

基于两种方法的攀西泥石流易发性评价对比分析

徐艳琴¹, 白淑英^{1,2}, 徐永明¹

(1. 南京信息工程大学 地理与遥感学院, 南京 210044; 2. 环境保护部 南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要: 泥石流易发性评价是泥石流灾害危险性评价和易损性评价的基础工作, 为泥石流灾害预防预测提供依据。利用贡献权重叠加模型(CWS)和基于确定性系数(CF)的确定权重模型, 采用多因子评价模型, 进行了四川省攀西地区泥石流易发性评价, 并结合实际泥石流点, 采用频率比对评价结果进行精度检验。结果表明: 两种方法得到的易发性分区结果整体分布具有较高的相似性, 攀西地区泥石流高、极高易发区主要分布于中部、南部、东部的断层分布地区及雅砻江、金沙江及其支流两岸。基于确定性系数的确定权重模型的评价精度高于贡献权重模型, 两种模型的评价结果中高易发区及以上级别分别占实际泥石流点总数的 87.5%, 58.22%, 频率比分别为 6.02, 3.71。基于确定性系数确定权重模型的评价结果具有更高的精确性, 该方法能有效进行攀西泥石流易发性评价。

关键词: 泥石流; 易发性评价; 贡献权重叠加模型; 确定性系数模型

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)03-0285-07

Comparative Analysis of Debris Flow Susceptibility Assessment Based on Two Methods in Panxi District

XU Yanqin¹, BAI Shuying^{1,2}, XU Yongming¹

(1. College of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: The assessment of debris flow susceptibility is the basic work of debris flow risk assessment and vulnerability assessment, which can provide the basis for the prediction of debris flow disaster prevention. Taking the Panxi district of Sichuan Province as a study area, the weights of debris flow factor were determined by using contribution weight superposition method (CWS) and the Certainty Factor (CF) method, the multi factor evaluation model is adopted for debris flow susceptibility assessment and mapping, the frequency comparison model combining with the actual debris flow point was used for testing accuracy of the results. The assessment results of the two methods have high similarity to the overall distribution of the zoning results. High and very high prone areas of debris flow mainly distribute in the fault distribution in the central, southern and eastern parts of Panxi District as well as the Yalong River, Jinsha River and its tributaries on both sides. The evaluation accuracy of the deterministic weight model based on CF is higher than that of the contribution weight model. The numbers of debris flow of the two methods in the high prone areas and beyond account for 87.5%, 58.22% of the total number of actual debris flow points, and the frequency ratios are 6.02, 3.71. The assessment result based on method for determining weight by the certainty factor has the higher accuracy, this method can effectively evaluate the debris flow susceptibility of Panxi.

Keywords: debris flow; susceptibility assessment; contribution weight superposition model; certainty factor method

泥石流是发生在山区的包含有水、泥土、岩石的一种特殊洪流,具有流动速度快、冲击力大、运行距离远、破坏力强等特点,通常会对发生区造成巨大损失^[1]。据统计,1950—2011 年全球共发生大型、特大型泥石流灾害 213 次,造成 7.8 万人死亡^[2]。由全国地质灾害通报可知,2006—2016 年中国共发生 1.1 万起泥石流灾害,严重威胁着人民生命财产安全,同时对生态环境造成巨大破坏。选取影响形成泥石流的自然地理因子指标进行泥石流灾害易发性评价具有现实意义,能为研究区泥石流灾害的预测预报及防灾减灾提供科学依据。

泥石流易发性评价常用的因子权重确定方法有专家打分法、层次分析法、模糊综合评判法、加权信息熵法、神经网络法和多元回归方法等^[3-9]。从因子权重确定角度上可以归为两类,一类是依据专家的经验知识对因子赋予权重,另一类是将专家经验知识结合数学统计分析方法得到因子权重。两种方法对比而言,第一种方法主观成分大,使得决策不具有普适性,第二种方法结合了主观经验和客观数据,在确定权重上更为合理,但也存在计算过程复杂、受主观性影响的缺陷。贡献权重叠加模型(CWS)和基于确定性系数(CF)的确定权重模型结构简单,应用方便,避免了主观因素的影响,能客观定量的确定评价因子内及因子间对泥石流灾害的影响权重。本文结合实际选取地质、地形、水系等因素的 7 个因子,采用这两种方法得到攀西地区泥石流灾害易发性及分区,并对模型结果进行精度评价,对比分析两种方法的评价结果,以期对攀西地区泥石流灾害易发性评价提供技术支撑。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

攀西位于四川西南部,包括凉山彝族自治州和攀枝花市,辖区面积 6.7 万 km²。研究区地处横断山脉东北缘,地势上由西北向东南倾斜,地形起伏大;地貌以低中山、中山为主,山地占全区总面积的 70%;地质构造错综复杂,多条大断裂纵横其间,地震频发,岩体结构松散;水系发达,金沙江、雅砻江及其支流密布;气候类型属于亚热带气候,雨旱季分明,夏季降雨集中且多暴雨。区内水能资源、矿产资源、旅游资源、农业资源、生物资源丰富,经济发展以资源开发为主,是我国西部大开发的战略基地,是长江上游重要的生态屏障。

受地形地貌、地质水文、气候等多方面影响,攀西

地区泥石流灾害频发,是长江上游泥石流灾害高度危险区,特别是喜德、德昌、冕宁、盐边、盐源、攀枝花等区县泥石流危害尤为严重,重大泥石流灾害事件有:德昌县群发性泥石流、宁南县群发性泥石流、攀枝花市大田镇泥石流^[10]。

1.2 数据源

研究数据包括地形、地质、地震、泥石流灾害相关数据。地形数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)免费发布的 30 m 空间分辨率 ASTER GDEM 的数字高程数据(DEM),坡度、坡向、河网数据由 DEM 数据衍生而来;地层岩性和断层因子通过 1:250 万中国地质图获取;泥石流灾害数据来自地球系统科学数据共享网西南山地分中心;地震数据来自中国地震信息网(<http://www.csi.ac.cn/publish/main/837/1077/index.html>)的 1:400 万中国地震动峰值加速度区划图。所有数据都经相同的投影变换且数据结构和分辨率统一。

2 研究方法

2.1 评价因子选取

影响泥石流形成的因素多且杂,历史泥石流发生的分布范围、数量等都直接反映了其发育环境的地层岩性、地形地貌、地震动力环境对泥石流的影响和控制作用^[11]。此外在攀西地区,河流水系也对泥石流形成具有重要影响。本文在分析研究区历史实际泥石流灾害发育特征和形成原因的基础上,选取 7 个自然地理因子探讨攀西地区泥石流发生的潜在可能性。

地形在一定程度上决定泥石流灾害发育的空间规律。其中高程与泥石流松散堆积物的分布、降水分布、人类活动强度密切相关,从而间接影响泥石流的发生;坡向不同会导致斜坡体岩石所受物理、风化作用差异较大;坡度是影响泥石流固体物质补给方式、数量和泥石流发生规模的主要因素。

地质构造因素对泥石流发育的控制作用十分明显。其中断裂活动会加剧岩体破坏,同时,崩塌、滑坡也多沿断裂带分布,形成大量松散固体物质,为泥石流活动提供了丰富的物质来源;不同地层岩性成分和结构影响其遭受风化等破坏的难易程度,岩土体是泥石流灾害发育的重要物质基础。

泥石流灾害一般集中在河流沟谷附近,距离河流的远近决定了岩石土体受水体侵蚀作用的强烈,水系的侧蚀作用会导致沿岸坡体失稳,进而容易发生泥石流。地震活动会导致岩石崩裂,直接激发崩塌、滑坡

等次生灾害的发生,增加了松散物质来源。

评价因子的原始数据类型既有定性也有定量的,且变化范围不一致,为方便对泥石流流易发性进行评

价,根据研究区的实际情况结合相关专家的研究经验^[12-14]设置分级标准对评价因子原始数据进行离散化分级,详见表 1。

表 1 泥石流评价因子分级标准

评价因子	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级	7 级	8 级
高程/km	<0.5	0.5~1	1~1.5	1.5~2	2~2.5	2.5~3	3~3.5	≥3.5
坡度	<10°	10°~15°	15°~20°	20°~25°	25°~30°	30°~35°	35°~40°	≥40°
坡向	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
距断层距离/km	<1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	≥7
距河流距离/km	<0.5	0.5~1	1~1.5	1.5~2	2~2.5	2.5~3	3~3.5	≥3.5
地层岩性	第四系	第三系	中生界	上古生界	下古生界	上元古界	下元古界	太古界
地震动峰值加速度/g	0.10	0.15	0.20	0.30	≥0.40			

2.2 确定权重方法

2.2.1 贡献权重模型 贡献权重叠加(Contribution Weight Superposition,CWS)模型已经被多次应用于滑坡危险性、滑坡因子敏感性分析上^[15-16],该模型是乔建平等^[17-18]提出的基于统计已发生历史灾害的因子贡献率,进而计算因子等级自权重和因子间互权重求出泥石流敏感性指数。

构建模型的过程包括:(1)通过分析历史泥石流灾害与因子等级之间的关系,依据公式计算贡献率;(2)对贡献率重分类,通过合并和均值化得到自权重;(3)通过对贡献率等级分级求和并标准化,再对标准化结果均一化得到因子互权重。

贡献率是用来表示因子与泥石流发生概率的关系,贡献率越大表示因子在该条件下发生泥石流的可能性越大。滑坡贡献率计算需要考虑到滑坡面积、体积、数量,而本文参照 mingtao Ding 等^[19]改进后的泥石流贡献权重模型,采取如下公式计算因子的贡献率,自权重及互权重:

$$R_m^i = n_m^i / n \quad (1)$$

式中: R_m^i 表示因子 i 在等级 $m(m=1,2,\dots,8)$ 内对泥石流的贡献率; n_m^i 表示因子 i 在等级 m 内发生泥石流的数量; n 是研究区内发生泥石流的总数。

$$W_i^l = L_i^l / \sum_{l=1}^5 L_i^l \quad (2)$$

$$L_i^l = \sum_{m=1}^8 R_m^i / |L_i^l| \quad (3)$$

通过对因子贡献率求和再均值化后得到因子自权重,式中 L_i^l 是对每一等级单因子进行均值化得到的数列, l 表示贡献等级的数量($l=1,2,3,4,5$), $|L_i^l|$ 是每个贡献率等级的因子个数, W_i^l 是各贡献等级因子自权重。

$$A_i^l = \sum_{m=1}^8 R_m^i \quad (4)$$

$$\bar{A}_i^l = T_i^l / \sum_{l=1}^5 T_i^l \quad (5)$$

$$W^{i,j} = D^{i,j} / \sum_{i=1}^5 D^{i,j} \quad (6)$$

式中: A_i^l 是对每个贡献率等级的和; \bar{A}_i^l 表示对 A_i^l 进行标准化得到的值; $W^{i,j}$ 是因子 i 的互权重值; $D^{i,j}$ 表示因子 i 在贡献等级 l 内的贡献等级标准化后的和。

2.2.2 基于确定性系数的确定权重模型 基于确定性系数(Certainty Factor,CF)的确定权重模型是通过确定性系数方法计算因子的确定性系数值,进而通过各因子确定性系数值叠加相减的方法确定因子权重^[20-21]。

模型建立过程包括三部分,(1)运用确定性系数模型计算各因子的确定性系数值,如公式(7)所示:

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_a(1 - PP_s)} & PP_a \geq PP_s \\ \frac{PP_a - PP_s}{PP_a(1 - PP_s)} & PP_a < PP_s \end{cases} \quad (7)$$

式中:CF为因子的确定性系数值,确定性理论是一种用于随机不确定性的推理模型,确定性系数是一个概率函数,称为可信度,用来分析影响某一事件发生的各单指标的敏感性^[14,22]。取值区间为 $[-1,1]$,正值代表泥石流灾害发生的确定性高,负值代表泥石流灾害发生的确定性低,接近于0值代表不确定泥石流灾害是否发生; PP_a 为因子 a 等级中发生的泥石流灾害个数与等级 a 的面积之比; PP_s 为整体研究区内泥石流灾害个数与研究区总面积之比。

(2)所有影响因子逐级叠加合并CF值,计算所有因子的相对贡献值;合并除某因子外其他所有影响因子的CF值,得到除某因子外的其他所有因子的相对贡献值。

$$Z = \begin{cases} x + y - x \times y & x, y \geq 0 \\ \frac{x + y}{1 - \min(|x|, |y|)} & x \times y < 0 \\ x + y + x \times y & x, y < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: Z 为因子叠加合并后的结果; x, y 表示因子的 CF 值。

(3) 通过相减的方法得到某计算因子的相对贡献值, 最后均一化得到各因子相对权重。

$$T = \sum_{l=1}^5 |Z_{al} - Z_{ml}| \quad (9)$$

式中: T 代表某因子的相对贡献值; Z_{al} 代表所有因子合并后的分段百分比; Z_{ml} 表示除某因子外所有因子合并的分段百分比; $l (l=1, 2, 3, 4, 5)$ 为合并后重分类的等级, 均一化后得到因子权重 \bar{T} 。

代表所有因子合并后的分段百分比, 表示除某因子外所有因子合并的分段百分比, $l (l=1, 2, 3, 4, 5)$ 为合并后重分类的等级, 均一化后得到因子权重。

2.3 泥石流易发性模型

运用 GIS 叠加分析工具, 通过叠加相乘求和求出两种方法计算得到的泥石流灾害易发度 S , 计算公式如下:

$$S_1 = \sum_{i=1}^7 R_i^j \times W_i^i \times W^i \quad (10)$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^7 CF \times \bar{T} \quad (11)$$

式中: S_1 代表基于贡献权重模型的泥石流易发度; R_i^j 为指标每个等级对泥石流发育的贡献率; W_i^i 为指标贡献等级的自权重; W^i 为每个指标的互权重; S_2 代表基于 CF 的确定权重模型的泥石流易发度; CF 代表因子的确定性系数; \bar{T} 表示因子权重; i 表示因子, 共 7 个因子。

2.4 频率比模型

灾害频率比是某级别内泥石流灾害所占总灾害的百分比除以某级别的存在面积比, 能够评价区划级别与实际泥石流点分布的精度。高易发区的频率比值越大, 低易发区的频率比值越小, 表示评价结果越合理。

3 结果与分析

研究区 1949—2008 年实际发生过泥石流灾害的点有 1 519 处, 利用随机抽样方法抽取总数据的 80% (1 215 处) 泥石流数据作为分析样本, 运用贡献率权重叠加模型和确定性系数模型对研究区泥石流影响因素进行分析, 确定各影响因子最有利于泥石流灾害发生的数值区间, 结果见图 1。最后利用泥石流易发度模型得到研究区泥石流易发度, 基于贡献权重模型得到的泥石流易发度值范围为 0.281 7~0.715 0, 基于确定性系数确定权重模型得到的泥石流易发度值范围为 0.007 6~0.133 3。利用自然间断点分级法

重分类得到基于两种方法的泥石流易发性分区, 分为极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区和极低易发区 (图 2, 图 3)。为了检验评价效果, 将泥石流易发性区划图与 304 个泥石流检验数据集叠加, 分别统计各易发性分区面积及其覆盖的泥石流个数, 并计算各级别的频率比, 结果见表 2。

3.1 影响因子对泥石流灾害的贡献分析

分析因子等级的贡献率可知, 攀西地区泥石流灾害频发高程范围在 1~2.5 km, 其中 1~2 km 对泥石流灾害的贡献率最高; 而通过因子 CF 值则发现低于 2.5 km 的高程范围对泥石流灾害发生的确定性高。高贡献率区间范围内的坡向为东北、西南、东、南向; 其 CF 值表明泥石流易发坡向为东北、南、西南、西坡坡向, 而北坡和西北坡发生泥石流的概率较低。两种方法都表明坡度小于 15° 或介于 25°~30° 的山地更易于导致泥石流灾害发生, 而坡度大于 40° 的区域发生泥石流灾害的可能性极低。

通过断层因子贡献率值和 CF 值可知, 对泥石流的主要影响范围为距断层 0~2 km, 距断裂带距离大于 2 km 外, 其 CF 值均为负值, 表明发生泥石流的确定性很小。两种方法所得到的地层岩性分类对泥石流灾害的影响有很大差异, 因子贡献率表明中生界时期的地层岩性更易于发生泥石流灾害, CF 值则表明泥石流灾害主要发生在第四系和下元古界的地层。从岩石性质上来讲, 这 3 种地层岩性都易于发生泥石流。

最易于发生泥石流灾害的区域为距河流 0~0.5 km 范围内, 距河流越远对泥石流的贡献作用越小, 距河流 2.5 km 外, 发生泥石流的可能性很小。地震动峰值加速度表示地震时地面运动的加速度, 可以作为确定烈度的依据, 其值越大表明地震烈度越强。地震因子 CF 值表明地震动峰值加速度值大于等于 0.2 g 时, 发生泥石流的确定性大, 且地震动峰值加速度值越大, 越易于发生泥石流灾害。

3.2 基于贡献权重模型的泥石流易发性评价结果与分析

极高易发区的面积 (8 623.99 km²) 仅占研究区总面积的 12.80%, 覆盖泥石流点个数最多, 占检验泥石流点总数的 31.25%; 高易发区和中易发区内泥石流个数一致, 占泥石流点总数的 26.97%; 低易发区内覆盖的泥石流点个数占泥石流总个数的 11.51%; 而极低易发区内分布的泥石流比例仅为 3.29%, 58.22% 的历史泥石流灾害点分布在极高易发区和高易发区内。频率比能够评价区划级别与实际泥石流

点分布的精度,频率比值越大,表示评价结果越合理。易发性级别从低到高的频率比依次为:0.20, 0.56, 0.93, 1.27, 2.44, 从各级别频率比分布来看,易发性区划结果合理(表2)。

从空间分布来看,极高易发区、高易发区主要分布于断裂带两侧,中易发区主要集中分布于木里县、盐源县、喜德县内的距断裂带距离较远的地区,低易发区和极低易发区分散分布于无断层区域。

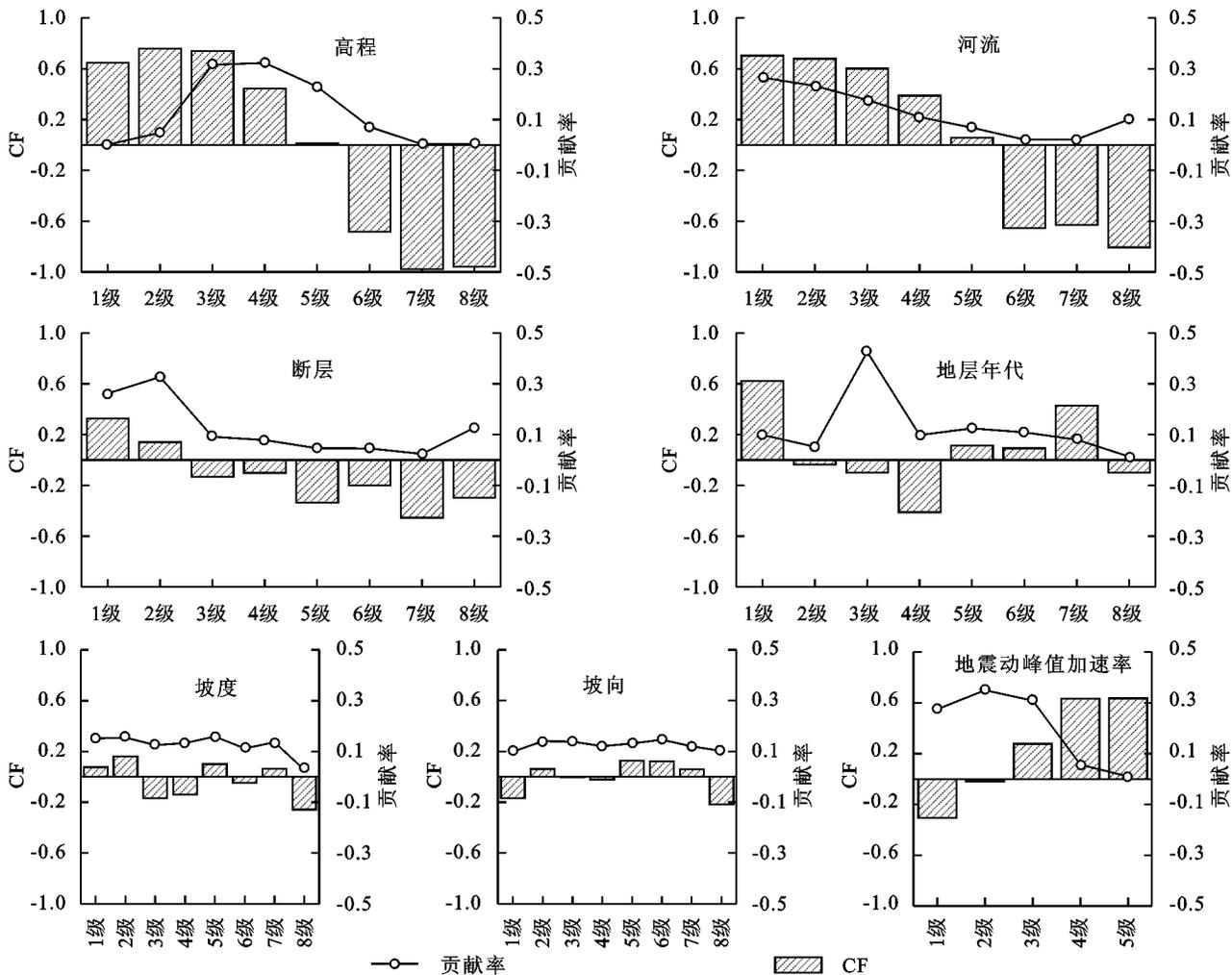


图1 各评价因子不同级别的贡献率及确定性系数

3.3 基于CF确定权重模型的泥石流易发性评价结果与分析

极高易发区面积最小,只占研究区总面积的13.20%,高易发区面积为12 455.63 km²,占总面积的18.49%,极高易发区和高易发区覆盖的泥石流点数占检验泥石流点总数的59.54%,27.96%,频率比分别为4.51,1.51;而中易发区、低易发区、极低易发区内泥石流点个数分别占总检验泥石流点个数的百分比为7.89%,3.62%,0.99%,频率比依次为0.36, 0.15, 0.05, 中易发区面积占研究区总面积的21.94%,低易发区面积占研究区面积比例最大,极低易发区占研究区总面积的比例为21.73%(表3)。

泥石流极高易发区、高易发区主要分布于攀西中部、南部和东部的雅砻江干流、金沙江干流及其支流安宁河,牛日河—黑水河流域,普雄河—越西河—尼

日河流域,昭觉河—西溪河流域,美姑河—留筒河流域的两侧支沟山地及河谷低山区、中低山区。

中易发区大多数分布在木里藏族自治县、喜德县、昭觉县的中高山区且距离断层分布较远的区域。低易发区和极地易发区主要分布于攀西西北的太阳山,安宁河和金沙江之间的大凉山、鲁南山等高山区。

表2 基于CWS模型的易发性区划统计

易发等级	面积/ km ²	面积 百分比/%	泥石流 点数/个	泥石流 百分比/%	频率比
极低易发区	10992.32	16.31	10	3.29	0.20
低易发区	13968.83	20.73	35	11.51	0.56
中易发区	19448.14	28.86	82	26.97	0.93
高易发区	14347.31	21.29	82	26.97	1.27
极高易发区	8623.99	12.80	95	31.25	2.44

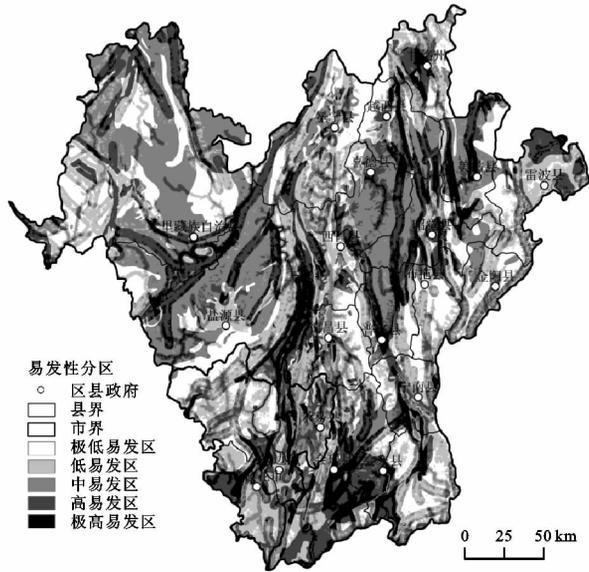


图 2 基于 CWS 的泥石流易发性区划

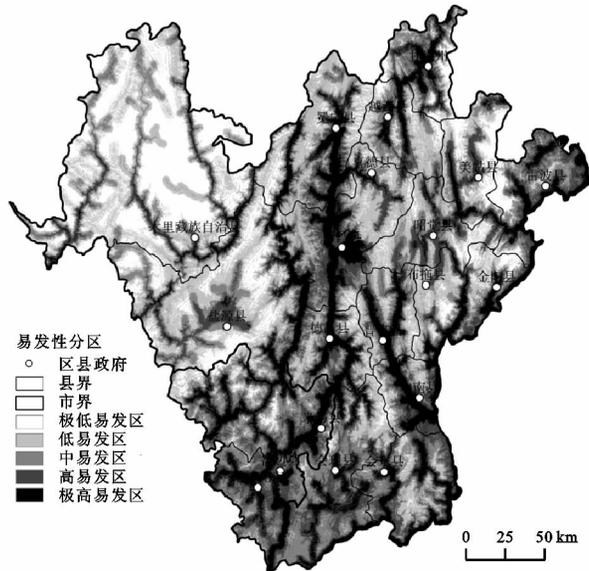


图 3 基于 CF 确定权重模型的泥石流易发性区划

表 3 基于 CF 确定权重模型的易发性区划统计

易发等级	面积/ km ²	面积 百分比/%	泥石流 点数/个	泥石流 百分比/%	频率比
极低易发区	14639.32	21.73	3	0.99	0.05
低易发区	16610.08	24.65	11	3.62	0.15
中易发区	14782.93	21.94	24	7.89	0.36
高易发区	12455.63	18.49	85	27.96	1.51
极高易发区	8893.02	13.20	181	59.54	4.51

4 结论与讨论

通过分析自然地理因子对泥石流灾害的贡献性发现泥石流高易发区的影响因子数值区间为:高程在 1 000~2 000 m;坡度小于 40°;第四系、中生界、下元古界地层;坡向为 NE、SW、E、S;距断层和河流 0~2 000 m 范

围内;地震动峰值加速度大于等于 0.2 g。

两种方法所得出的泥石流易发性区划结果具有空间分布上的一致性和局部的差异性,整体与攀西实际泥石流分布相似。依据易发性分区及各分区内包含的历史泥石流灾害点个数来看,基于 CF 的确定权重模型考虑了因子等级面积与泥石流灾害发生的个数,所得到的易发性评价成果很好的体现了泥石流分布情况,更符合实际结果。基于贡献权重模型所得到的易发性分区面积梯度较好,但中易发区内所含泥石流灾害点个数与较高易发区内所含泥石流点个数一致,没有得到很好的区分。

基于 CF 确定权重模型得到的泥石流极高、高易发区沿攀西中部、南部和东部的断裂带两侧和雅砻江、金沙江及其支流沿岸分布,中易发区大多分布在海拔高且距河流较远地区,低易发区和极低易发区则分布于太阳山、大凉山、鲁南山等高山区,可确定为最终评价结果。

利用两种方法对攀西地区进行泥石流易发性评价,高易发区内灾害点分布广泛,低易发区内灾害点则分布较少,能够综合反映研究区的泥石流灾害分布发育规律,对区域宏观经济规划和灾害防治提供依据。本文主要探讨形成松散堆积物质的自然地理因子对泥石流易发性的影响,未考虑降雨、土地利用等对泥石流易发性的影响,且搜集到的研究区的地质图、地震图等基础数据分辨率较低,影响评价结果的准确性,有待进一步的数据收集以提高评价精度。

参考文献:

- [1] 康志成,李焯芬,马嵩乃,等.中国泥石流研究[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] Dowling C A, Santi P M. Debris flows and their toll on human life: a global analysis of debris-flow fatalities from 1950 to 2011[J]. Natural Hazards, 2014,71(1): 203-227.
- [3] 杨起明,廖化荣,黄显艺.基于 GIS 的地质灾害信息系统的研究[J].西部探矿工程,2006,18(6):283-285.
- [4] 滕继东,任兴伟,刘永林.基于 AHP 法的地质灾害影响因素权重的确定[J].中国水运:理论版,2007,5(4):128-131.
- [5] 王子健,肖盛燮,戴廷利,等.泥石流危险度模糊综合评判方法及应用[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2008,27(5):794-798.
- [6] 刘洋,唐川,冯毅.基于 AHP-信息量法的地质灾害危险性评价[J].地球与环境,2013,41(2):173-179.
- [7] 褚洪斌,母海东,王金哲.层次分析法在太行山区地质灾害危险性分区中的应用[J].中国地质灾害与防治学报.

- 2003,14(3):128-132.
- [8] 向喜琼,黄润秋. 基于 GIS 的人工神经网络模型在地质灾害危险性区划中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,2000,11(3):26-30.
- [9] Jiang W, Rao P, Cao R, et al. Comparative evaluation of geological disaster susceptibility using multi-regression methods and spatial accuracy validation[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017,27(4):439-462.
- [10] 陈艳艳,王学成,唐秀兰. 攀枝花发生特大泥石流灾害中国电信全力抢险保通信[J]. 通信与信息技术,2016(5):33-33.
- [11] 唐川,朱静. GIS 支持下的滇西北地区泥石流灾害评价[J]. 水土保持学报,2001,15(6):84-87.
- [12] 王萌,乔建平. 贡献权重模型在区域滑坡危险性评价中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,2010,21(1):1-6.
- [13] 祁元,刘勇,杨正华,等. 基于 GIS 的兰州滑坡与泥石流灾害危险性分析[J]. 冰川冻土,2012,34(1):96-104.
- [14] 兰恒星,伍法权,周成虎,等. 基于 GIS 的云南小江流域滑坡因子敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(10):1500-1506.
- [15] 吴森,吴彩燕,李素敏,等. 基于本底因素贡献率模型的汶川县滑坡灾害危险性评价[J]. 西南科技大学学报,2013,28(3):28-34.
- [16] 吴森,李虎杰,陈国辉,等. 基于贡献率权重法的区域滑坡影响因子敏感性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2016,27(1):26-31.
- [17] 乔建平,石莉莉,王萌. 基于贡献权重叠加法的滑坡风险区划[J]. 地质通报,2008,27(11):1787-1794.
- [18] 乔建平,王萌. 贡献权重叠加法的滑坡危险度区划研究[J]. 自然灾害学报,2011,20(2):8-13.
- [19] Ding M, Heiser M, Hübl J, et al. Regional vulnerability assessment for debris flows in China—a CWS approach[J]. *Landslides*, 2016,13(3):537-550.
- [20] 刘艳辉,刘传正,唐灿,等. 基于确定性系数模型的地质灾害多因子权重计算方法[J]. 中国地质灾害与防治学报,2015,26(1):92-97.
- [21] 姜雪岩,张淑娟,王治国,等. 基于确定性系数的地质因素套损风险评价方法[J]. 大庆石油地质与开发,2016,35(6):104-108.
- [22] Shortliffe E H. A model of inexact reasoning in medicine[J]. *Mathematical Biosciences*, 1975, 23 (3/4): 351-379.

~~~~~

(上接第 284 页)

- [16] 叶正伟,孙艳丽. 基于 AHP-Topsis 的南通市环境灾害风险评价[J]. 水土保持研究,2013,20(4):230-234.
- [17] 杜挺,谢贤健,梁海艳,等. 基于熵权 TOPSIS 和 GIS 的重庆市县域经济综合评价及空间分析[J]. 经济地理,2014,34(6):40-47.
- [18] 王志新,何俊仕. 基于改进 TOPSIS 法的通辽市水资源利用效益评价[J]. 节水灌溉,2016(1):68-72.
- [19] 欧阳继红,王仲佳,刘大有. 具有动态加权特性的关联规则算法[J]. 吉林大学学报:理学版,2005,43(3):314-319.
- [20] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [21] 张霞,郑郁,王亚萍. 基于灰色关联度的 TOPSIS 模型在秦岭生态功能区水土保持治理效益评价中的应用[J]. 水土保持研究,2013,20(6):188-191.
- [22] 周磊,黄秋昊. 基于灰色关联 TOPSIS 的城市土地效益评价及障碍因子诊断[J]. 水土保持研究,2014,21(4):39-44.
- [23] 张锐,刘友兆. 我国耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(7):945-951.