

文章编号: 1000-0747(2022)04-0828-07

DOI: 10.11698/PED.20220212

二氧化碳捕集、驱油与埋存产业化进展及前景展望

袁士义^{1,2}, 马德胜^{2,3}, 李军诗¹, 周体尧^{2,3}, 姬泽敏^{2,3}, 韩海水^{2,3}(1. 中国石油天然气集团有限公司咨询中心, 北京 100724; 2. 提高石油采收率国家重点实验室, 北京 100083;
3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

基金项目: 中国石油重大科技专项“二氧化碳规模化捕集、驱油与埋存全产业链关键技术研究及示范”(2021ZZ01)

摘要: 二氧化碳捕集、驱油与埋存(CCUS-EOR)是最现实可行的规模化减碳技术,也是大幅度提高低渗透油田采收率的关键技术。梳理了国外CCUS-EOR发展的主要历程及其产业化进展,总结了我国CCUS-EOR技术攻关成果和矿场试验进展情况,分析了CO₂捕集、输送、驱油与埋存等全产业链的发展现状、面临问题与挑战,指出了我国CCUS-EOR规模化应用在驱油增产、埋存减碳等方面的巨大潜力和发展前景。提出目前我国CCUS-EOR正处于矿场试验向产业化发展的关键时期,需要针对我国陆相油藏的特点,发挥油田CO₂驱油可驱储量丰富、地下埋存空间巨大、地面基础设施完善和井筒注入通道分布广泛等优势,积极与碳源排放企业合作,加快攻关低浓度CO₂的低成本规模捕集、超临界长距离输送、更大幅度提高采收率和埋存率、安全规模埋存等核心关键技术攻关和示范工程建设,构建CCUS-EOR全产业链理论技术标准体系,支撑和推动工业化规模应用,以创新链引领CCUS-EOR新兴产业链快速效益发展。

关键词: 二氧化碳; CCUS-EOR; 碳捕集; 输送; 驱油; 碳埋存; 提高采收率; 产业化

中图分类号: TE327

文献标识码: A

Progress and prospects of carbon dioxide capture, EOR-utilization and storage industrialization

YUAN Shiyi^{1,2}, MA Desheng^{2,3}, LI Junshi¹, ZHOU Tiyaoyao^{2,3}, JI Zemin^{2,3}, HAN Haishui^{2,3}

(1. CNPC Advisory Center, Beijing 100724, China; 2. State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Beijing 100083, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: Carbon dioxide capture, EOR-utilization and storage (CCUS-EOR) are the most practical and feasible large-scale carbon reduction technologies, and also the key technologies to greatly improve the recovery of low-permeability oil fields. This paper sorts out the main course of CCUS-EOR technological development abroad and its industrialization progress. The progress of CCUS-EOR technological research and field tests in China are summarized, the development status, problems and challenges of the entire industry chain of CO₂ capture, transportation, oil displacement, and storage are analyzed. The results show a huge potential of the large-scale application of CCUS-EOR in China in terms of carbon emission reduction and oil production increase. At present, CCUS-EOR in China is in a critical stage of development, from field pilot tests to industrialization. Aiming at the feature of continental sedimentary oil and gas reservoirs in China, and giving full play to the advantages of the abundant reserves for CO₂ flooding, huge underground storage space, surface infrastructure, and wide distribution of wellbore injection channels, by cooperating with carbon emission enterprises, critical technological research and demonstration project construction should be accelerated, including the capture of low-concentration CO₂ at low-cost and on large-scale, supercritical CO₂ long-distance transportation, greatly enhancing oil recovery and storage rate, and CO₂ large-scale and safe storage. CCUS-EOR theoretical and technical standard system should be constructed for the whole industrial chain to support and promote the industrial scale application, leading the rapid and profitable development of CCUS-EOR emerging industrial chain with innovation.

Key words: carbon dioxide; CCUS-EOR; carbon capture; transportation; oil displacement; carbon storage; enhanced oil recovery; industrialization

引用: 袁士义, 马德胜, 李军诗, 等. 二氧化碳捕集、驱油与埋存产业化进展及前景展望[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(4): 828-834.

YUAN Shiyi, MA Desheng, LI Junshi, et al. Progress and prospects of carbon dioxide capture, EOR-utilization and storage industrialization[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(4): 828-834.

0 引言

近年来碳中和受到世界各国的空前关注。2015年,

国际社会达成了气候变化《巴黎协定》,确立了在21世纪末将全球平均温升较工业革命前控制在2℃以内的长期目标,众多研究表明,要实现这一目标,就必

须在 21 世纪下半叶甚至中叶实现碳中和^[1-4]。欧美等发达国家纷纷制定碳中和目标与近、中、远期行动方案。2019 年欧盟提出在 2050 年实现碳中和目标^[4]，2020 年美国公布行动计划支持在 2050 年实现净零排放^[4]。2020 年中国宣告“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”^[2, 4]。各国碳中和方案的提出，有力提振了世界各国应对气候变化的信心和行动意愿，也为碳中和技术的发展提供了有利契机。

二氧化碳捕集、利用与埋存 (CCUS) 及二氧化碳捕集与埋存 (CCS) 是实现碳中和的托底技术。“碳中和”不等于零碳排放，而是指各种活动产生的二氧化碳排放与各种碳汇措施吸收的量相等，达到相对“零排放”。在实际生产生活中，即使电力行业实现了全额可再生能源发电，其他行业也很难做到零排放，实现碳中和就需要以林业碳汇、CCUS/CCS 为代表的负碳技术提供保障。据 IEA 预测^[1]，实现全球 2070 年净零排放，其中 CCUS/CCS 技术封存 CO₂ 占累计减排量的 15%，对碳中和起托底作用。

二氧化碳捕集、驱油与埋存 (CCUS-EOR) 具有大幅度提高采收率和埋碳减排双重效益，最现实可行。根据利用方式的不同，CCUS 中的利用又可以分为油气藏利用 (CCUS-EOR/EGR) 化工利用、生物利用等方式。CCUS-EOR 将捕集的 CO₂ 注入地质构造完整、封闭性好、基础资料详实的已开发油藏，通过驱替提高原油采收率并实现 CO₂ 埋存，技术经济可行，是目前应用规模最大的 CCUS 技术，应用前景广阔。根据吉林、大庆等油田示范工程结果，CCUS-EOR 技术可提高油田采收率 10~25 个百分点，约每注入 CO₂ 2.0~3.0 t 可增产 1.0 t 原油，增油与埋存优势明显。CCS 没有 CO₂ 利用环节，是将捕集的 CO₂ 直接埋存。全球陆上及海底理论最大封存 CO₂ 容量为 55×10^8 t^[2]，其中深部咸水层封存量约占 98%，是较理想的 CO₂ 封存场所。受技术经济性等问题制约，目前 CCS 仍处于探索和矿场试验阶段^[3]。

中国 CO₂ 排放源主要包括发电、水泥、钢铁和煤化工等行业，以上 4 个行业 CO₂ 排放量约占总量的 92%，其中中低浓度 CO₂ 占总量的 90% 以上^[5]。由于富煤、油气不足的资源特点，中国煤炭消费在一次能源消费中占比高达 56.8%^[4]。因工艺要求和以燃煤为主的高温热处理特点，发电、水泥、钢铁等行业难以在短期内通过大规模节约燃煤、提高替代燃料比例等途径实现减碳目标。这些行业基础设施集中，CO₂ 排放规

模大，采用 CCUS 等负碳技术是平稳调整能源结构、实现规模减碳的现实途径。

CCUS-EOR 是石油炼化企业绿色发展的现实路径。石油炼化企业的 CO₂ 排放约占全国排放总量的 2.3%^[5]，以燃料燃烧排放和工艺过程排放为主，多为 15% 以下低浓度 CO₂。由于相当一部分炼化企业属于石油系统，有利于通过 CCUS-EOR 实现 CO₂ 资源化利用，推动石油化工行业绿色低碳发展。

本文梳理国外 CCUS-EOR 发展的主要历程及其产业化进展对中国的重要启示，基于中国 CCUS-EOR 技术攻关和矿场试验进展情况，分析了 CO₂ 捕集、输送、驱油与埋存等全产业链的发展现状、面临问题与挑战，指出了中国 CCUS-EOR 规模化应用在驱油增产、埋存减碳等方面的巨大潜力和发展前景。

1 国外 CCUS-EOR 产业发展的启示

1.1 国外 CCUS-EOR 产业发展历程与现状

国外 CCUS-EOR 项目主要在美国、加拿大等国家开展，特别是美国已具有成熟的 CCUS-EOR 工业体系。美国 CCUS-EOR 项目起步于 20 世纪 50 年代，60—70 年代持续开展关键技术攻关，70—90 年代逐步扩大工业试验规模，技术配套逐渐成熟，80 年代以后进入商业化推广阶段。自 20 世纪 80 年代起，美国 CCUS-EOR 技术工业化应用规模持续快速扩大，年产油量于 80 年代初突破 100×10^4 t，90 年代初突破 $1\,000 \times 10^4$ t，2012 年突破 $1\,500 \times 10^4$ t，并保持稳定^[6]（见图 1）。

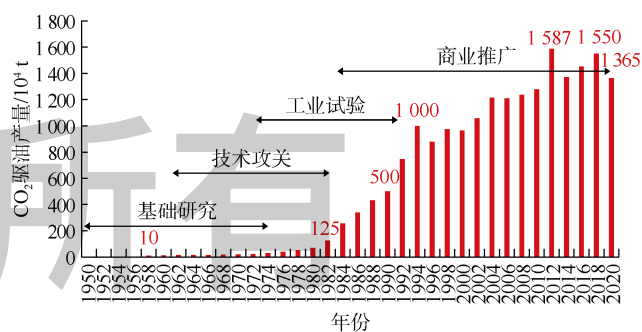


图 1 美国历年 CO₂ 驱油产量^[6]

全球碳捕集与封存研究院 (GCCSI) 2021 年研究报告^[7]显示，美国在运行中的、用于 CCUS-EOR 的大规模工业碳捕集项目有 11 个，暂停运行项目 2 个。在运行项目中 4 个为天然气处理项目，年捕集能力为 $1\,275 \times 10^4 \sim 1\,285 \times 10^4$ t，7 个为其他工业碳源项目，年捕集能力 $353 \times 10^4 \sim 579 \times 10^4$ t（见表 1）。

经过近 70 年的发展，目前美国 CCUS-EOR 产业

表 1 美国 CCUS-EOR 大规模工业捕集项目统计表^[7]

项目名称	封存类型	投运年份	用途	状态	捕集前 CO ₂ 浓度/%	年最小捕集能力/10 ⁴ t	年最大捕集能力/10 ⁴ t
Terrell Natural Gas Processing Plant (formerly Val Verde Natural Gas Plants)	CCUS-EOR	1972	天然气处理	运行中	25~50	40	50
Shute Creek Gas Processing Plant	CCUS-EOR	1986	天然气处理	运行中	65	700	700
Core Energy CO ₂ -EOR	CCUS-EOR	2003	天然气处理	运行中	5~30	35	35
Century Plant	CCUS-EOR	2010	天然气处理	运行中	大于 60	500	500
Enid Fertilizer	CCUS-EOR	1982	化肥生产	运行中		10	20
Coffeyville Gasification Plant	CCUS-EOR	2013	化肥生产	运行中		90	90
PCS Nitrogen	CCUS-EOR	2013	化肥生产	运行中		20	30
Arkalon CO ₂ Compression Facility	CCUS-EOR	2009	乙醇生产	运行中		23	29
Bonanza BioEnergy CCUS EOR	CCUS-EOR	2012	乙醇生产	运行中	大于 99	10	10
Great Plains Synfuels Plant and Weyburn-Midale	CCUS-EOR	2000	合成天然气	运行中	95	100	300
Air Products Steam Methane Reformer	CCUS-EOR	2013	制氢	运行中	10~20	100	100
Lost Cabin Gas Plant	CCUS-EOR	2013	天然气处理	暂停运行		70	70
Petra Nova Carbon Capture	CCUS-EOR	2017	发电	暂停运行		140	140

体系已成熟配套并持续拓展。在关键技术方面，已经形成了涵盖大规模 CO₂ 捕集、长距离超临界管道输送、大规模驱油油藏工程设计、大规模埋存安全监测等方面的关键技术体系。注采和地面工程设备简易高效，自动化程度高；动态监测和适时优化调整技术持续发展；产出气循环利用技术满足项目整体提效要求，实现了 CCUS-EOR 全流程封闭零排放的目标。

美国 CCUS-EOR 项目取得了很好的应用效果，以美国二叠盆地 Kelly-Snyder 油田 SACROC 区块 CCUS-EOR 项目为例^[8]：该区块储集层渗透率为 $1\times 10^{-3}\sim 30\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ ，地质储量约 $4.1\times 10^8\text{ t}$ ，1949 年投入开发，至 1974 年达到历史峰值年产量 $1\ 020\times 10^4\text{ t}$ ，1998 年产量递减至 $40\times 10^4\text{ t}$ ，2002 年实施 CO₂ 混相驱项目，2005 年产量超过 $150\times 10^4\text{ t}$ ，至 2020 年已持续稳产 16 年，累计增油 $2\ 456\times 10^4\text{ t}$ ，累计注入 CO₂ $3.9\times 10^8\text{ t}$ ，预计提高采收率 26 个百分点以上。在配套政策方面，国家出台了鼓励 CCUS-EOR 产业发展的 45Q、43 法案，每驱油埋存 1.0 t CO₂ 可抵免税额 20~35 美元，极大地调动了企业参与 CCUS-EOR 项目的积极性。

1.2 美国 CCUS-EOR 产业的主要启示

梳理美国 CCUS-EOR 产业化发展历程，对中国主要有 3 点启示：①得益于全产业链长期技术积累和大量矿场试验，形成了较为完整的技术标准体系；②得益于大规模管网建设，将天然气藏碳源、工业碳源捕集相结合并与油藏紧密连接，实现低成本捕集输送，有效降低了井口 CO₂ 价格（20~25 美元/t^[9-10]）；③得益于国家相应的鼓励政策，持续加大 CCUS-EOR 产业发展支持力度，实施规模不断扩大，并且开始向 CCS 方向拓展。

2 中国 CCUS-EOR 现状、问题与挑战

2.1 中国 CCUS-EOR 产业发展现状

国内 CCUS-EOR 研究起步较早，石油企业及相关院校早在 20 世纪 60 年代就开始探索 CO₂ 驱油技术，但因气源、机理认识、装备等问题产业化发展滞后。进入 21 世纪以来，国家和石油企业相继设立 CCUS-EOR 重大科技攻关和示范工程项目，大大推动了关键技术的突破和矿场试验的成功。目前全国已开展的 CCUS-EOR 矿场项目累计埋存 CO₂ 超过 $660\times 10^4\text{ t}$ ，其中中国石油天然气集团有限公司（简称“中国石油”）累计埋存 CO₂ 超过 $450\times 10^4\text{ t}$ ，累计增油超过 $100\times 10^4\text{ t}$ 。

2000 年以来，中国石油加快技术研发与应用步伐^[11-12]，先后牵头承担了国家重点基础研究发展计划（973 计划）、国家高技术研究发展计划（863 计划）、国家科技重大专项等一批国家级 CCUS-EOR 重大科技攻关和示范项目^[13-17]，并配套公司重大科技专项和重大开发矿场试验项目^[18]，进行集中攻关和试验，首次发现陆相原油 C₆—C₁₅ 组分对混相的重要贡献，构建了较为完整的陆相砂岩油藏 CO₂ 驱油埋存理论和技术标准体系，在吉林与长庆油田建成了 2 个国家级 CCUS-EOR 示范工程。截至 2021 年，中国石油共开展 11 项 CCUS-EOR 重大开发试验，CO₂ 年注入能力达到 $100\times 10^4\text{ t}$ ，2021 年年注入 CO₂ $56.7\times 10^4\text{ t}$ 、年产量达 $20\times 10^4\text{ t}$ ，具有显著的增产原油和埋存减排效果。吉林油田共建成 5 个 CO₂ 驱油与埋存示范区，累计注 CO₂ $212\times 10^4\text{ t}$ ，年注入 CO₂ 能力达到 $40\times 10^4\text{ t}$ ，年产能超过 $10\times 10^4\text{ t}$ ，其中黑 79 北小井距试验区 CO₂ 混相驱预计提高采收率 25 个百分点以上；大庆油田累计注

CO_2 $189 \times 10^4 \text{ t}$, 年注入 CO_2 能力 $30 \times 10^4 \text{ t}$, 年产油能力 $10 \times 10^4 \text{ t}$, 其中树 101 特低渗透油藏 CO_2 非混相驱预计提高采收率 10 个百分点以上。目前大庆、吉林、长庆、新疆等油田 CO_2 驱总体处于工业化试验和规模应用阶段。中国石油正在开展 CCUS-EOR 全产业链重大科技专项攻关, 同时大庆油田-大庆石化、吉林油田-吉林石化在松辽盆地建设年注入 CO_2 $300 \times 10^4 \text{ t}$ 、年产原油 $100 \times 10^4 \text{ t}$ 的重大示范工程, 中国石油力争 2025 年年注入 CO_2 达到 $500 \times 10^4 \text{ t}$ 、年产油量 $150 \times 10^4 \text{ t}$, 2030 年预期年注 CO_2 规模将达 $2\,000 \times 10^4 \text{ t}$ 、年产油超过 $600 \times 10^4 \text{ t}$ 。

中国石油化工集团有限公司(简称“中国石化”)经过十余年的技术攻关^[19-21], 形成了不同油藏类型 CO_2 驱提高采收率技术体系, 在江苏、胜利、华东等油田开展多个矿场试验, 取得了明显的效果。目前, 中国石化 CO_2 驱油已实施项目覆盖地质储量 $2\,512 \times 10^4 \text{ t}$, 累计增油量 $25.58 \times 10^4 \text{ t}$, 其中胜利油田高 89-1 区块 CO_2 近混相驱先导试验, 截至 2021 年 8 月累计注 CO_2 $31 \times 10^4 \text{ t}$, 累计增油量 $8.6 \times 10^4 \text{ t}$, 预测可提高采收率 17.2 个百分点。近期宣布已建成齐鲁石化-胜利油田百万吨级 CCUS-EOR 项目^[22], 预计未来 15 年累计注入 CO_2 $1\,068 \times 10^4 \text{ t}$ 、增油 $296.5 \times 10^4 \text{ t}$ 。

近年来, 延长油田积极探索 CCUS-EOR 技术^[23], 在一体化技术攻关和全流程低成本商业化工程示范方面取得积极进展, 在靖边与吴起试验区建成年处理规模 $15 \times 10^4 \text{ t}$ 的 CCUS 示范项目, 累计注入 CO_2 $21.6 \times 10^4 \text{ t}$, 预计可提高采收率 8 个百分点以上, 并在“十四五”形成 $100 \times 10^4 \text{ t}$ 规模年注入 CO_2 能力。

2.2 中国 CCUS-EOR 全产业链面临的问题与挑战

高浓度 CO_2 排放装置和高含量 CO_2 气藏相对较少。高浓度 CO_2 排放装置主要来自化肥、加氢、煤化工等^[4], 一般浓度大于 90%。目前国内石油化工企业(如大庆石化、吉林石化、齐鲁石化等)和大型煤化工企业(如中国神华煤制油化工有限公司等)的高浓度 CO_2 捕集技术较为成熟, 捕集成本一般低于 200 元/t。吉林油田利用物理分离方法对高 CO_2 含量天然气藏进行碳捕集, 技术成熟, 捕集成本低于 120 元/t。

低浓度碳源捕集成本高, 制约了经济、规模化应用。中低浓度 CO_2 主要来自煤电、水泥、钢铁、建材、炼化等工业装置排放, 占总排放量的 90% 以上, 绝大部分 CO_2 排放浓度低于 15%。这些装置排放量大且排放点多, 规模化捕集难度较大、成本高(300~700 元/t)^[24-25], 成为规模捕集利用的瓶颈。燃煤发电碳捕集技术主要

包括煤炭燃烧前捕集、富氧燃烧捕集、燃烧后捕集, 其中, 燃烧后捕集技术发展相对成熟, 中国华能集团有限公司、国家能源集团在该领域处于领跑地位, 已建成数套 $10 \times 10^4 \text{ t}$ 级捕集装置。炼化等企业已开展了中低浓度 CO_2 的捕集研究和试验, 但因技术、经济原因, 捕集利用受限。目前大庆石化、吉林石化正在开展 $100 \times 10^4 \text{ t}$ 低浓度、低成本(低于 220 元/t) CO_2 捕集技术攻关和工业装置建设。

CO_2 运输以车载方式为主, 规模小、运费高。目前开展的 CCUS-EOR 项目中多数采用车载方式运送, 成本较高, 一般为 0.8~1.0 元/(t·km)。吉林油田已建成 CO_2 气相输送管道 50 km, 年输送能力达到 $50 \times 10^4 \text{ t}$ 。目前国内还没有长距离超临界 CO_2 管道输送示范项目。

CCUS-EOR 项目有待进一步提高效率。目前 CO_2 驱油提高采收率幅度为 10~25 个百分点, CO_2 封存率约 60%~70%。在目前技术条件下, 驱油生命周期结束时, 地下仍剩余 50% 以上的原油地质储量, 更大幅度提高采收率和 CO_2 封存率, 具有重要的意义和实际价值, 但也面临更大的技术与经济方面的挑战。

大规模碳封存长期监测、安全防控缺乏实际经验。通过 973 计划、863 计划、国家科技重大专项研究^[13-17], 明确了不同注入方式、不同地质体 CO_2 封存机理及主控因素, 确定了油藏地质体 CO_2 “体积置换、溶解滞留、矿化反应”等封存机理的贡献程度与表征方法, 建立了天然气藏、咸水层、煤层气藏等地质体 CO_2 安全封存的潜力评价方法, 形成了 CO_2 浓度、土壤碳通量、稳定同位素等相结合的一体化方法监测 CO_2 泄漏的封存安全监测技术体系。研究认为 CO_2 封存过程的泄漏风险点主要是在井筒、断层、盖层等: 井筒受到 CO_2 大面积腐蚀后发生泄漏, 应特别关注实施防腐工艺, 如管材防腐或缓蚀剂防腐等; 断层、盖层等的密封性欠缺也会发生泄漏。目前已开展的矿场试验项目未发现 CO_2 泄漏, 但碳安全封存是一项长期的工程, 现场实施 CO_2 驱油与封存项目周期约 10~20 年, 大规模长期监测经验不足, 长效安全防控仍面临挑战。

3 中国 CCUS-EOR 驱油封存潜力评估

3.1 CCUS-EOR 增产原油和封存减排 CO_2 潜力巨大

CO_2 驱是有效补充油藏地层能量, 提高原油采收率的主要技术之一。目前世界上大型碳捕集项目捕集的 CO_2 超过 70% 用于油藏提高采收率, 特别是用于低

渗透油藏提高采收率。据中国石油勘探开发研究院 2020 年评价结果, 中国石油国内油田已动用储量中, 适宜 CO_2 驱提高采收率的低渗透油藏地质储量为 $67.3 \times 10^8 \text{ t}$, 预计平均提高采收率 16.5 个百分点、新增可采储量 $11.1 \times 10^8 \text{ t}$, 在驱油阶段可有效埋存二氧化碳 $29.5 \times 10^8 \text{ t}$ 。

根据国家 973 计划对中国主要油气盆地区域内主力油气藏 CO_2 地质埋存潜力的初步评价结果, 油藏的 CO_2 驱油埋存潜力超过 $140 \times 10^8 \text{ t}$, 其中松辽、鄂尔多斯、渤海湾、准噶尔等盆地的主力油区 CO_2 埋存潜力大, 是实施 CCUS-EOR 的重点地区; 中国主要盆地深部咸水层的 CO_2 理论埋存潜力更大, 达 $6 \times 10^{12} \text{ t}$ 以上。

3.2 CCUS-EOR 产业发展经济社会效益潜力巨大

CCUS-EOR 产业发展具有良好的经济效益。参考美国 45Q 法案, 按照国际油价 50 美元/bbl ($1 \text{ bbl} = 0.159 \text{ m}^3$)、2026 年 CO_2 驱油埋存用 35 美元/t 抵免税额估算, 中国已动用油藏增加原油可采储量、有效埋存 CO_2 的潜在产值可达 1.0×10^{12} 元以上。打造形成 CCUS-EOR 产业链, 按照年注入 $3\,000 \times 10^4 \text{ t}$ CO_2 计算, 每年可形成 $1\,000 \times 10^4 \text{ t}$ 产油能力, 创产值 250×10^8 元, 每年可埋存 CO_2 $2\,000 \times 10^4 \text{ t}$, 获碳利用抵免税费 48×10^8 元。如果国际油价高于 50 美元/bbl, CO_2 井口价格低于 200 元/t, 在国家有利政策支持下, CCUS-EOR 项目就有望大规模有效应用。

CCUS-EOR 产业发展可以创造可观的社会效益。如年埋存 CO_2 $3\,000 \times 10^4 \text{ t}$, 就可以消纳十余家大型炼化企业的碳排放量。CCUS-EOR 产业发展可以为能源结构稳步调整争取宝贵时间, 按照 2060 年实现碳中和目标计算, 当前高碳排放基础设施的使用期限已不足 40 年, 通过 CCUS-EOR 产业解决煤电、水泥和钢铁等行业的一部分 CO_2 排放问题, 可以避免新投建的基础设施提前关停和投资浪费的局面, 提升碳中和过程中的成本效益^[26]。此外, 推动 CCUS-EOR 新产业规模化发展, 还可以为社会提供大量就业机会。

4 中国 CCUS-EOR 产业前景展望

参照国外 CCUS-EOR 产业发展经验, 结合中国进展情况, 在“双碳”目标有利政策推动下, 国内 CCUS-EOR 新产业将进入快速规模化发展阶段。预期 2030 年中国 CCUS-EOR 产业年注入 CO_2 规模将达 $3\,000 \times 10^4 \text{ t}$ 级, 年增油规模将达 $1\,000 \times 10^4 \text{ t}$ 级; 2050 年驱油埋存和咸水层埋存协同发展, 年注入 CO_2 规模将达 $1.0 \times 10^8 \text{ t}$ 级, CCUS-EOR 新产业发展前景十分广

阔。目前中国 CCUS-EOR 正处于矿场试验向产业化发展的关键时期, 需要针对中国陆相油藏的特点, 充分发挥油田 CO_2 驱油可驱储量丰富、地下埋存空间巨大、地面基础设施完善和井筒注入通道分布广泛等优势, 积极与碳源排放企业合作, 构建 CCUS-EOR 全产业链理论技术标准体系, 支撑和推动工业化规模应用, 以创新链引领新兴 CCUS-EOR 产业链快速效益发展。

4.1 构建更高效 CCUS-EOR 全产业链原创技术体系

经过几十年发展, 中国陆相油田开发总体达到国际先进水平, 其中精细油藏描述、精细水驱及提高采收率等多项技术居国际领先水平。与国外海相油藏相比, 中国油藏以陆相为主, 储集层非均质性强、储量规模小, CO_2 规模化驱油埋存更为复杂, 难度更大。构建陆相油藏更高效的 CCUS-EOR 原创技术体系, 需要 CO_2 捕集技术由高浓度向中低浓度、低成本高效捕集发展, 重点研发高效、低能耗的化学吸收剂, 开发新型高效的解吸反应器与大型设备, 实现大规模、廉价、稳定的 CO_2 捕集和气源供给。储运技术由车载运输向超临界 CO_2 长距离管输发展, 研发低成本耐蚀抗裂特种钢管材, 实现 CO_2 长距离低成本安全输送。驱油技术向大规模、更大幅度提高采收率发展, 创新研发大规模 CCUS-EOR 油藏方案设计、进一步扩大波及体积、高效注采与低成本防腐等的配套开发系统, 特别是在改善 CO_2 与原油的混相能力、大孔隙体积倍数 CO_2 注入驱油、多级调驱扩大 CO_2 波及体积、分层 CO_2 注入工艺、抗 CO_2 腐蚀高效涂层材料、产出气低成本循环利用、驱埋一体数值模拟等方面加大攻关力度, 形成混相、近混相、非混相高效驱油技术系列。埋存技术向 CO_2 埋存地质体长期规模完整性发展, 通过升级埋存方案设计、细化地质和井筒完整性评价、实施多位一体监测、提升安全防控技术, 实现大规模超长期安全埋存。

4.2 贯通 CCUS-EOR 新兴产业链实现规模化发展

实现 CCUS-EOR 产业化, 需要尽快制订中长期发展规划, 从全产业链布局实现全产业链贯通, 其核心是大规模示范应用工程落地运行。“十四五”期间, 期望建成 $100 \times 10^4 \text{ t/a}$ 级低浓度 CO_2 的低成本高效捕集工程, 捕集成本降至 220 元/t 以下, 同时布局更多的碳排放企业碳捕集工程, 逐步形成超过 $1\,000 \times 10^4 \text{ t}$ 级的廉价、稳定 CO_2 供给气源。根据源汇匹配情况, 布局 CO_2 长输管网建设, 建成 100 km 达 $100 \times 10^4 \text{ t/a}$ 输送能力的超临界 CO_2 长距离输送管道, 且运输成本低于 0.25 元/($\text{t} \cdot \text{km}$)。建成产油 $100 \times 10^4 \text{ t/a}$ 的规模化高效驱油示

范区,力争混相驱提高采收率30个百分点,并不断扩大应用规模,大幅增加原油产量。实现安全埋存 CO_2 超过 $1\,000\times 10^4\text{ t/a}$,埋存率大于70%,持续扩大埋存规模,为“双碳”目标实现做出积极贡献。

4.3 推进CCUS-EOR全产业链相关企业的协同发展

要加强油气田企业和炼化、煤电、煤化工等碳排放企业的合作,形成优势互补的CCUS-EOR产业创新联合体。同时加强气藏开发利用(CCUS-EGR)、化工利用、生物利用以及CCS等减碳技术的攻关,带动规模化应用,为实现“双碳”目标提供强有力的技术保障。

国家层面已推出碳交易平台,对推动CCUS项目实施起到积极作用,建议国家进一步出台关于碳权确认方法、合理排放指标、减排补贴标准、减排综合收益等方面明确可行的量化计算方法和支持政策(参照美国的45Q法案),提高企业规模化实施CCUS的积极性和主动性。

5 结语

CCUS-EOR作为大幅度提高石油采收率和最现实可行的碳减排技术,是推动中国化石能源企业平稳、绿色、低碳发展的重要途径,对保障国家能源安全、实现“双碳”目标具有重大意义,加快产业化发展势在必行。中国CCUS-EOR技术攻关和示范工程取得了突破性进展,基本形成了适应中国陆相油田的驱油埋存技术标准体系,整体处于矿场试验向工业化试验和规模应用发展阶段。目前仍面临 CO_2 气源捕集/运输成本较高、采收率和埋存率相对较低、大规模埋存监测与安全防护实际经验缺乏等挑战,需要加快技术攻关和工程示范,支撑规模效益应用。

中国发展CCUS-EOR产业的 CO_2 捕集、驱油与埋存潜力巨大,松辽、渤海湾、鄂尔多斯、准噶尔等盆地是当前CCUS-EOR产业发展的主战场,油田企业是CCUS-EOR产业的主力军。推动捕集、运输、驱油与埋存全产业链技术进步、快速效益发展,支撑化石能源企业低碳发展,具有巨大的经济社会效益和广阔的发展前景。

目前CCUS-EOR产业处于规模化、高质量和有效益发展的机遇期,需要抓住时机,大力推进。建议国家和相关企业制订中长期发展规划和有利政策,构建陆相油藏高效CCUS-EOR原创技术体系,打造全流程贯通的新兴产业链,实现全产业链规模效益快速发展;同时注重发挥油气田企业优势,与碳排放企业合作发

展,带动和推进其他应用领域CCUS和CCS产业发展,在国家政策支持下,强力助推“双碳”目标的实现。

参考文献:

- [1] IEA. Energy technology perspectives 2020[R]. Paris: IEA, 2020.
- [2] 生态环境部环境规划院,中国科学院武汉岩土力学研究所,中国21世纪议程管理中心. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021): 中国CCUS路径研究[R]. 北京: 生态环境部环境规划院, 2021: 6-8.
Chinese Academy of Environmental Planning, Chinese Academy of Sciences. Institute of Rock and Soil Mechanics, the Administrative Center for China's Agenda 21. Annual report on Chinese carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS): Chinese CCUS pathway study[R]. Beijing: Chinese Academy of Environmental Planning, 2021: 6-8.
- [3] 全球碳捕集与封存研究院. 全球碳捕集与封存现状2020[R]. 墨尔本: 全球碳捕集与封存研究院, 2020: 16-23.
Global CCS Institute. Global status of CCS report 2020[R]. Melbourne: Global CCS Institute, 2020: 16-23.
- [4] 戴厚良, 苏义脑, 刘吉臻, 等. 碳中和目标下我国能源发展战略思考[J]. 石油科技论坛, 2022, 41(1): 1-8.
DAI Houliang, SU Yinao, LIU Jizhen, et al. Thinking of China's energy development strategy under carbon neutrality goal[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2022, 41(1): 1-8.
- [5] 胡永乐, 郝明强. CCUS产业发展特点及成本界限研究[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(3): 15-22.
HU Yongle, HAO Mingqiang. Development characteristics and cost analysis of CCUS in China[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(3): 15-22.
- [6] WALLACE M. The U.S. CO_2 enhanced oil recovery survey (EOY 2020)[R]. Arlington: Advanced Resources International, Inc., 2021.
- [7] Global CCS Institute. Global status of CCS report 2021[R]. Melbourne: Global CCS Institute, 2021: 34.
- [8] KALTEYER J. A case study of SACROC CO_2 flooding in marginal pay regions: Improving asset performance[R]. SPE 200460-MS, 2020.
- [9] MELZER L S. Carbon dioxide enhanced oil recovery (CO_2 EOR): Factors involved in adding carbon capture, utilization and storage (CCUS) to enhanced oil recovery[R]. Midland: Melzer Consulting, 2012.
- [10] EDWARDS R W J, CELIA M A. Infrastructure to enable deployment of carbon capture, utilization, and storage in the United States[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(38): E8815-E8824.
- [11] 袁士义, 王强. 中国油田开发主体技术新进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 657-668.
YUAN Shiyi, WANG Qiang. New progress and prospect of oilfields development technologies in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 657-668.
- [12] 袁士义, 王强, 李军诗, 等. 注气提高采收率技术进展及前景展望[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1623-1632.
YUAN Shiyi, WANG Qiang, LI Junshi, et al. Technology progress and prospects of enhanced oil recovery by gas injection[J]. Acta

- Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1623-1632.
- [13] 沈平平, 廖新维. 二氧化碳地质埋存与提高石油采收率技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 128-144.
SHEN Pingping, LIAO Xinwei. Technology of carbon dioxide stored in geological media and enhanced oil recovery[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 128-144.
- [14] 袁士义. 二氧化碳减排、储存和资源化利用的基础研究论文集[C]. 北京: 石油工业出版社, 2014: 319-332.
YUAN Shiyi. Fundamental research of emission reduction, storage and resource utilization of carbon dioxide[C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014: 319-332.
- [15] 袁士义. 注气提高油田采收率技术文集[C]. 北京: 石油工业出版社, 2016: 1-15.
YUAN Shiyi. Symposium of gas drive to improve oil recovery[C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016: 1-15.
- [16] 胡永乐, 郝明强, 陈国利. 注二氧化碳提高石油采收率技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018: 1-40.
HU Yongle, HAO Mingqiang, CHEN Guoli. Technology of enhanced oil recovery by carbon dioxide[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018: 1-40.
- [17] 胡永乐, 郝明强, 陈国利, 等. 中国 CO₂ 驱油与埋存技术及实践[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(4): 716-727.
HU Yongle, HAO Mingqiang, CHEN Guoli, et al. Technologies and practice of CO₂ flooding and sequestration in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4): 716-727.
- [18] 廖广志, 马德胜, 王正茂, 等. 油田开发重大试验实践与认识[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018: 414-464.
LIAO Guangzhi, MA Desheng, WANG Zhengmao, et al. Practice and theory of industrial & pilot test in oilfield development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018: 414-464.
- [19] 李阳, 黄文欢, 金勇, 等. 双碳愿景下中国石化不同油藏类型 CO₂ 驱提高采收率技术发展与应用[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(6): 793-804.
LI Yang, HUANG Wenhuan, JIN Yong, et al. Different reservoir types of CO₂ flooding in Sinopec EOR technology development and application under "dual carbon" vision[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(6): 793-804.
- [20] 苗军, 阳国军. 我国二氧化碳捕集和驱油发展现状及展望[J]. 当代石油石化, 2020, 28(12): 32-37.
MIAO Jun, YANG Guojun. Status and prospect of CO₂ capture and oil displacement in China[J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2020, 28(12): 32-37.
- [21] 张宗耀, 吕广忠, 王杰. 胜利油田 CCUS 技术及应用[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(6): 812-822.
ZHANG Zonglin, LYU Guangzhong, WANG Jie. CCUS and its application in Shengli Oilfield[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(6): 812-822.
- [22] 陈婉. 搭建碳循环模式 提升碳减排能力 中国石化开建我国首个百万吨级 CCUS 项目[J]. 环境经济, 2021(13): 58-59.
CHEN Wan. Building a carbon cycle model and improving the carbon emission reduction capacity: Sinopec started building China's first million-ton CCUS project[J]. Environmental Economy, 2021(13): 58-59.
- [23] 康宇龙, 白艳伟, 江绍静, 等. 延长石油碳捕集、利用与封存全流程技术特色与工程实践[J]. 应用化工, 2020, 49(7): 1768-1771, 1775.
KANG Yulong, BAI Yanwei, JIANG Shaojing, et al. Technical features and engineering practice of Yanchang full-chain carbon capture, utilization and storage project[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(7): 1768-1771, 1775.
- [24] 张贤, 李阳, 马乔, 等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 70-80.
ZHANG Xian, LI Yang, MA Qiao, et al. Development of carbon capture, utilization and storage technology in China[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 70-80.
- [25] 黄晶, 陈其针, 仲平, 等. 中国碳捕集利用与封存技术评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 38-78.
HUANG Jing, CHEN Qizhen, ZHONG Ping, et al. National assessment report on development of carbon capture utilization and storage technology in China[M]. Beijing: Science Press, 2021: 38-78.
- [26] 王双童, 杨希刚, 常金旺. 国内外煤电机组服役年限现状研究[J]. 热力发电, 2020, 49(9): 11-16.
WANG Shuangtong, YANG Xigang, CHANG Jinwang. Research on status of service life of coal-fired units at home and abroad[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(9): 11-16.
- 第一作者简介: 袁士义 (1956-), 男, 山东曹县人, 博士, 中国工程院院士, 主要从事油田开发方面的技术咨询与战略研究工作。地址: 北京市西城区六铺炕街 6 号, 中国石油咨询中心, 邮政编码: 100724. E-mail: yuansy@petrochina.com.cn
- 联系作者简介: 李军诗 (1977-), 男, 江苏赣榆人, 博士, 中国石油咨询中心高级工程师, 主要从事油气田开发方面的研究工作。地址: 北京市西城区六铺炕街 6 号, 中国石油咨询中心, 邮政编码: 100724. E-mail: lijunshi@petrochina.com.cn
- 收稿日期: 2021-12-28 修回日期: 2022-06-21
- (编辑 唐俊伟)