

马长玲, 李科. 地震诱发滑坡地质灾害的地貌因子敏感性评价模型 [J]. 华南地震, 2020, 40 (2): 92-98. [MA Changling, LI Ke. Sensitivity Evaluation Model of Geomorphological Factors for Earthquake-Induced Landslide Geological Disasters[J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (2): 92-98]

地震诱发滑坡地质灾害的地貌因子 敏感性评价模型

马长玲¹, 李 科²

(1. 陕西能源职业技术学院, 陕西 咸阳 712000; 2. 陕西省高速公路建设集团公司, 西安 710000)

摘要: 为了解决传统地质灾害危险区预测精准低, 计算过程复杂问题, 提出一种地震诱发滑坡地质灾害的地貌因子敏感性评价模型, 以满足不断增长安全需求。首先, 基于贡献率法量化得出不同地形地貌因子对应的面积值, 其次, 利用确定性系数法更为直观分析地震滑坡发生的关键因子种类, 提高后续评价精准度, 根据地质因子、外界诱发因子以及人为因子建立评价体系。最后通过几率数值模型、信息量评价模型对敏感性评价, 将其分为低敏感性区、中敏感性区、高敏感性区、极高敏感性区。实验证明: 评价模型计算简便、精准度高, 有着较强的合理性和适用性, 可作为地震滑坡相关研究和发展规划的基础科学依据。

关键词: 地质灾害; 地貌因子; 敏感性评价; 贡献率;

中图分类号: TP683.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2020) 02-0092-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.02.014

Sensitivity Evaluation Model of Geomorphological Factors for Earthquake-Induced Landslide Geological Disasters

MA Changling¹, LI Ke²

(1. Shanxi Energy Institute, Xianyang 712000, China;

2. Shanxi Provincial Expressway Construction Group Company, Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to solve the problems of low accuracy and complex calculation process of traditional geological hazard prediction, a sensitivity evaluation model of landslide geological hazard induced by earthquake is proposed to meet the increasing safety demand. Firstly, the area values corresponding to different topographic and geomorphological factors are quantified based on contribution rate method. Secondly, the deterministic coefficient method is used to analyze the key factors of earthquake landslides more intuitively, improve the accuracy of follow-up evaluation, establish an evaluation system according to geological factors, external induced factors and human factors, and calculate overall frequency between the average density of geological hazard points of various index factor attributes. Finally, the sensitivity is evaluated by probability numerical model and information

收稿日期: 2019-10-10

基金项目: 陕西能源职业技术学院校级重点科研课题《基于分形理论的陕南山区滑坡地质灾害敏感性分析与易发性评价——以岚皋县地质灾害为例》(18KYZ03)。

作者简介: 马长玲 (1984-), 女 (回族), 硕士, 讲师, 主要从事地质灾害的研究

E-mail: guopinglu@yahoo.com

通信作者: 李科 (1981-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程技术工作。

E-mail: c625845285@163.com

quantity evaluation model, which can be divided into sensitive area, middle sensitive area, high sensitive area and extremely sensitive area. Experiments show that the evaluation model in this paper is simple and accurate, and has strong rationality and applicability. It can be used as a basic scientific basis for research and development planning of earthquake landslides.

Key words: Geological hazards; Geomorphological factors; Sensitivity evaluation; Contribution rate;

0 引言

地震是地壳在释放大量能量时产生的附加震动,基本上每时每刻都会产生震动,但其中大部分都过小,无法被人们感受到,但是剧烈的地震将会引发大量的人员伤亡和巨大财产损失,同时,因地貌因子的不稳定更容易诱发高地滑坡、崩塌等次级灾难的发生,危害面积广泛所造成的损失远大于地震本身。这几年来,地震滑坡的敏感性评价和预测是该领域研究是主要的工作内容,但滑坡影响因子分析又是作业的基本要求。

相关人员提出以下解决方法。樊芷吟、荀晓峰等人^[1]针对地震引发的岩体松动导致降雨时产生的滑坡问题,提出一种基于 Logistic 回归模型的地貌因子敏感性分析,通过 GIS 采集对应因子数据,建立信息模型,并利用 Logistic 模型与耦合模型对该地区的低质敏感性进行评价。通过实验证明所提方法精度高,便于区分不同敏感性区域,但是该方法计算过程复杂、效率低。戴岚欣、许强等人^[2]对同震灾害的空间分布规律和控制因素(距断层距离、地面峰值加速度 PGA 等)进行分析。通过实验证明所提供方法能够有效对待测区域进行评价,但是合理性不高,不能广泛的应用在现实生活中。

针对上述问题,本文提出一种地震诱发滑坡地质灾害的地貌因子敏感性评价模型,通过分析地形地貌因子贡献率,合理划分敏感性区间,采用几率数值模型、信息量评价模型得以找到地震滑坡容易发生因子区间。实验证明本文模型计算简单、评价精准,适用性较好。

1 地震诱发滑坡地质灾害的地貌因子敏感性评价模型

1.1 基于贡献率法的地形地貌因子计算

贡献率是经济统计学分析中关键方法,将

其引入到地质灾害分析中,可以分析各个地形地貌因子在地震后的状态,并对其进行量化处理,为后续敏感性评价作理论基础。在分析地震后地质变化过程中,把贡献率引入各个地貌因子内,对发生改变的程度进行量化处理。

滑坡发生趋势取决于敏感性程度,而敏感性高低在于地震后地形地貌发生的改变。想要评价某区域滑坡灾害性的大小,就需考虑区域内存在的地形地貌因子的量化数值,地貌影响因子可以划分成一级与二级两个等级,分别记为频率因子的面积因子。用 f_{ij} 和 a_{ij} 来描述:

详细贡献率量化过程如下:

$$w_{ij} = f(f_{ij}, a_{ij}) \quad (1)$$

其中, w 描述的是地貌因子贡献率, f_{ij} 描述的是第 i 个频率因子和第 j 个面积因子频率之和。式(1)就能够描述为不同级影响因子中任意范围内的地质变化次数以及全部系数和的比值。 a_{ij} 描述第 i 个和因子变化数量之和的比值。 a_{ij} 描述第 i 个和因子当中 j 个二级因子总面积因子。

滑坡面积总和的两数相比所得值,通过与二级因子中每类因子区域范围内的滑坡面积之和,可分析贡献率的指标大小计算如下:

$$w_{ij} = \frac{(a_{ij} + f_{ij})}{2} / \sum c_{ij} \quad (2)$$

随后进行归一化处理,得到式(3)

$$w_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sum w_{ij}} \quad (3)$$

式中 c_{ij} 表示第 j 个二级因子所对应的区域面积值。

1.2 确定性系数下敏感性分析

确定性系数 CF 方法(Certainty Factor Method)是由 Shorliffe 和 Buchanan 提出的一个概率函数,并且由 Heclerman 进行完善改进,将此用来分析某种事件发生过程当中各个影响因子的敏感性。此方法在评估不同种类灾害影响因子

敏感性有很高的精准度。 CF 方法表示如下：

$$CF = \begin{cases} \frac{Pa - Ps}{Ps(1 - Pa)}, Pa < Ps; \\ \frac{Pa - Ps}{Pa(1 - Ps)}, Pa \geq Ps. \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, Pa 为事件在数据类中发生的条件概率。在现实地震滑坡影响因素敏感性分析中, Pa 可以表示数据类 a 中已经有滑坡面积与此数据类单元面积的比值, Ps 可以表示为区域内的地震滑坡面积与区面积的比值。 CF 的变化区间为 $[-1, 1]$, 当 $CF > 0$ 时, CF 值越大, 表示坡体变形程度越高, 发生滑动的可能性越大; 相反 $CF < 0$ 时, CF 越小, 表明地震诱发滑坡的可能性越小; 当 CF 接近 0 时, 则是表明坡体滑动的可能无法确定。

本文借助 GIS 工具的空间分析功能, 完成每个影响因素的 CF 计算合并。首先将影响因素按一定原则分成不同类别, 然后在 ArcGIS 中将每个影响因素的面积和所包含的地震滑坡面积, 根据式(7)计算出每类影响因素中每一个因子的 CF 值。由于每类影响因素包含很多子集, 每个子集又包含不同的单一因子, 这些单一因子的 CF 值可能都不相同, 会导致出现敏感性程度较为分散的 CF 值, 不利于关键影响因素类集的筛选。为了对各类因子的作用程度进行分类排序, 本文利用一个统一值 Z 值来反映各大类影响因素整体对地震滑坡的敏感性, Z 值所体现的是每一类影响因素的各子集及各单一因子 CF 值的总合效果, 可以更为直观准确的确定区域内地震诱发滑坡发生的关键因子。 Z 值可以根据式(8)对各类影响集(子集)中影响因素的 CF 值进行合并来得到, 公式表达如下：

$$Z = \begin{cases} x + y - xy, & x > y > 0; \\ \frac{x + y}{1 - \min(|x|, |y|)}, & xy < 0; \\ x + y + xy, & x < y < 0. \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, x 和 y 分别表示要合并的两个 CF 值, 因本文将从小到大对每类影响因素下各子集的 CF 值合并, 最终得到体现该类各因子集综合作用的 Z 值。通过每一类 Z 值的比较, 可以发现不同类别影响因素对地震滑坡的影响程度, 从而确认主要因子的种类, 每一类影响因

子的 Z 值可以反映出区域内此类因子对地震滑坡的影响有没有普遍的性质。然后再利用 CF 值对各类具体影响因素进行敏感性分析。一般情况下, Z 值越大表明该影响因素在地震滑坡的形成过程中越起到关键作用, 而 CF 值越来越大则表明对应单一影响因素敏感越高。因此, 在因子确认中, 可以借助 Z 值确认某一类因子的关键程度, 利用 CF 值来确认某一特定因子的敏感度。因子敏感性分析流程如图 1。

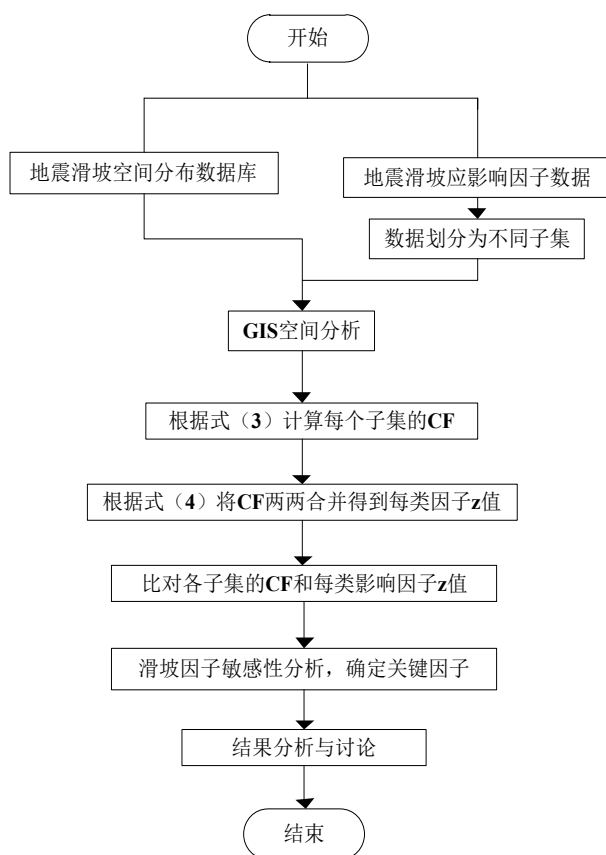


图 1 地震滑坡确定系数分析流程

Fig.1 Analysis flow of determination coefficient of earthquake landslide

1.3 敏感性评价

1.3.1 评价体系建立

评价的基础为地质因子、外界诱发因子以及人为因子结合。在地质灾害空间分布以及地质环境特征分析的基础之上, 为了突显出地形地貌的主导因子, 本文利用因子容量、可图形化以及经济能力的可靠性, 并结合 GIS 分析工具进行评价, 着重摘选了地形指标、地震烈度指标参与分析研究, 组成了敏感性评价体系, 如图 2 所示。

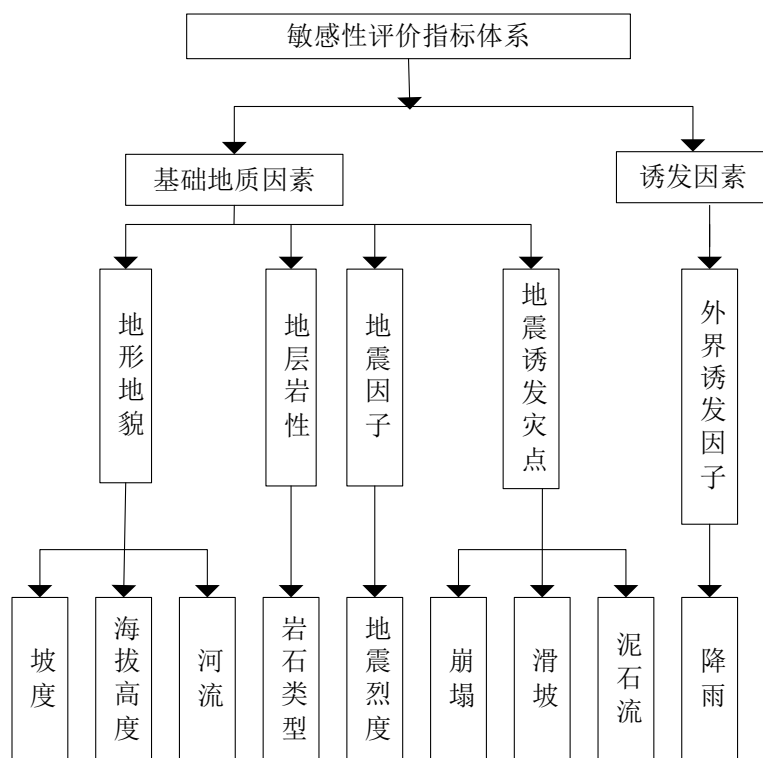


图2 敏感性评价指标体系

Fig.2 Sensitivity evaluation index system.

1.3.2 指标量化敏感性统计

敏感性计算中指标量化的过程非常重要，直接对评价结果产生重要影响。量化方法数量甚多，相比之下数学统计量化法占据较好的适用性，计算结果也相对较精准。敏感性统计是计算各类指标因子属性的地质灾害点平均密度之间整体频率，敏感性评价就是通过整体频率多少来进行判定的。

详细敏感性统计过程如下：

步骤 1：依据敏感度大小程度进行敏感性等级划分。

步骤 2：运用 GIS 计算各类标准属性的面积和单位面积中灾害点数，并且统计各类标准属性在单位面积的灾害点个数，再与地质灾害点平均密度结合比值要求对数，来表现出敏感性程度。

步骤 3：分别各个图层栅格化。

步骤 2 的敏感性统计如下：

$$W_i = \ln \frac{D_c}{D_m} = \ln \frac{N(S_i)}{\sum N(S_i)} \quad (4)$$

式中： w_i 为某一种特殊标准的敏感性； D_c 为此类特殊标准的地质灾害分布密度； D_m 为整区域内地质灾害分布密度； $N(S_i)$ 为此类特殊标准的地质灾害点个数； $\sum N(S_i)$ 为地质灾害点总个数； $A(N_i)$ 为某一中特殊标准所占的总面积； $\sum A(N_i)$ 为评价区的总面积。

1.3.3 指标敏感权重

指标赋予地质灾害敏感性权重值，采用用层次分析法（AHP）建立评价矩阵。本文需要考虑地形坡度、岩性、海拔高度、地震烈度、距河流距离共 5 个评价指标，指标敏感性分析以及敏感度结果见表 1 所示，最后构建的评价矩阵见表 2。

在 Matlab 下求得评价矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}=5.0133$ ，一次性指标 $CI=(\lambda_{\max}-n)/(5-1)=(5.0133-5)/(5-1)=0.0133/4=0.003325$ ，找寻任意平均值已执行标准（RI）；（RI=1.12），则其检验性指标 $CR=CI/RI=0.00277<0.1$ 。最大特征值对应法特征向量为，对特征向量进行归一化处理即得到 5 个评价指标的权重 w_i （见表 2）。

表 1 指标敏感性分析和敏感度赋值
Table 1 Index sensitivity analysis and sensitivity assignment

评价指标	指标属性	A/k m²	地质灾害数量	平均密度 /k m²	敏感度	敏感型分级
坡度 / (°)	0~10	132	47	0.611	-0.741	1
	10~20	573	316	0.611	-0.128	2
	20~35	967	666	0.611	0.023	4
	>35	1213	765	0.611	0.118	3
岩性	白云岩	455	19	0.611	-1.810	1
	千枚岩	83	63	0.611	0.323	3
	板岩	1530	711	0.611	-0.311	2
	砂岩	558	338	0.611	-0.154	2
	碳酸盐岩	491	592	0.611	0.897	4
	砂页岩	35	50	0.611	1.287	4
距河流距离 /m	500	210	285	0.611	1.583	4
	500~1000	201	197	0.611	0.638	3
	1000~1500	180	191	0.611	0.544	2
	>1500	2351	1050	0.611	-0.309	1
海拔高度 /m	1000	359	597	0.611	1.982	4
	1000~1500	951	938	0.611	0.583	3
	1500~2000	789	179	0.611	-0.959	2
	>2000	825	11	0.611	-3.821	1
地震烈度	VII	1311	180	0.611	-1.019	1
	IX	464	149	0.611	-0.094	2
	X	462	621	0.611	1.253	3
	XI	628	810	0.611	1.825	4

注释：敏感度的结果为负值，表明地质灾害密度低于标准值；敏感度的结果为正值，表明地质灾害密度高于标准值。

表 2 指标判断矩阵和权重
Table 2 Index judgment matrix and weight

类型	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	W_i
B_1	1	2	1	1/2	1/2	0.157
B_2	1/2	1	1/2	1/3	1/3	0.088
B_3	1	2	1	1/2	1/2	0.156
B_4	2	3	2	1	1	0.297
B_5	2	3	2	1	1	0.297

注释： B_1 描述为地形坡度； B_2 描述为海拔高度； B_3 描述为岩性； B_4 描述为地震烈度； B_5 描述为距河流距离； W_i 描述为指标权重。

本文的敏感性评价是利用 GIS 空间分析模块 Map calculator 命令中完成的。通过以上分析计算得出：

$$\begin{aligned} S &= \sum W_i \times B_{ij} \\ &= 0.157 \times B_{1j} + 0.088 \times B_{2j} + 0.156 \times B_{3j} + 0.297 \times B_{4j} + 0.297 \times B_{5j} \end{aligned} \tag{5}$$

式中： S 为评价单元的总和敏感度值； W_i 为

第 i 个指标的敏感度权重； B_{ij} 为第 i 个指标属性 j 的敏感度。其中 $i=1, 2, 3, 4, 5$ ； $j=1, 2, 3, 4, 5$ 。

1.4 评价模型选择

本文采取几率数值模型、信息量评价模型对地震诱发滑坡地质灾害敏感进行评价和分析对比。

(1) 几率就是某种因子类 X 中，存在最多因子的区域面积发生地质灾害的几率设为是 100%，那么因子 x_i 产生地质灾害的几率由以下公式算出：

$$GW_{area}(i) = \frac{D_{area}(i)}{Max(D_{area}(1), D_{area}(2), D_{area}(m))} \tag{6}$$

其中, $GW_{area}(i)$ 是因子 x_i 中发生地质灾害的几率, $D_{area}(i)$ 是因子 x_i 的地质灾害的面积密度。

(2) 信息论是信息模型的理论基础, 运用地质灾害产生时熵的减少表现出地质灾害时间所产生的不确定, 地质灾害系统熵值的变化等于因子组合对地质灾害事件所带来的的不确定程度, 与地质灾害的发生以及预测中得到的信息质量和数量相关, 即信息量越大, 所出现地质灾害的可能性越大。

$$I(y, x_1, x_2, \dots, x_n) = \log_2(p(y|x_1x_2 \dots x_n)/P_y) \quad (7)$$

式(7)随后进行归一化处理, 得到式

$$I(y, x_1, x_2, \dots, x_n) = I(y, x_1) + I_{x_1}(y, x_2) + I_{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}}(y, x_n) \quad (8)$$

式中 $I(y, x_1, x_2, \dots, x_n)$ 描述的是具体因素组合 x_1, x_2, \dots, x_n 描述的是地质灾害提供的信息

量; $P(y|x_1x_2 \dots x_n)$ 描述的是因素 x_1, x_2, \dots, x_n 描述的是组合条件下地质灾害产生的几率; P_y 描述的是地质灾害产生的几率; $I_{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}}(y, x_n)$

描述的是因素 x_1, x_2, \dots, x_{n-1} 所存在条件下, 因素 x_n 对地质灾害所提供的信息量。

最终根据概率数值将敏感性评价为 4 区, 分别是低敏感性区、中敏感性区、高敏感性区、极高敏感性区。

2 仿真实验

本文结合地形坡度、岩性、海拔高度、地震烈度、距河流距离共 5 个评价指标, 来进行敏感性评价; 而且采用几率数值模型、信息量评价模型对敏感性进行评价, 以及分析每一种类评价因子对滑坡敏感性的影响水平。

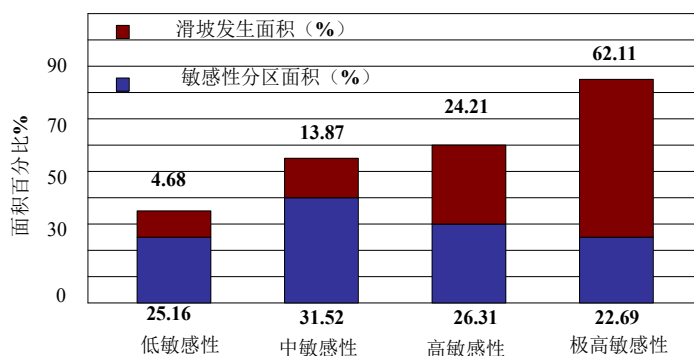


图3 滑坡敏感性面积与滑坡发生面积百分比

Fig.3 The sensitive area of landslide and the percentage of occurrence area of landslide

表3 滑坡敏感性评价结果

Table 3 Landslide sensitivity evaluation results

敏感性分区	滑坡发生面积 /km ²	滑坡发生面积占比 / (%)	敏感性分区面积 /km ²	敏感性分区占比 / (%)	比率 / (%)
低敏感性区	0.79	3.84	112.18	21.97	0.16
中敏感性区	3.68	14.47	136.58	31.42	0.59
高敏感性区	5.28	22.44	112.47	25.13	0.87
极高敏感性分区	15.13	61.43	94.25	21.38	20.86

为地震诱发滑坡地质灾害的地貌因子敏感性程度, 将滑坡敏感性分割为四个等级, 低敏感型分区面积占 21.97%, 滑坡发生面积占 3.84%; 中敏感性分区面积占 31.42% 滑坡发生面积占 14.47%; 高敏感性分区面积占 25.13%, 滑坡发生面积占 22.44%; 极高敏感区面积占 21.38%, 滑坡发生面积占 61.43%。

在强降雨环境下, 岩性软硬互层地区经常出现岩层中间滑动现象。这对滑坡极高敏感性分区累积面积百分比与滑坡发生总面积百分比相互影响, 故此将极高敏感性分区面积百分比的相互影响分为一百等分, 再以 1% 间隔计算, 计算算滑坡发生面积百分比见图 3。

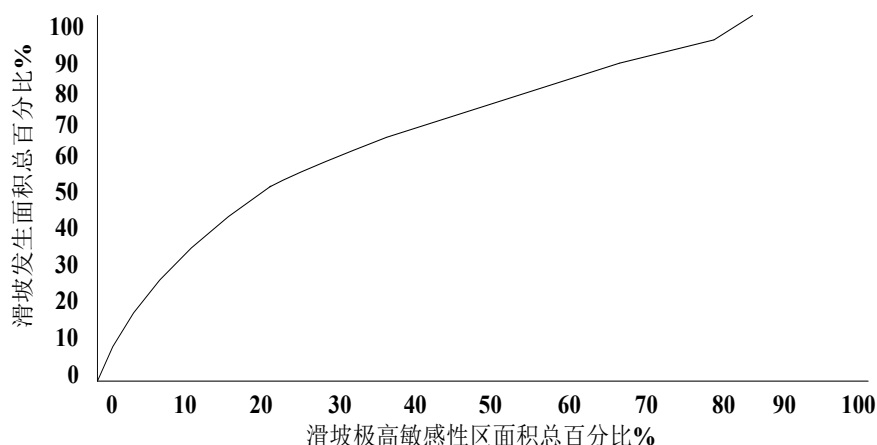


图4 频率比模型法滑坡敏感性面积总百分比曲线图

Fig. 4 Total percentage Curve of landslide sensitivity area based on frequency ratio model

如图所显示,滑坡极高敏感性区面积总百分比到达10%时候,滑坡发生面积总百分比为34%;极高敏感性区面积总百分比达20%时,滑坡发生面积总百分比为50%;极高敏感性区面积总百分比达到30%时,滑坡发生面积总百分比为65%。该曲线表明滑坡敏感性评价结果具有极高的准确度和可靠性。

3 结论

本文对地质发生灾害地区的影响因子进行定量,利用确定性系数可自动获取滑坡各影响因子数据。采用几率数值模型、信息量评价模型对敏感性进行评价,分析每一种类评价因子对滑坡敏感性的影响水平。实验证明,当极高敏感性区面积达到30%时,滑坡发生面积总百分比为65%。由此可见滑坡敏感性评价最终结果具有较高的准确性,可为地震诱发滑坡地质灾害的地貌因子作出预判提供科学依据。

参考文献

- [1] 樊芷吟, 苟晓峰, 秦明月. 基于信息量模型与 Logistic 回归模型耦合的地质灾害易发性评价 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 340-347.
- [2] 戴岚欣, 许强, 范宣梅, 等. 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟地震诱发地质灾害空间分布规律及易发性评价初步研究 [J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 1151-1164.
- [3] 牛全福, 冯尊斌, 党星海, 等. 黄土区滑坡研究中地形因子的选取与适宜性分析 [J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(12): 1584-1592.

- [4] 王毅, 唐川, 何楚, 等. 基于降雨频率的泥石流危险性评价研究 [J]. 长江科学院院报, 2018, 35(1): 67-72.
- [5] 武新宁, 易俊梅, 周淑丽, 等. 尼泊尔 $M_s 8.1$ 级地震活动构造及次生地质灾害研究 [J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 137-144.
- [6] 王志恒, 汪东川, 胡炳旭, 等. 考虑滑坡敏感性的天津市蓟州区生态网络构建 [J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4351-4362.
- [7] 彭建, 郭小楠, 胡熠娜, 等. 基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建——以云南省玉溪市为例 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 627-635.
- [8] 王森, 许强, 罗博宇, 等. 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.
- [9] 王卫东, 傅庆湘, 汤睿. 川藏铁路(成都—雅安段)线域滑坡地质灾害时间-空间敏感性分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(4): 48-56.
- [10] 冯非凡, 武雪玲, 牛瑞卿, 等. 粒子群优化 BP 神经网络的滑坡敏感性评价 [J]. 测绘科学, 2017, 42(10): 174-179.
- [11] 陈宇杭, 王浪, 邓辉, 等. 四川茂县黄土墙滑坡地震动力响应特征研究 [J]. 人民长江, 2017(b06): 153-157.
- [12] 吴杭, 张绪教, 乔彦松, 等. 基于确定性系数与证据权模型的滑坡灾害敏感性评估: 以金沙江龙开口一期纳段流域为例 [J]. 现代地质, 2017, 31(6): 1269-1277.