距离泥石流出山口越远,与主流线夹角越大的位置,受泥石流危害越小。(2) 本模型在大白泥沟应用的计算结果与现场勘察验证结论相吻合,表明评估模型比较合理。(3) 该模型所涉及的参数——距扇顶的长度、与扇主轴的夹角、危害频率,均可通过 GIS 和遥感分析得到,简单实用,为泥石流扇形地危险性评估工作提供了一种原理简单、计算方便的新方法。

关键词: 泥石流; 扇形地; 危险性评估; 遥感

中图分类号: P642. 23

文献标志码: A

泥石流扇形地危险性评估经历了从定性研究到定量研究的过程。早期的危险性评估方法是先建立扇形地的几何特征(如最大长度和最大宽度等)与整个流域的形态特征(如流域面积、主沟长度、完整性系数等)之间的经验统计关系,再评价泥石流的危险性^[1-3]。此外,有学者采用专家打分或统计学的方法,通过分析泥石流扇形地危险度的主导因子(如泥石流堆积厚度、最大石块粒径、扇面纵比降、扇面沟道位置和扇面糙度等)与危险性的关系,得到泥石流扇形地危险度评价模型^[4]。随着 GIS 技术和泥石流数值模拟方法的发展,许多学者提出了基于泥石流物理量的危险性分析方法。例如,唐川^[5-6]等提出的用泥石流流深和速度等物理量对泥石流危险范围进行分区。韦方强^[7]等用数值模拟

方法获得泥石流在扇形地运动过程中的动量分布,提出了泥石流危险性动量分区模型。胡凯衡^[8-9]等提出基于动能的危险性分区方法,并分析了不同物理指标对泥石流危险性分区的影响。

泥石流危险性的定性评价取决于影响因子和权重的确定,往往依赖专家经验,大多只能给出定性评估,实际应用价值不大。基于数值模拟的泥石流危险性评估方法,虽然可以给出定量的和相对准确的计算结果,却需要提前掌握准确的泥石流动力学参数。这些参数在许多无观测数据的区域往往难以获取。为此,本文在前人工作的基础上,通过遥感和 GIS 空间分析相结合方法,提出了一种基于泥石流扇形地形态特征的危险性评估数学模型,并用于评估小江流域高频泥石流沟——大白泥沟扇形地的危

收稿日期(Received): 2016 - 01 - 15; 改回日期(Accepted): 2016 - 03 - 23。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金面上项目(41371039); 国家重点基础研究发展计划(2015CB452704); 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金 [National Natural Science Foundation of China (41371039); National Program on Key Basic Research Project (2015CB452704); Open Foundation of Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences]

作者简介(Biography): 李彦稷(1991 -), 女, 汉族, 云南昆明人, 硕士研究生。主要研究方向: 山地灾害防治工程 [Li Yanji (1991 -), female, born in Kunming, Yunnan Province, M. Sc. candidate, research on debris flows] E - mail: 501830073@qq. com

* 通信作者(Corresponding author): 胡凯衡(1975 -), 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 泥石流减灾理论与技术、泥石流动力学过程和数值模拟研究 [Hu Kaiheng (1975 -), male, Ph. D., professor, born in Ruijin, Jiangxi Province, specialized in debris flow mechanism and mitigation] E - mail: khhu@imde. ac. cn

险性。

1 基本模型

1.1 理想扇形地危险性的分布

泥石流在窄深式峡谷的运动是一种两侧受限的流动。当泥石流进入堆积区, 两侧开阔边界对运动不再限制, 泥石流就像一种二维平面射流, 在沿原有方向继续向下游运动的同时, 不断向两侧漫流。这时, 坡度逐渐变缓, 流深变小, 泥石流流速逐渐减小, 最后在主流线两侧发生淤积。假设泥石流是一种均匀的流体, 堆积区也是两侧对称的平地, 堆积过程没有障碍物或河水等的干扰。那么, 泥石流扇形地将是一个理想的扇形(图1)。这样一个理想的扇形可以用扇顶的位置、扇主轴(主流线)、扇的张角、扇两翼的长度等几何参数来描述。

假定泥石流主流线为堆积扇中轴线, 泥石流主流线方向为纵坐标轴, 垂直于堆积扇中轴线为横坐标轴, 建立坐标系(如图1)。从泥石流运动过程直观分析, 距离扇顶越近的地方, 泥石流的流速和流深越大, 泥石流到达的机会越大。而越到扇缘, 泥石流到达的机会越小, 流速和流深也小。而在与扇顶距离相等的地方, 离中轴线越远(即与主轴线的夹角越大), 泥石流的侧向漫流速度和流深也越小。因而, 泥石流在扇形地上的危险性分布可以用极坐标的形式, 定义为极径长 l 和极角 θ 的函数:

$$H(x_i, y_i) = f(l, \theta) \quad (1)$$

其中 (x_i, y_i) 为堆积扇上任意一点的坐标, l 为堆积扇上任意一点到扇顶的极径长, θ 为该点与扇顶连

线与扇主轴的夹角, 即极角。这里, $\theta \in (-90^\circ, 90^\circ)$ 。

根据上面对泥石流堆积运动过程的分析, 可以得到危险性函数 H 随着极径长和极角的增大而减少, 且是极角的对称函数。一个非常自然的假设是认为危险性与极径长成反比。另一方面, 因为泥石流向两侧漫流的速度分量远小于沿主流方向的分量。所以, 泥石流危险性沿两侧的衰减的速度要大于沿主流方向的速度。为了反映危险性与极角对称和快速衰减的性质, 可以用极角余弦的幂函数形式来表示危险性随极角的衰减特征。综合以上分析, 将理想状态下泥石流扇形地的危险性分布表示为:

$$H(x_i, y_i) = \frac{k}{l e^{-\cos\theta}} \quad (2)$$

其中 k 为比例系数, 通过(3)式计算得到:

$$l = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (3)$$

其中 (x_0, y_0) 是扇顶(泥石流出山口)的坐标, 一般设该点为坐标原点 $(0, 0)$ 。

1.2 实际扇形地危险性分布的修正

自然界中泥石流的运动堆积和扇形地的形态很难实现理想状态。泥石流出山后, 由于堆积区地形、障碍物、植被、土地利用, 以及主河冲刷等影响, 堆积扇发育并不是按规则扇形分布。而且, 在主河的影响下, 泥石流会偏向主河下游方向运动, 堆积扇多沿主河向下游延展。因此, 通过式(1)计算实际泥石流扇形地上任意一点的危险性并不准确。为了准确计算实际泥石流扇形地的危险性分布, 需要知道扇形地上大石块的分布、扇面微地形变化、扇面的颗粒级配、植被发育程度、扇与主河关系等详细的数据。而这些因素非常多, 随机性很大。有些因素难以量化。所以, 建立一个确定性的函数来反映这些因素对危险性的影响非常困难, 可操作也不太强。为此考虑随机性的概念, 引入受灾概率变量, 将式(1)变为

$$H(x_i, y_i) = f(l, \theta, p_i) \quad (4)$$

其中 p_i 为堆积扇上任意一点 (x_i, y_i) 受到泥石流危害的概率。假设 H 与 p_i 成正比, 则(2)式变为:

$$H(x_i, y_i) = \frac{k p_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2} e^{-\cos\theta}} \quad (5)$$

确定 p_i 的值需要泥石流历史灾害事件的数据。这里可采用遥感影像解译的方法来得到 p_i 的估计值。具体的方法是: 选择连续 n ($n \geq 1$) 景某泥石流沟的遥感影像, 通过解译得到不同时相泥石流灾害事件的堆积范围。对于泥石流堆积扇上任意一点,

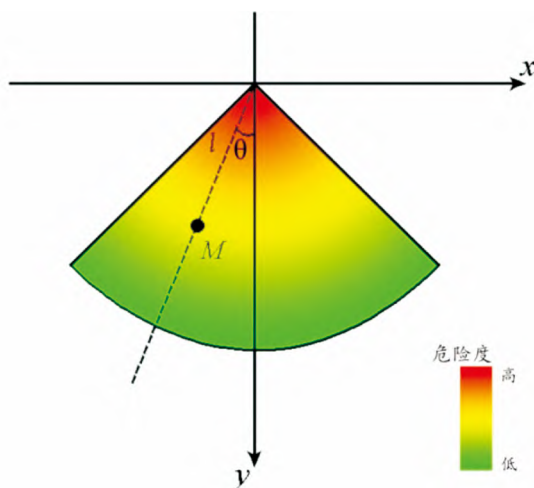


图1 理想泥石流扇形地危险性分布

Fig.1 Hazard distribution of debris flow on an ideal alluvial fan

在一期遥感影像上被解译出,计其出现次数为1,反之,则记为0,将解译结果进行累加,记为 a ,则该点受泥石流危害的频率为:

$$p_i = \frac{a}{n} \quad (6)$$

而将 p_i 作为一种估计,那么(6)式带入(5)式,得泥石流堆积扇危险性计算公式:

$$H(x_i, y_i) = \frac{ak}{n\sqrt{x_i^2 + y_i^2}e^{-\cos\theta}} \quad (7)$$

2 应用实例

2.1 研究区概况

本次研究选取小江流域著名的泥石流沟——大白泥沟为研究对象(图2)。大白泥沟位于云南省昆明市东川区,金沙江一级支流小江中游。北纬 $26^{\circ}02'$,东经 $103^{\circ}05'$,流域面积 18.05 km^2 ,主沟长 11.8 km 。大白泥沟处于小江断裂带东、西支断裂之间,发育北东向转南北向的断层,控制了流域形成态和不良地质现象的分布。泥石流的物源主要来自崩塌滑坡体。该流域滑坡体岩性主要为板岩、千枚岩,物质成分主要为高岭石、多水高岭石、水云母、蒙脱

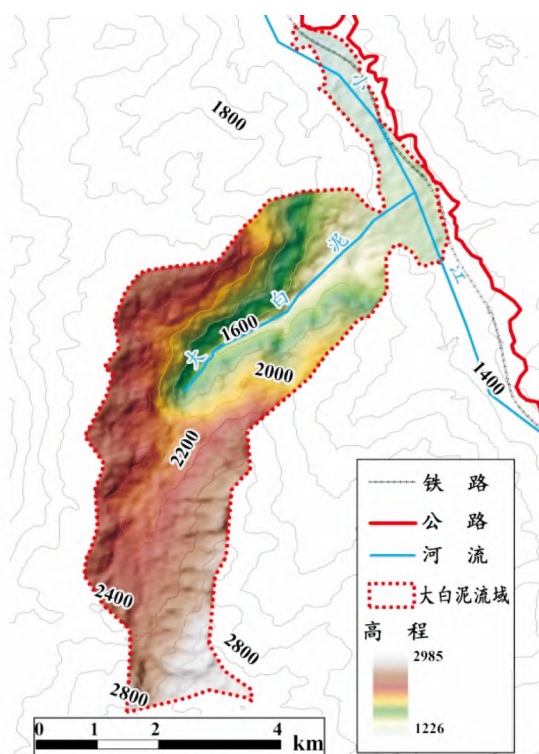


图2 研究区示意图

Fig. 3 Schematic map of study area

石以及拜来石等粘土矿物,崩解性强烈。两岸滑坡后壁数百米内,有大量平行于滑动面的地裂,最深的可达数米以上,活动非常强烈。因此,该流域泥石流活动频繁,历史上记载泥石流非常活跃的有1828年、1917年、1951年、1946年和1957年。1957年7月3日实测流量为 $415 \text{ m}^3/\text{s}$ 。泥石流最大流量可达 $1500 \sim 2000 \text{ m}^3/\text{s}$,最大淤积厚度可达 6 m ,最大局部冲刷深度约 5 m ,下段沟床纵坡多年来变化不大,大冲大淤规律明显。大白泥泥石流扇形地发育迅速,近20年来,堆积面积增大 0.52 km^2 ,淤高 13.8 m ,增加淤积方量 1570 万 m^3 ,小江河床大白泥沟段上涨 8 m 。由于小江彼岸顶托,整个堆积扇向小江下游延伸约 3 km 。从大白泥沟目前资料分析,泥石流仍处于活跃期^[10]。

2.2 大白泥扇形地危险性评估

根据上述建议的泥石流扇形地危险性评估模型,对大白泥沟泥石流堆积扇进行危险性评估。为了便于运算,所有评估参数均统一到同一坐标系下,且所有要素均采用统一的数据结构、统一格网,使其空间综合转化为可用于计算的多维矩阵。具体过程如下:

(1) 理想状态下扇形地危险性分布:以ArcGIS为平台,选取泥石流出口山口两山山脚连线与其垂直平分线的交点位置作为扇顶,利用栅格计算器计算扇形地极径长和极角,建立理想状态下大白泥沟扇形地危险性分布,然后利用resample工具将计算结果重采样为像元大小 $30 \times 30 \text{ m}$ 的栅格数据,利用颜色变化表示理想状态下大白泥扇形地危险性关系(如图3),距离扇顶越近,危险性越大;反之,危险性越小。

(2) 扇形地泥石流危害频率计算:获取大白泥地区1988年~2015年间的遥感影像,剔除不可用数据,较均匀选取14期可利用TM遥感影像,对影像进行大气校正、几何校正和配准,将其统一到同一坐标系下,以ENVI遥感处理软件为平台,利用面向对象图像分类技术,通过定义扇形地特征,将遥感影像进行图像分割和分块合并,分别从14期影像上提取大白泥扇形地泥石流危害区域(图4)。结果发现,1988年~2015年间,大白泥沟泥石流扇形地发生了动态变化。将提取的泥石流扇形地动态变化结果进行叠加,根据公式(6)计算扇形地每个位置受泥石流危害的频率,最后将计算结果在ArcGIS中重采样为像元大小 $30 \times 30 \text{ m}$ 的栅格数据(图5)。

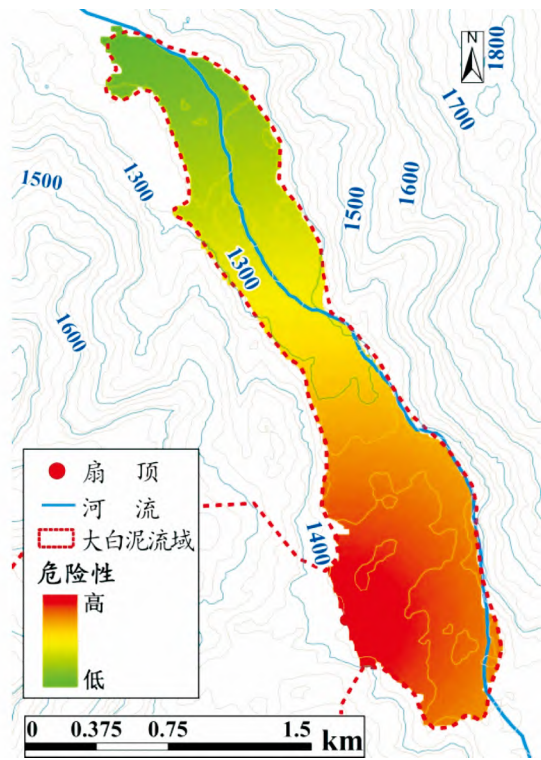


图 3 理想大白泥扇形地危险性分布

Fig.3 Ideal hazard distribution of debris flow on the Dabaini's alluvial fan

(3) 扇形地泥石流危险性修正: 将上述理想状态下泥石流扇形地危险性分布计算结果与扇形地泥石流受灾概率计算结果利用 ArcGIS 栅格计算器进行代数乘积运算,修正泥石流扇形地危险性计算公式,所得结果利用 resample 工具重采样为像元大小 $30 \times 30\text{ m}$ 的栅格数据(图 6)。

从图 6 可以看出,大白泥扇形地泥石流高危险性区域集中在泥石流出山口附近,左岸危险性大于右岸,下游区域危险性高于上游。受小江主河的影响,泥石流物质出山后偏向下游运动,使得下游冲淤明显,危险性较高。随着远离泥石流出口位置,泥石流危险性逐渐减小,泥石流物质逐渐堆积形成台地,可用于农业生产。另外,近年来由于西南地区干旱少雨,大白泥泥石流爆发频率降低,大白泥扇形地人类活动加剧,在泥石流出山后右岸,周围村民种植了大量庄稼和树木,合理利用了泥石流扇形地土地资源。

2.3 结果验证

扇形地上植被生长情况能反映该泥石流沟泥石流暴发频率,可间接反映扇形地受泥石流危害的大小。植被生长越茂盛区域,说明受到泥石流影响相对较小。反之,对于基本没有植被覆盖区域,说明受

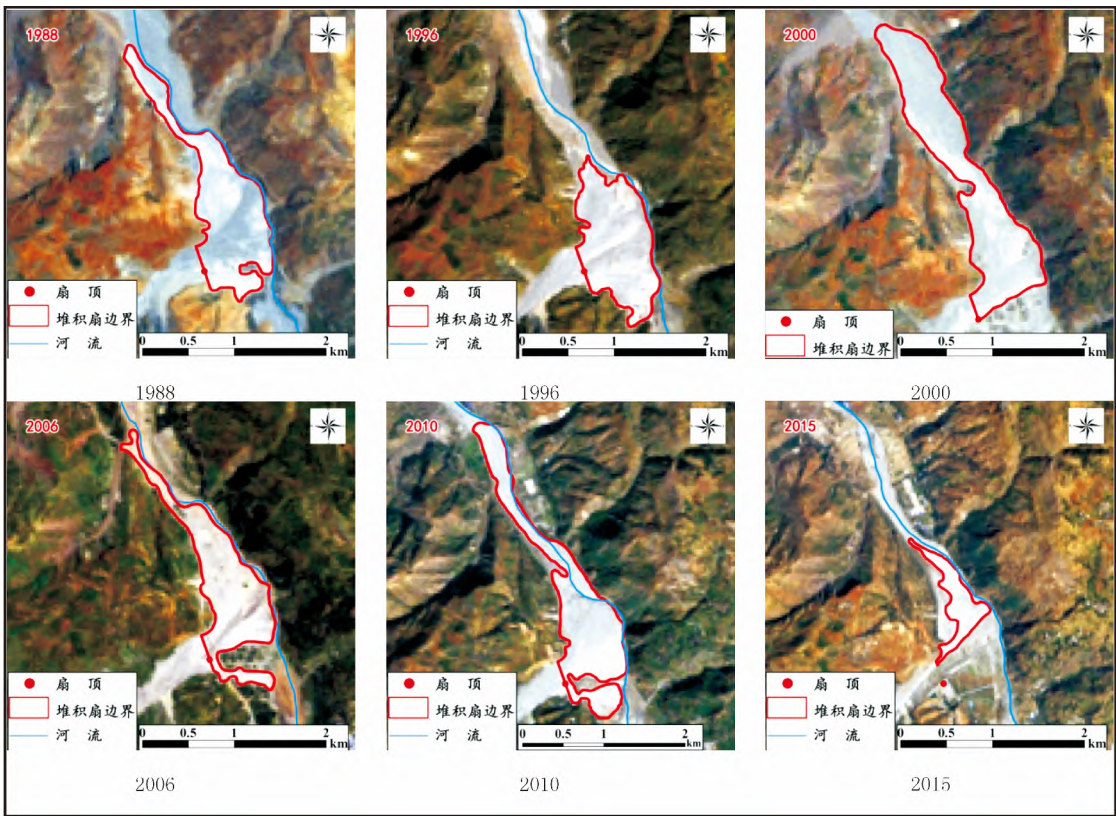


图 4 泥石流扇形地 TM 影像解译

Fig.4 Interpretation of debris flow alluvial fan in TM images

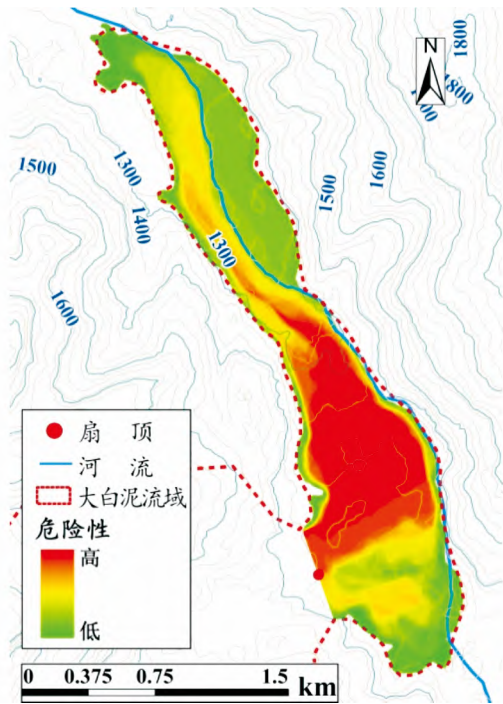


图 5 大白泥泥石流危害频率分布

Fig. 5 Frequency distribution of debris flow on Dabaini's alluvial fan

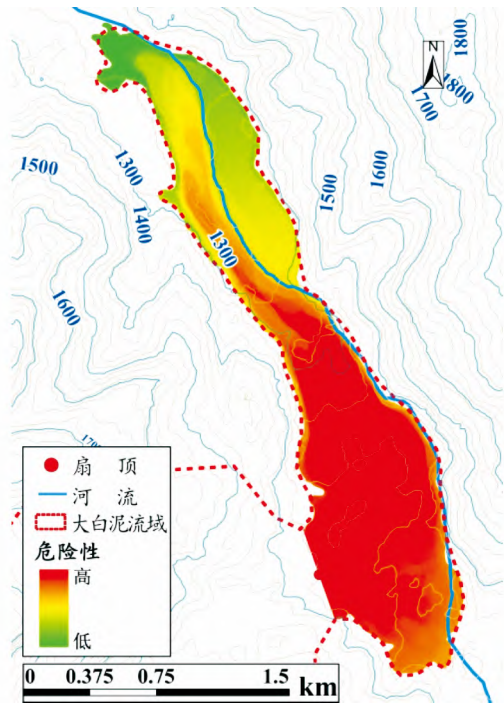


图 6 修正后的大白泥扇形地危险性分布

Fig. 6 Corrected hazard distribution of debris flow on the Dabaini's alluvial fan

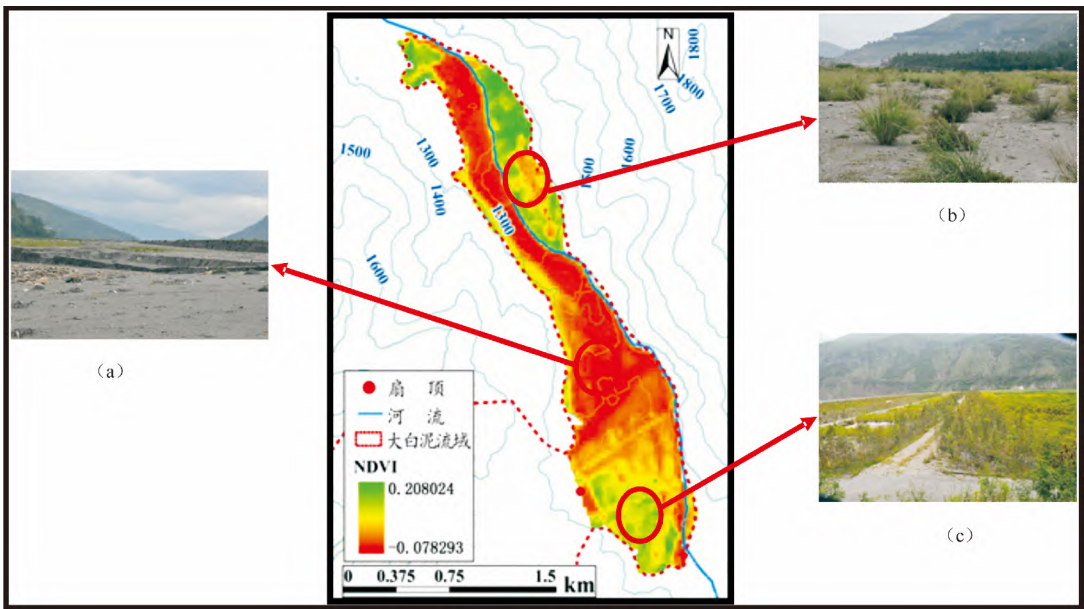


图 7 大白泥扇形地平均归一化植被指数

Fig. 7 Average NDVI of Dabaini's alluvial fan

泥石流危害较严重。归一化植被指数(NDVI)通过增加近红外波段范围绿叶的散射和可见光红波段范围叶绿素吸收的差异来反映植被生长情况。因此,可通过计算大白泥扇形地NDVI指数来间接验证本文扇形地危险性评估模型。

利用ENVI软件,计算获取的1988~2015年的14景遥感影像中大白泥扇形地区域的归一化植被指数(NDVI),通过ArcGIS软件分析工具计算出14景影像的平均归一化植被指数(如图7)。通过对比图6和图7,结果基本吻合,即对于大白泥扇形地,

出山口右岸 1988 年~2015 年平均归一化植被指数较大,说明受泥石流危害较小;出山口左岸 1988 年~2015 年平均归一化植被指数较小,说明受泥石流危害大。同时,对于大白泥扇形地左岸距泥石流出口较远地区,1988 年~2015 年平均归一化植被指数比距出口较近的区域大。这说明本文提出的模型与实际的情况比较吻合。

为了进一步对本文危险性评估模型进行验证,通过实地勘察(图 7a、b、c),发现对于大白泥扇形地左岸距离泥石流出口较远的位置,由于大白泥和主河小江的共同作用,形成台地,人工移栽了大量植被,并已形成一定规模,说明近年来该区域受大白泥泥石流危害较小,与本文模型计算结果相吻合。

3 讨论与结论

传统的泥石流扇形地危险性定性分析方法,由于影响因子和权重的确定依赖专家的经验,实际应用范围并不大。基于数值模拟的定量分析方法,存在泥石流动力学参数的取值困难。因此,本文在以下方面获得了研究进展:

(1) 根据泥石流危险性与扇形地形态特征的关系,结合泥石流危害频率的分布,建立了一个需要参数少、可操作性强的泥石流扇形地危险性评估模型。该模型只跟距扇顶的长度、与扇主轴的夹角以及危害频率有关。全部变量可以借助 GIS 和遥感分析得到,简单实用。

(2) 模型计算的大白泥扇形地危险性与 1988 年~2015 年平均 NDVI 计算结果的叠加和现场验证发现,泥石流危险性分布与该区域植被分布情况吻合度较高。表明本研究提出的泥石流扇形地危险性评估模型合理可靠,可用于泥石流危险性评估参考。

(3) 该模型对于低频泥石流扇形地不太适用。对于不同时相遥感图像比较缺乏的区域,也需要考虑采用其他方法估算泥石流的危害频率。

参考文献(References)

[1] 刘希林,唐川. 泥石流危险性分析[M]. 北京: 科学出版社, 1995 35-61 [LIU Xilin, TANG Chuan. Debris flow hazard analysis [M]. Beijing: Science Press, 1995: 35-61]

[2] 池谷浩,米尺谷,诚悦. 土石流危险区域の設定に关する研究(第二报)[J]. 土木技术资料,1979,21(9):46-50 [IKETANI kou, Komesyakutani, Makotoetsu. Study on debris flow hazard area (The second report) [J]. Civil engineering technical data, 1979, 21(9):46-50]

[3] 石川芳治,水山高久等. 土石流危険渓流における渓流の崩壊[J]. 新砂防,1989,42(3):4-10 [YOSHINORI Araki, KOHEI Furukawa, TAKAHITO Ogasawara, et al. A study on the change of destruction form and scale to debris-flow and collapse of debris-flow in hazardous torrent [J]. Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, 1989, 42(3):4-10]

[4] 唐川,刘洪江. 泥石流堆积扇危险度分区定量评价研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(3):63-70 [TANG Chuan, LIU Hongjiang. Assessment of zoning debris flow hazards on alluvial fans [J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1997, 3(3):63-70]

[5] 唐川. 泥石流堆积泛滥过程的数值模拟及其危险范围预测模型的研究[J]. 水土保持学报,1994,8(1):45-50 [TANG Chuan. Numerical simulation of debris flow inundation on the alluvial fans and its prediction model of the risk areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 8(1):45-50]

[6] 唐川,周钊乾,朱静等. 泥石流堆积扇危险度分区的数值模拟研究[J]. 灾害学,1994,9(4):7-13 [TANG Chuan, ZHOU Juqian, ZHU Jing, et al. A study on the risk zoning of debris flow on alluvial fans by applying technology of numerical simulation [J]. Journal of Catastrophology, 1994, 9(4):7-13]

[7] 韦方强,胡凯衡, Lopez JL 等. 泥石流危险性动量分区方法与应用[J]. 科学通报,2003,48(3):298-301 [WEI Fangqiang, HU Kaiheng, LOPEZ J L, et al. Method and its application of the momentum model for debris flow risk zoning [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(6):298-301]

[8] 胡凯衡,韦方强,何易平,等. 流团模型在泥石流危险度分区中的应用[J]. 山地学报,2003,21(6):726-730 [HU Kaiheng, WEI Fangqiang, HE Yiping, et al. Application of particle model in risk zoning of debris flow [J]. Journal of Mountain Science, 2003, 21(6):726-730]

[9] 胡凯衡,韦方强. 基于数值模拟的泥石流危险性分区方法[J]. 自然灾害学报,2005,14(1):10-14 [HU Kaiheng, WEI Fangqiang. Numerical simulation based debris flow risk zoning [J]. Journal of Natural disasters, 2005, 14(1):10-14]

[10] 杜榕桓,康志成,陈循谦,等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M]. 科学技术文献出版社重庆分社,1987 [DU Ronghuan, KANG Zhicheng, CHEN Xunqian et al. A comprehensive investigation and control planning for debris flow in the xiaojiang river basin of Yunnan province [M]. Chongqing Science and Technology Publishing House Chongqing Branch, 1987]

Risk Assessment Based on Morphological Characteristics of Debris Flow Alluvial Fan

LI Yanji^{1 2 3}, HU Kaiheng^{1 2}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu, Sichuan 610041, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In the mountainous areas it is quite common for people to settle on the stretch of alluvial fans consisted primarily of debris flow sedimentation, where specific settlements are highly vulnerable than other places in case of debris flow strike. A scientific risk assessment of the alluvial fan would be of great significance in the later commercial exploitation of the fan. Aimed to Dabaini Gully of Xiaojiang basin, Yunnan as a case study, this research completed field surveys and performed an integrated analysis of disaster formations, and then two factors, the morphological characteristics of debris flow alluvial fan with occurrence frequency of debris flow were combined to introduce a quantitative risk distribution model of the fan, which depended on three variable parameters, the distance from fan apex, the angle between fan's main axis and the occurrence frequency. Results confirmed: (1) Damages incurred by debris flow strike lied in the relative position of the settlement to the debris flow gully. Settlements located at a site far from the gully mouth, or at a larger separation angle with the mainstream line of debris flow would be less danger; (2) The application of the model to Dabaini Gully verified that a fine agreement between the field observation with the modeling was established, justifying the validation of the model; (3) Involved parameters of the model referred to the distance from fan apex, the included angle from fan axis and occurrence frequency, where all those values can be readily acquired by remote sensing and GIS analysis. The work provided a simple and convenient calculation method for risk assessment of debris flow fan.

Key words: Debris flow; alluvial fan; risk assessment; remote sensing

封面照片: 芦庵坑沟泥石流堆积物

2016年5月8日福建泰宁县开善乡金溪左岸的芦庵坑沟发生了特大规模的灾害性泥石流,导致36人死亡失踪。泥石流搬运的最大颗粒为13.7*11.3*9.9 m。

(陈宁生 2016年5月31日摄)