

引用格式: 闵超, 李映君, 李小刚, 等. 直觉模糊MABAC法在低渗碳酸盐岩气藏有利区优选中的应用[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(4): 577-585.  
MIN Chao, LI Yingjun, LI Xiaogang, et al. Application of intuitive fuzzy MABAC method in optimizing favorable areas of low permeability carbonate gas reservoirs[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(4): 577-585.  
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.04.007

# 直觉模糊MABAC法在低渗碳酸盐岩气藏有利区 优选中的应用

闵超<sup>1,2,3</sup>, 李映君<sup>1,2</sup>, 李小刚<sup>3</sup>, 华青<sup>4</sup>, 张娜<sup>4</sup>

(1. 西南石油大学理学院, 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学人工智能研究院, 四川 成都 610500; 3. 西南石油大学油气藏地质及  
开发工程全国重点实验室, 四川 成都 610500; 4. 中国石油西南油气田公司重庆气矿, 重庆 400700)

**摘要:** 低渗碳酸盐岩气藏地质构造和储层特征复杂, 数据获取和解释的不确定性较高, 导致有利区优选的难度较大。提出了最优最劣法(BWM)赋权下的直觉模糊MABAC(多属性边界近似区域比较)法低渗碳酸盐岩有利区优选模型。首先, 根据低渗碳酸盐岩地质特征、生烃能力和储气能力等信息, 建立综合考虑低渗碳酸盐岩成藏的地质条件、施工条件的综合评价指标体系; 然后利用BWM方法确定各关键评价指标权重, 同时考虑多个因素对不同的油气田的影响并掌握因素之间的优先级关系; 最后, 利用直觉模糊信息替代精确信息, 建立改进的直觉模糊多属性决策模型, 对低渗碳酸盐岩气藏开发有利区进行优选。利用10个碳酸盐岩气藏区块进行实验, 结果表明: 剩余动态储量、有效储层厚度等因素表现良好的C区块为最优。对碳酸盐岩气藏开发有利区按照整体距离的值进行降序排序, 结果为: C区>I区>H区>A区>D区>G区>J区>E区>F区>B区。将提出的直觉模糊MABAC法与现有方法进行对比, 并结合数值模拟结果分析, 验证了该方法的有效性和合理性。

**关键词:** 低渗碳酸盐岩; 有利区优选; 评价指标体系; 最优最劣法(BWM); 直觉模糊MABAC法

中图分类号: TE155

文献标识码: A

## Application of intuitive fuzzy MABAC method in optimizing favorable areas of low permeability carbonate gas reservoirs

MIN Chao<sup>1,2,3</sup>, LI Yingjun<sup>1,2</sup>, LI Xiaogang<sup>3</sup>, HUA Qing<sup>4</sup>, ZHANG Na<sup>4</sup>

(1. School of Science, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Institute for Artificial Intelligence, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Development Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 4. PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chongqing 400700, China)

**Abstract:** The geological structure and reservoir characteristics of low-permeability carbonate gas reservoirs are complex, and the high uncertainty in data acquisition and interpretation makes it challenging to identify optimal development areas. To address this, the study introduces an intuitionistic fuzzy Multi-Attributive Border Approximation area Comparison (MABAC) model, combined with the Best Worst Method (BWM) for weighting, to select the most suitable areas for developing these reservoirs. The approach begins by establishing a comprehensive evaluation index system that considers geological characteristics, hydrocarbon generation capacity, and gas storage capability of the low-permeability carbonate formations. This system not only integrates geological data but also considers the construction conditions relevant to these reservoirs. Using the BWM, weights for each key evaluation indicator are determined, taking into account the multifactorial impacts on various oil and gas fields and establishing the hierarchical relationships between these factors. An improved intuitionistic fuzzy multi-attribute decision-making model is then developed. This model uses intuitionistic fuzzy data instead of precise information, enhancing the selection process for favorable areas. The application of this model on ten candidate blocks indicated that Block C is the most favorable, outperforming others in terms of remaining dynamic reserves, effective reservoir thickness, and other crucial indicators. The blocks were ranked as follows based on the overall distance value: Block C > Block I > Block H > Block A > Block D > Block G > Block J > Block E > Block F > Block B. The effectiveness and rationality of the proposed intuitionistic fuzzy MABAC method were validated through comparisons

收稿日期: 2023-09-05。

第一作者简介: 闵超(1982—), 男, 博士, 教授, 从事最优化方法与不确定性理论在油气田开发中的应用研究工作。地址: 四川省成都市新都区新都大道8号, 邮政编码: 610500。E-mail: minchao@swpu.edu.cn

基金项目: 成都市国际合作项目“基于深度学习的孔隙网络渗流模拟理论和技术探讨”(2020-GH02-00023-HZ)。

with existing methods and analysis of numerical simulation results, confirming its utility in optimizing the development of low-permeability carbonate gas reservoirs.

**Keywords:** low permeability carbonate rock; selection of favorable areas; evaluation index system; Best Worst Method (BWM); intuitive fuzzy MABAC method

中国低渗碳酸盐岩气藏数量多、分布广,但目前储量整体动用程度不高<sup>[1]</sup>。部分低渗区块压力高、剩余储量多,挖潜潜力大,但开发风险大。低渗碳酸盐岩气藏需要通过优选有利区,集中资源对具有较高产能潜力的地区进行开发,从而提高开发效率,降低开发风险。

碳酸盐岩的有利区优选通常是从地质条件方面来分析和选择,主要包括:①利用测井、地震、岩心描述、分析测试等资料对气藏类型及其主控因素进行分析<sup>[2-7]</sup>;②在钻井、地震、测井资料的基础上,结合薄片观察、分析化验,以层序和相控、井震结合为方法开展地层划分及对比、沉积相特征、储层特征及分布规律等综合地质特征研究<sup>[8-13]</sup>。这些方法仅依赖于地质因素的分析而无法充分考虑到其他因素的协同影响,而且纯地质条件分析难以预测未来生产状况的变化,因此需要从更多维度来进行综合分析,实现低渗碳酸盐岩的有利区优选。

另一方面,油气田有利区优选的大部分数据处理方法,均是从优属角度出发,只考虑支持方面的证据,将原始数据转化为越大越优型的无量纲值<sup>[14-17]</sup>。直觉模糊MABAC(多属性边界近似区域比较)法是一种实用且可靠的理性决策工具,可以用于解决各种实际的多属性决策问题<sup>[18]</sup>。例如:PAMUČAR等<sup>[18]</sup>将混合DEMATEL-MABAC模型用于购买叉车的投资决策过程;彭定洪等<sup>[19]</sup>将MABAC法扩展到Picture模糊集,提出一种能够充分考虑评价信息犹豫性和动态性的可再生能源选择方法。该方法考虑了潜在的损失和收益值且优选结果稳定性高,但在数据处理上也是将原始数据转化为越大越优型的无量纲值,只研究了支持方面的证据,忽略了负面的影响。因此,提出了一种最优最劣法(BWM)赋权下的MABAC低渗碳酸盐岩气藏有利区优选模型。该方法能够同时考虑多个因素对不同的方案的影响,并掌握因素之间的优先级关系,且直觉模糊集具有隶属度和非隶属度函数,能同时考虑支持和反对两方面的证据,从而在对原始数据进行处理和判断时,对现有数据进行全面的考察。

## 1 BWM赋权下的直觉模糊MABAC法

低渗碳酸盐岩气藏有利区优选当中存在较多定性描述,且优选结果受决策者经验和知识背景的影响很大。

传统的多属性决策方法或忽视了决策者心理状态带来的抉择影响。因此,在利用最优最劣方法BWM确定指

标评价体系权重的基础之上,借助直觉模糊集改进传统的MABAC方法,使用直觉模糊信息替代精确信息,建立改进的直觉模糊多属性决策模型。该模型可用于评估多个候选方案或对象:当需要评估和排序多个候选方案、项目、产品或对象时,其可以提供一种系统化的评估框架;同时,直觉模糊MABAC法可以处理模糊和不确定性信息,通过使用模糊集理论帮助决策者在面对不确定性和模糊性时做出相对准确的决策。

### 1.1 低渗碳酸盐岩有利区评价指标

低渗碳酸盐岩储层地质条件复杂,具有低孔隙度、低渗透率、岩性复杂、非均质性强、区域差异性大等特性。借鉴现有的研究成果,综合考虑碳酸盐岩成藏的地质条件、压裂工程条件方面的因素,并根据因素的相关性、可度量性、可操作性、评估因素的重要性,从16个潜在因素中筛选出碳酸盐岩气藏有效储层厚度、剩余动态储量、含气饱和度、渗透率、孔隙度、泊松比、地层压力、温度、埋深共9项关键性指标用于碳酸盐岩有利区的优选(图1)。所选取的因素之间存在相关性,会对最后得到的有利区优选结果产生影响。比如渗透率和孔隙度,温度和地层压力,两者之间的相关关系都较强,选择最具代表性和重要性的因素变得更加复杂,而其他因素则可能被低估,同时,模型在优选过程中可能会更容易受到随机误差或外部因素的干扰,从而导致预测结果的波动性增加。为了解决指标相关性引起的问题,通过统计分析来确定指标之间的相关性,并在多指标决策方法中使用调整后的权重(图2)。

1) 碳酸盐岩的有效厚度是碳酸盐岩气藏赋存的载体,也是保证有充足储集空间和渗透空间的重要条件,直接影响压裂改造和碳酸盐岩资源量;在碳酸盐岩气藏储量丰度一定时,储层越厚,可提供的气源越丰富,产量越稳定。

2) 碳酸盐岩的剩余动态储量表征着碳酸盐岩的富集程度,也是获得高产的前提。

3) 含气饱和度是地质勘探、石油和天然气勘探等领域的重要参数,表示空隙中气体体积与总孔隙体积的比例,对于预测岩石中的油气储量具有重要意义。

4) 渗透率直接影响碳酸盐岩作为潜在储层的产能和可采储量,渗透率的大小取决于岩石的孔隙结构、孔隙度、孔隙之间的连通性,典型的碳酸盐岩常常具有复杂的孔隙结构,包括溶洞、裂缝和微观孔隙。

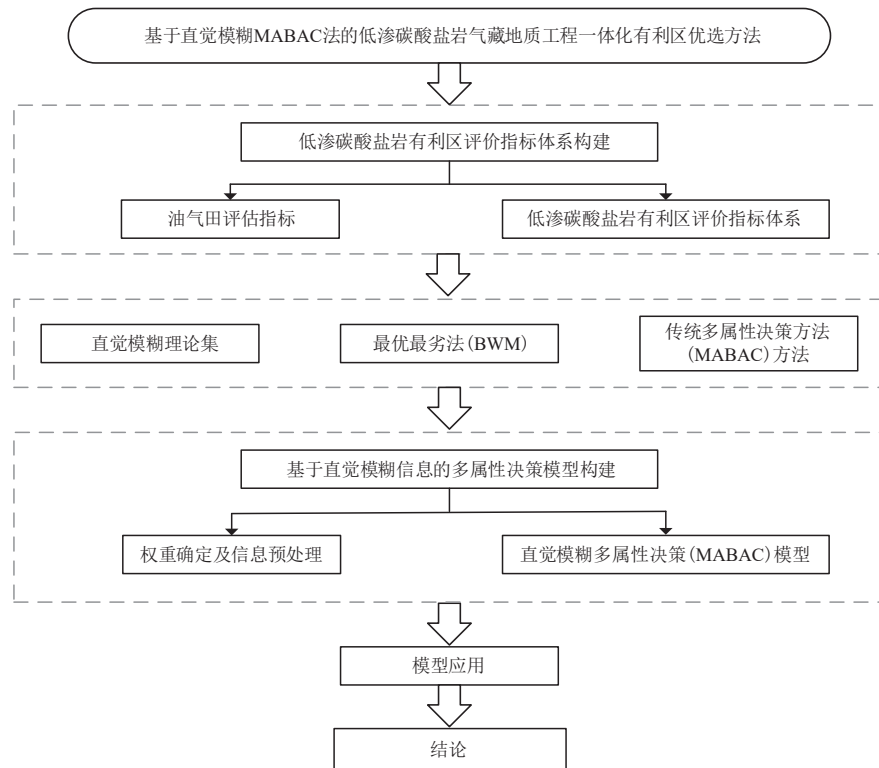


图1 低渗碳酸盐岩有利区优选流程

Fig. 1 Flow of optimizing favorable areas of low-permeability carbonate rocks

5) 孔隙度是反映碳酸盐岩储层物性的主要参数,孔隙度的大小可以影响碳酸盐岩吸附量和吸附状态,只有当孔隙度达到一定条件时,碳酸盐岩才能达到工业产量。

6) 碳酸盐岩的产出依赖于后期的压裂,而岩石的力学性质决定了裂缝的打开和连通程度;泊松比是碳酸盐岩岩石力学性质的重要参数,通常低泊松比的脆性碳酸盐岩更易形成诱导裂缝,增强碳酸盐岩的渗流能力。

7) 地层压力、温度的大小影响着吸附气和游离气的含量,随着压力增加,吸附气和游离气含量都会随之增大,但是相同压力下,随着地层温度的增加,吸附气和游离气含量均会降低。

8) 根据勘探和开发的实践,碳酸盐岩埋深不宜过大。过大的埋深不仅会增加碳酸盐岩开采的难度,而且会增加碳酸盐岩开采的成本。

## 1.2 BWM确定属性权重

最优最劣方法是荷兰学者REZAEI<sup>[20]</sup>提出的一种多属性决策方法,可以通过较少的比较信息获得一致性结果并且能够考虑到不同因素之间的相对重要性。BWM确定属性权重的步骤如下:

- 1) 确定决策属性。
- 2) 确定最优(最重要)属性  $C_B$  和最劣(最不重要)属性  $C_W$ 。

3) 使用1~9之间的整数衡量  $C_B$  相对于其余  $n-1$  个属性的偏好(重要性程度),记为  $a_{Bj}$ 。

4) 使用1~9之间的整数衡量  $C_B$  和  $C_W$  之外的其余  $n-2$  个属性相对于最劣属性  $C_W$  的偏好(重要性程度),记为  $a_{jW}$ 。

5) 求解各属性的最佳权重  $(\omega_1^*, \omega_2^*, \dots, \omega_n^*)$ 。

考虑大部分油田公司追求开发效益最大化,选取剩余动态储量作为最重要的评价指标,使用1~9之间的整数来衡量剩余动态储量相对于其余8个评价指标的重要程度;类似地,温度是影响有利区优选最小的指标,将其作为最不重要的评价指标,使用1~9之间的整数来衡量其余8个指标相对于温度的重要程度(表1)。

将表1中的数据代入模型:

$$\begin{aligned} & \min \xi \\ & s.t. \begin{cases} \left| \frac{\omega_B}{\omega_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi, \left| \frac{\omega_j}{\omega_W} - a_{jW} \right| \leq \xi \\ \sum_{j=1}^n \omega_j = 1, \omega_j \geq 0, \text{对任意的 } j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\omega_j$  为第  $j$  个属性的权重;  $\xi$  为专家比较结果一致性的误差;  $\omega_B$  为最优属性的权重;  $\omega_W$  为最劣属性的权重;  $n$  为属性个数。

解得:  $\omega_1=0.144 1, \omega_2=0.379 4, \omega_3=0.063 1, \omega_4=0.053 4, \omega_5=0.068 2, \omega_6=0.070 6, \omega_7=0.104 7, \omega_8=0.052 3, \omega_9=0.064 2$ 。

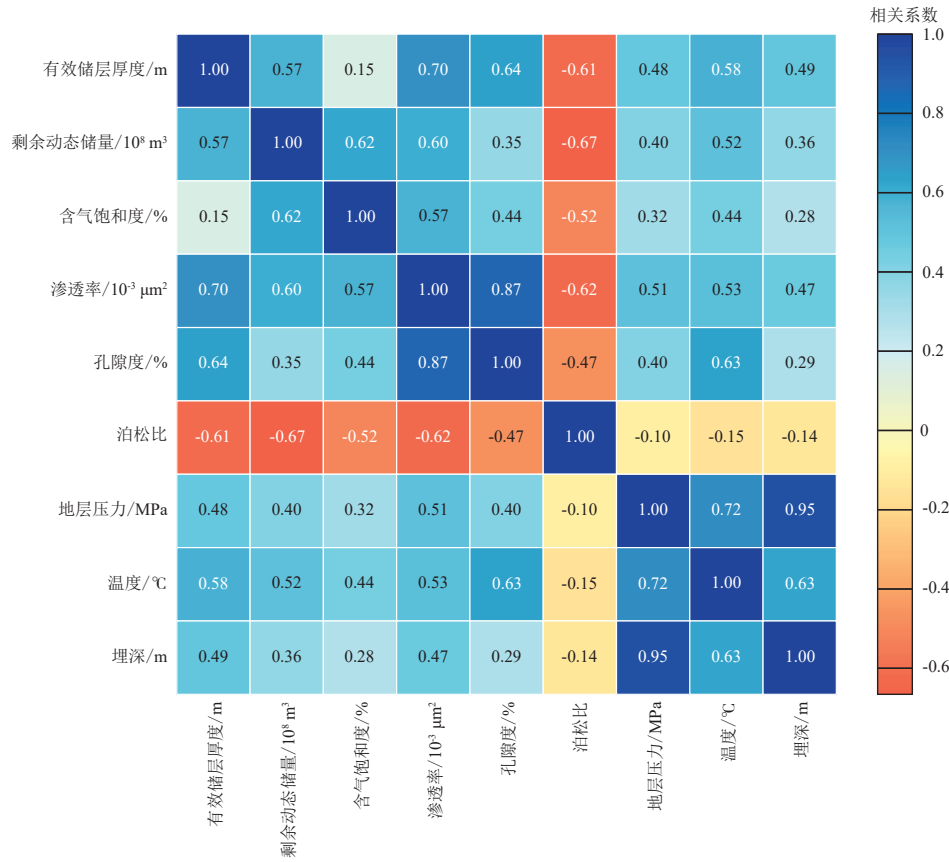


图2 评价指标相关性热力图

Fig. 2 Thermal diagram of correlation between evaluation indicators

表1 对于剩余动态储量和温度的两两比较向量

Table 1 Pairwise comparison vector for remaining dynamic reserves

指标	有效储层厚度	剩余动态储量	含气饱和度	渗透率	孔隙度	泊松比	地层压力	温度	埋深
剩余动态储量	2	1	5	6	5	5	3	9	7
温度	8	9	3	2	2	2	5	1	3

1.3 改进的直觉模糊MABAC方法

MABAC方法于2015年由PAMUČAR等<sup>[18]</sup>首次提出,是一种以边界近似区域(BAA)为评价标准的多属性决策方法。对此,提出一种改进的直觉模糊MABAC方法,利用隶属度和非隶属度函数,同时考虑支持和反对两方面的证据,在处理具有模糊性的评价问题方面具有良好的表达能力。步骤如下:

1) 建立初始决策矩阵。对于有  $m$  个备选方案和  $n$  个属性的直觉模糊多属性决策问题,初始决策矩阵  $X=[\alpha_{ij}]_{m \times n}$  见表2。其中,  $\alpha_{ij} = \langle \mu_{\alpha_{ij}}, \nu_{\alpha_{ij}} \rangle$  是直觉模糊数,  $\mu_{\alpha_{ij}} \in [0,1]$  和  $\nu_{\alpha_{ij}} \in [0,1]$  分别为隶属度和非隶属度,方案  $A_i (i = 1,2,\dots,m)$  表示为  $A_i = (\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{in})$ 。

2) 构造规范化决策矩阵  $N=[\tilde{\alpha}_{ij}]_{m \times n}$ , 其中:

$$\tilde{\alpha}_{ij} = \begin{cases} \langle \mu_{\alpha_{ij}}, \nu_{\alpha_{ij}} \rangle, C_j \text{ 是效益型属性} \\ \langle \nu_{\alpha_{ij}}, \mu_{\alpha_{ij}} \rangle, C_j \text{ 是成本型属性} \end{cases} \quad (2)$$

3) 计算加权决策矩阵  $W=[\beta_{ij}]_{m \times n}$ :

$$\beta_{ij} = \omega_j \tilde{\alpha}_{ij} = \left\langle 1 - \left(1 - \mu_{\tilde{\alpha}_{ij}}\right)^{\omega_j}, \left(\nu_{\tilde{\alpha}_{ij}}\right)^{\omega_j} \right\rangle \quad (3)$$

其中,  $\tilde{\alpha}_{ij} = \langle \mu_{\tilde{\alpha}_{ij}}, \nu_{\tilde{\alpha}_{ij}} \rangle$  是规范化决策矩阵  $N$  中的元素;

$\omega_j$  是属性  $C_j$  的权重, 满足  $\omega_j > 0$  且  $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1; i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$ 。

4) 确定边界近似区域BAA。对于属性  $C_j$ , 边界近似区域BAA通过式(4)计算获得:

$$g_j = \left( \bigotimes_{i=1}^m \beta_{ij} \right)^{\frac{1}{m}} = \left\langle \prod_{i=1}^m \sqrt[m]{\mu_{\beta_{ij}}}, 1 - \prod_{i=1}^m \sqrt[m]{1 - \nu_{\beta_{ij}}} \right\rangle \quad (4)$$

其中,  $j = 1, 2, \dots, n$ 。

当计算完所有属性的边界近似区域之后,由式(5)得到直觉模糊多属性决策问题的边界近似区域向量  $G$ :

$$G = (g_1, g_2, \dots, g_n)^T \quad (5)$$

5) 比较直觉模糊数  $\tilde{\alpha}_{ij}$  与相应的  $g_j$  之间的大小关系,并以此为依据,根据式(6)对初始属性权重进行进一步的处理,得到属性权重  $W_{ij}^*(\omega_j)$ ,其中\*表示修正属性权重,区别于初始属性权重。

$$W_{ij}^*(\omega_j) = \begin{cases} \frac{\omega_j^\delta}{\left[ \omega_j^\delta + (1 - \omega_j)^\delta \right]^{\frac{1}{\delta}}}, & \beta_{ij} \geq g_j \\ \frac{\omega_j^\tau}{\left[ \omega_j^\tau + (1 - \omega_j)^\tau \right]^{\frac{1}{\tau}}}, & \beta_{ij} < g_j \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; \delta, \tau$  表示固定参数,由文献[24]得到。

6) 在计算方案  $A_i$  与边界近似区域  $g_j$  之间在每个属性下的距离  $d_{ij}$  时,引入价值函数,使得距离  $d_{ij}$  的计算公式变为:

表2 直觉模糊多属性初始决策矩阵

Table 2 Intuitionistic fuzzy multi-attribute initial decision matrix

备选方案	属性					
	$C_1$	$C_2$	...	$C_j$	...	$C_n$
$A_1$	$\alpha_{11}$	$\alpha_{12}$	...	$\alpha_{1j}$	...	$\alpha_{1n}$
$A_2$	$\alpha_{21}$	$\alpha_{22}$	...	$\alpha_{2j}$	...	$\alpha_{2n}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$A_i$	$\alpha_{i1}$	$\alpha_{i2}$	...	$\alpha_{ij}$	...	$\alpha_{in}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$A_m$	$\alpha_{m1}$	$\alpha_{m2}$	...	$\alpha_{mj}$	...	$\alpha_{mn}$

表3 待优选的碳酸盐岩开发有利区块指标数据

Table 3 Indicator data for carbonate rock development blocks awaiting optimization

区块	有效储层厚度/ m	剩余动态储量/ $10^8 \text{ m}^3$	含气饱和度/ %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙度/ %	泊松比	地层压力/ MPa	温度/ $^\circ\text{C}$	埋深/ m
A	21.40	2.53	80.70	0.57	3.87	0.28	58.59	107.87	4 614
B	1.95	0.52	81.03	0.03	1.59	0.31	33.81	96.67	3 295
C	34.30	16.50	87.20	1.80	5.13	0.22	59.20	110.16	4 846
D	24.01	1.88	80.90	1.39	5.22	0.28	53.70	102.06	4 395
E	12.24	2.16	75.74	1.01	5.11	0.30	52.43	103.34	3 949
F	26.00	0.59	72.75	1.04	4.71	0.24	35.18	94.51	3 386
G	29.80	1.57	71.27	1.12	4.75	0.31	58.43	109.74	4 981
H	20.27	5.29	85.00	1.91	4.80	0.26	59.92	100.66	5 001
I	29.60	6.90	91.00	2.40	9.00	0.25	53.94	114.09	4 326
J	17.30	0.86	82.10	1.08	4.80	0.27	59.24	105.05	5 087

$$d(\beta_{ij}, g_j) = \begin{cases} W_{ij}^*(\omega_j) \left[ \frac{1}{4} (|\mu_{\beta_{ij}} - \mu_{g_j}| + |\nu_{\beta_{ij}} - \nu_{g_j}|) + \frac{1}{2} \max(|\mu_{\beta_{ij}} - \mu_{g_j}|, |\nu_{\beta_{ij}} - \nu_{g_j}|) \right]^s, & \beta_{ij} > g_j \\ 0, & \beta_{ij} = g_j \\ -\sigma W_{ij}^*(\omega_j) \cdot \left[ \frac{1}{4} (|\mu_{\beta_{ij}} - \mu_{g_j}| + |\nu_{\beta_{ij}} - \nu_{g_j}|) + \frac{1}{2} \max(|\mu_{\beta_{ij}} - \mu_{g_j}|, |\nu_{\beta_{ij}} - \nu_{g_j}|) \right]^s, & \beta_{ij} < g_j \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $g_j = \langle \mu_{g_j}, \nu_{g_j} \rangle$  是属性  $C_j$  的边界近似区域;  $\beta_{ij} = \langle \mu_{\beta_{ij}}, \nu_{\beta_{ij}} \rangle$  是加权决策矩阵  $W$  中的元素;  $\sigma, s$  表示固定参数,由文献[24]得到。

步骤7:对备选方案排序。由式(8)对距离矩阵中的每一行元素求和,得到各备选方案的准则函数值:

$$S_i = \sum_{j=1}^n d_{ij}, j = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

根据  $S_i$  的大小对方案  $A_i$  进行排序,  $S_i$  越大,则方案  $A_i$  越优。

### 1.3.1 指标模糊化处理

备选的10个低渗碳酸盐岩区块的评价指标中,孔隙度、渗透率、含气饱和度、有效储层厚度、剩余动态储量、地层压力为效益性指标,泊松比、温度、埋深为成本型指标(表3)。

上述数据型指标具有一定的模糊性、可度量性,因此,借助式(9)<sup>[21]</sup>将单值数据转化为 Vague 值数据:

$$\alpha_{ij} = \left\langle \frac{x_{ij}^P - x_{j,\min}^P}{x_{j,\max}^P - x_{j,\min}^P}, \frac{x_{j,\max} - x_{ij}}{x_{j,\max} - x_{j,\min}} \right\rangle, P = 2, 3, \dots \quad (9)$$

进而构造由直觉模糊数表示的评价矩阵  $X = [\alpha_{ij}]$ 。这里,  $x_{j,\max}$  为第  $j$  个指标的理论最大值,  $x_{j,\min}$  为第  $j$  个指标的理论最小值,指数  $P$  取2,于是,得到碳酸盐岩有利区优选直觉模糊评价矩阵(表4)。

表4 碳酸盐岩有利区优选直觉模糊评价矩阵  
Table 4 Intuitive fuzzy evaluation matrix for optimal selection of favorable areas in carbonate rocks

区块	储层厚度	剩余动态储量	含气饱和度	渗透率	孔隙度	泊松比	地层压力	温度	埋深
A	<0.373 7, 0.394 2>	<0.010 3, 0.898 6>	<0.536 9, 0.408 6>	<0.081 2, 0.715 0>	<0.141 2, 0.681 1>	<0.337 8, 0.581 1>	<0.938 2, 0.046 9>	<0.245 6, 0.702 1>	<0.578 3, 0.354 4>
B	<0.002 9, 0.958 0>	<0.000 4, 0.979 4>	<0.546 7, 0.399 1>	<0.000 2, 0.987 5>	<0.015 4, 0.934 4>	<0.454 1, 0.463 0>	<0.089 9, 0.873 2>	<0.227 7, 0.722 2>	<0.087 4, 0.882 0>
C	<0.960 4, 0.020 3>	<0.438 0, 0.338 2>	<0.738 0, 0.222 9>	<0.812 7, 3.0098 5>	<0.255 7, 0.541 1>	<0.074 9, 0.893 4>	<0.964 5, 0.026 8>	<0.280 3, 0.664 0>	<0.681 6, 0.261 6>
D	<0.470 5, 0.318 6>	<0.005 7, 0.924 8>	<0.542 8, 0.402 9>	<0.038 0, 0.805 0>	<0.265 1, 0.531 1>	<0.318 2, 0.601 9>	<0.734 8, 0.209 9>	<0.160 9, 0.799 0>	<0.485 5, 0.442 0>
E	<0.122 1, 0.659 7>	<0.007 4, 0.913 7>	<0.393 8, 0.550 3>	<0.000 0, 0.997 4>	<0.253 7, 0.543 3>	<0.434 7, 0.482 1>	<0.684 7, 0.252 4>	<0.179 1, 0.777 7>	<0.310 3, 0.620 4>
F	<0.551 7, 0.260 9>	<0.000 6, 0.976 2>	<0.312 0, 0.635 7>	<0.000 3, 0.982 0>	<0.214 0, 0.587 8>	<0.144 2, 0.803 1>	<0.124 9, 0.827 5>	<0.195 9, 0.758 2>	<0.116 0, 0.845 6>
G	<0.724 9, 0.150 7>	<0.004 0, 0.937 0>	<0.272 7, 0.678 0>	<0.003 8, 0.938 0>	<0.217 8, 0.583 3>	<0.474 6, 0.443 2>	<0.931 2, 0.052 3>	<0.273 8, 0.671 0>	<0.744 0, 0.207 6>
H	<0.335 3, 0.427 0>	<0.044 8, 0.788 3>	<0.668 2, 0.285 7>	<0.208 8, 0.534 0>	<0.222 6, 0.577 8>	<0.249 7, 0.677 5>	<0.996 6, 0.002 6>	<0.141 1, 0.822 4>	<0.753 4, 0.199 6>
I	<0.715 2, 0.156 5>	<0.076 1, 0.724 1>	<0.862 9, 0.114 3>	<0.003 6, 0.940 0>	<0.808 1, 0.111 1>	<0.174 9, 0.765 2>	<0.744 4, 0.201 9>	<0.341 4, 0.598 6>	<0.457 1, 0.469 6>
J	<0.244 2, 0.513 0>	<0.001 2, 0.965 4>	<0.578 9, 0.368 6>	<0.001 8, 0.957 9>	<0.222 6, 0.577 8>	<0.253 1, 0.673 6>	<0.966 4, 0.025 3>	<0.203 9, 0.749 1>	<0.794 2, 0.165 2>

### 1.3.2 低渗碳酸盐岩气藏有利区优选

首先,为了确保评价信息的可比性和一致性,需要按照式(2)、式(3)对直觉模糊评价矩阵当中的信息进行加权处理,从而得到加权直觉模糊决策矩阵。

然后,利用式(4),计算出边界近似区域向量  $\mathbf{G}$ ,  $\mathbf{G}=\{g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6, g_7, g_8, g_9\}=\{<0.050\ 8, 0.888\ 2>, <0.003\ 0, 0.964\ 7>, <0.047\ 2, 0.945\ 4>, <0.000\ 3, 0.995\ 8>, <0.015\ 4, 0.966\ 1>, <0.069\ 6, 0.915\ 1>, <0.120\ 7, 0.859\ 7>, <0.065\ 8, 0.924\ 5>, <0.033\ 3, 0.959\ 3>\}$ 。

根据每个区块的属性值与边界近似区域之间的大小关系,利用式(6)得到修正的属性权重  $W_{ij}^*(\omega_j)$ ,其中参数取值<sup>[22]</sup>: $\delta=0.61, \tau=0.69$ 。

随后利用式(7),计算10个待选碳酸盐岩气藏开发有利区块与边界近似区域向量  $\mathbf{G}$  之间在每个属性下的加权距离  $d_{ij}$  (其中参数取值<sup>[22]</sup>: $\zeta=0.88, \sigma=2.25, \xi=0.88$ ),并汇总得到每个区块与  $\mathbf{G}$  之间的整体距  $S_i$ 。相关结果如表5所示。

最后,根据表5对10个待选碳酸盐岩气藏开发有利区块按照整体距离的值进行降序排序可得C区块为最优,排序结果为:C区>I区>H区>A区>D区>G区>J区>E区>F区>B区。

## 2 评价结果对比分析

利用单值TOPSIS法<sup>[23]</sup>和EDAS法<sup>[24]</sup>与提出的直觉模糊MABAC方法进行对比分析。TOPSIS法,也被称作逼近理想解法,其核心思想是,在备选方案集中寻求一个折中解,满足与正理想解距离最近,同时与负理想解距离最

远。正理想解和负理想解的确定是TOPSIS法中至关重要的一步,两者都是从加权归一化后的数据矩阵中挑选,但这样会导致当决策环境和自身条件发生变化时,属性值也相应发生变化,这就有可能引起正理想解和负理想解的改变,从而使排序也随之变化,即发生逆序现象。EDAS法选用所有方案在每个属性下的平均值作为决策标准,同时计算各方案与该决策标准之间的正向距离和负向距离,最终根据正向距离和负向距离的综合情况确定最优方案。与提出的直觉模糊MABAC法相比,当不存在具有冲突性质的属性时,EDAS法不具备很好的适用性。

从表6可以看出,在BWM赋权下的直觉模糊MABAC法所得结果与单值TOPSIS法和EDAS法所得结果基本符合,但E区、F区、J区等区块的优选结果略有不同。

在直觉模糊MABAC法中,J区>E区>F区,但单值TOPSIS法优选结果为F区>E区,单值EDAS方法优选结果为E区>J区。从初始决策矩阵可以看出TOPSIS法过分地强调有效储层厚度对优选结果的影响,EDAS法过分地强调剩余动态储量对优选结果的影响,却忽略了含气饱和度、渗透率等关键因素对于优选的作用。而提出的直觉模糊MABAC多属性决策方法能够同时从支持和反对两方面的证据充分地考虑各个因素对于最终选择的结果,避免了极端值对优选结果的影响和单一评估方法时可能出现的偏差,用该方法选出的区块往往在各属性指标上都有较为不错的表现。

最后,为了进一步验证提出方法的可靠性,采用Fracpro PT软件对E区、F区、J区中代表性井在相同的泵注条件下的压裂裂缝进行数值模拟。由图3可知,E区、F

表5 每个方案与边界近似区域的加权距离与整体距离

Table 5 Overall distance and weighted distance between each scheme and the approximate boundary region

区块	储层厚度	剩余动态储量	含气饱和度	渗透率	孔隙度	泊松比	地层压力	温度	埋深	$S_i$
A	0.005 3	0.001 4	0.000 1	0.001 6	-0.004 0	-0.005 8	0.032 2	-0.002 3	-0.003 3	0.025 2
B	-0.058 2	-0.028 8	0.000 5	-0.001 4	-0.012 1	-0.014 0	-0.061 9	-0.000 6	0.019 2	-0.157 4
C	0.081 7	0.095 1	0.007 6	0.016 7	0.001 5	0.016 6	0.041 0	-0.004 9	-0.007 6	0.247 7
D	0.012 4	-0.007 7	0.000 4	0.000 9	0.001 7	-0.004 0	0.003 2	0.003 3	0.001 1	0.011 2
E	-0.033 1	-0.002 4	-0.008 1	-0.001 6	0.001 4	-0.012 9	-0.004 5	0.002 3	0.006 5	-0.052 4
F	0.018 7	-0.027 7	-0.011 6	-0.001 3	0.000 4	0.009 2	-0.059 6	0.001 5	0.016 5	-0.054 0
G	0.034 6	-0.013 0	-0.013 1	-0.000 4	0.000 5	-0.015 2	0.030 4	-0.004 4	-0.009 8	0.009 7
H	0.002 3	0.013 2	0.004 8	0.003 6	0.000 6	0.002 1	0.071 2	0.004 5	-0.010 1	0.092 3
I	0.033 6	0.021 1	0.014 5	-0.000 4	0.019 3	0.006 8	0.004 1	-0.008 4	0.001 9	0.092 6
J	-0.013 8	-0.023 9	0.001 7	-0.000 9	0.000 6	0.001 9	0.041 9	0.001 1	-0.011 4	-0.002 8

表6 直觉模糊MABAC方法与单值TOPSIS、EDAS方法结果对比

Table 6 Comparison of results between intuitionistic fuzzy MABAC method and single valued TOPSIS and EDAS methods

区块	直觉模糊MABAC排序	EDAS排序	TOPSIS排序
A	4	4	5
B	10	10	10
C	1	1	1
D	5	5	6
E	8	7	9
F	9	9	8
G	6	6	4
H	3	3	3
I	2	2	2
J	7	8	7

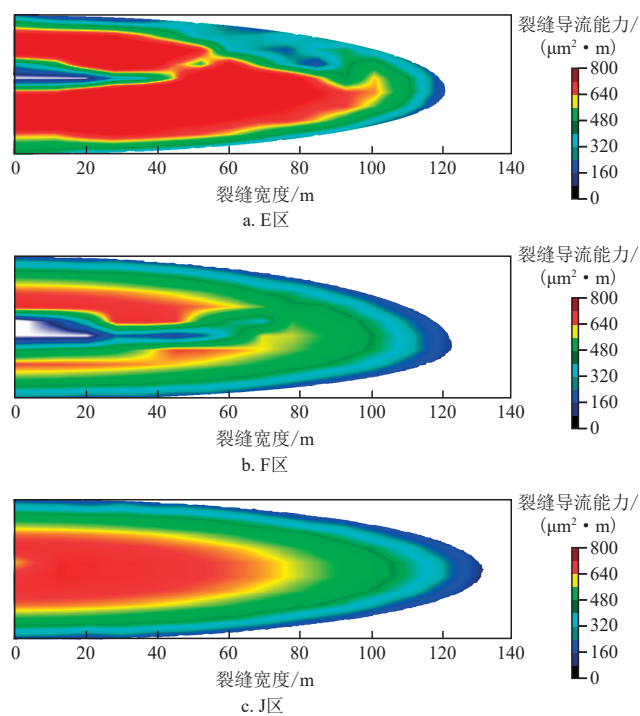


图3 E区、F区、J区代表性井压裂后裂缝导流能力示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fracture conductivity of representative wells in E block, F block and J block after fracturing

区、J区的支撑缝长分别为120.9、121.5、132.5 m,支撑缝长的影响因素比较复杂,地质与工程因素共同影响。J区具有最大的支撑缝长,E区的支撑缝长最小,同时与F区相差不大,但E区的导流能力比F区要强,于是,所得结论与优选出的结果一致:J区>E区>F区。故所提方法模型在处理具有模糊性的评价问题方面具有良好的灵活性和

表达能力,更能为低渗碳酸盐岩开发有利区块优选提供可靠的参考,可在实际中推广使用。

### 3 结论

通过建立低渗碳酸盐岩气藏有利区优选的关键性评价指标的评价体系,提出BWM赋权下的直觉模糊MABAC碳酸盐岩气藏有利区优选模型。该模型利用最优最劣法(BWM)确定属性权重,能够同时考虑多个因素对不同的方案的影响且可以清楚地了解因素之间的优先级关系,因素的重要性程度依次为剩余动态储量、有效储层厚度、地层压力、含气饱和度、孔隙度、泊松比、渗透率、埋深、温度;同时采用改进的直觉模糊MABAC法对碳酸盐岩气藏开发有利区进行优选,考虑支持和反对两方面的证据,给出了更加合理的碳酸盐岩气藏有利区优选评价结果。

利用中国10个待选低渗碳酸盐岩开发有利区块进行实证研究并与其他方法对比,结果表明该方法在处理具有模糊性的评价问题方面具有良好的灵活性和表达能力,避免了使用单一评估方法时可能出现的偏差,使得评价结果更为有效合理。

#### 参考文献

- [1] 史亚红,陈文安,李纲,等. 凤西混积碳酸盐岩储层测井流体识别及定量评价[J]. 石油地质与工程, 2023, 37(5): 10-16.  
SHI Yahong, CHEN Wen'an, LI Gang, et al. Logging fluid identification and quantitative evaluation of mixed carbonate reservoir in Fengxi area[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2023, 37(5): 10-16.
- [2] 于吉旺,庞雄奇,郑定业,等. 普光地区深层碳酸盐岩气藏主控因素及有利区预测[J]. 特种油气藏, 2022, 29(3): 28-35.  
YU Jiawang, PANG Xiongqi, ZHENG Dingye, et al. Main controlling factors and favorable area prediction of deep carbonate gas reservoirs in Puguang Area[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2022, 29(3): 28-35.
- [3] 祝渭平,姚清洲,李闯,等. 塔中低凸起奥陶系深层鹰山组三、四段碳酸盐岩油气成藏要素及有利区带[J]. 地球科学, 2023, 48(2): 690-704.  
ZHU Weiping, YAO Qingzhou, LI Chuang, et al. Hydrocarbon accumulation factors and favorable exploration of carbonate reservoirs in the 3rd-4th members of Ordovician Yingshan Formation of Tazhong Low Salient[J]. Earth Science, 2023, 48(2): 690-704.
- [4] 贾俊. 叙利亚Tishirine油田复杂碳酸盐岩储层有效性综合评价[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(2): 30-36.  
JIA Jun. Comprehensive evaluation for effectiveness of complex carbonate reservoir: A case from Tishirine Oilfield in Syria, Syria[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(2): 30-36.
- [5] 季天恩. 塔里木盆地中一下寒武统台缘带分布、沉积相及有利区的地震解释研究[D]. 西安: 西北大学, 2021.

- Ji Tianyu, Seismic interpretation of the platform margin distribution, sedimentary facies and favorable areas of middle-lower Cambrian in Tarim Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2021.
- [6] 陈思禹,王颖晋,郭俊阳,等.塔中东部碳酸盐岩储集层特征对比及勘探开发有利区预测[J].东北石油大学学报,2021,45(2):10-19.  
CHEN Siyu, WANG Yingjin, GUO Junyang, et al. Comparison of carbonate reservoir characteristics in Eastern Tazhong Block of Tarim Basin and prediction of favorable development zone[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2021, 45(2): 10-19.
- [7] 彭勇民,龙胜祥,何希鹏,等.彭水地区常压页岩气储层特征及有利区评价[J].油气藏评价与开发,2020,10(5):12-19.  
PENG Yongmin, LONG Shengxiang, HE Xipeng, et al. Characteristics of normal-pressure shale gas reservoirs and evaluation of its favorable areas in Pengshui[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(5): 12-19.
- [8] 徐腾.川东地区下三叠统嘉陵江组二段储层特征及有利储层发育区预测[D].成都:成都理工大学,2021.  
XU Teng. Reservoir characteristics of the second member of Lower Triassic Jialingjiang formation and prediction of favorable reservoir development area in eastern Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- [9] 戴明刚,雷海飞,凌安航,等.太原地区奥陶系碳酸盐岩热储特征及勘探有利区[J].天然气工业,2020,40(4):143-155.  
DAI Minggang, LEI Haifei, LING Anhang, et al. Thermal reservoir characteristics and favorable targets of Ordovician carbonate rocks in the Taiyuan area[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(4): 143-155.
- [10] 张立安,王少鹏,张岚,等.通过地质建模剖析古潜山碳酸盐岩裂缝性储层地质特征[J].油气藏评价与开发,2021,11(5):688-693.  
ZHANG Li'an, WANG Shaopeng, ZHANG Lan, et al. Analysis on geological characteristics of fractured carbonate reservoir in buried-hill by geological modeling[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(5): 688-693.
- [11] 王志伟,张凯,武群虎,等.基于井震裂缝识别敏感性参数模型的碳酸盐岩储层裂缝预测方法[J].煤田地质与勘探,2023,51(6):163-174.  
WANG Zhiwei, ZHANG Kai, WU Qunhu, et al. A method for predicting fractures in carbonate reservoirs based on fracture identification-sensitive log-seismic parameter model[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(6): 163-174.
- [12] 袁倩.川东北地区黄龙场构造飞仙关组储层特征及有利区优选[D].成都:西南石油大学,2019.  
YUAN Qian. Reservoir characteristics and favorable area selection of Feixianguan Formation in Huanglongchang structure in Northeast Sichuan[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [13] 孙斌,张培先,高全芳,等.川东南南川地区茅口组一段碳酸盐岩储层特征及富集模式[J].非常规油气,2022,9(3):21-31.  
SUN Bin, ZHANG Peixian, GAO Quanfang, et al. Reservoir properties and accumulation mode of carbonate rocks in Mao1 Member of Nanchuan Area in southeast Sichuan[J]. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9(3): 21-31.
- [14] 周红,朱芳冰.基于优化组合权—灰关联—TOPSIS的页岩气有利区优选[J].地质科技情报,2018,37(5):106-113.  
ZHOU Hong, ZHU Fangbing. Optimization of favorable areas of shale gas based on optimal combination weights and grey correlation and TOPSIS[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(5): 106-113.
- [15] 马旭,杨双春,李秉繁,等.基于改进AHP-熵权法和TOPSIS的火山岩气藏开发方案优选[J].新疆石油地质,2017,38(3):325-330.  
MA Xu, YANG Shuangchun, LI Bingfan, et al. Optimization of volcanic gas reservoir development program based on the improved AHP-entropy weight method and TOPSIS[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(3): 325-330.
- [16] 李婷.基于随机模拟的油田开发规划二步决策优选方法[J].世界石油工业,2022,29(5):39-45.  
LI Ting. Two-step decision optimization method of oilfield development planning based on stochastic simulation[J]. World Petroleum Industry, 2022, 29(5): 39-45.
- [17] 杨兆中,杨晨曦,李小刚,等.基于灰色关联的逼近理想解排序法的煤层气井重复压裂选井——以沁水盆地柿庄南区块为例[J].科学技术与工程,2020,20(12):4680-4686.  
YANG Zhaozhong, YANG Chenxi, LI Xiaogang, et al. Multiple fracturing well selection of coalbed methane wells based on technique for order preference by similarity to ideal solution method of gray correlation: Taking the case of Qinshui Basin Shizhuang South Block as an examples[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(12): 4680-4686.
- [18] PAMUČAR D, ČIROVIĆ G. The selection of transport and handling resources in logistics centers using Multi-Attributive Border Approximation area Comparison (MABAC) [J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(6): 3016-3028.
- [19] 彭定洪,黄子航,罗雪,等.基于情景模糊动态MABAC的可再生能源选择方法[J].环境科学研究,2019,32(3):532-538.  
PENG Dinghong, HUANG Zihang, LUO Xue, et al. Renewable energy selection method based on picture fuzzy dynamic MABAC[J]. Environmental Science Research, 2019, 32(3): 532-538.
- [20] REZAEI J. Best-worst multi-criteria decision-making method[J]. Omega: The international journal of management science, 2015, 53: 49-57.
- [21] 王思航,田小林,王楚柯,等.模糊相似法对页岩气选区评价的应用——以四川盆地海相页岩气为例[J].油气藏评价与开发,2018,8(1):71-75.  
WANG Sihang, TIAN Xiaolin, WANG Chuke, et al. Application of fuzzy similarity methods for evaluating the district of shale gas: A case of marine shale gas in Sichuan Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(1): 71-75.
- [22] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty[J]. Journal of Risk and Uncertainty, 1992, 5(4): 297-323.
- [23] HUANG C L, YOON K. Multiple attribute decision making: Methods and applications: A state-of-the-art survey[M]. Heidelberg: Springer Berlin, 1981.
- [24] KESHAVARZ-GHORABAE M, ZAVADSKAS E K, OLFAT L, et al. Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS) [J]. Informatica, 2015, 26(3): 435-451.