

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202510080088

油区含水层压缩空气储能圈闭筛选标准与应用

李继岩, 罗红梅, 谢传金

(中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

摘要: 为实现“双碳”目标, 亟须开发规模化储能技术。利用中国陆相含油气盆地中广泛分布的含水层进行压缩空气储能(CAES)是一条极具潜力的途径。胜利油田拥有数以万计的含水圈闭及完善的工程设施, 是开展规模化CAES的理想场所。然而, 目前尚缺乏针对此类地质体的系统性CAES筛选标准。本研究基于数值模拟和勘探资料, 构建了涵盖地面选址、技术可行性及经济可行性三个维度的综合筛选标准体系。研究表明, 首次明确了胜利油田温带季风气候下的CAES安全半径阈值; 并定量揭示了地层倾角、注采井间距、储集层渗透率及埋深等关键参数的临界控制范围。经济评价表明了年度成本及度电成本均随运行周期增加而显著降低。以胜利油田KD642-7区块群馆陶组上段为实例研究表明, 该标准能有效甄别圈闭适宜性(实际安全半径优于理论值, 而先存井网密度不足), 并为优化注采井部署提供决策意见。该筛选标准对渤海湾盆地及其类似油气区的CAES场地筛选具有重要指导意义。

关键词: 压缩空气储能; 含水层; 圈闭; 筛选条件; 筛选标准

中图分类号: P618.13; TE122.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2026)04-1294-11

Preliminary Screening Criteria for Compressed Air Energy Storage Traps in Oil and Gas Fields

LI Jiyan, LUO Hongmei, XIE Chuanjin

(Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: To support the achievement of China's Carbon Peak and Carbon Neutrality goals, the development of large-scale energy storage technologies is essential. The use of widely distributed aquifers within continental sedimentary basins for Compressed Air Energy Storage (CAES) offers a highly promising pathway. The Shengli Oilfield, with its numerous aquifer traps and well-developed infrastructure, represents an ideal location for deploying CAES at scale. However, systematic screening criteria for selecting suitable CAES sites in such geological settings remain underdeveloped. In this study, we develop a comprehensive screening framework based on numerical simulations and exploration data that integrates site selection, technical feasibility, and economic viability. Our findings define first the safety radius threshold for CAES under temperate monsoon climate conditions, and quantify the critical ranges of key geological and engineering parameters, including formation dip angle, injection - production well spacing, permeability, and burial depth. Economic analysis indicates that both annualized cost and levelized cost of electricity decline significantly with extended operational cycles. A case study of the upper Guantao Formation in block group KD642-7 of the Shengli Oilfield demonstrates that the

收稿日期: 2025-10-08; 修回日期: 2025-11-18; 编辑: 戚开静。

基金项目: 山东省泰山产业领军人才项目 (tsx202408055)。

作者简介: 李继岩, 男, 博士研究生, 1987年出生, 研究员, 从事油气地质综合研究与勘探部署工作。

Email: ljy19870817@163.com。

引用格式: 李继岩, 罗红梅, 谢传金. 油区含水层压缩空气储能圈闭筛选标准与应用 [J]. 现代地质, 2026, 40 (4): 1294-1304. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202510080088.

LI Jiyan, LUO Hongmei, XIE Chuanjin. Preliminary Screening Criteria for Compressed Air Energy Storage Traps in Oil and Gas Fields [J]. GEOSCIENCE, 2026, 40 (4): 1294-1304. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202510080088.

proposed criteria effectively evaluate trap suitability-where the actual safety radius exceeds theoretical predictions, despite insufficient existing well density. And they also support the optimization of well placement strategies. This systematic screening criteria provide valuable guidance for CAES site selection in the Bohai Bay Basin and other analogous hydrocarbon-bearing regions.

Key words: compressed air energy storage; aquifer; trap; screening conditions; screening criteria

0 引言

随着全球能源转型的加速和碳中和目标的提出^[1-2], 储能技术成为实现碳中和、发展新能源的关键, 包括抽水蓄能、电化学储能、压缩空气储能等多种方式^[3-5], 尤其在多孔介质储集层(如含水层)中进行压缩空气储能使得油气田以其独特的优势而备受关注^[6]。位于中国“三北”等地区的多数油气田已处于较高勘探开发阶段, 其在储能方面具有“储采并重”的技术优势和场地优势^[7-9]。压缩空气储能最初由美国能源部在伊利诺伊州的匹兹菲尔德开展了向某含水层注采空气的试验来验证含水层压缩空气储能的可行性^[10-12], 而以地下盐穴为主要储集空间依其高转换效率而成为压缩空气储能的主要场景^[13-15]。然而, 地下盐穴受地域和时空的影响分布局限而无法承担多场景、低成本的应用场景。中国广泛分布的油气田多为以碎屑岩为储集空间, 其丰富的孔隙型储集空间成为压缩空气储能未来发展方向之一。

压缩空气储能利用压缩机和膨胀机(涡轮

机)实现电能与压缩空气的内能和势能的相互转化(图1), 然而油气田(简称油区)相关的压缩空气储能相比较洞穴型压缩空气储能、天然气储气库以及CO₂咸水层封存, 在经济性方面, 因存在先期油气勘探开发评价和配套设施, 在经济和技术上具有明显的优势^[16-17]。需要注意的是, 压缩空气储能因有高压气体和泄露风险, 所以其在安全评价上又不同于油气的勘探。目前基于油区场景下的压缩空气储能从地面选址、技术评价及经济评价的圈闭筛选标准鲜有报道。本文从地面、技术以及经济三个维度分析压缩空气储能库筛选标准, 并以胜利油田孤东油田KD642-7区块群馆陶组上段砂岩含水层圈闭为例, 阐述对潜力目标筛选条件及相关参数, 明确油区开展压缩空气储能选址依据。该研究成果不仅服务于油区储能库筛选实践, 也为天然气储集库提供关键技术支撑。

1 油区压缩空气储能建库优势分析

压缩空气储能系统主要包括地上部分和地下

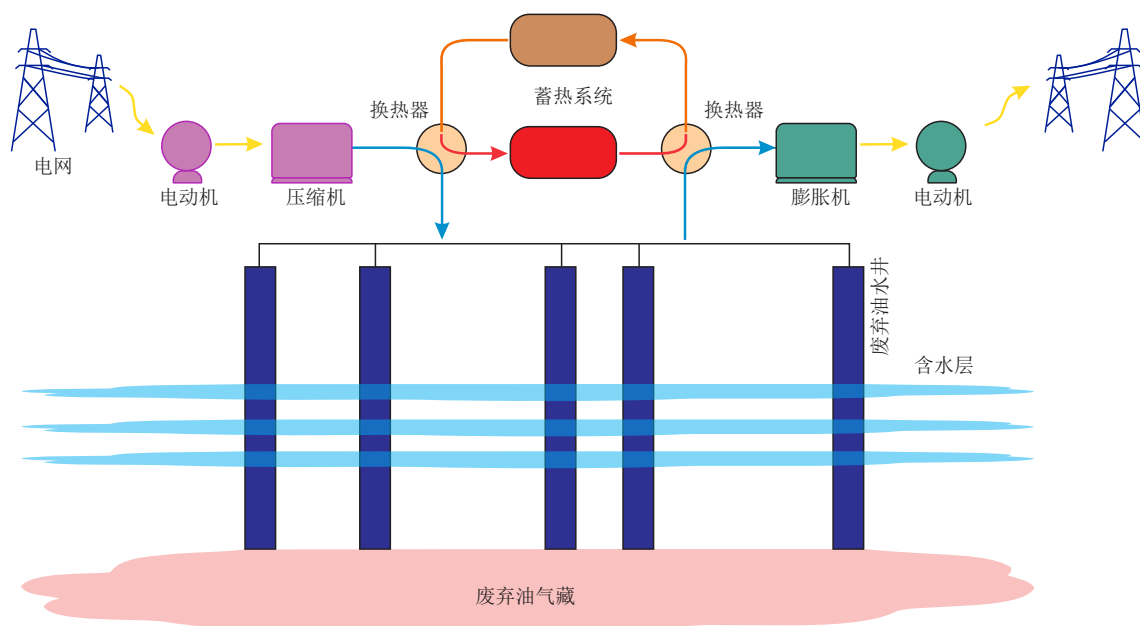


图1 非补燃式压缩空气储能系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of non-reheat compressed air energy storage system

表 1 四类典型储存气体的工程特征对比
Table 1 Comparison characteristics of four typical storage projects

序号	方面	洞穴型压缩空气储能	CO ₂ 咸水层封存	含水层储存天然气	含水层压缩空气储能
1	地面设施	地面注入与发电系统	地面注入系统	地面注入与发电 (或输送)系统	地面注入与发电系统
2	储集空间	人工开挖空腔	天然圈闭岩石孔隙	天然圈闭岩石孔隙	天然圈闭岩石孔隙
3	运行方式	双向注采	单向注入,长期封存, 无提取需求	双向注采	双向注采
4	周转周期	短期	永久	短期	短期
5	封闭机制	人工密封材料与结构	天然盖层、断层封闭	天然盖层、断层封闭	天然盖层、断层封闭
6	储存容量	完全人工控制	对 CO ₂ 运移空间限定较少	一定范围内,满足 工程设计要求	一定范围内,满足 工程设计要求
7	保压要求	高	中等	中等	高
8	场地稳定风险	可控	过度变形、失稳	过度变形、失稳	过度变形、失稳
9	泄漏危害	可控	危害与泄漏量相关, 损失经济性	危害与泄漏量相关, 损失经济性	损失经济性

部分;地上部分主要以能量转换设备为主;地下部分则因储能库的类型(譬如洞穴型和孔隙型储库)、特征(储库承压和密封程度)、性质等方面的差异性,导致其在选址、设计和建设中迥然不同。为了更有效开展油区含水层压缩空气储能圈闭筛选,将其与相关联领域(洞穴型压缩空气储能、CO₂咸水层封存、含水层储存天然气)的关键工程要素进行类比分析(表1),识别出油区含水层压缩空气储能的关键特征,以此为出发点指导选址标准研究。

从相关领域对比可以看出,与油区压缩空气储能最接近的场景是含水层储存天然气^[18],可以借鉴其圈闭筛选的基本要求。然而,两者也存在明显的差异:(1)油区在压气储能中存储的介质是空气,尽管其泄漏气体本身的危害性相较于前者更低,但压缩储能空气的能量形式为压力(势)能;(2)为提高油区储存的容量,反复增大的压缩空气储能压力会对圈闭密封性和完整性提出更高要求。因此,油区压缩空气储能含水层圈闭筛选中需要重点考虑压力问题。

2 油区储能库筛选标准

油区压缩空气储能本身是一个包含地面与地下的系统工程,不仅涉及勘探、开发、钻井、电力等多专业的融合,而且其建设与发展充分考虑油区良好的资源条件和就近的多元消纳场景。因此,在确定储能库筛选原则时,以压缩空气储能技术为核心,结合地面建设条件、地下储库地质条件、工程技术条件以及应用场景、经济可行性,针

对油区确定了三大类筛选条件,即限定性的地面选址条件、可靠性的技术条件及周期性的经济评价。

2.1 地面选址条件

地面选址条件主要针对压缩空气储能进行的环境评价和安全评价,与前期注采井的环境和安全评价有所不同。

压缩空气储能是被压缩的空气进入空气透平膨胀机中膨胀做功发电。在整个渤海湾盆地地下含水层中硫化氢和天然气广泛存在,当含有硫化氢的有毒气体从地层进入到地面空气透平膨胀机中,极大增加了有害气体扩散半径;当天然气进入到地面空气透平膨胀机后,也增加天然气蒸气云的爆炸半径。因而,除了基本的环境和安全评价外,需要考虑硫化氢这类有害气体的扩散界线及天然气这类可燃气体的燃爆界线。考虑压缩空气可燃爆炸及泄露天然气形成蒸气云爆炸范围均小于1 km;而硫化氢这类有害气体扩散的范围要远远大于1 km,尽管硫化氢的密度大于天然气的浓度。在对地面选址的时候,需要重点考虑硫化氢的扩散半径。本次以高斯模型地面轴线浓度公式为基础,风速以蒲福风级(m/s),且设定在一级风速(0.5 m/s)在100 m出的相对浓度为基准值(100%),其他条件下的浓度按照比例计算;模拟出了不同风速下的硫化氢有害气体在0~5 km范围内的相对浓度衰减程度(图2)。整个华北地区属于温带季风气候,10级风基本见不到,所以以10级风为最大值。结果显示,无论风速如何,硫化氢浓度均随着距离的增加而强烈衰减。根据中国关于硫化氢安全接触限值10⁻⁶的要求,在

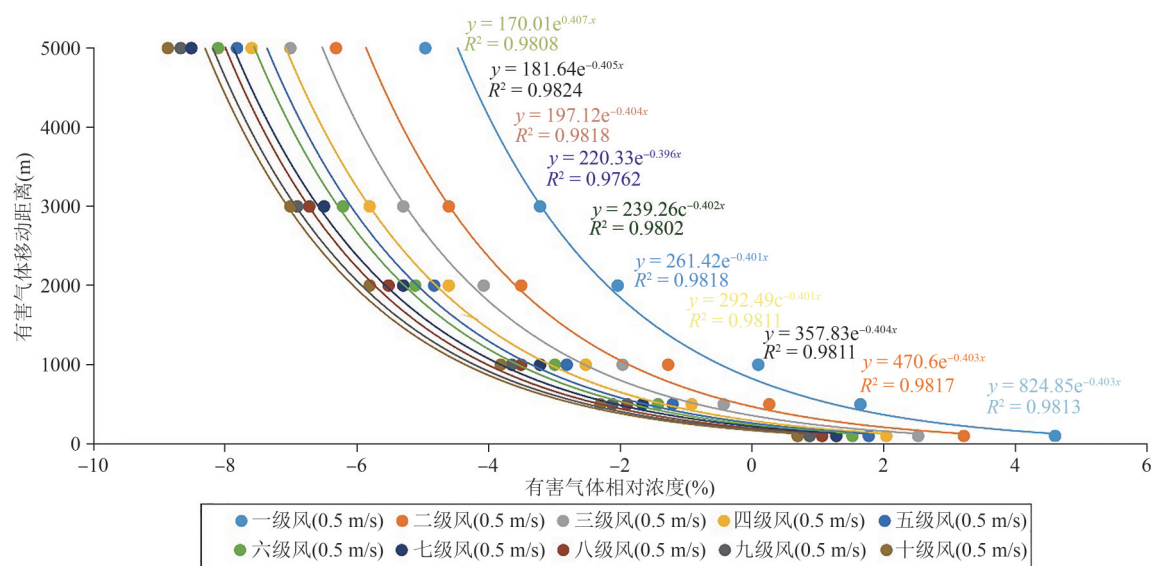


图2 有害气体相对浓度扩散程度

Fig. 2 Relative concentration diffusion degree of harmful gases

5000 m的边界上所有风速情况下的其浓度均 $\leq 0.007\%$, 常见的8—10级风速时其100 m的浓度也仅为8.2%~10.2%, 说明5000 m半径足以覆盖有害气体的主要扩散半径。

2.2 技术条件

在开展油气田压缩空气储能实施过程中, 频繁的高压注采气对储能库的库容量和性能提出更高的要求^[19], 从而保证储能库“容量大、注得进、采得出、保安全”^[12]。相应地从储能库类型与建库间距、储集层性能与圈闭密封性三个方面开展技术条件评价。

2.2.1 储能库类型及建库规模

能够保证压缩空气在可控的范围内聚集并形成气腔的储能库至关重要, 这一具有储集层、盖层和遮挡物的地质体与石油地质学中圈闭的功能如出一辙。因此, 本次借鉴石油地质学中关于圈闭成因类型的划分方案, 对储能库的类型进行划分。储能库类型的划分是基于现有资料准确落实其对应的含水层圈闭类型。由于压缩空气储能是被压缩的空气分子小, 其注入压力大, 可能会导致与变位形成的断层圈闭及特殊类型的圈闭类型在储能库类型中并不适用(图3)。本次将地层圈闭、岩性圈闭和部分构造圈闭类型引入到储能库类型中, 按照圈闭表征难度、封闭性评价难度、稳定性程度、地层倾角大小及关键要素多少为标准, 依次排列出所优选的储能库类型, 即背斜构造类、非背斜构造类、地层不整合类、独立岩性类储能库。

在考虑储集层类型基础上, 储集层地层倾角是影响被压缩空气形成气腔范围的关键因素, 进而直接影响建库速度。通过固定圈闭的规模(长 $\times$ 宽为1000 m $\times$ 300 m)、注气量(4×10^4 m³)、储集层物性(孔隙度30%, 渗透率1000 mD)与储集层厚度(10 m), 模拟储集层地层倾角与气腔半径数值模拟。结果揭示了地层倾角 $\geq 15^\circ$ 可实现半径为425 m的压缩空气气腔, 地层倾角 $\geq 2^\circ$ 可实现半径为1000 m的有效气腔, 而地层倾角 $\leq 2^\circ$ 无法形成有效气腔(图4)。因此, 在选择圈闭时必须考虑构造幅度对储能库建设规模的影响, 储集层的地层倾角必须 $\geq 2^\circ$ 。

在储能库类型确定基础上, 注采方案的合理设计是储能库规模化建设的重要因素。从前期数值模拟所获取的压缩空气气腔半径可确定出合理的注气井和采气井之间的距离, 即注采井之间的距离需要小于压缩空气气腔的半径。尽管当前的油区常规注采井网之间的距离为300 m, 考虑到天然气分子小、流动快的特征, 注气井的最小井距应小于425 m。如果叠加含泥砂岩水力压裂裂缝的延伸长度(按照200 m的人工裂缝长度), 气腔的半径甚至可以扩展到625 m, 同时造成各采气井之间的井间干扰, 因而各采气井之间的距离则大于625 m。压缩空气储能要实现采气产能达到发电水平则需要建立储能库群, 因而一个储能库群中的各个储能库之间的距离也需要大于625 m, 确保各储能库的开发效果和稳定运行。

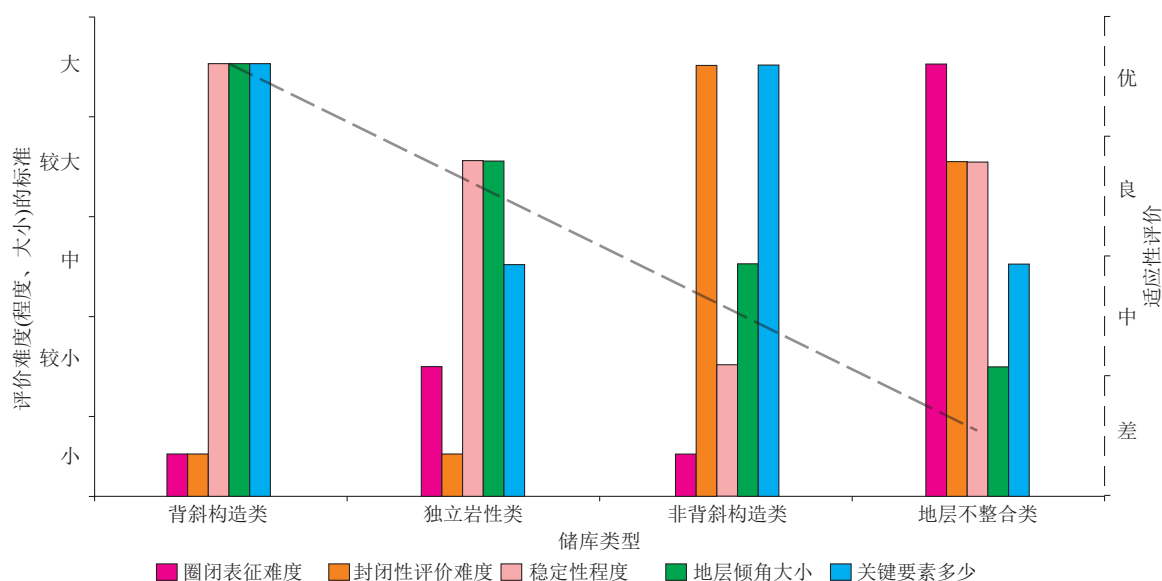


图3 不同类型圈闭建库的适用性评价

Fig. 3 Applicability evaluation of the different types of reservoirs

左侧纵坐标表示对圈闭稳定性程度、圈闭表征难度、封闭性评价难度、关键要素多少及地层倾角大小,右侧纵坐标表示建库难易程度的整体评价,用断续线表示

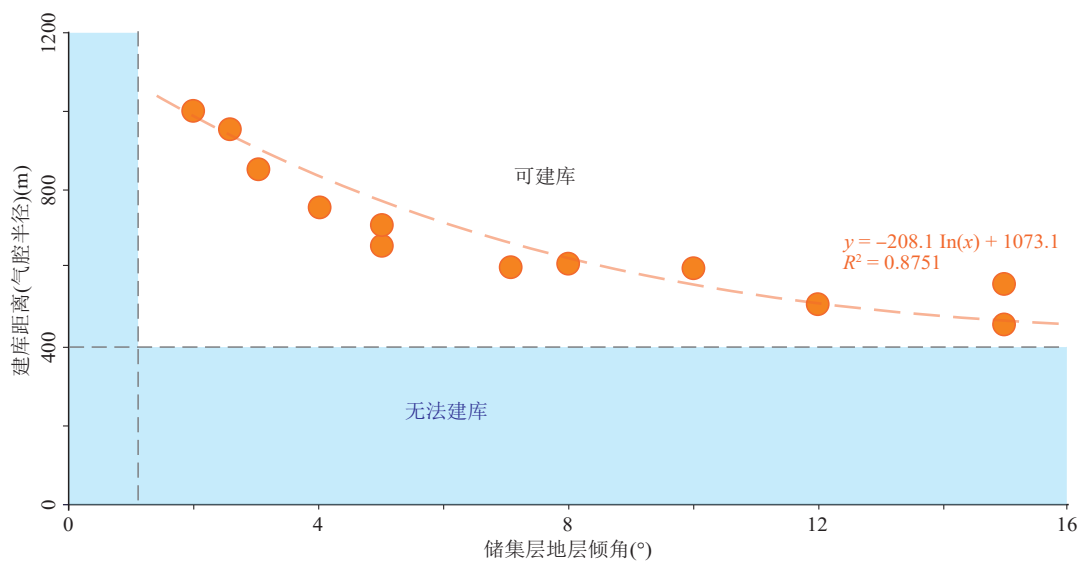


图4 储集层地层倾角与注采井井距之间的关系数值模拟结果

Fig. 4 Numerical simulation results of the relationship between stratum dip angle and well spacing for reservoir construction under different geological conditions

2.2.2 储集层性能

储集层在压缩空气储能库的地质容量及其注入性方面发挥重要的作用。为确保储能库高效稳定运行,储集层一方面要具有较高的孔隙度和渗透率,提高储集层容量、降低注入压力和能量损失;另一方面,在采气工程和发电端又要求储集层具有较好的结构稳定性,以保证其在高频注采气过程中的稳定性。针对储集层的这两方面需求,分别从物性与埋深两个方面优选储集层。

(1) 储集层的渗透率界线:关于储能库的储集层渗透率界定,美国矿业局和国际能源署发布的标准是其渗透率在0.1 mD到100 mD之间,以确保气体流动性和储存效率。抛开项目实施技术角度,以实现最大经济效益的压缩空气储能商业化,高渗透率的储集层更有利于大规模空气快速抽注,提高能量转换效率^[20]。在以地下盐穴为储集层的压缩空气储能转换效率在60%~65%之间,其气体压缩为无阻流量;而以砂岩为储集层的压

压缩空气渗流需要克服渗流过程中的压力损失,且转换效率达到50%才具有一定的商业价值。达西定律是流体流动速度与压力梯度之间的关系,按照转换效率50%的要求,计算储能库砂岩储集层的渗透率不低于300 mD。

(2) 储集层的埋藏深度界线:储集层埋藏深度的选择需要综合考虑储集层稳定性、系统安全性及运行成本。储集层埋深过浅会由于砂岩的成岩作用不足、砂岩疏松而导致其抗压能力低,容易在储能库高速与高频运行时出现严重出砂,进而损坏发电设备和井筒。埋深过深则由于压力过大而形成较高的冲蚀流量,也会导致严重出砂而导致设备磨损,其过低的流速与流量反而导致运行成本增加。按照常规的地面膨胀机发电要求供气压力需大于5 MPa、常用油管直径76 mm、空气密度随着压力升高近似线性增加(10 MPa约为15 kg/m³,40 MPa约为60 kg/m³),模拟胜利油田济阳坳陷常规砂岩储集层地层压力、压缩空气临界流速及临界流量(图5)。结果显示,济阳坳陷储集层埋深3000 m及以上时的临界流量小于15000 m³/d,而埋深在500 m则临界流速和流量激增,也导致储集层损伤。因此,储集层的适宜埋藏深度在750 m至3000 m之间。

2.2.3 圈闭密闭性

储能空间的密闭性是储能库建设的一项核心评价要素^[16],因为储能空间高密封性能才能保证压缩空气注入后在可控的范围内聚集,并能保证

压缩空气注得进、采得出。根据天然气勘探及天然气储集库的开发经验可知,涉及圈闭封闭性空间要素为储集体周边非渗透性盖层以及储集层相关的断层。非渗透性盖层所承受的压力要高于正常地层压力,才能确保储能库在高频注采过程中注入气体不会突破盖层形成裂缝或者断层而导致外溢^[21-28]。因而,对于其盖层或者断层的封闭性要求要远远大于石油与天然气的勘探评价要求,其封闭性评价分为静态评价和动态评价两个方向。其中静态评价主要是利用突破压力或排替压力这一指标。从统计的突破压力或排替压力与非渗透盖层渗透率之间关系显示,两者就有明显的负相关性,尽管来自不同地区的样品测试差别较大(图6)。本次的盖层渗透率约为 $1.0 \times 10^{-7} \mu\text{m}^2$,属于优质的盖层;然而不同盖层之间的突破压力变化较大,按照压缩空气储能为静压的80%~90%进行计算,需要选择合适的盖层分布区。本次选择储能库未涉及到断层,因此对断层封闭性评价不再进行赘述。动态评价则是基于静态评价盖层结构,结合力学参数模拟出频繁注采情况下盖层空间封闭压力,进而确定出圈闭运行的安全封闭压力。

2.3 经济评价

油区含水层压缩空气储能库相比较其他类型储能库具有地质评价成本低、井筒改造便利(井的位置及运行状态、井筒完整性、固井质量等)

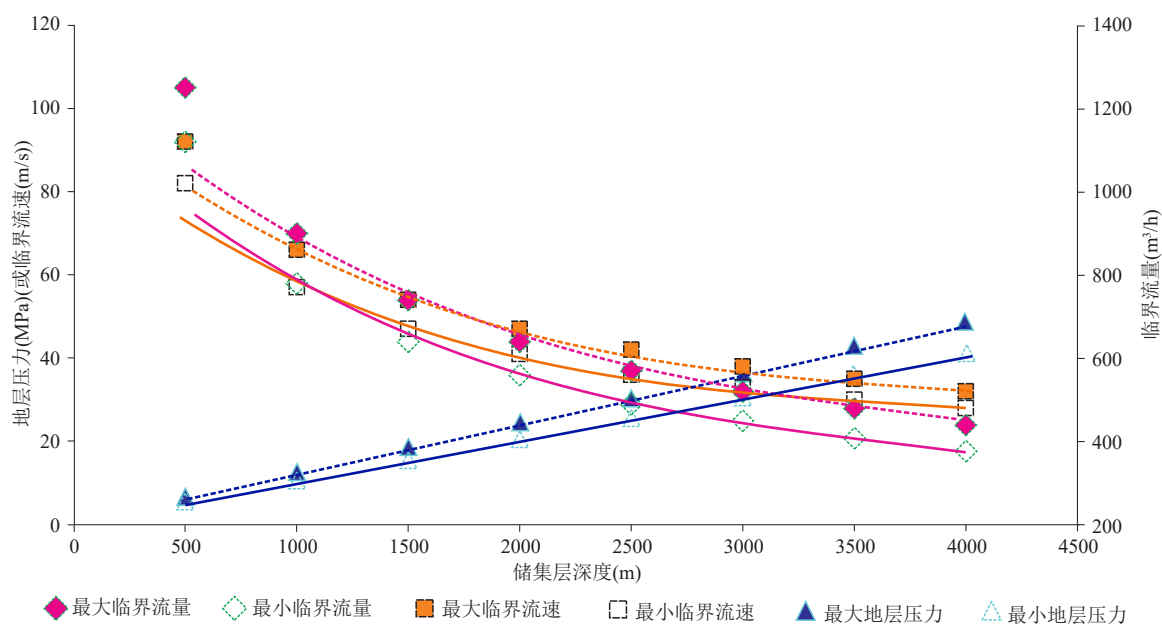


图5 模拟不同埋深下的储集层压力、临界流速及临界流量

Fig. 5 Simulation of the reservoir pressure, critical flow velocity and critical flow rate at different burial depths

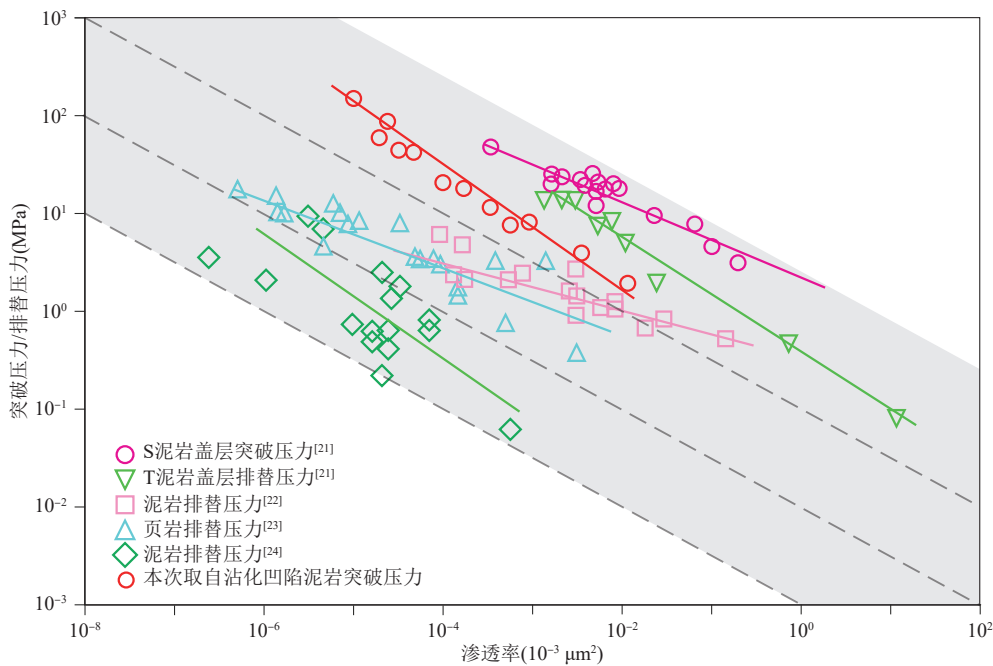


图6 模拟不同埋深下的储集层压力、临界流速及临界流量

Fig. 6 Production capacity, vertical pipe flow in the wellbore, and erosion flow when the burial depth of the simulated reservoir is 700 meters

和地面设施相对完善（新能源发电站或新能源规划建设电站位置、已有供电系统、安全及应急系统等）的优势。按照油区含水层改造为压缩空气储能库，假设项目规模为100 MW/400 MWh（功率容量MW/能量容量MWh），并考虑设备寿命、大修周期及贴现率（假设为5%），进行多周期成本预算模拟。总成本包括资本性支出（capital expenditure）、运营支出（operational expenditure）和残值。资本性支出涉及地质评估、井筒改造、密封增强、压缩空气储能设备、地面设施及其他，运营支出（ N 年）为年运维费（ N 年）和大修成本（5年一次），残值按照20年寿命归零进行设备剩余价值计算。动态调整包括贴现率影响、运维成本增长及大修周期三个内容。资本性支出以1.8亿元、年运营支出初始为资本性支出的2.5%（450万元/a）且每年增长2%；大修成本为资本性支出的5%。整体上单位成本随着运行时间的增加而降低（图7A），其中年均成本及度电成本均逐渐降低（图7B），但在大修成本及运维成本影响下总成本确呈略微增加的趋势（图7A）。

3 评价筛选实例

参照上述提出的油气田压缩空气储能选址条件，选取胜利东部探区孤东油田KD642-7区块群馆陶组上段砂岩含水圈闭为例进行候选库址评价。

3.1 地面选址条件

地面选址包括地上部分和地下部分两方面。KD642-7区块群位于东营市垦利区孤东油区，地表为已有油气勘探开发井场用地，距最近居民区、保护区及农田的大于5 km；储能库目标为油气勘探过程中发现的含水层，试油显示其含少量的天然气及硫化氢气体，其中天然气体积约为0.53%，硫化氢体积占比约为0.037%。KD642-7区块位于最近的自然保护区、居民区、军事区等关键区域约为40 km，远远大于上述模拟的5 km的安全界限。

KD642-7区块群中5个目标储能库的圈闭类型为岩性上倾尖灭形成的独立岩性圈闭，呈中强振幅地震反射特征，砂体向四周尖灭的边界非常清晰，满足建库的基本技术要求，周围均为泥岩封堵层。其中KD642-7区块砂体顶面构造图显示（图8），该砂体呈条带状近东西展布南北平均宽190 m，东西长1915 m，圈闭面积1.37 km²，圈闭高点埋深1384 m，地层倾角2.6°，构造幅度40 m，能够有效快速形成气腔。平面上，KD642-7区块群共控制总面积约为9.78 km²，纵向上约为12.04 km²。

按照100 MW/400 MWh的项目规模进行预设，根据能量计算公式 $E = P \times V_c \times \ln(P_{\max}/P_{\min}) \times \eta$ 可以计算出 V_c 的数值（ $E = 400$ MWh， P 为100 kPa，

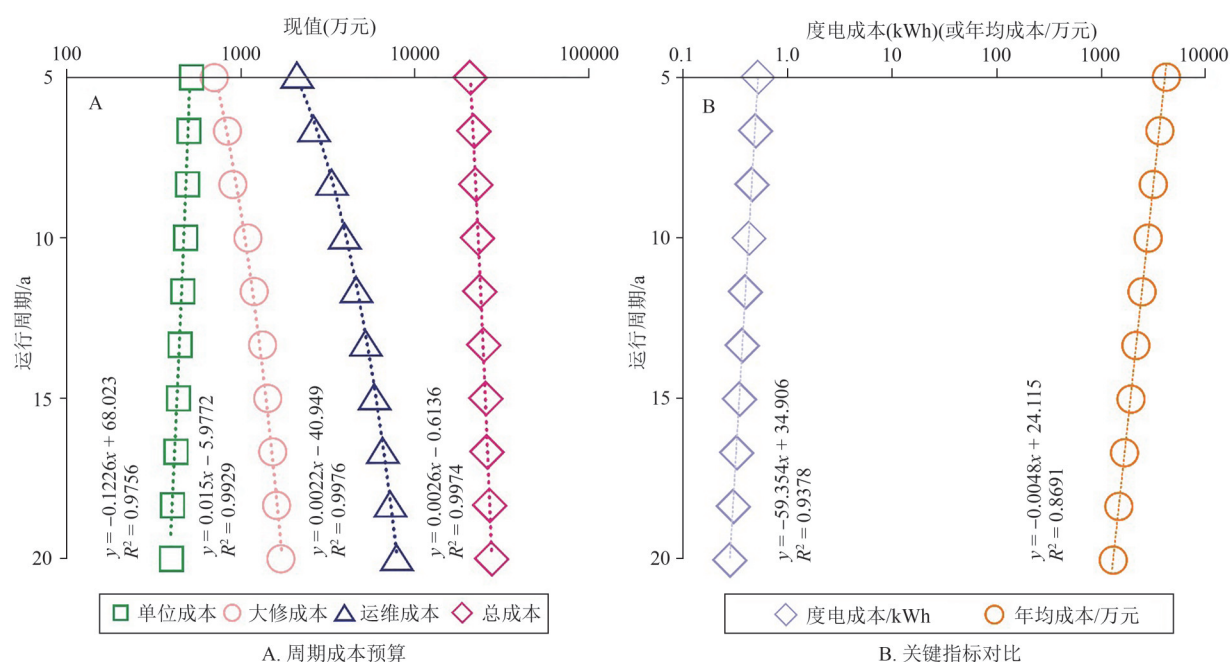


图7 油区含水层压缩空气储能库20年周期运行成本预算模型

Fig. 7 Twenty-year cycle operating cost budget model of the compressed air energy storage facility in the aquifer of the oil area

$P_{\max} = 12 \text{ MPa}$, $P_{\min} = 4 \text{ MPa}$, η 为往返效率, 约为0.85, $\ln(12/4) \approx 1.1$, 其约为 $1.54 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。储库砂体厚度12.8 m, 储集层孔隙度34.8%, 渗透率 $687.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 其为特高孔、高渗储集层。按照 $A = V_c / (h \times \Phi_{\text{eff}}) = 1.54 \times 10^7 / (12.8 \times 0.136) \text{ km}^3 \approx 8.85 \text{ km}^3$, 这一控制面积远小于平面的 9.78 km^2 和纵向的 12.04 km^2 实际面积。

3.2 技术性条件

储库目标为曲流河沉积, 储盖组合具典型河流相二元结构特征, 砂体四周受非渗透泥岩包围, 泥岩厚度稳定, 密闭条件有利。储集层内流体为纯水层, 地层水总矿化度为14399~15101 mg/L, 氯离子含量为8635~9188 mg/L, 水型为 CaCl_2 。地层温度为 58.0°C , 压力系数为0.965, 属正常温压系统。

对储能库盖层的封闭性能进行了定量评价, 评价结果作为储能库筛选的重要依据^[29-31]。尽管前期对目标区不同盖层做了突破压力测试, 然而KD642-7区块群馆陶组上段不同盖层的突破压力变化极大。根据木桶原理盖层所有单元中的最小值作为整个盖层系统的安全封闭压力^[32], 它是决定盖层是否安全可靠的基本标准。具体计算过程中, 需要首先将盖层离散化为多个单元体^[33], 以实测突破压力级力学参数为依据计算每个单元体的封闭压力, 盖层全部单元体中封闭压力最小值

即为该盖层的安全封闭压力。采用上述方法对KD642-7区块群的KD642-7井区的盖层各个单元体(位置)的最大封闭压力初步评价计算(图9), 该盖层系统的安全封闭压力约为26.7 MPa左右(图8)。对该储能库目标圈闭开展现场封闭性实验, 并对其目标储集层压力进行检测, 运行测试45 d, 证实储能库压力系数基本恒定, 表明该储能库盖层密闭评价准确。

3.3 经济性条件

KD642-7区块群储能库目标区地面为已存的油井和水井井场, 其中有油井12口, 水井43口, 涵盖水平井9口, 现为停产状态。现场对所有油水井开展了注气实验, 其井筒密闭状态均为良好。储能库目标周边50 km内, 光伏与风力发电累计投产项目已有14个, 规划项目8个, 面临着巨大的调峰需求; 同时周边的油气勘探、开发及生产消纳场景存在多元便利, 满足就近消纳便利条件。

前期已经对按照20年的运行周期、项目规模为100 MW/400 MWh进行了评价, 且有完善的井网, 而如何进行井网优选是经济性评价的关键。根据100 MW发电功率约需要360 kg/s的空气质量流量。参考油气井产能类型, 1000 m水平井段的水平井采出流量为60~80 kg/s, 以其平均值计算约为6口采出井即可满足。按照三点布井法, 注入井数为2口井, 监测井部署2口, 即可满足

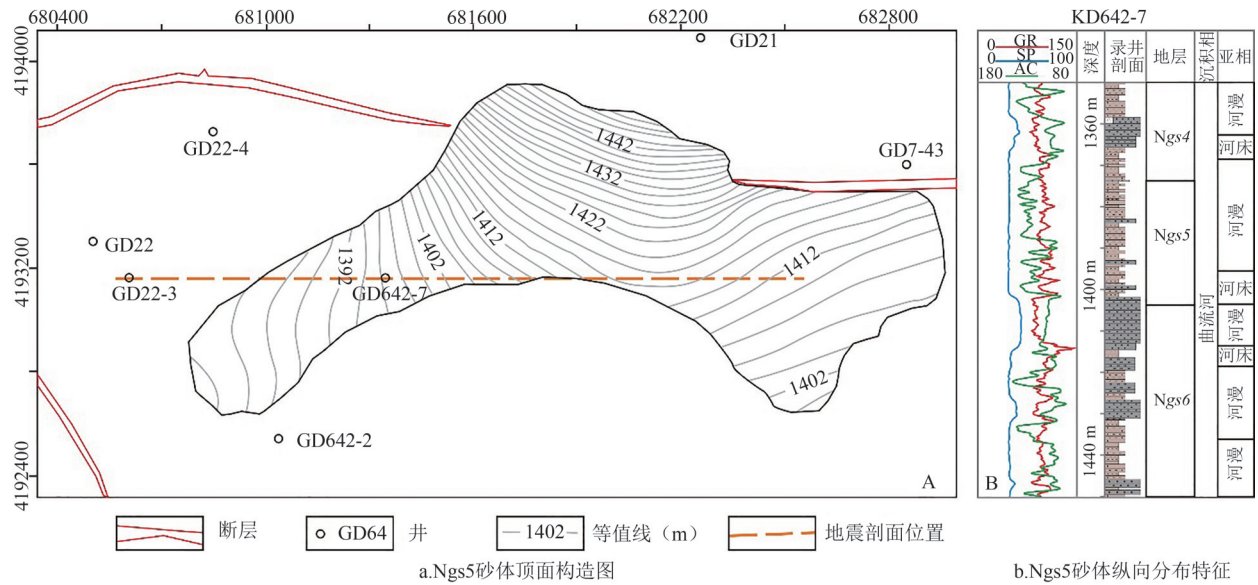


图8 KD642-7井区 Ng55 砂体特征

Fig. 8 Characteristics of the Ng55 sandstone layer in the KD642-7 well area

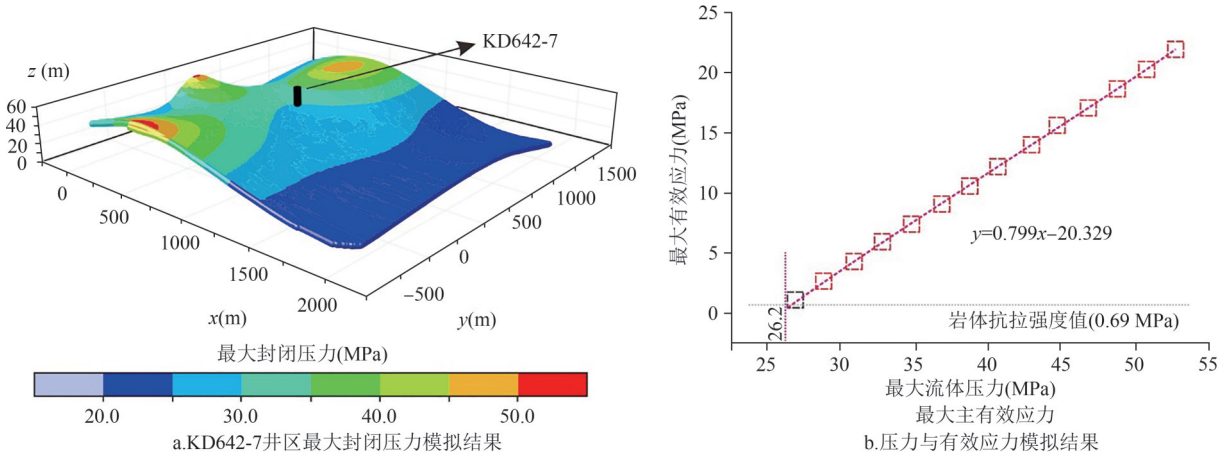


图9 KD642-7井区盖层封闭性评价

Fig. 9 Sealing performance evaluation of reservoir in the KD642-7 well area

KD642-7 区块的开发。为实现经济最多效率,建议前期优先选择具有水平井的区块进行先导实验,再进行效益性评价。另外, KD642-7 区块群因纵向上多个盖层突破压力变化较大,下一步需要对不同盖层分别进行测试与评价,以确保压缩空气储能项目群的平稳运行。

4 结 论

(1) 油区储能库筛选标准涉及限定性的地面选址条件、可靠性的技术性条件和周期性的经济评价。其中地面选址条件中的 5000 m 半径是储能库与安全区的界限。可靠性的技术性条件中,储集层的地层倾角必须 $> 2^\circ$ 是形成气腔的关键条件;一个储能库群中的各个储能库之间大于 625 m 是各个储能库安全运行的边界条件;储能库储集层的渗透率不低于 300 mD、埋藏深度在 750 m 至 3000 m 之间;盖层封闭性取决于安全封闭压力和压缩空气储能运行压力的关系。周期性的经济评价中,以运行周期 20 年为标准,其成本随着运行周期增加而持续降低,最终可降至 0.53 元/kWh。

(2) 以孤东油田 KD642-7 区块群馆陶组上段砂岩含水圈闭为实例,其实际安全区半径大约 40 km。平面上与纵向上均满足于项目预设规模为 100 MW/400MWh 所需要的实际面积。技术性条件中,该储集层埋深 1200~1600 m,储集层渗透率大于储能库优选标准,盖层突破压力从 3.4~120 MPa,安全封闭压力为 26.7 MPa。消费场景满足要求,经济成本约束下的生产场景则需要选择 6 口采出井和 3 口注入井来满足该项目预设的规模。

参考文献:

- [1] GAO J, SHI X, LAN X, et al. A Technical roadmap for China's petrochemical industry upgrading to achieve carbon neutrality [J]. *Engineering*, 2023, 29, 2955–2968.
- [2] 潘松圻, 邹才能, 李勇, 等. 重大生物事件与化石能源形成演化——兼论地球系统框架下能源学发展[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 498–509.
- [3] 完颜祺琪, 李国欣, 朱华银, 等. 中国天然气地下储气库重大理论、关键技术进展与展望[J]. *天然气工业*, 2025, 45(1): 153–163.
- [4] 杜少雄, 孔令雨, 刘璐, 等. 石油沥青基炭材料电化学储能应用综述(英文)[J]. *新型炭材料(中英文)*, 2024, 39(6): 1088–1107.
- [5] 姜文, 黄乐清, 张松航, 等. 压缩空气储能地下储气库地质评价研究进展[J]. *煤炭地质与勘探*, 2025, 21(3): 256–262.
- [6] 周瑜, 夏才初, 赵海斌, 等. 压气储能内衬洞室的空气泄漏率及围岩力学响应估算方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(2): 297–309.
- [7] 陈红汉. 我国大型克拉通叠合盆地的走滑构造与油气聚集研究进展[J]. *地球科学*, 2023, 48(6): 2039–2066.
- [8] 祁生文, 郑博文, 王赞, 等. 二氧化碳地质利用与封存场址的地质评价[J]. *中国科学:地球科学*, 2023, 53(9): 1937–1957.
- [9] 左锐, 潘明浩, 刘嘉蔚, 等. 含水层压缩空气储能过程中储层渗流特性及地球化学过程研究进展[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(8): 1769–1778.
- [10] 文冬光, 宋健, 刁玉杰, 等. 深部水文地质研究的机遇与挑战[J]. *地学前缘*, 2022, 29(3): 11–24.
- [11] 康永尚, 杨帆, 刘树杰. 调峰地下含水层储气库库址优选定量决策方法[J]. *地球科学:中国地质大学学报*, 2007, 32(2): 235–240.
- [12] 黄宽, 张万益, 王丰翔, 等. 地下空间储能国内外发展现状及调查建议[J]. *中国地质*, 2024, 51(1): 105–117.
- [13] 杨春和, 王同涛. 深地储能研究进展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(9): 1729–1759.
- [14] 叶斌, 程子睿, 彭益成. 压气储能洞室气密性影响因素分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(10): 1526–1532.
- [15] 张国华, 王薪锦, 相月, 等. 压缩空气硬岩储库关键问题研究进展:气密性能、热力过程与稳定性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(11): 2601–2626.
- [16] 郭朝斌, 王志辉, 刘凯, 等. 特殊地下空间应用与研究现状[J]. *中国地质*, 2019, 46(3): 482–492.
- [17] 姜文, 黄乐清, 张松航, 等. 压缩空气储能地下储气库地质评价研究进展[J]. *煤田地质与勘探*, 2025, 53(8): 62–75.
- [18] KAZEMI T E, AREZOU J, ALI T. 低渗透含水层储气库储气过程中气-水-岩相互作用及储气量影响因素[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(6): 1053–1058.
- [19] 金佳旭, 朱磊, 刘磊, 等. 填埋场单井注气气体压力监测试验及预测模型[J]. *岩土力学*, 2023, 44(1): 259–267.
- [20] 吕晓光, 李伟. 多层砂岩油田热采油藏管理提高采收率[J]. *新疆石油地质*, 2024, 45(1): 65–71.
- [21] ZHU S N, ZHENG D W, SUN J C, et al. Experimental study on dynamic sealing capacity and safe threshold of caprock in underground gas storages [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 101: 104521.
- [22] 朱思南, 曾大乾, 张广权, 等. 气藏型储气库多周期注采工况下受损盖层密封能力评价方法及演化特征[J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(1): 2078–2090.
- [23] DAVIES P B. Evaluation of the role of threshold pressure in controlling flow of waste-generated gas into bedded salt at the Waste Isolation Pilot Plant [R]. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 1991.
- [24] AMANN-HILDENBRAND A, GHANIZADEH A, KROOSS B M. Transport properties of unconventional gas systems [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2012, 31(1): 90–99.
- [25] 陈博文, 李琦, 谭永胜, 等. 不同有效应力下泥岩盖层二氧化碳突破压力演化特征的试验研究[J]. *岩土力学*, 2024, 45(12): 3681–3693.
- [26] 田澜希, 张冠杰, 雷新. 琼东南盆地二号断裂带断层封闭性评

价[J]. 现代地质, 2024, 38(5): 1235 – 1247.

[27] 王圣宜, 邹长春, 彭诚, 等. 海域孔隙型储层天然气水合物赋存模式定量化表征: 声波和电阻率测井的约束[J]. 现代地质, 2023, 37(1): 127 – 137.

[28] 朱子恒, 任众鑫, 王照周, 等. 苏北盆地刘庄储气库密封性评价研究[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(5): 805 – 813.

[29] 毛川, 刘丽, 赵晓明, 等. 四川盆地地下采卤型盐腔空气储能封闭性评价[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2024, 47(3): 48 – 64.

[30] KUSHNIR R, ULLMANN A, DAYAN A. Thermodynamic models for the temperature and pressure variations within adiabatic caverns of compressed air energy storage plants [J]. Journal of Energy Resources Technology Transactions of the Asme, 2012, 134(2): 219 – 231.

[31] 万发, 蒋中明, 廖峻慧, 等. 地下水对 CAES 地下储气库气密性和围岩稳定性影响[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(9): 1899 – 1908.

[32] 夏才初, 张平阳, 周舒威, 等. 大规模压气储能洞室稳定性和洞周应变分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1391 – 1398.

[33] 蒋中明, 黄毓成, 刘澜婷, 等. 平江浅埋地下储气实验库力学响应数值分析[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 37 – 43.