

以确定性系数法为基础的不同滑坡易发性评价模型对比分析

陈玉波, 徐世光, 陈梦瑞

Comparative analysis of landslide susceptibility evaluation models based on coefficient of determination method: A case study of Baoshan Basin, Yunnan Province

CHEN Yubo, XU Shiguang, and CHEN Mengrui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202306021>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于层次分析法的北京市地质环境质量综合评价

Comprehensive evaluation method of geological environment quality in Beijing based on AHP

郭学飞, 王志一, 焦润成, 曹颖 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 70-76

基于指标变权重复合云模型的岩质边坡稳定性评价初探

A preliminary study on evaluation of rock slope stability based on index variable weight compound cloud model

陈忠源, 戴自航 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 9-17

基于RBF神经网络信息量耦合模型的滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment by the coupling method of RBF neural network and information value: A case study in Min Xian, Gansu Province

黄立鑫, 郝君明, 李旺平, 周兆叶, 贾佩钱 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 116-126

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

Landslide susceptibility assessment based on K-means cluster information model in Wenchuan and two neighboring counties, China

周天伦, 曾超, 范晨, 毕鸿基, 龚恩慧, 刘晓 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 137-150

基于理想点-可拓云模型的隧道围岩稳定性评价

Stability evaluation of tunnel surrounding rock based on ideal point-extension cloud model

何乐平, 罗舒月, 胡启军, 蔡其杰, 李浴辉 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 126-134

基于不同评价单元和灾害熵的泥石流危险性分析

Hazard analysis of debris flows based on different evaluation units and disaster entropy: A case study in Wudu section of the Bailong river basin

李小龙, 宋国虎, 向灵芝, 罗亮, 唐良琴, 沈娜, 梁梦辉 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 107-115



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202306021

陈玉波, 徐世光, 陈梦瑞. 以确定性系数法为基础的不同滑坡易发性评价模型对比分析——以云南保山盆地为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(1): 119-130.

CHEN Yubo, XU Shiguang, CHEN Mengrui. Comparative analysis of landslide susceptibility evaluation models based on coefficient of determination method: A case study of Baoshan Basin, Yunnan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(1): 119-130.

以确定性系数法为基础的不同滑坡易发性 评价模型对比分析 ——以云南保山盆地为例

陈玉波¹, 徐世光^{1,2}, 陈梦瑞³

(1. 昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 云南昆明 650093; 2. 云南省地矿工程勘察集团有限公司, 云南昆明 650011; 3. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南昆明 650000)

摘要: 随着保山盆地城市化进程的不断推进, 当地地质条件逐渐恶化, 滑坡灾害频发, 为了提供切合实际的防治建议, 文章对研究区进行滑坡易发性评价。据区域地质背景、人类活动及灾害发育特征, 选取海拔、坡度、坡向、归一化植被覆盖度、工程地质岩组、距道路距离、距断层距离、距水系距离、灾害点密度共 9 个评价因子。建立确定性系数法模型 (CF)、确定性系数法与层次分析法耦合模型 (CF-AHP)、确定性系数法与熵指数法耦合模型 (CF-IOE) 及确定性系数法与距离函数法-组合权重耦合模型 (CF-AHP-IOE)。结果显示: CF、CF-AHP、CF-IOE、CF-AHP-IOE 模型滑坡易发性分级的灾害密度及频率比值显著增加, 均有效对研究区进行滑坡易发性评价; 4 种模型 AUC 值分别为 0.890、0.911、0.921、0.916, 耦合模型具有更高评价精度; 其中 CF-AHP-IOE 模型在极高易发区频率比值与灾害数量占比 90% 以上, 说明了主、客赋权更加合理。研究可为保山盆地城市化进程提供地质灾害防治建议。

关键词: 滑坡易发性评价; 确定性系数法; 层次分析法; 熵指数法; 距离函数-组合权重法

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2025)01-0119-12

Comparative analysis of landslide susceptibility evaluation models based on coefficient of determination method: A case study of Baoshan Basin, Yunnan Province

CHEN Yubo¹, XU Shiguang^{1,2}, CHEN Mengrui³

(1. School of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 2. Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources, Kunming, Yunnan 650011, China; 3. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650000, China)

Abstract: As urbanization continues to progress in the Baoshan Basin, geological conditions have deteriorated and leading to frequent landslide natural hazards. To provide prevention and control recommendations, landslide susceptibility assessment was

收稿日期: 2023-06-16; 修订日期: 2023-10-12

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

第一作者: 陈玉波 (1999—), 男, 贵州黔西南人, 安全工程专业, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害防治。E-mail: 860006049@qq.com

通讯作者: 徐世光 (1963—), 男, 云南昆明人, 地质工程专业, 博士, 博士生导师, 教授级高级工程师, 研究方向为地质灾害防治、水文地质与工程地质等。E-mail: xushiguang828@sina.com

carried out in the study area. Nine evaluation factors, including elevation, slope, slope direction, normalized vegetation cover (NDVI), engineering geological rock group, distance from roads, distance from faults, distance from water systems, and density of disaster sites, were selected based on the regional geological background, human activities and disaster development characteristics. Four models were established: deterministic coefficient method (CF), the coupled model of deterministic coefficient method and hierarchical analysis method (CF-AHP), the coupled model of deterministic coefficient method and index of entropy method (CF-IOE), and the coupled model of deterministic coefficient method and distance function-combined weights method (CF-AHP-IOE). The results show that the hazard density and frequency ratios of CF, CF-AHP, CF-IOE, and CF-AHP-IOE models landslide susceptibility grading have significantly increased, effectively assessing the landslide susceptibility in the study area. The AUC values of the three models were 0.890, 0.911, 0.921, and 0.916, respectively, indicating higher evaluation accuracy for the coupled models. Among them, the CF-AHP-IOE model has a ratio of disaster frequency and disaster quantity exceeding 90% in the extremely high susceptibility zone, demonstrating a more reasonable weighting approach. The study can provide preemptive recommendations for the urbanization process in the Baoshan Basin.

Keywords: geological hazard susceptibility assessment; deterministic coefficient method; hierarchical analysis method; entropy index method; distance function-combination weighting method

0 引言

我国西南部山区滑坡自然灾害频发,严重影响城市发展。滑坡是一种斜坡岩土体,沿地层间形成的软弱结构面滑移的现象,物理学性质表现为抗滑力小于下滑力,具有瞬时性、强破坏性等特点。滑坡易发性分区可为滑坡防治工程提供指导建议及勘察方向。

滑坡易发性评价是预测滑坡灾害分布情况并提供防治建议的手段之一^[1]。滑坡分布主要受地质环境条件、气象条件、人类工程活动等因素的影响^[2]。目前,滑坡易发性评价研究方法主要有单一模型:层次分析法^[3]、信息量^[4-5]、频率比^[6]、确定性系数^[6-8]、熵指数法^[9-10]、组合赋权^[11]、证据权^[12]、逻辑回归^[6-7,9]、神经网络^[13]、随机森林^[14]、支持向量机^[15]等;耦合模型:单一模型间耦合^[6-7,9-11]。单一模型局限于机械的叠加评价因子,未考虑评价因子的权重差异及滑坡发育的实际条件,而耦合模型则使评价因子以线性关系描述滑坡灾害与孕灾因子间联系。其中确定性系数法属于概率函数模型,可反映滑坡点与孕灾因子的敏感性,定量描述评价单元易发程度,但确定性系数法缺乏考虑评价因子间内在联系及不同孕灾因子对滑坡发育的重要性^[7],而层次分析法与熵值法分别从经验认知与数据客观规律上描述评价因子间的内在联系,并根据滑坡点与评价因子的关系确定评价因子权重,由于层次分析法与熵指数法权重计算的两极化(过度经验化、过度遵循数据规律),对此引入距离函数法,它使得同一个评价因子不同权重归于一个中立权重值,即解决权重值两极化问题,又保证前人研究对滑坡经验认识,且不失客观规律。

因此,本文以确定性系数法为基础,构建了确定性系数法(certainty factor, CF)、确定性系数法与层次分析法(certainty factor-analytic hierarchy process, CF-AHP)、确定性系数法与熵指数法(certainty factor-index of entropy, CF-IOE)及确定性系数法与距离函数法-组合权重(CF-AHP-IOE)的不同滑坡易发性评价模型,并对 4 种滑坡易发性评价模型结果进行对比分析。论证了耦合模型可解决单一模型数据量少与精度较低的问题,CF-AHP-IOE 模型从主、客观角度优化评价指标因子权重值,提高模型评价精度。评价结果为保山盆地周边滑坡灾害的防灾减灾提供参考,研究成果可用于其他滑坡易发性分区中。

1 研究方法

1.1 CF

确定性系数法^[6-8,14]是一种条件概率函数,假设将来与过去发生滑坡灾害的条件相同,表达式为:

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_s(1 - PP_a)} & PP_a < PP_s \\ \frac{PP_a - PP_s}{PP_a(1 - PP_s)} & PP_a \geq PP_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: PP_a ——滑坡灾害评价因子 a 类分级发生的条件概率,即 a 类分级滑坡数量与 a 类分级面积之比;

PP_s ——滑坡灾害在整个研究区中发生的先验概率,即研究区域滑坡总数与总面积之比;

CF ——确定系数值,范围在 $[-1, 1]$ 内,表征评价因子对滑坡发生的确定性系数,正值代表滑

坡发生的确定性大,负值代表滑坡发生的确定性小,0代表不能确定对滑坡发育影响状态。

1.2 CF-AHP

AHP^[3]是一种多目标决策问题的方法。将目标层次化,按因素的相关性构建与目标层的有序递进层次结构,核心在于判断各层因素与上层隶属关系。据经验法与前人成果,对因素进行两两比较并标度赋值,构建判断矩阵并检验其一致性。

以式(1)计算的评价因子确定性系数值为基础,采用层次分析计算评价因子权重值,并加权赋值计算单元栅格总确定性系数值($CF_{\text{总}}$),即滑坡易发性程度,表达式为:

$$CF_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n CF_{ij}(CF_{ij}, W_{i\text{-AHP}}) \quad (2)$$

式中: $W_{i\text{-AHP}}$ ——第 i 个评价指标因子权重;

$CF_{ij}(CF_{ij}, W_{i\text{-AHP}})$ ——第 i 个评价因子中 j 类分级的加权确定性系数值。

1.3 CF-IOE

IOE^[9-10]模型属于客观权重方法之一,熵代表系统的不确定性,滑坡评价指标因子的能量熵反映各类影响因素对滑坡的重要性,即可依据频率比值估算评价指标因子权重值,具有样本数据要求少,客观性强等优势。其计算步骤如下:

$$F_{ij} = \frac{Z}{S} \quad (3)$$

$$(F_{ij}) = F_{ij} / \sum_{j=1}^N F_{ij}, \quad j = 1, \dots, N \quad (4)$$

$$H_i = - \sum_{j=1}^N (F_{ij}) \log_2 (F_{ij}) \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$H_{i\text{max}} = \log_2 N \quad (6)$$

$$P_i = (H_{i\text{max}} - H_i) / H_{i\text{max}} \quad (7)$$

$$F_i = \sum_{j=1}^N F_{ij} / N \quad (8)$$

$$W_i = P_i \cdot F_i \quad (9)$$

$$W_{i\text{-IOE}} = W_i / \sum_i W_i \quad (10)$$

式中: F_{ij} ——各评价因子分级的频率比值;

S, Z ——对应分级的面积百分比、滑坡灾害百分比;

(F_{ij}) ——概率密度;

$H_i, H_{i\text{max}}$ ——熵值;

N ——评价指标因子分级数;

n ——评价指标因子个数;

P_i ——评价因子信息率;

W_i ——评价因子权重。

将 W_i 进行归一化,得到 $W_{i\text{-IOE}}$,即评价指标因子权重系数。

1.4 CF-AHP-IOE

由于 AHP 主观性强,精度受专家经验影响较大,因此引入 IOE,计算客观权重值。采用距离函数法^[11],以主、客观权重求组合权重值($W_{i\text{-AHP-IOE}}$),旨在既考虑研究人员对滑坡发育认识,又不失客观规律。计算步骤如下:

假设 $W_{i\text{-AHP-IOE}}$ 为其组合权重值,是其 W_1, W_2 为主、客观权重值线性相加,式子如下:

$$W_{i\text{-AHP-IOE}} = \alpha W_1 + \beta W_2 \quad (11)$$

式中: $W_{i\text{-AHP-IOE}}$ ——组合权重值;

W_1, W_2 ——主、客观权重值,分别为 $W_{i\text{-AHP}}$ 与 $W_{i\text{-IOE}}$ 。

由于层次分析法与熵指数法计算的权重值具有一定差异性,为消除这种差异性,提高模型评价精度,由此引入距离函数 $d(W_1, W_2)$,其表达式为:

$$d(W_1, W_2) = \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (W_1 - W_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

为使评价因子主、客观权重值的差异性与分配系数保持一致,对距离函数与分配系数取等,其计算方式如下:

$$d(W_1, W_2)^2 = (\alpha - \beta)^2 \quad (13)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (14)$$

式中: α, β ——主、客观分配系数,其和等于 1 是分配系数约束条件;

1.5 受试者工作特征曲线(ROC)

滑坡易发性评价精度检验通常使用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)的 AUC(area under curve)值度量^[7, 16]。ROC 曲线是一种检测自变量对因变量是否敏感,滑坡易发性值为检验自变量,滑坡是否发生为二分类因变量。本文以面积比法作为 ROC 曲线绘制方法,曲线横坐标为 1-特异性(假正率),即易发性分区面积由极高到低易发区的百分比

累加;纵坐标为敏感度(真正例率),即相应易发区面积的实际滑坡栅格面积百分比累加。ROC 曲线下方面积为模型评价精度,即 AUC 值,大于 0.7 模型具有较高评价精度,越接近 1 滑坡易发分区越准确。

2 实例分析

2.1 研究区概况

研究区地处云南省西部,保山市东北部。总面积约 765 km²,保山盆地面积约 213 km²,占比 28%,地势西北高、东南低。研究区地质构造复杂,断裂纵横交错,褶皱多数形态不完整,发育呈“歹”字型断裂带,主要有卧佛寺断裂、清水沟断裂、李家寺断裂等。出露较多的为第四系(Q)黏土、含砾石黏土、砂砾石层、黏土夹泥炭多层土体;三叠系(T)黏土、灰岩、玄武岩、白云岩;二叠系(P)灰岩、白云质灰岩;石炭系(C)页岩夹泥质灰岩、玄武岩;泥盆系(D)泥质灰岩及灰质泥岩;志留系(S)页岩、粉砂岩及泥质灰岩;奥陶系(O)页岩、粉砂岩、泥岩;寒武系(C)灰岩、砂岩、白云岩、泥质灰岩等地层。受人类工程活动、地质条件等影响该地区的滑坡灾害发育,据野外调查与遥感解译研究分析得出滑坡 99 个。研究区地理位置及滑坡灾害分布,如图 1—2 所示。

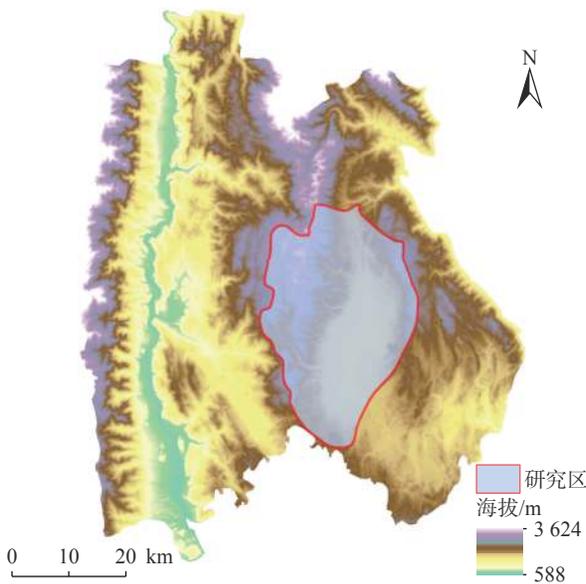


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographic location of the study area

2.2 基于 AHP 与 ROC 曲线的评价指标体系构建

通过分析区域地质环境及灾害发育特征,选取海拔、坡度、坡向、归一化植被覆盖度(normalized vegetation index, NDVI)、工程地质岩组、距道路距离、距断层距离、距水系距离、灾害点密度,共计 9 个评价

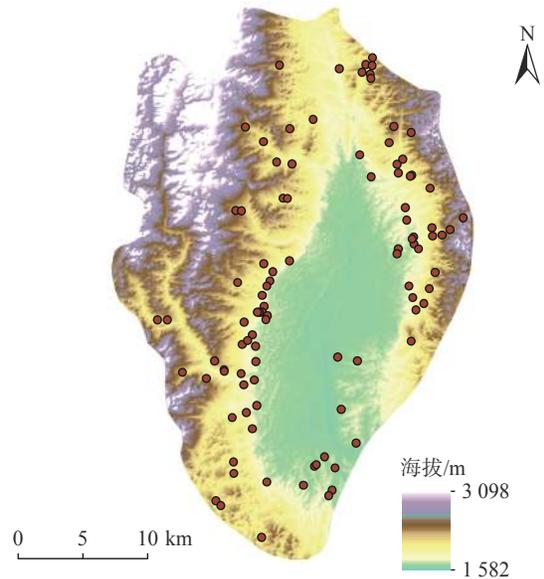


图 2 研究区滑坡灾害分布

Fig. 2 Distribution of landslide hazards in the study area

因子,对研究区进行滑坡易发性评价。

为保证确定性系数法模型评价精度,对评价指标因子进行相互独立性检验。利用 ArcGIS 波段统计工具计算评价指标因子的相关性系数矩阵(表 1)。结果表明:海拔与坡度、NDVI、道路,坡度与 NDVI、水系呈现低度相关(0.3<相关系数值<0.5),可能对模型评价精度产生影响。

为确保模型评价精度,据层次分析法计算评价因子权重顺序,如:灾害点密度>工程地质岩组>坡度>断层>道路>水系>NDVI>坡向>海拔(表 2)。结合评价指标因子相关性及重要性(即:研究人员对滑坡发育的经验认识,得出的评价因子重要程度),依次剔除海拔、NDVI、水系,分别建立评价模型。结果表明:未剔除评价指标因子的 AUC 值 0.890,模型评价精度最高(表 3)。因此 9 个评价因子均可纳入模型的构建。

2.3 评价指标因子分析

评价指标因子分级是统计分析结果合理性的基础。海拔以自然断点法进行分级;坡度、坡向、归一化植被覆盖度(NDVI)以等距分级;离散型评价因子有工程地质岩组、距道路距离、距断层距离、距水系距离、灾害点密度,据滑坡发育特征及现场调查进行分级;工程地质岩组据岩体建造、岩性组合、岩体结构类型、岩石力学性质分级。

频率比法(frequency ratio, FR)^[6-7]是一种基于统计学的预测方法,FR 值表征各级评价指标因子对滑坡灾害发生的贡献度,FR>1 即有利于滑坡灾害的发生,值越

表 1 评价指标因子相关系数矩阵

Table 1 Matrix of correlation coefficients of evaluation indicator factors

评价因子	海拔	坡度	坡向	NDVI	工程地质岩组	道路	断层	水系	灾害点密度
海拔	1	0.471	-0.017	0.412	0.272	0.325	-0.100	-0.162	-0.132
坡度		1	-0.001	0.402	0.269	0.070	-0.188	-0.382	0.008
坡向			1	-0.088	0.127	-0.025	-0.042	0.062	0.020
NDVI				1	0.203	0.159	-0.150	-0.264	-0.018
工程地质岩组					1	-0.061	-0.259	-0.252	0.176
道路						1	0.030	0.162	-0.146
断层							1	0.227	-0.156
水系								1	-0.126
灾害点密度									1

表 2 评价因子判断矩阵及权重值

Table 2 Judgment matrix and weight values of evaluation factors

评价因子	海拔	坡度	坡向	归一化植被覆盖度	工程地质岩组	道路	断层	水系	灾害点密度	W_i
海拔	1	1/7	1/2	1/3	1/6	1/4	1/5	1/2	1/8	0.024
坡度		1	5	3	1/3	1	1	2	1/4	0.115
坡向			1	1	1/6	1/2	1/3	1/2	1/8	0.036
归一化植被覆盖度				1	1/5	1	1/2	1	1/6	0.052
工程地质岩组					1	4	2	3	1/3	0.202
道路						1	1/2	1	1/5	0.068
断层							1	2	1/4	0.106
水系								1	1/5	0.058
灾害点密度									1	0.339

表 3 不同模型 AUC 值

Table 3 AUC values of different models

剔除因子	未剔除	海拔	海拔、NDVI	海拔、NDVI、水系
AUC值	0.890	0.875	0.871	0.871

大贡献度越大。因此以 FR 值对各级评价指标因子进行分析(图 3—4)。

2.3.1 海拔

海拔高度不同,植被密度与人类活动存在较大差异,间接影响斜坡稳定及滑体物源分布情况,影响滑坡发育^[3]。研究区海拔在 1 582 ~ 3 098 m,其中 1 724 ~ 2 167 m 内 FR 值大于 1,易于滑坡的发生。

2.3.2 坡度

坡度反映了地形倾斜程度,大小决定表面径流量、坡面冲刷速率及体土层剩余下滑力,影响坡体稳定性^[7]。研究区最大坡度近 59°,以 8°为等距分级,大于 40°为一级,在坡度大于 8°的斜坡体 FR 值均大于 1,有利于滑坡发生。

2.3.3 坡向

坡向间接影响斜坡曝光度、风化程度、降雨强度及土壤湿度^[17]。研究区山脉南北展布,东、南、西南、西方向上, FR 值为 1.150、1.153、1.441、1.418,促进滑坡发育。

2.3.4 归一化植被覆盖度

归一化植被覆盖度^[7,18]范围在[0, 1],以 Landsat 8 遥感影像数据为基础,据像元二分模型计算 $NDVI$ 值:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (15)$$

式中: $NDVI$ ——归一化植被覆盖度;

NIR ——遥感影像中近红外波段;

R ——红光波段。

归一化植被覆盖度数值越大栅格单元植被覆盖度越高。因此以 0.2 为间隔分级,在 0.4 ~ 0.8 区间, FR 值为 1.526、1.510 为滑坡集中发生范围。

2.3.5 工程地质岩组

工程地质岩组^[17]为滑坡物源基础,受降雨、地壳运动及风化剥蚀等影响,控制滑坡类型及分布情况。将研究区岩土体分为松散土体、碎屑岩岩组、碳酸盐岩岩组、碳酸盐岩夹碎屑岩岩组、变质岩岩组、岩浆岩岩组共 6 类岩组。其中碳酸盐岩岩组、碳酸盐岩夹碎屑岩岩组、岩浆岩岩组岩性为页岩、泥质灰岩、灰岩夹粉砂岩、泥岩, FR 值均大于 1,对滑坡发育有利。

2.3.6 距道路距离

道路是人类活动强度的体现,道路修建过程中坡脚开挖、植被破坏,改变岩土体原有的环境条件,破坏斜

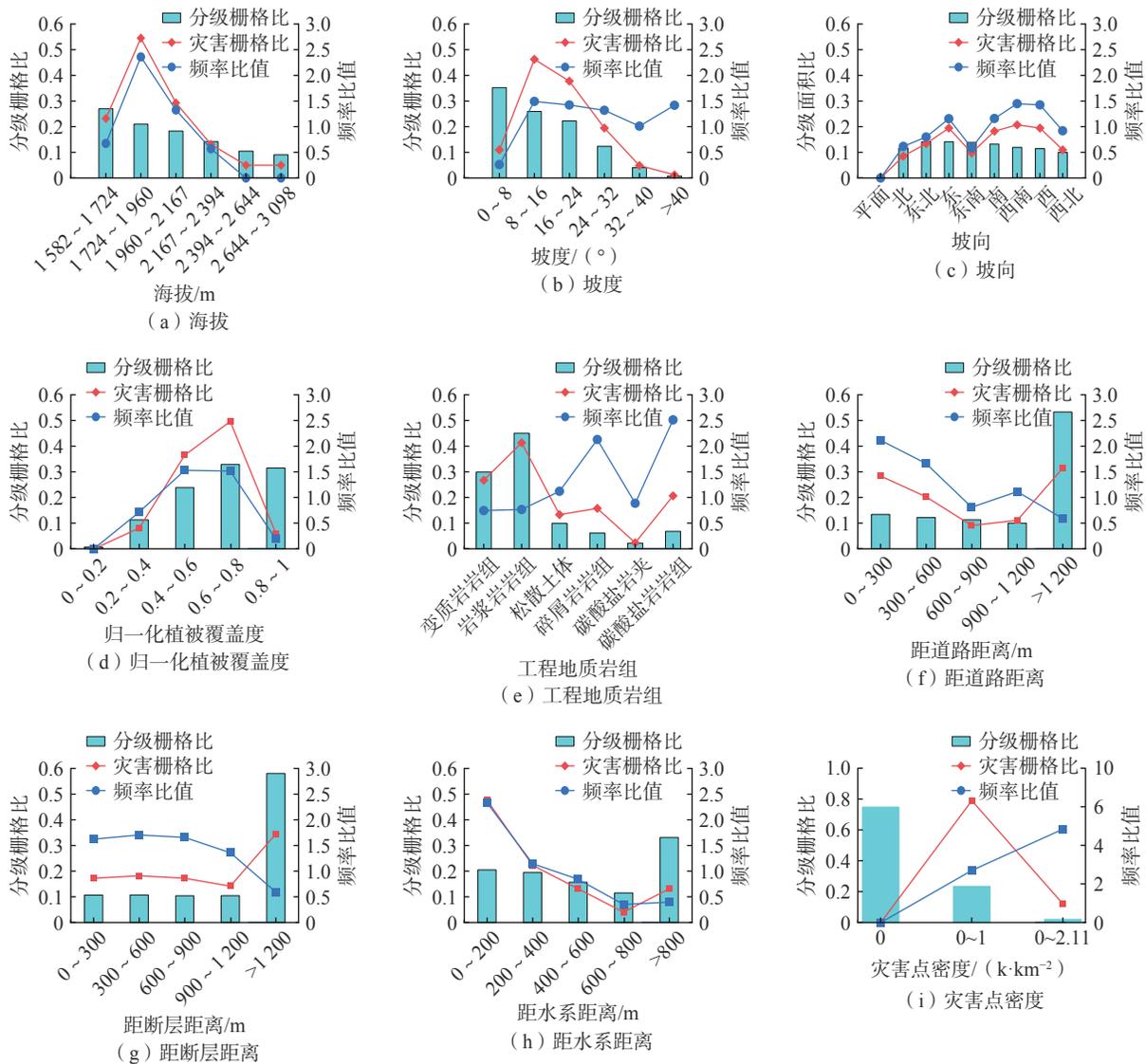


图 3 评价指标因子分级占比、灾害占比及频率比值趋势图

Fig. 3 Trend charts of graded proportion of evaluation indicator factors, disaster proportions and frequency ratios

坡体稳定性^[6,17]。以 300 m 为等距制作道路缓冲区, 在距道路 600 m 以内, FR 值为 2.109、1.655, 距道路越近坡体稳定性越差, 滑坡易形成。

2.3.7 距断层距离

断裂构造产生了岩石破碎带, 物理力学性质变差, 风化剥蚀加剧, 地层错位形成软弱带^[6,8,17]。以 300 m 为等距制作断层缓冲区, 在距道路 1 200 m 以内, FR 值均大于 1, 严重影响岩石物理力学性质, 距断裂带越近, 越促进滑坡形成。

2.3.8 距水系距离

水系反映了水对斜坡底部的侵蚀及软化作用, 易形成临空面, 破坏斜坡的稳定性^[19]。以水文分析法提取水系, 将水系以 200 m 等距制作缓冲区, 将研究区划分 5 级, 在距水系 400 m 以内, FR 值为 2.323、1.144, 越近

滑坡越发育。

2.3.9 灾害点密度

滑坡灾害点密度^[2,19-22]反映流域滑坡灾害发育情况, 表现为滑坡群发效应, 不同岩组、斜坡体结构及人类活动强度的不均匀分布, 导致流域内滑坡易发程度差异, 是灾害发生的结果。但由于研究区盆地的面积占比 28%, 滑坡灾害主要发育在山谷内, 且流域内影响滑坡发育的主要因子不同及滑坡失稳后造成区域地质不稳定性, 小型群发性滑坡常集中在流域内(图 5), 由于勘察局限性, 忽略极小型滑坡灾害, 因此引入流域内灾害点密度作为评价因子, 弥补评价因子不准确造成的误差, 提高模型精度。以水文分析法划分研究区流域单元, 滑坡点密度为流域内的灾害点个数与流域面积之比, 研究区灾害点密度在 0~2.11 个/ km^2 , 分为 0, 0~1,

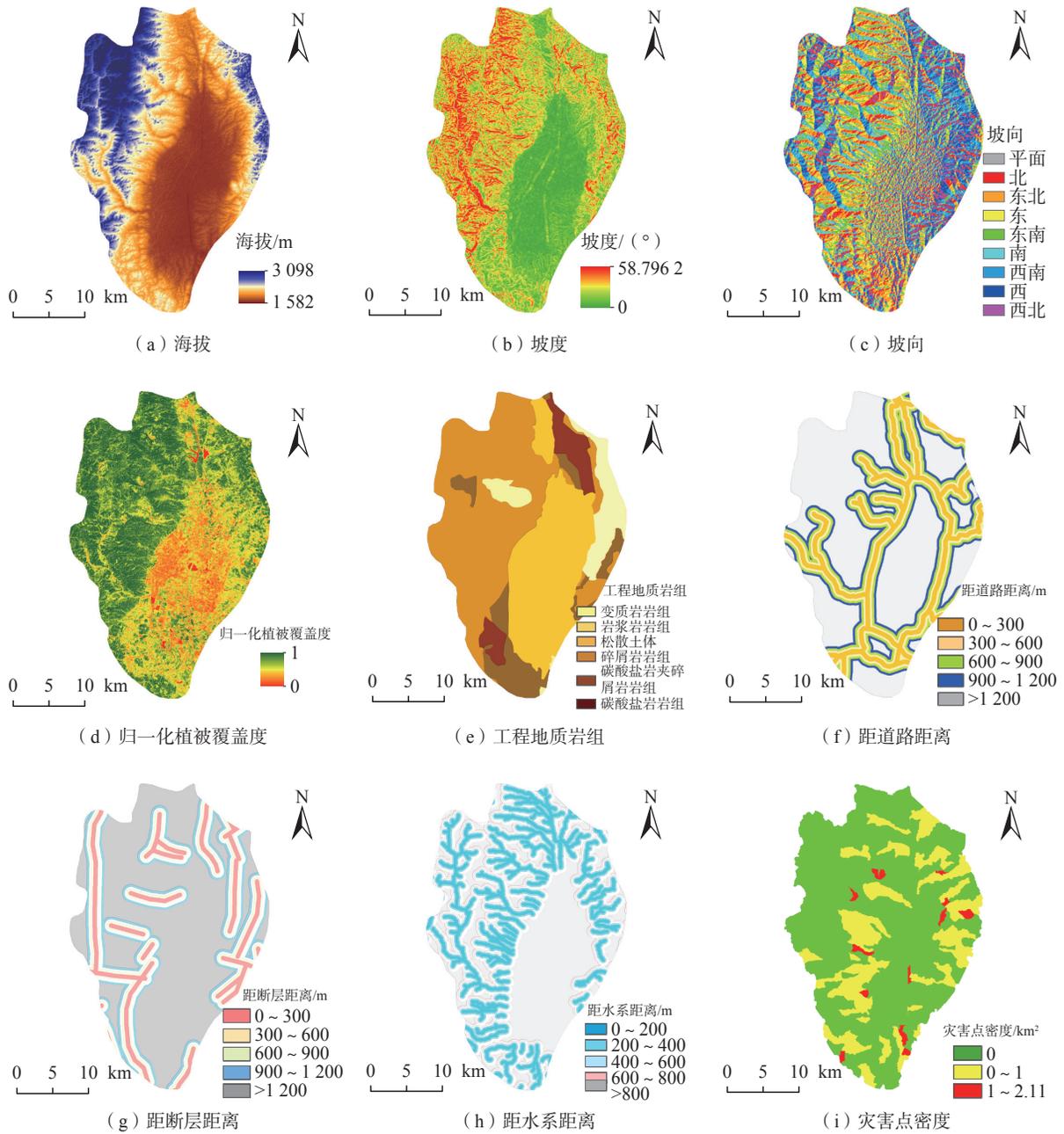
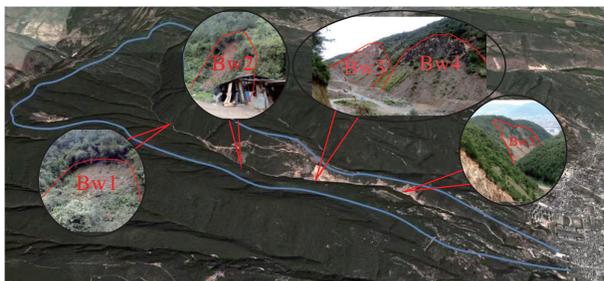


图 4 滑坡灾害评价指标因子

Fig. 4 Evaluation indicator factors for landslide hazard



流域范围 Bw 不稳定斜坡

图 5 流域单元滑坡灾害图

Fig. 5 Landslide hazard map for watershed units

1~2.11 个/km², 在 1~2.11 个/km² 的区间 FR 值最大为 6.039。

3 易发性评价

3.1 基于确定性系数的模型评价

3.1.1 单一模型

据式(1), 计算各评价指标因子分级的确定性系数值(CF)(表 4), 采用地理信息系统(geographic information system, GIS)对评价指标因子层进行叠加, 利用自然

表 4 评价因子确定性系数值及权重值

Table 4 Coefficient of determination values and weight values for evaluation factors

评价因子	状态分级	CF	W _{i-AHP}	W _{i-IOE}	W _{i-AHP-IOE}	评价因子	状态分级	CF	W _{i-AHP}	W _{i-IOE}	W _{i-AHP-IOE}
海拔/m	1 582 ~ 1 724	-0.357	0.024	0.116	0.067	工程地质岩组	0.8 ~ 1	-0.827	0.202	0.042	0.126
	1 724 ~ 1 960	0.658					松散土体	-0.282			
	1 960 ~ 2 167	0.280					碎屑岩岩组	-0.260			
	2 167 ~ 2 394	-0.463					碳酸盐岩岩组	0.122			
	2 394 ~ 2 644	-1.000					碳酸盐岩夹碎屑岩组	0.605			
	2 644 ~ 3 098	-1.000					变质岩岩组	-0.127			
坡度/(°)	0 ~ 8	-0.765	0.115	0.026	0.073	距道路距离/m	0 ~ 300	0.601	0.068	0.035	0.052
	8 ~ 16	0.374					300 ~ 600	0.453			
	16 ~ 24	0.336					600 ~ 900	-0.215			
	24 ~ 32	0.273					900 ~ 1 200	0.115			
	32 ~ 40	0.007					>1 200	-0.443			
	>40	0.332					距断层距离/m	0 ~ 300			
坡向	平面	-1.000	300 ~ 600	0.471							
	北	-0.420	600 ~ 900	0.451							
	东北	-0.228	900 ~ 1 200	0.299							
	东	0.149	>1 200	-0.439							
	东南	-0.448	距水系距离/m	0 ~ 200	0.651	0.058		0.066	0.062		
	南	0.152		200 ~ 400	0.144						
	西南	0.350		400 ~ 600	-0.179						
	西	0.337		600 ~ 800	-0.678						
西北	-0.096	>800	-0.634	灾害点密度/km ²	0	-1.000	0.339	0.572	0.449		
归一化植被覆盖度	0 ~ 0.2	-1.000	0 ~ 1		0.808						
	0.2 ~ 0.4	-0.312	1 ~ 2.11		0.958						
	0.4 ~ 0.6	0.394									
	0.6 ~ 0.8	0.386									

断点法将叠加图层进行分区,即得出 CF 模型的滑坡易发性分区图。

3.1.2 耦合模型

(1)CF-AHP 模型

CF-AHP 模型权重信息获取是基于层次分析法构建评价指标体系层次结构模型,计算评价指标因子权重值。根据研究区滑坡发育特征、专家意见及前人成果,采用标度法构建判断矩阵(表 3);经一致性检验,CR 值为 0.028,小于 0.1,即权重值有效(表 3)。

以确定性系数值(CF)为基础,据层次分析法计算权重为系数,据式(2)对评价指标因子进行叠加,如式(16),计算栅格单元加权确定系数值,采用自然断点法对加权确定性系数分级,得出 CF-AHP 耦合模型滑坡易发性分区图。

(2)CF-IOE 模型

以确定性系数值(CF)为基础,据式(3)—(10),计算评价指标因子权重值,计算栅格单元加权确定系数值,

如式(17),采用自然断点法对加权确定性系数分级,得出 CF-IOE 耦合模型滑坡易发性分区图。

(3)CF-AHP-IOE 模型

基于确定性系数值(CF),据式(12)—(14),利用距离函数法,计算 α 、 β 主、客观分配系数分别为 0.527、0.473,据式(11)计算评价指标因子组合权重值,计算栅格单元加权确定性系数值,如式(18),采用自然断点法对加权确定性系数分级,得出 CF-AHP-IOE 耦合模型滑坡易发性分区图。

$$CF-AHP_{\text{总}} = 0.024CF_{1j} + 0.115CF_{2j} + 0.036CF_{3j} + 0.052CF_{4j} + 0.202CF_{5j} + 0.068CF_{6j} + 0.106CF_{7j} + 0.058CF_{8j} + 0.339CF_{9j} \quad (16)$$

$$CF-IOE_{\text{总}} = 0.116CF_{1j} + 0.026CF_{2j} + 0.031CF_{3j} + 0.092CF_{4j} + 0.042CF_{5j} + 0.035CF_{6j} + 0.035CF_{7j} + 0.066CF_{8j} + 0.572CF_{9j} \quad (17)$$

$$CF-AHP-IOE_{总} = 0.067CF_{1j} + 0.073CF_{2j} + 0.034CF_{3j} + 0.071CF_{4j} + 0.126CF_{5j} + 0.066CF_{6j} + 0.062CF_{7j} + 0.062CF_{8j} + 0.449CF_{9j} \quad (18)$$

式中: $CF-AHP_{总}$ 、 $CF-IOE_{总}$ 、 $CF-AHP-IOE_{总}$ ——CF-AHP、CF-IOE、CF-AHP-IOE 模型的总加权确定性系数值;

CF_{1j} — CF_{9j} ——海拔、坡度、坡向、归一化植被覆盖度、工程地质岩组、距道路距

离、距断层距离、距水系距离、灾害点密度的确定性系数值。

3.2 滑坡易发性评价结果对比分析

将评价指标因子栅格图层按权重系数(表 4)加权计算,采用自然断点法将其划分为低、中、高及极高易发区,得出确定性系数模型(CF)及确定性系数法与层次分析法耦合模型(CF-AHP)、确定性系数法与熵指数法耦合模型(CF-IOE)及确定性系数法与距离函数法-组合权重模型(CF-AHP-IOE)的研究区滑坡易发性分区图(图 6)。

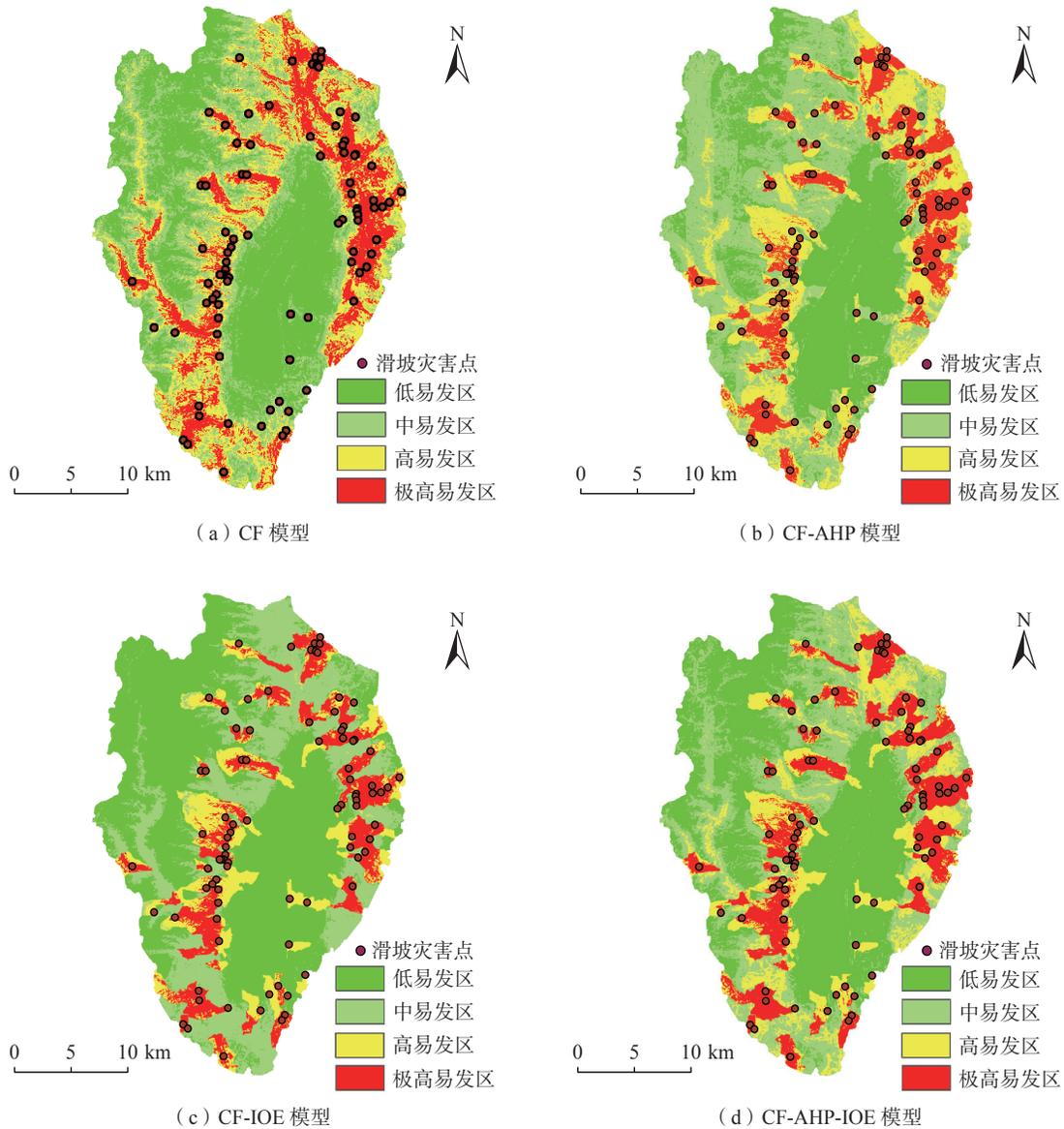


图 6 滑坡易发性分区结果

Fig. 6 Geological hazard susceptibility zoning results

以分级面积实际发生的滑坡灾害数量占比、灾害密度、频率比值占比对滑坡评价结果进行分析(表 5),结果显示:

(1)单一模型,CF 模型滑坡易性发分区(低、中、高、极高)面积为 241.328, 208.166, 198.697, 116.628 km²,落入极高的滑坡数量占比 79.8%,极高易发区的灾害密度

表 5 CF、CF-AHP、CF-IOE、CF-AHP-IOE 模型分级结果
Table 5 Grading results of CF, CF-AHP、CF-IOE、CF-AHP-IOE models

评价模型	易发分区	分级面积/km ²	面积占比/%	灾害频数	灾害占比/%	灾害密度/km ²	频率比值	频率比值占比/%
CF	低	241.328	31.6	1	1.0	0.004	0.032	0.53
	中	208.166	27.2	5	5.1	0.024	0.186	3.10
	高	198.697	26.0	14	14.1	0.070	0.544	9.07
	极高	116.628	15.2	79	79.8	0.677	5.233	87.29
CF-AHP	低	365.938	47.8	0	0	0	0	0
	中	197.212	25.8	1	1.0	0.005	0.039	0.50
	高	107.775	14.1	22	22.2	0.204	1.577	20.04
	极高	93.894	12.3	76	76.8	0.809	6.253	79.46
CF-IOE	低	371.350	48.6	0	0	0	0	0
	中	201.359	26.3	1	1.0	0.005	0.038	0.51
	高	86.153	11.3	15	15.2	0.174	1.345	18.09
	极高	105.957	13.9	83	83.8	0.783	6.052	81.40
CF-AHP-IOE	低	300.304	39.3	0	0	0	0	0
	中	202.226	26.4	0	0	0	0	0
	高	130.706	17.1	9	9.1	0.069	0.532	9.15
	极高	131.584	17.2	90	90.9	0.684	5.284	90.85

0.677 个/km²; 低—极高易发区的频率比值显著增大, 极高易发区频率比值大于 1, 表明 CF 模型对研究区进行有效分级。

(2) 耦合模型: CF-AHP、CF-IOE、CF-AHP-IOE 模型滑坡易发性分区中的极高易发性分级面积为 93.894, 105.957, 131.584 km², 落入极高易发区的滑坡数量占比 76.8%、83.8%、90.9%, 灾害密度 0.809, 0.783, 0.684 个/km², 频率比值占总频率比值均在 79% 以上; CF-AHP-IOE 极高易发区频率比值占比高达 90%; 3 种模型滑坡易发性分级的灾害频数及密度由低—极高依次增大, 符合滑坡发育规律, 即 3 种耦合模型均对研究区滑坡易发性进行了有效评价。

(3) 据 CF-AHP、CF-IOE、CF-AHP-IOE 模型耦合模型的滑坡易发性评价结果分析: 极高易发区的灾害占比及频率比值占比均依次增大; 高易发区却依次减小, 如表 5 所示, 反映了滑坡向极高易发区集中; 极高易发区灾害密度分别为 0.809, 0.783, 0.684 个/km², 呈现逐步降低趋势, 由于灾害密度受分区面积与灾害频数的影响, 追溯到评价指标因子栅格精度及灾害数量多少的问题, 将直接影响分区灾害密度值大小, 未能体现 CF-AHP-IOE 模型的优势, 但仍然反应极高易发区灾害密度的绝对高占比。而灾害占比及频率比值占比均为无量纲值, 可更加反映滑坡灾害的集中程度。

3.3 评价结果精度检验

采用 ROC 曲线的 AUC 值检验模型预测精度, 曲线

横坐标为 1-特异性; 纵坐标为敏感度, CF、CF-AHP、CF-IOE 及 CF-AHP-IOE 模型 AUC 值分别为 0.890、0.911、0.921、0.916(图 7), AUC 均大于 0.7, 均具有较高的准确性, 确定性系数值在层次分析法、熵指数法及组合权重法权重系数加权后, 评价精度更高, 更准确对研究区进行滑坡易发性分级。

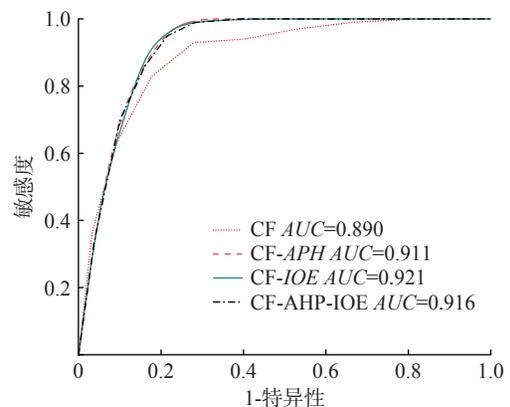


图 7 ROC 曲线
Fig. 7 ROC curve

4 结论

(1) 评价结果显示: 高、极高易发区分布于地势起伏大、中度植被覆盖、断裂构造发育的岩石破碎及人类活动强烈的西南与东北的山区沟谷, 表明在人类工程活动与水文条件影响下, 坡脚侵蚀软化、坡体稳定性差, 极易引发滑坡地质灾害。

(2)提出基于 AHP 与 ROC 的评价指标体系的构建方法。结果表明:结合评价因子间相关性与重要性,取 AUC 值为 0.890 的评价模型,模型评价分级结果更好,为评价因子间的弱相关性提供一种可行的解决方法。

(3)CF、CF-AHP、CF-IOE 及 CF-AHP-IOE 模型滑坡易发性分区的频率比值从低易发区到极高易发区显著增大,极高易发区频率比值占比均在 79% 以上,具有良好的分级效果。

(4)CF、CF-AHP、CF-IOE 及 CF-AHP-IOE 模型 AUC 值分别为 0.890、0.911、0.921、0.916,模型评价精度高。采用 AHP、IOE 及组合权重法进行滑坡易发性评价,AUC 值提升 0.021、0.031、0.026,表明耦合模型具有更高评价精度,但精度提升不明显,笔者认为,研究区滑坡灾害数据及评价指标因子精度误差等影响了统计规律的原因,滑坡易发性分级精度还可进一步研究。

(5)组合权重模型(CF-AHP-IOE)综合了主、客观权重值,进行滑坡易发性分级,相较于单一模型有更高精度,受结论(4)缘故略低于 CF-IOE 模型,但在极高易发区灾害密度及频率比值占比均高达 90% 以上,均高于其他评价模型,准确将灾害区进行划分,因此距离函数-组合权重模型(CF-AHP-IOE)可更好为防灾减灾提供建议。

参考文献(References):

- [1] 范林峰,胡瑞林,曾逢春,等.加权信息量模型在滑坡易发性评价中的应用——以湖北省恩施市为例[J].*工程地质学报*, 2012, 20(4): 508 - 513. [FAN Linfeng, HU Ruilin, ZENG Fengchun, et al. Application of weighted information value model to landslide susceptibility assessment: A case study of Enshi City, Hubei Province [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(4): 508 - 513. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 韩金良,吴树仁,李东林,等.秦巴地区地质灾害的分布规律与成因[J].*地质科技情报*, 2007, 26(1): 101 - 108. [HAN Jinliang, WU Shuren, LI Donglin, et al. Distribution regularities and contributing factor of geological hazards in Qinling-Daba mountains [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(1): 101 - 108. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 许冲,戴福初,姚鑫,等.GIS支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡易发性评价[J].*岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增刊2): 3978 - 3985. [XU Chong, DAI Fuchu, YAO Xin, et al. Gis-based landslide susceptibility assessment using analytical hierarchy process in Wenchuan earthquake region [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and*

Engineering, 2009, 28(Sup 2): 3978 - 3985. (in Chinese with English abstract)]

- [4] 王雷,吴君平,赵冰雪,等.基于GIS和信息量模型的安徽池州地质灾害易发性评价[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(3): 96 - 103. [WANG Lei, WU Junping, ZHAO Bingxue, et al. Susceptibility assessment of geohazards in Chizhou City of Anhui Province based on GIS and informative model [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(3): 96 - 103. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 周萍,邓辉,张文江,等.基于信息量模型和机器学习方法的滑坡易发性评价研究——以四川理县为例[J].*地理科学*, 2022, 42(9): 1665 - 1675. [ZHOU Ping, DENG Hui, ZHANG Wenjiang, et al. Landslide susceptibility evaluation based on information value model and machine learning method: A case study of Lixian County, Sichuan Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(9): 1665 - 1675. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 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. Comparison of landslide susceptibility assessment models in Zhenkang County, Yunnan Province, China [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(1): 157 - 171. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 屠水云,张钟远,付弘流,等.基于CF与CF-LR模型的地质灾害易发性评价[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(2): 96 - 104. [TU Shuiyun, ZHANG Zhongyuan, FU Hongliu, et al. Geological hazard susceptibility evaluation based on CF and CF-LR model [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(2): 96 - 104. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 吴森,张文,刘民生.西藏地区崩塌滑坡影响因子敏感性分析[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(3): 109 - 117. [WU Sen, ZHANG Wen, LIU Minsheng. Susceptibility analysis on influencing factors of rockfalls and landslides in Tibet [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(3): 109 - 117. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李利峰,张晓虎,邓慧琳,等.基于熵指数与逻辑回归耦合模型的滑坡灾害易发性评价——以蓝田县为例[J].*科学技术与工程*, 2020, 20(14): 5536 - 5543. [LI Lifeng, ZHANG Xiaohu, DENG Huilin, et al. Assessment of landslide susceptibility based on coupling model of index of entropy and logistic regression: A case study of Lantian County [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(14): 5536 - 5543. (in Chinese with English abstract)]

- [10] 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)]
- [11] 张晨,王清,陈剑平,等.金沙江流域泥石流的组合赋权法危险度评价 [J] .岩土力学, 2011, 32(3): 831 - 836. [ZHANG Chen, WANG Qing, CHEN Jianping, et al. Evaluation of debris flow risk in Jinsha River based on combined weight process [J] . Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 831 - 836. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 范强,巨能攀,向喜琼,等.证据权法在区域滑坡危险性评价中的应用——以贵州省为例 [J] .工程地质学报, 2014, 22(3): 474 - 481. [FAN Qiang, JU Nengpan, XIANG Xiqiong, et al. Landslides hazards assessment with weights of evidence: A case study in Guizhou, China [J] . Journal of Engineering Geology, 2014, 22(3): 474 - 481. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张林梵,王佳运,张茂省,等.基于BP神经网络的区域滑坡易发性评价 [J] .西北地质, 2022, 55(2): 260 - 270. [ZHANG Linfan, WANG Jiayun, ZHANG Maosheng, et al. Evaluation of regional landslide susceptibility assessment based on BP neural network [J] . Northwestern Geology, 2022, 55(2): 260 - 270. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 郑迎凯,陈建国,王成彬,等.确定性系数与随机森林模型在云南芒市滑坡易发性评价中的应用 [J] .地质科技通报, 2020, 39(6): 131 - 144. [ZHENG Yingkai, CHEN Jianguo, WANG Chengbin, et al. Application of certainty factor and random forests model in landslide susceptibility evaluation in Mangshi City, Yunnan Province [J] . Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(6): 131 - 144. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 盛明强,刘梓轩,张晓晴,等.基于频率比联接法和支持向量机的滑坡易发性预测 [J] .科学技术与工程, 2021, 21(25): 10620 - 10628. [SHENG Mingqiang, LIU Zixuan, ZHANG Xiaoping, et al. Landslide susceptibility prediction based on frequency ratio analysis and support vector machine [J] . Science Technology and Engineering, 2021, 21(25): 10620 - 10628. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 侯鹏鹏.岷江上游区域泥石流发育规律与易发性评价 [D] .绵阳:西南科技大学, 2022. [HOU Pengli. Development law and susceptibility evaluation of debris flow in the upper reaches of Minjiang River [D] . Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 冯杭建,周爱国,唐小明,等.基于确定性系数的降雨型滑坡影响因子敏感性分析 [J] .工程地质学报, 2017, 25(2): 436 - 446. [FENG Hangjian, ZHOU Aiguo, TANG Xiaoming, et al. Susceptibility analysis of factors controlling rainfall-triggered landslides using certainty factor method [J] . Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 436 - 446. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算 [J] .资源科学, 2004, 26(4): 153 - 159. [LI Miaomiao, WU Bingfang, YAN Changzhen, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun Reservoir by remote sensing [J] . Resources Science, 2004, 26(4): 153 - 159. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 孟凡奇,高峰,林波,等.基于AHP和信息量模型的地质灾害易发性评价——以鲁东片区为例 [J] .灾害学, 2023, 38(3): 111 - 117. [MENG Fanqi, GAO Feng, LIN Bo, et al. Evaluation of geological disaster susceptibility in eastern Shandong based on AHP and information model [J] . Journal of Catastrophology, 2023, 38(3): 111 - 117. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 陈宾,魏娜,张联志,等.基于斜坡单元灾害强度的滑坡灾害易损性评价——以湖南省湘乡市为例 [J] .中国地质灾害与防治学报, 2024, 23(2): 137-145. [CHEN Bin, WEI Na, ZHANG Lianzhi, et al. Evaluation of landslide disaster vulnerability based on the hazard intensity of slope unit: A case study of Xiangxiang City, Hunan Province [J] . The Chinese Journal of Geological Hazards and Control, 2024, 23(2): 137-145. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 张书豪,吴光,张乔,等.基于子流域特征的泥石流易发性评价 [J] .水文地质工程地质, 2018, 45(2): 142 - 149. [ZHANG Shuhao, WU Guang, ZHANG Qiao, et al. Debris-flow susceptibility assessment using the characteristic factors of a catchment [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(2): 142 - 149. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 支泽民,刘峰贵,周强,等.基于流域单元的地质灾害易发性评价——以西藏昌都市为例 [J] .中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(1): 139 - 150. [ZHI Zemin, LIU Fenggui, ZHOU Qiang, et al. Evaluation of geological hazards susceptibility based on watershed units: A case study of the Changdu City, Tibet [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1): 139 - 150. (in Chinese with English abstract)]