

GRA—FAHP 模型的煤层底板突水危险性评价

李博

贵州大学喀斯特环境与地质灾害防治教育部重点实验室, 贵阳, 550000

内容提要: 矿井水害一直是制约我国煤炭安全生产的重要隐患之一, 对其进行准确的预测评价具有十分重要的理论意义和实用价值。本文根据煤层底板突水各影响因素之间的关系是灰色关系并且具有非线性特征的特点, 建立了定量与定性指标为一体的煤层底板突水评价指标体系及等级划分标准。同时将灰色关联分析法 (GRA) 和模糊层次分析法 (FAHP) 相结合。构建了能真实反映影响因素与底板突水之间灰色关系和非线性关系的底板突水危险性评价模型, 并应用模型对某典型工作面突水危险性等级进行了评价, 可为今后煤层底板突水预测评价的研究提供一定的借鉴和依据。

关键词: 煤层底板突水; 定量与定性; 灰色关联分析法; 模糊层次分析法; 评价

长期以来煤炭一直是我国的主要能源之一, 安全高效地进行煤炭资源开采是关系到国民经济和社会发展的重大事情。然而, 我国煤矿地质、水文地质条件十分复杂, 矿井水害一直是制约我国煤炭安全生产的重要隐患之一, 尤其是目前不少矿井已转入深部开采, 随着矿井向深部延伸, 工作面底板含水层的水压逐渐增大, 突水的危险性不断增大, 淹井事故也逐年上升。由此可见, 煤层底板水害已成为影响制约煤炭安全生产的重大难题之一, 对其进行准确预测预报和符合实际的评价具有十分重要的理论指导意义和实用价值 (王成绪等, 2004; Sun Yajun et al., 2008; Yao Banghua et al., 2012; 钱家忠等, 2012)。

以往对水害的预测主要采取突水系数法 (管恩太, 2011), 但是突水过程显现出一种非常复杂的非线性动力特征, 传统的突水系数法所能考虑的突水影响因素极为有限, 未能全面真实描述煤层底板突水这种受控于多因素且具有非常复杂机理的非线性动力现象 (卜昌森等, 2001; 武强等, 2007a), 已无法适应新的采矿方法和新的水文地质环境条件下的煤层底板突水评价。目前很多的科技工作者也在煤层底板突水领域做了大量的工作。武强等 (2007b) 利用 GIS 的空间数据处理和信息融合技术, 对煤层底板突水评价进行了研究。尹尚先等 (2004) 对煤层底板陷落柱突水进行了机理分析。胡巍等 (2013) 论

证了有限元强度折减在层开采底板突水评价的可行性。高延法等 (2009) 建立了底板突水危险性评价专家系统, 将突水地质开采信息实现了数值化。曹庆奎等 (2011) 建立了模糊—支持向量机模型, 用于对煤层底板突水危险性的评价。但是煤层底板突水预测评价是一个多因素影响的具有非线性动力特征的决策系统, 在这个系统当中各因素对底板突水的作用是已知的, 但是各因素之间并不是相互独立的, 他们之间的关系不明确, 但的确存在, 从本质上讲, 就是一种灰色关系。针对煤层底板突水预测评价中存在的以上特征, 本文建立了定量与定性指标为一体的煤层底板突水评价指标体系, 同时将灰色系统理论和对传统的层次分析法有很大改进的模糊层次分析法相结合。建立了能真实反映影响因素与底板突水之间灰色关系和非线性关系的多因素评判模型, 该评价模型可以得出不同层次的危险性评价结果, 可以为水害防治提供更为完善的有效信息。

1 煤层底板突水危险性评价主控因素

进行煤层底板突水危险性评价, 首先要确定相应的评价因素指标, 多年来的开采实践证明, 矿井底板突水评价的因素是多方面的, 从指标选取的可行性、代表性准确性出发, 本文主要选取了 4 个主要因素。

注: 本文为国家自然科学基金 (编号 41430318)、贵州省科技厅基金 (编号 黔科合 LH 字 [2014] 7617) 和贵州大学引进人才基金 (编号 2014-61) 资助项目的成果。

收稿日期: 2014-02-20; 改回日期: 2015-04-06。责任编辑: 黄敏。Doi: 10.16509/j.georeview.2015.05.015

作者简介: 李博, 男, 1982 年生。博士, 主要从事岩溶水文地质研究。Email: libo1512@163.com。

1.1 底板充水含水层

底板含水层的性质是煤层底板水害的决定因素之一,只有在富水性强、水量储存大的地段,当突水通道形成后,在水压的作用下,才会造成大的底板突水事故,若是富水性弱的地段,即使突水通道能导含水层,也不会造成大的危害。本文主要从底板含水层的水压、单位涌水量、渗透系数、含水层厚度 4 个因素对充水含水层的性质进行考虑。

1.2 地质构造

地质构造和底板水害的关系十分密切,首先地质构造的性质和发育程度会对含水层的富水性产生影响。其次构造会削弱了隔水层阻抗变形的能力,一些断层和裂隙,也会成为底板突水的突水通道(李博等,2012)。同时,断层自身的导水性也对断层能否导水起到重要作用。所以地质构造是煤层底板突水评价中的一个重要因素,本文主要从构造性质、构造密度、岩溶陷落柱发育情况、裂隙发育情况 4 个方面进行考虑。

1.3 底板隔水层阻水性

底板隔水层是阻止煤层底板突水的关键,是预防底板突水的天然地质保障。底板隔水层在阻止含水层突水的能力上主要体现在隔水层的厚度、隔水层的力学强度及岩体完整度三个方面。厚度大的隔水层,较强的抗压性及完整度良好的岩体能够有效的降低导水裂隙带的发育同时对底板水害进行有效的遏制。本文就从以上 3 个方面对底板隔水层的阻水能力进行评价。

1.4 开采扰动

随着回采的进行,底板围岩体在采动影响下会形成矿压破坏带。矿压破坏带是底板突水的重要诱因,矿压破坏带高度发育的越深,越容易引发突水事故。影响矿压破坏带的因素主要有煤层的采厚、开采深度、工作面长度及煤层倾角。开采煤厚越大,开采深度越深,工作长度越长及煤层倾斜度越陡,对煤层底板的破坏性就越大,就越容易诱发突水。

2 指标权重的确定方法

以往的权重确定方法多利用层次分析方法(AHP),但是层次分析法中存在诸如判断一致性与矩阵一致性的差异、一致性检验的困难和缺乏科学性等问题,其关键在于构造各层次的判断矩阵,但没有考虑到人为判断的模糊性。本文利用模糊数学新的研究成果,将 AHP 扩展到模糊环境中,即得到模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process ,

FAHP),并将其应用于指标权重的确定。下面介绍如何建立模糊互补判断矩阵、模糊互补判断矩阵权重的计算方法,以及模糊互补判断矩阵的一致性判断方法(张吉军,2000;兰继斌等,2006;彭书凤等,2008):

2.1 模糊互补判断矩阵的建立

在模糊层次分析中,作因素间的两两比较,采用一个因素比另一个因素的重要程度来定量表示,则得到模糊判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$,如果其具有如下性质:

- ① $a_{ii} = 0.5, i = 1, 2, \dots, n$;
- ② $a_{ij} + a_{ji} = 1, i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

这样的判断矩阵称为模糊互补判断矩阵。

关于某准则的相对重要程度得到定量描述,通常采用 0.1~0.9 标度法给予数量标度。 $a_{ii} = 0.5$ 表示因素与自己相比同样重要;若 $a_{ij} \in [0.1, 0.5)$,则表示因素 x_j 比 x_i 重要;若 $a_{ij} \in (0.5, 0.9]$,则表示因素 x_i 比 x_j 重要。在本次研究中对准则层的模糊互补判断矩阵根据上述原则采用两个(或多个)领域专家打分的方法进行建立。

2.2 模糊互补判断矩阵的权重确定

求解模糊互补判断矩阵权重的采用一种通用公式,该公式具备了模糊一致性判断矩阵的良好特性及其判断信息,计算量小便于实现。该公式如下:

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} - 1 + \frac{n}{2}}{n(n-1)}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

2.3 模糊互补判断矩阵的一致性检验

得到的权重值是否合理,还应该进行比较判断的一致性检验。检验其一致性原则的方法如下:

定义 1 设矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 和 $B = (b_{ij})_{n \times n}$ 均为模糊判断矩阵,称

$$I(A, B) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij} + b_{ij} - 1| \quad (2)$$

为 A 和 B 的相容性指标。

定义 2 设 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ 是模糊判断矩阵 A 的权重向量,其中 $\sum_{i=1}^n W_i = 1, W_i \geq 0 (i = 1, 2,$

$\dots, n)$,令 $W_{ij} = \frac{W_i}{W_i + W_j} (i, j = 1, 2, \dots, n)$,则称 n 阶矩阵。 $W^* = (W_{ij})_{n \times n}$ 为判断矩阵 A 的特征矩阵。对于决策者的态度 t ,当相容性指标 $I(A, W^*) \leq t$ 时,认为判断矩阵为满意一致性的。 t 越小则表明决策者对模糊判断矩阵的一致性要求越高,我们这里取 $t = 0.1$ 。

3 煤层底板突水的 GRA—FAHP 评价模型

灰色理论认为,灰色系统是指部分信息已知、部分信息未知的系统。用于解决信息不全所引起的不确定性问题。针对煤层底板突水这样的非线性复杂系统,其充水含水层、底板隔水层、地质构造、开采条件等这些因素对底板突水的作用是已知的,但是这些因素之间关系的密切程度是不确定的。因此,煤层底板突水评价属于灰色系统,能够采用灰色关联评价法(GRA)进行安全评价,并且应用 GRA 法能够有效地处理各因素之间的不确定关系,是一种有效的解决方法。我们结合模糊层次分析法(FAHP)和灰色关联分析法(GRA)建立了煤层底板突水的耦合评价模型,具体评价步骤如下(邓聚龙,1992;王福建等,2006;刘思峰等,2013):

3.1 确定评价对象和评价标准

参考数列(评价标准)记为: $x_j^0 = \{x_j^0(1), x_j^0(2), \dots, x_j^0(n)\}$, 比较序列(评价对象)记为: $x_i^0 = \{x_i^0(1), x_i^0(2), \dots, x_i^0(n)\}$ 比较序列的确定中对

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_i(k) - x_j(k)| + \rho \max_i \max_k |x_i(k) - x_j(k)|}{|x_i(k) - x_j(k)| + \rho \max_i \max_k |x_i(k) - x_j(k)|}$$

(4)

其中: $\xi_i(k)$ 为第 i 个评价对象中第 k 个指标与第 k 个最优指标的关联系数; ρ 为分辨系数,一般取 $\rho = 0.5$; $k = 1, 2, \dots, n$, $i = 1, 2, \dots, m$ 。

3.3 计算灰色加权关联度

在 FAHP 法确定的各指标的权重的基础上,计算考虑因子间权重差异的灰色加权关联度。

$$r_i = \sum_{k=1}^n w_k \zeta_i(k)$$

(5)

w_k 为采用模糊层次分析法确定各影响指标的权重; r_i 为第 i 个评价对象对理想对象的灰色加权关联度; $i = 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, n$ 。

3.4 评价分析

根据计算的灰色加权关联度的大小,建立评价对象的关联序列,然后根据最大关联度法则,关联度越大,与等级集合的关联程度越好,由此判定出评价区的煤层底板突水的危险性等级。

4 底板突水评价等级划分

本文中将煤层底板突水危险性评价分为 4 个等

定量指标根据指标的实测值确定,对定性指标根据研究区的实际情况结合我们建立的定性指标分级标准进行量化。然后按初值化处理评价矩阵进行无量纲化后形成如下矩阵:

$$\begin{matrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nn} \end{matrix}$$

其中,无量纲化处理采用被量化值与各级标准值的平均值相比较的方法进行,其计算公式如下:

$$x(k) = \frac{x^0(k)}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j^0(k)}$$

(3)

式中: $x(k)$ 表示待评价样本的第 k 项评价因子的无量纲化值; $x^0(k)$ 表示待评价样本的各评价因子的实际值; $x_j^0(k)$ 表示底板突水分级标准中各评价指标的标准值; $k = 1, 2, \dots, n$ 。

3.2 计算灰色关联系数

灰色关联系数计算公式如下:

级,小(Ⅰ)、较小(Ⅱ)、较大(Ⅲ)、大(Ⅳ)。对于定量指标我们综合考虑国家规范和经验值,如指标单位涌水量,按照《煤矿防治水规定》将其分为 0.1 L/(sm)、1 L/(sm)、5 L/(sm),在此基础上,本文将该指标划分为 4 个等级,即富水性弱 [$q < 0.1$ L/(sm)]、富水性较弱 [0.1 L/(sm) $\leq q < 1$ L/(sm)]、富水性较强 [1 L/(sm) $\leq q < 5$ L/(sm)]、富水性极强 [5 L/(sm) $\leq q$]; 渗透系数指标,按照《水利水电工程地质勘察规范》将渗透性划分为极微透水 [$K < 10^{-6}$ cm/s]、微透水 [10^{-6} cm/s $\leq K < 10^{-5}$ cm/s]、弱透水 [10^{-5} cm/s $\leq K < 10^{-4}$ cm/s]、中等透水 [10^{-4} cm/s $\leq K < 10^{-2}$ cm/s]、强透水 [10^{-2} cm/s $\leq K < 10$ cm/s]、极强透水 [10 cm/s $\leq K$] 6 个等级,在此基础上,本文按照极微透水 [$K < 10^{-6}$ cm/s]、弱透水 [10^{-6} cm/s $\leq K < 10^{-4}$ cm/s]、中等透水 [10^{-4} cm/s $\leq K < 10^{-2}$ cm/s] 和强透水 [10^{-2} cm/s $\leq K$] 将其分为 4 级。同样的方法,按照《工程岩体分级标准》,我们确定了岩体抗压性和岩体完整性指数的分级标准,按照《水文工程、地质工程地质编录》,我们确定了

裂隙率的分级标准,按照《煤田地质勘探规范》我们确定煤层采厚与煤层倾角的分级标准。最终建立了定量或定性的影响因素与底板突水危险性等级之间的对应关系,见表 1。

与定量指标相比,定性指标各个等级没有确定的数值区间,且分界线更加模糊(李博等,2014),在这里采用分级法对定性指标的模糊指标来进行评定。先按一定准则量化处理这些定性指标即把因素分为优、良、差、劣 4 个等级,相应的等级分值依次为 0.1(Ⅰ)、0.4(Ⅱ)、0.7(Ⅲ)、1.0(Ⅳ)。分值越大代表危险性越大。然后根据评价区实际情况,对相应指标根据等级分值进行量化处理。

5 应用实例

5.1 研究区概况

在本文中,应用构建的评价模型对河北蔚县境内单侯矿 6102N 工作面进行底板突水危险性评价,评价主要的目标煤层为主采煤层 6#煤。单侯井田所处的蔚县煤田,位于华北古板块主体—华北地台北缘,近东西向阴山—燕山构造带,与北东—北北东向太行山构造带的交接部位,构造格局的形成经历了复杂的地质演化历程,矿井断裂构造和褶皱发育强烈;根据单侯煤矿水文地质勘探资料和现场采掘工程证明,奥陶系下统的碳酸盐岩岩溶裂隙含水层为煤系基底,是煤层底板充水的主要直接充水含水层,岩溶裂隙十分发育,富水性强;煤层底板至基底灰岩顶界赋存一层泥岩隔水层,隔水层分布面积广,其厚度受基底古地形的控制,局部很薄,天然状态下,一般能起到隔水作用,但在开采扰动和底板含水层高压水作用下,易形成底板突水。综上所述,评价区底板突水受到底板含水层、底板隔水层、地质构造及开采扰动的影响和控制。

(1) 工作面底板含水层特征:研究区工作面煤系基底灰岩主要为奥陶系下统(O_1)的冶里组(O_{1y})、亮甲山组(O_{1l})。以灰色石灰岩、泥质条带灰岩、泥质灰岩为主。灰岩含水层厚度为 40~80 m,奥水含水层水压 0.7~1.1 MPa,单位涌水量根据抽水试验为 0.0048~0.008 L/(s·m),渗透系数为 3.24×10⁻⁶ cm/s,全层溶蚀现象岩溶率 11.2%~29.2%,该组灰岩岩溶较发育。

(2) 工作面底板隔水层特征:工作面底板隔水层岩性主要为泥岩、粉砂岩、细砂岩夹

砂砾岩薄层及煤层,分布整个井田。隔水层岩石裂隙发育较差,富水性弱,岩石抗压强度一般为 22~47.7 MPa,隔水层厚度在工作面范围内为 40~70 m。

(3) 工作面开采条件特征:在 6102N 工作面内开采煤层 6#煤在大部分区域厚度比较稳定,煤厚在 3.0~3.5 m 之间,地层产状较平缓,煤层倾角一般小于 15°,在 5°~15°之间,工作面斜长为 150 m,煤层开采深度为 360~390 m 之间。

(4) 工作面地质构造特征:单侯井田内断裂裂隙发育较差,同时断裂形成后破碎带经后期固结成岩,固结紧密,导水性能差。但井田内褶皱较发育,故给煤矿开采带来一定的难度。在 6102N 工作面内构造相对简单,有 3 条已查明性质断层,均为正断层,断层落差 0~3 m。对开采影响不大。

5.2 研究区指标权重的确定

首先我们确定准则层的权重值,相对于充水含水层、底板隔水层、地质构造、开采条件 4 个评价准则,由两个(或多个)领域专家打分的方法分别对各因素作两两比较判断,得到权重模糊互补判断矩阵 A 。设专家给出的权重模糊互补判断矩阵为 A :

$$A_1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0.5 & 0.5 & 0.4 & 0.7 \\ 0.5 & 0.5 & 0.4 & 0.5 \\ 0.6 & 0.6 & 0.5 & 0.7 \\ 0.3 & 0.5 & 0.3 & 0.5 \end{matrix} \end{matrix}$$

跟据式(1),计算的权重向量为:

表 1 影响煤层底板突水因素等级表
Table 1 Grading standard of influencing factors of coal floor water-irruption

影响因素		煤层底板突水危险性等级			
		I	II	III	IV
底板充水含水层	含水层水压(Mpa)	小	较小	较大	大
	单位涌水量(L/(sm))	0.01	1	5	10
	含水层渗透性(cm/s)	10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	10 ⁻²	1
	含水层厚度	薄	较薄	较厚	厚
底板隔水层阻水性	隔水层厚度	厚	较厚	较薄	薄
	岩体抗压性(MPa)	60	30	15	5
	岩体完整性指数	0.75	0.55	0.35	0.15
地质构造	构造性质	简单	较简单	较复杂	复杂
	裂隙率(%)	2	5	8	10
	岩溶陷落柱发育情况	少	较少	较多	多
	构造密度	小	较小	较大	大
开采扰动	煤层的采厚(m)	0.5	1.3	3.5	8m
	开采深度	浅	较浅	较深	深
	工作面长度	小	较小	较大	大
	煤层倾角(°)	5	15	25	45

$W_1 = [0.258 \quad 0.242 \quad 0.283 \quad 0.217]$ 。

判断矩阵 A 的特征矩阵计算结果为：

$$W_1^* = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.516 & 0.477 & 0.543 \\ 0.484 & 0.500 & 0.461 & 0.527 \\ 0.523 & 0.539 & 0.500 & 0.566 \\ 0.457 & 0.473 & 0.434 & 0.500 \end{bmatrix}$$

据式(2), A_1 与 W_1^* 的相容性指标为: $I(A_1, W_1^*) = 0.01 \leq 0.1$, 故可以认为模糊判断矩阵 A_1 是满意一致的, 因此其权重集 W_1 的分配是合理的。与

$$x = \begin{bmatrix} 0.545 & 0.182 & 0.727 & 1.273 \\ 0.001 & 0.002 & 0.250 & 1.249 \\ 1.283 \times 10^{-5} & 3.960 \times 10^{-6} & 3.960 \times 10^{-4} & 3.960 \times 10^{-2} \\ 1 & 0.182 & 0.727 & 1.273 \end{bmatrix}$$

5.3.2 关联系数计算

按照公式(4)进行关联系数的计算如下：

$$\xi = \begin{bmatrix} 0.845 & 0.916 & 0.731 & 0.609 \\ 0.999 & 0.889 & 0.613 & 0.442 \\ 1 & 1 & 0.980 & 0.333 \\ 0.708 & 0.879 & 0.879 & 0.708 \end{bmatrix}$$

5.3.3 灰色加权关联度的计算

结合 FAHP 法确定的含水层的权重, 按照公式(5)进行加权关联度的计算

$$r_1 = [0.3123 \quad 0.3189 \quad 0.1565 \quad 0.2123] \times \begin{bmatrix} 0.8448 & 0.9159 & 0.7314 & 0.6087 \\ 0.9995 & 0.8886 & 0.6134 & 0.4423 \\ 1.0000 & 0.9998 & 0.9804 & 0.3333 \\ 0.7076 & 0.8789 & 0.8789 & 0.7076 \end{bmatrix} = [0.8893 \quad 0.9124 \quad 0.7640 \quad 0.5335]$$

最大灰色加权关联度 $r_{1,max} = 0.9124$, 说明该工作面充水含水层危险等级为Ⅱ级。同理,

$$r_2 = [0.6254 \quad 0.8657 \quad 0.5506 \quad 0.3981], \text{最大灰色加权关联度 } r_{2,max} = 0.8657, \text{说明该工作面隔水层危险等级为Ⅱ级。}$$

$$r_3 = [0.7885 \quad 0.7559 \quad 0.5040 \quad 0.3852], \text{最大灰色加权关联度 } r_{3,max} = 0.7885, \text{说明该工作面地质构造危险等级为Ⅰ级。}$$

$$r_4 = [0.5716 \quad 0.7037 \quad 0.9020 \quad 0.5186], \text{最大灰色加权关联度 } r_{4,max} = 0.9020, \text{说明该工作面开采条件危险等级为Ⅲ级。}$$

5.3.4 工作面底板突水的危险性等级计算

如表 3 所示, 按照公式(5), 该工作面的灰色加权关联度为:

确定准则层权重的方法相同, 我们按照模糊层次分析法, 同时结合以求得的准则层的权重, 最后得出各指标的权重, 见表 2:

5.3 利用评价模型计算危险性等级

5.3.1 进行无量纲化处理

将工作面含水层的指标数值作为比较序列, 同时将表(1)中的等级标准作为参考数列。按照公式(3)对数据进行无量纲化处理如下:

$$r = [0.258 \quad 0.283 \quad 0.217 \quad 0.242] \times \begin{bmatrix} 0.8893 & 0.9124 & 0.7640 & 0.5335 \\ 0.7885 & 0.7559 & 0.5044 & 0.3852 \\ 0.5716 & 0.7037 & 0.9016 & 0.5186 \\ 0.6254 & 0.8647 & 0.5506 & 0.3981 \end{bmatrix} = [0.7279 \quad 0.8112 \quad 0.6687 \quad 0.4555]$$

综合评价结果最大关联度 $r_{max} = 0.8112$, 所以该工作面底板突水危险性等级属于Ⅱ级。该工作面在回采过程中未受水害威胁, 也未发生突水事故。与评价预测结果是相符的。造成该评价结果的原因主要是因为该工作面构造简单, 且已探查清楚。隔水层厚度较大, 含水层富水性及水压较小, 虽然开采扰动强度较大, 但是整体上突水危险性较小。

为了对比验证, 我们也选取了突水危险性较大的单侯矿东翼轨道大巷进行底板突水危险性评价, 该区域水压较大, 在 2.0~3.5 MPa 之间。构造发育强烈, NF12 断层穿越轨道巷。同时该轨道巷曾发生过突水事故, 突水量达到 1800m³/h。

利用 GRA—FAHP 评价模型计算该轨道巷灰色关联度为:

$$r = [0.258 \quad 0.283 \quad 0.217 \quad 0.242] \times \begin{bmatrix} 0.4315 & 0.7520 & 0.9245 & 0.8621 \\ 0.3722 & 0.5011 & 0.8883 & 0.9285 \\ 0.5236 & 0.8015 & 0.7226 & 0.6816 \\ 0.3891 & 0.5515 & 0.8237 & 0.8954 \end{bmatrix} = [0.4244 \quad 0.6432 \quad 0.8460 \quad 0.8575]$$

综合评价结果最大关联度 $r_{max} = 0.8575$, 所以该轨道大巷底板突水危险性等级属于Ⅳ级。属于突水危险性大的级别, 与实际情况相符。

表 2 指标权重计算结果

Table 2 Calculation results of the indicators weight

目标层	准则层	权重	指标层	权重	总权重	排序
底板突水危险性评价	底板充水含水层	0.258	含水层水压	0.3123	0.0805	5
			单位涌水量	0.3189	0.0822	4
			含水层渗透性	0.1565	0.0403	15
			含水层厚度	0.2123	0.0547	11
	底板隔水层阻水性	0.242	隔水层厚度	0.425	0.1028	1
			隔水层抗压性	0.315	0.0762	6
			隔水层完整性指数	0.26	0.0629	10
	地质构造	0.283	构造性质	0.3135	0.0887	2
			裂隙率	0.163	0.0461	13
			岩溶陷落柱发育情况	0.2987	0.0845	3
			构造密度	0.2248	0.0636	8
	开采扰动	0.217	煤层的采厚	0.2981	0.0646	7
			开采深度	0.2905	0.0630	9
			工作面长度	0.2176	0.0472	12
			煤层倾角	0.1938	0.0420	14

表 3 评价区准则层权重及关联度

Table 3 Weight and related degrees of the guidelines layer in evaluation area

准则层	权重	I	II	III	IV
底板充水含水层	0.258	0.8893	0.9124	0.7640	0.5335
地质构造	0.283	0.7885	0.7559	0.5044	0.3852
开采扰动	0.217	0.5716	0.7037	0.9016	0.5186
底板隔水层阻水性	0.242	0.6254	0.8647	0.5506	0.3981

6 结论

(1)根据煤层底板突水的影响因素特点,从充水含水层、地质构造、开采条件、底板隔水层四个方面出发,选取相应的指标,综合行业规范和前人研究成果建立了定量与定性指标为一体的煤层底板突水评价指标体系及等级划分标准。

(2)将模糊层次分析法(FAHP)应用到底板突水危险性评价中,利用 FAHP 法确定指标权重,为权重确定提供了一定的理论依据,而不再单单依赖于专家经验,减少了人为因素的影响,可为今后水害研究中权重的确定提供一定的借鉴。

(3)根据煤层底板突水是多因素决策并且各影响因素之间的关系是灰色关系的特点,引入 GRA 技术,同时结合 FAHP 方法,建立了 GRA 和 FAHP 耦合模型的煤层底板突水危险性的评价方法,该模型评价结果可以反映不同层次的危险性评价结果及危

险性排列顺序,可以为水害防治提供更为完善的有效信息。同时本文对河北单侯矿某工作面进行了评价,评价效果较好。为该问题的解决提供了一条新的途径,可为今后的相关的研究提供参考。

参 考 文 献 / References

曹庆奎,赵斐. 2011. 底板突水危险性评价专家系统及应用研究. 煤炭学报, 36(4):634 ~ 637.

邓聚龙. 1992. 灰色理论与方法. 北京:石油工业出版社.

高延法,章延平. 2009. 底板突水危险性评价专家系统及应用研究. 岩石力学与工程学报, 28(2):253 ~ 258.

管恩太. 2011. 突水系数与煤矿水害防治,煤炭工程,47(1):46 ~ 48.

胡巍,徐德金. 2013. 有限元强度折减法在底板突水风险评价中的应用. 煤炭学报, 38(1):28 ~ 31.

李博,郭俊,李恒凯,丁坚平,邱海涛,王晓谦. 2012. 基于模糊综合判别的岩溶地区煤层顶板涌(突)水危险性总体评价. 中国煤炭, 38(8):51 ~ 54.

李博,郭小铭,徐爽,刘卫坤,王泽会,李恒凯. 2014. 基于模糊评判—综合赋权的煤层底板突水危险性评价. 河南理工大学学报(自然科学版), 33(1):6 ~ 11.

兰继斌,徐扬,霍良安,刘家忠. 2006. 模糊层次分析法权重研究,系统工程理论与实践,26(9):107 ~ 112.

刘思峰,蔡华,杨英杰,曹颖. 2013. 灰色关联分析模型研究进展,系统工程理论与实践,33(8):2041 ~ 2046.

彭书凤,田盈. 2008. 模糊层次分析法在中小工业企业信用评价中的应用. 重庆工学院学报(自然科学), 22(1):131 ~ 133.

钱家忠,杜奎,赵卫东,周小平,马雷. 2012. 基于投影寻踪技术的矿井突水水源判别模型——以新庄孜煤矿为例. 地质论评,58(6):1175 ~ 1179.

王成绪,王红梅. 2004. 煤矿防治水理论与实践的思考. 煤田地质与勘探, 32(11):100 ~ 103.

王福建,俞传正. 2006. 灰色关联分析在道路交通事故中的应用. 中国安全科学学报, 16(2):17 ~ 21.

武强,张志龙马积福. 2007a. 煤层底板突水评价的新型实用方法 I——主控指标体系的建设. 煤炭学报, 32(1):42 ~ 47.

武强,张志龙,张生元,马积福. 2007b. 煤层底板突水评价的新型实用方法 II——脆弱性指数法. 煤炭学报,32(11):1121 ~ 1126.

尹尚先,武强. 2004. 煤层底板陷落柱突水模拟及机理分析. 岩石力学与工程学报, 23(15):2551 ~ 2556.

张吉军. 2000. 模糊层次分析法(FAHP). 模糊系统与数学,14(2):84 ~ 89.

Sun Y J, Xu Z M, Dong Q H, Liu S D, Gao R B, Jiang Y H. 2008. Forecasting water disaster for a coal mine under the Xiaolangdi reservoir. China Univ Mining & Technol,18(4):516 ~ 520.

Yao B H, Bai H B, Zhang B Y. 2012. Numerical simulation on the risk of roof water inrush in Wuyang Coal Mine. International Journal of Mining Science and Technology, 22(2):273 ~ 277.

Risk Assessment Model of Coal Floor Water-Irruption Based on GRA—FAHP

LI Bo

Key Laboratory of Karst Environment and Geohazard Prevention, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang, 550000

Abstract: Mine water disaster has always been a seriously hidden danger of the coal mine production. Therefore, accurately predicting and evaluating has important theoretical significance and practical value. In this paper, according to the characteristics that the relationship among various influencing factors of coal floor water-irruption is grey and nonlinear, establishing the coal floor water-irruption evaluation index system and grading standards integrating the quantitative and qualitative indicators. At the same time, combining grey relational analysis method (GRA) and fuzzy analytic hierarchy process (FAHP), coal floor water-irruption risk assessment model is set up, which can truly reflect the grey relationship and nonlinear relationship among influence factors. Then, applying it to evaluate water-irruption risk grading in a typical working face. This method can provide reference and basis for the research on predicting and evaluating the coal floor water-irruption in the future.

Keywords: coal floor water-irruption; quantitative and qualitative; grey relational analysis; fuzzy analytic hierarchy process; evaluation