

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.02.027

熵权集对分析法在盐岩储气库稳定性评价中的应用

姜德义¹, 彭辉华¹, 赵丽君¹, 刘春²

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆科技学院 安全工程学院, 重庆 400042)

摘 要: 以盐岩力学参数、储气库腔体参数、储气库运行参数建立储气库稳定性综合评价体系, 利用熵值法和集对分析法分别确定评价指标在该体系中的权重和联系度, 结合两者确定储气库稳定性等级。该方法与灰色关联分析法所得到的评价结果一致, 验证了其科学性和可行性。集对分析法避免了灰色关联分析中由于分辨系数的不确定而导致的结果差异, 更客观地反映了盐岩储气库运营期的稳定性情况, 可以精确得到盐岩储气库所属的稳定性等级, 为工程实践提供更详细的参考。

关键词: 盐岩储气库; 稳定性评价体系; 熵值法; 集对分析; 灰色关联分析

中图分类号: TD 31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)02-0284-06

Application of Set Pair Analysis Method Based on Entropy Weight to the Stability Evaluation of Salt Rock Gas Storage

JIANG De-yi¹, PENG Hui-hua¹, ZHAO Li-jun¹, LIU Chun²

(1. State Key Laboratory for the Coal Mine Disaster Dynamics and Controls, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Safety Engineering College, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 400042, China. Corresponding author: PENG Hui-hua, E-mail: penghui-hua@foxmail.com)

Abstract: To establish a stability evaluation system, the mechanical parameters of salt rocks, cavity parameters of gas caverns, and operation parameters of gas caverns were considered. Combining each evaluation index's weight with its connection degree based on the entropy and set pair analysis, respectively, the stability levels of gas caverns were determined. The results were consistent with those of the grey correlation analysis, proving that the set pair analysis method applied in the stability evaluation of gas storage is scientific and feasible. The evaluation by the set pair analysis method, which reflects the stability situation more objectively, can not only avoid the outcome disparity due to the uncertainty of distinguishing coefficients, but also obtain the stability level of gas storage, which provides more detailed information for project practices.

Key words: salt rock gas storage; stability evaluation system; entropy; set pair analysis; grey correlation analysis

盐岩作为一种特殊的软岩,具有结构致密、孔隙度低、渗透率小、塑性变形能力大等优良特性,是目前认为的石油、天然气储备的理想场所^[1-5],盐岩储气库的稳定性已得到国内外广泛的研究。Staudtmeister等^[6]长期致力于盐岩蠕变特性的研究,并利用数值方法对地下溶腔储室的安全性进行了多方面分析。Alheid^[7]将地震波监测方法用于溶腔破坏范围的监测。Schulze等^[8]利用黏弹性-黏塑性模型对盐岩溶腔展开研究。陈锋等^[9]通

过数值模拟方法对金坛盐岩储气库进行腔形优化,并针对围岩塑性区范围以及腔体体积变形规律开展了相关研究。贾超等^[10]对处于运营期的储气库进行风险分析,采用体积收缩率作为单项分级指标,提出了地下油气储库运营风险分级机制的基本划分方法以及相应的可靠度计算功能函数。

目前对盐岩地下储库运营期稳定性的研究多集中在盐岩本构模型及数值计算方法等方面,针对储气库整体稳定性建立多指标评价模型的研究

收稿日期: 2015-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51304256,41672292,51574048,51604044); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1401328); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(106112016CDJZR245518)。

作者简介: 姜德义(1962-),男,四川浦江人,重庆大学教授。

尚不完善.集对分析法已广泛应用于环境、效益等领域,本文将其引入到盐岩储气库运营期稳定性评价中,并与应用较为成熟的灰色关联分析法^[11]进行对比.为了客观、准确地反映评价体系中各指标对稳定性的影响程度,将各评价指标的权重值与集对分析法、灰色关联分析法相结合.因此,确定各评价指标的权重值是进行盐岩储气库稳定性评价的基础,直接关系到评价结果的科学性.以往的主观赋权法,如层次分析法、德尔菲法等,往往由于受人为主观因素的影响夸大或者降低某些指标的影响,不能真实地反映实际情况.与之相对的客观赋权法,得到的权重值仅根据各项指标值之间的关系,或者它们的变化程度来决定,不受其他外界因素的影响,如熵值法、主成分分析法等.

因此,本文以熵值法确定的权重值为基础,采用集对分析法对盐岩储气库运营期进行稳定性评价,并与灰色关联分析法进行对比,以检验集对分析法在盐岩储气库运营期稳定性评价中的科学性和可行性.

1 熵值法与集对分析法、灰色关联分析法

1.1 熵值法

熵值法是一种客观赋权法,它根据评价体系中各参考指标的熵值所提供的信息量大小对评价指标的权重进行计算,尽可能地保证了指标权重值的客观性^[12].

熵值法确定权重的主要步骤如下.

一般地,评价对象的指标集记为 $\{x_{ij}\}$, x_{ij} 表示第*i*个方案第*j*个指标的原始值, $i=1,2,\dots,m$; $j=1,2,\dots,n$.

1) 原始数据标准化处理.

$$\text{正向指标: } x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_j\}}{\max\{x_j\} - \min\{x_j\}}, \quad (1)$$

$$\text{逆向指标: } x'_{ij} = \frac{\max\{x_j\} - x_{ij}}{\max\{x_j\} - \min\{x_j\}}. \quad (2)$$

为了避免取对数无意义,将标准化后的数据进行平移(+1)处理.

2) 计算指标信息熵.第*j*个指标的熵值为

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n), \quad (3)$$

$$\text{其中, } p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}}.$$

3) 计算指标权重.第*j*个指标的权重为

$$w_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j}. \quad (4)$$

最终得到系统内各指标的权重值, $W = (w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_n)$.

1.2 集对分析法

Zhao^[13]针对不确定系统问题提出集对分析法,从整体上研究系统确定性与不确定性之间的关系.

集对分析法的基本思路是在一定的问题背景下,设存在集合*M,N*,记为集对 $H = (M, N)$,联系度 μ 表达式为

$$\mu = \frac{D}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j. \quad (5)$$

式中:*N*为集对所具有的特征总数;*D,P,F*分别为集对中两个集合共同具有的特征数、相互对立的特征数,以及既不共同拥有也不相互对立的特征数.不考虑权重的情况下,*D/N,F/N,P/N*,分别称为集合在所论问题下的同一度、差异度、对立度,且满足归一化条件,即 $D/N + F/N + P/N = 1$;*i,j*分别为差异度系数、对立度系数.

由于系统存在确定性和不确定性,联系度表达式(5)中包含相对确定的部分 D/N , $(P/N)j$ 和相对不确定的部分 $(F/N)i$,系统确定性和不确定性的混合导致差异性的不确定;因此,根据不同的问题背景,进一步对差异性作同一性与对立性分析,式(5)可展开为

$$\mu = \frac{D}{N} + \frac{F_1}{N}i_1 + \frac{F_2}{N}i_2 + \dots + \frac{F_m}{N}i_m + \frac{P}{N}j. \quad (6)$$

式中 F_1, F_2, \dots, F_m 为集对中不同级的两个集合中既不共同拥有又不相互对立的特征数.

由于系统包含多个评价指标,各个评价指标的影响不尽相同,因此,进一步对系统内各评价指标作同一、差异、对立的集对分析,得到方案*i*中第*j*项指标的联系度 μ_{ij} .

为准确反映系统内各评价指标的影响,将各评价指标的联系度与权重值结合,计算盐岩储气库*i*的五元平均联系度 $\bar{\mu}_i$:

$$\bar{\mu}_i = \mu_i \cdot \sum_{j=1}^n (w_j \cdot \mu_{ij}). \quad (7)$$

对结果进行归一化处理.根据最大原则选取经归一化处理后联系度的最大值所对应的稳定性等级,即为评价对象的稳定性等级.

1.3 灰色关联分析法

灰色系统理论由邓聚龙^[14]提出,主要针对部分信息未知的不确定性系统.作为灰色系统理论

的主要内容之一,灰色关联分析的核心是确定比较数列与参考数列间的关联度。

分别将理想方案及预选方案中的各因素数据作为参考数列和比较数列,假设有 m 个预选方案,每个方案由 n 个因素构成,则可构成如下数列:

$$\begin{aligned} \{X_{参考(j)}\} &= \{X_{0(1)}, X_{0(2)}, \dots, X_{0(n)}\}, \\ \{X_{1(j)}\} &= \{X_{1(1)}, X_{1(2)}, \dots, X_{1(n)}\}, \\ &\vdots \\ \{X_{i(j)}\} &= \{X_{i(1)}, X_{i(2)}, \dots, X_{i(n)}\}, \\ &\vdots \\ \{X_{m(j)}\} &= \{X_{m(1)}, X_{m(2)}, \dots, X_{m(n)}\}. \end{aligned}$$

式中 $\{X_{i(j)}\}$ 表示评价方案中各因素数据组成的数列, $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$.

为与熵值法保持一致,用式(1)和式(2)对原始数据进行无量纲化处理.由于各因素对最终结果的影响程度不完全相同,将各因素的关联系数与其权重值相结合,计算相应的关联度作为最终评价指标,通过对关联度的分析比较确定最优数列.关联度计算公式如下:

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^n w_j \xi_{i(j)}. \quad (8)$$

式中: γ_i 表示比较数列对于参考数列的关联度; w_j 表示第 j 个因素的权重, $\sum_{j=1}^n w_j = 1$; $\xi_{i(j)}$ 表示方案

i 中第 j 个因素的关联系数:

$$\xi_{i(j)} = \frac{\min_i \min_j |X'_{0(j)} - X'_{i(j)}| + \rho \max_i \max_j |X'_{0(j)} - X'_{i(j)}|}{|X'_{0(j)} - X'_{i(j)}| + \rho \max_i \max_j |X'_{0(j)} - X'_{i(j)}|}. \quad (9)$$

式中分辨系数 $\rho \in (0, 1)$, 取值见表 1, 其中,

$$\varepsilon_\Delta = \frac{1}{n \cdot \max_i \max_j |X'_{0(j)} - X'_{i(j)}|} \sum_{j=1}^n |X'_{0(j)} - X'_{i(j)}|. \quad (10)$$

表 1 分辨系数的取值

ε_Δ	ρ 的范围	ρ 的一般取值
$\varepsilon_\Delta < \frac{1}{3}$	$\rho \in [\varepsilon_\Delta, 1.5\varepsilon_\Delta]$	$\rho = 1.5\varepsilon_\Delta$
$\frac{1}{3} \leq \varepsilon_\Delta \leq \frac{1}{2}$	$\rho \in (1.5\varepsilon_\Delta, 2\varepsilon_\Delta]$	$\rho = 2\varepsilon_\Delta$
$\varepsilon_\Delta > \frac{1}{2}$	ρ 在 $[0.8, 1]$ 中任意取值	$\rho = [0.8, 1]$

2 评价指标体系的建立及权重确定

2.1 评价指标体系的建立

综合考虑盐岩储气库的内在特征、外界环境构成要素,将盐岩储气库的运营期稳定性评价模型中的相关因素分为盐岩力学参数、储气库腔体参数、储气库运行参数三部分,建立多层次的评价指标体系,如图 1 所示。

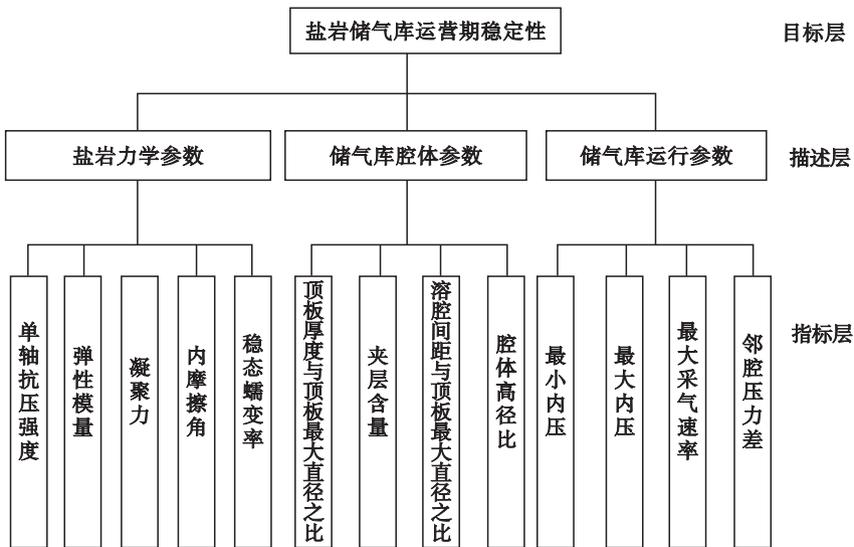


图 1 盐岩储气库运营期稳定性评价体系

Fig. 1 Evaluation system of the stability of salt rock gas storage during the operation period

2.2 熵值法确定权重

以金坛储气库西 2、东 2 及岗 1 溶腔为对象,各溶腔的原始参数值如表 2 所示。

利用式(1)~式(4)计算得到各评价指标的

权重向量 $W = (0.0777, 0.0767, 0.0769, 0.0773, 0.0766, 0.0767, 0.0768, 0.0772, 0.0768, 0.0767, 0.0771, 0.0769, 0.0766)$ 。

表 2 盐岩储气库原始指标值

Table 2 Original values of indices of salt rock gas storage

指标	西 2	东 2	岗 1
单轴抗压强度/MPa	21.00	19.00	19.00
弹性模量/GPa	18.50	17.30	18.90
凝聚力/MPa	1.20	1.20	1.00
内摩擦角/(°)	45.00	38.00	37.00
稳态蠕变率 $\times 10^4/h^{-1}$	2.50	2.40	2.30
顶板厚度/顶板最大直径	0.13	0.21	0.18
夹层含量/%	6.08	10.90	13.13
溶腔间距/顶板最大直径	1.06	2.02	1.30
腔体高径比	0.79	0.57	0.64
最小内压/MPa	4.80	5.10	5.20
最大内压/MPa	13.40	11.40	11.80
最大采气速率/(MPa·d ⁻¹)	0.68	0.69	0.48
邻腔压力差/MPa	1.30	1.70	2.30

表 3 盐岩储气库运营期稳定性分级标准

Table 3 Classification standard of the stability of salt rock gas storage during the operation period

评判等级	I	II	III	IV	V
单轴抗压强度 R_c /MPa	30 ~ 20	20 ~ 10	10 ~ 5	5 ~ 2.5	2.5 ~ 0
弹性模量 E /GPa	20.0 ~ 12.5	12.5 ~ 9.4	9.4 ~ 7.0	7.0 ~ 5.0	5.0 ~ 0
凝聚力 c /MPa	5 ~ 3.00	3.00 ~ 2.17	2.17 ~ 1.54	1.54 ~ 1.00	1.00 ~ 0
内摩擦角 φ /(°)	50 ~ 40.0	40.0 ~ 35.9	35.9 ~ 32.7	32.7 ~ 30.0	30.0 ~ 0
稳态蠕变率 $\varepsilon_s \times 10^4/h^{-1}$	0 ~ 1.5	1.5 ~ 2.1	2.1 ~ 2.6	2.6 ~ 3.0	3.0 ~ 6
顶板厚度/顶板最大直径 A	0.50 ~ 0.40	0.40 ~ 0.35	0.35 ~ 0.32	0.32 ~ 0.28	0.28 ~ 0
夹层含量 B /%	0 ~ 1.3	1.3 ~ 2.9	2.9 ~ 5.0	5.0 ~ 10.0	10.0 ~ 100
溶腔间距/顶板最大直径 C	3.41 ~ 1.59	1.59 ~ 1.41	1.41 ~ 1.26	1.26 ~ 1.13	1.13 ~ 0
腔体高径比 D	2 ~ 1.5	1.5 ~ 1.0	1.0 ~ 0.6	0.6 ~ 0.4	0.4 ~ 0
X	1.32 ~ 1.08	1.08 ~ 1.02	1.02 ~ 0.98	0.98 ~ 0.94	0.94 ~ 0
Y	1.00 ~ 0.90	0.90 ~ 0.85	0.85 ~ 0.82	0.82 ~ 0.78	0.78 ~ 0
Z	1.00 ~ 0.92	0.92 ~ 0.88	0.88 ~ 0.85	0.85 ~ 0.83	0.83 ~ 0
邻腔压力差 U /MPa	0 ~ 1.0	1.0 ~ 2.0	2.0 ~ 3.0	3.0 ~ 4.0	4.0 ~ 5.0

注： X, Y, Z 分别为储气库最小内压、最大内压和最大采气速率的运行值与模拟值之比。

3 金坛储气库运营期稳定性评价

3.1 盐岩储气库稳定性等级标准

盐岩储气库运营期稳定性可分为 5 个等级：I（极为稳定）、II（稳定）、III（较稳定）、IV（基本稳定）、V（不稳定），分类标准见表 3。

3.2 集对分析评价

将盐岩储气库稳定性评价分级的各评价指标与评价标准构成一个集对，符合 I, II, III, IV, V 级标准的指标分别作为同一度、差异偏同度、差异度、差异偏反度、对立度，指标个数分别记为 D, F_1, F_2, F_3, P ，储气库的五元平均联系度 $\bar{\mu}_i$ 的计算步骤如下。

1) 利用式(6)初步计算储气库 i 的五元联系

$$\mu_i = \frac{D}{N} + \frac{F_1}{N}i_1 + \frac{F_2}{N}i_2 + \frac{F_3}{N}i_3 + \frac{P}{N}j$$

2) 根据各评价指标的真实值，计算方案 i 中第 j 项指标的五元联系度 μ_{ij} 。

正向指标联系度：

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1+0i_1+0i_2+0i_3+0j, & x \in [S_1, +\infty]; \\ \frac{x-S_2}{S_1-S_2} + \frac{S_1-x}{S_1-S_2}i_1+0i_2+0i_3+0j, & x \in [S_2, S_1]; \\ 0 + \frac{x-S_3}{S_2-S_3}i_1 + \frac{S_2-x}{S_2-S_3}i_2+0i_3+0j, & x \in [S_3, S_2]; \\ 0+0i_1 + \frac{x-S_4}{S_3-S_4}i_2 + \frac{S_3-x}{S_3-S_4}i_3+0j, & x \in [S_4, S_3]; \\ 0+0i_1+0i_2 + \frac{x-S_5}{S_4-S_5}i_3 + \frac{S_4-x}{S_4-S_5}j, & x \in [S_5, S_4]; \\ 0+0i_1+0i_2+0i_3+1j, & x \in [0, S_5]. \end{cases} \quad (11)$$

逆向指标联系度：

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1+0i_1+0i_2+0i_3+0j, & x \in [0, S_1]; \\ \frac{S_2-x}{S_2-S_1} + \frac{x-S_1}{S_2-S_1}i_1+0i_2+0i_3+0j, & x \in [S_1, S_2]; \\ 0 + \frac{S_3-x}{S_3-S_2}i_1 + \frac{x-S_2}{S_3-S_2}i_2+0i_3+0j, & x \in [S_2, S_3]; \\ 0+0i_1 + \frac{S_4-x}{S_4-S_3}i_2 + \frac{x-S_3}{S_4-S_3}i_3+0j, & x \in [S_3, S_4]; \\ 0+0i_1+0i_2 + \frac{S_5-x}{S_5-S_4}i_3 + \frac{x-S_4}{S_5-S_4}j, & x \in [S_4, S_5]; \\ 0+0i_1+0i_2+0i_3+1j, & x \in [S_5, +\infty]. \end{cases} \quad (12)$$

式(11)和式(12)中， x 为评价指标的真实值， S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 分别为 I, II, III, IV, V 级的分级标准限值。

3) 将熵值法得到的各指标权重值代入公式

(7),计算盐岩储气库 i 的五元平均联系度 $\bar{\mu}_i$, 并对评价结果进行归一化处理, 计算结果与储气库稳定性等级如表 4 所示.

表 4 评价结果
Table 4 Evaluation results

评价对象	平均联系度 $\bar{\mu}_i$	等级
西 2	$\bar{\mu}_1 = 0.37 + 0.25i_1 + 0.17i_2 + 0.06i_3 + 0.15j$	I
东 2	$\bar{\mu}_2 = 0.30 + 0.32i_1 + 0.04i_2 + 0.12i_3 + 0.22j$	II
岗 1	$\bar{\mu}_3 = 0.18 + 0.17i_1 + 0.24i_2 + 0.23i_3 + 0.18j$	III

3.3 灰色关联度评价

将储气库西 2、东 2 和岗 1 腔体评价指标的

表 5 盐岩储气库 0# 原始指标值
Table 5 Original values of indices of rock salt gas storage 0#

R_c/MPa	E/GPa	c/MPa	$\varphi/(\text{°})$	$\varepsilon_s \times 10^4/\text{h}^{-1}$	A	$B/\%$	C	D	X	Y	Z	U/MPa
21.00	19.00	1.22	38.00	2.108	0.40	7.00	1.04	0.60	4.90	13.50	0.54	1.00

表 6 西 2、东 2 和岗 1 腔体的 ε_Δ 和 ρ
Table 6 Values of ε_Δ and ρ

指标	西 2	东 2	岗 1
ε_Δ	0.43	0.63	0.67
ρ	0.86	0.8	0.8

参数值确定为对比数列, 将稳定性较好的 0# 腔体确定为参考数列(表 5). 选用式(1)和式(2)对数据进行标准化处理后构成数列, 如式(13)所示. 代入式(10)并结合表 1 对分辨系数 ρ 的取值进行修正, 计算结果如表 6 所示. 运用式(9)得到各数列的关联系数 $\xi_{i(j)}$. 最终将熵值法确定的各指标参数值代入式(8)中, 得到 3 个腔体的关联度, 各腔体关联系数及关联度如表 7 所示. 储气库西 2、东 2 和岗 1 腔体的关联度分别为 0.73, 0.71, 0.62, 以关联度为依据得到三个腔体的稳定性排序, 即西 2 优于东 2 优于岗 1.

3.4 评价结果分析

采用集对分析法分析得到储气库西 2、东 2 和岗 1 腔体的稳定性等级分别为 I, II, III 级, 与实际相符. 根据灰色关联分析得到的 3 个腔体稳定性排序为: 西 2 优于东 2 优于岗 1, 与集对分析法

表 7 关联系数和关联度表
Table 7 Values of correlation coefficients and correlation degrees

储气库	$\xi_{i(j)}$													γ_i
	R_c	E	c	φ	ε_s	A	B	C	D	X	Y	Z	U	
西 2	0.72	0.48	0.66	0.46	1.00	0.85	0.46	0.65	0.99	0.72	0.66	0.78	0.79	0.73
东 2	0.51	0.60	0.74	1.00	0.71	0.51	0.64	0.69	0.51	0.57	0.69	0.85	0.69	0.71
岗 1	0.44	0.44	0.59	1.00	0.44	0.53	0.63	0.80	0.54	0.44	0.70	0.53	0.44	0.62

得出的结果一致, 从而验证了集对分析法在盐岩储气库稳定性评价中的可行性.

对比集对分析法、灰色关联分析法可以看出, 在灰色关联分析中当 $\varepsilon_\Delta \geq 0.5$ 时分辨系数 ρ 可在 $[0.8, 1]$ 中任取, 具有一定的不确定性, 容易受人

为因素的影响, 而集对分析法的各项联系度均为确定值, 得到的评价结果更为客观. 另外, 通过集对分析法得到的结果更为详细, 不仅可得到储气库腔体的稳定性排序, 还可以更具体地确定出储气库腔体所属的稳定性等级, 为工程实践提供参考.

$$\left. \begin{aligned} \{X_{\text{参数}(j)}\} &= \{1.00, 0.00, 0.55, 0.00, 0.00, 3.00, 0.00, 0.46, 1.00, 0.00, 0.55, 0.71, 1.00\}, \\ \{X_{\text{西}2(j)}\} &= \{0.67, 0.94, 1.00, 1.00, 0.00, 0.00, 1.00, 0.00, 0.99, 0.33, 1.00, 0.95, 0.77\}, \\ \{X_{\text{东}2(j)}\} &= \{0.00, 0.74, 1.00, 0.13, 0.50, 1.00, 0.64, 1.00, 0.00, 0.83, 0.00, 1.00, 0.46\}, \\ \{X_{\text{岗}1(j)}\} &= \{0.00, 1.00, 0.00, 0.00, 1.00, 2.00, 0.47, 0.25, 0.32, 1.00, 0.20, 0.00, 0.00\}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

4 结 论

- 1) 以熵值法确定盐岩储气库运营期各评价指标的权重值, 排除人为差异, 结果更加客观.
- 2) 基于熵值法得到的权重值, 采用集对分析

法得到金坛西 2、东 2 及岗 1 腔体的稳定性等级分别为 I(极为稳定)、II(稳定)、III(较稳定), 与实际相符.

- 3) 采用灰色关联度分析法得到的腔体稳定性为西 2 优于东 2 优于岗 1, 与集对分析法得到的结果一致.

4) 熵权集对分析法比灰色关联分析法得到的盐岩储气库运营期稳定性等级更准确,对工程实践更具指导意义。

参考文献:

- [1] Thiemeyer N, Habersetzer J, Peinl M, et al. The application of high resolution X-ray computed tomography on naturally deformed rock salt; multi-scale investigations of the structural inventory [J]. *Journal of Structural Geology*, 2015, 77: 92 – 106.
- [2] Ma L, Liu X, Wang M, et al. Experimental investigation of the mechanical properties of rock salt under triaxial cyclic loading [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 62: 34 – 41.
- [3] Desbois G, Urai J L, de Bresser J H P. Fluid distribution in grain boundaries of natural fine-grained rock salt deformed at low differential stress; implications for rheology and transport properties [J]. *Journal of Structural Geology*, 2012, 43: 128 – 143.
- [4] Fan J, Chen J, Jiang D, et al. Fatigue properties of rock salt subjected to interval cyclic pressure [J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 90: 109 – 115.
- [5] Jiang D, Fan J, Chen J, et al. A mechanism of fatigue in salt under discontinuous cycle loading [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2016, 86: 255 – 260.
- [6] Staudtmeister K, Rokahr R B. Rock mechanical design of storage caverns for natural gas in rock salt mass [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1997, 34(3/4): 300. e1 – 300. e13.
- [7] Alheid H J. Investigation of the long-term development of

damaged zones around underground openings in rock salt [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1998, 35(4): 589 – 590.

- [8] Schulze O, Popp T, Kern H. Development of damage and permeability in deforming rock salt [J]. *Engineering Geology*, 2001, 61(2/3): 163 – 180.
- [9] 陈锋, 杨春和, 白世伟. 盐岩储气库最佳采气速率数值模拟研究 [J]. *岩土力学*, 2007, 28(1): 57 – 62.
(Chen Feng, Yang Chun-he, Bai Shi-wei. Investigation on optimized gas recovery velocity of natural gas storage in salt rock layer by numerical simulation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(1): 57 – 62.)
- [10] 贾超, 刘家涛, 张强勇, 等. 盐岩储气库运营期时变可靠度计算及风险分析 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(5): 1479 – 1484.
(Jia Chao, Liu Jia-tao, Zhang Qiang-yong, et al. Time-variant reliability calculation and risk analysis for salt rock gas storage during operation time [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(5): 1479 – 1484.)
- [11] 姜德义, 霍琰, 任松, 等. 灰色理论在盐岩储气库稳定性评价中的应用 [J]. *中国矿业*, 2011, 20(3): 122 – 125.
(Jiang De-yi, Huo Yan, Ren Song, et al. Application of the grey theory on the salt rock gas storage's stability evaluation [J]. *China Mining Magazine*, 2011, 20(3): 122 – 125.)
- [12] Straathof S M. Shannon's entropy as an index of product variety [J]. *Economics Letters*, 2007, 94(2): 297 – 303.
- [13] Zhao K. Set pair analysis and its preliminary application [J]. *Exploration of Nature*, 1994, 13(1): 67 – 72.
- [14] 邓聚龙. 灰色系统综述 [J]. *世界科学*, 1983(7): 1 – 5.
(Deng Ju-long. Grey system review [J]. *World Science*, 1983(7): 1 – 5.)

(上接第 269 页)

- [6] 王述红, 张航, 张艳桥, 等. 随机结构面切割岩质边坡空间块体模型及关键块体分析 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2011, 32(3): 431 – 434.
(Wang Shu-hong, Zhang Hang, Zhang Yan-qiao, et al. Random structural plane cutting of a rock slope spatial block model and its key block analysis [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2011, 32(3): 431 – 434.)
- [7] Wang S H, Ni P P, Yang H, et al. Modeling on spatial block topological identification and their progressive failure analysis of slope and cavern rock mass [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 10: 1509 – 1514.
- [8] 王述红, 张靖杰, 李云龙, 等. 工程岩体开挖过程全空间块体搜索及其系统研制 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(7): 1026 – 1029.
(Wang Shu-hong, Zhang Jing-jie, Li Yun-long, et al. Quickly spatial identification process of blocks during rock excavation and its system modeling [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2010, 31(7): 1026 – 1029.)
- [9] Yang Y, Wang S H. Visual program based on general block theory [C] // *New Development in Rock Mechanics and*

Engineering & Sanya Forum for the Plan of City and City Construction. Sanya, 2009: 351 – 358.

- [10] Wang S H, Guo M D, Yang Y, et al. Enhancing block rock failure understanding through GeoSMA-3D numerical analysis [C] // *ISRM International Symposium on Rock Mechanics "Rock Characterisation, Modelling and Engineering Design Method"*, SinoROCK2009. Hong Kong, 2009: 158 – 164.
- [11] Wang S H, Ni P P, Guo M D. Spatial characterization of joint planes and stability analysis of tunnel blocks [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 38(1): 357 – 367.
- [12] 穆撒江. 碎裂岩体块体力学分析及其岩坡稳定性评价 [D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
(Mu Xi-jiang. Block mechanics analysis and cataclastic rock slope stability assessment [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.)
- [13] Wang S H, Huang R Q, Ni P P, et al. Fracture behavior of intact rock using acoustic emission; experimental observation and realistic modeling [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2013, 36(6): 903 – 914.