

基于小流域单元的怒江州泥石流易发性评价¹

李益敏^{1,2}, 杨蕾¹, 魏苏杭^{1,3}

(1. 云南大学资源环境与地球科学学院, 云南 昆明, 650091; 2. 云南省地理研究所

高原山地灾害与

环境研究中心, 云南昆明 650223; 3. 昆明市国土规划勘察测绘研究院, 云南 昆明

650041)

【摘要】: 开展泥石流灾害易发性评价, 了解区域泥石流易发程度的整体特征和空间异质性, 为区域宏观层面国土空间布局及地质灾害防治规划等提供依据。基于小流域评价单元, 选择距断裂带距离、岩性、melton比率、流域延伸率、流域高差率、河流弯曲系数、流域水系密度、平均植被覆盖度、年均降水量、距道路距离、距居民点距离等 11 个评价指标, 采用确定性系数模型 CF 和多因子叠加重确定法开展怒江州泥石流易发性评价研究。将易发性评价结果划分为 5 个等级, 并以研究区历史泥石流灾害对易发性评价结果验证。结果表明: 极高易发区面积仅占研究区总面积的 8.31%, 但发生泥石流灾害的数量占泥石流总数的 29.75%; 高易发区的面积占总面积的 12.29%, 发生泥石流的数量占 22.59%。最后通过独立样本验证, 易发性评价模型性能 (AUC = 0.742) 良好。怒江州泥石流灾害易发性评价结果与历史泥石流灾害点空间分布较为吻合, 表明选取的易发性评价指标和评价方法可行, 评价结果可为怒江州防灾减灾工作提供参考。

【关键词】: 怒江州; 泥石流; 易发性评价; CF 模型; 基于 CF 的多因子叠加重法

【中图分类号】: P64 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2019)10-2419-10

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201910014

泥石流易发性评价是泥石流研究中的重点和难点, 对了解泥石流易发程度的整体特征和空间异质性, 为泥石流预防、预警预报、治理研究提供依据具有重要意义^[1, 2]。

易发性评价指标的选取、指标权重的确定和评价模型直接关系到泥石流易发性评价质量, 相关研究一直是学者们研究的热点^[3, 4]。评价因子选择的合理性是影响评价结果科学性的重要因素, 由于泥石流形成受多因素影响, 具有地域差异性, 因此泥石流易发性评价指标难以形成公认的体系, 但地形地貌、地质、水文、人类干扰因素对泥石流灾害起决定性作用, 是泥石

¹收稿日期: 2019-01-25; 修回日期: 2019-04-01

基金项目: 云南省科技厅—云南大学联合基金: “天空地”协同的高山峡谷区重大地质灾害隐患识别监测预警研究区; 云南省科技惠民计划项目 (N0. 2013CA014); 云南大学服务云南行动计划 (N0. 2016ZD07)

作者简介: 李益敏 (1965~), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向为 3S 技术在山地环境与地质灾害中的应用. E-mail: liyimin1965@163.com

流易发性的主要影响因素，成为学者们在选取泥石流易发性影响因子时参考的依据^[5, 6]；指标权重体现指标在泥石流易发性整体评价中的相对重要程度，常用方法有专家打分法、层次分析法、模糊评判法、信息量权数法、多因子叠加权重确定法^[7-11]等。专家打分法权重依赖于专家的专业背景和工作经验，主观性较大。层次分析法判断矩阵的构建在很大程度上依据经验得到，主观性较大。模糊评判法存在计算偏复杂，指标权重矢量的确定人为主观性较强等不足。信息量权数法、因子叠加权重确定法能避免因子权重确定的主观性而越来越多的应用于地质灾害评价中；易发性评价模型也从定性分析向定量化发展^[12-18]。近年来，随着 GIS 技术的发展，将定量评价方法与 GIS、RS、GPS 等空间信息技术相结合，实现泥石流灾害易发性评价结果的定量、空间化成为研究的热点和趋势^[19, 20]。

怒江州复杂的地形地貌和特殊的气候条件导致泥石流滑坡等地质灾害频繁，是云南省泥石流等地质灾害较为敏感和易发的区域，如 2010 年 8 月 18 日怒江州贡山县发生了死亡失踪 92 人的特大泥石流灾害。据云南省环境监测院提供的资料，怒江州分布有泥石流沟 410 条，已对当地人民的生命财产安全构成威胁。有专家学者开展过怒江州泥石流地质灾害敏感性研究和泥石流单沟的研究^[21-23]，但针对怒江州区域性泥石流易发性的研究相对缺乏，因此开展怒江州泥石流灾害易发性评价，为怒江州国土空间布局及地质灾害防治规划等提供依据具有重要作用。本文基于小流域单元以流域特征因子和传统泥石流灾害评价因子构建评价体系，采用确定性系数模型对怒江州泥石流易发性评价展开研究，了解区域泥石流易发程度的整体特征和空间异质性，完善规则格网单元忽略实际地形因素导致的泥石流易发性预测误差的研究，验证基于 CF 的多因子叠加确定权重方法的可行性，以期对怒江州防灾减灾工作提供参考。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

怒江州(25° 33' ~ 28° 23' N, 98° 09' ~ 99° 39' E)地处云南省西北部横断山脉纵向岭谷区，辖泸水、福贡、贡山和兰坪四县，总面积 14 584. 95 km²。州内高黎贡山、怒山山脉、云岭山脉近南北向延伸，澜沧江（湄公河）、怒江（萨尔温江）、独龙江（伊洛瓦底江）等深切峡谷平行南下，河谷谷坡坡度一般 35° ~ 45°、部分达 60° ~ 70°。地质构造复杂，褶皱带分布广泛，地层破碎，州内有独龙江-高黎贡山褶皱带，左贡-耿马褶皱系，贡山-六库褶皱带，三江褶皱系；立体气候明显，澜沧江 500 m ~ 2 900 m 以上至 4 500 m 高程为高山半寒冷半湿润气候。怒江流域年降水量 > 1 222 mm，高海拔 3 000 m 以上为寒冷半湿润气候，3 000 m 海拔以下河谷地带为温-热半湿润整个流域内降水充沛，植被极为发育，从谷底到山顶均有不同气温带的植物生长，原生态条件下多呈茂密森林或原始森林^[24]；受印度洋暖流和青藏高原冷空气共同影响，州内降水量不均衡，自西向东、自北向南逐渐减少，贡山县独龙江乡降水量可达 3000 mm，兰坪县兔峨乡降水量不足 1 000 mm。

1.2 数据源

数据源包括，1 : 5 万 DEM，1 : 25 万交通图、1 : 25 地质图，2016 年 landsat8 遥感影像（地理空间数据云），2012 ~ 2016 年怒江州气象站逐小时降水量（云南省气象局），泥石流灾害数据（怒江州国土部门），居民点数据（怒江州个乡政府及村庄），所有数据统一投影转换到西安 80 坐标系。

2 泥石流易发性评价研究

2.1 易发性评价单元选择

在泥石流易发性评价单元上，目前大多采用栅格单元，其无法体现泥石流发生的真实情况。小流域单元考虑了泥石流与沟谷的地形条件、物质条件以及降雨等因子的相互联系，能得出比较可靠的评价结果^[25]。

首先对 DEM 进行填充填洼，再利用多向流算法的 ArcSWAT 模型结合“burn-in”方案对 DEM 强迫以提高提取河网的准确度^[26]，并分别以 1，5，10 km² 的汇水阈值提取河网节点生成小流域，然后对比小流域矢量与遥感影像，选取合理汇水阈值并进行流域边界修正，最终以 5 km² 为阈值提取的河网和河网节点划分小流域，共得到 1414 个小流域单元，小流域平均面积为 10.39 km²，最大面积为 69.66 km²，最小面积为 0.06 km² (图 1)。

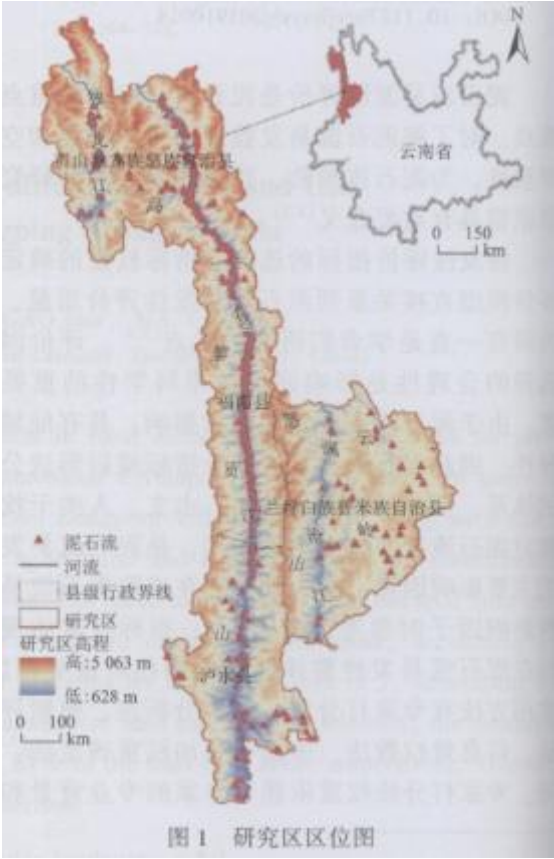


图 1 研究区区位图

2.2 评价指标体系构建

2.2.1 评价因子

泥石流的形成必须具备 3 个基本条件：(1) 1 利于泥石流发生和运动的地形条件；(2) 丰富的松散土石碎屑等固体物质来源；(3) 短期内充足的水源条件。因此从地质条件、地形地貌、水文环境及人类活动等基础条件分析，选取距断裂带距离、岩性、melton 比率、流域延伸率、流域高差率、河流弯曲系数、流域水系密度、平均植被覆盖度、年均降水量、距道路距离、距居民点距离等因子构建评价体系。

(1) 地质条件

a. 距断裂带距离

利用 ArcGIS 空间分析工具，根据统计的泥石流灾害点分布情况（图 2a），将距断裂带距离分为 5 个等级，其中有 146 个泥石流灾害点分布于断裂带附近 200 m 范围内，占比 40.22%，灾害点密度达 4.47 个/100 km²。

b. 岩性

根据岩土体的工程地质性质，按岩土体软硬程度分为松散岩组、软弱岩组、较坚硬岩组、坚硬岩组 5 个等级（图 2b）。

（2）地形地貌

a. melton 比率

melton 比率 R_m 是反映流域地势的指标^[27]，该值越大则流域的地势越陡峻。利用 ArcGIS Zonal 工具，根据公式（1）计算小流域 melton 比率，根据研究区泥石流分布情况，从研究区最小值 0.141 起，以 0.3 为步长，等间隔分级（图 2c）。

$$R_m = \frac{dH}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

式中：A 表示流域面积（ m^2 ）；dH 表示流域高差（m）。

b. 流域延伸率

流域延伸率 BE 是将流域面积相等的圆直径与流域长轴作比值^[28]。当其它条件一定时，流域越接近于圆形，流域延伸率越接近 1，则流域在出口的洪峰流量越大^[29]。根据泥石流分布情况，采用等间距法，将研究区小流域延伸率分成 5 个等级（图 2d）。

$$BE = \frac{2\sqrt{A}}{L\sqrt{\pi}} \quad (2)$$

式中：A 为流域面积（ m^2 ）；L 为流域长轴长度（m）。

c. 流域高差率

流域高差率 R_r 是流域高差与流域长轴长度之比值，如式（3），值越大则地势越陡^[30]。利用 ArcGIS Zonal 工具，以 0.3 为步长，将小流域高差率分成 5 个等级（图 2e）。

$$R_r = \frac{dH}{L} \quad (3)$$

式中：dH 为流域高差（m）；L 为流域长轴长度（m）。

d. 流域水系密度

流域水系密度 D_r 是流域内一定流量阈值生成的水系面积与流域面积之比， D_r 能指示流域内受到水流冲刷的区域所占的比例。利用 Arc HydroTools 工具，以 100 个栅格单元汇水面积为阈值生成水系来计算流域水系密度，根据泥石流分布情况，将研究区小流域水系密度分为 5 个等级（图 2f），计算公式如下：

$$D_i = \frac{A_i N_{100}}{A} \quad (4)$$

式中： A_i 为栅格面积（ m^2 ）； N_{100} 为小流域内水系的栅格总数（个）； A 为小流域面积（ m^2 ）。

e. 河流弯曲系数

河流弯曲系数越大，河流流经的区域相对越多^[31]。通过属性表中的字段计算功能计算各段河流的弯曲系数，以小流域单元为统计单元，利用 ArcGIS 的 Spatial Join 功能，连接河流与流域，将各小流域内级别较高的河流的弯曲系数作为该流域的单元指标值，统计泥石流分布情况将河流弯曲系数分为 5 个等级（图 2g）。

f. 平均植被覆盖度

植被覆盖度 VFC 能反应一段时间内植物对雨水的截留作用。考虑到研究区的植被情况，基于像元二分模型的基础^[32]，取研究区累积概率为 95%和 5%时的 NDVI 值作为式(4)中的最大值和最小值。先计算各栅格 VFC，再计算各小流域单元的平均 VFC，根据泥石流分布情况，将其分为 5 个等级（图 2h）。计算公式如下：

$$VFC = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{95} - NDVI_{min}} \quad (4)$$

式中：NDVI 为归一化植被指数。

(3) 水文环境

a. 年均降水量

采用研究区 87 个气象站点 2012–2016 年逐小时年均降水量，利用 ArcGIS 空间插值、分区统计功能获得降水量值，并根据泥石流分布情况，以 300 mm 降水量作为步长分级（图 2i）。

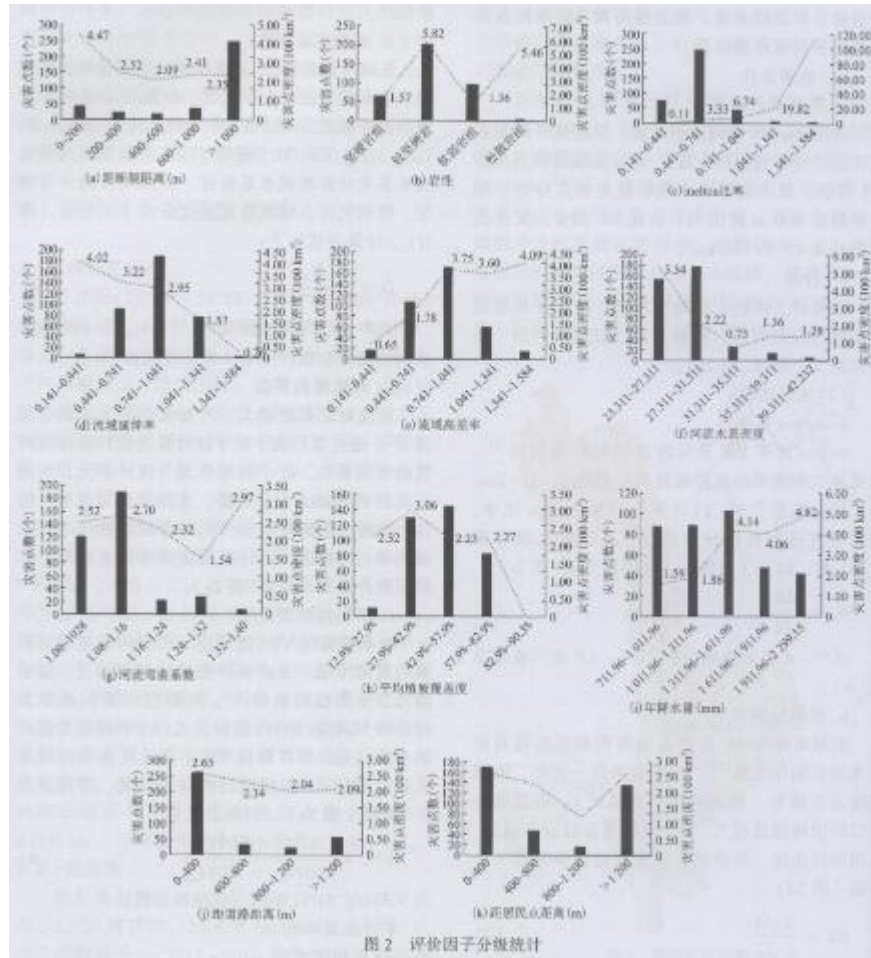
(4) 人类活动

a. 距道路距离

距离道路的远近可以反映人类活动的剧烈程度。利用 ArcGIS 工具以 400 m 为单位建立多环缓冲区，根据泥石流分布情况，将距道路距离等间隔分为 5 个等级（图 2j），其中 0~400 m 是泥石流灾害点密度最大达 2.65 个 100 km^2 。

b. 距居民点距离

距居民点越近，人类耕作、建房、修路等活动就越频繁，产生固体松散堆积物的可能性就越大^[47]，根据研究区泥石流分布情况，将距离居民点距离分为 5 级（图 2k）。



2. 2.2 评价因子多重共线性诊断

多重共线性是指模型设计矩阵数据列之间存在着线性相关的现象。为避免变量的高度相关关系使模型结果失真，从研究区 454 个历史泥石流灾害中随机选取 80%(363) 个已发生泥石流灾害点作为模型测试样本，提取每个样本的每个因子各等级值，在 SPSS 中进行多重共线性诊断，统计其方差膨胀因子 (VIF)。结果表明，所有评价因子的 VIF 均小于 3，容差都小于 1，说明因子间出现多重共线性的可能性小 (表 1)。

表 1 各评价因子 VIF 计算结果

	共线性统计	
	容差	VIF
距断裂距离	0.430	2.327
岩性等级	0.740	1.351
Melton 比率	0.456	2.193
流域延伸率	0.763	1.311
流域高差率	0.973	1.027
河流弯曲系数	0.990	1.010
流域水系密度	0.991	1.009
平均植被覆盖率	0.934	1.071
多年平均降雨量	0.806	1.240

距道路距离	0.972	1.029
距居民点距离	0.976	1.024

2.3 易发性评价方法

2.3.1 评价模型

确定性系数模型 (CF) 是一个概率函数, 一般用来判断某事件发生时各指标的贡献率。计算公式如下:

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_s(1 - PP_s)}, & \text{if } PP_a \geq PP_s \\ \frac{PP_s - PP_a}{PP_s(1 - PP_s)}, & \text{if } PP_a \leq PP_s \end{cases} \quad (5)$$

式中: PP_a 表示泥石流灾害在影响因子 a 中发生的条件概率, 通常以影响因子 a 中某一单元发生泥石流数目与该单元面积 (m^2) 的比值来计算; PP_s 表示泥石流灾害在研究区 S 中发生的概率, 通常以整个研究区内泥石流的数目除以该研究区的总面积 (m^2) 的商来表示。

2.3.2 因子权重

基于 CF 的多因子叠加确定权重法是根据评价单元每个因子的 CF 值直接代表该因子对泥石流灾害发生的贡献值, 确定各因子相对权重, 具体步骤如下:

(1) 影响因子 CF 值叠加计算

逐一叠加各评价因子, 其结果为参与合并计算的因子对泥石流灾害的综合贡献值。逐一叠加所有因子则所得结果为所有因子的泥石流发生总贡献值; 部分参与叠加因子图层则结果为这部分因子的综合贡献。

假设参与合并两个因子的 CF 值分别为 x 和 y , 合并后的结果为 Z , 合并公式如式 (6):

$$Z = \begin{cases} x + y - x * y, & x \geq 0, y \geq 0 \\ \frac{x + y}{1 - \min(|x|, |y|)}, & x * y < 0 \\ x + y + x * y, & x < 0, y < 0 \end{cases} \quad (6)$$

为方便量化结果, 将合并后的 CF 值进行分类, 分为 5 个级别, 根据上式 (6) 逐步叠加合并所有影响因子, 合并结果用 Z_{all} 表示, 合并后各级别的分段百分比用 Z_{all-i} ($i=1, 2, \dots, 5$) 表示; 根据上式 (6) 逐步叠加合并各影响因子 (某因子除外), 合并结果用 $Z_{某因子}$ 表示, 合并后各级别的分段百分比分别为 $Z_{某因子-i}$ ($Z = 1, 2, \dots, 5$) (表 2)。

表 2 CF 级别划分

分级	CF 值分段	对地质灾 害的贡献	所有因子叠加	除某因子外 其他所有 因子叠加
1	<-0.6	小	Z_{all-1}	$Z_{某因子-1}$
2	-0.6~0.2	较小	Z_{all-2}	$Z_{某因子-2}$
3	-0.2~0.2	不确定	Z_{all-3}	$Z_{某因子-3}$
4	0.2~0.6	较大	Z_{all-4}	$Z_{某因子-4}$
5	>0.6	大	Z_{all-5}	$Z_{某因子-5}$

(2) 某影响因子 CF 值的贡献计算

当计算某因子图层的 CF 值的贡献时，可根据式（7）计算该图层的 CF 值贡献。

$$\Delta Z_{某因子-i} = Z_{all-i} - Z_{某因子-i} \quad (7)$$

其中： $Z_{某因子-i}$ 为某影响因子 CF 合并分段贡献值； Z_{all-i} 为所有影响因子 CF 合并分段结果值； $Z_{某因子-i}$ 为除该影响因子外其他所有因子 CF 合并 分段结果值； i 为 CF 分段级别， $i=1, 2, \dots, 5$ 。

(4) 易发性评价（指数）

易发性评价或易发性评价指数可以从整体上反应泥石流的易发程度，指数越大，灾害发生的可能性越高。按照公式（9）计算评价单元的泥石流易发性值：

$$G = \sum_{i=1}^n W_i * CF_i \quad (9)$$

式中： W_i —因子权重； CF_i 因子量化值（CF 值）。

3 结果与分析

3.1 CF 值及因子权重

统计测试样本即 80% (363) 个泥石流灾害点分布，根据公式（5）计算因子各等级 CF 值（表 3），利用 ArcGIS 空间连接工具将结果连接到 1 414 个小流域；

根据公式（6）（7）（8）（9）计算各指标分段综合贡献值及各指标归一化权重。根据基于 CF 的多因子叠加确定权重法计算指标的重要性， $mel-ton$ 比率、流域高差率、流域水系密度、多年平均降雨量、平均植被覆盖度在 11 个指标中对泥石流易发性影响最显著，河流弯曲系数则是重要性最低的指标（表 4）。

由于研究区北部贡山县、福贡县独龙江、怒江流域地势高差大， $mel-ton$ 比率 $0.741 \sim 1.041$ ，降水丰富年均 2 000 mm 左右，因此泥石流易发性高；研究区东南部澜沧江流域、云岭山脉，平均植被覆盖度 VFC 高 40%~50%，年均降水 700~1 000

mm, 因此泥石流易发性较低。

表 3 指标 CF 计算结果

指标因子	分级数	分类级别	CF	指标因子	分级数	分类级别	CF
距断裂带距离	1	0-200	0.427	河流弯曲系数	1	1.00 ~ 1.08	0.005
	2	200-400	0.005		2	1.06-1.16	0.071
	3	400-600	-0.163		3	1.16-1.24	-0.074
	5	600-1 000	-0.039		4	1.24-1.32	-0.379
	5	>1 000	-0.061		5	1.32-1.40	0.152
岩性	1	坚硬岩组	0.045	流域水系密度	1	23.311~27.311	0.517
	2	较坚硬岩	-0.030		2	27.311~31.311	-0.112
	3	软弱岩组	0.198		3	31.31~35.311	-0.705
	4	松散岩组	0.073		4	35.311~39.311	-0.453
Melton 比率	1	0.141-0.441	-0.955	年均降水量	5	39.311~42.232	-0.483
	2	0.441 ~ 0.741	0.241		1	711.96-1 011.96	-0.362
	3	0.741-1.041	0.612		2	1 011.96-1 311.96	-0.254
	4	1.041 ~ 1.341	0.852		3	1 311.96-1 611.96	0.385
	5	1.341 ~ 1.584	0.953		4	1 611.96-1 911.96	0.373
流域延伸率	1	0.293 ~ 0.443	0.367	平均植被覆盖度	5	1 911.96-2 299.15	0.467
	2	0.443 ~ 0.593	0.215		1	12.9%-27.9%	-0.072
	3	0.593 ~ 0.743	0.147		2	27.9%-42.9%	0.175
	4	0.743 ~ 0.893	-0.369		3	42.9%-57.9%	-0.108
	5	0.893-0.992	-0.895		4	57.9%-72.9%	-0.092
流域高差率	1	0.089-0.189	-0.737	距道路距离	5	72.9%-90.3%	-1.000
	2	0.189-0.289	-0.285		1	0-400	0.052
	3	0.289-0.389	0.324		2	400-800	-0.064
	4	0.389-0.489	0.295		3	800-1 200	-0.184
	5	0.489 ~ 0.625	0.377		4	>1 200	-0.163
				距居民点距离	1	0-400	0.057
					2	400-800	-0.085
					3	800-1 200	-0.503
					4	>1 200	0.045

表 4 各指标叠加后 Z 分段百分比及归一化权重

指标	<-0.6	-0.6--0.2	-0.2-0.2	0.2-0.6	>0.6	归一化权重
距断裂距离	53.559	9.929	6.250	14.550	15.712	0.042
岩性	52.659	11.600	4.335	12.594	18.812	0.063
melton 比率	38.203	20.949	13.672	14.350	12.826	0.311
流域延伸率	52.946	9.122	8.695	9.390	19.848	0.063
流域高差率	54.307	9.755	12.441	10.690	12.807	0.140
河流弯曲系数	51.199	9.856	5.594	12.849	20.503	0.010
流域水系密度	50.187	10.279	8.409	18.113	13.012	0.127

多年平均降雨量	47.862	8.241	10.380	10.938	22.579	0.110
平均植被覆盖度	57.625	8.600	4.660	12.822	16.293	0.090
距道路距离	52.233	8.516	6.443	12.571	20.237	0.024
距居民点距离	51.046	9.113	5.968	13.714	20.160	0.020

3.2 易发性分区

根据自然断点法 (Natural Break) 将易发性分为 5 个等级, 低易发区 $[-0.612\ 5, -0.345\ 0]$ 、较低易发区 $[-0.345\ 0, 0.012\ 1]$ 、中易发区 $[0.012\ 1, 0.107\ 0]$ 、较高易发区 $[0.107\ 0, 0.202\ 8]$ 、高易发区 $[0.202\ 8, 0.483\ 1]$, 得到最后的易发性分区图 (图 3)。

从图 3 中可以看出, 极高易发区和高易发区主要分布在贡山县独龙江干流、福贡县怒江干流及其支流沿岸地区, 与历史泥石流灾害点分布较为吻合。

3.3 结果检验

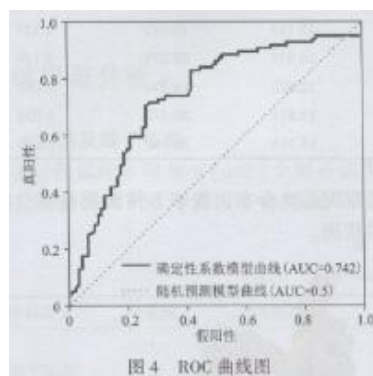
为保证检验结果独立性, 用研究区未参与评价的 20%(91 个) 历史泥石流灾害点验证易发性分区合理性。从极高易发区到极低易发区, 泥石流灾害点密度逐渐减小, 各等级易发性分区面积也逐渐减少, 检验样本数与各泥石流易发区面积的比值逐渐增加 (表 5)。

ROC 曲线 (图 4) 是二分类学习中常用的评价分类器效果的曲线, 其评价更为全面、客观, 不会受到正负样本比例的影响。AUC 表示 ROC 曲线下的面积, 是度量分类模型结果的一个标准, 其值介于 0.5~1 之间, 越接近 1, 则模型模拟值越接近样本值。通过未参与评价的 20%泥石流灾害点 (91) 验证, 其纵轴代表正确预测出的泥石流小流域占有泥石流小流域个数的比例, 横轴代表正确预测出的非泥石流小流域占有非泥石流小流域个数的比例, 其中 AUC 为 0.742 高于 0.7, 标准误差 0.037, 准确性较好 (图 4)。说明基于小流域单元的泥石流易发性评价能够较好的反应实际泥石流分布, 能够为预测泥石流空间分布提供依据。



表 5 易发分区面积比例和泥石流灾害点在分区类别中的分布比例

分区类别	面积 (km ²)	面积比例 (%)	泥石流 (个)	泥石流比例 (%)	泥石流密度 (个·km ²)	小流域单元个数 (个)
极低易发区	5 111.72	35.05	12	13.22	0.08	325
低易发区	3 358.52	23.03	13	14.33	0.09	288
中易发区	3 095.02	21.22	18	20.11	0.13	310
高易发区	1 792.67	12.29	21	22.59	0.14	247
极高易发区	1 211.94	8.31	27	29.75	0.19	244
合计	14 569.87		91			1 414



4 结论

(1) 相比规则的栅格单元,小流域评价单元能够更好的反应实际地貌单元及孕灾环境。基于 CF 的多因子叠加确定权重法是基于历史泥石流灾害点对小流域泥石流易发性贡献值的基础上,避免了主观确定权重带来的误差。

(2) 本研究中 melton 比率、流域高差率、流域水系密度、多年平均降雨量、平均植被覆盖度是 11 个评价指标中影响泥石流活动最显著的指标。研究区内泥石流高易发区多分布于贡山县、福贡县地势陡峻 melton 比率 0.741~1.041、多年平均降雨量为 2 000 mm 地区。

(3) 采用基于 CF 的多因子叠加权重法和确定性系数模型对研究区泥石流易发性评价。极高易发区占比 8.31%,极低易发区占比 35.05%,经过独立样本的合理性检验和 ROC 曲线检验,表明预测精度良好。

(4) 怒江州地势陡峻,水系密度大,降水丰富,地质环境复杂,泥石流易发性南北差异大,独龙江、怒江沿岸有居民点分布的区域,应加强群测群防工作,预防灾害及降低灾害损失。

参考文献

[1]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.HU R L, FAN L F, WANG S S, et al. Theory and method for landslide risk assessment - current status and future development[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1):76-84.

[2]程英建,石豫川,石胜伟,等.数量化理论在泥石流易发性预测中的应用[J].水文地质工程地质,2015,42(1):140-145.CHENG Y J, SHI Y C, SHI S W, et al. Prediction of debris flow occurrence based on the quantification theory [J], Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(1):140-145.

[3]岳溪柳,黄玫,徐庆勇,等.贵州省喀斯特地区泥石流灾害易发性评价[J].地理信息科学学报,2015,17(11):1395-1403.YUE X L, HUANG M, XU Q Y, et al. The Susceptibility Assessment of Debris Flow in Karst Region of Guizhou Province[J], Journal of Geo-information Science, 2013, 17(11):1395-1403.

[4]陈剑,黎艳,许冲.金沙江干热河谷区泥石流易发性评价模型及应用[J].山地学报,2016,36(4):460-467.CHEN J, LI Y, XU C. Susceptibility Assessment Model of Debris Flows in the Dry-hot Valley of the Jinsha River and Its Application [J]. Mountain Research, 2016, 36(4):460-467.

[5]胡凯衡,崔鹏,韩用顺,等.基于聚类和最大似然法的汶川灾区泥石流滑坡易发性评价[J].中国水土保持科学,2012,10(1):12-18.HU K H, CUI P, HAN Y S, et al. Susceptibility mapping of landslides and debris flows in 2008 Wenchuan earthquake by using cluster analysis and maximum likelihood classification methods [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(1):12-18.

[6]焦方谦,赵新生,陈川,等.证据权模型在泥石流灾害易发性评价中的应用[J].干旱区地理,2013,36(6):1111-1124.JIAO F Q, ZHAO X S, CHEN C, et al. Debris flow hazard susceptibility evaluation application with Weighted Evidences Model [J]. Arid Land Geographic, 2013, 36(6):1111-1124.

[7]郭瑞,马富存,郭一兵,等.基于层次分析法的泥石流易发性评价[J].东华理工大学学报(自然科学版),2016,39(4):

347-351. GUO R, MA F C, GUO Y B, et al. Debris Flow Evaluation of Occurrence Easiness Based on AHP [J]. Journal of East China University of Technology, 2016, 39(4), 347-351.

[8] 宁娜, 马金珠, 张鹏, 等. 基于 GIS 和信息量法的甘肃南部白龙江流域泥石流灾害危险性评价[J]. 资源科学, 2013, 35(4) : 892-899. NING N, MA J Z, ZHANG P, et al. Debris Flow Hazard Assessment for the Bailongjiang River, Southern Gansu [J]. Resources Science, 2013, 35(4) : 892-899.

[9] 李芳, 梅红波, 王伟森, 等. 降雨诱发的地质灾害气象风险预警模型: 以云南省红河州监测示范区为例[J]. 地球科学, 2017, 42(9) : 1637-1646. LI F, MEI H B, WANG W S, et al. Rainfall-Induced Meteorological Early Warning of Geo-Hazards Model : Application to the Monitoring Demonstration Area in Honghe Prefecture, Yunnan Province [J]. Earth Science, 2017, 42(9) : 1637-1646.

[10] 刘林通, 孟兴民, 郭鹏, 等. 基于流域单元和信息量法的白龙江流域泥石流危险性评价[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2017, 53(3) : 292-299. LIU L T, MENG X M, GUO P, et al. Assessment of debris flow hazards in the Bailongjiang River based on the catchment unit and information value method [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2017, 53(3) : 292-299.

[11] 刘艳辉, 刘传正, 唐灿, 等. 基于确定性系数模型的地质灾害多因子权重计算方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1) : 92-97. LIU Y H, LIU C Z, TANG C. CF-based multi-factor overlay method to determine weights of the factors for geo-hazards [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(1) : 92-97.

[12] 谭玉敏, 郭栋, 白冰心, 等. 基于信息量模型的涪陵区地质灾害易发性评价[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(12) : 1554-1562. TAN Y M, GUO D, BAI B X, et al. Geological Hazard Risk Assessment Based on Information Quantity Model in Fuling District, Chongqing City, China [J], Journal of Geo - information Science, 2015, 17(12) : 1554-1562.

[13] 王骏, 丁明涛, 庙成, 等. 基于 GIS 和 AHP 的芦山地震灾区泥石流危险性评价[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11) : 1580-1587. WANG J, DING M T, MIAO C, et al. Hazard Assessment of Debris Flow Based on GIS And AHP In Lushan Earthquake Disaster Area [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(11) : 1580-1587.

[14] CONFORTI M, PASCALE, S, ROBUSTELLI G, et al. Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River catchment (northern Calabria, Italy) [J]. Catena, 2014, 113(1):236-250.

[15] 蒋德明, 李益敏, 鲍华姝, 等. 泸水县滑坡孕灾环境因素敏感性研究[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(4): 109-119. JIANG D M, LI Y M, BAO H S, et al. Study on sensitivity of disaster-pregnant environmental factors of landslide in Lushui County [J], Journal of Natural Disasters, 2016, 25(4) : 109-119.

[16] 田春山, 刘希林, 汪佳, 等. 基于 CF 和 Logistic 回归模型的广东省地质灾害易发性评价[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6) : 154-161. TIAN C S, LIU X L, WANG J, et al. Geohazard susceptibility assessment based on CF model and Logistic Regression models in Guangdong [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, 43(6) : 154-161.

[17] DIEU T B, BISWAJEET P, OWE L, et al. Landslide susceptibility assessment in the Hoa Binh province of Vietnam : A comparison of the Levenberg - Marquardt and Bayesian regularized neural networks [J]. Geomorphology,

2012, 171 - 172(6): 12-29.

[18]Pradhan B, Lee S. Delineation of landslide hazard areason Pe-nang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regres-sion , and artificial neural network models [J]. EnvironmentalEarth Sciences, 2010, 60(5) : 1037-1054.

[19]王宁涛, 彭轲, 黎清华, 等. 基于 RS 和 GIS 的地质灾害易发性定量评价: 以湖北省五峰县为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(6) : 221-229. WANG N T, PENG K, LI Q H, et al. Quantitative evaluation of geological disaster liability based on RS &GIS analysis : Acase study of Wufeng County, Hubei Province[J]. Earth Sci-ence Frontiers, 2012, 19(6) : 221-229.

[20]唐川, 马国超. 基于地貌单元的小区域地质灾害易发性分区方法研究[J], 地理科学, 2015, 35(1): 91-98. TaNG 川, MA Lr C. small Regional Geohazards susceptibilityMapping Based on Geomorphic Unit [J]. scientia Geographica Sinica, 2015, 35(1) : 91-98.

[21]张杰, 李世凯, 甘云兰, 等. 云南贡山 8. 18 特大泥石流灾害调查分析与启示[J]. 地质工程学报, 2015, 23(3): 373-382. ZHANG J, LI S K, GAN Y L, et al. Analysis and Revelation of ijiant Debris Flow Hazads of August 18, 2010 in GongshanCounty, Yunnan Povince [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(3) : 373-382.

[22]苏鹏程, 韦方强, 谢涛, 等. 云南贡山 8. 18 特大泥石流成因及其对矿产资源开发的危害[J]. 资源科学, 2012, 34(7) : 1248-1256. SU P C , WEI F Q, XIE T, et al. Causal Analysis of Debris Flow on August 18, 2010 in Gongshan, Yunnan Province and Its Harm to the Development and Utilization of Mineral Re-sources[J]. Resources Science, 2012, 34(7) : 1248-1256.

[23]唐川. 怒江流域泥石流敏感性空间分析[J]. 地理研究, 2005, 24(2) : 178-185. TANG C. Susceptibility spatial analysis of debris flows in theNujiang River Basin of Yunnan [J], Geographical Research, 2005, 24(2) : 178-185.

[24]骆银辉, 周道银, 朱荣华. 世界自然遗产—三江并流区生态环境特征及其成因初探[J]. 地质灾害与环境保护, 2008, 19(2) : 94-97. LUO Y H, ZHOU D Y, ZHU R H. primary study on environ-ment of geology and bionomics in the area of world natural in-heritance-the three rivers juxtaposition [J]. Journal of Geolog-ical Hazards and Environment Preservation, 2008, 19(2) : 94-97.

[25]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 S H, WU GUANG, ZANG QIAO, et al. Debris-flow susceptibility assessment using the characteristic factors of acatchment [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(2) : 142-149.

[26]郑子彦, 张万昌, 郇庆国. 基于 DEM 与数字化河道提取流域河网的不同方案比较研究[J]. 资源科学, 2009, 31(10) : 1730-1739. ZHENG Z Y, ZHANG W C, TAI Q G. A Comparative Study on Different Schemes of Automatic River System Extraction Based on DEM and Vector Channels[J]. Resources Science, 2009, 31(10) : 1730-1739.

[27]MELTON M A. The Geomorphic and Paleoclimatic Significance of Alluvial Deposits in Southern Arizona : A Reply [J]. The Journal of Geology, 1965, 73 (1) : 102-106.

[28]SCHUMM S A. Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey [J]. Geological Society of America Bulletin, 1956, 67 (5) : 597-646.

[29]曹子月,姚成,李致家,等. 基于 DEM 的大别-皖南山区平均洪峰滞时定量分析[J]. 湖泊科学, 2017, 29(3): 765-774. CAO Z Y, YAO CHENG, et al. DEM-based quantitative analysis of average peak time lag of Dabie - South Anhui mountain area [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(3) : 765-774.

[30]杨涛, 唐川, 常鸣, 等. 基于数值模拟的小流域泥石流危险性评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 27(1) : 197-204. YANG T, TANG C, CHANG M, et al. Hazard Assessment of Debris Flow in Small Watershed Based on Numerical Simulation [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 27(1) : 197-204.

[31]姚文艺, 郑艳爽, 张敏, 等. 论河流的弯曲机理[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 533-540. YAO W Y, ZHENG Y S, ZHANG M, et al. Discussion on the mechanism of river meandering [J]. Advances in Water science, 2010, 21(4) : 533-540.

[32]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(4) : 153-159. LI M M, WU B F, YAN C Z, et al. Remote Sensing Estimation of Vegetation Coverage in the Upper Miyun Reservoir [J]. Resources Science, 2004(4) : 153-159.