

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.06-13

基于不同评价单元和灾害熵的泥石流危险性分析 ——以白龙江流域武都段为例

李小龙¹, 宋国虎², 向灵芝^{1,2}, 罗 亮¹, 唐良琴¹, 沈 娜¹, 梁梦辉¹

(1. 重庆交通大学山区公路水运交通地质减灾重庆市高校重点实验室, 重庆 400074;

2. 四川省地质矿产勘察开发局成都水文地质工程地质队/四川省地质工程勘察院,
四川 成都 610072)

摘要:白龙江流域为泥石流等地质灾害密集分布区。2020 年 8 月由于强降雨激发, 白龙江流域武都段发生了大规模的群发性泥石流灾害, 造成严重损失。文章以白龙江流域甘肃省陇南市武都段(宕昌县两河口乡—武都区桔柑镇)为研究区, 通过野外实地考察, 选取流域面积、流域形状系数、平均坡度、沟谷密度、物源参照值(HI)、岩性、流域中心距活动断层距离、一小时最大降雨量、植被覆盖度作为泥石流危险性评价因子。基于灾害熵理论, 分别以泥石流单沟和小流域单元作为评价单元, 利用 ArcGIS 软件, 进行区域泥石流危险性评价。分析结果表明, 研究区内泥石流沟大多数都属于中、高危险性。致灾因子中岩性、物源参照值(HI)、距断层距离、植被覆盖度及平均坡度的权重最大, 与实际考察结果一致。且以小流域单元作为评价单元的评价结果更符合研究区的泥石流发育情况。

关键词:白龙江流域; 泥石流; 灾害熵; 流域单元; 危险性

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)06-0107-09

Hazard analysis of debris flows based on different evaluation units and disaster entropy: A case study in Wudu section of the Bailong river basin

LI Xiaolong¹, SONG Guohu², XIANG Lingzhi^{1,2}, LUO Liang¹, TANG Liangqin¹, SHEN Na¹, LIANG Menghui¹

(1. Key Laboratory of Geological Hazards Mitigation for Mountainous Highway and Waterway, Chongqing Jiaotong
University, Chongqing 400074, China;

2. Chengdu Hydrogeological Engineering Geological Team of Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources/Geological
Engineering Survey Institute of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: The Bailong river basin is a densely distributed area of geological disasters such as debris flow. In August 2020, due to the stimulation of heavy rainfall, a large-scale group debris flow disaster occurred in Wudu section of Bailong river basin, causing serious losses. This paper takes the Wudu section (Lianghekou Township, Dangchang County to Jugan Town, Wudu District) of Longnan City in Gansu Province as the research area. Through field investigation, we selected the area of drainage basin, shape coefficient of basin, average slope, density of gully, reference value of material source (HI), lithology, distance between basin center and active fault, one hour maximum rainfall and vegetation coverage as debris flow hazard assessment factors. Taking single gully and small watershed units of debris flow as evaluation units, the regional debris flow hazard

收稿日期: 2021-01-25; 修订日期: 2021-03-09

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察项目(2019QZKK0902); 两相物质组成对泥石流沉积物固结机理及承载特性的影响机制研究(51608083)

第一作者: 李小龙(1996-), 男, 四川资阳人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害防治方面的研究。E-mail: 543274573@qq.com

通讯作者: 向灵芝(1980-), 女, 重庆人, 副教授, 博士, 主要从事地质灾害防治方面的研究。E-mail: xlz1223xlz@sina.com

assessment is carried out by using ArcGIS software based on the theory of disaster entropy. The results show that most of the debris flows in the study area belong to medium and high hazard debris flow gullies. Some of the most heavily weighted disaster-causing factors like the weight of lithology, source reference value (HI), distance from fault, vegetation coverage and average slope are consistent with the actual investigation results. Moreover, the evaluation results of small watershed units are more consistent with the development of debris flow in the study area.

Keywords: Bailong river basin; debris flow; disaster entropy; watershed unit; hazard

0 引言

泥石流是一种地质不良山区常见的自然地质灾害现象^[1]。泥石流发生时常常会冲毁房屋、公路铁路、淤埋农田、毁坏供水、供电、通讯等设施,威胁人民生命和财产安全,严重影响当地生态环境,造成巨大经济损失。

白龙江流域位于甘肃省南部,属秦岭西段,地处青藏高原、黄土高原和四川盆地的交接处,是我国泥石流最为频发和严重的地区之一^[2],泥石流灾害已严重威胁该区域国民经济和社会的可持续发展。因此有必要对该区域泥石流灾害进行研究,从而科学有效的做出防灾减灾举措,保障生命安全,减少财产损失。由于研究区泥石流发育历史悠久,因此相关研究成果较丰富。如李晓婷等^[3]选取地质条件、地形地貌、水动力条件等 10 个指标,采用层次分析法对权重进行赋值,模糊综合评判法对武都区石门乡 6 条泥石流沟进行了危险性评价;王高峰等^[4]采用 FLO-2D 模型对白龙江流域泥湾沟在有无治理情景不同降雨频率条件下泥石流堆积特征及危险区进行了模型分析;刘德玉等^[5]经过对白龙江流域甘肃段的实地调查,统计分析了沟床比降、沟坡坡度、流域面积和相对高差 4 个主要地形因素与泥石流灾害的类型及易发程度的关系;蒲济林等^[6]基于 GIS 与 AHP 模型对白龙江流域甘肃省内部分进行了泥石流危险性评价;高立兵等^[7]运用信息熵与 AHP 模型对整个白龙江流域泥石流进行了危险性评价;刘林通等^[8]基于流域单元和信息量法对甘肃省白龙江流域泥石流危险性展开评价;李淑松等^[9]以流域单元为评价单元,选取沟床比降、泥石流规模和堵江程度 3 个因子,构建危险性评价模型,对甘肃省陇南地区白龙江流域泥石流进行了危险性评价;评价单元是影响泥石流危险性评价的主要因素之一,本文分别以小流域和泥石流沟作为评价单元,基于灾害熵理论,运用 ArcGIS 对白龙江流域甘肃省武都段泥石流进行危险性分析评价,结果可为防灾减灾做参考。

1 研究区概况

白龙江发源于岷山北麓,是长江水系嘉陵江的一级

支流。本文研究区武都段主要地处白龙江流域的中部,区域面积 4 389.78 km²,主要河流有北峪河、角弓河、沟坝河、福津河、舍书河等(图 1)。研究区大的地貌单元上处于西秦岭西段侵蚀-剥蚀构造山地,山体总体是东西走向,地势上西北高、东南低。受新构造影响强烈,地震活动频繁,其大部分地区为Ⅶ度地震烈度。沟谷发育、切割强烈、相对高差大。区内出露的新近系、泥盆系、石炭系、侏罗系等地层主要被成县-徽县谈家庄断裂带和康县-略阳断裂带两大断裂带所切割^[10]。白龙江干流段以南地区植被茂密;白龙江干流段以北及北峪河流域水土流失严重,植被覆盖率低。区内主要交通干线有 G75 兰海(兰州~海南)高速公路、G8513 平绵(平凉~绵阳)高速公路、国道 G212、国道 G211,以及兰渝铁路。受温带季风气候影响,降雨主要集中在 5~9 月,降雨集中且多暴雨,为泥石流的发生提供了充足的激发条件。2020 年 8 月 15—17 日连续强降雨,导致区内几乎所有泥石流沟都暴发了大规模泥石流。造成房屋冲毁、道路冲断、通讯中断、农作物、家畜等遭受严重损失。



图 1 研究区泥石流分布

Fig. 1 Distribution of debris flow in the study area

2 研究方法

为了定量各种致灾因子在地质灾害产生过程中的权重,丁继新等根据信息熵的理论和方法,提出了灾

害熵概念,并构建了一种基于灾害熵理论的地质灾害评价方法,其他学者基于该理论进行了相应的研究与运用^[11-13]。

运用灾害熵对区域泥石流危险性评价,首先需要基于区域的孕灾背景,选取对区域泥石流发生有重要影响的评价因子,然后基于评价单元计算每一个评价指标的值,构建泥石流灾害评价矩阵。由于各评价因子的属性并不完全相同,需先将每种因子进行标准化处理,转换成可以直接进行比较的无量纲数据,再根据式(1)、(2)确定灾害熵,根据式(3)计算表征评价指标重要程度的评价指标效用值,然后根据式(4)利用评价指标效用值计算各指标的权重,最后根据式(5)计算每个评价单元危险性值。评价单元的危险性值越大,表示该评价单元发生泥石流灾害的危险性就越大。

$$F_{ij}=r_{ij}/\sum_{j=1}^nr_{ij}$$

(1)

$$E_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^mF_{ij}\ln F_{ij}$$

(2)

$$V_j=1-E_j$$

(3)

$$w_j=V_j/\sum_{j=1}^nV_j$$

(4)

$$P_i=\sum_{j=1}^nw_jr_{ij}$$

(5)

式中: r_{ij} ——第*i*个评价单元的第*j*项评价指标标准化后的值;

F_{ij} ——第*i*个评价单元的第*j*项评价指标在泥石流灾害产生过程中出现的频率;

E_j ——第*j*项评价指标的灾害熵;

m ——评价单元的个数;

n ——评价指标的个数;

V_j ——第*j*项评价指标的指标效用值;

w_j ——第*j*项评价指标的权重;

P_i ——第*i*个评价单元泥石流灾害的危险性。

3 评价因子分析

本文根据对武都段泥石流的野外实地考察和资料分析整理,选择9个影响因素作为研究区泥石流危险性的评价指标,即:流域面积、流域形状系数、平均坡度、沟谷密度、物源参照值(HI)、岩性、流域中心距活动断层距离、一小时最大降雨量、植被覆盖度。本文所用数

据来源见表1所示。

表 1 数据介绍
Table 1 Data introduction

序号	数据	来源
1	DEM数据	http://www.gscloud.cn/
2	一小时最大降雨量	甘肃省地质环境监测院
3	植被指数	http://www.geodata.cn/
4	地质图	中国地质力学所
5	遥感影像	图新地球

(1)流域面积

流域面积指分水岭包围下的汇水面积,是确定沟谷水动力条件的重要参数,流域面积越大,水动力条件越好,反之越差,对于泥石流活动而言是当沟谷流域面积在某一范围内最为有利^[5,12]。从研究区段329条泥石流沟的统计结果来看,流域面积83.6%都小于10.0 km²。因此,研究区泥石流的活动主要集中于流域面积较小的流域,流域面积在3~10 km²范围内的泥石流最为活跃。

(2)流域形状系数

流域形状系数反映了降雨等流时线以及汇流洪峰值出现,影响着流域泥沙冲淤^[14]。流域形状系数的值越接近1,流域形状近乎于圆形,汇流速度快,流域易形成大洪水,进而导致泥石流;反之不易出现泥石流^[15]。通过对研究区329条泥石流沟按自然断点法统计分析,表明该区域泥石流沟形状系数小于1.3的有95条,占总数的28.8%;介于1.3~1.5之间的有157条,占总数的47.72%;大于1.5的有77条,占总数的23.4%。

(3)平均坡度

坡度影响地表汇流。坡度越大,流域汇流达到峰值就越快,且峰值流量越大,坡体表面越容易被侵蚀冲刷,形成坡面物源^[16]。同时坡度越大,松散物质所具有的势能也越大,松散物质对环境变化做出的反应也就越大,有利于泥石流形成和流动。经实地考察发现研究区物源多分布在10°~40°之间。

(4)沟谷密度

沟谷密度反映地表被水流切割的破碎程度,可以综合反映研究区气候、地形、岩性、植被等因素对泥石流发育和活动的影响^[17]。沟谷密度越大,地表遭受水流切割越严重,地表沟壑越多越破碎,固液两相径流越易形成,泥石流发生的可能性越大。反之可能性越小。

(5)物源参照值(HI)

研究表明面积-高程积分值(HI)反映流域受侵蚀程度,HI越大,表明流域演化阶段越年轻,可蚀性越大^[18]。利用面积—高程积分值进行泥石流沟地貌发育阶段的

划分,能够定量的反映区域提供松散物质的能力。运用 ArcGIS 平台对研究区进行分析,结果表明,研究区主要处于地貌发育的青壮年期,泥石流发育旺盛期。

(6)岩性

泥石流的物源在一定程度上受岩性的影响,研究区内地层岩性复杂,出露的地层主要有志留系、泥盆系、二叠系、三叠系、侏罗系、古近系、新近系和第四系地层,岩性主要有千枚岩、板岩、灰岩、中厚层灰岩、变质砂岩、砂砾岩、砂岩^[19]。岩性不同抗风化能力也就不同,坚硬岩石不易被风化侵蚀,软弱松散地层则易被侵蚀切割。通过对研究区的考察发现,研究区地层岩性存在比较严重的软硬相间现象,在这两者的作用下研究区存在大量松散堆积物,为泥石流形成提供着充足物源。根据研究区内的地层岩性情况,可以分为 6 类(表 2),将各个泥石流沟内的各类岩层按照面积百分比进行叠加得出每个流域的岩性因子数值(DSF)^[12]。

表 2 研究区泥石流沟岩性分类表
Table 2 Lithology classification of debris flow gully in study area

岩性分类	坚硬块状 岩浆岩	软弱中厚 层碎屑岩	坚硬中厚 层碎屑岩	松散软弱 堆积层及 冲洪积层	较坚硬中 厚层-厚层 碳酸盐岩、 薄层板岩、 碎屑岩	软弱-坚硬 中厚层- 厚层板岩、 碎屑岩
赋值	1	3	5	7	8	10

(7)流域中心距活动断层距离

研究区的新构造运动活跃,而泥石流的活动与活动断层关系密切。断层的存在使得断层周围的岩体十分破碎,为崩塌、滑坡、落石等地质灾害的高发区,这一系列的崩坡积物为泥石流提供了丰富的物源。距离断层越近泥石流频率越高,规模越大。

(8)小时最大降雨量

在泥石流发生的三大条件中水动力条件是主要诱发条件,而绝大数泥石流沟的水动力补给来源于降雨。短历时的强降雨,会使泥石流沟内快速汇集大量径流,从而使得水动力条件达到了泥石流启动阈值。因此降雨量与泥石流的启动有着密切关系。研究区 24 h 最大降水量为 90.5 mm,1 h 最大降水量 40 mm,10 min 最大降水量 16.2 mm^[20]。综合考察结果和收集资料将 1 h 最大降雨量作为研究区泥石流危险性评价的降雨因素参照值。

(9)植被覆盖度

研究区泥石流发育与植被有着密切关系。植被的存在可以反映该地区的水土保持情况,由于植物叶茎的

挡水作用和根系的固土作用的存在,在植被覆盖高的地区泥石流的形成越不容易,反之则越容易形成泥石流。通过对植被归一化指数(NDVI)的统计分析表明,该区域植被覆盖度基本都小于 0.4。

4 危险性计算与分析

利用 DEM 高程数据(30 m)、地质图(1 : 200 000)、归一化植被指数(NDVI)和一小时最大降雨等值线图,对研究区评价因子进行分析,运用 GIS 技术计算各评价指标值。参考相关研究成果和武都段泥石流活动特征的分析结果,将各评价指标分为 3 类,并分别赋以分值 1 ~ 3(表 3)。

表 3 泥石流沟危险性评价指标标准化分级表
Table 3 Standardized classification table of debris flow gully hazard assessment index

评价指标	标准化赋值		
	1	2	3
流域面积/km ²	>10	<3	3 ~ 10
流域形状系数	>1.5	1.3 ~ 1.5	<1.3
平均坡度/(°)	0 ~ 20	20 ~ 30	>30
沟谷密度/(km·km ⁻²)	<0.5	0.5 ~ 1	>1
HI	<0.45	>0.60	0.45 ~ 0.6
岩性因子(DSF)	<5	5 ~ 7	>7
距断层距离/km	>3	1 ~ 3	<1
降雨/mm	<36	36 ~ 38	>38
NDVI	>0.4	0.25 ~ 0.4	<0.25

评价单元是影响泥石流危险性评价的主要因素之一,以往用于泥石流评价的单元主要有栅格单元、地貌单元、行政单元^[21-23],而这些评价单元与泥石流孕灾背景缺乏直接联系。本文选取与泥石流孕灾背景有着紧密联系的泥石流沟和小流域单元作为评价单元。每一条泥石流沟都是由一个或多个小流域单元组成。以泥石流沟为评价单元可以整体反映致灾因素对泥石流的影响,但会忽视掉局部因素的影响。小流域单元是一种能够综合反映泥石流发生处地形条件和水文过程的一种评价单元。它具有汇水面积小,沟道短,对降雨有着极高的灵敏度等特点。以小流域单元作为评价单元可以更好的反映泥石流沟局部地形地貌对泥石流的控制。近年来已有不少学者将其运用于泥石流灾害分析评价中^[21-22,24]。本文基于 DEM 数据,根据水文学方法^[21],提取研究区小流域,以此作为一种评价单元。再以 Google Earth 影像为基础,基于提取出来的小流域解译泥石流沟,将其作为另一种评价单元。以马槽沟为例,如图 2 所示。

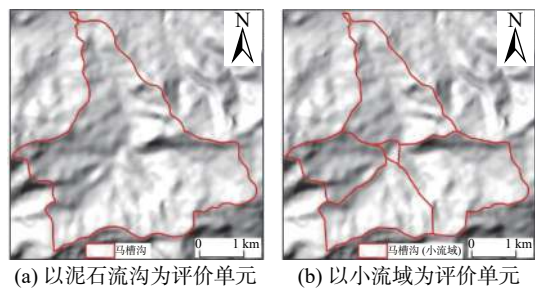


图 2 不同评价单元示例

Fig. 2 Schematic diagram of evaluation unit

4.1 以泥石流沟为评价单元的危險性计算

以武都段 329 条泥石流沟谷作为评价单元。参照前文所选 9 个因子作为评价指标, 并根据表 3 对各评价

指标进行标准化分级赋值, 各个评价因子的分级图, 如图 3 所示。各致灾因子评价指标值经过赋值全部变成可直接参与计算的无量纲数。根据前述研究方法, 可以计算出泥石流沟各评价指标的灾害熵、信息有用值及其权重, 计算结果见表 4。

由表 4 可以知, 在以泥石流沟为评价单元的因子分析中, 岩性、物源参照值、距活动断层距离、植覆盖度及平均坡度的权重最大, 分别为 0.121 651, 0.120 162, 0.113 950, 0.113 231, 0.110 954。这与实际情况基本相吻合。在计算出每种评价指标或致灾因子的权重后, 由式 (5) 计算每条泥石流的危险度数值, 其计算结果见图 4。

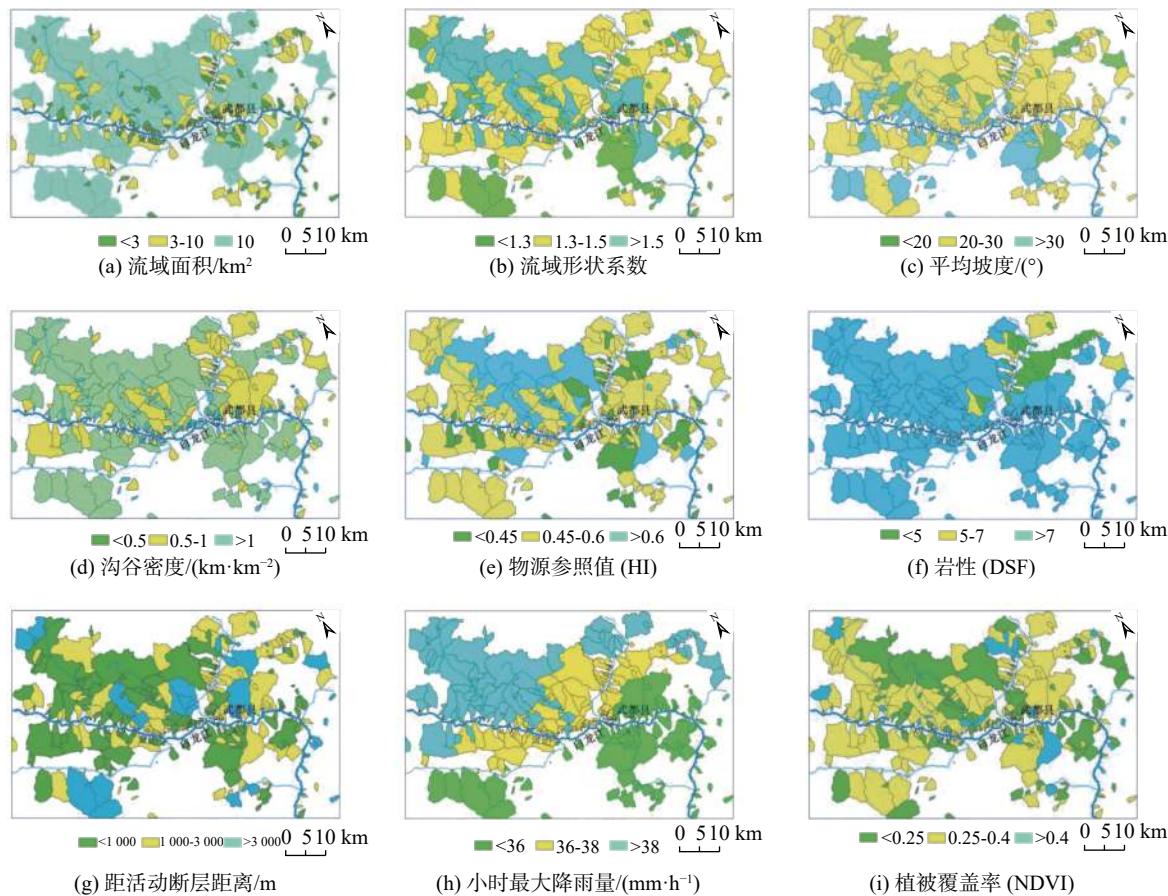


图 3 评价因子分级图 (泥石流沟为评价单元)

Fig. 3 Grading of evaluation factors (debris flow gully as evaluation unit)

表 4 评价指标灾害熵及其权重

评价指标	流域面积	流域形状系数	平均坡度	沟谷密度	物源参照值	岩性	距断层距离	降雨量	NDVI
灾害熵	12.994 670	12.969 065	13.502 476	12.941 899	14.539 949	14.707 807	13.840 045	12.426 344	13.758 987
信息效用值	-11.994 670	-11.969 065	-12.502 476	-11.941 899	-13.539 949	-13.707 807	-12.840 045	-11.426 344	-12.758 987
评价指标的权重	0.106 448	0.106 221	0.110 954	0.105 979	0.120 162	0.121 651	0.113 950	0.101 404	0.113 231

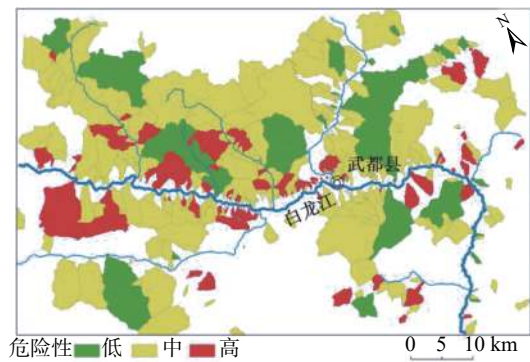


图 4 泥石流沟危险性评价图 (泥石流沟为评价单元)

Fig. 4 Debris flow gully hazard assessment (debris flow gully as assessment unit)

4.2 以小流域为评价单元

以武都段提取的 1 305 个小流域作为评价单元, 参照前文所选 9 个因子作为评价指标, 并根据表 3 对各评价指标进行标准化分级赋值, 各个因子分级结果如图 5 所示。根据前述研究方法, 可以计算出泥石流沟各评价指标的灾害熵、信息有用值及其权重 (表 5)。

由表 5 可以看出, 在以小流域为评价单元的因子分析中, 岩性、流域面积、距活动断层距离、平均坡度及植覆盖度的权重最大, 分别为 0.128 442, 0.120 691, 0.116 541, 0.109 927, 0.109 034。这说明它们是研究区泥石流发生的最主要因素。

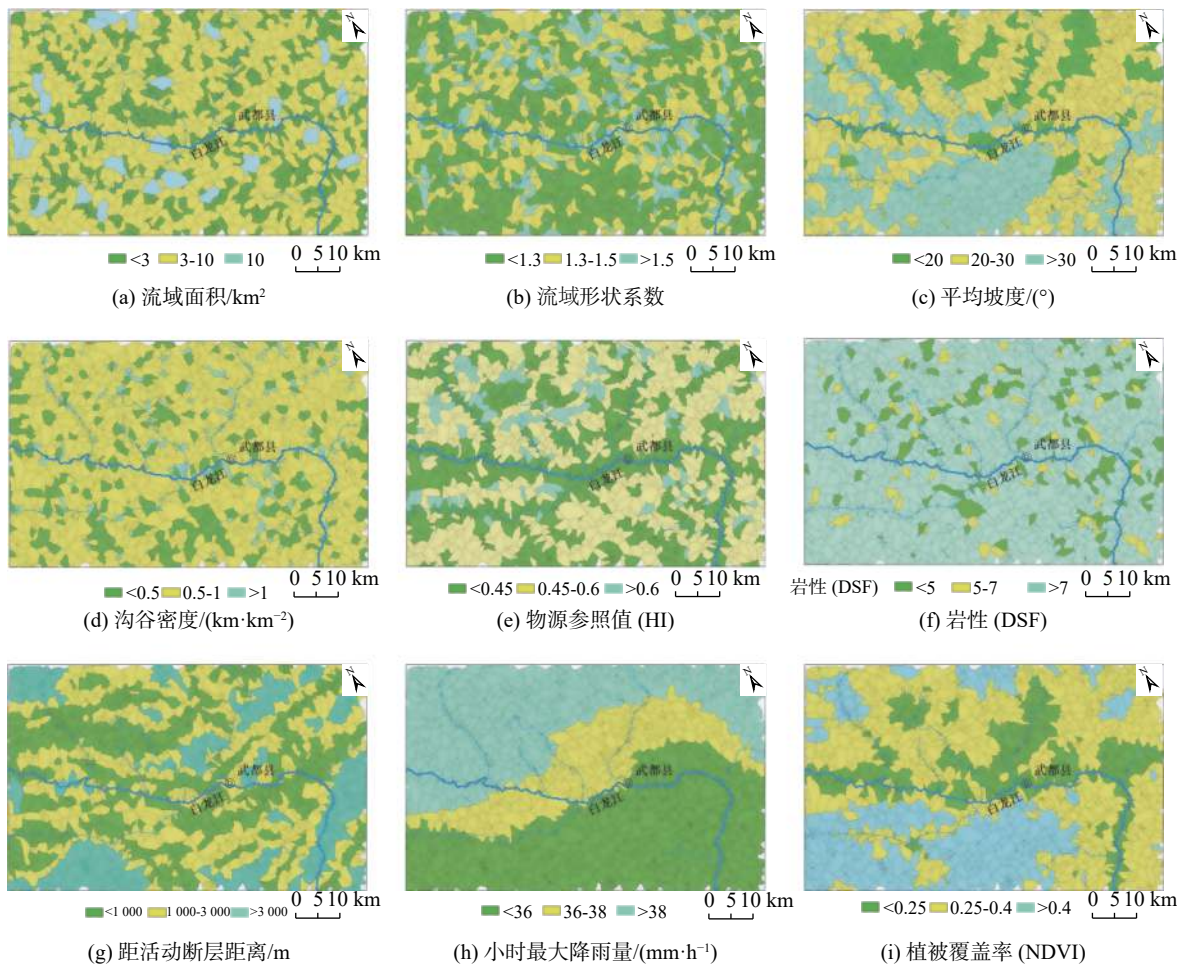


图 5 小流域评价因子分级图

Fig. 5 Classification of evaluation factors in small watershed

表 5 评价指标灾害熵及其权重

Table 5 Evaluation index disaster entropy and its weight

评价指标	流域面积	流域形状系数	平均坡度	沟谷密度	物源参照值	岩性	距断层距离	降雨量	NDVI
灾害熵	46.777 098	39.015 534	42.694 335	42.127 049	40.254 309	49.717 080	45.202 859	40.145 965	42.355 624
信息效用值	-45.777 098	-38.015 534	-41.694 335	-41.127 049	-39.254 309	-48.717 080	-44.202 859	-39.145 965	-41.355 624
评价指标的权重	0.120 692	0.100 228	0.109 927	0.108 432	0.103 494	0.128 443	0.116 541	0.103 209	0.109 034

在计算出各评价指标或致灾因子的权重后,由式(5)来计算出每个流域单元的危险度数值,计算结果如图6所示。以武都段329条泥石流沟为研究对象,将各个泥石流流域内的各个小流域的危险性数值按照面积所占百分比进行加权叠加得出每条泥石流沟的危险性数值,其结果如图7所示。

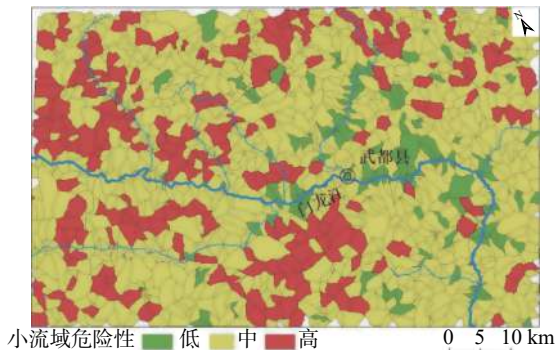


图6 小流域危险性评价图

Fig. 6 Hazard assessment of small watershed

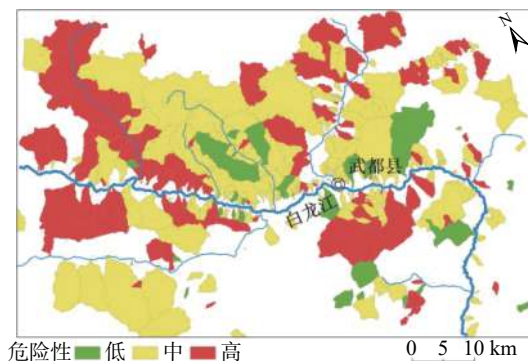


图7 泥石流沟危险性评价图(小流域为评价单元)

Fig. 7 Debris flow gully hazard assessment (small watershed as assessment unit)

野外调查显示,马槽沟流域面积13.27 km²,主沟长5.1 km,主沟纵比降80.9‰。属于侵蚀低中山地貌区,流域内海拔最高2216 m,最低1267 m,相对高差949 m。山坡坡度25°~30°,局部大于30°。受新老构造运动及河流下切的影响,整个流域支离破碎。主要出露地层为中上志留统(S₂₊₃)的千枚岩、板岩夹灰岩,新近系(N)的红色砂岩、粉砂岩和梁崱上披覆有黄土,岩体节理发育,风化强烈,植被稀少。冲沟极其发育,沟谷密度6.4 km/km²。在强降雨条件下,发生泥石流概率较高,这与评价结果相吻合。

4.3 计算结果分析

(1)以泥石流沟为评价单元的计算结果表明,研究区内329条泥石流沟的危险性数值位于1.4~2.8之间,

按照自然断点法分为低、中、高三个级别。低危险性36条,占总数的10.94%,中危险性共187条,占总数的56.84%,高危险性共106条,占总数的32.22%。

以小流域为评价单元的计算结果表明,研究区内共有1305个小流域,危险性数值位于1.3~2.9之间,按照自然断点法分为低、中、高三个级别。低危险性155个,占总数的11.88%,中危险性共537个,占总数的61.84%,高危险性共343个,占总数的26.28%。

将各个泥石流流域内的各个小流域的危险性数值按照面积所占百分比进行加权叠加得到每个流域危险性数值。通过分级计算,研究区内共有329条泥石流沟,危险性数值位于1.4~2.7之间,按照自然断点法分为低、中、高三个级别。低危险性37条,占总数的11.24%,中危险性共184条,占总数的55.93%,高危险性共108条,占总数的32.83%。

(2)综合两种评价单元的分区结果,武都段的泥石流沟大多数都属于中、高危险性泥石流沟。

(3)从计算结果分析可知,以泥石流沟作为评价单元,其高危险性泥石流沟中流域面积大于3 km²的沟占21.14%,与实际情况相比,流域面积大于3 km²的泥石流沟其危险性偏低。以小流域为评价单元,将泥石流沟内各小流域危险度按面积百分比进行加权叠加计算泥石流沟危险性,其高危险性泥石流沟中流域面积大于3 km²的泥石流沟占31.38%,符合实际情况。对比两者结果,以小流域作为评价单元,结果更符合客观事实。

5 结论

(1)通过灾害熵来评价泥石流危险性,可以定量的计算每种致灾因子在泥石流产生过程中的权重,从而可以更加清楚的了解泥石流的形成机制。计算结果表明,研究区的影响因子中岩性、HI、距断层距离、NDVI及平均坡度的权重最大,与实际考察结果一致。

(2)运用灾害熵模型评价泥石流灾害时,选取不同大小的评价单元产生的结果会存在差异,由于计算单元评价因子参数的取值会涉及平均值,故选择大尺度的评价单元会削弱评价因子的作用,从而影响计算结果。因此选用合适的评价单元,才能使结果更符合实际情况。

(3)灾害熵理论的评价结果受评价因子的选取影响很大,并且每个地区的地理环境、孕灾背景都有一定的区域特点,故为了得到比较客观的评价结果,需要对研究地区的孕灾条件进行实地考察,才能准确选取到区域主要致灾因子。

参考文献 (References):

- [1] 杨兴坤, 李海东. 泥石流灾害的工程预防措施 [J]. 中国水利, 2014(10): 54–55. [YANG Xingkun, LI Haidong. Engineering prevention measures of debris flow disaster [J]. China Water Resources, 2014(10): 54–55. (in Chinese)]
- [2] 孟兴民, 陈冠, 郭鹏, 等. 白龙江流域滑坡泥石流灾害研究进展与展望 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(4): 1–15. [MENG Xingmin, CHEN Guan, GUO Peng, et al. Research of landslides and debris flows in Bailong river basin: Progress and prospect [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(4): 1–15. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 李晓婷, 刘文龙. 模糊综合评判法在甘肃陇南武都区石门乡泥石流危险性评价中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 71–76. [LI Xiaoting, LIU Wenlong. Application of fuzzy comprehensive evaluation method to debris flow risk evaluation in Shimen Township in Wudu District of Longnan City, Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 71–76. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 王高峰, 陈宗良, 毛佳睿, 等. 不同工程情景和降雨频率工况下白龙江流域泥石流危险性评价 [J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(5): 30–40. [WANG Gaofeng, CHEN Zongliang, MAO Jiarui, et al. Debris flow risk assessment in Bailong river basin under different engineering scenarios and rainfall frequency conditions [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(5): 30–40. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 刘德玉, 贾贵义, 李松, 等. 地形因素对白龙江流域甘肃段泥石流灾害的影响及权重分析 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 33–39. [LIU Deyu, JIA Guiyi, LI Song, et al. Impacts of topographical factors on debris flows and weight analysis at the Gansu segment of the Bailongjiang river basin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 33–39. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 蒲济林, 苏军德, 高立兵, 等. 基于GIS与AHP模型的白龙江流域泥石流危险性评价 [J]. 中国水土保持, 2016(5): 58–61. [PU Jilin, SU Junde, GAO Libing, et al. Risk assessment of debris flow in Bailong river basin based on GIS and AHP model [J]. Soil and Water Conservation in China, 2016(5): 58–61. (in Chinese)]
- [7] 高立兵, 苏军德. 基于信息熵与AHP模型的小区域泥石流危险性评价方法 [J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 376–380. [GAO Libing, SU Junde. Risk assessment method of debris flow in residential area based on information entropy and AHP Model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 376–380. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘林通, 孟兴民, 郭鹏, 等. 基于流域单元和信息量法的白龙江流域泥石流危险性评价 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2017, 53(3): 292–298. [LIU Lintong, MENG Xingmin, GUO Peng, et al. Assessment of debris flow hazards in the Bailongjiang river based on the watershed unit and information value method [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2017, 53(3): 292–298. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李淑松, 邹强, 陈容, 等. 白龙江流域泥石流危险性评价 [J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(4): 83–88. [LI Shusong, ZOU Qiang, CHEN Rong, et al. Hazard assessment of debris flow in Bailong river basin [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(4): 83–88. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 赵艳萍. 白龙江流域泥石流分布规律及其影响因素研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2013. [ZHAO Yanping. Study on the regularity of debris flow distribution and influence factors in Bailong river basin [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 丁继新, 周圣华, 杨志法, 等. 川藏公路然乌—东久段地质灾害定量评价: “地质灾害熵”概念的提出和应用 [J]. 自然灾害学报, 2005, 14(4): 79–84. [DING Jixin, ZHOU Shenghua, YANG Zhifa, et al. Quantitative assessment of geological hazards in segment between Ranwu and Dongjiu in Sichuan-Tibet highway: Presentation and application of concept of “geological hazard entropy” [J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(4): 79–84. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 向灵芝, 崔鹏, 陈洪凯, 等. 基于灾害熵的汶川震后道路泥石流敏感性分析 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(5): 71–78. [XIANG Lingzhi, CUI Peng, CHEN Hongkai, et al. Sensitivity analysis of debris flow along highway in Wenchuan County after earthquake based on hazard entropy theory [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2017, 36(5): 71–78. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 庄树裕, 李广杰, 王钢城, 等. 灾害熵-可拓综合评判理论在泥石流危险性评价中的应用 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(6): 3075–3077. [ZHUANG Shuyu, LI Guangjie, WANG Gangcheng, et al. Application of entropy-extension comprehensive evaluation theory in the debris flow risk assessment [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(6): 3075–3077. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张意奉, 焦菊英, 唐柄哲, 等. 特大暴雨条件下小流域沟道的泥沙连通性及其影响因素: 以陕西省子洲县为例 [J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 302–309. [ZHANG Yifeng, JIAO Juying, TANG Bingzhe, et al. Channel sediment

- connectivity and influence factors in small watersheds under extremely rainstorm: A case study at Zizhou County, Shaanxi Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(1): 302–309. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 宋瑶. 北京山区洪沟道特征及预警技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016. [SONG Yao. The study on channel characteristics and early warning techniques of mountain flood in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 张国平, 徐晶, 毕宝贵. 滑坡和泥石流灾害与环境因子的关系 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 653–658. [ZHANG Guoping, XU Jing, BI Baogui. Relations of landslide and debris flow hazards to environmental factors [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(3): 653–658. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 周志华, 林维芳, 徐标. 基于GIS与信息量模型的沟谷密度与滑坡发育关系的研究 [J]. *中国矿业*, 2012, 21(1): 119–121. [ZHOU Zhihua, LIN Weifang, XU Biao. Relationship between gully density and landslide based on GIS and information value model [J]. *China Mining Magazine*, 2012, 21(1): 119–121. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 梁馨月, 徐梦珍, 吕立群, 等. 基于地貌特征的青藏高原边缘泥石流沟分类 [J]. *地理学报*, 2020, 75(7): 1373–1385. [LIANG Xinyue, XU Mengzhen, LYU Liqun, et al. Geomorphological characteristics of debris flow gullies on the edge of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(7): 1373–1385. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 陈宗良, 叶振南, 王志宏, 等. 白龙江流域中上游第四纪沉积物的发育特征及其灾害效应 [J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(2): 29–36. [CHEN Zongliang, YE Zhennan, WANG Zhihong, et al. Development characteristics and disaster effect of the Quaternary sediments in the middle and upper reaches of the Bailongjiang river basin [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(2): 29–36. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 侯燕军. 甘肃省陇南市武都区北山泥石流灾害成因分析及防治措施 [J]. *甘肃科技*, 2010, 26(21): 55–57. [HOU Yanjun. Cause analysis and prevention measures of Beishan debris flow disaster in Wudu District, Longnan City, Gansu Province [J]. *Gansu Science and Technology*, 2010, 26(21): 55–57. (in Chinese)]
- [21] 邹强, 唐建喜, 李淑松, 等. 基于水文响应单元的泥石流灾害易发性分区方法 [J]. *山地学报*, 2017, 35(4): 496–505. [ZOU Qiang, TANG Jianxi, LI Shusong, et al. Susceptibility assessment method of debris flows based on hydrological response unit [J]. *Mountain Research*, 2017, 35(4): 496–505. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 杨宇, 蔡英桦, 钟华介, 等. 基于集水单元的岩溶山区小流域泥石流敏感性评价: 以贵州威宁二塘河流域为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(5): 57–64. [YANG Yu, CAI Yinghua, ZHONG Huajie, et al. Susceptibility assessment of debris flows in small watershed of Karst area based on catchment units: a case study in Ertang river basin, Weining County, Guizhou Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(5): 57–64. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 李彩侠, 马煜, 何元勋. 泥石流致灾因子敏感性分析: 以四川都江堰龙溪河流域为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(5): 32–39. [LI Caixia, MA Yu, HE Yuanxun. Sensitivity analysis of debris flow to environmental factors: a case of Longxi River basin in Dujiangyan, Sichuan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(5): 32–39. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 李益敏, 杨蕾, 魏苏杭. 基于小流域单元的怒江州泥石流易发性评价 [J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(10): 2419–2428. [LI Yimin, YANG Lei, WEI Suhang. Susceptibility assessment of debris flow in Nujiang befecture based on the catchment [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(10): 2419–2428. (in Chinese with English abstract)]