

基于GIS的模糊数学模型在泥石流 敏感性评价中的应用

王毅¹ 唐川¹ 李为乐¹ 何楚²

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要: 以四川省汶川县为典型研究区, 采用GIS技术与层次分析法、模糊数学等数学模型相结合的方法, 进行了泥石流敏感性评价研究。选取流域高差、沟壑密度、沟道坡度、主沟纵比降、崩滑体核密度强度、年最大日降雨量等6个指标作为评价因子, 构建了泥石流敏感性评价指标体系。采用模糊综合评判法对汶川县160条泥石流的敏感性进行了评价, 利用ARCGIS空间分析功能求出了每个因子对上一级的隶属度图层。最后根据最大隶属度原则, 选取每个流域上泥石流的敏感性隶属度的最大值作为该流域单元泥石流的敏感性等级。检验分析表明, 评价的泥石流敏感性空间分布与实际调查结果较为吻合。

关键词: 泥石流; 模糊数学; GIS技术; 层次分析法; 敏感性评价

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

Application of GIS-based fuzzy mathematics model to sensitivity evaluation of debris flow

WANG Yi¹, TANG Chuan¹, LI Weile¹, HE Chu²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. College Of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: In order to establish a model to evaluate the sensitivity of the debris flow, we took Wenchuan County of Sichuan Province as a typical study area, then derived a mathematical model that combines concepts of GIS technology, analytic hierarchy process and fuzzy mathematics. Basin relief, ravine density, channel slope, longitudinal specific drop of major gully, crumble-sliding body's kernel density and the maximum daily rainfall amount in a year were chosen as evaluation indices to build debris flow susceptibility evaluation index system. Fuzzy comprehensive evaluation method was used to evaluate the sensitivity of 160 debris flow in Wenchuan County, we took advantage of ARCGIS's space analysis function to calculate the membership degree of each layer for factors. Finally, according to the maximum membership principle, we chose the maximum membership degrees of debris flow in each watershed as the watershed unit's debris flow susceptibility level. Check analyses show that the evaluated spatial distribution of the susceptibility coincides with the investigated results in filed.

Keywords: debris flow; fuzzy mathematics; GIS technology; analytic hierarchy process; susceptibility analysis

收稿日期: 2016-05-10; 修回日期: 2016-07-05

基金项目: 科技部科技基础性专项课题(2011FY110100); 中国地质调查局项目(12120113009900); 国家重点实验室团队项目(SKLG2012Z002)

Supported by: The Basic Work of Science and Technology Special (Grant No. 2011FY110100); Project of China Geological Survey(Grant No. 12120113009900); State Key Laboratory of Team Project(Grant No. SKLG2012Z002)

作者简介: 王毅(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害风险评价、遥感与GIS应用研究. E-mail: 624844957@qq.com

泥石流是由土、石等固体物与水混合,在重力作用下,沿陡峻沟坡运动的饱和流体^[1],是山区地震后易发生的主要次生灾害种类之一,属于突发性地质灾害。由于泥石流发生时速度快,破坏力大,常给人类的生命财产带来巨大损失。在地震的作用下,大量的崩塌滑坡堆积于沟道内,这些松散物源往往会在后续降雨影响下,进一步失稳转换为泥石流物源。地震对地质环境的影响是长期的,例如,唐川^[2]在总结了台湾集集地震与日本关东地震震后次生地质灾害发育规律的基础上,预测汶川地震后的 10~15 a 内,滑坡、泥石流等灾害将处于高峰爆发期。黄润秋^[3]提出,震后汶川灾区的地质灾害活跃期将持续 20~25 a,且在这段时间内,将以群发性泥石流为主,滑坡等灾害次之,且地质灾害将以 4~5 a 一个高峰为周期,呈震荡式衰减下降,最终恢复到地震前的水平。

由于泥石流的形成条件受到了很多因素的影响,且对于泥石流敏感性来说,敏感性与各因子之间又具有多样性,可变性和不确定性的特点,而模糊数学对于处理这类难以给出精确化的事物提供了新的思路,因此,不少学者将模糊数学模型引入泥石流敏感性的研究,利用模糊综合评判法来对泥石流的敏感性做出评判,并取得了一定的有效成果^[4-5]。

但从目前利用模糊数学模型进行泥石流研究的应用深度和广度来讲,一方面在进行模糊评判时,对于各评价因子采用一级评判。然而对于像泥石流这种由多因素构成的,且各因素之间往往有层次之分的复杂系统,一级评判难以比较出系统中因素间的优劣次序,并不能满足评价结果需求,得不到有意义的评判结果。另一方面,在运用模糊数学模型进行泥石流评价时,都是小范围小区域的定量评价,倘若进行大范围的区域型泥石流评价,模糊数学则会导致计算量与工作量巨大,十分不便,并且最终结果也不直观呈现。为弥补以上诸多不足,本文采用多级模糊评判法,集成 GIS 空间分析技术与层次分析法、模糊数学等数学模型,将模糊数学中繁琐的函数计算全部在 ARCGIS 中进行实现,使数学模型智能化,也使得最终评价结果能更为直观的呈现出来。针对震区当地情况,用崩滑体灾害核密度强度用来描述泥石流物源状态,以此奠定泥石流敏感性评价的基础,并通过与当地实际调查结果进行对比,吻合程度较高。

1 研究区概况

汶川县是川西北高原和成都平原之间的交通要道,地处我国西南地区的四川盆地西北部边缘,隶属于阿坝藏族羌族自治州,地理坐标为 30°45'N-31°43'N 与 102°51'E-103°44'E 之间,全县面积 4 085 km²。境内以高中山地貌为主,且地势呈西北—东南倾斜,山脉构成了全县地形的主要骨架,龙门山脉控制了汶川县东北部地形,邛崃山系控制了汶川县西南部的地形,境内相对高差悬殊巨大,地形较为复杂。县内主要发育着两大断裂带:茂汶断裂带和北川—映秀断裂带。茂汶断裂带:是一条北东走向的压性大断裂,是龙门山构造带发震断裂之一。北川—映秀断裂带是一条压扭性斜冲大断层,是汶川地震的发震断裂,汶川县境内北川—映秀断裂中的次级断裂构造规模大,呈北东向平行于主断裂展布。地层在汶川县境内发育较为完整。但是汶川县域地质构造复杂,岩性及工程地质岩组特性空间变化复杂,第四纪松散堆积物及强风化岩浆岩在该区域呈广泛分布,地质灾害孕育条件充足。加之汶川地震的影响,使得地质环境极为脆弱,崩塌、滑坡极度发育。由此可见,对该区域进行敏感性评价具有十分重要的现实意义。

2 评价方法

2.1 泥石流敏感性评价数学模型

模糊综合评价法是以模糊数学为基础,在处理泥石流这类具有较多模糊因素的地质灾害上有一定的优势。其评判模型基本步骤如下^[6-7]:

设汶川县 n 条泥石流沟为待评价对象,则这 n 条泥石流沟构成对象集 X :

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}. \quad (1)$$

(1) 首先,给定影响泥石流敏感性因素集合 U ,将 U 按属性 c 划分成 m 个子集,使他们满足如下条件

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m U_i = U, \\ U_i \cap U_j = \emptyset (i \neq j); \end{cases} \quad (2)$$

从而得到了第二级评判因素集合

$$U/c = \{ U_1, U_2, \dots, U_n \}; \tag{3}$$

式中 $U_i = \{ u_{ik} \} (i=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n_k)$ 表示子集 U_i 中含有 n_k 个评判因子。

(2) 其次, 对于因素集 U/c 中的每一个子集 U_i 的因子, 按照单层次模糊综合评判模型进行评判。若因素子集 U_i 的权重为模糊子集 A_i , 计为: $A_i = \{ a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in} \}$, 其评判矩阵为 R_i , 则可得到第 i 个子集 U_i 的综合评判结果

$$B_i = A_i \cdot R_i = \{ b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in} \}. \tag{4}$$

(3) 将 U/c 中的 m 个评判因素子集 $U_i (i=1, 2, \dots, m)$ 进行综合评判, 其评判决策矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mn} \end{bmatrix}. \tag{5}$$

若因素集 U/c 中的各评判因素子集的权重为 A , 则可得到综合评价结果向量 $B = A \cdot R$ 。

(4) 最终, 给定泥石流敏感性评价集 V 将其划分为 m 个等级, 则 $V = \{ V_1, V_2, \dots, V_m \}$ 。从而可以建立从 U 到 V 的模糊关系:

$$R: X \times U \rightarrow [0, 1]. \tag{6}$$

通过模糊变换 $B = A \cdot R$, 并利用最大隶属度原则确定泥石流沟的敏感性。

2.2 构建评价模型指标体系

(1) 评价单元划分。利用 GIS 技术进行泥石流敏感性模糊综合评价时, 需要对评价单元进行合理划分。因为评价单元划分的不同, 将导致不同的分析和操作, 评价单元的划分对泥石流灾害敏感性评价极其重要。国内外学者将评价单元分为 5 种类型: 栅格单元、地貌单元、均一条件单元、地形单元及流域单元^[8-9]。对于泥石流而言, 泥石流的发生发展与山区的地貌单元有着十分密切的关联。泥石流的地貌特征、丰富的物源及降雨是泥石流发生的必要条件。因此, 为了在敏感性评价过程充分考虑泥石流的内因作用, 提高评价的可靠性, 我们以泥石流流域为单元^[10, 12], 对汶川县 160 条泥石流进行敏感性评价研究。

(2) 评价因子选择。评价因子是衡量评价对象某种特性的基本尺度, 这些因子必须与评价对象息息相关, 且能够客观的最大限度的反应评价对象, 影响评价对象。因此, 本文结合汶川县具体灾害情况, 并综合考虑影响泥石流运动的三大基础条件: 地形、物源与水, 选取地形地貌 U_1 (流域高程差 U_{11} 、沟坡坡度 U_{12} 、沟壑密度 U_{13} 、主沟纵比降 U_{14})、物源状态 U_2 (崩滑体核密度强度 U_{21})、活动频率 U_3 (年最大日降雨量 U_{31}) 3 个类型 6 个因子作为本次泥石流敏感性评价的指标体系。

(3) 评价等级划分评价集是对泥石流敏感性综合评价的语言表述。根据研究区泥石流的发育状况, 并参照前人研究成果^[13-17], 将泥石流敏感度划分为低敏感、中敏感、高敏感 3 个等级, 即评价集 $V = \{ V_1, V_2, V_3 \} = \{ \text{低敏感}, \text{中敏感}, \text{高敏感} \} = \{ \text{I}, \text{II}, \text{III} \}$ 。

2.3 评价因子权重的确定

在模糊综合评价中, 因子权重的确定是整个评价过程中不可或缺的重要环节, 它关系到评价结果是否符合

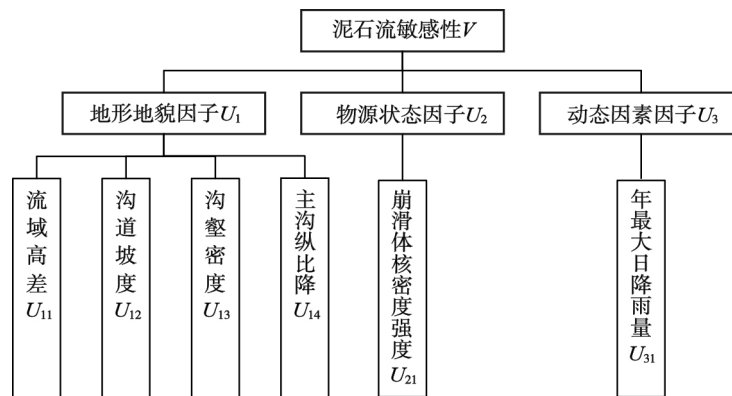


图 1 层次分析法模型

Fig. 1 Model of analytic hierarchy process

实际情况。本研究采用层次分析法(AHP)确定各评价因子的权重^[18 22]。层次分析法是一种解决多因素复杂系统的方法,它把人的思维过程层次化、数量化,且将人的主观依据以数量的形式进行表达和处理,使其具有条理性和科学性,是目前求取地质灾害影响因子权重的较好方法,对描述因子的影响力效果显著。

根据前文对评价因子的提取及分类,建立层次分析法模型(图 1):

2.4 隶属度函数的确定

隶属度的确定是模糊综合评价的关键点之一,可反映评价指标隶属于各等级泥石流敏感性的程度,一般可由隶属度函数来进行确定。隶属度函数是用于定量描述评价因子对泥石流敏感性隶属程度的函数形式。由于泥石流敏感性影响因素的相互作用,以及泥石流灾害本身的复杂性和模糊性的特点,在目前的泥石流评价研究中,隶属度常凭借专家经验进行确定。参照前人有关隶属度函数构造的方法,本文采用较为常见的三角形、降半梯形和升半梯形模糊分布函数,来计算各指标因子对上一层级指标的隶属度,且获得了良好的效果。

设 UV_{ij} 表示评价指标 U_i 对评语等级 V_j 的隶属度,则隶属度函数如公式(7、8、9)所示:

$$UV_{i1} = \begin{cases} 1 & 0 < x \leq d_1, \\ \frac{d_2 - x}{d_2 - d_1} & d_1 < x \leq d_2, \\ 0 & x \geq d_2; \end{cases} \quad (7)$$

$$UV_{i2} = \begin{cases} 1 & x \leq d_1, x \geq d_3, \\ \frac{x - d_1}{d_2 - d_1} & d_1 < x \leq d_2, \\ \frac{d_3 - x}{d_3 - d_2} & d_2 < x \leq d_3; \end{cases} \quad (8)$$

$$UV_{i3} = \begin{cases} 0 & x \leq d_2, \\ \frac{x - d_2}{d_3 - d_2} & d_2 < x \leq d_3, \\ 1 & x \geq d_3. \end{cases} \quad (9)$$

2.5 基于 GIS 技术的评价模型求解

根据上文介绍的泥石流敏感性评价数学模型,为综合考虑各因素对泥石流灾害的影响,其中模糊算子 \circ 采用 $M(\cdot, \oplus)$ 一加权平均模型,该算法的运算规是:

$$b_j = \sum_{i=1}^m a_i \times r_{ij} \cdot \min\{1, \sum_{i=1}^m a_i \cdot r_{ij}\}. \quad (10)$$

其中: a_i 为指标 i 的权重; r_{ij} 为指标 i 对评语集中第 j 级别的隶属度。则汶川县泥石流灾害敏感性模糊综合评价结果向量如公式(11)所示:

$$B = A \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = A \circ \begin{bmatrix} A_1 \begin{bmatrix} u_{11}v_1 & u_{12}v_2 & v_{13}v_3 \\ u_{12}v_1 & u_{12}v_3 & u_{13}v_3 \\ u_{13}v_1 & u_{13}v_2 & u_{13}v_3 \\ u_{14}v_1 & u_{14}v_2 & u_{14}v_3 \end{bmatrix} \\ A_2 [u_{21}v_1 \quad u_{21}v_2 \quad u_{21}v_2] \\ A_3 [u_{31}v_1 \quad v_{31}v_2 \quad u_{31}v_2] \end{bmatrix}. \quad (11)$$

其中: B 为汶川县泥石流敏感性模糊综合评判结果向量, B_1 为汶川县泥石流地形地貌因子模糊综合评判结果向量, B_2 为汶川县泥石流物源状态因子模糊综合评判结果向量, B_3 为汶川县泥石流动态因素因子模糊综合评判结果向量, A 为汶川县泥石流敏感性模糊综合评判的权重向量, A_1 为汶川县泥石流地形地貌因素模糊综合评判的权重向量, A_2 为汶川县泥石流物源状态模糊综合评判的权重向量, A_3 为汶川县泥石流动态因素模糊综合评判的权重向量。

求解此问题的关键在于模糊关系矩阵的运算, GIS 虽不具备直接的矩阵运算功能,但是可以通过将矩阵分解再一步步运算的方式,同样能够实现矩阵的求解,本文利用 ARCGIS 空间分析功能来求解模型。

3 评价结果

(1) 运用层次分析法确定泥石流敏感性评价因子的权重^[18 22]。为了能更简便快捷地得到各因子的权重 本文运用 Yaahp 层次分析软件来进行计算。最终得到汶川县泥石流敏感性评价指标的各因子对于上一层次的权重如(表 1、2) ,以及各评价指标对目标层的总权重如(表 3) 所示:

表 1 $V - U_i$ 指标层权重

Table 1 Weights of $V - U_i$ index layer

V	U_1	U_2	U_3	W_i
U_1	1	2	3	0.539 6
U_2	1/2	1	2	0.297 0
U_3	1/3	1/2	1	0.163 4

注: U_1 为地形地貌因子; U_2 为物源状态因子; U_3 为动态因素因子; W_i 为指标权重

表 2 $U_1 - U_{ij}$ 指标层权重

Table 2 Weights of $U_1 - U_{ij}$ index layer

V	U_{11}	U_{12}	U_{13}	U_{14}	W_i
U_{11}	1	1/2	1/4	1/4	0.087 1
U_{12}	2	1	1/3	1/3	0.142 2
U_{13}	4	3	1	1	0.385 4
U_{14}	4	3	1	1	0.385 4

注: U_{11} 为流域高程差; U_{12} 为沟坡坡度; U_{13} 为沟壑密度; U_{14} 为主沟纵比降; U_{21} 为崩滑体核密度强度、 U_{31} 为年最大日降雨量; W_i 为指标权重

表 3 各评价指标对目标层总权重

Table 3 Total weights of each index layer to target layer

	$V - U_i$ 指标层权重			$V - U_{ij}$ 指标层权重
	U_1	U_2	U_3	
	0.539 6	0.297 0	0.163 4	
U_{11}	0.087 1	0.000 0	0.000 0	0.047 0
U_{12}	0.142 2	0.000 0	0.000 0	0.076 7
U_{13}	0.385 4	0.000 0	0.000 0	0.208 0
U_{14}	0.385 4	0.000 0	0.000 0	0.208 0
U_{21}	0.000 0	1.000 0	0.000 0	0.297 0
U_{31}	0.000 0	0.000 0	1.000 0	0.163 4

(2) 基于 GIS 技术的隶属函数的计算。汶川县泥石流灾害敏感性模糊综合评价的关键是隶属度的计算 根据研究区内泥石流实际情况 ,及前文对评价等级的划分 ,需要先确定计算隶属度时的间隔点。本文将汶川县泥石流灾害地形地貌条件及泥石流敏感性均分为 3 级 ,即{ 低(V_1) ,中(V_2) ,高(V_3) } ,各评价指标数据间隔点设置如(表 4) 所示:

表 4 间隔点设置

Table 4 Setting of interval points

评价因子	Δ	d_1	d_2	d_3
流域高程差/m	500	100 0	150 0	200 0
沟坡坡度/($^\circ$)	10	20	30	40
沟壑密度/($\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$)	0.5	0.5	1	1.5
主沟纵比降/%	10	20	30	40
年最大日降雨/mm	20	50	70	90
滑坡点活动强度	1	2	3	4

注: 其中 Δ 是设置指标数值间隔点时的间距 ,其值取标准差与平均值之中的较小者 ,其他间隔点由表达式 $d_{i+1} = d_i + \Delta$ 来确定。

根据前文对隶属函数的确定,在评价因子集中流域高程差 U_{11} 、沟坡坡度 U_{12} 、沟壑密度 U_{13} 、主沟纵比降 U_{14} 、崩滑体核密度强度 U_{21} 、年最大日降雨量 U_{31} 等指标都属于正相关指标,即数值越大,敏感性越高,完全可以运用上述公式(7)、(8)、(9)运算。基于 Arcgis 空间分析功能,结合上述隶属函数,通过计算可得到每一个栅格评价单元上各指标对上一层次评语等级的隶属度,从而相应得到不同评语等级的隶属度图层 3 个:低(V_1)、中(V_2)、高(V_3)。

下面以沟壑密度 U_{13} 评价因子为例,通过 Arcgis 空间分析中的“栅格计算器”工具处理后,得到了(图 2, 3, 4)所示的沟壑密度对汶川地形地貌敏感性不同等级的隶属度图层。

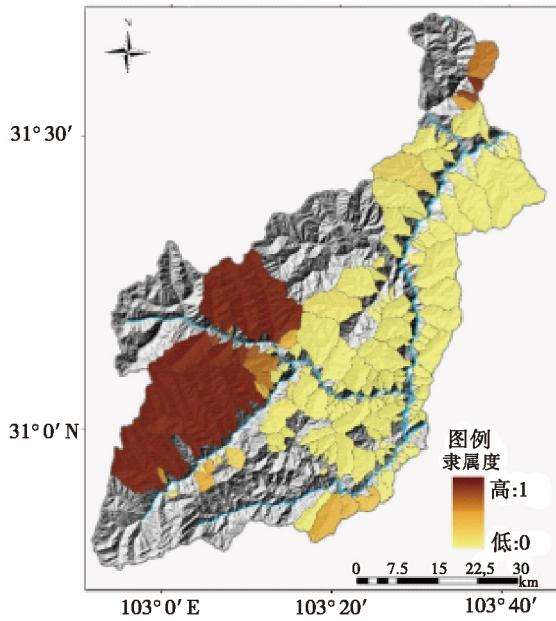


图 2 沟壑密度对 V_1 的隶属度
Fig. 2 Membership degree of gully density to dangerous rank “ V_1 ”

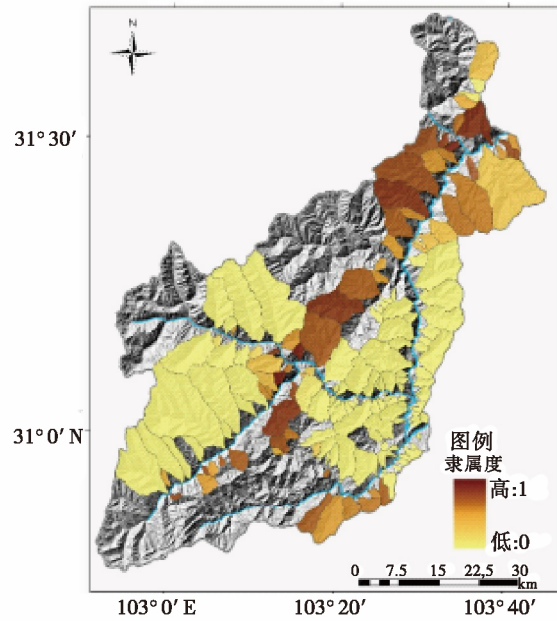


图 3 沟壑密度对 V_2 的隶属度
Fig. 3 Membership degree of gully density to dangerous rank “ V_2 ”

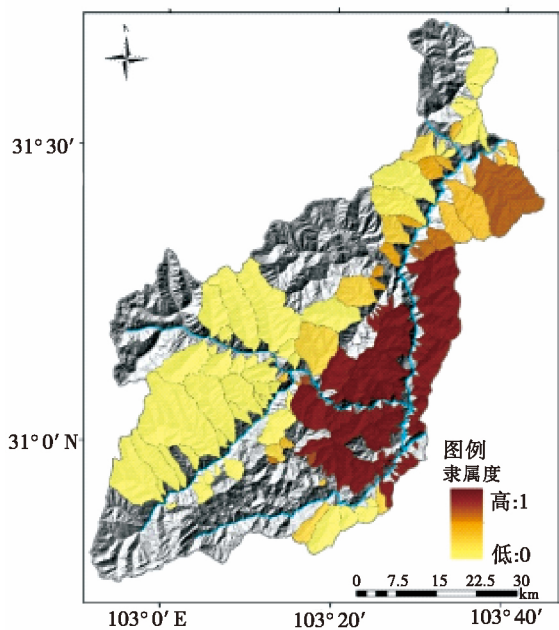


图 4 沟壑密度对 V_3 的隶属度
Fig. 4 Membership degree of gully density to dangerous rank “ V_3 ”

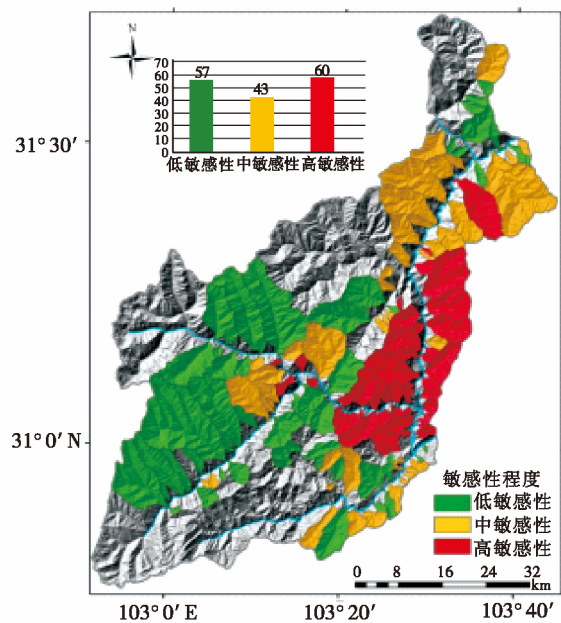


图 5 泥石流敏感性评价图
Fig. 5 Sensitivity evaluation map of debris flow

(3) 基于 GIS 技术的泥石流敏感性模糊综合评价。根据前文所建立的汶川县泥石流灾害敏感性模糊综合评价数学模型(公式(11))结合 ArcGIS 空间分析功能。首先,将由 GIS 生成的 6 个评价指标因子的隶属度图层(18 个)载入到 ArcMap 中,并对泥石流敏感性模糊综合评价结果矩阵进行乘积变换,将变换的表达式输入“栅格计算器”中进行计算,后得到汶川县泥石流不同等级敏感性的隶属度图层,如图 2 3 4。

最终,根据最大隶属度原则,选取每个流域上泥石流敏感性隶属度的最大值,作为该流域单元泥石流敏感性等级。可以通过在 Arcgis “栅格计算器”中输入下述(公式(12))来实现,最终得到汶川县泥石流敏感性评价图,具体如(图 5)。

$$V = \text{con}(\max(BV_1, BV_2, BV_3) = BV_1, 1, \text{con}(\max(BV_1, BV_2, BV_3) = BV_2, 2, \beta)) \quad (12)$$

其中: B 为汶川县泥石流敏感性模糊综合评判结果向量, V_1, V_2, V_3 分别对应评语等级“低”、“中”、“高”。

根据结果显示,在 160 条沟中,有 60 条泥石流沟属于高敏感性泥石流,占研究区总数的 37.5%,主要分布在岷江与渔子溪交汇处,岷江流域的银杏乡段沿岸;有 43 条泥石流属于中度敏感性泥石流,占研究区总数的 26.9%,较多分布在汶川县城周围和渔子溪流域的耿达段沿岸;有 57 条泥石流为低敏感性泥石流,主要分布于汶川县的西南部。其具体分布情况如(图 5)所示。

4 结论

(1) 本文运用 GIS 空间分析技术,对汶川县泥石流敏感性进行模糊综合评价。结果表明,此方法既能充分利用泥石流灾害系统的复杂性,又能全面充分地考虑评估因素指标值、评估因素权重和评估因素之间的相互作用对泥石流灾害的影响,可有效减少模糊综合评判法的计算工作量,并使评价结果更加直观。

(2) 经对研究区泥石流沟的文献资料查阅,对比了马国超^[22]关于汶川县泥石流沟的危险性评价结果,刘清华等^[23]关于映秀地区岷江流域的泥石流危险性评价与彭昌翠^[24]关于映秀至耿达泥石流危险性评价结果,以上学者的研究结果与本文的泥石流敏感性评价结果基本吻合。因此,该模型方法在泥石流灾害敏感性评价的应用是可行的。

(3) 经野外现场调研,将泥石流敏感性评价结果与实际灾害情况进行一致性对比,发现评价结果与泥石流沟暴发频率和规模基本一致,不同敏感性分区的泥石流分别呈现了不同的实际情况。在高敏感性的 60 条泥石流沟里,地势地形陡峻,非常易于泥石流灾害的孕育,且在震后储备了大量松散物源物质,每年雨季的降雨量也相对较高,使得其活动频率也随之较高。评价结果为中度敏感度的 43 条泥石流沟,基本都为已暴发过的沟道,但由于沟道地形地势形态与地震遗留下的物源储存量都各不相同,使得其泥石流活动频率与规模也有所差异。而在低敏感度的 57 条沟道中,部分沟道有发生过泥石流的历史背景,但近年来其活动较为稳定,也有沟道未发生过泥石流,沟道内物源体量少,植被丰富覆盖率较高。因此,该方法对泥石流敏感性评价的结果是合理的,并对该区域的泥石流防灾减灾具有实际指导意义。

参考文献:

- [1] 康志成,马藹乃,李仲芬,等. 中国泥石流研究[M]. 北京:北京科学出版社,2004: 1-4.
KANG Zhicheng, MA Ainai, LI Zhongfen, et al. Debris Flow Research in China[M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-4. (in Chinese)
- [2] 唐川. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J]. 山地学报, 2010, 28(3): 341-349.
TANG Chuan. Activity tendency prediction of rainfall induced landslides and debris flows in the wenchuan earthquake areas[J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(3): 341-349. (in Chinese)
- [3] 黄润秋. 汶川地震地质灾害后效应分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(2): 145-151.
HUANG Runqiu. After effect of geohazards induced by the wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(2): 145-151. (in Chinese)
- [4] 刘加龙,吕希奎,刘贵应. 模糊综合评判法在泥石流灾度评价中的应用[J]. 地质科技情报, 2001, 18(4): 86-88.
LIU Jialong, LY Xikui, LIU Guiying. Fuzzy comprehensive evaluation method to evaluate debris flow hazard degree[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 18(4): 86-88. (in Chinese)
- [5] 张跃等. 模糊数学方法及其应用[M]. 北京:煤炭工业出版社,1992.
ZHANG Yue. Fuzzy Mathematics Method and Application[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1992. (in Chinese)
- [6] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,2011:305-319.
XU Guanhua. Mathematical Methods in Contemporary Geography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 305-319. (in Chinese)

- [7] 王学武,石豫川,黄润秋,等. 多级模糊综合评判方法在泥石流评价中的应用[J]. 灾害学, 2004, 19(2): 3-8.
WANG Xuewu, SHI Yuchuan, HUANG Runqiu, et al. Zhou Chunhong, et al. Application of multi-layer fuzzy comprehensive evaluation method in debris flow assessment[J]. Journal of Catastrophology 2004, 19(2): 3-8 (in Chinese)
- [8] Fansto Guzzetti, Alberto Carrara, Mauro Cardinali, et al. Landslide hazard evaluation a review of current techniques and their application in a multi-scale study central Italy[J]. Geomorphology, 1999 (31): 181-216.
- [9] 杜国梁,高金川,胡新丽. 基于 GIS 和组合赋权的岷县板达沟泥石流危险性评价[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 235-241.
DU Guoliang, GAO Jinchuan, HU Xinli. Debris flow hazard assessment of Banda Gully in Minxian County based on GIS and combination weighting method[J]. Journal of Natural Disasters 2014, 23(4): 235-241. (in Chinese)
- [10] 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, 26(2): 177-180.
WANG Xiaopeng, PAN Mao, XU Yueren. Debris flow hazard zonation based on catchment unit[J]. Journal of Mountain Science 2006, 26(2): 177-180. (in Chinese)
- [11] 李为乐,唐川,杨武年,等. RS 和 GIS 技术在县级区域泥石流危险区划中的应用研究——以四川省泸定县为例[J]. 灾害学, 2008, 23(2): 71-75.
LI Weile, TANG Chuan, YANG Wunian, et al. Research on application of GIS and RS in debris flow hazard zonation at county level——a case study in Luding County of Sichuan Province[J]. Journal Of Catastrophology 2008, 23(2): 71-75. (in Chinese)
- [12] 李雅辉,杨武年,杨鑫,等. 基于流域系统的地貌信息熵泥石流敏感性评价[J]. 中国水土保持, 2011(1): 55-57.
LI Yahui, YANG Wunian, YANG Xin, et al. Based on the basin system of terrain information entropy debris flow sensitivity evaluation[J]. Soil And Water Conservation In China, 2011(1): 55-57. (in Chinese)
- [13] 刘洋,唐川,李为乐,等. 四川省都江堰市龙池地区群发性泥石流物源敏感性分析[J]. 灾害学, 2013, 28(2): 107-113.
LIU Yang, TANG Chuan, LI Weile, et al. Sensitivity analysis on mass of debris flows on the Longchi region, Dujiangyan, Sichuan Province[J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(2): 107-113. (in Chinese)
- [14] TANG C, ZHU J, LIANG J. Emergency assessment of seismic landslide susceptibility: a case study of the 2008 Wenchuan earthquake affected area[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 8(2): 207-217.
- [15] Gentile F, Bisantino T, Liuzzi G T. Debris-flow risk analysis in south Gargano watersheds (Southern-Italy) [J]. Natural Hazards, 2008, 44(1): 1
- [16] 陈伟,任光明,左三胜. 泥石流危险度的模糊综合评判[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 138-139.
CHEN Wei, REN Guangming, ZUO Sansheng. Fuzzy comprehensive evaluation method to judge dangerous degree of debris flow[J]. Research of Soil and Water, 2006, 13(2): 138-139. (in Chinese)
- [17] 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. (in Chinese)
- [18] 余斌,谢洪,王士革,等. 汶川县泥石流沟在汶川"5.12"地震后的活动趋势[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(6): 68-73.
YU Bin, XIE Hong, WANG Shige, et al. Activity tendency of debris flow gully in Wenchuan County after "5.12" Wenchuan earthquake[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(6): 68-73. (in Chinese)
- [19] 王哲,易发成. 基于层次分析法的绵阳市地质灾害易发性评价[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 14-23.
WANG Zhe, YI Facheng. AHP-based evaluation of occurrence easiness of geological disasters in Mianyang City[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(1): 14-23. (in Chinese)
- [20] 张风华,谢礼立. 城市防震减灾能力指标权重确定研究[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 23-29.
ZHANG Fenghua, XIE Lili. Study on determination of index weights for city's ability in earthquake disasters reduction[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(4): 23-29. (in Chinese)
- [21] 李保俊,冀萌新,吕红峰,等. 中国自然灾害备灾能力评价与地域划分[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 47-53.
LI Baojun, JI Mengxin, LYU Hongfeng, et al. Assessment and zoning of disaster preparedness capability in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(6): 47-53. (in Chinese)
- [22] 马国超. 强震区汶川县地质灾害危险性评价研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
MA Guochao, The Geological Hazard Assessment and Mapping Study of Wenchuan in Meizoseismic Area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [23] 刘清华,唐川,常鸣,等. 汶川地震强震区映秀地区泥石流的危险性[J]. 山地学报, 2012, 30(5): 592-598.
LIU Qinghua, TANG Chuan, CHANG Ming, et al. Risk of debris flow in epicenter of Wenchuan earthquake, Yingxiu of Sichuan[J]. Journal of Mountain Science 2012, 30(5): 592-598. (in Chinese)
- [24] 彭昌翠. 汶川地震映秀至耿达公路泥石流灾害发育特征及其危险性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
PENG Changcui. Development Characteristics and Hazard Assessment of the Debris Flow in the Wenchuan Earthquake area along Yingxiu - Genda Highway, Chengdu [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. (in Chinese)