

基于 GIS 的高山峡谷区滑坡灾害危险性评价 ——以泸水市为例

李益敏^{1,2}, 袁静¹, 蒋德明¹, 王东驰¹, 刘心知¹

(1. 云南大学 地球科学学院, 昆明 650500; 2. 云南省高校国产高分卫星遥感地质工程研究中心, 昆明 650500)

摘要: 为了加深对泸水市滑坡灾害的认识和泸水市防灾减灾的实际需要, 以泸水市 235 个滑坡灾害点数据为基础, 分析滑坡的发育特征和形成机理, 结合相关性分析, 选取坡度、高程、道路、水系、地层岩性、断层、土地利用类型以及降雨量共 8 个因子构建危险性评价指标体系。基于 GIS 技术, 分析各评价指标与滑坡灾害点相对密度的关系, 并对各指标进行分级, 然后采用层次分析法和信息量模型, 对研究区的滑坡灾害危险性进行了评价和区划。结果表明: (1) 研究区滑坡易发生在坡度 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 、高程小于 1 900 m, 区内软弱岩体或软硬相间的岩层较易引起滑坡灾害的发生, 且距道路、断裂带和河流越近, 发生滑坡灾害的可能性越大, 降雨量对滑坡的发生也有影响, 滑坡发生的概率随降雨量的增加而增加, 建设用地和耕地极易发生滑坡灾害。(2) 研究区滑坡灾害极高和高危险区主要分布在人类活动较为强烈的河流两岸和道路沿线。(3) 极高、高、中、低危险区的面积分别为 448.75 km^2 , 848.51 km^2 , $1\,011.61\text{ km}^2$, 779.54 km^2 , 极高和高危险区仅占研究区总面积的 42%, 却包含 86.81% 的滑坡灾害点, 滑坡密度高达 $0.157\,3\text{ 个}/\text{km}^2$, 说明该区域危险性较高。

关键词: 滑坡; 高山峡谷区; GIS; 层次分析法; 信息量模型; 危险性评价

中图分类号: P954

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)03-0355-09

GIS-Based Risk Assessment of Landslide Disaster in High Mountain Valley — Taking Lushui City as an Example

LI Yimin^{1,2}, YUAN Jing¹, JIANG Deming¹, WANG Dongchi¹, LIU Xinzhi¹

(1. College of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China; 2. Yunnan Institute of Geography, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to deepen the understanding of landslide disasters in Lushui City and meet the actual needs of disaster prevention and mitigation in Lushui City, the development characteristics and formation mechanism of the landslide in Lushui City were analyzed based on the data of 235 landslide disaster points. Combined with correlation analysis, 8 factors including slope, elevation, road, water system, stratigraphic lithology, fault, land use type and rainfall were selected to build a risk assessment index system. Based on GIS technology, the relationship between each index and the relative density of landslide disaster points was analyzed, and each index was graded. The analytic hierarchy process and information model were used in evaluation and zoning of the landslide hazard risk in the study area. The results show that: (1) landslides in the study area are prone to occur between slopes of $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$ and elevations less than 1 900 m; soft rocks or soft-hard rock layers in the area are more likely to cause landslide hazards; the closer to the road, fault zone and river, the greater the possibility of landslide disaster; the rainfall also has the impact on the occurrence of landslides; the probability of landslides increases with the increase of rainfall; construction land and cultivated land are prone to landslide disasters; (2) the extremely high and high risk areas of landslide hazards in the study area mainly distributed on both banks of rivers and roads where human activities are strong; (3) the areas of extremely high, high, medium and low risk areas are 448.75 km^2 , 848.51 km^2 , $1\,011.61\text{ km}^2$ and

收稿日期: 2020-06-15

修回日期: 2020-07-03

资助项目: 云南省科技厅-云南大学联合基金重点项目(2019FY003017); 国家自然科学基金(41161070); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190545)

第一作者: 李益敏(1965—), 女(白族), 云南昆明人, 研究员, 研究方向为 3S 技术在山地环境与地质灾害中的应用。E-mail: 648119611@qq.com

通信作者: 袁静(1996—), 女, 四川南充人, 硕士研究生, 研究方向为 3S 技术在地质灾害中的应用。E-mail: 1565747027@qq.com

779.54 km², respectively; the extremely high and high risk areas only account for 42% of the total area of the study area, but contain 86.81% of the landslide disaster points, and the landslide density is as high as 0.157 3 km², indicating that the landslide risk in this area is high.

Keywords: landslide; high mountain canyon area; GIS; analytic hierarchy process; information model; risk assessment

特殊的地形地貌、极端气候等因素导致我国的滑坡灾害频繁发生,据相关资料显示,近几十年来,每年发生的滑坡灾害对当地的基础设施建设造成巨大破坏,导致大量人员伤亡和财产损失^[1]。通过分析滑坡灾害发生的地质环境、分布规律等因素,选取导致滑坡发生的内部主导因素与外部诱发因素,构建评价指标体系。采用合适的评价模型或方法计算滑坡灾害发生的可能性,并对滑坡危险性结果进行分区,对区域防灾减灾具有重要意义。欧美国家在 20 世纪 70 年代就开始了滑坡灾害危险性评价研究,而我国的研究工作起步较晚。近年来,随着社会经济及 GIS 技术的发展,滑坡灾害危险性评价的研究越来越受到国内外学者的关注,危险性评价指标体系和评价方法也得到了快速发展^[2-4]。A.Uromeihy 等^[5]在 GIS 技术支持下,采用定性评价方法中的模糊综合评判法对伊朗 Khorshrostan 地区进行了滑坡灾害危险性评价;石菊松等^[6]以巴东县新城区为研究区,通过分析其滑坡灾害的发生过程、地质环境等因素,构建危险性评价指标体系,开展基于信息量模型和敏感性评价方法的滑坡灾害危险性预测;熊俊楠等^[7]运用 GIS 技术,选取高程、相对高差、坡度、坡向、岩性、地震、降雨共 7 个评价指标,并采用 AHP-信息量法对溪洛渡库区的滑坡灾害进行了危险性评价研究,得到了较准确的分区结果。从已有研究来看,滑坡危险性评价指标不断完善,大多数学者已接受并采用的选择方法是:考虑包括地形地貌、地质构造、工程岩组等孕灾环境和人类工程活动、大气降水等致灾因子^[8-9]。近年来,评

价模型也已从单一、定性评价方法转向综合、定量评价方法,定性和定量评价都得到了广泛应用。结合各方法的优缺点,进行模型组合,可以有效提高模型精度,采用定性和定量相结合的方法对滑坡灾害进行危险性评价已成为研究的热点和趋势^[10-11]。

因此,本文以怒江州泸水市为研究区,以 GIS 为平台,采用 AHP 和信息量模型相结合的方法开展泸水市滑坡灾害危险性评价,以期为泸水市的防灾减灾、异地搬迁和城市规划等工作提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

泸水市隶属云南省怒江傈僳族自治州,位于北纬 25°33′—26°29′,东经 98°34′—99°09′,南依保山市,北邻福贡县,东靠兰坪县和云龙县,西连缅甸,下辖六镇三乡,总面积 3 203.04 km²。地理位置处于我国青藏高原东南部横断山区,境内江河纵横,水系发育密集,怒江由北向南贯穿高黎贡山和碧罗雪山之间,海拔高差达 3 000 m 以上,立体气候突出,垂直气候变化规律十分明显,形成了独特的高山峡谷地貌。研究区内山高坡陡,地势陡峭,山地面积约占研究区总面积的 94%,且大部分地区坡度较大,水动力条件充足,有利于滑坡灾害的形成,是我国地质灾害最为严重的地区之一。

1.2 数据来源

滑坡灾害危险性评价所用基础数据见表 1,坐标系为 1980 西安坐标系,高斯—克吕格投影。

表 1 数据目录

数据名称	数据来源	数据名称	数据来源
滑坡灾害点	怒江州国土部门	土地利用	2018 年 RapidEye 遥感影像
DEM 数据	地理空间数据云	NDVI	2018 年 Landsat8 遥感影像
行政区划图	国家地球系统科学数据共享平台	降雨量	云南省气象局
道路数据	测绘科学共享服务网	研究区地质图	国家地球系统科学数据共享平台

2 评价指标体系的建立

2.1 评价单元的确定

选择一个合适的危险性评价单元,可以有效提高评价结果的精度。目前,常见的评价单元有行政单元、地域单元、规则网格单元以及自然斜坡单元

等^[12]。由于网格单元具有数据处理速度快、精度较高和可以综合运算各个指标的优点,故本文采用规则网格单元作为研究区危险性评价的基本单元,并用公式(1)进行计算:

$$G_f = 7.49 + 0.0006f - 2.0 \times 10^{-9}f^2 + 2.9 \times 10^{-15}f^3 \quad (1)$$

式中: G_f 指合适的网格大小; f 指等高线精度的分母值。研究区所使用的 DEM 数据为 1:5 万,则由公式(1)计算得到适宜网格的大小为 30 m×30 m。

2.2 评价因子的选取

滑坡是一种非线性动力学过程,影响滑坡发生的因素多而复杂。本文以泸水市 235 起滑坡灾害点为基础,参阅大量文献资料^[13-14],综合考虑泸水市滑坡灾害的发生过程、发育环境等因素,选取环境因素、人类工程活动、致灾因子三大类评价因素作为影响因子,环境因素包括坡度、高程、水系、地层岩性、断层构造和 NDVI,人类工程活动:选取道路和土地利用类型作为人类工程活动中的量化指标;致灾因子:泸水市滑坡主要为降雨诱发,故选取降雨量作为致灾因子。

表 2 各指标因子间的相关系数

指标因子	坡度	高程	水系距离	道路距离	地层岩性	断裂构造	土地利用	NDVI	降雨量
坡度	1.00								
高程	0.13	1.00							
水系距离	0.04	0.19	1.00						
道路距离	0.16	0.15	0.19	1.00					
地层岩性	-0.07	-0.13	0.09	-0.07	1.00				
断裂构造	-0.10	-0.01	0.02	-0.01	0.15	1.00			
土地利用	0.13	0.18	0.06	0.03	-0.19	0.03	1.00		
NDVI	0.37	-0.32	0.46	0.04	-0.36	-0.15	0.62	1.00	
降雨量	0.13	0.00	0.00	0.04	-0.15	-0.06	0.00	0.28	1.00

2.3 评价因子的提取与量化

2.3.1 坡度 坡度是影响滑坡发育的重要因素,直接决定着斜坡的稳定性。坡度较小的地区,不易发生滑坡灾害,随着坡度的增大,包括坡体自重在内的剪切力也随之增大,为松散堆积物提供了较大的势能,坡体稳定性降低,发生滑坡灾害的可能性增大。根据研究区实际情况,将坡度划分为 0°~10°,10°~20°,20°~30°,30°~40°,40°~50°,50°~60°, >60°共 7 个等级(图 1),然后分析坡度与滑坡灾害点相对密度的关系,得到图 2 的直方图,结果显示:坡度在 30°~50°范围内的滑坡点相对密度较大,说明该区域发生滑坡的可能性较大。

2.3.2 高程 高程对滑坡灾害的发生有着重要影响。高程不同,会导致降水、气温、植被以及土壤类型等因素均不相同。泸水市山高谷深、地形复杂、海拔高差达 3 000 m 以上,随着高程增加,形成复杂的山地垂直自然带。利用 GIS 技术,根据不同垂直自然带,将高程划分为 7 个分带(图 3),并分析各个高程分带与滑坡灾害点相对密度的关系(图 4)。由图 3—4 可知:高程在 0~1 900 m 范围内,滑坡灾害点相对密度较大,说明滑坡易发生在此高程范围内;当高程 >1 900 m 时,滑坡灾害点相对密度较小。由遥感影

利用 GIS 空间相关性分析工具,对选取的评价指标进行相关性分析,剔除相关性强的因子,可以使评价指标的选取更为合理,提高评价结果的精度。基于 ArcGIS,对各评价因子进行波段集统计,然后计算各评价因子图层间的协方差矩阵和相关矩阵,得到各指标因子间的相关系数 R ,当 $|R| \leq 0.3$ 时,表示相关性较弱或者不相关^[15]。由表 2 可知,NDVI 与坡度、高程等 6 个因子相关系数的绝对值大于 0.3,其他各指标因子间的相关系数的绝对值均小于 0.3,故将 NDVI 因子剔除,最终确定以坡度、高程、道路距离、水系距离、地层岩性、断层构造、土地利用类型以及降雨量共 8 个因子作为评价指标,构建滑坡灾害危险性评价指标体系。

像发现,海拔在 1 900 m 以上时,居民点分布很少,高程越高,人类活动强度越小;而海拔小于 1 900 m 的地区,居民点分布密集,人口密度较大,发生滑坡灾害的可能性较大。

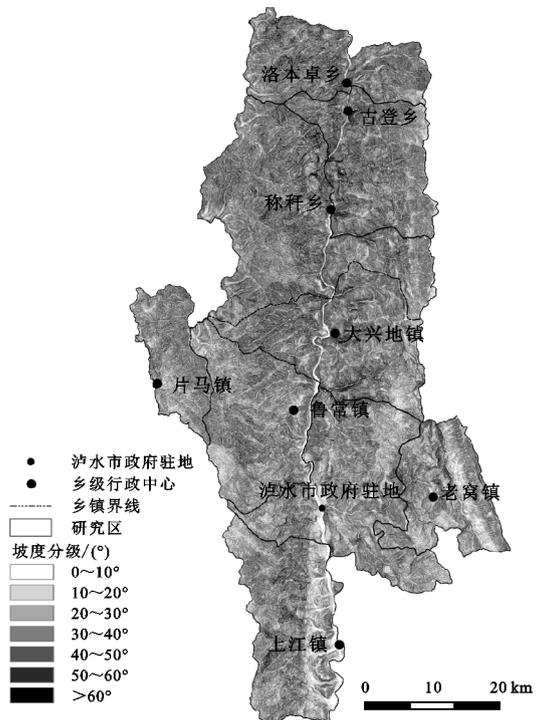


图 1 泸水市坡度分级

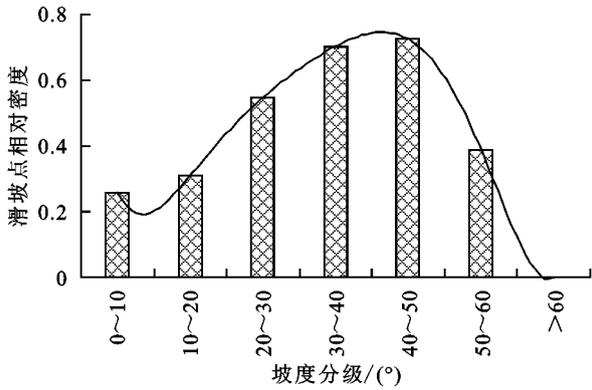


图 2 滑坡灾害点相对密度与坡度关系

害^[16]。在 ArcGIS 软件支持下,对道路数据建立以 200 m 为间隔的缓冲区(图 5),各缓冲区内滑坡灾害点的相对密度见图 6,结果表明,距道路越近,滑坡灾害发生的次数越多。滑坡灾害的发生,与距道路距离有密切的关系,修建道路等人类工程活动会干扰、诱发滑坡灾害。

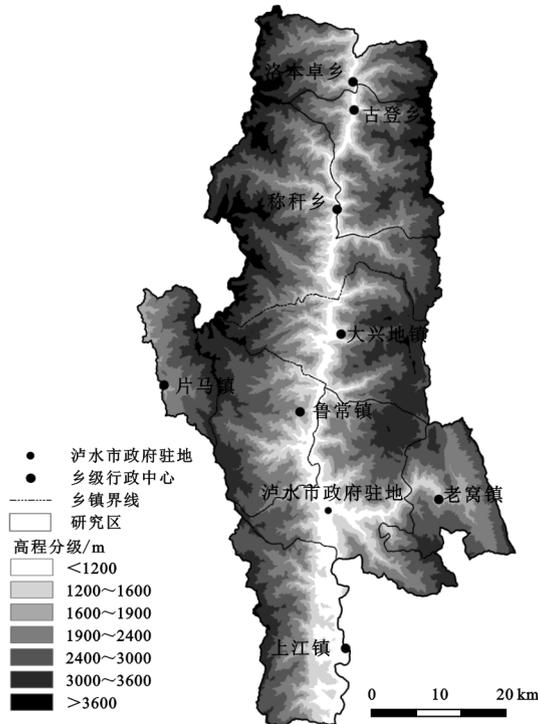


图 3 泸水市高程分级

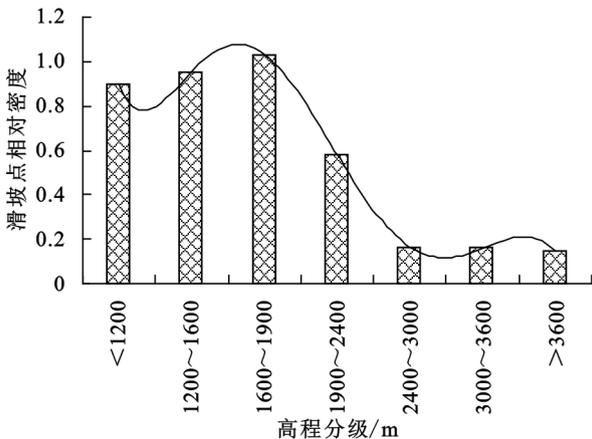


图 4 滑坡灾害点相对密度与高程关系

2.3.3 道路 受自然环境的限制,泸水市人地矛盾突出,山路修建过程中需要开挖边坡,会改变山体原有的岩层结构,使斜坡体抗剪能力降低,形成不稳定斜坡或危岩,在暴雨的情况下,极易发生滑坡灾

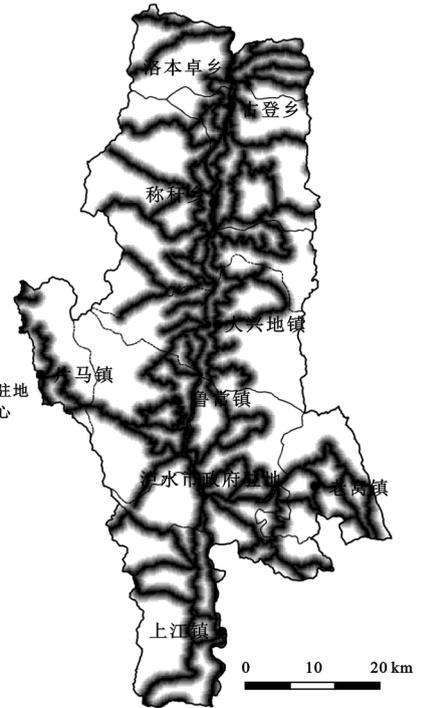


图 5 泸水市滑坡灾害道路分级

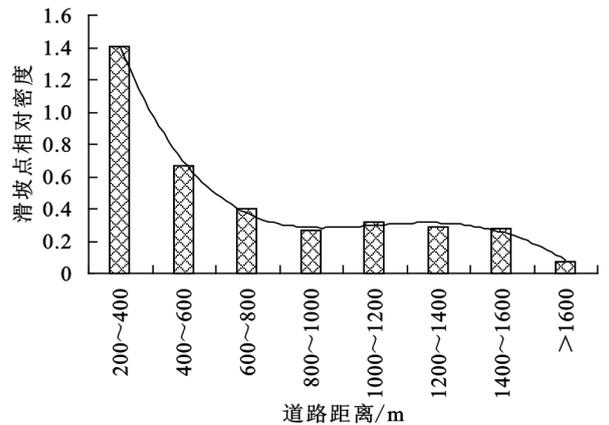


图 6 滑坡灾害点相对密度与道路距离关系

2.3.4 水系 水系是影响滑坡发育的重要因素,主要表现在河流的侵蚀和掏蚀作用会影响斜坡的稳定性,增大滑坡灾害发生的概率^[17]。本文通过 DEM 提取泸水市水系,以 200 m 为间隔,基于 ArcGIS 建立河流缓冲区(图 7),分析水系距离和滑坡灾害点相对密度的关系(图 8)。结果表明:研究区滑坡灾害点随距水系距离的增大而减小,其中 0~800 m 范围内滑坡灾害点相对密度较高,说明该区间内易发生滑坡,当水系距离>800 m 时,滑坡灾害点相对密度很小,

河流对滑坡发生的控制力减弱。

生滑坡灾害,坚硬岩体组成的斜坡稳定性很好,抗风化能力较强,不易破裂,滑坡灾害也不易发生。

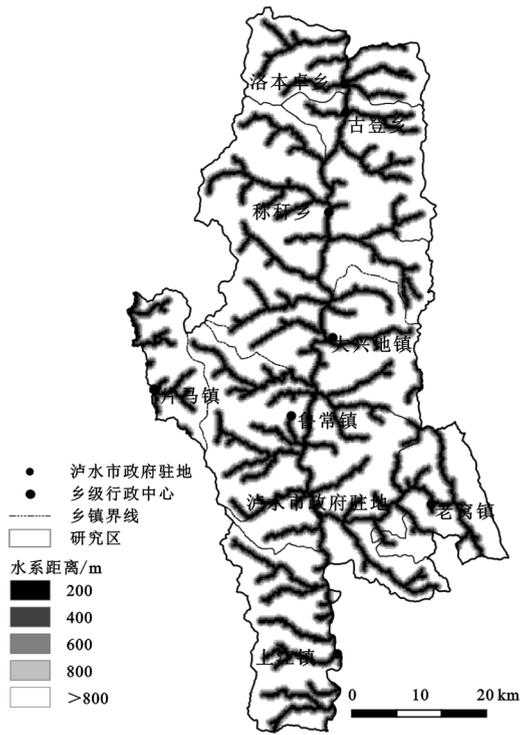


图 7 泸水市水系距离

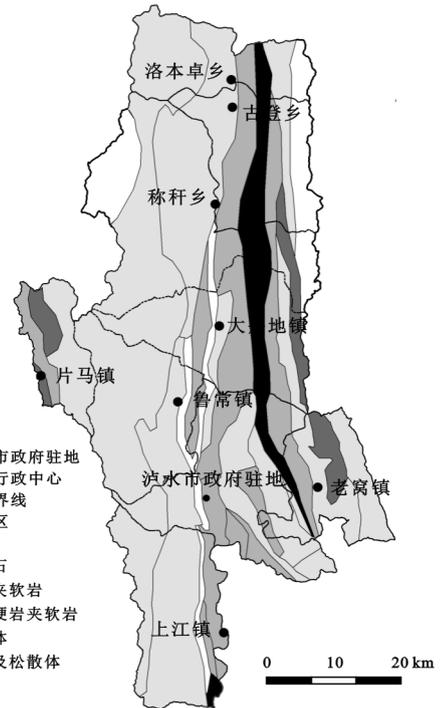


图 9 泸水市岩性分类

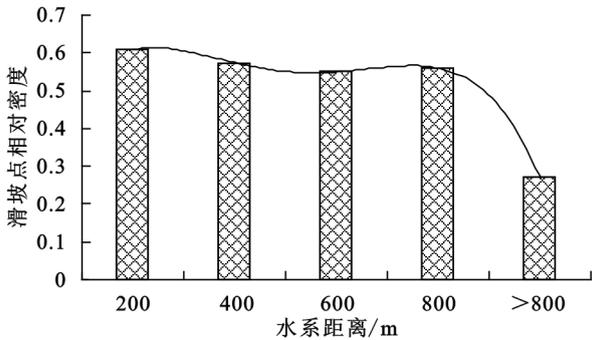


图 8 滑坡灾害点相对密度与水系距离关系

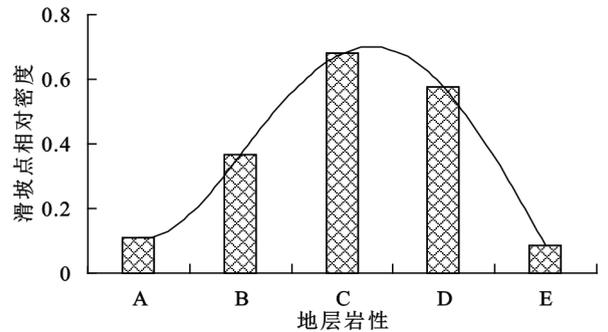


图 10 滑坡灾害点相对密度与岩性关系

2.3.5 岩性 地层岩性是区域滑坡灾害分布的主控因素。不同的岩土体性质不同,其坚硬程度、物理化学性质和抗风化能力等均不相同,导致滑坡发生的概率也不同。考虑到将岩性指标量化分析,本文以地层组为基本单位,根据岩层的坚硬程度、物理化学性质等,将泸水市岩土体划分为 5 种类型:A(坚硬岩体)、B(坚硬岩夹软岩)、C(中等坚硬岩夹软岩)、D(软弱岩体)、E(粘性土及松散体)^[18],利用 ArcGIS 空间分析功能生成研究区地层岩性分布图(图 9)和滑坡灾害点相对密度直方图(图 10),结果显示:坚硬岩夹软岩、中等坚硬岩夹软岩和软弱岩体的滑坡灾害点相对密度较大,说明滑坡易发生在以板岩、片岩、灰岩、砂岩、页岩、泥岩以及千枚岩等软弱岩层或软硬相间的岩层中,这是因为软硬岩夹层会使软岩成为天然的滑床,有利于滑坡灾害的发生,研究区内粘性土及松散体稳定性较差,通常只能形成低缓的斜坡,不易发

2.3.6 断裂构造 断裂构造是滑坡灾害发育的重要控制因素。断层构造会破坏岩层的稳定性、完整性和连续性,导致断裂带周围岩体破碎,松散物堆积,增大滑坡灾害发生的可能性。泸水市断裂构造主要以南北向为主,东西向分布较少。以 200 m 为间隔建立缓冲区(图 11),基于 ArcGIS 的数据统计功能,分析断裂距离与滑坡灾害点相对密度的关系(图 12)。结果显示:距离断裂带越远,滑坡灾害点相对密度越小,在 0~600 m 区间内滑坡灾害点相对密度较大,滑坡灾害较易发生。

2.3.7 土地利用 不同土地利用类型对滑坡发生的影响程度不同。通过对 2018 年 RapidEye 遥感影像进行目视解译,获得研究区土地利用类型分布图(图 13)。分析建设用地、耕地、未利用地、草地、林地以及水体与滑坡灾害点相对密度的关系(图 14)发现:建设用地和耕地发生滑坡灾害的频率最高,泸水市陡坡

耕种及不合理的工程建设破坏地表形态,增加人工切坡,加剧水分下渗,使地表水体流失严重,极易诱发滑坡灾害。

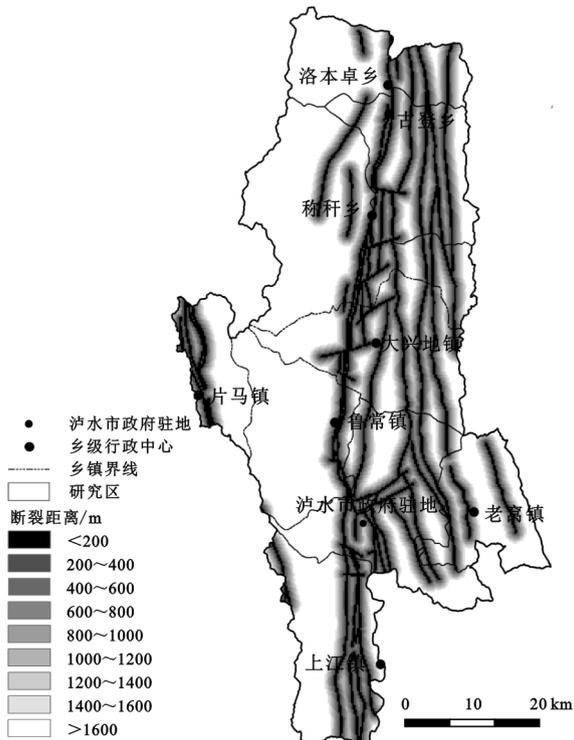


图 11 泸水市滑坡灾害断裂分级

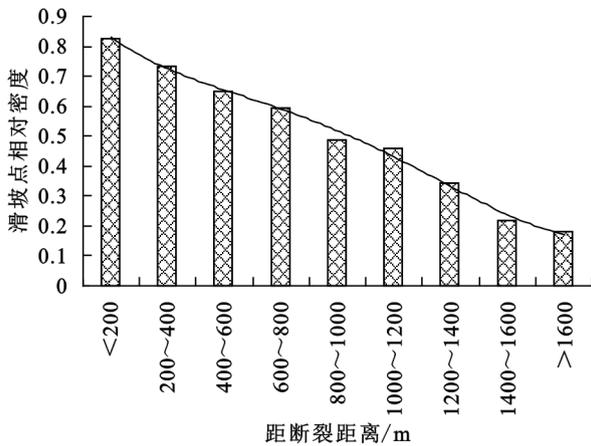


图 12 滑坡灾害点相对密度与断裂距离关系

2.3.8 降雨量 降雨是滑坡灾害发生的主要诱因,是滑坡灾害危险性评价中最具代表性的评价因子之一。大量雨水下渗导致斜坡岩土体的抗剪强度降低,诱发坡体发生变形和位移,造成滑坡灾害的发生。本文采用泸水市气象站点多年年均降雨量数据作为评价指标,基于 ArcGIS 对降雨数据进行空间插值,得到泸水市年降雨量分级,统计不同年降雨量范围内的滑坡灾害点相对密度(图 15)。结果显示:研究区内滑坡灾害的发生整体上随降雨量的增加而增加,尤其是当年均降雨量在 2 198~3 415 mm 范围内,滑坡灾害点相对密度较大,也与统计资料中泸水市暴雨型滑

坡灾害分布最为广泛的结论相吻合。

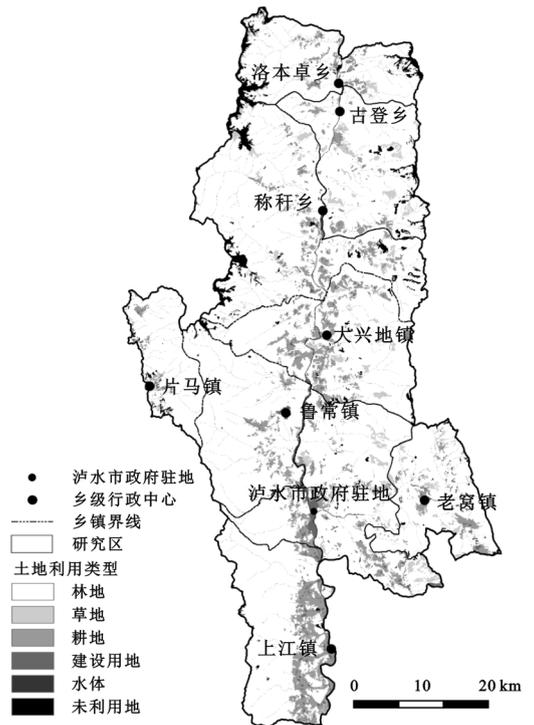


图 13 泸水市土地利用类型

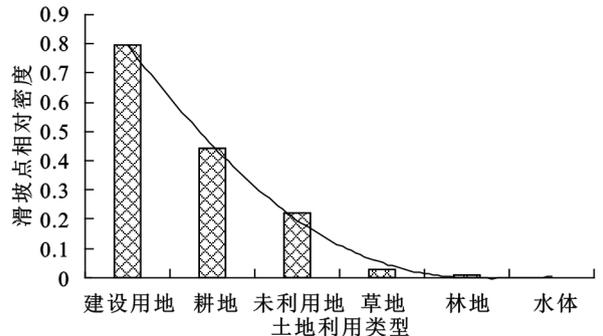


图 14 土地利用类型与滑坡灾害点相对密度的关系

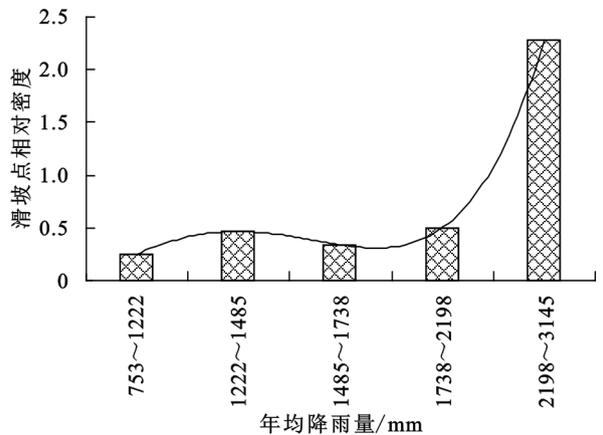


图 15 滑坡灾害点相对密度与降雨量关系

3 评价方法与流程

3.1 层次分析法

层次分析法于 20 世纪 70 年代由美国运筹学家 T.L.saaty^[19]提出,它是一种定性与定量相结合的决

策分析方法,广泛应用于地质灾害领域。本文通过层次分析法对各评价因子赋予不同的权重值。

3.1.1 建立层次结构模型 通过分析泸水市滑坡灾害发育的地质环境、结构特征等因素,结合已收集的滑坡灾害数据,建立层次结构模型(图 16)。

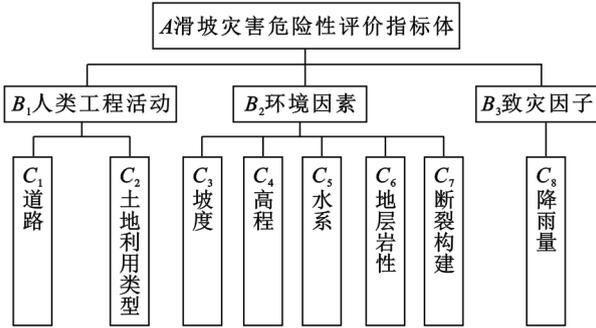


图 16 泸水市滑坡灾害危险性评价层次结构模型

3.1.2 构造判断矩阵 对已选定的评价指标,参考以往学者的研究结果^[20-21],利用专家认可度表^[22],采用 T.L.saaty^[19]提出的 1~9 标度法,构造比较两因素相对重要性的判断矩阵(表 3—5)。

表 3 A—B 判断矩阵

A	B ₁	B ₂	B ₃
B ₁	1	1	2
B ₂	1	1	3
B ₃	1/2	1/3	1

表 4 B₁—C 判断矩阵

B ₁	C ₁	C ₂
C ₁	1	5
C ₂	1/5	1

表 5 B₂—C 判断矩阵

B ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
C ₃	1	4	3	1	4
C ₄	1/4	1	1/4	1/4	1/3
C ₅	1/3	4	1	1/2	3
C ₆	1	4	2	1	3
C ₇	1/4	3	1/3	1/3	1

3.1.3 一致性检验 在 Matlab 软件下进行分析,并验证判断矩阵的一致性。公式如下:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}; CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

式中: n 为判断矩阵的阶数; CI 为一致性指标; RI 为平均随机一致性指标; CR 为随机一致性比率。当 $CR < 0.1$ 时,表示判断矩阵具有一致性,权重赋值合理,反之应进行调整。根据公式(2)计算得到 A 表示 B 层的 CR 值为 0.017 6, B_1 表示 C 层的 CR 值为 0.015 1, B_2 表示 C 层的 CR 值为 0.093 1;三层的 CR 值均小于 0.1,满足一致性检验。归一化处理后得到 8 个评价因子的权重值并排序(表 6)。

表 6 A—C 层次总排序

层次 C	层次 B—C			次 C 总排序 权重值
	B ₁	B ₂	B ₃	
C ₁	0.3876	0.4434	0.1692	0.3876
C ₂	1	0	0	0.0216
C ₃	0	0.2877	0	0.1276
C ₄	0	0.0593	0	0.0263
C ₅	0	0.1781	0	0.0790
C ₆	0	0.2413	0	0.1070
C ₇	0	0.0899	0	0.0399
C ₈	0	0	1	0.1692

3.2 信息量模型

信息量模型是一种由信息论发展而来的统计分析预测方法,国内学者晏国珍首次将信息论引入到滑坡研究中以后,越来越多的学者将此方法应用到地质灾害的研究中。本文采用坡度、高程、道路、水系、地层岩性、断层、土地利用类型以及降雨量共 8 个评价指标,基于 GIS 技术和信息量模型,计算各评价因子的信息量值(表 7)。

3.3 危险性评价

利用 GIS 技术,将各评价指标的信息量值与权重值根据公式(3)计算得到泸水市滑坡灾害危险性评价结果。计算公式如下:

$$Q = \sum_{a=1}^n W_a \times I_{aj} \quad (3)$$

式中: Q 为评价单元的综合信息量值; W_a 为层次分析法赋予的第 a 个指标的权重值; I_{aj} 为第 a 个指标第 j 个级别(类别)的信息量值。

4 评价结果分析与精度检验

4.1 评价结果与分析

泸水市滑坡灾害危险性评价结果在 -1.013 ~ 0.795。利用 ArcGIS 软件的重分类功能,采用自然间断点分级法将危险性评价结果分为:低危险性(-1.013 ~ 0.047);中危险性(0.047 ~ 0.128);高危险性(0.128 ~ 0.214);极高危险性(0.214 ~ 0.795)4 个等级,得到泸水市滑坡灾害危险性分区。

统计不同危险性等级区的面积、占研究区总面积的比例、滑坡灾害点在各级别中的个数、所占滑坡灾害点总数的比例和滑坡灾害点密度(表 8),可以看出:泸水市滑坡灾害极高和高危险区主要分布在人类活动强度较大的河流两岸和道路沿线,分析结果与区内实际滑坡灾害点分布特征相吻合。这是因为泸水市人口集中分布在河谷区,区内构造发育,交通通达性较好,人口密度大,经济活动频繁。极高危险区面

积为 448.75 km²,占研究区总面积的 25.24%;高危险区面积为 848.51 km²,占研究区总面积的 32.76%;极高和高危险区仅占研究区总面积的 42%,却包含了 204 个滑坡灾害点,约占滑坡灾害点总数的 86.81%,滑坡密度高达 0.157 3 个/km²,说明这些区域发生滑坡灾害

的可能性较高。中危险区面积为 1 011.61 km²,低危险区面积为 779.54 km²,中危险及以下区域占研究区总面积的 58%。因此,今后泸水市应将极高和高危险区作为滑坡灾害防治的重点区域,这将大大减少滑坡灾害造成的人员伤亡和财产损失。

表 7 各指标因子分级的信息量值及排序

评价 指标	指标分级 (分类)	信息量值	信息量 排序	评价 指标	指标分级 (分类)	信息量值	信息量 排序	
岩性	A	0.523	12	高程	<1200	0.697	8	
	B	-1.308	50		1200~1600	0.632	10	
	C	0.358	15		1600~1900	0.770	7	
	E	-1.545	51		1900~2400	0.197	24	
	D	-0.094	33		2400~3000	-1.050	45	
土地利用	林地	-0.477	40	水系	3000~3600	-1.094	46	
	草地	-0.938	43		>3600	-1.184	47	
	耕地	1.369	3		0~200	0.416	14	
	建设用地	2.182	1		200~400	0.350	16	
	水体	0.000	32		400~600	0.314	19	
	未利用地	0.222	23		600~800	0.332	17	
	0~200	1.243	4		>800	-0.994	44	
	200~400	0.504	13		坡度	0~10	0.196	25
	400~600	0.013	31			10~20	0.316	18
	600~800	-0.414	39			20~30	0.039	30
800~1000	-0.261	35	30~40	0.528		11		
1000~1200	-0.346	36	40~50	-0.399		38		
道路	1200~1400	-0.369	37	50~60	-1.299	48		
	>1400	-1.695	52	>60	-1.301	49		
	0~200	0.694	9	降雨量	753~1222	-0.547	41	
	200~400	0.715	6		1222~1485	0.069	29	
	400~600	0.268	20		1485~1738	-0.252	34	
	600~800	0.255	21		1738~2198	0.148	27	
	800~1000	0.082	28		2198~3145	1.661	2	
	断裂	1000~1200	0.183	26				
		1200~1400	0.752	5				
		1400~1600	0.226	22				
>1600		-0.635	42					

表 8 危险性等级面积比例和滑坡灾害点在各级别中的分布比例

评价等级	面积/km ²	比例/%	滑坡		滑坡灾害点密度 (个·km ⁻²)
			灾害点/个	比例/%	
极高危险性	448.76	14.53	116	49.36	0.2838
高危险性	848.50	27.47	88	37.45	0.1040
中危险性	1011.60	32.75	23	9.79	0.0227
低危险性	779.55	25.25	8	3.40	0.0103
合计	3088.41	100	235	100	-

4.2 合理性检验

本文通过统计各危险性等级内滑坡灾害点密度,来检验滑坡灾害危险性分区结果的合理性。由图 17 可知:危险性等级越高,滑坡灾害点分布密度越大,两者之间呈现良好的正相关性,危险性等级和滑坡灾害点分布密度的关系可采用指数函数 $y=0.0029e^{1.1478x}$ 来表示,相关系数达到 0.986 8,说明评价结果与研究区的实际情况基本一致,危险性分级区划在理论上具有合理性,采用 AHP-信息量模型进行区域滑坡灾害危

危险性评价具有较高的准确性和可行性。

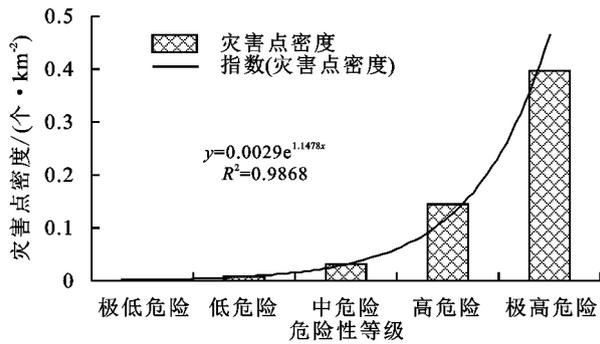


图 17 各危险性分区滑坡灾害点密度分布关系

5 讨论与结论

(1) 以 GIS 为平台,对 9 个影响因子进行相关性分析,剔除 NDVI 因子,最终确定以坡度、高程、道路距离、水系距离、地层岩性、断层构造、土地利用类型以及降雨量共 8 个指标因子,构建滑坡灾害危险性评价指标体系。

(2) 分析各影响因子与滑坡灾害点相对密度的关系,结果表明:滑坡多发生在坡度 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 、高程小于 1 900 m;滑坡发生的概率随降雨量的增加而增加;土地利用类型中建设用地和耕地发生滑坡灾害较多;且滑坡易发生在软弱岩体或软硬相间的岩层中;断裂、水系以及道路都呈现距离越近,滑坡越易发生的趋势。

(3) 泸水市滑坡灾害极高和高危险区主要分布在人口相对密集的河流两岸和道路沿线。极高、高、中、低危险区的面积分别为 448.75, 848.51, 1 011.61, 779.54 km²,中危险及以下区域占研究区总面积的 58%,极高和高危险区面积仅占研究区总面积的 42%,滑坡灾害点却占研究区总数的 86.81%,滑坡密度高达 0.157 3 个/km²,说明该区域危险性较高。

(4) 通过统计各危险性等级内滑坡灾害点密度,进行滑坡灾害危险性评价分级的合理性检验,发现二者呈现良好的正相关性,说明危险性分级区划在理论上具有合理性,采用 AHP—信息量模型能够较好地进行区域滑坡灾害危险性评价。

参考文献:

[1] 中国地质环境公报[J].国土资源通讯,2003(7):52-58.
 [2] 杨栓成,王运生.基于 GIS 的涪江上游南坝—水晶流域滑坡危险性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(6):15-22.
 [3] 王春山,巴仁基,周洪福,等.四川省石棉县县城泥石流灾害风险评估[J].水土保持研究,2014,21(4):219-223,228.
 [4] 陈冠,孟兴民,郭鹏,等.白龙江流域基于 GIS 与信息量模型的滑坡危险性等级区划[J].兰州大学学报:自然科学版,2011,47(6):1-6.

[5] Uromeihy A, Mahdavi M R. Landslide hazard zonation of the Khorshroostam area, Iran[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2000,58(3):207-213.
 [6] 石菊松,张永双,董诚,等.基于 GIS 技术的巴东新城区滑坡灾害危险性区划[J].地球学报,2005,26(3):275-282.
 [7] 熊俊楠,朱吉龙,苏鹏程,等.基于 GIS 与信息量模型的溪洛渡库区滑坡危险性评价[J].长江流域资源与环境,2019,28(3):700-711.
 [8] Talaei, Reza. Landslide risk assessment using a multi-method approach in Hashtchin region(NW of Iran)[J]. Acta Geodaetica Et Geophysica, 2014,49(3):381-401.
 [9] 李炫,杨本勇,范建容,等.基于流域单元的岷江上游泥石流危险性评价[J].水土保持研究,2015,22(6):335-339.
 [10] 高立兵,苏军德.基于信息熵与 AHP 模型的小区泥石流危险性评价方法[J].水土保持研究,2017,24(1):376-380,2.
 [11] 彭令,牛瑞卿,赵艳南,等.区域滑坡灾害风险评估:以长江三峡库区秭归县为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(3):891-901.
 [12] 陶舒,薛东剑,程滔,等.汶川地震前后滑坡分布变化规律:以川北山区为例[J].自然灾害学报,2015,24(1):177-184.
 [13] 谈树成,刘雪斌,谢亚亚,等.某拟建高速公路地质灾害易发性评价[J].水土保持研究,2019,26(3):373-380.
 [14] 洪增林,李永红,张玲玉,等.一种基于主成分分析法的区域性地质灾害危险性评估方法[J].灾害学,2020,35(1):118-124.
 [15] 张晓敏.基于 GIS 的陕西省滑坡灾害危险性评价及分区研究[D].西安:长安大学,2019.
 [16] 魏国灵,金云龙,邱锦安,等.粤东陆河县地质灾害易发性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(1):51-56.
 [17] 杨俊辉.基于 GIS 的岩桑树水电站近坝区滑坡风险性评价[D].长春:吉林大学,2014.
 [18] Wei F, Gao K, Hu K, et al. Relationships between debris flows and earth surface factors in Southwest China[J]. Environmental Geology, 2008,55(3):619-627.
 [19] 刘丽娜,许冲,徐锡伟,等. GIS 支持下基于 AHP 方法的 2013 年芦山地震区滑坡危险性评价[J].灾害学,2014,29(4):183-191.
 [20] 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):292-298,30.
 [21] 张俊,殷坤龙,王佳佳,等.三峡库区万州区滑坡灾害易发性评价研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):284-296.
 [22] 王磊,张春山,杨为民,等.基于 GIS 的甘肃省甘谷县地质灾害危险性评价[J].地质力学学报,2011,17(4):388-401.