

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.06.03

基于 GIS 的涪江上游南坝 - 水晶流域滑坡危险性评价

杨栓成¹, 王运生²

(1. 新疆交通规划勘察设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830006;

2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 本文以涪江上游南坝 - 水晶流域滑坡为研究对象, 选取坡度、高程、坡向、岩性、岸坡结构等 9 个影响因子, 基于 GIS 平台, 采用滑坡确定性系数模型与层次分析模型相结合的 (CF-AHP) 模型对研究区进行滑坡危险性评价。根据评价结果, 将研究区划分为极高危险区 (18.57%)、高危险区 (38.71%)、中危险区 (23.92%)、低危险区 (18.8%) 四个等级。利用危险性评价结果对比法和受试者工作特征曲线 (ROC) 对评价结果进行验证, 得到 ROC 曲线下面积 AUC 值为 88.36%, 表明 CF-AHP 模型能够较客观准确地对研究区滑坡危险性评价。

关键词: GIS; 滑坡确定性系数模型; 层次分析模型; 危险性评价

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)06-0015-08

GIS-based landslide risk assessment along the Nanba-Shuijing reaches in the Fujiang River

YANG Shuancheng¹, WANG Yunsheng²

(1. Xinjiang Transportation Planning Survey and Design Institute, Urumqi, Xinjiang 830006, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: In this paper, the landslides at the Nanba-Shuijing reaches in the Fujiang River were taken as the research objects. Nine influencing factors including slope, elevation, slope direction, lithology and slope structure, are selected. Based on GIS software, the CF-AHP model was applied to evaluate the risk of landslides in the study area. According to the evaluation results, the study area is divided into four levels, the extremely dangerous area (18.57%), the high risk area (38.71%), the middle danger area (23.92%), and the low danger area (18.8%). The ROC curve and risk comparison result are used to verify the evaluation results, and the AUC value is 88.36%, which indicates that the CF-AHP model can serve to objectively evaluate the landslide hazard in the study area.

Keywords: GIS; landslides CF; AHP; hazard assessment

0 引言

滑坡危险性评价通常指某一区域的滑坡在某一特定时间内发生的空间位置、灾害强度及发生概率, 并对其危险程度划分等级, 为减灾防灾工作提供一定依据。近年来, 滑坡危险性评价方法, 由初阶的定性评价发展到如今的统计模型等定量法, 这些方法在本质上并无很大区别, 都是选取若干影响因素并对其进行一定数

学方法的加权运算, 得出危险性指标。但每种模型各有优缺点, 其中确定性系数模型 (CF) 可以保证影响因子分级之间的权重取值来源于滑坡基本数据, 避免了人为因素的干扰, 但是该方法不能很好的确定各影响因子间的权重。层次分析模型 (AHP) 可以通过评价因子的两两互相比来确定其权重, 并对构造矩阵关系过程中不合理结构进行一定程度的调整, 其结果的合理性最终可以用一致性比率来检验。

收稿日期: 2017-12-28; 修订日期: 2018-04-04

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (41602331); 中国沙漠气象科学研究基金 (Sqj2015015); 中国博士后基金 (2016M602951XB)

第一作者: 杨栓成 (1989-), 男, 河南南阳人, 地质工程专业, 硕士, 工程师, 主要从事地质工程专业研究。E-mail: 18200355862@163.com

根据研究区滑坡的发育规律及成因机制,本文采用层次分析模型(AHP)与确定性系数模型(CF)结合的方法对研究区进行滑坡危险性评价。在此基础上,将危险性评价指标分为基本因素和诱发因素,具体包括高程、坡度、坡向、岸坡结构、地层岩性、地质构造、河流水系、降雨、人类工程活动9个二级评价指标。最后利用GIS技术对研究区滑坡进行危险性分区。

1 研究区概况

涪江上游南坝-水晶流域地处青藏高原向四川盆地过度地带东缘,总体地势表现为由西北向东南逐渐降低,流域面积4 709 km²。该地区属于四川盆地亚热带湿润气候区的盆地西部边缘区,立体气候十分显著;南东地区降水多,北西地区降水少;山地地区降水多,河谷地区降水少^[1]。研究区内水系众多,主要河流涪江发源于境内西北方雪宝顶主峰,火溪河、土城河、虎牙河等数百余条支流呈不对称羽状绵延分布于沟壑纵横之间。区内地层岩性变化较大,出露地层主要有元古界前震旦系和震旦系,古生界寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系和二叠系,中生界三叠系,以及新生界第四系。研究区主要构造有虎牙关大断层、清溪大断层、老营坪断层、南坝大断层、轿子顶复背斜、杨柳坝弧形复向斜等^[2]。根据野外调查及遥感解译,研究区内共发育滑坡157处(图1),滑坡密度为3.33个/100 km²,规模多为中型-大型滑坡,总体积约4.8×10⁸ m³。

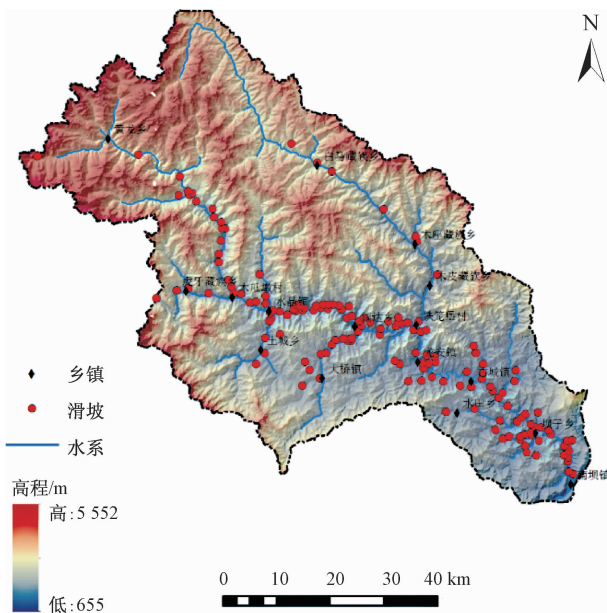


图1 研究区滑坡分布示意图

Fig.1 Distribution schematic diagram of landslides in the study area

2 滑坡危险性评价模型

2.1 确定性系数模型

确定性系数法(CF)的滑坡危险性评价模型,是依据已发生的滑坡与确定性影响因子的数据集(河流水系、地层岩性、岸坡结构等)之间的统计关系,从而判定滑坡灾害的危险程度^[3]。确定性系数CF作为一个概率函数,表达式如下:

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

式中: PP_a ——事件(滑坡)在数据分类 a 中发生的条件概率,在此表示数据 a 类单元中存在的滑坡数量与单元面积的比值;

PP_s ——整个研究区域中滑坡发生的先验概率,可以表示为研究区滑坡数量与研究区面积的比值。

经计算,CF值的变化范围为 $[-1, 1]$ 。 $(0, 1]$ 表示滑坡发生的机率性高,值越接近1,滑坡确定性越高; $[-1, 0)$ 表示滑坡发生的确定性低,值越接近-1,滑坡发生的确定性越低;当CF值接近0时,表示滑坡发生的确定性与区域平均值接近^[4]。

2.2 层次分析模型

层次分析法(AHP)是美国学者T L Saaty提出的一种多指标分析评价方法,具有精度高、使用方便等特点^[5]。通过评价因子两两互相比确定各评价因子权重,可以对构造矩阵关系过程中不合理结构进行一定程度的调整,其结果的合理性最终可以用一致性比率来检验。具体的步骤如下:

(1) 建立层次结构模型

在滑坡危险性评价过程中,目标层为滑坡危险性评价结果,准则层为评价指标类型,方案层为具体的评价指标,从而建立一个多层次分析模型。

(2) 构造判断(成对比较)矩阵

分析每一层的要素相对于上一层次某要素的单排序情况,对一系列成对要素进行量化判断比较,并写成矩阵形式,即构成判断矩阵^[6]。判断矩阵的元素 a_{ij} 用 Saaty 给出的1~9标度法给出(表1)。

(3) 一致性检验

由于 λ 连续依赖于 a_{ij} , 而 λ 比 n 大的越多, A 的不一致性越严重。因此,采用 $\lambda - n$ 数值的大小来衡量 A 的不一致程度,这样判断矩阵得出的评价因子权

重才是可靠的^[7](表 2)。

表 1 判断矩阵元素的标度方法

Table 1 The scaling method for the element of judgment matrix

标度	含义
1	两个因素相比,具有同样重要性
3	两个因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要
5	两个因素相比,一个因素比另一个因素明显重要
7	两个因素相比,一个因素比另一个因素强烈重要
9	两个因素相比,一个因素比另一个因素极端重要
2,4,6,8	上述两相邻判断的中值
倒数	因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 比较的判断 a_{ij} ,则因素 <i>j</i> 与因素 <i>i</i> 比较的判断 $a_{ji}=1/a_{ij}$

表 2 一致性指标定义

Table 2 Definition of consistency index

定义一致性指标:	$C_1 = 0$, 有完全一致性
$C_1 = (\lambda - n) / (n - 1)$	C_1 接近于 0, 有满意的一致性
($n > 1$)	C_1 越大, 不一致性越严重

为衡量 C_1 的大小,引入随机一致性指标 RI ,其结果见表 3。

表 3 随机一致性指标 RI

Table 3 Random consistency index RI

n	1	3	5	7	9
RI	0	0.52	1.12	1.36	1.45

定义一致性比率: $C_R = \frac{C_1}{RI}$,一般当 $C_R < 0.1$ 时,表示矩阵 A 的不一致程度可以通过一致性检验,在容许范围内,否则需要对因子 a_{ij} 进行调整^[8]。

(4) 计算各评价因子的组合权重,得到权重分配值。

3 基于 CF-AHP 模型的滑坡危险性评价

3.1 滑坡评价模型的选取

本文在选取评价模型时,结合前人研究成果及研究区实际情况,最终选取层次分析法与确定性系数法相结合(CF-AHP)。首先运用确定性系数(CF)法,求出各评价因子指标分级的相对权重,即 CF 值,但该方法不能很好的确定各评价因子之间的权重。然后结合层次分析法(AHP)对各评价指标之间进行层次划分,科学分配权重,并检验权重分配的可靠性。最终结合这两种评价方法构建 CF-AHP 评价模型,对研究区滑坡进行危险性评价。该评价模型将客观与主观相结合,不仅考虑了每个评价指标对滑坡的影响程度,还在一定程度上避免了各指标的重复性和人为干扰因素,计算简便,可有效地提高滑坡危险性评价结果的准

确性。

3.2 滑坡评价因子指标

进行滑坡危险性评价的基础是选取评价因子。影响斜坡稳定性因素很多,且各因素间关系复杂,应结合野外实地调查资料选取评价因子^[9]。本文在选取评价因子时,结合研究区地质背景,将滑坡危险性评价指标分为基本因子和诱发因子两个层次,具体包括高程、坡度、坡向、岸坡结构、地层岩性、地质构造、河流水系、降雨、人类工程活动等 9 个二级评价指标(图 2)。

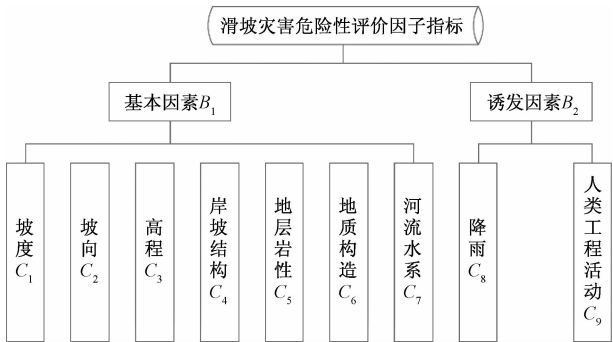


图 2 研究区滑坡危险性评价因子指标体系

Fig. 2 Index system for the landslide risk evaluation in the study area

3.3 评价单元格的选取

由于各影响因素在局部区域的差异性和复杂性,为达到较精确评价的目的,需将整个研究区分成若干个小单元,即评价单元。单元格的选取与评价结果的合理性密切相关,目前常用的评价单元主要有正方形栅格法、斜坡单元法、地域单元法、子流域单元法等^[10]。

研究区 DEM 分辨率为 30 m × 30 m,鉴于数据精度有限,故选取正方形栅格单元,其运算简洁,便于实现快速分析。选取栅格大小的需要综合考虑,参考前人研究成果^[11],栅格单元尺寸经验公式:

$$G_s = 7.49 + 0.0006S - 2.0 \times 10^{-6}S^2 + 2.9 \times 10^{-15}S^3 \quad (2)$$

式中: G_s ——适宜网格大小;

S ——基础数据精度的分母。

该处研究区的基础数据比例尺为 1:250 000,通过上述公式得出 $G_s = 157.3$,进而得出适宜网格为 5 × 5 像素单元,然后对其进行重采样,将研究区分为 209 310 个栅格。

3.4 各评价因子指标分级及 CF 值

(1) 高程分级及 CF 值

研究区高程的 CF 值计算结果见表 4,其中高程在 655 ~ 1 000 m, 1 000 ~ 1 500 m, 1 500 ~ 2 000 m 区间

内,CF 均为正值,说明滑坡在这些区间内容易发生。当高程大于 2 000 m 时,其 CF 值转为负值,表明在此范围内,滑坡发生及机率型较小,地形不利于滑坡的发生。

表 4 高程分级及各分级 CF 值

Table 4 Elevation classification and CF value of each grade

指标分级	指标范围/m	滑坡数量/个	面积/km ²	CF
1	655 ~ 1 000	16	145.11	0.722 0
2	1 000 ~ 1 500	90	759.79	0.743 6
3	1 500 ~ 2 000	40	888.51	0.269 3
4	2 000 ~ 2 500	9	787.66	-0.664 5
5	> 2 500	2	2 128.38	-0.972 7

(2) 坡度分级及 CF 值

表 5 为坡度分级及对应的确定性系数,CF 值在 15° ~ 30° 区间内为正值,其余区间内确定性系数均为负值,说明滑坡主要集中分布于 15° ~ 30° 区间内,当坡度大于 60° 时,其确定性系数为 -1,说明该区间基本不发生滑坡。

表 5 坡度分级及各分级 CF 值

Table 5 Grade of slope and CF value of each grade

指标分级	指标范围/(°)	滑坡数量/个	面积/km ²	CF
1	0 ~ 15	4	485.38	-0.758 8
2	15 ~ 30	122	1 939.01	0.487 0
3	30 ~ 45	28	1 917.48	-0.569 8
4	45 ~ 60	3	344.65	-0.745 1
5	60 ~ 90	0	22.93	-1.000 0

(3) 坡向分级及 CF 值

坡向分级及其对应的 CF 值见表 6,由此可知,区域内在东南、正南、西南方向 CF 值为正值,且在正南方向值最大,表明滑坡在这些方向容易发生,其余方向 CF 值为负,说明该方向对滑坡影响较小或者不影响,CF 值为 -1 表明平面不发生滑坡。

表 6 坡向分级及各分级 CF 值

Table 6 Classification of slope direction and CF value of each classification

指标分级	指标范围/(°)	滑坡数量/个	面积/km ²	CF
1	平面(-1)	0	0.15	-1.000 0
2	北(0 ~ 22.5)	8	267.96	-0.106 6
3	北东(22.5 ~ 67.5)	9	544.47	-0.512 1
4	东(67.5 ~ 112.5)	16	632.59	-0.246 7
5	东南(112.5 ~ 157.5)	31	659.96	0.301 1
6	南(157.5 ~ 202.5)	36	610.38	0.450 4
7	南西(202.5 ~ 247.5)	21	587.68	0.070 5
8	西(247.5 ~ 292.5)	14	562.35	-0.258 8
9	西北(292.5 ~ 337.5)	11	576.75	-0.435 6
10	北(337.5 ~ 360)	11	267.16	0.197 8

(4) 地层岩性分级及 CF 值

按照工程地质岩组分类,地层岩性分为坚硬岩类、较坚硬岩类、软弱岩类和软硬相间岩类四种,其对应的 CF 值见表 7。由表可知,仅有软弱岩类对应的 CF 值为正值,说明滑坡对其敏感性较强,坚硬岩类的 CF 值为最小,表明该区域地层岩性对滑坡敏感性最低。

表 7 地层岩性分级及各分级 CF 值

Table 7 Stratigraphic and lithologic classification and CF values of each classification

指标分级	指标范围	滑坡数量/个	面积/km ²	CF
1	坚硬岩类	1	145.68	-0.799 4
2	较坚硬岩类	17	1 422.7	-0.648 9
3	软弱岩类	78	1 075.29	0.559 6
4	软硬相间岩类	61	2 065.78	-0.116 7

(5) 岸坡结构分级及 CF 值

岸坡结构按坡向与岩层倾向夹角可分为四类,分别为顺向坡、斜向坡、横向坡和逆向坡,其分别对应的 CF 值计算结果见表 8,由表 8 可知,顺向坡和逆向坡对应的 CF 值为正值,表明其对滑坡影响程度最大,而横向坡和斜向坡对应 CF 值为负值,说明滑坡对其敏感性较低。

表 8 岸坡结构分级及各分级 CF 值

Table 8 Classification of slope structure and CF value of each classification

指标分级	指标范围	滑坡/个	面积/km ²	CF
1	顺向坡	65	787.63	0.617 0
2	斜向坡	35	1 571.46	-0.338 7
3	横向坡	19	1 592.45	-0.649 5
4	逆向坡	38	757.91	0.347 4

(6) 降雨量分级及 CF 值

降雨量分级及各分级对应的 CF 值见表 9,由表 9 可知,降雨量在大于 750 mm 范围内 CF 值均为正值,且在大于 850 mm 范围内 CF 值最大,表明滑坡受降雨影响较大,且在降雨量较小区域,CF 值均为负值。

表 9 降雨量分级及各分级 CF 值

Table 9 Rainfall classification and CF value of each classification

指标分级	指标范围/mm	滑坡/个	面积/km ²	CF
1	< 700	3	835.81	-0.895 4
2	700 ~ 750	49	1 855.65	-0.212 6
3	750 ~ 800	53	1 079.9	0.332 6
4	800 ~ 850	23	616.97	0.110 4
5	> 850	29	321.12	0.653 0

(7) 水系缓冲分级及 CF 值

水系缓冲分级及分级指标对应的 CF 值见表 10,

分析表明,离水系越近,其坡体遭受侵蚀也越严重,对应的 CF 值也较大,为滑坡易发区。随着与水系距离的增加,滑坡分布数量有所减少,在距水系 1 000 m 之外,其对应 CF 值转为负值。

表 10 水系缓冲分级及各分级 CF 值
Table 10 Water system buffer classification and each classification CF value

指标分级	指标范围/m	滑坡/个	面积/km ²	CF
1	0 ~ 500	97	509.87	0.853 4
2	500 ~ 1 000	31	476.83	0.504 6
3	1 000 ~ 1 500	11	451.25	-0.274 7
4	> 1 500	18	3 271.5	-0.839 4

(8) 断层缓冲分级及 CF 值

研究区内断层活动比较剧烈,离断层越近,斜坡稳定性越差,断层缓冲分级及对应的 CF 值见表 11。研究表明,CF 值在 0 ~ 1 000 m 和 1 000 ~ 2 000 m 内均为正值,表明滑坡在该区域内较易发。当距断层大于 2 000 m 时,其对应的 CF 值为负值,说明该地区滑坡易发度较低。

表 11 断层缓冲分级及各分级 CF 值
Table 11 Fault buffer classification and each classification CF value

指标分级	指标范围/m	滑坡/个	面积/km ²	CF
1	0 ~ 1 000	22	509.17	0.237 2
2	1 000 ~ 2 000	18	449.73	0.173 8
3	2 000 ~ 4 000	23	737.15	-0.065 1
4	> 4 000	94	3 013.4	-0.065 3

(9) 公路缓冲分级及 CF 值

公路缓冲分级及对应 CF 值见表 12,随着距公路距离的增加,各分级指标对应的 CF 值呈逐渐递减趋势,说明滑坡易发程度越来越小,且在大于 2 000 m 区域 CF 值转为负,表明滑坡在该区域较不易发生。

表 12 公路缓冲分级及各分级 CF 值
Table 12 Highway buffer classification and each classification CF value

指标分级	指标范围/mm	滑坡/个	面积/km ²	CF
1	0 ~ 500	86	275.73	0.924 0
2	500 ~ 1 000	20	254.64	0.595 9
3	1 000 ~ 1 500	11	241.67	0.277 6
4	1 500 ~ 2 000	9	229.92	0.154 4
5	> 2 000	31	3 707.49	-0.755 2

3.5 层次分析模型确定指标权重

(1) 计算各级评价因子权重

根据滑坡评价因子建立判断矩阵,首先对评价因子 A - B 的矩阵进行求解,归一化其特征向量,所得结

果即为影响因子的权重。经计算,因子 B₁、B₂ 分别为 0.8 和 0.2(表 13)。

表 13 A - B 之间判断矩阵及因子权重
Table 13 Judgment matrix and index weight between A-B

A	B ₁	B ₂	归一权重 W
B ₁	1	4	0.80
B ₂	1/4	1	0.20

对 B₁-C 之间判断矩阵进行归一化求解,其结果见表 14。通过数学计算,判断矩阵最大特征值为 λ_{max} = 7.337 5,各因子归一化权重 W 分别为(0.127 0, 0.049 2, 0.074 6, 0.247 4, 0.257 6, 0.149 0, 0.095 2)。

表 14 B₁-C 之间判断矩阵及因子权重
Table 14 Judgment matrix and index weight between B₁-C

B ₁	坡度 C ₁	坡向 C ₂	高程 C ₃	岸坡结构 C ₄	地层岩性 C ₅	地质构造 C ₆	河流水系 C ₇	归一权重 W
坡度 C ₁	1	3	3	1/3	1/3	1/2	2	0.127 0
坡向 C ₂	1/3	1	1/2	1/4	1/4	1/2	1/3	0.049 2
高程 C ₃	1/3	2	1	1/2	1/3	1/2	1/2	0.074 6
岸坡结构 C ₄	3	4	2	1	1	2	3	0.247 4
地层岩性 C ₅	2	4	3	1	1	2	3	0.257 6
地质构造 C ₆	1/2	2	2	1/2	1/2	1	2	0.149 0
河流水系 C ₇	1/2	3	2	1/3	1/3	1/2	1	0.095 2

通过计算,B₂-C 判断矩阵最大特征值 λ_{max} = 2,其因子归一化权重为(0.666 7,0.333 3)(表 15)。

表 15 B₂-C 之间判断矩阵及因子权重
Table 15 Judgment matrix and index weight between B₂-C

B ₂	C ₈	C ₉	归一权重 W
C ₈	1	2	0.666 7
C ₉	1/2	1	0.333 3

(2) 一致性检验

按照上述公式对判断矩阵进行一致性检验,计算各判断矩阵一致性指标(表 16)。

表 16 评价因子综合一致性指标
Table 16 Comprehensive consistency index of evaluation factor

一致性检验	A - B	B ₁ - C	B ₂ - C
λ _{max}	2	7.337 5	2
N	2	7	2
RI	0	1.36	0
C _I	0	0.056 25	0
C _R	0	0.041 36	0

由表 15 可知,判断矩阵的 C_R < 0.1,表明通过一致性检验,所得权重具有可信性(表 17)。

(3) 各评价因子综合权重

表 19 危险性差值分级参数表
Table19 Parameters of risk D-value classification

自然分类级别	1	2	3	4	5
属性值	< -1.124	-1.124 ~ -0.564	-0.564 ~ 0.632	0.632 ~ 1.086	>1.086
差值分级	低相似率	高相似率	相同	高相似率	低相似率

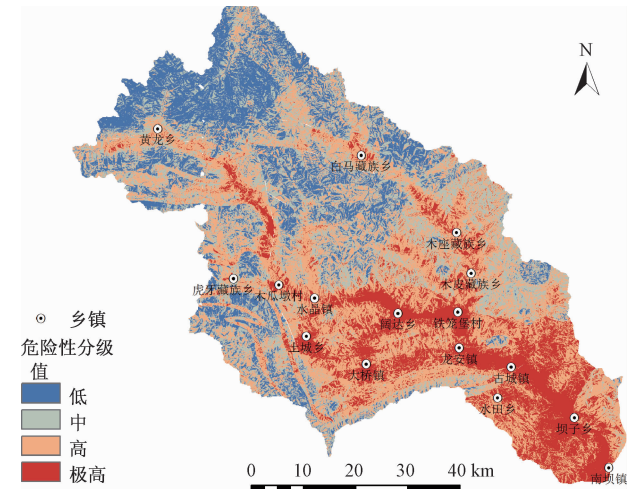


图 4 基于平武县调查报告的危险性评价结果图
Fig.4 Risk assessment results based on Pingwu County investigation report

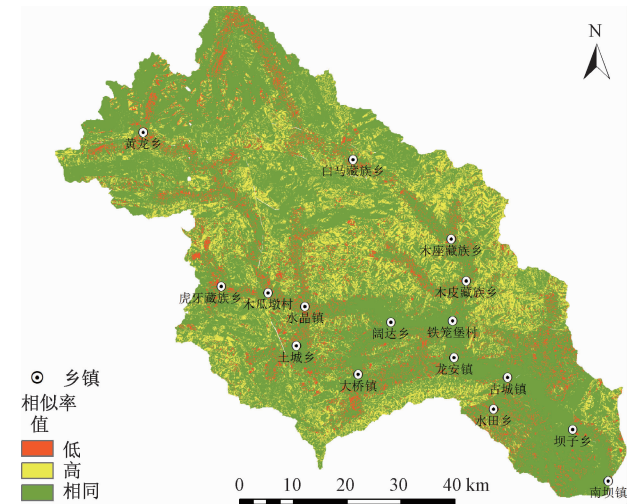


图 5 危险性对比结果图
Fig.5 Risk comparison result map

4.2 ROC 曲线分析法

ROC (Receiver Operation Characteristics) 曲线广泛应用于模型的评价,为了定量比较,通常用曲线下面积 AUC (Area Under Curve) 作为定量指标来衡量模型的精确度^[12]。ROC 曲线越靠近左上角,AUC 值也越大,表明在一系列临界值范围内其模型性能越好。

对研究区滑坡危险性评价结果建立 ROC 检验曲线,横轴为表危险性面积累计百分比,纵轴为滑坡分布

累计百分比。通过对研究区滑坡危险性评价结果进行统计,得到其 ROC 曲线见图 6。

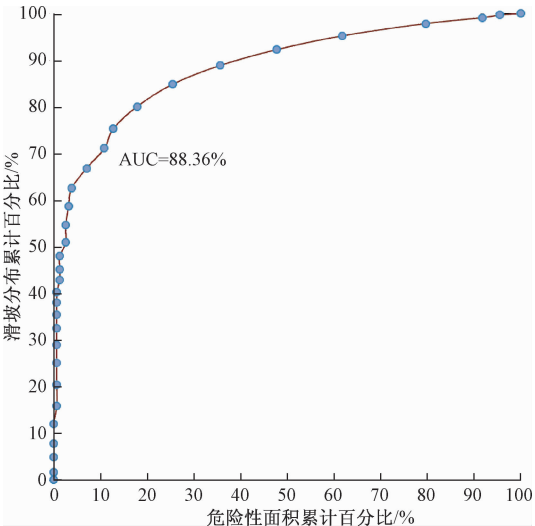


图 6 研究区滑坡危险性评价 ROC 曲线
Fig.6 ROC curve of landslide risk assessment in the study area

通过 ROC 曲线计算该模型的 AUC 值,得出 AUC 值为 88.36%,表示该评价模型具有较高的准确性和可信性。

5 结论

本文选取 CF-AHP 评价模型,对研究区滑坡危险性进行评价,将客观因素和实际情况相结合,主要得出以下结论:

- (1)通过 9 个评价因子各分级的 CF 值和对应的权重可知,地层岩性、岸坡结构、河流水系和降雨 4 个因子对滑坡灾害易发性贡献相对较大,特别是在顺向坡、软弱岩类、降雨 > 850 mm 和距水系 500 m 内比较容易发生滑坡灾害。
- (2)根据评价结果,将研究区划分为四个危险性等级,分别为极高危险区、高危险区、中危险区和低危险区。其中极高危险区分布面积为 875.35 km²,占研究区总面积的 18.57%;高危险区分布面积为 1 823.17 km²,占研究区总面积的 38.71%;中危险区面积约 1 126.61 km²,占研究区总面积的 23.92%;低危险区面积约 885.32 km²,占研究区总面积的 18.8%。

(3)通过危险性结果对比法和 ROC 曲线检验,其结果与流域内滑坡灾害的实际情况较符合,AUC 值为 88.36%,表明模型评价精度较高,能够较客观准确地对研究区进行滑坡灾害危险性评价。

参考文献:

- [1] 王运生,苟富刚,陈宁,等.平武县石坎河汶川地震灾害链的成因条件研究[J].工程地质学报,2011,19(S1):141-149.
WANG Yunsheng, GOU Fugang, CHEN Ning, et al. The genetic condition research of hazard Chains of Wen chuano earthquake in Shikan River of Pingwu County[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(S1):141-149.
- [2] 豆敬翔.基于 GIS 的平武县地质灾害危险性评价研究[D].成都:成都理工大学,2012.
DOU Jingxiang. Based on GIS for Pingwu Country disaster of geological reseach[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [3] 刘丽娜,许冲,陈剑. GIS 支持下基于 CF 方法的 2013 年芦山地震滑坡因子敏感性分析[J].工程地质学报,2014,22(6):1176-1186.
LIU Lina, XU Chong, CHEN Jian. Landslide factor sensitivity analyses for landslide triggered by 2013 Lushan Earthquake Using Gis Platform and certainty factor method[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(6):1176-1186.
- [4] 刘艳芳,方佳琳,陈晓慧,等.基于确定性系数分析方法的秭归县滑坡易发性评价[J].自然灾害学报,2014,23(6):209-217.
LIU Yanfang, FANG Jialin, CHEN Xiaohui, et al. Evaluation of landslide susceptibility in Zigui County based on certainty factor method[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(6):209-217.
- [5] 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(S2):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(S2):3978-3985.
- [6] 杜常见,易庆林,周宝,等.基于 GIS 和加权信息量的三峡库区云阳县滑坡灾害易发性评价[J].三峡大学学报(自然科学版),2017,39(2):48-53.
DU Changjian, YI Qinglin, ZHOU Bao, et al. Landslide susceptibility assessment in Yunyang District of Three Gorges Reservoir based on GIS and weighted information value[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2017, 39(2):48-53.
- [7] 郑师谊,张绪教,杨艳,等.层次分析法在滇西怒江河谷潞江盆地崩塌与滑坡地质灾害危险性评价中的应用[J].地质通报,2012,31(2/3):356-365.
ZHENG Shiyi, ZHANG Xujiao, YANG Yan, et al. The application of analytic hierarchy process to the danger evaluation of collapse and slide in Lujiang basin segment of Nujiang valley, western Yunnan Province[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(2/3):356-365.
- [8] 杜国梁,张永双,高金川,等.基于 GIS 的白龙江流域甘肃段滑坡易发性评价[J].地质力学学报,2016,22(1):1-11.
DU Guoliang, ZHANG Yongshuang, GAO Jinchuan, et al. Landslide susceptibility assessment based on gis in Bailongjiang Watershed, Gansu Province[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(1):1-11.
- [9] 戴岚欣,许强,范宣梅,等.2017 年 8 月 8 日四川九寨沟地震诱发地质灾害空间分布规律及易发性评价初步研究[J].工程地质学报,2017,25(4):1151-1164.
DAI Lanxin, XU Qiang, FAN Xuanmei, et al. A preliminary study on spatial distribution patterns of landslides triggered by Jiuzhaigou earthquake in Sichuan on August 8th, 2017 and their susceptibility assessment[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4):1151-1164.
- [10] 刘肖姬.东川地区滑坡危险性的遥感和 GIS 评价[D].中国地质大学(北京),2015.
LIU Xiaoji. Dongchuan landslide hazard evaluation using remote sensing and GIS[D]. China University of Geosciences(Beijing), 2015.
- [11] 李军,周成虎.基于栅格 GIS 滑坡风险评价方法中网格大小选取分析[J].遥感学报,2003(2):86-92.
LI Jun, ZHOU Chenghu. Appropriate grid size for terrain based landslide risk assessment in Lantau Island, Hong Kong[J]. Journal of Remote Sensing, 2003(2):86-92.
- [12] 杜谦,范文,李凯,等.二元 Logistic 回归和信息量模型在地质灾害分区中的应用[J].灾害学,2017(2):220-226.
DU Qian, FAN Wen, LI Kai, et al. Geohazard susceptibility assessment by using binary logical regression and information value model[J]. Journal of Catastrophology, 2017(2):220-226.