

文章编号: 2095-2163(2024)01-0043-07

中图分类号: TE972.2

文献标志码: A

# 盐岩储气库稳定性评估模型与应用研究

骆正山<sup>1</sup>, 宁清云<sup>1</sup>, 骆济豪<sup>2</sup>

(1 西安建筑科技大学 管理学院, 西安 710055; 2 北京理工大学 睿信学院, 北京 102488)

**摘要:** 为了解决盐岩储气库稳定性评估的模糊性和不确定性问题,降低事故发生的概率,提高判断准确度,将功效系数法引入盐岩储气库系统的评估与控制中,提出一种基于集成赋权-功效系数法的盐岩储气库稳定性评估模型。在所建评估体系下,运用反熵权法(AEW)、决策试验和评价试验法(DEMATEL)、改进组合数的有序加权平均C-OWA算子计算指标权重,三者优势互补,削弱了单一赋权方法的不足,并利用乘法合成原理获得综合权重。通过计算盐岩储气库的总功效系数值,评估整个系统的风险等级,最后利用实例,验证了模型的适用性与有效性。验证结果表明:该模型赋权方法可靠,计算结果贴近实际情况,能有效评估盐岩储气库的状态。

**关键词:** 安全系统科学; 盐岩储气库; 功效系数法; 组合赋权; 稳定性评估

## Stability assessment of gas storage reservoirs based on integrated assignment-efficacy factor

LUO Zhengshan<sup>1</sup>, NING Qingyun<sup>1</sup>, LUO Jihao<sup>2</sup>

(1 School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2 Ruixin Institute, Beijing Institute of Technology, Beijing 102488, China)

**Abstract:** In order to reduce the probability of accidents and improve the accuracy of judgments, the stability assessment model of salt rock gas storage based on the integrated assignment-efficacy coefficient method is established to address the ambiguity and uncertainty of salt rock gas storage stability assessment, and the efficacy coefficient method is introduced into the assessment and control of salt rock gas storage system for the first time. Under the established assessment system, the inverse entropy weighting method (AEW), decision making test and evaluation test method (DEMATEL), and the ordered weighted average C-OWA operator with improved combination numbers are used to calculate the index weights, and the advantages of the three complement each other to weaken the shortcomings of a single assignment method, and the principle of multiplicative synthesis is used to obtain the integrated weights. By calculating the total efficacy coefficient value of salt rock gas storage, the risk level of the whole system is assessed, and finally the applicability and effectiveness of the model are verified by using examples. The results show that the model is reliable, the calculation results are close to the actual situation, and it can effectively evaluate the state of salt rock gas storage.

**Key words:** safety system science; salt rock gas storage; efficacy coefficient method; combination weighting; stability assessment

## 0 引言

近年来,中国清洁能源消费量逐步增加,消费区对天然气输送与储存工程的依赖不断增强,因此发展稳定安全的能源储备设施具有重大意义<sup>[1]</sup>。相比其他类型的储备设施,盐岩储气库因具有渗透率低、注采速率快等优势而受到广泛关注<sup>[2-3]</sup>。但高强度循环注采对系统冲击大,若不能准确判断稳定程度,

一旦发生事故,将致储气库运营失效,严重时会引起社会动荡<sup>[4-5]</sup>。因此,探究地下储气库失稳影响因素,建立高精度的稳定性评估模型意义重大。

目前,国内外学者对盐岩储气库安全方面的研究,主要集中在构建岩体本构模型及模拟储气库运行时的性质。王粟、付兴等<sup>[6-7]</sup>分别利用FLAC 3D模拟注采过程,得到不同运行条件对储气库稳定的影响,并进行参数优化;王志荣等<sup>[8]</sup>通过建立夹层

基金项目: 国家自然科学基金(41877527)。

作者简介: 宁清云(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:储气库风险评估。

通讯作者: 骆正山(1969-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:油气管道、储气库风险评估、建模与方法。Email:549207144@qq.com

收稿日期: 2023-01-12

力学模型并结合蠕变试验,提出计算夹层垮塌时间的方法;Zhang等<sup>[9]</sup>研究气水渗流规律,提出改善渗流条件以保证储气库稳定;Wang等<sup>[10]</sup>建立有限元模型,揭示了储气库失效和高风险区域的分布状况。以上研究结果的可靠程度依赖于输入参数的准确性,而储气库属于复杂的大型地下工程,其部分参数信息的获取难度大且带有随机性与模糊性,通常其评价指标须借助专家的经验判断,而忽视了人员因素缺乏对系统整体的考量。当前对储气库整体稳定性进行多指标定量评估的研究较少。姜德义等<sup>[11]</sup>用集对分析法和熵权法分别确定评价指标的权重与联系度,进而确定储气库稳定等级。但未考虑到主观因素,易导致结果偏差;Tan等<sup>[12]</sup>采用有限区间云模型和遗传算法组合加权的评价方法,确定地下空间的适宜等级,但权重的组合未解决遗传算法过早收敛的问题;毕傲睿<sup>[13]</sup>根据直觉模糊评价信息计算指标权重,通过物元可拓法建立储气库安全评价模型。而物元可拓的评价对象受到限制因素较多,计算结果主观随意性较强。

综上,为弱化专家认知偏差所致强主观干扰,本研究采用决策试验和评价试验法耦合C-OWA算子确定指标主观权重,可同时考虑指标的重要度与指标间的影响程度,并通过反熵权法避免客观权重出现极端值,保证精确度。因功效系数法适用于评估多层次的复杂对象,可避免评价标准单一而造成误差,适合储气库稳定性评估,为此本研究首次将其引入该领域,构建集成赋权-功效系数法的储气库稳

$$\mu_4 = \begin{cases} [1 - (x_{\min} - x_i) / (x_{\min} - x_{n\min})] \times 40 + 60, & x_i < x_{\min} \\ 100, & x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \\ [1 - (x_i - x_{\max}) / (x_{n\max} - x_{\max})] \times 40 + 60, & x_i > x_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x_{\min}$ 、 $x_{\max}$ 分别为区间下限值与上限值, $x_{n\min}$ 、 $x_{n\max}$ 分别为下限与上限不允许值。

(3) 计算总功效系数值 $G$ ,计算公式如式(5)所示:

$$G = \sum_{i=1}^m \mu_i w_{ci} \quad (5)$$

式中: $G$ 为总功效系数值, $\mu_i$ 为第 $i$ 个指标的单项功效系数, $w_{ci}$ 为对应的综合权重。

## 2 盐岩储气库稳定性评估模型构建

### 2.1 稳定性评价指标体系构建

地下盐岩储气库的稳定性受诸多因素影响,不

定性评估模型。该模型克服单一赋权法的偏差,结合功效系数法提高了评估结果的准确性,并通过实例验证模型的适用性与可靠性,以期对储气库的安全管理提供参考借鉴。

### 1 功效系数法原理

功效系数法限定了单项评价值的取值范围,削弱了单项评价值过高,对综合评价产生的不利影响,评价值可展现各评估对象之间的差距<sup>[14]</sup>。原理如下:

(1) 设定评价指标的满意值与不允许值。满意值为指标达到最高水平的优值,不允许值是指标不应出现的劣值。

(2) 计算指标的单项功效系数值。根据指标与单项功效系数的关系,将指标分为极大型、极小型、稳定型和区间型指标,其单项功效系数确定函数分别为 $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 、 $\mu_3$ 、 $\mu_4$ ,如式(1)~式(4)所示:

$$\mu_1 = \begin{cases} (x_i - x_{ni}) / (x_{mi} - x_{ni}) \times 40 + 60, & x_i < x_{mi} \\ 100, & x_i \geq x_{mi} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_i$ 为第 $i$ 个指标实际观测值, $x_{mi}$ 、 $x_{ni}$ 分别为第 $i$ 个指标满意值与不允许值。

$$\mu_2 = \begin{cases} (x_i - x_{ni}) / (x_{mi} - x_{ni}) \times 40 + 60, & x_i > x_{mi} \\ 100, & x_i \leq x_{mi} \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_3 = \left( 1 - \frac{|x_i - x_{mi}|}{|x_{ni} - x_{mi}|} \right) \times 40 + 60 \quad (3)$$

仅包括区域地层形态特征、岩石力学特性,还包括腔体的形态特征与运行情况。文献[15]在分析关键影响因素的基础上,梳理前人相关研究,关于盐岩储气库的稳定性主要涉及盐岩溶腔稳定、盐岩力学参数适宜、运行状态稳定等3个方面,三者须同时稳定才能保证储气库稳定运营,且溶腔承压能力受夹层的作用极大<sup>[3]</sup>。确定各级指标及换算后的分值等级标准范围,见表1,构建盐岩储气库稳定性评价模型计算结构如图1所示。

表 1 评价指标体系与分级标准

Table 1 Evaluation index system and grading standards

目标层	准则层	指标层	V 级	IV 级	III 级	II 级	I 级	说明
			不稳定	欠稳定	较稳定	稳定	很稳定	
盐岩储气库稳定	A 盐岩溶腔参数	A1 腔体埋深	400-580 或 1 080-1 300	580-610 或 1 040-1 080	610-640 或 1 000-1 040	640-670 或 950-1 000	670-810 或 810-950	稳定型
		A2 套管鞋高度	0-0.56 或 1.94-2.5	0.56-0.63 或 1.87-1.94	0.63-0.70 或 1.80-1.87	0.70-0.80 或 1.70-1.80	0.80-1.25 或 1.25-1.70	稳定型
		A3 顶板厚度	0-0.28 或 1.44-2.00	0.28-0.32 或 1.40-1.44	0.32-0.35 或 1.30-1.40	0.35-0.40 或 1.20-1.30	0.40-0.50 或 0.50-1.20	稳定型
		A4 溶腔形状	0.4-1.0	0.3-0.4	0.2-0.3	0.1-0.2	0-0.1	极小型
		A5 溶腔间距	0-1.13 或 3.87-5	1.13-1.26 或 3.74-3.87	1.26-1.41 或 3.59-3.74	1.41-1.59 或 3.41-3.59	1.59-2.5 或 2.5-3.41	稳定型
	B 盐岩力学参数	B1 夹层层数	4	3	2	1	0	极小型
		B2 夹层含量	10.0-100	5.0-10.0	2.9-5.0	1.3-2.9	0-1.3	极小型
		B3 弹性模量(E/GPa)	0-5.0	5.0-7.0	7.0-9.4	9.4-12.5	12.5-20.0	极大型
		B4 凝聚力(c/MPa)	0-1.00	1.00-1.54	1.54-2.17	2.17-3.00	3.00-5.00	极大型
		B5 内摩擦角( $\varphi/^\circ$ )	0-30.0	30.0-32.7	32.7-35.9	35.9-40.0	40.0-50.0	极大型
		B6 稳态蠕变率( $\epsilon_s/10^{-4}/h$ )	3.0-6.0	2.6-3.0	2.1-2.6	1.5-2.1	0-1.5	极小型
	C 运行状态参数	C1 地层破裂压力与最大内压比	0-1.6	1.6-1.7	1.7-1.8	1.8-1.9	1.9-2.0	极大型
		C2 最小内压	0-0.94 或 1.46-2.40	0.94-0.98 或 1.42-1.46	0.98-1.02 或 1.38-1.42	1.02-1.08 或 1.32-1.38	1.08-1.20 或 1.20-1.32	稳定型
		C3 最大内压	0-0.78 或 1.22-2.00	0.78-0.82 或 1.18-1.22	0.82-0.85 或 1.15-1.18	0.85-0.90 或 1.10-1.15	0.90-1.00 或 1.00-1.10	稳定型
		C4 最大采气速率	0-0.83 或 1.18-2.0	0.83-0.85 或 1.15-1.18	0.85-0.88 或 1.12-1.15	0.88-0.92 或 1.08-1.12	0.92-1.00 或 1.00-1.08	稳定型
C5 邻腔压差(P/MPa)		4.0-5.0	3.0-4.0	2.0-3.0	1.0-2.0	0-1.0	极小型	

表 2 指标单项功效系数值及特征值

Table 2 Individual efficacy coefficient values and eigenvalues of indicators

指标	指标单项功效系数值	特征值	
		满意值	不允许值
A1	67.35	1 300.00	810.00
A2	76.00	0.00	1.25
A3	69.60	0.00	0.50
A4	67.20	1.00	0.00
A5	72.80	0.00	2.50
B1	80.00	4.00	0.00
B2	61.20	100.00	0.00
B3	63.00	0.00	20.00
B4	90.40	0.00	5.00
B5	68.00	0.00	50.00
B6	92.00	6.00	0.00
C1	64.80	0.00	2.00
C2	72.33	0.00	1.20
C3	77.20	0.00	1.00
C4	66.00	0.00	1.00
C5	74.00	5.00	0.00

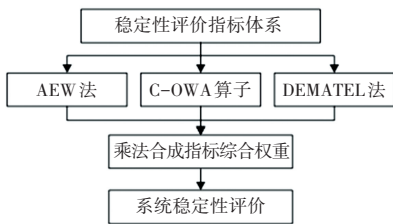


图 1 盐岩储气库稳定性评价模型结构

Fig. 1 Stability evaluation model structure of salt rock gas storage reservoirs

2.2 指标满意值与不允许值的确定

为使指标值处于满意值与不允许值区间内,取极小型指标的 V 级和 I 级极限值作为指标的满意值和不允许值,取极大型指标的 V 级和 I 级极限值作为指标的满意值和不允许值,而稳定型指标的值按实测数据所处区间而定,见表 2。

### 2.3 指标单项功效系数值

各指标分别按照所属类型计算其单项功效系数值。如:弹性模量等为极大型指标,采用式(1)计算;稳态蠕变率等为极小型指标,采用式(2)计算;顶板厚度等为稳定型指标,采用式(3)计算,见表2。

### 2.4 确定指标综合权重

为避免单一赋权法的弊端,本文采用集成赋权的思想,同时考虑盐岩储气库评价状态的局部差异度及专家主导性。利用 AEW 计算指标客观权重,而对数据信息外的情况则采用 DEMATEL 与 C-OWA 算子组合计算权重。三者联合,用以削弱专家主观上的认知偏差,且在一定程度上避免客观赋权方法过度削弱异常值而导致权重分配均衡化的弊端,提高了结果的可靠程度。

#### 2.4.1 反熵权法

反熵权法(AEW)相较于熵权法,降低了对指标的敏感性,能有效解决个别权重出现极端值或信息遗漏的问题<sup>[16-17]</sup>,方法如下:

(1)建立观测数据评价矩阵。设有  $n$  个评估对象,  $m$  个评价指标,可得矩阵  $X_o = (x_{oj})_{m \times n}$ 。式中,  $x_{oj}$  表示第  $i$  个指标第  $j$  个对象的实际观测值,  $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$ 。

(2)观测数据标准化处理。按照影响效果,盐岩储气库的稳定性评价指标分为效益型、成本型以及区间型,处理后将指标观测值映射至  $[0, 1]$  内,计算方法参照文献<sup>[17]</sup>。处理后得到标准化矩阵  $Y = (y_{ij})_{m \times n}$ 。式中,  $y_{ij}$  表示第  $i$  行第  $j$  列的元素,  $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$ 。

(3)计算第  $i$  个指标的反熵值  $E_i$ , 如式(6)所示:

$$E_i = - \sum_{j=1}^n p_{ij} \ln(1 - p_{ij}) \quad (6)$$

$$p_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij} \quad (7)$$

(4)计算第  $i$  个指标的权重  $w_{oi}$ , 如式(8)所示:

$$w_{oi} = E_i / \sum_{i=1}^m E_i \quad (8)$$

#### 2.4.2 DEMATEL 法

决策试验和评价试验法(DEMATEL)是利用矩阵和图论分析系统要素的方法,适用于复杂系统问题,能理清各指标间的逻辑关系<sup>[18-19]</sup>,方法如下:

(1)邀请  $n$  位相关领域的专家学者,对评价指标间的影响程度按照 0~4 分进行打分,收集处理并建立直接影响矩阵  $D$ , 如式(9)所示:

$$D = \begin{cases} 0 & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & 0 & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & 0 & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & 0 & \vdots & \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj} & \cdots & 0 \end{cases} \quad (9)$$

(2)对直接影响矩阵  $D$  做归一化处理,获得规范化的直接影响矩阵  $Z$ , 如式(10)所示:

$$Z = x_{ij} / \left[ \max \left( \sum_{j=1}^n x_{ij} \right) \right] \quad (10)$$

(3)计算综合影响矩阵  $T$ , 如式(11)所示:

$$T = Z + Z^2 + \cdots + Z^k = Z(I - Z)^{-1} \quad (11)$$

(4)求影响度  $r_i$  与被影响度  $c_i$ 。  $r_i$  表示各要素对其他要素的影响程度;  $c_i$  指要素受到其它要素的影响程度,如式(12)所示。

$$\begin{cases} r_i = [r_i]_{n \times 1} = \left[ \sum_{j=1}^n t_{ij} \right]_{1 \times n} \\ c_i = [c_i]_{n \times 1} = \left[ \sum_{i=1}^n t_{ij} \right]_{n \times 1}^T \end{cases} \quad (12)$$

当  $i = j$  时,  $r_i + c_i$  为中心度,反映因素在指标体系中的位置及作用程度。

(5)求指标权重  $w_{di}$ , 如式(13)所示:

$$w_{di} = \frac{r_i + c_i}{\sum (r_i + c_i)} \quad (13)$$

#### 2.4.3 C-OWA 算子

C-OWA 算子是对有序加权平均 OWA 算子的改进,利用加权组合数的形式,连接权重和重要度,保证专家意见的公平性,削弱了极值的负面作用<sup>[20]</sup>,与 DEMATEL 法形成互补。计算步骤如下:

(1)邀请  $n$  位相关领域的专家学者对相同层次指标的重要度打分,收集初始决策数据集  $A = \{a_{1j}, a_{2j}, \cdots, a_{nj}\}$ , 并遵循由大到小的顺序,对元素从 0 开始编号,得到决策数据集  $B = \{b_{0j}, b_{1j}, \cdots, b_{(n-1)j}\}$ 。

(2)计算决策数据集  $B$  的位置权重向量  $\eta_i$ , 如式(14)所示:

$$\eta_i = \frac{C_{n-1}^i}{\sum_{k=0}^{n-1} C_{n-1}^k} = \frac{C_{n-1}^i}{2^{n-1}} \quad (14)$$

式中:  $C_{n-1}^i$  表示在  $n-1$  个数据中选取  $i$  个数据的组合数,  $i \in [0, n-1]$ , 并有  $\sum_{i=0}^{n-1} \eta_i = 1$ 。

(3)计算各个指标的绝对权重  $\lambda_j$ , 如式(15)所示:

$$\lambda_j = \sum_{i=0}^{n-1} \eta_i b_{ij} \quad (15)$$

式中:  $j = 1, 2, \dots, m, m$  为指标数。

(4) 计算各指标的相对权重  $w_{ci}$ , 如式 (16) 所示:

$$w_{ci} = \lambda_j / \sum_{j=1}^m \lambda_j \quad (16)$$

### 2.4.4 综合权重确定

对 DEMATEL 与 C-OWA 算子的权重加和后, 取算数平均, 如式 (17) 所示, 得到主观权重集  $w_s = \{w_{si} \mid 1 \leq i \leq m\}$ , AEW 法得到客观权重集为  $w_o = \{w_{oi} \mid 1 \leq i \leq m\}$ , 采用乘法合成法确定综合权重  $w = \{w_i \mid 1 \leq i \leq m\}$ 。该方法对指标评价价值变动的反映比加法合成更敏感, 且避免产生线性补偿问题。由于积式运算的性质, 乘法合成的结果可体现指标评价价值中较小数的作用, 保证信息不丢失<sup>[21]</sup>。计算如式 (18) 所示:

$$w_{si} = (w_{di} + w_{ci}) / 2 \quad (17)$$

$$w_i = \frac{w_{oi} w_{si}}{\sum_{i=1}^m w_{oi} w_{si}} \quad (18)$$

### 2.5 确定总功效系数值

参考《石油行业安全生产标准化井下作业实施规范》<sup>[22]</sup>, 将盐岩储气库稳定程度分为 5 个等级, 考虑到功效系数值越大表明系统状态越不稳定的特点, 进而获得稳定程度分值区间, 见表 3。将样本计算获得的总功效系数值代入表 3, 得出盐岩储气库的稳定等级。

表 3 盐岩储气库稳定等级对照表

Table 3 Comparison table of stability levels of salt rock gas storage reservoirs

稳定等级	分值区间	等级说明
I 级	[0,60)	很稳定
II 级	[60,70)	稳定
III 级	[70,80)	较稳定
IV 级	[80,90)	欠稳定, 处临界状态
V 级	[90,100]	不稳定, 不安全

### 3 实证分析

为验证该评估模型的准确性, 取金坛某储气库工程数据进行验证, 各指标参数见表 4。

针对 16 个影响因素设计打分表, 量化多维度指标体系中的各个因素间的相互影响关系。邀请相关领域的专家教授共 6 人, 采用 0~4 标度打分 (“4” 表示有很强影响, “3” 表示有较强影响, “2” 表示有一般程度影响, “1” 表示有弱影响, “0” 表示无影响)。回收并汇总打分表, 累加获得表中各量化影响关系的数值之和, 进而得到直接影响矩阵  $D$ , 并请专家对指标的重要度打分, 得到初始决策数据集矩阵  $A$ 。分别处理算得主观权重集  $w_d$  与  $w_c$ , 并求得合成权重集  $w_s$ 。同客观权重集  $w_o$  进行乘法合成, 得到综合权重  $w$ , 进而通过该模型算得总功效系数。权重与总功效系数值结果见表 4。

$D =$	$\begin{bmatrix} 0 & 16 & 20 & 16 & 19 & 6 & 13 & 13 & 13 & 12 & 14 & 19 & 19 & 18 & 18 & 17 \\ 10 & 0 & 14 & 15 & 9 & 9 & 8 & 4 & 0 & 3 & 0 & 15 & 9 & 7 & 14 & 2 \\ 11 & 18 & 0 & 18 & 14 & 10 & 4 & 2 & 3 & 2 & 3 & 16 & 19 & 19 & 8 & 13 \\ 10 & 17 & 19 & 0 & 20 & 7 & 3 & 4 & 5 & 2 & 3 & 18 & 18 & 20 & 17 & 21 \\ 11 & 7 & 10 & 15 & 0 & 5 & 5 & 2 & 0 & 0 & 3 & 15 & 17 & 17 & 13 & 21 \\ 3 & 12 & 14 & 17 & 15 & 0 & 12 & 10 & 11 & 11 & 11 & 13 & 15 & 18 & 14 & 16 \\ 11 & 18 & 15 & 16 & 16 & 13 & 0 & 4 & 2 & 4 & 3 & 16 & 14 & 21 & 15 & 13 \\ 10 & 9 & 9 & 21 & 8 & 10 & 16 & 0 & 11 & 17 & 20 & 19 & 10 & 12 & 8 & 13 \\ 9 & 7 & 11 & 18 & 11 & 12 & 15 & 11 & 0 & 20 & 17 & 16 & 13 & 12 & 11 & 12 \\ 8 & 11 & 14 & 16 & 16 & 9 & 17 & 14 & 15 & 0 & 12 & 17 & 6 & 5 & 7 & 9 \\ 11 & 13 & 18 & 14 & 20 & 8 & 17 & 12 & 15 & 14 & 0 & 13 & 17 & 19 & 12 & 15 \\ 9 & 14 & 9 & 11 & 11 & 10 & 6 & 5 & 4 & 6 & 7 & 0 & 15 & 19 & 16 & 16 \\ 11 & 17 & 15 & 21 & 20 & 4 & 2 & 2 & 1 & 2 & 3 & 13 & 0 & 7 & 12 & 22 \\ 9 & 15 & 16 & 19 & 20 & 6 & 3 & 3 & 0 & 3 & 2 & 20 & 7 & 0 & 13 & 21 \\ 7 & 14 & 10 & 14 & 13 & 5 & 1 & 2 & 1 & 0 & 2 & 16 & 0 & 2 & 0 & 10 \\ 10 & 8 & 14 & 17 & 18 & 5 & 3 & 2 & 1 & 2 & 1 & 14 & 11 & 15 & 16 & 0 \end{bmatrix}$	$A =$	$\begin{bmatrix} 4 & 3 & 3 & 3 & 4 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 1 & 2 & 1 \\ 3 & 1 & 4 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 2 & 2 & 3 & 4 & 3 \\ 3 & 3 & 2 & 2 & 4 & 3 \\ 3 & 2 & 3 & 2 & 4 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 2 \\ 3 & 2 & 2 & 2 & 3 & 2 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 2 & 3 & 1 & 1 & 1 & 2 \\ 4 & 3 & 3 & 2 & 4 & 3 \\ 3 & 4 & 3 & 2 & 2 & 3 \\ 4 & 3 & 2 & 3 & 3 & 4 \\ 4 & 3 & 4 & 2 & 3 & 3 \\ 4 & 2 & 3 & 2 & 3 & 3 \\ 3 & 2 & 3 & 2 & 4 & 3 \end{bmatrix}$
-------	--	-------	--

(19)

利用针对复杂系统的多级模糊综合评价方法, 计算该储气库的综合评价矩阵为  $B = [0.129 7,$

$0.168 8, 0.110 7, 0.087 4, 0.056 3]$ , 依据最大隶属度原则, 结合稳定等级对照表, 计算表明该储气库属于

稳定等级。对照此结果及该储气库实际运行情况可知,本稳定性评估模型计算结果准确,可为判断盐岩

储气库的稳定程度提供一种新的思路,具有较好的工程应用前景。

表4 金坛西1储气库观测数据及计算结果

Table 4 Observation data and calculation results of Jintan West 1 gas storage reservoir

指标	观测数据对应值	AEW 法权重	DEMATEL 法权重	C-OWA 算子权重	主观合成权重	综合权重	总功效系数值	评价等级
A1	900.00	0.081 7	0.070 5	0.077 0	0.073 8	0.096 8		
A2	0.75	0.043 7	0.060 4	0.055 8	0.058 1	0.040 7		
A3	0.38	0.069 0	0.068 9	0.052 8	0.060 9	0.067 4		
A4	0.18	0.081 7	0.079 1	0.068 7	0.073 9	0.096 9		
A5	1.70	0.054 9	0.069 8	0.068 7	0.069 3	0.061 0		
B1	2.00	0.029 6	0.057 3	0.061 1	0.059 2	0.028 1		计算结果位于 [60,70)范围内, 储气库属于 稳定等级
B2	3.00	0.114 1	0.053 4	0.047 5	0.050 5	0.092 5	68.659 4	
B3	18.50	0.104 2	0.052 6	0.052 8	0.052 7	0.088 1		
B4	1.20	0.007 0	0.050 6	0.043 8	0.047 2	0.005 3		
B5	40.00	0.077 5	0.049 4	0.037 0	0.043 2	0.053 7		
B6	4.80	0.007 0	0.057 1	0.076 2	0.066 7	0.007 5		
C1	1.76	0.094 4	0.074 3	0.068 7	0.071 5	0.108 3		
C2	0.83	0.057 7	0.064 0	0.076 2	0.070 1	0.064 9		
C3	0.57	0.039 4	0.068 7	0.076 2	0.072 5	0.045 8		
C4	0.85	0.087 3	0.056 1	0.068 7	0.062 4	0.087 4		
C5	1.75	0.050 7	0.067 7	0.068 7	0.068 2	0.055 5		

## 4 结束语

(1)构建包含16个关键因素的评价体系用于判断盐岩储气库的稳定程度,建立了主客观集成赋权-功效系数法的评估模型,并通过计算实际工程数据,经过结果对比后证明该模型合理有效。

(2)指标赋权时,C-OWA算子与DEMATEL法形成互补,将单指标的重要度同指标间的影响程度结合,并用反熵权法保证指标数据完整;乘法合成法可使权重中的较小值起作用,既与C-OWA算子中位置权重的计算思路殊途同归,同时也提高了计算结果对指标值的敏感性。

(3)首次引入功效系数法评估地下盐岩储气库的稳定性,按照行业标准划分盐岩储气库的稳定等级,在盐岩溶腔稳定、盐岩力学参数适宜、运行状态稳定3个主要方面的考虑下,算得的总功效系数值可用于判定稳定性等级。

该方法结合主客观赋权后,能有效防止大型复杂系统在控制层面受单个子系统影响而误判,从而保证评估结果更接近真实。

## 参考文献

[1] 魏国齐,郑雅丽,邱小松,等.中国地下储气库地质理论与应用

[J].石油学报,2019,40(12):1519-1530.

- [2] MA X Q, XU Z J, CHEN L P, et al. Creep deformation analysis of gas storage in salt caverns[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 139(3): 104635.
- [3] 周冬林,王立东,焦雨佳.层状盐岩溶蚀形态特征及主要影响因素[J].油气储运,2019,38(10):1130-1135.
- [4] LI Hugh Z, Saint-Vincent Patricia M B, Mundia-Howe Mumbi, et al. A national estimate of U.S. underground natural gas storage incident emissions[J]. Environmental Research Letters, 2022, 17(8):084013.
- [5] 骆正山,段远哲,王小完,等.高温环境下气藏型储气库泥岩盖层密封性评价[J].中国安全科学学报,2022,32(2):74-82.
- [6] 王粟,武志德,王汉鹏,等.地下盐穴储气库周期注采运行稳定性评价[J].油气储运,2018,37(7):775-779,789.
- [7] 付兴,夏焱,徐孜俊,等.盐穴压缩空气储能腔体稳定性数值模拟[J].地下空间与工程学报,2018,14(S2):930-934,957.
- [8] 王志荣,王永春,高志俭,等.平顶山地下盐穴储气库泥岩夹层稳定性评价[J].高校地质学报,2019,25(1):116-124.
- [9] ZHANG J, FANG F, LIN W, et al. Research on injection-production capability and seepage characteristics of multi-cycle operation of underground gas storage in gas field-Case study of the Wen 23 gas storage[J]. Energies, 2020, 13(15):3829.
- [10] WANG R, YAN Y, LIU Y, et al. Analysis of depleted gas reservoir underground gas storage wellbore integrity change during gas injection and production processes[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 215: 110585.
- [11] 姜德义,彭辉华,赵丽君,等.熵权集对分析法在盐岩储气库稳定性评价中的应用[J].东北大学学报(自然科学版),2017,38(2):284-289.

(下转第55页)