

区域泥石流孕灾环境危险性评价 ——以北京军都山区为例

程维明¹, 夏 遥¹, 曹玉尧¹, 宋 杨¹, 刘海江²

(1. 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;
2. 中国环境监测总站, 北京 100012)

摘要: 以北京军都山区实测泥石流沟谷数为基准, 基于因子叠加、信息量模型和FCM-粗糙集三种方法, 分别获得了泥石流灾害发生的危险性等级分布, 结果表明: ①各分区单位面积内泥石流沟谷数都随着危险性评价等级的提高而增多; ②因子叠加法和信息量模型法可得出五级泥石流灾害危险性分级, 而粗糙集法只得出三级分级; ③以实际泥石流沟谷落在评价区数目为标准, 信息量模型法有90%以上的泥石流沟谷在危险性高和极高区域; 粗糙集法得到危险区域覆盖了63.72%的泥石流沟谷分布; ④从单位面积泥石流沟谷数与泥石流沟谷分布比率可得, 信息量模型法评价精度较高, 因子叠加法没有形成良好的梯度, 而粗糙集法计算等级结果与其他方法存在差异, 故须在其他区域进行进一步研究。

关键词: 泥石流; 孕灾环境; 危险性; 评价; 军都山区

1 引言

泥石流是中国山区常见的自然灾害, 是由土、石等固体物与水相混合, 在重力作用下沿陡峻沟坡运动的饱和流体^[1]。我国是世界上泥石流灾害最严重的国家之一, 据初步统计, 中国境内泥石流沟谷遍及26个省、市的广大山区, 可能发生泥石流的沟谷数多达3万余条, 其灾害发生频率与损失有逐年增加的趋势, 平均每年造成的经济损失高达10多亿元^[2]。因此, 泥石流已成为制约中国山区经济发展和人民生命财产安全的最严重自然灾害之一, 故对区域泥石流灾害研究和危险性评价具有重要现实意义^[3]。

泥石流灾害危险性是指在一定区域内泥石流灾害发生的可能性。根据泥石流危险性评价尺度和关注对象的不同, 其危险性评价研究分为单沟和区域评价两种。其中, 前者是指针对一条或几条泥石流沟, 而后者是指对较大范围地区内的泥石流灾害危险性进行评价^[3]。

国际上, 泥石流危险性评价研究起步较早^[4]。第三届国际地貌学大会上, David总结了各国在泥石流危险性评价的进展, 及泥石流灾害调查、分析、评价与检验的分析方法^[5]。Wieczorkd等对加利福尼亚山区泥石流灾害发生情况进行了危险性编目工作, 并对当地的泥石流灾害进行了遥感危险性评价^[6,7]。Hollingsworth等采用权重相加方法对滑坡泥石流危险性进行了评价^[8]。Hansen针对泥石流危险性评价, 建立了区域泥石流危险性评价研

收稿日期: 2012-05-25; 修订日期: 2012-11-17

基金项目: 国家科技支撑计划 (2012BAH28B01-03); 科技基础性专项 (2011FY110400-2); 国家自然科学基金项目 (41171332)

作者简介: 程维明 (1973-), 甘肃天水人, 副研究员, 从事数字地貌信息提取与制图研究。

E-mail: chengwm@lreis.ac.cn

究的理论基础^[9]。Carrara等在综合相关成果的基础上,提出了泥石流灾害制图的技术问题^[10,11]。Mejia-Navarro利用GIS技术提出了区域地质灾害敏感性和易损性生成泥石流风险评价分区图的方法^[12]。随着遥感与地理信息系统的发展,为区域性泥石流危险性评价研究提供了更加便利的数据来源与空间分析工具,使区域泥石流危险性评价研究的准确度与速度都得到了很大提高^[13-18]。

中国的泥石流危险性评价研究发展较快。谭炳炎等从定性角度对泥石流的危险性做出判别,提出了泥石流严重程度的综合评判方法^[19,20]。张梁等提出的地质灾害灾情数量化综合评判的科研成果在铁路部门得到推广和应用^[21]。罗云介绍了国外安全科学中对人类劳动环境的危险性评价方法^[22]。刘希林所著“泥石流危险度判定的研究”^[23]被视为中国泥石流危险性研究的开始,他将定性分析与定量分析有效地结合起来,提出了多因子综合评判的模型^[24,25]。同时,中国科学院成都山地灾害与环境研究所对雅砻江二滩水电站库区、长江三峡水电站库区和长江上游进行了滑坡与泥石流危险性分区的研究^[26-28],标志着中国的泥石流危险性评价工作开始进入实际应用阶段。进入20世纪90年代,泥石流危险性评价工作在全国范围内展开,如全国滑坡、泥石流灾害分布与灾害区划图^[29],四川攀西地区、大渡河及泸定县滑坡泥石流危险程度分区图^[30-32]、黄河上游地区崩塌滑坡泥石流危险性评估^[33],中国公路、云南省泥石流危险性评估^[34,35]以及中国自然灾害风险评估^[36,37]等等。

随着数学理论与计算机技术的发展,研究者多使用数学与GIS相结合的方法来进行泥石流危险性评价,获得了大量成果。如铁永波等将信息熵理论与泥石流危险性评价相结合,对昆明市东川城区进行泥石流危险性评价^[38]。原立峰基于SVM理论,以云南省37条泥石流沟为样本,建立了泥石流危险性评价的支持向量机模型^[39]。方兴等将模糊概率模型应用于区域泥石流危险性评价中,尝试对多因子综合评价模型进行了改进^[40]。宋杨等使用因子叠加法,对北京市密云山区周边山区进行滑坡泥石流易发区预测^[41]。其他多名学者也在使用分形理论、神经网络等多种方法进行泥石流危险性评价方面做出了很多贡献。另外,粗糙集方法作为处理不确定性问题的典型方法,其最主要的特点是完全数据驱动,可有效地去除主观判断对结果的影响,在诸多领域已得到了广泛应用^[42-45]。

灾害是地球表层异变过程的产物,是致灾因子、孕灾环境与承灾体综合作用的结果^[46],目前对泥石流灾害孕灾环境危险性的评价,多数依靠以往经验及因子叠加方法进行研究,其结果存在一定的主观性。同时研究中单一方法的评价相对较多,多种方法的比较相对较少。因此,本研究试图以实测泥石流沟谷为基准,首先对比分析因子叠加法、信息量模型法和粗糙集法各自的特点,然后分别计算多种方法对区域泥石流灾害危险性及其等级分区,并对对比分析各自的评价结果,以期为其他区域滑坡与泥石流灾害危险性评价提供基础和技术支撑。

2 泥石流危险性评价方法

2.1 因子叠加法

因子叠加法是最为经典的泥石流危险性评价方法之一,其大体步骤为:收集、筛选致灾因子指标,对各个分区内的各致灾因子进行量化、归一化处理,确定各致灾因子指标的权重,然后根据各个致灾因子的量化值和权重叠加分析得出危险性评价结果^[41]。因子叠加法可以使用多种方法来确定致灾因子的量化标准和权重,从而去除主观因素,增加评价方

法的客观性，提高评价精度。

2.2 信息量模型法

信息量法是在已知灾害数据的基础上，利用其数据与其影响因素，计算出影响因素为危险性提供的信息量，建立评价模型，对具有相似地质环境的其他地区进行区域泥石流危险性评价^[47,48]。信息量模型利用已有的灾害数据研究影响因子和灾害发生之间的关系，其结果的稳定性与可信度高，不需要先验知识参与的特点，简化了数据准备过程中的步骤，有利于计算机系统的自动化评价。

2.3 FCM-粗糙集方法

FCM聚类方法：即模糊C-均值聚类方法，1972年由Bezdek等提出^[49]。它的思想是使得被划分到同一簇的对象之间的相似度最大，而不同簇之间的相似度最小，是一种由迭代算法近似得到目标函数的最优值^[50]。

粗糙集数据挖掘方法：粗糙集是波兰理工大学Pawlak提出用来研究不完整数据、不精确知识的表达、学习、归纳等方法的一套理论^[50,51]。该方法能有效地分析和处理不精确、不一致和不完整等的各种不完备信息，直接从给定问题的描述集合出发，从中发现数据潜在的规律，特别适用于复杂系统的数据挖掘^[52]。其主要思想就是通过对已有知识库进行知识约简，从而推导出问题的决策或分类规则，其主要特点是无须提供问题所需处理的数据集合之外的任何先验信息^[53]，因此适合从客观的角度对研究对象进行评价^[54,55]。

FCM-粗糙集评价方法：粗糙集作为一种针对不确定性数据的分析方法，其要求数据具有一定的格式，需要对数据进行预处理，其过程为离散与简约。粗糙集软件Rosetta提供了几种离散化与简约工具，经过实际验证发现，提供的简约工具可以达到较好效果，但是内置的离散化工具的计算结果并不能很好地满足规则生成的需要。因此，利用FCM方法取代内置离散化工具对数据进行离散化处理。

FCM-粗糙集方法分为5个步骤（图1）：即原始数据的转换、使用FCM方法对数据进行离散化、约简、规则生成和结果预测及验证。通过数据转换使平面分散的点状数据转换成抽象的属性表，形成FCM方法需要的决策系统，使用FCM方法的离散化使数据满足粗糙集处理的需要，约简去除了属性中多余的部分，规则生成为推理和预测提供了规则库，结果预测和验证对方法和结果进行了客观检验。

3 研究区概况与灾害现状

军都山属燕山山系，地表形态上表现为不连续的断块山脉，地势由南往北呈阶梯状增高，军都山地势最高处海拔2241 m。军都山区地层包括侵入岩、喷出岩、各类变质岩、碳酸盐岩、沉积碎屑岩和火山碎屑岩、各类成因的松散堆积物等都有出露^①。

军都山区年平均降水量等值线走向大

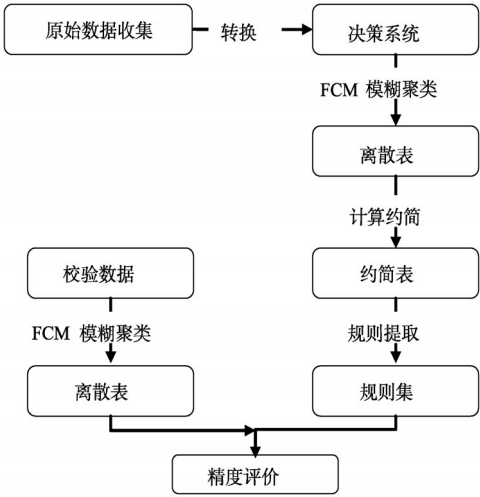
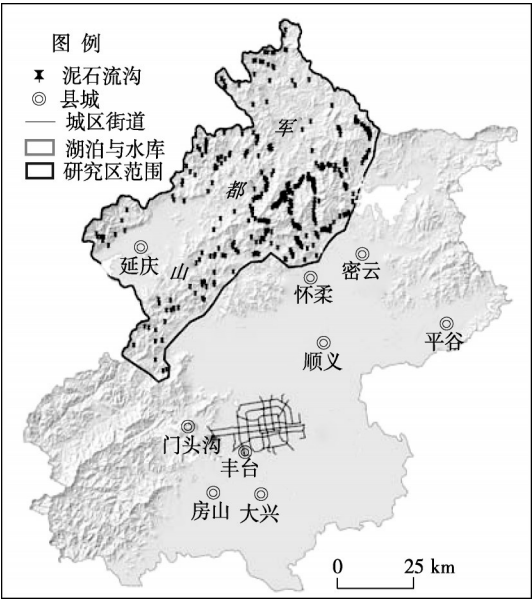


图1 FCM-粗糙集方法主要流程
Fig. 1 Flowchart of FCM-rough set method

① 霍亚贞, 杨作民, 孟德政. 北京自然地理. 内部资料, 1988.

致与山脉走向相一致。年降水量一般在450-660mm之间,自东南向西北方向逐渐减少。降水的季节分配极不均匀,下半年的降水量占全年90%以上,以夏季为主,尤其集中于7、8两月,要占下半年降水量的84%。

针对研究区泥石流灾害的调查与收集,一般认为,凡是发生过泥石流这一事件的沟或具备了形成泥石流这一事件的沟,都应认定为泥石流沟。在实际工作中,确定泥石流沟主要根据泥石流活动产物、泥石流活动史以及泥石流形成的基本条件来确定泥石流沟谷。目前,军都山区共确定泥石流沟谷339条^[56,57](图2)。研究区内各乡镇的泥石流分布情况如表1。



4 军都山区区域泥石流危险性评价

图2 研究区地势特征及泥石流沟分布
Fig. 2 Hillshade and gullies of debris flows in the study area

4.1 评价指标的获取

泥石流主要孕灾环境指标包括地形、岩性、植被、水系等因素^[57]。其中地形与岩性要素提供了泥石流物质的重力势能条件与松散物质;植被分布影响泥石流松散物质的生成,选取了研究区7月下旬的植被指数数据作为泥石流危险性评价指标;水系条件既反应了泥石流的发育环境,提供了泥石流产生的水源,也综合反应了地形、地质、植被等数据的综合情况。由于北京地区降雨具有主要集中于7-9月份、其他时间降雨均较少的特点,因此降雨在泥石流的生成过程中,主要以集中性暴雨形式出现,作为直接导致泥石流灾害极端条件。故在本研究中,将其作为致灾因子而不是孕灾环境来处理。泥石流孕灾环境指标体系各级分类见图3。

4.1.1 地形指标的提取 地形条件主要从两个方面影响泥石流的发育,即相对高度和坡度。相对高度是山坡坡面的松散固体物质能否启动的根本条件,而坡度条件是势能能否转化成动能和转化速度的制约条件。除此之外,还选取了坡向、坡形作为地形信息的辅助因子。地形信息的数据源是使用研究区1:5万的DEM数据,通过ArcGIS软件的表面分析功能,得出研究区山地地貌类型包括小起伏低山、小起伏中山、中起伏低山、中起伏中山和大起伏中山等几类。

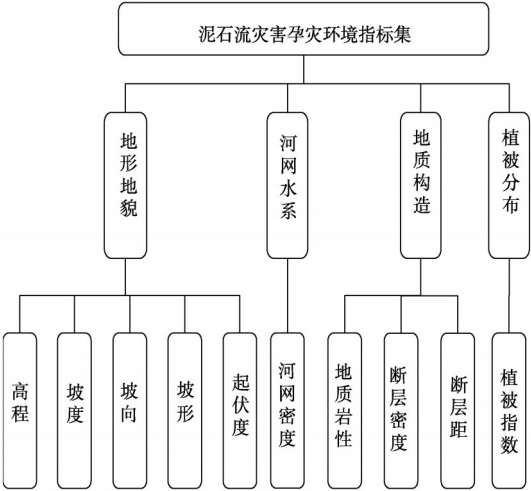


图3 泥石流孕灾环境危险性评价选取的指标
Fig. 3 Factors of hazard assessment of debris flows

表1 研究区内各乡镇泥石流沟谷数目
Tab. 1 Gully numbers of debris flows of each town in the study area

乡镇名	泥石流 沟谷数	编号	乡镇名	泥石流 沟谷数	编号	乡镇名	泥石流 沟谷数	编号
流村镇	9	1	渤海镇	19	12	香营乡	8	23
十三陵镇	4	2	九渡河镇	7	13	琉璃庙镇	53	24
八达岭镇	0	3	永宁镇	2	14	石城乡	29	25
长陵镇	8	4	西田各庄镇	5	15	千家店镇	30	26
康庄镇	0	5	张山营镇	10	16	冯家峪镇	25	27
怀柔镇	1	6	雁栖镇	28	17	汤河口镇	4	28
大榆树镇	0	7	怀北镇	17	18	宝山镇	10	29
大庄科乡	8	8	旧县镇	0	19	长哨营乡	2	30
延庆镇	0	9	四海镇	14	20	喇叭沟门乡	19	31
井家庄镇	0	10	刘斌堡乡	2	21	南口乡	8	32
沈家营镇	0	11	珍珠泉乡	17	22			

4.1.2 地质指标的提取 地质构造通常以断层和岩性来体现。对于断层指标，采用ArcGIS软件的缓冲区工具，根据断层的影响范围建立缓冲区，根据研究区内断层缓冲区的分布，对断层指标进行量化。对于岩性指标，根据岩层的坚硬程度^[58]，将整个研究区划分为五个等级，即极软岩、软岩、较软岩、较硬岩和硬岩。

4.1.3 环境指标的提取 选取植被指数和河网密度作为评价指标，其中前者利用NDVI作为分析指标，在研究区，实际调查表明大多数的泥石流都是发生在植被覆盖度较低的区域；后者利用单位面积的河网长度来计算。

4.1.4 降雨指标的提取 降水是一个复杂的指标，包括年降水量、5-9月降水量、暴雨等级、暴雨日数、降水年际变差系数、降水年内变差系数等。军都山区属半干旱半湿润气候区，降水主要集中在每年的6-9月，故选择6-9月的降水量作为降水评价指标。

4.2 区域泥石流危险性计算

4.2.1 因子叠加法 利用区域泥石流危险性评价指标，将评价指标数据根据其不同的评价等级进行重分类，统一到同一等级体系内，那些被认为比较容易引发泥石流的属性都被赋予比较高值^[41]，根据现有研究，推断出各个评价指标数据对泥石流灾害的权重，评价等级与影响权重如表2。将评价指标体系输入到运算模型中进行计算，并与研究区乡镇行政区划图进行叠加，得到基于多因子叠加法的军都山区泥石流危险性评价结果（图4a）。

4.2.2 信息量模型 基于DEM提取的地形因子（包括坡度、坡向等），利用地质数据提取地质构造因子（包括岩性、断层距离），利用数字地貌数据获取地貌形态类型因子，并栅格化各评价因子，通过空间分析功能计算各因子的信息量^[47,48]，针对输入的各评价因子图层进行空间分析建模，并与危险性分布图进行叠加，得到危险性评价结果（图4b）。

4.2.3 粗糙集模型 将经过重分类离散化后的评价指标数据与泥石流沟谷数据输入模型，自动整理数据表并调用粗糙集运算软件Rosetta进行基于粗糙集模型的规则提取，并根据提取得到的规则对研究区内的评价指标数据进行重分类。基于对研究区泥石流孕险环境危险性的影响程度以及数据的可获取性，选取了地形、河网水系、地质构造、植被数据4大类共10种孕灾环境指标，具体选用的孕灾环境指标如图4，提取采样点上的孕灾环境数

表2 区域泥石流危险性因子叠加法评价指标体系

Tab. 2 Factor system of hazard assessment of debris flows based on factors weighting-superposition method

		单位	指标等级				
相对高差			<100	100-300	300-500	500-700	>700
地形因子(0.4)	-0.1	m	0.2	0.4	0.6	0.8	1
	坡度	°	0-5	5-15	15-25	25-35	>35
	-0.6		0.2	0.4	0.6	0.8	1
	坡形		极凹坡	凹形坡	直坡	凸坡	极凸坡
	-0.1		0.2	0.4	0.6	0.8	1
	坡向	°	<90	90-145	145-180	180-270	270-360
	-0.1		0.4	0.8	1	0.6	0.2
	地貌类型		小起伏	中起伏	小起伏	中起伏	大起伏
			低山	低山	中山	中山	中山
	-0.1		0.2	0.4	0.6	0.8	1
环境因子(0.1)	植被指数		-1	0	0-0.1	0.1-0.4	0.4-1
	(0.6)		0.8	1	0.6	0.4	0.2
	河网	km/	0-15	15-30	30-45	45-60	>60
	密度(0.4)	100km ²	0.2	0.4	0.6	0.8	1
构造因子(0.2)	与断层距离(0.6)	m	<500	500-1000	1000-2000	2000-5000	5000-10000
			1	0.8	0.6	0.4	0.2
	地质岩组(0.4)		硬	较硬	软硬相间	软	极软
			0.2	0.6	1	0.8	0.4
降雨因子(0.3)	6-9月平均		<400	400-475	475-550	550-600	>600
	降水量(1)	mm	0.2	0.4	0.6	0.8	1

据，整理后得到FCM-粗糙集方法需要的决策表。

对得到的决策表中的连续数据，如高程、坡度、坡向等，使用Matlab软件的FCM函数进行离散化，M取值为2，聚类数选择为5。得到聚类中心后根据与聚类中心的距离将数据离散化，整理后导入粗糙集计算软件Rosetta，使用动态约简法对离散化后的数据表进行约简，并导出规则集。由于泥石流灾害的不确定性与复杂性，得到的约简结果和规则数目都较多。根据得到的规则集可以看出，并没有总结出简单易行的判断标准，而大多是较为复杂的规则，但还是反应了泥石流灾害发生的部分规律，体现了在多种孕灾环境综合作用下的泥石流灾害的形成规律与危险性分布（图4c）。

4.3 区域泥石流危险性评价结果

4.3.1 三种方法评价结果比较 基于因子叠加法、信息量法、粗糙集法三种模型对北京军都山区进行了泥石流危险性评价，得到了不同结果。根据《北京山区泥石流》中的泥石流沟谷^[51]，泥石流沟谷在不同危险区下单位面积内泥石流沟谷数分布如表3。从表3中可以看到，三种方法可得出不同的泥石流灾害危险性评价等级，其中因子叠加法和信息量模型法可得出五个等级，而粗糙集法仅能得到三种等级。

三种评价方法得到的评价结果中，各个分区内的单位面积内泥石流沟谷数都随着危险

性评价等级的提高而提高。其中信息量法的评价结果分级较为合理，各个分区内泥石流沟谷的平均条数呈阶梯式上升；而因子叠加法得到的高危险性区域和极高危险性区域区别并不明显；粗糙集法由于方法自身的限制，只能得到安全、危险、不确定三种结果，平均之后得到的单位面积泥石流沟谷数差别并不大，只是在研究区总体平均值0.070上下浮动。

以实际存在的泥石流沟谷落在不同评价区的数目作为评价标准，全研究区共有泥石流沟谷339条，分别计算不同评价分区内泥石流沟谷数占研究区泥石流沟谷总数的百分比（表4）。如表4所示，信息量法得到的评价结果对泥石流沟谷分布情况的表达最好，有90%以上的泥石流沟谷都在危险性高和极高的区域。粗糙集法得到的危险区域覆盖了63.72%的泥石流分布，但其分级类别较少。

从单位面积泥石流沟谷数与泥石流沟谷分布比率两方面可以看出，信息量法很好地概况了研究区内泥石流沟谷的分布情况，评价精度较高。但信息量法在运算过程中需要泥石流沟谷数据作为输入数据，因此并不能单一得将对泥石流沟谷分布的拟合程度作为唯一的结果评价标准，还需要其他数据进行佐证。因子叠加法得到的评价结果在高危险性与极高危险性区域差别并不明显，没有形成良好梯度，而且运算过程中人为因素较多，主观影响较大，但其优点是方法简单明确，且利用了以往经验与研究成果，在对研究区的孕灾环境较为熟悉，而且缺少泥石流沟谷实际分布数据时，可以获得很好效果。粗糙集法得到的危险区域，涵盖了63%的泥石流沟谷，证明其在区域泥石流危险性评价方面，是一种行之有效的方法，并且其完全数据驱动的模式，去除了主观因素的影响，并且在评价过程中得到的规则集，可以在进一步研究中在其他孕灾环境类似的区域进行应用。但由于方法限制，只能得到安全、危险、不确定三种评价结果，不能对评价结果进行进一步定量分级。

4.3.2 区域泥石流危险性分布与特征 根据多种方法获得军都山区区域泥石流危险性评价结果，得到研究区内各乡镇的危险性评价等级。以信息量法得到评价结果为基准，将研究区分为5个级别不同的危险区（表5）。

极低危险区：包括康庄镇、大榆树镇和沈家营镇，占研究区3.4%。该区域以平原为主，地势平坦，未见泥石流沟谷分布。区域内无明显断层，降雨较少。从松散物质、水力条件、坡度地形等方面均不利于形成泥石流灾害，泥石流灾害危险性极低。

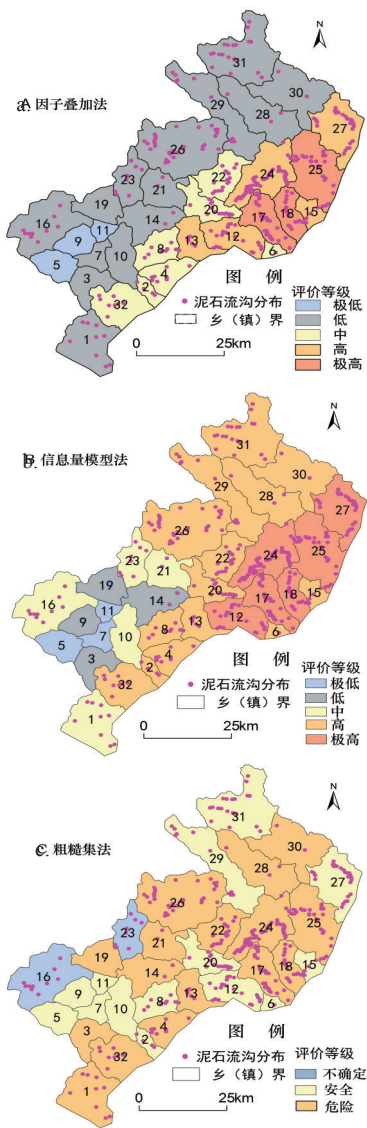


图4 三种方法获得区域泥石流危险性评价结果图（图中编号参见表1）

a: 因子叠加法; b: 信息量模型法;
c: 粗糙集法

Fig. 4 Assessment result maps from three methods

表 3 单位面积泥石流沟谷数分布
Tab. 3 Gully numbers of debris flows within unit area

评价方法	评价等级	面积(km ²)	乡镇数	泥石流沟谷数	单位面积内泥石流沟谷数 (条/km ²)
因子叠加法	极低	209.957	3	0	0
	低	2,693.845	14	96	0.004
	中	717.815	7	60	0.084
	高	754.038	5	109	0.145
	极高	501.914	3	74	0.147
信息量法	极低	186.461	3	0	0.000
	低	433.701	4	2	0.005
	中	860.957	5	29	0.034
	高	2,300.829	14	137	0.060
粗糙集法	极高	1095.059	6	171	0.156
	安全	1,667.497	14	105	0.063
	危险	2,824.299	16	216	0.076
	不确定	385.212	2	18	0.047

低危险区：包括了八达岭镇、延庆镇、旧县镇和永宁镇，占研究区 9.1%。该区域内除了永宁镇发现 2 条泥石流沟谷，均未发现泥石流沟谷。主要为盆地及盆周丘陵台地，坡度与高差较小，降雨与极低危险区相比较多，但仍在全区中处于较低水平。

中危险区：包括井家庄镇、刘斌堡乡、张山营镇、流村镇、香营乡 5 个乡镇，占研究区 17.6%。该区域以低山为主，夹有少量的中山和部分丘陵。该区域断层发育较多，岩体硬度较低，因此构成该区的岩体在各次构造运动中，形成了大量的松散碎屑物质。

高危险区：包括 14 个乡镇，占研究区 47.1%。该区域主要分布在研究区中部，为一条长条状区域，覆盖了全区 40% 的泥石流沟谷。该区域以中山为主，断层十分发育，岩石较破碎，汛期雨量较大且降雨较集中，时有暴雨、大暴雨和特大暴雨发生，为泥石流发育提供了较为有利的条件。

极高危险区：包括怀北镇、雁栖镇、琉璃庙镇等 6 个乡镇，占研究区 17.1%。该区域为中山区，绝对高度不高，但大部分地区相对高程很大，山坡陡峻，切割强烈，为泥石流的形成提供了充足的条件。该区复杂而软硬兼具的岩体在历次构造运动中形成了大量的断裂构造，将岩体切割得支离破碎，形成了大量的松散碎屑物质。该区域多年平均 6-9 月份降水量最高达 650 mm，是全研究区降雨最多的区域，且高度集中，经常形成强大的地表径流和沟谷洪流，为泥石流的形成提供了必要而又充足的水文条件。

表 4 不同危险区泥石流沟谷分布比率表 (单位: %)
Tab. 4 Rate of gully numbers of debris flows in different dangerous zones

因子叠加法	极低	低	中	高	极高
因子叠加法	0.00	28.32	17.70	32.15	21.83
信息量法	极低	低	中	高	极高
信息量法	0.00	0.59	8.55	40.41	50.44
粗糙集法	安全		不确定		危险
粗糙集法	30.97		5.31		63.72

表5 研究区内各乡镇危险性评价等级表

Tab. 5 Levels of hazard assessment of debris flows of each town in the study area

乡镇名	信息量法 评价等级	因子叠加法 评价等级	粗糙集法 评价等级	面积 (km ²)	泥石流 沟谷数	单位面积泥石流 沟谷数(条/km ²)
大榆树镇	极低	低	安全	55.975	0	0
康庄镇	极低	极低	危险	95.622	0	0
沈家营镇	极低	极低	危险	34.864	0	0
八达岭镇	低	低	安全	97.703	0	0
旧县镇	低	低	安全	110.265	0	0
永宁镇	低	低	安全	146.824	2	0.014
延庆镇	低	极低	危险	78.910	0	0
井家庄镇	中	低	安全	130.943	0	0
刘斌堡乡	中	低	安全	127.681	2	0.016
张山营镇	中	低	安全	268.979	10	0.037
流村镇	中	低	安全	217.120	9	0.041
香营乡	中	低	安全	116.233	8	0.069
长哨营乡	高	低	安全	251.327	2	0.008
汤河口镇	高	低	安全	231.224	4	0.017
宝山镇	高	低	安全	256.942	10	0.039
喇叭沟门乡	高	低	安全	302.118	19	0.063
千家店镇	高	低	安全	380.512	30	0.079
九渡河镇	高	高	不确定	108.161	7	0.065
西田各庄镇	高	高	不确定	52.732	5	0.095
怀柔镇	高	中	危险	24.801	1	0.040
南口乡	高	中	危险	171.374	8	0.047
大庄科乡	高	中	危险	116.992	8	0.068
长陵镇	高	中	危险	106.576	8	0.075
十三陵镇	高	中	危险	38.869	4	0.103
珍珠泉乡	高	中	危险	142.626	17	0.119
四海镇	高	中	危险	116.576	14	0.120
冯家峪镇	极高	高	危险	208.914	25	0.120
渤海镇	极高	高	危险	153.238	19	0.124
琉璃庙镇	极高	高	危险	230.993	53	0.229
石城乡	极高	极高	危险	256.86	29	0.113
怀北镇	极高	极高	危险	100.208	17	0.170
雁栖镇	极高	极高	危险	144.846	28	0.193

5 结论与讨论

本文主要结论如下：① 将FCM-聚类和粗糙集的优势相结合形成的FCM-粗糙集方法为本文提出的一种新尝试，它的主要特点是数据驱动，去除了主观因素和人为影响，利于计算机自动分析与计算。② 因子叠加法和信息量模型法可得出五级泥石流灾害危险性分级结果，即极低、低、中、高和极高。相比而言，粗糙集法只能得出三级分级结

果,即安全、不确定和危险。③三种评价方法的结果中,总体上,各个分区单位面积内,随着危险性评价等级的提高,泥石流沟谷数都在增多。同时每种方法分区的等级与实测泥石流沟谷数存在一定的差异,如在因子叠加法和信息量模型法为极低和低等级中,实测泥石流沟谷数较少,但粗糙集法计算结果中,出现危险的等级。④以实际存在的泥石流沟谷落在不同评价区数目为标准,信息量模型法获得的评价结果有90%以上的泥石流沟谷都在危险性高和极高区域;粗糙集法得到危险区域覆盖了63.72%的泥石流沟谷分布,但其分级类别较少。⑤对研究区32个乡镇用三种方法进行分区可知,极低危险区占3.4%,低危险区占9.1%,中危险区占17.6%,高危险区占47.1%,极高危险区占17.1%,故军都山区属于泥石流灾害高危险和极高危险区域占64.2%,需要加强对泥石流灾害的防治和治理,以免灾害的发生。

从单位面积泥石流沟谷数与泥石流沟谷分布比率两方面可以看出,信息量法很好地概况了研究区内泥石流沟谷的分布情况,评价精度较高;因子叠加法得到的结果在高危险性 & 极高危险性区域差别并不明显,没有形成良好的梯度;粗糙集法得到的危险区域,涵盖了大多数泥石流沟谷,但粗糙集法计算结果与其他两种方法的结果存在一定的出入,故可在其他孕灾环境类似的区域进行进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 康志成, 马嵩乃, 李焯芬, 等. 中国泥石流研究. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] 李阔, 唐川. 泥石流危险性评价研究进展. 灾害学, 2007, 22(1): 106-111.
- [3] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践. 自然灾害学报, 1996, 5(4): 6-17.
- [4] Jones D K C. Landslide Hazard Assessment in the Context of Development. In: McCall G J H, Laming D J C, Scott S C. Geo-hazards: Natural and Man-made. London: Chapman & Hall, 1992. 117-141.
- [5] Varnes D J. Landslide Hazard Zonation: A Review of Principle and Practice. UNESCO, France, 1984.
- [6] Wieczorek G F. Evaluating danger landslide catalogue maps. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 1984, 1(1): 337-342.
- [7] Ellen S D, Wieczorek G F. Landslide, floods and marine effects of the storm of January 3-5 1982 in the San Francisco Bay Region. California (USGS Professional Paper, 1434). US Geological Survey, Reston, VA, 1988, 310.
- [8] Hollingsworth R, Kovacs G S. Soil slumps and debris flows: Prediction and protection. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 1981, 38(1): 17-28.
- [9] Hansen A. Landslide hazard analysis. In: Bruden D, Prior D B. Slope Instability, Chichester. Chichester: John Wiley & Sone Led, 1984. 523-543.
- [10] Carrara A, Cardinali M, Guzzetti F. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. ITC Journal, 1992, (2): 172-183.
- [11] Carrara A. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. Earth Surface Processes and Landforms, 1991, 16(1): 427-445.
- [12] Mejia-Navarro M, Wohl E E, Oaks S D. Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: Model for Glenwood Springs, Colorado. Geomorphology, 1994, 10(1-4): 331-354.
- [13] Anbalagan R, Singh B. Landslide hazard and risk assessment mapping of mountainous terrains: Cases study from Kumaun Himalaya India. Engineering Geology, 1996, 43(4): 237-246.
- [14] Dikau R. Derivatives from detailed geoscientific map s using computer methods. Geomorphology, 1990, 80(suppl. 1): 45-55.
- [15] Wadge G. The potential of GIS modeling of gravity flows and slop instability. International Journal of Geographical Information Systems, 1994, 2(2): 143-152.
- [16] Brabb E E. Innovative Approaches to landslide hazard and risk mapping. Proc. 4 th. Int. Symp, Landslides. Toronto, 1984. 307-324.
- [17] Grunert J. Geomorphologische Entwicklung des Bonner Ramus. Arb. 2. Rhein. Landeskd, 1988, 58(1): 165-180.

- [18] Takahashi T. Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: Soft countermeasures for a disaster. *Journal Disaster Science*, 1981, 3(3): 57-65.
- [19] 谭炳炎. 泥石流沟严重程度的数量化综合评判. *水土保持通报*, 1986, 6(1): 51-57.
- [20] 谭炳炎, 靳番, 荆绍华. 泥石流沟的判别方法和数量化综合评判. *泥石流防治理论和实践*. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- [21] 张梁, 张业成, 罗元华, 等. 地质灾害灾情评估理论与实践. 北京: 地质出版社, 1998.
- [22] 罗云. 灾害评价初探. *灾害学*, 1987, 2(3): 10-14.
- [23] 刘希林. 泥石流危险度判定的研究. *灾害学*, 1988, 3(3): 10-15.
- [24] 刘希林. 泥石流危险区划的探讨. *灾害学*, 1989, 4(4): 3-9.
- [25] 刘希林. 区域泥石流风险评价研究. *自然灾害学报*, 2000, 9(1): 54-61.
- [26] 乔建平, 赵宇. 滑坡危险区划研究述评. *山地学报*, 2001, 19(2): 157-160.
- [27] 乔建平. 长江上游滑坡危险度区划. *水土保持学报*, 1994, 8(1): 40-43.
- [28] 钟敦伦, 谢洪, 韦方强. 长江上游泥石流危险度区划研究. *山地研究*, 1994, 12(2): 65-70.
- [29] 唐邦兴, 柳素清, 刘世建. 中国泥石流分布及其灾害危险区划图. 成都: 成都地图出版社, 1991.
- [30] 周燃. 攀枝花市滑坡分布与危险区预测图的编制. 成都: 四川科技出版社, 1989.
- [31] 胡芹龙. 大渡河冷竹关电站. 成都: 成都理工大学硕士学位论文, 2009.
- [32] 苏小琴. 四川泸定县城区深家沟泥石流特征及风险评价研究. 成都: 成都理工大学硕士学位论文, 2008.
- [33] 张春山, 张业成, 马寅生. 黄河上游地区崩塌、滑坡、泥石流地质灾害区域危险性评价. *地质力学学报*, 2003, 9(2): 143-153.
- [34] 谷秀芝. 公路泥石流危险性评价方法与系统. 重庆: 重庆交通大学硕士学位论文, 2010.
- [35] 朱静, 唐川. 云南省泥石流灾害危险度分区研究. *中国地质灾害与防治学报*, 1996, 7(2): 86-93.
- [36] 唐川, 刘琼招. 中国泥石流灾害强度划分与危险区划探讨. *中国地质灾害与防治学报*, 1994, 5(S0): 30-36.
- [37] 史培军. 中国自然灾害风险地图集. 北京: 科学出版社, 2011.
- [38] 铁永波, 唐川, 周春花. 基于信息熵理论的泥石流沟谷危险度评价. *灾害学*, 2005, 20(4): 43-46.
- [39] 原立峰. 基于SVM的泥石流危险度评价研究. *地理科学*, 2008, 28(2): 296-300.
- [40] 方兴, 刘章军. 基于模糊概率的区域泥石流危险性评价. *灾害学*, 2010, 25(S0): 232-235.
- [41] 宋杨, 程维明, 柏延臣, 等. 密云水库周边山区滑坡泥石流易发区预估. *地理科学进展*, 2011, 30(3): 343-351.
- [42] 张文修, 吴伟志, 梁吉业, 等. 粗糙集理论与方法. 北京: 科学出版社, 2001.
- [43] 徐裘, 许国荣, 张虎. 基于FCM与粗糙集的连续数据知识挖掘方法. *海军工程大学学报*, 2006, 18(1): 103-107.
- [44] 何志虎. 基于Fuzzy-AHP法的泥石流评价方法及其应用研究. 广州: 华南理工大学硕士学位论文, 2012.
- [45] 于怀昌, 刘汉东, 余宏明, 等. 基于FCM算法的粗糙集理论在边坡稳定性影响因素敏感性分析中的应用. *岩土力学*, 2008, 29(7): 1889-1894.
- [46] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践. *自然灾害学报*, 1996, 5(4): 6-17.
- [47] 牛全福, 程维明, 刘勇, 等. 基于信息量模型的玉树地震次生地质灾害危险性评价. *山地学报*, 2011, 29(2): 243-249.
- [48] 牛全福. 基于GIS的地质灾害风险评估方法研究. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2011.
- [49] Bezdek J C. *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. New York: Plenum Press, 1981.
- [50] Pawlak Z. Rough sets. *International Journal of Computer and Information Sciences*, 1982, 11 (2): 341-356.
- [51] 马志民, 张军, 钟亮. 基于层次聚类的改进FCM算法. *山东交通学院学报*, 2005, 13(2): 67-69.
- [52] 王劲峰, 廖一兰, 刘鑫. *空间数据分析教程*. 北京: 科学出版社, 2010.
- [53] Hexiang Bai, Yong Ge, JinFeng Wang et al. Using rough set theory to identify villages affected by birth defects: The example of Heshun, Shanxi, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(4): 559-576.
- [54] Pawlak Z. Vagueness and uncertainty: A rough sets prospective. *International Journal of Computer Intelligence*, 1995, 11(2): 227-232.
- [55] 匡乐红, 徐林荣, 刘宝琛, 等. 基于粗糙集原理的泥石流危险度区划指标选取方法. *地质力学学报*, 1995, 12(2): 236-242.
- [56] 钟敦伦, 谢洪, 王士革. 北京山区泥石流. 北京: 商务印书馆, 2004.
- [57] 刘涛. 密云县泥石流危险度评价及防治措施体系研究. 北京: 北京林业大学硕士学位论文, 2009.
- [58] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. GB50007-2002. 中华人民共和国国家标准: 建筑地基基础设计规范. 北京: 中国建筑资讯网, 2002.

Regional hazard assessment of disaster environment for debris flows: Taking Jundu Mountain, Beijing as an example

CHENG Weiming¹, XIA Yao¹, CAO Yuyao¹, SONG Yang¹, LIU Haijiang²

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and
Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China)

Abstract: In this paper, three analysis methods, such as, factors weighting-superposition one, information amount model one and FCM-rough set one, are firstly presented and analyzed. FCM-rough set method integrates the advantages of fuzzy C-means clustering method (FCM) and rough set theory, which is a data-driven method. On the basis of spatial distributions of 339 gully numbers of the debris flows from field surveying in Jundu Mountains of Beijing, hazard assessment maps of the debris flows are compiled based on the three methods, and then the assessment results are compared. The conclusions can be drawn as follows: 1) The methods of factors weighting-superposition one and information amount model one can draw 5 levels of hazard classification results of debris flows, by contrast, FCM-rough set method can only draw 3 levels of classification results. 2) Based on the results of the three assessment methods, on the whole, gully numbers of debris flows in the hazard zones increase, when hazard assessment levels change from low to high. 3) Taking the actual gully numbers of debris flows located in different hazard zones as judging standard, information amount model method can obtain better results, which possesses more than 90% of gully numbers of debris flows in high and very high hazard zones; FCM-rough set method can reach 63.72% of the gully distribution of debris flows in dangerous zones. 4) Taking ratio of gully numbers within unit area and gully distribution of debris flows as judging standard, and information amount model method is relatively good to the general gully distribution of debris flows, which possesses high precision evaluation. The results obtained by factors weighting-superposition method have not obvious difference in high and very high hazard zones, and a good gradient is not formed. FCM-rough set method covers most of gully distribution of debris flows in dangerous zones, but its calculation results are not good, and the method could be promoted in other similar regional disaster environment for future study.

Key words: debris flow; hazard assessment; disaster environment; assessment; Jundu Mountains