

王继. 基于多级模糊数学的矿山地质灾害指标体系设计[J]. 灾害学, 2019, 34(4): 14-18. [WANG Ji. Design of mine geological hazard index system based on multi-level fuzzy mathematics [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(4): 14-18. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.04.003.]

# 基于多级模糊数学的矿山地质灾害指标体系设计<sup>\*</sup>

王 继

(四川财经职业学院, 四川 成都 610101)

**摘 要:** 当前矿山地质灾害指标较为固定, 缺少灵活性, 较为死板。将多级模糊数学理论应用到金属矿山地质灾害指标体系设计中。结合金属矿山地质灾害不确定性的特征, 设计多级模糊模型, 进行主客观定权。在上述基础上, 将设计的模型应用到灾害评估指标体系设计中。实验结果表明, 该模型能够有效提高评估的灵活性, 结果也更为准确。

**关键词:** 多级模糊数学; 金属矿山; 地质灾害; 评估方法

**中图分类号:** X43; X915.5; P642      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-811X(2019)04-0014-05  
**doi:** 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.04.003

金属矿山地质灾害是当前地质灾害研究的一个分支, 并且是最可能直接诱发地质灾害的一种。其是在人为或自然因素的作用下产生的, 对人类的生命安全、环境破坏以及资源损失具有严重的威胁作用<sup>[1-2]</sup>。我国属于发展中国家, 国家的发展、人类的生活需求需要消耗大量的矿产资源, 对矿山开采的需求日益增加<sup>[3-4]</sup>。但是部分矿山开采只注重经济效益, 导致开采事故日益增多<sup>[5]</sup>, 对矿山地质灾害进行评估可高效实现预防矿山地质灾害的目的, 因此需要研究一种新的金属矿山地质灾害评估方法。

目前, 国内外已有相关学者进行了相应研究。邓创等<sup>[6]</sup>提出一种基于风险理论的金属矿山地质灾害评估方法, 结合相关环境及地质设定相关联的参数, 并量化金属矿山地质发生灾害的概率, 结合相关的风险理论指标, 完成金属矿山地质灾害评估, 该方法的评估耗时较长。贾茜淳等<sup>[7]</sup>提出一种基于 GPS 定位的金属矿山地质灾害评估方法, 通过量化采集得到的相关数据, 将量化数据作为输入因子, 灾害等级作为输出因子, 构建神经网络模型, 完成金属矿山地质灾害评估, 该方法评估的准确性较低。

针对以上所述现状及现有方法存在的问题, 本文提出了一种基于多级模糊数学的金属矿山地质灾害评估方法。

## 1 基于多级模糊数学的金属矿山地质灾害评估方法

### 1.1 多级模糊数学设计

模糊数学主要是描述以及处理不确定性的相关工具, 并且具有稳定的数学基础, 能够对灾害中的不确定性进行建模, 提供直观的方式描述各个风险因素之间的关系。模糊推理结构能够更加充分的反应风险机制的产生<sup>[8-9]</sup>, 它能够有效利用数据库进行数据存储, 能够提供快速有效的概率推理方法, 并且在风险跟踪中发现新的证据, 新数据能够引入相关的模糊数学模型中, 重新计算或者更新先前的评估结果。

首先分析金属矿山地质灾害的不确定性特征, 构建灾害评估指标体系, 设计多级模糊模型, 进行主客观定权。具体过程如下:

模糊数学理论可直观地表示为一个复杂的赋值因果关系, 一个完整的模糊数学模型是由二元组构成, 且  $B \leq G$ , 则有:

$$\cdot G = (V(G), E(G)). \quad (1)$$

式中:  $\cdot G$  代表有向无环图,  $V(G)$  代表节点集合,  $E(G)$  代表弧集合。

依据模糊数学模型结构, 确定多级模糊模型<sup>[10]</sup>:

\* 收稿日期: 2019-03-28

修回日期: 2019-06-03

基金项目: 自然科学基金项目“灾害预防多传感器集成监测系统研究”(40511130586)

作者简介: 王继(1982-), 男, 四川峨边人, 硕士, 讲师, 主要从事高等数学教育与数学建模研究. E-mail: dndn6655@163.com

$$P(V_i | V_j) = \frac{\cdot GP(V_i | V_j)}{P(V_j)} = \frac{\cdot GP(V_j)P(V_i | V_j)}{P(V_j)} \quad (2)$$

式中:  $P(V_i)$  代表先验概率,  $P(V_i | V_j)$  代表后验概率。在矿山地质灾害中, 将矿山地质划分为不同区域, 作为不同节点目标, 即为评价不同区域的灾害风险指标, 风险指标主要是指某一矿山地质风险状态的发生概率<sup>[11]</sup>; 矿山地质灾害风险指标之间存在的因果关系, 利用不同区域节点的有向弧表示, 地质灾害发生的条件概率充分反映了因果关系的强弱, 也就是所谓的概率指标大小; 利用先验概率以及后验概率, 进行推理计算, 确定最终的地质灾害概率后验分布, 即为地质区域所处不同状态的概率分布, 以概率的表达式充分说明区域矿山地质灾害风险状态。

依据多级模糊模型, 整合不同区域风险, 并对其进行约束, 获取后验概率的表达式:

$$P(v | V_1, V_2, \dots, V_k) = P(v) \prod_{i=1}^k P(V_i | v) \quad (3)$$

通过公式(3)设定先验概率分布以及非根节点概率分布, 推理得到包含整体矿山地质的联合地质灾害风险概率分布。

在上述分析的基础上, 加入地质灾害根节点的权重参数  $w_i$ <sup>[12]</sup>。对后验概率公式进行主客观定权, 获取隶属函数表达式为:

$$L(V_i) = P(v | V_1, V_2, \dots, V_k)^{w_i} \\ = P(v) \prod_{i=1}^k P(V_i | v)^{w_i} \quad (4)$$

## 1.2 基于模型的矿山地质灾害指标体系设计

在前一小节的基础上, 依据主客观定权后的地质灾害风险数学模型, 构建金属矿山地质灾害评估模型, 利用该模型将金属矿山地质灾害划分为不同的等级, 进而完成矿山地质灾害指标体系设计。具体过程如下:

采矿区的面积不断扩大的同时, 支撑其覆岩层的矿柱压力也就越来越大<sup>[13]</sup>, 此时矿山地质沉陷系数为:

$$C = \frac{H}{W} \quad (5)$$

式中:  $H$  代表开采深度,  $W$  代表开采宽度。当沉陷系数达到一定的值时, 矿柱就会发生破裂。

在岩层中由于水的冲刷会带走大量的细小颗粒, 发生机械腐蚀。随着细小颗粒的不断减少, 造成岩层逐渐松散, 其孔隙度与强度快速降低, 造成大规模的碎屑流, 导致颗粒无法均匀的分配在岩层中, 矿层渗透压力为:

$$C_d = \frac{g_w I}{C} = g_w \frac{Dh}{CL} \quad (6)$$

式中:  $h$  代表颗粒分布差,  $L$  代表渗透长度。

岩石颗粒的不断渗透变形对金属矿山造成较大的危险, 从而发生事故。滑坡主要是指斜坡的岩体在受重力的作用下沿着任意弱面下滑的地质现象<sup>[14-15]</sup>。在进行矿山开采以前, 边坡岩体应该

处于平衡的状态, 尾矿的堆积会加大顶部的荷载, 造成变形, 增大坡度, 降低了腐蚀的基准面。此时岩层斜坡的稳定性系数稳定系数为:

$$K = \frac{G_d N \tan \varphi + C \cdot A}{T} = \frac{G \cos \theta + C \cdot A}{G \sin \theta} \quad (7)$$

式中:  $\theta$  代表坡角,  $\varphi$  代表临界坡脚,  $C \cdot A$  代表滑坡重力和滑坡之间的接触面积。通过公式(7)可知下滑力的增大会造成山体滑坡的机率增大, 下滑力和重力坡角呈正相关。

在开采矿山的过程中, 岩石颗粒的渗透产生了大量固体残渣, 主要包含弃土等多种物质, 是形成泥石流灾害的主要原因<sup>[16-17]</sup>。在固定的地貌条件下, 颗粒渗透动力会激发一定的山体滑坡, 加快堆积物的流动速度。

在上述分析的基础上, 结合主客观定权模型, 构建金属矿山地质灾害评估模型, 即:

$$R_M = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K^2} \quad (8)$$

金属矿山地质灾害等级为:

$$J = \frac{R_M W_{PK}^{(r)}}{\alpha \cdot \varepsilon_{pk}^{(r)} \cdot H_{pk}^{(r+1)}} \quad (9)$$

有效的金属矿山地质灾害指标为:

$$Q = J \delta \times P(M_p | m_{p1}, m_{p2}, \dots, m_{pk}) \quad (10)$$

式中:  $\delta$  表示灾害等级效用因子。  $P(M_p | m_{p1}, m_{p2}, \dots, m_{pk})$  表示金属矿山地质灾害环境影响因素集合, 金属矿山地质灾害发生受众多环境因素的影响, 包括动力地质作用、岩土体基本属性、胁迫稳定性、水文地质特征与人类活动强度等, 用  $M_1, M_2, \dots, M_p$  表示,  $p \leq 5$ , 每种环境因素包含众多环境因子, 表示为  $m_{p1}, m_{p2}, \dots, m_{pk}$ 。

综上所述, 完成了基于多级模糊数学的金属矿山地质灾害指标设计。

## 2 实验结果与分析

以我国某矿区为例, 对该矿区实行地质灾害评估, 判断该矿区地质灾害危险性相关的模糊因素, 先设定评价单元与评价因素, 然后根据本文提出的多级模糊模型, 进行主客观定权, 获取隶属函数; 将每个参评因子的每项因子根据地质灾害评价因子分级, 获取每个因子隶属于相应的评价等级隶属度, 最后评估结果根据最大隶属度原则判定。

把地质灾害评估等级设定为危险性高、危险性较高、危险性中度和危险性低 4 种等级。实验所选取的矿区地质灾害分布情况如表 1 所示。

表 1 实验矿区地质灾害点统计数据

地质灾害类型	灾害点数量/个
滑坡	52
崩塌	34
不稳定斜坡	125
泥石流	30
合计	241

环境因素的设定是该矿区地质灾害准确评估的重中之重。根据野外调查的资料把该矿区地质灾害的环境因素设定为 5 种, 依次是动力地质作用、岩土体基本属性、胁迫稳定性、水文地质特

征与人类活动强度。该 5 种环境因素设定为 19 个环境因子, 由此建立的评价指标和引用贝叶斯网络模型, 进行主客观定权后的结果如表 2 所示。

表 2 地质灾害评估因子权值、隶属度计算结果

评估指标(三级)	权值	环境因子(二级)	权值	评估内容(一级)	权值	隶属度
动力地质作用	0.14	活断层	0.34	活动极限	0.3	(0.05, 0.3, 0)
				地震时震级最大值	0.2	(0, 0, 0.9)
				断层长短	0.2	(0, 0.84, 0.14, 0)
		地震	0.3	峰值地面加速度	0.34	(0, 0, 0.2)
				谐波分量周期	0.34	(0, 0, 0.2)
				场地强度	0.2	(0.02, 0.6, 0)
		砂土液化	0.24	液化层深度	0.2	(0.24, 0.4, 0.14, 0.2)
				液化层厚度	0.2	(0.24, 0.4, 0.14, 0.2)
				地下水位	0.1	(0, 0.9, 0)
				场地强度	0.1	(0.04, 0.4, 0)
岩土体地基特征	0.1	变质岩类	0.1	干抗压强度	0.3	(0.1, 0.2, 0.1, 0.2)
				震动横波在土内的传播速度	0.24	(0.9, 0, 0)
				软化系数	0.34	(0, 0.4, 0.2, 0.1)
		第三系岩类	0.1	干抗压强度	0.3	(0.9, 0.3, 0.2, 0.1)
				震动横波在土内的传播速度	0.24	(0.9, 0, 0)
				软化系数	0.34	(0, 0, 0.9)
		卵砾石	0.14	承载力	0.3	(0.9, 0, 0)
				厚度	0.34	(0, 0.2, 0)
				震动横波在土内的传播速度	0.24	(0.9, 0, 0)
		砂土	0.14	承载力	0.3	(0.9, 0, 0)
				厚度	0.34	(0.9, 0, 0)
				震动横波在土内的传播速度	0.24	(0.9, 0, 0)
		黄土类土	0.24	承载力	0.24	(0, 0.9, 0)
				湿陷性系数	0.24	(0.2, 0.1, 0.2, 0.1)
				震动横波在土内的传播速度	0.1	(0.4, 0.4, 0, 0)
				湿陷性换图厚度	0.2	(0, 0, 0.4, 0.4)
		淤泥质土	0.24	承载力	0.2	(0.1, 0.14, 0.4, 0.24)
				厚度	0.3	(0.9, 0, 0)
				埋深	0.2	(0.9, 0, 0)
斜坡稳定性	0.2	滑坡	0.2	滑坡体体积	0.2	(0.5, 0.3, 0, 0)
				日降雨量最大值	0.2	(0, 0, 0.2)
				安全系数	0.3	(0, 0.2, 0.3, 0.4)
		崩塌	0.1	崩塌体体积	0.2	(0.14, 0.84, 0, 0)
				日降雨量最大值	0.2	(0, 0, 0.2)
				安全系数	0.3	(0, 0.5, 0.3)
		泥石流	0.2	不稳定沟壁比例	0.1	(0.14, 0.2, 0.14, 0.5)
				流域植被覆盖率	0.14	(0, 0.3, 0.5, 0)
				雨强	0.14	(0.14, 0.84, 0, 0)
				流域沟床坡降	0.1	(0, 0, 0.3, 0.5)
				流域山坡坡度	0.2	(0, 0.1, 0.2, 0.4)
				地形坡度	0.3	(0.2, 0.2, 0.5, 0.1)
		无灾害斜坡	0.24	内摩擦角	0.24	(0.2, 0.2, 0.5, 0.1)
				前缘陡坎高度	0.34	(0.2, 0.2, 0.5, 0.1)

续表 2

评估指标(三级)	权值	环境因子(二级)	权值	评估内容(一级)	权值	隶属度
水文地质特征	0.2	基岩孔隙水	0.34	富水性	0.3	(0, 0.5, 0.3, 0)
				埋深	0.24	(0, 0.9, 0)
				矿化度	0.34	(0, 0.2, 0.6)
		孔隙裂隙水	0.3	富水性	0.3	(0, 0.14, 0.84, 0)
				埋深	0.24	(0, 0, 2, 0)
				矿化度	0.34	(0, 0, 0.1, 0.7)
		孔隙水	0.3	富水性	0.3	(0.04, 0.2, 0.24, 0.5)
				埋深	0.24	(0.04, 0.2, 0.24, 0.5)
				矿化度	0.34	(0, 0, 0.1, 0.7)
		水土流失	0.2	地形坡度	0.3	(0, 0, 0.2, 0.6)
				沟谷密度	0.34	(0.1, 0.1, 0.1, 0.3)
				植被覆盖率	0.24	(0, 0.1, 0.1, 0.5)
人类活动强度	0.2	人工填土	0.2	填土分类	0.34	(0.5, 0.1, 0.2, 0.2)
				厚度	0.3	(0.5, 0.1, 0.2, 0.2)
				面积	0.24	(0.5, 0.1, 0.2, 0.2)
		水质污染	0.15	五毒含量	0.24	(0.2, 0.2, 0.1, 0.5)
				硬度	0.1	(0.2, 0.2, 0.1, 0.5)
				$NO_4^-$	0.24	(0.2, 0.2, 0.1, 0.5)
				$NO_3^-$	0.1	(0.2, 0.2, 0.1, 0.5)
				$SO_4^{2-}$	0.2	(0.2, 0.2, 0.1, 0.5)

根据表 2 数据, 通过最大隶属度原则, 对该矿区的每个环境因子实行地质灾害等级综合评价, 结果如下。

#### (1) 一级评估

将矿区地质灾害综合评估结果矩阵用  $A$  表示, 表示非相同质量级别的隶属度:

$$A_{11} = [0, 0.46, 0.52, 0]; \quad (11)$$

$$A_{12} = [0, 0.05, 0.33, 0.5]; \quad (12)$$

$$A_{13} = [0.08, 0.65, 0.18, 0.05]; \quad (13)$$

$$A_{21} = [0.21, 0.45, 0.14, 0.14]; \quad (14)$$

$$A_{23} = [0.54, 0, 0.44, 0]; \quad (15)$$

$$A_{24} = [0.3, 0, 0.5, 0]; \quad (16)$$

$$A_{25} = [0.234, 0.364, 0.1, 0.1]; \quad (17)$$

$$A_{26} = [0.62, 0.13, 0.17, 0.04]; \quad (18)$$

$$A_{31} = [0.11, 0.21, 0.29, 0.35]; \quad (19)$$

$$A_{33} = [0.014, 0.184, 0.25, 0.53]; \quad (20)$$

$$A_{34} = [0.016, 0.382, 0.30, 0.28]; \quad (21)$$

$$A_{41} = [0, 0.40, 0.30, 0.27]; \quad (22)$$

$$A_{42} = [0, 0.01, 0.5, 0.37]; \quad (23)$$

$$A_{43} = [0.032, 0.064, 0.331, 0.56]; \quad (24)$$

$$A_{51} = [0, 0.04, 0.334, 0.614]; \quad (25)$$

$$A_{52} = [0.4, 0.24, 0.1, 0.04]; \quad (26)$$

$$A_{53} = [0.04, 0.1, 0.24, 0.4]; \quad (27)$$

#### (2) 二级评估

$$A_1 = [0.2, 0.38, 0.39, 0.2]; \quad (28)$$

$$A_2 = [0.37, 0.33, 0.1, 0.07]; \quad (29)$$

$$A_3 = [0.05, 0.33, 0.33, 0.25]; \quad (30)$$

$$A_4 = [0.012, 0.260, 0.28, 0.435]; \quad (31)$$

$$A_5 = [0.194, 0.124, 0.2, 0.37]; \quad (32)$$

#### (3) 三级评估

$$A_{\text{实验矿区}} = [0.30, 0.15, 0.24, 0.37]; \quad (33)$$

实验矿区地质灾害综合评估结果矩阵设为  $A$  实验矿区。把地质灾害情况用隶属度区间的形式进行判断, 实验将隶属度区间设定为:

低级:  $[0.8, 1.0]$ ;

中级:  $[0.5, 0.8]$ ;

较高级:  $[0.2, 0.5]$ ;

高级:  $[0, 0.2]$ 。

计算最终评价结果, 取各级中间值设成模糊子集, 则模糊子集, 实验矿区地质灾害最终评价结果设为  $G$ :

$$G = (0.8 \times 0.30^2 + 0.64 \times 0.15^2 + 0.34 \times 0.24^2 + 0.2 \times 0.37^2) / (0.30^2 + 0.15^2 + 0.24^2 + 0.37^2) \approx 0.43. \quad (34)$$

则该矿区的地质灾害危险性等级为较高。

综合上述一级评估、二级评估和三级评估的分析, 可以看出利用本文的评估模型能够明确的划分出地质灾害等级, 验证了方法的可行性, 表明其能够有效的完成矿山地质灾害指标体系设计。

## 3 结束语

针对传统方法存在的一系列问题, 设计多级

模糊数学模型,在金属矿山地质灾害评估中应用。分析金属矿山地质灾害的不确定性,构建相应的评估体系。划分出不同的灾害等级。实验结果表明,本文给出的方法能够有效降低灾害评估时间,提高灾害评估效率,使获取的灾害评估结果更为准确。

总体分析,当前的金属矿山地质灾害评估的研究主要属于自然灾害。虽然全面考虑了导致灾害发生的灾害风险评估体系已经建立,但是进展却不是十分的明显。在灾害损失的评估中,针对直接造成的经济损失的评估方法当前发展较为成熟,但是间接造成损失的评估还不是十分完善。未来阶段,需要进一步完善金属矿山地质灾害评估体系,及时采取相应的保护措施,进一步减少经济损失。

## 参考文献:

- [1] 贾茜淳,张豫,丛沛桐. 钟山县山洪地质灾害风险评估与预警[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 208-214.
- [2] 郑凯航,朱月琴,张和生,等. 我国地质灾害图研究现状及趋势分析[J]. 中国矿业, 2016, 25(s2): 234-239.
- [3] 雷崇利,刘翔, LEI Chongli, 等. 基于地质灾害危险性的煤层气项目经济评价[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(3): 75-79.
- [4] 王先龙. 关于铁路路堑边坡区域地质灾害防治的思考[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(7): 47-51.
- [5] 王福涛,王世新,周艺,等. 高分辨率多光谱的芦山地震次生地质灾害遥感监测与评估[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(1): 181-185.
- [6] 邓创,刘友波,刘俊勇,等. 考虑降雨诱发次生地质灾害的电网风险评估方法[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3825-3832.
- [7] 贾茜淳,张豫,丛沛桐. 钟山县山洪地质灾害风险评估与预警[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 208-214.
- [8] 赵良军,李虎,刘玉锋,等. 新疆伊犁果子沟地质灾害风险评估及其致灾因子[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 693-700.
- [9] 彭建超,吴群,钱畅. 城镇住宅用地基准地价的地质灾害影响及修正系数研究——以兰州市为例[J]. 中国土地科学, 2016, 30(9): 73-81.
- [10] 王军,黄杰飞,程勇. 基于大数据处理的农业气象灾害分类模型[J]. 计算机仿真, 2017, 34(5): 353-356.
- [11] 郭捷,马凤山,赵海军,等. 金属矿山充填法开采引发地表突然塌陷机理分析[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(3): 461-465.
- [12] 韩张雄,倪天阳,武俊杰,等. 典型金属矿山选矿药剂与重金属污染综述[J]. 应用化工, 2017, 46(7): 1387-1390.
- [13] 徐兴华,唐小明,游省易,等. 东南沿海山区小流域突发地质灾害动态风险评估与应急预案[J]. 灾害学, 2018, 33(04): 81-88+95.
- [14] 兰乾玉,尹偃鹏,吴凌峰,等. 玉溪市电网遭受地质灾害风险评估[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(2): 25-30.
- [15] 范立民,马雄德,李永红,等. 西部高强度采煤区矿山地质灾害现状与防控技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 276-285.
- [16] 夏开宗,陈从新,付华,等. 金属矿山崩落采矿法引起的岩层移动规律分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1434-1440.
- [17] 谢婉丽,滕宏泉,杜蕾,等. 基于GIS结合模糊信息方法在灾害危险性区划中的应用——以大西安地区崩滑地质灾害为例[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 111-116.

# Design of Mine Geological Hazard Index System Based on Multi-level Fuzzy Mathematics

WANG Ji

(Sichuan Vocational College of Finance and Economics, Chengdu 610101, China)

**Abstract:** At present time, mine geological hazard index is relatively fixed, lack of flexibility and rigidity. The theory of multi-level fuzzy mathematics is applied to the design of geological hazard index system in metal mines. According to the uncertainties of geological hazards in metal mines, a multi-level fuzzy model is designed to determine the weights subjectively and objectively. On the basis of this, the designed model is applied to the design of disaster assessment index system. The experimental results show that the model can effectively improve the flexibility of evaluation, and the results are more accurate.

**Key words:** multilevel fuzzy mathematics; metal mines; geological disasters; evaluation method