

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202112034

张蕊, 郭荣昌, 贺攀, 等. 基于改进突变理论的滑坡危险性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(1): 121-128.

ZHANG Rui, GUO Rongchang, HE Pan, et al. Landslide hazard assessment based on improved catastrophe theory[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1): 121-128.

基于改进突变理论的滑坡危险性评价

张蕊, 郭荣昌, 贺攀, 余岭燕

(兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 滑坡危险性评价是滑坡风险评估的重要组成部分, 对滑坡的预测和防治意义重大。传统滑坡危险性评价在计算指标间重要性时多采用 AHP、专家评判法、模糊综合评判等方法, 但存在主观性较强, 计算较为复杂等问题。研究基于一种改进的突变理论模型对滑坡进行危险性评价, 选取坡度、坡向、高程、平面曲率、剖面曲率、距河流距离、地层岩性、土地利用类型、距断层距离、植被覆盖率、24 h 降雨以及人类工程活动等 12 个因子作为滑坡危险性评价的影响因子, 采用熵权法判定指标间的相对重要性, 并建立滑坡危险性评价体系; 然后对指标进行标准化、归一化, 计算总突变结果; 最后使用拟合函数对总突变结果进行转换, 得到新的滑坡危险性评价准则, 并以雅安市的 20 条滑坡对评价准则进行实例验证。结果表明, 突变理论得到的评价结果准确率为 90%, 评价结果更加直观准确。

关键词: 滑坡; 危险性评价; 突变理论; 熵权法

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)01-0121-08

Landslide hazard assessment based on improved catastrophe theory

ZHANG Rui, GUO Rongchang, HE Pan, YU Lingyan

(School of Automation & Electrical Engineering of Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Landslide hazard assessment is an important part of landslide risk assessment, which is of great significance to landslide prediction and prevention. Analytic Hierarchy Process(AHP), expert evaluation, fuzzy comprehensive evaluation and other methods were often used in traditional landslide hazard evaluation to calculate the importance of inter-index, which were subjective and complicated. This paper introduced an improved model of mutation theory, which overcame the limitation of traditional methods and achieved higher evaluation accuracy. Firstly, according to field investigation and previous studies, 12 factors including slope, slope direction, elevation, plane curvature, profile curvature, distance from river, stratigraphic lithology, land use type, distance from fault, vegetation coverage rate, 24 h rainfall and human engineering activities were selected as influencing factors of landslide risk assessment, and the relative importance of indicators was determined by entropy weight method, and the landslide risk assessment system was established. Then the index was standardized and normalized, and the total mutation result was calculated. Finally, the fitting function was used to transform the total catastrophe result, and a new criterion of landslide risk assessment was obtained. Taking 20 landslides in Ya'an city as an example, the results showed that the accuracy of the evaluation results obtained by the catastrophe theory was 90%, and the improved evaluation results were more intuitive and accurate

Keywords: landslide; risk assessment; catastrophe theory; entropy weight method

收稿日期: 2021-12-28; 修订日期: 2022-04-07

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 甘肃省自然科学基金(21JR1RA254); 兰州交通大学青年科学基金项目(2018021)

第一作者: 张蕊(1994-), 女, 汉族, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害风险评估。E-mail: 2991099579@qq.com

通讯作者: 郭荣昌(1986-), 男, 汉族, 河南林州人, 博士, 副教授, 研究方向为地质灾害风险评估。E-mail: grc_mail@126.com

0 引言

滑坡是指大量的岩石、泥土或岩屑物质沿斜坡的运动^[1]。滑坡是一种常见的山区地质灾害,它常常直接毁坏农田、村庄、城镇等,给人民的生命财产带来了巨大的损失。从国家统计局提供资料可以知道,仅在 2019 年发生的各类地质灾害包括泥石流、崩塌、滑坡、地面塌陷总计 6 181 处,其中滑坡 4 220 处,伤员 299 人中死亡 211 人,造成高达 27 万元的直接经济损失。滑坡危险性评价对预防和减轻滑坡具有重要意义。

目前评价方法中国外学者主要采用人工神经网络^[2]、逻辑回归^[3]、频率比^[4]、证据权^[5]等方法进行危险性评价。国内学者祁于娜等^[6]利用层次分析法与熵权法计算评价因子权重,采用易发性指数并基于 GIS 对研究区进行易发性评价及区划,并表明地质灾害易发性分区与已有的地质灾害分布有较好的对应关系。吴博等^[7]使用熵权法得出因子的权重,计算多指标综合属性测度,结合属性识别理论和置信度判别准则,经实例验证表明评价结果与实际情况基本一致。Zhu 等^[8]使用突变理论建立了岩溶地区隧道开挖突水和突泥的风险评价模型,该方法预测的风险等级与工程中观察到的结果一致。宋盛渊等^[9]使用突变理论进行滑坡危险性评价,经过实例评价后表明该方法有较高的准确率。王雪冬等^[10]利用熵权法得到因子之间相对重要性的排序,再使用突变理论对 10 条泥石流易损度进行了评价,表明易损度为轻度和中度的评价结果符合实际情况。刘晓宇等^[11]通过分析选取 7 个指标建立滑坡危险性评价突变模型,评价结果与现场调查情况吻合性较高。

滑坡在某些因素作用下具有突发的现象,其爆发具有明显的突变特征,突变理论是一个很好解决这类突发问题的方法,因此可以采用突变理论进行危险性评价。突变理论的优势在于评价结果不依赖于精确的因子权重,仅对因子进行重要性排序即可,能有效降低此类评价工作的主观性,同时又提高了评价的效率和准确性。但是常规的突变评价法缺点十分明显,即归一化导致评价结果过于聚集,不利于风险程度的判别。

因此,借鉴前人研究成果,利用熵权法得到 24 h 降雨、高程、坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率、距断层距离、距河流距离、地层岩性、土地利用类型、植被覆盖率以及人类工程活动 12 个指标间相对重要性排序结果,并建立滑坡危险性评价体系,通过计算得到总突变结果,最后使用拟合函数对总突变结果进行转换,得到新的滑坡危险性评价准则。

1 基本理论与方法

1.1 突变理论介绍

法国数学家勒内·托姆在其著作中对突变理论进行了详细的讲解,突变理论由此诞生。他将系统内部状态的整体性“突跃”称为突变,其特点是过程连续而结果不连续^[12-13]。突变理论方法在地质、交通等领域有着广泛的应用,对边坡稳定性、隧道安全性等的评价,均取得良好的效果。

1.1.1 基本模型

突变评价法是以突变理论为基础,如图 1 所示常用的 3 种模型。

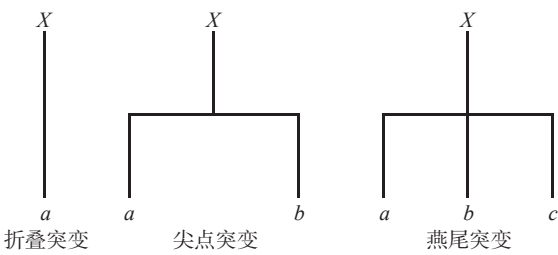


图 1 常用突变模型
Fig. 1 Common mutation model

通过突变模型的势函数求导得到分歧方程,分歧方程是反映状态变量与各控制变量之间的关系,此方程可导出归一化公式,最后运用归一化公式,求出系统的总突变评价^[14],见表 1。

表 1 一维状态变量的突变模型			
Table 1 Mutation model of one-dimensional state variables			
突变模型	控制变量维数	势函数	归一公式
折叠突变	1	x^3+ax	$x_a=\sqrt{a}$
尖点突变	2	x^4+ax^2+bx	$x_a=\sqrt{a}$
			$x_b=\sqrt[3]{b}$
燕尾突变	3	$x^5+ax^3+bx^2+cx$	$x_a=\sqrt{a}$
			$x_b=\sqrt[3]{b}$
			$x_c=\sqrt[4]{c}$

1.1.2 改进的突变理论评价法

突变理论在危险性评价方面存在两点不足,人为主观的对指标的重要性排序,从而导致评价结果直接受到人为主观因素的影响,评价过程中对各指标进行归一化处理,归一化公式具有聚集性特点,导致评价结果之间的数值差距很小,不利于直观判断滑坡的危险性等级^[15]。针对上述的不足,首先采用熵权法计算客观权重,对 12 个影响因子重要性排序,使评价结果更加客观;其次根据文献^[16]讲述的方法改进突变理论,假设指

标层各隶属度值为 $x_i(i=1,2,\dots,n)$,计算出总突变结果 y_i ,构建 x_i 与 y_i 的拟合关系式,使用拟合函数对评价结果转换,使突变评价结果不至于聚集,可以很好地显示评价结果的“优”“劣”性,其关键在于选取一种与突变函数规律相一致的方法。

1.2 熵权法

熵权法又称信息熵,是一种计算客观权重的方法。在信息论中,熵是对不确定性或随机性的一种度量,不确定性越大,熵值就越大,不确定性越小,熵值就越小。影响地质灾害发生的因素有很多,不同的影响因子对地质灾害发生的贡献程度不同,运用信息熵可以定量地衡量评价因子差异程度的大小,能够反映各评价因子的效用价值,可用来计算评价因子的权重值^[17]。

假设有 m 个样本 n 个指标,其中 x_{ij} 为第 i 个样本的第 j 个指标($1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$),熵权法计算步骤:

(1) 标准化

正向指标:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (1)$$

逆向指标:

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_i) - x_{ij}}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中, $\max(x_i)$ 、 $\min(x_i)$ 分别为该指标的最大值、最小值。

适度指标:

$$x'_{ij} = \begin{cases} \frac{\max(x_i) - x_{ij}}{\max(x_i) - x_{opt}}, & x_{ij} > x_{opt} \\ \frac{x_{ij} - \min(x_i)}{x_{opt} - \min(x_i)}, & x_{ij} \leq x_{opt} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, x_{opt} 取值为 180° 。

(2) 计算各指标的信息熵

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln p_{ij} \quad (4)$$

其中, $p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}}$,如果 $p_{ij}=0$,则 $\lim_{p_{ij} \rightarrow 0} p_{ij} \ln p_{ij} = 0$ 。

(3) 计算各指标权重

$$w_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j}, 1 \leq j \leq n \quad (5)$$

2 滑坡危险性评价模型计算步骤

(1)建立判别指标体系。建立目标层、准则层、指标层的三层指标评价体系。指标层包含适度指标、正向指标和逆向指标。其中,正向指标是越大评价结果就越好;逆向指标即越小对评价结果越有利;适度指标是需要综合考量的指标,如坡向指标。

(2)指标重要性排序。使用熵权法计算12个因子的权重,再按照权重大小进行指标重要性排序。

(3)标准化:正向指标、逆向指标、适度指标按照上述1.2中的公式进行计算。

(4)归一化:归一化的计算有两种评判原则:互补原则和非互补原则^[18]。非互补原则为:如果各因子之间不能相互替代,使用“大中取小”的标准取值,即选择较小的值作为本次计算的系统值;互补原则为:如果各因子之间存在相互关联的关系,取“平均值”。

(5)构建拟合函数:根据上述构建的滑坡危险性评价体系,从0到1依次以0.05递增对12个指标进行赋值,使用Matlab进行拟合得到拟合曲线以及拟合曲线的决定系数。 R^2 取值范围为 $[0, 1]$,取值越大说明自变量 x 对因变量 y 的拟合能力越强,效果越好。

3 实例应用

3.1 研究区概况

据国家统计局统计年鉴资料显示,仅2021年,四川省共发生地质灾害2513起,其中滑坡灾害1737起,约占70%。雅安市位于四川盆地的西部边缘,除中、东部地势低外,其余西、南、北三面地势较高,形成左上高地势右下低地势^[19-20]。市区山脉纵横交错,地貌类型复杂多样,地质灾害频发,且板块活动剧烈,近年来地震频发。该地区受季风气候的影响,降水集中,多山地容易加速坡体解体。雅安素有“雨城”“天漏”之称是我国地质灾害多发区^[21-22]。因此,文章以雅安地区为例,对沿线滑坡进行危险性分析。

3.2 数据来源

文章通过对研究区滑坡点的勘察,并结合前人的研究^[23-26],选取剖面曲率 D_1 、平面曲率 D_2 、坡向 D_3 、高程 D_4 、坡度 D_5 、地层岩性 D_6 、距断层距离 D_7 、距河流距离 D_8 、植被覆盖率 D_9 、24h降雨 D_{10} 、土地利用类型 D_{11} 、人类工程活动 D_{12} 等12个因子用于指标体系的构建。从地理空间数据云(gscld.cn)下载DEM和Landsat类型的数据,DEM(ASTER GDEM 30 m分辨率数字高程数据)提取 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 , Landsat

(Landsat 8 OLI_TIRS 卫星数字产品, 空间分辨率 30 m) 提取 D_9 。国家地质资料数据中心(ngac.org.cn)下载 1 : 250 万的地质图提取 D_6 和 D_7 ; 国家基础地理信息中心(ngcc.cn)提取 D_8 ; 国家气象信息中心-中国气象数据网(nmic.cn)下载时间分辨率为 1h 的降雨数据, 获得 D_{10} 。中国科学院资源环境科学与数据中心网站下载

栅格分辨率为 30 m 土地利用类型 dbf 文件提取 D_{11} ; 使用道路缓冲区和居民点空间分布数据提取 D_{12} 。

3.3 指标取值

以雅安市的 20 条滑坡数据为例, 对区域内的滑坡灾害风险进行数据分析。各项指标数据如表 2。

表 2 研究区滑坡的各评价指标
Table 2 Evaluation indexes of landslide in the study area

滑坡点	24 h降雨/mm	地层岩性	距断层距离/km	土地利用类型	坡度/(°)	高程/m	坡向/(°)	平面曲率	剖面曲率	距河流距离/km	植被覆盖率
1	17	砂岩	3.117 6	有林地	11.504 2	1 403	22.890 6	-0.544 0	0.532 1	0.316 8	0.302 9
2	2	砾岩	7.058 8	灌木林	11.913 7	1 002	99.090 3	-0.574 2	0.113 8	0.174 0	0.142 9
3	16	砂岩	11.1765	旱地	9.646 2	789	11.309 9	0.021 7	0.149 6	0.174 0	-0.117 6
4	9	砂岩	3.823 5	疏林地	11.242 8	968	326.976 1	-0.035 0	0.043 3	0.102 0	-0.007 8
5	18	砂岩	7.058 8	旱地	27.031 1	696	210.963 8	0.100 2	-0.158 3	0.440 0	0.273 5
6	12	砾岩	0.411 8	旱地	15.951 8	809	122.735 2	0.038 0	0.200 3	0.090 0	0.336 9
7	18	砂岩	5.058 8	水田	24.131 9	1 827	170.362 5	0.048 9	-0.007 2	0.280 0	0.490 0
8	6	砂岩	7.647 1	高覆盖度草地	16.759 9	815	255.579 2	-0.096 5	0.091 5	0.043 2	0.474 9
9	8	泥岩	2.352 9	旱地	20.957 6	1 574	81.869 9	-0.030 7	-0.101 3	0.272 0	0.318 9
10	17	泥岩	6.470 6	中覆盖度草地	20.814 3	1 103	243.996 7	-0.154 3	-0.035 6	0.126 0	0.200 3
11	3	砂岩	4.705 9	城镇用地	12.958 8	649	58.324 5	0.149 9	-0.064 2	0.030 0	-0.073 2
12	17	砂岩	2.647 1	有林地	20.745 5	1 205	124.315 1	0.025 0	-0.120 4	0.300 0	0.334 8
13	15	砂岩	9.000 0	中覆盖度草地	23.088 8	2 094	85.515 4	-0.057 7	-0.228 9	8.600 0	0.183 7
14	18	砂岩	4.117 6	旱地	7.853 9	611	25.016 9	-0.086 6	0.214 1	0.080 0	0.181 3
15	13	冲洪积砾石及砂土	2.235 3	旱地	18.435 0	1 086	180.000 0	-0.128 6	-0.117 1	0.164 0	0.000 0
16	5	砂岩	8.529 4	旱地	18.568 6	726	60.255 1	0.083 2	-0.070 2	0.100 0	0.267 1
17	22	冲洪积砾石及砂土	2.352 9	旱地	7.117 2	1 096	334.290 0	-0.159 0	0.497 9	0.168 0	0.397 5
18	32	砂岩	8.470 6	旱地	29.260 1	1 769	59.620 9	0.134 4	-0.027 0	6.500 0	0.431 7
19	34	冲洪积砾石及砂土	8.823 5	旱地	14.752 5	576	85.462 2	0.110 3	0.011 5	0.044 0	0.217 0
20	34	砂岩	7.058 8	中覆盖度草地	14.724 2	889	267.273 7	0.368 3	-0.344 8	0.312 0	0.374 5

3.4 因子排序

首先对 12 个因子进行熵权法重要性排序, 将 12 个指标进行排序。权重为:

$$w = (0.141\ 8, 0.166\ 3, 0.081\ 8, 0.113\ 3, 0.051\ 6, 0.021\ 7, 0.059\ 9, 0.100\ 2, 0.126\ 6, 0.061\ 5, 0.044\ 1, 0.031\ 1)$$

重要性依次为: 降雨、高程、剖面曲率、坡度、平面曲率、地层岩性、距断层距离、植被覆盖率、坡向、土地利用类型、人类工程活动、距河流距离。

3.5 判别模型

提取影响滑坡的 12 个指标, 使用熵权法得到各指标的重要性排序后, 根据图 1 中 3 种常用的突变模型, 建立滑坡危险性评价体系, 见表 3。

3.6 构建拟合函数

根据表 3 中构建的滑坡危险性评价体系, 令底层指标值 x_i 均分别为 0, 0.05, 0.1, $\cdots$, 0.95, 1, 计算出相对

应的突变评价结果 y_i , 构建 x_i 与 y_i 的拟合函数关系, 见表 4。

x_i 与 y_i 的拟合曲线见图 2。

R^2 是最常用于评价回归模型优劣程度的指标, R^2 越大(接近于 1), 所拟合的回归方程越优。拟合关系式为: $y = 0.120\ 5 \ln x + 0.998\ 5$, 指数曲线的 R^2 为 0.976 4, 较接近 1, 拟合度较高。

3.7 基于改进突变理论的滑坡危险性评价

3.7.1 数据标准化

其中正向指标有: 剖面曲率 D_1 、平面曲率 D_2 、坡度 D_5 、高程 D_4 、降雨 D_{10} , 采用式 (1) 标准化; 负向指标有: 距断层距离 D_7 、距河流距离 D_8 、植被覆盖率 D_9 , 采用式 (2) 进行标准化处理。坡向 D_3 指标, 采用式 (3) 进行标准化。土地利用类型、地层岩性以及人类工程活动, 采取人为赋值的方法。标准化处理结果见表 5。

表 3 滑坡危险性评价体系

Table 3 Landslide risk assessment system

目标层	突变模型	准则层	突变模型	中间层	突变模型	指标层
滑坡危险性 <i>A</i>	燕尾突变(非互补)	地形地貌 <i>B</i> ₁	尖点突变(非互补)	地貌 <i>C</i> ₁	燕尾突变(非互补)	剖面曲率 <i>D</i> ₁
						平面曲率 <i>D</i> ₂
						坡向 <i>D</i> ₃
				滑坡形态 <i>C</i> ₂	尖点突变(互补)	高程 <i>D</i> ₄
						坡度 <i>D</i> ₅
		地质条件 <i>B</i> ₂	燕尾突变(非互补)	岩性条件 <i>C</i> ₃	折叠突变	地层岩性 <i>D</i> ₆
				构造条件 <i>C</i> ₄	尖点突变(非互补)	距断层距离 <i>D</i> ₇
						距河流距离 <i>D</i> ₈
				植被条件 <i>C</i> ₅	折叠突变	植被覆盖率 <i>D</i> ₉
				致灾因子 <i>C</i> ₆	燕尾突变(非互补)	24 h降雨 <i>D</i> ₁₀
		诱发因素 <i>B</i> ₃	折叠突变			土地利用类型 <i>D</i> ₁₁
						人类工程活动 <i>D</i> ₁₂

表 4 底层指标*x*与总突变结果*y*对应关系

Table 4 Corresponding relationship between underlying indicators *x* and total mutation results *y*

<i>x</i>	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
<i>y</i>	0.000 0	0.586 6	0.740 7	0.790 0	0.821 5	0.845 1	0.864 0
<i>x</i>	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
<i>y</i>	0.879 9	0.893 7	0.905 8	0.916 7	0.926 6	0.935 6	0.944 0
<i>x</i>	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
<i>y</i>	0.951 7	0.959 0	0.965 8	0.972 3	0.978 4	0.984 2	0.989 7

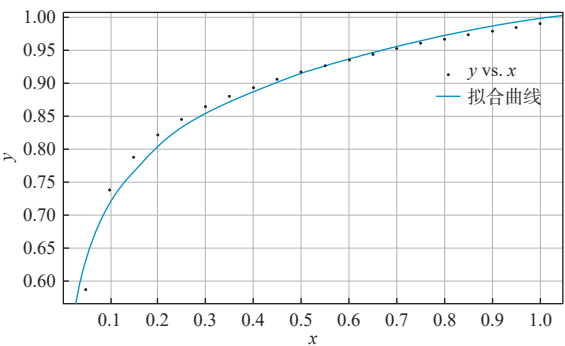


图 2 底层指标与总突变结果拟合曲线

Fig. 2 Fitting curve of bottom index and total mutation result

3.7.2 数据归一化

利用表 3 中的突变体系计算各层评价指标的突变结果。限于篇幅,下面以 1 号滑坡为例计算分析的步骤。

(1)中间层归一化

指标 D_1 、 D_2 、 D_3 构成燕尾突变并遵循非互补原则:
 $x_{D_1} = \sqrt[3]{0.944\ 8} = 0.981\ 3$, $x_{D_2} = \sqrt[3]{0.084\ 5} = 0.539\ 2$, $x_{D_3} = \sqrt[3]{0.074\ 9} = 0.273\ 6$, $x_{C_1} = \min\{x_{D_1}, x_{D_2}, x_{D_3}\} = 0.273\ 6$ 。

指标 D_4 与 D_5 构成尖点突变并遵循互补原则:
 $x_{D_4} = \sqrt{0.495\ 6} = 0.704$, $x_{D_5} = \sqrt[3]{0.197\ 8} = 0.582\ 6$, $x_{C_2} = \text{average}\{x_{D_4}, x_{D_5}\} = 0.643\ 3$ 。

指 $x_{C_2} = \text{average}\{x_{D_4}, x_{D_5}\}$ 标 D_6 为折叠突变, $x_{C_3} = x_{D_6} = \sqrt{0.900\ 0} = 0.948\ 7$ 。

指标 D_7 、 D_8 构成尖点突变并遵循非互补原: $x_{D_7} = \sqrt{0.769\ 6} = 0.877\ 3$, $x_{D_8} = \sqrt[3]{0.969\ 3} = 0.989\ 7$, $x_{C_4} = \min\{x_{D_7}, x_{D_8}\} = 0.877\ 3$ 。

指标 D_9 为折叠突变, $x_{C_5} = x_{D_9} = \sqrt{0.353\ 2} = 0.594\ 3$ 。

指标 D_{10} 、 D_{11} 、 D_{12} 构成燕尾型突变遵循互补原则:
 $x_{D_{10}} = \sqrt{0.429\ 9} = 0.655\ 7$, $x_{D_{11}} = \sqrt[3]{0.7} = 0.887\ 9$, $x_{D_{12}} = \sqrt[3]{0.89} = 0.971\ 3$, $x_{C_6} = \min\{x_{D_{10}}, x_{D_{11}}, x_{D_{12}}\} = 0.655\ 7$ 。

(2)准则层归一化

对 C_1 、 C_2 构成尖点突变遵循非互补原则: $x_{C_1} = \sqrt[3]{0.273\ 6} = 0.649\ 2$, $x_{C_2} = \sqrt{0.643\ 3} = 0.802\ 1$, $x_{B_1} = \min\{x_{C_1}, x_{C_2}\} = 0.649\ 2$ 。

对 C_3 、 C_4 、 C_5 构成燕尾突变遵循非互补原: $x_{C_3} = \sqrt[4]{0.948\ 7} = 0.986\ 9$, $x_{C_4} = \sqrt[3]{0.877\ 3} = 0.957\ 3$, $x_{C_5} = \sqrt{0.594\ 3} = 0.770\ 9$, $x_{B_2} = \min\{x_{C_3}, x_{C_4}, x_{C_5}\} = 0.770\ 9$ 。

对 C_6 为折叠突变, $x_{B_3} = \sqrt{0.655\ 7} = 0.809\ 7$

(3)目标层归一化

指标 B_1 、 B_2 、 B_3 构成燕尾型突变并遵循非互补原则: $x_{B_1} = \sqrt{0.649\ 2} = 0.805\ 7$, $x_{B_2} = \sqrt[3]{0.809\ 7} = 0.932\ 1$, $x_{B_3} = \sqrt[4]{0.770\ 9} = 0.937\ 0$ 。

表 5 标准化结果

Table 5 Standardization results

序号	剖面曲率	平面曲率	坡向	高程	坡度	地层岩性	距断层距离	距河流距离	植被覆盖率	降雨	土地利用类型	人类工程活动
1	0.944 8	0.084 5	0.074 9	0.495 6	0.197 8	0.90	0.769 6	0.969 3	0.353 2	0.429 9	0.70	0.89
2	0.511 2	0.055 4	0.523 6	0.270 9	0.213 7	0.60	0.439 1	0.984 4	0.592 6	0.005 0	0.60	0.34
3	0.548 3	0.630 2	0.006 7	0.151 6	0.125 7	0.90	0.093 7	0.984 4	0.982 4	0.414 2	0.50	0.35
4	0.438 1	0.575 5	0.217 0	0.251 9	0.187 6	0.90	0.710 4	0.992 0	0.818 0	0.192 8	0.80	0.30
5	0.229 1	0.705 9	0.835 1	0.099 5	0.800 0	0.90	0.439 1	0.956 2	0.397 3	0.448 4	0.50	0.40
6	0.600 9	0.645 9	0.662 8	0.162 8	0.370 3	0.60	0.996 5	0.993 3	0.302 3	0.302 1	0.50	0.33
7	0.385 8	0.656 3	0.943 2	0.733 1	0.687 6	0.90	0.606 8	0.973 2	0.073 3	0.461 9	0.40	0.80
8	0.488 0	0.516 1	0.597 4	0.166 2	0.401 6	0.90	0.389 7	0.998 3	0.095 8	0.111 5	1.10	0.32
9	0.288 2	0.579 6	0.422 2	0.591 4	0.564 5	1.40	0.833 7	0.974 0	0.329 3	0.164 8	0.50	0.32
10	0.356 3	0.460 4	0.659 1	0.327 5	0.558 9	1.40	0.488 4	0.989 5	0.506 7	0.429 9	1.20	0.32
11	0.326 6	0.753 8	0.283 5	0.073 2	0.254 2	0.90	0.636 4	0.999 7	0.915 9	0.041 5	0.10	0.20
12	0.268 4	0.633 3	0.672 1	0.384 6	0.556 2	0.90	0.809 1	0.971 1	0.305 4	0.429 9	0.70	0.30
13	0.155 9	0.553 6	0.443 6	0.882 7	0.647 1	0.90	0.276 3	0.091 2	0.531 5	0.386 9	1.20	0.48
14	0.615 2	0.525 7	0.087 4	0.051 9	0.056 2	0.90	0.685 7	0.994 4	0.535 1	0.448 5	0.50	0.31
15	0.271 8	0.485 2	1.000 0	0.318 0	0.466 6	1.50	0.843 6	0.985 5	0.806 4	0.307 7	0.50	0.32
16	0.320 4	0.689 5	0.294 9	0.116 3	0.471 8	0.90	0.315 7	0.992 3	0.406 8	0.089 3	0.50	0.30
17	0.909 3	0.455 8	0.178 1	0.323 6	0.027 6	1.50	0.833 7	0.985 1	0.211 7	0.566 0	0.50	0.30
18	0.365 2	0.738 9	0.291 1	0.700 6	0.886 5	0.90	0.320 7	0.313 8	0.160 5	0.843 0	0.50	0.46
19	0.405 1	0.715 6	0.443 3	0.032 3	0.323 8	1.50	0.291 1	0.998 2	0.481 7	0.904 8	0.50	0.35
20	0.035 7	0.964 5	0.535 1	0.207 6	0.322 7	0.90	0.439 1	0.969 8	0.246 1	0.905 0	1.20	0.40

最后, 1 号滑坡总的突变评价结果为: $x_A = \min \{x_{B_1}, x_{B_2}, x_{B_3}\} = 0.805\ 7$, 经拟合的函数转换后评价结果为 0.201 9。

3.7.3 滑坡危险性评价结果

按照上述步骤得到其余 19 条滑坡的突变评价结果, 再按照拟合关系式将改进前的结果进行转换, 改进前后的滑坡危险性评价准则见表 6。

表 6 滑坡危险性评价准则

Table 6 Criteria for landslide hazard assessment

危险性级别	高危险	中危险	低危险
改进前	(0.9100, 1]	(0.8500, 0.9100]	(0, 0.8500]
改进后	(0.4798, 1]	(0.2916, 0.4798]	(0, 0.2916]

滑坡危险性评价准则经拟合函数转换后, 评价区间较改进前更分散, 更容易区别滑坡得危险性等级。20 条滑坡危险性评价结果结果见表 7。

由表 7 可知, 雅安地区的 20 条滑坡中有 10 条低危险型滑坡、7 条中危险型滑坡、3 条高危险型滑坡。7 号滑坡的总突变评价结果处于低危险与中危险滑坡的分界点附近, 15 号滑坡的总突变评价结果处于中危险与高危险滑坡的分界点附近, 若 12 个指标中任意一个指标发生突变时, 低危险、中危险滑坡有可能突变为中危险或高危险滑坡; 4 号滑坡总突变评价结果都略高于中危险评价区间的下限, 10 号滑坡总突变评价结果都略高于高中危险评价区间的下限, 表明这 2 处滑坡虽是中或

表 7 滑坡危险性评价结果

Table 7 Landslide risk assessment results

序号	改进前	危险性	改进后	危险性	现场调查结果
1	0.805 7	低危险	0.201 9	低危险	低危险
2	0.643 5	低危险	0.052 6	低危险	低危险
3	0.658 6	低危险	0.059 6	低危险	低危险
4	0.856 1	中危险	0.306 8	中危险	中危险
5	0.888 0	中危险	0.399 8	中危险	中危险
6	0.865 4	中危险	0.331 3	中危险	高危险
7	0.849 3	低危险	0.290 0	低危险	低危险
8	0.833 0	低危险	0.253 1	低危险	低危险
9	0.860 5	中危险	0.318 1	中危险	中危险
10	0.914 0	高危险	0.496 1	高危险	高危险
11	0.767 0	低危险	0.146 5	低危险	低危险
12	0.921 6	高危险	0.528 1	高危险	高危险
13	0.901 9	中危险	0.448 6	中危险	中危险
14	0.743 4	低危险	0.120 4	低危险	低危险
15	0.904 6	中危险	0.458 9	中危险	中危险
16	0.817 7	低危险	0.223 0	低危险	低危险
17	0.812 4	低危险	0.213 4	低危险	中危险
18	0.891 9	中危险	0.413 0	中危险	中危险
19	0.811 3	低危险	0.211 4	低危险	低危险
20	0.831 0	低危险	0.249 2	低危险	低危险

高危险滑坡, 但如果施以科学的防治措施, 那么滑坡危险性将由中危险降低为低危险或高危险降低为中危险。

4 结论

本文使用熵权法计算指标间的相对重要性排序, 利

用改进的突变理论对研究区滑坡危险性进行评价,以雅安地区的 20 条滑坡进行验证,得出以下结论:

(1)使用熵权法计算各指标的客观权重时,减少了判别过程中的主观性。

(2)采用定性与定量相结合的方法进行指标的标准化,归一化,进而通过突变理论模型计算突变结果,但由于归一化会导致评价分值较高且过于集中,因此,设计了一个转换方法,从而使突变评价法更符合习惯意义上的“优”“劣”。

(3)将改进前后的突变结果与实地调查结果相比,改进前危险性评价结果数值较大且过于集中,很难辨认出滑坡危险性的等级,改进后的滑坡危险性评价结果相对于改进前较分散,评价更准确,易于判断。改进前 20 条滑坡中编号为“6 号、17 号”的滑坡危险性与现场调查显示不一致,评价的准确率为 90%。评价结果表明该方法对滑坡危险性判别有较高准确率。因此,可为滑坡地质灾害的危险性评价与防治提供参考,同时这一转换方法对其他领域的研究也具有借鉴意义。

参考文献(References):

- [1] 汤明高,吴川,吴辉隆,等.水库滑坡地下水动态响应规律及浸润线计算模型——以石榴树包滑坡为例[J].水文地质工程地质,2022,49(2):115-125. [TANG Minggao, WU Chuan, WU Huilong, et al. Dynamic response law of groundwater in reservoir landslide and calculation model of infiltration line: A case study of Shidshubao landslide [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 115-125. (in Chinese with English abstract)]
- [2] KALANTAR B, PRADHAN B, NAGHIBI S A, et al. Assessment of the effects of training data selection on the landslide susceptibility mapping: a comparison between support vector machine (SVM), logistic regression (LR) and artificial neural networks (ANN) [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2018, 9(1): 49-69.
- [3] 张钟远,邓明国,徐世光,等.镇康县滑坡易发性评价模型对比研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(1):157-171. [ZHANG Zhongyuan, DENG Mingguo, XU Shiguang, et al. Comparative study on evaluation models of landslide susceptibility in Zhenkang County [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(1): 157-171. (in Chinese with English abstract)]
- [4] SHANO L, RAGHUVANSHI T K, METEN M. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio model: The case of Gamo highland, South Ethiopia [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(7): 1-18.
- [5] MAŁKA A N. Landslide susceptibility mapping of Gdynia using geographic information system-based statistical models [J]. *Natural Hazards*, 2021, 107(1): 639-674.
- [6] 祁于娜,王磊.层次分析-熵值定权法应用于山区城镇地质灾害易发性评价[J].测绘通报,2021(6):112-116. [QI Yuna, WANG Lei. Application of AHP-entropy weight method in hazards susceptibility assessment in mountain town [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(6): 112-116. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 吴博,赵法锁,段钊,等.基于熵权的属性识别模型在陕西土质滑坡危险度评价中的应用[J].灾害学,2018,33(1):140-145. [WU Bo, ZHAO Fasuo, DUAN Zhao, et al. Application of attribute recognition model based on coefficient of entropy to hazard degree evaluation of soil landslide in Shaanxi [J]. *Journal of Catastrophology*, 2018, 33(1): 140-145. (in Chinese with English abstract)]
- [8] ZHU J Q, LI T Z. Catastrophe theory-based risk evaluation model for water and mud inrush and its application in Karst tunnels [J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(5): 1587-1598.
- [9] 宋盛渊,王清,潘玉珍,等.基于突变理论的滑坡危险性评价[J].岩土力学,2014,35(增刊2):422-428. [SONG Shengyuan, WANG Qing, PAN Yuzhen, et al. Evaluation of landslide susceptibility degree based on catastrophe theory [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(Sup 2): 422-428. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王雪冬,叶果,李世宇,等.基于熵值法和突变级数法的泥石流易损度评价[J].地质与资源,2019,28(5):493-496. [WANG Xuedong, YE Guo, LI Shiyu, et al. Vulnerability assessment of debris flow based on entropy value and catastrophe progression methods [J]. *Geology and Resources*, 2019, 28(5): 493-496. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 刘晓宇,任光明,刘彬,等.基于突变理论的滑坡危险性评价[J].西华大学学报(自然科学版),2020,39(2):95-99. [LIU Xiaoyu, REN Guangming, LIU Bin, et al. Analysis of landslide hazard based on mutation series method [J]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2020, 39(2): 95-99. (in Chinese with English abstract)]
- [12] MOGAJI K A, LIM H S. Development of a GIS-based catastrophe theory model (modified DRASTIC model) for groundwater vulnerability assessment [J]. *Earth Science Informatics*, 2017, 10(3): 339-356.
- [13] GHORBANI M A, KHATIBI R, SIVAKUMAR B, et al. Study of discontinuities in hydrological data using catastrophe theory [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2010, 55(7): 1137-1151.
- [14] QIU X X, CAO Q G, WANG Y N, et al. Risk assessment method of coal spontaneous combustion based on catastrophe

- theory [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 603(1): 012017.
- [15] 王艺洁, 张东映, 张小清, 等. 基于改进突变评价法的安徽省旱灾风险评价 [J]. *水电能源科学*, 2020, 38(11): 1-4. [WANG Yijie, ZHANG Dongying, ZHANG Xiaoqing, et al. Drought risk assessment of Anhui Province based on improved catastrophe progression approach [J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(11): 1-4. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 夏杰源. 改进的突变评价法在河南省农业干旱中的应用 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017. [XIA Jieyuan. Application of improved catastrophe evaluation method in agricultural drought in Henan Province [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 赵晓燕, 谈树成, 李永平. 基于斜坡单元与组合赋权法的东川区地质灾害危险性评价 [J]. *云南大学学报 (自然科学版)*, 2021, 43(2): 299-305. [ZHAO Xiaoyan, TAN Shucheng, LI Yongping. Risk assessment of geological hazards in Dongchuan District based on the methods of slope unit and combination weighting [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2021, 43(2): 299-305. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 梁桂兰, 徐卫亚, 何育智, 等. 突变级数法在边坡稳定综合评判中的应用 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(7): 1895-1899. [LIANG Guilin, XU Weiya, HE Yuzhi, et al. Application of catastrophe progression method to comprehensive evaluation of slope stability [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(7): 1895-1899. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 唐然, 邓韧, 董建辉, 等. 雅安市汉源县永定桥水库飞水沟滑坡成因机制分析 [J]. *地质论评*, 2015, 61(增刊 1): 110-111. [Tang Ran, Deng Ren, Dong Jianhui, et al. Genetic mechanism analysis of Feishuigou landslide in Yongdingqiao Reservoir, Hanyuan County, Ya'an City [J]. *Geological Review*, 2015, 61(Sup 1): 110-111. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 李鹏岳, 巴仁基, 倪化勇, 等. 库水位升降速率对雅安双家坪堆积体滑坡稳定性影响模拟分析 [J]. *地质力学学报*, 2017, 23(2): 288-295. [LI Pengyue, BA Renji, NI Huayong, et al. Simulation analysis of the influence of water level rise and fall rate on the stability of Shuangjiaping accumulation in Ya'an [J]. *Chinese Journal of Geomechanics*, 2017, 23(2): 288-295. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 徐晓雪, 季灵运, 张文婷, 等. 基于相干性的 InSAR 时间序列方法追溯四川雅安地区汉源滑坡灾前形变 [J]. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(4): 632-640. [XU Xiaoxue, JI Lingyun, ZHANG Wenting, et al. Trace deformation of Hanyuan Landslide in Ya'an Area, Sichuan Province based on InSAR time series method of coherence [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(4): 632-640. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 侯圣山, 李昂, 韩冰, 等. 四川雅安地质灾害预警预报及分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2014, 25(4): 134-138. [HOU Shengshan, LI Ang, HAN Bing, et al. Prediction and analysis of geological hazards in Ya'an, Sichuan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazards and Control*, 2014, 25(4): 134-138. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 方然可, 刘艳辉, 苏永超, 等. 基于逻辑回归的四川青川县域区域滑坡灾害预警模型 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(1): 181-187. [FANG Ranke, LIU Yanhui, SU Yongchao, et al. Prediction model of regional landslide disaster in Qingchuan County, Sichuan Province based on logistic regression [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 181-187. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 刘福臻, 王灵, 肖东升. 机器学习模型在滑坡易发性评价中的应用 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(6): 98-106. [LIU Fuzhen, WANG Ling, XIAO Dongsheng. Application of machine learning model in landslide susceptibility evaluation [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(6): 98-106. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 杨华阳, 许向宁, 杨鸿发. 基于证据权法的九寨沟地震滑坡危险性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(3): 20-29. [YANG Huayang, XU Xiangning, YANG Hongfa. The Jiuzhaigou co-seismic landslide hazard assessment based on weight of evidence method [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(3): 20-29. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 周天伦, 曾超, 范晨, 等. 基于快速聚类-信息量模型的汶川及周边两县滑坡易发性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(5): 137-150. [ZHOU Tianlun, ZENG Chao, FAN Chen, et al. Landslide susceptibility assessment based on K-means cluster information model in Wenchuan and two neighboring counties, China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 137-150. (in Chinese with English abstract)]