水文地質工程地質
HYDROGEOLOGY & ENGINEERING GEOLOGY
中文核心期刊 CSCD核心期刊
中科双效期刊 中国科技核心期刊
Caj-cd规范获奖期刊

岩性圈闭型压缩气体地质储能场地适宜性评价方法及应用研究

郭朝斌，王福刚，李　采，朱宇通

Site suitability evaluation method and application of compressed gas geological energy storage in lithologic trap

GUO Chaobin, WANG Fugang, LI Cai, and ZHU Yutong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202403010

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黑龙江林甸地区深部咸水层CO_2地质储存条件与潜力评估

Geological storage conditions and potential assessment of CO_2 in deep saline aquifers in Lindian of Heilongjiang Province

马永法, 周学军, 董俊领, 詹涛, 王旭, 刘玲, 刘玉, 刘艳, 何兰, 李昌, 史珍珍　水文地质工程地质. 2022, 49(6): 179–189

新疆准东地区场地尺度二氧化碳地质封存联合深部咸水开采潜力评估

A study of the potential of field-scale of CO_2 geological storage and enhanced water recovery in the eastern Junggar area of Xinjiang

马鑫, 李旭峰, 文冬光, 罗兴旺, 刁玉杰, 杨国栋, 尹书郭, 曹伟　水文地质工程地质. 2021, 48(6): 196–205

通过永定河渗漏补给地下水的适宜性评估研究

The suitability assessment of groundwater recharge by leakage of the Yongding River

曹欣怡, 翟远征, 李木子, 潘成忠, 郑富新, 芦红, 夏雪莲, 滕彦国, 王金生　水文地质工程地质. 2022, 49(1): 20–29

高放废物深地质处置地下水数值模拟应用综述

Review of groundwater numerical simulation for deep geological disposal of high-level radioactive waste

李露露, 张秋兰, 李星宇, 张璜, 崔亚莉, 邵景力　水文地质工程地质. 2022, 49(2): 43–53

从核心期刊评价指标分析如何提升期刊影响力——以《水文地质工程地质》为例

An analysis on the evaluation indexes of core journal and its improving effect on journal influence: a case study of Hydrogeology & Engineering Geology

汪美华, 范宏喜, 张若琳　水文地质工程地质. 2019, 46(3): 169–169

高放废物深地质处置地下水流数值模拟方法研究进展

Advances in groundwater numerical simulation in deep geological disposal of high-level radioactive waste

李露露, 周志超, 邵景力, 崔亚莉, 赵敬波　水文地质工程地质. 2021, 48(6): 13–23

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202403010

郭朝斌, 王福刚, 李采, 等. 岩性圈闭型压缩气体地质储能场地适宜性评价方法及应用研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 10-20.

GUO Chaobin, WANG Fugang, LI Cai, et al. Site suitability evaluation method and application of compressed gas geological energy storage in lithologic trap[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 10-20.

岩性圈闭型压缩气体地质储能场地适宜性评价方法及应用研究

郭朝斌[1,2], 王福刚[3], 李　采[1,2], 朱宇通[1,2]

（1. 中国地质科学院, 北京　100037; 2. 自然资源部碳封存与地质储能工程技术创新中心, 北京　100037; 3. 中国石油化工股份有限公司胜利油田, 山东 东营　257001）

摘要： 针对目前岩性圈闭型压缩气体地质储能场地适宜性评价多基于静态因素, 缺乏动态多因素的耦合分析, 导致评估结果与实际工程应用存在较大差异这一问题, 开展细化储能场地适宜性评价方法研究。通过考虑储气层储集性、储能安全性、实际操作性等方面, 提出场地静态可行性分析与动态性能评估相结合的方法, 并以胜利油田孤东辖区 A2 砂体为例开展应用研究。通过场地地质特征静态分析、GPSFLOW 数值模拟软件定量评价以及现场先导性注气试验评估, 结果显示 A2 砂体井口压力在注入标况空气 9.4×10^4 m^3 结束后下降 8.16%, 显示密封性良好, 符合储能空间要求。表明考虑储能系统动态性能的场地适宜性评价方法可为项目的选址和建设、储能效率的评价及优化提供更准确的数据支撑, 有利于促进清洁能源利用与能源转型的可持续发展。

关键词： 地质储能; 适宜性评价; 数值模拟; 水文地质; 岩性圈闭

中图分类号： X701; P542^{+}.5　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-3665(2024)04-0010-11

Site suitability evaluation method and application of compressed gas geological energy storage in lithologic trap

GUO Chaobin[1,2], WANG Fugang[3], LI Cai[1,2], ZHU Yutong[1,2]

(1. *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing*　100037, *China*; 2. *Technology Innovation Center for Carbon Sequestration and Geological Energy Storage*, *MNR*, *Beijing*　100037, *China*; 3. *Sinopec Shengli Oilfield Company*, *Dongying*, *Shandong*　257001, *China*)

Abstract: The current evaluation of the suitability of lithological trap-type compressed gas geological storage sites is mostly based on static factors. It lacks a coupled analysis of dynamic multiple factors, leading to a significant gap between the assessment results and actual engineering applications. To develop a refined method for evaluating the suitability of energy storage sites, an integrated approach that combines static feasibility analysis with dynamic performance assessment, considering key aspects such as reservoir properties, energy storage safety, and practical operability was proposed. The method was applied in the A2 geological formation of the Gudong

收稿日期： 2024-03-05; **修订日期：** 2024-05-07　　**投稿网址：** www.swdzgcdz.com

基金项目： 国家自然科学基金项目(42372286; 42002255; U2244215; U2344226); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221819); 中国地质科学院基本科研业务费专项经费(JKYQN202306; JKY202413)

第一作者： 郭朝斌(1989—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事多相流体数值模拟工作。E-mail: guochaobin123@hotmail.com

通讯作者： 李采(1979—), 女, 博士, 正高级工程师, 主要从事多相流体数值模拟工作。E-mail: licai@cags.ac.cn

Oilfield. Through the static analysis of site geological features, quantitative evaluation using GPSFLOW numerical simulation software, and on-site pilot gas injection tests, the results show that after injecting 9.4×10^4 m^3 of air, the pressure in the A2 geological formation decreases by 8.16% within 6 days. It indicates the good sealing performance meeting the requirements of energy storage space. Considering the dynamic performance of energy storage systems, the suitability evaluation method can provide more accurate data support for the site selection, construction, evaluation, and optimization of energy storage efficiency, further promoting sustainable development of clean energy utilization and energy transition.

Keywords: geological storage；suitability evaluation；numerical simulation；hydrological；lithologic trap

随着太阳能和风能等可再生能源的不断发展, 储能技术通过周期性的峰谷储存释放电量成为解决能源间歇性和不稳定性的关键方案之一[1], 在季节调峰、事故应急、战略储备等方面也具有重要意义[2]。2022 年, 可再生能源新增装机 1.52×10^8 kW, 占全国新增发电装机的 76.2%, 已成为我国电力新增装机的主体[3－5]。

压缩气体地质储能作为一种规模化、周期性的物理储能方案, 以其选址便利性、快速部署能力、迅捷反应及多样化的应用环境等特点正在成为能源储存研究中的一个焦点领域[3, 6－7]。目前根据储气库类型的不同, 分为以盐穴、硐库为代表的洞穴型和以含水层、枯竭油气藏为代表的多孔介质型两类储气库[2, 8－9]。其中, 以盐穴为代表的储能系统研究程度较高, 代表性工程为德国的 Huntorf[10] 及美国的 MacIntosh 电站[11], 以及并网运行不久的江苏金坛储能电站[12－14]。含水层、枯竭油气藏等储气库类型储能系统由于资源分布广泛, 在有储能需求的地区比较容易筛选出合适的场地, 相关研究聚焦在系统设计、效率优化、现场试验等方面, 并已有部分小型示范工程, 如美国 Iowa 项目[11, 15－21]。

科学合理的场地适宜性评价和选址工作是实现压缩气体地质储能的前提条件[17, 22－23], 涉及地质条件、地质稳定性、储层气体密度、地表环境影响以及经济可行性等方面, 对确保储气库建设和安全、高效运行具有重要意义。在已有场地评价研究中多为静态评价因素的定性及半定量分析, 对于储能过程中的动态参数考虑较少[17]。岩性圈闭是指在沉积层内部由于岩石性质或物性的横向变化形成的能够限制流体流动的封闭环境, 通常由具有孔隙度和渗透性的储集岩体组成, 其周围被不渗透或低渗透性的岩石所包围。由于具有较清晰的储库边界, 封闭空间良好, 是开展多孔介质储气库压缩气体地质储能的优选场地。但以往关于多孔介质压缩气体地质储能场地的研究以构造圈闭或侧向边界开放的水平层状为主[24－27], 较少关注岩性圈闭型。为此, 本文开展岩性圈闭型压缩气体地质储能场地适宜性评价方法研究, 在充分分析静态评价因素基础上探索与动态因素耦合进行定量分析, 为地质储能场地评价提供更多参考, 进一步提高场地评价的科学性和准确性。

1　储能场地适宜性方法

在进行场地适宜性评价时, 需要通过定性和定量相结合的分析方法, 综合考虑储能系统规模、效益及环境影响等各个方面的因素, 并重视限制性因素, 如断层的存在、人口密集区的接近等可能对项目的可行性产生重大影响。选出既符合技术和经济要求, 又能最小化环境和社会风险的场地, 从而为压缩气体地质储能提供最佳的实施方案。

1.1　静态可行性分析

借鉴已有工程案例资料[9, 17] 分析, 建立岩性圈闭压缩气体地质储能场地适宜性评价体系, 如表 1 所示。根据储能规模及安全性可分为 3 个大的评价指标, 分别为储集性、安全性和操作性。

储集性表示根据储能需求确定储存容量, 评估场地是否能够提供足够的空间以满足设计规模, 是表征场地可行性的关键因素。

安全性是影响储能系统评估的限制性因素, 需充分考虑如断层活动、地震风险、气体泄漏的可能性及其后果, 确保公共安全不会因地质储能项目而受到威胁。同时评估对地表和地下环境的潜在影响, 包括对土壤、地下水、生态系统的影响, 以及对附近居民区和自然敏感区的可能影响。

操作性主要受到经济性、政策支持、公众接受度等方面的影响。重点考虑建设和运营成本, 以及储能系统的长期经济回报可行性。另外, 在实施过程中可能遇到的技术挑战也需要充分考虑。

最后, 在储能需求地区开展源汇匹配分析, 结合实际场地特征, 因地制宜选择评价因素采用层次分析法、模糊综合评价法等方法进行半定量分析, 得出场地适宜性评价结论。

表 1 压缩气体地质储能场地适宜性静态评价指标

Table 1 Index for site assessment of compressed gas geological energy storage

类别	评价对象	影响因子	意义
储集性	储层	厚度	垂向距离影响储能空间体积
		面积	横向距离影响储能空间体积
		孔隙度	储能空间体积
		渗透率	影响气体可占据储集空间比例
		深度	影响压缩气体的压力及密度
		温度	影响流体的密度
安全性	盖层	厚度	可能的密封有效性
		岩石学特征	渗透性和孔隙度
		已知的密封性	流体逃逸的潜在性
		横向连续性	完整性和溢出点
		次级盖层	主盖层之上的密封性
	断层	破碎	流体转移潜能
		渗透性	流体运移时间
		构造	构造的稳定性影响新旧断层
	井孔	注入井	注入井的密封性
		废弃井	潜在的直接通道
	地表	地形气候	潜在泄露后羽流的延伸
		土地利用	气体暴露的影响
		人口密集程度	气体暴露的影响
		水文特征	气体的扩散形式
操作性	经济性	源汇匹配	与能源站的距离影响建设成本
		峰谷差价	峰谷差价影响储能系统的效益
	场地建设	注入井孔	井孔的数量及建设成本
		场地位置	保护区等占地影响批复性
		政策	政府、民众支持

1.2 动态性能评估

动态评价是在静态评价可行的基础上进一步通过室内试验、数值模拟等方法开展储能规模及效率的定量表征，主要步骤包括：

(1)基础数据准备

充分收集石油、地矿、水利、海洋、气象、高等院校与科研机构等部门单位在研究区开展的区域地质、水文地质、工程地质、环境地质勘查、监测、研究等基础资料和成果，全面收集工作区规划等资料，并对资料进行整理和综合分析研究。同时，开展室内试验测试获取岩芯的物理、化学和力学等属性参数。

(2)模型建立

包括地质模型、属性模型及数值模型等步骤。根据已有的资料，在地质特征研究的基础上，利用单井基础数据、地震解释数据、地质基础研究资料、测试解释数据、储量单元资料建立三维地质和属性模型。地质模型主要包括储层、盖层、井筒、断层等结构模型。属性模型包括孔隙度模型、渗透率模型、饱和度模型。数值模型包括网格剖分、初始条件、边界条件及结果分析等内容。

(3)参数敏感性分析

由于地质条件的不确定性，在建立模型后需开展不同参数的敏感性分析，为后续开展方案设计提供基础，包括渗透率、孔隙度、边界条件(表 2)及注气速率、循环周期等。

表 2 边界条件敏感性分析方案示例

Table 2 Scenarios demonstration of boundary sensitivity analysis

模型	参数
1	上、下及四周边界为封闭边界
2	上边界为开放边界，其余为封闭边界，逐步设置下、四周边界开放
3	上、下及四周边界为开放边界

(4)设计初始气囊形成及注采循环方案

利用建立的数值模型对压缩气体地质储能的过程进行模拟分析，主要包括初始气囊形成、注采循环等过程。在初始气囊形成阶段，需要确定注气量及注气速率，以及预期的最大压力积聚等参数。在注采循环过程中，需要确定循环周期、单次循环的速率、是否会引起气水界面的运移等参数。最后，提出最大储能规模及效率优化方案等数据。

1.3 场地测试

场地测试是储能场地适宜性评价中的重要环节，通过一系列的现场试验来获取地下岩石、流体特性及储层物性的详细信息，主要包括钻孔密封测试、注气压力测试、吞吐试验等内容，测试钻孔及岩性圈闭的可用性，并根据实测数据与数值模型结果对比分析，为后续开展实际参数试验提供支撑。

(1)钻孔密封测试

通过向钻孔中注入工作气体并封闭井口，监测压力随时间的变化。如果压力保持稳定，说明该段地层具有良好的封闭性；如果压力下降，则可能存在裂缝或其他渗透通道。这项测试有助于确定钻孔是否存在可能的泄漏路径，从而影响其经济开采价值。

(2)岩性圈闭压力测试

向储层注入气体并测量其压力响应来评估储层的渗透性和容量。通过分析注入压力与时间的关系，推断储层的物理特性。

(3)释放试验

在注入一定量气体后，将气体释放，通过监测抽出和注入过程中的压力变化，可以了解储层的循环能力，在砂岩储层中还需测试出砂量。

(4)模型优化与方案预测

将实测数据与模型预测结果进行比较，可以验证

模型的准确性, 并对模型进行调整优化。这种对比分析有助于更准确地理解储层特性, 为后续的实际参数试验和开采策略的制定提供科学依据。

2　应用案例

选择胜利油田孤东辖区 A2 圈闭为例开展压缩气体地质储能适宜性评价, 分为场地静态可行性分析和动态性能评估两步。胜利油田孤东辖区位于济阳坳陷沾化凹陷的东北部, 孤南洼陷、孤北洼陷与桩东洼陷之间, 垦东—青坨子凸起的西侧, 主要分布在孤东潜山披覆构造上。孤东油田新生界地层自下而上发育古近系沙河街组及东营组、新近系馆陶组和明化镇组。

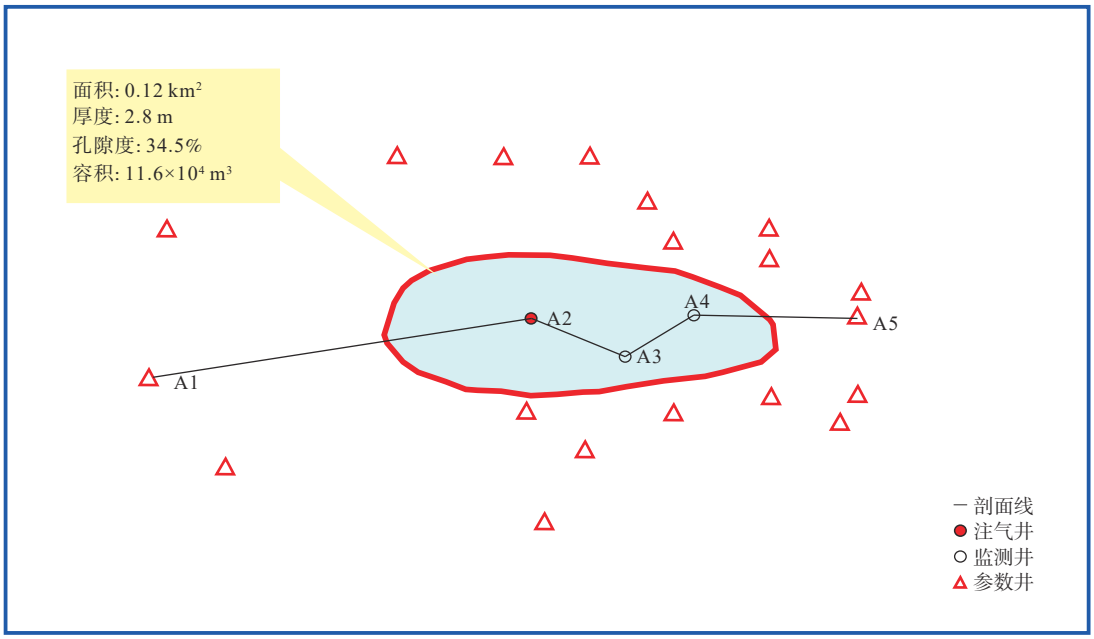
2.1　场地静态可行性分析

2.1.1　储集性

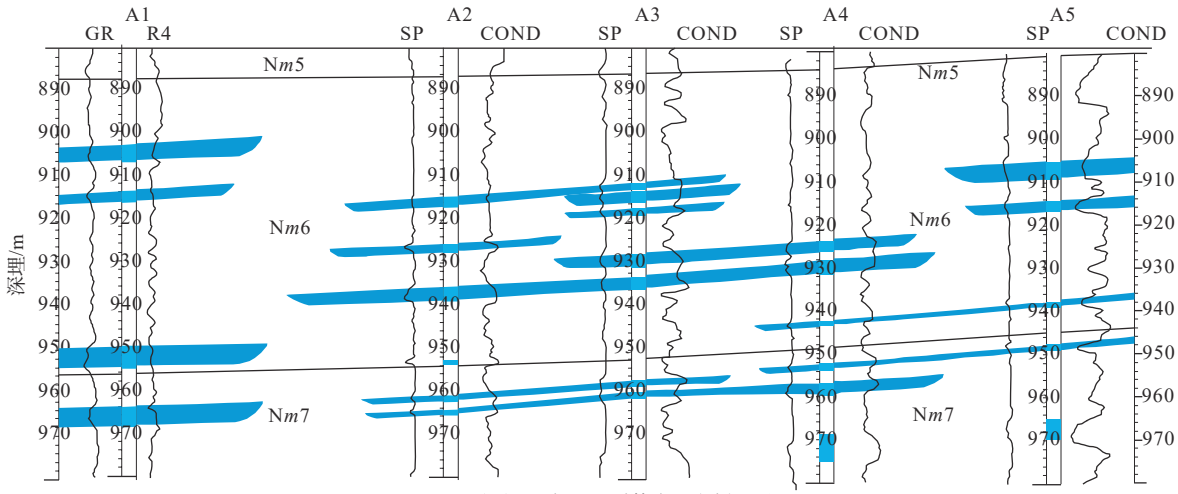
孤东 A2 钻孔设计井深 1 475 m, 完钻井深 1 477 m, 井深地层为馆陶组。孤东 A2 钻孔, 平面位置如图 1(a)所示, 经过的明化镇组顶部埋深约 887 m。根据地震剖面初步判断, 在埋深930 m 左右发育一砂岩透镜体, 结合周围钻孔岩芯揭露, 初步判断 A2 东西向剖面如图 1(b)所示。

初步筛选出 A2 透镜体平面面积 0.12 km^2, 厚度 2.8 m, 平均孔隙度为 34.5%, 通过计算其容积为 11.6×10^4 m^3, 适合开展小规模压缩气体地质储能。

地震资料对水砂的反射特征较气砂体弱, 通过与



（a）孤东A2地质体平面位置示意图



（b）孤东A2地质体东西向剖面图

图 1　孤东 A2 结构体结构解释图（东—西）

Fig. 1　Structure explanation of A2 (east-west)

邻井精细地层对比落实砂体展布，在目前的井控条件下，认为该砂体是封闭的，其封闭性将通过注气试验进一步验证。

2.1.2 安全性分析

A2 地质体具有多组盖层，且盖层厚度适宜，存在次级盖层进一步增强了其封闭能力，有效防止了气体的垂直逸出，显示出优秀的密封性。A2 地质体所在位置的水文特征、地形气候条件以及土地利用情况均支持开展储能的可行性，而较低的人口密集程度有助于减少环境和社会影响。

2.1.3 操作性分析

A2 圈闭周围 2 km 范围内拥有一座太阳能光伏基地，其储能需求较大，非常适合供能。这种源汇匹配使得能源无需长距离运输，减少了能源的损耗和成本，同时也对环境造成了较小的影响。现有的注入井状况良好，可以被重新利用，从而降低项目初始成本。

同时，场地位于采油厂辖区内的场地，享有政策支持及公众接受度优势，操作性高。其优越的地理位置与政策环境为项目带来独特优势，有助于项目的可行性和实施。

2.2 空间密封性动态评估

2.2.1 三维数值模型建立

利用 GPSFLOW（General Purpose Subsurface FLOW）软件开展储能系统地下储气库密封性分析。GPSFLOW 软件是由 C++语言编写的用于多相流体数值模拟运移分析的软件，软件使用积分有限差分方法进行空间离散化，采用一阶全隐式时间差分，非线性代数方程组使用牛顿-拉夫逊迭代法求解。主要应用于 CO_2 地质封存、压缩气体地质储能、地下水运移等领域，其质能守恒方程如表 3 所示。

（1）研究区剖分

采用 mView 软件[28] 进行积分有限差分法[29] 对研究区域进行网格剖分。如图 2 所示，平面上剖分为 30 m×30 m 大小的网格，注入井附近进行加密处理（网格边长 0.2 m），共 887 个网格，垂向上在目标注入层进行加密共剖分为 13 层：整个研究区剖分为 11 531 个网格，33 147 个链接。

（2）岩石基本参数

根据圈闭构造特征，模型中分为砂岩与泥岩 2 种岩性，具体参数如表 4 所示，圈闭砂体的孔隙度和渗透率从 A2 地质体钻孔测试分析报告中获取，垂向渗透率按照水平向渗透率的 1/10 设置，泥岩的渗透率在模型中假设为 0.01×10^{-15} m^2，用于表征良好封闭性。

表 3 GPSFLOW 质能守恒方程

Table 3 The mass and energy balance equations solved in GPSFLOW

参数	公式
质能守恒方程	$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_{V_n} M^i \mathrm{d}V_n = \int_{\Gamma_n} F^i \cdot n \mathrm{d}\Gamma_n + \int_{V_n} q^i \mathrm{d}V_n$
质量累积方程	$M^i = \varphi \sum_{\beta=1}^{\mathrm{NPH}} S_\beta \rho_\beta X_\beta^i,\ i = 1,\mathrm{NK};\ \beta = 1,\mathrm{NPH}$
能量累积方程	$M^{\mathrm{NK}+1} = \varphi \sum_{\beta=1}^{\mathrm{NPH}} S_\beta \rho_\beta U_\beta + (1-\varphi)\rho_R C_R T$
质量通量	$F^i = \sum_{\beta=1}^{\mathrm{NPH}} X_\beta^i \rho_\beta u_\beta$
能量通量	$F^{\mathrm{NK}+1} = -\lambda \nabla T + \varphi \sum_{\beta=1}^{\mathrm{NPH}} h_\beta \rho_\beta u_\beta$

注：i为组分，NK表示组分总数量；M^i为组分i在单位体积中的质量或能量积累项；V_n为由闭合表面所界定的任意子域；F为质量或热通量；n为指向V_n的面元Γ_n上的法向量；q为质量或能量的汇/源项；φ为孔隙度；β为相态指数，从1到相态总数量（NPH）；S_β为相β的饱和度（各相占据的孔隙空间的体积分数）；ρ_β为相β的密度；X_β^i为相β中组分i的质量分数；U_β表示相β的比内能；C_R为岩石比热；T为温度；u_β为达西速度；λ为导热系数；h_β为相β的比焓。

模型中为气液两相流，相对渗透率和毛细压力计算函数分为 van Genuchten-Mualem 模型[30－31] 和 van Genuchten 函数[30]，计算参数曲线如图 3 所示。

（3）初始条件

1）初始温度

根据油藏探明储量报告，该地区温度梯度为 0.321 °C/km，属于正常温度系统，模型中温度分布根据式（1）计算得到：

$$T = T_0 + h \cdot G \tag{1}$$

式中：T—— 模型中不同位置的温度/°C；

T_0—— 地面温度/°C，取常年平均地面温度；

h—— 埋深/m；

G—— 地温梯度/（°C·km^{-1}）。

2）初始压力

模型初始状态时处于静水压力平衡状态：

$$P = P_0 + \rho g h \tag{2}$$

式中：P——模型中不同位置的压力/Pa；

P_0——大气压/Pa，取 1.01×10^5 Pa；

ρ——水的密度/（kg·m^{-3}），取 1 000 kg/m^3；

g—— 重力加速度/（ m·s^{-2}），取 9.8 m/s^2；

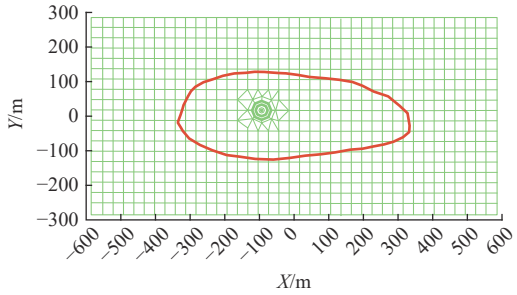
h—— 埋深/m。

3）初始气相饱和度

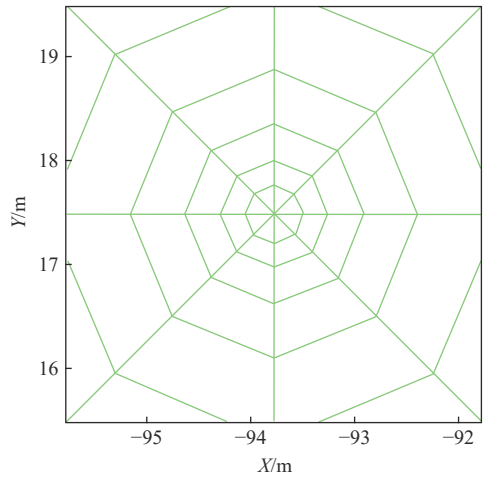
初始地层中不含空气，故气相饱和度设置为 0。

4）边界条件

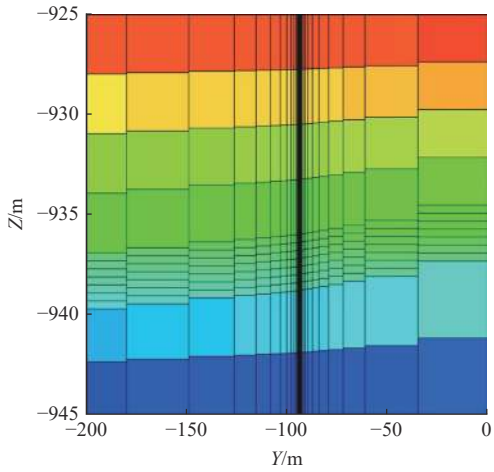
基本模型中假设边界为无流量边界。



（a）平面网格剖分



（b）井孔附近网格加密处理



（c）垂向网格剖分

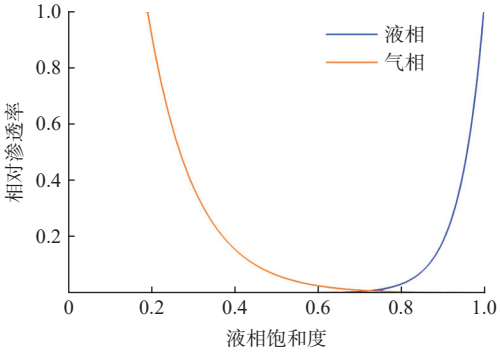
图 2　网格剖分

Fig. 2　Domain discretization

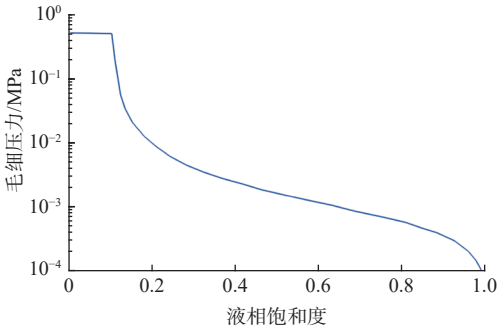
表 4　岩石基本性质

Table 4　Basic parameters of rocks

参数	砂岩	泥岩
孔隙度	0.345	0.05
水平向渗透率/(10^{-15} m^2)	2000	0.01
垂向渗透率/(10^{-15} m^2)	200	0.001
岩石颗粒密度/(kg·m^{-3})	2 600	
压缩系数/Pa^{-1}	1.0×10^{-10}	
比热/(J·kg^{-1}·°C^{-1})	920.0	



（a）相对渗透率计算函数曲线



（b）毛细压力计算函数曲线

图 3　相对渗透率和毛细压力计算函数曲线

Fig. 3　Parameter of relative permeability and capillary pressure calculation function

2.2.2　注气方案

采取连续注气方式开展储能空间密闭性测试，选择 0.1 kg/s 速率（标况下体积速率约 4.6 m^3/min）连续注入 14 d，共 120.96 t 空气，体积为 9.4×10^4 m^3。根据注入层位平均温度压力，在地层中的体积约 758 m^3，在 10 MPa、50°C 时空气密度约 143 kg/m^3。

2.2.3　动态评估结果分析

（1）基本模型结果分析

如图 4 所示，随着注气的继续，压力逐渐上升，注气结束后为 13.23 MPa，是原始地层压力的 1.42 倍。停止注入后，压强在 6 d 内下降了 1.08 MPa。压缩气体地质储能的循环周期一般为天或周，在此时间段内

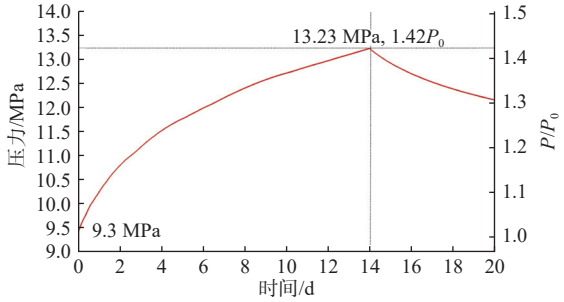
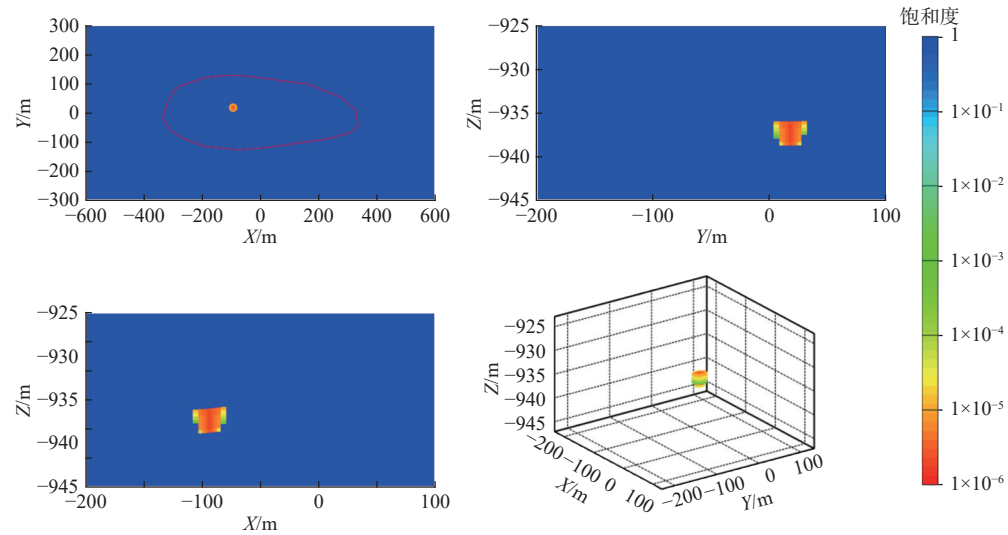
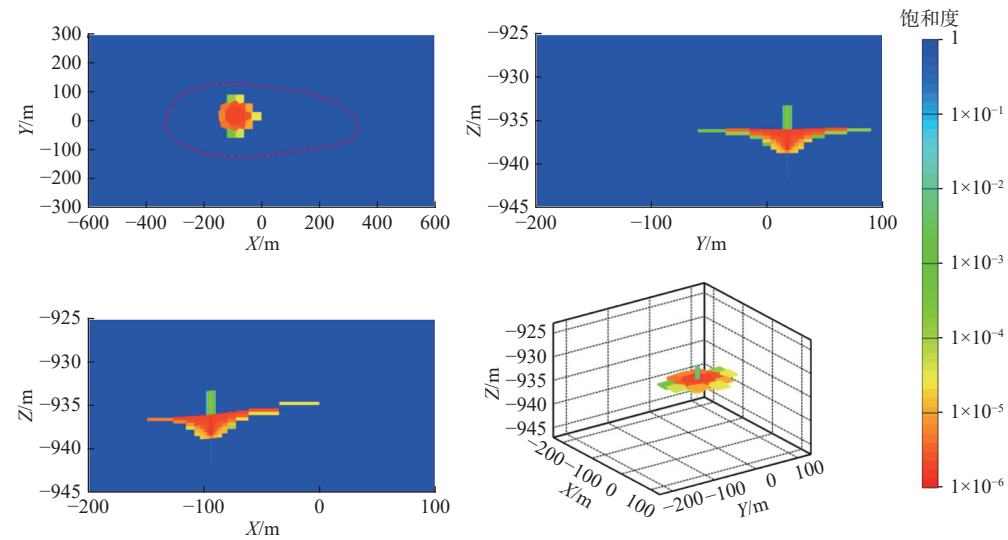


图 4　基本模型中井底压力随时间变化图

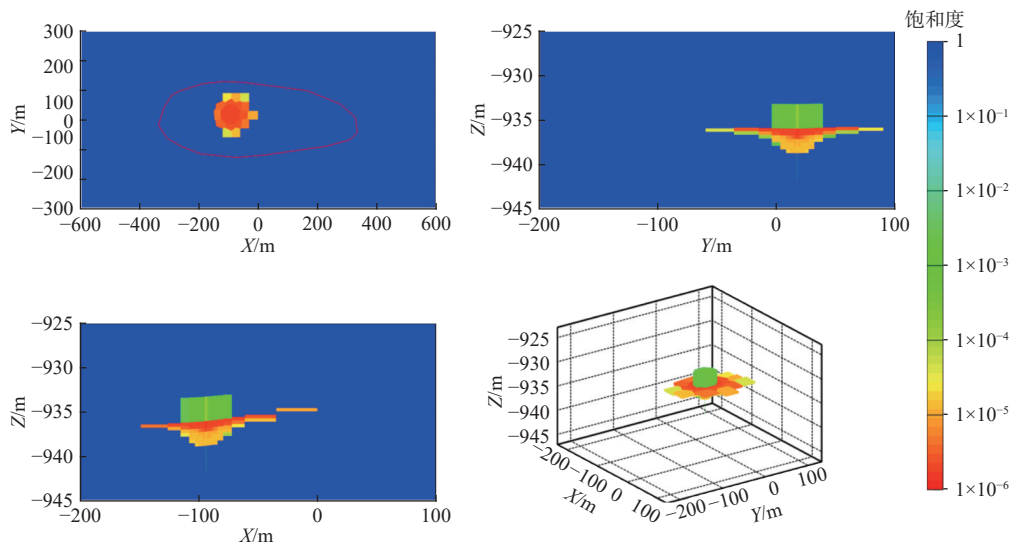
Fig. 4　Pressure variation in the basic model



（a）第1天时气相饱和度分布



（b）第14天时气相饱和度分布



（c）第20天时气相饱和度分布

图 5　不同时间气相饱和度分布

Fig. 5　Gas saturation distribution on different days

压力降低了 8.16%, 可认为地层的密封性良好, 符合储能空间的要求。

第 1 天、14 天和 20 天时气体饱和度如图 5 所示。第 1 天注入井附近饱和, 平面上运移距离注入井约 10 m, 垂向上运移距离约 2.8 m。第 14 天时, 平面上运移距离注入井约 100 m, 少量气体向上突破盖层。

结合注入过程压力增幅、停注后压力下降比率等趋势及气相运移分布规律, 初步判断 A2 砂体密封性良好。在 20 d 内, 平面上运移距离注入点约 100 m, 近井区域可以形成一定大小的初始气囊, 为后续注采循环提供良好的压力支持。

(2)边界范围敏感性分析

基本模型中为根据注入井及周围井岩性分布等控制条件初步确定, 实际地质边界会有不同, 为考虑不同砂体范围对注气过程的影响, 设计不同渗透率边界模型, 不同边界范围敏感性分析方案如表 5 所示。方案中的比例为边界到注入点的距离的倍数, 具体范围如图 6 所示。

表 5　不同边界范围敏感性分析方案设计

Table 5　Different boundary ratio scenarios design

编号	边界范围
B1	0.6
B2	0.8
B3	1.2
B4	1.4

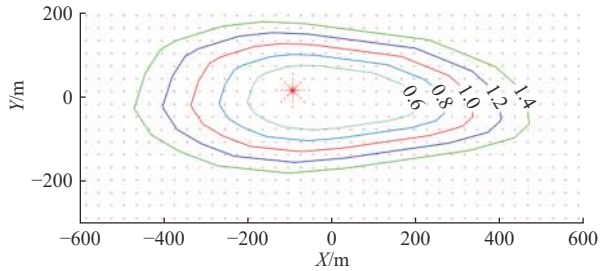


图 6　不同边界范围示意图

Fig. 6　Schematic diagram of different boundary ranges

从图 7 可以看出, 不同的边界范围对注入井压力变化具有较大的影响, 具体表现为砂体范围越大, 压力升高的幅度越小, 在边界是封闭的前提下, 越有利于后续的注气, 即储能系统的规模越大。在边界范围比例为 0.8 时, 在注入结束后井底压力超过安全压力, 即 $1.5P_0$, 此时会发生岩石破裂的情况, 会产生一定的安全影响, 因此认为此时的砂体范围不适合进行基本模型中设定的储能规模。

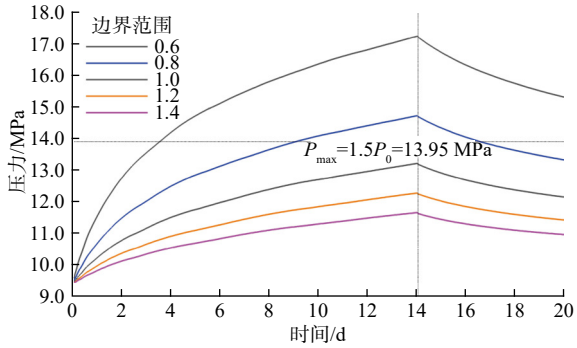


图 7　不同边界范围模型中井底压力随时间变化图

Fig. 7　Pressure variation of different boundary ratio scenarios

(3)孔隙度敏感性分析

在预研究阶段, 通常暂未开展详细场地地球物理探测分析, 故需在模型中考虑不同孔隙度、渗透率非均质性分布对注气过程的影响。设计不同孔隙度敏感性分析方案, 如表 6 所示, 基本模型中孔隙度为 0.345。

表 6　不同孔隙度敏感性分析方案设计

Table 6　Different porosity scenarios design

编号	孔隙度
P1	0.1
P2	0.2
P3	0.345
P4	0.4

孔隙度对注入压力的变化具有不可忽略的影响, 如图 8 所示。砂体孔隙度大于 0.345 时, 注入压力低于 $1.5P_0$ 破裂压力。

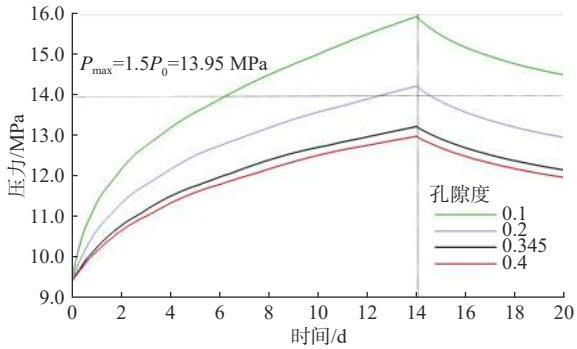


图 8　不同孔隙度敏感性分析方案井底压力变化对比

Fig. 8　Comparison of pressure variation for different porosity scenarios

(4)渗透率敏感性分析

为分析不同砂体渗透率对注气过程的影响, 设计 50×10^{-15} ~ $4\,000\times10^{-15}$ m^2 模型情景, 如表 7 所示。

渗透率越大, 压力增幅越小, 越有利于注气的继

表 7 不同渗透率敏感性分析方案设计

Table 7 Different permeability scenarios design

编号	渗透率/(10^{-15} m^2)
K1	50
K2	100
K3	500
K4	1 000
K5	2000
K6	3 000
K7	4 000

续，即可扩大储能规模(图 9)。当渗透率降低为 50×10^{-15} m^2 时，最大压力将超过破裂压力，引起安全隐患。从单次储能规模上分析，较小的渗透率可以带来较大的注采压力，从而使得储能规模相应提升。但注采速率需要严格控制，因此在实际选址过程中应结合实际需求进行分析。

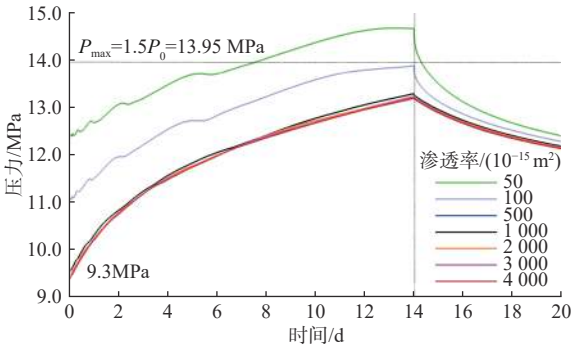


图 9 不同渗透率敏感性分析方案井底压力变化对比

Fig. 9 Comparison of pressure variation for different permeability scenarios

2.3 现场测试

2.3.1 钻孔可用性分析

利用清洁水对灰面(970 m 埋深)、井口及以上套管试压 12.0 MPa，稳压 30 min，压降小于 0.5 MPa，井孔密封性良好。

2.3.2 注气压力分析

钻孔密封洗测试通过后，在 936.4 ~ 938.4 m 处进行射孔并防砂处理。由于该地区处于油气藏富集地区，为了确保施工安全，将注气试验的工质气体由空气换为氮气，结合注氮车实际工况，注入标况下 10×10^4 m^3 氮气并对井口压力进行记录分析，结果如图 10 所示。在注气初期，由于气相驱替液相导致出现压力上升现象，最高为 12 MPa，在注入稳定后压力下降至 10 MPa 后保持稳定，在注气结束后也保持稳定，判断砂体相对密封，符合储能空间的要求。

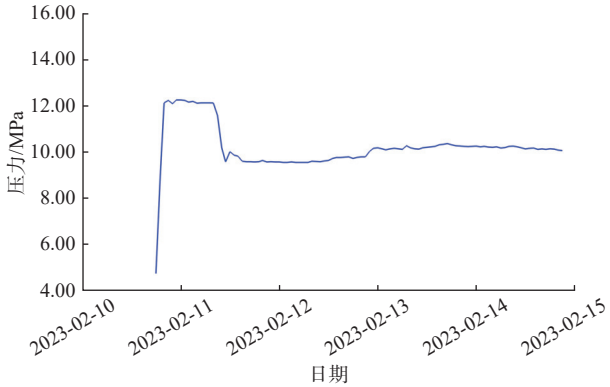


图 10 注气压力试验中井口压力变化

Fig. 10 Wellhead pressure variation during gas injection test

根据现有数据，可以判断 A2 砂体具有良好的圈闭性，适合开展压缩气体地质储能试验。后续过程中，在确保岩性圈闭及井孔中气体组分无变化后还应进一步开展释放试验，进而更为动态判断场地的动态性能。

3 结论

(1)以岩性圈闭为研究对象，提出压缩气体地质储能场地适宜性静态可行性评价与动态性能评价相结合的评价方法。静态评价利用数据分析等定性及半定量方法对储集性、安全性和操作性三类开展可行性分析。动态评价以数值模型计算方法为主开展封存性能的初步评估分析，为后续实际工程提供符合实际的评价结果。

(2)以胜利油田孤东辖区 A2 岩性圈闭为例开展实际应用研究，静态可行性及动态数值模拟评价结果显示 A2 地质体具有良好的圈闭特性，适合开展压缩气体地质储能工程建设。

(3)后续实际应用中应加强井底压力和温度的实时监测，从而更为及时准确地分析储能系统的状态，为项目的选址和建设、储能效率的评价及优化提供更准确的数据支撑。

本文提出的评价方法可为评估含水层、枯竭油气藏等多孔介质类型的地下储气库的储能适宜性提供一定参考价值，促进清洁能源利用与能源转型的可持续发展。

参考文献（References）：

[1] 李红，白雨鑫，何青. 压缩二氧化碳储能系统膨胀机研究进展 [J]. 热力发电，2024, 53(2)：17 − 26. [LI Hong, BAI Yuxin, HE Qing. Research progress of

expander for compressed carbon dioxide energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(2): 17 − 26. (in Chinese with English abstract)]

[2] 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. [HUANG Kuan, ZHANG Wanyi, WANG Fengxiang, et al. Development status of underground space energy storage at home and abroad and geological survey suggestions[J]. Geology in China, 2024, 51(1): 105 − 117. (in Chinese with English abstract)]

[3] 凌晨，吴斌，朱学成，等. 350MW 级先进压缩空气储能系统建模与特性分析 [J]. 能源研究与利用，2023(5): 28 − 32. [LING Chen, WU Bin, ZHU Xuecheng, et al. Modeling and characteristic analysis of 350MW advanced compressed air energy storage system[J]. Energy Research & Utilization, 2023(5): 28 − 32. (in Chinese)]

[4] 国家能源局发布 2022 年全国电力工业统计数据 [EB]. (2023-01-18)[2024-03-01]. [National Energy Administration released statistical data of national electric power industry for 2022[EB]. (2023-01-18)[2024-03-01]. http://www.nea.gov.cn/2023-01/18/c_1310691509.htm. (in Chinese)]

[5] 中电建协发布《中国电力建设行业年度发展报告 2022》[EB]. (2022-08-29)[2024-03-01]. [CECC releases China Power Construction Industry Annual Development Report 2022[EB]. (2022-08-29)[2024-03-01]. http://www.chinapower.com.cn/xw/gnxw/20220829/165036.html. (in Chinese)]

[6] 孙晓霞，桂中华，高梓玉，等. 压缩空气储能系统动态运行特性 [J]. 储能科学与技术，2023, 12(6): 1840 − 1853. [SUN Xiaoxia, GUI Zhonghua, GAO Ziyu, et al. Dynamic characteristics of compressed air energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(6): 1840 − 1853. (in Chinese with English abstract)]

[7] 何青，王珂. 等温压缩空气储能技术及其研究进展 [J]. 热力发电，2022, 51(8): 11 − 19. [HE Qing, WANG Ke. Research progress of isothermal compressed air energy storage technology[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(8): 11 − 19. (in Chinese with English abstract)]

[8] LIU Hejuan, YANG Chunhe, LIU Jianjun, et al. An overview of underground energy storage in porous media and development in China[J]. Gas Science and Engineering, 2023, 117: 205079.

[9] GUO Chaobin, LI Cai, ZHANG Keni, et al. The promise and challenges of utility-scale compressed air energy storage in aquifers[J]. Applied Energy, 2021, 286: 116513.

[10] 刘笑驰，梅生伟，丁若晨，等. 压缩空气储能工程现状、发展趋势及应用展望 [J]. 电力自动化设备，2023, 43(10): 38 − 47. [LIU Xiaochi, MEI Shengwei, DING Ruochen, et al. Current situation, development trend and application prospect of compressed air energy storage engineering projects[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 38 − 47. (in Chinese with English abstract)]

[11] 张文，王龙轩，丛晓明，等. 新型压缩空气储能及其技术发展 [J]. 科学技术与工程，2023, 23(36): 15335 − 15347. [ZHANG Wen, WANG Longxuan, CONG Xiaoming, et al. New type of compressed air energy storage and its technological development[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(36): 15335 − 15347. (in Chinese with English abstract)]

[12] 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. [YANG Chunhe, WANG Tongtao. Advance in deep underground energy storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(9): 1729 − 1759. (in Chinese with English abstract)]

[13] WU Fan, XU Mingyang, ZHONG Wei, et al. Thermodynamic and economic analyses of a modified adiabatic compressed air energy storage system coupling with thermal power generation [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 59: 104521.

[14] 李子钰，吕宏，李祖辉，等. 空气压缩储能的发展现状及其应用前景 [J]. 资源节约与环保，2023(8): 5 − 8. [LI Ziyu, LYU Hong, LI Zuhui, et al. Development status of air compression energy storage and its application prospect[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2023(8): 5 − 8. (in Chinese)]

[15] 叶磊. 基于 TOUGH-FLAC 集成的含水层压气储能 THM 多场耦合研究 [D]. 徐州：中国矿业大学，2020. [YE Lei. Study on THM multi field coupled compressed air energy storage in aquifers based on TOUGH-FLAC integration[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]

[16] 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. [ZUO Rui, PAN Minghao, LIU Jiawei, et al. Review on flow characteristics and geochemical process during compressed air energy storage in aquifer[J]. Research of Environmental

Sciences, 2022, 35(8): 1769 − 1778. (in Chinese with English abstract)]

[17] 董家伟, 李毅. 含水层压缩空气储能选址评价方法研究 [J]. 安全与环境工程, 2021, 28(3): 228 − 239. [DONG Jiawei, LI Yi. Study of the site evaluation of compressed air energy storage in aquifers[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(3): 228 − 239. (in Chinese with English abstract)]

[18] 谢珺河. 含水层压气储能热流固耦合并行模拟研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022. [XIE Junhe. Study on parallel computing simulation of thm coupling behavior of compressed air energy storage in aquifers[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022. (in Chinese with English abstract)]

[19] 郭朝斌, 张可倪, 李采. 压缩空气含水层储能系统设计及可行性分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(7): 1107 − 12. [GUO Chaobin, ZHANG Keni, LI Cai. Subsurface system design and feasibility analysis of compressed air energy storage in aquifers[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2016, 44(7): 1107 − 1112. (in Chinese with English abstract)]

[20] 郭朝斌, 李采, 杨利超, 等. 压缩空气地质储能研究现状及工程案例分析 [J]. 中国地质调查, 2021, 8(4): 109 − 119. [GUO Chaobin, LI Cai, YANG Lichao, et al. Research review and engineering case analysis of geological compressed air energy storage[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(4): 109 − 119. (in Chinese with English abstract)]

[21] 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. [GUO Chaobin, WANG Zhihui, LIU Kai, et al. The application and research progress of special underground space[J]. Geology in China, 2019, 46(3): 482 − 492. (in Chinese with English abstract)]

[22] 许晓艺, 李琦, 刘桂臻, 等. 基于多准则决策的 CO_2 地质封存场地适宜性评价方法 [J]. 第四纪研究, 2023, 43(2): 551 − 559. [XU Xiaoyi, LI Qi, LIU Guizhen, et al. Suitability evaluation method for CO_2 geological storage sites based on multi-criteria decision-making[J]. Quaternary Sciences, 2023, 43(2): 551 − 559. (in Chinese with English abstract)]

[23] 王齐鑫, 马传明, 花勐健, 等. 安徽省沉积盆地 CO_2 地质储存适宜性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(5): 121 − 121. [WANG Qixin, MA Chuanming, HUA Mengjian, et al. Suitability evaluation of geological storage of CO_2 in sedimentary basin of Anhui Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(5): 121 − 121. (in Chinese with English abstract)]

[24] SUN Dongmei, CHU Zhubin, CHEN Wenyuan, et al. Comparison of the characteristics of compressed air energy storage in dome-shaped and horizontal aquifers based on the Pittsfield aquifer field test[J]. Applied Energy, 2023, 348: 121465.

[25] BENNETT J A, FITTS J P, CLARENS A F. Compressed air energy storage capacity of offshore saline aquifers using isothermal cycling[J]. Applied Energy, 2022, 325: 119830.

[26] BENNETT J A, SIMPSON J G, QIN Chao, et al. Techno-economic analysis of offshore isothermal compressed air energy storage in saline aquifers co-located with wind power[J]. Applied Energy, 2021, 303: 117587.

[27] PFEIFFER W T, WITTE F, TUSCHY I, et al. Coupled power plant and geostorage simulations of porous media compressed air energy storage (PM-CAES)[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 249: 114849.

[28] AVIS J, CALDER N, WALSH R. MVIEW—a powerful pre- and post-processor for TOUGH2[C]//Proceedings of TOUGH Symposium 2012. California: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2012.

[29] NARASIMHAN T N, WITHERSPOON P A. An integrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media[J]. Water Resources Research, 1976, 12(1): 57 − 64.

[30] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892.

[31] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 513 − 522.

编辑: 汪美华