

陈孝国, 边晓菲, 母丽华, 等. 基于混合型动态决策理论的露天矿边坡危险度评价[J]. 灾害学, 2015, 30(4): 34-38. [Chen Xiaoguo, Bian Xiaofei, Mu Lihua, et al. The Risk Assessment of Open Pit Slope Based on the Hybrid Dynamic Decision-making Theory[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(4): 34-38.]

基于混合型动态决策理论的露天矿边坡危险度评价^{*}

陈孝国^{1,2}, 边晓菲¹, 母丽华¹, 张红芬²

(1. 黑龙江科技大学 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150022;

2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为进一步完善露天矿边坡危险度评价方法, 在系统阐述影响危险度因素的基础上, 建立了基于时间集的混合型动态决策模型。其中, 将由语言值、区间值、模糊数和直觉模糊数组成的混合型评价矩阵统一转化为直觉模糊评价矩阵, 时间权重采用指数衰减方法进行确定, 并利用集成算子将不同时刻的直觉模糊矩阵集成为综合直觉模糊矩阵。然后采用熵权理论确定各个属性权重, 将不同属性值再进行集成, 并按照得分值越大越优的原则进行决策。最后通过实例说明了该模型的具体应用。

关键词: 边坡危险度; 混合型评价; 集成; 动态决策; 直觉模糊熵

中图分类号: P642.22; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2015)04-0034-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.04.007

矿山工程的安全建设质量直接影响着我国基础行业和社会的稳固发展, 但由于矿山本身自然条件的复杂以及人类开采利用的不合理, 导致矿区的灾害事故频发, 造成了巨大的经济损失和人员伤亡。近年来, 快速的经济的发展进一步加大对矿产的需求量, 随着露天矿边坡开采深度的增加, 人为活动改变了边坡的应力状态及工程地质特征, 容易使边坡出现崩塌、滑坡等危险, 一旦发生灾害就会造成人员伤亡、设备损毁及矿产资源的浪费^[1]。因此, 对露天矿边坡进行稳定性研究并作出危险度评价将对矿山的安全生产具有重要现实意义。目前, 模糊数学相关理论已经在矿业工程中进行了广泛的应用^[2-5], 刘大勇等^[6]通过降雨量和降雨强度两个参数对抚顺西露天煤矿的边坡滑坡与降雨的关系进行了探讨; 刘丽娜^[7]提出了基于 AHP 法的边坡危险性评价方法; 祝玉学^[8]运用可靠性理论对尖山铁矿边坡进行了优化设计; 刘文方等^[9]利用熵权理论对边坡稳定性进行了评价; 赵丽娜等^[10]探讨了露天矿边坡滚石运动特征及控制方法。

上述研究成果虽然全面考虑了露天矿边坡影

响因素的可变性、模糊性及复杂性等特点, 但是普遍没有注意到露天矿的采场边坡影响因子是随着开采的进度不同而时刻发生变化的, 也就是说露天矿边坡是一个动态开放的不可逆系统。同时, 现有的评价方法多采用数值型或者语言型进行单一评价, 而实际在影响边坡危险性的指标因素中, 有的比较适合数值型, 有的比较适合语言型, 还有的可能比较适合区间值型, 因此, 混合型评价是比较普遍的。本文将探讨考虑时间变化的混合型决策方法在露天矿边坡危险度评价中的应用。

1 影响露天矿边坡危险度的因素分析

1.1 影响露天矿边坡危险度的水文地质条件

风化作用是地表岩石与空气、水、生物接触过程中, 不断产生物理及化学变化, 从而形成松散堆积物的过程, 风化作用按照原理不同可以分为物理、化学及生物风化。不管哪种风化作用对于边坡的稳定性均有明显的影响, 会增大边坡的危险度^[11]。

大气降水作为边坡危险度评价的重要因素,

^{*} 收稿日期: 2015-03-30 修回日期: 2015-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51105135); 黑龙江省自然科学基金项目(A201421); 黑龙江省教育厅科研项目(12531577); 黑龙江科技大学青年才俊资助项目(20120501)

作者简介: 陈孝国(1978-), 男, 黑龙江克东人, 副教授, 主要从事模糊决策, 煤矿安全方面研究. E-mail: kjdxcxg@sohu.com

通常需要引起高度重视, 按照其分类可以分为地表降水及地下水, 而其对于边坡危险度的作用原理表现为软化、静水压力和动水压力。

1.2 影响露天矿边坡危险度的边坡内部地质结构

岩体的岩性往往是决定边坡危险度的重要因素, 坚硬而完整的岩石如花岗岩、大理岩或者石灰岩等, 往往能够形成较高且陡峭的高边坡, 而且危险度较小; 软弱岩石甚至土体则稳定性较差, 通常只能形成低且缓的斜坡, 危险度较高。地质构造对边坡危险度的影响主要体现为边坡的结构面, 结构面的发育程度、产状、填充物等都会成为危险度的重要影响因素。通常顺倾(结构面同边坡的倾向相同, 坡脚大于倾角)边坡的危险度要高于逆倾边坡, 而且结构面同边坡的夹角越大, 边坡的危险度越低。

内摩擦角作为工程上经常使用的参数之一, 常用来表征土体的抗剪强度指标。土体越密实, 内摩擦角越大, 咬合力及摩擦力也就越大, 边坡的危险度也就越低。粘聚力是土体内部颗粒之间的相互吸引力, 按照其成因可以分为原始、固化及毛细三种粘聚力, 如果土体受到扰动时, 其固化粘聚力就会丧失, 而原始粘聚力会在丧失之后逐渐恢复到原来的水平, 毛细粘聚力相较于前两者较小, 一般可忽略不计。如果边坡土体的粘聚力越高, 则边坡的危险度越低^[12]。

1.3 影响露天矿边坡危险度的几何条件

平面形态呈现凹形的边坡危险度较凸形的危险度高, 而同样是凹形的边坡, 边坡等高线曲率半径增大, 边坡的危险度也随之增大。对于其他条件一致的边坡, 坡高的高度越大, 则危险度越高, 反之亦然。对于其他条件一致的边坡, 坡角越大, 危险度越高, 反之亦然。

1.4 影响露天矿边坡危险度的诱发因素

人类对露天矿边坡的开采活动必然会导致边坡的物理力学性质发生变化, 科学开采配合有效的加固措施, 可以降低边坡的危险度, 通常人为因素对边坡的影响主要包括开挖造成削坡及坡顶加载等。不合理削坡可能造成坡脚软弱夹层及结构面切穿, 在下滑力一定的前提下造成边坡危险度的增大。另外, 施工时常常为了贪图一时之便, 将弃石堆积在坡顶, 这样会造成坡脚剪应力及坡顶张应力的集中, 同时增加坡体本身的自重, 从而导致边坡危险度增大。

露天矿边坡开挖时大多采用爆破开挖, 爆破作业产生的振动冲击波对于边坡危险度的增大作用非常明显。爆破产生的瞬时冲击波会在被爆

破的岩体中产生并传播动荷载, 大大增加了边坡的瞬时应力。而压缩波传到坡面之后会迫使坡面产生临空面方向的扩张, 这会造成岩体拉伸, 从而导致原有裂隙发育甚至产生新的裂隙, 最终造成岩体破坏滑塌^[13]。

2 直觉模糊集基本概念

定义 1^[14] 设 X 是一个给定的论域, 则 X 上的一个直觉模糊集定义为 $A = \{ \langle x_i, \mu_A(x_i), v_A(x_i) \rangle \mid x_i \in X \}$, 式中, $\mu_A: X \rightarrow \text{int}(0, 1)$ 和 $v_A: X \rightarrow \text{int}(0, 1)$ 分别为 A 的隶属度函数和非隶属度函数, 且对 $\forall x_i \in X$, 有 $0 \leq \sup(\mu_A(x_i)) + \sup(v_A(x_i)) \leq 1$ 成立。记 $\pi_A(x_i) = 1 - \mu_A(x_i) - v_A(x_i)$ 为 $x_i \in A$ 的未知度, 也称为犹豫度, 且 $0 \leq \pi_A(x_i) \leq 1, x_i \in X$ 。通常称 $(\mu_A(x_i), v_A(x_i), \pi_A(x_i))$ 为一直觉模糊数, 简记 $(\mu_A(x_i), v_A(x_i))$ 。

定义 2^[15] 设 $\alpha_j = (a_j, b_j), (j = 1, 2, \dots, n)$, 为一组直觉模糊数, 则称下式为直觉模糊集成算子:

$$IFWA_w(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = (1 - \prod_{j=1}^n (1 - a_j)^{w_j} \prod_{j=1}^n b_j^{w_j}) \quad (1)$$

式中: $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 为 $\alpha_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 的权重向量, 且 $w_j \in [0, 1], \sum_{j=1}^n w_j = 1$ 。

定义 3^[15] 设 $\alpha(a, b)$ 为一个直觉模糊数, 称

$$S(\alpha) = a - b \quad (2)$$

为 α 的得分函数, $H(\alpha) = a + b$ 为 α 的精确度函数。

当 $S(\alpha_i) < S(\alpha_j)$ 时, 规定 $\alpha_i < \alpha_j$; 当 $S(\alpha_i) = S(\alpha_j), H(\alpha_i) < H(\alpha_j)$ 时, 规定 $\alpha_i < \alpha_j$; 当 $S(\alpha_i) = S(\alpha_j), H(\alpha_i) = H(\alpha_j)$ 时, 规定 $\alpha_i = \alpha_j$ 。

定义 4^[16] 设 $A = \{ \langle x_i, \mu_A(x_i), \pi_A(x_i) \rangle \mid x_i \in X \}$ 为一直觉模糊集, 称

$$E(A) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1 - (\mu_A(x_i) - v_A(x_i))^2 + 2\pi_A^2(x_i)}{2 - (\mu_A(x_i) - v_A(x_i))^2 + \pi_A^2(x_i)} \quad (3)$$

为直觉模糊熵。

3 混合型动态多属性群决策方法

决策问题中, 假设 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 为方案集, m 为方案的个数; $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ 为决策属性集, n 为决策属性个数; 时间集 $T = \{1, 2, \dots, K\}$, $H^{(t)} = (h_{ij}^{(t)})_{m \times n}$ 为第 t 个评价矩阵, 其中 $h_{ij}^{(t)} (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ 为第 t 段时间内方案 u_i 关于属性 c_j 的评价值, 该值可以是语言值、区间值、模糊数或直觉模糊数形式。

3.1 混合型评价矩阵的转化

对于含有语言值、区间值、模糊数和直觉模糊

数的混合型评价矩阵 $\mathbf{H}^{(t)}$ 进行决策分析时,我们可以将它们统一转化为直觉模糊数矩阵 $\mathbf{R}^{(t)} = (r_{ij}^{(t)})_{m \times n}$ 后再进一步处理。

模糊数 a_{ij} 转化为直觉模糊数为 $(a_{ij}, 1 - a_{ij})$ 。

区间值 $[a_{ij}^L, a_{ij}^U]$ 按效益型和成本型首先进行规范化。

$$\text{效益型: } b_{ij}^L = \frac{a_{ij}^L}{\max_{i \in N} a_{ij}^U}, b_{ij}^U = \frac{a_{ij}^U}{\max_{i \in N} a_{ij}^U}。$$

$$\text{成本型: } b_{ij}^L = \frac{\max_{i \in N} a_{ij}^U - a_{ij}^U}{\max_{i \in N} (\max_{i \in N} a_{ij}^U - a_{ij}^L)};$$

$$b_{ij}^U = \frac{\max_{i \in N} a_{ij}^U - a_{ij}^L}{\max_{i \in N} (\max_{i \in N} a_{ij}^U - a_{ij}^L)}。$$

规范化后的区间值 $[a_{ij}^L, a_{ij}^U]$ 转化为直觉模糊数为 $(b_{ij}^L, 1 - b_{ij}^U)$ 。

语言值转化为直觉模糊数的方法可以参考文献[17]中给出的11标度的语言变量与直觉模糊数的对应关系。设语言变量集合 $S = \{\text{绝对好, 很好, 好, 较好, 中好, 中等, 中差, 较差, 差, 很差, 绝对差}\}$, 则对应的直觉模糊数集合为

$$A = \{(1, 0), (0.9, 0.05), (0.8, 0.1), (0.7, 0.15), (0.6, 0.2), (0.5, 0.5), (0.4, 0.4), (0.3, 0.55), (0.2, 0.7), (0.1, 0.85), (0, 1)\}。$$

3.2 权重的确定

将混合型评价矩阵统一转化为直觉模糊数矩阵后,分别确定不同时间段和属性因素权重。

文献[18]中提出采用指数衰减模型来确定时间权重,基本思想是不同时刻决策者所掌握的信息是不同的,离最终决策时刻越近则掌握决策信息越多,时间权重就越大,反之就越小。

本文只考虑时间为离散时的情况,设时间集 $T = \{1, 2, \dots, K\}$, $t \in T$ 则 t 时刻的权重

$$w_t = \frac{e^{\lambda t} (1 - e^{\lambda})}{e^{\lambda} (1 - e^{\lambda K})}, \quad (4)$$

式中: λ 为衰减系数。

下面确定属性权重。利用满足定义3的熵度量计算出评价矩阵中每个直觉模糊数所对应的熵值 E_{ij} 。然后采用 $p_{ij} = \frac{E_{ij}}{\max_i (E_{ij})}$ ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) 对熵值进行规范化处理。最后通过

$$\omega_j = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_{ij}}{\sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_{ij}\right)} \quad (5)$$

确定属性权重。

3.3 评价矩阵的集成运算

时间权重确定之后,可以将不同时间段对应的

直觉模糊评价矩阵 $\mathbf{R}^{(t)} (t = 1, 2, \dots, K)$ 进行集成,得到综合决策矩阵

$$\mathbf{R} = (r_{ij})_{m \times n}, r_{ij} = IFWA_w(r_{ij}^{(1)}, r_{ij}^{(2)}, \dots, r_{ij}^{(K)}) = \left(1 - \prod_{t=1}^K (1 - a_{ij}^{(t)})^{w_t}, \prod_{t=1}^K (b_{ij}^{(t)})^{w_t}\right), \quad (6)$$

式中: $r_{ij}^{(t)} = (a_{ij}^{(t)}, b_{ij}^{(t)})$, w_t 表示第 t 时间段对应的权重。

属性权重确定之后,可以将决策矩阵 \mathbf{R} 按照不同属性进行集结,得到每个方案对应的直觉模糊数 β_i 。

$$\beta_i = IFWA_w(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}) = \left(1 - \prod_{j=1}^n (1 - a_{ij})^{\omega_j}, \prod_{j=1}^n (b_{ij})^{\omega_j}\right), \quad (7)$$

式中: $r_{ij} = (a_{ij}, b_{ij})$ 。

3.4 决策步骤

步骤1:将混合型评价矩阵统一转化为直觉模糊评价矩阵。

步骤2:利用式(4)求出不同时间段权重 $w_t (t = 1, 2, \dots, K)$ 。

步骤3:将不同时间段的评价矩阵 $\mathbf{R}^{(t)} (t = 1, 2, \dots, K)$ 进行集成,得到综合决策矩阵 $\mathbf{R} = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

步骤4:利用式(1)将每个方案按照全部属性值进行集成。

步骤5:根据式(2)计算出得分值的大小并进行决策排序。

4 工程实例分析

安太堡露天矿区内植被较稀少,有严重的水土流失现象。本区地下水位较低,安全隔水层较厚,水不易进入,影响甚微。大气、水及生物的风化作用对近地表岩石的影响较弱。年降雨量值区间为 82.2 ~ 489.16 mm,降雨月份集中,最大降雨强度 87 mm/日,478 mm/月。北帮边坡为第四系、第三系和石炭系地层。其中第四系黄土中含有粉土层、粉质粘土层和粘土层;第三系只是局部分布;石炭系中有泥岩层、砂岩层和煤层。各地层之间为不整合接触关系。顶板总体产状为南倾,倾角变化较大。岩层的产状倾向南东,倾角 $3^\circ \sim 5^\circ$ 。北帮边坡泥岩层组物理力学性能指标如下:天然容重 $\rho = 2.52 \text{ g/cm}^3$;粘聚力 $C = 1.60 \text{ MPa}$;内摩擦角 $\varphi = 28.0^\circ$;单轴抗压强度 $R = 18.52 \text{ MPa}$ 。砂岩层组物理力学性能指标为:天然容重 $\rho = 2.51 \text{ g/cm}^3$;粘聚力 $C = 4.95 \text{ MPa}$;内摩擦角 $\varphi = 43.0^\circ$;单轴抗压强度 $R = 28.52 \text{ MPa}$ 。北帮边坡岩体节理、裂隙极其发育,受其影响,北帮岩体破碎严重,且中间含有多组软弱结构面^[19]。

现从北帮边坡选取5个观测点 $U = \{u_1, u_2, u_3,$

u_4, u_5 }, 根据上面分析得到的 4 项影响露天矿边坡危险度的属性指标, c_1 水文地质条件, c_2 边坡内部地质结构, c_3 几何条件, c_4 诱发因素对观测点进行评价, 近三周的评价矩阵分别为 $H^{(1)}$ 、 $H^{(2)}$ 、 $H^{(3)}$ 。

$$H^{(1)} = \begin{pmatrix} (0.53, 0.24) & \text{好} & [0.3, 0.4]0.63 \\ (0.86, 0.03) & \text{中等} & [0.5, 0.6]0.72 \\ (0.70, 0.18) & \text{中好} & [0.4, 0.5]0.66 \\ (0.62, 0.15) & \text{较差} & [0.6, 0.7]0.53 \\ (0.46, 0.22) & \text{很好} & [0.2, 0.3]0.82 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$H^{(2)} = \begin{pmatrix} (0.58, 0.17) & \text{好} & [0.6, 0.7]0.58 \\ (0.81, 0.09) & \text{中差} & [0.4, 0.5]0.65 \\ (0.77, 0.12) & \text{较好} & [0.5, 0.6]0.74 \\ (0.62, 0.15) & \text{较差} & [0.5, 0.6]0.46 \\ (0.45, 0.27) & \text{好} & [0.3, 0.4]0.53 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$H^{(3)} = \begin{pmatrix} (0.56, 0.21) & \text{较好} & [0.7, 0.8]0.65 \\ (0.61, 0.19) & \text{中差} & [0.5, 0.6]0.37 \\ (0.83, 0.07) & \text{中好} & [0.4, 0.5]0.86 \\ (0.32, 0.46) & \text{较差} & [0.6, 0.7]0.41 \\ (0.54, 0.15) & \text{好} & [0.1, 0.2]0.58 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

(1) 将混合型评价矩阵 $H^{(1)}$ 、 $H^{(2)}$ 、 $H^{(3)}$ 转化为直觉模糊评价矩阵 $R^{(1)}$ 、 $R^{(2)}$ 、 $R^{(3)}$, 其中影响露天矿边坡危险度的几何条件对应的区间值按照成本型进行规范化处理。

$$R^{(1)} = \begin{pmatrix} (0.53, 0.24) & (0.8, 0.1) & (0.6, 0.2) & (0.63, 0.37) \\ (0.86, 0.03) & (0.5, 0.5) & (0.2, 0.6) & (0.72, 0.28) \\ (0.70, 0.18) & (0.6, 0.2) & (0.4, 0.4) & (0.66, 0.34) \\ (0.62, 0.15) & (0.3, 0.55) & (0, 0.8) & (0.53, 0.47) \\ (0.46, 0.22) & (0.9, 0.05) & (0.8, 0) & (0.82, 0.18) \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$R^{(2)} = \begin{pmatrix} (0.58, 0.17) & (0.8, 0.1) & (0, 0.75) & (0.58, 0.42) \\ (0.81, 0.09) & (0.4, 0.4) & (0.5, 0.25) & (0.65, 0.35) \\ (0.77, 0.12) & (0.7, 0.15) & (0.25, 0.5) & (0.74, 0.26) \\ (0.62, 0.15) & (0.3, 0.55) & (0.25, 0.5) & (0.46, 0.54) \\ (0.45, 0.27) & (0.8, 0.1) & (0.75, 0) & (0.53, 0.47) \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$R^{(3)} = \begin{pmatrix} (0.56, 0.21) & (0.7, 0.15) & (0, 0.86) & (0.65, 0.35) \\ (0.61, 0.19) & (0.4, 0.4) & (0.29, 0.57) & (0.37, 0.63) \\ (0.83, 0.07) & (0.6, 0.2) & (0.43, 0.43) & (0.86, 0.14) \\ (0.32, 0.46) & (0.3, 0.55) & (0.14, 0.71) & (0.41, 0.59) \\ (0.54, 0.15) & (0.8, 0.1) & (0.86, 0) & (0.58, 0.42) \end{pmatrix}. \quad (13)$$

(2) 取衰减系数 $\lambda = 0.5$, 利用式(4) 计算时间权重:

$$w = (0.186\ 3, 0.307\ 2, 0.506\ 5). \quad (14)$$

(3) 将不同时间段的评价矩阵 进行集结, 得到决策矩阵:

$$R = \begin{pmatrix} (0.561, 0.202) & (0.754, 0.123) & (0.156, 0.628) & (0.626, 0.374) \\ (0.742, 0.107) & (0.420, 0.417) & (0.348, 0.447) & (0.548, 0.452) \\ (0.793, 0.099) & (0.634, 0.183) & (0.374, 0.444) & (0.801, 0.199) \\ (0.490, 0.265) & (0.300, 0.550) & (0.152, 0.652) & (0.449, 0.551) \\ (0.499, 0.193) & (0.824, 0.088) & (0.821, 0.000) & (0.629, 0.371) \end{pmatrix}. \quad (15)$$

(4) 根据式(3) 得到直觉模糊熵矩阵:

$$E = \begin{pmatrix} 0.511 & 0.391 & 0.477 & 0.484 \\ 0.397 & 0.520 & 0.529 & 0.498 \\ 0.354 & 0.472 & 0.523 & 0.390 \\ 0.533 & 0.593 & 0.463 & 0.497 \\ 0.548 & 0.323 & 0.287 & 0.483 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

最终得到属性权重 $\omega = (0.257\ 1, 0.399\ 8, 0.245\ 3, 0.097\ 8)$, 利用式(1) 将每个方案按照全部属性进行集成。结果分别为 $u_1 = (0.597\ 9, 0.232\ 2)$, $u_2 = (0.526\ 8, 0.301\ 4)$, $u_3 = (0.659\ 9, 0.195\ 7)$, $u_4 = (0.339\ 2, 0.475\ 1)$, $u_5 = (0.751\ 4, 0)$ 。

(5) 根据式(2) 计算出每个观测点的得分值, $s(u_1) = 0.365\ 7$, $s(u_2) = 0.225\ 4$, $s(u_3) = 0.464\ 2$, $s(u_4) = -0.135\ 9$, $s(u_5) = 0.751\ 4$ 。所以五个观测点的危险度从小到大排序为 $u_5 < u_3 < u_1 < u_2 < u_4$ 。

5 结论

利用语言值、区间值、模糊数和直觉模糊数对露天矿边坡危险度进行评价更加符合工程实际需要, 同时在复杂多变的地质条件和众多不确定性因素的作用下, 引入时间变量能够保证对观测系统进行连续的研究。决策模型中通过直觉模糊集成运算得到的危险性评价结果可靠性将有所提高, 整个决策过程计算量较小, 且易于编程。该项研究不仅丰富了露天矿边坡危险度的评价方法, 同时也可以推广到其它领域。

参考文献:

- [1] 吴顺川, 高永寿, 杨占峰. 基于正交试验的露天矿高陡边坡落石随机预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (Supp. 1): 2826 - 2832.
- [2] 夏元友, 朱瑞赓, 李新平. 边坡稳定性研究的综述与展望[J]. 金属矿山, 1995, 20(12): 9 - 12.
- [3] 陈孝国, 杜红, 高尔新, 等. 煤层自然危险性的模糊 - 可拓理论模型[J]. 灾害学, 2014, 29(3): 29 - 33.
- [4] 韩晋平, 毕永华, 侯金玲, 等. 基于灰色 - 模糊综合法的煤矿应急救援能力评价研究[J]. 西安科技大学学报, 2011, 31 (2): 146 - 152.
- [5] 陈孝国, 杜红, 母丽华, 等. 不确定条件下矿井火灾救灾路线优选的群决策方法[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24 (3): 167 - 171.
- [6] 刘大勇, 王恩德, 宋建潮, 等. 抚顺西露天煤矿滑坡与降雨的关系及预报方法[J]. 灾害学, 2008, 23(2): 50 - 54.
- [7] 刘丽娜, 许冲, 徐锡伟, 等. GIS 支持下基于 AHP 方法的 2013 年芦山地震区滑坡危险性评价[J]. 灾害学, 2014, 29 (4): 183 - 191.
- [8] 祝玉学. 边坡稳定性的最大似然估计[J]. 国外金属矿山, 1995, 20(3): 6 - 12.

- [9] 刘文方, 李红梅. 基于熵权理论的斜坡地质灾害链综合评判[J]. 灾害学, 2013, 29(1): 8–11.
- [10] 赵丽娜, 周科平, 高峰, 等. 露天矿边坡滚石运动特征及控制[J]. 灾害学, 2008, 23(3): 76–79.
- [11] 杨天鸿, 张锋春, 于庆磊, 等. 露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1437–1451.
- [12] 孙树海, 曹兰柱, 张立新. 露天矿边坡稳定性的模糊综合评判[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(2): 177–179.
- [13] 张时忠, 张天锡. 爆破施工对边坡稳定性影响初探[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(1): 39–43.
- [14] Atanassov K. Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Set-sands, 1986, 20(1): 87–96.
- [15] 陈孝国. 基于区间直觉模糊集的动态多属性群决策方法[J]. 广西民族大学学报, 2014, 20(3): 51–55.
- [16] Wei C P, Wang P, Zhang Y Z. Entropy, similarity measure of interval-valued intuitionistic fuzzy sets and their applications[J]. Information Sciences, 2011, 18(1): 4273–4286.
- [17] 张峰, 谢振华, 程江涛, 等. 基于改进直觉模糊数的混合型多属性决策方法[J]. 海军航空工程学院, 2013, 28(4): 451–454.
- [18] 陈孝国, 杜红. 区间三角模糊软集及其动态决策方法[J]. 系统工程与电子技, 2015, 37(5): 1111–1115.
- [19] 李欣洪. 基于可拓学-模糊层次分析法的露天矿边坡危险度评价[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.

The Risk Assessment of Open Pit Slope Based on the Hybrid Dynamic Decision-making Theory

Chen Xiaoguo^{1,2}, Bian Xiaofei¹, Mu Lihua¹ and Zhang Hongfen²

(1. College of Science, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: To further improve the way to assess the risk of the open pit slope, we established the hybrid dynamic decision-making model upon the time set, which is on the basis of formulating the factors that will influence the risk. And among the model, we will transfer the hybrid evaluation matrix which is formed by the linguistic, interval-value, fuzzy value and intuitionistic fuzzy value to the intuitionistic fuzzy evaluation matrix. Time weight will be confirmed by the exponential decay approach, and it will use aggregation operator to integrate intuitionistic fuzzy matrix at different time to comprehensive intuitionistic fuzzy matrix. And then we will make use of entropy weight theory to ascertain the attribute weight, and integrate the attribute value again. Next, we will make a decision according to the principle of it will be better if its score value is greater. Finally, illustrate the concrete application of the model through the examples.

Key words: risk of side slope; hybrid evaluation; aggregating; dynamic decision making; intuitionistic fuzzy entropy

(上接第 28 页)

Research on Multi-source Information Eddy Current in Meteorological Disaster Events

Guo Xiang¹, Zhang Airong² and Wang Yang²

(1. College of Public Administration of Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. College of Public Administration of Nanjing University of Agriculture, Nanjing 210095, China)

Abstract: The connections between the information interactive subjects in meteorological disaster events is worthy of deep consideration in meteorological disaster events emergency management. we make a detailed classification on meteorological disaster events of multi-source information, and at the same time to conduct in-depth analysis of information structure. On this basis, we propose a conventional information interactive mode in meteorological disaster events. Moreover, we further analyze the generation of eddy current and its impact on meteorological disaster events.

Key words: meteorological disaster events; multi-source information; information interaction; information eddy current