

doi: 10.12029/gc20230331001

黄宽, 张万益, 王丰翔, 栾卓然, 胡雅璐, 陈骥, 方圆, 宋泽峰, 王健. 2024. 地下空间储能国内外发展现状及调查建议[J]. 中国地质, 51(1): 105–117.

Huang Kuan, Zhang Wanyi, Wang Fengxiang, Luan Zhuoran, Hu Yalu, Chen Ji, Fang Yuan, Song Zefeng, Wang Jian. 2024. Development status of underground space energy storage at home and abroad and geological survey suggestions[J]. Geology in China, 51(1): 105–117(in Chinese with English abstract).

地下空间储能国内外发展现状及调查建议

黄宽¹, 张万益², 王丰翔^{1,3,4}, 栾卓然^{1,3,4}, 胡雅璐², 陈骥²,
方圆², 宋泽峰^{1,3,4}, 王健⁵

(1. 河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 河北地质大学地球科学学院, 河北 石家庄 050031; 2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 3. 河北省战略性关键矿产研究协同创新中心, 河北地质大学, 河北 石家庄 050031; 4. 河北省光电信息与地球探测技术重点实验室, 河北地质大学, 河北 石家庄 050031; 5. 保定金禾矿业有限公司, 河北 保定 073204)

提要:【研究目的】在现代能源体系中, 能源储备占有举足轻重的地位, 强化能源储备体系, 保障能源稳定供应, 处理好国际国内能源市场上各种突发事件的影响, 这是中国能源发展中的一个重要课题。【研究方法】本文从地下空间储备设施类型出发, 并结合全球的地下空间储备设施建设与相关研究实验, 深入对比分析世界和中国在储油、储气等方面的发展现状, 由此提出保障能源安全的合理化建议。【研究结果】(1)利用地下空间进行储能是未来能源储备维护的重要方向。这是天然气调峰、可再生能源可持续供应、大规模高效利用氢气的有效途径。发展地下空间储能是实现中国碳中和和能源结构升级的关键问题;(2)全球地下空间储能设施主要分为五类: 盐穴、水封洞库、含水层、枯竭油气藏和废弃矿坑;(3)国外开展地下空间储能设施建设比较早, 在地下储能电站、地下储氢设施建设、石油储备和天然气储备等方面都要领先。【结论】在复杂的国际背景下, 中国能源安全面临严峻挑战。开展地下空间储能能力调查、建立更多的地下空间储备设施和与相关企业共同开展全国地下储库规划势在必行。

关键词: 能源储备; 地下空间储能; 地质调查工程; 能源安全; 能源体系

创新点: (1)本文对全球地下空间储能的发展现状进行了综述, 并系统总结了全球地下空间储能类型, 对比分析了中国与其他国家在储油、储气方面的差异, 对今后有关地下空间储能研究有着一定帮助;(2)本文根据国际背景和中国国情提出了开展地下空间储能能力调查等建议。

中图分类号: P618 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)01-0105-13

Development status of underground space energy storage at home and abroad and geological survey suggestions

HUANG Kuan¹, ZHANG Wanyi², WANG Fengxiang^{1,3,4}, LUAN Zhuoran^{1,3,4}, HU Yalu², CHEN Ji²,
FANG Yuan², SONG Zefeng^{1,3,4}, WANG Jian⁵

(1. Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 2. Development Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China; 3. Hebei Province

收稿日期: 2023-03-31; 改回日期: 2023-06-02

基金项目: 河北省创新能力提升计划项目(21567628H)资助。

作者简介: 黄宽, 男, 1999 年生, 硕士生, 资源与环境专业, 从事矿产普查与勘探研究; E-mail: huangk022@163.com。

通讯作者: 王丰翔, 男, 1984 年生, 助理研究员, 从事大型—超大型矿床研究; E-mail: wfx0316@163.com。

Collaborative Innovation Center for Strategic Critical Mineral Research, College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 4. Hebei Key Laboratory of Optoelectronic Information and Earth Exploration Technology, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 5. Baoding Jinhe Mining Co., Ltd., Baoding 073204, Hebei, China)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] In the modern energy system, energy reserve plays an important role. Strengthening the energy reserve system, ensuring stable energy supply, and handling the impact of various emergencies in the international and domestic energy markets are an important topic in China's energy development. **[Methods]** Based on the types of underground space storage facilities, combined with the construction of global underground space storage facilities and related research experiments, this paper deeply compares and analyzes the development status of oil and gas storage in the world and China, so as to put forward reasonable suggestions to ensure energy security. **[Results]** (1) The utilization of underground space for energy storage is an important direction of future energy storage maintenance. This is an effective way to peak regulation of natural gas, sustainable supply of renewable energy and efficient use of hydrogen on a large scale. The development of underground space energy storage is a key issue to achieve carbon neutrality and upgrade China's energy structure; (2) Global underground space energy storage facilities can be divided into five categories: salt cavern, water-sealed cavern, aquifer, depleted oil and gas reservoir and abandoned mine; (3) The construction of underground space energy storage facilities was carried out earlier in foreign countries, which should take the lead in the construction of underground energy storage power stations, underground hydrogen storage facilities, oil reserves and natural gas reserves. **[Conclusions]** In the complex international background, China's energy security faces severe challenges. It is imperative to investigate the energy storage capacity of underground space, establish more underground space storage facilities and carry out national underground storage planning together with related enterprises.

Key words: energy reserve; underground space energy storage; geological survey engineering; energy security; energy system

Highlights: (1) We summarize the development status of global underground space energy storage, systematically summarize the types of global underground space energy storage, and compare and analyze the differences between China and other countries in terms of oil and gas storage, contributing to future research on underground space energy storage. (2) According to the international background and China's national conditions, some suggestions on the investigation of underground space energy storage capacity are put forward.

About the first author: HUANG Kuan, male, born in 1999, graduate student, majors in resources and environment, engaged in mineral prospecting and exploration research; E-mail: huangk022@163.com.

About the corresponding author: WANG Fengxiang, male, born in 1984, assistant researcher, engaged in the study of large-super large deposits; E-mail: wfx0316@163.com.

Fund support: Supported by Hebei Province Innovation Ability Promotion Plan Project (No.21567628H).

1 引 言

“十四五”时期,中国经济进入了绿色高质量的发展阶段,并制定了“碳中和、碳达峰”战略目标,力争到 2060 年达到碳中和,实现净零二氧化碳排放(苏健等, 2021; Wang et al., 2021)。然而,中国能源矿产资源消费仍处于高位,长期对外依存的格局难以改变。因此,能源结构调整和能源安全问题日益突出。新型能源储备矿产是平时时期经济发展的重要保障,也是特殊环境下的“救命粮食”,不仅可以应对短期供应冲击,还能为能源消费常识的改

变争取时间(薛惠锋和周奕琛, 2009; Sovacool and Mukherjee, 2011)。作为能源安全体系中的重要环节,地下空间储能在各国能源安全中扮演着重要角色,是集季节调峰、事故应急、战略储备、助力清洁能源利用等功能于一体的重要基础设施(常乐等, 2012)。

随着能源结构转型和科技快速发展,地下空间储能已由传统的储油(施锡林等, 2023)、储气(马新华等, 2022),发展到压缩空气储能、储氢(郭朝斌等, 2019; 陆佳敏等, 2022)等。与欧美发达国家相比,中国地下空间储能起步较晚,发展不健全。面对

“贸易保护主义”和“反全球化”浪潮,世界正面临着百年未有之大变局,正处于经济结构转型阶段关键时刻,中国能源消费仍然处于高位,能源安全问题日益突出。本文系统总结地下空间储能的地质条件、主要类型及优缺点,并结合全球地下空间储备设施建设与相关研究实验,深入对比分析国内外在储油、储气等方面的发展现状,提出保障中国能源安全的合理化建议。因此,开展地下空间储能能力调查、建立更多的地下空间储备设施以及与相关企业共同开展全国地下储库规划,是保障国内能源安全稳定供应、建立能源战略储备、促进天然气调峰的重要途径,具有重大的研究意义。

2 地下空间储能的地质条件

地质条件是影响地下空间储能的首先条件,主要涉及到围岩类型与构造地质、地震及水文地质等方面。地下空腔、枯竭油气藏和废弃矿坑等,为地下储油、储天然气、储氢等提供了合适的地质条件(图 1)。

2.1 围岩类型与地质构造

根据 Van Gessel et al.(2014)研究,围岩的选择

需要满足以下几点:(1)围岩要有足够的硬度,以使空腔稳定;(2)无裂缝,以减少泄漏;(3)均匀,很少或没有薄弱带,如节理、断裂、褶皱、风化、矿化和其他不连续性特征,如剪切带。这影响了岩石的强度、泄漏潜力和地下空间的尺寸;(4)低孔隙度、低渗透率,这要求尽可能选择块状火成岩、变质岩和精选石灰石、白云岩等岩石。通常渗透率随深度和围压的增加而降低。例如,在硬岩矿山,1000 m 以下持续的地下水渗流是不存在的。一般情况下,岩石的渗透性与应力状态、节理间距、节理方向和孔隙宽度有关。

侵入岩、块状化学沉积岩和非叶状变质岩是地下储能围岩的较好选择。侵入岩在地下结晶,它们冷却得足够慢,可以形成大晶体,例如花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩和辉长岩等,通常是呈块状、质地均匀、几乎各向同性的,孔隙度和渗透率也比较低。此外,它们的晶体结构使其具有高强度、良好的弹性、热性能和风化性能(Allen et al., 1982)。在沉积岩中,页岩和粉砂岩是较好的选择,因为它们渗透率低且相对容易开采,但这些岩石需要大量的人工

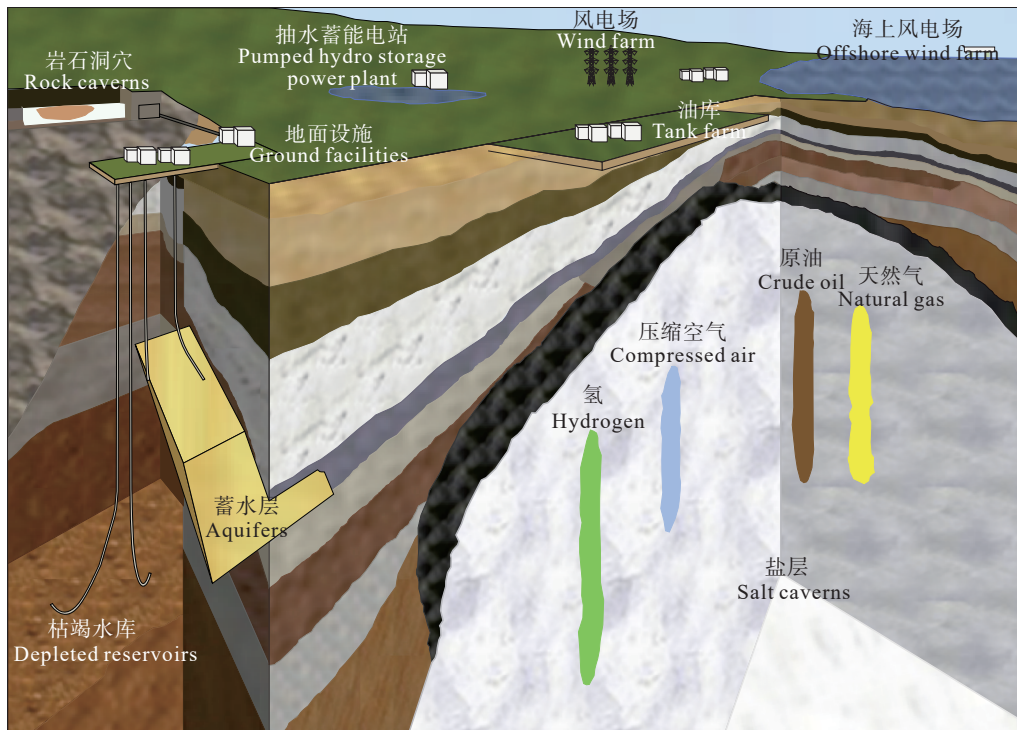


图 1 地下空间中潜在的储库主要有盐穴、含水层、枯竭油气藏和废弃矿坑(据 Crotagino et al., 2018 修改)

Fig.1 Potential reservoirs in underground space mainly including salt cavern, aquifer, depleted hydrocarbon reservoirs and abandoned mine (modified from Crotagino et al., 2018)

支撑。另一个是盐岩,适用于天然气、氢气和压缩空气储能,它的渗透性非常低,这就确保了高质量的流体隔离,无论是作为多孔储层上的盖层,还是作为盐单元内部的人工洞穴储层(Matos et al., 2019)。此外,因为它具有与混凝土相当的抗压强度,它具有塑性移动来密封裂缝或空洞,并且可以很容易地通过水溶解来开采。变质岩主要有2种类型:叶状变质岩如板岩、片岩等和非叶状变质岩如石英岩、大理岩。石英岩和大理岩通常是均匀的,各向同性的,具有高强度。

构造问题:一般来说,应避免选择构造活动程度高的地质复杂性地区作为地下洞室建设的选择,因为它们可能代表薄弱地带。有几种影响岩层的构造特征和构造变形,如层理、褶皱、断层和节理,对地下结构很重要,因为它们会导致渗透性高和机械强度低(Allen et al., 1982)。(1)层理面是一种主要结构,通常作为液压管道,如果发生变形,可能会增加岩体的水力传导能力;(2)岩体的褶皱在地下储能建设中具有潜在的重要意义,因为它可能指示一个高地应力区域,特别是与断层结合时,可能产生薄弱区;(3)断层(孤立的或作为断裂带的)是岩层的潜在薄弱点,因为这些区域可能加速风化和水的运动,增加岩体的水力传导能力;(4)节理被认为是与地下空间稳定性有关的最重要的地质构造特征,这主要是因为它们出现更频繁,提供了可能发生破坏的薄弱面,它们充当水力管道,增加了岩体的渗透性。

2.2 水文地质与地质灾害

在考虑地下空间储能时,围岩的水文特征、地下水分布和化学性质同样是需要考虑的重要因素。通常渗透率会随着深度和围压的增加而降低。一般情况下,岩石的渗透性与应力状态、节理间距、节理方向和孔隙宽度有关。岩体的地应力状态结合岩石的强度和结构特征,在确定地下开挖的方向、几何形状和尺寸方面很重要。地下水会因温度变化引起化学性质变化,或者洞室内氧气或水的存在会加速岩体风化,导致洞室失稳(Allen et al., 1982)。

此外各类地质灾害也是需要考虑的问题,如地震、火山活动都是会破坏地下空间稳定的因素,通常地表结构比地下设施如隧道、竖井更容易遭受破坏。所以选址应尽可能远离活动断裂带、潜在的地震活动区和火山活动区域。

3 地下空间储能类型

地下空间储能设施主要分为5类:盐穴、水封洞库、含水层、枯竭油气藏和废弃矿坑。盐穴是密封性能良好、注采灵活且成本低的油气地下储存空间。水封洞库是被公认为油品存储的最佳方式。含水层是大工业中心和大城市附近较为理想的储气场所。枯竭油气藏是最常用、最经济的油气储层方式。废弃矿坑储库对矿坑的天然地质条件要求高,国内外应用较少。

3.1 盐穴

盐穴是地下较厚的盐层或盐丘,通过灌水、抽取等方法将其中的盐提取出来后,在地下留下体积巨大的空洞。其优点是注采转换灵活且注采成本较低。缺点是施工过程中难免有残留的盐分,高浓度的盐水对于钢铁等材料腐蚀性大。盐穴中高温高压下的盐具有自动愈合裂缝的特点,盐穴具有高稳定性与封闭性,不局限于天然气和石油储存,还可用于实现压缩空气储能、储氢、储氮等,参与各能源系统的调峰,应用前景广阔(李建君, 2022)。此外,国内外学者对地下盐岩溶腔 CO₂ 封存的可行性进行了探讨,认为盐岩具有极低的渗透率,且难溶于 CO₂, 是 CO₂ 地下处置的有效地质体(Bachu and Dusseault, 2005)。目前尚无地下盐穴封存 CO₂ 的案例。宗师等(2023)以苏南隆起地带的金坛地区盐穴储气库为研究对象,建立了盐穴储气库 CO₂ 封存的数学模型,探讨了其可行性。

盐穴储气库选址要遵循(Knott and Cross, 1992):(1)盐层厚度大,无断层影响;(2)盐层品位高,有利造腔;(3)顶板强度大,有利气库安全;(4)盐层内部夹层少、厚度小,有利造腔;(5)埋深大于 400 m, 保证一定的储气能力;(6)水源充足,保证造腔用水。江汉盐穴储气库基本具备了以上几个建库条件,有效工作气量为 $2.8 \times 10^9 \text{ m}^3$, 垫气量 $2 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。目前,江汉储气库一期工程测得溶腔体积逾 $4 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。该矿区构造简单,地层平缓,盐层埋深 1212.5~2182.0 m, 区内无断层,裂隙不发育,由 25 个含盐韵律层组成,盐层总厚度 338.8 m, 顶底板盐间层以泥云岩、含钙芒硝泥岩、钙芒硝质泥岩为主,岩性致密坚硬。

3.2 水封洞库

水封洞库是在具有稳定地下水的基岩区域挖掘洞穴,以地下水做密封层,在洞穴内储存原油。水封洞库的基本原理是在地下水位以下的人工洞穴内,利用水的密度更大且水与油不相混的原理,在岩壁中充满地下水的静压力大于储油静压力的背景下,将油置于水的包围之中(图 2)。水封洞库的优点是储量大、封闭性好、安全性能高、污染小及运营管理费用低。其不足之处在于对围岩本身的性状、地应力条件及地下水条件的要求较高。在水封洞库建设中,水幕系统设计与测试技术是核心,因受国外技术封锁,国内在此方面的技术还比较薄弱。

地下水封洞库选址要求具有稳定的地下水位,选择在坚硬、完整性好的块状岩体区,并具有弱透水性,最好是结晶状、未风化或弱风化的花岗岩。尽量依托现有的海运航道、大型油码头和输油管道。国内于 20 世纪 70 年代开始研究建造地下水封洞库,主要有黄岛水封洞库、象山水封洞库、汕头水封 LPG 库和宁波水封 LPG 库,其中黄岛水封洞

库是国家石油储备二期工程之一,是国内第一个大型地下水封洞库工程,总库容量为 15 万 m³,分 3 个洞室,其中有 2 个洞室用施工巷道连为一体,地下洞室通过 3 个竖井和地面连接,竖井口设在操作巷道内,地面仅能看到一个操作巷道入口和一个控制室。由于原油在库内储存时间长,油水分离好,油的质量得到进一步改善。

3.3 含水层

含水层储气库的基本原理是将高压气体注入地下含水层结构的最高点或其周围,向含水层通入气体将水从孔隙中驱出,并在构造顶部盖层下积蓄而形成储气库气藏(贾善坡等,2016)(图 3)。含水层储气库实际上就是人造气藏。在调峰需求量高的大城市以及靠近工业中心,普遍缺少适宜枯竭油气藏,也没有盐穴构造改建地下储气库,利用含水层构造对地下储气库进行改造,则成为优选方案。

含水层作为一种重要的储集体形式,对其进行合理研究是非常必要的。目前,世界上主要城市和工业中心附近建造的地下储气库,基本上都是含水层型地下储气库。含水层型储气库主要由地质资

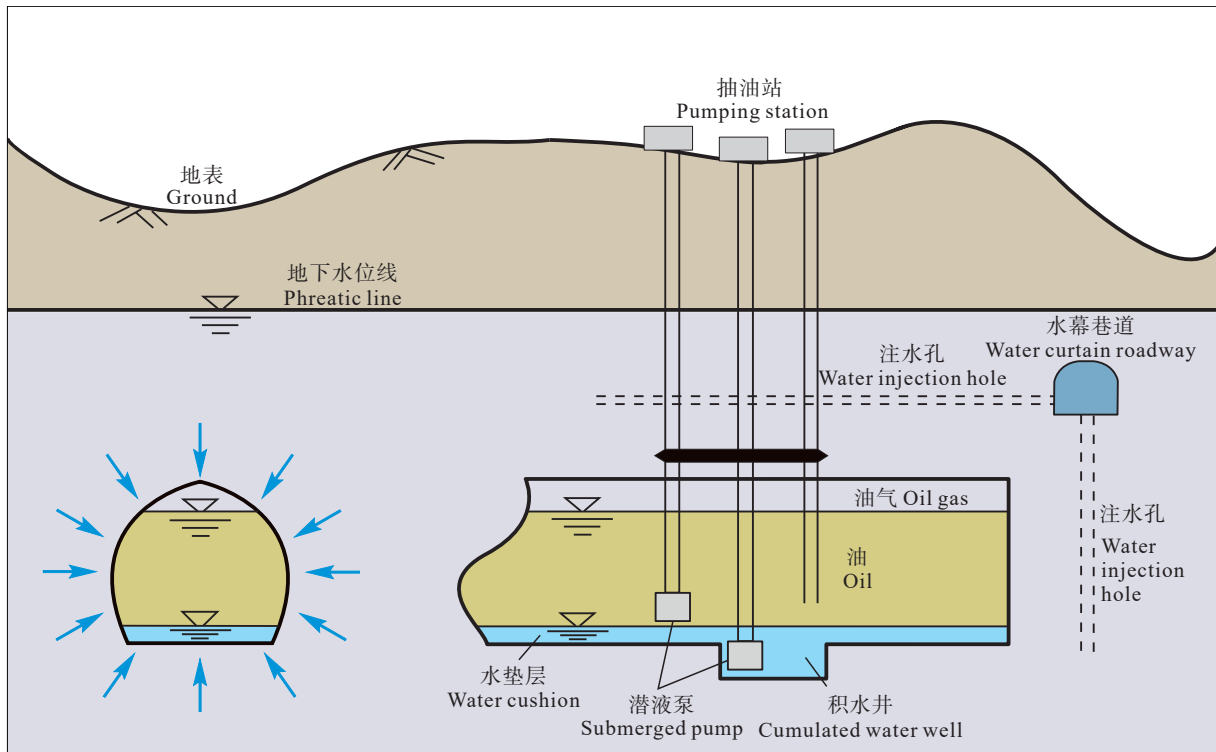


图 2 地下水封洞库储油原理(据王梦恕和杨会军,2008 修改)

Fig.2 Principle of oil storage in underground water-sealed caverns(modified from Wang Mengshu and Yang Huijun, 2008)

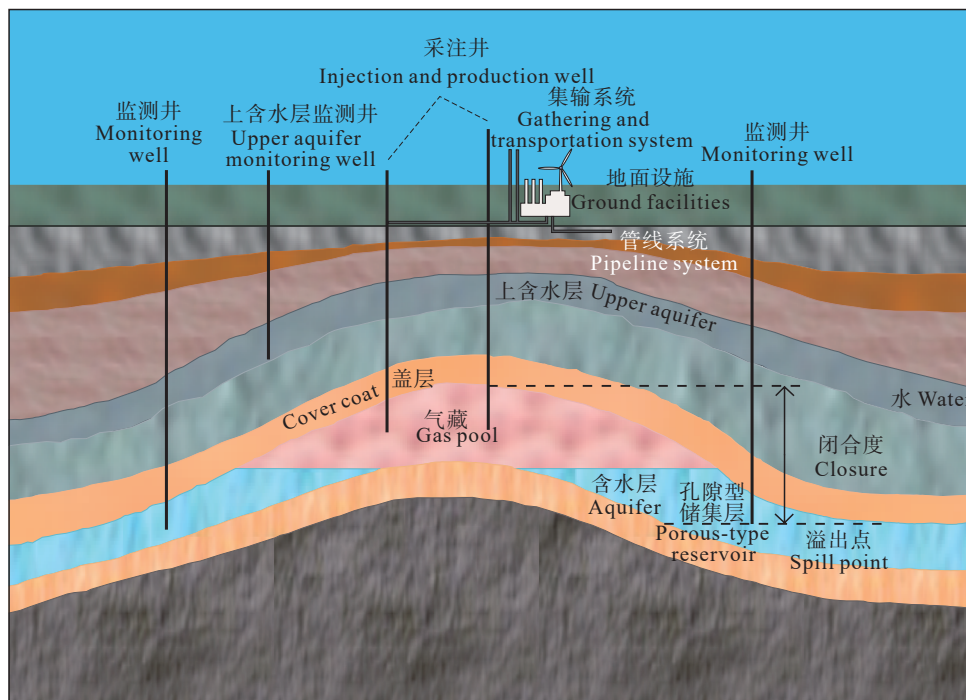


图 3 含水层地下储气库基本结构示意图(据贾善坡等, 2016 修改)

Fig.3 Basic structure diagram of aquifer underground gas storage(modified from Jia Shanpo et al., 2016)

料分析、油藏工程设计和开采工艺设计组成,是一个系统工程。欧美发达国家经过半个世纪的发展,形成一个从勘探评价,气藏工程为一体、钻井完井与地面工程配套工艺技术(王保辉等, 2012; 贾善坡等, 2015)。这些技术是世界油气开发的主要支柱之一,在国外油气田开发中发挥了重要作用。国内尚无此类储库的建成实例,针对该领域的研究多集中于盐穴储气库的建库理论和技术。

含水层型储气库选址要求储气岩层孔隙度为 12%~25%, 渗透率一般大于 $0.5 \mu\text{m}^2$ 。最适合的岩石种类有砂层、纯砂岩、石灰岩和白云岩。含水层要有低渗透率的盖层和底层,密封性好,通常为页岩。储气层位厚度大、分布广、有尽量大的库容量(张森琦等, 2011)。储气含水层与生活、工业用水或其他水源不连通,以免造成污染。有的含水层需要进行抽水,抽出的咸水可以在碱厂回收制盐和提取盐化工产品等,微咸水经过淡化、净化以后,可作为城市生活用水、工业用水、环境用水等的水源。

3.4 枯竭油气藏

枯竭油气藏型储库以原油气藏区块作为基础,重新布置井眼建立储油气库注采井网,对原油气

藏老井评估后,进行封堵或改造作业的油气储存方式。这种方法的优点是人们已经精确地把握了它的地质情况,不需要地质勘探从而节约了投资。缺点在于只能基于已有枯竭油气田进行开发利用,范围相对比较局限。据 Lord et al.(2014)研究表明,枯竭油气藏作为储氢是最为经济可行的。国外枯竭油气藏型储库埋深几乎都在 2500 m 以内,且构造较完整,储层高孔、高渗。

2000 年,中国在大港油田利用枯竭油气藏建成了大张坨地下储气库,设计日供能力为 $5 \times 10^6 \text{ m}^3$,总井数 20 口,采用中高部位部署注采井网。井位部署主要避开 3 个不良因素:一是井点远离气水界面,防止注、采过程中水体突进和侵入现象;二是井点远离断层,防止断层破裂影响气库的封闭性;三是井点远离低渗区和致密区,防止产能过低。在上述原则的指导下,大张坨地下储气库实现了少井高产、减少边水的危害、保证气藏流体及压力分布均匀等设计目标。

3.5 废弃矿坑储库

通常用采矿遗留下来的废弃坑道,或直接修建岩洞,四周后以水泥加固,用以储备。这种储气库

的工作气量比例高,可完全回收垫气,但由于符合储气密封条件的矿坑较少,人工开凿也受地质条件的限制,所以这类储库不是很常见。

4 国内外研究现状对比

4.1 石油储备

储油方式主要有地面储油罐、盐穴、硬岩洞等,其中盐穴储藏是最常用的方法(Yang et al., 2022)。美国、日本、德国等国家石油储备丰富,水封岩洞和盐穴等地下储库发挥了重要作用。在得克萨斯州和路易斯安那州的墨西哥湾沿海建设有 4 个地下盐穴战略油库,占全部石油储备能力约 60%,包括 Bryan Mound、Big Hill、West Hackberry 和 Bayou Choctaw,共有 60 个盐穴,累计储油能力为 7.13 亿桶,相当于 140 天的消费量(USDE, 2019)。这些战略石油储备不仅保证了美国的能源安全,而且确立了美国在国际石油定价中的主导地位。日本储备规模约 8700 万 t,相当于 120 天的消费量。日本下设 10 个国家石油储备基地,其中 3 个地下水封岩洞储油库。德国储备规模约 3600 万 t,约为 100 天的消费量。法国的石油战略储备约为 2510 万 t,相当于 85 天的消费量。

中国石油储备最多可满足 40 天的消费量,不足美、日、德、法等国储备能力的一半。原油储备

方式分为陆上、海上和地下 3 种类型。中国于 1973 年在黄岛建设了第一座小型水封洞库。直到 2004 年才正式启动国家石油储备基地计划,由国家发改委规划,国家能源局组织实施,石油企业自建。2014 年建设了包括镇海、黄岛、舟山和大连等 4 个国家石油储备基地(地面库)的一期工程,总储备库容为 1640 万 m³,储备原油能力为 1407 万 t。2015 年,储备基地二期工程新增地下储备库 4 处,总储备库容提高到 2860 万 m³,原油储备能力达到 2454 万 t。目前三期工程正在建设,加上企业储备,最多可满足 40 天的消费量。

4.2 天然气储备

美国、欧盟、俄罗斯、乌克兰等国家经历几十年的储气库建设,建立了适合相应地质特点的建库配套技术,形成了油气藏、盐穴和含水层等完善的地下储气库设施建设(Knepper, 1997)。根据国际天然气及一切烃类气体情报中心统计,世界上已建成 662 座地下储气库,工作气量总量 4212 亿 m³(图 4),以美国为主、欧洲和其他发达地区次之。其中,北美和欧洲传统天然气市场储气能力占 93%(苏展, 2021)。北美聚集了世界上三分之二以上的储气库共 439 座。在美国,存储天然气等于 59 天的消耗量,主要是地下储气库的储备。欧盟 28 个成员国中有 21 个国家拥有地下储气库,共 142 座,工作气

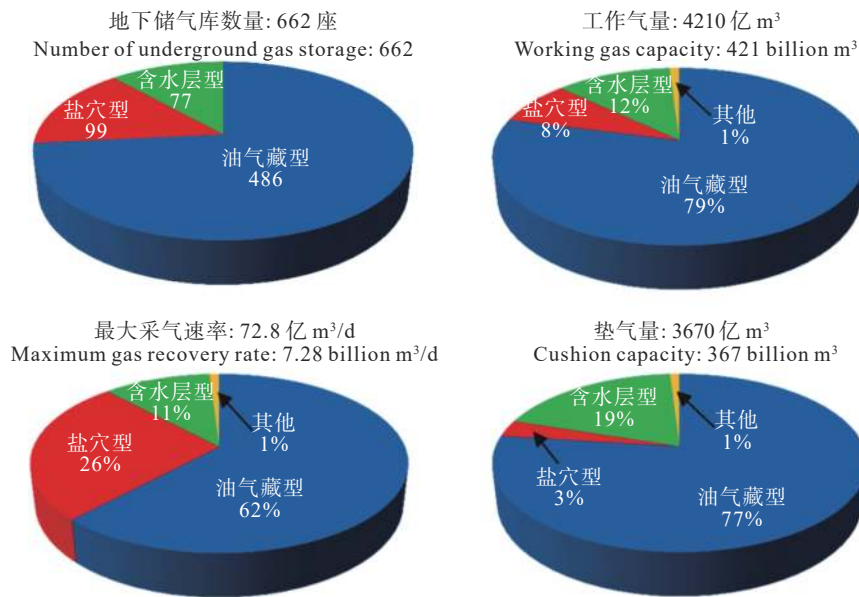


图 4 世界上利用地下空间建设储气库类型及其关键参数
Fig.4 Types and key parameters of underground gas storage in the world

总量达 1083 亿 m^3 , 在地下储气库中, 工作气量居第二位。其中, 奥地利、匈牙利、法国、荷兰、意大利、英国和德国, 工作气总量达 857 亿 m^3 , 它在欧盟地下储气库中的工作气量中约占 80%。俄罗斯有地下储气库 26 座, 工作气总量达 736 亿 m^3 。乌克兰境内共 13 座地下储气库, 总工作气 350 亿 m^3 。按照储气库类型来分, 枯竭油气藏型储气库占到储气库总数的 73%、工作气量占比 79%; 盐穴型储气库占到储气库总数的 15%、工作气量占比 8%, 而调峰气量占比 26%(Yang et al., 2022)。说明盐穴储气库这种快速调峰能力对愈发灵活多变的天然气市场供应具有较强的适用性, 得到越来越多国家和地区的重视。

国内地下储气库建设总体处于起步阶段, 天然气储备仅能满足全国不足 30 天的用量。天然气储备方式分为储气罐、管道储气、液化天然气、压缩天然气和地下储气库等。自 1998 年汕头建设第一座水封储气库之后, 优选了河南平顶山、淮安及江苏金坛等盐穴储气库库址, 开展了河北孙虎、江苏白驹、江西麻丘、湖北潜江及大五等含水层选址。到 2021 年底, 中国已建成地下储气库(群)20 座, 工作气量总量 261 亿 m^3 (表 1)。

4.3 地下储能电站

压缩空气储能技术被誉为最有前途的大型电

力储能技术之一, 它利用地下空间充当巨型储存罐, 使用多余的电能(一般是风能、太阳能等不稳定电能)将压缩空气泵入地下空间, 在需要时释放压缩空气可使发电设施重新发电, 从而达到稳定发电的目的(图 5)。采用盐穴作为压缩空气储能库具备建设成本低、占地面积小、密封性好、储气压力高、安全稳定等优势(梅生伟等, 2017)。

德国、美国、日本和韩国地下空间储能的研究起步较早, 已经有许多完成建设或正在建设的地下储能电站或相关研究实验。国外盐穴压缩空气储能电站研究已有 40 多年历史, 其中德国和美国的 2 个压缩空气地下储能电站已经投入商用(中国科学院武汉文献情报中心学科情报团队等, 2021)。德国的 Huntorf 储能电站于 1978 年建造于盐穴中, 输出功率为 321 MW, 运行效率为 29%。美国 McIntosh 储能电站 1991 年在阿拉巴马州建造, 输出功率为 110 MW, 运行效率为 54%(Fan et al., 2020)。日本在 20 世纪 90 年代, 也实施了 2 项压缩空气储能的相关试验, 其中一个修建在日本北海道一个煤矿内, 另一个建造在岐阜县神冈一个锌矿的巷道中。韩国的压缩空气储能电站试点项目于 2011 年开始建设, 实验室位于地下 100 m 深的灰岩中(郭平业等, 2022)。

表 1 中国储气库(群)主要设计参数(数据来源于朱健颖等, 2021)

Table 1 Chinese gas storage main design parameters (data from Zhu Jianying et al., 2021)

序号	储气库(群)	地理位置	库容/亿 m^3	工作气量/亿 m^3	形成调峰能力/亿 m^3	主管企业
1	大庆群库	黑龙江大庆	4.3	2.7	0.5	
2	辽河双6	辽宁盘锦	55.2	30.0	20.5	
3	辽河雷61	辽宁盘锦	5.3	3.4	0.5	
4	双驼子	吉林松原	11.2	5.1	0.3	
5	华北苏桥	河北永清	67.0	23.0	10.0	
6	大港板南	天津滨海	7.8	4.3	2.0	中国石油
7	长庆峡224	陕西靖边	10.4	5.0	3.3	
8	长庆苏东39-61	陕西靖边	19.2	8.0	0.1	
9	长庆榆37	陕西靖边	6.0	2.7	0.1	
10	新疆呼图壁	新疆呼图壁	117.0	45.0	29.0	
11	西南相国寺	重庆市渝北区	43.0	23.0	23.0	
12	中原文96	河南濮阳	5.9	3.0	3.0	
13	江苏金坛	江苏金坛	11.8	7.2	1.5	中国石化
14	江汉黄场	湖北潜江	2.3	1.4	0.5	
15	大港库群	天津大港	69.0	30.4	19.0	
16	华北库群	河北永清	18.7	7.5	7.5	
17	江苏金坛	江苏金坛	26.0	17.1	7.8	国家管网
18	江苏刘庄	江苏刘庄	4.6	2.5	2.5	
19	中原文23	河南濮阳	84.3	32.7	22.0	
20	金坛	江苏金坛	12.0	7.0	1.7	港华储气有限公司
	合计		581	261	154.8	

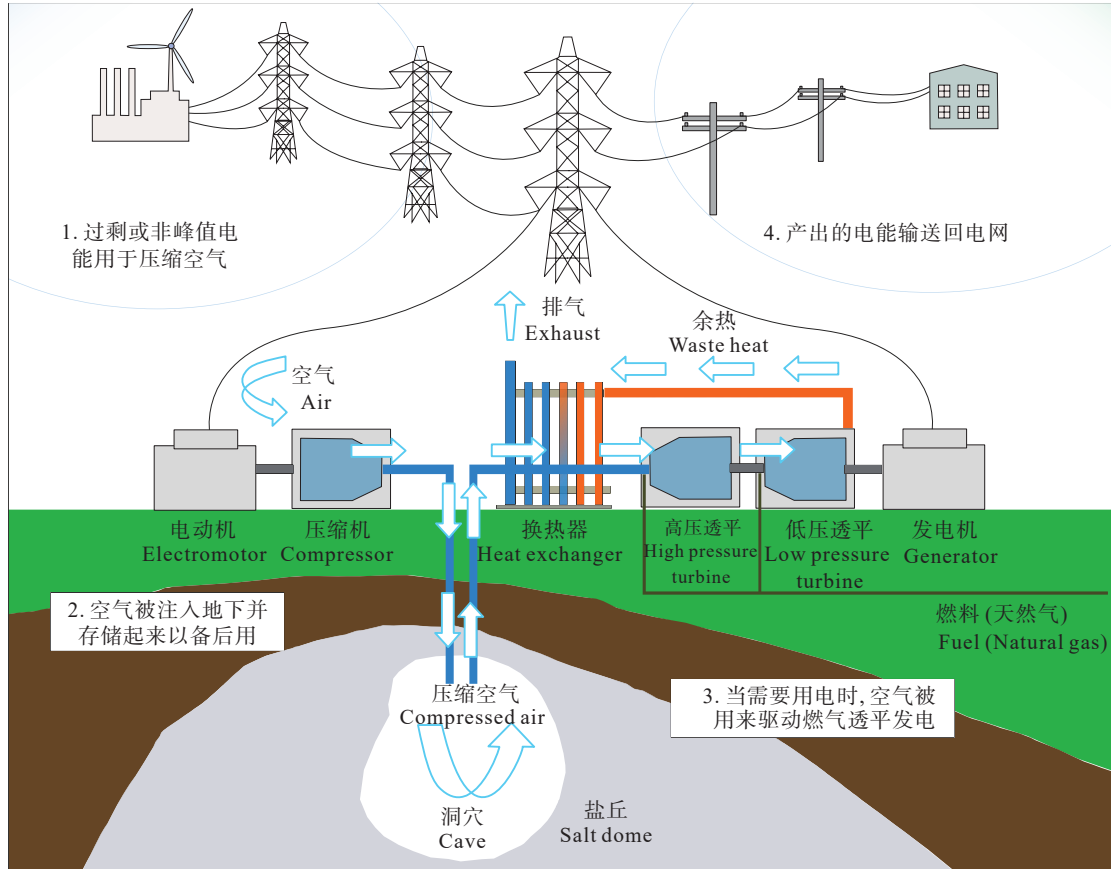


图 5 压缩空气储能基本原理示意图(据陈海生等, 2013 修改)

Fig.5 Schematic diagram of the basic principle of compressed air energy storage (modified from Chen Haisheng et al., 2013)

中国盐穴储能技术应用虽然不到 10 年历史, 但已有不少于 10 个项目运行。已有 2 座盐穴压缩空气储能电站分别于 2021 年 9 月和 2022 年 5 月成功并网发电, 运行效率达到 60% 以上(表 2)。分别是由中科院工程热物理研究所承担的山东肥城 10 MW 示范电站、中盐集团联合清华大学承担的江苏金坛 60 MW/300 MW·h 的试验示范项目。该项目理论预计年发电量约 1 亿度。此外, 河南平顶山市叶县 200 MW 盐穴储能电站及江苏淮安 465 MW 盐穴储能电站预计将相继投产, 贵州毕节、河北张家口也在开展大规模项目。

4.4 地下储氢

地下储氢就是利用地下的地质构造, 实现氢能的大规模储存, 也就是用电低谷的时候, 使用风电、光电及其他清洁能源电解水制氢, 将氢气注入盐穴、枯竭油气藏或含水层等地质构造中, 达到储存氢能的目的(周庆凡和张俊法, 2022)。地下储氢的研究始于 20 世纪 70 年代。1979 年, 美国天然气技

术研究院公布了一份关于地下储氢的研究成果, 验证了它在经济上和技术上是可行的。此后, 许多国家都开展了有关地下储氢方面的研究工作。1986 年在 Taylor et al.(1986)的研究基础上, 地下储氢方法最为经济。

英美已建成纯氢气地下盐穴储库, 德国、法国、阿根廷等国家已启动储氢计划。美国盐穴储氢数量最多, 德克萨斯州拥有 3 个盐穴储氢库, 总容量超过 200 万 m^3 (表 3)。此外, 美国也新近推出 SHASTA、Geo H2 等研究计划。英国进行盐穴储氢最早, 它的 Teesside 储氢库作为欧洲仅有的盐穴储氢库已运行了 50 年, 总容量为 21 万 m^3 。德国在进行地下储氢的研究计划方面最多, 近 10 年共开展了 H2STORE、In Sp EE、ANGUS、Hy INTEGER、Hy CAVmobil 以及其他一些地下储氢的研究计划(Tarkowski, 2019; Tian et al., 2022)。国内在这方面起步较晚, 目前还处于初步探索阶段。

国内对地下储氢的研究起步比较晚, 目前还没

表2 中国建成及在建压缩空气储能项目情况

Table 2 Energy storage projects built and under construction of compressed air in China

建成年份	并网年份	地点	示范工程项目	压缩空气储能技术	发电装机量	系统效率	投资额
2013	—	河北廊坊	1.5 MW级非补燃超临界压缩空气储能系统示范工程	超临界压缩空气储能	1.5 MW	52.1%	—
2014	—	安徽芜湖	500 kW非补燃压缩空气储能示范工程	绝热压缩空气储能	500 kW	40%	3000万
2016	—	青海西宁	100 kW光热复合压缩空气储能实验电站	绝热压缩空气储能	100 kW	51%	—
2017	2021.10	贵州毕节	10 MW先进压缩空气储能示范平台	液态空气储能	10 MW	60.20%	—
2018	—	江苏苏州	国网江苏同里综合能源服务中心内500 kW液态空气储能示范项目	液态空气储能	500 kW	—	—
2021	2021.09	山东肥城	盐穴先进压缩空气储能调峰电站一期10 MW示范电站	绝热压缩空气储能	10 MW	60.70%	1亿
2021	2021.12	河北张家口	国际首套100 MW/400 MW·h先进压缩空气储能国家示范项目	液态空气储能	100 MW	70.40%	8.4亿
2021	2022.05	江苏金坛	中盐金坛盐穴压缩空气储能电站国家示范工程一期60 MW/300 MW·h项目	绝热压缩空气储能	60 MW	60%以上	4.3亿
	2022年6月开工	河南平顶山市叶县	200 MW盐穴先进压缩空气储能电站	绝热压缩空气储能	200 MW	—	15亿
	2022年7月通过可行性评审, 待开工	江苏淮安	苏盐集团465 MW/2600 MW·h盐穴压缩空气储能项目	绝热压缩空气储能	465 MW	—	—

数据来源: 据文贤旭等, 2018; 吴皓文等, 2021综合整理。“—”表示数据未知。

表3 世界目前正在运行的地下储氢设施

Table 3 The underground hydrogen storage facilities currently in operation in the world

序号	盐穴项目名称	位置	开始运行时间	容量/万m ³	基准深度/m	压力/10 ⁵ Pa	储氢量/t	储能量/(GW·h)
1	ClemensDome	美国德克萨斯州	1986年	58	1000	70~137	2400	81
2	Mass Bluss	美国德克萨斯州	2007年	56.6	1200	55~152	3690	123
3	Spindletop	美国德克萨斯州	2014年	90.6	1340	68~202	8230	274
4	Teesside	英国英格兰东北部	1972年	21	365	45	810	27

有大型地下储氢设施, 现有地下储氢井容量与英美储库容量相差悬殊。氢气地下储库的建设面临着多方面的挑战, 其中主要有: 储层与盖层地质完整性研究、井筒的完整性、材料的耐久性、氢气开采的纯度和氢气在地下的化学反应(付盼等, 2020)。目前, 地下储氢应用仅限于建设加氢站。2021年8月重庆半山环道综合加氢站正式建成, 这是中国第一座采用储氢井技术加氢站, 服务重庆最早的氢能公交车及市内物流车。该加氢站日供氢 1000 kg, 约为 14 m³, 较国外大规模地下储氢库仍存在较大差距(Bai et al., 2014; Liu et al., 2020)。

5 思考与建议

5.1 思考

国外较早就重视地下空间储备设施建设, 国内起步晚但发展较快。国外在盐穴压缩空气储能电

站研究已有 40 多年历史, 英美已建成纯氢气地下盐穴储库, 德国、法国、阿根廷等国家已启动储氢计划, 北美和欧洲传统天然气市场储气能力占全球 93%。中国地下空间储备设施建设起步晚, 盐穴储能技术应用更是不到 10 年历史。所以利用地下空间实施天然气、压缩空气、石油和氢气等大规模储备是我国能源储备工程重点发展方向。

当今世界处于百年未有之大变局, 中美博弈、俄乌冲突、新冠疫情等复杂背景下, 全球产业链、供应链遭到破坏, 中国经济发展的外部环境恶化, 能源安全面临严峻挑战。党中央、国务院对能源储备的重视程度空前。积极应对极端背景下出现的危机, 增加地下储库容刻不容缓。需要中国地质调查局立足职能定位和发挥专业优势, 尽快落实局党组“强化地下空间储能能力调查评价和技术创新”的前瞻性部署, 加快地质调查工作, 助力地下空间储

备设施建设为国家能源安全提供地质技术保障。

5.2 建议

(1) 开展盐穴、水封洞库含水层等地下空间储能能力调查, 评价建库的可行性。

一是开展盐穴选址地质调查。在塔里木盆地、云南兰坪—思茅盆地、陕北盐盆、四川盆地、湖南、湖北江汉盆地、江苏、河南等岩盐分布地区, 评价岩盐地层的规模、厚度和埋深等。

二是水封洞库选址地质调查。在东部沿海以及西部地区, 寻找地下水位以下、高稳定性和低渗透性的适宜建库的花岗岩类、砂岩类等岩体或地层。评价围岩稳定性与岩体结构、地质构造、地下水活动、地应力作用等。

三是开展含水层选址地质调查。在长三角、粤港澳大湾区、京津冀、关中平原城市群、长江中游城市群、兰西城市群、中原城市群等周边(刘楷琳和尚培培, 2021), 开展含水层选址调查, 助力大型城市储气调峰能力建设。

(2) 建议设立地下空间储备设施选址地质调查工程, 统筹开展全国非城市地下空间应用国情调查。地质条件复杂, 建议设立地下空间储备设施选址地质调查工程, 将全国性的非城市地下空间储备设施建设选址地质调查作为一项国情调查工作, 全面系统掌握适于建设地下空间储备设施库址的第一手资料。

(3) 与相关企业建立以问题和需求为导向的合作调查机制, 共同开展全国储库规划。建立与中国石油、中国石化、国家管网公司、中国盐业等企业的联络机制, 加强项目建设前的需求对接。积极发挥地质调查优势, 共同开展全国储库规划, 协同推进储库选址地质调查评价。积极争取财政经费支持, 加快推进成果转化。

6 结 论

(1) 利用地下空间进行储能是未来能源储备维护的重要方向。这是天然气调峰、可再生能源持续供应、大规模高效利用氢气的有效途径。发展地下空间储能是实现中国碳中和和能源结构升级的关键问题。

(2) 目前地下空间储备设施主要分为五类: 盐穴、水封洞库、含水层、枯竭油气藏和废弃矿坑。

其中盐穴具有物理性质稳定、渗透性低、自动愈合裂缝、易溶于水、分布广泛等特点。它被认为是一种理想的大规模储能地质介质。利用盐穴进行大规模能源储备将是地下空间储能的优先发展方向。

(3) 国外虽然在地下储能电站、地下储氢设施建设、石油储备和天然气储备等方面都要领先, 但中国经过近些年大力建设和发展在盐穴储能技术应用、含水层地下储气库建设等方面取得了显著成就。

(4) 国内有良好的盐层地理优势, 具有重要的大规模能源储存价值。开展地质调查工作、加速地下空间储能能力调查和设立地下空间储备设施是十分必要的。

致谢: 在数据收集和图件绘制过程中, 得到河北地质大学郭襄博士的大力帮助, 在此表示感谢!

References

- Allen R D, Doherty T J, Fossum A F. 1982. Geotechnical issues and guidelines for storage of compressed air in excavated hard rock caverns[J]. Pacific Northwest Laboratory Operated for the U. S. Department of Energy by Battelle Memorial Institute, PNL-4180.
- Bachu S, Dusseault M. 2005. Underground injection of carbon dioxide in salt beds[J]. *Developments in Water Science*, 52(5): 637-648.
- Bai M, Song K, Sun Y, He M, Li Y, Sun J. 2014. An overview of hydrogen underground storage technology and prospects in China[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 124: 132-136.
- Chang Le, Zhang Minji, Liang Jia, Sun Yangzhou. 2012. The role of energy storage in ensuring energy security[J]. *Sino-Global Energy*, 17(2): 29-35 (in Chinese with English abstract).
- Chen Haisheng, Liu Jinchao, Guo Huan, Xu Yujie, Tan Chunqing. 2013. Technical principle of compressed air energy storage system[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2(2): 146-151 (in Chinese with English abstract).
- Crotogino F, Schneider G S, Evans D J. 2018. Renewable energy storage in geological formations[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 232(1): 100-114.
- Fan J, Xie H, Chen J, Jiang D, Li C, Tiedeu W N, Ambre J. 2020. Preliminary feasibility analysis of a hybrid pumped-hydro energy storage system using abandoned coal mine goafs[J]. *Applied Energy*, 258: 114007.
- Fu Pan, Luo Miao, Xia Yan, Li Guotao, Ban Fansheng. 2020. Research on status and difficulties of hydrogen underground storage technology[J]. *China Well and Rock Salt*, 51(6): 19-23 (in Chinese with English abstract).

- Guo Chaobin, Wang Zhihui, Liu Kai, Li Cai. 2019. The application and research progress of special underground space[J]. *Geology in China*, 46(3): 482–492 (in Chinese with English abstract).
- Guo Pingye, Wang Meng, Sun Xiaoming, He Manchao. 2022. Study on off-season cyclic energy storage in underground space of abandoned mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 47(6): 2193–2206 (in Chinese with English abstract).
- Jia Shanpo, Jin Fengming, Zheng Dewen, Meng Qingchun, Zhang Hui, Lin Jianpin, Wei Qiang. 2015. Evaluation indices and classification criterion of aquifer site for gas storage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(8): 1628–1640 (in Chinese with English abstract).
- Jia Shanpo, Zheng Dewen, Jin Fengming, Zhang Hui, Meng Qingchun, Lin Jianpin, Wei Qiang. 2016. Evaluation system of selected target sites for aquifer underground gas storage[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 47(3): 857–867 (in Chinese with English abstract).
- Knepper G A. 1997. Underground storage operations[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 49(10): 1112–1114.
- Knott L, Cross K G. 1992. Gas storage caverns in East Yorkshire Zechstein salt: Some geological and engineering aspects of site selection[J]. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 24923: 691–692.
- Li Jianjun. 2022. Development status and prospect of underground gas storage in China[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 41(7): 780–786 (in Chinese with English abstract).
- Liu Kailin, Shang Peipei. 2021. Measurement and spatial correlation of high-quality development level of China's city clusters[J]. *Journal of Northeast University of Finance and Economics*, (3): 37–46 (in Chinese with English abstract).
- Liu W, Zhang Z, Chen J, Jiang D, Wu F, Fan J, Li Y. 2020. Feasibility evaluation of large-scale underground hydrogen storage in bedded salt rocks of China: A case study in Jiangsu Province[J]. *Energy*, 198(May 1): 117348.1–117348.16.
- Lord A S, Kobos P H, Borns D J. 2014. Geologic storage of hydrogen: Scaling up to meet city transportation demands[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(28): 15570–15582.
- Lu Jiamin, Xu Junhui, Wang Weidong, Wang Hao, Xu Zijun, Chen Liuping. 2022. Development of large-scale underground hydrogen storage technology[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 11(11): 3699–3707 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xinhua, Zheng Dewen, Wei Guoqi, Ding Guosheng, Zheng Shaojing. 2022. Development directions of major scientific theories and technologies for underground gas storage[J]. *Natural Gas Industry*, 42(5): 93–99 (in Chinese with English abstract).
- Matos C R, Carneiro J F, Silva P P. 2019. Overview of large-scale underground energy storage technologies for integration of renewable energies and criteria for reservoir identification[J]. *Journal of Energy Storage*, 21: 241–258.
- Mei Shengwei, Gong Maoqiong, Qin Guoliang, Tian Fang, Xue Xiaodai, Li Rui. 2017. Advanced adiabatic compressed air energy storage system with salt cavern air storage and its application prospects[J]. *Power System Technology*, 41(10): 3392–3399 (in Chinese with English abstract).
- Shi Xilin, Wei Xinxing, Yang Chunhe, Ma Hongling, Li Yiping. 2023. Problems and countermeasures for construction of China's salt cavern type strategic oil storage[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 38(1): 99–111 (in Chinese with English abstract).
- Sovacool B K, Mukherjee I. 2011. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach[J]. *Energy*, 36(8): 5343–5355.
- Su Jian, Liang Yingbo, Ding Lin, Zhang Guosheng, Liu He. 2021. Research on China's energy development strategy under carbon neutrality[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 36(9): 1001–1009 (in Chinese with English abstract).
- Su Zhan. 2021. Research on the development trend of global underground gas storage and its enlightenment to the construction of gas storage and peak shaving system in China[J]. *Quality and Market*, (7): 143–145 (in Chinese with English abstract).
- Subject Information Team of Wuhan Literature and Information Center, Chinese Academy of Sciences, Li Nana, Zhao Yanqiang, Wang Tongtao, Yang Chunhe. 2021. Trend observation: International salt cavern energy storage strategy and technology development trend analysis[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 36(10): 1248–1252 (in Chinese with English abstract).
- Tarkowski R. 2019. Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105: 86–94.
- Taylor J B, Alderson J E, Kalyanam K M, Lyle A B, Phillips L A. 1986. Technical and economic assessment of methods for the storage of large quantities of hydrogen[J]. *International Association for Hydrogen Energy*, 2(1): 5–22.
- Tian Q N, Yao S Q, Shao M J, Zhang W, Wang H H. 2022. Origin, discovery, exploration and development status and prospect of global natural hydrogen under the background of “Carbon Neutrality”[J]. *China Geology*, 5(4): 722–733.
- US Department of Energy (USDE). 2019. Office of Fossil Energy and Carbon Management[N]. SPR Storage Sites. <https://www.energy.gov/fecm/strategic-petroleum-reserve-4>.
- Van Gessel S, Leynet A, Mulder A, Koorneef J, Harcouet-Menou V. 2014. ESTMAP Technical Support Document: Subsurface Data Specification. EC Project no[R].
- Wang Baohui, Yan Xianzhen, Yang Xiujuan, Feng Yaorong. 2012. Natural gas dynamic migration in an underground gas storage in aquifer beds[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 33(2): 327–331 (in Chinese with English abstract).
- Wang Mengshu, Yang Huijun. 2008. Basic principles for design and construction of underground water-sealed hydrocarbon-storage rock caverns[J]. *Engineering Science of China*, (4): 11–16, 28 (in Chinese with English abstract).

- Chinese with English abstract).
- Wang Y, Guo C H, Chen X J, Jia L Q, Guo X N, Chen R S, Wang H D. 2021. Carbon peak and carbon neutrality in China: Goals, implementation path and prospects[J]. *China Geology*, 4(4): 720–746.
- Wen Xiankui, Zhang shihai, Wang Suobin. 2018. Summary of compressed air energy storage technology and demonstration projects[J]. *Application of Energy Technology*, (3): 43–48 (in Chinese with English abstract).
- Wu Haowen, Wang Jun, Gong Yingli, Yang Hairui, Zhang Man, Huang Zhong. 2021. Development status and application prospect analysis of energy storage technology[J]. *Journal of Electric Power*, 36(5): 434–443 (in Chinese with English abstract).
- Xue Huifeng, Zhou Yichen. 2009. China's energy reserve strategy under the slowdown of global economic growth[J]. *Environmental Protection*, (2): 64–66 (in Chinese with English abstract).
- Yang C, Wang T, Chen H. 2022. Theoretical and technological challenges of deep underground energy storage in China[J]. *Engineering*, 25(6): 168–181.
- Zhang Senqi, Guo Jianqiang, Diao Yujie, Zhang Hui, Jia Xiaofeng, Zhang Yang. 2011. Technical method for selection of CO₂ geological storage project sites in deep saline aquifers[J]. *Geology in China*, 38(6): 1640–1651 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Qingfan, Zhang Junfa. 2022. Review of underground hydrogen storage technology[J]. *Oil Gas and New Energy*, 34(4): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jianying, Qian Bin, Zhao Yunsong, Li Jingjiang. 2021. Advantages of applying cluster well technology to construct salt cavern gas storage[J]. *Gas & Heat*, 41(5): 1–3, 17, 44 (in Chinese with English abstract).
- Zong Shi, Liu Shiqi, Xu Hui, Wang Wenkai, Cao Bo, Huang Fansheng. 2023. Numerical simulation of CO₂ storage in bedded salt rock storage cavern in Subei Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 51(3): 27–36 (in Chinese with English abstract).
- 贾善坡, 金凤鸣, 郑得文, 孟庆春, 张辉, 林建品, 魏强. 2015. 含水层储气库的选址评价指标和分级标准及可拓综合判别方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 34(8): 1628–1640.
- 贾善坡, 郑得文, 金凤鸣, 张辉, 孟庆春, 林建品, 魏强. 2016. 含水层构造改建地下储气库评价体系[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 47(3): 857–867.
- 李建君. 2022. 中国地下储气库发展现状及展望[J]. *油气储运*, 41(7): 780–786.
- 刘楷琳, 尚培培. 2021. 中国城市群高质量发展水平测度及空间关联性[J]. *东北财经大学学报*, (3): 37–46.
- 陆佳敏, 徐俊辉, 王卫东, 王浩, 徐孜俊, 陈留平. 2022. 大规模地下储氢技术研究展望[J]. *储能科学与技术*, 11(11): 3699–3707.
- 马新华, 郑得文, 魏国齐, 丁国生, 郑少婧. 2022. 中国天然气地下储气库重大科学理论技术发展方向[J]. *天然气工业*, 42(5): 93–99.
- 梅生伟, 公茂琼, 秦国良, 田芳, 薛小代, 李瑞. 2017. 基于盐穴储气的先进绝热压缩空气储能技术及应用前景[J]. *电网技术*, 41(10): 3392–3399.
- 施锡林, 尉欣星, 杨春和, 马洪岭, 李银平. 2023. 中国盐穴型战略石油储备库建设的问题及对策[J]. *中国科学院院刊*, 38(1): 99–111.
- 苏健, 梁英波, 丁麟, 张国生, 刘合. 2021. 碳中和目标下我国能源发展战略探讨[J]. *中国科学院院刊*, 36(9): 1001–1009.
- 苏展. 2021. 全球地下储气库发展趋势研究及对我国储气调峰体系建设的启示[J]. *质量与市场*, (7): 143–145.
- 王保辉, 闫相祯, 杨秀娟, 冯耀荣. 2012. 含水层型地下储气库天然气动态运移规律[J]. *石油学报*, 33(2): 327–331.
- 王梦恕, 杨会军. 2008. 地下水封岩洞油库设计、施工的基本原则[J]. *中国工程科学*, (4): 11–16, 28.
- 文贤旭, 张世海, 王锁斌. 2018. 压缩空气储能技术及示范工程综述[J]. *应用能源技术*, (3): 43–48.
- 吴皓文, 王军, 龚迎莉, 杨海瑞, 张曼, 黄中. 2021. 储能技术发展现状及应用前景分析[J]. *电力学报*, 36(5): 434–443.
- 薛惠锋, 周奕琛. 2009. 全球经济增长减缓下的中国能源储备策略[J]. *环境保护*, (2): 64–66.
- 张森琦, 郭建强, 刁玉杰, 张徽, 贾小丰, 张杨. 2011. 规模化深部咸水含水层 CO₂ 地质储存选址方法研究[J]. *中国地质*, 38(6): 1640–1651.
- 中国科学院武汉文献情报中心学科情报团队, 中国科学院武汉岩土力学研究所油气地下储备与开发研究中心团队, 李娜娜, 赵晏强, 王同涛, 杨春和. 2021. 趋势观察: 国际盐穴储能战略与科技发展态势分析[J]. *中国科学院院刊*, 36(10): 1248–1252.
- 周庆凡, 张俊法. 2022. 地下储氢技术研究综述[J]. *油气与新能源*, 34(4): 1–6.
- 朱健颖, 钱彬, 赵云松, 李敬江. 2021. 应用丛井技术建设盐穴储气库的优势[J]. *煤气与热力*, 41(5): 1–3, 17, 44.
- 宗师, 刘世奇, 徐辉, 王文楷, 曹泊, 皇凡生. 2023. 苏北盆地层状盐穴储气库 CO₂ 封存数值模拟研究[J]. *煤田地质与勘探*, 51(3): 27–36.

附中文参考文献

- 常乐, 张敏吉, 梁嘉, 孙洋洲. 2012. 储能在能源安全中的作用[J]. *中外能源*, 17(2): 29–35.
- 陈海生, 刘金超, 郭欢, 徐玉杰, 谭春青. 2013. 压缩空气储能技术原理[J]. *储能科学与技术*, 2(2): 146–151.
- 付盼, 罗森, 夏焱, 李国韬, 班凡生. 2020. 氢气地下存储技术现状及难点研究[J]. *中国井矿盐*, 51(6): 19–23.
- 郭朝斌, 王志辉, 刘凯, 李采. 2019. 特殊地下空间应用与研究现状[J]. *中国地质*, 46(3): 482–492.
- 郭平业, 王蒙, 孙晓明, 何满潮. 2022. 废弃矿井地下空间反季节循环储能研究[J]. *煤炭学报*, 47(6): 2193–2206.