

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2021.02.008

基于证据权法的湖南省石门县皂市水库滑坡易发性评价

赵祈溶, 曹顺红, 文武飞, 周丽芸

ZHAO Qi-Rong, CAO Shun-Hong, WEN Wu-Fei, ZHOU Li-Yun

(湖南省地质调查院, 长沙 410016)

(Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410016, Hunan, China)

摘要:湖南省石门县皂市水库地区滑坡地质灾害频发,采用证据权法进行滑坡易发性评价可以为滑坡防治提供科学依据。本文首先以斜坡单元为基本制图单元,利用 ArcGIS 空间分析功能,结合历史滑坡灾害点实地复核数据、遥感影像、地形图、数字高程模型、地质图等数据,提取了坡度、坡形、斜坡高差、植被覆盖度、地层岩性、斜坡结构类型、断层缓冲距离、道路缓冲距离、河流缓冲距离等 9 个证据因子并划分证据层;然后基于证据权法分别计算各证据层权重值,生成了研究区滑坡易发性分区图,并进行了预测精度分析。结果表明:(1)研究区滑坡易发性可划分为高易发区、中易发区、低易发区、极低易发区 4 类,4 类分区面积占比分别为 7.5%、20.6%、54.9%、17.0%;(2)基于成功率曲线法得出分区准确率为 84.7%,评价结果与灾害点分布较为吻合。

关键词:滑坡;证据权法;易发性分区;皂市水库;湖南省石门县

中图分类号:P642.22

文献标识码:A

文章编号:2097-0013(2021)02-0216-10

Zhao Q R, Cao S H, Wen W F and Zhou L Y. Landslide Susceptibility Evaluation Based on Weights of Evidence Method for the Zaoshi Reservoir in Shimen County, Hunan Province. *South China Geology*, 2021, 37(2): 216-225.

Abstract: Landslide geological disasters occur frequently in the Zaoshi reservoir area, Shimen County of Hunan Province. The evaluation of landslide susceptibility by evidence right method can provide a scientific basis for landslide prevention and control. By using historical field revision data of landslide spots, remote sensing image, topographic map, DEM and geological map, we extracted 9 evidence factors on ArcGIS, including slope, slope shape, relative elevation of slope, vegetation coverage, stratum lithology, the models of slope structure, fault buffer distance, road buffer distance and river buffer distance. The weights of evidence factors are determined and the distribution chart of landslide susceptibility are generated by overlaying posterior probability of evidence layer of each unit. The results show that: (1) the landslide susceptibility in the study area can be subdivided into four categories: high prone area, medium prone area, low prone area and very low prone area, whose area proportions are 7.5%, 20.6%, 54.9% and 17.0% respectively; (2) Based on the success rate curve method, the zoning accuracy is 84.7%, and the evaluation results are consistent with the distribution of disaster points.

收稿日期:2021-1-22;修回日期:2021-3-1

基金项目:湖南省自然资源厅项目(湖南皂市水库地质灾害补充调查与勘查)

第一作者:赵祈溶(1987—),工程师,主要从事地质灾害调查、地下(热)水勘查工作,E-mail:474950313@qq.com

Key words: landslide; slope unit; weights of evidence method; susceptibility zoning; the Zaoshi reservoir; Shimen County, Hunan province

石门县皂市水库地处湖南省西北部的山地 - 丘陵区,复杂的地质条件为地质灾害的发育提供了有利的环境,尤以滑坡为甚。同时由于研究区内多个移民新镇和库岸公路的修建,极大地改变了原有地质环境,滑坡强度有加剧的趋势。

为了进一步提高区域防灾减灾的针对性和有效性,对该区进行滑坡易发性评价尤其重要。目前国内主要采用定量分析的方法进行地质灾害易发性评价,其中常用的方法有层次分析法^[1-2]、证据权法^[3-6]、信息量法^[7-8]、逻辑回归模型^[9-10]、定量风险计算评价法^[11-12]、敏感性指数法^[13-14]等。赵银兵等^[15]认为上述评价方法均能客观准确地评价区域地质灾害易发性,其中层次分析法可以凸显主要致灾因子的空间分布格架;逻辑回归模型可实现各级易发性分区的空间渐次变化;定量风险计算评价法主要是根据风险评价公式定量计算了滑坡稳定性系数和破坏概率;敏感性指数法凸显地质灾害高易发区,信息量法兼具层次分析法和敏感性指数法的优点。同时,上述方法也各有其优缺点:张玘恺等^[16]认为层次分析法和信息量法因其定量数据较少,定性成分多,主观性较强;敏感性指数法在一定程度上带有主观性、猜测性,它无法确定某一不确定性因素真正的变化范围和在这一范围内变化的可能性大小;逻辑回归模型选用何种因子和该因子采用何种表达式只是一种推测,导致了某些因子的不可测性。

证据权法是利用综合的证据来支持先前假设的定量方法,其本身是一种离散的多元统计方法,由加拿大数学地质学家 Agterberg 引入地质领域^[17],应用于矿产资源评价与预测领域,近年来也被用于地质灾害易发性、危险性评价^[18-20]研究中。影响因子的选择和权重的确定是正确进行滑坡易发性评价的基础,影响因子不仅有定量因子也有定性因子,在不同模型中,往往影响因子的选择和权重赋值在专家判断的过程中存在主观性,而证据权法是一种数据驱动的方法,可以通过统计分析来确定影响因子的权重,避免主观臆断的选择影响因子和对

影响因子主观的进行权重估值,可以对地质灾害进行客观评价研究。本文采用证据权法对研究区进行滑坡灾害易发性评价。

1 证据权法基本原理

假设研究区被分为 $N(T)$ 个单元,某证据 B 存在的单元数为 $N(B)$,证据 B 不存在的单元数为 $N(\bar{B})$,存在滑坡的单元数为 $N(D)$,不存在滑坡的单元数为 $N(\bar{D})$ 。当每个斜坡单元的证据因子 B 存在时,发生滑坡的前验概率为 $P(D|B)$,如式(1)所示:

$$P(D|B)=P(D \cap B)/P(B) \quad (1)$$

用 $O(x)$ 表示几率,即 x 发生的概率与不发生的概率比值:

$$O(x)=P(x)/[1-P(x)] \quad (2)$$

$$O(D|B)=P(D|B)/[1-P(D|B)]=P(D|B)/P(\bar{D}|B) \\ =O(D) \times [P(B|D)/P(B|\bar{D})] \quad (3)$$

Logit(x) 表示对几率取自然对数,也即 x 发生的逻辑概率。则对式(3)两侧取自然对数:

$$\text{Logit}(D|B)=\text{Logit}(D)+\ln[P(B|D)/P(B|\bar{D})]= \\ \text{Logit}(D)+W^+, \quad (4)$$

同理,当证据因子 B 不存在时:

$$\text{Logit}(D|\bar{B})=\text{Logit}(D)+\ln[P(\bar{B}|D)/P(\bar{B}|\bar{D})]= \\ \text{Logit}(D)+W^- \quad (5)$$

其中:

$$W^+=\ln[P(B|D)/P(B|\bar{D})]=\ln[N(B \cap D) \times N(\bar{D})]/[N(B \cap \bar{D}) \\ \times N(D)] \quad (6)$$

$$W^-=\ln[P(\bar{B}|D)/P(\bar{B}|\bar{D})]=\ln[N(\bar{B} \cap D) \times N(\bar{D})]/[N(\bar{B} \cap \bar{D}) \\ \times N(D)] \quad (7)$$

$$C=W^+-W^- \quad (8)$$

式中: W^+ 、 W^- 分别为证据层存在区和不存在区的权重值,对于原始数据缺失区域,其权重值为 0, C 为相对系数。当 $W^+ > 0$ 或者 $W^- < 0$ 时,影响因子与滑坡灾害呈正相关;当 $W^+ < 0$ 或者 $W^- > 0$ 时,影响因子与滑坡灾害呈负相关。 C 值为正,表示滑坡与证据层之间呈正相关,且其值越大,相关性越大,越利于滑坡的发生,反之则不利于滑坡

发生。

当存在多个相对独立的证据层时,则各个证据层叠加后发生灾害的条件概率为:

$$\text{Logit}(D|B_1 \cap B_2 \cap B_3 \cdots \cap B_n) = \text{Logit}(D) + \sum_{i=1}^n W_i^+ \quad (9)$$

$$\text{Logit}(D|\bar{B}_1 \cap \bar{B}_2 \cap \bar{B}_3 \cdots \cap \bar{B}_n) = \text{Logit}(D) + \sum_{i=1}^n W_i^- \quad (10)$$

2 研究区概况及影响因子分级

2.1 研究区概况

皂市水库位于湖南省西北部,第一斜坡带涉及石门县 7 个乡镇(皂市镇、维新镇、磨市镇、白云镇、三圣乡、雁池镇、新铺镇)和慈利县 1 个乡镇(三合镇),界于北纬 $29^{\circ}37' \sim 29^{\circ}50'$,东经 $110^{\circ}45' \sim 111^{\circ}19'$,总面积 476.53 km^2 (图 1)。

皂市水库地处武陵山东缘的低山 - 丘陵区。区内地层除了缺失石炭系、古近系外,自寒武系至第四系均有分布。区内主要构造线方向为北东东 - 东西向,主要断裂构造有:①珠宝街逆断层,②古家

台 - 易家山正断层,③磨市 - 上坪正断层,④崔家井正断层,⑤下坪 - 田家垭断层,⑥观山 - 夜响庙断层,⑦磺厂 - 竹巷口正断层等(图 1)。该区地质环境复杂且脆弱,人类工程活动频繁,主要发育滑坡和崩塌地质灾害,尤以库岸斜坡及软硬相间岩石分布地段较为密集。根据石门县 1:50000 地质灾害详查数据库和湖南省地质调查院 2017~2018 年实地复核,研究区共有 90 处滑坡点。

2.2 评价数据

本文研究采用的数据源有:①石门县 1:50000 地质灾害详查数据库,用于实地复核研究区内 90 处滑坡数据;②皂市水库研究区范围遥感影像(0.5 m 分辨率),用于圈定地质灾害大致范围;③ 1:10000 矢量地形图和 1:10000 DEM 数据,用于提取坡度、坡形、斜坡高差、道路、水文特征;④ 1:10000 地质图和实测产状数据,提取地层岩性、断层、斜坡结构类型;⑤石门县土地利用规划矢量数据(2016 年调整版),提取植被覆盖度。研究区数据预处理包括坡度、坡形、斜坡高差、植被覆盖度、地层岩性、斜坡结构类型、断层缓冲距离、道路缓冲距离、河流缓冲距离等九个评价因子图层制作。

2.3 斜坡单元划分

对于 1:10000 地质灾害调查尺度而言,确定制图单元是分析滑坡灾害易发性的首要工作和重要基础。区域滑坡灾害评价单元一般分为 5 种类型:栅格单元、地貌单元、特定条件单元、斜坡单元和地形单元^[21]。斜坡单元是滑坡等地质灾害发育的基本单元,且河谷的发育阶段对滑坡等地质灾害的形成,具有重要影响作用^[22-23]。斜坡单元因其可以提高与实际地形地貌的吻合度,能够更好地体现区域中滑坡的实际发育状况^[24]而被广泛运用。因此,采用基于沟谷(山脊)划分的坡面单元作为评价单元,可综合体现各类因素,使评价结果更加贴近实际地质灾害区^[25]。斜坡单元的划分主要采用 ArcGIS 平台,使用 1:10000 数字高程模型(DEM)、遥感影像和地质图来实现,其划分过程依次为:生成无洼地 DEM、水流方向提取、流量提取、河网生成、生成河流连接、集水流域生成、集水流域面矢量生成、反转 DEM 等,经一系列操作得到原始斜坡单元数据,再对其进行人工编辑得到最终的 5722 个

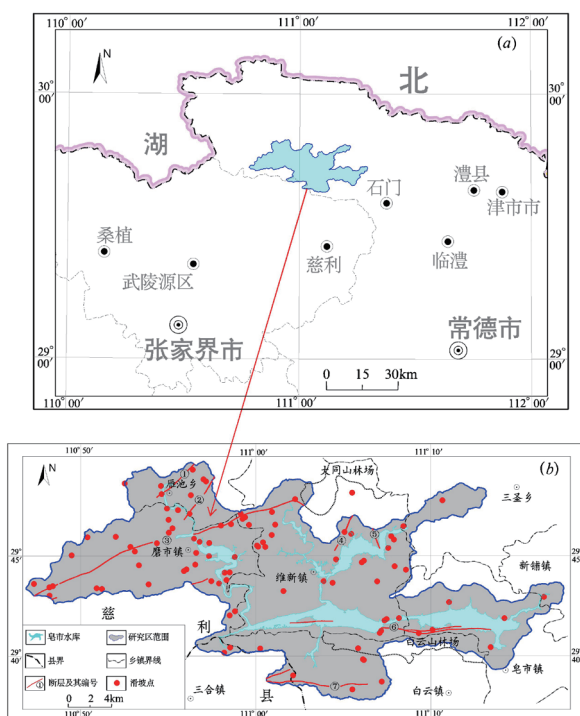


图 1 研究区地理位置(a)及滑坡地质灾害分布图(b)

Fig. 1 Geographic location (a) and landslide distribution (b) of the study area

自然斜坡单元。

2.4 评价因子分级

2.4.1 坡度

地形坡度是孕育地质灾害的重要原因,但不同坡度的致灾性却不相同。由于斜坡单元坡度是综合地形计算的结果,区内所有斜坡单元的整体坡度皆在 60° 以内。首先按照每 10° 一个步长统计各个

区间段地质灾害分布情况,考虑到 $0\sim 10^{\circ}$ 、 $40\sim 50^{\circ}$ 和 $50\sim 60^{\circ}$ 三个等级没有地质灾害分布,故将坡度划分为 $0\sim 11^{\circ}$ 、 $11\sim 20^{\circ}$ 、 $20\sim 30^{\circ}$ 、 $30\sim 36^{\circ}$ 和 $> 36^{\circ}$ 五个等级(图 2a)。

2.4.2 坡形

坡形反映了坡体在内外地质动力作用下的演变规律,地质灾害的发生受到坡形的影响,不同的

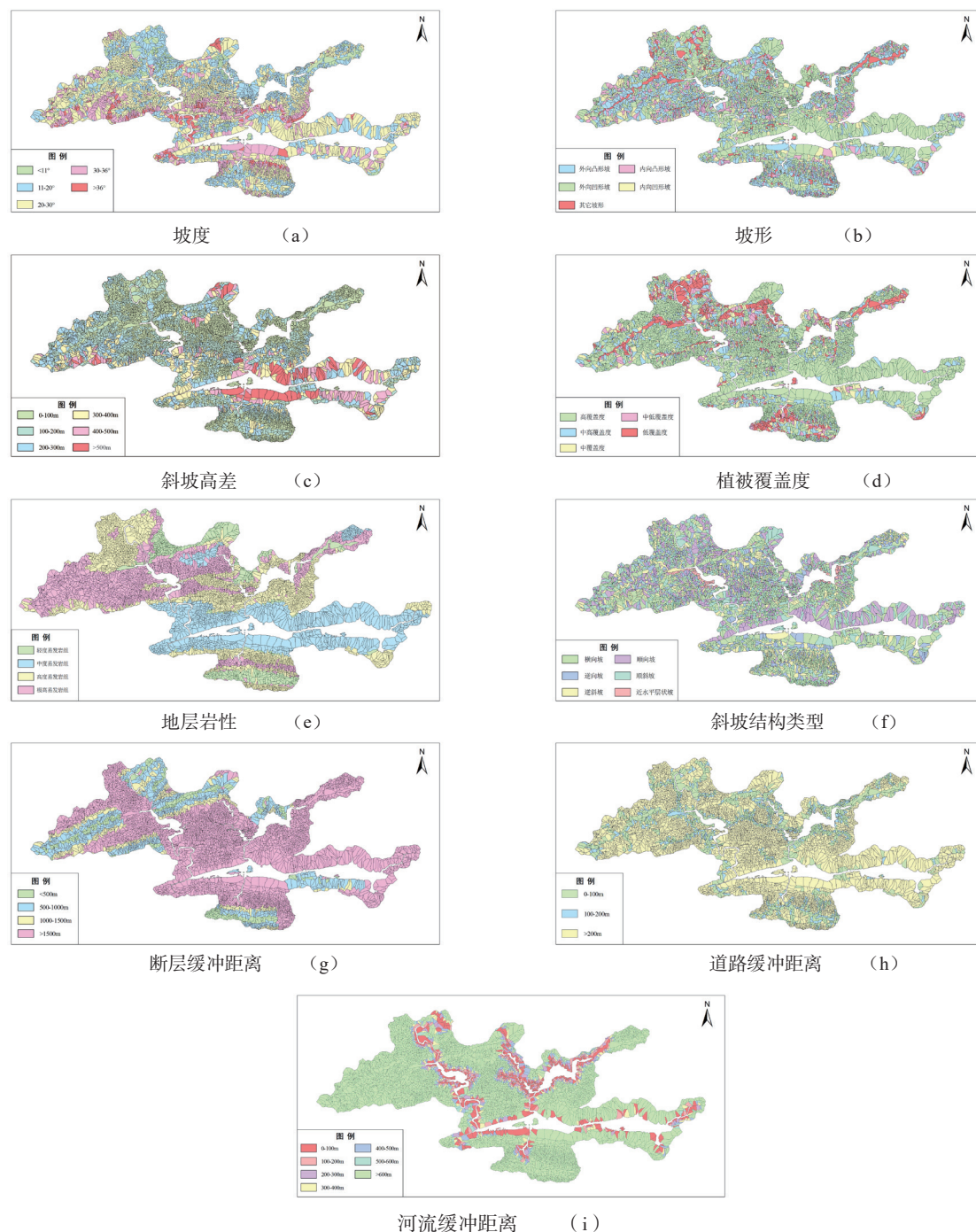


图 2 各证据因子评定结果

Fig. 2 Evaluation results of scores for evidence factors

坡体和坡面受力状况大不相同。凹形坡随着坡长的增加,坡度会减小,相较于坡体的上下部分,坡体中部最容易受到侵蚀,导致坡体失稳;凸形坡坡顶平缓,下部陡峭,坡脚处应力大,坡脚不稳定易发生大型滑坡,直线型坡坡度基本不变,地形起伏小,相对比较稳定。

按照斜坡的平面曲率和剖面曲率可将斜坡坡形划分为内向凹形坡(斜坡单元数量 669 个,下同)、内向凸形坡(613 个)、内向直线形坡(2 个)、外向凹形坡(2486 个)、外向凸形坡(1712 个)、外向直线形坡(4 个)、直线凹形坡(45 个)、直线凸形坡(46 个)、直线坡(145 个)九种类型,考虑到有五种坡形分布的滑坡数量较少,将其归并为其它坡形,故将研究区斜坡坡形分为内向凹形坡、内向凸形坡、外向凹形坡、外向凸形坡、其它坡形五种类型(图 2b)。

2.4.3 斜坡高差

斜坡高差是滑坡、崩塌等地质灾害发育的必要条件之一,对灾害的发育有着重要影响。坡高控制着坡体内各处应力的分布,应力值与坡高成线性正相关关系,坡高增大,应力值也随之增加。

本文利用 DEM 数据提取斜坡高差因子,并将其初步分为 0~100 m、100~200 m、200~300 m、300~400 m、400~500 m、500~600 m、600~700 m、700~800 m 八个等级;分别统计各高差级别的面积占工作区斜坡总面积的比例,各高差级别内滑坡的数量,各高差级别内滑坡的体积分布状况,综合上述三个方面统计其综合贡献率^[26],最终得出 100~200 m 高差范围内最有利于滑坡发生的评判结果;而 0~400 m 的第一斜坡带中,其面积为工作区面积的 85.87%,发育滑坡 79 处,占总数的 87.78%,体积共 1521.89 万 m³,占总体积的 63.86%,是区内重灾范围;相对高差 500~800 m 区域滑坡分布数量极少,每一区间皆不超过 2 处,故将其合并。最终,将斜坡高差因子划分为 0~100 m、100~200 m、200~300 m、300~400 m、400~500 m、> 500 m 六个等级(图 2c)。

2.4.4 植被覆盖度

植被覆盖状况是区域地质灾害发育的重要影响因素,植被能对滑坡的稳定性起到积极的作用,

能提高土体抗剪强度,增强坡面稳定性。滑坡、崩塌地质灾害多发生在无植被或低植被覆盖的区域,而在植被覆盖度好的区域不易发生地质灾害。本次工作参考水利部 2008 年颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》^[27]中的植被覆盖度分级标准,并结合皂市水库自身的植被覆盖特点,将植被覆盖度分成 5 级:低覆盖度(< 30%)、中低覆盖度(30%~45%)、中覆盖度(45%~60%)、中高覆盖度(60%~75%)、高覆盖度(> 75%)(图 2d)。

2.4.5 地层岩性

地层岩性是地质灾害发生、发展的物质基础,岩土体的抗风化能力、强度、应力分布等参数依赖于岩石的类型和软硬程度。此外,不同性质的岩石及其组合因其岩性特征、坚硬程度和岩体结构的差异,地质灾害的类型及发育特征也不相同,不同的地层单元由于其岩性特征及类型差异对地质灾害易发性的影响也显著不同。

工作区共分布 17 种地层,除第四系外各个地层都有地质灾害点分布,因个别地层(泥盆纪云台观组 + 黄家磴组(D_{2y}+D_{3h})、白垩纪神皇山组(K_{1sh})、侏罗纪白田坝组(J_{1b})分布面积较小,所占的斜坡单元个数较少,导致最终的 W^+ 数值严重偏高(分别达到 4.0395、3.1232、2.4814),对最终易发性分区影响都较大,可能造成结果失真,故参考地层因素对滑坡发育的贡献率研究^[28],对全部地层重新进行统计,划分出极高易发岩组(志留纪小河坝组 + 吴家院组(S_{1xh}+w)、泥盆纪云台观组 + 黄家磴组(D_{2y}+D_{3h})、奥陶纪大湾组(O_{1-2d})、高易发岩组(志留纪回星哨组 + 小溪峪组(S_{2h}+x)、志留纪新滩组(S_{1x})、奥陶纪牯牛潭组 + 龙马溪组(O_{2g}+OSI)、二叠纪梁山组 + 茅口组(P_{2l}+m))、中度易发岩组(白垩纪神皇山组(K_{1sh})、白垩纪罗镜滩组(K_{2lj})、三叠纪大冶组(T_{1d})、三叠纪嘉陵江组(T_{1j})、侏罗纪白田坝组(J_{1b})、三叠纪巴东组(T_{2b})、轻度易发岩组(奥陶纪桐梓组 + 红花园组(O_{1t}+h)、二叠纪龙潭组 + 吴家坪组(P_{3l}+w)、寒武纪娄山关组(C_{3-4l})、第四系(Q))四类,得到的证据因子权重值相对更接近本区地质灾害分布规律(图 2e)。

2.4.6 斜坡结构类型

斜坡结构类型是斜坡体内各类岩土体分布的

位置、产状及其与坡度、坡向之间的关系,是构成地质灾害的结构基础。工作区斜坡结构类型共划分为顺向坡(1017 个)、顺斜坡(997 个)、横向坡(2119 个)、逆斜坡(892 个)、逆向坡(630 个)、近水平层状坡(67 个)六类,其中近水平层状坡没有地质灾害分布,故证据因子权重值为 0(图 2f)。

2.4.7 断层缓冲距离

断层发育除了是滑坡发生的有利地形条件,断层周围由于地层挤压或拉裂,使得岩石力学强度降低,破坏了斜坡稳定性,为地质灾害发生创造了条件。考虑到与断层的距离会影响到地质灾害发生的概率,故先计算欧氏距离,设定阈值,将工作区内与断层的缓冲距离划分为 0~500 m、500~1000 m、1000~1500 m、> 1500 m 四个等级,则距离断层 500 m 以内的权重值最高,与基本规律符合(图 2g)。

2.4.8 道路缓冲距离

道路修筑过程形成的高陡边坡和日常扰动都对滑坡发育产生极大的促进作用,其与斜坡之间的距离是主要影响因素。对工作区道路进行缓冲区分析,首先提取区内的省道、县道和重要的村组公路,再以 100 m 为步长,初始划分为 0~100 m、100~200 m、200~300 m、300~400 m、400~500 m、> 500 m 六个等级。从统计结果来看,缓冲距离 200~500 m 区间未分布任何地质灾害,故重新将缓冲区划分为 0~100 m、100~200 m、> 200 m 三个等级;从统计结果可以看出,在缓冲距离为 100 m 以内的滑坡相对点密度最大,随着缓冲区的扩大,相对点密度减少。由此表明,道路建设与地质灾害的发生有着密切的联系,随着与道路距离的增加,地质灾害的发生概率减小(图 2h)。

2.4.9 河流缓冲距离

河流水系是一个地区地表径流大小的体现,在一定程度上反映了该地区的沟谷密度。研究表明,冲刷是滑坡发育的重要因素。根据已知的滑坡到河流的距离关系,可以推测河流距离因子对未来滑坡发生可能的影响。本次选择渫水及其一级支流作为河流影响因子,对上述河流分别做不同距离的缓冲区,分别为 0~100 m、100~200 m、200~300 m、300~400 m、400~500 m、500~600 m 和 >600 m,将河流两侧侵蚀影响范围划分为 7 个等级(图 2i)。

3 评价因子的相关性分析和证据层权重计算

根据证据权法和已有数据分别计算各证据图层的权重值、对比度,结果见表 1。

通过统计分析,整体坡度 20~30° 区间 W^+ 最大,其次为 11~20° 区间,二者 W^+ 和 C 值规律一致,表明其最有利于滑坡发生;整体坡度小于 11° 的 W^+ 最小,显示其最不利于滑坡发生。

外向凹形坡和外向凸形坡的 W^+ 和 C 值为正值且相近,是区内滑坡发育的主要坡形;其余坡形 W^+ 和 C 值为负值,说明其对滑坡发生产生消极影响。

斜坡高差大于 500 m 区间的 W^+ 和 C 值为正值且最大,其次为 400~500 m 区间,是区内滑坡发生的主要相对高差;小于 200 m 区间 W^+ 和 C 值为负值,不易于发生滑坡,随着相对高差不断加大,滑坡发生可能性不断加大。

中低、中、中高植被覆盖度区域的 W^+ 和 C 值较为接近且相对较大,是区内滑坡发生的主要区间,高植被覆盖度区域 W^+ 和 C 值为负值,不利于滑坡发生。

区内极高易发岩组 W^+ 和 C 值为正值且最大,其次为中度易发岩组;轻度易发岩组 W^+ 和 C 值为负值且最小,最不利于滑坡发育。地层岩性证据层权重并未体现出高易发岩组比中度易发岩组更易于引起滑坡的特点,猜测研究区志留系多发育小型滑坡,此类滑坡并未全部纳入地质灾害数据库;且斜坡单元一般跨越两个或多个地层,取面积占比最大的地层来代表斜坡单元地层的方式可能不能准确反映实际的主要易崩易滑地层。

顺斜坡 W^+ 和 C 值为正值且最大,其次为顺向坡,表明这两种斜坡结构类型更易于引起滑坡发生;逆斜坡和横向坡的 W^+ 和 C 值为负值,皆不利于滑坡发生。

与断层距离 500 m 以内 W^+ 和 C 值为正值且数值较大,而超过 500 m 的 W^+ 为负值,此项结果表明区内断层对滑坡发生的影响范围主要在 500 m 以内。

与道路距离 100 m 以内 W^+ 和 C 值为正值且数值较大,而超过 100 m 的 W^+ 为负值,此项结果表明滑坡发生主要受到 100 m 范围内的道路影响。

与河流距离 100 m 以内 W^+ 和 C 值为正值且 W^+ 为负值,说明河流对滑坡的影响范围主要集中在缓冲距离 200 m 范围内。

表 1 证据因子权重与对比度

Table 1 The weights and contrast ratios of evidence factors

评价因子	因子等级	W^+	W^-	C
坡度 /°	< 11	-1.3354	0.0595	-1.3949
	11~20	0.1120	-0.0494	0.1614
	20~30	0.1839	-0.1836	0.3675
	30~36	-0.3812	0.0535	-0.4348
	> 36	-1.2927	0.0273	-1.3200
坡形	内向凹形坡	-0.2555	0.0295	-0.2851
	内向凸形坡	-0.2863	0.0296	-0.3159
	外向凹形坡	0.1118	-0.0949	0.2066
	外向凸形坡	0.1101	-0.0508	0.1608
	其它坡形	-1.4453	0.0337	-1.4789
斜坡高差 /m	0~100	-0.7204	0.3847	-1.1052
	100~200	-0.1001	0.0403	-0.1404
	200~300	0.6500	-0.1351	0.7851
	300~400	0.8287	-0.0959	0.9245
	400~500	1.1651	-0.0510	1.2162
	> 500	1.2514	-0.0296	1.2810
植被覆盖度	低覆盖度	0.0768	-0.0083	0.0851
	中低覆盖度	0.3506	-0.0327	0.3833
	中覆盖度	0.3435	-0.0468	0.3903
	中高覆盖度	0.3296	-0.0687	0.3983
	高覆盖度	-0.2604	0.2848	-0.5451
地层岩性	极高易发岩组 (S_1xh+w, D_2v+D_3h, O_2d)	0.1663	-0.1070	0.2733
	高易发岩组 ($S_2h+x, S_1x, O_2g+OSl, P_2l+m$)	-0.1754	0.0960	-0.2714
	中度易发岩组 ($K_1sh, K_2lj, T_1d, T_{1-2}j, J_1b, T_2b$)	0.1531	-0.0332	0.1862
	轻度易发岩组 ($O_1t+h, P_3l+w, C_{2-3}l, Q$)	-0.4051	0.0328	-0.4379
斜坡结构类型	顺向坡	0.2733	-0.0699	0.3431
	顺斜坡	0.5665	-0.1723	0.7388
	横向坡	-0.3488	0.1609	-0.5097
	逆斜坡	-0.5466	0.0755	-0.6221
	逆向坡	0.0093	-0.0012	0.0104
	近水平层状坡	0.0000	0.0000	0.0000

续表 1

评价因子	因子等级	W^+	W^-	C
断层缓冲距离	<500	1.2306	-0.1842	1.4148
	500~1000	-0.2852	0.0421	-0.3274
	1000~1500	-0.2191	0.0188	-0.2380
	>1500	-0.1599	0.2953	-0.4552
道路缓冲距离	0~100	1.4099	-1.2521	2.6619
	100~200	-0.7904	0.0662	-0.8566
	> 200	-1.3498	1.0074	-2.3572
河流缓冲距离	0~100	0.8030	-0.1157	0.9187
	100~200	0.0023	-0.0001	0.0024
	200~300	-0.1946	0.0067	-0.2013
	300~400	-0.0295	0.0013	-0.0308
	400~500	-1.3632	0.0301	-1.3933
	500~600	-0.3611	0.0090	-0.3701
	>600	-0.0764	0.1914	-0.2678

4 易发性分区与精度评价

4.1 易发性分区结果

成功率曲线是由模型预测的易发性等级和相应的灾害样本累积百分比共同决定的,以易发性等

级为横坐标,灾害样本累积百分比为纵坐标,即可绘制成功率曲线(ROC)(图 3)。取曲线斜率发生变化的拐点(图中纵轴值 40.4%、88.9%、100%)作为易发性的分级依据,将研究区划分为高易发区、中易发区、低易发区、极低易发区(图 3,4)四类。

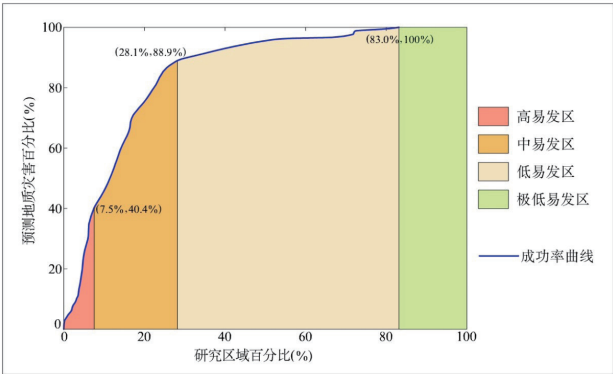


图 3 滑坡灾害易发性成功率曲线图

Fig. 3 Curve of success rate of landslide hazard susceptibility

其中高易发区分为 39 个亚区、128 个次亚区,合计面积约 32.12 km²,占全区面积的 7.53%,主要分布在雁池乡、磨市镇、维新镇及溁水两岸;中易发区分为 30 个亚区、218 个次亚区,合计面积约 87.72 km²,占全区面积的 20.57%,主要分布在商溪

河、仙阳河两岸及溁水北岸;低易发区分为 27 个亚区、128 个次亚区,合计面积约 234.26 km²,占全区面积的 54.92%,在各个乡镇都广泛分布;极低易发区分为 24 个亚区、136 个次亚区,合计面积约 72.41 km²,占全区面积的 16.98%,主要分布在磨市

镇北部、维新镇全境、白云镇中南部。

4.2 精度评价

成功率曲线可以表明评价模型和评价指标对滑坡易发性的预测程度,而 ROC 曲线与横轴围成

的面积 (AUC: area under the curve) 可以表示模型对灾害样本的预测精度,其值越高,预测精度越高。从本次评价预测结果的成功率曲线(图 3)看到, AUC 为 0.847,即可以认为此次评价的精度为 84.7%。

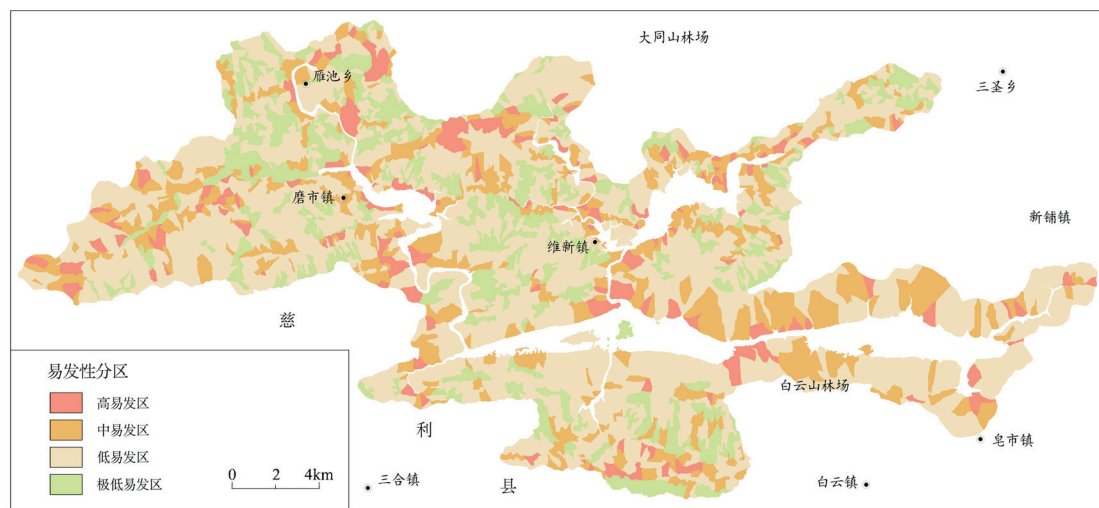


图 4 滑坡易发性分区图

Fig. 4 Landslides susceptibility zoning map

4.3 分区结果讨论

由于各个证据层具有平等的权重,单个证据因子权重值过高可能左右最终评价结果。故应对计算出的每个证据层权重与以往总结的滑坡发育规律进行对比分析,查验合理性,以免某个证据层权重严重偏离客观认知。

由于区内志留系多发育小型滑坡,此类滑坡并未全部纳入地质灾害数据库;且斜坡单元一般跨越两个或多个地层,取面积占比最大的地层来代表斜坡单元地层的方式可能不能准确反映实际的主要易崩易滑地层,导致地层要素初始评价结果与客观现实不符。通过贡献率法进行校正后结果更具有可靠性。

研究区内斜坡单元与河流、道路的缓冲距离都是通过矢量数据提取较高级别的水系、公路计算得出,虽然评价结果与客观规律基本符合,但各个斜坡单元受到局部溪流冲蚀、村组公路切坡的影响未能体现。所以在具备大比例尺地面调查的条件下,仍应以实地调查数据修正每个斜坡单元受河流、道路的影响距离。

5 结论

本文采用证据权法对研究区进行滑坡灾害易发性评价,并用成功率曲线法对评价结果进行验证,其证据因子组合计算结果的 AUC 为 0.847,表明多数滑坡发生在易发性指数较高的单元,评价效果较好。将研究区划分为高易发区、中易发区、低易发区、极低易发区四类:高易发区占总面积的 7.53%,发生 40.4% 的滑坡;中易发区占总面积的 20.57%,发生 48.5% 的滑坡;低易发区占总面积的 54.92%,发生 11.1% 的滑坡;极低易发区占总面积的 16.98%,未有滑坡发生。

参考文献:

- [1] 朱霞,张戈,颜秉英,张旭升.基于 GIS 和层次分析法的清原县地质灾害易发性评价[J].河北地质大学学报,2020,43(6):77-83.
- [2] 王哲,易发成.基于层次分析法的绵阳市地质灾害易发性评价[J].自然灾害学报,2009,18(1):14-23.
- [3] 范强,巨能攀,向喜琼,黄健.证据权法在滑坡易发

- 性分区中的应用—以贵州桐梓河流域为例[J]. 灾害学,2015,30(1):124-129.
- [4] 胡燕,李德营,孟颂颂,孙一清. 基于证据权法的巴东县城滑坡灾害易发性评价[J]. 地质科技通报,2020,39(3):187-194.
- [5] 闫怡秋,杨志华,张绪教,孟少伟,郭长宝,吴瑞安,张怡颖. 基于加权证据权模型的青藏高原东部巴塘断裂带滑坡易发性评价[J]. 现代地质,2021,35(1):26-37.
- [6] 郭长宝,唐杰,吴瑞安,任三绍. 基于证据权模型的川藏铁路加查-朗县段滑坡易发性评价[J]. 山地学报,2019,37(2):240-251.
- [7] 王佳佳,殷坤龙,肖莉丽. 基于 GIS 和信息量的滑坡灾害易发性评价——以三峡库区万州区为例[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(4):797-808.
- [8] 赵东亮,兰措卓玛,候光良,许长军,李万志. 青海省河湟谷地地质灾害易发性评价[J]. 地质力学学报,2021,27(1):83-95.
- [9] 冯策,刘瑞,苟长江. 基于 Logistic 回归模型的芦山震后滑坡易发性评价[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(3):282-287.
- [10] 栗泽桐,王涛,周杨,刘甲美,辛鹏. 基于信息量、逻辑回归及其耦合模型的滑坡易发性评估研究:以青海沙塘川流域为例[J]. 现代地质,2019,33(1):235-245.
- [11] 黎义勇,彭轲,赵信文,刘洋. 郁江流域堡上滑坡形成机制及稳定性分析[J]. 华南地质与矿产,2011,27(1):69-75.
- [12] 徐勇,刘磊,连志鹏,陈丽霞,李德营. 武陵山区宣恩县双龙湖滑坡涌浪风险评价研究[J]. 华南地质与矿产,2018,34(4):331-338.
- [13] 王森,许强,罗博宇,王一超,刘文德,严越. 基于分形理论的南江县滑坡敏感性分析与易发性评价[J]. 水文地质工程地质,2017,44(3):119-126.
- [14] 余丰华,刘正华,夏跃珍,张达政,余恬钰. 基于敏感指数主成分分析法的浙江沿海突发性地质灾害易发区评价[J]. 灾害学,2015,30(4):64-68.
- [15] 赵银兵,陈利顶,孙然好,倪忠云,别小娟. 地质灾害易发性评价方法对比研究:以京津冀地区为例[J]. 环境生态学,2020,2(4):27-38+50.
- [16] 张圪恺,凌斯祥,李晓宁,孙春卫,徐建祥,黄涛. 九寨沟县滑坡灾害易发性快速评估模型对比研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(8):1595-1610.
- [17] Agterberg F P. Combining indicator patterns in weights of evidence modeling for resource evaluation[J]. Nonrenewable Resources, 1992,1(1):39-50.
- [18] 俞布,潘文卓,宋健,缪启龙,张玮玮,段春锋. 杭州市滑坡地质灾害危险性区划与评价[J]. 岩土力学,2012,33(S1):193-199+216.
- [19] 杨华阳,许向宁,杨鸿发. 基于证据权法的九寨沟地震滑坡危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2020,31(3):20-29.
- [20] 赵海燕,殷坤龙,陈丽霞,郭子正,杨永刚,檀梦姣. 基于有效降雨阈值的澧源镇滑坡灾害危险性分析[J]. 地质科技通报,2020,39(4):85-93.
- [21] 张曦,陈丽霞,徐勇,连志鹏. 两种斜坡单元划分方法对滑坡灾害易发性评价的对比研究[J]. 安全与环境工程,2018,25(1):12-17+50.
- [22] 田述军,张珊珊,唐青松,樊晓一,韩培锋. 基于不同评价单元的滑坡易发性评价对比研究[J]. 自然灾害学报,2019,28(6):137-145.
- [23] 谢礼立,陶夏新,左惠强. 基于 GIS 和 AI 的地震灾害危险性分析与信息系统[J]. 自然灾害学报,1995,(S1):1-6.
- [24] 薛强,张茂省,李林. 基于斜坡单元与信息量法结合的宝塔区黄土滑坡易发性评价[J]. 地质通报,2015,34(11):2108-2115.
- [25] 黄启乐,陈伟,唐绪波,傅旭东. 区域地质灾害评价中斜坡单元划分方法研究[J]. 自然灾害学报,2017,26(5):157-164.
- [26] 乔建平,杨宗佑. 贡献率法确定三峡库区滑坡发育环境本底因子[J]. 自然灾害学报,2008,17(5):47-51.
- [27] 水利部. SL 190-2007 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 2008.
- [28] 乔建平,吴彩燕,田宏岭. 三峡库区云阳-巫山段地层因素对滑坡发育的贡献率研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(17):2920-2924.