

# 怒江州斜坡地质灾害孕灾环境因素敏感性研究

李益敏<sup>1,2</sup>, 谢亚亚<sup>1</sup>, 蒋德明<sup>1</sup>, 段亚苹<sup>1</sup>

(1. 云南大学 资源环境与地球科学学院, 昆明 650504; 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:** 由于地质背景复杂、地理位置特殊以及气候特征独特, 导致怒江州山地灾害频发, 人居环境脆弱。选择海拔、坡度、河流、道路、地层岩性、断裂带、降雨量以及土地利用类型作为怒江州斜坡地质灾害孕灾环境因子。在地理信息系统(GIS)技术支持下, 采用确定性系数(CF)分析了斜坡地质灾害易发敏感性, 并通过敏感性指数(E)分析了各因子对斜坡地质灾害发生的影响程度, 确定有利于斜坡地质灾害发生的条件, 绘制了斜坡地质灾害敏感性分区图。结果表明: 研究区极低敏感区、低敏感区、中敏感区、高敏感区以及极高敏感区面积比例为 19.95 : 31.22 : 23.84 : 16.57 : 8.2。采用国土部门提供的研究区历年发生的 1 366 个斜坡地质灾害点对研究结果进行了验证, 仅占研究区总面积的 24.99% 的高、极高敏感区内, 发生斜坡地质灾害 1 171 起, 占总的斜坡地质灾害发生数的 85.72%; 斜坡地质灾害点的空间分布情况与孕灾环境敏感性分区具有良好的正相关性。同时采用 2017 年最新地质灾害数据对研究结果进行了验证, 位于高、极高敏感区内的地质灾害数占总灾害数的 90%, 验证了本次研究结果的合理性。可为怒江州灾害的防灾减灾提供决策依据。

**关键词:** 斜坡地质灾害; 孕灾环境; 敏感性; 怒江州

**中图分类号:** P694

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2018)05-0300-06

## Study on Sensitivity in Disaster-Pregnant Environmental Factors of Slope Geological Hazards in Nujiang Prefecture

LI Yimin<sup>1,2</sup>, XIE Yaya<sup>1</sup>, JIANG Deming<sup>1</sup>, DUAN Yaping<sup>1</sup>

(1. School of Resources Environment and Earth Science, Yunnan University, Kunming 650504, China;

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

**Abstract:** Due to the complex geological tectonic background, special geographical location and unique climate characteristics, frequent mountain hazards always exist in high mountain canyon area, and human settlements are vulnerable. In this paper, some factors were selected to research disaster-pregnant environment of slope geological hazards, including elevation, slope, river, road, lithology, fault zone, rainfall, and the land use type. Under the support of GIS, we used certainty factor (CF) model to analyze the slope geological hazards prone sensitivity and determined each factor's impact degree according to the sensitivity-exponential (E) models, ascertained the beneficial conditions to occurrence of slope geological hazards and made the zoning map of slope geological hazards sensitivity in region. The results showed that the area ratio of extremely low sensitive zone, low sensitive zone, medium sensitive zone, high sensitive zone, extremely high sensitive zone in the study area was 19.95 : 31.22 : 23.84 : 16.57 : 8.2. A total of 1 366 slope geological hazards points were used to verify the research results, the high and extremely high sensitive zones were cover 24.99% of the study area, but the actual number of slope geological hazards was 1 171, and the number of slope geological hazards in those sensitive zones was 85.72% of the total. The spatial distribution of slope geological disaster sites has a positive correlation with the sensitive zone. And the latest geological disasters data of 2017 were used to verify the research result. The number of geological disasters in high and extremely high sensitive areas accounted for 90% of the total

收稿日期: 2017-09-17

修回日期: 2017-11-05

资助项目: 云南怒江流域精细化地质灾害气象预警系统研究及示范(2013CA014); 中央引导地方科技发展专项“地质灾害气象预警模型及预警产品表达示范研究——怒江州为示范区”; 云南大学研究生科研创新资助项目(ynuy2016114)

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

number. All disasters have verified the rationality of the results and the results can provide a basis decision-making for disaster prevention and mitigation of disasters in Nujiang Prefecture.

**Keywords:** slope geologic hazards; disaster-pregnant environment; sensitivity; Nujiang Prefecture

斜坡地质灾害是体积巨大的表层物质在重力作用下沿斜坡向下运动,导致人员伤亡和巨大财产损失的地质灾害。崩塌、滑坡及泥石流是典型斜坡地质灾害的表现形式,在特殊孕灾条件下易引发崩滑流群发成灾的现象<sup>[1]</sup>,对人民生命、财产、安全以及基础设施建设等造成重大威胁,严重阻碍着社会经济的可持续发展。地震、降雨、地形地貌以及人类活动等孕灾环境因素,为斜坡地质灾害的发生提供了良好条件。目前,国内外学者对斜坡地质灾害进行了大量研究,如 Raghuvanshi 等<sup>[2]</sup>通过考虑对边坡失稳的内在和外部触发参数,提出了一种新的边坡敏感性评价参数方案(SSEP);O. F. Althuwaynee 等<sup>[3]</sup>采用决策树模型对韩国 Pohang Kyeong Joo 流域进行了滑坡易发性区划,并将其结果与多元逻辑回归模型进行对比;陈曦炜等<sup>[4]</sup>对降雨诱发型地质灾害风险进行评估;庆丰等<sup>[5]</sup>主要分析了人类活动对地质灾害的影响。

目前,学者们主要开展了地质灾害的防治、管理、危险性区划、风险性评估、易发性评价、预测预警等方面的研究,并取得了重要成效<sup>[6-9]</sup>。地质灾害的发生影响因素多而复杂,地质灾害孕灾环境敏感性研究作为相关研究的基础,综合分析各孕灾因子对灾害发生的概率尤为重要,对提高区域灾害预测预报的精度具有重要的价值,对地质灾害防灾减灾有着重要的指导作用。

我国在青藏高原隆升以及季风气候的自然环境条件影响下,地形起伏大、地质构造复杂、降水集中,使得斜坡地质灾害发生频繁<sup>[10]</sup>,伴随着社会经济的快速发展,灾害带来的损失也愈发严重。基于上述情况,本文以怒江州高山峡谷区为研究区,选取海拔、坡度、河流、道路、地层岩性、断裂带、降水量以及土地利用 8 个孕灾环境指标,采用确定性系数概率模型,开展斜坡地质灾害孕灾环境敏感性研究。研究 CF 模型应用于高山峡谷区孕灾环境中的合理性与可行性。

## 1 研究区概况

怒江傈僳族自治州,位于云南省西北部的三江并流世界自然遗产地,地理坐标为 98°09′—99°39′E, 25°33′—28°23′N;辖 1 市 3 县共 29 个乡镇。怒江州最高海拔 5 128 m,最低海拔 738 m,相对高差达 4 390 m,属典型的高山峡谷地貌,南北向总体地势北部高南部低。区内有高大的担当力卡山、高黎贡山、碧罗雪山、云岭以

及水流湍急的独龙江、怒江、澜沧江由西向东相间并列分布,形成了深切割高山峡谷地貌。怒江断裂、澜沧江断裂及碧罗雪山断裂等深大断裂及次级断裂均较发育,致使区内岩石挤压变形,节理裂隙发育,岩体的完整性遭到破坏,降低了坡体的稳定性,为斜坡地质灾害的形成提供了有利的条件<sup>[11]</sup>。怒江州平均坡度 32°,坡度大于 35°区域占 44.28 %。受地形及大气环流的影响,从谷底到山顶形成了独特的山地垂直气候带:亚热带—温带—寒带。境内河流密集,除独龙江、怒江以及澜沧江三大干流之外还有 183 条较大支流。由于降水的季节性差异,冬、夏季节降水量差别较大,加之特殊的地形地貌特征,常常引发崩塌、滑坡及泥石流等斜坡地质灾害。给当地人民生命安全及财产造成了重大影响,严重阻碍着当地社会经济的发展。

## 2 研究方法

### 2.1 数据源

数据源包括,研究区 1:5 万 DEM,1:25 万交通图、地质图,2014 年高分一号卫星影像数据,国土部门收集的怒江州 1 366 起历史斜坡地质灾害点(滑坡 630 起,崩塌 283 起,泥石流 453 起),2017 年 1 月至 9 月的 10 起地质灾害数据。所有空间数据经投影转换统一到西安 80 坐标系下。

### 2.2 指标因子选择

建立科学合理的指标体系,是研究结果准确、合理的关键。结合研究区实际情况和数据资料的全面性、可获得性,选取海拔、坡度、河流、道路、地层岩性、断裂带、降水量、土地利用类型 8 个因子作为孕灾环境因子。

在确定指标因子的基础上,进行各个因子的分级(分类),详见表 1 和附图 3。其中地层岩性分级参照 Wei F<sup>[12]</sup>的方法,将怒江州地层岩组分为 5 类。其中 1 类以泥质灰岩、灰色白云岩、厚层至块状含燧石结核结晶灰岩为主,2 类以片麻岩、变粒岩、石英片岩夹角闪片岩为主,3 类以砂质黏土、砂砾石、粉砂质泥岩为主,4 类以砂岩夹泥岩、页岩夹灰岩为主,5 类以砾岩、黏土岩夹褐煤为主(表 1)。

### 2.3 模型方法

(1) 确定性系数概率模型。确定性系数 CF (certainty factor) 方法作为一个概率函数,最早由 Shortlife 和 Buchanan 提出,由 Heckerman 加以改进,用来分析影

响某一事件发生的各因素的敏感性。该方法主要是通过历史灾害点与孕灾环境因子之间的定量关系来确定灾害发生的敏感性,即预测未来潜在灾害在达到同相似条件区域的其他灾害发生时所处的相同环境时,也可能发生灾害。计算公式如下:

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

式中:PP<sub>a</sub>为斜坡地质灾害事件在数据类 $a$ 中发生的条件概率;PP<sub>s</sub>为斜坡地质灾害事件在整个研究区 $a$ 中发生的概率。PP<sub>a</sub>在实际应用中可以表示为代表数据类 $a$ 的单元中存在的灾害数目与单元面积(km<sup>2</sup>)的比值,PP<sub>s</sub>可以表示为整个研究区的斜坡地质灾害数目与研究区面积(km<sup>2</sup>)的比值。

基于上述公式计算所得的CF的值域区间为[-1,1]。当结果为正,表明灾害发生的可能性增大,此区域为灾害易发区;反之,结果为负,则代表事件确定性的降低,表示灾害失稳的确定性低,不易发生灾害;如果计算结果接近于0值,则代表先验概率与条件概率十分接近,事件发生的确定性不可能确定,即此单元不能确定是否发生灾害。

(2) 敏感性指数。确定性系数概率模型其优势在于能反映某一孕灾环境因子的易发区间,但不能从整体上表达这类因子对灾害发生的贡献程度,而敏感性指数 $E$ 主要反映孕灾环境因子敏感度的大小,这一方法可以从整体上分析每一类因子对斜坡地质灾害失稳的影响,对研究区域灾害敏感性分析指标体系提供定量化依据<sup>[13]</sup>,公式如下:

$$E_i=CF_{(i,max)}-CF_{(i,min)} \quad (2)$$

式中: $E_i$ 为某一个因子对斜坡地质灾害敏感性的影响

指数;CF<sub>(i,max)</sub>为孕灾环境因子 $i$ 各类别对斜坡地质灾害确定性系数值(CF)的最大值;CF<sub>(i,min)</sub>为孕灾环境因子 $i$ 各类别对斜坡地质灾害确定性系数值(CF)的最小值。

### 3 结果与分析

#### 3.1 斜坡地质灾害孕灾环境敏感性分析

3.1.1 海拔 怒江州为高山峡谷地区,海拔 738~5 128 m,相对高差达 4 390 m,由于高差较大以及复杂的地形地貌条件,对水热条件的再分配造成了重要影响,形成了独有的山地垂直气候带,海拔的变化对气候、降水、植被类型等因素有着直接的影响,进而间接的影响着斜坡地质灾害的发生。海拔分级参考文献<sup>[14]</sup>按不同垂直气候带划分(附图 3A)。通过 GIS 技术,由 DEM 得到海拔分级图,建立海拔与斜坡地质灾害发生的关系,采用 CF 模型方法,分析各海拔分级对斜坡地质灾害发生的敏感性。

通过表 2 可以看出,海拔<2 400 m 范围内是怒江州斜坡地质灾害易发区域,特别是<1 900 m 范围内是斜坡地质灾害的高易发集中区域。该区域也是人类活动较为集中的地区,耕作及工程建设等对自然环境的破坏较为严重,加之低海拔区域水系发育,对边坡切割较为明显,使得斜坡地质灾害发生的概率较大。

3.1.2 坡度 坡度是斜坡地质灾害发生的一个重要性控制因素,斜坡地质灾害的发生关键在于斜坡体是否具有有效的临空面。将坡度划分为 5 个等级(附图 3B),应用 CF 模型分析方法,对研究区内坡度与斜坡地质灾害的发生之间关系进行研究,结果见表 3。

表 3 显示,不同坡度分区与斜坡地质灾害的发生有较为密切的关系。怒江州 8°~35°范围内 CF 较大,证明这一坡度区极易发生斜坡地质灾害。

表 1 斜坡地质灾害孕灾环境因子分级(分类)及数据来源表

孕灾环境因子	分级(分类)	数据来源
海拔/m	<1200,1200~1600,1600~1900,1900~2400,2400~3000,3000~3600,>3600	1:5 万 DEM 提取
坡度/(°)	0~8,8~15,15~25,25~35,>35	1:5 万 DEM 提取
距离河流/m	0~200,200~400,400~600,600~800,800~1000,>1000	1:5 万 DEM 提取
距离道路/m	0~200,200~400,400~600,600~800,800~1000,1000~1200,>1200	1:25 万交通图
地层岩性类型	1,2,3,4,5	区地质图提取
距离断裂带/m	0~200,200~400,400~600,600~800,800~1000,1000~1200,1200~1400,1400~1600,>1600	地质图提取
降水量/mm	<40,40~50,50~60,60~70,70~80,80~90,>90	怒江州雨量监测站点
土地利用类型	耕地,草地,林地,水体,建设用地,未利用土地	2014 年高分一号数据

3.1.3 河流 河流两岸属于典型的自然切坡,通过侵蚀作用河流沿岸边坡临空面积增大,使得上部斜坡易发岩土体超过自身承载力向下滑动而导致斜坡地质灾害的发生。不同河流等级其侵蚀作用各不相同,

使得斜坡地质灾害发生的概率也不相同。本文通过 DEM 提取河流,根据怒江州现有自然条件建立 200 m 间隔的河流缓冲区(附图 3C),通过 CF 模型,研究河流与斜坡地质灾害之间的关系,得出距河流距离不

同等级范围内的敏感性,结果见表 4。

表 2 海拔分级及 CF 值确定表

分级/m	密度( $PP_a$ )	$PP_a(1-PP_s)$	$PP_s(1-PP_a)$	CF
<1200	0.595	0.540	—	0.930
1200~1600	0.658	0.596	—	0.946
1600~1900	0.325	0.294	—	0.785
1900~2400	0.123	0.112	—	0.264
2400~3000	0.027	—	0.091	-0.730
3000~3600	0.004	—	0.093	-0.965
>3600	0.001	—	0.094	-0.995

表 3 坡度分级及 CF 值确定表

分级/(°)	密度( $PP_a$ )	$PP_a(1-PP_s)$	$PP_s(1-PP_a)$	CF
<8	0.023	—	0.092	-0.774
8~15	0.128	0.116	—	0.297
15~25	0.142	0.129	—	0.375
25~35	0.101	0.091	—	0.078
>35	0.070	—	0.087	-0.275

表 4 距河流距离分级及 CF 值确定表

分级/m	密度( $PP_a$ )	$PP_a(1-PP_s)$	$PP_s(1-PP_a)$	CF
<200	0.277	0.202	—	0.730
200~400	0.214	0.133	—	0.621
400~600	0.132	0.042	—	0.318
600~800	0.091	—	0.082	-0.036
800~1000	0.065	—	0.088	-0.332
1000~1200	0.060	—	0.088	-0.378
>1200	0.017	—	0.092	-0.830

通过表 4 可以看出,0~600 m 范围内河流对斜坡地质灾害的发生影响较大;距河流距离越远,其 CF 值越小,呈现出明显的递减规律性,表明河流对斜坡地质灾害发生的控制力随着距离的增大而减小。

3.1.4 道路 道路对斜坡地质灾害的影响主要表现在人们修建道路时对边坡的开挖、爆破等加剧了斜坡地质灾害的发生。怒江州属于高山峡谷区,山高谷深,地质构造复杂,生态环境极为脆弱,是地质灾害敏感区,研究区人类活动条件下诱发斜坡地质灾害的频率明显增加。在 GIS 技术支持下,建立以 200 m 为间距的距离道路缓冲区等级图(附图 3D),分析道路与斜坡地质灾害的关系,具体见表 5。

表 5 距道路距离分级及 CF 值确定表

等级/m	密度( $PP_a$ )	$PP_a(1-PP_s)$	$PP_s(1-PP_a)$	CF
<200	0.449	0.407	—	0.873
200~400	0.148	0.134	—	0.407
400~600	0.076	—	0.087	-0.208
600~800	0.053	—	0.089	-0.460
800~1000	0.040	—	0.090	-0.592
1000~1200	0.050	—	0.089	-0.493
1200~1400	0.029	—	0.091	-0.711
>1400	0.010	—	0.093	-0.900

从表 5 可以看出,道路对斜坡地质灾害发生的影

响范围主要集中在 0~400 m 范围内,其 CF 值超过 0.4,该范围为斜坡地质灾害发生的主要控制因素之一;距道路距离越远,其 CF 值越小,道路对斜坡地质灾害的发生影响程度相应降低。

3.1.5 地层岩性 地层岩性作为斜坡地质灾害易发敏感性不可缺少的影响因子之一,是区域斜坡地质灾害分布的主控因素。其岩石的坚硬程度、类型以及结构特征在一定程度上反映出了岩土体的力学强度,还表征了岩石的抗风化、抗侵蚀能力,对于斜坡岩土体变形失稳的影响极为明显。通过研究区 1:25 万数字化地质图提取,结合文献<sup>[13]</sup>中提出不同地层岩性对滑坡泥石流灾害形成的贡献,本文以地层组为基本单位,对地层岩性指标进行归类化处理,将怒江州地层组定量分级标准为 5 类(附图 3E),研究怒江州地层岩性与斜坡地质灾害发生的关系,分析结果见表 6。

表 6 地层岩性分类及 CF 值确定表

类型	密度( $PP_a$ )	$PP_a(1-PP_s)$	$PP_s(1-PP_a)$	CF
1	0.215	0.195	—	0.624
2	0.033	—	0.091	-0.672
3	0.127	0.115	—	0.289
4	0.051	—	0.089	-0.476
5	0.201	0.182	—	0.590

从表 6 可以看出,地层岩性分类中 1,3,5 类型的 CF 值较高,特别是 1,5 两个类型发生斜坡地质灾害的概率较大,其 CF 值均大于 0.5。怒江州 1,3,5 类岩性主要为泥质灰岩、砂岩、泥岩、粉砂岩、砂质黏土、砂砾、石砾岩、黏土岩等较为松散的岩石种类,有利于斜坡地质灾害发生的发生;而 2,4 类岩性主要为板岩、石英岩、大理岩以及流纹岩等较为坚硬的岩石种类,不易发生斜坡地质灾害。

3.1.6 断裂带 断裂构造的破碎带影响范围较广,可长达几公里乃至数十公里,沿断裂构造带上软弱构造面发育,岩石极为破碎,风化程度较高,使得地下水富集和排泄,易发生斜坡地质灾害。研究区内断裂带以南北向为主,有少量东西向分布的断裂带(附图 3F),对研究区内距断裂距离不同区域的确定性系数进行分析,分析结果见表 7。

从表 7 中可以看出,距断裂距离 1 600 m 以内区域,斜坡地质灾害的发生的概率极高,而 1 600 m 范围外斜坡地质灾害发生概率较低。

3.1.7 降雨量 降雨量的大小、分布以及变化规律,对斜坡地质灾害的发生有影响,本文采用 2012—2016 年怒江州 87 个雨量监测站点的平均最大日降水量数据,在 GIS 技术的支持下,用反距离权重法进行空间插值计

算出怒江州 2014—2016 年平均最大日降水量分布图(附图 3G),并划分为 7 个等级,以分析怒江州降雨与斜坡地质灾害之间的关系,分析结果见表 8。

表 7 距断裂距离分级及 CF 值确定表

等级/m	密度( $PP_a$ )	$PP_a(1-PP_s)$	$PP_s(1-PP_a)$	CF
<200	0.155	0.067	—	0.435
200~400	0.149	0.061	—	0.410
400~600	0.133	0.043	—	0.324
600~800	0.141	0.052	—	0.369
800~1000	0.122	0.031	—	0.256
1000~1200	0.103	0.010	—	0.096
1200~1400	0.142	0.053	—	0.375
1400~1600	0.161	0.075	—	0.463
>1600	0.064	—	0.088	-0.344

表 8 降雨量等级及 CF 值确定表

等级/mm	密度( $PP_a$ )	$PP_a(1-PP_s)$	$PP_s(1-PP_a)$	CF
<40	0.067	—	0.087	-0.305
40~50	0.097	0.086	—	0.008
50~60	0.094	0.087	—	0.021
60~70	0.098	0.089	—	0.048
70~80	0.131	0.118	—	0.312
80~90	0.169	0.153	—	0.493
>90	0.452	0.410	—	0.875

通过表 8 可以明显看出,降雨量与斜坡地质灾害的发生有着密切的关系,平均日降水量越大越容易发生斜坡地质灾害。平均日降水量超过 70 mm,发生斜坡地质灾害频率较高。

3.1.8 土地利用 不同土地利用类型对斜坡地质灾害发生的影响程度不同。而人类对土地的不合理利用方式会加剧斜坡地质灾害的发生。本文通过遥感解译,并结合土地利用一级分类标准将土地利用类型分为:林地、草地、耕地、水体、建设用地以及未利用地 6 大类型(附图 3H),采用 CF 模型,建立 6 种土地利用类型与斜坡地质灾害发生之间的关系,结果见表 9。

表 9 土地利用类型及 CF 值确定表

类型	密度( $PP_a$ )	$PP_a(1-PP_s)$	$PP_s(1-PP_a)$	CF
林地	0.068	—	0.087	-0.294
草地	0.009	—	0.093	-0.910
耕地	0.501	0.454	—	0.897
水体	—	—	—	—
建设用地	0.975	0.884	—	0.997
未利用地	0.121	0.085	—	0.324

通过表 9 可以看出,斜坡地质灾害发生概率较大的土地利用类型为耕地和建设用地,CF 值分别为 0.897,0.997。怒江州为高山峡谷区,山高谷深平地少,人类耕作以及工程建设都会对边坡进行开挖,使得边坡稳定性降低,进而促使斜坡地质灾害的发生。

3.2 孕灾环境因子对斜坡地质灾害敏感性的影响程度分析

影响斜坡地质灾害发生的因素多且复杂,本文通过对不同因子孕灾环境的研究,得出不同因子的不同分级(分类)对斜坡地质灾害发生的影响程度各不相同,通过敏感性指数确定各孕灾环境因子的敏感性指数  $E$ ,从而在整体上反映出该因子对斜坡地质灾害失稳性影响程度。

表 10 斜坡地质灾害孕灾环境因子影响程度

序号	孕灾环境因子	$E(i,_{\max})$	$E(i,_{\min})$	$E_i$
1	海拔	0.946	-0.995	1.941
2	坡度	0.375	-0.774	1.149
3	水系	0.730	-0.830	1.560
4	道路	0.873	-0.900	1.773
5	地层岩性	0.624	-0.672	1.296
6	断裂	0.463	-0.344	0.807
7	降雨量	0.875	-0.305	1.180
8	土地利用	0.997	-0.910	1.907

表 10 反映各因子对研究区斜坡地质灾害影响程度。其中海拔、土地利用、道路、水系 4 个因子敏感性指数较高,均超过 1.5,说明研究区斜坡地质灾害的发生主要受这 4 个因子的控制。怒江州山高谷深,河流对边坡的切割作用明显;海拔对地质灾害的影响也较大,怒江州低海拔地区灾害频发,一方面是低海拔地区受人类干扰较大,另一方面可能是高海拔地区人口分布少,发生的地质灾害没有造成人员伤亡未采集或没有被发现而未采集。道路的修建、不合理的土地利用方式以及开矿等人类活动容易诱发地质灾害。地层岩性和坡度是斜坡地质灾害发生的基本条件,而降雨量作为斜坡地质灾害诱发因子之一,对斜坡地质灾害的发生也有不可忽视的作用,其敏感性值都在 1.0 以上。

3.3 孕灾环境敏感性分区与验证

将 CF 模型计算结果赋值到各个敏感性因子分级(分类)中,并在 ArcGIS 支持下,对 8 个因子进行叠加分析,采用自然断点法,将研究区斜坡地质灾害敏感性分为 5 个等级:极低敏感区、低敏感区、中敏感区、高敏感区和极高敏感区(附图 3I)。统计各敏感性区域的面积、比例以及各级别的灾害点个数和比例,结果如表 11 所示。

怒江州斜坡地质灾害高敏感区域主要分布在河流以及道路沿线,与实际历史斜坡地质灾害发生点较为吻合。统计各敏感性等级区域的面积分布分别为:极低敏感区面积为 2 882.3 km<sup>2</sup>,低敏感区面积为 4 510.3 km<sup>2</sup>,中敏感区面积为 3 443.6 km<sup>2</sup>,高敏感区面积为 2 393.5 km<sup>2</sup>,极高敏感区面积为 1 216.1 km<sup>2</sup>。

表 11 敏感性级别面积比例和检验灾害点  
在各级别中的分布比例

敏感性 等级	面积/ km <sup>2</sup>	面积 比例/%	灾害点/ 个	灾害数/ %	灾害点密度/ (个·km <sup>-2</sup> )
极低敏感区	2882.3	19.95	3	0.22	0.001
低敏感区	4510.3	31.22	62	4.54	0.014
中敏感区	3443.6	23.84	100	7.32	0.029
高敏感区	2393.5	16.57	332	24.30	0.139
极高敏感区	1216.1	8.42	839	61.42	0.690

通过以上分析,进一步统计出历史斜坡地质灾害点在不同敏感性等级范围内的分布情况,得出各敏感性等级范围内斜坡地质灾害密度。斜坡地质灾害点的分布密度随着敏感性等级的升高而逐渐增加,二者呈现良好的正相关,与指数函数关系较为吻合,采用公式  $y=0.0003e^{1.5369x}$  定义,相关系数达到 0.972 5。

3.4 2017 年地质灾害数据与结果验证

以怒江州国土局提供的 2017 年 1 月至 9 月发生的 10 起地质灾害作为验证数据,包括滑坡 7 起,崩塌 1 起,泥石流 2 起,将灾害点数据和怒江州孕灾环境敏感性分区图进行叠加,统计各敏感性分区内地质灾害个数,极高敏感区内发生地质灾害 6 起,高敏感区内 3 起,中敏感区内 1 起,可见灾害大多发生在高、极高敏感区内,占总灾害个数的 90%,低敏感区内未发生地质灾害(表 12)。

表 12 2017 年 1 月至 9 月地质灾害基本情况及其所在敏感区

编号	时间	灾害类型	经度	纬度	所在敏感区
1	2017.3.24	泥石流	98.62	26.01	极高敏感区
2	2017.7.10	滑坡	98.73	25.95	高敏感区
3	2017.7.26	滑坡	98.75	25.94	高敏感区
4	2017.8.10	滑坡	98.75	25.95	高敏感区
5	2017.8.10	滑坡	98.76	25.95	中敏感区
6	2017.8.10	崩塌	98.85	27.50	极高敏感区
7	2017.8.10	泥石流	98.83	27.54	极高敏感区
8	2017.9.7	滑坡	98.92	25.87	极高敏感区
9	2017.9.17	滑坡	99.15	26.38	极高敏感区
10	2017.9.25	滑坡	99.13	26.36	极高敏感区

4 结 论

(1) 区内斜坡地质灾害点的实际分布情况验证了敏感性分区结果的正确性,灾害点密度与敏感性等级具有良好的正相关性,其指数函数关系验证了 CF 模型的斜坡地质灾害敏感性分区结果的合理性。

(2) 怒江州历史斜坡地质灾害点大多位于极高敏感区,主要分布在怒江州的河流和道路沿线;中敏感及其以上敏感程度范围内的斜坡地质灾害点占总数的 93.04%,特别是极高敏感区历史斜坡地质灾害点所占比例

达 61.42%,研究结果与实际斜坡地质灾害的发生较为吻合,表明选取的敏感性因子和评价模型合理。

(3) 怒江州峡谷的河流区以及道路沿线,是斜坡地质灾害敏感性程度较高的区域,这一区域水系发育,加之道路的修建、开矿等工程建设以及陡坡耕作等人类活动,为斜坡地质灾害的发生提供了有利条件,同时,该区域也是怒江州人口、经济、产业分布的集中区域,灾害风险较高,应当加强本区域斜坡地质灾害的管理、监测、防治。

参考文献:

[1] 余瀚,王静爱,柴玫,等. 灾害链灾情累积放大研究方法进展[J]. 地理科学进展,2014,33(11):1498-1511.

[2] Raghuvanshi T K, Ibrahim J, Ayalew D. Slope stability susceptibility evaluation parameter (SSEP) rating scheme-An approach for landslide hazard zonation[J]. Journal of African Earth Sciences, 2014,99:595-612.

[3] Althuwaynee O F, Pradhan B, Park H J, et al. A novel ensemble decision tree-based CHi-squared Automatic Interaction Detection (CHAID) and multivariate logistic regression models in landslide susceptibility mapping [J]. Landslides, 2014,11(6):1063-1078.

[4] 陈曦炜,裴志远,王飞. 基于 GIS 的贫困地区降雨诱发型地质灾害风险评估:以湖北省恩施州为例[J]. 地球信息科学学报,2016,18(3):343-352.

[5] 庆丰,熊木齐,赵岩,等. 人类活动对地质灾害的影响:以甘肃省武都区为例[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2015,51(6):894-897.

[6] 关凤峻,沈伟志. 全国地质灾害灾情分析与防治研究[J]. 水文地质工程地质,2016,43(2):7-10.

[7] 刘毅飞,王欣凯,蔡廷禄,等. 福建海坛岛地质灾害特征及风险评价[J]. 灾害学,2016,31(4):122-127.

[8] 唐川,马国超. 基于地貌单元的小区域地质灾害易发性分区方法研究[J]. 地理科学,2015,35(1):91-98.

[9] Kavzoglu T, Sahin E K, Colkesen I. An assessment of multivariate and bivariate approaches in landslide susceptibility mapping: a case study of Duzkoy district[J]. Natural Hazards, 2015, 76(1):471-496.

[10] 崔鹏. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题[J]. 地理科学进展,2014,33(2):145-152.

[11] 谈树成,金艳珠,冯龙,等. 基于 RIA 的 WebGIS 斜坡地质灾害气象预报预警信息系统的设计与实现:以怒江为例[J]. 地球学报,2014,35(1):119-125.

[12] 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.

[13] 王志恒,胡卓玮,赵文吉,等. 基于确定性系数概率模型的降雨型滑坡孕灾环境因子敏感性分析:以四川省低山丘陵区为例[J]. 灾害学,2014,29(2):109-115.

[14] 高应新. 怒江土壤[M]. 昆明:云南大学出版社,1991.