

基于FDAHP与独立性权系数综合确权的煤层顶板隔水性能评价

范佳俊, 刘启蒙, 朱敬忠

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南
Email: 377205039@qq.com

收稿日期: 2021年5月27日; 录用日期: 2021年6月29日; 发布日期: 2021年7月7日

摘 要

在评价煤层顶板隔水性能时多采用单一主、客观赋权的传统多源信息融合方法, 为避免这些不足, 以布尔台煤矿4₂202工作面为例, 在充分考虑影响4煤顶板隔水性能各因素的基础上, 确定了粗中砂岩厚度、细砂岩厚度、粉砂岩厚度、脆塑性岩厚度比、岩芯采取率、隔水层厚度和隔水层组岩性组合指数为影响其隔水性能的7大主控因素; 采用模糊德尔菲层次分析法(FDAHP)和独立性权系数法分别计算各主控因素的主、客观权重, 归一化得到综合权重; 利用Arcgis软件建立了工作面顶板隔水性能分区图。结果表明, 区内西北向的隔水性能较强, 与采掘工作面倾斜方向拟合效果明显, 4₂202工作面煤层顶板岩层阻隔水性能在中等强度到弱之间, 优于临近的4₂201工作面。

关键词

煤层顶板, FDAHP, 独立性权系数法, 隔水性, Arcgis

Evaluation of Coal Seam Roof Water-Resistance Performance Based on FDAHP and Independent Weight Coefficient Method

Jiajun Fan, Qimeng Liu, Jingzhong Zhu

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui
Email: 377205039@qq.com

Received: May 27th, 2021; accepted: Jun. 29th, 2021; published: Jul. 7th, 2021

文章引用: 范佳俊, 刘启蒙, 朱敬忠. 基于 FDAHP 与独立性权系数综合确权的煤层顶板隔水性能评价[J]. 矿山工程, 2021, 9(3): 233-243. DOI: 10.12677/me.2021.93036

Abstract

Traditional multi-source information fusion methods with single subjective or objective weighting are often used when evaluating the water-resistance performance of coal seam roof. To avoid these inadequacies, 7 major controlling factors including the coarse and medium sandstone thickness, fine sandstone thickness, siltstone thickness, brittle-plastic rock thickness ratio, core monitor rate, waterproof layer thickness and lithology combination index of water-resisting layer group were selected based on the fully consideration of various factors affecting the No. 4 coal roof water-resistance. This paper calculated the subjective and objective weights of each main controlling factor respectively by the FDAHP and independent weight coefficient methods, and obtained the comprehensive weight by the normalization; using Arcgis to establish a partition map of the water-resistance performance of coal seam roof. The results show that the water resistance in the northwest direction of the area is strong, obvious fitting effect of the inclination direction of the mining face, the water-resistance performance of coal seam roof in 4₂202 working face is between medium strength and weak, which is better than that of the 4₂201 working face.

Keywords

Coal Roof, FDAHP, Independent Weight Coefficient Method, Water-Resistance, Arcgis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,在煤层开采过程中顶板水害安全问题屡见不鲜,如何准确的评价煤层顶板的隔水性能,对于实际生产具有重要的理论价值和实际意义[1]。煤层顶板的隔水性能很大程度取决于区域内煤层含水层的富水性和岩性组合结构,通常表现为不连续性和各向异性的特点,因此对顶板隔水性能的分区需要综合考虑多方面的因素,需将多源的信息在一个系统内进行综合的处理和分析[2]。目前国内外学者在这方面进行了大量且有成效的研究[3] [4] [5] [6],其中武强院士[4]针对煤层顶板涌水危险性评价方面提出的“三图-双预测法”,将工作面顶板涌水危险性分区图和回采过程中工作面涌水量模拟预测结合形成了一整套的系统思路,开创了国内在该领域研究的先河。

对煤层顶板隔水性能的分区评价是一个综合分析各种地学信息的过程。一般来说,考虑到的因素越多,最终得到的评价结果与事实越吻合,但有些因素之间存在复杂的线性关系可能会重复赋权,使得无法准确客观的确定各主控因素的权重,最终影响评价结果。以往针对顶板隔水性的研究大多采用单一的主观或客观的赋权方法,主观赋权方法具有一定的局限性,即专家的主观认知忽视了某一客观事实,导致不能得出理想的评价效果;客观赋权方法重视各主控因素数据之间的内部变化,其可能得到评价结果与事实相悖[7]。基于此,本文在分析影响工作面顶板隔水性能诸多因素的基础上,主观赋权采用将模糊评价方法,群体决策的德尔菲方法和传统的层次分析法三种有机结合的模糊德尔菲层次分析法(FDAHP)[8] [9]。独立性权系数法来客观赋权,能充分反映主控因素之间共线性强弱、操作简单[9]。利用主客观权重地有机结合能得出综合权重,最终通过分析做出顶板砂岩隔水性的定性评价。

2. 研究区概况

布尔台井田具体位于华北地区鄂尔多斯区向斜东胜隆起区中东部,为南西倾向的单斜构造。井田内

未发现陷落柱构造，亦无岩浆岩侵入，开采中见到的多是规模较小的中小型正断层和小型断层，基本没有水文地质意义。4₂202 工作面在首采面 4₂201 下方，与上覆 22 煤层间距 65~87 m，2⁻² 煤巷道掘进时发生过 E91 钻孔突水事故，最大突水量为 70.2 m³/h，受到重复采动的影响，在回采 4₂202 工作面时，因上覆为 2⁻² 煤采空区，工作面开采塌陷后导水裂隙带可能导通 2⁻² 煤采空区积水和煤系地层延安组裂隙-孔隙承压含水层，造成工作面涌水量增大，严重时甚至可导致工作面被淹，因此对 4₂202 工作面顶板的隔水性进行分析十分必要。

3. 主控因素的确定及量化

影响工作面煤层顶板富水性的因素有很多，通过对研究区和相邻工作面的地质条件、水文地质条件及相关资料分析，本文从水层结构、岩层完整性和隔水岩性 3 方面综合考虑，构建层次结构模型，图 1。

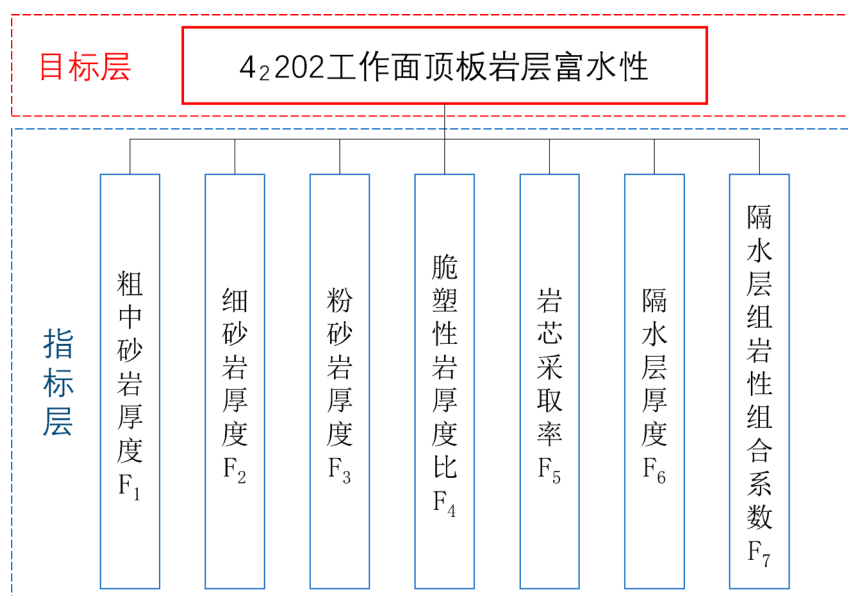


Figure 1. Water-rich hierarchical structure model of roof rock formation
图 1. 顶板岩层富水性层次结构模型

3.1. 含水层结构因素

4₂202 工作面煤层顶板的主要储水层为砂岩含水层，在其他因素一致的情况下，储水能力与含水层厚度呈正比，即含水层越厚，煤层顶板隔水性能越弱；4₂202 工作面顶板煤系砂岩主要含水岩性为粗砂岩和中砂岩，细砂岩和粉砂岩次之，统计不同岩性岩层的厚度数据，分别建立粗、中砂岩，细砂岩和粉砂岩厚度的专题图，图 2。

3.2. 岩层完整性因素

岩石质量指标(RQD 值)可以综合反映岩体强度和岩体破碎程度，是反应岩体完整性的最直观的指标，但受实际限制 RQD 很难获取，具有较大的局限性，可选用与岩体结构破碎程度有关的岩芯采取率，在钻孔取芯质量得到保证时，岩芯采取率越低，岩体完整性越差，砂岩裂隙越多，储水空间越大，富水性越强；反之，岩芯采取率越高，储水空间越小，富水性越弱。同时由于顶板岩层的不均匀性，在受到应力破坏时，脆性岩和塑性岩的透水性能有明显差异，所以可用脆塑性岩厚度比来定性判断不同位置岩层隔

水性能的差异，比值越大，岩体越破碎，富水性越好。基于此分别建立岩芯采取率和脆塑性岩厚度比专题图，如图 2。

3.3. 隔水层结构因素

隔水层因素对顶板岩层的阻水能力主要体现在厚度和岩性两个方面，隔水层厚度可以延长承压水对裂隙侵蚀扩展的时间，使得工作面的推进发生在导水裂隙到达空顶区之前，此外厚度越大还能不断消耗承压水以克服岩体的抗拉强大和途径阻力以及扩展裂隙的水头。隔水层结构不同，其整体隔水性能也有所不同，4₂202 工作面顶板主要隔水岩性有泥岩和砂质泥岩，岩石力学性质相近的岩层组成的隔水能力比岩石力学性质悬殊较大的岩层组成的隔水能力强，在一定的底板厚度下，各种岩性组合成的底板隔水能力可用岩性组合指数来表示，指数越大，岩层的隔水性能越差。隔水层厚度和隔水层岩性组合指数专题图，如图 2。

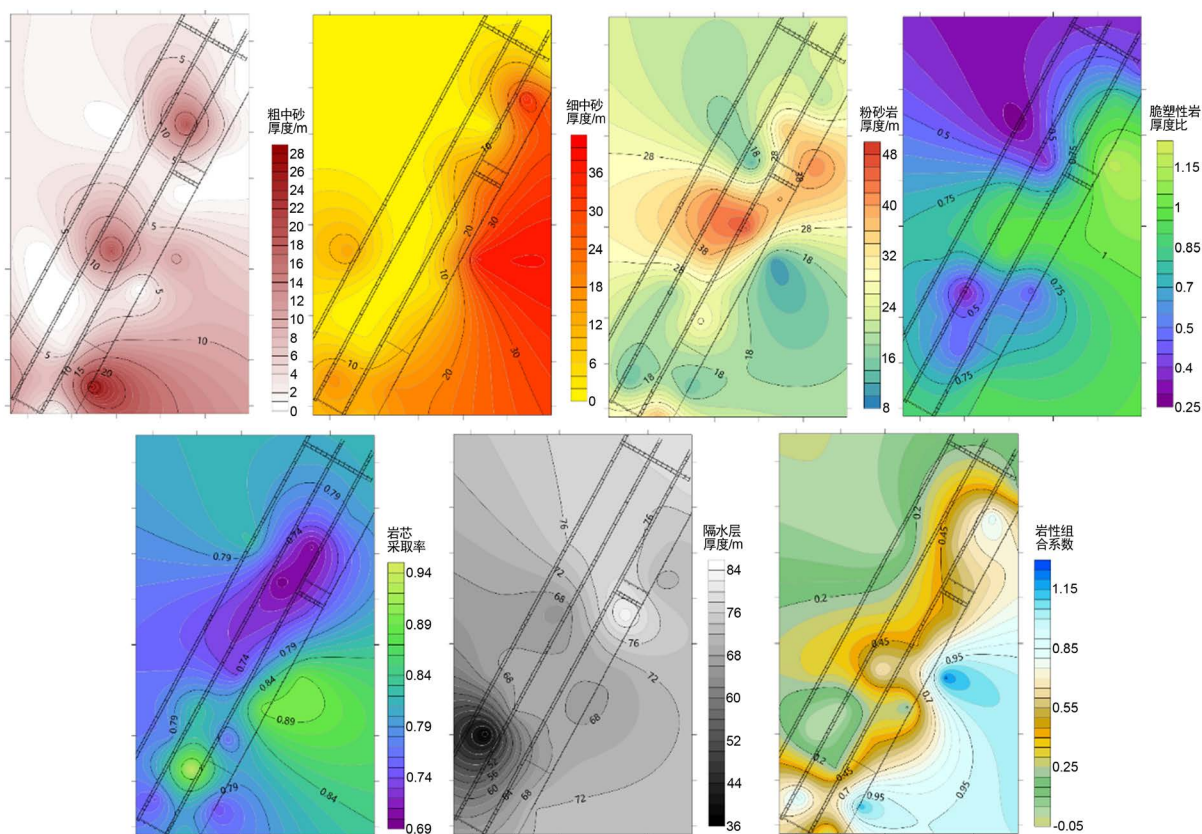


Figure 2. Thematic map of each main control factor
图 2. 各主控因素专题图

4. 主、客观权重的确定

4.1. 基于 FDAHP 的主观赋权

4.1.1. 建立比较判断矩阵

通过专家调查法(传统德尔菲法)，征集各领域专家及科研工作者的意见，按照 1~9 级标度法，对每个主观因素的影响高低进行相对重要性评价，见表 1。

Table 1. Evaluation value of the importance of each main control factor to the water richness of coal roof
表 1. 各主控因素对煤层顶板富水性重要性的评价值

专家编号	评价指标(F_i)						
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7
1 (P1)	6	5	4	4	7	8	8
2 (P2)	8	4	4	6	6	8	7
3 (P3)	8	6	5	5	5	6	7
4 (P4)	8	4	4	6	6	8	4
5 (P5)	6	4	4	6	6	6	5
6 (P6)	7	5	5	6	5	6	5
7 (P7)	6	6	6	7	5	8	7
8 (P8)	4	4	4	6	5	4	5

根据表 1 中各主控因素对煤层顶板富水性所起作用大小进行相对重要性评价, 按式 1 建立两两比较判断矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & a_{34} & a_{35} & a_{36} & a_{37} \\ 1/a_{14} & 1/a_{24} & 1/a_{34} & 1 & a_{45} & a_{46} & a_{47} \\ 1/a_{15} & 1/a_{25} & 1/a_{35} & 1/a_{45} & 1 & a_{56} & a_{57} \\ 1/a_{16} & 1/a_{26} & 1/a_{36} & 1/a_{46} & 1/a_{56} & 1 & a_{67} \\ 1/a_{17} & 1/a_{27} & 1/a_{37} & 1/a_{47} & 1/a_{57} & 1/a_{67} & 1 \end{bmatrix}$$

其中, a_{ij} 为主控因素 F_i 和 F_j 的相对重要程度的判断 $a_{ij} = \frac{C_i}{C_j}$, C_i, C_j 分别为某一专家对主控因素 F_i 和 F_j 的赋值, 对于 8 位专家对 7 项主控因素的评估, 建立 8 个 7×7 的两两比较判断矩阵, 即

$$A_{p2} = \begin{bmatrix} 1.000 & 2.000 & 2.000 & 1.333 & 1.333 & 1.000 & 1.143 \\ 0.500 & 1.000 & 1.000 & 0.667 & 0.667 & 0.500 & 0.571 \\ 0.500 & 1.000 & 1.000 & 0.667 & 0.667 & 0.500 & 0.571 \\ 0.750 & 1.500 & 1.500 & 1.000 & 1.000 & 0.750 & 0.857 \\ 0.750 & 1.500 & 1.500 & 1.000 & 1.000 & 0.750 & 0.857 \\ 1.000 & 2.000 & 2.000 & 1.333 & 1.333 & 1.000 & 1.143 \\ 0.875 & 1.750 & 1.750 & 1.167 & 1.167 & 0.875 & 1.000 \end{bmatrix}$$

$$A_{p3} = \begin{bmatrix} 1.000 & 1.333 & 1.600 & 1.600 & 1.600 & 1.333 & 1.143 \\ 0.750 & 1.000 & 1.200 & 1.200 & 1.200 & 1.000 & 0.857 \\ 0.625 & 0.833 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.833 & 0.714 \\ 0.625 & 0.833 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.833 & 0.714 \\ 0.625 & 0.833 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.833 & 0.714 \\ 0.750 & 1.000 & 1.200 & 1.200 & 1.200 & 1.000 & 0.857 \\ 0.875 & 1.167 & 1.400 & 1.400 & 1.400 & 1.167 & 1.000 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 A_{p_4} &= \begin{bmatrix} 1.000 & 2.000 & 2.000 & 1.333 & 1.333 & 1.000 & 2.000 \\ 0.500 & 1.000 & 1.000 & 0.667 & 0.667 & 0.500 & 1.000 \\ 0.500 & 1.000 & 1.000 & 0.667 & 0.667 & 0.500 & 1.000 \\ 0.750 & 1.500 & 1.500 & 1.000 & 1.000 & 0.750 & 1.500 \\ 0.750 & 1.500 & 1.500 & 1.000 & 1.000 & 0.750 & 1.500 \\ 1.000 & 2.000 & 2.000 & 1.333 & 1.333 & 1.000 & 2.000 \\ 0.500 & 1.000 & 1.000 & 0.667 & 0.667 & 0.500 & 1.000 \end{bmatrix} \\
 A_{p_5} &= \begin{bmatrix} 1.000 & 1.500 & 1.500 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.200 \\ 0.667 & 1.000 & 1.000 & 0.667 & 0.667 & 0.667 & 0.800 \\ 0.667 & 1.000 & 1.000 & 0.667 & 0.667 & 0.667 & 0.800 \\ 1.000 & 1.500 & 1.500 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.200 \\ 1.000 & 1.500 & 1.500 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.200 \\ 1.000 & 1.500 & 1.500 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.200 \\ 0.833 & 1.125 & 1.125 & 0.833 & 0.833 & 0.833 & 1.000 \end{bmatrix} \\
 A_{p_6} &= \begin{bmatrix} 1.000 & 1.400 & 1.400 & 1.167 & 1.400 & 1.167 & 1.400 \\ 0.714 & 1.000 & 1.000 & 0.833 & 1.000 & 0.833 & 1.000 \\ 0.714 & 1.000 & 1.000 & 0.833 & 1.000 & 0.833 & 1.000 \\ 0.857 & 1.200 & 1.200 & 1.000 & 1.200 & 1.000 & 1.200 \\ 0.714 & 1.000 & 1.000 & 0.833 & 1.000 & 0.833 & 1.000 \\ 0.857 & 1.200 & 1.200 & 1.000 & 1.200 & 1.000 & 1.200 \\ 0.714 & 1.000 & 1.000 & 0.833 & 1.000 & 0.833 & 1.000 \end{bmatrix} \\
 A_{p_7} &= \begin{bmatrix} 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.857 & 1.200 & 0.750 & 0.857 \\ 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.857 & 1.200 & 0.750 & 0.857 \\ 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.857 & 1.200 & 0.750 & 0.857 \\ 1.167 & 1.167 & 1.167 & 1.000 & 1.400 & 0.875 & 1.000 \\ 0.833 & 0.833 & 0.833 & 0.714 & 1.000 & 0.625 & 0.714 \\ 1.333 & 1.333 & 1.333 & 1.143 & 1.600 & 1.000 & 1.143 \\ 1.167 & 1.167 & 1.167 & 1.000 & 1.400 & 0.875 & 1.000 \end{bmatrix} \\
 A_{p_8} &= \begin{bmatrix} 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.667 & 0.800 & 1.000 & 0.800 \\ 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.667 & 0.800 & 1.000 & 0.800 \\ 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.667 & 0.800 & 1.000 & 0.800 \\ 1.500 & 1.500 & 1.500 & 1.000 & 1.200 & 1.500 & 1.200 \\ 1.125 & 1.125 & 1.125 & 0.833 & 1.000 & 1.125 & 1.000 \\ 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.667 & 0.800 & 1.000 & 0.800 \\ 1.125 & 1.125 & 1.125 & 0.833 & 1.000 & 1.125 & 1.000 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

4.1.2. 建立群体模糊判断矩阵

用三角模糊数表示的群体两两判断矩阵如下:

$$B = (b_{ij}) \tag{1}$$

式中, b_{ij} 为三角模糊数, $b_{ij} = (\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij})$, $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}$ 分别为 F_i 和 F_j 两个主控因素相对重要值的下限值, 最可能值和上限值, $\alpha_{ij} \leq \beta_{ij} \leq \gamma_{ij}$, 分别由下式确定:

$$\begin{cases} \alpha_{ij} = \min(a_{ijk}) \\ \beta_{ij} = \left(\prod_{k=1}^m a_{ijk}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (k=1, \dots, m) \\ \gamma_{ij} = \max(a_{ijk}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, a_{ijk} 为第 k 个决策专家对 F_i 和 F_j 两个主控因素相对重要程度的判断, m 为专家总数。

由此构造该专家组的群体判断矩阵。

$$\begin{bmatrix} (1.000 & 1.000 & 1.000) & (1.000 & 1.384 & 2.000) & (1.000 & 1.456 & 2.000) & (0.667 & 1.140 & 1.600) & (0.800 & 1.160 & 1.600) & (0.750 & 0.983 & 1.333) & (0.750 & 1.107 & 2.000) \\ (0.500 & 0.723 & 1.000) & (1.000 & 1.000 & 1.000) & (1.000 & 1.052 & 1.250) & (0.667 & 0.824 & 1.250) & (0.667 & 0.838 & 1.200) & (0.500 & 0.711 & 1.000) & (0.571 & 0.800 & 1.000) \\ (0.500 & 0.687 & 1.000) & (0.800 & 0.951 & 1.000) & (1.000 & 1.000 & 1.000) & (0.667 & 0.783 & 1.000) & (0.571 & 0.797 & 1.200) & (0.500 & 0.676 & 1.000) & (0.500 & 0.760 & 1.000) \\ (0.625 & 0.878 & 1.500) & (0.800 & 1.214 & 1.500) & (1.000 & 1.277 & 1.500) & (1.000 & 1.000 & 1.000) & (0.571 & 1.018 & 1.400) & (0.500 & 0.863 & 1.500) & (0.500 & 0.971 & 1.500) \\ (0.625 & 0.851 & 1.167) & (0.833 & 1.177 & 1.500) & (0.833 & 1.238 & 1.750) & (0.714 & 0.982 & 1.750) & (1.000 & 1.000 & 1.000) & (0.625 & 0.837 & 1.125) & (0.714 & 0.954 & 1.500) \\ (0.750 & 1.017 & 1.333) & (1.000 & 1.407 & 2.000) & (1.000 & 1.480 & 2.000) & (0.667 & 1.159 & 2.000) & (0.800 & 1.179 & 1.600) & (1.000 & 1.000 & 1.000) & (0.800 & 1.126 & 2.000) \\ (0.500 & 0.891 & 1.333) & (1.000 & 1.217 & 1.750) & (1.000 & 1.281 & 2.000) & (0.667 & 1.029 & 2.000) & (0.667 & 1.048 & 1.400) & (0.500 & 0.877 & 1.167) & (1.000 & 1.000 & 1.000) \end{bmatrix}$$

4.1.3. 确定群体模糊权重向量

根据群体模糊判断矩阵, 由式(3)计算评价指标 F_i 的群体模糊权重向量 r_i 和模糊权重向量 w_i

$$\begin{cases} r_i = \sqrt[n]{(a_{i1} \otimes a_{i2} \otimes \dots \otimes a_{in})} \\ w_i = r_i \otimes (r_1 \oplus r_2 \oplus \dots \oplus r_n)^{-1} \\ w_i = (w_i^L, w_i^M, w_i^U) \end{cases} \quad (3)$$

其中, w_i^L, w_i^M, w_i^U 分别为模糊权重向量的最小值, 中间值和最大值。

上述运算用到的三角模糊数运算法则为:

$$\begin{cases} a \otimes b = (a_1 \times b_1, a_2 \times b_2, a_3 \times b_3) \\ a \oplus b = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3) \\ b^{-1} = \left(\frac{1}{b_3}, \frac{1}{b_2}, \frac{1}{b_1}\right) \end{cases} \quad (4)$$

计算的群体的模糊权重向量分别为:

$$\begin{cases} w_1 = (0.065, 0.122, 0.226) \\ w_2 = (0.096, 0.168, 0.284) \\ w_3 = (0.102, 0.177, 0.306) \\ w_4 = (0.075, 0.139, 0.280) \\ w_5 = (0.075, 0.142, 0.254) \\ w_6 = (0.063, 0.120, 0.220) \\ w_7 = (0.070, 0.133, 0.263) \end{cases}$$

4.1.4. 权重决策分析

利用几何平均法和归一法由式(5)获得各评价指标的最终决策权重, 即 7 个主控因素对 4 煤顶板突水影响的权重值分别为 0.122, 0.166, 0.177, 0.143, 0.139, 0.119, 0.135。

$$W_i = \frac{(w_i^L w_i^M w_i^U)^{\frac{1}{3}}}{\sum_i (w_i^L w_i^M w_i^U)^{\frac{1}{3}}}, i = (1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

4.2. 基于独立性权系数法的客观赋值

独立性权系数法可以分析各主控因素数据间的共线性强弱，避免因忽视指标间的内部联系而对某些主控因素赋权过重，设有指标项 X_1, X_2, \dots, X_m ，复相关系数 R 表示某一指标 X_j 与其他指标之间的共线性关系，若指标 X_j 越容易由其他指标线性组合表示出，则 R 越大，则表明该指标重复信息越多，因此在现实考虑中应过滤掉重复的信息给予更小的权重 D ，通常用负相关系数 R 的倒数表示。其中

$$\begin{cases} R_i = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(\tilde{X} - \bar{X})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2(\tilde{X} - \bar{X})^2}} \\ D_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{R_i}} \end{cases} \quad i = (1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

式中， \tilde{X} 为 X 中除去 X_i 的剩余矩阵； $\bar{X} = \text{mean}(X)$ 。

根据上述公式原理，对所选 7 大主控因素的复相关系数计算结果如表 2 所示，然后对复相关系数的倒数进行归一化处理，即可得各主控因素的客观权重 D_i 。

Table 2. The objective weight of each main control factor

表 2. 各主控因素的客观权重

主控因素($i = 1 \sim 8$)	复相关系数 R_i	复相关系数倒数 $1/R_i$	客观权重 D_i
粗、中砂岩厚度	0.991	1.008	0.127
细砂岩厚度	0.776	1.288	0.163
粉砂岩厚度	0.797	1.254	0.158
脆塑性岩厚度比	0.883	1.113	0.141
平均岩芯采取率	0.860	1.162	0.147
隔水层厚度	1.000	1.000	0.121
隔水层岩性组合系数	0.921	1.086	0.140

5. 数学模型的建立

5.1. 数据归一化处理

因为各主控因素的量纲不同，数据的增减对模型评价结果的影响也不同，为了使数据便于统计且具有更直观的可比性，因此需要消除量纲，进行归一化处理，将不同类别的数据归于同一类，方便后面的分析，本文采用最小 - 最大标准化，将 F_1, F_2, F_3, F_4 和 F_7 指标按负相关的归一化公式(7a)处理，其余各因素按正相关的归一化公式(7b)处理。建立各主控因素归一化的专题图，图 3。

$$x_i^* = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (7a)$$

$$x_i^* = \frac{x_i - x_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (7b)$$

x_i ——评价指标数据归一化前的值； x_i^* ——评价指标数据归一化后的值； x_{\min} ——某评价指标数据中的最小值； x_{\max} ——某评价指标数据中的最大值。

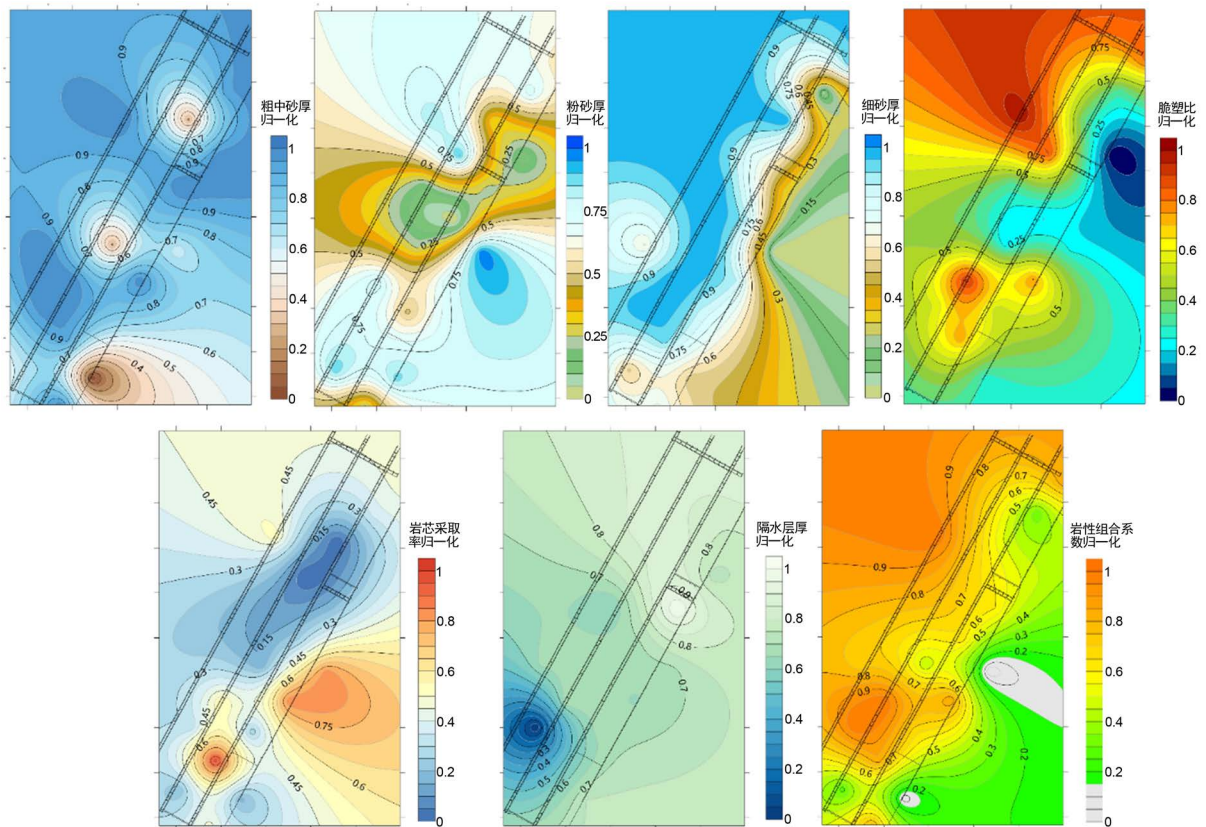


Figure 3. The normalized thematic map of each main control factor
图 3. 各主控因素归一化专题图

5.2. 隔水性能指数数学模型的建立

各主控因素原始数据归一化处理后，将 FDAHP 确定的主客观权重和独立性权系数确定的客观权重进行组合并归一化赋权，式(8)得到其综合权重 C_i ；并利用 Arcgis 软件进行信息融合叠加处理，建立 4₂202 工作面顶板隔水性能数学模型：如式(9)所示。它能反映出某一位置上由各主控因素共同作用而表现出来的隔水性能的大小，表征着该处煤层顶板岩层的隔水性能强弱，隔水性能指数值越大，隔水性能越强。

$$C_i = \frac{W_i \cdot D_i}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot D_i} \quad (8)$$

式中： n 为主控因素个数， W_i 为第 i 个主控因素的主观权重， D_i 为第 i 个主观因素的客观权重。

$$\begin{aligned} C_i &= \sum_{i=1}^n C_i F_i(x, y) \\ &= 0.107F_1(x, y) + 0.187F_2(x, y) + 0.194F_3(x, y) + 0.140F_4(x, y) \\ &\quad + 0.141F_5(x, y) + 0.100F_6(x, y) + 0.131F_7(x, y) \end{aligned} \quad (9)$$

式中： C_i ——隔水性能指数； C_i ——第 i 个主控因素的综合权重值； $F_i(x, y)$ ——第 i 个主控因素的归一化值， (x, y) 为地理坐标。

5.3. 工作面顶板隔水性能分区与评价

根据上述 4-2 煤顶板隔水性能指数评价模型，通过对叠加后各个独立单元的隔水性能指数进行统计

分析, 运用 Natural Breaks (Jenks) (自然间断点分级法) 对其进行 4 级分级, 并结合井下各涌(突)水点的实际涌水量进行调整、校正, 综合确定了各级阈值分别为 0.4, 0.6, 0.8。并对研究区进行分区, 如表 3, 隔水性能指数 C_i 越大, 煤层顶板岩层隔水能力越强。得到 4-2 煤顶板隔水性能分区图, 如图 4。

Table 3. The water-impermeability partition table of the roof

表 3. 顶板隔水性分区表

隔水性能指数	隔水性分区
$C_i > 0.8$	强隔水区
$0.6 < C_i \leq 0.8$	中等隔水区
$0.4 < C_i \leq 0.6$	较弱隔水区
$C_i \leq 0.4$	较弱隔水区

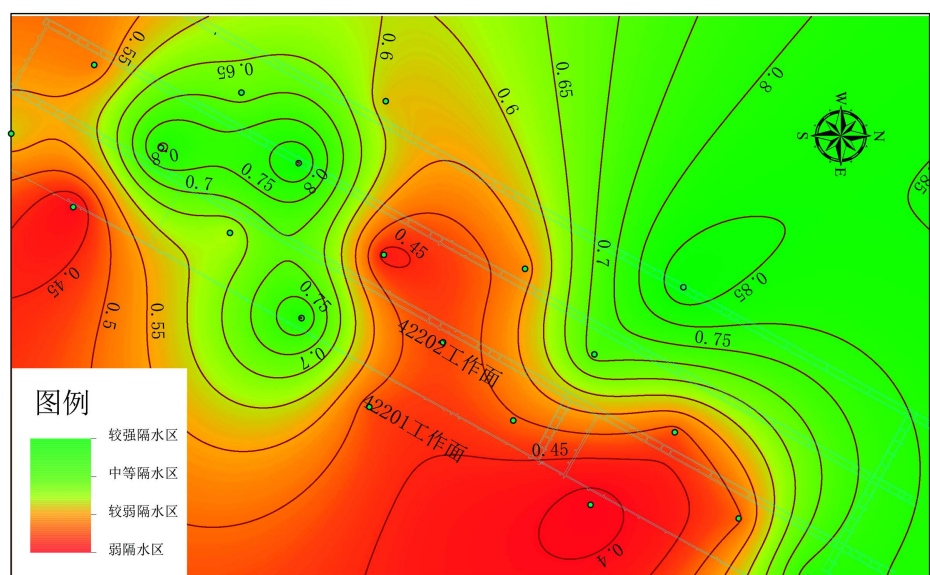


Figure 4. The partition diagram of the roof water-proof performance

图 4. 顶板隔水性能分区图

6. 结论

1) 区内西北向的隔水性能较强, 与采掘工作面倾斜方向拟合效果明显, 4₂202 工作面煤层底板岩层阻隔水性能在中等强度到弱之间, 优于旁边的 4₂201 工作面。

2) 在缺少足够的钻孔单位涌水量资料情况下, 脆塑性岩厚度比, 隔水层岩性组合系数, 岩芯采取率等可作为评价工作面顶板隔水性能的主控指标

3) 采用 FDAHP 与独立行权系数法综合确权的方法, 可应用于该区工作面顶板隔水性能的评价, 为矿井水害的防治提供一定的理论基础。

基金项目

校研究生创新基金项目(2020CX2004)。

参考文献

- [1] 张伟杰, 李术才, 魏久传, 等. 岩溶泉域煤矿奥灰顶部相对隔水性及水文地质特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 349-357.
- [2] 王洋. 煤矿充水含水层富水规律与分区评价及疏降水量动态预测[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2017.
- [3] 石守桥, 魏久传, 尹会永, 等. 济三煤矿煤层顶板砂岩含水层富水性预测[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(5): 100-104.
- [4] 武强, 樊振丽, 刘守强, 等. 基于 GIS 的信息融合型含水层富水性评价方法——富水性指数法[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1124-1128.
- [5] 陈康, 薛国强, 陈卫营, 等. 一种煤层顶板富水性快速评价方法[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(4): 1752-1757.
- [6] 贾鹏宙. 煤矿床含水层富水性定量评价方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(2): 168-172.
- [7] 李刚, 李建平, 孙晓蕾, 等. 主客观权重的组合方式及其合理性研究[J]. 管理评论, 2017, 29(12): 17-26+61.
- [8] 蔡海兵, 程桦. 基于 FDAHP 理论的深部岩体分级方法[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(6): 43-49.
- [9] 邱梅, 施龙青, 滕超, 等. 基于灰色关联-FDAHP 法与物探成果相结合的奥灰富水性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 3203-3213.