

## 山东省二氧化碳地质封存研究现状及进展

刘华峰<sup>1</sup>,程鸿雁<sup>1</sup>,郑兆伟<sup>2</sup>,孙斌<sup>1</sup>,董健<sup>1</sup>,刘春华<sup>1</sup>,王丽娟<sup>1</sup>,叶林<sup>3</sup>,刘治政<sup>1,3\*</sup>,  
魏凯<sup>4</sup>

(1. 山东省地质调查院, 山东 济南 250014; 2. 山东省煤田地质局物探测量队, 山东 济南 250104; 3. 山东大学, 山东 青岛 266237; 4. 山东省地质矿产勘查开发局第五地质大队, 山东省地矿局岩溶塌陷防治重点实验室, 山东 泰安 271000)

**摘要:**为了进一步遏制全球气候变化,有效降低大气中的二氧化碳浓度,顺利完成双碳目标,我国陆续实施 CCUS 项目并逐步推进应用。近年来围绕地质碳封存研究,山东省自然资源厅部署实施了 6 项碳封存地质勘查项目,研究结果显示,山东省划分为深部咸水层、枯竭油气藏、不可采煤层及大型盐穴等 4 种碳封存地质类型,摸清了不同地质类型的储层、盖层条件和适宜性,明确了深部咸水层是未来碳封存主要潜力介质和发展方向。同时齐鲁石化-胜利油田 CCUS 案例表明山东省的二氧化碳驱油技术已趋向成熟。山东省地质碳封存地勘项目研究及 CCUS 案例实施,为山东省“双碳目标”的顺利实现提供了地质理论和技术支撑。

**关键词:**碳封存;地勘项目;咸水层;山东省

**中图分类号:**X169;X21

**文献标识码:**A

**doi:**10.12128/j.issn.1672-6979.2025.12.003

## 0 引言

18 世纪以来,化石燃料大量使用造成温室气体浓度逐渐增高,引起全球气候变化问题日益严重,其中 CO<sub>2</sub> 增强温室效应最为显著,在温室气体中贡献占比超过 60%<sup>[1]</sup>。因此,CO<sub>2</sub> 的排放成为影响全球温度和气候变化等连锁反应的直接因素,减碳成为 21 世纪的国际共同目标。2020 年 9 月,我国在第七十五届联合国大会上做出“中国力争于 2030 年前二氧化碳排放达到峰值,2060 年实现碳中和”的碳排放承诺<sup>[2]</sup>,即“双碳目标”。山东省为全国 CO<sub>2</sub> 排放大省,“双碳目标”任务艰巨。在不改变能源结构的前提下,碳捕集、碳循环、碳封存(简称 CCUS)是实现“双碳目标”的主要途径。CO<sub>2</sub> 地质封存(简称 CCS)技术通过捕集工业排放的二氧化碳,将其注入地下或海底地质构造中实现永久封存,是当前国际上公认的减少二氧化碳直接排放的有效措施之一<sup>[3]</sup>。国内外学术界对碳封存的研究更多以工程应

用为目标,包括封存机理研究、封存设备流程、风险评估、典型案例跟踪评价等<sup>[4]</sup>。我国 CCUS 技术快速发展,形成了碳捕集、利用与封存全流程技术体系,并进入规模化应用阶段,对二氧化碳地质封存的场址选择、监测技术及适宜性和潜力评价进行研究,特别是对二氧化碳地质封存的影响因素及在储层中运移规律开展了大量的研究工作,取得了一定的研究成果,但一般是采用室内试验、理论分析和数值模拟的方法进行<sup>[5]</sup>。山东省齐鲁石化-胜利油田百万吨级 CCUS 项目正在实施,学者对山东省碳封存的研究鲜见报道。本文立足山东实际,论述了山东省地质碳封存的研究进展和工作实施情况,探索了山东省地质碳封存地质类型及相关主控因素,以期对山东省“双碳目标”的顺利实现提供地质支撑。

## 1 碳封存与封存方式

碳封存(Carbon Sequestration)是通过一定技术手段将捕集的 CO<sub>2</sub> 安全储存起来,使其与大气长期

收稿日期:2025-10-10;修订日期:2025-10-25;编辑:王敏

基金项目:山东省 2023 年地质勘查项目“山东省二氧化碳地质储存潜力评价体系建设”(鲁勘字[2023]7 号)

作者简介:刘华峰(1982—),男,山东鄄城人,正高级工程师,主要从事环境地球化学和环境科学方面工作;E-mail:hfliu88@163.com

\* 通信作者:刘治政(1985—),男,山东莱芜人,正高级工程师,主要从事水工环方面工作;E-mail:664323877@qq.com

隔绝。碳封存方式包括生物封存、地质封存和海洋封存<sup>[6]</sup>。这 3 种碳封存方式优缺点各异, 相比而言, 生物封存一般为自然过程, 固碳时间在百年以上, 存在固碳效率低, 固碳时间短的缺点。海洋封存虽然远离城市安全性较高, 但成本高, 技术难度大, 缺乏示范项目与顶层框架<sup>[7]</sup>。这 2 种碳封存方式不适于高速发展的社会需求。

CO<sub>2</sub> 地质封存(CCS)是指通过工程技术手段将捕集的 CO<sub>2</sub> 储存于深部地质构造中, 实现与大气长期隔绝的过程。根据地质封存体的不同, 较常见地质封存方式有油气藏、深部咸水层、煤层和其他地质结构<sup>[8]</sup>; 国内深部咸水层封存具有分布广, 潜力大、效果好和技术成熟的特点。《2024 年全球碳捕集与封存(CCS)现状报告》(全球碳捕集与封存研究院)指出, 欧洲和英国有 191 个项目处于不同的开发阶段, 其中 23 个设施将二氧化碳注入深部咸水层, 18 个设施将二氧化碳注入枯竭油气田。据不完全统计, 截至 2024 年 11 月, 全球投产 844 个大规模 CCUS 项目中, 二氧化碳封存类型主要以强化石油开采(EOR)和专用地质封存两类为主。《中国区域二氧化碳地质封存经济可行性研究——中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2024)》指出, 全球陆地 CO<sub>2</sub> 理论封存容量为(6~42)万亿 t, 海底理论封存容量为(2~13)万亿 t, 中国 CO<sub>2</sub> 理论地质封存容量为(1~4)万亿 t。以上看出, CO<sub>2</sub> 封存主要以地质封存为主, 反映出目前地质碳封存在技术上较为成熟, 安全性高。

目前适宜地质碳封存的介质包括废弃的油气田、煤层、地下深部咸水层, 其中咸水层封存潜力最大<sup>[9]</sup>。有关报道称, 深部咸水层碳封存容量占比大于 90%, 且分布广泛, 是较为理想的碳封存场所<sup>[10]</sup>。

## 2 地质碳封存机理

### 2.1 物理条件

CO<sub>2</sub> 多以超临界状态输送、封存至地下, 以保证地质碳封存的稳定性和安全性。这种超临界状态是在压力 7.38 MPa、临界温度 31.1℃时 CO<sub>2</sub> 呈现出兼具气体流动性和液体高密度的特殊物理状态, 是均一的流体相态(图 1)。根据地表温度 15℃, 地温梯度 2.5℃/100m、地层压力系数为 1.0, 推测出地质封存埋深在地表 800 m 以下, 才能呈现出超临界

状态<sup>[11-13]</sup>。

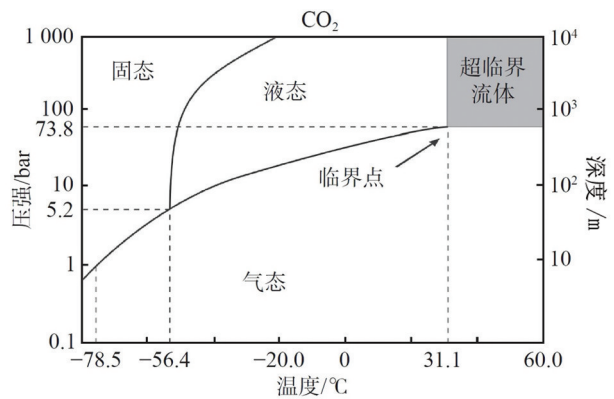


图 1 二氧化碳存在形态与温度、压强的关系<sup>[14]</sup>

### 2.2 封存机理

CO<sub>2</sub> 在地层中的封存机理比较复杂<sup>[15-17]</sup>, 包括: ①静态封存, 超临界 CO<sub>2</sub> 的密度比地层水的密度小, 注入后的 CO<sub>2</sub> 受浮力作用向上运移至地质构造圈闭的顶部; ②束缚封存, 注入的 CO<sub>2</sub> 在压力和浮力双重作用下束缚在储层孔隙中; ③溶解封存, 在温度、压力和盐度控制下, CO<sub>2</sub> 呈溶解状态达到平衡封存; ④矿化封存, 构造圈闭的超临界 CO<sub>2</sub> 与水反应生成碳酸, 与岩石矿物中的 Ca<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 发生反应形成碳酸盐沉淀; ⑤水动力封存, 在地下水动力作用下, 地层水的流动可阻隔或分散部分 CO<sub>2</sub>, 在浮力等作用下聚集形成水动力圈闭; ⑥吸附封存, 煤层吸附 CO<sub>2</sub> 远高于其他地层, 且吸附能力强于 CH<sub>4</sub><sup>[18-19]</sup>, 易于驱替煤层里的 CH<sub>4</sub>。因此, CO<sub>2</sub> 在地质封存过程中, 是物理相态变化和化学平衡的复杂物理化学过程。

### 2.3 咸水层碳封存

咸水层封存多存在于“不可利用”的深部沉积盆地盐水层(矿化度为 3~50 g/L), 咸水中存在着高浓度的盐类(盐度高于 10 g/L), 不适于农业及人类生产生活使用<sup>[20]</sup>, 它具有巨大的 CO<sub>2</sub> 储存潜力, 在储层圈闭性良好的前提下, 能够长久的封存 CO<sub>2</sub>。据报道, 我国的深部盐水层中, CO<sub>2</sub> 的储量约为 14 350 亿 t, 是所有进行 CO<sub>2</sub> 地质封存的场所中储量最高的<sup>[13]</sup>。根据相关研究, 深部咸水层具有巨大的封存潜力, 占总 CO<sub>2</sub> 封存容量的 90%~95%, 是 CCS 项目中最有前景的地质储层之一<sup>[21]</sup>。

神华集团于 2010 年在内蒙古自治区鄂尔多斯市启动了中国第一个 CCS 工业化示范项目, 设计年

捕集封存 CO<sub>2</sub> 约 10 万 t, 将 CO<sub>2</sub> 加压后注入地下 1 000~3 000 m 的咸水层岩层, 并通过岩性较致密的盖层实现封存<sup>[10]</sup>, 证明我国地质碳封存技术已经成熟。

### 3 山东省地质碳封存研究进展

山东省除了胜利油田在实施 CCUS 项目进行 CO<sub>2</sub> 驱油外, 其余均为探索性和理论性的研究工作, 包括海洋地质碳封存和陆地地质碳封存, 海洋碳封存如东海区域的地质封存理论研究<sup>[22-23]</sup>, 陆域地质碳封存的报道较少。

依据山东省大地构造分区和地质地层条件, 结合地质碳封存需求的圈闭性和安全性, 将山东省可用于地质碳封存的地质资源划分为深部咸水层、油气藏、煤层及大型盐穴等洞穴型特殊空间等 4 类。结合上述 4 种地质碳封存类型, 2022 年开始山东省自然资源厅先后部署开展了“山东省德州潜凹陷二氧化碳封存试验与潜力评价”“山东省日照市乔家墩子深层裂隙二氧化碳封存试验与潜力评价”“山东省东营潜凹陷二氧化碳封存试验与潜力评价”“鲁西南地区二氧化碳地质储存条件调查及潜力评价”“山东省大汶口盆地盐穴地下空间碳储潜力调查与评价”“山东省二氧化碳地质储存潜力评价体系建设”等 6 个项目, 旨在摸清全省二氧化碳地质封存有利场所及封存潜力, 助力山东省改善生态环境, 实现“双碳目标”。截至 2025 年 6 月, 6 个项目报告均顺利完成验收, 获得了一系列研究成果, 极大推动了山东省地质碳封存的研究程度和技术水平, 为下一步实施 CCUS 工程项目提供理论依据和精确的碳封存靶区。

#### 3.1 咸水层地质碳封存研究

CO<sub>2</sub> 在深部咸水层封存过程中, 包括 4 个主要的封存机制, 分别是构造封存、毛细管封存、溶解封存和矿化封存, 这 4 个封存机制的发生在时间上呈先后逻辑关系。咸水层封存效率的主控因素为盖层地质条件、储层物性参数、CO<sub>2</sub> 纯度及封存过程的操作方式<sup>[14]</sup>, 也就是说盖层的圈闭性、储层的渗透率、CO<sub>2</sub> 浓度及封存实施的注入方式均能影响到 CO<sub>2</sub> 封存量及封存效率, 是实现咸水层地质碳封存的关键因素。

绝大部分 CO<sub>2</sub> 在注入初期以构造封存的形式

储存, 随着 CO<sub>2</sub> 浓度不断上升, 原本地层中的咸水被 CO<sub>2</sub> 驱替。待 CO<sub>2</sub> 注入完毕后, 原先被驱替掉的咸水回来驱替掉部分 CO<sub>2</sub>, 这部分 CO<sub>2</sub> 受到毛细管力作用, 被吸附在多孔储层的孔隙内, 这便是毛细管封存。注入的 CO<sub>2</sub> 部分会有少部分在咸水中溶解, 其溶解量取决于咸水层内温度、压力和含盐量。其中约 1% 的 CO<sub>2</sub> 会与地层水发生反应, 生成碳酸。随后碳酸又在水中分解为氢离子和碳酸根离子, 后者会和咸水中的 Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 结合生成碳酸盐沉淀, 完成 CO<sub>2</sub> 的矿化封存<sup>[24]</sup>。

不同封存机制对封存 CO<sub>2</sub> 的安全性影响较大。在深部盐水层的封存机理中, 构造封存和毛细管封存属于物理封存, 对 CO<sub>2</sub> 进行封存作用的时间较短; 而溶解封存和矿化封存属于化学封存, 对 CO<sub>2</sub> 进行封存的稳定性较强<sup>[25]</sup>。

山东省咸水层面积较大, 分布在齐广断裂以北、东至沂沭断裂带西盘, 包括鲁西北的聊城、德州、滨州、东营等地。在德州潜凹陷和东营潜凹陷等区域, 埋深一般在 800 m 以下, 自上至下分布有馆陶组、东营组 and 沙河阶组等地层, 部分区域东营组地层缺失, 岩性以砂岩和泥岩为主, 层厚较大。山东省深部咸水层以岩性孔隙度大、水矿化度高为特点。

山东省德州潜凹陷二氧化碳封存试验与潜力评价项目, 在分析德州潜凹陷地质构造和地质条件的基础上, 开展了深部咸水层 CO<sub>2</sub> 封存试验、CO<sub>2</sub> 运移监测、地震监测、地表形变监测、水质监测、大气 CO<sub>2</sub> 浓度监测、土壤 CO<sub>2</sub> 通量监测, 以及室内试验模拟及数值模型建设等一系列工作, 查明了德州潜凹陷深部咸水层形成地质背景条件、地层参数特征与地质碳封存所需要的地质条件、盖层条件、储集条件以及温压条件等, 证实了沙河街组地层具有良好的封存适宜性; 环境监测结果表明注入的 CO<sub>2</sub> 未发生逃逸, 地层作为盖层具有良好的密闭性。该项目证明了沙河街组砂岩含水层作为碳封存储层层位, 东营组泥岩作为直接盖层, 密闭性好, 厚度大, 具有碳封存的适宜性。本论文的支撑地勘项目也科学计算了深部咸水层的碳封存量, 潜力巨大。

#### 3.2 构造裂隙碳封存研究

深部构造裂隙地质碳封存一直未有研究和实施案例, 理论上讲, 深部构造裂隙发育程度和分布是碳封存的主控因素, 裂隙发育成因对碳封存后期的

稳定性有直接作用。但是构造裂隙一般空间跨度较大,用地质手段去查清构造裂隙的密闭性,工作周期长,难度较大。

山东省的构造裂隙广泛分布于鲁中南地区和胶东地区。日照乔家墩子深层裂隙二氧化碳封存试验与潜力评价项目,对区内深部裂隙发育情况、地层参数特征与咸水层二氧化碳地质封存所需要的地质条件、盖层条件、储集条件以及温压条件等对比分析,确定了乔家墩子深层裂隙二氧化碳注入层位为 1 291.1~1 320.5 m;实施了 2 次裂隙含水层二氧化碳地质封存试验,在裂隙储层规模化注入过程,注入井数量、注入压力、注入井类型对储层利用效率影响明显,储层中二氧化碳主要在垂向上呈椭圆形分布,在水平方向上的分布特征明显受裂隙空间的限制;采用数值模拟的方法估算封存试验井地质封存潜力。

### 3.3 不可采煤层碳封存研究

国内学者对不可采煤层的研究较多,CO<sub>2</sub> 在煤层中的封存涉及许多地球物理、地球化学和地质力学反应,其中最重要的是气体吸附和解吸、矿物反应和溶解<sup>[26]</sup>。超临界 CO<sub>2</sub> 作为一种非极性流体注入煤层后,煤层中的黏土矿物对 CO<sub>2</sub> 产生吸附,煤体中的有机物发生物理萃取,一些小的有机分子被液态 CO<sub>2</sub> 溶解并沉淀,形成矿化封存;同时注入煤层的 CO<sub>2</sub> 会析出 CH<sub>4</sub>, 因此,在不可开采的煤层中可以采用 CO<sub>2</sub> 驱替 CH<sub>4</sub> 强化煤层气开采,从而实现 CO<sub>2</sub> 封存,但会造成煤层的膨胀,影响煤层结构的稳定性<sup>[6]</sup>。

山东省煤层主要分布在鲁西南和鲁南一带,滕州和邹城等地部分煤矿已完成开采,菏泽区域煤田大部分正在开采。鲁西南地区二氧化碳地质储存条件调查及潜力评价项目,深入分析鲁西南地区煤层、盐层的分布情况及地质、水文地质条件,明确了各煤田的二氧化碳地质封存临界深度,评价了各调查区块构造稳定性,确定了巨野、单县和曹县煤田深部煤层具有良好的二氧化碳地质封存条件。通过二维地震勘查,圈定了黄岗凹陷(潜)南部适宜二氧化碳地质封存的巨厚盐层分布范围,并大致查明其构造圈闭条件,区内含煤地层具备二氧化碳地质封存潜力;系统分析了鲁西南地区含煤地层、含盐地层与二氧化碳地质封存有关的主控因素,采用逐级递减的方

法,划定了适宜二氧化碳地质封存的有利区块。

### 3.4 大型盐穴碳封存研究

山东省盐穴主要集中在大汶口盆地,主要用于储能储气等新兴领域。地下的盐岩被溶解抽取后,形成具有一定封闭空间的盐岩溶腔,腔体空间形态不规则,但封闭性好,其孔隙率低、蠕变性强、建造简单、注采气便捷等优点,具备储存二氧化碳的潜力<sup>[27]</sup>。

山东省大汶口盆地盐穴地下空间碳储潜力调查与评价项目,利用多种地震属性融合等勘查手段,查清了地下盐腔空间形态,确定了主要盐层的采动范围,估算了重点调查区内盐腔体积。根据腔体规模、裂隙发育程度、腔体纵横比和腔体间距以及盖层裂隙发育程度等参数,对盐腔进行了综合评价,圈定 I 类腔体 9 个、II 类腔体 2 个、III 类腔体 7 个,腔体总体规模较大,盖层裂隙不发育,腔体围岩圈闭性好,此研究为地下盐穴碳封存的选址提供技术靶区。

## 4 山东省 CCUS 典型案例

为了推进“双碳目标”的实现,山东省迅速部署和实施相关 CCUS 项目,其中齐鲁石化-胜利油田 CCUS 项目,是我国首个百万吨级 CCUS 项目<sup>[28]</sup>,该项目将齐鲁石化生产过程中产生的二氧化碳捕集、提纯后输送至胜利油田注入地层封存并驱油,既降碳减排又驱油增产。该项目推动能耗降低 19%,实现捕集率达到 93% 以上,建成大规模 CO<sub>2</sub> 驱油与封存工程,近 2 年新增原油产量 75.4 万 t,提高采收率 20% 以上,获得全球碳封存领导人论坛旗舰项目认证,标志着我国 CCUS 技术进入国际先进行列,CCUS 产业进入成熟的商业化运营阶段,对搭建“人工碳循环”模式具有重要意义,该示范工程获 2024 年度山东省科技进步奖特等奖。这表明了山东省碳封存在技术上和产业化达到了国内较高的水平。

## 5 展望

本文介绍了碳封存基本情况、封存方式及适宜性地质分类,分析和总结了山东省内近年来部署完成的碳封存地质勘查项目和实施的 CCUS 项目案例。山东省对地质碳封存研究虽然起步较晚,但近年来省内地质碳封存技术呈现出快速发展态势。通过地质勘查项目实施,查明了适于山东省碳封存的

4 种地质类型,明确了深层咸水层为山东省地质碳封存的主要储存载体,潜力极大,是目前和未来的重点发展方向。

为了保证山东省双碳目标的顺利完成,持续保障经济高质量发展的同时维护和谐的地球环境,在目前地质碳封存研究的基础上,仍需要开展广泛的勘查、深层次理论技术探索和 CCUS 工程试验,有以下几个方面的展望。

(1)地质碳封存选址的适宜性评价,通过系统部署和开展精密调查,进一步查清山东省适宜地质碳封存的空间和场所,为实施碳封存提供靶区。

(2)深入研究碳封存潜力方法。基于碳封存地质空间结构和储层、盖层介质物理化学参数,开展碳封存试验演算,精确计算关键参数值,科学估算地质碳封存潜力,明确山东省地质碳封存潜力。

(3)加强地质碳封存监测。为防止封存地质体中 CO<sub>2</sub> 泄漏,充分发挥物探技术作用,针对碳封存的试验场地或工程区域,进行地天空一体化的监测部署,建立监测预警与应急处理系统,保证地质空间的安全性。

(4)打造地质碳封存应用示范工程,形成具有商业化价值的碳封存集成试点,推动实现地质碳封存全链条产业化。

**致谢:**感谢项目实施过程中山东省自然资源厅地质勘查处各位领导和找矿指导技术中心的大力支持,感谢综合研究阶段山东省地质调查院领导及同事们提供的热心帮助,感谢山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队、山东省地质矿产勘查开发局第八地质大队、山东省煤田勘查规划院、山东省地质工程集团有限公司及山东省地质科学研究院等单位负责碳封存的项目组提供的地勘项目资料。

## 参考文献:

- [1] 张玉铭,胡春胜,张佳宝,等.农田土壤主要温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J].中国生态农业学报,2011,19(4):966-975.
- [2] 盛玉雷.积极稳妥推进碳达峰碳中和[N].人民日报,2022-11-17(007).
- [3] 孙腾民,刘世奇,汪涛.中国二氧化碳地质封存潜力评价研究进展[J].煤炭科学技术,2021,49(11):10-20.
- [4] 范淑菁,郝晨越,陈新月,等.二氧化碳捕集技术的研究进展[J].黑龙江科学,2024,15(6):20-24.
- [5] 张海滨,卢迪,王永昌,等.二氧化碳海洋封存的技术和研究现状[J].海洋科学,2024,48(4):108-121.
- [6] 张广奇,徐玉兵,刘曾奇,等.CO<sub>2</sub>地质封存技术研究进展[J].当代化工研究,2024(17):41-43.
- [7] 杨旅涵,施泽明,吴蒙,等.碳封存技术研究进展[J].中国煤炭地质,2023,35(6):44-50.
- [8] 李光,刘建军,刘强,等.二氧化碳地质封存研究进展综述[J].湖南生态科学学报,2016,3(4):41-48.
- [9] JAFARI M, CAO S C, JUNG J. Geological CO<sub>2</sub> sequestration in saline aquifers: implication on potential solutions of China's power sector[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 121:137-155.
- [10] 潘志彦,郇林军,郑佳祎,等.超临界二氧化碳在深部盐水中溶解封存及影响因素[J].应用科技,2025,52(1):77-83.
- [11] 孙玉景,周立发,李越.CO<sub>2</sub>海洋封存的发展现状[J].地质科技情报,2018,37(4):212-218.
- [12] 李海峰,王强.CCUS中CO<sub>2</sub>利用和地质封存研究[J].现代化工,2022,42(10):86-90.
- [13] 卓成刚,刘秀慧.CO<sub>2</sub>海洋封存技术国内外研究进展与启示[J].安全与环境工程,2017,24(5):84-89.
- [14] 马馨蕊,梁杰,李清,等.咸水层CO<sub>2</sub>地质封存研究进展及前景展望[J].海洋地质前沿,2024,40(10):1-18.
- [15] 曹默雷,陈建平.CO<sub>2</sub>深部咸水层封存选址的地质评价[J].地质学报,2022,96(5):1868-1882.
- [16] 孙玉景,周立发,李越.CO<sub>2</sub>海洋封存的发展现状[J].地质科技情报,2018,37(4):212-218.
- [17] 李海峰,王强.CCUS中CO<sub>2</sub>利用和地质封存研究[J].现代化工,2022,42(10):86-90.
- [18] 卓成刚,刘秀慧.CO<sub>2</sub>海洋封存技术国内外研究进展与启示[J].安全与环境工程,2017,24(5):84-89.
- [19] 王晓桥,马登龙,夏锋社,等.封储二氧化碳泄漏监测技术的研究进展[J].安全与环境工程,2020,27(2):23-34.
- [20] 刁玉杰,马鑫,李旭峰,等.咸水层CO<sub>2</sub>地质封存地下利用空间评估方法研究[J].中国地质调查,2021,8(4):87-91.
- [21] LU P, LIU W, GAO C, et al. Evaluation of carbon dioxide storage in the deep saline layer of the Ordovician Majiagou Formation in the Ordos Basin//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science[C]. IOP Publishing, 2021: 12-58.
- [22] 可行,陈建文,龚建明,等.东海陆架盆地CO<sub>2</sub>地质封存适宜性评价[J].海洋地质前沿,2023,39(7):1-12.
- [23] 曹珂,吴林强,王建强,等.我国海洋地质碳封存研究进展与展望[J].中国地质调查,2023,10(2):72-76.
- [24] NOORAIEPOUR M. Rock properties and sealing efficiency in fine-grained siliciclastic caprocks - implications for CCS and petroleum industry[D]. Oslo: University of Oslo, 2018.
- [25] 赵玉龙,杨勃,曹成,等.盐水层CO<sub>2</sub>封存潜力评价及适应性评价方法研究进展[J].油气藏评价与开发,2023,13(4):484-494.
- [26] 张伟伟.西山矿区煤层CO<sub>2</sub>气相预裂增透技术应用研究[J].

当代化工研究,2020(13):94-95.

[28] 乔振,荀玥婷.山东省碳捕集利用与封存技术现状、问题及对策研究[J].科技广场,2023(2):55-64.

[27] 梁卫国,赵阳升.盐岩溶腔二氧化碳地质储存研究[J].地下空间与工程学报,2007(2):1545-1550.

## Present Condition and Progress of Carbon Dioxide Geological Storage in Shandong Province

LIU Huafeng<sup>1</sup>, CHENG Hongyan<sup>1</sup>, ZHENG Zhaowei<sup>2</sup>, SUN Bin<sup>1</sup>, DONG Jian<sup>1</sup>, LIU Chunhua<sup>1</sup>, WANG Lijuan<sup>1</sup>, YE Lin<sup>3</sup>, LIU Zhizheng<sup>1,3</sup>, WEI Kai<sup>4</sup>

(1. Shandong Institute of Geological Surveying, Shandong J'nan 250014, China; 2. Geophysical Prospecting and Surveying Brigade of Shandong Bureau of Coal Geology, Shandong J'nan 250104, China; 3. Shandong University, Shandong Qingdao 266237, China; 4. No. 5 Geological Brigade of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Key Laboratory of Karst Collapse Prevention and Control of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Shandong Tai'an, 271000, China)

**Abstract:** In order to further curb global climate change, effectively reduce the concentration of carbon dioxide in the atmosphere, and successfully achieve the dual carbon goals, CCUS projects has been successively implemented and gradually promoted their application in China. In recent years, the Department of Natural Resources of Shandong Province has deployed and implemented six geological exploration projects for carbon sequestration research. As showed by the research results, Shandong province can be divided into four geological types of carbon sequestration, they are deep saline aquifers, depleted oil and gas reservoirs, unmineable coal seams and large salt caverns. The reservoir and cap rock conditions and suitability of different geological types have been identified, It is clarified that deep saline aquifers are main potential and development direction for carbon sequestration in the future. As showed by CCUS project of Qilu Petrochemical Shengli Oilfield, application of carbon dioxide flooding technology in Shandong province has become mature. The research on geological carbon sequestration geological exploration projects in Shandong province and the implementation of CCUS projects can provide geological theory and technical support for realizing "dual carbon goals" smoothly in Shandong province.

**Key words:** Carbon sequestration; geological exploration projects; saline aquifers; Shandong province