

基于熵值法和突变级数法的泥石流易损度评价

王雪冬¹, 叶 果¹, 李世宇¹, 张晓军², 李小龙³

1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 中铁十九局集团有限公司矿业投资有限公司, 北京 100161; 3. 山东正元建设工程有限责任公司, 山东 潍坊 261000

摘 要: 泥石流易损度(危害性)评价是泥石流风险评估的重要组成部分。结合熵值法和突变理论的泥石流易损度评价方法, 采用客观的熵值法判断指标间相对重要程度, 利用突变级数法计算突变级数值进行评价, 方法理论基础牢固且避免了确定指标权重值的弊端。以吉林省和龙市地质灾害调查与区划中的 10 条泥石流易损度评价实例进行验证, 结果表明: 数据获取、标准化和评价过程简便, 易损度等级以轻度和中度为主的评价结果符合实际情况, 该方法经过完善指标体系后可更加合理地应用于实际工作中。因此, 基于熵值法和突变理论的泥石流易损度评价方法是可行的、可靠的。

关键词: 泥石流; 易损度; 评价; 熵值法; 突变级数法

VULNERABILITY ASSESSMENT OF DEBRIS FLOW BASED ON ENTROPY VALUE AND CATASTROPHE PROGRESSION METHODS

WANG Xue-dong¹, YE Guo¹, LI Shi-yu¹, ZHANG Xiao-jun², LI Xiao-long³

1. College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning Province, China; 2. China Railway 19th Bureau Group Mining Investment Co., Ltd., Beijing 100161, China; 3. Shandong Zhengyuan Construction Engineering Co., Ltd., Weifang 261000, Shandong Province, China

Abstract: Vulnerability (harmfulness) is an important part of debris flow risk assessment. Two methods are combined for the vulnerability assessment. The objective entropy value method is adopted to judge the relative importance of indexes; while the catastrophe progression to calculate its value. The well-grounded method theory can avoid the disadvantages of determining index weight value. Taking the vulnerability assessment examples of 10 debris flows in the geohazard surveying and zoning in Helong City, Jilin Province, for verification, the results show that the process of data acquisition, standardization and assessment is simple, and the mild and moderate-dominated vulnerability grades are consistent with the actual situation. The method can be more reasonably applied to practical work after improving the index system. Therefore, the combination of entropy value method and catastrophe theory is feasible and reliable for debris flow vulnerability assessment.

Key words: debris flow; vulnerability; assessment; entropy value method; catastrophe progression method

0 引言

泥石流易损度是指由泥石流灾害而可能导致一定

区域和时间内的人、财、物的潜在最大损失^[1]。泥石流易损性评价是泥石流灾害风险评价的重要方面, 也是

收稿日期: 2019-02-18; 修回日期: 2019-04-03. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家自然科学基金“基于降雨条件和堆积特征的内排土场泥石流启动规律研究”项目(编号 51604140); 中国博士后科学基金“降雨作用下矿山排土场浅层滑坡演化规律研究”项目(编号 2018M631815); 辽宁省自然科学基金“矿山排土场坡面降雨冲刷破坏机理研究”项目(编号 20170540423); 大学生创新创业训练计划“矿山排土场泥石流垂向流速分布研究”项目(编号 201810147271).

作者简介: 王雪冬(1984—), 男, 讲师, 从事地质资源与地质工程专业教学与研究, 通信地址 辽宁省阜新市中华路 47 号, E-mail/987817831@qq.com

泥石流防灾减灾的基础^[2-4]. 目前综合评价方法有层次分析法、模糊综合评价法、功效系数法、神经网络分析法等众多方法, 指标权重的确定往往是目标评价问题的核心, 主客观赋权法均存在缺点, 对评价结果产生影响^[5-7]. 泥石流是一定地形地貌条件下的松散碎屑堆积物在暴雨等诱发因素作用时突发的现象, 其暴发具有典型的突变特征, 突变理论为解决这类问题提供了有效方法^[8-9]. 突变理论涉及较深的数学基础, 其中突变级数法以其理论简单得到了广泛应用, 突变级数法应用于评价过程虽然无需给出指标因子的权重数值^[10], 但仍需要定性判断出评价指标间的相对重要程度, 可采用依据数据客观分析的熵值法进行改进^[11]. 将熵值法改进后的突变级数法应用于吉林省和龙市泥石流易损度评价中, 获得了新的泥石流易损度评价方法.

1 突变级数法理论模型简介

突变理论被广泛应用于研究事物状态的突变过程中, 将控制系统突变发生的因子称作控制变量^[9], 当控制变量数为 2 时, 就构成了最常见的尖点型突变模型^[12]. 下面简要介绍基于尖点型突变模型的突变级数综合评价法.

尖点型突变模型的势函数为

$$F(x) = x^4 + ax^2 + bx \tag{1}$$

式中 x 是状态变量; a 和 b 是控制变量.

对(1)式求导数可得到临界曲面, 平衡曲面 M 的方程为

$$F'(x) = 4x^3 + 2ax + b = 0 \tag{2}$$

对上式求导后可得到奇点集 S 为

$$F''(x) = 12x^2 + 2a = 0 \tag{3}$$

由(2)(3)式联立并消去 x , 得到分歧集 B 的方程为

$$8a^3 + 27b^2 = 0 \tag{4}$$

分歧集 B 的分解形式可表达式为

$$\begin{cases} a = -6x^2 \\ b = 8x^3 \end{cases} \tag{5}$$

图 1 为平衡曲面 M 和分歧集 B 的空间图形, 平衡曲面 M 上 OI 和 OJ 构成了奇点集 S , 它们在 $u-v$ 平面上的投影 $O'I'$ 和 $O'J'$ 构成了分歧集 B . 系统状态的变化表现有突变和渐变两种形式. 当系统的状态沿着路

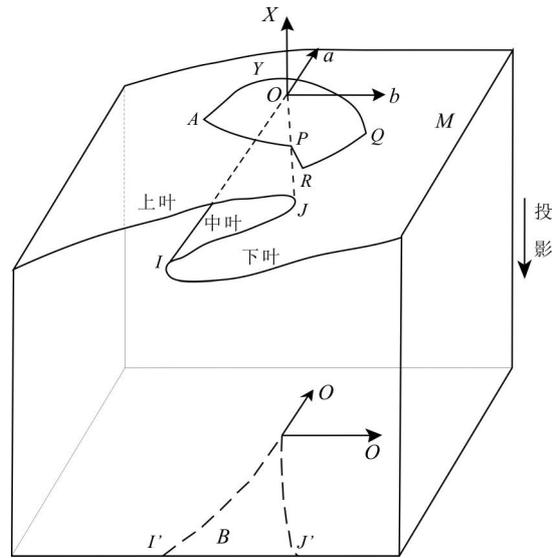


图 1 尖点型突变模型

Fig. 1 Cusp catastrophe model

径 AYQ 变化时, 表现为渐变方式; 当沿着路径 $APRQ$ 变化时, 跨过奇点集 B , 则系统状态变量 x 从上叶跨到中叶突越到下叶, 系统状态则发生突变^[9, 13].

2 熵值法改进突变级数法的泥石流易损度评价

2.1 基本原理

尖点型突变级数法是根据尖点突变理论得到的综合评价方法^[14], 原理是把综合评价目标分解, 根据模糊数学及尖点突变理论获得突变模糊隶属函数, 再由尖点模型的分歧集方程得出归一化公式并计算出突变级数值用于评价. 优缺点同时体现在指标权重上, 其应用时只需定性给出指标因子间的相对重要程度^[15-16]. 为了避免主观判断的误差, 采用依据数据本身判断的熵值法进行改进, 其原理是分析各指标的变异程度, 利用各指标因子的信息熵值来判断相对重要程度.

将 m 个样本, n 项指标因子组成的综合评价集数据进行无量纲化和归一化处理, 获得可用于评价的源数据集 R_{ij} . 根据处理后的数据可求得第 j 项指标因子的权重值为 $w_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n e_j$. 式中, $e_j = \sum_{i=1}^m t_{ij} \ln t_{ij} / \ln m$ 即为第 j 项指标因子的信息熵, $t_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^m r_{ij}$ 为第 j 个样本第 i 项指标因子的比重, r_{ij} 为源数据集 R_{ij} 中第 j 项指

标因子的第 i 个样本. 信息熵值与指标因子的相对重要程度呈反比关系^[17-18], 因此, 可利用计算获得的信息熵值判断出指标因子间的重要程度.

2.2 评价过程

将影响易损度的各项指标作为控制变量, 建立起泥石流的势函数, 应用熵值法改进突变级数法来评价泥石流的易损度特征. 根据泥石流易损度评价选取合适的评价指标, 建立目标评价系统^[19]. 为了达到取值范围统一, 需要将各个控制变量标准化后控制在 0~1 的区间内, 一般可利用(6)式进行指标的归一化.

$$\begin{cases} x_a = \sqrt{a} \\ x_b = \sqrt[3]{b} \end{cases} \quad (6)$$

由(6)式可知, 归一化过程中的控制变量对评价目标的控制作用有主次之分, 这种控制作用的大小可由熵值法依据数据本身进行客观判断. 因此, 根据上述建立的改进层次结构模型, 即可求得突变级数值后进行易损度的综合评价. 显然, 当控制变量都对评价目标产生正效应作用时, 采取互补原则, 即取突变级数的平均值^[9].

3 应用

和龙市地处吉林省东部的长白山区, 地质环境质量较差, 以泥石流、崩塌、滑坡为主的地质灾害常有发生. 泥石流、滑坡等地质灾害潜在危险较严重, 已发现泥石流隐患点 69 处, 一旦泥石流暴发, 会造成当地人民生命财产的损失, 因此, 开展泥石流易损度的有效评价是十分必要的.

3.1 评价指标的选取与赋值

泥石流的易损度评价指标通常可以概括为社会危害度、物质危害度、环境危害度和经济危害度 4 类^[1]. 为实现灾害的评估与防灾减灾的快速响应, 将社会危害度用威胁人口的指标表达, 后三者则可以估算成财产的货币量形式, 以威胁经济财产的多少表达^[20]. 简化后易损度评价因子分为财产指标和人口指标两大类, 可通过前期的地质灾害调查工作获取具体数值.

以和龙市地质灾害调查与区划资料为基础, 威胁人口指标以单沟泥石流威胁的实际人数来表达, 威胁经济财产指标以泥石流所威胁的物质指标、环境指标和财产指标转化成的货币量之和来表达, 其中道路、耕地、房屋等均按当地实际物价水平进行估算取值, 这样

泥石流易损度评价的尖点型突变模型如图 2 所示, 得到的指标赋值情况如表 1 所示.

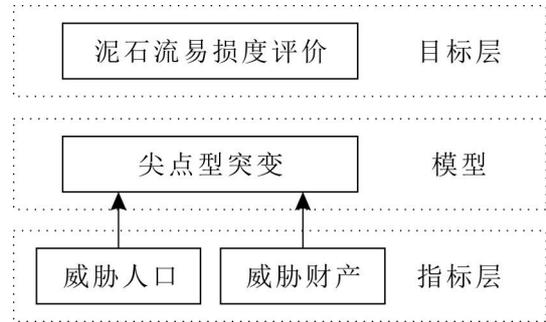


图 2 泥石流易损度评价模型

Fig. 2 Vulnerability assessment model of debris flow

表 1 选取泥石流沟调查情况统计表

Table 1 Survey statistics for the selected debris flow gullies

| 泥石流沟编号 | 受威胁人口/人 | 威胁财产/万元 |
|--------|---------|---------|
| N1 | 8 | 30 |
| N2 | 70 | 551 |
| N3 | 6 | 60 |
| N4 | 42 | 482 |
| N5 | 10 | 59 |
| N6 | 9 | 54 |
| N7 | 30 | 270 |
| N8 | 11 | 51 |
| N9 | 18 | 170 |
| N10 | 5 | 44 |

3.2 评价指标的标准化、重要程度、归一化与评价标准

由于模型中指标因子的意义不同, 在利用(6)式归一化公式计算泥石流易损度的突变级数值前, 需按(7)式进行指标因子的标准化处理.

$$x_i' = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (7)$$

式中 x_{\max} 和 x_{\min} 分别为指标因子的最大值和最小值.

结合熵值法和表 1 数据, 计算出威胁人口和威胁经济财产指标的信息熵值分别为 0.838 和 0.793, 由此可得出威胁经济财产评价指标相对重要程序.

判断单沟泥石流的易损度等级还需确定每个评价等级标准的突变级数值, 可根据单个指标的泥石流易损度等级划分的标准值得出. 依据我国《滑坡崩塌泥石流灾害调查规范(1:50000)》并参考相关文献^[21], 将

泥石流易损度划分为轻度危害、中度危害、高度危害和极度危害4个等级(表2)。

表2 泥石流易损度评价等级划分标准
Table 2 Grading standards of debris flow vulnerability assessment

| 评价指标 | 轻度危害 | 中度危害 | 高度危害 | 极度危害 |
|---------|-------|---------|----------|-----------|
| 受威胁人口/人 | 0-10 | 10-100 | 100-1000 | 1000-2000 |
| 威胁财产/万元 | 0-100 | 100-500 | 500-1000 | 1000-2000 |

将表2中单指标泥石流易损度评价等级阈值应用到改进的突变级数法中,可获得基于熵值法和尖点型突变级数法的泥石流易损度评价标准(表3)。泥石流易损度突变级数值越大,泥石流的危害性就越高。

表3 泥石流易损度评价等级标准
Table 3 Grades of debris flow vulnerability assessment

| 评价等级 | 轻度危害 | 中度危害 | 高度危害 | 极度危害 |
|------|---------|-------------|-------------|---------|
| 突变级数 | 0-0.197 | 0.197-0.434 | 0.434-0.750 | 0.750-1 |

3.3 易损度评价结果与分析

利用尖点型突变模型的归一化公式计算各泥石流易损度的突变级数。模型中威胁人口和威胁经济财产的两个指标对泥石流危害程度的作用是正向的,所以采用公式(6)进行指标因子的归一化运算时需采用互补原则,计算结果见表4。

表4 泥石流易损度评价结果
Table 4 Results of debris flow vulnerability assessment

| 泥石流沟编号 | 标准化处理 | | 突变级数值 | 评价结果 |
|--------|-------|-------|-------|------|
| | 受威胁人口 | 威胁财产 | | |
| N1 | 0.004 | 0.015 | 0.141 | 轻度 |
| N2 | 0.035 | 0.276 | 0.426 | 中度 |
| N3 | 0.003 | 0.030 | 0.159 | 轻度 |
| N4 | 0.021 | 0.241 | 0.383 | 中度 |
| N5 | 0.005 | 0.029 | 0.171 | 轻度 |
| N6 | 0.005 | 0.027 | 0.168 | 轻度 |
| N7 | 0.015 | 0.135 | 0.307 | 中度 |
| N8 | 0.006 | 0.026 | 0.171 | 轻度 |
| N9 | 0.009 | 0.085 | 0.250 | 中度 |
| N10 | 0.003 | 0.022 | 0.146 | 轻度 |

结合泥石流易损度的突变级数等级划分标准和计算得到选取的泥石流沟突变级数值可以看出,和龙市泥石流的易损度等级以轻度和中度为主,说明整体上泥石流的危害较小,这与调查得到的该区泥石流规模小、危害性小的结论相符。同时,也存在威胁数十人和上百万财产安全的潜在单沟泥石流,若未采取群测群防等地质灾害的有效预防措施,仍可能造成十分严重的灾害损失。因此,泥石流易损度的评价结果可为防灾减灾工作提供理论和实践指导。

4 结论

1)依据数据本身判断指标因子重要性的熵值法进行改进突变级数综合评价法,并将其应用于泥石流易损度综合评价中,避免了权重值确定的弊端,保证了综合评价结果的客观。

2)应用评价结果与调查得到的实际结论相符,改进型突变级数综合评价法可用于泥石流灾害的风险评估工作,也能为灾害的有效防治提供指导。

3)概化后的泥石流易损度评价指标简单且易于赋值,能够实现泥石流易损度的快速评价。但易损度评价涉及指标较多,将来可选取更加合理的指标体系用于实际评价工作,可为更加科学、合理地开展泥石流易损度评价提供依据。因此,基于熵值法和突变理论的泥石流易损度评价是可行的、可靠的。

参考文献:

- [1]刘希林,莫多闻. 泥石流易损度评价[J]. 地理研究, 2002, 21(5): 569-577.
- [2]CUI Peng, XIANG Ling-zhi, ZOU Qiang. Risk assessment of highways affected by debris flows in Wenchuan earthquake area[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(2): 173-189.
- [3]HAN Yong-shun, LIU Hong-jiang, ZHONG Dun-lun, et al. GIS-based risk assessment of debris flow disasters in the upper reach of Yangtze river[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2007, 12(4): 657-662.
- [4]刘希林,尚志海. 泥石流灾害综合风险分析方法及其应用[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(5): 86-88.
- [5]唐波,刘希林,尚志海. 城市灾害易损性及其评价指标[J]. 灾害学, 2012, 27(4): 6-11.
- [6]倪晓娇,南颖,朱卫红,等. 基于多灾种自然灾害风险的长白山地区生态安全综合评价[J]. 地理研究, 2014, 33(7): 1348-1360.

(下转第 422 页 /Continued on Page 422)

综上所述,结合已有资料,作者认为龙江组形成于早白垩世早期鄂霍次克洋板块俯冲与碰撞造山转换阶段,地壳加厚导致下地壳部分熔融,并在上涌过程中伴有中、上地壳物质的混染,在经历至少3次喷发旋回后,形成了龙江组火山岩组合。

5 结论

(1)龙江组以灰绿色、灰紫色气孔杏仁状安山岩、角闪安山岩、安山质角砾熔岩为主,具有爆溢相到喷溢相、爆溢相到喷发沉积相、崩塌相到次火山相的3个旋回,火山活动总体上逐渐减弱。岩性为玄武安山岩、玄武质粗面安山岩、粗面安山岩、安山岩、粗面岩、英安岩及流纹岩,属过铝质中酸性岩,高钾钙碱性系列。

(2)微量元素含量特征与大陆地壳相近,富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,反映构造背景岛弧环境。

(3)龙江组测年结果主要介于126~120 Ma,属早白垩世早期。此时处于鄂霍次克洋板片俯冲与碰撞造山转换阶段,龙江组火山岩组合主要归因于碰撞造山增厚下地壳的部分熔融作用。

参考文献:

- [1]李向文,杨言辰,叶松青,等. 黑龙江省塔河县十五里桥金矿床地质特征及控矿因素[J]. 地质与勘探,2014,50(1):77-85.
- [2]张富程,杨言辰,李向文,等. 十五里桥金矿区物化探异常特征及应用[J]. 物探与化探,2015,39(2):262-267.
- [3]宋贵斌,刘洪利,马靖,等. 黑龙江十五里桥金矿床成矿地质背景及成矿机制探讨[J]. 黄金,2013,34(5):17-22.
- [4]公维国,李向文,魏海峰,等. 黑龙江十五里桥金矿区土壤地球化学特征及找矿方向[J]. 黄金,2013,34(4):19-23.
- [5]李庆录,张秀琴,徐伦先,等. 上黑龙江成矿带区域成矿特征[J]. 黄金科学技术,2010,18(5):20-23.
- [6]孙彦峰. 黑龙江省塔河县十五里桥金矿床地质特征及矿床成因探讨[D]. 北京:中国地质大学,2015:30-31.
- [7]张超,吴新伟,张渝金,等. 龙江盆地龙江组火山岩的地球化学特征及锆石 U-Pb 年龄[J]. 中国地质,2018,45(3):456-466.
- [8]李永飞,郜晓勇,卞雄飞,等. 大兴安岭北段龙江盆地中生代火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质通报,2018,32(8):1195-1210.
- [9]丁秋红,陈树旺,商翎,等. 兴安岭东部地区下白垩统龙江组新认识[J]. 地质与资源,2014,23(3):215-234.
- [10]叶素攀,魏杰,沙小保. 大兴安岭新六站地区龙江组火山岩特征及构造环境[J]. 世界有色金属,2017(17):200-202.
- [11]王苏珊,刘佳宜,季洪伟,等. 黑龙江三道湾子金矿区龙江组安山岩的年代学与地球化学[J]. 岩石学报,2017,33(3):2604-2615.

(上接第 496 页 /Continued from Page 496)

- [7]王雪冬,李广杰,孟凡奇,等. 基于改进型拉开档次法的泥石流危险度评价实例[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2012,42(6):1853-1858.
- [8]凌复华. 突变理论及其应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,1987:2-3.
- [9]徐黎明. 基于突变理论的乌东德水电站近坝区泥石流风险评价与防治研究[D]. 长春:吉林大学,2013.
- [10]周容义,黎忠文,牛会永. 基于突变理论的油库火灾爆炸分析与模糊动态评价[J]. 中国安全科学学报,2006,16(6):97-101.
- [11]王雪冬,李世宇,孙延锋,等. 基于熵值法和突变理论的矿山环境质量评价[J]. 煤炭科学技术,2018,46(S1):264-267.
- [12]Lee S, Chwa U, Min K D. Landslide susceptibility mapping by correlation between topography and geological structure in the Janghung area, Korea[J]. Geomorphology, 2002,46(3/4):149-162.
- [13]曹伟,盛煜,齐吉琳. 基于突变级数法的青海木里矿区冻土环境影响评价[J]. 煤炭学报,2008,33(8):881-886.
- [14]李军霞. 西藏隆子县滑坡灾害形成机理及非线性预测研究[D]. 长春:吉林大学,2011.
- [15]陈娇,罗周全,侯造水. 基于改进突变级数法的金属矿采空区稳定性评价[J]. 中国安全生产科学技术,2013,9(11):17-24.
- [16]安景文,安娴,王龙康. 基于突变级数法的企业应急动态能力评价研究[J]. 中国安全生产科学技术,2017,13(1):109-114.
- [17]张立新,张艳. 基于改进突变级数法的农村人力资源能力评价研究[J]. 大连理工大学学报:社会科学版,2016,37(1):70-76.
- [18]郑德凤,臧正,王平富. 改进的突变模型及其在水资源评价中的应用[J]. 水利水电科技进展,2014,34(4):45-52.
- [19]王富强,刘中培,杨松林. 基于突变理论的灌区水资源开发利用状况综合评价[J]. 中国农村水利水电,2011(12):19-25.
- [20]唐川,张军,周春花,等. 城市泥石流易损性评价[J]. 灾害学,2005,20(2):11-17.
- [21]LIU Xi-lin. Site-specific vulnerability assessment for debris flows: Two case studies[J]. Journal of Mountain Science, 2006,13(1):20-27.