

您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

马进功.基于变权模糊理论的残煤连采可行性评价研究[J].煤炭科学技术,2021,49(8):30-37. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.08.003
MA Jingong.Study on feasibility evaluation of continuous mining of residual coal based on variable weight fuzzy theory [J].Coal Science and Technology,2021,49(8):30-37. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.08.003

移动扫码阅读

基于变权模糊理论的残煤连采可行性评价研究

马 进 功[1,2]
(1.中国煤炭科工集团 太原研究院有限公司,山西 太原 030006;2.山西天地煤机装备有限公司,山西 太原 030006)

摘 要:为解决目前采用连续采煤机开采残采煤区时只能定性确定可行性的问题,基于国内短壁连采现有工艺和装备,充分考虑残采煤区所处的开采和地质条件,探索和分析了残采煤区连采的可行性数学评价方法和准则。根据模糊数学提出了层次分析法、变权理论的综合评价方法,从地质构造条件、煤层赋存、开采安全要素、块段不规则要素等 4 个方面内容进行系统分析,构建了以残采煤区和连采技术特点为基础的可行性评价指标体系(19 个因素),并参照国内煤炭行业规范标准或者专家打分法对各个因素进行量化处理,得到了不同指标的合理取值范围,建立了指标评判矩阵并确定指标初始权重。根据实际情况调整初始权重,调高“差”因子权重,同时调低“好”因子权重,使之更符合实际,最终考虑最大评判指标的贡献,采用最大隶属度作为评定准则,确定残采煤区连采可行性。通过盛平煤矿、张家峁煤矿、南关煤矿 3 个案例评价验证了评价方法合理性和准确性。研究表明:此方法基于煤矿现场提出残采煤区可行性影响因素,赋予指标的权重合理、计算方法得当,是一种有效的定量判定残采煤区是否适用连采技术的数学评价方法,为小矿井先期决策引进连采技术具有重要的参考意义。

关键词:残采煤区;连采可行性;模糊数学;层次分析法;变权理论;定量判定
中图分类号:TD823 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2021)08-0030-08

Study on feasibility evaluation of continuous mining of residual coal based on variable weight fuzzy theory

MA Jingong[1,2]
(1.*China Coal Technology & Engineering Group Taiyuan Research Institute*, *Taiyuan* 030006, *China*;
2.*Shanxi Tiandi Coal Mining Machinery Co.*, *Ltd.*, *Taiyuan* 030006, *China*)

Abstract: In order to solve the problem that can only be qualitatively determined when the continuous machine is used in residual mining areas, based on the existing domestic short-wall continuous mining technology and continuous mining equipment, on the basis of fully considering the residual mining areas of mining and geological conditions, the exploration and analysis of the residual coal mining areas adopt the feasibility of the extraction of mathematics evaluation method and criteria. According to fuzzy mathematics, a comprehensive evaluation method of analytic hierarchy process and variable weight theory was proposed. The system analyzed the four aspects of geological structure conditions, coal seam occurrence, mining safety factors, and block irregular factors. A feasibility evaluation index system (19 factors) was constructed based on the characteristics of residual coal mining areas and continuous mining technology, and quantified each factor with reference to the domestic coal industry norms and standards or expert scoring method to obtain different indicators. In this way, the reasonable value ranges of different indicators were obtained, the indicator evaluation matrix was established and the initial weight of the indicators was determined. The initial weight was adjusted according to the actual situation, the weight of “poor” factor was increased, and the weight of “good” factor was reduced so as to make it more realistic. Finally, the contribution of the maximum evaluation index was taken into consideration, and the maximum membership degree was used as the evaluation criterion to determine the feasibility of continuous mining in residual coal area. The rationality and accuracy of the evaluation method were verified through three different case evaluations of Shengping Coal Mine, Zhangjiamao Coal Mine and Nanguan Coal Mine. The study shows that this method is an effective mathematical eval-

收稿日期:2020-12-25;**责任编辑**:朱恩光
基金项目:山西省面上青年基金项目资助(201601D202051);山西天地煤机装备有限公司面上项目资助(M2021-MS03,M2018-18)
作者简介:马进功(1986—),男,山西汾阳人,副研究员,硕士。E-mail:majg100@126.com

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

uation method for quantitatively determining the suitability of continuous mining technology in residual coal areas based on the feasibility influencing factors of residual coal areas proposed by the coal mine site, with reasonable weight given to indexes and appropriate calculation method, and it has important reference significance for small mines to make decisions on introducing continuous mining technology.

Key words: residual coal mining area; feasibility of continuous mining; fuzzymathematics; analytic hierarchy process; variable weight theory; quantitative determination

0 前 言

2020 年我国煤炭产量为 39 亿 t,同比增长 1.4%,其中晋陕蒙三省(区)煤炭产量 27.9 亿 t,占全国煤炭产量的 71.5%[1]。这些产煤大省为彻底解决小煤窑私挖滥采与产能过剩的局面,正在经历或已完成煤炭企业兼并重组[2-3],仅 2016 年便有2 044 个煤矿退出产能,数字背后是储量巨大的残煤资源。根据相关文献[5]:1949 年至 2014 年间,我国各类煤矿形成的残留煤炭资源总量为 1 286.1 亿 t,平均可采储量 403 亿 t,因此,残采煤区回采有着巨大的市场潜力。实践已经证明,连续采煤机短壁机械化开采技术具有掘采合一、运行灵活、投资少、成本低、来压预警性强、设备稳定性高、通风容易等优势,是解决残采煤区开采的重要技术[6]。

目前,连续采煤机对残采煤区开采的可采性评价,仍然主要采用工程类比确定,数学模糊评价方法为其提供了一种新的评价途径。模糊数学评价方法在煤矿方面的应用较为广泛,如陈凡等[7]提出一种基于区域划分与主控因素辨识的冲击危险性评价方法;陈雪峰等[8]建立了基于模糊集对分析法的底板突水危险性评价模型;李进朋等[9]建立基于模糊结构元的多分支水平井瓦斯抽采多因素群评价模型;郭广山[10]通过灰色关联方法为煤层气有利区快速评价提供客观可靠的快速评价方法;刘雪艳等[11]结合山西省某煤矿的实际情况,提出了一种新颖的基于万有引力的煤层底板突水预测方法。对于残煤资源开采,国内学者也开展了诸多研究,张玉江[5]建立了下垮落式复合残采区中部整层弃煤开采岩层控制理论;黄温钢等[12]建立了煤炭地下气化变权-模糊层次综合评价模型;陆刚[14]提出了针对衰老矿井的、应用性较强的残煤可采性评价与复采理论。笔者基于上述理论,将残煤资源特性和连续采煤机的显著特点相结合,形成连续采煤机对残煤资源的数学模糊评价方法。对此,笔者充分考虑残采煤区所处地质条件,连续采煤机技术特点,建立可行性指标评价体系,采用层次分析法、模糊综合评价模型和变权理论,建立了可行性变权模糊层次综合模型,对残采煤区进行短壁连采的可行性进行了数学评价,评价结果与不同矿井的应用结果相吻合,对指导现场具有重要的参考价值。

1 数学方法选择

综合评价方法是通过一定的数学模型,采用多个评价因素或指标对被评对象进行评价,并将多个指标值合成一个反映整体性的综合评价值[17]。研究表明,与其他单一评价方法相比,模糊综合评价法和层次分析法更为合理,而这 2 种评价方法的组合,即模糊层次综合法,又优于一般的单一评价方法,因此,采用模糊层次综合法。

普通评价方法一般采用常权评价,但在实际情况中,一般评价因素较多,分配给各指标的权重相对较低,当评价的某些指标出现极值时,若采用常权来处理,通常会掩盖这类指标对整体评价的影响,导致得出的评价结果远离客观实际。因此,有必要引入变权理论[12,18-19]构建综合评价数学模型。

综上所述,采用变权模糊层次分析法对残采煤区短壁开采可行性进行综合评价。

2 残采连采变权模糊层次综合评价模型建立

2.1 评语等级

变权模糊层次综合评价模型主要用于评价残采煤区连采是否可行,评语等级不宜太多或太少,若太多,评判结果不易集中;太少,则评判结果难以分级[20]。故模型的条件可行性评价分成 3 个等级,其评语集 $V=\{$可行,基本可行,不可行$\}$。

2.2 残采煤区连采可行性影响因素及指标建立

结合现场调研、文献查阅和理论分析、开采经验,建立了残采煤区可行性评价指标体系,共分为 A、B、C 3 个层次,其中 B 层包括 4 项影响因素,C 层包括 19 项技术指标,如图 1 所示。

2.3 评价指标量化

残采煤区连采的构造条件评价因素分为断层复杂系数、褶皱复杂系数、陷落柱影响系数 3 类,其指标值量化结果见表 1。

1)地质构造条件。断层复杂程度系数 Y,公式[14]为

$$Y=\rho^{0.7}+\frac{l}{2\,850+150\rho}-0.382\,4 \tag{1}$$

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

式中:ρ 为块段内断层密度,条/km^2;l 为块段内断层长度指数,m/km^2。

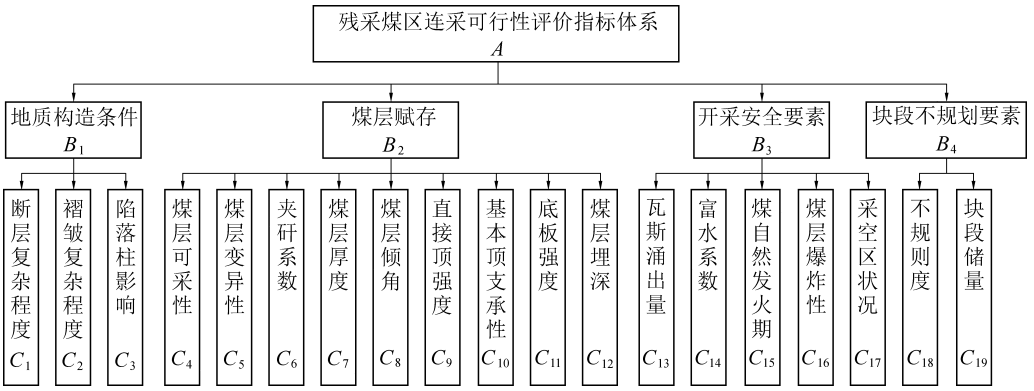


图 1　残采煤区连采可行性评价指标体系

Fig.1　Evaluation index system of feasibility of continuous mining in residual coal area

表 1　*C* 层评价指标量化值

Table 1　Quantification of evaluation indexes in *C* layer

评价等级	可行	基本可行	不可行
断层复杂程度系数	≤1	1~3	>3
褶皱复杂程度系数	≤0.66	0.66~1.34	>1.34
陷落柱影响系数	≤0.1	0.1~0.4	>0.4
煤层可采性指数	≥0.80	0.65~0.80	<0.65
煤层变异性	<0.10	0.10~0.25	≥0.25
夹矸系数/%	<5	5~20	≥20
煤层厚度/m	2.5~4.5	1.3~2.5/4.5~10	<1.3/>10
煤层倾角/(°)	≤8	8~10	>10
直接顶强度/MPa	>80	25~80	≤25
基本顶支承性	≥1.0	0.4~1.0	<0.4
底板强度/MPa	>40	8~40	<8
煤层埋深/m	<200	200~500	>500
瓦斯涌出量/(m^3·min^{-1})	<2	2~3	>3
富水系数/(m^3·t^{-1})	<8	8~20	>20
煤自然发火期/月	>3	2~3	<2
煤尘爆炸性系数/%	<10	10~28	>28
采空区状况/%	<10	10~40	>40
不规则度	0.8~1.2	0.4~0.8/1.2~1.6	<0.4/>1.6
块段储量/万 t	>30	10~30	<10

注:采空区状态表示残采复采时,原来采空区所占采区的比例。

褶皱复杂程度系数 F,计算公式[14]为

$$F=\sqrt{(K_S/1.41)^2+(\gamma_\beta/0.325)^2+(N/3.75)^2} \tag{2}$$

式中:K_S为褶皱复杂程度指数;γ_β为两翼倾角变异系数;N 为褶皱密度系数。

陷落柱影响系数,计算公式[14]为

$$k=\sum_{i=1}^{n}\frac{s_i}{s}\eta_i \tag{3}$$

式中:k 为陷落柱影响系数;s_i为块段内第 i 个陷落柱影响面积,km^2;s 为工作面开采面积,km^2;η_i为块段内第 i 个陷落柱破坏厚度与开采厚度的比值;n 为块段内陷落柱数量。

2)煤层赋存。煤层条件的评价因素为煤层可采性、煤层变异性、夹矸系数、煤层厚度、煤层倾角、直接顶强度、基本顶支承性、底板强度、煤层埋深。①直接顶稳定性:评价直接顶稳定性以直接顶岩层的单向抗压强度 σ_c作为评价指标。②基本顶支撑性:选用基本顶厚度与采高的倍数比 e 作为反映基本顶支撑的概略性总体指标。③底板强度:取直接底岩层的单向抗压强度 R_D作为评价底板强度主要指标。

3)开采安全要素。开采安全要素的评价因素为瓦斯涌出量、富水系数、煤自然发火期、煤尘爆炸指数和采空区状况。其中,采空区状况是影响该块段正常开采的重要影响因素,评价块段内采空区影响用采空区影响系数 τ 指标,公式为

$$\tau=\frac{L_{KH}}{S'}\times 100\% \tag{4}$$

式中:L_{KH}为块段内采空区的累计面积,m^2;S'为工作面的面积,m^2。

4)块段不规则要素。块段不规则要素的评价指标为不规则度和块段储量。不规则度计算公式为

$$P=\frac{1}{4w}\sum_{i=1}^{w}S_i \tag{5}$$

式中:P 为块段不规则度;S_i为块段内第 i 个不规则区边数;w 为不规则区区域数量。

2.4　隶属度函数建立

为使各指标对象的评测值转化为统一的无量纲量,借助模糊数学中的隶属函数对各指标的原始值进行处理,将不同维度的数值统一规划到[0,1]区间上的隶属度。采用线性隶属函数,根据残采煤区

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

短壁开采条件可行性评价指标的特点,可将其划分为效益型(数值越大越好)、成本型(数值越小越好)和中间型(数值介于某个区间较好)等 3 种类型[14],将各指标值代入计算其属于各评价等级的隶属度,以地质构造条件中各个评价指标的隶属度函数构建为例,见表 2。

表 2　地质构造条件的隶属度函数

Table 2　Membership functions of geological structural conditions

评价等级	可行	基本可行	不可行
断层复杂程度系数 C_1	$\begin{cases}0, x\geqslant 2\\ \dfrac{2-x}{2-1}, 1<x<2\\ 1, x\leqslant 1\end{cases}$	$\begin{cases}\dfrac{x-1}{2-1}, 1<x\leqslant 2\\ \dfrac{3-x}{3-2}, 2<x<3\\ 0, \text{其他}\end{cases}$	$\begin{cases}1, x\geqslant 3\\ \dfrac{x-2}{3-2}, 2<x<3\\ 0, x\leqslant 2\end{cases}$
褶皱复杂程度系数 C_2	$\begin{cases}0, y\geqslant 1.001\ 5\\ \dfrac{1.001\ 5-y}{1.001\ 5-0.663}, 0.663<y<1.001\ 5\\ 1, y\leqslant 0.663\end{cases}$	$\begin{cases}\dfrac{y-0.663}{1.001\ 5-0.663}, 0.663<y\leqslant 1.001\ 5\\ \dfrac{1.34-y}{1.34-1.001\ 5}, 1.001\ 5<y<0.4\\ 0, \text{其他}\end{cases}$	$\begin{cases}1, y\geqslant 1.34\\ \dfrac{y-1.001\ 5}{1.34-1.001\ 5}, 1.001\ 5<y<1.34\\ 0, y\leqslant 1.001\ 5\end{cases}$
陷落柱影响系数 C_3	$\begin{cases}0, z\geqslant 0.25\\ \dfrac{0.25-z}{0.25-0.1}, 0.1<z<0.25\\ 0.1, z\leqslant 0.1\end{cases}$	$\begin{cases}\dfrac{z-0.1}{0.25-0.1}, 0.1<z\leqslant 0.25\\ \dfrac{0.4-z}{0.4-0.25}, 0.25<z<0.4\\ 0, \text{其他}\end{cases}$	$\begin{cases}1, z\geqslant 0.4\\ \dfrac{z-0.25}{0.4-0.25}, 0.25<z<0.4\\ 0, z\leqslant 0.25\end{cases}$

注:x、y、z 分别为相对应的评价因子指标值。

根据对残采煤区连采条件的研究,采用专家打分法,对各层次评价指标进行矩阵构造[20]。

判断矩阵 $\boldsymbol{B}\rightarrow\boldsymbol{A}$,表示以 A 层指标因子为判断准则,与 A 层有关的 B 层元素两两比较构造的判断矩阵。其他判断矩阵构造方式同上。计算如下:

$$\boldsymbol{B}\rightarrow\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1 & 1/6 & 1/4 & 1/2\\ 6 & 1 & 3 & 5\\ 4 & 1/3 & 1 & 5\\ 2 & 1/5 & 1/5 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{C}\rightarrow\boldsymbol{B}_1=\begin{bmatrix}1 & 1/5 & 1/5\\ 5 & 1 & 2\\ 5 & 1/2 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{C}\rightarrow\boldsymbol{B}_2=\begin{bmatrix}1 & 2 & 4 & 1 & 2 & 2 & 3 & 4 & 2\\ 1/2 & 1 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1/3 & 1/2 & 1 & 1/3\\ 1/4 & 2 & 1 & 1/3 & 1/4 & 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1/4\\ 1 & 2 & 3 & 1 & 1/2 & 1/3 & 3 & 4 & 4\\ 1/2 & 2 & 4 & 2 & 1 & 1 & 3 & 3 & 1\\ 1/2 & 3 & 1/3 & 3 & 1 & 1 & 4 & 3 & 2\\ 1/3 & 2 & 3 & 1/3 & 1/3 & 1/4 & 1 & 1/3 & 1/2\\ 1/4 & 1 & 2 & 1/4 & 1/3 & 1/3 & 3 & 1 & 1\\ 1/2 & 3 & 4 & 1/4 & 1 & 1/2 & 2 & 1 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{C}\rightarrow\boldsymbol{B}_3=\begin{bmatrix}1 & 4 & 5 & 6 & 2\\ 1/4 & 1 & 2 & 3 & 1/3\\ 1/5 & 1/2 & 1 & 1/2 & 1/5\\ 1/6 & 1/3 & 2 & 1 & 1/6\\ 1/2 & 3 & 5 & 6 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{C}\rightarrow\boldsymbol{B}_4=\begin{bmatrix}1 & 1/7\\ 7 & 1\end{bmatrix}$$

2.5　确定初始权重方法

采用 T.L.Saty 根法[19],计算过程为:先将判断矩阵的每行 r(r 为矩阵阶数)个元素连乘求积,然后将乘积开 r 次方;再将其作归一化处理所求得的特征向量即为初始权重向量。

2.6　判断矩阵的一致性检验方法

一致性检验目的是防止出现类似“甲比乙极端重要,乙比丙极端重要,而丙比甲极端重要”的严重违反逻辑的错误。如果矩阵未通过一致性检验,要对该矩阵进行重新调整,直至满足条件。

1)计算一致性指标 CI。为确保各判断矩阵的可行性,需要对其进行一致性检验,具体步骤:利用 MATLAB 软件计算可以得出上面判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$,然后计算一致性指标,如式(6),结果见表 3。

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-n'}{n'-1}\tag{6}$$

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

式中:n'为矩阵阶数。

表 3　判断矩阵一致性的检验指标计算结果

Table 3　Calculation results of test indicators to determine matrix consistency

判断矩阵	$B\rightarrow A$	$C\rightarrow B_1$	$C\rightarrow B_2$	$C\rightarrow B_3$	$C\rightarrow B_4$
λ_{max}	4.177 4	3.053 6	9.782 7	5.194 7	2.000 0
矩阵阶数 n'	4	3	9	5	2
CI	0.059 1	0.026 8	0.097 8	0.048 7	0

2)计算随机性比值 CR。CR 计算见式(10),若 CR 小于 0.1,认为判断矩阵通过一致性检验,否则需重新调整判断矩阵,直至满足条件。

$$CR=\frac{CI}{RI} \tag{7}$$

其中,平均随机一致性指标 RI 的取值与判断矩阵阶数有关,见表 4。

表 4　RI 与矩阵阶数关系

Table 4　Relationship between matrix order and RI

矩阵阶数	2	3	4	5	9
RI	0	0.58	0.90	1.12	1.45

随机性比值 CR 计算结果见表 5。可知,各判断矩阵 CR 皆小于 0.1,均通过一致性检验,证明构造的判定矩阵所得各复合指标及基指标的权重系数合理。

表 5　随机性比值 CR 计算结果

Table 5　Calculation results of random ratio CR

判断矩阵	$B\rightarrow A$	$C\rightarrow B_1$	$C\rightarrow B_2$	$C\rightarrow B_3$	$C\rightarrow B_4$
CR	0.065 7	0.046 2	0.067 5	0.043 5	0

3　残煤连采可行性案例分析

针对吉县盛平煤矿、张家峁煤矿、南关煤矿等 3 个煤矿进行变权模糊层次综合评价值计算,以盛平煤矿计算过程为例说明。

3.1　残采煤区隶属度计算

山西煤炭运销集团吉县盛平煤业有限公司残采煤区短壁开采的地质构造条件、煤层赋存、开采安全要素、块段不规则要素的实际情况及指标取值见表 6。在计算过程中,将各评价指标的状态值代入表的指标隶属函数,即可获得其不同评价等级的隶属度。由于采用线性隶属函数,会出现每个指标的 3 个隶属度中至少有 1 个为 0 的情况,这会使得其变权后的权值为无穷大,从而导致无法计算。为避免上述现象发生,常用的处理方法是用 1 个足够小的量 δ 取代,并在其他非零隶属度中相应地扣除增加的量,以确保每个指标各隶属度之和为 1,引入 δ 对评价结果影响极小。

$$\delta=\frac{1}{1\ 000+p} \tag{8}$$

式中:p 为单个评价指标值为 0 的隶属度数量。

根据评价指标隶属度函数以及盛平矿残采煤区复采煤的实际值,构造模糊关系矩阵 $\boldsymbol{R}$,见表 6。

3.2　可行性综合评价方法

吉县盛平煤业残采煤区短壁开采条件可行性综合评价为两级来进行,首先利用与 B 层各元素有联系的 C 层的指标,来评判 B 层各元素的质量状况,将其称为Ⅰ级评判,然后以Ⅰ级评判的结果做最终的评判标准,将其称为Ⅱ级评判。具体根据文献[20],计算过程如下。

3.2.1　Ⅰ级评判

1)地质构造条件(以下向量或矩阵均指与 B_1 元素相关的 C 层顺序指标对 B_1 元素形成的不同向量)。

第 1 步:确定综合评价指标常权向量 $\boldsymbol{A}_{C\rightarrow B1}$。

$\boldsymbol{A}_{C\rightarrow B1}=(0.128\ 4,0.510\ 6,0.361\ 0)$

第 2 步:根据表 6,构造模糊关系矩阵 $\boldsymbol{R}_{C\rightarrow B1}$。

$$\boldsymbol{R}_{C\rightarrow B1}=\begin{bmatrix}0.001\ 0 & 0.599\ 0 & 0.400\ 0\\ 0.240\ 7 & 0.759\ 2 & 0.001\ 0\\ 0.998\ 0 & 0.001\ 0 & 0.001\ 0\end{bmatrix}$$

第 3 步:确定状态影响向量 $\boldsymbol{S}_{C\rightarrow B1}$。根据文献[12-13]采用基于隶属度的变权函数来确定状态影响向量。

$\boldsymbol{S}_{C\rightarrow B1}=(1.000\ 0,1.000\ 0,1.000\ 0)$

第 4 步:确定综合评价指标变权向量 $\boldsymbol{W}_{C\rightarrow B1}$。基于隶属度的 Hardarmard 乘积变权模型[13](变权原理)进行计算。

$\boldsymbol{W}_{C\rightarrow B1}=(0.128\ 4,0.510\ 6,0.361\ 0)$

第 5 步:模糊综合合成向量 $\boldsymbol{Y}_{C}\rightarrow\boldsymbol{B}_1$。

$$\boldsymbol{Y}_{C\rightarrow B1}=\boldsymbol{W}_{C\rightarrow B1}\cdot\boldsymbol{R}_{C\rightarrow B1}=$$

$$\begin{bmatrix}0.128\ 4\\ 0.510\ 6\\ 0.361\ 0\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\times\begin{bmatrix}0.001\ 0 & 0.599\ 0 & 0.400\ 0\\ 0.240\ 7 & 0.759\ 2 & 0.001\ 0\\ 0.998\ 0 & 0.001\ 0 & 0.001\ 0\end{bmatrix}=$$

$(0.483\ 3\quad 0.464\ 9\quad 0.052\ 2)$

2)煤层赋存。重复上述“地质构造条件”的Ⅰ级评判方法,其模糊综合向量 $\boldsymbol{Y}_{C\rightarrow B2}$(其表示意义参考 $\boldsymbol{A}_{C\rightarrow B1}$)为

$\boldsymbol{Y}_{C\rightarrow B2}=\boldsymbol{W}_{C\rightarrow B2}\cdot\boldsymbol{R}_{C\rightarrow B2}=(0.358\ 4\quad 0.451\ 3\quad 0.190\ 5)$

3)开采安全要素。其模糊综合向量 $\boldsymbol{Y}_{C\rightarrow B3}$ 为

$\boldsymbol{Y}_{C}\rightarrow\boldsymbol{B}_3=\boldsymbol{W}_{C\rightarrow B3}\cdot\boldsymbol{R}_{C\rightarrow B3}=(0.563\ 0\quad 0.344\ 7\quad 0.092\ 3)$

4)块段不规则要素。其模糊综合向量 $\boldsymbol{Y}_{C\rightarrow B4}$ 为

$\boldsymbol{Y}_{C\rightarrow B4}=\boldsymbol{W}_{C\rightarrow B4}\cdot\boldsymbol{R}_{C\rightarrow B4}=(0.262\ 6\quad 0.674\ 1\quad 0.063\ 3)$

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

表 6　盛平煤矿、张家峁煤矿、南关煤矿残采煤区评价条件取值、模糊关系矩阵 R 及变权相对权重

Table 6　Values of short-wall mining conditions in Shengping Coal Mine, Zhangjiamao Coal Mine and Nanguan Coal Mine, fuzzy relation matrix R and relative weight of variable weight

因素	盛平煤矿						张家峁煤矿						南关煤矿					
	评价因子指标值	评价因子初始值			相对权重	变权相对权重	评价因子指标值	评价因子初始值			相对权重	变权相对权重	评价因子指标值	评价因子初始值			相对权重	变权相对权重
		可行	基本可行	不可行				可行	基本可行	不可行				可行	基本可行	不可行		
断层复杂程度系数	2.400	0.001 0	0.599 0	0.400 0	0.128 4	0.128 4	0	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.128 4	0.128 4	3.30	0.001 0	0.001 0	0.998 0	0.128 4	0.184 1
褶皱复杂程度系数	0.920	0.240 7	0.759 2	0.001 0	0.510 6	0.510 6	0	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.510 6	0.510 6	1.20	0.001 0	0.413 6	0.585 4	0.510 6	0.449 6
陷落柱影响系数	0	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.361 0	0.361 0	0	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.361 0	0.361 0	0.35	0.001 0	0.333 3	0.665 7	0.361 0	0.366 3
煤层可采性系数	0.730	0.070 0	0.929 0	0.001 0	0.208 2	0.188 4	1.00	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.208 2	0.208 2	1.00	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.208 2	0.201 8
煤层变异性	0.160	0.200 0	0.799 0	0.001 0	0.057 3	0.051 9	0.21	0.001 0	0.533 3	0.465 7	0.057 3	0.057 3	0.23	0.001 0	0.266 7	0.732 3	0.057 3	0.086 1
夹矸系数	13.000	0.001 0	0.932 3	0.066 7	0.040 2	0.036 4	5.20	0.973 3	0.025 7	0.001 0	0.040 2	0.040 2	3.00	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.040 2	0.039 0
煤层厚度	3.100	0.749 0	0.250 0	0.001 0	0.153 0	0.138 5	5.80	0.386 7	0.612 3	0.001 0	0.153 0	0.153 0	1.98	0.050 0	0.949 0	0.001 0	0.153 0	0.148 3
煤层倾角	4.000	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.160 0	0.144 8	2.00	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.160 0	0.160 0	2.80	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.160 0	0.155 1
直接顶强度	40.000	0.001 0	0.181 8	0.817 2	0.148 2	0.229 2	43.10	0.001 0	0.657 2	0.341 8	0.148 2	0.148 2	39.50	0.001 0	0.527 3	0.471 7	0.148 2	0.143 7
基本顶支承性	0.740	0.133 3	0.865 7	0.001 0	0.059 1	0.053 5	2.26	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.059 1	0.059 1	0.56	0.001 0	0.532 3	0.466 7	0.059 1	0.057 3
底板强度	25.000	0.062 5	0.936 5	0.001 0	0.069 9	0.063 3	23.37	0.001 0	0.960 6	0.038 4	0.069 9	0.069 9	23.00	0.001 0	0.936 5	0.062 5	0.069 9	0.067 8
煤层埋深	230.000	0.799 0	0.200 0	0.001 0	0.104 1	0.094 2	106.70	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.104 1	0.104 1	275.00	0.499 0	0.500 0	0.001 0	0.104 1	0.100 9
瓦斯涌出量	0.850	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.436 7	0.436 7	0	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.436 7	0.436 7	3.15	0.001 0	0.001 0	0.998 0	0.436 7	0.558 8
富水系数	0.185	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.127 0	0.127 0	0.23	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.127 0	0.127 0	15.00	0.001 0	0.832 3	0.166 7	0.127 0	0.081 6
煤自然发火期	2.500	0.001 0	0.998 0	0.001 0	0.058 1	0.058 1	1.00	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.058 1	0.058 1	2.00	0.001 0	0.001 0	0.998 0	0.058 1	0.074 5
煤尘爆炸性	20.000	0.001 0	0.887 8	0.111 1	0.065 7	0.065 7	23.35	0.001 0	0.515 7	0.483 3	0.065 7	0.065 7	36.00	0.001 0	0.001 0	0.998 0	0.065 7	0.084 3
采空区状况	29.000	0.001 0	0.729 0	0.270 0	0.312 5	0.312 5	0	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.312 5	0.312 5	32.00	0.001 0	0.532 3	0.466 7	0.312 5	0.200 7
不规则度	1.500	0.001 0	0.500 0	0.499 0	0.125 0	0.125 0	1.00	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.125 0	0.125 0	0.73	0.325 0	0.674 0	0.001 0	0.125 0	0.125 0
块段储量	23.000	0.300 0	0.699 0	0.001 0	0.875 0	0.875 0	333.00	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.875 0	0.875 0	88.81	0.998 0	0.001 0	0.001 0	0.875 0	0.875 0

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

3.2.2　Ⅱ级评判

Ⅰ级评判的结果作为Ⅱ级评判依据，Ⅱ级评判具体过程与一级评判中 A 层“地质构造条件”计算步骤一致，因此，以下向量或矩阵均指 B 层顺序元素（B_1～B_4）对 A 层。

①常权向量 $\boldsymbol{A}_{B\to A}$ 为

$$\boldsymbol{A}_{B\to A}=(0.067\ 9,0.550\ 1,0.313\ 1,0.095\ 0)$$

②模糊关系矩阵 $\boldsymbol{R}_{B\to A}$ 为

$$\boldsymbol{R}_{B\to A}=\begin{bmatrix}0.483\ 3 & 0.464\ 9 & 0.052\ 2\\ 0.358\ 4 & 0.451\ 3 & 0.190\ 5\\ 0.262\ 6 & 0.674\ 1 & 0.063\ 3\end{bmatrix}$$

③状态影响向量 $\boldsymbol{S}_{B\to A}$ 为

$$\boldsymbol{S}_{B\to A}=(1.000\ 0,1.000\ 0,1.000\ 0)$$

④综合评价指标变权向量 $\boldsymbol{W}_{B\to A}$ 为

$$\boldsymbol{W}_{B\to A}=(0.067\ 9,0.550\ 1,0.313\ 1,0.095\ 0)$$

⑤Ⅱ级评判综合向量 $\boldsymbol{Y}_{B\to A}$ 为

$$\boldsymbol{Y}_{B\to A}=\boldsymbol{W}_{B\to A}\cdot\boldsymbol{R}_{B\to A}=$$

$$\begin{bmatrix}0.067\ 9\\ 0.550\ 1\\ 0.313\ 1\\ 0.095\ 0\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\times\begin{bmatrix}0.483\ 3 & 0.464\ 9 & 0.052\ 2\\ 0.358\ 4 & 0.451\ 3 & 0.190\ 5\\ 0.563\ 0 & 0.344\ 7 & 0.092\ 3\\ 0.262\ 6 & 0.674\ 1 & 0.063\ 3\end{bmatrix}=$$

$$(0.431\ 2\quad 0.451\ 8\quad 0.143\ 3)$$

所有评价指标计算结果见表 6。

3.2.3　最终评价分析

张家峁煤矿、南关煤矿参照上述计算。最终的综合评价值见表 6、表 7。

表 7　盛平煤矿、张家峁煤矿、南关煤矿残采煤区连采可行性综合评价值

Table 7　Feasibility evaluation result of continuous mining in residual mining area in Shengping Coal Mine, Zhangjiamao Coal Mine and Nanguan Coal Mine

评价等级	可行	基本可行	不可行
盛平煤矿综合评价值	0.431 2	0.451 8	0.143 3
张家峁煤矿综合评价值	0.800 5	0.170 8	0.054 8
南关煤矿综合评价值	0.037 6	0.243 1	0.718 2

由表 7 分析，结合最大隶属度评定准则，得出结论：吉县盛平煤矿残采煤区连采条件可行性评价值最大为 0.451 8，隶属“基本可行”等级；张家峁煤矿可行性评价值最大为 0.800 5，隶属“可行”等级；南关煤矿评价值最大为 0.718 2，隶属“不可行”等级。

现场实际应用情况是，张家峁煤矿连采工作面月产达 12.0 万 t，应用效果非常理想；盛平煤业月产 2.0 万 t，解决了残采煤区的开采难题，应用较为成功；南关煤矿使用连续采煤机由于地质条件不适用，应用失败。据此分析，实际效果与评价模型结果相吻合，说明建立的数学评价模型是合理的。

4　结　　论

1）残采煤区直接顶强度、采空区状况、块段不规则要素中的不规则度和块段储量是影响残采可行性评价能否达到理想最大隶属值的核心影响因素。

2）通过调整指标因子的权重，调高差因子的权重，调低好因子的权重，降低评价对象的综合评价值，提高了评价的准确性与科学性。

3）按照建立的模糊变权层次分析模型，对盛平煤矿、张家峁煤矿、南关煤矿等 3 个不同条件的矿井残采煤区进行评价，分别验证了模型中（可行、基本可行、不可行）3 种评语等级，评价结果同实际使用效果完全吻合，表明了构建的模型合理、可行，变权模糊数学方法对残采煤区可行性评价具有适用性和参考性。

参考文献（References）：

[1] 2020 煤炭行业发展年度报告[R].北京：中国煤炭工业协会，2021.

[2] 吴　达.我国煤炭产业供给侧改革与发展路径研究[D].北京：中国地质大学（北京），2016：5-10.

[3] 韩沚清.供给侧改革下煤炭企业兼并重组动因、策略及路径[J].煤炭经济研究，2018，38(4)：6-13.
HAN Zhiqing.Motivation，strategy and path of merger and reorganization with coal enterprises under the background of supply side reform[J].Coal Economic Research，2018，38(4)：6-13.

[4] 宋　梅，郝旭光，朱亚旭.我国煤炭产业供给侧结构性改革效果分析[J].中国煤炭，2018，44(5)：5-8，14.
SONG Mei，HAO Xuguang，ZHU Yaxu.Effect analysis of supply-side structural reform of China's coal industry [J]. China Coal，2008，44(5)：5-8，14.

[5] ZHANG Yujiang，FENG Guorui，ZHANG Min，*et al*. Residual coal exploitation and its impact on sustainable development of the coal industry in China[J]. Energy Policy，2016，96：534-541.

[6] 周茂普，曹胜根，江小军.缓倾斜煤层连续采煤机短壁开采工艺研究与应用[J].采矿与安全工程学报，2014，31(1)：55-59.
ZHOU Maopu，CAO Shenggen，JIANG Xiaojun. Research on the application of continuous miner shortwall mining technology in gently inclined longwall face[J]. Journal of Minig & Safety Engineering，2014，31(1)：55-59.

[7] 陈　凡，曹安业，窦林名，等.基于区域划分与主控因素辨识的冲击危险性评价方法[J].煤炭学报，2018，43(3)：607-615.
CHEN Fan，CAO Anye，DOU Linming，*et al*.Method of coal burst hazard assessment based on region division and identification of main impact factors[J].Journal of China Coal Society，2018，43(3)：607-615.

[8] 陈雪锋，苗永春，陈文涛.基于模糊集对分析法的底板突水危险性评价研究[J].煤炭科学技术，2019，47(2)：218-223.
CHEN Xuefeng，MIAO Yongchun，CHEN Wentao.Study on evalua-

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

tion of mine floor water inrush danger based on fuzzy set pair analysis method[J].Coal Science and Technology,2019,47(2):218-223.

[9] 李进朋,张 勋,黎凤岐,等.基于模糊结构元多分支水平井瓦斯抽采多因素群评价[J].煤炭科学技术,2019,47(2):114-119.
LI Jinpeng,ZHANG Xun,LI Fengqi,*et al*.Multi-factor group evaluation of gas drainage in mutti-branch horizontal well based on fuzzy structural element[J].Coal Science and Technology,2019,47(2):114-119.

[10] 郭广山.柿庄南区块煤层气储层有利区综合评价研究[J].煤炭科学技术,2019,47(3):200-206.
GUO Guangshan. Comprehensive evaluation study on favorable area of coalbed methane reservoir in southern Shizhuang block [J].Coal Science and Technology,2019,47(3):200-206.

[11] 刘雪艳,张雪英,李凤莲.基于万有引力的煤层底板突水预测算法[J].煤炭学报,2015,40(S2):458-463.
LIU Xueyan, ZHANG Xueying, LI Fenglian. Gravitational force based coal floor water inrush prediction algorithm[J].Journal of China Coal Society,2015,40(S2):458-463.

[12] 黄温钢,王作棠.煤炭地下气化变权-模糊层次综合评价模型[J].西安科技大学学报, 2017, 37(4):500-507.
HUANG Wengang, WANG Zuotang. Comprhensive evaluation model of fuzzy analytic hierarchy process with variable weight for underground coal gasification[J].Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(4):500-507.

[13] 诸葛福民,周 刚,程卫民,等.基于灰色模糊变权理论的矿井热害综合评价模型[J].煤炭科学技术, 2009,37(7):60-63.
ZHUGE Fuming,ZHOU Gang,CHENG Weimin,*et al*.Comprhensive evaluation model of mine heat disaster based on grey fuzzy variable weights theory[J].Coal Science and Technology, 2009, 37(7):60-63.

[14] 陆 刚.衰老矿井残煤可采性评价与复采技术研究[D].徐州:中国矿业大学, 2010.

[15] 吴胜利,刘茂林.基于模糊数学的高炉炉况预测模型[J].钢铁, 2001, 36(3):12-14.
WU Shengli,LIU Maolin.Forecasting model of BF status based on fuzzy math[J].Steel, 2001, 36(3):12-14.

[16] 高 峰,张志镇,高亚楠,等.基于盲数理论的冲击矿压危险性评价模型[J]. 煤炭学报,2010,35(S1):28-32.
GAO Feng, ZHANG Zhizhen, GAO Yanan, *et al*. Evaluation model of rock burst risk in mining based on blind data theory[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(S1):28-32.

[17] WU Qiang, ZHAO Dekang, WANG Yang, *et al*. Method for assessing coal-floor water-inrush risk based on the variable-weight model and unascertained measure theory[J]. Hydrogeology Journal, 2017, 25(10):1-15.

[18] 蒂 萨,层次分析法在资源分配、管理和冲突分析中的应用[M].北京:煤炭工业出版社, 1988:334.

[19] WU Qiang, LI Bo, CHEN Yulong. Vulnerability assessment of groundwater inrush from underlying aquifers based on variable weight model and its application[J]. Water Resources Management, 2016, 30(10):3331-3345.

[20] 乔长录.半干旱地区大型灌区水文生态系统动态监测与综合评价研究[D].西安:长安大学,2012:114-118.