

文章编号: 1008 - 2786 - (2017) 4 - 000 - 10

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000249

鄂西南山区小区域大比例尺 滑坡灾害易发性及其精度评价

付 圣¹ 陈丽霞^{1*} 黎丰收¹ 连志鹏² ,徐 勇²

(1. 中国地质大学(武汉) 地球物理与空间信息学院, 武汉 430074;

2. 中国地质调查局 武汉地质调查中心, 武汉 430205)

摘 要: 小范围大比例尺地质灾害易发性评价面临时空数据精度或质量不满足理论要求的现状。如何利用有限的数据实现相对可靠的评价结果, 是论文研究的主要目的。论文选取湖北省五峰县渔洋关镇为研究区域, 考虑水文、地形、岩性分布、历史灾害规模等因素讨论了斜坡单元的划分方法; 将证据权模型分析所得滑坡易发性值转换至各斜坡单元, 绘制基于斜坡单元的研究区易发性评价分级图; 分别采用 ROC 曲线和野外核查手段, 评价了易发性结论的成功率和预测率。研究表明, 斜坡单元的划分一方面要符合实际地形, 另一方面更应体现单元的地质差异性; 栅格计算结论转化为斜坡单元的表达成果、精度分析的注重和野外核查工作的开展是保证分析结果可靠性有效途径; 湖北省五峰县渔洋关镇易发性评价成功率和预测率分别为 84% 和 74%, 野外验核与理论分析结果的一致性较高。

关键词: 滑坡; 斜坡单元; 证据权法; 易发性评价; 精度分析

中图分类号: P642. 22

文献标志码: A

我国地质环境复杂多样, 地质自然灾害严重, 滑坡灾害是自然灾害中主要的一种类型。滑坡灾害危及人类生命财产安全、破坏环境和资源, 在人口稠密地区, 其破坏性更严重^[1]。对我国鄂西地区处于城镇化建设或移民迁建山区城镇而言, 开展滑坡易发性评价对于指导灾害风险管理工作具有重要的现实意义^[2]。

山区城镇地质灾害评价尺度(1: 10 000) 属于大比例尺(1: 5000 ~ 1: 15 000) 评价范畴^[3]。该尺度的滑坡易发性评价一般采用确定性模型, 并且需要具备^[4]: 滑坡灾害数据、遥感影像(用于提取地物、植被等信息)、高分辨率数字高程模型(DEM)、岩土体工

程地质条件(用于提供岩土体强度参数、岩土体物质成分、地层产状等信息)、水文条件(地下水埋深、地表水径流分布) 和人类工程活动等。我国山区城镇这一小范围大比例尺的地质灾害易发性评价工作, 存在以上数据的时空精度或质量不满足理论要求的现状。论文拟针对该类数据现状, 综合考虑评价方法的有效性、评价结果的可靠性与适用性, 对城镇范围这一小区域实施大比例尺易发性区划研究。

对于大比例尺度而言, 确定评价单元是分析滑坡易发性的重要任务。在滑坡灾害空间预测评价中, 常用的单元划分类型有栅格单元、地形单元、均一条件单元、地貌单元、斜坡单元等^[5]。其中, 斜坡

收稿日期(Received date): 2016 - 09 - 14; 改回日期(Accepted date): 2017 - 7 - 10。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41641012); 中国地质调查局二级项目(D5. 7. 3) 科研专题“武陵山区城镇地质灾害风险评估技术指南”。[National Natural Science Foundation of China (41641012); Guideline for Geological Hazards in Mountainous Towns in Wuling Area, D5. 7. 3, China Geological Survey]

作者简介(Biography): 付圣(1993 -), 男, 河北保定人, 学士, 主要研究方向: 地质灾害与工程地质。[Fu Sheng(1993 -), male, born in Baoding, Hebei province, B. S., research on geological hazards and engineering geology] E-mail: jason_fusheng@ 163. com。

* 通讯作者(Corresponding author): 陈丽霞(1979 -), 女, 湖北汉川人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 滑坡灾害预测预报、风险分析与管理。[Chen Lixia(1979 -), female, born in Hanchuan, Hubei province, Ph. D., associate professor, research on landslide hazard prediction and risk management] E-mail: ch_l_x@ 163. com

单元因其未分割滑坡实际地形,相对于规则的栅格单元而言更适用于大比例尺评价工作。例如,唐亚明等^[6]考虑面积大小、单元差异性和单元界线划分斜坡单元并用于斜坡稳定性的野外评价。尚慧等^[7]采用斜坡单元对彭阳县地质灾害进行危险性区划,其结果具较好的准确性和预测性。薛强等^[8]基于斜坡单元对宝塔区黄土滑坡进行了易发性评价,认为该方法能提高评价单元与实际地形地貌的吻合度。E. Rotigliano 等^[9]在对 Madonie Mountains 地区进行易发性评价中,采用水文分析法划分斜坡单元,规定每一个单元被河流分支和河道限制,且将低于一定面积的单元合并以提取出影响滑坡的主要控制因子。总而言之,对于一个山区集镇范围而言,斜坡单元的划分是整个评价过程中最耗时的环节,其对评价结果的工程适用性影响较大。目前已开展的大量工作,对斜坡单元的依据与划分过程交代不清晰,研究成果的示范性与可拓性不强。

评价结果的可靠性、分析精度以及与实际吻合程度是用户使用灾害评估成果时最关心的问题。数据不完备条件下的评价结果则更需要精度分析过程。传统的精度评价方法主要有基于 ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲线的成功率和预测率精度评价。Chung CJF 等^[10],S. Sterlacchini 等^[11]采用多种数学模型对研究区进行了易发性精度评价分析,通过成功率和预测率两方面对结果进行了评价。

ROC 曲线虽充分利用了实验数据和预测数据,极为客观,但其缺乏野外现场的真实核查过程。在评价数据源不完备的条件下,现场核查的方法对于大比例尺区域滑坡评价结果的准确性检验尤为重要。尽管野外验证过程需较大工作量,但其评价结论可靠性高。国外学者 Robin Fell 等^[12]在对 GIS 模型预测结论的校正中,曾提出野外现场调查是检验易发性分区精度的最佳方式。国内学者王涛等^[13]也提出,对 GIS 模拟成果进行反复的野外验证是十分必要的,GIS 技术不能取代其决定性地位;在风险控制图研究中提出,为保证滑坡风险制图研究的可靠性,需要进行野外验证。

论文拟针对国内大量开展山区城镇地质灾害评价工作的需求,针对数据不完备的现状,以鄂西地区五峰县渔洋关镇为研究区(1:10 000),重点从评价单元划分和评价精度验证两方面,讨论大比例尺山区城镇滑坡灾害易发性评价方法。

1 研究区概况与数据预处理

研究区位于湖北省五峰土家族自治县渔洋关境内(如图 1),属于典型的构造溶蚀侵蚀低山地貌。渔洋河河流两岸地形较为开阔,分布有一、二、三级阶地。坡度变化较大,坡度大于 30°的山坡在 30% 以上。区内出露地层主要为奥陶系和志留系,岩性为灰岩、白云岩等,薄层至厚层状。因受褶皱和构造带的影响,岩体裂隙及层间破碎带发育,风化强烈,多形成土质边坡,且易形成以滑坡为主的地质灾害。根据野外地质灾害调查报告^[14],研究区历史滑坡灾害点共 7 个。

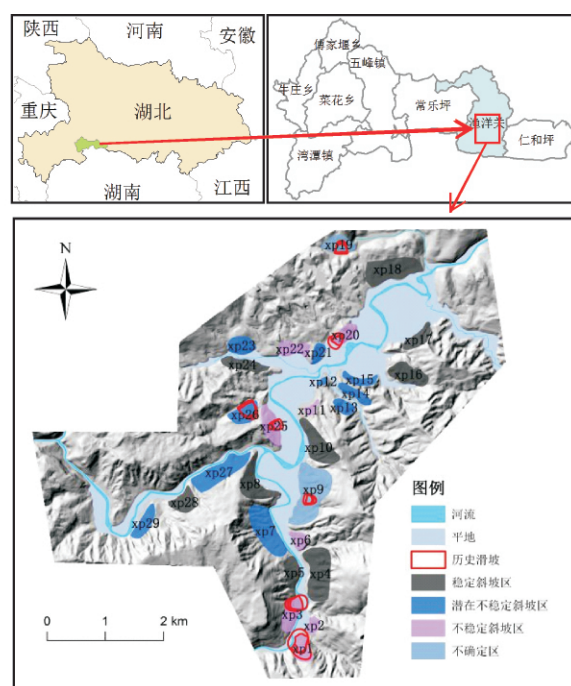


图 1 研究区范围与灾害分布图

Fig. 1 Location of the study area and landslide distribution

论文采用的数据源有:①无人机航拍影像(0.5 m 分辨率);②1:1 万地质灾害分布图;③渔洋关滑坡编录数据库,包含历史滑坡详细数据信息;④1:1 万数字化地形图和 10 mDEM 数据,从中提取坡度、高程、坡向、坡面形态、水文特征和公路;⑤1:1 万地质图,用于提取地层岩性、断层、斜坡结构。研究区数据预处理包括坡度、高程、坡向、坡面形态、地层岩性、斜坡结构、断层、公路、河流等九个因子图层制作。在本环节,研究区被划分为 10 m × 10 m 的栅格单元共 291 363 个。

(1) 坡度

根据研究区滑坡灾害点坡度与滑坡发生的关系,将研究区内坡度分成4个等级: $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 、 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 、 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 、大于 50° , 分别代表平坡、缓坡、中等坡和陡坡。

(2) 高程

研究区高程分带与水系发育、岩性条件、人类活动等因素密切相关,根据研究区滑坡灾害点高程与滑坡发生的关系,将研究区高程范围划分为4个等级: $0 \sim 260$ m、 $260 \sim 350$ m、 $350 \sim 440$ m、 $440 \sim 680$ m。

(3) 坡向

坡向不同导致了太阳光照射的时间和强度的差异,坡体的岩性及水分含量则会受到影响,其差异性有规律地随不同坡向而变化,由此产生了规律性滑坡灾害分布^[15]。为了便于野外实际的方位描述,将研究区内坡向分为: $0 \sim 45^{\circ}$ 、 $45 \sim 90^{\circ}$ 、 $90 \sim 135^{\circ}$ 、 $135 \sim 180^{\circ}$ 、 $180 \sim 225^{\circ}$ 、 $225 \sim 270^{\circ}$ 、 $270 \sim 315^{\circ}$ 、 $315 \sim 360^{\circ}$ 、平地。

(4) 坡面形态

斜坡的坡面形态在空间几何上是地球表面上某个点的切线方向角对所在弧长的转动率,因此能在 ArcGIS 中计算和表征斜坡的坡面形态^[16]。坡面形态小于零则判断坡面形态为凹形坡,其汇水能力较强,坡体上的松散物容易被冲刷,从而间接影响坡体的不稳定性;斜坡的坡面形态大于零则判断为凸形坡,坡型最凸的地方地应力比较集中,在外因触发下很容易发生坡体变形甚至触发滑坡。

(5) 斜坡结构

斜坡结构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,是构成滑坡灾害的结构基础^[17]。将研究区内的斜坡结构按照基岩层面倾向与地形坡向组合的夹角关系可分类5类^[18]: 顺向坡($0 \sim 30^{\circ}$) (其中顺向坡是岩层倾角小于或等于斜坡坡角的顺向坡,而伏顺坡为岩层倾角大于斜坡坡角的顺向坡)、斜向坡($30 \sim 60^{\circ}$)、横向坡($60 \sim 120^{\circ}$)、逆向坡($120 \sim 180^{\circ}$)。

(6) 地层

研究区内有17种地层岩性,其中发育滑坡灾害数量较多的有4类: 奥陶系牯牛潭组、志留系罗惹坪组、志留系纱帽组、第四系残坡积物。

(7) 断层

断层发育除了有利于滑坡灾害发生的地形条件,其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,为滑坡发生创造了条件^[19]。考虑到离断层的距离会影响到滑坡发生的概率,故先计算欧氏距离,设定阈值,将研究区内分为距断层小于100 m和大于100 m。

(8) 河流

河流的长期侵蚀作用会破坏岸坡,掏蚀坡脚会使岸坡产生大量的临空面,致使滑坡沿河发育^[20]。考虑距离河流远近的这一因素,研究区内设定50 m河流缓冲区进行定量分析。

(9) 公路

由于人类工程活动主要集中在公路两侧,对公路因子进行量化具有实际物理意义^[21]。根据实际工作经验,以公路为基准线对普通公路建立100 m缓冲区,对高速公路建立200 m缓冲区进行定量分析,经栅格化处理参与评价。

2 大比例尺区域滑坡易发性评价方法

论文选取我国鄂西地区渔洋关镇为研究区,利用基础地质资料搜集、遥感数据获取和野外灾害调查的手段,预处理滑坡因子数据并制作栅格化因子图层;同时,对研究区实施斜坡单元划分工作;采用证据权模型分析滑坡易发性空间分布后,将栅格评价结果与斜坡单元相结合,得到基于斜坡单元的易发性结果;最后分别通过 ROC 曲线与现场验证法进行精度评价。论文研究技术路线见图2所示。

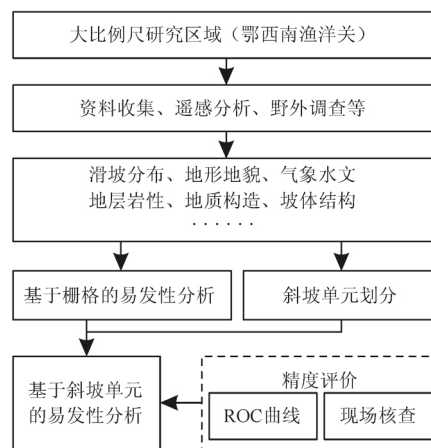


图2 大比例尺区域滑坡灾害易发性分析技术路线图

Fig. 2 Methodology for large scale landslide hazard susceptibility mapping

2.1 斜坡单元划分

山区城镇在平缓地带发生的滑坡的概率小,需首先实施去平地处理。该方法是根据河流地区和坡

度接近 0° 的空间提取至平地图层, 将其从总区域中剔除。

然后, 借鉴 Xie M 和冯正一等^[22-23] 的“集水区重叠法”, 利用正反地形分别提取集水流域的山脊线与山谷线, 把生成的集水流域和反向集水流域融合。具体方法是, 利用 ArcGIS 中的水文分析模块由原始 DEM 数据提取山谷线和洼地填充, 以求取整个研究区的流向图各单元的累积流量^[24]; 通过设定最小汇水单元数得到不同面积的汇水区, 其边界即为分水线; 将原始 DEM 反转, 用同样方法得到负地形的集水流域, 提取负地形的山脊线。将原始 DEM 数据获得的集水流域和反转 DEM 后获取的集水流域叠加融合, 得到初步划分的斜坡单元。

最后, 依据山体阴影、坡体形态等地形因素和地层岩性因素调整单元。具体包括: 缝隙合并、空洞补全、重叠区域删除等细节工作。值得提出的是, 作者认为需要考虑地层岩性因素(如图 4) 以体现单元的地质差异性, 该斜坡单元划分方法更符合研究区滑坡发育的地质与规模规律。具体流程如图 3 所示。

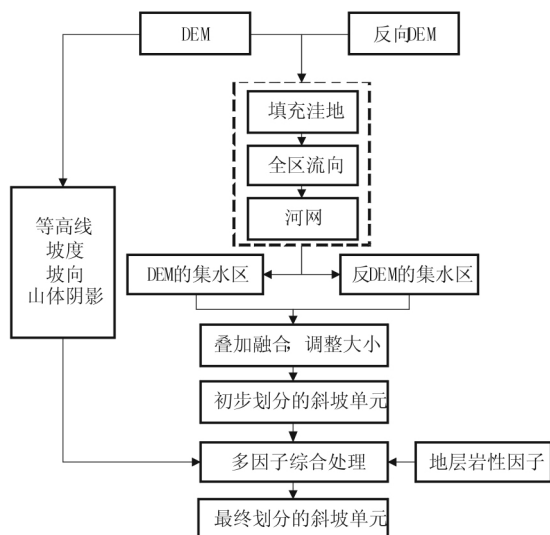


图 3 斜坡单元划分流程图

Fig. 3 Diagram of slope unit division

2.2 易发性评价模型

本文拟采用证据权模型开展易发性评价。该模型早期由加拿大数学地质学家 Agterberg 提出, 是一种假设条件独立前提下综合证据因子的定量评价方法, 后被引入地质领域^[25-28]。该模型分析是以数据驱动的定量评价, 需要解决权重、先验概率、相关度、条件独立性检验、证据因子优选和后验概率等问题。

2.3 精度评价方法

论文分别采用 ROC 曲线和现场核查两种方式

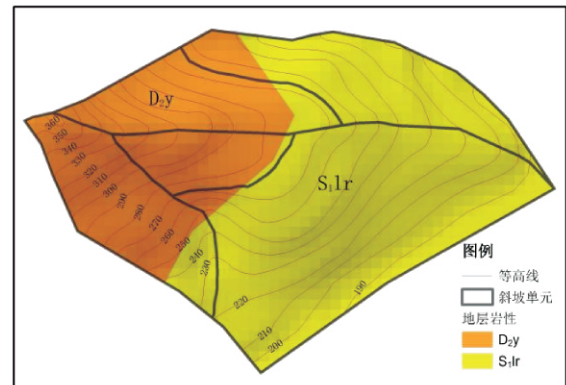


图 4 考虑地形与地层单元的斜坡单元划分示意图

Fig. 4 Sketch of slope unit division based on terrain and lithology unit

进行滑坡易发性精度评价。ROC 曲线的成功率和预测率是由易发性结果与滑坡单元进行分区统计得到。将使用实验滑坡数据(历史滑坡数据)评价易发性分析的成功率, 使用检验数据(野外验核为不稳定级别的斜坡数据)评价易发性分析的预测率。

在野外调查工作中: 根据失稳证据、斜坡形态、斜坡结构特征、地质构造、水的作用、人类工程活动等野外调查判据^[18], 将斜坡分为不稳定、潜在不稳定、稳定和不确定四个级别。后续精度评价时, 所有级别斜坡都将成为精度分析对象。本研究区而言, 2014 年区内野外调查 29 处斜坡, 其中 8 处不稳定, 10 处潜在不稳定, 9 处稳定和 2 处稳定性不确定。

3 鄂西地区渔洋关镇滑坡易发性评价

3.1 训练样本选择与先验概率计算

根据 1:10000 渔洋关地质灾害分布图、鄂西南地区五峰县渔洋关镇城区地质灾害基本特征表和鄂西南地区五峰县渔洋关镇城区斜坡调查统计表等信息, 选择区内所有历史滑坡(共 7 处)作为训练样本参与计算。根据证据权法原理计算得滑坡发生的先验概率(即滑坡密度)为 0.0119。

3.2 斜坡单元划分

通过上述斜坡单元划分方法得到该研究区斜坡单元共 701 个(如图 5)。其中, 斜坡单元的大小根据历史滑坡的面积和方量判定。图 5 中, 斜坡单元最大面积为 $2 \times 10^5 \text{ m}^2$, 最小面积为 $1.6 \times 10^3 \text{ m}^2$, 主要分布在至 $10^4 \sim 9 \times 10^4 \text{ m}^2$ 范围内, 符合当地的实际情况。

3.3 证据因子权重计算

根据证据权法, 分别计算各证据图层的权重值、对比度, 见表 1。以高程为例 $0 \sim 260 \text{ m}$ 范围区域与

滑坡发育呈正相关,权重值较大,在该证据层因子的存在下,非常容易发生滑坡;350 ~ 440 m 范围区域与滑坡发育呈负相关,权重值的绝对值也较大,在该证据层因子的存在下,不易发生滑坡。

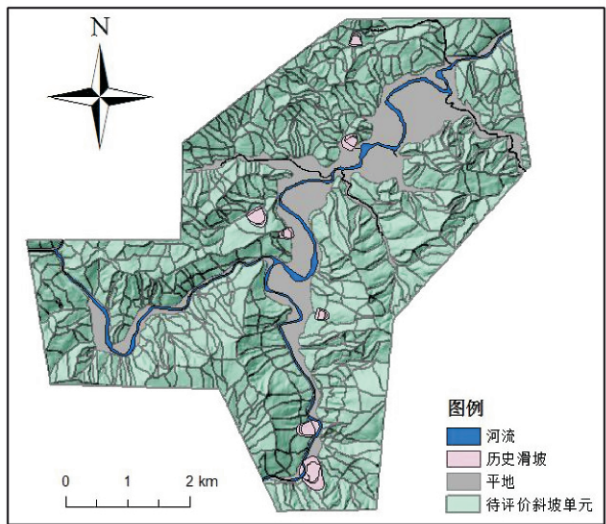


图 5 斜坡评价单元分布图

Fig. 5 Slope unit map for landslide susceptibility zoning in Yuyangguan county

表 1 证据因子权重与对比度

Tab. 1 The weights and contrast of evidence factors				
影响因子	状态指标	W ⁺	W ⁻	C = W ⁺ - W ⁻
坡度/°	0 ~ 10	-1.1113	0.0803	-1.1916
	10 ~ 30	0.1930	-0.3113	0.5042
	30 ~ 50	-0.0652	0.0273	-0.0925
	50 ~ 90	0.0000	0.0247	-0.0247
高程/m	0 ~ 260	0.5101	-0.3502	0.8603
	260 ~ 350	0.1897	-0.1231	0.3128
	350 ~ 440	-1.2584	0.1645	-1.4229
	440 ~ 680	0.0000	0.1462	-0.1462
坡向	平地	-2.7921	0.0223	-2.8145
	NNE(0 ~ 45°)	-0.1852	0.0230	-0.2082
	NEE(45 ~ 90°)	0.4690	-0.0751	0.5440
	SEE(90 ~ 135°)	-0.4904	0.0493	-0.5396
	SSE(135 ~ 180°)	-0.5249	0.0571	-0.5820
	SSW(180 ~ 225°)	-0.5356	0.0566	-0.5921
	SWW(225 ~ 270°)	-0.7329	0.0699	-0.8028
	NWW(270 ~ 315°)	0.2506	-0.0401	0.2907
	NNW(315 ~ 360°)	0.7426	-0.1974	0.9400
坡面形态	凹形坡	0.0665	-0.0741	0.1406
	直线坡	-3.4237	0.0051	-3.4289
	凸形坡	-0.0476	0.0393	-0.0870

续表 1				
影响因子	状态指标	W ⁺	W ⁻	C = W ⁺ - W ⁻
斜坡结构	飘顺坡	0.2214	-0.0274	0.2488
	伏顺坡	-0.8911	0.0359	-0.9270
	斜向坡	-0.8217	0.0962	-0.9180
	横向坡	0.0311	-0.0152	0.0463
	逆向坡	0.2121	-0.1471	0.3592
地层	第四系冲洪积物	-2.6098	0.0073	-2.6171
	第四系残坡积物	1.9079	-0.6337	2.5416
	二叠系马鞍山组	0.0000	0.0058	-0.0058
	二叠系栖霞组	0.0000	0.0077	-0.0077
	石炭系黄龙组	0.0000	0.0026	-0.0026
	泥盆系写经寺组	0.0000	0.0064	-0.0064
	泥盆系黄家磴组	0.0000	0.0127	-0.0127
	泥盆系云台观组	0.0000	0.0752	-0.0752
	志留系纱帽组	0.2269	-0.0746	0.3015
	志留系罗惹坪组	-0.5818	0.1137	-0.6956
	志留系龙马溪组	0.0000	0.1668	-0.1668
	奥陶系宝塔组	0.0000	0.0470	-0.0470
	奥陶系牯牛潭组	1.0559	-0.0652	1.1211
	奥陶系大湾组	-4.9011	0.0392	-4.9403
	奥陶系红花园组	0.0000	0.0488	-0.0488
	奥陶系南津关组	0.0000	0.0486	-0.0486
	寒武系三游洞群组	0.0000	0.0085	-0.0085
至断层	大于 100	0.0410	-0.2688	0.3098
	距离/m 小于 100	-0.2688	0.0410	-0.3098
至河流	大于 50	-0.0264	0.2021	-0.2285
	距离/m 小于 50	0.2021	-0.0264	0.2285
公路缓冲区/m	缓冲区之外	-0.1868	0.6364	-0.8232
	普通公路(<100)	0.8117	-0.1424	0.9541
	高速公路(<200)	0.3036	-0.0249	0.3285

3.4 条件独立性检验及证据因子优选

论文提取了研究区滑坡灾害的证据因子后,为保证证据因子能满足证据权法的要求,必须通过证据因子之间的相关独立性检验,剔除相关性大的证据因子。为了准确计算初选证据因子的相关系数,利用 ArcGIS 波段集统计工具分析各图层证据因子之间的相关系数。由表 2 可知,在所有因子相关性结果中,坡面形态和坡度相关性最大;依据相关程度判定标准^[29],坡面形态和坡度呈低相关度。根据滑坡发育的基本规律,坡度相对而言更为重要,因此剔除坡面形态因子。由此,最终确定研究区内证据因子的最优组合为地形坡度、高程、坡向、斜坡结构、地层、断层、河流、公路。

表 2 各因子相关系数统计表
Tab.2 Correlation coefficient between each factors

	坡度	高程	坡向	坡面形态	斜坡结构	地层	断层	河流	公路
坡度	1.00	0.13	0.06	0.36	0.01	0.03	-0.10	-0.01	-0.11
高程		1.00	0.06	-0.01	0.06	-0.11	-0.11	-0.25	-0.29
坡向			1.00	0.02	-0.06	-0.07	-0.05	-0.03	-0.05
坡面形态				1.00	-0.04	0.00	0.00	0.03	0.00
斜坡结构					1.00	-0.03	-0.04	0.03	-0.05
地层						1.00	0.11	-0.05	0.13
断层							1.00	0.00	0.12
河流								1.00	0.15
公路									1.00

3.5 精度评价与现场验证

以平均值为特征值将各栅格单元的易发性值赋予斜坡单元。将斜坡单元与历史滑坡进行分区统计 绘制成功率曲线(如图 6) 取曲线斜率发生变化的拐点(图内纵轴值 56.58%、67.54%、89.47%、98.99%、100%) 作为易发性的分级依据。

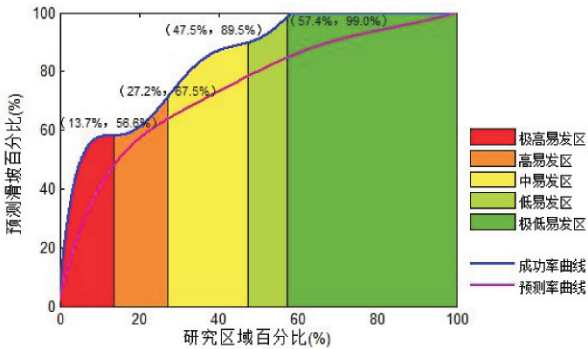


图 6 滑坡灾害易发性成功率与预测率曲线图
Fig.6 ROC curves for success rate and prediction rate

在精度评价中 根据 ROC 曲线线下面积(AUC 值) [30-31] ,分别计算成功率和预测率为 83.6% 和 73.8%。通过与同类研究工作 ,如 S. Sterlacchini 等 [11]、Dahal RK 等 [25] 的评价效果比较可知 本文评价结果精度较高。

在现场核查精度评价中 ,由于室内斜坡单元划分较野外评价的斜坡边界范围更细 ,某一野外斜坡边界通常包括多个具有不同易发等级的斜坡单元。通过计算某一野外斜坡单元所含某等级易发区面积的占比作为易发性评价结论预测率的判断依据。野外核查中 将以下指标作为滑坡不稳定的标识 [18]。失稳证据方面: 历史发生、或有明显变形痕迹; 斜坡形态方面: 坡面形态为凸形、坡高在 50 m 以上、或坡度在 50°以上; 斜坡结构特征为含软弱层结构、岩体结构为块状结构; 地质构造为背景活动性强、距离断裂近的地区等等。例如 ,1 号斜坡(XP1) 包括极高、高和中等三个级别的易发区斜坡单元; 在野外核查中 综合该地区曾发生过滑坡、斜坡相对高差达 240 m、斜坡类型为岩土混合等因素 将其等级判定为不稳定 将极高和高易发区面积占 1 号斜坡的面积百分比视作空间预测的预测率 ,即 79.2%。由表 3 可知 ,该评价结果总体预测率较好 ,特别是对于野外判定为“不稳定”和“潜在不稳定”的斜坡 ,其效果要明显高于“稳定”的斜坡。不稳定斜坡 XP20 和 XP22 预测率相对较低(38.7% 和 30.6%) ,其原因是现场核查中发现这两处斜坡目前正处于切坡建房阶段 ,该信息未在评价中体现 ,从而出现误差 ,可见评价因素的动态变化对斜坡易发性评价结论带来的影响。潜在不稳定斜坡 XP23、稳定斜坡 XP17、XP18 和 XP24 的预测率相对较低 ,属于预测误差存在的客观原因。总体来看 ,野外核查证明本论文实验结果较好。

表 3 斜坡稳定性野外核查与空间预测结论对比表
Tab.3 Comparison of landslide susceptibility between data-driven results and field work investigation

斜坡编号	总面积 /m ²	预测结论(%)					斜坡单元内证据权 法后验概率值	野外判 断等级	预测率 (%)
		极高	高	中	低	极低			
xp1	124 372	78.4	0.9	20.8	0.0	0.0	0.254	不稳定	79.2
xp2	51 453	75.7	5.8	18.5	0.0	0.0	0.311	不稳定	81.5
xp3	140 132	98.1	0.0	0.0	0.2	1.8	0.153	不稳定	98.1
xp6	65 202	79.4	7.5	0.0	13.1	0.0	0.133	不稳定	86.9
xp11	36 022	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.042	不稳定	100.0
xp20	102 283	0.7	38.0	42.6	18.7	0.0	0.016	不稳定	38.7

续表 3

斜坡编号	总面积 / m ²	预测结论(%)					斜坡单元内证据权 法后验概率值	野外判 断等级	预测率 (%)
		极高	高	中	低	极低			
xp22	106 074	0.0	30.6	0.2	69.2	0.0	0.020	不稳定	30.6
xp25	157 342	83.2	0.0	10.0	0.0	6.8	0.329	不稳定	83.2
xp7	303 137	80.1	0.0	3.2	7.8	8.9	0.156	潜在不稳定	83.3
xp12	17 090	84.4	15.6	0.0	0.0	0.0	0.115	潜在不稳定	100.0
xp13	70 232	0.0	23.7	76.3	0.0	0.0	0.015	潜在不稳定	100.0
xp14	89 996	0.0	12.2	87.8	0.0	0.0	0.012	潜在不稳定	100.0
xp15	85 305	44.6	1.2	54.2	0.0	0.0	0.011	潜在不稳定	100.0
xp21	58 940	0.0	0.0	60.4	34.6	5.0	0.012	潜在不稳定	60.4
xp23	119 731	0.0	0.0	35.0	0.0	65.0	0.006	潜在不稳定	35.0
xp26	138 665	1.1	1.1	96.0	1.2	0.7	0.018	潜在不稳定	98.1
xp27	294 101	33.5	0.0	31.5	19.8	15.2	0.255	潜在不稳定	65.0
xp29	118 567	30.2	46.4	22.4	1.0	0.0	0.138	潜在不稳定	99.0
xp4	351 790	33.0	0.0	14.6	0.7	51.7	0.005	稳定	52.4
xp5	118 142	0.0	0.0	44.1	32.9	23.0	0.007	稳定	55.9
xp8	209 979	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.003	稳定	100.0
xp10	214 370	50.5	0.0	0.0	35.1	14.4	0.009	稳定	49.5
xp16	190 651	0.0	0.2	21.0	63.1	15.7	0.006	稳定	78.8
xp17	110 016	17.7	82.3	0.0	0.0	0.0	0.019	稳定	0.0
xp18	336 749	15.6	2.4	41.9	32.5	7.6	0.007	稳定	40.1
xp24	133 747	0.0	15.7	43.7	19.7	21.0	0.018	稳定	40.7
xp28	129 075	40.2	0.3	4.6	0.0	54.9	0.003	稳定	54.9

注: 不稳定斜坡预测率 = (极高 + 高) 面积 / 该斜坡总面积; 潜在不稳定斜坡预测率 = (极高 + 高 + 中) 面积 / 该斜坡总面积; 稳定斜坡预测率 = (低 + 极低) 面积 / 该斜坡总面积。

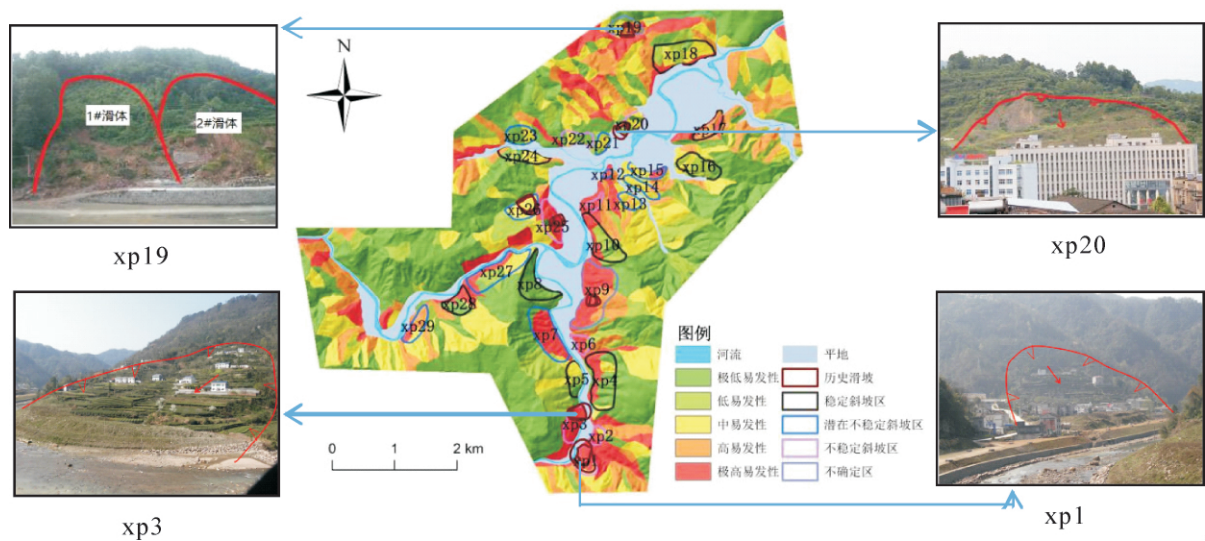


图 7 滑坡易发性分区结果图及现场踏勘图

Fig. 7 Landslide susceptibility zoning map and reconnaissance map

4 结论与讨论

(1) 目前我国大比例尺山区城镇滑坡灾害易发性面临数据精度或质量不满足理论要求的现状。栅格计算结论转化为斜坡单元的表达式成果,精度分析的注重和野外核查工作的开展是克服此项困难并保证分析结果可靠性的有效途径。

(2) 斜坡评价单元的划分除考虑两个集水流域的叠加和坡度、坡向等因素之外,更应注重地层岩性的空间分布,以确保斜坡单元一方面高度符合实际地形,另一方面体现单元的地质差异性。

(3) 数据精度有限的条件下滑坡易发性精度评价要考虑两种途径,一方面是 ROC 曲线的成功率和预测率评价,另一方面是针对现场核查斜坡稳定性进一步评估易发性的准确性。研究区滑坡灾害易发性分析的成功率和预测率分别是 84% 和 74%,其评价效果较好;理论分析与实际核查结论吻合度较高。29 处斜坡区内仅 1 处出现评价结果相反的情况;本次评价对于野外判定为“不稳定”和“潜在不稳定”的斜坡,其效果要明显高于“稳定”的斜坡。评价误差现象表明,人类工程活动对斜坡形态的改造,应及时纳入评价指标中,以及时反映研究区斜坡的稳定性现状。

(4) 研究区内线状评价因子(断层、河流和公路)的缓冲半径,是通过区内有限的历史滑坡与因子的空间位置关系统计得到,其代表性和可靠性值得进一步研究;区内地震带发育,但其地震烈度不高于 6 度,因而未考虑地震加速度空间分布对灾害易发性带来的影响。

参考文献 (References)

- [1] 殷坤龙,朱良峰. 滑坡灾害空间区划及 GIS 应用研究[J]. 地学前缘, 2001, 8(2): 279 - 284 [YIN Kunlong, ZHU Liangfeng, Landslide hazard zonation and application of GIS [J]. Earth Science Frontiers 2001 8(2): 279 - 284]
- [2] 殷坤龙,张桂荣,陈丽霞,等. 滑坡灾害风险分析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2010: 5, 240 - 278 [YIN Kunlong, ZHANG Guirong, CHEN Lixia et al. Landslide hazard risk evaluation [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press 2010: 5, 240 - 278]
- [3] SOETERS R, VAN WESTERN CJ. Slope instability recognition, analysis, and zonation, in A. K. Turner and R. L. Schuster(eds), Landslides: Investigation and Mitigation [M]. Washington DC: National Academy Press, 1996: 247, 129 - 177
- [4] VAN WESTERN CJ, CASTELLANOS E, KURIAKOSE SL. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview [J]. Engineering Geology 2008, 102(3 - 4): 112 - 131
- [5] GUZZETTI F, CARRARA A, CARDINALI M, et al. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy [J]. Geomorphology, 1999, 31(1 - 4): 181 - 216
- [6] 唐亚明. 陕北黄土滑坡风险评价及检测预警技术方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2012, 88 - 107 [TANG Yaming. Methods on risk assessment and monitor & early-warning for the loess landslide in north of Shannxi [D]. Beijing: China University of Geosciences 2012 88 - 107]
- [7] 尚慧,倪万魁,程花. 斜坡单元划分在彭阳县地质灾害危险性区划中的应用[J]. 中国水土保持, 2011, 3: 48 - 50 [SHANG Hui, NI Wankui, CHENG Hua. Application of slope unit division to risk zoning of geological hazards of Pengyang county [J]. Soil and Water Conservation in China 2011 3: 48 - 50]
- [8] 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 [XUE Qiang, ZHANG Maosheng, LI Lin. Loess landslide susceptibility evaluation based on slope unit and information value method in Bao-ta District, Yan'an [J]. Geological Bulletin of China 2015 34(11): 2108 - 2115]
- [9] ROTIGLIANO E, CAPPADONIA C, CONOSCENTI C, et al. Slope units - based flow susceptibility model: using validation tests to select controlling factors [J]. Natural Hazards 2012 61(1): 143 - 153
- [10] CHUNG CJF, FABBRI AG. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1999, 65(12): 1389 - 1399
- [11] STERLACCHINI S, BALLABIO C, BLAHUT J, et al. Spatial agreement of predicted patterns in landslide susceptibility maps [J]. Geomorphology 2011, 125(1): 51 - 61
- [12] FELL R, COROMINAS J, BONNARD C, et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning [J]. Engineering Geology 2008, 102(3 - 4): 99 - 111
- [13] 王涛,吴树仁,石菊松. 国际滑坡风险评估与管理指南研究综述[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 1006 - 1019 [WANG Tao, WU Shuren, SHI Jusong. A review of international landslide risk assessment and management guidelines [J]. Geological Bulletin of China 2009 28(8): 1006 - 1019]
- [14] 连志鹏. 鄂西南地区五峰县渔洋关镇城区地质灾害分布图[R]. 武汉地质调查中心. 2014 [LIAN Zhipeng. Geological hazard map of Yuyangguan Town, Wufeng County [R]. Center of Wuhan geological survey. 2014]
- [15] 宋腾蛟. 金沙江奔子栏水库库区单体滑坡稳定性智能评估及滑坡灾害区域风险分析[D]. 长春: 吉林大学, 2015, 90 - 98 [Song Tengjiao. Intelligent evaluation methods of individual landslides stability and regional risk analysis of landslide hazard in Benzilan water source reservoir along the Jinsha river [D]. Changchun: Jilin University 2015 90 - 98]
- [16] 刘长春. 三峡库区万州城区滑坡灾害风险评价[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014, 66 - 74 [Liu Changchun. Landslide risk

- assessment at Wanzhou urban area in the Three gorges reservoir [D]. Wuhan: China University of Geosciences 2014, 66 – 74]
- [17] 靳世雄, 陈永波, 杨宗佑. 基于贡献率法的滑坡易发性评价——以雅安雨城区为例 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36 (32): 14233 – 14234 [JIN Shixiong, CHEN Yongbo, YANG Zongji. Assessment on the susceptibility of landslide based on the method of contributing rate [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36 (32): 14233 – 14234]
- [18] 崩塌滑坡泥石流地质灾害调查与风险评估技术要求 [S]. 中国地质调查局地质调查技术标准. 2016. 03 [The technical requirements of collapse landslide and debris flow geological hazard and risk assessment [S]. Technical standards of China Geological Survey Bureau of Geological Survey. 2016. 03]
- [19] 范强, 巨能攀, 向喜琼, 等. 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 [FAN Qiang, JU Nengpan, XIANG Xiqiong, et al. Landslides susceptibility assessment using weights of evidence in the Tongzi watershed, China [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30 (1): 124 – 129]
- [20] 蒋良文, 王士天, 刘汉超, 等. 岷江上游干流岸坡主要表生地质灾害分布特征及成因浅析 [J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13 (1): 13 – 17 [JIANG Liangwen, WANG Shitian, LIU Hanchao, et al. Research on hypogene geological hazards in the upstream of Min river [J]. Journal of Geological hazards and environment preservation, 2002, 13 (1): 13 – 17]
- [21] 田述军, 孔纪名. 基于斜坡单元和公路功能的滑坡风险评价 [J]. 山地学报, 2013, 31 (5): 580 – 587 [TIAN Shujun, KONG Jiming. Risk assessment of landslide based on slope unit and highway function [J]. Mountain Research, 2013, 31 (5): 580 – 587]
- [22] Xie MW, Esaki T, Cai MF. A GIS – based method for locating the critical 3D slip surface in a slope [J]. Computers & Geotechnics, 2004, 31 (4): 267 – 277
- [23] 冯正一, 梁家齐, 吴宗江. 边坡变迁三维测量与稳定性分析 [J]. 水土保持学报, 2006, 38 (2): 117 – 128 [FENG Zhengyi, LIANG Jiaqi, WU Zongjiang. Three-dimensional laser scanning and stability analysis of slopes [J]. Journal of Soil and Water Conservation 2006, 38 (2): 117 – 128]
- [24] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 429 – 445 [TANG Guoan, YANG Xin. ArcGIS Geographic information system spatial analysis experimental course [M]. Beijing: Science Press, 2006: 429 – 445]
- [25] DAHAL RK, HASEGAWA S, NONOMURA A, et al. Predictive modeling of rainfall – induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights – of – evidence [J]. Geomorphology 2008, 102 (3 – 4): 496 – 510
- [26] BONHAM – CARTER GF, AGTERBERG FP, WRIGHT DF. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova-Scotia [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1988, 54 (11): 1585 – 1592
- [27] BONHAM-CARTER GF, AGTERBERG FP, WRIGHT DF. Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential [C]// Statistical Applications in the Earth Sciences. 1989, 171 – 183
- [28] AGTERBERG FP. Combining indicator patterns in weights of evidence modeling for resource evaluation [J]. Natural Resources Research. 1992, 1 (1): 39 – 50
- [29] 余建英, 何旭宏. 数据统计分析与 SPSS 应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 164 [YU Jianying, HE Xuhong. Statistical Analysis and SPSS Application [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2003: 164]
- [30] NEUHAUSER B, TERHORST B. Landslide susceptibility assessment using weights of evidence applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany) [J]. Geomorphology 2007, 86 (1 – 2): 12 – 24
- [31] HANLEY JA, MCNEIL BJ. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve [J]. Radiology, 1982, 143 (1): 29 – 36

Large Scale Landslides Susceptibility and Accuracy Assessment in Mountainous Counties

FU Sheng¹, CHEN Lixia^{1*}, LI Fengshou¹, LIAN Zhipeng², XU Yong²

(1. China University of Geosciences, Institute of Geophysics and Geomatics, Wuhan, Hubei province 430074, China)

(2. China Geological Survey, Wuhan Geological Survey Center, Wuhan, Hubei province 430205, China)

Abstract: Data accuracy and quality does not satisfy small area-large scale landslide susceptibility mapping in mountainous area. In this paper, it aims to propose a methodology of susceptibility mapping using limited data for landslides in a town named Yuyangguan, located at Wufeng county, west Hubei province, China. Firstly, slope unit map was generated by a method considering hydrology, topography, lithology and historical landslide

magnitude. Weights-of-evidence model was applied for grid-based landslide susceptibility mapping , which was later converted to slope unit results using average susceptibility value. Then the success rate and prediction rate was evaluated by Receiver Operating Characteristic (ROC) curve and field check. The results showed that slope unit division should consider not only terrain and hydrology , but also geological differences , such as lithology. Grid-based susceptibility map can be converted to slope unit map for the convenience of risk management practice. The reliability can be measured by not only ROC curves but also field investigation. For Wufeng county , the success rate and prediction rate of landslide susceptibility were 84% and 74% , approving a high agreement with field work.

Key words: Landslide; Slope unit; Weights of evidence; Susceptibility mapping; Accuracy analysis