

杨小平, 陈斐, 李哲宏, 等. 基于投影寻踪博弈论-云模型的滑坡风险评价[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 60-67. [YANG Xiaoping, CHEN Fei, LI Zhehong, et al. Landslide Risk Evaluation Based on Projection Pursuit Game Theory and Cloud Model [J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(3): 60-67. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.03.010.]

基于投影寻踪博弈论-云模型的滑坡风险评价^{*}

杨小平^{1,2}, 陈斐^{1,2}, 李哲宏^{1,2}, 倪萍^{1,2}, 蒋力³, 刘光辉⁴

(1. 桂林理工大学 信息科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学 广西嵌入式技术与智能系统重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 广西壮族自治区地质环境监测站, 广西 南宁 530029; 4. 桂林赛普电子科技有限公司, 广西 桂林 541004)

摘 要: 滑坡风险影响因素具有多属性、多层次且无法全部量化等特点, 该文基于多源信息融合理论, 结合实际的监测数据对滑坡风险易发性进行深入分析。首先, 根据主要影响因素构建滑坡风险评价模型。利用层次分析法、改进 CRITIC 法对各项指标因子进行权重分析。针对区域性滑坡存在影响因素较少和样本数量较少等问题, 引入灰色关联分析来对指标因子的权重进行优化。同时利用加速遗传投影寻踪模型来寻找出能够反映高维样本数据整体特征的最佳投影方向。通过博弈论对四组权重值进行组合赋权。最后将权重结果与云模型相结合实现对滑坡风险的综合评判。以昭平县作为研究对象, 选取三个风险区域进行评价, 评价结果与实际相吻合, 说明该模型具有理论合理性和工程应用可行性, 可为滑坡灾害的防治提供参考依据。

关键词: 滑坡; 风险评价; 投影寻踪; 博弈论; 云模型

中图分类号: X43; X915.5; P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)03-0060-08

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.03.010

广西地质环境非常复杂, 地质灾害频发, 给社会和经济带来了巨大的损失。其中滑坡灾害发生的数量居第一位, 造成的损失也最大, 所以本文以滑坡灾害为研究对象, 对其进行风险评价研究^[1]。

目前, 国内外已经使用了各种各样的方法对滑坡风险进行研究^[2]。LEE 等^[3]和 VASU 等^[4]分别对韩国的 Yongin 地区和 Mt Woomyeon 地区的滑坡风险进行了分析。AKGUN^[5]根据土耳其 Izmir 地区的地质特点和影响因素, 运用逻辑回归对其进行滑坡风险评价。DEVKOTA 等^[6-7]利用逻辑回归模型和确定性系数法对喜马拉雅山区的风险进行评估, 然后又利用证据权并结合频数比值模型进行相应对比评价。2014 年, 司鹤等^[8]采用数理统计和灰色关联度等方法针对重庆市建立了城市公共安全风险评估指标体系, 并进行了敏感性计算。2015 年张立军等^[9]提出了一种改进 CRITIC 法加权的聚类算法, 提升了聚类的质量, 优化聚类的性能。2018 年李守林等^[10]将灰色关联分析和 TOPSIS 相结合对 11 家物流企业的历年创新绩效进行综合评估。同年苏屹等^[11]利用加速遗传算法投影寻踪模型科学分析了 496 家企业的可持续发展能力, 取得了很好的评价效果。2019 年金菊良等^[12]建立了基于灰色关联度和联系数耦合的区域农业旱灾脆弱性评价模型。2020 年李江龙等^[13]以云模型理论为基础, 利用熵权法对评价指标赋权并运用云模型理论对三个城市的承灾程度进行综合评价。同

年吴博等^[14]依据偏好系数法进行组合赋权, 并采用功效系数法对黄土边坡稳定性进行了评价。2021 年周子勇等^[15]提出了基于层次熵权建立城市道路塌陷分析评估模型。2021 年祁于娜等^[16]应用层次分析-熵值定权方法对山区城镇地质灾害风险进行评价, 通过两种方法的结合对评价因子进行综合赋权, 并通过 ArcGIS 进行评价。同年, LIU 等^[17]在对用永定新河水水质特征进行分析时引用了博弈论改进的水质综合识别指数。黄亚江等^[18]将 AHP-PSO 和改进的 CRITIC 法相结合来确定地铁火灾安全各韧性指标权重。2022 年, 张冰冰等^[19]通过对比分析表明灰色关联度分析比 DTOPSIS 法更适用于综合评价芦笋新品种(系)在江西省的适应性。同年赵彬^[20]采用 G1 法和改进 CRITIC 法主观观相结合来确定边坡稳定性各影响因素权重, 并利用博弈论求得最优组合权重。程麒铭等^[21]将随机森林和投影寻踪法相结合, 对生物滞留系统性能进行评价, 取得了良好的效果。

本文以广西壮族自治区昭平县作为研究区, 依据广西壮族自治区昭平县 1:5 万地质灾害详细调查报告为基础数据资料, 利用博弈论对评价因子进行组合权重计算, 结合云模型来计算滑坡风险因素的隶属度, 生成综合评价云图来开展区域滑坡易发性评价, 为该区旅游业发展、铁路、公路、水电站等重大工程规划建设和防灾减灾工作提供参考。

^{*} 收稿日期: 2022-10-20 修回日期: 2023-02-10

基金项目: 国家高新技术研发计划(863 计划)(2013AA12210504); 广西壮族自治区科技攻关项目(AC1638012); 广西壮族自治区科技攻关项目(AD18281068); 广西壮族自治区南宁市青秀区科技局科技计划(RZ19100041)。

第一作者简介: 杨小平(1973-), 男, 汉族, 陕西富平人, 教授, 主要从事信息处理、嵌入式系统研究。E-mail: 707726045@qq.com

通信作者: 蒋力(1968-), 男, 汉族, 广西全州人, 高级工程师, 主要从事地质环境调查、评价研究。E-mail: 373484489@qq.com

1 滑坡灾害风险易发性评价指标体系构建

1.1 研究区概括

昭平县是广西壮族自治区贺州市的市辖县, 位于广西东部、桂江的中游, 素有“广右咽喉”之称。地处亚热带气候区, 气候温和, 降雨充沛, 面积 3 273 km², 县辖 9 镇 3 乡, 共 44.7 万人。该县具有复杂的地形地貌条件、较发育的断层、褶皱构造、强风化的高陡斜坡和充沛的雨量, 使其为广西地质灾害易发、多发县区, 该县非常适合进行滑坡灾害风险评价研究。

1.2 评判因子的选取

首先依据广西壮族自治区昭平县 1:5 万地质灾害的详细调查报告对区内所发生的各类地质灾害情况进行统计分析, 通过对滑坡数据进行分析, 总结了昭平县所有滑坡灾害共同的发育特征、形成的基本条件和对其发育影响最大的指标因素。本文以滑坡风险易发性等级分区为目标层, 另外将发育因子、基础因子和诱发因子作为准则层的三个要素。并按准则层要素共选取了 8 个指标因子构成第三层, 即方案层, 分别是地质灾害发育密度、地貌类型、地形坡度、工程地质岩组、风化层厚度、地质构造、人类工程活动和多年平均降雨量。根据上述指标, 构建的昭平县滑坡灾害易发性评价的层次结构模型如图 1 所示。

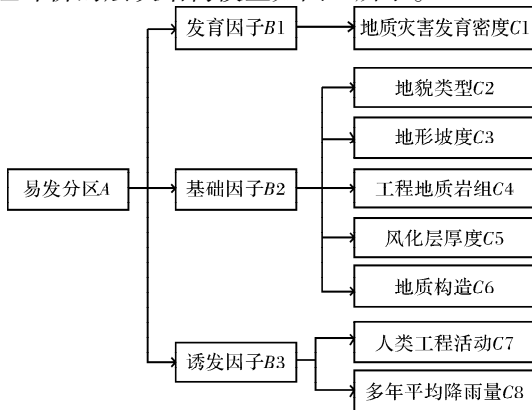


图1 昭平县滑坡灾害易发程度评价层次结构

1.3 评价因子量化

(1) 地质灾害发育密度: 地质灾害发育密度为灾害发生数量与研究分区的面积的比值。密度划分标准: 高密度(>0.1 处/km²), 中密度(0.05 ~ 0.1 处/km²), 低密度(0.01 ~ 0.05 处/km²)

(2) 地貌类型: 根据研究区地貌类型的分布统计、并做调整, 确定地貌类型单因子评价赋值指标。

(3) 坡度: 根据统计结果, 滑坡主要发生在 30°以上斜坡, <30°基本没有滑坡发生, 45°~55°斜坡由于坡度较陡, 覆盖层也较厚, 滑坡数量最多, >55°斜坡, 因覆盖层厚度较薄, 滑坡数量减少。本文以 10°为间隔将坡度划分为[0°, 15°]、(15°, 25°]、(25°, 35°]和>35°。

(4) 工程地质岩组: 根据研究区工程地质岩组的分布统计、并做调整, 确定各工程地质岩组单因子评价赋值指标。

(5) 风化层厚度: 昭平县地质灾害发育数量主要集中分布在风化层厚度 1~3 m 区域, 部分风化土层厚度>5m, 在此区域内各种地质灾害的发育比较集中, 密度最大。

(6) 地质构造: 每个区域都有构造带, 在构造带两边的岩石相比于其他岩石更容易破碎。首先确定每个区域内的构造线, 在其两侧设置四个缓冲区, 间距分别设置为≤1 km、1~3 km、3~5 km、>5 km。

(7) 人类工程活动: 主要考虑区内人类进行削坡建房等工程活动的分布密度作为参考来衡量人类工程活动的强弱。

(8) 多年的平均降雨量: 降雨量越多的地区往往越容易造成滑坡等各类地质灾害的发生。本文通过对昭平县多年降雨量的统计结果, 将多年的平均降雨量作为参考来对降雨量因子进行评价和赋权。

最终量化结果如表 1 所示。

2 基于投影寻踪博弈论-云模型的风险评价模型

2.1 加速遗传投影寻踪模型

投影寻踪法的基本原理是将高维的样本数据投影到低维(1~3 维)子空间上, 然后利用计算机相关技术在低维空间中进行分析, 以描述高维空间样本数据的整体特征。需要通过不断地投影指标进行优化, 最终获得最佳投影方向。根据以上原理, 具体步骤如下:

(1) 建立评价样本集合, 并进行归一化处理。

(2) 构造投影指标函数 $Q(a)$ 。投影寻踪模型的思想是把 P 维数据 $\{x^*(i, j) | i=1, 2, 3, \dots, n; j=1, 2, 3, \dots, p\}$ 通过向低维空间投影, 形成以 $a = \{a(1), a(2), \dots, a(p)\}$ 的一维投影值 $Z(i)$ 。

$$Z(i) = \sum_{j=1}^p a(j)X(i, j) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: a 为单位长度向量。

投影值 $Z(i)$ 在整体范围内分布应尽量分散, 但是在局部范围内要尽可能的密集。 $Q(a)$ 用下式表达:

$$Q(a) = S_z D_z \quad (2)$$

式中: S_z 为投影值的标准差, D_z 为局部密度, 计算公式如下:

$$S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z(i) - E_z)^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n ((R - r(i, j)) \times u(R - r(i, j))) \quad (4)$$

式中: E_z 为所有投影值的平均值, R 表示局部密度窗口半径, 一般可取 $0.1S_z$, $r(i, j)$ 表示样本之间的距离, 其中 $u(t)$ 为单位阶跃函数。

(3) 优化投影指标函数。对于确定的指标集, 投影指标函数 $Q(a)$ 随着投影方向 a 的变化而产生变化, 所以最佳投影方向能有效地反映高维数据的特点, 估计其最佳投影方向就是求解投影指数函数最大化问题。

最大化目标函数:

$$\max Q(a) = S_z D_z \quad (5)$$

约束条件:

$$s. t. \sum_{j=1}^p a^2(j) = 1 \quad (6)$$

(4) 求得最佳的投影方向向量 a^* , 对其进行归一化则可得到各指标权重向量 ω 。

表 1 评价因子量化赋值

指标层	评价因素赋值			
	不易发 (1 分)	低易发 (2 分)	中易发 (3 分)	高易发 (4 分)
地质灾害发育密度 $C_1/(处/km^2)$	极低密度 <0.01	低密度 0.01 ~ 0.05	中密度 0.05 ~ 0.1	高密度 >0.1
地貌类型 C_2	中山、洪积岗丘坡地以及河流阶地	中低山地貌、峰丛洼地谷地	低山	丘陵垄丘谷地、峰林谷地以及孤峰平原
地形坡度 $C_3/(^\circ)$	<15	15 ~ 25	25 ~ 35	>35
工程地质岩组 C_4	粘性土、砂砾石双层结构土体, 岩土、粘土夹砾石、粉质粘土单层土体, 块状坚硬花岗岩组	中厚层状坚硬较坚硬石英砂岩、石英细砂岩、细砂岩夹较软—软粉砂岩、泥岩岩组, 中厚层较软—软页岩、泥岩岩组岩组	厚层状坚硬—软细砂岩、粉砂岩、泥(页)岩夹多层坚硬硅质岩岩组	中厚层状强—弱岩溶化坚硬碳酸盐岩, 厚层状坚硬—较坚硬杂砂岩、砂岩夹较软页岩、粉砂岩岩组
风化土层厚度 C_5/m	≤ 1	1 ~ 3	3 ~ 5	>5
地质构造距离 C_6/km	>5	3 ~ 5	1 ~ 3	≤ 1
人类工程活动 C_7	弱	较弱	中等	强烈
多年平均降雨量 C_8/mm	1 400 ~ 1 600	1 600 ~ 1 800	1 800 ~ 2 000	> 2 000

在投影寻踪模型中, 求解最佳投影方向本质的目的就是投影指标函数进行最大化寻优, 为了加快投影寻踪模型中对投影目标函数最大化寻优速度, 利用加速遗传算法(RAGA)来对其进行优化。具体步骤如下:

(1) 优化变量的实数编码。根据以下公式进行线性变换。

$$x(j) = a(j) + y(j)(b(j) - a(j)), j = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

n 为优化变量的数目。通过上式将在区间 $[a(j), b(j)]$ 上的第 j 个待优化变量 $x(j)$ 对应到 $[0, 1]$ 区间上其在区间上对应值为实数 $y(j)$, 则定义 $y(j)$ 为 RAGA 中的遗传基因。

(2) 定义初始父代的群体。首先设置父代的种群数量为 N 。可获得每组 n 个的 N 组在 $[0, 1]$ 区间上的随机数, 将其定义为初始群体的父代个体值 $y(i, j)$ 。对其按步骤(1)进行线性变换后带入目标方程可得到目标函数值 $\{Q(i) | (i = 1, 2, \dots, n)\}$, 根据函数值进行排序, 得到最优个体, 将其值带入下一代。

(3) 建立适应度评价函数。建立基于序的评价函数。用适应度评价函数对种群中每个染色体的概率进行设定, 以保证染色体选择的可能性与其适应度成正比。

(4) 进行选择操作。通过旋转赌轮 N 次, 在每次旋转中选择一组新的染色体, 可得到 N 个复制的染色体, 由此产生下一代群体。

(5) 将得到的新种群进行交叉操作, 概率为 P_c 。再将种群中将 $P_c N$ 个染色体进行交叉操作。

(6) 对产生的新种群在进行变异操作, 将变异的概率设置为 P_m 。随后产生新一代的种群。

(7) 演化迭代。按照适应度的大小对产生的子代个体进行排序。并选择优秀子代作为新的父代重复以上步骤。

(8) 加速处理。在运行过程中, 通过不断把产生优秀个体的区间作为下一代优化变量的迭代区间来实现对算法的加速运行。通过不断调整, 结果会离最优点越来越远。最终可获得最佳投影方向 a^* 。

利用加速遗传算法来优化求解投影寻踪模型可以减少算法时间, 提高运算速度。

2.2 基于博弈论的组合赋权

层次分析法通过专家打分, 指标比较进行赋权, 其结合了专家经验, 对于影响滑坡各要素刻画了大致的权重分配, 但其主观色彩较强, 评价权重不够客观。改进 CRITIC 法可以通过计算指标间的相关性和冲突性来确定各指标所占权重, 是一种客观赋权的方法。灰色关联分析可以判断各因素之间的关联度, 从而修正客观指标权重。投影寻踪法可以将高维特征投影到低维特征, 得到的最佳投影方向即为各指标权重向量, 在稳健性、抗干扰性和准确性方面都优于一般的传统模型。

所以将层次权重、改进 CRITIC 法权重、灰色关联分析权重以及遗传加速投影寻踪法权重进行组合计算, 将主客观权重结合, 弥补滑坡风险等级评价中主客观评价不均的问题。

博弈论(game theory, GT)主要为了各个决策主体能够实现相对平衡。基本思想是让最终得到的权重分配与各方法得到的权重之间的偏差最小。让多种方法所得权重分配更加合理。基于层次权重、改进 CRITIC 法权重、灰色关联分析权重以及遗传加速投影寻踪法权重进行组合计算, 采用博弈论对 4 种方法进行权重分配, 具体步骤如下。

(1) 构造基础向量集 ω_k 。假设有 L 种赋权方法对 n 个评价赋权, 则构造的向量集为:

$$\omega_k = [\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{kn}] (k = 1, 2, \dots, L). \quad (8)$$

则 L 个向量可任意线性组合为:

$$\omega = \sum_{k=1}^L \beta_k \omega_k^T. \quad (9)$$

式中: β_k 为权重系数且规定 $\beta_k > 0$ 。

(2) 优化线性组合系数 β 。使得博弈论组合赋权结果向量与各方法赋权结果向量离差最小, 最优权重系数依据下式求解:

$$\min \|\sum_{k=1}^L \beta_k \omega_k^T - \omega_g\|, k = 1, 2, \dots, L. \quad (10)$$

式中: ω_g 为博弈论组合赋权结果。

(3) 求解后得到最优组合系数 $\beta^* = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)$, 对其进行归一化处理得到 β_k^* 。最终得到博弈论组合赋权结果, 即最优组合权重 W :

$$W = \sum_{k=1}^L \beta_k^* \omega_k^T. \quad (11)$$

表 2 层次分析法各指标权重

准则层指标	准则层权重	指标层	指标层权重	综合权重
发育因子 B_1	0.152	地质灾害发育密度 $C_1/(处/km^2)$	1	0.152
		地貌类型 C_2	0.248	0.156
		地形坡度 $C_3/(^\circ)$	0.248	0.156
基础因子 B_2	0.630	工程地质岩组 C_4	0.147	0.093
		风化土层厚度 C_5/m	0.241	0.152
		地质构造距离 C_6/km	0.116	0.073
		人类工程活动 C_7	0.667	0.145
诱发因子 B_3	0.218	多年平均降雨量 C_8/mm	0.333	0.073

3 滑坡灾害风险评价模型应用

3.1 评价指标权重确定

3.1.1 层次分析法权重确定

运用 1~9 标度法来表示各因素之间的重要程度。以专家的意见作为参考,两两比较各层中各个指标的相对重要性,生成判断矩阵。计算判断矩阵的最大特征值及其相对应的特征向量。然后将计算所得到的特征向量即所得权重进行层次单排序,即可得到权重的占比情况。同时还要检验生成的判断矩阵是否满足一致性。结果如表 2 所示。

3.1.2 改进 CRITIC 法和灰色关联确定权重

随机选取 10 个滑坡点,对其数据进行量化后生成评价矩阵(表 3)。然后按照步骤求取其各评价指标的权重。

表 3 滑坡点数据

滑坡点	指标层							
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
1 号	3	4	1	2	3	4	4	3
2 号	3	3	2	4	2	4	3	3
3 号	4	2	3	2	2	4	4	3
4 号	2	3	3	3	2	4	3	3
5 号	2	2	3	4	2	4	3	3
6 号	4	3	3	2	2	4	4	1
7 号	3	3	3	4	2	3	4	2
8 号	3	2	4	2	2	3	3	2
9 号	3	4	3	4	3	4	4	2
10 号	4	4	3	4	3	2	3	1

表 4 各指标组合权重分配

目标层	准则层	指标层	层次权重	改进 CRITIC	灰色关联权重	投影寻踪模型	博弈论组合权重
易发分区 A	发育因子 B_1	地质灾害发育密度 C_1	0.152	0.102	0.124	0.102	0.115
		地貌类型 C_2	0.156	0.113	0.127	0.173	0.151
		地形坡度 C_3	0.156	0.068	0.122	0.036	0.077
	基础因子 B_2	工程地质岩组 C_4	0.093	0.159	0.132	0.113	0.121
		风化层厚度 C_5	0.152	0.235	0.122	0.228	0.199
		地质构造 C_6	0.073	0.064	0.119	0.084	0.083
		人类活动 C_7	0.145	0.168	0.118	0.185	0.164
	诱发因子 B_3	多年平均降雨量 C_8	0.073	0.092	0.135	0.080	0.089

3.1.3 加速遗传投影寻踪模型权重

设置种群规模 $N=400$,交叉概率 $p_c=0.8$,变异概率 $p_m=0.2$ 优化变量数目 $n=8$,变异方向所需随机数 $M=10$,加速次数为 20,获得的结果如下,最佳投影方向为:

$$a^* = (0.102, 0.173, 0.036, 0.113, 0.228, 0.084, 0.185, 0.080)。(12)$$

3.1.4 博弈论组合权重确定

基于上述 4 种赋权方法所得权重,依据博弈论取 $L=4$ 求得最优组合系数 $\beta^* = (0.264, 0.276, 0.219, 0.686)$ 。所得最终权重如表 4 所示。

3.2 云模型等级评价集确定

将风险值划分为四个区间,高易发区(I级)值为 $(3.0, 4.0]$,中易发区(II级)风险值为 $(2.0, 3.0]$,低易发区(III级)风险值为 $(1.2, 2.0]$,不易发区(IV级)风险值 $(0.0, 1.2]$,标准云模型数字特征。其中:

$$\bar{Ex} = \frac{C_j^{\min} + C_j^{\max}}{2};(13)$$

$$\bar{En} = \frac{C_j^{\max} - C_j^{\min}}{2\sqrt{2\ln 2}};(14)$$

$$\bar{He} = K。(15)$$

式中:第 j 个区间的上边界值用 C_j^{\max} 来表示,第 j 个区间的下边界值 C_j^{\min} 用来表示; K 为通常为常数,本文取 0.05。通过公式计算就可以得到对应各区间的标准云特征(表 5)。

表 5 滑坡风险级别划定及云数字标准特征

风险级别	取值区间	数字特征	说明
I	(3.0, 4.0]	(3.5, 0.425, 0.05)	高易发区
II	(2.0, 3.0]	(2.5, 0.425, 0.05)	中易发区
III	(1.2, 2.0]	(1.6, 0.340, 0.05)	低易发区
IV	(0.0, 1.2]	(0.6, 0.510, 0.05)	不易发区

根据标准云模型数字化特征，通过一维正向云发生器，生成风险等级标准云图(图 2)所示。图 2 中红黄蓝绿正态云分别对应 I、II、III、IV 级风险。

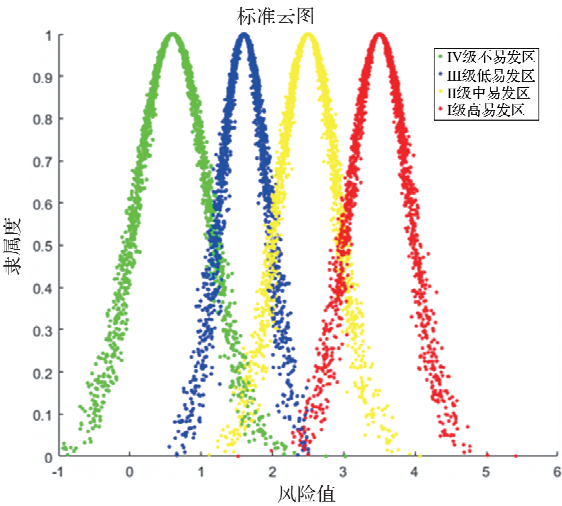


图 2 风险等级标准云图

3.3 贴近度

由于不同的评价对象评价结果比较相近，简单通过所得到的综合云图无法精确的判断处具体属于哪个风险等级，所以利用贴近度指标来进行评判。贴近度是用来判断云图间贴近程度的大小，通过贴近度可以更准确判断评价对象所属的风险等级，贴近度越大则越靠近所对应标准等级，计算公式如下所示：

$$T = \frac{1}{|Ex - Ex|} \quad (16)$$

式中：T 为综合云等级的贴近度。

3.4 滑坡风险等级评价

分别选取 A 区(昭平镇附近)、B 区(北陀镇附近)和 C 区(黄姚镇附近)进行滑坡风险等级评价。

3.4.1 A 区滑坡风险综合云

A 区属于中山地貌、中低山地。地质灾害发育密度 0.121 6 处/km²。中山地貌：海拔一般在 800 ~ 1 200 m，山坡度一般在 30° ~ 45°，植被较发育；工程地质岩组类型是属中厚层状坚硬 - 较坚硬石英砂岩、石英细砂岩、细砂岩夹较软 - 软粉砂岩，地层岩性由粘土、粉质砂土、砂、卵砾石等，厚度大，结构松散；残坡积层厚度一般 1 ~ 3 m；地质构造发育，高龄 - 桂华向斜、大垌 - 夏思倒转向斜及大王岭 - 石柱顶背斜从该区域北面通过，受其构造影响区域内岩体风化强烈，覆盖厚度变化较大。该滑坡所处的地区雨量充沛，年降雨量达 1 900 mm。人口居住相对密集，居民切坡建房和削坡修建道路活动较多，人类工程活动中等 - 强烈。在区域内随机选取 10 个点，根据量化标准对数据进行处理生成原始数据(表 6)。

表 6 A 区滑坡数据

取样地	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
1 号	4	4	2	3	2	3	3	3
2 号	4	4	2	4	2	4	4	3
3 号	4	4	2	3	2	3	3	3
4 号	4	2	2	4	4	4	4	3
5 号	4	4	2	3	2	4	4	3
6 号	4	4	3	4	4	3	4	2
7 号	4	4	2	4	2	4	3	3
8 号	4	4	3	4	2	3	4	3
9 号	4	4	3	4	2	4	3	3
10 号	2	3	4	4	4	4	2	2

根据云模型的公式，计算出指标层各因素的云数字特征，并对所得指标云的特征数字矩阵和指标权重矩阵合成运算操作，最终获得综合云数字特征，从而生成滑坡风险等级综合云，A 区的综合云云数字特征如表 7 所示，A 区的综合评价云图如图 3 所示。

表 7 A 区综合云云数字特征

目标层	综合云数字特征	指标层	组合权重	指标层云数字特征
易发分区 A	(3.262, 0.684, 0.308)	C ₁	0.115	(3.8, 0.451, 0.443)
		C ₂	0.151	(3.7, 0.602, 0.306)
		C ₃	0.077	(2.5, 0.752, 0.256)
		C ₄	0.121	(3.7, 0.526, 0.209)
		C ₅	0.199	(2.6, 1.053, 0.418)
		C ₆	0.083	(3.6, 0.602, 0.309)
		C ₇	0.164	(3.4, 0.752, 0.277)
		C ₈	0.089	(2.8, 0.401, 0.130)

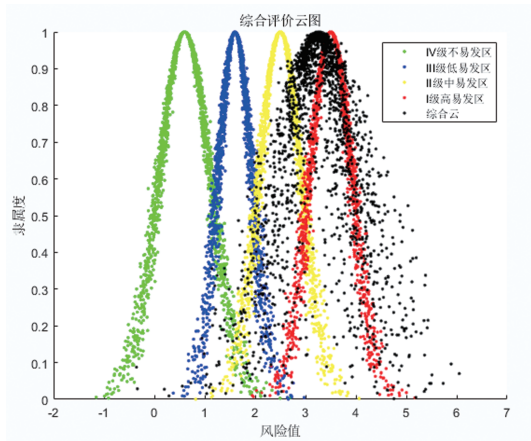


图3 A区综合评价云图

3.4.2 B区滑坡风险综合云

B区属于中低山地貌、低山地貌。中低山地貌: 主要分布于区域内东北面和西北面, 海拔一般在750~850 m, 山脉基本平行构造线, 山脊狭窄, 山坡角度 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 植被发育。低山地貌: 分布区域内西南面和中部, 海拔500~700 m, 山脉基本平行构造线, 山坡角度 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 地表水多呈树枝状分布。

中厚层状坚硬和较坚硬石英砂岩、石英细砂岩、细砂岩夹较软-软粉砂岩, 还包括泥岩岩组和厚层状坚硬-较坚硬杂砂岩、砂岩夹较软页岩、粉砂岩岩组; 全风化层及残坡层厚度之和在1.0~3.0 m间, 残坡积层厚度在0.3~3.0 m, 岩性属于粘土、含碎石粘土, 结构松散, 透水性差。年降雨量为600~1 800 mm。

地质构造发育, 发育褶皱为大坪村复式向斜、大王岭-石柱顶背斜、大堡复式背斜; 断裂发育: 沙子街张扭性断裂、午龙村-沙子街压扭性断裂、上冲水路张扭性断裂。人口居住相对较分散, 人类工程活动弱-中等, 主要为居民削坡建房、乡村公路建设等。

在区域内随机选取10个点, 根据量化标准对数据进行处理生成原始数据如表8所示。

表9 B区综合云云数字特征

目标层	综合云数字特征	指标层	组合权重	指标层云数字特征
易发分区 B	(2.320, 0.675, 0.285)	C_1	0.115	(2.0, 0.501, 0.439)
		C_2	0.151	(2.6, 0.852, 0.123)
		C_3	0.077	(3.5, 0.627, 0.339)
		C_4	0.121	(2.5, 1.128, 0.325)
		C_5	0.199	(2.1, 0.226, 0.222)
		C_6	0.083	(3.4, 0.602, 0.309)
		C_7	0.164	(1.6, 1.053, 0.418)
		C_8	0.089	(1.8, 0.401, 0.130)

表8 B区滑坡数据

取样地	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
1号	2	1	4	4	2	3	1	2
2号	2	3	3	2	2	4	1	2
3号	2	3	4	2	2	3	1	2
4号	1	2	3	2	2	3	3	2
5号	2	3	4	4	2	4	1	2
6号	3	4	3	2	3	3	1	1
7号	2	2	3	2	2	3	1	2
8号	1	3	4	1	2	3	3	2
9号	2	3	3	2	2	4	1	2
10号	3	2	4	4	2	4	3	1

根据云模型的公式, 计算得到综合云数字特征, 生成滑坡风险等级综合云。B区的综合云数字特征如表9所示, B区的综合评价云图如图4所示。

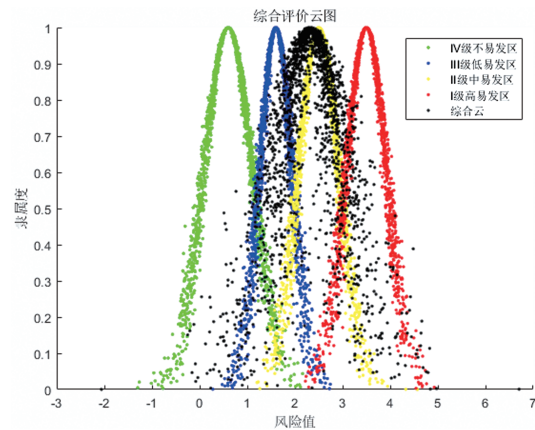


图4 B区综合评价云图

3.4.3 C区滑坡风险综合云

C区属于中山地貌、中低山地貌、低山地貌。灾害发育密度 0.0112 处/ km^2 。海拔一般300~1 000 m, 切深一般400~800 m, 冲沟中多有水流发育, 整体呈现树枝状分布, 山体坡度 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$, 局部呈陡崖状, 山体植被发育。厚层状坚硬-较坚硬杂砂岩、砂岩夹较软页岩、粉砂岩, 厚层状较坚硬-软细砂岩、粉砂岩、泥(页)岩夹多层坚硬硅质岩岩组; 残坡积层厚度1~3 m, 岩性为粘土、含碎石粘土, 结构松散, 透水性一般。全风化层厚度一般1~2 m, 结构破碎。

大坪村复式向斜、王葵 - 石碑背斜、五马岭复式背斜、大堡复式背斜在区域内发育。年降雨量 <1 600 mm。

人口分布较为分散, 人类工程活动以居民自建房切坡为主, 人类活动强度弱~中等。

在区域内随机选取 10 个点, 根据量化标准对数据进行处理生成原始数据(表 10)。

表 10 C 区滑坡数据

取样地	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
1 号	1	2	3	2	2	4	1	2
2 号	1	3	1	1	2	3	1	1
3 号	1	2	3	2	2	3	3	2
4 号	2	1	1	1	1	3	1	2
5 号	1	2	1	2	2	3	1	2
6 号	2	3	4	2	3	4	1	1
7 号	1	2	1	2	2	3	1	2
8 号	1	2	4	1	2	4	1	2
9 号	2	2	1	2	2	3	1	1
10 号	3	3	3	2	3	4	3	1

根据云模型的公式, 计算后最终获得综合云数字特征, 生成滑坡风险等级综合云。C 区的综合云数字特征如表 11 所示, C 区的综合评价云图如图 5 所示。

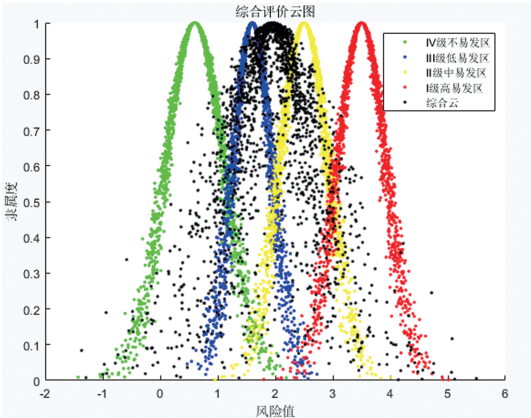


图 5 C 区综合评价云图

3.4.4 各区域滑坡风险等级评价

根据各区域综合评价云图, 计算其与评价等级中心值的贴适度(表 12)。

经计算可得知 A 区属于高易发区, B 区属于中易发区, C 区属于低易发区。与实际探测结果一致。

4 结论

(1)通过引入了加速遗传算法来优化求解投影寻踪模型可以减少算法时间, 提高运算速度更快的获得最优解。

(2)通过构建基于层次分析、改进 CRITIC、灰色关联、加速遗传投影寻踪, 利用博弈论进行组合赋权, 并与云模型相结合的多目标多层次评价体系, 并通过计算得到了滑坡风险易发性综合云图, 与标准云图进行对比, 确定了评价区域所属滑坡风险等级, 该评价结果与实际情况相符, 说明该方法合理可行。

(3)与传统地质灾害安全评价方法(如层次分析、模糊分析、灰色关联等)相比, 博弈论组合赋权与云模型相结合对滑坡风险易发性等级评价的方法, 一方面利用主客观赋权相结合, 解决了评价权重主客不均的问题; 另一方面针对地面塌陷随机模糊的特点, 利用云模型数字特征和云图评价, 一定程度上体现了滑坡风险随机模糊的特性。博弈论组合赋权 - 云模型的的评价模型在一定程度上对滑坡风险易发性等级评价的科学计算提供了有效帮助。

表 11 C 区综合云云数字特征

目标层	综合云数字特征	指标层	组合权重	指标层云数字特征
易发分区 C	(1.954, 0.682, 0.305)	C_1	0.115	(1.5, 0.752, 0.256)
		C_2	0.151	(2.2, 0.602, 0.195)
		C_3	0.077	(2.2, 1.504, 0.727)
		C_4	0.121	(1.7, 0.526, 0.209)
		C_5	0.199	(2.1, 0.451, 0.344)
		C_6	0.083	(3.4, 0.602, 0.309)
		C_7	0.164	(1.4, 0.802, 0.260)
		C_8	0.089	(1.6, 0.602, 0.309)

表 12 贴适度

滑坡区	E_x 值	E_x 与上侧标准中心值贴适度	E_x 与下侧标准中心值贴适度	风险等级分区
A	3.262	4.202	1.312	高易发区
B	2.320	5.556	1.389	中易发区
C	1.954	1.954	2.825	低易发区

参考文献:

- [1] 冯杭建, 周爱国, 俞剑君, 等. 浙西梅雨滑坡易发性评价模型对比[J]. 地球科学, 2016, 41(3): 403-415.
- [2] 胡瑞林, 范林峰, 王珊珊, 等. 滑坡风险评价的理论与方法研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 76-84.
- [3] LEE S, RYU J H, LEE M J, et al. Use of an artificial neural network for analysis of the susceptibility to landslides at Boun, Korea [J]. Environmental Geology, 2003, 44(7): 820-833.
- [4] VASU N N, LEE S R. A hybrid feature selection algorithm integrating an extreme learning machine for landslide susceptibility modeling of Mt. Woomyeon, South Korea [J]. Geomorphology, 2016, 263: 50-70.
- [5] AKGUN A. A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods; a case study at Zmir, Turkey [J]. Landslides, 2012, 9(1): 93-106.
- [6] DEVKOTA K C, REGMI A D, POURGHASEMI H R, et al. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling-Narayanghat Road section in Nepal Himalaya [J]. Natural Hazards, 2013, 65(1): 135-165.
- [7] REGMI A D, DEVKOTA K C, YOSHIDA K, et al. Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(2): 725-742.
- [8] 司鹄, 贾文梅. 城市公共安全风险评估指标敏感性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(11): 71-76.
- [9] 张立军, 张潇. 基于改进 CRITIC 法的加权聚类方法[J]. 统计与决策, 2015(22): 65-68.
- [10] 李守林, 赵瑞, 陈丽华. 基于灰色关联分析和 TOPSIS 的物流企业创新绩效评价[J]. 工业技术经济, 2018, 37(4): 12-21.
- [11] 苏屹, 于跃奇. 基于加速遗传算法投影寻踪模型的企业可持续发展能力评价研究[J]. 运筹与管理, 2018, 27(5): 130-139.
- [12] 金菊良, 张浩宇, 陈梦璐, 等. 基于灰色关联度和联系数耦合的农业旱灾脆弱性评价和诊断研究[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 1-7.
- [13] 李江龙, 樊燕燕, 李子奇. 基于熵权-云模型的城市群综合承灾度评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(7): 48-54.
- [14] 吴博, 赵法锁, 吴韶艳. 基于组合赋权-功效系数法的黄土边坡稳定性评价[J]. 灾害学, 2020, 35(2): 34-38.
- [15] 周子勇, 石浩宇, 董毓良, 等. 基于层次熵权-云模型城市道路塌陷风险评价研究[J]. 安全与环境学报: 1-11.
- [16] 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.
- [17] LIU Y, HU Y C, HU Y M, et al. Water quality characteristics and assessment of Yongding New River by improved comprehensive water quality identification index based on game theory [J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 104: 40-52.
- [18] 黄亚江, 李书全, 项思思. 基于 AHP-PSO 模糊组合赋权法的地铁火灾安全韧性评估[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 15-20, 40.
- [19] 张冰冰, 叶艳英, 金水凤, 等. 基于灰色关联度分析和 DTOPSIS 法的芦笋种质资源综合评价[J]. 河南农业科学, 2022, 51(5): 96-107.
- [20] 赵彬. 边坡稳定性评价的组合赋权博弈论云化物元模型[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(6): 60-67.
- [21] 程麒麟, 陈垚, 刘臻, 等. 基于随机森林-投影寻踪法的生物滞留系统多目标评价方法[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(4): 85-90, 96.

Landslide Risk Evaluation Based on Projection Pursuit Game Theory and Cloud Model

YANG Xiaoping^{1,2}, CHEN Fei^{1,2}, LI Zhehong^{1,2}, NI Ping^{1,2}, JIANG Li³, LIU Guanghui⁴

(1. Guilin University of Technology, Information Science and Engineering, Guilin 541004, China;
2. Guilin University of Technology, Guangxi Key Laboratory of Embedded Technology and Intelligent System, Guilin 541004, China; 3. Guangxi Zhuang Autonomous Region Geological Environment Monitoring Station, Nanning 530029, China; 4. Guilin Saipu Electronic Technology Limited Company, Guilin 541004, China)

Abstract: The influence factors of landslide risk include multi-attribute, multi-level and incapable of all quantification, this paper conducts an in-depth analysis of landslide susceptibility based on multi-source information fusion theory combined with actual landslide risk monitoring data. Firstly, the landslide risk susceptibility evaluation model is constructed according to the main influencing factors. Analytic hierarchy process and improved CRITIC method are used to analyze the weight of each index factor. Aiming at the problems of few influencing factors and small number of samples in regional landslides, grey relational analysis is introduced to optimize the weights of index factors. At the same time, the accelerated genetic projection pursuit model is used to find the best projection direction that can reflect the overall characteristics of high-dimensional sample data. Then, the four groups of weight values are combined and weighted through game theory. Finally, the weight results are combined with the cloud model to achieve a comprehensive evaluation of landslide risk susceptibility. Taking Zhaoping County as the research object, three risk areas are selected for evaluation, and the evaluation results are consistent with the actual situation, indicating that the model has theoretical rationality and engineering application feasibility. The model can provide a reference for the prevention and control of landslide disasters.

Keywords: landslide; risk assessment; projection pursuit; game theory; Cloud model