

文章编号: 1008 - 2786 - (2017) 4 - 000 - 10

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000247

基于水文响应单元的泥石流灾害易发性分区方法

邹 强^{1 2} 唐建喜² 李淑松² 范建容¹

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室/中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所,成都 610041;

2. 西南科技大学环境与资源学院,四川 绵阳 621010)

摘 要: 以水文响应单元和栅格单元为基础评价单元,运用因子贡献率法和信息量法两种评价模型对安宁河流域进行泥石流灾害易发性评价。研究表明,在流域尺度范围内,水文响应单元能够更好体现区域中的微观综合地貌特征,切合区域整体性描述;基于水文响应单元的易发性分区不仅与历史泥石流实际分布情况的契合度较高,而且数学模型方法适应效率较高和区内孕灾条件体现更为明显。由此,建立基于水文响应单元泥石流灾害易发性分区对探求流域尺度范围内泥石流灾害易发性分区方法与评价制图是一个有益的尝试与拓展,可为制定减灾防灾决策提供科学参考。

关键词: 水文响应单元;泥石流;信息量模型;易发性;分区方法

中图分类号: P694

文献标志码: A

近年来,我国发生数次重大泥石流灾害^[1-3],不仅给国家带了巨大的经济损失,同时给人们带了沉重的灾难。通过分析泥石流易发性,即以基础地质环境条件(内在控制因素)为出发点,分析泥石流在相对稳定的孕灾环境中发生的可能性大小^[4],并完成易发性分区,可为泥石流灾害预测与风险防范提供决策支持。

泥石流灾害易发性评价研究起源于 20 世纪 70 年代,主要由专家打分对其进行判断和评价^[5]。20 世纪 80 年代开始,学者们将数理统计方法逐渐应用于地学领域,从灾害成灾机理和数学物理原理角度对泥石流预测进行研究^[6-9],逐渐从定性分析向定量分析转变。90 年代后,伴随着 GIS 技术与高精度岩土物理模型的应用推广,国内外研究者在泥石流灾害评估方面深入研究,相继取得一些具有代表意义的研究成果^[10-14]。

复杂的孕灾环境使得当前泥石流灾害易发性评价缺乏统一的评价标准和技术规范。随着我国泥石流演化机理与灾害评价分区工作的深化与普及,探究针对泥石流分布广、人口集中的区域泥石流灾害易发性评价分区方法显得愈加迫切与重要。本文从水文学角度出发,结合 GIS 理论技术,以水文响应单元和网格单元为分区单元,综合考虑泥石流灾害发生所需的物质、能量和环境影响方面的影响因素,运用因子贡献率法和信息量法两种常用模型对研究区进行易发性分区,研究评价单元划分对易发性评价结果的影响及其数学模型运算效率,探讨更好适合流域尺度的泥石流灾害易发性分区方法。

1 研究区概况

安宁河流域地处青藏高原东缘,是雅砻江的一

收稿日期(Received date): 2016-09-08; 改回日期(Accepted date): 2016-11-16

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金重点基金项目(41401598); 数字制图与国土信息应用工程国家测绘地理信息局重点实验室开放基金资助项目(DM2016SC03); 四川旅游发展研究中心项目(LYM12-11); 四川省科技支撑项目(2014SZ0163)。[Key Project of National Natural Science Foundation of China (41401598); Research Foundation of Key Laboratory of Digital Mapping and Land Information Application of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation [DM2016SC03]; Program of Sichuan Tourism Development Research Center [LYM12-11]; Science and Technology Programs of Sichuan Province [2014SZ0163]

作者简介(Biography): 邹强(1982-) 男,副教授,主要从事山地灾害与 GIS 研究。[Qiang Zou (1982-): male, associate professor, research on mountain hazards and GIS.] E-Mail: zouqiang@imde. ac. cn.

条支流,发源于凉山州冕宁县北部牦牛山与小相岭之间。流域呈狭长形状,南北长约 250 km,东西宽 25 ~ 75 km,面积 $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。流域最高点 4791 m,位于最高峰为越西县与冕宁县交界的钊头尖山,最低点 974 m,位于流域西南河谷。受地质构造控制,流域总体地势北高南低,西高东低,呈 SN 向延伸。流域地貌以剥蚀侵蚀高山和中山为主,中游沿河两岸多为堆积河谷平原与山间断陷盆地^[15]。

安宁河流域,地处康滇地轴中段与北段,是安宁河断裂带的核心区域,隶属康滇南北向构造带^[16]。区内地质构造作用强烈,推覆体内部的次级褶皱发育,断层活跃,岩体破碎,除石炭系、志留系和第三系缺失外,其余地层从元古界至新生界均有出露,岩

性有页岩、砂岩、泥岩、岩浆岩,河谷地带和山间盆地覆盖有大量第四系松散堆积物。安宁河断裂带呈南北向贯穿流域,岩体震裂松动,岩石疏松破碎并诱发了大量的崩塌、滑坡,沟道内汇集了大量松散堆积物,也为泥石流发生提供了充分的物源条件。

安宁河流域属中亚热带季风气候区,夏秋多雨,大量裸露的地表在雨水的侵蚀作用下,地表沟壑众多,为泥石流灾害发生提供了有利地形条件。由于流域内地形起伏较大,岸坡陡峻,地质环境条件复杂。加上全球气候变化,极端暴雨天气增加,泥石流极为发育,历史上发生数次大型、特大型泥石流灾害^[17]。据野外调查统计,安宁河流域有泥石流 271 条(图 1),安宁河两岸泥石流分布密度大。

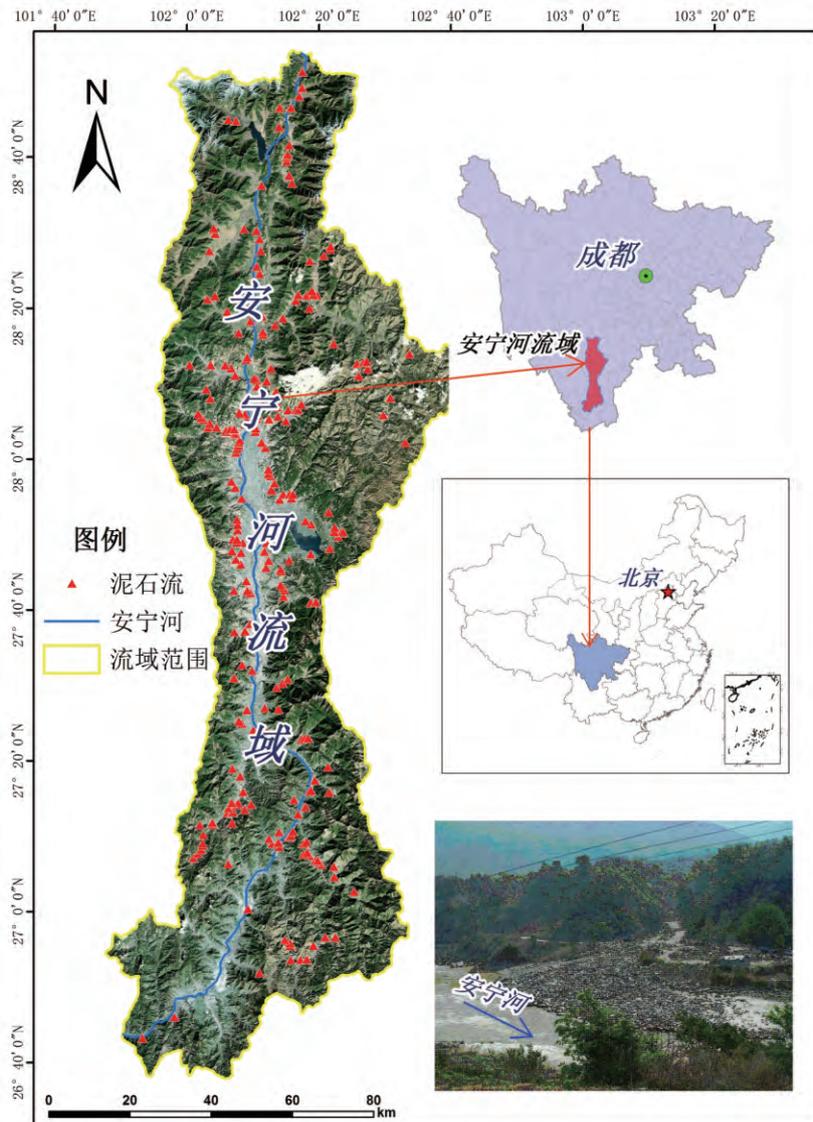


图 1 安宁河流域地理位置及泥石流灾害分布图

Fig. 1 Location of the Anning River basin and debris flows

2 研究方法

2.1 评价单元划分

评价单元不仅是数据处理和计算分析的模型单元,也是最终评价结果图件的基本制图单元。目前,泥石流灾害评价中常用的评价单元的划分方法有网格单元、地貌单元、均质单元、流域单元^[4,18]。本文采用栅格单元和水文响应单元两种形式作为基本评价单元,其中栅格单元即网格单元(本文采用规则的正方形网格,网格大小为 25×25 m),而水文响应单元是指能够有效表现基本水文过程的综合地貌特性的不规则单元。

水文响应单元是基于小型集水地貌区划分的评价单元,能够良好地表现局部区域的地形。本文的水文响应单元的划分以水文学的 D8 流向建模为依据,利用 ArcGIS 软件完成水文响应单元的划分。主要操作步骤包括:①初始 DEM 的洼地填充(图 2);②水流方向确定(图 3);③汇流累积流量计算(图 4);④沟谷提取与编码(图 5);⑤基本汇水单元划分(图 6)。

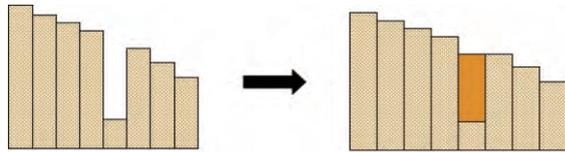


图 2 DEM 填挖操作示意图

Fig.2 Sketch graph of fill operation for DEM

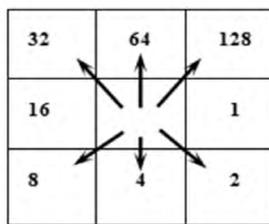


图 3 水流流向编码

Fig.3 Coding of flow direction

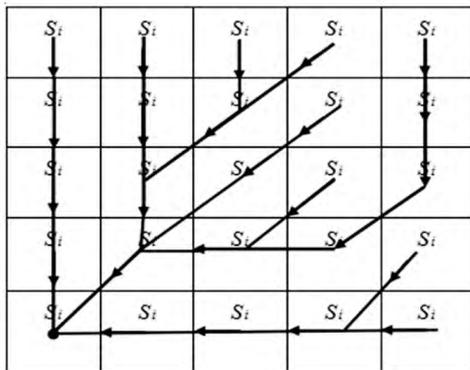


图 4 汇流累积过程

Fig.4 Process of flow accumulation

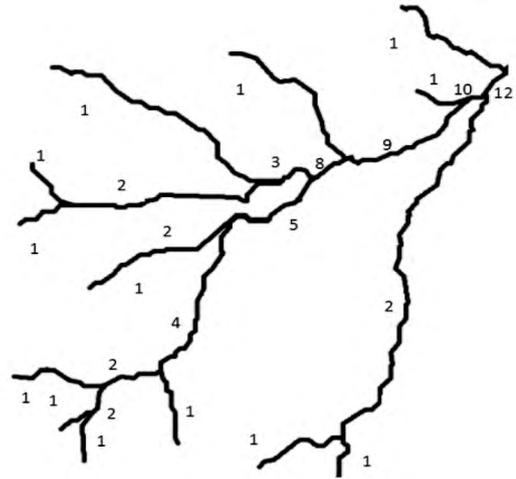


图 5 沟谷分级方法

Fig.5 Classification of ravine



图 6 基本汇水单元示意图

Fig.6 Sketch graph of basic catchment unit

本文的评价单元均基于研究区数字高程模型 (DEM) 数据,综合上述评价单元的生成方法。本文泥石流灾害易发性评价单元划分的流程图如图 7 所示,划分结果如图 8 所示。

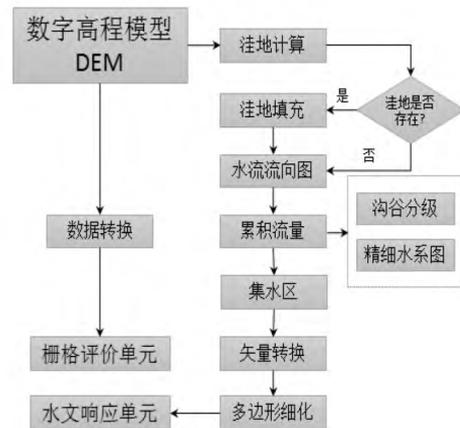


图 7 水文响应单元划分流程图

Fig.7 Flow chart of evaluation unit

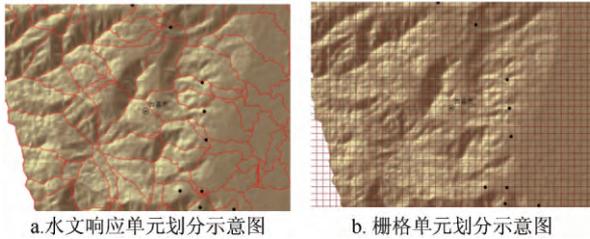


图 8 评价单元划分

Fig. 8 Evaluation units

2.2 评价因子选取

泥石流灾害的发生是一个复杂的系统过程,其影响因素很多,包括地质条件、地形条件、气候条件、水文条件、植被条件和人类活动等,各因素的影响作用也不尽相同。

本文参考泥石流易发性相关文献^[19-21],考虑研究区内泥石流的孕灾背景、发育现状和灾害分布,从泥石流形成与演化的物质条件、能量条件和人类活动影响三个方面出发,选取地形坡度、沟谷密度、工程岩组、地震烈度、距断层距离、土地利用类型等 6 个相对稳定的评价因子构建指标体系(图 9),进而研究泥石流灾害易发性。针对研究区泥石流发生的实际情况,充分考虑资料的可获取性与研究尺度,对评价指标进行量化。地形坡度和沟谷密度可通过 1:50 000 地形图数据处理获取^[22],工程岩组、地震烈度、距断层距离等地质信息可通过研究区地质图提取,土地利用类型可依据研究区土地利用数据,参考第二次全国土地调查技术规程(TDT 1014-2007)进行划分。

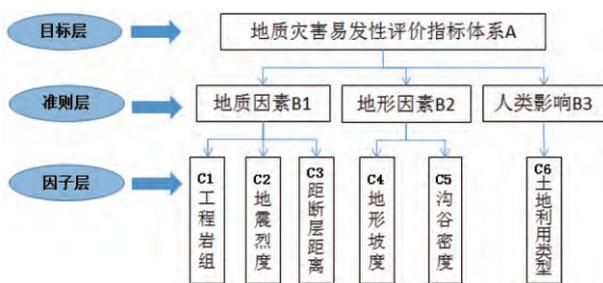


图 9 泥石流灾害易发性评价指标体系

Fig. 9 Susceptibility assessment indicators of Geohazards

本文评价单元有两种类型:栅格单元和水文响应单元。由于两者具有各自的特性,故评价因子量化值的确定要根据基础评价单元的变化做出相应的处理。对于栅格单元,依据评价因子的栅格值确定。与此相应水文响应单元的评价因子有:地形坡度(取水文单元内平均坡度)、沟谷密度(取水文单元

内平均密度)、工程岩组(取水文单元内主要岩性)、地震烈度(取水文单元地震烈度最大值)、距断层距离(取水文单元到断层的平均距离)、土地利用(取水文单元内主要土地类型)。

2.3 易发性评价方法

2.3.1 因子贡献率法

因子贡献率法是一种反映因子对目标对象影响程度的表现方法^[23]。基于因子指标值与贡献权重,计算泥石流灾害易发度,计算公式如下:

$$Sus = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (1)$$

式中, Sus 是泥石流灾害易发性指数, X_i 为各评价指标的归一化值; W_i 为各评价指标的贡献权重。各因子贡献权重采用层次分析法确定^[24],根据 Saaty 的 1-9 标度方法对各因素进行打分,构成判断矩阵,利用数理统计方法,计算判断矩阵的最大特征值 λ_{max} 及对应特征向量,继而对特征向量进行一致性检验(公式 2、3),然后通过归一化处理得到各因子的贡献权重值 W_i (公式 4)。

$$C \cdot I \cdot = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$C \cdot R \cdot = \frac{C \cdot I}{R \cdot I} \quad (3)$$

$$W_i = T_i / \sum_{i=1}^n T_i \quad (4)$$

其中 $C \cdot I \cdot$ 为一致性指标, $C \cdot R \cdot$ 为检验系数, $R \cdot I \cdot$ 为平均随机一致性指标, n 为判断矩阵的阶数。通常在 $C \cdot R \cdot < 0.1$ 时认为判断矩阵的一致性为优。

2.3.2 信息量模型

信息量法是通过现有信息,把区域稳定性的各种影响因素的实测值转化为反映区域稳定性的信息量,表征影响因素对研究对象的影响大小,进而评价研究对象的稳定程度^[25-26]。

基于信息量模型的泥石流灾害易发性评价方法是通过计算已选评价因子信息量来评价影响参数诱发泥石流灾害的难易程度。综合信息量值越大表示区内发生泥石流灾害的可能性越大。信息量的计算表达式为:

$$I(Y, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = \ln \frac{P(Y, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)}{P(Y)} \quad (5)$$

式中: $I(Y, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 为因素组合 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 对泥石流灾害提供的信息量, $P(Y, x_1, x_2,$

x_3, \dots, x_n) 为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 组合条件下泥石流灾害发生的概率; $P(Y)$ 为泥石流灾害发生的概率。

由于制约和影响泥石流发生的环境因子的性质各有差异,对引发灾害的作用大小也不同,故采用单因素信息量来描述泥石流灾害易发程度。信息量模型则可表示为:

$$I = \sum_{i=1}^n I(y, x_i) = \sum_{i=1}^n \ln \left[\frac{N_i/N}{S_i/S} \right] \quad (6)$$

式中: I 为研究区评价单元总的信息量值, n 为参评因子数, $I(y, x_i)$ 为泥石流灾害发生条件下出现 x_i 的信息量, S 为研究区评价单元总面积, S_i 为研究区内含有评价因素 x_i 的总面积, N 为研究区泥石流灾害总数, N_i 为分布在 x_i 因素下泥石流灾害的数量。

3 结果与分析

3.1 指标计算及易发性分区

(1) 因子贡献率的计算

根据因子贡献率模型建立 A - B 判断矩阵(表 1) 中 $\lambda_{\max} = 3$, 对应特征向量为 (0.6667, 0.6667, 0.3333), $CR = 0 < 0.1$, 满足一致性检验, 由公式(4) 得 B1、B2、B3 因子权重分别为 0.4、0.4、0.2。

B1 - C 判断矩阵(表 2) 中 $\lambda_{\max} = 3$, 对应特征向量为(0.8018, 0.2673, 0.5345), $CR = 0 < 0.1$, 满足一致性检验, 由公式(4) 得 C1、C2、C3 因子权重分别为 0.5、0.17、0.33。

B2 - C 判断矩阵(表 3) 中 $\lambda_{\max} = 2$, 对应特征向量为(0.9487, 0.3162), $CR = 0 < 0.1$, 满足一致性检验, 由公式(4) 得 C4、C5 因子权重分别为 0.75、0.25。

对以上获取的目标权重进行归一化处理, 得到最终 6 个因子的综合权重值(表 4), 再依据式(1) 计算研究区泥石流灾害易发度, 分别对水文响应单元和栅格单元进行易发性分区, 得到最终的结果图(图 10)。

表 1 A - B 判断矩阵

Tab.1 A - B judgment matrix

A	B1	B2	B3
B1	1	1	2
B2	1	1	2
B3	1/2	1/2	1

表 2 B1 - C 判断矩阵

Tab.2 B1 - C judgment matrix

B1	C1	C2	C3
C1	1	3	3/2
C2	1/3	1	1/2
C3	2/3	2	1

表 3 B2 - C 判断矩阵

Tab.3 B2 - C judgment matrix

B2	C4	C5
C4	1	3
C5	1/3	1

(2) 因子信息量计算

泥石流灾害因子信息量的获取, 首先对各个因子进行分级, 然后统计各个因子在各级别中的灾害点数, 再计算各个因子的信息量值。栅格单元和水文响应单元的因子量化值见表 5。最后依据式(6) 计算研究区的综合信息量分布图。

分析各个评价单元的计算结果显示, 基于栅格单元的综合信息量值分布在 7 ~ 29 之间, 基于水文响应单元的综合信息量值分布在 11 ~ 27 之间。利用自然断点法对基于不同评价单元的综合信息量值进行重分类, 并划分泥石流灾害易发区(图 10), 其中栅格单元评价结果划分为: 低度易发区 (< 12)、较低易发区(12 ~ 15)、中等易发区(15 ~ 18)、较高易发区(18 ~ 21)、高度易发区(> 21); 水文响应单元评价结果划分为: 低度易发区 (< 12)、较低易发区(12 ~ 14)、中等易发区(14 ~ 18)、较高易发区(18 ~ 20)、高度易发区(> 20)。从易发性评价结果图上可以看出, 研究区的泥石流易发地区主要分布在安宁河主河两岸, 尤其在冕宁至西昌一带、喜德县中东部地区泥石流易发程度较高, 而在流域东北部地区泥石流易发度相对较低。

表 4 评价因子综合因子权重

Tab.4 Weight of influence factors

因子层 C_i	层次 B - C			综合 贡献率
	B1	B2	B3	
C1	0.40	0.40	0.20	0.20
C2	0.50	0	0	0.07
C3	0.17	0	0	0.13
C4	0.33	0.75	0	0.30
C5	0	0.25	0	0.10
C6	0	0	1	0.20

表 5 各因子信息量计算结果与分级表

Tab. 5 Information value of influence factors and its classification

评价因子	分级	信息量计算(栅格单元)			权重排序	信息量计算(水文响应单元)			权重排序
		N_i	S_i	信息量值		N_i	S_i	信息量值	
坡度(°)	<8	189	1605	0.59	4	49	578	0.26	3
	8~15	236	1804	0.70	5	145	1149	0.66	5
	15~20	194	3351	-0.12	3	231	2419	0.38	4
	20~25	79	2929	-0.88	2	189	3203	-0.10	2
	>25	23	1375	-1.360	1	107	3715	-0.82	1
沟谷密度 (km/km ²)	X<35	0	23	0	3	0	4	0	3
	35~40	11	211	-0.22	1	8	164	-0.30	1
	40~45	60	545	0.52	5	47	408	0.57	5
	45~48	158	1956	0.21	4	163	1651	0.42	4
	X>48	492	8328	-0.10	2	503	8836	-0.14	2
地震烈度(度)	X<6	0	0	0	2	0	0	0	3
	6~7	106	1468	0.10	4	106	1361	0.18	4
	7~8	236	2961	0.20	5	236	2723	0.293	5
	8~9	0	0	0	3	0	0	0	2
	X>9	379	6635	-0.13	1	379	6980	-0.18	1
距断层 距离(km)	X<5	549	8090	0.04	4	547	5101	0.50	5
	5~10	85	1772	-0.31	1	84	2977	-0.84	1
	10~15	52	829	-0.02	2	58	1500	-0.52	3
	15~20	35	373	0.36	5	32	853	-0.56	2
	X>20	0	0	0	3	0	0	0	4
土地利用 类型	水体	3	52	-0.11	2	1	45	-1.086408	1
	滩地/河渠	9	81	0.53	4	4	27	0.81	5
	居住用地	189	1143	0.93	5	119	1071	0.53	4
	草地	277	6508	-0.43	1	389	7087	-0.17	2
	山区	243	3280	0.13	3	208	2833	0.12	3
岩性	软	146	2919	-0.26	2	152	2973	-0.24	2
	较软	17	217	0.18	3	15	180	0.24	3
	中等	148	1802	0.23	4	170	1762	0.39	5
	较硬	254	2605	0.40	5	221	2616	0.26	4
	硬	156	3521	-0.39	1	164	3532	-0.34	1

注: 表 6 中其 N_i 分布在评价因素内的灾害数 S_i 为分级区域面积。

3.2 评价结果与比较分析

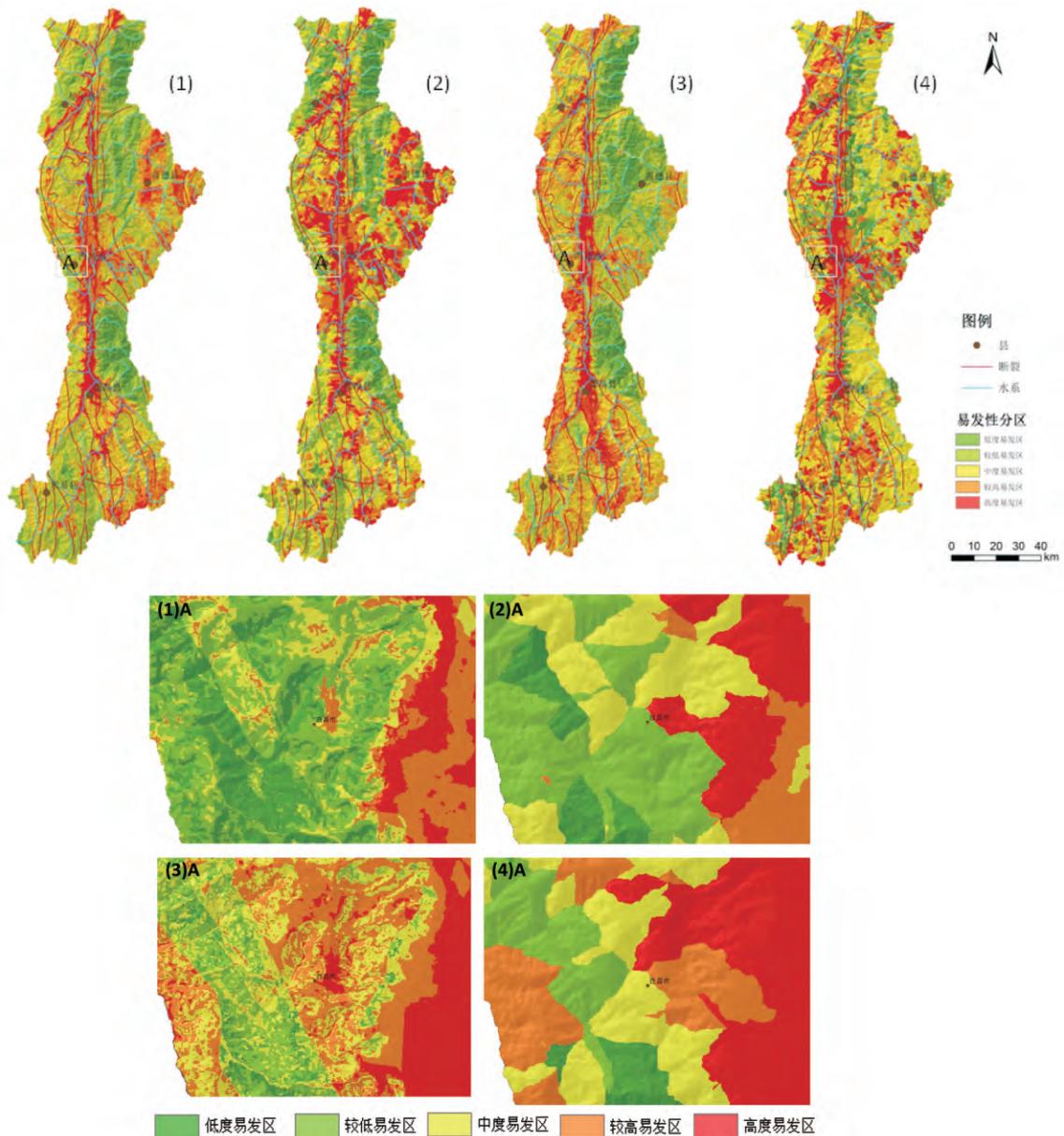
(1) 历史灾害在分区结果中的契合度分析

对 4 种分区结果与已有泥石流灾害分布情况进行空间比对, 利用已有灾害在各易发区内所占灾害总数的百分比来描述分区结果的契合度。其中, 以栅格单元为基础评价单元的分区结果中, 基于因子贡献率法与信息量法的分区结果中分别有 80.83%、77.07% 的泥石流灾害分布在中等、较高和高度易发区; 以水文响应单元为基础评价单元的分区结果中, 基于因子贡献率法与信息量法的分区结

果中分别有 84.96%、89.10% 的泥石流灾害分布在中等、较高和高度易发区(图 11)。由此可见, 以水文响应单元为基础评价单元的易发性分区结果更能体现实际灾害的分布情况, 分区等级与泥石流灾害分布契合度更高。

(2) 数学模型方法的适用效果分析

利用 GIS 工具分别对以栅格单元和水文响应单元为基础评价单元的分区结果进行比较。基于栅格单元的易发性分区结果中, 基础评价单元合计 12 293 077 个; 从因子贡献率法与信息量法评价结果



(1)、(3) 栅格单元; (2)、(4) 水文响应单元; (1)、(2) 信息量法; (3)、(4) 因子贡献率法。

图 10 研究区易发性分区图

Fig. 10 Susceptibility map of the study area

中,分别统计各级易发区占全区评价单元的百分比(表6),其中,两种评价结果之间具有相同易发等级的评价单元9133757个,占总单元数的74.3%。同理,基于水文响应单元的易发性分区结果中,基础评价单元合计6641个,其中,具有同等分级的评价单元5459个,占总单元数的82.2%。综合上述统计结果表明,以水文响应单元为基础单元,运行效率较高,两种数学模型计算结果的重合度更高,数学模型的适用效果更好。

(3) 对微地貌特征的体现情况分析

栅格形状规则,大小均匀,有利于实现评价单元的快速划分和进一步运算,但它不能完全反映地表起伏形态,并且与地理环境条件联系不够紧密。相对栅格单元而言,水文响应单元是根据基本集水地貌单元作为划分依据,划分科学性更强,区内地形地貌、地质条件整体性更为完整,对区内孕灾条件的体现更为明显。

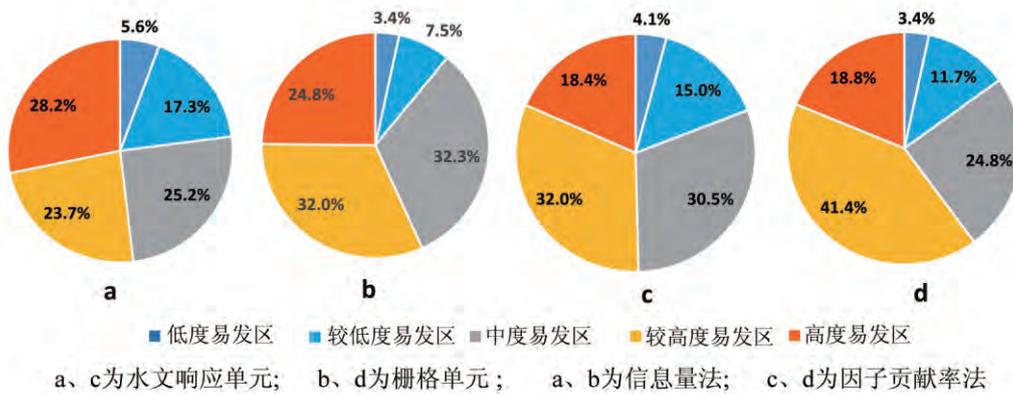


图 11 泥石流灾害在各易发区的分布比例图

Fig. 11 Distribution proportion of debris flows in each susceptibility zonation

表 6 各级易发区评价单元统计表

Tab.6 Statistical results of each susceptibility zonation

评价单元 分区类别	水文响应单元				栅格单元			
	信息量法		因子贡献率法		信息量法		因子贡献率法	
	评价单元数	百分比	评价单元数	百分比	评价单元数	百分比	评价单元数	百分比
低度易发区	432	6.5	299	4.5	1069 498	8.7	1696 445	13.8
较低度易发区	883	13.3	930	14.0	1487 462	12.1	1868 548	15.2
中度易发区	2331	35.1	1879	28.3	3331 424	27.1	4265 698	34.7
较高度易发区	2178	32.8	2431	36.6	4179 646	34.0	3356 010	27.3
高度易发区	817	12.3	1102	16.6	2225 047	18.1	1106 377	9.0

4 结论

(1) 以安宁河流域为研究区, 论文探讨了分别以水文响应单元与传统栅格单元为基础评价单元划分方法。结果显示, 在流域尺度范围内, 水文响应单元以基本集水地貌区为划分单元, 较传统栅格评价单元, 能够更好地体现出区域中的微观综合地貌特性, 对区域整体性描述更为切合实际。

(2) 构建以地形坡度、沟谷密度、工程岩组、地震烈度、距断层距离、土地利用等 6 个因子为基础的易发性评价指标体系, 以因子贡献率法与信息量模型为评价方法, 探究了研究区易发性。结果表明, 在 4 种泥石流灾害易发性分区结果中, 中度及以上易发区占比皆在 77% 以上, 说明研究区泥石流灾害易发程度较高, 泥石流灾害活动频繁, 应给予重点防治。

(3) 相对于传统栅格评价单元的评价分区方法而言, 基于水文响应单元的区域泥石流灾害易发性分区结果与研究区泥石流灾害分布情况更加吻合,

灾害易发区划分的层次表现力更强, 数学模型方法的适用效率也相对更佳。

可见, 该评价方法在泥石流灾害易发性评价工作中具有良好的适用性与合理性, 在流域尺度范围内泥石流灾害易发性分区方法与评价专题制图是一个有益的尝试与拓展。

参考文献(References)

- [1] CUI P, CHEN X Q, ZHU Y Y, et al. The Wenchuan Earthquake (May 12, 2008), Sichuan Province, China, and resulting geohazards [J]. *Natural Hazards*. 2011, 56: 19 - 36.
- [2] 刘传正, 苗天宝, 陈红旗, 等. 甘肃周县 2010 年 8 月 8 日特大山洪泥石流灾害的基本特征及成因 [J]. *地质通报*, 2011, 30 (1): 141 - 150. [LIU Chuazheng, MIAO Tianbao, CHEN Hongqi, et al. Basic feature and origin of the "8 · 8" mountain torrent-debris flow disaster happened in Zhouqu County, Gansu, China, Aug. 8, 2010 [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30 (1): 141 - 150.]
- [3] 彭亮, 马兴华, 金家琼, 等. "4 · 14" 玉树地震断裂带对震后地质灾害影响作用分析 [J]. *自然灾害学报*, 2014, 23 (5): 78 - 83. [PENG Liang, MA Xinghua, JIN Jiaqiong, et al. Analysis of influence of "4. 14" Yushu earthquake fault zone on post-earthquake

- geological disasters [J]. Journal of Natural Disasters. 2014, **23** (5): 78 – 83.]
- [4] 唐川, 马国超. 基于地貌单元的小区域地质灾害易发性分区方法研究[J]. 地理科学, 2015, **35**(1): 92 – 97. [TANG Chuan, MA Guochao. Small regional geohazards susceptibility mapping based on geomorphic unit [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, **35**(1): 92 – 97.]
- [5] ALEOTTI P, CHOWDHURY R. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1999, **58**(1): 21 – 44.
- [6] CARRARA A. Multivariate models for landslide hazard evaluation [J]. Mathematical Geology, 1983, **15**(3): 403 – 426.
- [7] MONTGOMERY D. R, DIETRICH W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding [J]. Water Resource Research, 1994, **30**(4): 1157 – 1171.
- [8] 程尊兰, 朱平一, 刘雷激. 泥石流活动与雨强的关系——以雅砻江下游金龙沟为例[J]. 自然灾害学报, 1998, **7**(1): 118 – 120. [CHENG Zunlan, ZHU Pingyi, LIU Leiji. The relationship between debris flow activity and rainfall intensity [J]. Journal of Natural Disasters. 1998, **7**(1): 118 – 120.]
- [9] RICKENMANN D. Empirical relationships for debris flows [J]. Natural hazards, 1999, **19**(1): 47 – 77.
- [10] 刘希林, 唐川. 泥石流危险性评价[M]. 北京: 科学出版社, 1995. [LIU Xilin, TANG Chuan. Debris flow hazard assessment [M]. Beijing: Science Press, 1995.]
- [11] CONOSCENTI C, DI Maggio C, ROTIGLIANO E. GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily Italy [J]. Geomorphology, 2008, **94**(3 – 4): 325 – 339.
- [12] OHLMACHER G C, DAVIS J C. Davis. Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA [J]. Engineering Geology, 2003, **69**(3 – 4): 331 – 343.
- [13] PACHAURI A K, ABHIRUP Chatterjee, REETA Gaur. Enveloping relief surfaces of landslide terrain [J]. Journal of Mountain Science, 2007, **3**(9): 203 – 208.
- [14] 刘斌涛, 陶和平, 刘邵权, 等. 川滇黔接壤地区自然灾害危险度评价[J]. 地理研究, 2014, **33**(2): 225 – 236. [LIU Bintao, Tao Heping, Liu Shaoquan, et al. Assessment and analysis of natural hazards danger degree in the Sichuan – Yunnan – Guizhou bordering area of Southwest China [J]. Geographical Research, 2014, **33**(2): 225 – 236.]
- [15] 李秀珍, 刘希林, 苏鹏程. 四川凉山州安宁河流域泥石流危险性评价[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, **25**(4): 426 – 430. [LI Xiuzhen, LIU Xilin, SU Pengcheng. Assessment on regional debris flow Hazardousness of Anning River valley in Liangshan prefecture, Sichuan [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering. 2005, **25**(4): 426 – 430.]
- [16] 四川省西昌市志编纂委员会. 西昌县志[M]. 成都: 四川人民出版社, 1996. [City annals compilation committee of Xichang in Sichuan province. County annals [M]. Chengdu: Sichuan people's Publishing House, 1996.]
- [17] 常晓军, 丁俊魏, 伦武, 等. 四川安宁河流域地质灾害发育分布规律浅析[J]. 地质学报, 2008, **28**(1): 35 – 40. [CHAO Xiaojun, DING Junwei, LUN Wu, et al. Development of geological hazards in the Anning River valley, Sichuan [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, **28**(1): 35 – 40.]
- [18] 王晓朋, 潘懋, 徐岳仁. 基于流域单元的泥石流区域危险性评价[J]. 山地学报, 2006, **24**(2): 177 – 180. [WANG Xiaopeng, PAN Mao, XU Yueren. Debris flow hazard zonation based on catchment-unit [J]. Journal of Mountain Science, 2006, **24**(2): 177 – 180.]
- [19] 唐川. 云南怒江流域泥石流敏感性空间分析[J]. 地理研究, 2005, **24**(2): 178 – 185. [TANG Chuan. Susceptibility spatial analysis of debris flows in the Nujiang River Basin of Yunnan [J]. Geographical Research, 2005, **24**(2): 178 – 185.]
- [20] CASCINI L. Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales [J]. Engineering Geology, 2008, **102**: 164 – 177.
- [21] 邹强, 王青, 刘延国. 基于 GIS 与 Logistic 模型的公路泥石流易发性分析方法[J]. 水土保持通报, 2014, (34) 3: 185 – 189. [ZOU Qiang, WANG Qing, LIU Yanguo. A debris-flow susceptibility evaluation method using GIS and Logistic Model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, (34) 3: 185 – 189.]
- [22] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2012. [TANG Guoan, YANG Xin. ArcGIS spatial analysis of Geographic Information System textbook [M]. Beijing: Science press, 2012.]
- [23] 乔建平, 朱阿兴, 吴彩燕, 田宏岭. 采用本底因子贡献率法的三峡库区滑坡危险度区划[J]. 山地学报, 2006, **24**(5): 569 – 573. [QIAO Jianping, ZHU Axing, WU Caiyan, et al. Bottom factors applied to the zoning study of the risk levels of landslides in Three Gorges reservoir area [J]. Journal of Mountain Science, 2006, **24**(5): 569 – 573.]
- [24] SAATY T L. The analytic hierarchy process [M]. New York: McGraw – Hill, 1980.
- [25] 邹强, 崔鹏, 杨伟. G318 川藏公路段泥石流危险性评价[J]. 山地学报, 2013, **31**(3): 342 – 348. [ZOU Qiang, CUI Peng, YANG Wei. Hazard assessment of debris flows along G318 Sichuan-Tibet Highway [J]. Journal of Mountain Science, 2013, **31**(3): 342 – 348.]
- [26] 高克昌, 崔鹏, 赵纯勇, 等. 基于地理信息系统和信息量模型的滑坡危险性评价——以重庆万州为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(5): 991 – 996. [GAO Kechang, CUI Peng, ZHAO Chunyong et al. Landslide hazard evaluation of Wanzhou based on GIS information value method in the Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(5): 991 – 996.]

Susceptibility Assessment Method of Debris Flows Based on Hydrological Response Unit

ZOU Qiang^{1,2,*}, TANG Jianxi², LI Shusong², FAN Jianrong¹

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process/Institute of Mountain Hazards
and Environment, Chinese Academy of Sciences (CAS), Chengdu 610041, China;

2. School of Environmental and Resource, Southwest University of Science and Technology,
Mianyang 621010, Sichuan, China)

Abstract: In this article, an improved method with combination of grid cell and hydrological response unit as basic evaluation unit was introduced into our improved model to assess the susceptibility of debris flow at the Anning River basin. Information value method and contribute rate method were adopted in the susceptibility assessment model. The results confirmed that at watershed scale, susceptibility zones developed from this assessment model with hydrological response unit not only showed high consistence with the actual debris flow distribution but also agreed better with the regional geographical description as well as the micro geomorphologic characteristics of such area. In addition, the improved assessment model showed better calculation efficiency and well reflected the hazard fostering conditions. Thus, the proposed method is an effective improvement of debris flow susceptibility assessment at watershed scale and it also provide scientific support to disaster reduction and prevention.

Keywords: hydrological response unit; debris flow; information value model; susceptibility; zoning method