

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.05.07

基于灰色关联与粗糙依赖度的甘肃兰州市区 泥石流危险性评价

牛全福^{1,2}, 陆 铭¹, 李月锋¹, 冯尊斌¹, 高文信¹, 陆小琳¹

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省应急测绘工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 危险性评价是泥石流灾害研究的主要问题之一, 多因子综合评价是泥石流危险性评估的主要模式。由于泥石流灾害的不确定性和灾害系统的复杂性, 因而非确定性分析方法成为其评估首选的研究方法。本研究以泥石流频发的兰州市为例, 针对常规研究中选取的坡度等 10 个地形影响因子, 首先应用复相关系数法去除地形因子间相关性, 获得综合主要地形影响因子的地形易发性因子; 然后, 从地形易发性、地质岩性、地貌类型、降雨、植被覆盖度 5 个影响因子出发, 应用灰色关联度、粗糙依赖度以及融合灰色关联度与粗糙依赖度的模糊综合方法获取泥石流危险性评价图。评价结果可知: (1) 地形起伏度、坡向变率、地表粗糙度、坡长、坡度变率、植被覆盖度和降雨对该地区泥石流的发生具有一定的控制作用, 与现场调查结果相吻合; (2) 将三种评估结果与泥石流灾害进行叠加分析发现, 研究区大多数泥石流点分布在 0.4~0.6 和 0.6~0.8 区间, 且三种方法获得结果的趋势一致, 均较客观地反映研究区泥石流危险性的空间分布; (3) 由 ROC 曲线分析, 灰色关联度和粗糙依赖度的评估结果精度比较接近, 其 ROC 曲线下面积均接近 0.7; 融合灰色关联和粗糙依赖度的模糊综合方法所得的 ROC 曲线下面积大于 0.7, 其说明该模型评估的结果较好地反映泥石流危险性分布, 具有较高的可信度。

关键词: 泥石流; 危险性; 不确定性分析; 因子; 精度

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)05-0048-09

Hazard assessment of debris flow in Lanzhou City of Gansu Province based on methods of grey relation and rough dependence

NIU Quanfu^{1,2}, LU Ming¹, LI Yuefeng¹, FENG Zunbin¹, GAO Wenxin¹, LU Xiaolin¹

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. Emergency Mapping Engineering Research Center of Gansu, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: Hazard assessment is one of the key issues in disaster studies of debris flow. And comprehensive assessment with multiple factors is the main mode of them. Because of uncertainty and complexity, non-deterministic analysis has already become the preferred approach. This study take Lanzhou, a provincial capital with frequent debris flows, as an example. Firstly, the relationship among 10 topographic factors, such as slope, et al., was taken away with the method of complex correlation coefficient and the topographic susceptibility factor was gained from them. Then, using five factors, for example, the topographic susceptibility, the geological lithology, landform, the precipitation and vegetation coverage and the hazard assessment maps were obtained with three methods of grey relational degree, rough dependence degree and fuzzy comprehensive method with grey relational degree and rough dependence degree. The conclusions are as follows: (1) These debris flows in the study area are controlled by seven factors, including the relief, slope

收稿日期: 2018-12-04; 修订日期: 2019-01-08

基金项目: 国家自然科学基金: 基于 GIS 的典型黄土区地质灾害致灾因子的优选与地表灾害过程模拟(41461084)

第一作者: 牛全福(1973-), 男, 甘肃天水人, 博士, 副教授, 研究方向为 3S 与地质灾害风险评估。E-mail: 330398304@qq.com

aspect, surface coarseness, slope length, slope of slope, vegetation cover and precipitation, which are coincided with field investigation. (2) After overlaying and analyzing these assessment maps with the data of debris flows, it shows that most of the points of debris flows were taken place in the grades of 0.4 ~ 0.6 and 0.6 ~ 0.8, these results from three methods are consistent and better show the special distribution of the debris flows in the study area. (3) From ROC analysis, the accuracy from grey relational degree and rough dependence degree are rather similar and the area under ROC curve is close to 0.7. However, the method of fuzzy comprehensive weight determination with grey relational degree and rough dependence degree shows high credibility with the area of bigger than 0.7, which better reflect the debris flow distribution in the study area.

Keywords: debris flow; hazard; non-deterministic analysis; factor; accuracy

0 引言

泥石流危险性是指在人类及所在环境中一切事物遭受泥石流损害的可能性大小^[1]。作为防灾减灾中泥石流灾害管理的重要一环,泥石流的危险性评估是泥石流灾害防治决策的前提^[2]。学者们普遍认为通过泥石流风险评估和风险管理,可以大大减弱其带来的风险,通常从泥石流的发育规律、孕灾环境、成灾方式和驱动因子等多方面来科学评价其发生的可能性、危险性、危害范围和程度等^[3-7]。

21世纪以来,灾害风险评估和管理的研究成为新的热点^[8]。国内外学者对泥石流危险性评估进行了大量的研究^[9-12],其中澳大利亚 FELL^[12]将危险度描述为规模与概率(频率)的乘积,并得到大多认同^[2],而我国学者将泥石流灾害系统中孕灾环境、致灾因子的自然属性特征用灾害过程强度或规模、频率、灾害影响区域及其影响程度、危害程度等指标进行刻画^[13-17],由此,多因子综合评价成为泥石流危险性研究所采取的主要模式。在泥石流灾害研究中,致灾因子的识别和风险评估分析方法的选取一直是泥石流危险性研究的关键^[3,7,15-16]。泥石流灾害的形成与其所处的地貌形态、物质、构造、水文、气象和植被条件等多种因素密切相关,因此,探究已发生泥石流灾害与这些因素间的关系,可揭示泥石流发生的重要条件和有利于制定防灾减灾措施。例如,MOORE 和 MCINNES^[18]基于地貌方法,研究了山坡系统与冲积海岸沉积系统间的关系,对制定研究区安全保护措施奠定基础;牛全福等^[3]基于多种方法探讨了地形因子在地质灾害研究中的适宜性,并探讨了因子分级的方法对评估精度的影响。孟凡奇等^[7]基于逐步判别分析法对泥石流危险性的评价因子按贡献大小进行筛选,使得危险度评价结果更符合实际泥石流危险发育情况。泥石流灾害的评估方法通常基于泥石流灾害预测理论的原理,

已形成参数合成法、数理多元统计、层次分析法、信息模型法等多种评估预测模型。这些评估模型大多基于统计方法,其优点为指标体系的建立简单易行、可操作性较强、便于计算机编程处理等,缺点为对样本要求高、预测结果精度不够^[8]。因此,探索泥石流形成的致灾因子和适宜的评估方法有利于进一步提高泥石流危险性评估的可靠性。

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。泥石流是由多种致灾因素共同作用形成的一种地质灾害,其中多数致灾因素较难确定或者模糊不清,形成了一个灰色系统^[19]。由于泥石流灾害特性的这种不确定性和灾害系统的复杂性,用绝对的“非此即彼”存在难以描述泥石流灾害系统的客观实际问题,即存在“亦此亦彼”的模糊现象^[20]。因此,其评估方法宜采用灰色关联模型、粗糙度和模糊数学理论等非确定性分析方法进行模拟。基于上述讨论,本研究以泥石流频发的兰州市为例,从泥石流灾害预测理论出发,结合3S技术和地形、地貌、岩性、降雨和植被覆盖等影响指标,应用灰色关联度、粗糙依赖度以及融合前两种方法的模糊定权方法进行泥石流危险性评价,为该区域泥石流危险性评价理论研究和防灾减灾等提供技术支持。

1 研究区概况

兰州市地处黄河上游的黄土高原西部,黄河自西向东穿城而过,城区坐落在两岸河流阶地上,是典型的山间河谷型城市(图1)。市区南北两侧为绵延起伏的高山和纵横沟壑的黄土脊梁,海拔为1 417 ~ 2 918 m,地形起伏较大。受其特殊的地理位置和河流的分割影响,其地域空间狭窄、岩土体完整性差、风化严重^[21]。由于半干旱的气候环境,植被覆盖较为稀少,降水主要集中在6 ~ 9月,小范围短时暴雨往往强度大,因而滑

坡泥石流等地质灾害频发,严重威胁人们的生命和财产安全。

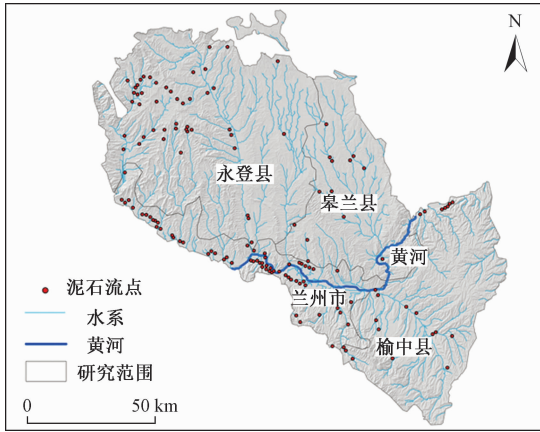


图 1 研究范围

Fig. 1 The study area

兰州为我国泥石流发育最密集的城市之一^[22]。自建国以来,兰州市已发生滑坡、泥石流等地质灾害超 342 起,造成约 687 人死亡,累计直接经济损失超过 7.95×10^8 元,其中泥石流灾害最为严重,其危害程度居全国各省会城市之首^[22]。据调查,兰州已发生泥石流多沿黄河干流和支流呈带状分布,其中有 30 多条分布在黄河以南部的阳洼沟、大金沟以及元托崂沟等,有 50 多条沿北部分布,以雷坛河上游两岸最为集中。近年来,随着西部大开发和城市化的步伐加快,人口和建筑物密集、土地资源稀缺,人类工程活动等不断加剧,潜在地质灾害危险性不断增大、隐患也不断增多^[23]。

2 资料与方法

2.1 研究数据

本研究采用的数据主要包括:1:100 万地貌数据

(来源:中科院地理科学与资源研究所),1:50 万地质数据(来源:中国地质调查局),30 m 的 Aster GDEM 数据(来源: <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp>),145 个泥石流灾害发生的点位置调查数据,下载自地理空间数据云的 3 景 Landsat8 OLI 遥感影像数据(2018 年 7 月,轨道号:131 034、131 035、130 035),兰州及周边 13 个气象站点 6~9 月降雨数据(2008—2017),以及研究区的基础地理数据等。

2.2 研究方法

首先,利用 ArcGIS10.2 平台,基于 Aster GDEM 进行孕灾环境因子的提取,基于地貌数据和地质数据提取地貌类型和地质岩性并转换成栅格图层,将最大月降雨数据经插值处理生成研究区的降雨因子图层;其次,在 ENVI 支持下,将 3 景 landsat8 遥感数据进行辐射校正、几何纠正、NDVI 和植被覆盖度计算,拼接和裁减、生成植被覆盖图层;第三,应用复相关系数法对地形因子去相关,获得综合所有地形因子的地形易发性图层;最后,建立危险性评价指标体系,应用灰色关联度、粗糙依赖度以及融合灰色关联度和粗糙依赖度的模糊综合定权法进行兰州泥石流危险性评价,并分析评价结果。

(1) 灰色关联度

泥石流是由多种致灾因素共同作用形成的一种地质灾害,其中多数致灾因素较难确定或者模糊不清,形成了一个灰色系统^[20]。灰色关联度分析就是通过研究每个因子与参考因子的关联系数大小来分析泥石流灾害的危险性^[24]。若以 $x(i,j)$ 为灰色关联因子的原始数据矩阵, $x'(i,j)$ 为 $x(i,j)$ 无量纲化矩阵, $x(a,j)$ 为参考序列,则灰色关联度的计算如下式(1):

$$r(i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\min_i \min_j |x'(a,j) - x'(i,j)| + \rho \max_i \max_j |x'(a,j) - x'(i,j)|}{|x'(a,j) - x'(i,j)| + \rho \max_i \max_j |x'(a,j) - x'(i,j)|} \quad (1)$$

其中, $r(i)$ ——灰色关联度;

i ——样本;

j ——关联因子;

n ——总样本;

m ——关联因子总数($i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m$);

ρ ——分辨系数,取值区间为 $[0,1]$,其值越小分辨率越大,通常取 0.5。

(2) 粗糙依赖度

粗糙依赖度也可以处理不确定性和不完整性的问

题,它是间接对数据进行分析 and 推理的方法,通过对已知数据分析处理发现隐含的知识^[25-26],在泥石流评价指标体系中,去除某一指标会对评估结果产生一定的影响,该指标的重要程度可用相互依赖度来计算,具体公式如下式(2):

$$a_i = \frac{1 - N_{C-C'(D)} / N_{C(D)}}{\sum_{i=1}^n (1 - N_{C-C'(D)} / N_{C(D)})} \quad (2)$$

其中, a_i ——第 i 类致灾因子的权重;

$N_{C(D)}$ ——系统 D 中由指标序列 C 构建的子集数;

$N_{C-C'(D)}$ ——系统 D 中去掉某一个指标 C' 的指标序列 $C - C'$ 构建的子集,与子集 $N_{C(D)}$ 具有相同的子集数。其中 $N_{C-C'(D)}/N_{C(D)}$ 表示致灾因子的依赖度,而 $1 - N_{C-C'(D)}/N_{C(D)}$ 表示致灾因子的重要度。

(3) 融合灰色关联度和粗糙依赖度的模糊综合法

灰色关联度算法是通过关联系数分析泥石流致灾因子的不确定性,由于算法中关联度与比较数列、参考数列以及其长度有关,而且无量纲处理和分辨系数的选取也会对关联度产生影响^[24]。粗糙依赖度作为一种刻画不确定性问题的较为客观方法,可以结合灰色关联度和模糊集理论^[27-29],在泥石流危险性评估中发挥各自的优势。本算法融合灰色关联度和粗糙依赖度的模糊定权方法如下:

$$w_i = ua_i + (1 - u)\beta_i \tag{3}$$

式中: w_i ——融合灰色关联度和粗糙依赖度的模糊法的权重;

u ——系数,本研究取值为 0.4;

a_i ——粗糙依赖度确定的各致灾因子权重;

β_i ——灰色关联度确定的各致灾因子权重。

3 泥石流危险性评价

3.1 泥石流致灾因子的提取

首先,利用 ArcGIS10.2 平台和 Aster GDEM 分别提取 6 个微观地形因子(坡度、坡向、坡长、坡度变率、坡向变率和曲率)和 4 个宏观地形因子(地表粗糙度、地形起伏度、高程变异系数和地表切割深度),并与研究区已调查的泥石流位置点数据进行叠加运算,提取泥石流点的各地形因子属性值并做标准化处理;其次,将标准化结果导入 SPSS 软件,计算各地形因子与已发生泥石流点密度间的相关性,选择相关性最强的地形起伏度作为主要因子,其余地形因子为次要因子;第三,计算主要因子与次要因子之间的复相关系数,获取各地形因子的权重(表 1),并对各地形因子图层做加权叠加运算,得地形易发性图层。然后,基于 ENVI 和 Landsat8 OLI 数据计算 NDVI 及植被覆盖度,基于 ArcGIS10.2 平台,利用地貌和地质数据分别提取地貌类型和地质岩性图层,利用雨季(6 月~9 月)的月降雨均值经空间插值计算获得月降雨图层(图 2)。

表 1 地形因子与泥石流点相关分析

Table 1 Correlation analysis between terrain factors and debris flows

	坡度	坡向	坡长	坡度变率	坡向变率	曲率	粗糙度	起伏度	变异系数	切割深度
相关系数	0.014	0.057	-0.018	-0.146	0.074	0.078	0.11	0.132	0.073	-0.118
复相关权重	0.082	0.098	0.131	0.115	0.186	0.016	0.148	0.266	0.049	0.033

3.2 泥石流危险性制图

本次泥石流危险性研究,分别采用了灰色关联度、粗糙依赖度以及融合灰色关联度和粗糙依赖度的模糊法来分析。并且,为了对本次泥石流危险性评估结果进行评价,将收集的已发生泥石流数据(共 145 个)进行随机分组,第一组(75 个泥石流点)引入上述三种模型中进行泥石流的危险性模拟,第二组(70 个泥石流点)用来做精度评价。

应用灰色关联度进行泥石流危险性模拟步骤:首先,对地形易发性、植被覆盖度、地貌类型、岩性和月降雨五个因子做无量纲处理,消除单位差异;其次,将泥石流灾害点密度作为参考序列,与比较序列(五个致灾因子)进行求差的绝对值;计算其与五个比较序列的关联系数,进而计算灰色关联度;将灰色关联序做归一化处理,得到各致灾因子的权重(表 2);然后基于 ArcGIS10.2 平台加权叠加各致灾因子,获得研究区泥石流危险性分级图(图 3)。

应用粗糙依赖度进行泥石流危险性模拟步骤:首先,对地形易发性因子、地质岩性、降雨、植被覆盖度和地貌类型五个因子重分类(分别分四级),其中,地形易发性、植被覆盖度和降雨采用自然断点法进行分级,地质岩性参考岩层的坚硬程度进行分级;其次,进行致灾因子与泥石流发生的必要性分析;接下来,应用粗糙依赖度计算五个致灾因子的依赖度和重要度,并计算每个因子的权重(表 3);最后,基于 ArcGIS10.2 平台将各致灾因子进行加权叠加运算并分级,获得研究区泥石流危险性分级图(图 4)。

基于灰色关联度方法和粗糙依赖度方法分别获得

表 2 评价因子的灰色关联度及权重

Table 2 Grey relational degree and weight for

assessment factors

	地形易发性	植被覆盖度	地貌类型	地质岩性	降雨
灰色关联度	0.893	0.877	0.905	0.864	0.907
权重	0.201	0.197	0.203	0.194	0.205

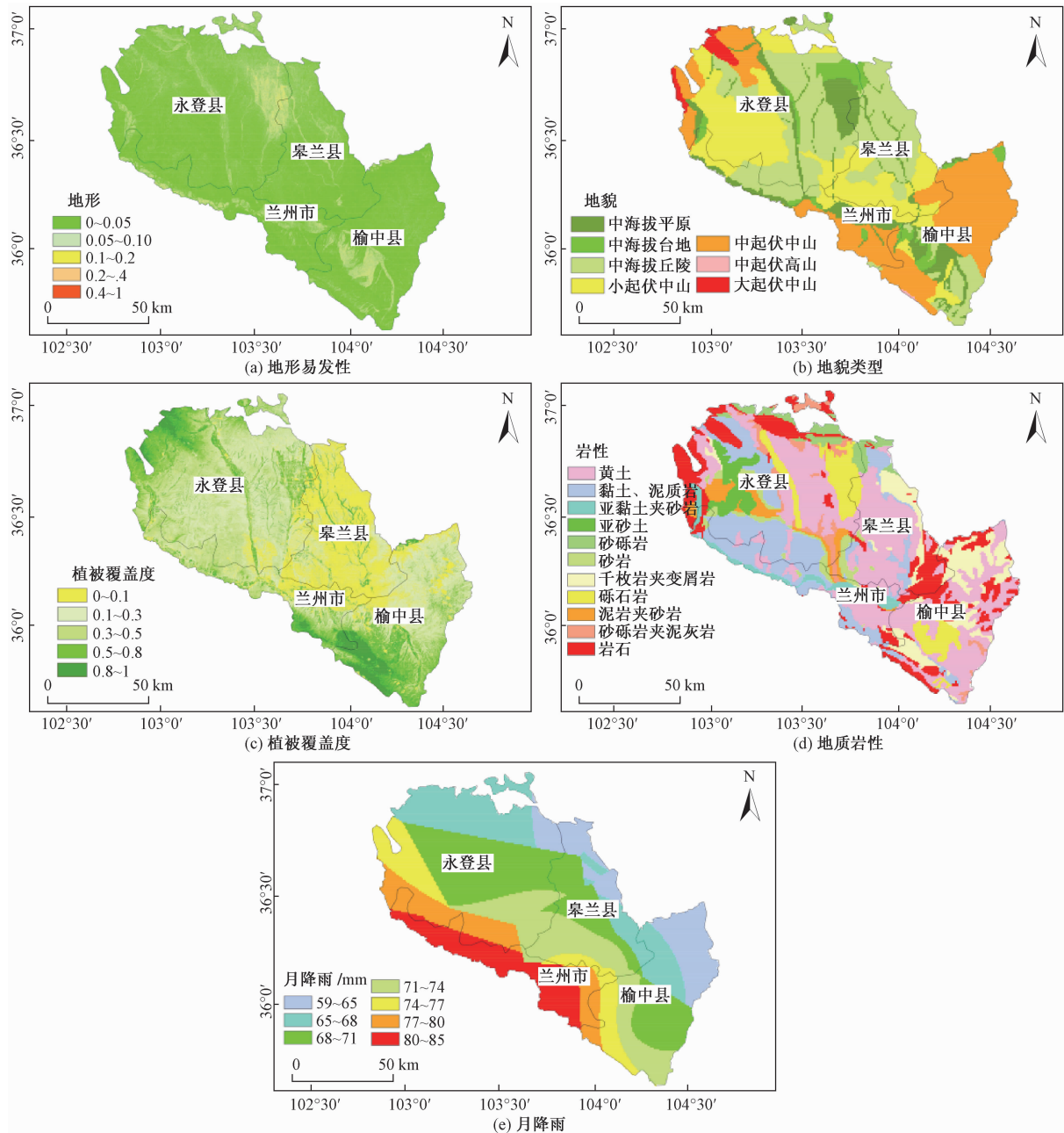


图 2 泥石流评估指标

Fig. 2 Assessment factors for debris flow

表 3 各致灾因子的粗糙依赖度、重要度和权重

Table 3 Rough dependence degree, importance degree and weight for each factor

	地形易发性	植被覆盖度	地貌类型	地质岩性	降雨
粗糙依赖度	0.205	0.182	0.432	0.523	0.341
重要度	0.795	0.818	0.568	0.477	0.659
权重	0.24	0.247	0.171	0.144	0.199

的各致灾因子的权重,应用融合灰色关联度和粗糙依赖度的模糊综合法,获得各致灾因子的模糊综合权重

(表 4)。然后,基于 ArcGIS10.2 平台加权叠加各致灾因子,获得研究区泥石流危险性分级图(图 5)。

表 4 致灾因子的模糊综合权重

Table 4 Fuzzy comprehensive weight for disaster-inducing factors

	地形易发性	植被覆盖度	地貌类型	地质岩性	降雨
粗糙依赖度权	0.24	0.247	0.171	0.144	0.199
灰色关联度权	0.201	0.197	0.203	0.194	0.205
模糊综合权	0.216	0.217	0.191	0.174	0.202

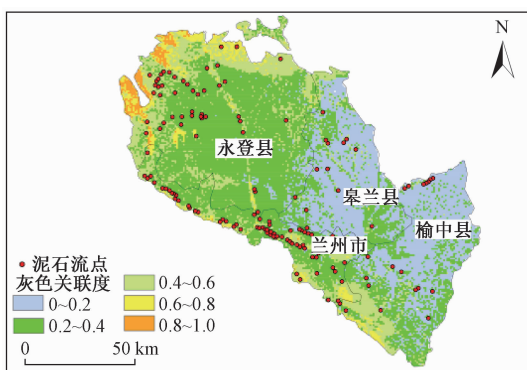


图 3 灰色关联度法评估结果

Fig. 3 Assessment result from grey relational degree

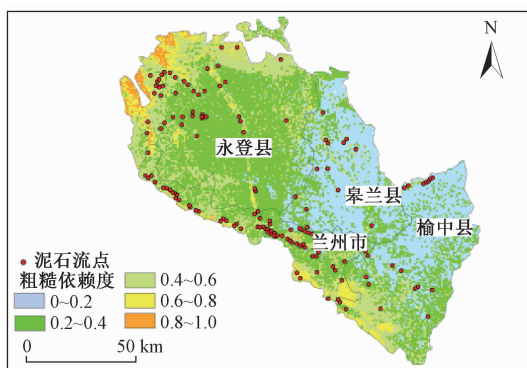


图 4 粗糙依赖度法评估结果

Fig. 4 Assessment result from rough dependence degree

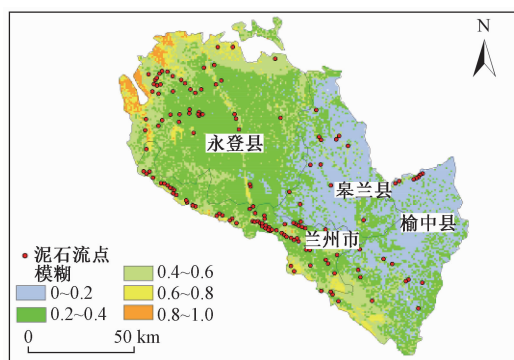


图 5 模糊综合法评估结果

Fig. 5 Assessment result from fuzzy comprehensive method

3.3 评估结果精度分析

本研究结果的精度分析采用验证组数据进行统计分析,主要采用两种方法进行评价:将评估结果与验证组数据进行空间叠加统计分析和基于 ROC 曲线的精度评定。首先,将验证组泥石流灾害点与三种方法获得的评估结果进行叠加统计,对比分析已发生泥石流点在泥石流危险性等级中的分布关系(图 3,表 5)。从图 3 可以看出,验证组泥石流点绝大多数分布在危

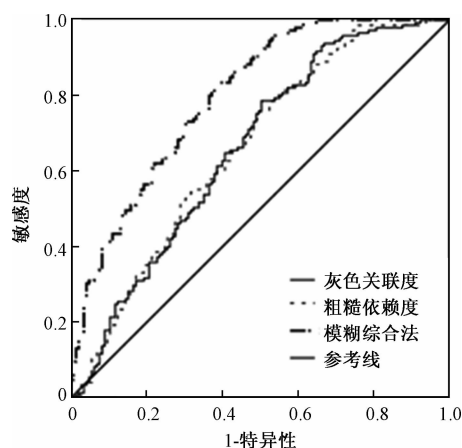


图 6 ROC 曲线

Fig. 6 ROC curve

险性的中、高危险等级区域,仅有少量落到较低危险区域。由表 5 可知,研究区大多数泥石流点分布在 0.4 ~ 0.6 和 0.6 ~ 0.8 区间,且三种方法获得结果的趋势一致。表明本研究基于三种不确定方法获得的泥石流危险性评估结果与已发生泥石流分布具有很好的对应关系,即泥石流高发区对应着危险性评估的高等级区,本次评估的结果较客观反映了研究区泥石流灾害的空间分布,也说明了评估结果具有较高的可信度。

ROC 曲线又称为感受性曲线,已广泛应用于地质灾害危险性评估结果精度分析中^[30]。基于 ROC 曲线的模型精度评判标准为:曲线下面积越接近于 1 (总面积值位于 0 ~ 1),说明模型的判别结果较好^[31]。因此,本研究采用 ROC 曲线评价泥石流危险性评估三种结果的精度。首先,将灰色关联度、粗糙依赖度和综合前两种方法的模糊综合法的评估结果以及研究区内泥石流的发生与否情况,通过采样(共 290 个点)制作成 Excel 表格,样点中,将已发生泥石流点的属性置为 1,未发生为 0,并导入 SPSS 软件统计分析,获得三种评价模型的 ROC 曲线(图 6)和精度计算结果(表 6)。

由图 6 和表 6 可知,融合灰色关联和粗糙依赖度的模糊综合法所获得的结果精度最好,其 ROC 曲线下的面积为 0.789;灰色关联度和粗糙依赖度的评估结果精度比较接近,其 ROC 曲线下的面积分别为 0.658 和 0.660。同时,依据 ROC 曲线的评判标准,灰色关联度和粗糙依赖度的 ROC 曲线下面积接近于 0.7,表明其结果具有低的准确性,而融合灰色关联和粗糙依赖度的模糊综合法的 ROC 曲线下面积大于 0.7,说明该模型评估的结果具有较高的可信度,很好地反映了泥石流危险性分布。

表 5 危险区分区灾害点密度统计表

Table 5 Statistics of debris flow density in every hazard zone

模型	危险区 分级	分级面积/ km ²	面积百 分比 a/%	灾害点/ 个	灾密百 分比 b/%	b/a
灰色 关联度	0~0.2	3 572.55	26.92	19	13.10	0.49
	0.2~0.4	6 066.17	45.71	37	25.52	0.56
	0.4~0.6	2 743.12	20.67	42	28.97	1.40
	0.6~0.8	667.53	5.03	33	22.76	4.52
	0.8~1.0	221.63	1.67	14	9.66	5.78
粗糙 依赖度	0~0.2	3 795.51	28.6	28	19.31	0.68
	0.2~0.4	5 922.84	44.63	35	24.14	0.54
	0.4~0.6	2 719.23	20.49	38	26.21	1.28
	0.6~0.8	664.88	5.01	32	22.07	4.40
	0.8~1.0	168.54	1.27	12	8.28	6.52
模糊 综合	0~0.2	3 636.25	27.4	25	17.24	0.63
	0.2~0.4	6 054.23	45.62	35	24.14	0.53
	0.4~0.6	2 727.19	20.55	41	28.28	1.38
	0.6~0.8	659.57	4.97	31	21.38	4.30
	0.8~1.0	187.12	1.41	13	8.97	6.36

表 6 ROC 曲线计算结果

Table 6 Calculation result of ROC curve

检验模型	面积	标准误差	渐进 Sig	渐近 95% 置信区间	
				下限	上限
灰色关联度	0.658	0.032	0.001	0.596	0.721
粗糙依赖度	0.660	0.032	0.000	0.597	0.722
模糊综合法	0.798	0.025	0.000	0.748	0.847

4 结论与讨论

本研究基于泥石流发生的不确定性、复杂性和模糊性的特点,以泥石流频发地兰州地区为例,从已发生的泥石流灾害点调查数据出发,选取适合描述泥石流灾害系统不确定性的数学模型:灰色关联度、粗糙依赖度、融合灰色关联度和粗糙依赖度的模糊综合法进行泥石流危险性评估,所得结论如下:

(1)由复相关系数得到的地形因子权重来看,地形起伏度>坡向变率>地表粗糙度>坡长>坡度变率>坡向>坡度>高程变异系数>地表切割深度>曲率,且地形起伏度、坡向变率、地表粗糙度、坡长和坡度变率的权重均大于0.1,说明这五个因子对该区域泥石流的发生,在地形参数上具有一定的控制作用。由灰色关联度计算的权重排序为:降雨>地貌类型>地形易发性>植被覆盖度>地质岩性;利用粗糙依赖度获得泥石流影响因子的权重排序为:植被覆盖度>地形易发性>降雨>地貌类型>地质岩性;而融合灰色关联度和粗糙依赖度的模糊综合法获得的影响因子权重顺序与粗糙依赖度所获结果序列一致。

(2)从泥石流影响因子来分析,基于三种方法获

得的主要致灾因子依次为:植被覆盖度、降雨和地形易发性,其中,地形易发性主要受地形起伏度、坡向变率、地表粗糙度、坡长和坡度变率的控制,经调查发现这些影响因子与实际地形地貌和生态环境具有很好的吻合性。由于兰州河谷盆地为一双侧不对称的压扭性断陷谷地^[32],其南北两山起伏度较大、主体属于松散岩土,结构疏松,植被覆盖稀少,河谷阶地及被沟谷切割的黄土梁峁等为主要地貌形态,高陡的斜坡、高阶地前缘形成多个临空面,许多冲沟顺断裂面发育。此外,驱动因素(如:地震和暴雨)也是研究区泥石流发生的直接诱发因素,据统计,研究区年均降水量约为327.7 mm,多集中在6~9月^[33]。短时集中强降雨驱动下极易引发泥石流灾害,该区域也是泥石流灾害的多发区。

(3)由三种方法进行泥石流的危险性评估的结果来分析,从定性角度来看,将验证组的泥石流点与灰色关联度、粗糙依赖度、以及融合灰色关联度和粗糙依赖度的模糊综合法评估结果进行叠加分析可知,绝大多数泥石流点分布在评估结果的中和高等级区域,表明三种方法评估的结果均较客观地反映了研究区泥石流危险性的空间分布,也说明其评估结果均具有一定的可信度。但是,基于ROC曲线的精度分析来看,灰色关联度和粗糙依赖度的评估结果精度比较接近,其ROC曲线下面积均接近0.7;融合灰色关联和粗糙依赖法的模糊综合法所获得的结果精度最好,其ROC曲线下面积大于0.7,说明该模型评估的结果具有较高的可信度,较好地反映泥石流危险性分布。

(4)本研究针对泥石流频发的兰州地区,基于泥石流灾害的模糊不确定性特点,利用不确定性算法进行泥石流的危险性评估,其结果与泥石流调查数据具有很好的吻合性,表明该研究方法可行,可为该区域及其它地区泥石流的危险性研究提供借鉴。

参考文献:

- [1] 朱静. 泥石流沟判别与危险度评价研究[J]. 干旱区地理, 1995(3):63-71.
ZHU Jing. Judgment of debris flow ravines and evaluation of risk degree of debris flows[J]. Arid Land Geography, 1995(3):63-71.
- [2] 刘希林, 陈宜娟. 泥石流风险区划方法及其应用——以四川西部地区为例[J]. 地理科学, 2010(4):558-565.
LIU Xilin, CHEN Yijuan. Application of debris flow risk zonation: an example of west Sichuan [J]. Scientia Geographica Sinica, 2010(4):558-565.

- [3] 牛全福,冯尊斌,党星海,等.黄土区滑坡研究中地形因子的选取与适宜性分析[J].地球信息科学学报,2017,19(12):1584-1592.
NIU Quanfu, FENG Zunbin, DANG Xinghai, et al. Suitability analysis of topographic factors in loess landslide research [J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19(12):1584-1592.
- [4] 丁明涛,韦方强,王欢,等.基于聚类分析的三江并流区泥石流危险性评价[J].资源科学,2012,34(7):1257-1265.
DING Mingtao, WEI Fangqiang, WANG Huan, et al. Hazard assessment of debris flow based on cluster analysis in three parallel rivers area [J]. Resources Science, 2012, 34(7):1257-1265.
- [5] 宁娜,张鹏,马金珠,等.基于灰色关联度与模糊评判的泥石流危险性评价[J].人民长江,2013(增刊1):111-123.
NING Na, ZHANG Peng, MA Jinzhu, et al. Debris flow risk assessment based on gray relational degree and fuzzy evaluation [J]. Yangtze River, 2013 (S1): 111-123.
- [6] 罗冠枝,徐林荣.基于粗糙集和灰色理论的模糊综合定权法在泥石流危险性评价中的应用[J].安全与环境工程,2008,15(3):1-6.
LUO Guanzhi, XU Linrong. Application of fuzzy synthetic method based on rough set theory and grey theory in debris flow hazard assessment [J]. Safety and Environmental Engineering, 2008, 15(3):1-6.
- [7] 孟凡奇,李广杰,李明,等.逐步判别分析法在筛选泥石流评价因子中的应用[J].岩土力学,2010,31(9):2925-2929.
MENG Fanqi, LI Guangjie, LI Ming, et al. Application of stepwise discriminant analysis to screening evaluation factors of debris flow [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9):2925-2929.
- [8] 刘希林,尚志海.自然灾害风险主要分析方法及其适用性述评[J].地理科学进展,2014,33(11):1486-1497.
LIU Xilin, SHANG Zhihai. Risk analysis methods of natural disasters and their applicability [J]. Progress in Geography, 2014, 33(11):1486-1497.
- [9] ALEXANDER D. Natural disasters: a framework for research and teaching [J]. Disasters, 2010, 15(3): 209-226.
- [10] CARRARA A, CARDINALI M, DETTI R, et al. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2010, 16(5):427-445.
- [11] ZARN B, DAVIES T R H. The significance of processes on alluvial fans to hazard assessment [J]. Annals of Geomorphology, 1994, 38(4): 487-500.
- [12] FELL R. Landslide risk assessment and acceptable risk [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994(31): 261-272.
- [13] 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(3/4): 181-191.
- [14] 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 Xilin, MO Duowen. Debris flow risk assessment [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003.
- [15] 刘希林.区域泥石流危险度评价研究进展[J].中国地质灾害与防治学报,2002,13(4):1-9.
LIU Xilin. Advance in research on assessment for degree of regional debris flow hazard [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, 13(4):1-9.
- [16] 王晓朋,潘懋,任群智.基于流域系统地貌信息熵的泥石流危险性定量评价[J].北京大学学报:自然科学版,2007,43(2):211-215.
WANG Xiaopeng, PAN Mao, REN Qunzhi. Hazard assessment of debris flow based on geomorphic information entropy in Catchment [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2007, 43(2):211-215.
- [17] 石磊.线性回归模型复相关系数的影响评价[J].云南大学学报(自然科学版),1995,17(2):136-139.
SHI Lei. Assessing local influence for multiple correlation coefficients in regression model [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences), 1995, 17(2):136-139.
- [18] MOORE R, MCINNES R G. Cowes to Gurnard coastal stability: providing the tools and information for effective planning and management of unstable land [J]. Thomas Telford, 2002.
- [19] 李志斌,郑成德.滑坡、泥石流危险度评判的灰色模式识别理论与模型[J].系统工程理论与实践,2000(5):128-132.
LI Zhibin, ZHENG Chengde. Grey-mode identification theory and model for landslide and debris flow risk degree [J]. Systems Engineering—Theory & Practice,

- 2000(5):128-132.
- [20] 刘海,陈华. 基于层次分析法的未确知测度理论泥石流危险性评价[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(8):1033-1038.
- LIU Hai, CHEN Hua. Hazard assessment of debris flow based on uncertainty measure theory and AHP[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(8):1033-1038.
- [21] 冯乐涛,宿星,吴玮江,等. 兰州市地质灾害分布规律及预警评价研究[J]. 甘肃科学学报,2014,26(5):63-67.
- FENG Letao, SU Xing, WU Weijiang, et al. Distribution regularity and early warning evaluation of geological hazards in Lanzhou[J]. Journal of Gansu Sciences,2014,26(5):63-67.
- [22] 王伟. 兰州地区滑坡泥石流分布及灾害特征[J]. 环境科学,2007,35(6):177-180.
- WANG Wei. Landslide and debris flow distribution and disaster characteristics in Lanzhou area[J]. Environmental Science,2007,35(6):177-180.
- [23] 王得楷,马琦明,陈怀录,等. 甘肃城市建设地质灾害防治研究[J]. 甘肃科学学报,2010,22(3):53-56.
- WANG Dekai, MA Qiming, CHEN Huailu, et al. Study on the prevention and control of geological disasters in Gansu urban construction[J]. Journal of Gansu Sciences,2010,22(3):53-56.
- [24] 吴文建,张世涛,张光政,等. 基于灰色关联分析法的泥石流危险性评价——以泸水县银坡河泥石流为例[J]. 地质灾害与环境,2017,28(3):30-32.
- WU Wenjian, ZHANG Shitao, ZHANG Guangzheng, et al. Debris flow risk assessment based on grey correlation analysis method: a case study of Yinpohe debris flow in Lushui County[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2017,28(3):30-32.
- [25] 吕擎峰,李军鹏,赵本山,等. 基于灰色关联度法的可拓理论在霍尔古吐水电站坝址区泥石流危险性评价中的应用[J]. 工程地质学报,2016,24(2):211-219.
- LYU Qingfeng, LI Junpeng, ZHAO Benshan, et al. Debris flow risk assessment at Huoergutu hydropower dam site using grey correlation method and extension theory[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(2):211-219.
- [26] 匡乐红,徐林荣,刘宝深. 基于可拓方法的泥石流危险性评价[J]. 中国铁道科学,2006,27(5):1-6.
- KUANG Lehong, XU Linrong, LIU Baoshen. Debris flow hazard assessment based on extension method[J]. China Railway Science, 2006,27(5):1-6.
- [27] 杨艳,张绪教,叶培盛,等. 基于模糊数学法评价滇西保山地区麻柳河泥石流沟的危险性[J]. 地质通报,2012,31(2):351-355.
- YANG Yan, ZHANG Xujiao, YE Peisheng, et al. Fuzzy comprehensive evaluation for risk assessment of the Malanghe debris flow gully in Baoshan area, western Yunnan Province[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(2):351-355.
- [28] 王俊豪,金华丽,倪天翔,等. 基于层次分析法的模糊综合评判模型在康乐县泥石流沟危险性评价中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,2017,28(3):54-57.
- WANG Junhao, JIN Huali, NI Tianxiang, et al. The application of fuzzy comprehensive evaluation model based on analytic hierarchy process in risk assessment of debris flow gully in Kangle County[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017,28(3):54-57.
- [29] 杨敏,胡伟,王运生. 基于最优组合赋权和模糊综合评价法的杂谷脑河下游泥石流危险性评价[J]. 黑龙江大学自然科学学报,2017,34(3):271-278.
- YANG Min, HU Wei, WANG Yunsheng. Application of optimal combined weights method and fuzzy comprehensive evaluation method in risk evaluation of the debris flow along the downstream of Zagu river[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University,2017,34(3):271-278.
- [30] 牛全福,冯尊斌,张映雪,等. 基于GIS的兰州滑坡灾害孕灾环境敏感性评价[J]. 灾害学,2017,32(3):29-35.
- NIU Quanfu, FENG Zunbin, ZHANG Yingxue, et al. Susceptibility assessment of disaster environment for landslide hazard based on GIS in Lanzhou Area[J]. Journal of Catastrophology,2017,32(3):29-35.
- [31] 韦修喜,周永权. 基于ROC曲线的两类分类问题性能评估方法[J]. 计算机技术与发展,2010,20(11):47-50.
- WEI Xiuxi, ZHOU Yongquan. A new performance categories evaluation method based on ROC curve[J]. Computer Technology and Development, 2010, 20(11):47-50.