

基于确定性系数模型的泸水市泥石流易发性评价

李益敏^{1,2}, 李驭豪¹, 赵志芳¹

(1. 云南大学 资源环境与地球科学学院, 昆明 650500; 2. 云南省地理研究所 高原山地灾害与环境研究中心, 昆明 650223)

摘要:以泥石流灾害频发的怒江州泸水市为研究区,选取坡度、高程、河流距离、道路距离、岩性、断裂带距离、降雨量、NDVI、土地利用 9 个影响因子,建立了泸水市泥石流灾害易发性评价体系。采用确定性系数模型(CF 模型)进行了泥石流灾害易发性评价,将泥石流易发性评价结果分为极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区 4 个等级。结果表明:研究区高易发区及以上级别的易发区内发生的泥石流灾害数量占总数的 95.32%,易发性评价结果正确率达到 81.99%,表明选取的评价指标合理,CF 模型适用于泸水市的泥石流灾害易发性评价研究。泸水市泥石流灾害高易发区也是居民点集中分布区,评价分区结果对泸水市的泥石流灾害防灾减灾具有一定的借鉴作用。

关键词:泥石流灾害; 易发性评价; 确定性系数模型; 泸水市

中图分类号:P642.23

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)04-0336-07

Assessment on Susceptibility of Debris Flow in Lushui Based on the Certain Factor Model

LI Yimin^{1,2}, LI Yuhao¹, ZHAO Zhifang¹

(1. College of Resources, Environment and Earth Science, Yunnan University, Kunming 650500, China;

2. Tableland Mountain Hazards and Environment Research Center, Yunnan Institute of Geography, Kunming 650223, China)

Abstract: Lushui City, Nujiang State was taken as the study area, where debris flow occurs frequently. Nine impact factors including slope, elevation, river, road, lithology, fault, precipitation, NDVI and land use were selected to build the susceptibility assessment system. The certain factor model (CF model) was used to evaluate the susceptibility, result of which can be divided into 4 areas of extremely high susceptibility, high susceptibility, middle susceptibility and low susceptibility. The results showed that the events of debris flow occurred in the area which had a susceptibility above high accounted for 95.32% of the total debris flow events, the correct rate of susceptibility evaluation results reached up to 81.99%, indicating that selected indices were reasonable and CF model was practicable in susceptibility assessment. The high susceptibility area of debris flow in Lushui City was also the distribution area where settlements were concentrated. Therefore, the evaluation results could provide the reference for debris flow disaster prevention and mitigation in Lushui City.

Keywords: debris flow disaster; susceptibility assessment; certain factor model; Lushui City

泥石流是我国最频发的地质灾害之一,因其暴发突然、来势凶猛、危害严重而倍受关注,成为研究热点^[1-5]。泥石流的易发性评价可以直观反映泥石流灾害的空间分布,也为预防潜在灾害的战略准备提供参考,对于预测预警、防灾减灾工作意义重大^[2]。易发性评价指标^[6-13]、评价模型^[6-13]和指标权重^[14-15]的合理性关系到泥石流易发性评价结果的科学性和适合性,是易发性评价研究关键。泥石流易发性与地形地貌、地层岩性、降雨特征、植被覆盖、人类干扰等因素

相关,构成泥石流易发性主要评价指标。陈剑等^[1]选取地貌熵值、岩土类型、坡向、坡度、植被归一化指数、月均降雨量 6 个因子作为泥石流的易发性评价因子;谭玉敏等^[3]选取坡度、坡向、累计汇水面积、地层岩性、水域、降雨量、植被和土地利用分类 8 个影响因子;岳溪柳等^[5]选取土壤侵蚀、坡度、坡向、岩石性质、土地利用方式、归一化植被指数(NDVI)、到沟谷的距离及 >25 mm 降雨日数 8 个因子开展贵州省喀斯特地区泥石流易发性研究;Jiang 等^[14]以断层距离、

岩性、高程、坡度、坡向、河流距离、植被覆盖(NDVI)等作为评价指标因素,开展了云南省地质灾害易发性评价研究。近年,泥石流评价方法和技术手段不断提升,GIS与模型方法结合应用于泥石流灾害易发性评价研究中,实现评价结果的定量化、空间化成为趋势。GIS技术与信息量^[3-6]、层次分析法^[7-8]、聚类和最大似然法^[9-10]、神经网络^[11-12]、证据权重法^[13]、回归模型^[11,14]、确定性系数(CF)^[15-17]等模型方法在泥石流评价中得到广泛应用,取得了良好的效果。指标某一因子的权重是指该因子在泥石流评价整体中的相对重要程度,代表了不同因子作用或贡献的大小。权重确定方法一类是以专家打分法(德尔菲法为代表),通过充分挖掘专家的知识、经验,主观性较强而受到质疑。另一类是将专家经验与数学统计方法相结合,如层次分析法、模糊权重法,该类方法计算中存在个人主观判别的参与,大量已知样本的获取难度等问题。CF值直接代表着各因子对地质灾害的贡献这一物理基础,该方法模型简单,应用方便,可较好应用于地质灾害因子权重研究中^[15-17]。因而,本文采用CF模型和GIS方法开展泸水市泥石流易发性评价研究。

1 研究区概况

泸水市位于云南省西北部,世界自然遗产地三江并流区,怒江傈僳族自治州南部,濒临欧亚和印支两大板块的结合部,构造运动强烈,地质环境复杂,环境脆弱。泸水市最高海拔4 161.6 m,最低海拔738 m,相对高差达3 423.6 m,为典型的高山峡谷地貌。国际河流怒江自北向南流经泸水市,怒江两岸支流大多垂直入江,干支流构成羽状水系。研究区地形地貌、构造复杂、河流密布、河流坡降比大,降水丰富,年均降水量1 199.7 mm,特殊的地理环境和复杂的大气环流使得研究区水系发育密集,立体气候突出,加之筑桥修路、采矿、垦荒等人类活动的影响,这些因素的综合叠加影响为泥石流灾害的发生孕育了条件,造成

区内泥石流灾害较为发育^[18]。

2 数据与研究方法

2.1 数据源与评价单元

数据源包括1:5万地形图、1:25万地质图、交通图、高分一号遥感影像、降水数据以及泸水市泥石流灾害历史数据等(包括64个有具体空间关系的灾害点,见表1)。

评价单元的选择取决于空间数据的比例尺与精度,对于研究区较大、比例尺较小的空间数据,一般以栅格或规则网格为评价单元,并且栅格单元在GIS软件中易于计算和处理。本研究区东西横距56.19 km,南北纵距108.27 km,故采用25 m×25 m的栅格单元作为泥石流易发性评价单元。

表1 泸水市泥石流灾害信息

泥石流灾害发生地点	时间(年-月-日)	成因
老窝镇银坡村茅草坪	2014-07-01	连续多天强降雨
老窝镇荣华村	2014-07-11	连续多天强降雨
老窝镇荣华村打虎箐、磨坊河	2013-07-14	连续多天强降雨
古登乡古登河	2014-07-10	连续多天强降雨
古登乡政府法庭旁边	2016-07-11	连续降雨
秤杆乡勒墨村	2014-07-10	连续多天强降雨

2.2 指标体系构建

结合泸水市的地形地貌、地质构造、气候、降水等环境特征以及泥石流灾害的分布规律,选取坡度、高程、河流距离、道路距离、岩性、断裂带距离、降雨量、NDVI、土地利用9个影响因子作为泥石流灾害易发性评价指标因子。

各个因子的分级情况参考相关论文。其中,坡度分为5个等级^[18],高程的分级按泸水市的垂直气候带谱界线为标准划分为5个等级,离河流、道路、断裂带距离则根据泸水市的面积大小,以200 m为单位进行分级^[19]。岩性按照工程地质岩组GB50218—1994和GB50021—2001分为4类,土地利用类型按一级分类。各评价指标分级(分类)具体见表2。

表2 泸水市泥石流灾害评价指标分级(分类)

评价指标	分级(分类)
坡度/(°)	0~8,8~15,15~25,25~35,>35
高程/m	<1200,1200~1600,1600~1900,1900~2400,2400~2700,>2700
岩性	坚硬岩组、较坚硬岩组、软弱岩组、松散岩组
河流距离/m	0~200,200~400,400~600,600~800,800~1000,>1000
道路距离/m	0~200,200~400,400~600,600~800,800~1000,1000~1200,>1200
断裂带距离/m	0~200,200~400,400~600,600~800,800~1000,1000~1200,>1200
降雨量/mm	<900,900~1000,1000~1100,1100~1200,>1200
NDVI	<0,0~0.18,0.18~0.25,0.25~0.35,>0.35
土地利用类型	未利用土地,耕地,草地,林地,水体,建设用地

(1) 坡度。坡度的大小会对泥石流灾害的发生产生影响。坡度越大,泥石流发生的频率越高。首先从泸水市的 DEM 数据中将坡度提取出来,后用 ArcGIS 的重分类工具按照分级标准将坡度分为 5 个等级。

(2) 高程。不同高程范围内人类活动的范围也会不同,而且高程会对植被的类型、植被的覆盖度以及降水量产生影响,因而选取其作为评价因子之一。与坡度的操作相类似,将高程从 DEM 数据中提取出来,按照泸水市的垂直气候带谱进行分级,分为 6 个等级。

(3) 离河流距离。河流水系对泥石流灾害发生的影响比较大,河流两岸的岩土体受到河流水体侧蚀的影响,抗侵蚀能力较弱,降水增加水位上升使岩土体难以承受冲击力可能引发泥石流灾害。将河流从 DEM 数据中提取出来,并进行缓冲区分析,建立多环缓冲区,将其分为 6 个等级。

(4) 离道路距离。人类工程活动对于泥石流灾害的影响较大,研究区的人类工程活动以筑路、采矿和城镇建设为主。考虑到土地利用因子已反映采矿和城镇建设对泥石流的影响,且山区道路作为线性工程贯穿整个研究区,曲折盘旋使得开挖的土方量较大,因此将道路纳入评价指标。道路的分级处理方式与水系相同,将其分为 7 个等级。

(5) 岩性。泥石流发生的概率大小与岩性关系非常紧密。岩性对泥石流的稳定性影响比较大,岩性越松散,即岩体的抗压能力越弱,流水侵蚀作用越强烈,则灾害越容易发生。将岩性直接按照标准进行分级并重分类,分为坚硬岩组、较坚硬岩组、软弱岩组和松散岩组 4 个等级。

(6) 离断裂带距离。断裂带影响泥石流的发育和发生。离断裂带越近,岩土体越破碎,稳定性越差,泥石流灾害越容易发生,反之,离断裂带越远,岩土体的稳定性越好,泥石流灾害发生的频率较低。断裂带的处理方式与道路相同,将其分为 7 个等级。

(7) 降雨量。降雨是诱发泥石流的主要因素,雨季是泥石流高发期。由于降水强度大,入渗量相对较小,地表产生的径流量较大,冲刷作用强烈,使得具有一定坡度的松散堆积物随径流形成洪水从而引发泥石流灾害,泸水市泥石流灾害的发生与降水发生密切,选择 2012—2016 年泸水市雨量监测站点的实测数据,运用 ArcGIS 中的克里金空间插值法得到降雨量空间分布图,再对其用边界进行掩膜提取,提取完成后进行分级,分为 5 个等级。

(8) NDVI。植被指数(NDVI),能够较好地反映出植被生长状态及植被盖度,在植被遥感中应用最为广泛。不同的 NDVI 值对灾害的影响程度不同,NDVI 由

TM 遥感影像数据得到,在 ENVI 5.1 软件的支持下下进行提取,并换算为 $-1 \sim 1$ 的 NDVI 值。换算后将 NDVI 值用自然断点法划分为 5 个等级: $NDVI < 0$ 为水体、云等区域; $0 \sim 0.18$ 为裸土等植被较少区域; $0.18 \sim 0.25$ 为植被覆盖一般的区域; $0.25 \sim 0.35$ 为植被覆盖较好的区域; > 0.35 为植被覆盖很好的区域,结果见图 1。

(9) 土地利用类型。不同的土地利用类型对泥石流灾害的发生影响程度不同,土地利用和泥石流灾害具有关联性。土地利用类型由 2016 年高分一号遥感数据解译,并经过野外验证得到,类型分为未利用土地、耕地、草地、林地、水体、建设用地 6 类。

2.3 确定性系数模型

确定性系数模型 CF 是一个概率函数,CF(certainty factor)最早是由 Shortliffe 等^[20]提出,由 Heckerman^[21]改进,用于分析影响某一事件发生的各个因素的敏感性。CF 模型可以分析泥石流灾害因子的敏感性,完成泥石流灾害的易发性评价。计算公式为:

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

式中: PP_a 是泥石流灾害事件在数据类 a 中发生的条件概率; PP_s 是泥石流灾害事件在整个研究区 s 中发生的先验概率。通常, PP_a 在实际应用中可以表示为数据类 a 的单元中存在的泥石流灾害数目与单元面积(km^2)的比值; PP_s 可以表示为整个研究区的泥石流灾害数目与研究区面积(km^2)的比值。

基于上述公式所计算得出的 CF 的值域区间为 $[-1, 1]$ 。如果计算出的结果为正值,则代表事件发生确定性的增长,即泥石流灾害发生的确定性高,说明此单元为泥石流灾害的易发区;反之,如果计算出的结果为负值,则代表事件发生确定性的降低,即泥石流灾害发生的确定性低,说明此单元不容易发生泥石流灾害。

本文运用确定性系数模型(CF 模型)对泸水市泥石流灾害进行易发性评价,基于 GIS 平台,分别对各项因子进行处理,再根据分级标准进行分级,得到易发性评价分区结果。

3 易发性评价及结果与分析

3.1 CF 值计算及分析

(1) 坡度。坡度的 CF 计算结果说明,坡度与泥石流灾害的发生具有较为紧密的联系,坡度为 $8^\circ \sim 25^\circ$,泥石流灾害发生的概率比较大;坡度较小的地区,灾害发生的概率相应减小(表 3)。

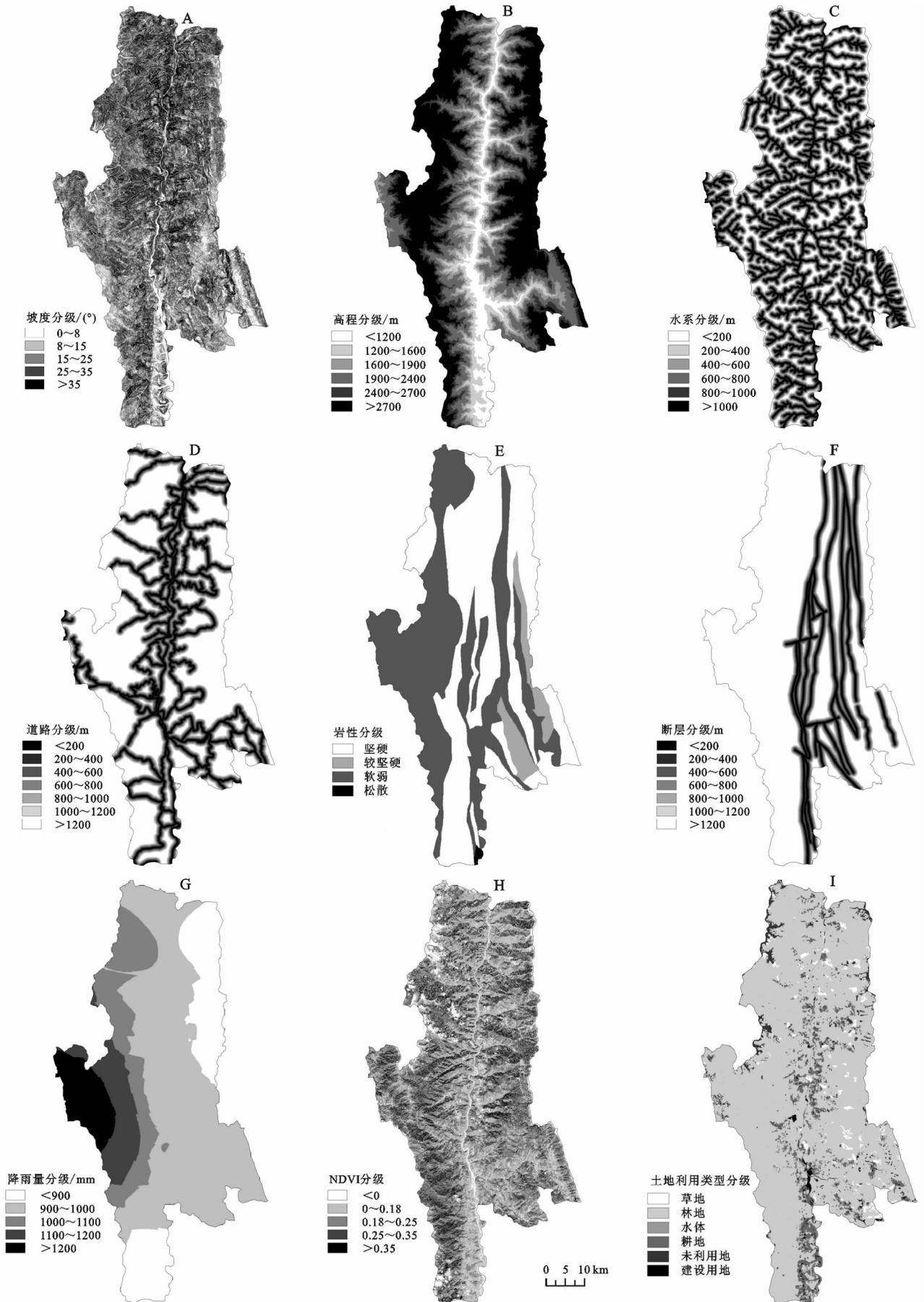


图 1 易发性评价指标分级

表 3 坡度分级与 CF 值计算结果

分级/(°)	PP_a	$PP_a(1-PP_s)$	$PP_s(1-PP_a)$	CF
0~8	0.3197	0.3131	—	0.2551
8~15	0.2528	0.2475	—	0.6376
15~25	0.1518	0.1487	—	0.8825
25~35	0.0472	0.0462	—	0.5743
>35	0.0093	—	0.0205	-0.5545

注：“—”代表未发现，下表同。

(2) 高程。海拔的 CF 值计算结果表明，海拔在 1 600 m 以下是泸水市泥石流灾害较为发育区域。受到自然条件的限制，泸水市高海拔地区不适合人类居住，因此对自然环境的破坏较小，而在人类活动较为集中的低海拔地区，人们筑桥修路、耕作、采矿等活动以及低海拔地区水系的发育，为泥石流灾害的发生孕育了条件。

表 4 高程分级与 CF 值计算结果

分级/m	PP_a	$PP_a(1-PP_s)$	$PP_s(1-PP_a)$	CF
<1200	0.1789	0.1752	—	0.9032
1200~1600	0.0350	0.0343	—	0.4192
1600~1900	0.0158	—	0.0203	-0.2367
1900~2400	0	—	0.0206	-1
2400~2700	0.0188	—	0.0202	-0.0915
>2700	0	—	0.0206	-1

(3) 距水系距离。距水系距离的 CF 值计算结果表明，距水系 200 m 以内，对灾害的影响较大，泥石流灾害发生的概率较大，随着距离的递增，灾害发生的概率也在减小。说明距水系的距离越近，泥石流灾害发生的概率就越大(表 5)。

表 5 水系分级与 CF 值计算结果

分级/m	PP_a	$PP_a(1-PP_s)$	$PP_s(1-PP_a)$	CF
<200	0.0774	0.0759	—	0.7491
200~400	0.0065	—	0.0205	-0.6906
400~600	0.0072	—	0.0205	-0.6542
600~800	0.0021	—	0.0206	-0.8999
800~1000	0.0054	—	0.0205	-0.7431
>1000	0	—	0.0206	-1

(4) 距道路距离。修建公路等人类活动对泥石流灾害产生影响，通过 CF 值计算结果可以发现，离道路越近，泥石流发生的概率就越高(表 6)。

表 6 道路分级与 CF 值计算结果

分级/m	PP_a	$PP_a(1-PP_s)$	$PP_s(1-PP_a)$	CF
0~200	0.0968	0.0947	—	0.8033
200~400	0.0488	0.0477	—	0.5891
400~600	0.0128	—	0.0204	-0.3824
600~800	0.0071	—	0.0205	-0.6589
800~1000	0.0042	—	0.0207	-0.7998
1000~1200	0	—	0.0206	-1
>1200	0.0015	—	0.0206	-0.9285

(5) 离断裂带距离。断裂带周围岩土体破碎，风化程度高，容易形成泥石流。根据断裂带的分级以

及 CF 值得计算结果可知，距断裂带 800 m 以内泥石流灾害发生的概率比较大，而大于 800 m 的区域泥石流灾害发生的可能性较低。说明断裂带对泥石流灾害的发生也具有重要的影响(表 7)。

表 7 断裂带分级与 CF 值计算结果

分级/m	PP_a	$PP_a(1-PP_s)$	$PP_s(1-PP_a)$	CF
0~200	0.0480	0.0470	—	0.5824
200~400	0.0377	0.0369	—	0.4625
400~600	0.0379	0.0371	—	0.4654
600~800	0.0546	0.0534	—	0.3348
800~1000	0.0127	—	0.0204	-0.3899
1000~1200	0.0536	—	0.0204	-0.5277
>1200	0.0083	—	0.0205	-0.6033

(6) 岩性。岩石的类型以及坚硬程度都会对岩土体的抗风化能力和抗侵蚀能力有影响。从 CF 值分析结果可以看出，根据岩石的坚硬程度进行统计，越坚硬的岩体，泥石流灾害发生的概率越小(表 8)。

表 8 岩性分级与 CF 值计算结果

类型	PP_a	$PP_a(1-PP_s)$	$PP_s(1-PP_a)$	CF
坚硬岩组	0.0242	0.0237	—	0.1503
较坚硬岩组	0.0058	—	0.0205	-0.1149
软弱岩组	0.0183	—	0.0203	-0.7238
松散岩组	0.1352	—	0.0206	-0.8652

(7) 降雨量。降雨与泥石流灾害的发生关系非常密切，降雨量越大，则泥石流灾害发生的概率也较高。计算结果 CF 值也说明了这一问题(表 9)。

表 9 降雨量分级与 CF 值计算结果

分级/mm	PP_a	$PP_a(1-PP_s)$	$PP_s(1-PP_a)$	CF
<900	0	—	0.0204	-1
900~1000	0.0320	—	0.0203	-0.4044
1000~1100	0.0066	0.0536	—	0.6868
1100~1200	0.0124	0.0739	—	0.7125
>1200	0.0135	0.0981	—	0.8762

(8) NDVI。NDVI 也是泥石流灾害的一个重要影响因素。表 10 表明 NDVI 在 0.18 以内泥石流灾害发生的概率较大，说明植被覆盖度越低，泥石流灾害发生的概率越大(表 10)。

表 10 NDVI 分级与 CF 值计算结果

分级	PP_a	$PP_a(1-PP_s)$	$PP_s(1-PP_a)$	CF
<0	0.0680	0.0666	—	0.7099
0~0.18	0.0364	0.0356	—	0.4394
0.18~0.25	0.0085	—	0.0205	-0.5945
0.25~0.35	0.0035	—	0.0207	-0.8361
>0.35	0	—	0.0207	-1

(9) 土地利用类型。土地的不合理利用会造成泥石流灾害的发生，不同的土地利用方式对泥石流灾害的影响也不同。通过 CF 计算结果可知，建设用地、水体和耕地这 3 种土地利用类型发生泥石流灾害的概率较大(表 11)。

表 11 土地利用类型分级与 CF 值计算结果

类型	PP_a	$PP_a(1-PP_s)$	$PP_s(1-PP_a)$	CF
耕地	0.0877	0.0859	—	0.7809
水体	0.1497	0.1466	—	0.8803
林地	0.0091	—	0.0205	-0.5652
建设用地	0.3276	0.3208	—	0.9567
草地	0.0149	—	0.0203	-0.2825
未利用地	0	—	0.0206	-1

3.2 泥石流易发性评价等级划分

利用 ArcGIS 叠加上 9 个因子的 CF 值,按照自然断点法将泥石流灾害易发性结果分为极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区 4 个等级(表 12),得到易发性评价分级图(图 2)。

表 12 易发性评价 CF 值等级划分

级别	值域	易发性等级
1	-6~-3	低易发区
2	-3~-1	中易发区
3	-1~1	高易发区
4	1~6	极高易发区

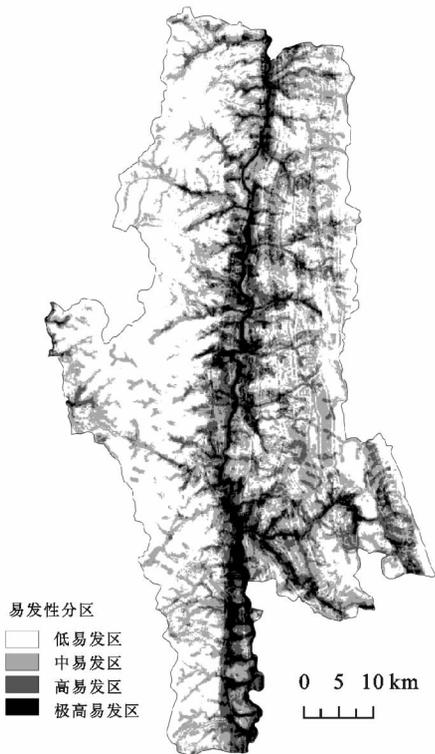


图 2 易发性评价分区结果

表 13 泸水市泥石流易发性分级结果和比例

易发等级	面积/ km ²	面积 比例/%	灾害点/ 个	灾害数 比例/%	灾害点密度/ (个·km ⁻²)
低易发区	1406.8797	45.38	0	0	0
中易发区	954.9839	30.80	3	4.69	0.0031
高易发区	473.9604	15.29	10	15.63	0.0211
极高易发区	264.5710	8.53	51	79.69	0.1928

3.3.2 AUC 验证 将泥石流易发性模型评价结果以

3.3 易发性评价结果验证

为了验证泸水市泥石流灾害易发性评价分区结果的合理性,本研究采用 64 个泥石流样本数据以及泥石流灾害面积百分比累积—易发性面积百分比累积曲线来进行验证易发性评价指标因子、模型方法结果的科学性与合理性。

3.3.1 泸水市样本灾害点数据结果验证 从泸水市 64 个样本内泥石流灾害点数据验证结果(图 3)可以看出,易发性评价分区与灾害点分布较为吻合,极高易发区主要分布在泸水市的怒江干流的沿岸地区,泥石流灾害的密度从极高易发区到低易发区逐渐减少,其中,低易发区面积占总面积的 45.38%,灾害点个数为 0;中易发区面积占总面积的 30.80%,灾害点个数占总个数的 4.69%;高易发区面积占总面积的 15.29%,灾害点个数占总个数的 15.63%;极高易发区面积占总面积的 8.53%,灾害点个数占总个数的 79.69%。高易发区及其以上等级区域内的灾害点占总数的 95.32%。根据评价结果的验证,说明用确定性系数模型可以较好地反映出泥石流灾害发生的区域(表 13)。

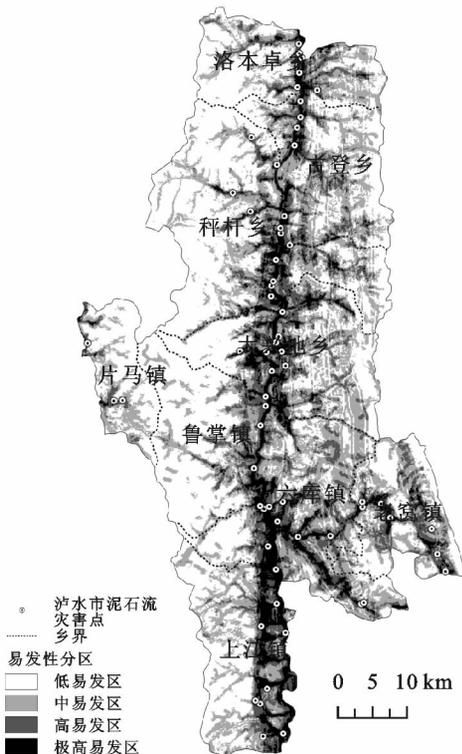


图 3 易发性评价分区结果与样本内灾害点数据叠加

1%的间隔分为 100 等分,求取已知泥石流在这 100 个级别内的分布百分比,构建易发性评价结果累积与泥石流发生累积曲线^[22](图 4)。根据计算,曲线下面积(Area Under Curve, AUC)为 81.99%,说明易发性评价结果的准确率达到 81.99%,表明确定性系数模型适用于泸水市易发性评价分析,得到的易发性分级结果具有合理性。

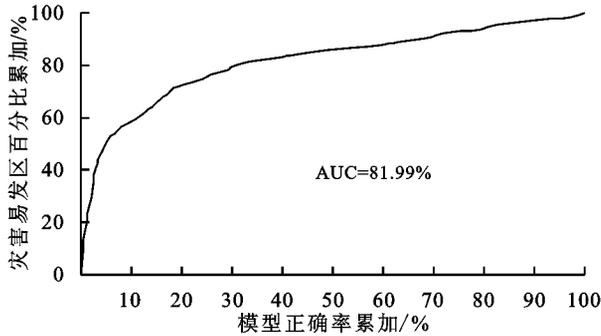


图 4 确定性系数模型评价结果检验曲线

4 结论

(1) 泸水市的泥石流灾害点大多分布在极高易发区内,极高易发区面积仅占总面积的 8.53%,但发生的泥石流灾害点所占比例高达 79.69%,易发性评价结果与实际泥石流灾害的分布比较吻合,AUC 检验的准确率达 81.99%,表明论文选取的指标和 CF 模型是合理的,应用于泸水市泥石流灾害易发性评价中是可行的。

(2) 泸水市泥石流灾害发生与海拔、坡度、离水系、道路、断裂带距离关系密切,海拔 1 600 m 以下是泥石流易发区;离水系 200 m、道路 400 m、断裂带 800 m 内是泥石流高发区。

(3) 泸水市泥石流灾害发生与岩性、降雨、植被覆盖、土地利用有关系。具体是:岩体的坚硬程度影响泥石流发生,越坚硬的岩体,泥石流灾害发生的概率越小;降雨量越大,泥石流灾害发生的概率也较高;植被覆盖度越低,泥石流灾害发生的概率越大;土地利用方式影响泥石流易发性,泸水市建设用地、水体和耕地这 3 种土地利用类型发生泥石流灾害的概率较大。

(4) 泸水市泥石流灾害高发区也是居民点集中分布区,要减少人类不合理的活动诱发的泥石流灾害,汛期要加大泥石流灾害排查和群测群防巡查,减少泥石流灾害的发生和灾害造成的损失。

参考文献:

[1] 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,2016,34(4):460-467.

[2] 吴赛儿,陈剑,Zhou Wendy,等.基于逻辑回归模型的泥石流易发性评价与检验:以金沙江上游奔子栏—昌波河段为例[J].现代地质,2018,32(3):611-622.

[3] 谭玉敏,郭栋,白冰心,等.基于信息量模型的涪陵地区地质灾害易发性评价[J].地球信息科学学报,2015,17(12):1554-1562.

[4] 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):292-298,308.

[5] 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].地球信息科学学报,2015,17(11):1395-1403.

[6] 张以晨,秦胜伍,翟健健,等.基于信息量的长白山地区

泥石流易发性评价[J].水文地质工程地质,2018,45(2):150-158.

- [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.
- [8] 付奇,何政伟,薛东剑.层次分析法在炉霍县泥石流易发性评价中的应用[J].地理空间信息,2012,10(6):139-141.
- [9] 丁明涛,韦方强,王欢,等.基于聚类分析的三江并流区泥石流危险性评价[J].资源科学,2012,34(7):1257-1265.
- [10] 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.
- [11] Pradhan B, Lee S. Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(5):1037-1054.
- [12] Sdao F, Lioi D S, Pascale S, et al. Landslide susceptibility assessment by using a neuro-fuzzy model: A case study in the rupestrian heritage rich area of Matera[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2013, 13(2):395-407.
- [13] 焦方谦,赵新生,陈川.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.
- [14] Jiang W, Rao P, Cao R, et al. Comparative evaluation of geological disaster susceptibility using multi-regression methods and spatial accuracy validation[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(4):439-462.
- [15] 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.
- [16] 刘明学,陈祥,杨珊妮.基于逻辑回归模型和确定性系数的崩滑流危险性区划[J].工程地质学报,2014,22(6):1250-1256.
- [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.
- [18] 万石云,赵宁坤,段玮,等.云南省滑坡泥石流与强降水的相关性和多时间尺度特征研究[J].灾害学,2015(1):45-50.
- [19] 李益敏,刘素红,李小文.基于 GIS 的怒江峡谷人居环境容量评价:泸水县为例[J].地理科学进展,2010,29(5):572-578.
- [20] Shortliffe E H, Buchanan B G. A model of inexact reasoning in medicine [J]. Mathematical Biosciences, 1975, 23(3/4):351-379.
- [21] Heckerman D. Probabilistic Interpretations for MYCIN's Certainty Factors [M] // Readings in uncertain Reasoning. Morgan Kaufmann Publishers Inc. 1990.
- [22] 许冲,戴福初,徐锡伟.基于 GIS 平台与证据权的地震滑坡易发性评价[J].地球科学:中国地质大学学报,2011,36(6):1155-1164.