

基于斜坡发育指标的旺苍县滑坡危险性评价

朱吉祥, 张礼中, 周小元, 王 乾

(中国地质科学院 水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061)

摘 要:四川省旺苍县是滑坡的频发区。由于特殊的地质条件与地形地貌特征,该区的滑坡呈现特殊的演变规律,传统的评价方法很难精确地获取该区滑坡的危险性分析结果,研究以该区的地层岩性、地层构造、接触面倾角、地下水类型、坡高、坡度、坡形、斜坡类型以及碎石含量 9 个斜坡发育指标作为评价因子,通过引入评价因子的特征函数表征各因子对滑坡的影响模式,建立基于斜坡发育指标的滑坡危险性评价模型,评价结果能够比较精确地反映旺苍县的滑坡危险性分布特征,对于该区的滑坡防治工作具有一定的实际意义。

关键词:滑坡; 斜坡; 特征函数; 信息熵; 危险性评价; 旺苍县

中图分类号:P642.22

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)03-0309-06

Assessment of Landslide Hazard of Wangcang County Based on Slope Development Factors

ZHU Ji-xiang, ZHANG Li-zhong, ZHOU Xiao-yuan, WANG Qian

(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: Wangcang County is the area with the most frequent landslide in Sichuan Province. The evolution of the landslides in this area is very special because of the unusual geological conditions and topographical characteristics, hence it's difficult to obtain the accurate result for the traditional assessment approaches. This research selected nine development factors of slope which contain the lithology, tectonic, inclination of contact surface, groundwater types, and the structure of the slope, and then the character functions was introduced to describe the influence modes of these factors, finally the landslide hazards assessment model was established based on the development factors of slope. The result can be more accurately reflect the distribution characteristics of the landslides in Wangcang County, and there was some practical significance to landslide prevention work of the study area.

Key words: landslide; slope; character function; comentropy; hazard assessment; Wangcang County

滑坡是危害人类社会经济活动最严重的自然灾害之一^[1],对于滑坡的研究一直都是国内外相关学者研究的重点^[2-3]。斜坡作为滑坡的孕体^[4],其发育指标对滑坡具有决定性的影响,因此分析斜坡的发育指标是进行滑坡危险性评估的基础^[5]。目前滑坡危险性评价主要分为两类^[6-7]:其一就是根据力学原理建立物理模型进行评价,例如基于诱发因素主导的滑坡演变与发生的机制分析^[8-9],基于室内试验的滑坡演变机制的模拟^[10-11],以及基于监测数据时序性特征的滑坡位移模拟^[12-13]等。这类评价方法可以非常精确地反映滑坡演变的动态,适合对单个滑坡体进行评价;另一类是利用滑坡监测数据,通过建立概率模型

来反映滑坡危险性的分布规律,例如数据挖掘技术^[14]、专家知识经验挖掘模型^[15]、数理统计方法^[16]等,这是目前进行区域滑坡危险性评价的普遍思路。

1 斜坡发育指标的评价模型

旺苍县位于大巴山西脉米仓山山地与四川盆地的接合地区,主要以山区丘陵地形为主,主要发育山地滑坡,其分布受该区的地形地貌、地层岩性、地质构造、气象水文及人类工程经济活动等因素的控制影响。但是由于控制山区滑坡发育的影响因素存在特殊性,例如坡度与高程在局部可能存在突变,由于人类耕种导致山区局部的地貌存在差异等,对于旺苍县

而言,另一个特殊之处是该区地质条件非常脆弱,该区断裂发育,地层破碎且岩性变化频繁,因此,利用传统的区域滑坡危险评价方法获取的滑坡危险性区划往往比较粗糙,精度不高。

由于该区的地质环境背景比较复杂,导致该区滑坡的发生往往具有一定的独立性,对于不同地区的滑坡,控制其演变与发育的影响因素往往差异比较明显,因此对于不同地区的滑坡而言,同一影响因素(例如地层岩性)在滑坡发生过程中的地位(权重)不一致;而传统的滑坡危险性评价方法进行区划时,对于同一影响因素而言,其地位(权重)在该研究区滑坡发生过程中是一致与确定的。为了避免这个问题,本研究针对旺苍县滑坡发育的特点,提出了一个以斜坡(山体)为评价单元,将研究区分成若干个独立的斜坡评价区,虽然各评价单元之间的地质环境条件可能存在差异,但是评价单元内部的地质环境条件却可以基本保持一致。基于此,本研究提出了一个基于斜坡发育指标的山区滑坡危险性评价方法。

1.1 评价因子的标准化处理

利用长期的监测资料,对发育滑坡斜坡的特征进行统计分析,但是由于描述这些特征的评价指标具有不同的量纲,无法进行综合的分析,因此首先必须对其进行标准化处理。本次采用极差标准化的方式:

$$\text{正效应: } r_{i,j} = \begin{cases} 1 & x = x_{\max} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} & x_{\min} < x < x_{\max} \\ 0 & x = x_{\min} \end{cases}$$
$$\text{负效应: } r_{i,j} = \begin{cases} 1 & x = x_{\min} \\ \frac{x - x_{\max}}{x_{\min} - x_{\max}} & x_{\min} < x < x_{\max} \\ 0 & x = x_{\max} \end{cases}$$

1.2 斜坡演变的主要影响因子

滑坡的演变是不同影响因素共同作用的结果^[17]。地层岩性、斜坡类型、碎石含量等是斜坡演变为滑坡的主要物质基础;坡高、坡度、坡型等是斜坡演变为滑坡的主要势能基础;地质构造、接触面倾角、降水(地下水类型)是斜坡演变为滑坡的主要诱发基础。因此,模型选取地层岩性、斜坡类型、碎石含量、坡高、坡度、坡型、地下水类型等作为斜坡演变为滑坡的主要影响因子。

1.3 信息熵理论

信息熵理论是 Claude E. Shannon 于 1948 年提出的,主要是指在某一事件中某一特定信息出现的概率。因此它的本质还是一种数理统计方法,公式如下:

$$E_j = -K \sum_{i=1}^m P_{i,j} \ln P_{i,j}$$
 (1)

$$P_{i,j} = \frac{r_{i,j}}{\sum_{i=1}^m r_{i,j}}$$
 (2)

式中: E_j ——某一特定信息 j 的熵值, E_j 越大,表明该信息 j 对事件的影响越不明显; m ——事件中所有的信息的数量; $P_{i,j}$ ——相对权重; K ——常数。

1.4 评价模型

(1) 由于 E_j 表征的是事物的混乱程度,因此利用其可以获取系统的确定性系数 V_j 。

$$V_j = 1 - E_j$$
 (3)

(2) 利用获取的确定性系数 V_j ,确定各评价因子的权重 W_j 。

$$W_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^m V_j}$$
 (4)

(3) 建立评价因子的特征函数 $\phi_{i,j}$;

$$H = \sum_{j=1}^m w_j \cdot \phi_{i,j}$$

(4) 建立评价模型:

$$H = \sum_{j=1}^m W_j \phi_{i,j}$$
 (5)

模型结果 H 为一个量化值,表征一个斜坡在现有条件下演变为滑坡的概率。 H 越大,表示该斜坡发生滑坡的可能性越大,反之亦然。利用该模型对研究区内斜坡产生滑坡的可能性进行分析,在斜坡发生滑坡之前对其进行治理,因此利用斜坡发育指标建立的模型具有及时性和针对性等特点。

2 结果与分析

2.1 旺苍县典型滑坡的发育机制

研究区内滑坡大多以牵引式的土体滑坡为主(图 1—2),占 95% 以上,通常滑坡规模较小,据统计,中小型滑坡占 97.8%,无深层滑坡,基本稳定的滑坡居多,占 78.7%。调查发现,旺苍县内的滑坡多发生于雨季,或一次较大降雨过程延缓一定时间后发生滑坡,尤其是一次较大降雨的中后期易发生滑坡。降水形成的地下渗流是研究区滑坡最主要的诱发因素:降水进入斜坡体中,导致接触面的有效应力急剧降低,土体斜坡在自身重力作用下沿接触面向下滑动形成滑坡^[18]。本研究对研究区内 60 个发生过滑坡的斜坡发育指标进行统计分析,判定影响滑坡发育的评价因子(表 1),同时根据这些因子的分布规律,建立相应的特征函数。限于篇幅原因,本文仅列出其中的 20 个滑坡点的统计数据。

2.2 评价因子的权重

权重是体现评价因子影响滑坡演变的重要性指

标,通常是基于以下两类方式获得:一类是根据力学原理建立模型,通过模拟斜坡引发滑坡的整个过程,分析各个评价因子在整个过程当中所起的作用,从而确定权重,这类方法一般只适用与评价单个滑坡体的危险性,无法运用到区域滑坡危险性评价;另一类是根据监测资料,利用数理统计获取评价因子的权重,一个非常重要的依据就是具有与发生的滑坡相同或相近的地质地理条件,也有可能发生滑坡^[19]。本研究采取第二种方式,首先利用公式(1)获取评价因子的熵值 E_j ,再利用式(2)获取评价因子的确定性系数



图1 旺苍县滑坡野外采集照片

V_i, V_i 表征评价因子 j 对滑坡的相关性,利用公式(3)对确定性系数 V_j 进行归一化处理,获取各评价因子的相对权重 W_i 。

$$W_i=(x_1,x_2,x_3,x_4,x_5,x_6,x_7,x_8,x_9)=(0.11\quad 0.13\quad 0.11\quad 0.13\quad 0.08\quad 0.09\quad 0.13\quad 0.14\quad 0.08);$$

从权重的分布来看,研究区内并不存在引发滑坡的“优势”因子,权重在各评价因子中分布比较平均,这说明研究区内滑坡一般是由众多影响因素共同作用形成的,可能与土质滑坡的演变过程有关。

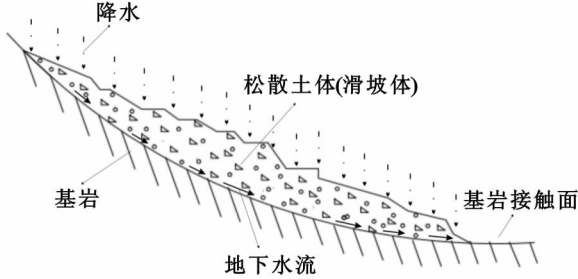


图2 旺苍县典型滑坡机制示意图

表1 旺苍县部分滑坡的相关监测记录

编号	地层岩性	构造	接触面倾角	地下水类型	坡高	坡度	坡形	斜坡类型	碎石含量
	x_1	x_2	$x_3/(^{\circ})$	x_4	x_5/m	$x_6/(^{\circ})$	x_7	x_8	$x_9/\%$
1	碎石土	单斜	49	孔隙水	75	35	阶状	土质斜坡	10
2	碎石土	单斜	27	孔隙水	7	23	阶状	土质斜坡	10
3	碎石土	单斜	31	孔隙水	35	27	平直	土质斜坡	10
4	碎石土	单斜	47	孔隙水	25	29	阶状	土质斜坡	10
5	碎石土	单斜	35	孔隙水	150	35	阶状	土质斜坡	8
6	碎石土	单斜	41	孔隙水	37	45	平直	土质斜坡	25
7	碎石土	单斜	41	孔隙水	45	37	平直	土质斜坡	35
8	碎石土	单斜	35	岩溶水	25	31	阶状	土质斜坡	10
9	灰岩	单斜	40	孔隙水	42	40	凹形	岩质斜坡	50
10	砂/泥岩	单斜	26	裂缝水	30	27	凹形	土质斜坡	10
11	碎石土	单斜	45	孔隙水	33	42	平直	土质斜坡	45
12	碎石土	单斜	41	孔隙水	50	41	阶状	土质斜坡	15
13	砂/泥岩	单斜	20	裂缝水	10.2	44	平直	土质斜坡	20
14	板岩	背斜	31	孔隙水	115	35	平直	土质斜坡	75
15	碎石土	单斜	35	孔隙水	11	39	平直	土质斜坡	15
16	碎石土	单斜	17	孔隙水	8.5	41	平直	土质斜坡	8
17	碎石土	单斜	21	孔隙水	34	47	平直	土质斜坡	30
18	碎石土	单斜	17	孔隙水	5	28	平直	土质斜坡	10
19	碎石土	单斜	20	孔隙水	30	32	凹形	土质斜坡	20
20	碎石土	单斜	16	孔隙水	7.9	46	平直	土质斜坡	10

注:编号9滑坡为碎石含量为50%的岩质滑坡,主要是由于该斜坡的风化比较强烈,但是岩层的原生状态保持较好;编号14滑坡为碎石含量为75%的土质滑坡,主要是由于粉砂质板岩,比编号9风化得更彻底,同时受后期的扰动比较强烈。

2.3 评价因子的特征函数 $\psi_{i,j}$

2.3.1 斜坡特征影响滑坡发育的三种模式 评价因子的特征函数 $\phi_{i,j}$ 表示因子对滑坡的响应模式,也就是因子对滑坡的影响规律,根据 ZHU 等的分析,基于斜坡特征的评价因子对滑坡的影响可以用以下 3

类函数来表示(图3):钟型函数、Z 型函数、S 型函数。钟型函数反映了评价因子与滑坡危险性之间存在这样的一种关系,即:评价因子在某个临界值或某个范围内时滑坡的危险性最高,而当评价因子小于或大于

该值或该范围时,滑坡危险性就会降低;Z 型函数则表明,评价因子存在一个临界值,当小于或等于该临界值时滑坡的危险性达到最大,而大于该临界值时滑

坡的危险性会减小;S 型函数则与 Z 型函数相反,当评价因子大于临界值时滑坡的危险性达到最大,反之,滑坡的危险性会减小^[20]。

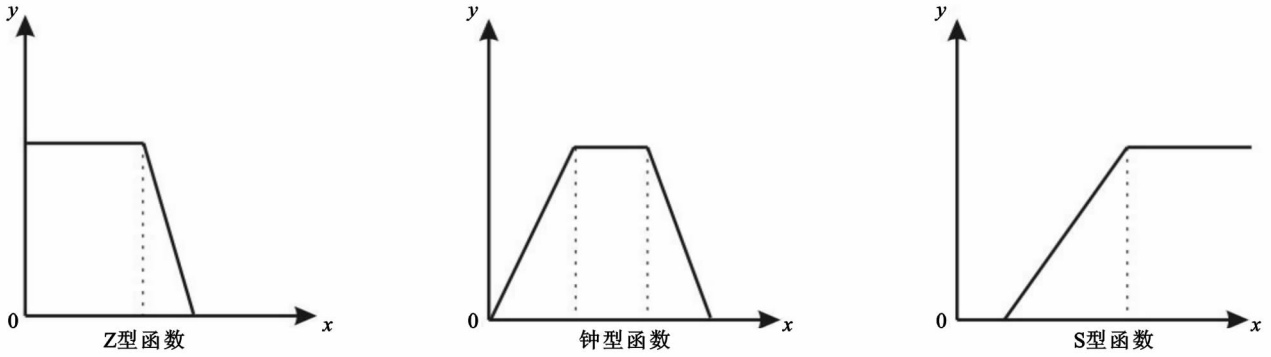


图 3 斜坡特征影响滑坡的三种模式^[20]

2.3.2 建立特征函数 $\phi_{i,j}$ 由于影响滑坡发育的斜坡特征存在量化与非量化因子,其中量化因子包括接触面倾角、坡高、坡度、碎石含量;非量化因子包括地层岩性、地质构造、地下水类型、坡型与斜坡类型等。因此在建立特征函数 $\phi_{i,j}$ 时,必须分别进行。

(1) 量化因子的特征函数 $\phi_{1,j}$ 。量化因子存在连续的观测序列,因此基于这种连续性与引发滑坡的危险性建立一一对映的经典函数关系是评价这类因子对滑坡影响的最理想模式,考虑到滑坡机制的复杂性,这种理想的评价模式难以实现。因此,本研究采用一种简化的形式对各量化因子进行分析。以接触面倾角为例,统计发现,研究区内滑坡主要是沿第四系松散堆积层与岩层或岩层的弱风化层地接触面向下滑动的,因此接触面的倾角对滑坡的发育有重要影响,倾角太小不一定引发滑坡,倾角太大斜坡往往直接形成崩塌灾害,因此对于接触面倾角,采用钟型函数进行拟合,同时假设滑坡危险性与接触面倾角为线性变化关系。为了确定滑坡危险性达到最大的坡度临界值,本研究假设样本完全且分布比较均匀,该临界值包含于已有的样本区间。首先对样本进行区间划分,划分的标准就是尽量使滑坡点向某个区间集中;然后对该区间进行第二次划分,标准一样,如此进行多次的区间划分,最后选取该区间的平均值作为接触面倾角的临界值 $\bar{x}_3 = 45^\circ$,于是建立特征函数 $\phi_{1,3}$ (式 5),同样的方式分别获得其它量化因子的特征函数 ϕ_j 。

1) 接触面倾角

$$\phi_{1,3} = \begin{cases} \frac{4}{\pi}x_3 & 0 \leq x_3 \leq \frac{\pi}{4} \\ -\frac{4}{\pi}x_3 + 2 & \frac{\pi}{4} \leq x_3 \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (5)$$

2) 坡度

$$\phi_{1,6} = \begin{cases} \frac{18}{5\pi}x_6 & 0 \leq x_6 \leq \frac{5}{18}\pi \\ -\frac{9}{2\pi}x_6 + \frac{9}{4} & x_6 \geq \frac{5}{18}\pi \end{cases} \quad (6)$$

3) 坡高

$$\phi_{1,5} = \begin{cases} \frac{1}{50}x_5 & 0 \leq x_5 \leq 50 \\ -\frac{1}{100}x_5 + \frac{3}{2} & 50 \leq x_5 \leq 150 \\ 0 & x_5 > 150 \end{cases} \quad (7)$$

4) 碎石含量

$$\phi_{1,9} = \begin{cases} -\frac{10}{21}x_9 + 1 & 0 \leq x_9 < \frac{3}{10} \\ -\frac{15}{7}x_9 + \frac{3}{2} & \frac{3}{10} \leq x_9 \leq \frac{7}{10} \\ 0 & x_9 > \frac{7}{10} \end{cases} \quad (8)$$

(2) 非量化因子的特征函数 ϕ_j 。非量化因子在空间上是离散的,因此其特征函数 $\phi_{2,j}$ 也应当是离散的形式,例如某滑坡点的地层岩性为灰岩,对于该滑坡点岩性对其影响就是确定的,该滑坡点中岩性指标下灰岩的危险性为 1,其余岩性的危险性为 0,运用这种(0,1)分布对研究区内 60 个滑坡进行统计,获取不同非量化因子下因子项的特征函数值 $\phi_{2,j}$, $\phi_{2,j}$ 越大,表明发生滑坡的危险性越大。评价因子临界值的确定是建立定量化因子特征函数的关键,采用区间收敛的方式,使尽量多的滑坡信息蕴含于更小的区间之中,将其平均值作为临界值,不仅提高了模型的灵活性和可操作性,同时也在一定程度上克服了人为的随意性。将该评价因子下不同因子项的确定性系数 V_j 从小到大排列,假设 V_j 最小因子项的特征函数值 $\phi_{2,j}$ 为 k ($0 < k < 1$), k 的取值与该评价因子对滑坡的敏感程度有关,响应越敏感, k 的取值越大; V_i 最大因子项的特征函数值 $\phi_{2,j}$ 取值为 1。其余因子项的特征函数

值 $\phi_{2,j}$ 利用均匀分布可以获得: $k+(i-1)(1-k)/(n-1)$, 其中 i 表示在该因子序列中的位置, 如果存在位置相同的项, 选其中任意一个进行分析。各评价因子的特征函数值 $\phi_{2,j}$ 分布如表 2 所示。

表 2 非量化评价因子的危险性分布表

因子项	地层岩性							地质构造		斜坡类型		坡型				地下水类型		
	花岗 岩(k)	千枚 岩	砾/ 砂岩	灰 岩	板 岩	砂/ 泥岩	碎石 土	背斜 (k)	单 斜	岩质 斜坡(k)	土质 斜坡	凸型 (k)	平直 型	阶梯 型	凹 形	岩溶 水(k)	裂隙 水	孔隙 水
$\phi_{2,j}$	0.4	0.4	0.55	0.7	0.85	0.85	1	0.3	1	1	0.45	1	0.25	0.5	0.75	1		

2.4 建立评价模型

$$H = \sum_{j=1}^m \omega_j \cdot \phi_{1,j} = \sum_{j=1}^4 \omega_j \cdot \phi_{1,j} + \sum_{j=1}^5 \omega_j \cdot \phi_{2,j} \quad (9)$$

式中: $\sum_{j=1}^4 \omega_j \cdot \phi_{1,j}$ ——量化因子危险性评价集;
 $\sum_{j=1}^5 \omega_j \cdot \phi_{2,j}$ ——非量化因子评价集。模型的实质就是将所有的评价因子分为上述两类, 对于前者, 首先利用公式(5)—(8)分别获取各因子的特征函数 $\phi_{1,j}$, 再根据已经确定好的权重, 运用加权求和的方式获取量化因子的危险性评价结果; 对于后者, 首先根据评价因子通过查表 2 获取相应因子的特征函数值 $\phi_{2,j}$, 再运用加权求和的方式获取非量化因子的危险性评价结果; 最后运用公式(9)将二者结合, 最终获取某斜坡引发滑坡的概率。以研究区杨家坪滑坡($106^{\circ}26'15''\text{E}$, $32^{\circ}29'30''\text{N}$)为例, 该滑坡的原始斜坡为土质斜坡, 地层岩性为板岩, 地质构造为背斜, 原始坡高为 100 m, 原始

坡度为 37° , 接触面倾角为 39° , 坡型为凹形, 碎石含量为 10%, 地下水类型为孔隙水, 将所有斜坡影响因子的参数引入该模型中, 获取该斜坡发生滑坡的概率 H 为 0.72。

2.5 结果检验

以研究区内 18 个具有代表性的不稳定斜坡作为未来可能发生的滑坡, 对模型进行检验。斜坡作为滑坡的孕体, 其平衡状态决定了滑坡的发生^[21], 不稳定斜坡作为处于失稳状态的斜坡, 处于滑坡形成过程中的末期, 在没有人为治理的条件下, 未来可能发生滑坡的概率非常大。将每个不稳定斜坡的影响因子的相关参数引入模型当中, 获取每个不稳定斜坡最终发生滑坡的概率 H (表 3)。检验结果中所有不稳定斜坡发生滑坡的概率 H 均大于 0.6, 其中 $H>0.85$ 有 11 个, $H>0.9$ 有 8 个, 较好地证明了模型具有较高的可靠性。

表 3 研究区不稳定斜坡发生滑坡的概率 H

不稳定斜坡 ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\phi_{2,j}$	0.78	0.92	0.87	0.78	0.89	0.91	0.97	0.63	0.88
不稳定斜坡 ID	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$\phi_{2,j}$	0.83	0.92	0.94	0.97	0.75	0.65	0.92	0.75	0.94

3 讨论

“降雨期间或降雨之后斜坡岩土体内孔隙水压力的升高使得潜在滑动面上的有效应力及抗剪强度降低, 从而诱发滑坡”^[22-23], 太沙基于 1925 年提出了经典降水诱发滑坡的机制, 但是严格来说, “是降水形成的地下水及其与周围岩土体的水岩作用诱发了滑坡”^[23]。对于土质斜坡, 降水下渗至土体可能同时形成饱和渗流与非饱和渗流^[24]。对于饱和渗流, 主要是通过静水压力和动水压力的作用诱发滑坡的^[25-27], 此时地下水类型与孔隙度对斜坡稳定性的影响最为敏感; 对于非饱和渗流, 主要是通过降低土体的基质吸力诱发滑坡^[28-29], 此时斜坡体的土质对其稳定性的影响最为敏感。因此, 降水对滑坡的诱发作用主要体现在地下水斜坡体的侵蚀作用中, 而地下水的不同类型决定了地下水对斜坡体不同的侵蚀特征, 因此在本

模型中, 降水对于滑坡的影响已经转变为不同地下水类型对斜坡的侵蚀特征之中。选取研究区内岩溶水、裂隙水与孔隙水进行分析, 认为降水对研究区内滑坡的影响已经蕴涵于模型的评价结果当中。因此运用该模型进行滑坡危险性评价获取的结果可以作为研究区滑坡危险性区划的依据。

4 结论

- (1) 基于斜坡发育指标的滑坡危险性评价模型将影响滑坡发育的斜坡特征按各自的空间分布规律划分为量化因子与非量化因子, 通过引入特征函数(值) $\phi_{i,j}$, 对各特征因子下不同因子项的滑坡发育的影响进行拟合(概化)。作这样的处理不仅提高了评价结果的精度, 同时使得整个评价的过程大大简化。
- (2) 模型的结果是通过综合分析研究区内所有滑坡的发育规律获取。基于斜坡发育指标的评价模

型,综合考虑研究区内所有滑坡发育指标的基础上,对典型的引起斜坡发生滑坡的影响因子进行提取,同时对其影响模式进行分析归纳,对研究区内大部分的斜坡进行危险性评价,具有较高的普适性和通用性。

(3) 旺苍县是典型的山区地形,斜坡发育非常普遍,区域内大部分的滑坡灾害都是由原生斜坡发育而成。因此对于研究区斜坡的稳定性研究具有重要的意义。基于斜坡发育指标的滑坡危险性评价模型对旺苍县的滑坡灾害防治工作具有重要的实际应用价值,该模型的分析结果可以应用至旺苍县典型斜坡稳定性的评价中。

参考文献:

- [1] 徐丹梅,杜尚海.三角带滑坡稳定性对极端气候的响应[J].水土保持研究,2011,18(3):168-171.
- [2] 石菊松,石玲,吴树仁,等.滑坡风险评估实践中的难点与对策[J].地质通报,2009,28(8):1020-1030.
- [3] Carrara A, Pike R J. GIS technology and models for assessing landslide hazard and risk[J]. Geomorphology, 2008,94(3):257-260.
- [4] 徐黎明,王清,陈剑平,等.二密滑坡形成机制[J].吉林大学学报:地球科学版,2012,42(4):1104-1111.
- [5] 许强,董秀军.汶川地震大型滑坡成因模式[J].地球科学:中国地质大学学报,2011,36(6):1134-1142.
- [6] 彭令,牛瑞卿,陈丽霞. GIS支持下三峡库区秭归县滑坡灾害空间预测[J].地理研究,2010,29(10):1889-1898.
- [7] 方丹,胡卓玮,王志恒.基于GIS的北川县地震次生滑坡灾害空间预测[J].山地学报,2012,30(2):230-238.
- [8] 田东方,刘德富,郑宏,等.降雨条件下滑坡排水沟排水数值模拟[J].岩土力学,2011,32(4):1255-1261.
- [9] 王宇,李晓,张博,等.降雨作用下滑坡渐进破坏动态演化研究[J].水利学报,2013,44(4):416-425.
- [10] 冯振,殷跃平,李滨,等.鸡尾山特大型岩质滑坡的物理模型试验[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(7):2827-2835.
- [11] 张军新,裴向军,黄润秋,等.顺层岩质变形体变形机制及治理对策研究[J].水土保持研究,2011,18(3):177-181.
- [12] 徐峰,汪洋,杜娟,等.基于时间序列分析的滑坡位移预测模型研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(4):746-751.
- [13] 樊晓一.滑坡位移多重分形特征与滑坡演化预测[J].岩土力学,2011,32(6):1831-1837.
- [14] Pradhan B. A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS[J]. Computers & Geosciences,2012,51:350-365.
- [15] Kayastha P, Dhital M R, De Smedt F. Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal[J]. Computers & Geosciences, 2012,52:398-408.
- [16] Piacentini D, Troiani F, Soldati M, et al. Statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility in South Tyrol (south-eastern Alps, Italy)[J]. Geomorphology,2012,151:196-206.
- [17] 陈小婷,黄波林.望霞大斜坡地质灾害链形成过程分析[J].水土保持研究,2011,18(1):82-86.
- [18] 陈天健,蔡和伦,黄彦荣,等.人工降雨模型试验研究降雨入渗对滑坡类型之影响[J].水土保持研究,2012,19(1):254-257.
- [19] Varnes D J. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice [C]//International association of engineering geology commission on landslides and other mass movements on slopes. Int. Assoc. Eng. Geol., UNESCO Natural Hazards Series,1984.
- [20] 朱阿兴,裴韬,乔建平,等.基于专家知识的滑坡危险性模糊评估方法[J].地理科学进展,2006,25(7):1-13.
- [21] 胡明鉴,汪稔,张平仓.斜坡稳定性及降雨条件下激发滑坡的试验研究:以蒋家沟流域滑坡堆积角砾土坡地为例[J].岩土工程学报,2001,23(4):454-457.
- [22] Reid M E, Nielsen H P, Dreiss S J. Hydrologic factors triggering a shallow hillslope failure[J]. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 1988, 25(3):349-361.
- [23] 徐则民,黄润秋,范柱国.滑坡灾害孕育一激发过程中的水-岩相互作用[J].自然灾害学报,2005,14(1):1-9.
- [24] 张明,胡瑞林,谭儒蛟,等.降雨型滑坡研究的发展现状与展望[J].工程勘察,2009(3):11-17.
- [25] Okura Y, Kitahara H, Ochiai H, et al. Landslide fluidization process by flume experiments[J]. Engineering Geology,2002,66(1):65-78.
- [26] Wang G, Sassa K. Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content [J]. Engineering Geology, 2003,69(1):109-125.
- [27] 吴亚子,傅荣华,王健,等.大渡河松坪滑坡形成机制及稳定性分析[J].水土保持研究,2011,18(2):62-65.
- [28] Lam L, Fredlund D G. Saturated-unsaturated transient finite element seepage model for geotechnical engineering[J]. Advances in Water Resources,1984,7(3):132-146.
- [29] Kim J, Jeong S, Park S, et al. Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils[J]. Engineering Geology,2004,75(3):251-262.