

引用格式:熊俊楠,韦方强,刘志奇.四川省小流域泥石流危险性评价[J].地球信息科学学报,2017,19(12):1604-1612. [ Xiong J N, Wei F Q, Cheng W M. 2017. Hazard assessment of debris flow in Sichuan Province. Journal of Geo-information Science, 19(12):1604-1612. ] DOI:10.3724/SP.J.1047.2017.01604

# 四川省小流域泥石流危险性评价

熊俊楠<sup>1,3</sup>, 韦方强<sup>2</sup>, 刘志奇<sup>1</sup>

1. 西南石油大学土木工程与建筑学院, 成都 610500; 2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714;  
3. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

## Hazard Assessment of Debris Flow in Sichuan Province

XIONG Junnan<sup>1,3\*</sup>, WEI Fangqiang<sup>2</sup> and LIU Zhiqi<sup>1</sup>

1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 3. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract:** Hazard assessment is important for the prevention and mitigation of debris flow disaster. This study takes Sichuan Province as the research area. Based on the DEM data, we realize the demarcation of the small watershed in Sichuan Province by extracting the direction of water flow and calculating the accumulation of the flow confluence. Based on the collected information of debris flow watershed, we selected the watershed elevation difference and watershed area as the indicators. The identification model of potential debris flow watershed based on the energy condition was built by analyzing the hazard- formative environment and characteristics of debris flow hazards. A total of 7798 small watersheds with the required energy conditions for debris flow occurring were identified by utilizing the established model among all the demarcated small watersheds, which is  $31.1 \times 10^4 \text{ km}^2$  accounting for 64.18% of the total area of Sichuan Province. The indicator system of debris flow hazard risk assessment and the extension matter-element model were established from the energy condition of the debris flow occurring, the condition of the loose solid materials, the precipitation condition and the condition of human activity. These determine the weights of the assessment factors, of dividing the grade of the hazard risk, by which it classifies the hazard risk degree of small watershed debris flow. The number of the moderate, high and very high hazard degree is 1946, 1725 and 1002, with an area of  $9.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,  $7.7 \times 10^4 \text{ km}^2$  and  $3.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ , respectively. The total area of moderate hazard areas is  $20.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ , accounting for 41.67% of the total area of Sichuan Province. Finally, the analyses were made for the reliability of assessment results and the distribution of the different hazard degree of debris flow areas in different municipal administrative districts and the major river valleys. All the known small watershed of very high hazard degree are identified as debris flow watersheds. The 896 watersheds of moderate hazard degree do not belong to the identified debris flow and 1233 watersheds of high hazard degree do not belong to the identified debris flow, either. They are the key area for disaster prevention and reduction in Sichuan province in the next few years. The

收稿日期 2017-06-30; 修回日期: 2017-09-26.

基金项目 :住房和城乡建设部科技计划项目(2016-K3-024);国家安全生产监督管理总局科技项目(2014-3281);西藏自治区科技支撑计划项目(省809);西南石油大学启航计划项目(2014QHZ034)。

作者简介 熊俊楠(1981-),男,四川南充人,博士,副教授,主要从事地理信息系统与灾害风险分析方面的研究。

E-mail: neu\_xjn@163.com

results of the analyses have the great theoretical and practical significance for enhancing the debris flow identification, the prevention and mitigation of regional debris flow disaster. The sustainable development of mountainous areas and also the theory of the risk assessment of debris flow hazard.

**Key words:** debris flow; geomorphology characteristics; hazard assessment; small watersheds; extension matter-element model

**\*Corresponding author:** XIONG Junnan, E-mail: neu\_xjn@163.com

**摘要** 泥石流危险性评价是泥石流防灾减灾的重要内容。本文以四川省为研究区,以DEM为数据源,通过提取水流方向,计算汇流累积量,实现四川省小流域划分。基于收集的已查明泥石流流域资料,分析了泥石流孕灾环境与成灾特点,选择流域高差、流域面积为指标,建立基于能量条件的势能泥石流流域判别模型,对划分的小流域进行判别,识别出7798个小流域具备泥石流发生所需能量条件,面积为 $31.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占四川省总面积的64.18%。进而建立了泥石流危险性评价指标体系和可拓物元模型,开展了小流域泥石流危险性评价,划分了危险度等级,得到中度、高度、极高危险区的小流域个数分别为1946、1725和1002个,面积分别为 $9.1 \times 10^4$ 、 $7.7 \times 10^4$ 和 $3.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,中度以上危险区面积共 $20.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占四川省总面积的41.67%。最后对评价结果可靠性和各等级泥石流危险区在各地市级行政区、各大流域的分布进行了分析。其结果对促进泥石流判别与危险性评价理论,区域泥石流防灾减灾与山区可持续发展等具有重要的理论和现实意义。

**关键词** 泥石流;地貌特征;危险性评价;小流域;可拓物元模型;

## 1 引言

泥石流是山区特有的一种突发性的自然现象,常发生在山区小流域,是一种饱含大量泥沙石块和巨砾的固液两相流体,呈粘性层流或稀性紊流等运动状态<sup>[1]</sup>。由于中国泥石流数量多,危害面广,具有区域性、周期性、季节性、夜发性、群发性等特点,目前还不能做到对每条沟都进行治理,为了科学地预防和减轻泥石流所带来的危害,就要分析泥石流的发育规律、孕灾环境、成灾方式和致灾因子等,进而对灾害发生的可能性、危险性、危害范围和程度等有一个科学、细致的认识和评价,即泥石流危险性评价,包括单沟和区域泥石流危险性评价。单沟危险性评价对待评价的泥石流沟认识明确,指标要求精度高,定量化程度高。区域泥石流危险性评价更注重区域内各单元之间危险性大小的对比,表示区域内相对各单元的危险性,评价因子也有许多为相对评价指标。

国内外学者在区域泥石流危险性评价方面做了大量的研究,1977年日本学者足立胜治等<sup>[2]</sup>最早开展了泥石流发生危险度的判定,从地貌条件、泥石流形态和降雨3个方面分析来判定泥石流发生的概率。1981年美国的Hollingsworth和Kovacs<sup>[3]</sup>采用打分方法,提出了泥石流危险度评价框架,建议将岩性、坡度和切割密度3个因子分别划分为0、1、2、3、4共5个等级,再用因子叠加求和进行危险度评价,奥地利、瑞士等<sup>[4]</sup>欧洲国家提出了采用类似于

交通信号中红、黄、绿三色的特定含义,来划分泥石流危险区、潜在危险区和无危险区。随着计算机以及地理信息系统技术的发展,泥石流评价也向着精度更高、速度更快,集成性能更高、更加便捷的方向发展<sup>[5]</sup>。区域泥石流危险性评价单元主要有网格、自然区域、行政区域单元等<sup>[6-7]</sup>,这些评估单元有其计算、管理等方面的优越性,但对泥石流发生的小流域地质环境信息反映不完整,从而影响泥石流危险性评价的精度和可靠性<sup>[8]</sup>。

本文以四川省为研究区,以数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)为数据源,划分出研究区小流域,通过分析已查明泥石流流域相对高度、流域面积等地貌因子分布特征,建立基于能量条件的势能泥石流流域判别模型,识别出具有泥石流发生所需能量条件的小流域。在此基础上,建立泥石流危险性评价指标体系和可拓物元理论模型,对各小流域泥石流危险性进行评价,并对各等级泥石流危险区的空间分布进行分析,其结果对促进泥石流危险性评价理论,区域泥石流防灾减灾等具有重要意义。

## 2 研究区概况与灾害现状

### 2.1 研究区概况

四川省位于中国西南腹地,地处长江上游,介于东经 $97^{\circ}21'$ ~ $108^{\circ}33'$ ,北纬 $26^{\circ}03'$ ~ $34^{\circ}19'$ 之间。南北跨度为916 km,东西跨度为1062 km。东连重庆

市,南邻云南省、贵州省,西接西藏自治区,北接青海省、甘肃省、陕西省<sup>[9]</sup>。其面积 $48.6\times 10^4\text{ km}^2$ ,居全国第五位,全省共有21个市(州)。

四川省位于中国自然地势的第一级台阶变化及第二级台阶向第三级台阶变化的过渡带,第一级台阶向第二级台阶变化的过渡带内,山高坡陡,地势险要,盆周山地和盆中丘陵、平原之间形成一个地貌急剧转变的过渡带。降水分布从区域看,暖区多雨,冷区少雨;从季节看,冷季雨少,暖季雨多。全省多年平均年降水量大部分在400~1200 mm之间,盆地区一般800~1200 mm,川西南区800~1100 mm,川西区600~800 mm之间。研究区是青藏高原与扬子地块挤压拼接的交汇部位之一,地质构造复杂多样,地质构造运动强烈,深大断裂发育,受龙门山断裂带、鲜水河活动断裂、安宁河断裂控制,成Y字形展布,地震活动频繁而强烈。区内地层发育齐全,第四系分布广泛,成因类型众多,第四纪冰川、冰川堆积物发育<sup>[10]</sup>。研究区地势及泥石流沟分布如图1所示。

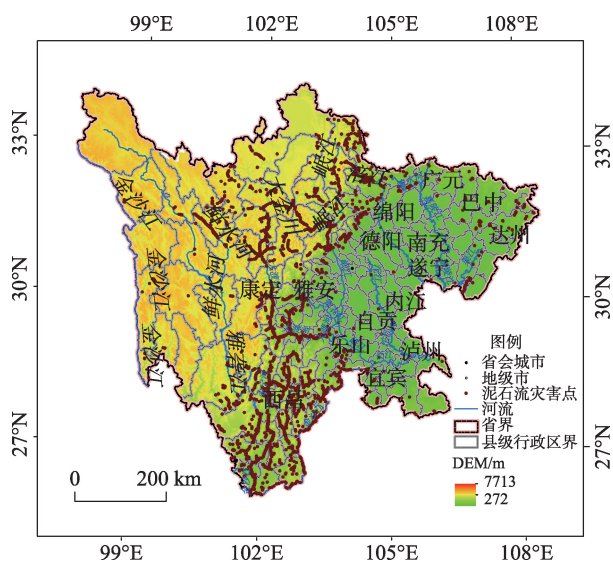


图1 研究区地势特征及泥石流沟分布

Fig. 1 Hillshade and gullies of debris flows in the study area

## 2.2 泥石流灾害现状

四川省已查明并编目的泥石流沟共有3177条<sup>[11]</sup>,分布密度达0.63条/100 km<sup>2</sup>,泥石流沟谷总面积 $4.55\times 10^4\text{ km}^2$ ,占四川省总面积的9.3%。四川省泥石流分布总体趋势是西部密集,规模大,危害重,盆周山地集中,规模大致中等,危害亦大至中等<sup>[12]</sup>。

2008年5月12日汶川地震、2013年4月20日芦山地震发生后,地震灾区赋存大量的松散固体物

质,为泥石流的发生提供了充足的物源,使该区成为泥石流最发育的地区之一<sup>[13]</sup>。每年因泥石流造成的损失十分严重,耕地、房屋、电站、厂矿、桥梁、铁路、公路、航道、自然保护区等均不同程度遭受泥石流的危害,如2010年四川强降雨引发的多处特大山洪泥石流造成全省14个市(州)、67个县(市)、576万人受灾,因灾死亡16人,失踪66人,全省因灾直接经济损失约68.9亿元,转移群众39.4万人。其中,8.13清平乡文家沟泥石流造成7人遇难,7人失踪,379户房屋被淹没,危房100余户<sup>[14-15]</sup>。

## 3 小流域划分与潜势泥石流流域判识

### 3.1 小流域划分方法

四川省小流域划分以ASTER GDEM为数据源,通过中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据服务平台获取(<http://datamirror.csdb.cn/>),空间分辨率为30 m×30 m,垂直精度20 m,水平精度30 m。

通过分析四川省已查明泥石流流域面积,71.36%的流域面积小于10 km<sup>2</sup>,因此,选取汇流累积单元个数阈值为10 000,集水面积阈值为9 km<sup>2</sup>进行小流域划分。以ArcGIS 10.1的水文分析工具箱Hydrology进行实验,通过提取地表水流径流模型的水流方向、计算汇流累积量、水流长度、河流网络(包括河流网络的分级)以及对研究区的流域进行分割,从而得到四川省小流域划分结果。

### 3.2 潜势泥石流流域判识

#### 3.2.1 判识模型

一般认为,凡是发生过泥石流这一事件的沟(坡)或具备了形成泥石流这一事件的沟(坡),都应认定为泥石流沟(坡)或泥石流流域(坡面)<sup>[11]</sup>。判识方法主要有判别因素分析法、严重程度数量化综合评判法、识别要素临界值判别法、流域特征与泥石流要素临界值对比判别法、形成条件和活动产物分析与活动史访问判别法、遥感图像解译法等<sup>[16-17]</sup>。

泥石流是一种动力地貌(或地质)现象(或过程),地貌条件是形成泥石流的内因和必要条件,在泥石流形成的3个基本条件中,地貌条件相对稳定,变化缓慢。影响泥石流流域能量条件的地貌因素主要有相对高度、沟床比降、沟坡坡度、坡向、沟谷形态、流域面积等,其中相对高度决定势能的大小,既与流域的沟床比降和流域面积有较密切的关系,又独立地反映了流域的地貌特征<sup>[11]</sup>。对四川省已查明



的3177条泥石流沟相对高度进行分析表明,流域相对高度一般在300 m以上,且泥石流流域数随着相对高度的增加而增多,当相对高度超过1000 m后,泥石流流域数逐渐减少,流域最大相对高度未超过4000 m。流域面积的大小,是确定沟谷水动力条件的主要参数,流域面积越大,水动力条件越好,反之水动力条件越差,但对于泥石流活动,则是当沟谷流域面积在某一范围内最为有利。对已查明泥石流流域面积的分析表明,面积小于10 km<sup>2</sup>的有2267条,占71.36%,小于40 km<sup>2</sup>的有2900条,占91.28%。

为了更好地揭示研究区泥石流流域相对高度、流域面积特征,将相对高度、流域面积二者结合分析,建立流域面积、单位面积相对高度分布如图2所示。随着泥石流流域面积的增大,单位面积相对高度逐渐减小,其趋势线的表达式为:

$$y = 805.4x^{-0.7485} \quad (1)$$

式中: $y$ 表示流域单位面积相对高度; $x$ 表示流域面积。其中趋势线相关系数 $R^2=0.8883$ 。

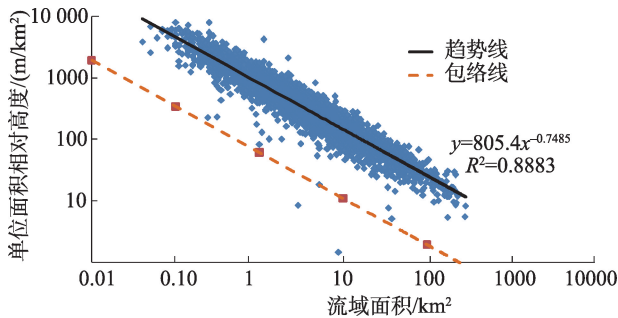


图2 泥石流流域面积与单位面积相对高度关系图

Fig. 2 Relationship between watershed area and relative height of unit area

对于这些已发生泥石流的流域,均具备了泥石流发生在单位面积上所需的能量条件和水动力条件,因此,建立包络线将泥石流流域发生应具备的单位面积势能条件、水动力条件通过单位面积相对高度、流域面积的关系反映出来,将其用到潜在泥石流流域判别中。对研究区任意流域而言,如果单位面积相对高度、流域面积均满足条件,位于包络线上方,就认为其具备泥石流发生在单位面积上所需的势能、水动力条件,判定其为潜在泥石流流域。

根据上述思路,建立包络线表达式为:

$$\ln(y) = 4.12 - 0.7485 \times \ln(x) \quad x \in (0.1, 300) \quad (2)$$

式中: $y$ 表示流域单位面积相对高度; $x$ 表示流域面积。分析已查明泥石流沟,其面积均小于300 km<sup>2</sup>,因此 $x$ 取值范围为 $x \in (0.1, 300)$ ,进而得基于流域面

积和单位面积相对高度的泥石流流域判别模型为:

$$\ln(y) + 0.7485 \times \ln(x) - 4.12 > 0 \quad (3)$$

则该小流域具备泥石流发生所需的能量条件,判定为潜在泥石流流域。

### 3.2.2 判别结果

基于上述模型,以 ArcGIS 10.1 和 SQL Server 2008 为平台,开发泥石流流域判别程序,在判别时,首先对划分的一级流域进行判定,如果具备泥石流发生所需能量条件,则结束本次判定,对另一个一级流域进行判别;如果不具备泥石流发生所需能量条件,则对该一级流域下各级流域逐级进行判别,有具备泥石流发生所需能量条件的流域时,则跳至另一个一级流域,直到完成最后一级流域判别为止。通过输入已经提取的四川省小流域(集水面积阈值9 km<sup>2</sup>)、提取的水系图、DEM数据进行四川省泥石流流域判别,合并处理后,共有7798个流域具备泥石流发生所需的能量条件,判别为潜在泥石流流域。不具备泥石流发生所需能量条件的小流域,判定为非泥石流流域,判别结果如图3所示。分析表明,泥石流流域总面积为31.1×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,占四川省总面积的64.18%,非泥石流流域总面积为17.4×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,占四川省总面积的35.82%。

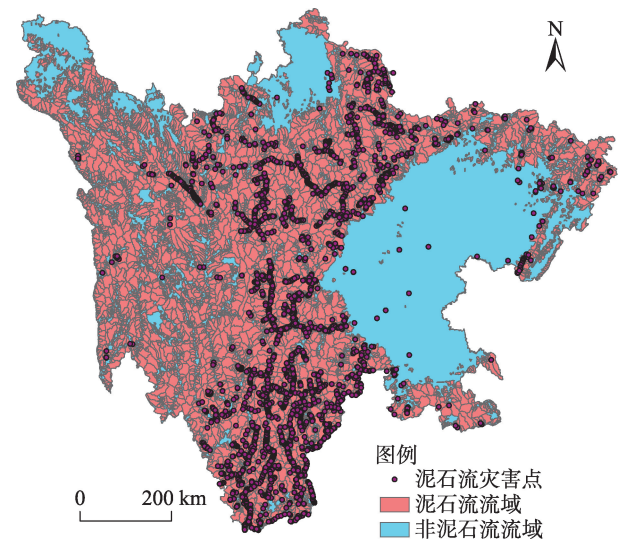


图3 潜在泥石流流域判别结果

Fig. 3 The identification results of potential debris flow

通过加入已查明的3177条泥石流沟,与判别结果进行叠置分析,已查明的泥石流沟有2923条位于本方法判别的泥石流流域中,占92.01%,有254条位于本方法判别的非泥石流流域中,占7.99%。经分析,用于判别的小流域,其面积均大于0.25 km<sup>2</sup>,因此,对于面积小于0.25 km<sup>2</sup>的坡面泥石流沟谷,则难

以识别出来,但由于其汇水面积较小,危害程度较低,未作深入研究。

## 4 泥石流危险性评价

### 4.1 评价指标体系

根据相对一致性、主导因素、综合分析的原则,从泥石流发生的能量条件、松散固体物质条件、降水条件、人类活动条件入手,初步选择高差、沟床比降、多年平均年降水量、多年年降水变差系数、断层

密度、地震烈度、地层岩性、土地利用8个指标作为评价因子。以研究区DEM、1:20万地质图、地震震级及烈度数据、1980–2014年气象站点降水数据、1:10万土地利用数据为基础,将前文判识具备泥石流发生能量条件的7798个小流域分别与之叠加,量化得小流域中各评价指标的取值,然后进行评价指标的相关性分析,得到相关系数如表1所示。

从评价因子的相关矩阵表可以看出,本文所选取的8个评价指标之间不存在明显的相关关系,可作为泥石流危险性评价指标。

表1 评价因子间的相关系数  
Tab. 1 Correlation matrix between evaluation factors

	高差	沟床比降	断层密度	地震烈度	地层岩性	土地利用	平均降水	降水变差
高差	1.000	0.404	0.171	0.233	-0.169	-0.458	0.107	0.161
沟床比降	0.404	1.000	0.111	0.122	-0.119	-0.364	0.012	0.091
断层密度	0.171	0.111	1.000	0.157	-0.119	-0.140	-0.052	0.000
地震烈度	0.233	0.122	0.157	1.000	-0.119	-0.200	-0.173	-0.105
地层岩性	-0.169	-0.112	-0.119	-0.119	1.000	0.273	0.396	0.195
土地利用	-0.458	-0.364	-0.140	-0.200	0.273	1.000	0.133	-0.002
平均降水	0.107	0.012	-0.052	-0.173	0.396	0.133	1.000	0.395
降水变差	0.161	0.091	0.000	-0.105	0.195	-0.002	0.395	1.000

### 4.2 评价模型

可拓学(Extenics)是中国学者蔡文教授于1983年创立并领导发展起来的一门用于解决矛盾问题的新学科,物元是可拓学认识世界的基本逻辑细胞,它将现实事物抽象为事物、特征及事物关于该特征的量值所组成的一个三元组,记作 $R=(\text{事物}, \text{特征}, \text{量值})=(N, C, C(N))$ ,这是一个将事物的质与量有机结合起来的研究模型<sup>[18]</sup>。

物元分析方法解决综合评判问题的步骤包括确定经典域、确定节域、确定待评价物元、计算关联度函数、确定权重系数,计算隶属程度、确定最终评价等级等环节。通过分析已查明泥石流沟中断层密度、地层岩性、高差、沟床比降、地震烈度、土地利用、多年平均年降水量、多年年降水变差系数的取值及其分布,确定了各因素相对于泥石流发生5个等级的区间值,将这些区间值应用于泥石流危险性评价的物元模型中,从而得到研究区泥石流危险性评价的标准物元模型如表2所示。

在标准物元模型的基础上,为进一步确定各评价因子的权重,通过主成分分析,计算得到各评价指标的权重如表3所示,各因子权重之和为1。

### 4.3 危险性评价

基于建立的可拓物元模型、评价因子及权重,分别计算各流域单元的危险度值,从而实现各小流域泥石流危险性评价。按照等间距划分方法,根据小流域危险度值,分别划分为极低危险区(一级)、低度危险区(二级)、中度危险区(三级)、高度危险区(四级)、极高危险区(五级)5个等级<sup>[19]</sup>,如表4所示。

按上述方法对各小流域泥石流危险度分区,对于判识为不具备泥石流发生所需能量条件的非泥石流区域,划分为极低危险区,其结果如图4所示。

### 4.4 评价结果分析

从图4可以看出,泥石流中等、高度、极高危险区主要分布于龙门山断裂带、鲜水河活动断裂、安宁河断裂及周边区域,低度危险区、极低危险区主要分布于成都平原、诺尔盖草原等区域。对各等级危险区面积及流域数统计表明,极高危险区共1002个小流域,面积为 $3.42 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占四川省总面积的7%,高度危险区共1725个小流域,面积为 $7.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占四川省总面积的15.8%,中度危险区共1946个小流域,面积为 $9.12 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占四川省总面积的18.8%,低度危险区共2009个小流域,面积为

表2 泥石流危险性评价的标准物元模型

Tab. 2 Standard matter-element model for debris flow hazard assessment

概率	流域单元特征	标准物元
0-0.2	1. 断层密度/(m/km <sup>2</sup> ): F=0 2. 地层岩性: R=1 3. 地震烈度/°: 0<E≤3 4. 年平均降水量/mm: P <sub>mean</sub> <500, P <sub>mean</sub> >1100 5. 降水量年际变差: C<0.1 6. 高差/m: H>3100, H≤100 7. 沟床比降/‰: S>650, S<50 8. 土地利用: 0.05<L≤0.1	$R_p = \begin{bmatrix} \text{一级, } H, <0, 100>, <3100, \infty> \\ S, <0, 50\%>, <650\%, \infty> \\ F, <0> \\ E, <0, 3> \\ R, <1> \\ L, <0.05, 0.1> \\ P_{mean}, <0, 500>, <1100, \infty> \\ C_v, <0, 0.1> \end{bmatrix}$
0.2-0.4	1. 断层密度/(m/km <sup>2</sup> ): 0<F≤0.15 2. 地层岩性: R=2 3. 地震烈度/°: 3<E≤6 4. 年平均降水量/mm: 500<P <sub>mean</sub> ≤600 1000<P <sub>mean</sub> ≤1100 5. 降水量年际变差: 0.14<C≤0.16 6. 高差/m: 100<H≤300, 2500<H≤3100 7. 沟床比降/‰: 500<S≤650 8. 土地利用: 0.1<L≤0.15	$R_p = \begin{bmatrix} \text{二级, } H, <100, 300>, <2500, 3100> \\ S, <500\%, 650\%> \\ F, <0, 0.15> \\ E, <3, 6> \\ R, <2> \\ L, <0.1, 0.15> \\ P_{mean}, <500, 600>, <1000, 1100> \\ C_v, <0.14, 0.16> \end{bmatrix}$
0.4-0.6	1. 断层密度/(m/km <sup>2</sup> ): 0.15<F≤0.3 2. 地层岩性: R=3 3. 地震烈度/°: 6<E≤7 4. 年平均降水量/mm: 600<P <sub>mean</sub> ≤700, 900<P <sub>mean</sub> ≤1000 5. 降水量年际变差: 0.1<C≤0.12 6. 高差/m: 300<H≤400, 1700<H≤2500 7. 沟床比降/‰: 350<S≤500, 8. 土地利用: 0<L≤0.05	$R_p = \begin{bmatrix} \text{三级, } H, <300, 400>, <1700, 2500> \\ S, <350\%, 500\%> \\ F, <0.15, 0.3> \\ E, <6, 7> \\ R, <3> \\ L, <0, 0.05> \\ P_{mean}, <600, 700>, <900, 1000> \\ C_v, <0.1, 0.12> \end{bmatrix}$
0.6-0.8	1. 断层密度/(m/km <sup>2</sup> ): 0.3<F≤0.5 2. 地层岩性: R=4 3. 地震烈度/°: 7<E≤9 4. 年平均降水量/mm: 700<P <sub>mean</sub> ≤800 5. 降水量年际变差: C>0.16 6. 高差/m: 400<H≤600, 1400<H≤1700 7. 沟床比降/‰: 150<S≤350 8. 土地利用: L>0.2	$R_p = \begin{bmatrix} \text{四级, } H, <400, 600>, <1400, 1700> \\ S, <150\%, 350\%> \\ F, <0.3, 0.5> \\ E, <7, 9> \\ R, <4> \\ L, <0.2, \infty> \\ P_{mean}, <700, 800> \\ C_v, <0.16, \infty> \end{bmatrix}$
0.8-1	1. 断层密度/(m/km <sup>2</sup> ): F>0.5 2. 地层岩性: R=5 3. 地震烈度/°: 9<E≤11 4. 年平均降水量/mm: 800<P <sub>mean</sub> ≤900 5. 降水量年际变差: 0.12<C≤0.14 6. 高差/m: 600<H≤1400 7. 沟床比降/‰: 50<S≤150 8. 土地利用: 0.15<L≤0.2	$R_p = \begin{bmatrix} \text{五级, } H, <600, 1400> \\ S, <50\%, 150\%> \\ F, <0.5, \infty> \\ E, <9, 11> \\ R, <5> \\ L, <0.15, 0.2> \\ P_{mean}, <800, 900> \\ C_v, <0.12, 0.14> \end{bmatrix}$



表3 区域泥石流危险性评价因子权重表

Tab. 3 Weighting coefficients of assessment factors of regional debris flow hazard

类别	地面要素类					气象要素类		
	断层密度	地层岩性	地震烈度	高差	沟床比降	土地利用	年平均降水量	降水量年际变差
各类权重	0.17	0.1	0.08	0.22	0.2	0.04	0.14	0.05

表4 区域泥石流危险度等级划分<sup>[5]</sup>

Tab. 4 Hazard degree classification of regional debris flow

区域泥石流危险度	危险度分区	泥石流活动特征
0.0-0.2	极低危险区	基本无泥石流活动,没有泥石流灾难,安全区
0.2-0.4	低度危险区	能够发生小规模和低频率的泥石流,一般不会造成重大灾难和严重危害
0.4-0.6	中度危险区	能够间歇性发生中等规模的泥石流,较少造成重大灾难和严重危害
0.6-0.8	高度危险区	能够发生大规模和高频率的泥石流,可造成重大灾难和严重危害
0.8-1.0	极高危险区	能够发生巨大规模和特高频率的泥石流,可造成重大灾难和严重危害

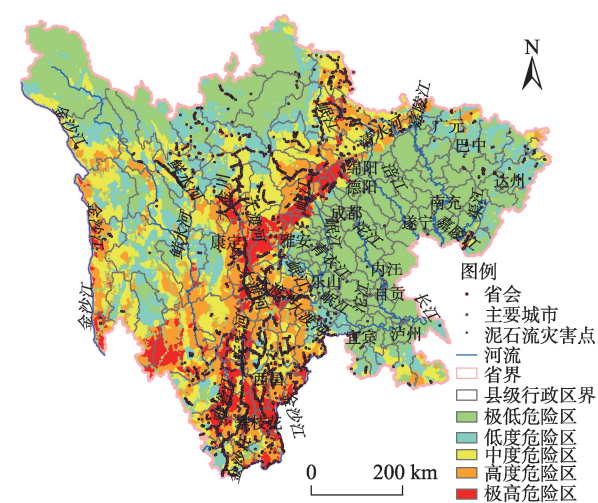


图4 四川省泥石流危险性评价结果图

Fig. 4 Hazard assessment results of debris flow

7.95×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,占四川省总面积的16.4%,极低危险区共1116个小流域,面积为20.31×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,占四川省总面积的42%。中度以上危险区的面积共20.19×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,占四川省总面积的41.67%。

4.4.1 各市级行政区内泥石流危险区分布

通过将市级行政区边界与评价结果叠加,分区统计得到四川省各地市州极低危险区、低度危险区、中等危险区、高度危险区、极高危险区的分布如表5所示。

从表5可看出,极高危险区主要分布于凉山、甘孜、阿坝、雅安、攀枝花、德阳、成都等区域。高度危险区主要分布于凉山、甘孜、阿坝、雅安、乐山、广元、绵阳、攀枝花等区域。中度危险区主要位于阿坝、甘孜、凉山、雅安、达州、宜宾、乐山、广元、绵阳、泸州、攀枝花、成都等区域。

表5 各市级行政区内不同等级危险区面积统计表(km<sup>2</sup>)

Tab. 5 The area of each hazard degree in all prefectures and cities

市级行政区	极低危险区	低度危险区	中度危险区	高度危险区	极高危险区
成都市	8285	711	829	503	1777
自贡市	4376	0	0	0	0
攀枝花市	872	1260	1890	2157	1231
泸州市	6391	2949	1950	924	0
德阳市	4364	71	326	65	1093
绵阳市	10 355	346	4684	4237	567
广元市	8000	3436	2571	2182	14
遂宁市	5322	0	0	0	0
内江市	5003	5	0	0	0
乐山市	5435	1936	1378	3848	539
南充市	12516	50	0	0	0
眉山市	577	300	418	688	15
宜宾市	8095	3375	1733	49	0
广安市	4780	892	331	350	0
达州市	8587	6060	1548	375	4
雅安市	2337	852	2602	4335	4898
巴中市	6817	4373	461	635	0
资阳市	7922	15	4.56	0	0
阿坝藏族羌族自治州	32 373	18 952	20 387	8530	2493
甘孜藏族自治州	48 051	30 493	37 376	25 326	7188
凉山彝族自治州	7415	3397	12 677	22 338	14 356

4.4.2 中等以上泥石流危险区分布

(1)极高危险区

极高危险区主要分布在岷江上游的都江堰、彭州、什邡、绵竹、安县、北川、茂县、九寨沟、汶川等县境内,大渡河中下游及其支流流域的丹巴、康定、泸

定、石棉、汉源、甘洛等县境内,安宁河、雅砻江流域的冕宁、喜德、德昌、普格、米易、盐边、盐源等县境内,以及金沙江流域的巴塘、得荣、木里、会东、会理、宁南等69个县境内。区内地形十分陡峭,松散固体物质极其丰富,生态条件十分脆弱,降水量充沛,具备了泥石流活动最为有利的能量、物质和能量转化和物质汇集条件,泥石流暴发频率高,规模巨大,对国民经济建设和人民生命财产具有严重的破坏和威胁能力。

### (2) 高度危险区

高度危险区主要分布在金沙江、岷江、雅砻江、大渡河等流域,木里、康定、巴塘、平武、会理、汶川、盐源、白玉、理县、道孚、理塘、冕宁、九寨沟、丹巴、石棉、德格、雅江、雷波、马边、茂县、会东、甘洛、美姑、泸定、稻城、盐边、汉源、布拖、米易、江油、松潘、甘孜、洪雅、德昌、北川等89个县。区内地形陡峻,松散碎屑物质十分丰富,生态条件脆弱,降水充足,具备了泥石流活动最为有利的能量、物质和能量转化和物质汇集条件,泥石流暴发频率高,泥石流规模很大。

### (3) 中度危险区

在各大流域均有分布,主要分布在金沙江、岷江、雅砻江流域,理塘、白玉、小金、德格、乡城、金川、九龙、道孚、松潘、平武、木里、九寨沟、盐源、巴塘、马尔康、新龙、黑水、理县、甘孜、石渠、雅江、康定、炉霍、北川、青川、茂县、色达、昭觉、古蔺、丹巴、盐边、喜德、美姑、冕宁、稻城、会理等115个县市区。区内地形陡峭,松散碎屑物质丰富,生态条件脆弱,降水充足,具备了泥石流活动有利的能量和物质及能量转化和物质汇流条件,泥石流规模大,暴发频率中等,对国民经济建设和人民生命财产具有较大的破坏和威胁能力。

#### 4.4.3 已查明泥石流流域与危险性评价结果对比分析

将已查明的3177个泥石流流域与危险性评价结果进行叠加分析,结果表明,已查明的泥石流流域713个位于中度危险区,占已查明总数的22.44%,829个位于高度危险区,占已查明总数的26.09,1085个位于极高危险区,占已查明总数的34.15%。已查明的泥石流沟位于中度危险区、高度危险区、极高危险区的有2627条,占82.69%。研究评价为极高危险区的各小流域,均属已查明的泥石流流域。评价为高度危险区的小流域中,有896个

属于未查明的泥石流流域,评价为中度危险区的小流域,1233个属于未查明的泥石流流域,这些危险等级较高,但尚未查明的泥石流流域,主要分布于雅安、都江堰、攀枝花、西昌、绵阳、广元、乐山、宜宾等市,以及龙门山断裂带、鲜水河活动断裂、安宁河断裂两侧和大渡河、金沙江、岷江流域,是四川省泥石流防灾减灾需重点关注和加强排查的区域。

## 5 结论与讨论

四川省由于位于中国地势的第二级台阶向第三级台阶变化的过渡带、第一级台阶向第二级台阶变化的过渡带内,是中国泥石流的多发区和高发区,泥石流危害和损失严重,以GIS为平台,可拓物元理论为基础,小流域为评价单元,开展了研究区潜势泥石流流域判识和小流域泥石流危险性评价,得到结论如下:

(1)通过分析已查明泥石流在区内的分布规律,各泥石流流域面积、单位面积相对高度等的分布特征,从小流域泥石流发生应具备的能量条件着手,建立潜势泥石流流域判识模型,分析、判别出了四川省具备泥石流发生所需能量条件的小流域共7798个。

(2)分析建立了基于可拓物元理论的泥石流危险性评价模型,建立了危险性评价指标体系,对具备泥石流发生所需能量条件的小流域进行危险性评价,通过加入已查明泥石流沟,对危险性评价结果进行分析,结果表明,已查明泥石流沟中,82.69%位于中度及以上危险区,88.42%以上位于轻度以上危险区。对评价为中度以上危险区,但并未查明的泥石流流域分布进行了分析。

(3)危险性评价结果表明,中度危险区、高度危险区、极高危险区的面积共 $20.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占四川省总面积的41.67%;高度、极高危险区在区内各大流域均有分布,但主要分布于岷江、金沙江、涪江、嘉陵江、雅砻江和渠江流域;高度危险区在凉山彝族自治州、甘孜藏族自治州、阿坝藏族羌族自治州、雅安市、乐山市、广元市、绵阳市、攀枝花市等区域分布较广。

本文通过先判识再评价的思路开展小流域泥石流危险性评价,即先建立模型对区内小流域是否具备发生泥石流所需能量条件进行判识,对具备能量条件的小流域进行评价,以期使评价结果的相对



差异性更具参考价值。由于泥石流的影响因素极其复杂,从相对变化缓慢的地貌条件出发建立能量判识条件,简单可行,但相对单一,后续研究需加入地质、降水、人类活动等因素进一步开展泥石流判识模型的研究。

#### 参考文献(References):

- [1] 唐邦兴,周必凡,吴积善,等.中国泥石流[M].北京:商务印书馆,2000. [ Tang B X, Zhou B F, Wu J S, et al. Debris in China[M]. Beijing: The Commercial Press, 2000. ]
- [2] Saezok E, Gardner J. GIS-Based mapping and modelling of debris flow hazards in Banff National Park, Alberta [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 1998(5):7-20.
- [3] Liu X L, Lei J Z. A method for assessing regional debris flow risk: an application in Zhaotong of Yunnan province (SW China)[J]. Geomorphology, 2003,52(3):181-191.
- [4] Hollingsworth R, Kovacs G S. Soil slumps and debris flows: prediction and protection[J]. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 1981,38(1):17-28.
- [5] 刘希林,莫多闻.泥石流风险评价[M].成都:四川科学技术出版社,2003. [ Liu X L, Mo D W. Debris flow risk assessment[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003. ]
- [6] 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 C. Activity tendency prediction of rainfall induced landslides and debris flow in the Wenchuan earthquake areas[J]. Journal of Mountain Science, 2010,28(3):341-349. ]
- [7] 丁继新,杨志法,尚彦军,等.区域泥石流灾害的定量风险分析[J].岩土力学,2006,27(7):1071-1076. [ Ding J X, Yang Z F, Shang Y J, et al. Quantitative risk analysis of regional debris flow hazards[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006,27(7):1071-1076. ]
- [8] 王常明,田书文,王翊虹,等.泥石流危险性评价:模糊C均值聚类——支持向量机法[J].吉林大学学报(地球科学版),2016,46(4):1168-1175. [ Wang C M, Tian S W, Wang Y H, et al. Risk assessment of debris flow: a Method of SWM based on FCM[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016,46(4):1168-1175. ]
- [9] 丁文峰,杜俊,陈小平,等.四川省山洪灾害风险评估与区划[J].长江科学院院报,2015,32(12):41-45,97. [ Ding W F, Du J, Cheng X P, et al. Risk assessment and regionalization of mountain torrent disaster in Sichuan Province [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015,32(12):41-45,97. ]
- [10] 杜俊,丁文峰,任洪玉.四川省不同类型山洪灾害与主要影响因素的关系[J].长江流域资源与环境,2015,24(11):1977-1983. [ Du J, Ding W F, Ren H Y. Relationships between different types of flash flood disasters and their main impact factors in the Sichuan Province[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015,24(11):1977-1983. ]
- [11] 钟敦论.中国泥石流滑坡编目数据库与区域规律研究[M].成都:四川科学技术出版社,1998. [ Zhong D L. The debris flow and landslide catalog database of China and regional regularity[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1998. ]
- [12] 苏鹏程,倪长健,孔纪名,等.区域泥石流危险度评价的影响因子识别[J].水土保持学报,2009,29(1):128-132. [ Su P C, Ni C J, Kong J M, et al. Impact factors identification of regional debris flow risk assessment[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009,29(1):128-132. ]
- [13] 苏鹏程,韦方强,冯汉中,等.“8.13”四川清平群发性泥石流灾害成因及其影响[J].山地学报,2011,29(3):337-347. [ Su P C, Wei F Q, Feng H Z, et al. Causes and effects of group occurring debris flow disasters in Qingping Town, Mian Yuan River Upstream, Sichuan[J]. Journal of Mountain Sciences, 2011,29(3):337-347. ]
- [14] 谷复光,王清,张晨.基于投影寻踪与可拓学方法的泥石流危险度评价[J].吉林大学学报(地球科学版),2010,40(2):373-376. [ Gu F G, Wang Q, Zhang C. Debris flow risk assessment by PPC and Extenics[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2010,40(2):373-376. ]
- [15] 铁永波,唐川.汶川县城泥石流灾害风险评价研究[J].灾害学,2010,25(4):43-47. [ Tie Y B, Tang C. Assessment of Wenchuan debris-flow risk[J]. Journal of Catastrophology, 2010,25(4):43-47. ]
- [16] 庄建琦,裴来政,丁明涛,等.潜在泥石流的界定与判识——以金沙江流域溪洛渡库区为例[J].灾害学,2009,24(4):1-9. [ Zhuang J Q, Pei L Z, Ding M T, et al. The definition and identification of potential debris flow gully - taking the Xiluodu reservoir area as an example[J]. Journal of Catastrophology, 2009,24(4):1-9. ]
- [17] 熊俊楠.基于遥感与GIS的精细化区域泥石流风险评估[D].北京:中国科学院大学,2013. [ Xiong J N. Refinement of regional debris flow risk assessment based on remote sensing and GIS[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. ]
- [18] 蔡文.物元模型及其应用[M].北京:科学技术文献出版社,1994. [ Cai W. Matter-element model and application[M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1994. ]
- [19] 李华威,万庆.小流域山洪灾害危险性分析之降雨指标选取的初步研究[J].地球信息科学学报,2017,19(3):425-435. [ Li H W, Wang Q. Study on rainfall index selection for hazard analysis of mountain torrents disaster of small watersheds[J]. Journal of Geo-information Science, 2017,19(3):425-435. ]