

引文: 贺三, 李浩淼, 范进争, 等. 东胜气田气藏-井筒-集输管网系统一体化能效评价[J]. 油气储运, 2025, 44(2): 220–229.

HE San, LI Haomiao, FAN Jinzheng, et al. Evaluation of energy efficiency for the gas reservoir-wellbore-gathering and transmission pipeline network system in Dongsheng Gas Field[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(2): 220–229.

东胜气田气藏-井筒-集输管网系统一体化能效评价

贺三¹ 李浩淼¹ 范进争² 齐宏伟² 季永强² 唐凯³ 杜铭轩¹ 余锐¹

1. 西南石油大学石油与天然气工程学院; 2. 中国石化华北油气分公司; 3. 中国石化西北油田分公司油气运销部

摘要:【目的】在油气田集输管网系统的能效评价中, 通常未考虑气藏、井筒对集输管网系统的影响, 建立的能效评价体系不够完善, 无法直接反映三者之间的相互关系, 导致评价结果难以体现整个生产系统的能效水平。东胜气田已进入低产低压阶段, 单井产出差异大、液气比高、压降速度变化快等问题较为突出, 亟需构建一套有针对性的评价方法, 发现制约其能效的薄弱环节。【方法】基于现行的相关规范及东胜气田生产工艺, 在集输管网系统能效评价的基础上, 纳入井筒排采、气藏开发相关评价指标, 建立了包含 10 项指标的气藏-井筒-集输管网系统一体化能效评价指标体系, 并确定了指标边界值。根据各项指标的特点, 建立了基于层次分析法-熵权法-模糊隶属函数法的能效评价混合算法。【结果】在东胜气田 J 区块的应用表明, 工艺调整前其能效评分仅为 58.4 分, 发现制约系统能效水平的关键因素包括排采效果不达标、压缩机组负荷率低及管道输送效率较低。结合气田生产情况, 提出了优化排采工艺、调整管网结构等改进措施, 调整后再次评分为 81.83 分, 系统能效显著提升, 符合现场实际需求。【结论】新建的能效综合评价体系与算法能够较好地反映不同生产工艺下气田的能效水平, 可用于指导气田开展有效的工艺调整, 应用实践表明所建立的能效评价指标体系及评价方法具有可行性。(图 8, 表 7, 参 27)

关键词: 东胜气田; 气藏; 井筒; 集输管网; 指标体系; 能效评价

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)02-0220-10

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2025.02.011

Evaluation of energy efficiency for the gas reservoir-wellbore-gathering and transmission pipeline network system in Dongsheng Gas Field

HE San¹, LI Haomiao¹, FAN Jinzheng², QI Hongwei², JI Yongqiang², TANG Kai³, DU Mingxuan¹, YU Rui¹

1. School of Oil & Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University; 2. Sinopec North China Oil & Gas Company;

3. Oil and Gas Transportation and Sales Department, SINOPEC Northwest Oil Field Company

Abstract: [Objective] In the evaluation of energy efficiency for gathering and transportation pipeline network systems, the impact of gas reservoirs and wellbores is often overlooked. Existing energy efficiency evaluation systems do not adequately account for the interrelationships among these three components, resulting in evaluation outcomes that do not accurately reflect the overall energy efficiency of production systems. The Dongsheng Gas Field, currently in a low-production and low-pressure stage, faces significant challenges, including considerable production disparities among individual wells, high liquid-gas ratios, and accelerated pressure drop rates. Therefore, there is an urgent need to develop targeted evaluation methods capable of identifying weak links that hinder energy efficiency. [Methods] Based on current relevant specifications and the production processes utilized in the Dongsheng Gas Field, evaluation indexes related to gas recovery through wellbore drainage and gas reservoir development were established as a complement to the energy efficiency evaluation of gathering and transportation pipeline network systems. This integrated evaluation index system of energy efficiency for the gas reservoir-wellbore-gathering and transmission pipeline network systems encompasses 10 indexes, along with their corresponding boundary values. In light of the characteristics of these indexes, a hybrid algorithm for energy efficiency evaluation was developed, leveraging the analytic hierarchy process (AHP) method, the entropy weight method, and the fuzzy membership function method. [Results] The application of the proposed evaluation system and algorithm in Block J of the Dongsheng Gas Field yielded an energy efficiency score of only 58.4 prior to process adjustments. This score indicated that key factors limiting system energy efficiency included substandard gas recovery through

drainage, low load rates of compressor units, and inefficient pipeline transportation. To address these challenges, improvement measures were proposed, including optimizing the drainage process and adjusting the pipeline network structure, taking into account the specific production conditions. As a result of these adjustments, the re-scored energy efficiency increased significantly to 81.83, reflecting a substantial improvement in system energy efficiency that aligns with the actual on-site production conditions. **[Conclusion]** This new integrated evaluation system and algorithm for energy efficiency is effective in reflecting the energy efficiency levels of gas fields across various production processes and guiding effective process adjustments for gas fields. The findings of this study validate the efficacy of the proposed index system and evaluation method for energy efficiency. (8 Figures, 7 Tables, 27 References)

Key words: Dongsheng Gas Field, gas reservoir, wellbore, gathering and transportation pipeline network, integrated index system, evaluation of energy efficiency

东胜气田位于鄂尔多斯盆地北部, 自 2017 年进入规模开发阶段以来, 累计探明储量达 $1\,239 \times 10^8 \text{ m}^3$, 已成为“十四·五”油气增储上产重要战场^[1]。但目前东胜气田进入低产低压阶段, 单井产出差异大、液气比高、压降速度变化快等问题日益凸显。东胜气田集输管网系统采用中低压集输工艺, 包括井下节流、中低压集气、气液混输、带液计量、井间串接及常温分离等工艺。集输管网系统建设方案依托于气藏开发方案, 其工艺调整或运行参数不合理, 将会进一步影响井筒内流动状况与地层的渗流行为, 导致气井产量发生变化, 进而影响气田整体能效水平。然而, 东胜气田生产系统能效水平能效制约瓶颈尚不明确, 亟需建立适用于其生产系统能效评价的方法。

对于油气田生产系统的能效评价, 在评价对象方面, 主要对地面集输系统进行了相关研究。对于原油集输系统, 主要开展了井场、站内泵机组、加热炉等设备与集输管网的能耗分析及评价^[2-6]。对于天然气集输系统, 已实现对气田增压站的用能评价^[7]、“井场-增压站-集气站-集输管网-气田水回注站”系统的用能损失情况评价^[8]。在指标体系构建方面, 在研究站场能效时主要选取泵机组的负荷率与效率、加热炉的热负荷率与热效率作为主要的评价指标^[2-6], 对集输管网的能效评价则采用管道效率、管道压差、管道工艺适应性及能量损失等指标^[2-3, 5]。对于增压站, 则使用压缩机组的处理气量、电能及燃料气量、负荷率及压缩机效率等 8 项参数作为评价指标^[8]。从评价算法方面, 针对不同评价模型的特点, 采用了单一或组合算法进行评价, 包含定性与定量两类评价方法。李玉星等^[3-4]采用层次分析法, 对转油站、站外管网及注水系统进行了深入评价。唐霏等^[7]基于粗糙集理论与 BP 神经网络建立了评价模型, 实现了 20 座增压站的能效综合评价。汤

晟等^[6]利用熵权-灰色关联分析的组合方法, 对不同季节的集输系统变化规律进行了研究, 并确定了其用能薄弱环节。

可见, 在集输系统的能效评价中, 已有研究成果算法单一且主要集中在地面集输系统的能效评价方面, 尚未考虑油气藏、井筒对地面集输管网系统的影响。但气藏-井筒-集输管网系统是一个完整的水力系统, 仅考虑地面集输系统所建立的能效评价体系不够完善, 不能直接反映三者之间的相互关系, 使得评价结果难以发现制约气田能效的主要因素。为此, 以东胜气田为研究对象, 在集输管网系统能效评价的基础上, 引入气藏开发、井筒排采相关评价指标, 建立气藏-井筒-集输管网系统一体化能效评价方法, 以期实现对气田生产系统能效水平的综合评价, 并提出有针对性的优化措施。

1 指标体系建立

中国气田主要分为常规气田、页岩气田、煤层气田、致密气田、凝析气田等, 气田类型不同导致与之配套的生产工艺存在差异, 故对气田生产系统的能效评价需根据气田生产工艺的特点进行分析。东胜气田是典型的封闭性致密低渗气藏, 其目标层以岩屑石、石英砂岩为主, 平均埋深 3 000 m, 主要目的层孔隙度范围为 5.0%~20.7%、渗透率范围为 0.14~8.52 mD。气井初期压力为 10~15 MPa, 平均压力递减为 0.022 2 MPa/d, 平均单井产气量、产液量分别为 $2.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $1.55 \text{ m}^3/(10^4 \text{ m}^3)$ 。该气田集输管网系统采用中低压集输工艺(图 1), 主要包括井下节流、中低压集气、气液混输、带液计量、井间串接及常温分离等环节^[9]。

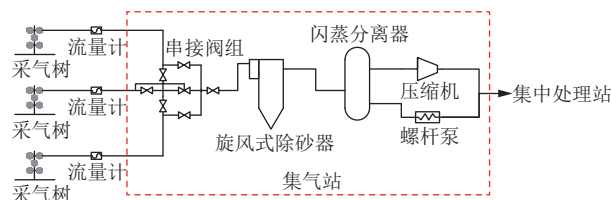


图1 东胜气田集输系统工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram of gathering and transmission system of Dongsheng Gas Field

由于东胜气田特性所致,目前处于开发后期,其稳定期短、产能递减快等问题导致生产系统出现耗能高、能效低的现象,成为影响东胜气田可持续发展的主要因素。为此,围绕气藏-井筒-集输管网系统中主要的技术指标建立评价体系。

1.1 评价指标的选取

针对东胜气田生产工艺的特性,选取气藏、井筒、井场等影响其能效的5个主要因素作为评价指标。

1.1.1 气藏

气藏储量是产气量的基础,但生产工艺的科学性会影响气井的产量。针对气藏部分提出单井产气量指标作为气藏评价指标。此外,由于东胜气田具有高液气比的特点,其高产水量易造成井底积液现象,影响气藏的开发,因此选取液气比作为一个重要评价指标。

1.1.2 井筒

东胜气田产水量较高,因此选用排水采气工艺。井筒作为连接气藏与集输管网系统的纽带,其指标围绕排水采气效果选取^[10-12],由于产气量、产水量的变化率能直观地反映井筒生产状态的变化趋势,故将其作为气井排水采气工艺的综合评价指标。

1)产气量变化率。气井增产是气田开发所追求的目标,而气井的产气量受到气井产能的制约。若存在井筒积液的情况,气井产能将出现下滑。因此,产气量变化率可作为一个指标对排水采气能效进行评价。

2)产水量变化率。如果气井产水问题严重,将会影响产气效率,这是气井生产的一个突出特点^[13-14]。排水采气的主要目标是排除井底积液,恢复或提高气井的产量,因此,产水量变化率也可作为一个指标对排水采气能效进行评价。

1.1.3 井场

气田防止天然气水合物的方法主要有加注抑制剂、加热、井下节流等工艺。若气田井场使用水套加热炉设备来防止天然气水合物,可根据SY/T 7319—2023《气田生产系统节能监测规范》的相关要求,选择加热

炉的负荷率、效率等作为能效评价指标;若采用注醇防冻工艺,则需要将注醇泵的效率、负荷率纳入指标。东胜气田采用井下节流的低压集输工艺,实现不注醇、不加热降压防堵,无额外耗能设备,因此针对东胜气田无需选取防止水合物相关的评价指标。

井口气嘴流动指数是气嘴出口压力与进口压力之比。在气藏开发中,若节流嘴前气体达到临界流动状态,气体在气嘴喉道加速至音速,集输管网系统的压力扰动不会传至产层,能增强储层渗流稳定性,提高气井单位压降产量;反之,则会使井口回压发生变化,影响气体在井筒内的流动及地层渗流行为,进而影响气井产量。在实际生产中,大量气井内气体未达到临界流动状态。如果在产液气井中,气体在气嘴内未达到临界流动状态,液体流经气嘴会减少气体有效过流面积,使实际产量低于理论产量,影响气井产能且易导致井筒积液。为此,提出以井口气嘴流动指数作为井场系统的评价指标。

1.1.4 集输管网系统

气田集输管网系统常规评价指标为输送效率与天然气损耗率^[4]。东胜气田采用气液混输、井间串接的集输工艺,其管网为枝状分布。

为了厘清混输过程积液、堵塞对管道的影响,通过对整体压降、单位长度压降进行分析,发现单位长度压降可更好地反映积液对管输效率的影响,故选择单位长度压降作为集输管网的评价指标。单位长度压降的计算公式为:

$$\Delta p = \frac{p_1 - p_2}{LQ} \quad (1)$$

式中: Δp 为采气管道单管单位长度单位输气量压降, $\text{Pa}/(\text{km} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$; p_1 、 p_2 分别为采气管道单管起点、终点压力, Pa ; L 为单管管长, km ; Q 为管道单管输气量, m^3/d 。

对于枝状分布的管网而言,由于缺乏中间节点的压力参数,可以利用生产数据中的单井产气量、井场与站场的压力,由 Schlumberger PIPESIM 软件计算中间节点的压力;再将该区块的若干管网分解为单管进行单位长度单位输气量压降计算;最后,将各单管单位长度单位输气量压降的算术平均值作为该区域集输管网的单位长度单位输气量压降。

1.1.5 集气站

基于东胜气田集气站的工艺与耗能设备情况(图2),对评价指标进行选取。集气站内设备可分为动设备与

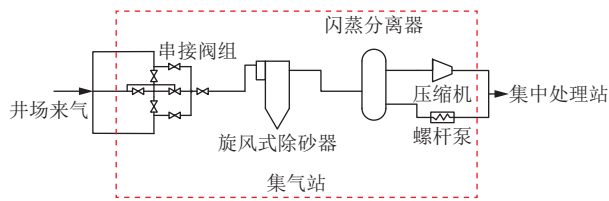


图2 东胜气田集气站工艺流程图
Fig. 2 Process flow diagram of gas gathering station of Dongsheng Gas field

静设备,静设备以除砂器、分离器为主,而动设备则以压缩机、螺杆泵为主。通过对静设备进行压力监测,发现压损较小,对系统整体能耗影响不大,无需建立相关评价指标。对动设备耗电量进行统计,螺杆泵仅为压缩机的0.08%,对气田能效水平影响程度较小,忽略不计。因此,集气站主要针对压缩机组进行评价。压缩机组效率是压缩机组单位时间内有效输出功率与输入功率之比,反映了压缩机组是否处于高效工作状态,SY/T 7319—2023给出了压缩机组效率的节能评价指标;压缩机组负荷率可以反映设备功率是否得到充分利用。为此,选取压缩机组效率^[5]、压缩机组负荷率^[6]作为集气站能效的评价指标。

1.2 指标体系构建

基于东胜气田气藏-井筒-集输管网系统的实际情况以及工艺流程,从气田气藏、井筒及集输管网系统3个部分,遴选了10个指标构建一体化能效评价指标体系(图3)。

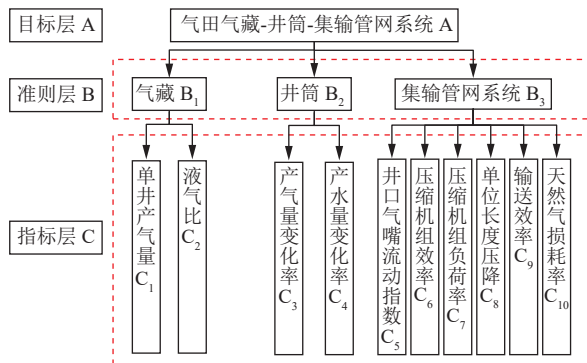


图3 东胜气田一体化能效评价指标体系
Fig. 3 Integrated evaluation index system of energy efficiency for Dongsheng Gas Field

2 能效评价方法

东胜气田气藏-井筒-集输管网系统一体化能效评价方法包括分配指标权重、模糊隶属函数变换及线性加权得分3个步骤^[15-16](图4)。

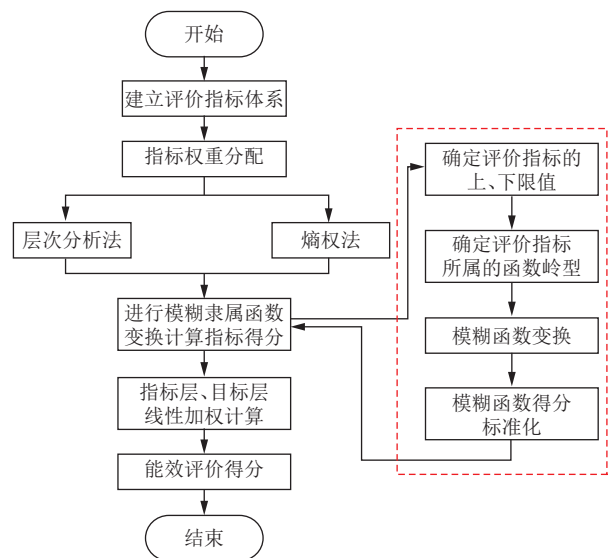


图4 东胜气田一体化能效评价流程图
Fig. 4 Integrated evaluation flow chart of energy efficiency for Dongsheng Gas Field

2.1 指标权重计算

层次分析法^[17-21]通过向行业内专家发放问卷,依靠专家工作经验得出指标的相对重要性来获得指标权重;熵权法^[18-19]则通过信息熵正向反映评价指标的变异程度,并据此确定各指标的权重。东胜气田气藏-井筒-集输管网系统一体化能效评价方法,首先采用经典的层次分析法完成准则层中气藏、井筒、集输管网系统的权重分配,并初步完成各准则层指标的权重分配。气藏与井筒层面的指标权重受停产因素影响,数据波动较大,难以通过定量性方法获得,仍选择层次分析法得出。但集输管网系统层面的指标历史生产数据较为稳定,可使用熵权法得出其指标权重。集输管网系统层面的指标权重采用层次分析法与熵权法相结合的方式综合分析,既从主观层面融合了行业专家的经验,又利用实际生产数据提升了权重分配的相对客观性。

2.1.1 层次分析法

层次分析法的权重计算过程包括构造判断矩阵、打分、一致性检验及权重计算^[17]。邀请西南油气田、大庆油田、大庆油田及新疆油田共40位油气集输行业专家发放“1~9”标度问卷,共回收有效问卷25份,其中包括高级工程师20位、工程师5位,赋予高级工程师、工程师的权重分别为0.8、0.2。判断矩阵与计算公式参考文献^[17],得到25位专家打分后各指标的判断矩阵(表1)。由此,得出准则层B₁、B₂、B₃的权重计算结果分别为0.211 9、0.074 0、0.714 1,进而计算得到指标层C₁~C₁₀共10个指标的权重(表2)。

表 1 基于层次分析法的东胜气田一体化能效评价指标判断矩阵表

Table 1 Judgment matrix for integrated evaluation indexes of energy efficiency for Dongsheng Gas Field based on AHP method

指标层	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀
C ₁	1	6	4	7	4	1	1	3	2	8
C ₂	1/6	1	1/4	2	1/4	1/8	1/8	1/6	1/7	2
C ₃	1/4	4	1	4	1	1/5	1/5	1/3	1/2	4
C ₄	1/7	1/2	1/4	1	1/4	1/7	1/7	1/5	1/6	1
C ₅	1/4	4	1	4	1	1/5	1/5	1/3	1/4	4
C ₆	1	8	5	7	5	1	1	3	2	7
C ₇	1	8	5	7	5	1	1	3	2	7
C ₈	1/3	6	3	5	3	1/3	1/3	1	1/5	5
C ₉	1/2	7	2	6	4	1/2	1/2	5	1	6
C ₁₀	1/8	1/2	1/4	1	1/4	1/7	1/7	1/5	1/6	1

表 2 基于层次分析法的东胜气田一体化能效指标层权重表
Table 2 Weight values for integrated evaluation indexes of energy efficiency for Dongsheng Gas Field based on AHP method

指标层	权重	指标层	权重
C ₁	0.189 0	C ₆	0.201 5
C ₂	0.022 9	C ₇	0.201 5
C ₃	0.054 8	C ₈	0.090 5
C ₄	0.019 2	C ₉	0.150 6
C ₅	0.051 2	C ₁₀	0.018 8

2.1.2 熵权法

选取东胜气田 J 区块从 2020 年 1 月—2022 年 6 月集输管网系统的生产数据,利用熵权法进行权重计算,计算过程参考文献[18]。由此得出集输管网系统 B₃ 的权重计算结果为 0.714 1,进而计算得到指标层 C₅~C₁₀ 共 6 个指标的权重(表 3)。

2.1.3 层次分析法-熵权法权重确定

将层次分析法与熵权法相结合的权重结果进行综合分析,其计算公式为:

$$W_i = W_A W_{Ai} + (1 - W_A) W_{Ei} \quad (2)$$

式中: W_i 为通过层次分析法-熵权法计算得到的第 i 个指标层的权重, $1 \leq i \leq 10$, 其中 $i \in Z$; W_A 为层次分析

表 3 基于熵权法的东胜气田一体化能效指标层权重表
Table 3 Weight values for integrated evaluation indexes of energy efficiency for Dongsheng Gas Field based on entropy weight method

指标层	权重	指标层	权重
C ₅	0.112 7	C ₈	0.109 5
C ₆	0.182 1	C ₉	0.138 0
C ₇	0.105 4	C ₁₀	0.066 4

法的权重,若仅使用层次分析法时 $W_A=1$, 否则 $W_A=0.5$; W_{Ai} 为层次分析法中第 i 个指标层的权重; W_{Ei} 为熵权法中第 i 个指标层的权重。

将表 2、表 3 的指标层权重代入式(2)中,可确定东胜气田各指标的最终权重(表 4)。

表 4 基于层次分析法-熵权法的东胜气田一体化能效指标层权重表

Table 4 Weight values for integrated evaluation indexes of energy efficiency for Dongsheng Gas Field based on AHP and entropy weight methods

指标层	权重	指标层	权重
C ₁	0.189 0	C ₆	0.191 7
C ₂	0.022 9	C ₇	0.153 5
C ₃	0.054 8	C ₈	0.100 0
C ₄	0.019 2	C ₉	0.144 3
C ₅	0.082 0	C ₁₀	0.042 6

2.2 指标隶属度计算

在建立评价指标体系时,各指标通常具有不同的量纲,影响指标的可比性。为了统一评价标准,需要对这些指标进行无量纲化处理。采用模糊隶属函数法完成该过程^[20-21],主要包括以下 4 个步骤。

1)确定指标优劣的上、下限值。对于正向指标,最优值为上限值 V_{up} ; 对于逆向指标,最优值为下限值 V_{down} 。

2)确定指标的模糊隶属函数类型。使用模糊隶属函数对指标进行无量纲化处理,该函数可以描述从隶属到不隶属的过程,包括升岭形与降岭形两种类型。分别采用式(3)升岭形、式(4)降岭形模糊隶属函数计算正向指标、逆向指标:

$$f(x_i) = \begin{cases} 0, & x_i \leq V_{down} \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\sin \frac{\pi}{V_{up} - V_{down}} \right) \left(x_i - \frac{V_{up} + V_{down}}{2} \right), & V_{down} < x_i \leq V_{up} \\ 1, & x_i > V_{up} \end{cases} \quad (3)$$

$$f(x_i)=\begin{cases}1,&x_i\leqslant V_{\text{down}}\\ \frac{1}{2}-\frac{1}{2}\left(\sin\frac{\pi}{V_{\text{up}}-V_{\text{down}}}\right)\left(x_i-\frac{V_{\text{up}}+V_{\text{down}}}{2}\right),&V_{\text{down}}<x_i\leqslant V_{\text{up}}\\ 0,&x_i>V_{\text{up}}\end{cases}\tag{4}$$

式中: x_i 为指标评价值,即选定时间范围内指标生产数据的算术平均值。

3)模糊变换。将不同评价指标值 x_i 代入模糊隶属函数计算,可以得到函数 $f(x_i)$ 的输出值,称之为该指标的隶属度,其为 0~1 之间的实数,消除了指标量纲的影响。

4)计算标准量化值。将每个指标的模糊隶属度值乘以 100,即可得到该指标的标准值。

根据 SY/T 6567—2016《天然气输送管道系统经济运行规范》,结合现场生产要求与统计优化,确定了东胜气田气藏-井筒-集输管网系统能效各指标的上下限值及模糊隶属函数类型(表 5)。需要注意的是,SY/T 6567—2016 规定,管道应具备 95% 以上的设计管输能力或评估后的管输能力。但东胜气田受产水量影响,管输效率相对较低,结合现场实际情况,上下限值选择与规范推荐略有不同。

表 5 东胜气田一体化能效评价指标上限、下限及模糊隶属函数类型表

Table 5 Upper limits, lower limits, and fuzzy membership function types for integrated evaluation indexes of energy efficiency for Dongsheng Gas Field

指标层 指标	下限、上限值		下、上限值 获取途径	模糊隶属 函数类型
	V_{down}	V_{up}		
C_1	0	$2\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$	生产数据统计	升岭形
C_2	0	$10\text{ m}^3/(10^4\text{ m}^3)$	生产数据统计	降岭形
C_3	0	50%	文献 [22]	升岭形
C_4	0	50%	文献 [22]	升岭形
C_5	0.55	1	文献 [23]	降岭形
C_6	30%	57%	生产数据求解	升岭形
C_7	63%	100%	生产数据求解	升岭形
C_8	0	$2.4\text{ Pa}/(\text{km}\cdot\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$	生产数据求解	降岭形
C_9	60%	100%	SY/T 6567—2016	升岭形
C_{10}	0	3.6	气田生产要求	降岭形

2.3 指标得分计算

采用线性加权法进行指标得分计算,将评价指标

的量化值与各指标的权重系数相乘,即可得到每个指标的评价得分;再将所有得分求和,得到最终的总评价得分^[24-27]。首先利用式(5)计算准则层指标评价得分,再利用式(6)计算目标层指标评价得分:

$$S_i=\sum_{j=1}^{10}S_{ij}W_{ij}\qquad 1\leqslant i\leqslant 10,1\leqslant j\leqslant 3\tag{5}$$

$$S=\sum_{i=1}^3S_iW_i\qquad 1\leqslant i\leqslant 10\tag{6}$$

式中: S_i 为第 i 个准则层指标的评价得分; S_{ij} 为第 i 个准则层指标中第 j 个指标层指标的评价得分; W_{ij} 为第 i 个准则层指标中第 j 个指标层指标的权重; S 为目标层指标的总评价得分; W_i 为目标层指标中第 i 个准则层的权重。

3 结果分析

以东胜气田 J 区块为例,采用新建的气藏-井筒-集输管网系统一体化能效评价方法进行评价对比,验证所建指标体系与方法的合理性。

根据 J 区块生产系统调整前产能情况(图 5)可直观看出,J 区块产气量呈波动下降趋势。随着东胜气田的深度开发,地层能量逐渐下降,部分老井存在携液能力不足、生产间歇等问题,同时伴随着排采工艺的失效、井口回压过高,使得气田的产能逐渐降低。气田产能的降低导致集气站压缩机组效率与负荷率降低,从而降低了集输管网系统的能效水平。

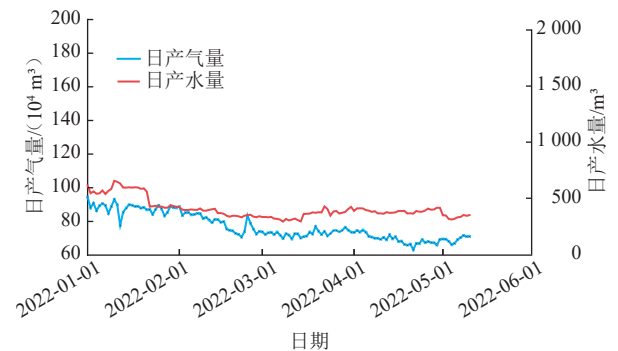


图 5 2022 年东胜气田 J 区块生产系统调整前产能情况图

Fig. 5 Capacity fluctuations before adjustments of production system in Block J of Dongsheng Gas Field in 2022

选取 2022 年东胜气田停产调整前的现场数据,以单井产气量指标 C_1 为例,采用所建评价方法对不同时期的气藏-井筒-集输管网系统指标进行能效分析:①以单井产气量为正向指标,模糊隶属函数选择为升岭形。其下限值、上限值分别为 0、2,选定时间内平均单井产气量为 $0.92 \times 10^4 \text{ m}^3$,故评价值为 0.92;将上限值、下限值及评价值代入式(3),得出模糊变换后的隶属度 0.4373。②再将隶属度扩大 100 倍,计算得到 C_1 的标准量化值,即为评价得分 43.73。③按照步骤①、步骤②的计算过程计算其他指标 $C_2 \sim C_{10}$ 。④将 $C_1 \sim C_{10}$ 的评价得分与权重代入式(5)、式(6)进行线性加权计算,即可得到该气田停产调整前的总评价得分为 58.40(表 6)。总评价得分反映出该区块生产系统能效水平较差。通过 $C_1 \sim C_{10}$ 单项指标评价得分可见,单井产气量、液气比、气井产量变化率、压缩机组负荷率及管道输送效率的评价得分偏低。其中,气藏、井筒产气量变化率及管输效率的评价得分处于最低水平,这表明该时期气井的排采效果不理想,致使气井产量低下,进而引发管道、压缩机出现“大马拉小车”的现象。井筒排采工艺失效导致气井减产,这是造成压缩机组负荷率过低、输送效率较低的主要问题,使集输管网系统的能源大量浪费。因此,液气比过大、气井排采效果不达标、压缩机组负荷率低及管道输送效率过低是使该区块能效水平较差的主要原因。

表 6 2022 年东胜气田 J 区块停产调整前一体化综合评价得分表
Table 6 Integrated evaluation scoring before adjustments of Block J in Dongsheng Gas Field in 2022

指标层	下限、上限值		评价值	权重	隶属度	评价得分	总评价得分
指标	V_{down}	V_{up}					
C_1	0	2.0	0.92	0.189 0	0.437 3	43.73	58.40
C_2	0	10.0	5.80	0.022 9	0.375 7	37.57	
C_3	0	50.0	14.75	0.054 8	0.199 8	19.98	
C_4	0	50.0	30.76	0.019 2	0.677 0	67.70	
C_5	0.55	1.0	0.61	0.082 0	0.956 8	95.68	
C_6	30.00	57.0	53.99	0.191 7	0.969 6	96.96	
C_7	63.00	100.0	81.85	0.153 5	0.514 9	51.49	
C_8	0	2.4	0.07	0.100 0	0.997 9	99.79	
C_9	60.00	100.0	61.80	0.144 3	0.005 0	0.50	
C_{10}	0	3.6	1.60	0.042 6	0.586 8	58.68	

4 工艺调整措施

根据上述所得分析结果,2022 年 5 月 11 日—6 月

17 日对东胜气田 J 区块从以下两个方面进行了工艺调整,并对调整后的系统能效进行了评价。

4.1 调整措施

4.1.1 井筒排采工艺调整

1) 优选泡排剂。开展室内试验进行泡排剂选型,确保药剂适合现场加注要求。以东胜气田 J 区块 I 井为例,泡排剂由 UT-7 型更换为 UT-8 型后,产量呈现明显上升趋势(图 6)。

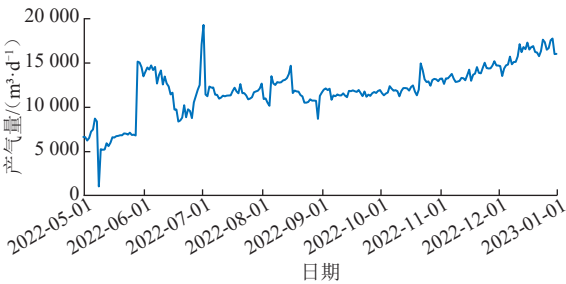


图 6 J 区块 I 井改加注 UT-8 型泡排剂后产气量变化曲线
Fig. 6 Gas production fluctuation curve of Block J Well I after changing the foaming agent to UT-8

2) 优化排采工艺。该气田部分气井含液量过高,常规的泡沫排水采气工艺失效,导致产量大幅下降或停产。以 J 区块 II 井为例,通过采用机械排采或气举的方式提高气井产量。通过调整排采工艺,产量基本维持在关停前的水平(图 7)。

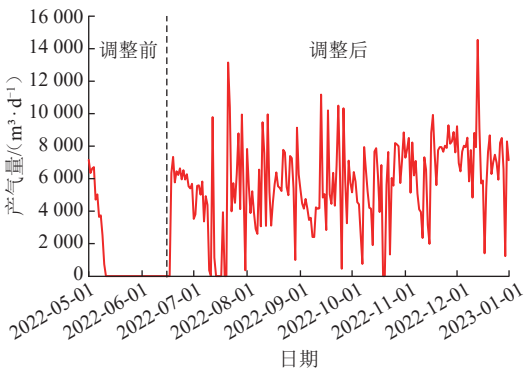


图 7 J 区块 II 井排采工艺调整前后的产气量变化曲线
Fig. 7 Gas production fluctuation curve before and after adjustment to drainage process in Block J Well II

4.1.2 增设站间集气干线

由于集气站设计处理能力远大于实际处理量,导致集气站压缩机组效率与负荷率降低。通过铺设集气干线,连通两临近集气站,对气井来气进行增压,以东胜气田 J 区块 1[#]、2[#]两个集气站为例,在 2[#]集气站投产初期,其集气区内生产井数较少,通过集气干线将天然气输送至 1[#]集气站进行增压,既降低了 2[#]集气站的能耗,同时提高了 1[#]集气站压缩机组运行效率。

4.2 系统调整后的能效评价

选取 2022 年停产调整后情况(图 8), 采用上述评价方法进行计算, 得出气藏-井筒-集输管网一体化综合评价得分(表 7)。与表 6 相比, 在调整后该区块总评价得分为 81.83, 气藏、井筒、集输管网系统能效均有提升。在调整后, 气井可以恢复生产, 其产量呈上升趋势; 通过优化排采工艺, 根据气井不同的生产条件, 针对性地实施了不同排采工艺, 井筒内积液减少, 使得气井产气量、产水量增大; 在集输管网系统方面, 基于上游气藏开发、井筒排采效果的提升, 气井油压升高, 使得井口流动指数降低。气井产量升高及两个相邻集气站相互协同作用, 提高了压缩机组效率, 并将压缩机组负荷率控制在合理范围内。

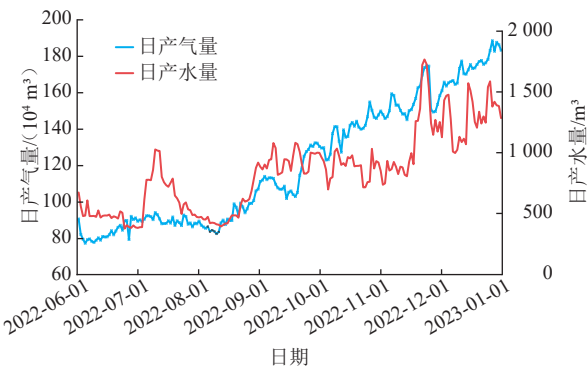


图 8 2022 年东胜气田 J 区块生产系统调整后产能情况图
Fig. 8 Capacity fluctuations after adjustments of production system in Block J of Dongsheng Gas Field in 2022

表 7 2022 年东胜气田 J 区块停产调整后一体化综合评价得分表
Table 7 Integrated evaluation scoring after adjustments of Block J in Dongsheng Gas Field in 2022

指标层	下限、上限值		评价价值	权重	隶属度	评价得分	总评价得分
指标	V_{down}	V_{up}					
C_1	0	2.0	1.22	0.189 0	0.669 4	66.94	81.83
C_2	0	10.0	7.37	0.022 9	0.161 2	16.12	
C_3	0	50.0	25.52	0.054 8	0.516 3	51.63	
C_4	0	50.0	62.31	0.019 2	1.000 0	100.00	
C_5	0.55	1.0	0.54	0.082 0	1.000 0	100.00	
C_6	30.00	57.0	73.27	0.191 7	1.000 0	100.00	
C_7	63.00	100.0	98.96	0.153 5	0.998 1	99.81	
C_8	0	2.4	0.08	0.100 0	0.997 3	99.73	
C_9	60.00	100.0	83.00	0.144 3	0.616 7	61.67	
C_{10}	0	3.6	1.60	0.042 6	0.586 8	58.68	

5 结论

1)建立了气藏-井筒-集输管网 3 层次 10 指标的

一体化综合评价体系, 构建了基于层次分析法-熵权法-模糊隶属函数法-线性加权法的评价方法。在东胜气田 J 区块的应用结果表明, 评价结果与现场生产情况一致, 调整后的气田能效水平得以提升。因此, 新建立一体化能效评价方法合理可行, 对气田生产实际具有指导作用。

2)新建立的评价体系不仅可以评价气田老区块工艺调整前、后的能效水平, 还可以用于指导气田新区块生产工艺方案的优选。但需要注意的是, 当气田生产工艺不同时, 应选择不同的指标重新建立指标体系, 再利用构建的评价方法进行计算分析。

参考文献:

[1] 刘颖. 既可防塌堵漏, 又能保护储层[EB/OL]. (2023-12-27)[2024-05-20]. http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2023-12/27/content_7085492.html.
LIU Y. It can not only prevent collapse and leakage, but also protect the reservoir[EB/OL]. (2023-12-27)[2024-05-20]. http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2023-12/27/content_7085492.html.
[2] 王经天. 榆树林油田地面集输系统能耗评价及优化改造技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2014.
WANG J T. Research on energy consumption evaluation, optimization and modification of Yushulin Oil Field surface gathering system[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014.
[3] 李玉星, 吴晓, 韩方勇. 基于 AHP 融合模糊综合评价法的集输系统用能研究[J]. 油气田地面工程, 2017, 36(11): 41-45. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6896.2017.11.010.
LI Y X, WU X, HAN F Y. Study on the energy consumption of the gathering and transportation system based on the AHP integrated fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2017, 36(11): 41-45.
[4] 司志梅, 段志刚, 钱钦, 常泰, 黄作男. 基于层次分析法的转油站系统能效评价体系研究[J]. 油气田地面工程, 2019, 38(6): 15-19. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6896.2019.06.004.
SI Z M, DUAN Z G, QIAN Q, CHANG T, HUANG Z N. Research on energy efficiency evaluation system of oil transfer station system based on analytic hierarchy process[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2019, 38(6): 15-19.
[5] 李垒. 塔河油田二、三、四区集输系统能效分析及节能措施研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.

- LI L. Energy efficiency analysis and energy-saving measures research of the gathering and transportation systems in the second, third, and fourth zones of Tahe Oilfield[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [6] 汤晟, 庞艳萍, 黎志敏, 张学强, 孙巍. 原油集输系统多层级能效评价体系研究[J]. 数学的实践与认识, 2021, 51(21): 1-8.
- TANG S, PANG Y P, LI Z M, ZHANG X Q, SUN W. Study on multi level energy efficiency evaluation system of crude oil gathering and transportation system[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2021, 51(21): 1-8.
- [7] 唐霏, 彭星煜. 基于 RS-BP 神经网络的增压站能效评价预测[J]. 油气储运, 2019, 38(3): 314-320. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2019.03.012](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2019.03.012).
- TANG F, PENG X Y. Energy efficiency evaluation and prediction of booster stations based on RS-BP Neural Network[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(3): 314-320.
- [8] 刘武, 纪国文, 罗召钱, 田智. 天然气矿场集输系统用能分析及评价方法研究[J]. 石油与天然气化工, 2016, 45(3): 109-116. DOI: [10.3969/j.issn.1007-3426.2016.03.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-3426.2016.03.022).
- LIU W, JI G W, LUO Z Q, TIAN Z. Energy analysis and evaluation method study of natural gas gathering and transportation system[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2016, 45(3): 109-116.
- [9] 彭杰. 东胜气田对低压集输工艺的应用及优化[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2020, 22(3): 24-27. DOI: [10.3969/j.issn.1673-1980.2020.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1980.2020.03.008).
- PENG J. Application and optimization of low pressure gathering system in Dongsheng Gas Field[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 22(3): 24-27.
- [10] 韩国庆, 邢志晟, 岳震铎, 杨伯客, 左昊龙, 梁星原. 柱塞气举排水采气研究现状及展望[J]. 天然气工业, 2024, 44(6): 52-63. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2024.06.006](https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2024.06.006).
- HAN G Q, XING Z S, YUE Z D, YANG B K, ZUO H L, LIANG X Y. Research status and prospect of deliquification and gas recovery by plunger lift[J]. Natural Gas Industry B, 2024, 44(6): 52-63.
- [11] 肖庆华, 文涛, 粟超. 负压开采与泡沫排水复合采气工艺在致密砂岩气藏的应用[J]. 石油钻采工艺, 2023, 45(3): 493-498. DOI: [10.13639/j.odpt.202206042](https://doi.org/10.13639/j.odpt.202206042).
- XIAO Q H, WEN T, SU C. Application of the composite gas production technology to tight sandstone gas reservoirs: Negative-pressure production and foam-assisted dewatering[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2024, 45(3): 493-498.
- [12] 吴正, 江乾锋, 周游, 何亚宁, 孙岩岩, 田伟, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格致密砂岩气田提高采收率关键技术及攻关方向[J]. 天然气工业, 2023, 43(6): 66-75. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2023.06.006](https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2023.06.006).
- WU Z, JIANG Q F, ZHOU Y, HE Y N, SUN Y Y, TIAN W, et al. Key technologies and orientation of EGR for the Sulige tight sandstone gas field in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry B, 2023, 43(6): 66-75.
- [13] CHEN M, SUN J Y, GAO E S, TIAN H N. A summary of wellbore fluid accumulation and drainage gas production technology in gas wells[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 621: 012113. DOI: [10.1088/1755-1315/621/1/012113](https://doi.org/10.1088/1755-1315/621/1/012113).
- [14] JIANG J X, LI K J, DU J G, CHEN Z Y, LIU Y H, LI Y. Prediction system for water-producing gas wells using edge intelligence[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 247: 123303. DOI: [10.1016/j.eswa.2024.123303](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123303).
- [15] 周军, 肖瑶, 孙建华, 梁光川, 彭井宏. 储气库地面工艺系统能效评价方法研究[J]. 石油与天然气化工, 2022, 51(2): 110-115. DOI: [10.3969/j.issn.1007-3426.2022.02.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-3426.2022.02.019).
- ZHOU J, XIAO Y, SUN J H, LIANG G C, PENG J H. Energy efficiency evaluation of underground gas storage ground process system[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2022, 51(2): 110-115.
- [16] 杨力, 秦红梅, 谢添一, 耿新宇. 高含硫气田集输 SCADA 安全评估方法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2024, 46(3): 117-129. DOI: [10.11885/j.issn.1674-5086.2023.11.07.01](https://doi.org/10.11885/j.issn.1674-5086.2023.11.07.01).
- YANG L, QIN H M, XIE T Y, GENG X Y. Intelligent security assessment of gathering and transportation SCADA system in high sulfur gas field[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2024, 46(3): 117-129.
- [17] 许少凡, 贺石中, 陶辉, 杨涛, 李秋秋, 杨智宏. 基于层次分析和熵权法的齿轮油选型评价[J]. 润滑与密封, 2024, 49(1): 172-178. DOI: [10.3969/j.issn.0254-0150.2024.01.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2024.01.025).
- XU S F, HE S Z, TAO H, YANG T, LI Q Q, YANG Z H. Evaluation of gear oil selection based on hierarchical analysis and entropy weight method[J]. Lubrication Engineering, 2024, 49(1): 172-178.
- [18] 王彬彬, 张兴龙, 李开鸿, 侯浩, 沈豪. 基于云模型的隧道并行管

- 道间风险评价方法[J]. 油气储运, 2023, 42(3): 298–305. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.03.007](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.03.007).
- WANG B B, ZHANG X L, LI K H, HOU H, SHEN H. Evaluation method for risks between parallel pipelines in tunnel based on cloud model[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(3): 298–305.
- [19] 王维旭, 夏博昌, 刘旬, 吕志鹏, 李享. 基于 TFN-AHP 熵权的铁钻工工业设计方案评价[J]. 石油机械, 2024, 52(7): 70–77. DOI: [10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2024.07.009](https://doi.org/10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2024.07.009).
- WANG W X, XIA B C, LIU X, LYU Z P, LI X. Evaluation on industrial design scheme of iron roughneck based on TFN-AHP entropy weight method[J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52(7): 70–77.
- [20] BISHNOI D, CHATURVEDI H. Optimised site selection of hybrid renewable installations for flare gas reduction using multi-criteria decision making[J]. Energy Conversion and Management: X, 2022, 13: 100181. DOI: [10.1016/j.ecmx.2022.100181](https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100181).
- [21] 李东晖, 田铃钰, 聂海宽, 彭泽阳. 基于模糊层次分析法的页岩气井产能影响因素分析及综合评价模型: 以四川盆地焦石坝页岩气田为例[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(3): 417–428, 454. DOI: [10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.03.003](https://doi.org/10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.03.003).
- LI D H, TIAN L Y, NIE H K, PENG Z Y. Factor analysis and comprehensive evaluation model of shale gas well productivity based on fuzzy analytic hierarchy process: Taking Jiaoshiba shale gas field in Sichuan Basin as an example[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(3): 417–428, 454.
- [22] 贾敏, 张建军, 李隽, 曹光强, 武俊文, 李楠, 等. 一种气井泡沫排水采气效果模糊定量评价方法[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(5): 119–124. DOI: [10.3969/j.issn.1672-7703.2017.05.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7703.2017.05.014).
- JIA M, ZHANG J J, LI J, CAO G Q, WU J W, LI N, et al. A fuzzy method to quantitatively evaluate the effect of foam deliquification in gas wells[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(5): 119–124.
- [23] 马国光. 天然气集输工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014: 57.
- MA G G. Natural gas gathering and transportation project[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014: 57.
- [24] 曾小康, 冯阳, 赖文庆, 汤彬坤, 吴涛, 伏喜斌, 等. 基于 AHP-熵权法的城市燃气管道风险评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(5): 130–135. DOI: [10.11731/j.issn.1673-193x.202105.020](https://doi.org/10.11731/j.issn.1673-193x.202105.020).
- ZENG X K, FENG Y, LAI W Q, TANG B K, WU T, FU X B. Risk assessment of urban gas pipeline based on AHP and entropy weight method[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(5): 130–135.
- [25] 周锋, 黄仕林, 李晓明, 廖开贵, 李勇. 基于层次分析法的致密气藏储层分类定量评价: 以新场气田蓬莱镇组气藏为例[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(3): 468–474, 483. DOI: [10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.03.016](https://doi.org/10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.03.016).
- ZHOU F, HUANG S L, LI X M, LIAO K G, LI Y. Quantitative evaluation of tight gas reservoir classification based on analytic hierarchy process: A case study of Penglaizhen Formation gas reservoir in Xinchang Gas Field[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(3): 468–474, 483.
- [26] 王霞, 段庆全. 基于改进层次分析法的油气管道风险因素权重计算[J]. 油气储运, 2019, 38(11): 1227–1231. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2019.11.004](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2019.11.004).
- WANG X, DUAN Q Q. A method for calculating the weight of oil and gas pipeline risk factor based on improved analytic hierarchy process[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(11): 1227–1231.
- [27] 周怀发, 申永亮, 张兴, 刘铭刚. 基于层次分析与集对分析法的 LNG 槽车区风险评价[J]. 油气储运, 2019, 38(3): 279–284. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2019.03.006](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2019.03.006).
- ZHOU H F, SHEN Y L, ZHANG X, LIU M G. Risk assessment on LNG tanker loading region based on analytical hierarchy process and set pair analysis theory[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(3): 279–284.
- (编辑: 李在蓉)
-
- 基金项目:** 四川省科技厅应用基础研究项目“亚临界态 CO₂ 消防管道流动特性与实验研究”, 2020YJ0393。
- 作者简介:** 贺三, 男, 1975 年生, 教授, 2004 年博士毕业于西南石油大学油气储运工程专业, 现主要从事油气流动保障、管道腐蚀与防护、油气田节能技术与评价方向的研究工作。地址: 四川省成都市新都区新都大道 8 号, 610500。电话: 13981806803。Email: hesan@126.com
- Received: 2024-06-25
• Revised: 2024-07-29
• Online: 2024-11-13

