

云南横断山区乡镇滑坡灾害易发性评价

吴兴贵¹, 王蓝婷¹, 丁梓逸¹, 张小亮², 周源海³, 王宇栋¹

(1. 昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 昆明 650093;

2. 中国有色金属工业昆明勘察设计院有限公司, 昆明 650041;

3. 云南凌业地基基础工程有限公司, 昆明 650051)

摘要: 横断山区地质灾害发育多, 其中属滑坡灾害易发育, 危害大, 且山区乡镇多地势环境复杂, 不规范活动较多, 易引发滑坡。因此对该区域乡镇进行滑坡易发性评价具有重要意义。以普洱市澜沧县安康佤族乡为例, 选择高程、坡度、坡向、起伏度等8个影响因素建立滑坡易发性评价指标体系, 构建了小区域滑坡灾害易发性评价指标层次结构模型, 利用层次分析法(AHP)确定出各个因子权重值。基于易发综合强度指数法, 利用 ArcGIS 地理空间分析评价了研究区滑坡易发性, 划分了四类区域: 高易发区, 面积占比 14.53%; 较高易发区, 面积占比 34.06%; 中易发区, 面积占比 33.57%; 低易发区, 面积占比 17.84%。为安康佤族乡防灾减灾以及滑坡灾害治理提供参考, 也为小区域滑坡灾害易发性评价提供了思路方法。

关键词: 地质灾害; GIS; 综合指数; 滑坡; 易发性

中图分类号: P642.22; P56; X4 **文献标识码:** A

THE SUSCEPTIBILITY EVALUATION OF TOWNSHIP LANDSLIDE DISASTER IN HENGDUAN MOUNTAINOUS AREA OF YUNNAN

WU Xing-gui¹, WANG Lan-ting¹, DING Zi-yi¹,

ZHANG Xiao-liang², ZHOU Yuan-hai³, WANG Yu-dong¹

(1. Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of

Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. China Nonferrous Metal Industry Kunming Survey and Design Institute Co. LTD, Kunming 650041, China;

3. Yunnan Lingye Foundation Engineering Co. LTD, Kunming 650051, China)

Abstract: Geological hazards are prevalent in the Hengduan Mountains, Landslide disaster is one of the most development-prone and harmful disasters, in addition, mountainous towns and villages have complex terrain environments and more irregular activities, which are easy to cause landslides. Therefore, it is of great significance to assess the landslide susceptibility of rural townships in this region. Taking the Ankang Wa ethnic township in Lancang County, Pu'er City as an example, this study established an evaluation index system for landslide susceptibility using eight influencing factors such as elevation, slope, aspect, and relief. The hierarchical structure of landslide susceptibility evaluation indicators for small-scale areas was constructed. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was used to determine the weight values of each factor. Based on the Comprehensive Vulnerability Index method,

the landslide vulnerability of the study area was evaluated using ArcGIS spatial analysis. Four categories of regions were identified: high vulnerability area with an area proportion of 14.53%, relatively high vulnerability area with an area proportion of 34.06%, medium vulnerability area with an area proportion of 33.57%, and low vulnerability area with an area proportion of 17.84%. It provides reference for disaster prevention and reduction and landslide disaster control in Ankang Wa Nationality Township, and also provides ideas and methods for small regional landslide disaster susceptibility evaluation.

Key words: geological disaster; GIS; comprehensive index; landslide; susceptibility

据 2016 年统计,滑坡灾害在我国地质灾害中占比最大,已成为我国主要的地质灾害类型之一^[1],严重威胁人的生命财产安全。滑坡灾害的发生与多种因素相关,各种因素之间存在不确定性及相互作用的复杂性特点^[2]。随着社会经济的发展,GIS 技术的引进,国内不少学者对滑坡地质灾害进行了有意义的探索和研究。

横断山区是我国地质结构最为复杂的区域之一,是东部环太平洋区域和西部古地中海区间的交接过渡地带,由于横断山区地质环境复杂,地貌类型多样,生态环境脆弱,使该区域滑坡灾害易发且危害严重^[3]。2006~2015 年期间,横断山区发生山地灾害 932 起,其中滑坡 382 起,造成了巨大的生命财产损失。近年,例如 2018 年发生的特大“白格滑坡”,造成了金沙江堵塞和重大经济损失,是社会影响较大的一起滑坡事件。国内学者对横断山区内山地灾害开展了相关研究,黄靖等^[4]对横断山区凉山州地质灾害的空间分布特征进行了探讨;曹楠等^[5]分析了横断山区内西昌的地质灾害分布规律;兰恒星等^[6]对横断山区内小江流域的滑坡灾害影响因子开展了深入分析;边江豪等^[3]对整个横断山区山地灾害进行了分布特征分析及动态演化规律研究。目前,对横断山区的研究主要以大区域(整个横断山区,州区,县域)尺度为主,且主要分析探讨灾害孕育条件及分布特征,且目前在对滑坡灾害易发性研究中,研究区域尺度主要聚焦于县域及以上,而在城镇区域,由于经济发展建设,山体开挖,建房切坡,公路建设等活动也更加频繁,从而诱发地质灾害发生。且由于乡镇人口“大分部,小聚居”的分布特点,地质灾害发生对山区乡镇人口的影响也会尤为严重。区域滑坡易发性是进行区域滑坡灾害危险性评价的基础,对山区乡镇进行国土资源开发、乡镇规划与建设时规避灾害风险有着重要意义。

综上所述,针对横断山区乡镇级滑坡灾害易发性评价的不足,本文以地处横断山区境内的澜沧县安康佤族乡为研究区,基于 GIS,将 AHP 与综合指

数模型相结合,选取滑坡灾害易发性评价影响因子并计算权重,对研究区内滑坡灾害易发性进行评价并分区,为乡镇安全规划及制定滑坡灾害防治方案提供参考。

1 研究区概况与数据准备

1.1 研究区概况

安康佤族乡位于云南省普洱市澜沧拉祜族自治县西北部,澜沧江以西,东经 $99^{\circ}61'37''\sim 99^{\circ}78'41''$,北纬 $23^{\circ}07'72''\sim 23^{\circ}25'06''$ (图 1),行政区域面积 179 km^2 ,地处横断山脉怒山山系南段,区域内地貌类型为中切割中山峡谷地貌,海拔高程多为 $1\ 800\text{ m}$ 以下,切割深度 $500\sim 1\ 000\text{ m}$ 。乡境内多为高山,地势呈西北高,东南低。

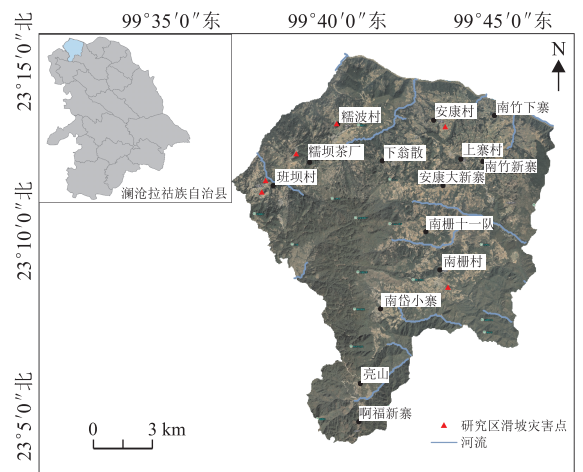


图 1 研究区位置及影像图

该地区属于亚热带山地季风气候,具有气候温和、四季不明显的特征。研究区境内主要河道有二级河流一条,三级河流两条,河网密度 $0.75\text{ km}^2/\text{km}^2$,乡内地层岩组主要为变质石英砂岩、绢英片岩、夹板岩、千枚岩。据云南省澜沧县地质灾害详细调查显示,安康乡共有 10 个地质灾害隐患点,其中滑坡灾害隐患点 7 个,灾害点密度 $5.59\text{ 个}/100\text{ km}^2$,是澜沧县灾害分布密集乡之一。

1.2 数据准备

本文用到的数据主要有安康乡行政边界,DEM,地质图,滑坡历史灾害点,土地利用类型等。其中DEM主要用于高程、坡度、坡向、起伏度、水系、曲率的提取。行政边界来源于91卫图,DEM来源于地理空间数据云,地质图来源于全国地质资料馆,滑坡历史灾害点来源于澜沧县地质灾害详细调查。参考安康佤族乡地理经纬度,结合投影坐标系计算方法,将研究区所有图层的坐标系设置为WGS-1984-UTM-Zone-47N。

2 易发性分区评价方法及因子选取

2.1 易发程度分区评价方法

目前,常用的易发性评价模型包括:信息量模型、确定系数法、逻辑回归模型、神经网络、决策树、综合强度指数法等。研究表明,不同的模型对同一研究区评价的结果不会产生太大差异^[7],但每种模型都有其适用的条件及不足,前面的几种方法均大量需要历史灾害点为基础,本次研究区为乡级小区域,历史灾害点数据少,不能有效客观的反映灾害分布情况,因此,本文采用易发综合强度指数法,对安康乡滑坡灾害易发性进行分区研究。基于研究区实际情况及前人的相关研究总结,确定安康乡滑坡易发性评价因子,利用AHP法计算各因子权重,根据各评价因子的不同状态,按照研究区实际情况划分不同等级,并赋予不同等级分值,将影响因素不同等级的影响程度进行量化,利用GIS叠加分析计算出各个单元所有评价因子加权,得出每一单元的易发程度指数,由易发程度指数将研究区划分为高易发区、较高易发区、中易发区和低易发区。

2.2 评价单元确定

滑坡易发性评价常用的单元划分方法主要有3种:

(1) 栅格单元:栅格单元的大小代表栅格评价单元的精度,为栅格数据最小单位的大小,一般为标准的正方形,每个像元的属性也能反应该栅格的空间分布位置。具有计算简单快捷,数据信息库结构清晰的优点。

(2) 行政单元:按照行政区划进行划分,思路清晰,可操作性强。但该方法分割了研究区域的整体性,忽略了同一评价因子在不同单元之间的联系,评价结果正确度较低。

(3) 斜坡单元:按照斜坡单元进行区域划分,更接近真实的情况,与前两个方法相比,该方法保证了构造单元的整体性、连续性。但是该方法没有统一

的划分标准,受主观意识的影响较大。

本文基于GIS的评价思路,具有数字高程模型等基础资料,缺少滑坡整体性划分的实际工作,因此本文选取栅格单元作为评价单元。本文收集的数据为30 m精度,因此本文将评价栅格单元划分为30 m×30 m。

2.3 评价因子确定

影响滑坡发生的因素主要有地层岩性、地形地貌、降雨量、植被覆盖及人类工程活动等,滑坡是多种因素联合作用的结果^[8]。由于研究区范围不大,故本文只选取地形及斜坡稳定基本因素高程、坡度、坡向、起伏度、曲率、土地利用类型、距水系距离和距断裂距离8个因素作为滑坡灾害易发性评价影响因子(图2),而地层岩性、降雨量等因素在该区域内基本相同故不做考虑。

(1) 高程:高程可以影响地下水径流、降水量、植被分布、斜坡应力变化及人的活动范围等,高程是影响降水量的主要因素,降水量与高程呈反相关关系,径流量的变化与降水量类似,随着高程的增加而减少。高程也决定着植被分布的梯度特性,不同高程下,植被种类与多样性有着明显的差别。同样,高程也会影响人类活动的强度。而这些因素也是影响滑坡发生的重要诱发因素。由以往研究者对云南省滑坡灾害分布特点的分析^[9, 10],滑坡灾害主要分布在1.0~2.0 km高程范围内。研究区高程范围为788~2 422 m,按影响情况将其重分类为4个等级,如图2(a)。

(2) 坡度:坡度是影响斜坡稳定性的重要因素,有了坡度条件,滑坡才会顺着坡面下滑。不同坡度对滑坡产生规模、类型及危险程度有着不同的影响,坡度也同样影响着坡度堆积物势能、植被分布特征及地表径流量。随着坡度的增大,斜坡剪切力也会增大,导致发生滑坡的概率增加,研究区坡度范围为0°~62.2°间,将影响情况其重分类为4个等级,如图2(b)。

(3) 坡向:是一个重要的地形特征,不同的坡体朝向的太阳辐射强度条件不同,进而对坡体土壤结构、植被多样性和覆盖率、水文地质等有着显著影响^[11]。据云南省坡向统计分析,在人类工程活动和地质背景相同的情况下,滑坡在阳坡发生的概率大于阴坡,滑坡密度呈现出南面高于北面、东面高于西面的特征,按影响情况将其重分类为4类,如图2(c)。

(4) 起伏度:高程从整体上反应地形的变化,起伏度反应某确定面积内最高点与最低点的高差(评

价单元的大小 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$), 反应了地表起伏的变化。据起伏度与滑坡灾害的分析, 起伏度与滑坡灾害有很大的相关性, 研究区起伏度为 $0^\circ \sim 133^\circ$, 将其按影响程度重分类为 4 类, 如图 2(d)。

(5) 坡形: 定量的表示地形表面的弯曲变形程度, 反映的是坡面凹凸的形态。剖面曲率反映了坡面的平面形态, 是曲率在垂直方向的分量, 表示坡度从最大降落方向的高程变化率^[12]。曲率越大, 坡形越凸, 反之则越凹。凹形随着坡长的增加, 坡度减小, 坡体中部比坡体上下部更容易受到侵蚀, 凸形坡坡顶平缓, 坡底陡峭, 坡脚应力较大, 更容易发生大型滑坡。总曲率越大, 表示地形地貌越复杂, 也就越容易造成失重, 导致坡体失稳。DEM 数据可以提取剖面曲率, 范围分别为 $0 \sim 42$, 并依据前人研究^[13] 将其进行重分类, 如图 2(e)。

(6) 土地利用类型: 土地利用类型反映的是人类工程活动对滑坡的影响, 随着经济建设的发展, 人类的居民建房、公路建设、耕地利用等活动破坏了斜坡的稳定性, 加剧滑坡灾害的发展。建房切坡及公路开挖等人类活动是典型的地质灾害孕育影响因素

之一^[14], 本文将研究区土地利用类型分为 4 类, 如图 2(f)。

(7) 距水系距离: 河流侵蚀与水对坡体的岩石的浸泡软化以及河流下切形成的斜坡临空面对斜坡岩土体都会造成影响^[15]。水系的发育与其对地表的切割能力成正向影响, 此外, 河流在枯水期与丰水期时, 河流流域内的水文地质环境也会不同, 也会影响斜坡的稳定性。本文对研究区距水系距离按 400 m , $400 \sim 800\text{ m}$, $800 \sim 1\ 600\text{ m}$, $>1\ 600\text{ m}$ 的距离进行划分, 如图 2(g)。

(8) 距断裂距离: 是滑坡灾害发育的影响因素之一, 滑坡的形成机理、类型及规模都与断裂有很大的关系。一方面, 断裂活动直接导致岩土层上部破坏、破裂, 进而引发灾害发生; 另一方面, 地质作用强烈地带, 土质较为疏松, 岩层破碎程度高, 导致风化作用更强, 以至于发育滑坡的斜坡常较为集中。研究区内断裂呈北东-南西向, 倾向 120° , 倾角 70° , 岩石破碎, 砂化强烈。本文对断裂带进行缓冲区创建, 分别为 $0 \sim 800\text{ m}$, $800 \sim 1\ 600\text{ m}$, $1\ 600 \sim 3\ 000\text{ m}$, $>3\ 000\text{ m}$, 如图 2(h)。

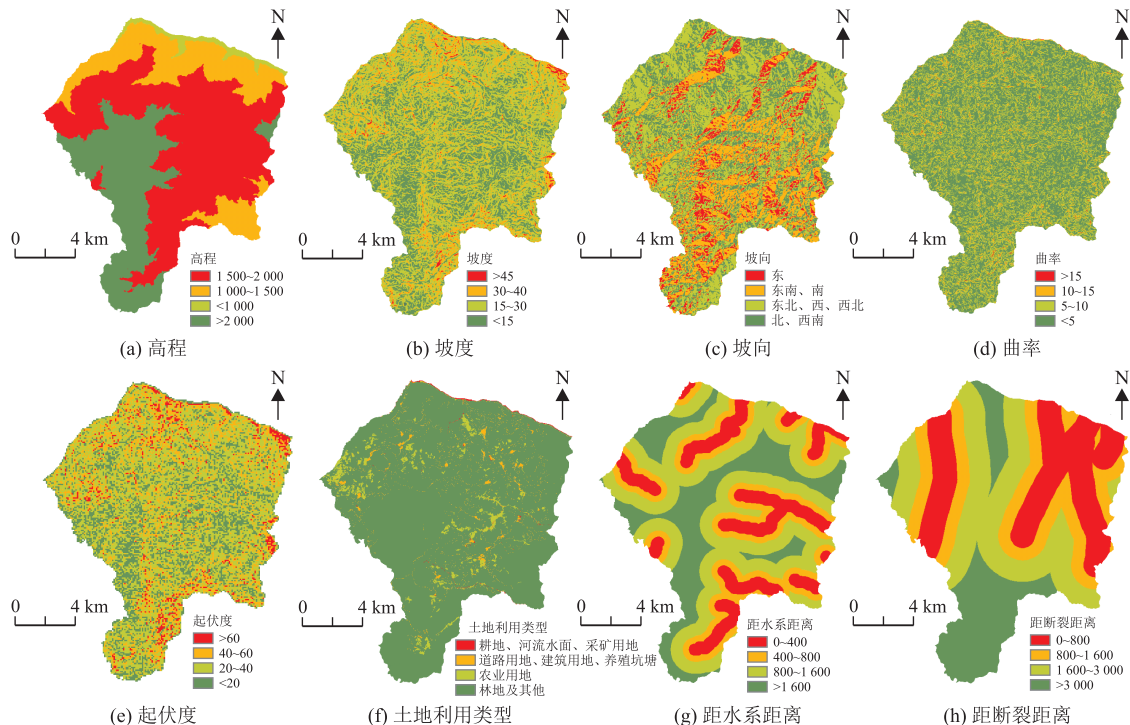


图 2 滑坡易发性评价因子重分类图

3 易发性评价

3.1 权重值计算

3.1.1 构造判断矩阵

本研究拟采用层次分析法来求得各个评价因子

的权重值, 参考前人研究^[16-19], 及结合研究区实际滑坡易发性评价因子分级结果, 采用 T. L. saaty 提出的 1~9 标度法, 对已选定的评价因子之间的相互重要性进行打分, 构建判断矩阵表, 见表 1。

表 1 因子权重比较矩阵表

	高程	坡度	坡向	曲率	起伏度	土地利用类型	距水系距离	距断裂距离
高程	1	1/4	1/2	1/2	1/3	5	3	1/3
坡度	4	1	2	2	2	6	4	2
坡向	2	1/2	1	1/2	1/2	4	3	1/2
曲率	2	1/2	2	1	1/2	3	2	2
起伏度	3	1/2	2	2	1	4	3	1/2
土地利用类型	1/5	1/6	1/4	1/3	1/4	1	2	1/6
距水系距离	1/3	1/4	1/3	1/2	1/3	1/2	1	1/4
距断裂距离	3	1/2	2	1/2	2	6	4	1

3.1.2 一致性检验

在 spss 中采用和积法进行分析计算,针对高程、坡度、坡向、曲率、起伏度、土地利用类型、距水系的距离、距断裂距离分析得到特征向量(表 2)及最大特征值 λ_{max} 为 8.638。对判断矩阵一致性进行检验,公式如下:

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

式(1)中,CI 为一致性指标;n 为矩阵阶数;CR 为随机一致性比率;RI 为平均随机一致性指标。当 $CR < 0.1$,表示该判断矩阵满足一致性检验,指标权重

赋值合理,反之则需对矩阵进行调整。计算得出 CI 值为 0.091,查明一致性指标 RI 为 1.410,根据检验性指标 $CR = CI/RI = 0.091/1.410 = 0.065 < 0.1$,则本次研究判断矩阵具有较好的一致性,最终进行归一化处理,得到各个评价因子的权重值如表 2 中所示。权重计算得出因子的重要性依次是坡度、起伏度、坡向、曲率、高程、距水系距离、土地利用类型、距断裂距离。如果仅采用易发强度综合指数进行易发性研究,而没有对各个因子的权重进行约束,则有可能过度强调水系及土地利用的作用。

表 2 因子特征向量及权重

	高程	坡度	坡向	曲率	起伏度	土地利用类型	距水系距离	距断裂距离
特征向量	0.654	1.972	0.851	1.161	1.291	0.314	0.339	1.419
权重	0.082	0.247	0.106	0.145	0.162	0.039	0.042	0.177

3.2 评价因子等级划分与量化

利用定量与半定量结合的方法,研究分析每个评价因子与滑坡灾害空间分布与发育规模的对应关

系以及内在联系,确定滑坡各评价因子的权重分配后,按照前人^[9, 10, 20]对各类评价因子的研究成果及研究区实际情况,将评分标准量化,见表 3。

表 3 评价因子分级与赋值

序号	评价因子	等级划分及得分			
		4	3	2	1
1	高程/m	1 500~2 000	1 000~1 500	<1 000	>2 000
2	坡度/°	>45	30~40	15~30	<15
3	坡向	东	东南、南	东北、西、西北	北、西南
4	曲率	>15	10~15	5~10	<5
5	起伏度	>60	40~60	20~40	<20
6	土地利用类型	耕地、河流水面、 采矿用地	道路用地、建筑 用地、养殖坑塘	农业用地	林地及其他
7	距水系距离/m	0~400	400~800	800~1 600	>1 600
8	距断裂距离/m	0~800	800~1 600	1 600~3 000	>3 000

3.3 滑坡易发性分区

对研究区滑坡易发性评价时,通过 AHP 对各因子赋予权重之后,对等级评分加权处理后再评价,优于把评价因子直接叠加,结果会更合理。综合指数模型在选择评价因子、栅格单元划分、因子权重划分、因子赋值等研究之后建立危险性指数,将评价因子各等级区间加权叠加得出该研究区的滑坡易发性指数(LSI)。

按表 1 和表 2 的参数,对评价单元取值,利用栅格计算器进行加权叠加计算,计算单元的滑坡易发性评价指数。

$$P_{LSI} = \sum_{i=1}^{n=8} (W_i \times X_i) \quad (2)$$

式(2)中, P_{LSI} 为滑坡易发性综合危险性指数; W_i 为评价因子权重; X_i 为评价因子得分。运用公式算出每个栅格的滑坡易发性指数,得到研究区滑坡易发性指数在 1~3.738 区间。为直观体现评价结果,依

据 GIS 中自然间距分类法对易发性指数进行分级,划分为 4 个分区,见表 4。并在 GIS 软件中绘制研究区滑坡灾害易发性分区图,如图 3。

低易发区:分布在研究区南、西南方向,面积

表 4 滑坡易发性综合评价表

评价等级	栅格数量	综合评价指数	面积/km ²	比例/%
高易发区	30 073	$3.738 > P_{LSI} \geq 2.488$	26.52	14.53
较高易发区	68 514	$2.488 > P_{LSI} \geq 2.097$	62.16	34.06
中易发区	67 803	$2.097 > P_{LSI} \geq 1.703$	61.27	33.57
低易发区	36 447	$1.703 > P_{LSI} \geq 1$	32.54	17.84

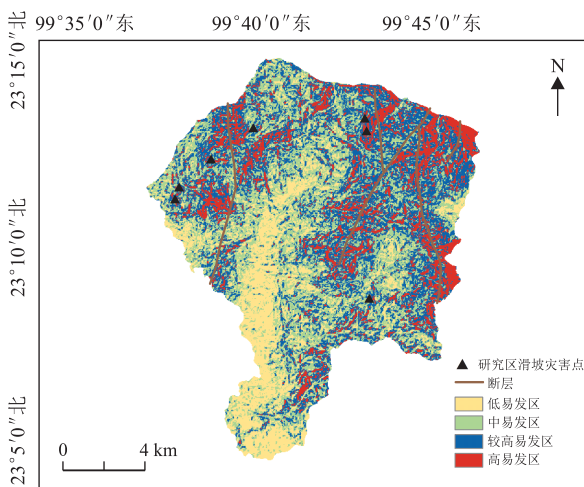


图 3 滑坡易发性分区

中易发区:主要分布在研究区中部及西部部分区域,面积为 61.27 km²,占总面积比例为 33.57%,分布较零散。南栅村、班坝村、糯波村在此区域内,目前调查发现存在滑坡灾害 1 处。

较高易发区:主要分布在研究区东部、北部及东北方部分区域,面积为 62.16 km²,占总面积比例为 34.06%,分布较零散。该区域人类工程活动较多,上寨村、安康大新寨、南岱小寨、亮山在此区域内,目前调查发现存在滑坡灾害 3 处。

高易发区:主要分布在研究区北部及东部及中部部分区域,面积为 26.52 km²,占总面积比例为 14.53%,分布较分散,主要靠近水系及山地。糯坝茶厂、安康村、南竹下寨、南竹新寨,南栅十一队在此区域内,目前调查发现存在滑坡灾害 3 处。

3.4 合理性检验

滑坡灾害易发性评价是一个多标准、多因素的过程,对评价结果的合理性检验是不可少的一步。本文采用受试者工作特征曲线(ROC 曲线)对本文易发性结果进行验证。该方法以真阳性率为纵坐标,以假阳性率为横坐标,形成曲线,曲线下的面积(AUC)用来预测结果合理性,其值越大,则越合理,

32.54 km²,占总面积比例为 17.84%,分布较为集中。为人类工程活动较少地区,下翁散和啊福新寨在此区域内,目前调查发现存在滑坡灾害 0 处。

一般,AUC 值在 0.7~0.9 间,则说明结果具有较高的合理性,当 AUC 的值大于 0.9 时,则说明合理性最好。本文以研究区滑坡灾害点数据作为基础,结合随机选取的非灾害点,分别对灾害点及非灾害点的评价指数数据进行提取,将灾害点数据目标值设为 1,非灾害点数据目标值设为 0,把处理好的数据导入 SPSS 软件中进行运算,得到本次易发性评价的 ROC 曲线(图 4),由计算结果得,AUC 值为 0.822,证明易发性分区结果具有较好的合理性。

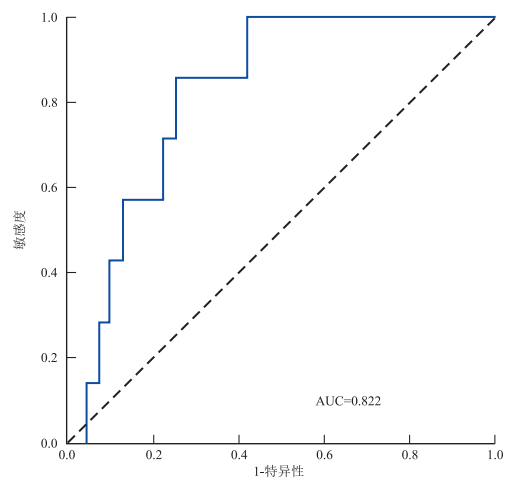


图 4 易发性评价结果的 ROC 曲线

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 本文以地处横断山区的澜沧县安康佤族乡为研究区,根据研究区实际情况选取高程、坡度、坡向、曲率、起伏度、土地利用类型、距水系距离和距断裂距离 8 个评价因子,建立评价指标体系,并采用 AHP 计算因子权重。研究表明,坡度、距断裂距离、起伏度、曲率是影响研究区滑坡发育的最重要的 4 个因素。

(2) 将研究区滑坡易发性划分为 4 个分区,低易发区、中易发区、较高易发区和高易发区,占地面积分别为:32.54 km²、61.27 km²、62.16 km²、

26.52 km²,其中较高易发区和高易发区共占总面积的48.5%,说明研究区滑坡易发性较高。

(3) 得到易发性分区与现有滑坡灾害隐患点呈正相关,灾害隐患点越多,易发性越高,表示该评价结果符合实际情况。采用ROC曲线对分区结果进行合理性检验,得到AUC值为0.822,说明本次易发性分区结果具有较高的合理性和可靠性,表示综合指数模型适用于小区域滑坡易发性评价。

(4) 研究区易发性高及较高区域主要集中在断裂带附近区域,且为村民生活、人口密度较高区域,一旦发生灾害将对村民的生命财产造成威胁。其中,上寨村、安康大新寨、南岱小寨、亮山处于滑坡高易发性区域,该区域在后续的开发与建设中要尽量加强滑坡灾害的防治,同时对已经开挖的边坡采取相应措施,防范滑坡灾害的发生。

4.2 讨论

(1) 目前,在省级、市级、县级大尺度上的地质灾害易发性研究普遍使用信息量模型、确定系数法、逻辑回归模型、神经网络等模型。这些方法均需要丰富历史灾害点等数据资料作为支撑,而在小区域尺度上的灾害易发性评价历史灾害数据较少,资料不够丰富,因此本文采用综合指数模型,将层次分析法与其结合,是一种定性定量相结合的一种综合衡量方法。研究结果表明该方法适用于研究区域资料不够丰富的小区域尺度灾害易发性评价。

(2) 本文研究受限于数据资料限制,其分析深度及精度还存在不足之处。例如,用层次分析法计算因子权重存在一定的主观性,乡域内地层岩性及植被覆盖度无法进行细致的划分与分析;另外,由于地形复杂及研究区域的限制,将评价单元按栅格划分,未按照斜坡单元划分,未能更好体现出实际地形特征与地貌的吻合度,这些还可以进行更进一步的细致研究。

参考文献

- [1] 张林梵,王佳运,张茂省,等.基于BP神经网络的区域滑坡易发性评价[J].西北地质,2022,55(2):260-270.
- [2] 祝清,谭衢霖,周嘉琦,等.基于GIS和AHP的福建福安区域

- 滑坡地质灾害危险性评价[J].测绘与空间地理信息,2021,44(5):25-30.
- [3] 边江豪,李秀珍,胡凯衡.横断山区山地灾害的区域分布特征与动态演化规律研究[C].2018年全国工程地质学术年会,中国陕西西安,2018.
- [4] 黄靖,第宝锋,边静虹,等.凉山州山地灾害空间分布特征及人为驱动力分析[J].水土保持研究,2014,21(6):278-283.
- [5] 曹楠,申太丽,罗水莲,等.西昌市地质灾害发育分布规律及防治建议[J].中国地质灾害与防治学报,2010,21(1):127-132.
- [6] 兰恒星,王苓涓,周成虎.云南小江流域滑坡关键影响因素研究[J].中国地质灾害与防治学报,2003,(1):103-109.
- [7] 温鑫,范宣梅,陈兰,等.基于信息量模型的地质灾害易发性评价:以川东南古蔺县为例[J].地质科技通报,2022,41(2):290-299.
- [8] Risk Assessment of Secondary Geological Disasters Induced by the Yushu Earthquake[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 9(2):232-242.
- [9] 杨迎冬,晏祥省,王宇,等.云南省地质灾害特征及形成规律研究[J].灾害学,2021,36(3):131-139.
- [10] 管新邦.云南省滑坡地质灾害危险性评价研究[D].中国矿业大学(北京),2018.
- [11] 王朝阳.坡向与斜坡稳定性的关系研究[D].昆明理工大学,2008.
- [12] 牛鹏飞.基于综合指数模型的舟曲县滑坡易发性评价[D].河北地质大学,2021.
- [13] 牛全福,冯尊斌,张映雪,等.基于GIS的兰州地区滑坡灾害孕灾环境敏感性评价[J].灾害学,2017,32(3):29-35.
- [14] 杨淞月,翁茂芝,田华,等.湖北省鹤峰县城区滑坡地质灾害风险评价[J].安全与环境工程,2021,28(1):144-155.
- [15] 孟晓捷,张新社,曾庆铭,等.基于加权信息量法的黄土滑坡易发性评价——以1:5万天水市麦积幅为例[J].西北地质,2022,55(2):249-259.
- [16] 邹靖.某地区滑坡地质灾害危险性评估研究[J].福建建材,2022,(1):68-70+86.
- [17] 李益敏,袁静,蒋德明,等.基于GIS的高山峡谷区滑坡灾害危险性评价——以泸水市为例[J].水土保持研究,2021,28(3):355-263.
- [18] 应智超,王中美,刘兵,等.基于GIS的瓮安县地质灾害易发性和危险性分区评价[J].贵州大学学报(自然科学版),2020,37(3):119-124.
- [19] 徐启业.基于GIS的地质灾害风险性评价与区划[D].西南科技大学,2020.
- [20] 李益敏,袁静,蒋德明,等.基于GIS的西南高山峡谷区滑坡危险性评价——以怒江州泸水市为例[J].西北师范大学学报(自然科学版),2021,57(6):94-102.

作者简介: 吴兴贵(1997—),女,硕士研究生,安全工程专业。E-mail:2839666766@qq.com

通讯作者: 王宇栋(1973—),男,硕导,副教授,博士,主要研究地灾规划、大数据挖掘与安全可视化。E-mail:584772219@qq.com