

文章编号:1009-9603(2020)01-0020-09

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2020.01.003

CCUS全球进展与中国对策建议

秦积舜¹,李永亮²,吴德彬³,翁慧²,王高峰¹

(1.提高石油采收率国家重点实验室(中国石油勘探开发研究院),北京 100083; 2.中国石油和化学工业联合会,北京 100723; 3.中国石油集团科技管理部,北京 100007)

摘要:碳捕集利用与封存(CCUS)是CO₂深度减排以应对气候变化的重要途径。近十余年,全球特别是中国CCUS技术和产业取得重要进展。基于多年来CCUS研究与实践经验,阐述了CCUS技术类型划分情况和中国CCUS发展部署,着重分析了全球重点地区驱油类CCUS(CCUS-EOR)技术发展历程和项目情况、不同CO₂驱替类型与特点及中国特色CCUS-EOR配套技术,系统分析了CCUS-EOR可持续发展的主要影响因素;在此基础上,对比了中美CO₂驱油技术发展条件,指出了中国CO₂驱油技术发展决策的难点,最后从发展基础、主要任务、优先区域、项目运作和政策法规等方面,提出了中国CCUS-EOR产业可持续发展的具体建议,为CCUS政策制定部门提供必要的决策参考。

关键词:碳捕集利用与封存;低渗透油藏;CO₂驱;可持续发展;对策建议

中图分类号:TE357.45

文献标识码:A

CCUS global progress and China's policy suggestions

QIN Jishun¹, LI Yongliang², WU Debin³, WENG Hui², WANG Gaofeng¹

(1.State Key Laboratory of EOR(PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development), Beijing City, 100083, China; 2.China Petroleum and Chemical Industry Federation, Beijing City, 100723, China; 3.Science and Technology Management Department of CNPC, Beijing City, 100007, China)

Abstract: The carbon capture, utilization and storage (CCUS) are important options to reduce CO₂ emissions in a deeper way in response to climate change. In the past decade, the important progress has been made in CCUS technology and industry, especially in China. Based on the research and practical experience of CCUS in recent years, the situation of CCUS technology types and CCUS development deployment in China are described. The development history and project situation of enhanced oil recovery CCUS (CCUS-EOR) technologies in key global regions, as well as different CO₂ displacement types and characteristics, and CCUS-EOR supporting technologies with Chinese characteristics are analyzed. The main influencing factors of CCUS-EOR sustainable development are analyzed systematically. On this basis, the development conditions of CO₂ flooding in China and the United States are compared, and the difficulties in promoting CO₂ flooding technology in China are pointed out. Finally, from the aspects of development basis, main tasks, priority areas, project operation, policies and regulations, etc., specific suggestions for the sustainable development of China's CCUS-EOR industry are put forward to provide necessary decision-making references for CCUS policy-making departments.

Key words: CCUS; low permeability reservoirs; CO₂ flooding; sustainable development; policy suggestions

诺贝尔奖获得者瑞典科学家斯凡特·阿伦尼斯(Svante Arrhenius)于1896年预言人类在工业化进程中大量排放CO₂将导致地球变暖。这一观点已为

全球多数专家学者接受。减排温室气体CO₂应对气候变化逐渐成为国际共识,中国亦将其作为实现煤炭等化石能源清洁利用的重要手段^[1-4]。

收稿日期:2019-10-25。

作者简介:秦积舜(1958—),男,山东济南人,教授,博导,从事油层物理及CCUS研究工作。E-mail:qinjsh@126.com。

基金项目:国家发改委CDM基金赠款项目“陕甘宁蒙地区CO₂捕集、驱油与埋存重大现场试验方案编制与百万吨级示范项目预可行性研究”(2014068),中国石油专项“长庆油田低渗透油藏CO₂驱油与埋存关键技术研究与应用”(2014E3606),中国石油科技专项“CCUS资源潜力评价和配套政策研究”(2017D-5009-03)。

碳封存是CO₂深度减排的重要途径。CO₂封存方式主要包括植被吸收、深部盐水层或油气藏地质埋存、深海溶解、材料合成或矿化等,不同方式的封存潜力、实施难度和社会经济效益差别很大。2006年4—5月间,在北京香山会议第276次、第279次学术讨论会上,与会专家首次提出碳捕集利用与封存(CCUS)的概念,并建议近期CO₂减排必须与利用紧密结合,主要利用途径是CO₂强化采油和资源化利用。建议得到高度重视,中国政府通过国家自然科学基金、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)、国家科技支撑计划和国家重点研发计划、国家科技专项等支持了CCUS领域的基础研究、技术研发和工程示范等^[5-7]。目前,全球变暖形势严峻,CCUS作为一项有望实现化石能源大规模低碳利用的新兴技术,是控制温室效应、实现人类社会可持续发展的重要技术选项。

经过多年国际交流与推介,CCUS概念已在全球范围内得到接受与使用。国际石油工程师协会(SPE)和油气行业气候倡议组织(OGCI)都成立或设置了专门的CCUS技术指导委员会或议题,中国也

成立了CCUS产业技术创新战略联盟。近十余年来,CCUS产业技术取得较大进步,新型技术不断涌现,技术种类不断增多。CCUS技术在减排的同时可以形成新业态,对促进CCUS可持续发展具有重大意义。十余年的实践证明,中国CCUS技术产业化的瓶颈是经济性,这与中国碳市场不成熟、气源供给体系不健全等原因有关^[8-9]。孙龙德院士在2016年第3届CCUS国际论坛上指出,CCUS技术发展要特别注重安全性和可持续性,可持续性主要取决于经济性。为此,笔者在回顾全球CCUS,特别是CO₂驱油与埋存技术沿革的基础上,分析中国CO₂驱油与埋存技术现状,系统阐述中国CCUS技术和管理发展方向,提出CCUS产业发展建议,以推动CCUS技术可持续发展。

1 CCUS技术概述

1.1 CCUS技术类型

近十余年来,CCUS技术的进步主要体现在从捕集到利用再到封存各个产业链条的新技术不断涌现,技术种类亦不断增多并日趋完善(图1)。业

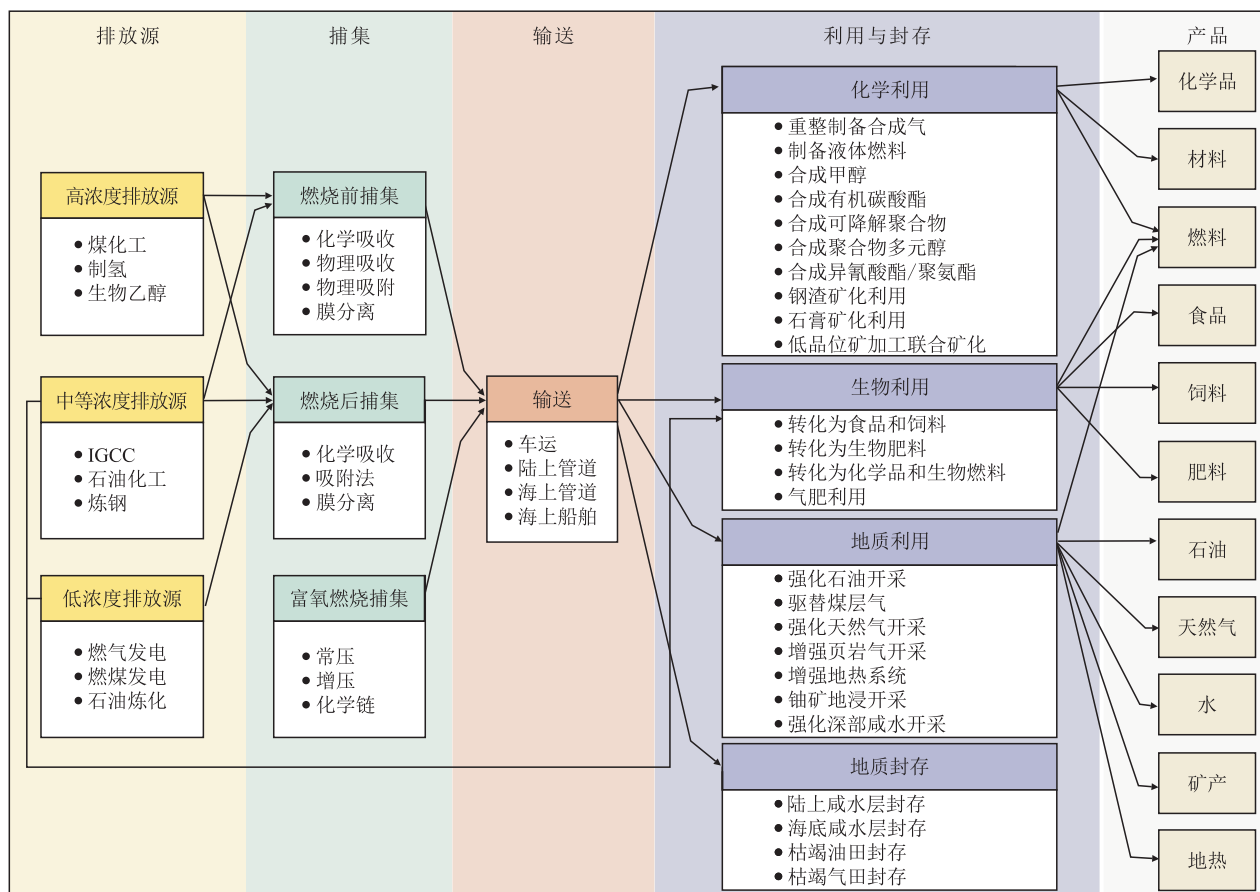


图1 CCUS技术流程及分类示意^[4]

Fig.1 CCUS technical process and classification diagram^[4]

已形成的CO₂捕集技术覆盖了主要的碳排放源类型,CO₂利用与封存技术在石油、化工、煤炭和电力等行业都有工程实践。丰富的CCUS技术选项为形成具有可观经济社会效益的新业态、促进CCUS可持续发展产生了重要和积极的影响。

1.2 中国CCUS发展部署

中国有序推进CCUS技术的研发与应用主要体现在3个方面^[4]:①明确了CCUS研发战略与发展方向。2011版CCUS技术路线图明确了CCUS的技术定位、发展目标和研发策略;《“十二五”国家CCUS科技发展专项规划》部署了CCUS技术研发与示范;“十三五”国家科技创新规划指明了CCUS技术进一步研发的方向。②加大了CCUS技术研发与示范的支持力度。通过国家“973”计划、“863”计划和科技支撑计划,围绕CO₂捕集、利用与地质封存等相关的基础研究、技术研发与示范进行了较系统的部署。正在实施的“十三五”期间国家重点研发计划以及准备部署启动的面向2030年的重大工程计划,也将CCUS技术研发与示范列为重要内容。③注重CCUS相关的能力建设和国际交流合作。成立了中国CCUS产业技术创新战略联盟,加强国内CCUS技术研发与示范平台建设,推动产学研合作;与国际能源署(IEA)、碳收集领导人论坛(CSLF)等国际组织开展了广泛合作,与欧盟、美国、澳大利亚、加拿大和意大利等国家和地区围绕CCUS开展了多层次的双边科技合作等。中国在示范运行的各类CCUS项目已超过20个,表1列出了若干代表性试验项目。

1.3 CCUS主要技术方向

世界范围内,注气驱油技术已成为产量规模居第一位的强化采油技术^[10];在气驱技术体系中,CO₂驱油技术因其可在驱油利用的同时实现碳封存,兼

具经济和环境效益而倍受工业界青睐。CO₂驱油技术在国外已有60多年的连续发展历史,技术成熟度与配套程度较高,凸显出规模有效碳封存效果^[11-15]。美国在利用CO₂驱油的同时已经封存CO₂约十亿吨。CO₂驱油技术因其封存规模大的特点,在各类CCUS技术中脱颖而出,尤其得到了能源界的重视。CO₂驱油成为CCUS的主要技术发展方向。

2 全球CCUS主要进展

2.1 欧美地区CO₂驱油技术沿革

美国历史文化和社会经济与欧洲高度融合,很多工业技术的发展与欧洲密不可分。同海上油田相比,陆上油田实施CO₂驱等提高采收率技术具有便利性,这是CO₂驱在美洲大陆而非北海油田获得重大发展的重要原因。

20世纪中叶,美国大西洋炼油公司(The Atlantic Refining Company)发现其制氢工艺过程的副产品CO₂可改善原油流动性,Whorton等于1952年获得了世界首个CO₂驱油专利。这是CO₂驱油技术较早的开端^[13-15]。

1958年,Shell公司率先在美国二叠系储层成功实施了CO₂驱油试验。

1972年Chevron公司的前身加利福尼亚标准石油公司在美国德克萨斯州Kelly-Snyder油田SA-CROC区块投产了世界首个CO₂驱油商业项目,初期平均提高单井产量约3倍。该项目的成功标志着CO₂驱油技术走向成熟。

1970—1990年间发生的3次石油危机使人们认识到石油安全对国家经济的重要作用。一些石油消费大国不断调整和更新能源政策和法规,激励强化采油(EOR)技术研发与相关基础设施建设,以降

表1 中国代表性CCUS试验项目
Table1 China's representative CCUS projects

序号	单位	项目名称
1	中国石油	吉林油田CO ₂ -EOR研究与示范
2	中国石油	大庆油田CO ₂ -EOR研究与示范
3	中国石油	长庆油田CO ₂ -EOR研究与示范
4	中国石化	胜利油田燃煤电厂CO ₂ 捕集与EOR示范
5	中国石化	中原油田炼油尾气CO ₂ 捕集与EOR项目
6	中联	中联煤层气公司CO ₂ -ECBM开采煤层气开采项目
7	华中科技大学	35 MW富氧燃烧技术研究与示范
8	国电	天津北塘热电厂CO ₂ 捕集试验项目
9	华能	华能石洞口电厂碳捕集系统
10	华能	华能绿色煤电IGCC电厂CO ₂ 捕集利用和封存示范
11	延长石油	延长石油陕北煤化工CO ₂ 捕集与EOR示范

低石油对外依存度。美国在1979年通过了石油超额利润税法,促进了CO₂驱等EOR技术的发展。1982—1984年间美国大规模开发了Mk Elmo Domo和Sheep Mountain等多个CO₂气田,建设了连接CO₂气田和油田的输气管线。这些工作为规模化实施CO₂驱油项目提供了CO₂气源保障。1986年美国CO₂驱油项目数达到40个。

2000年以来,原油价格持续攀升,给CO₂驱油技术发展带来利润空间,吸引了大量投资,新投建项目不断增加。据2014年数据^[16],美国已有超过130个CO₂驱油项目在实施,CO₂驱年产油量约为1600万吨(与中国各类三次采油技术年产油量总和相当),超过70%的碳源来自CO₂气藏。

2014年至今,国际油价持续低位徘徊,对相关技术推广带来不利影响,CO₂驱油项目数基本稳定。

加拿大CO₂驱油技术研究开始于20世纪90年代,最具代表性的是国际能源署温室气体封存监测项目资助的Weyburn项目。该项目年产油量约为150万吨,气源为煤化工碳排放;通过综合监测,查明地下运移规律,以建立CO₂地下长期安全封存技术和规范。

巴西有4个CO₂驱油项目,其中一个为深海超深层盐下油藏项目,特立尼达CO₂驱油项目数为5个^[16-17]。

俄罗斯(前苏联)CO₂驱油技术研发始于20世纪50年代并开展了成功的矿场试验,因其油气资源丰富且经济体量不大,对强化采油技术应用没有迫切需求,油田注气仅为小规模烃类气驱项目^[18]。

据Chevron石油公司学者Don Winslow对三次采油类项目的统计,北美地区CO₂驱提高采收率幅度为7%~18%,平均值为12.0%^[14]。

2.2 亚非地区CO₂驱发展历程

东南亚和日本与CO₂驱相关的研发和应用开始于20世纪90年代,至今仅有零星的几个注CO₂项目,但随着海上高含CO₂天然气藏的大规模开发,CO₂驱油技术料将快速发展。

中东和非洲油气资源丰富。2016年,ADNOC开始向Rumaiitha和Bab油田注气,2018年开始将钢厂捕集的80万吨CO₂注入陆上Habshan油田;阿尔及利亚仅有In Salah一个纯粹的CO₂地质封存项目;根据目前资料判断中东和北非两个地区CCUS-EOR技术的大规模商业化应用将于2025年前后获得突破^[19]。

中国国情和油藏条件的复杂性造就了CO₂驱油技术发展的不同历程。20世纪60年代,大庆油田开

始了注入CO₂提高采收率技术的早期探索;1990年前后,大庆油田和法国石油研究机构合作开展CO₂驱油技术研究和矿场试验,取得了一系列重要认识。2000年前后,江苏油田、吉林油田、大庆油田相继开展多个井组规模的试验,进一步探索或验证多种类型油藏CO₂驱提高采收率可行性,获得了一批重要成果。2005年前后,在应对气候变化政策的导向下,学术界和工业界根据国情,明确了中国碳减排要走CO₂资源化利用之路,形成了碳捕集利用与封存的概念。近十多年来,中国大型能源公司陆续设立了多个科技和产业项目,初步形成了有特色的CO₂驱油与埋存配套技术,建成了若干有代表性的CCUS-EOR示范工程。中国CO₂驱目标油藏类型主要为低渗透油藏,提高采收率幅度为3.0%~15%,平均约为7.4%。由于中国低渗透油藏大多属于陆相沉积,储层物性及流体条件较差,加之注气技术矿场试验与应用规模较小,气驱油藏经营管理的经验积累有待丰富,因此,CCUS技术还有较大的发展空间。

2.3 CCUS-EOR技术进展

2.3.1 CO₂驱替类型

驱替类型划分 按照混相程度不同,气驱类型分为混相驱、近混相驱和非混相驱三大类。根据美国能源部的资料,结合中国研究经验建议:若见气前的地层压力高于最小混相压力1.0 MPa以上,可定义为混相驱替;若见气前的地层压力比最小混相压力低1.0 MPa以内,可定义为近混相驱替;若见气前的地层压力低于最小混相压力1.0 MPa以上,可定义为非混相驱替;对于能够正常注水开发的油藏,若见气前的地层压力低于最小混相压力的75%,则不建议实施CO₂驱。

混相驱简况 理论研究与实践均表明,对于给定油藏,CO₂混相驱的采收率明显高于非混相驱,美国CO₂驱替类型主要为混相驱,混相驱项目数和EOR产量远大于非混相驱。以2014年数据为例,CO₂驱总项目数为139个,其中混相驱项目数达128个;CO₂驱年产油量为1371万吨,其中混相驱年产油量为1264万吨。CO₂混相驱项目成功率较高,2014年美国CO₂混相驱项目中获得成功的项目为104个,占比为81.2%。当然,美国CO₂驱油技术成功的商业应用与有利政策法规支持和2000年以来油价持续走高是密不可分的。

在中国,完成全生命周期的注气项目较少,矿场试验规模不大,气驱技术尚处于试验和完善阶段。诸如江苏草舍CO₂混相驱试验、吉林大情字井

地区CO₂混相驱试验、大庆海塔CO₂混相驱试验、中原濮城CO₂混相驱试验、吐哈葡北天然气混相驱试验和塔里木东河塘天然气混相驱试验已获得良好技术效果,大力发展混相驱有助于提高对注气提高采收率的信心,有助于气驱技术在中国的发展^[20]。

非混相驱简况 非混相驱与混相驱在工艺流程上无明显区别,在油藏管理和实施难度上也无过高要求。根据可能具备的现实条件选择油藏的合理开发方式是油田效益开发的基本要求。中国石化胜利油田高89、中国石化东北局腰英台油田BD33、中国石油大庆油田树101和树16、延长油田吴起和乔家洼等试验区的CO₂驱替类型都属于非混相驱,均取得了不同程度的增油效果。

据统计,全球实施的非混相CO₂驱油项目40个^[21],其中美国11个,加拿大1个,特立尼达5个,中国8个;全球非混相CO₂驱油项目提高采收率幅度为4.7%~12.5%,平均值为8.0%,平均换油率为3.95 tOil/tCO₂;中国的非混相CO₂驱油项目提高采收率幅度为3.0%~9.0%,平均约为5.5%。非混相CO₂驱油技术在不同埋深的轻质、中质和重油油藏中都有应用^[21-23]。

2.3.2 中国CCUS-EOR技术

国际上CO₂驱油技术是比较成熟的,从捕集到驱油利用的全流程都相对配套完善。中国在应用和发展CO₂驱油技术时学习和借鉴了欧美的成功经验,并考虑了国情和油藏特点。从功能的独立性考虑,中国发展和形成了多项CO₂捕集驱油与埋存关键技术^[5-7,24-31]:①包括燃煤电厂、天然气藏伴生、石化厂、煤化工等不同碳排放源的CO₂捕集技术。②包括气驱油藏流体相态分析、岩心驱替、岩矿反应等内容的CO₂驱开发实验分析技术。③以注入和采出等生产指标预测为核心的CO₂驱油藏工程设计技术。④涵盖CCUS资源潜力评价和油藏筛选的CO₂驱油与封存评价技术。⑤包括CCUS全过程相关材质在各种可能工况下的腐蚀规律及防腐对策为主的CO₂腐蚀评价技术。⑥以水气交替注入工艺、多相流体举升工艺为主的CO₂驱注采工艺技术。⑦包括CO₂管道输送和压注、产出流体集输处理和循环注入的CO₂驱地面工程设计与建设技术。⑧以气驱生产调整为主要目的的气驱油藏生产动态监测评价技术。⑨“空天-近地表-油气井-地质体-受体”一体化安全监测与预警的CO₂驱安全防控技术。⑩涵盖CCUS经济性潜力评价和CO₂驱油项目经济可行性评价的CO₂驱油技术经济评价技术。

上述涵盖捕集、选址、容量评估、注入、监测和

模拟等在内的关键技术,为全流程CCUS工程示范提供了重要的技术支撑,并在实践过程中逐步完善和成熟^[6]。

中国在CCUS-EOR技术研发与实践已开始展现自己的特色与优势。在驱油理论方面,扩展了CO₂与原油的易混相组分认识^[7],为提高混相程度和改善非混相驱效果提供了理论依据;在油藏工程设计方面,建立了成套的CO₂驱油全生产指标预测油藏工程方法,为注气参数设计和生产调整提供了不同于气驱数值模拟技术的新途径^[31-32];在长期埋存过程的仿真计算方面,基于储层岩石矿物与CO₂的反应实验结果,建立了考虑酸岩反应的数值模拟技术^[33];在地面工程和注采工程方面,形成了适合中国CO₂驱油藏埋深较大且单井产量较低的实际情况的注采工艺技术^[6,8,29];在系统防腐方面,建立了全尺寸的腐蚀检测中试平台,满足了注采与地面系统安全运行的装备测试需求^[6]。

2.4 CCUS技术可持续发展影响因素

北美地区在CO₂驱油技术方面有着长时间的现场实践和积累,在20世纪80年代就已经进入商业化应用阶段。与之相适应的还有廉价充足的气源、网络化输气管道、配套财税政策等有利于CO₂驱油与封存技术工业化推广的条件。总结中国近十余年的研究与实践,从国际视角分析全球注气技术发展轨迹可以看出,CO₂驱油与封存技术及其产业发展的可持续性主要取决于经济性,而政策环境、气源保障、国际油价、油藏条件、税收因素和油藏管理等因素对CO₂驱油与封存项目成败与效益也有不同程度的影响。

近十余年的CO₂驱油与封存实践表明,中国碳市场不成熟、气源供给体系不健全、CO₂换油率(吨油耗气量)高以及采收率较低等实际情况均不同程度影响着CCUS项目的经济性^[8],进而影响到CCUS技术在中国的可持续发展。以大情字井地区50万吨工业化推广项目为例,其具有经济性的前提条件是油价在90美元/bbl以上,提高采收率幅度不低于10%,气源充足稳定供应。如果这三个条件中有一个满足不了,项目的经济性、规模效益和该地区CCUS业务的可持续就会受到影响。

中国陆相沉积低渗透油藏非均质性较强,天然裂缝和人工裂缝交织,埋深较大,原油黏度较大,对CO₂驱油与封存项目的成败和效益带来挑战。若不采取数值模拟技术和气驱油藏工程方法综合论证这类油藏的气驱产量等关键生产指标^[32],恐难提高开发方案中技术经济评价结果的科学合理性。

2014年以来,国际油价持续下行并低位震荡徘徊,给全球CCUS活动带来了不小的影响。国际上CO₂驱油项目数自从2014年以后没有明显增加。在中国,能源公司自主开展的CO₂驱油与封存项目数也没有显著增加。在国际油价走势不够明朗的情况下,协调气源,强制源汇匹配的动力不足。

在气源方面,中国尚未形成针对CO₂驱油与封存技术应用的、价格相对合理且稳定供给的CO₂气源市场。以大情字井地区工业化推广项目为例,在没有外部供给市场保障的情况下,自筹的相对低成本天然气伴生CO₂产量不足以支撑CO₂驱50万吨生产能力的需要。在美国,已经形成了天然CO₂气藏为主体的气源稳定供给体系,解决了气源问题。

当前中国CO₂驱油技术整体处于工业化试验阶段,还存在若干需要解决或完善的技术问题^[22],例如:如何进一步降低CO₂驱单位产能投资,如何提高CO₂驱油藏的管理水平特别是延迟气窜和避免“应混未混”现象的出现以及持续改善注气效果等。这些问题对于CO₂驱油技术在石油企业的可持续应用也有一定影响。

全流程项目运营和商业模式尚不明确。除了前期投资大、运行成本高、经济风险高之外,大型全流程CCUS项目还往往具有跨行业、跨地域和跨部门特点,涉及“国家-地方-企业”关系。寻找恰当的商业模式和项目运营模式,能够在利益相关方之间合理配置资源,使项目效益最大化,促进CCUS技术可持续发展。然而,中国在这方面并没有成功的实践和成熟的经验。

只有油藏条件、气源保障、国际油价、油藏管理、商业模式等重要条件都基本具备了,辅以国家层面支持和财税政策导向,CO₂驱油技术才能成长为中国低渗透油藏开发的主体接替技术,CCUS在能源企业才能落地生根,开花结果,长期发展下去。

2.5 中美CO₂驱油技术发展条件对比

2.5.1 危机感和政策导向助推北美气驱大发展

通过本国原油快速增产应对石油危机。世界第一次石油危机使美国工业生产下降14%。加大国内勘探开发力度,推广气驱等强化采油技术快速增产成为美国降低石油对外依存度的重要举措。

通过政策法规导向激活美国国内石油市场。美国立法机构通过能源安全应急法案,放松油价管控,出台有利的税收和市场准入政策,吸引各类企业增加投资,全面激活其国内油气勘探生产市场,包括建成了CO₂长输管道。

美国适合CCUS-EOR的资源条件优越。美国

在低渗透油藏、高渗透油藏、过渡带油藏都有商业成功的CO₂驱油项目,证实了适合CO₂驱的油藏资源是庞大的;美国能源部2006年发布的报告显示,适合CO₂驱地质储量超过120亿吨。美国巨型气藏通过管网输送70%以上驱油用气,建立了多元化的CO₂气源供给体系,彻底解决了气源问题。美国每过5~6 a进行一次油气资源评价,为CCUS源汇匹配和输气管网等基础设施规划建设提供了重要依据,推动了美国CO₂驱油技术的持续发展与应用。

2.5.2 中国CO₂驱油与封存技术推广存在瓶颈

第一,气源供给问题突出。中国主要石油公司内部可用碳源规模小而分散,企业外部碳源市场尚未形成,价格高且不可控,保供压力大。

第二,油田与碳源之间缺少匹配桥梁(输送管网),导致大量高浓度CO₂气源不能转化为驱油资源输送到油田,也导致石油企业难以启动大型CO₂驱油与封存项目。CO₂输送管网建设与运营既涉及跨行业的上下游企业,也涉及地企关系,难以一蹴而就。

第三,CO₂驱油技术效果还不够明朗。中国低渗透油藏单井产量较低,注气后产量增幅达50%~100%,绝对增量仍然较低,是否还有大幅度提高产量途径,须进一步探索。中国完成全生命周期的注气项目甚少,注气效果未能完整展现和评估,在一定程度上影响投资决策。

第四,低油价不利CO₂驱油与封存技术推广。CO₂驱油与封存项目具有高技术、资金密集的特点,项目前期资金需求量大,投资回收期偏长,低油价下推动CCUS-EOR技术推广应用的难度增大。

此外,中国正在运行的CO₂驱油与封存项目多数是由示范项目延续而来,普遍存在规模偏小、各类资源匹配难度大、边建设边实践边积累边提高的状况。

3 中国CCUS产业发展政策建议

CO₂驱油与封存技术处于工业试验阶段 CO₂驱油技术是极具优势和潜力的低渗透油藏提高采收率技术。目前中国CO₂驱油与封存项目累积实施近300个井组,涵盖了多种油藏和气源类型,CO₂驱油与封存技术在中国已处于工业性试验阶段,个别示范项目取得了良好的国际影响。

CO₂驱油与封存技术推广只欠东风 发展CO₂驱油技术是提高低渗透油藏采收率的现实需要又契合国家低碳发展战略。从机理上,CO₂驱具有增

产石油和碳减排的双重功能。评价认为,中国混相条件较好的技术可行CO₂驱潜力约为70亿吨,CO₂驱年产油量有望达千万吨规模,相应的年减排CO₂量有望超过3 000万吨,潜力很大^[30-31]。从CO₂驱油技术准备、CO₂驱资源潜力和中外碳减排形势判断,CO₂驱在中国基本具备大规模推广的现实条件^[30]。加强气源工作、推动规模试验、采用低成本CO₂驱油工艺和提升气驱油藏经营管理水平,以及积极争取国家政策支持是中国加快推进CO₂驱油技术工业化的重要任务^[29]。

优选重点区域大力推动百万吨级CCUS项目鄂尔多斯盆地是中国最大的油气生产基地,油田周边存在亿吨级煤化工碳排放源,有开展大规模CCUS项目的源汇匹配有利条件;鄂尔多斯盆地地质情况相对简单,地震活动弱,有开展大规模CCUS项目的稳定地质构造等有利条件。鄂尔多斯盆地所属陕甘宁蒙等省区的社会与民族关系和谐。中美气候变化联合声明中,中国政府选定在鄂尔多斯盆地陕西境内进行CCUS规模化示范是有科学依据的^[23]。

加快推进鄂尔多斯地区百万吨项目的具体建议在陕西省建设百万吨级的碳捕集封存项目不仅仅是展现中国应对气候变化的实际行动,还是能源公司探索可持续发展途径的主动行为,具有战略创新和示范意义。近年来,国际油价在60美元/bbl左右徘徊,中外多家研究机构预测,油价将长期在此价位震荡运行。在此油价背景下,实施百万吨规模CO₂驱油与封存项目建设不仅是技术和投资的问题,还存在跨行业资源配置问题。因此,国家和地方参与协调和政策支持是及其重要的。

根据“陕甘宁蒙地区CO₂捕集、驱油与埋存重大现场试验方案编制与百万吨级示范项目”概念设计和预可行性研究成果^[21],在鄂尔多斯地区百万吨级CO₂注入项目投资总额超过50亿元(人民币),可建成百万吨原油生产能力。为此,需要建设具有年输送CO₂能力400万吨的300公里长距离超临界输气管道,评价期内累积注入CO₂量达2 273万吨,评价期末CO₂封存率约为80%。

根据该项目的经济评估数据提出,在现行法律法规和能源行业财税政策体系的基础上,将管道工程作为应对气候变化基础设施对待,由国家出资(或吸引能源行业外资金)建设长输管道工程(占项目投资比例约20%);项目建设方筹措无息(或低息)贷款(占项目投资比例约40%);陕甘宁蒙相关省区地方政府实施碳封存补贴试点等。通过上述

政策性措施,鼓励相关能源企业在低油价下(油价低于65美元/bbl)建设实施该规模化CO₂驱油与封存项目,并获得经济效益(项目收益将由国家、地方,以及参与企业共享),打通规模化CO₂驱油与封存项目的可持续性发展的途径。

建设和实施大规模的CCUS项目可带来客观的就业机会,拉动CCUS相关技术与装备制造业的发展,推动地方经济转型并带动区域内碳减排和经济发展的有效融合。此外,还能带动学科交叉和产业人才的培养。CCUS技术可以大幅度减少严重缺水省份油田开发对注水量的需求,还可以提高10%左右的原油采收率,既减少了碳排放还创造了新经济增长点。因此,实施百万吨级项目是陕甘宁蒙等省区绿色发展的一个机遇。

CCUS产业化的法律法规需求 完善应对气候变化相关法规。根据需要进一步修改完善能源、节能、可再生能源、循环经济、环保等相关领域法律法规,发挥相关法律法规对推动CCUS应对气候变化工作的促进作用,保持各领域政策与行动的一致性,形成协同效应。

中国发展CCUS的政策法规需求主要包括八个方面的内容^[31]:形成CCUS相关国家标准体系、建立碳排放权交易制度、建立碳排放认证核查制度、完善碳减排财税和价格政策、完善碳减排投融资政策、丰富碳排放源头综合控制手段、健全CCUS立项行政审批制度、规范大型CCUS项目商业模式。

4 结论

CO₂驱既是大幅度提高低渗透油藏采收率的有效手段,也是碳排放企业规模碳减排工作重要抓手。大力发展CO₂驱油和封存技术是中国低渗透油藏开发业务可持续发展的需要,是有效减少未来碳税缴纳规模的重要途径,对推动国家绿色低碳发展有示范意义。

中国能源企业应把握全国碳排放权交易市场建设和碳税征收准备战略机遇期,通盘筹谋并加快CO₂驱油技术工业化应用进程,为国家绿色低碳发展做出贡献。

致谢:成文过程中,得到了中国石油集团咨询中心袁士义院士、李海平教授、罗治斌教授和中国石油和化学工业联合会李润生教授的指导和帮助。在此表示衷心感谢!

参考文献

[1] 国家发展和改革委员会. 国家应对气候变化规划(2014-2020

- 年)[R].北京:国家发展和改革委员会应对气候变化司,2014.
National Development and Reform Commission.National response to climate change planning (2014–2020) [R]. Beijing: Climate Change Response Division of National Development and Reform Commission, 2014.
- [2] 中华人民共和国科学技术部.“十二五”国家碳捕集利用与封存科技发展专项规划[R].北京:中华人民共和国科学技术部, 2013.
Ministry of Science and Technology of the People’s Republic of China.Special program for the development of science and technology for carbon capture, utilization and storage in the 12th Five-Year Plan [R]. Beijing: Ministry of Science and Technology of the People’s Republic of China, 2013.
- [3] 国家科技部社会发展司,国家科技部中国21世纪议程管理中心.中国碳捕集、利用与封存(CCUS)技术路线图[R].国家科技部,2013.
Department of Social Development, Ministry of Science and Technology of China, China Agenda Management Center in 21st Century, Ministry of Science and Technology of China. China carbon capture, utilization and storage (CCUS) technology roadmap [R]. Ministry of Science and Technology of the State, 2013.
- [4] 国家科技部中国21世纪议程管理中心.中国CCUS发展路线图[C].北京:第五届CCUS国际论坛,2019.
China Agenda Management Center in 21st Century, Ministry of Science and Technology of China. China CCUS Development Roadmap [C]. Beijing: The fifth CCUS International Forum, 2019.
- [5] 秦积舜.CCUS十周年[R].北京:第三届CCUS国际论坛,2016.
QIN Jishun.CCUS 10th anniversary [R]. Beijing: The third CCUS International Forum, 2016.
- [6] 李阳.中国CCUS技术与产业发展状况[C].北京:2018碳捕集利用与封存技术论坛,2018.
LI Yang. CCUS technology and industry development in China [C]. Beijing: CCUS Technology Forum in 2018, 2018.
- [7] 秦积舜.CO₂驱油与埋存技术攻关试验进展及下步工作建议[R].北京:中国石油勘探开发研究院,2015.
QIN Jishun. Progress and suggestions on technologies of CO₂ flooding and storage [R]. Beijing: PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, 2015.
- [8] 王高峰,郑雄杰,张玉,等.适合二氧化碳驱的低渗透油藏筛选方法[J].石油勘探与开发,2015,42(3):358–363.
WANG Gaofeng, ZHENG Xiongjie, ZHANG Yu, et al. A new screening method of low permeability reservoirs suitable for CO₂ flooding [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42 (3): 358–363.
- [9] 袁少民.特低渗透油藏CO₂驱油调整技术界限[J].大庆石油地质与开发,2019,38(4):117–123.
YUAN Shaomin. Technical limits for the adjustment of the CO₂ flooding in ultra-low permeability oil reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(4): 117–123.
- [10] 李士伦,孙雷,郭平,等.再论我国发展注气提高采收率技术[J].天然气工业,2006,26(12):30–34.
LI Shilun, SUN Lei, GUO Ping, et al. Re-discussion of EOR with gas injection in China [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26 (12) : 30–34.
- [11] 李阳,杨勇.老油田绿色低碳低成本开发探索与实践[J].油气地质与采收率,2019,26(2):1–6.
LI Yang, YANG Yong. Exploration and practice of green low-cost development in old oilfields [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(2): 1–6.
- [12] 李士伦,汤勇,侯承希.注CO₂提高采收率技术现状及发展趋势[J].油气藏评价与开发,2019,9(3):1–8.
LI Shilun, TANG Yong, HOU Chengxi. Present situation and development trend of CO₂ injection enhanced oil recovery technology [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(3): 1–8.
- [13] 张蕾.CO₂-EOR技术在美国的应用[J].大庆石油地质与开发,2011,30(6):153–158.
ZHANG Lei. Application of CO₂-EOR technique in America [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2011, 30 (6): 153–158.
- [14] DON Winslow. Industry experience with CO₂ for enhanced oil recovery [R]. Chevron: Workshop on California Opportunities for CCUS/EOR, 2012.
- [15] 秦积舜,韩海水,刘晓蕾.美国CO₂驱油技术应用及启示[J].石油勘探与开发,2015,42(2):209–216.
QIN Jishun, HAN Haishui, LIU Xiaolei. Application and enlightenment of carbon dioxide flooding in the United States of America [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42 (2) : 209–216.
- [16] LEENA Koottungal. 2014 worldwide EOR survey [J]. Oil & Gas Journal, 2014, 112(4): 79–91.
- [17] 周蒂,李鹏春,张翠梅.离岸二氧化碳驱油的国际进展及我国近海潜力初步分析[J].南方能源建设,2015,2(3):1–9.
ZHOU Di, LI Pengchun, ZHANG Cuimei. Offshore CO₂-EOR: Worldwide progress and a preliminary analysis on its potential in offshore sedimentary Basins off China [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 1–9.
- [18] 孙瑞峰.俄罗斯油田注气法应用及分类[J].国外油田工程,2010,26(8):1–4.
SUN Ruifeng. Application and classification of gas injection method in Russia Oilfield [J]. Foreign Oil Field Engineering, 2010, 26 (8) : 1–4.
- [19] MESHAL Algharaib. Application potential of carbon dioxide flooding for improving oil recovery in Middle-East region [J]. Journal of World Petroleum Industry, 2010, 26(8): 59–63.
- [20] 王高峰,姚杰,王浩,等.低渗透油藏混气驱生产气油比预测[J].油气藏评价与开发,2019,9(3):14–18,24.
WANG Gaofeng, YAO Jie, WANG Hao, et al. Prediction of produced GOR of miscible gas flooding in low permeable reservoirs [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(3): 14–18, 24.
- [21] 李承龙.特低渗透油藏二氧化碳驱气窜影响因素及规律[J].特种油气藏,2018,25(3):82–86.
LI Chenglong. Gas channeling influencing factors and patterns of CO₂-flooding in ultra-low permeability oil reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(3): 82–86.
- [22] ZHANG Na, WEI Mingzhen, BAI Baojun. Comprehensive review

- of worldwide CO₂ immiscible flooding [C]. Tulsa: SPE Improved Oil Recovery Conference, 2014.
- [23] 胡伟, 吕成远, 王锐, 等. 水驱油藏注 CO₂ 非混相驱油机理及剩余油分布特征[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(5): 99-105.
HU Wei, LÜ Chengyuan, WANG Rui, et al. Mechanism of CO₂ immiscible flooding and distribution of remaining oil in water drive oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(5): 99-105.
- [24] 计秉玉. 中国 CCUS 的发展、机遇与挑战[R]. 北京: 第四届 CCUS 国际论坛, 2017.
JI Bingyu. Development, opportunities, and challenges of CCUS in CHINA [R]. Beijing: The fourth CCUS International Forum, 2017.
- [25] 王香增. 低渗透砂岩油藏二氧化碳驱油技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2017.
WANG Xiangzeng. CO₂ flooding technology in low permeability sandstone reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017.
- [26] 王增林. 胜利油田燃煤电厂 CO₂ 捕集、利用与封存技术及示范应用[C]. 北京: 第三届 CCUS 国际论坛, 2016.
WANG Zenglin. CO₂ capture, utilization and storage technology and demonstration application in coal-fired power plants of Shengli Oilfield [C]. Beijing: The third CCUS International Forum, 2016.
- [27] 高瑞民. 延长石油碳减排技术进展与规划[C]. 北京: 第三届 CCUS 国际论坛, 2016.
GAO Ruimin. Progress and planning of carbon emission reduction for Yanchang oil [C]. Beijing: The third CCUS International Forum, 2016.
- [28] 许世森. 燃烧前和燃烧后 CO₂ 捕集技术最新进展[C]. 北京: 第三届 CCUS 国际论坛, 2016.
XU Shisen. Recent advances in CO₂ capture technology before and after combustion [C]. Beijing: The third CCUS International Forum, 2016.
- [29] 王峰. CO₂ 驱油高效注采与埋存工艺技术[C]. 北京: 第三届 CCUS 国际论坛, 2016.
WANG Feng. Efficient injection-production and storage technologies during CO₂ flooding [C]. Beijing: The third CCUS International Forum, 2016.
- [30] 袁士义, 李海平, 王高峰, 等. 关于加快推进 CO₂ 驱工业化的思考[C]//中国 CCUS 联盟. 第四届 CCUS 论坛论文集. 北京: 中国石化出版社, 2017.
YUAN Shiyi, LI Haiping, WANG Gaofeng, et al. Thoughts on accelerating CO₂ drive industrialization [C]//China CCUS Alliance. Proceedings of the fourth CCUS forum. Beijing: China Petrochemical Press, 2017.
- [31] 王高峰, 秦积舜, 孙伟善. 碳捕集利用与封存案例与产业发展对策[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
WANG Gaofeng, QIN Jishun, SUN Weishan. CCUS development suggestions based on case analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2020.
- [32] 王高峰, 胡永乐, 宋新民, 等. 低渗透油藏气驱产量预测新方法[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(30): 8 905-8 911.
WANG Gaofeng, HU Yongle, SONG Xinmin, et al. New theory of oil production prediction in gas flooding tight reservoirs [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(30): 8 905-8 911.
- [33] 许天福, 金光荣, 岳高凡, 等. 地下多组分反应溶质运移数值模拟: 地质资源和环境研究的新方法[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(5): 1 410-1 424.
XU Tianfu, JIN Guangrong, YUE Gaofan, et al. Subsurface reactive transport modeling: a new research approach for geo-resources and environments [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(5): 1 410-1 424.

编辑 常迎梅