

引用格式:谭新,罗大清,宋欣和.考虑驱油与碳减排双重效益的CCUS-EOR经济性与发展模式分析与探讨[J].油气地质与采收率,2024,31(2):70-78.

TAN Xin, LUO Daqing, SONG Xinhe. Analysis and discussion of CCUS-EOR economy and development model considering benefits of oil displacement and carbon reduction[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(2): 70-78.

考虑驱油与碳减排双重效益的CCUS-EOR经济性与发展模式分析与探讨

谭新¹, 罗大清¹, 宋欣和²

(1. 中国石化集团经济技术研究院有限公司, 北京 100029; 2. 辽宁师范大学 国际商学院, 辽宁 大连 116029)

摘要:双碳战略目标下,石油石化行业转型的重点、难点在于探寻低成本转型发展路径,这就要求系统研究各项转型技术的发展基础和规模潜力,统筹各项转型技术发展应用时序,形成支撑最优转型路径的技术组合和综合方案。碳捕集、封存与利用(CCUS)的技术成熟度较高,与石油石化产业协同耦合性较好,是石油石化转型的关键技术之一,但成本过高仍是目前阻碍CCUS技术规模化发展的主要问题。分析CCUS的经济性及探讨其发展模式,对于确定未来CCUS产业的发展布局,以及研究CCUS对石油石化行业转型的支撑潜力、石油石化行业的转型路径具有重要作用。为深入分析研究未来CCUS技术的经济性以及在石油石化行业转型中的潜力和定位,本研究重点聚焦碳捕集与驱油封存(CCUS-EOR),提出了一套全新的分析研判思路。首先,通过CCUS-EOR的全流程梳理,详细分析介绍了各个环节的成本,包括碳捕集、运输、驱油封存等环节,研判了未来各个环节的成本下降空间。其次,通过对未来油价和碳价的研判,分析了驱油及碳减排带来的经济收益,并进行了成本收益对比。基于CCUS-EOR各环节的成本收益分析结果,本研究进一步对中国未来不同模式下的CCUS-EOR项目进行了全面的经济性评估,涵盖了不同的碳捕集技术、运输方式以及封存策略,揭示了在不同场景下CCUS-EOR项目的盈利能力和可持续发展潜力。研究表明,CCUS-EOR的经济性深受碳价、油价、驱油效率等多重因素的影响,其中从中长期来看,碳价的变化对未来CCUS-EOR收益影响较大。在碳价和油价均处于较高水平的情况下,CCUS-EOR项目的盈利空间更大,更具吸引力,同时驱油效率的提升也能显著提高项目的经济收益。当前中国各个项目经济性差异较大,无法完全保证明显盈利,但未来的经济性有较大提升空间。针对未来中国CCUS-EOR的发展,需要突破碳捕集环节的技术瓶颈,重点开发运用燃烧前捕集技术,降低捕集成本,提升捕集效率。此外,还需要优化产业布局,形成源汇匹配的产业集群,实现产业链的协同效应。同时,需积极推动碳交易市场的发展成熟,通过市场机制引导碳减排行为,为CCUS-EOR技术在石油石化行业的推广和应用创造良好的外部环境。

关键词:双碳目标;能源转型;碳捕集、封存与利用;CO₂驱油;CCUS-EOR

文章编号:1009-9603(2024)02-0070-09

DOI:10.13673/j.pgre.202312026

中图分类号:TE357.46

文献标识码:A

Analysis and discussion of CCUS-EOR economy and development model considering benefits of oil displacement and carbon reduction

TAN Xin¹, LUO Daqing¹, SONG Xinhe²

(1. SINOPEC Economics & Development Research Institute Company Limited, Beijing City, 100029, China; 2. College of International Business, Liaoning Normal University, Dalian City, Liaoning Province, 116029, China)

Abstract: Under the dual carbon goal, the focus and difficulty of the petroleum and petrochemical industry transition lie in exploring low-cost transition development paths. This needs to conduct systematic research on the development foundation and potential of

收稿日期:2023-12-18。

作者简介:谭新(1988—),男,湖南长沙人,高级工程师,博士,从事油气战略规划与转型研究工作。E-mail:tanxin.edri@sinopec.com。

通信作者:罗大清(1970—),男,江西吉安人,正高级经济师,硕士。E-mail:luodq.edri@sinopec.com。

various transition technologies, coordinate the development and application timing of these technologies, and thus form a technology portfolio and comprehensive plan supporting the optimal transition path. Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) has high technological maturity and sound coupling with the petroleum and petrochemical industry and is a key technology for petroleum and petrochemical transition. However, the high cost remains the main obstacle to large-scale development. Analyzing the economy and development mode of CCUS plays an important role in determining the future development layout of the CCUS industry, and studying the potential of CCUS for the petroleum and petrochemical industry transition. To conduct an in-depth analysis on the economy of future CCUS technology and its potential in the transition of the petroleum and petrochemical industry, this paper focuses on CCUS with enhanced oil recovery (CCUS-EOR) and proposes a new analytical approach. Firstly, by comprehensively reviewing the entire process of CCUS-EOR, the costs including carbon capture, transportation, oil displacement, and storage are analyzed in detail, with the cost reduction of each in the future evaluated. Secondly, by the prediction of future oil prices and carbon prices, the economic benefits brought by oil displacement and carbon emission reduction are analyzed, and a cost-benefit comparison is conducted. Based on the cost-benefit analysis results, this paper further carries out a comprehensive economic evaluation of CCUS-EOR projects under different modes in China, which covers different carbon capture technologies, transportation modes, and storage strategies, revealing the profitability and sustainable development potential of CCUS-EOR projects under different scenarios. The results show that the CCUS-EOR economy is deeply affected by multiple factors such as carbon price, oil price, and oil displacement efficiency. In the medium and long term, carbon price changes have a greater influence on future CCUS-EOR returns. Under the high level of both carbon price and oil price, the profitability of CCUS-EOR projects is greater and more attractive. Meanwhile, the improvement of oil displacement efficiency can significantly increase the economic benefits of the projects. Currently, there are significant differences in the economy of various projects in China, which cannot fully guarantee significant profits. However, there is great room for improving the future economy. For the future CCUS-EOR development in China, it is necessary to break through the technological bottleneck in carbon capture links and focus on developing and applying pre-combustion capture technology to reduce capture costs and improve capture efficiency. Additionally, it is necessary to optimize the industrial layout to form a source-sink matching industrial cluster and thus achieve a synergistic effect in the industrial chain. At the same time, it is important to promote the development of the carbon trading market, guide carbon emission reduction behavior via the market mechanism, and create a favorable external environment for the promotion and application of CCUS-EOR technology in the petroleum and petrochemical industry.

Key words: dual carbon goal; energy transition; CCUS; enhanced oil recovery by CO₂; CCUS-EOR

碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, 简称CCUS)技术是将CO₂从排放源中分离后加以利用或封存,以实现CO₂减排的技术^[1-2]。按照利用与封存类型的不同,主要可分为地质封存(如咸水封存)和化学、物理及生物利用等。其中,CCUS-EOR技术是一种结合了碳捕集、利用与封存和提高石油采收率的综合方案。CCUS-EOR技术先通过捕集过程将工业排放的CO₂收集并分离出来,然后将分离出的CO₂注入到油气田中。注入的CO₂将与原油混合,通过物理作用和化学反应,使原油膨胀、降低黏度、提高流动性,从而提高石油采收率^[3-4]。最终通过封存过程将CO₂与大气隔绝,避免其逃逸到大气中,实现温室气体减排及减少温室效应。

有关研究认为,2070年全球实现净零排放,碳捕集与封存技术减少的CO₂将占总减排量的15%,对碳中和起托底作用^[5]。当前CCUS在全球和中国发展迅速,且未来需求巨大^[6-9]。据估计,实现双碳目标下,2030年中国CCUS的减排需求为2400×

10⁴t,到2060年增至23.5×10⁸t。据不完全统计,截至2022年底,中国已投运和规划建设中的CCUS示范项目近百个,其中已投运项目超过半数,CO₂捕集能力约为400×10⁴t/a^[6]。虽然目前中国CCUS各环节技术取得了显著进展,具备了大规模CO₂捕集、输送、利用与封存系统设计能力和近期实现规模化应用的基础,但各环节技术发展并不均衡,仍然存在碳捕集成本过高、缺乏运输管网、资源利用转化率低、市场机制不完善、成本居高不下等挑战,距离规模化商业应用存在差距^[10-12]。因此,有必要重点深入探究制约CCUS发展的根本症结,分析未来CCUS在中国的发展模式及其经济性。

CCUS-EOR结合了碳封存的减排效益和驱油的经济收益,成为石油石化行业实现经济型碳减排和转型的重点技术领域,其经济性分析也成为该领域的热点和研究重点^[3-4,7-10]。在项目层面,研究以现金流法为基础,拓展建立了分析计算CCUS-EOR项目经济性的系列方法^[9]。在技术环节层面,当前研究分析了CCUS-EOR从捕集、运输、再到驱油封

存各环节不同技术类型的成本,包括CO₂燃烧前捕集、燃烧后捕集、富氧燃烧捕集、罐车运输、铁路运输、管道运输、船舶运输、液相与气相储运以及不同注入封存方式等^[10]。此外,还重点分析了油价、换油率、源汇匹配等重要因素对项目经济性的影响,以及中国未来提升CCUS-EOR经济性的发展方向^[3-4]。对于CCUS-EOR的经济性研究,仍存在以下深化空间:一是换油率(或驱油效率)在项目全周期的变化问题,由于CO₂驱油的换油率不是恒定的,而是随时间变化且呈非线性变化^[8],中国CCUS-EOR项目大多数较新,处于驱油效率上升的阶段,仅用目前观测的换油率评估项目全周期的驱油收益则会造成偏差。二是随着未来石油石化行业纳入碳交易市场且碳价逐步升高,项目收益计算应包括CO₂封存后的碳减排收益。

为此,以研究单位CO₂驱油封存的成本与收益为切入点,构建了分析CCUS-EOR未来经济性发展趋势的整体框架,包括CCUS-EOR的全流程成本计算与展望、考虑驱油和碳减排双重效益的经济收益计算与展望。在研究CCUS-EOR的成本方面,重点考虑未来各个技术环节的成本下降趋势,研判到2050年的成本范围;在研究CCUS-EOR的收益方面,考虑了驱油效率、油价随时间变化对驱油收益的影响,重点研究了未来碳价变化对项目碳减排收益的影响。进一步分析了中国当前和未来CCUS-EOR不同发展模式的经济性,提出了未来需要重点关注的发展模式。

1 研究方法

1.1 研究框架

假设CCUS-EOR技术随石油开采项目部署,项目总成本包括开采成本与部署CCUS-EOR的额外成本,而收入则包括产油收入与CCUS-EOR驱油封存带来的额外收入。针对某一石油开采项目,部署CCUS-EOR技术是否具备经济性,只需对比部署CCUS-EOR的额外成本与驱油封存带来的额外收入。

首先梳理部署CCUS带来的额外成本及其结构,主要包括碳捕集、运输、封存与利用等环节(图1)。其中,捕集技术主要分为燃烧前捕集和燃烧后捕集(包括常规燃烧捕集和富氧燃烧捕集)。运输方式主要分为罐车运输、管道运输和船舶运输。封存与利用方式种类繁多,包括咸水层封存、驱油封

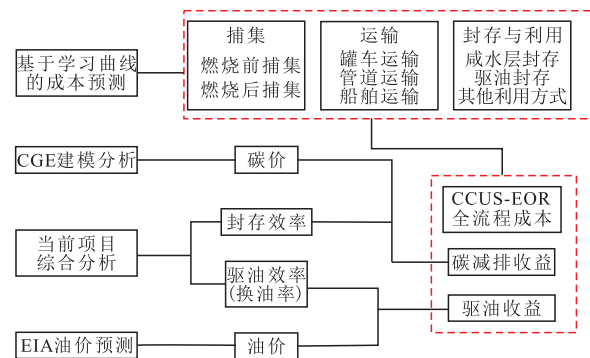


图1 CCUS-EOR成本效益分析框架

Fig.1 Cost-benefit analysis framework of CCUS-EOR

存、化工生产利用、生物利用等,主要针对驱油封存进行重点分析。

CCUS-EOR产生的额外收入主要包括2个方面:一是碳减排收入。在CCUS-EOR项目中,CO₂被封存在地下的储油层、盐层或非开采煤层中而非释放到大气中,能够带来碳减排效益。随着未来石油石化行业纳入碳排放权交易市场,CCUS-EOR的碳减排效益将直接与经济收益挂钩,即CCUS-EOR项目的所有者将获得与碳减排量和碳价关联的经济收益,因此需要重点分析CCUS-EOR的碳减排量及未来的碳价趋势。二是驱油带来的增油收入。CCUS-EOR项目可提高石油采收率,通过分析评估CCUS-EOR项目全周期的增油量,能够计算一定油价条件下的经济收益。

基于上述CCUS-EOR的成本效益分析,能够初步评估未来CCUS-EOR的经济性,并可基于碳价、油价、捕集和运输方式分析对CCUS-EOR项目影响的敏感性,拓展评估CCUS-EOR项目的不同发展模式。

1.2 模型与计算方法

1.2.1 CCUS-EOR全流程成本

CCUS-EOR的成本构成主要包括捕集、运输、封存与利用等环节。其全流程成本可概括为:

$$C_{\text{ccus}} = C + T + U \quad (1)$$

捕集成本是指从源头捕获CO₂的成本,包括从发电厂、工业设施等排放源捕获和处理CO₂的成本。这部分成本主要取决于源头的排放量、排放气体的成分、浓度以及捕集技术。捕集成本是占比最高的环节,也是影响CCUS工业化、商业化的关键因素。不同捕集方式的成本差异较大,其中燃烧前捕集指将燃料在燃烧前进行气化或重整,使燃料中碳元素转化成CO₂后进行捕集,目前成本可至200元/t以下。燃烧后捕集是指在燃料燃烧的烟气中,采用化

学或物理方法对CO₂进行选择富集,通常成本在240元/t以上,其中富氧燃烧捕集成本超过300元/t。此外,CO₂浓度与成本之间也有一定关联,通常高浓度的排放源碳捕集成本较低。

CO₂罐车运输主要用于陆上运输,是指将压缩后的CO₂以液态形式装载在大型罐车中,通常每车可装载量约为10 t。根据运输距离和重量计费,一般情况下运费超过1元/(t·km),长距离运输不具备经济性。船舶运输是指以液态CO₂的形式通过现有的液化天然气载运船进行运输,每船可运载上万吨CO₂,其成本为0.1~0.5元/(t·km),相较于陆上运输更具经济性,让CO₂的越洋运输和异地离岸存储成为可能。但由于中国适合封存CO₂的大型油田多在内陆地区,船舶运输在CCUS-EOR项目中的适用性较差。管道运输是指将捕集的CO₂通过管道网络进行运输,从捕集地点输送到可利用或可封存场地的过程,其预估成本为0.5~0.8元/(t·km)。

封存是指将捕集到的CO₂通过一定技术手段注入到地下岩层或海洋中,使其与大气长期隔绝的过程,地质封存成本通常在60元/t左右。在CO₂利用方面,由于涉及化学利用、物理利用和生物利用等多方面多领域,成本差异较大。重点考虑的CO₂驱油,指将捕集到的CO₂用于提高石油采收率,同时进行地质封存,是一种将封存和利用相结合的技术。虽然在循环利用CO₂驱油环节成本有所增加,但该技术利用现有油井进行CO₂封存,其整体成本较低。

未来CCUS-EOR的成本下降空间较大。其中,碳捕集是最有望通过技术创新降低成本的环节。如电化学分离技术、新型膜分离等新兴技术有可能在将来实现较大规模的应用,从而提高捕集效率、降低捕集成本。基于各项技术的成本学习曲线分析,到2030年,碳捕集成本有望在当前基础下降10%~30%;到2050年,有望再下降70%。在运输和封存环节,随着产业集群发展,推动源汇匹配优化和运输走廊共建共享,成本也将一定程度下降。预计到2030年,运输和封存成本有望再分别下降10%和20%;到2050年,有望再分别下降40%和50%。

1.2.2 驱油效益

CCUS-EOR的驱油收入可表示为:

$$B_{EOR} = E_{EOR} \cdot P_{oil} \quad (2)$$

其中:

$$E_{EOR} = I_{CO_2} \cdot \eta_{EOR} \quad (3)$$

忽略CO₂运输、存储等过程的逸散,可认为驱油注入量与碳捕集环节获取的CO₂量相当。驱油效率

η_{EOR} 是随时间变化的函数。为简化计算,假设油田是同质的,即相同时期驱油效率相同。对多个驱油项目的增油量进行拟合,增油效率可表示为:

$$\eta_{EOR}(t) = \begin{cases} e^{0.791t - 4.662} / 6.93 & t < 8 \\ -0.0145t + 0.560 & 8 \leq t \leq 10 \\ e^{-0.183t + 2.851} / 6.93 & t > 10 \end{cases} \quad (4)$$

由此,可以绘制驱油效率随时间变化的曲线(图2),可发现在项目运行初期,驱油效率呈指数上升,到第8年达到峰值,然后线性下降至第10年,再呈指数下降至项目运营期末。

参考美国能源信息署(EIA)关于布伦特原油价格的展望研究^[9],可以得到油价的长期变化曲线(图3),不同情景下价格差异较大,其中到2050年高油价情景和低油价情景之间相差近140美元/bbl。

1.2.3 碳减排效益

CCUS-EOR碳减排产生的经济效益可表示为:

$$B_{CO_2} = R_{CO_2} \cdot P_{CO_2} \quad (5)$$

通常用以驱油的CO₂会以一定比例逸散,因此碳减排量与驱油CO₂注入量有如下关系:

$$R_{CO_2} = I_{CO_2} \cdot \eta_{CO_2} \quad (6)$$

对于未来碳价的趋势分析,主要用基于CGE模型对全球及中国未来碳市场进行刻画(图4)。其基

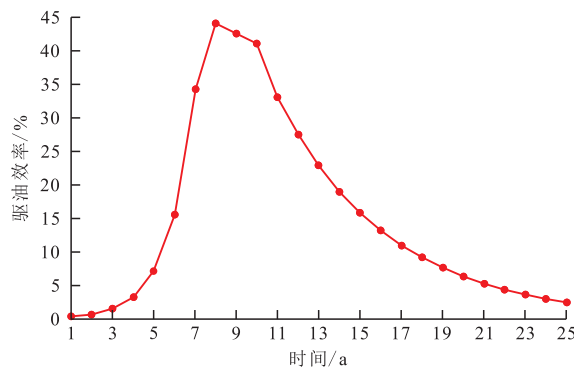


图2 驱油效率随时间变化曲线
Fig.2 Curve of oil displacement efficiency over time

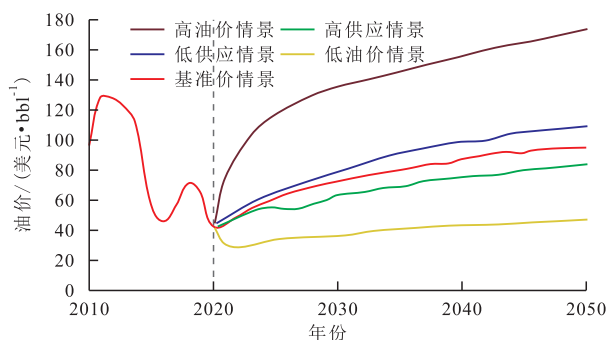


图3 油价长期预测
Fig.3 Long-term prediction of oil prices

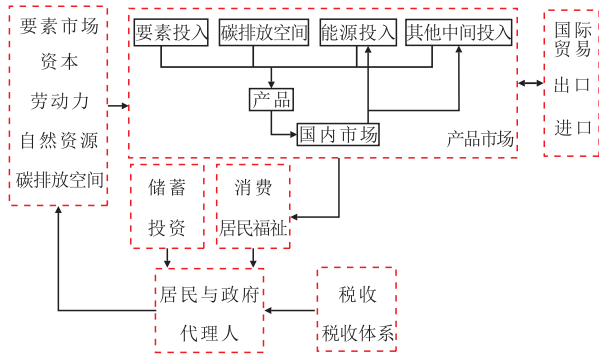


图4 CGE模型经济系统生产与消费关系分析框架
Fig.4 Analytic framework of production and consumption in economic system of CGE model

本思路是将CO₂视为与能源、钢铁、粮食等等性质的生产要素与产品在全球各区域和部门之间交易及利用,而非清洁能源和其他产品的生产也伴随CO₂产生。

通过将CO₂的产生、利用和交易纳入建模,可对未来碳价进行分析展望^[10-11]。基于静态CGE模型,在区域r的部门i中,生产者会在满足生产关系 $\phi_{r,i}$ 的情况下选择 $y_{r,i}$ 的产量水平、 $k_{r,i}$ 的生产要素、 $x_{r,ji}$ 的中间投入,以最大化其利润。其中,生产关系 $\phi_{r,i}$ 刻画了现有生产技术下的生产结构。因此,生产者行为表示为:

$$\pi_{r,i} = p_{r,i}y_{r,i} - C_{r,i}(p_{r,i}, w_{r,i}, y_{r,i}) \quad (7)$$

其中:

$$y_{r,i} = \phi_{r,i}(x_{r,ji}, k_{r,i}) \quad (8)$$

消费者由区域r中的自然资源、劳动力以及资本供应所刻画。在给定收入 $M_{r,i}$ 的情况下,消费者会选择消费不同的产品以最大化其福利($\max W_{r,i}(d_{r,i})$)。

实现最大化福利的约束条件为:

$$\text{s.t. } M_{r,i} = \sum_i p_{r,i}d_{r,i} \quad (9)$$

在静态CGE模型的基础上,可以递归地建立动态CGE模型,以评估未来数十年间能源市场与政策的复杂影响与时序演化。通过有序地求解一系列不同时间断面的静态CGE模型并根据结果更新下一时间断面的参数,最终能够得到动态的发展趋势,并由此分析未来碳价的发展趋势。

中国碳交易市场与国际链接是未来可能的发展模式和趋势^[12-13]。通过设立不同情景假设(表1),能够绘制未来碳价的变化曲线(图5)。其中,独立发展情景下,中国碳市场与全球无链接,即中国的碳交易仅在国内各部门之间进行;全球链接情景下,中国参与全球碳交易,形成全球统一碳价。在

全球链接情景下,由于发达国家碳价较高,碳市场链接之后发达国家碳价将会全面下降,而发展中国家碳价将被拉升并形成统一。因此在全球链接情景下,中国碳价将明显高于独立发展情景碳价。

表1 情景设置

情景名称	减排目标和碳预算	是否链接
独立发展情景	NDC和碳中和目标	否
全球链接情景	全球2℃目标	是

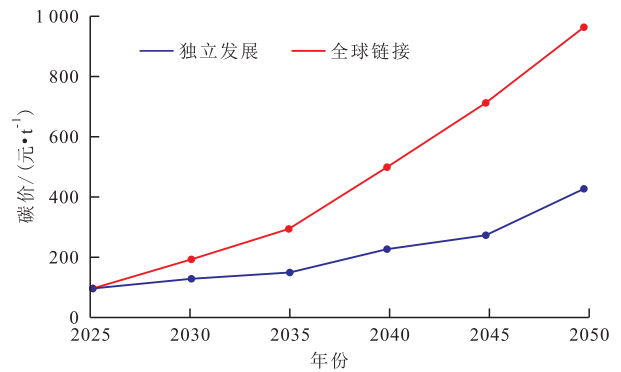


图5 不同情景下的中国碳价趋势
Fig.5 China's carbon price trends under different scenarios

2 结果分析

2.1 CCUS-EOR的成本与收入展望

针对未来CCUS-EOR的成本与收入进行数值分析。CCUS-EOR的成本展望如图6所示。考虑运输距离为100 km,当前CCUS-EOR的全流程成本约为270~445元/t,未来成本随时间下降,到2050年有望降至110~230元/t。造成成本预估上下限差异的主要因素包括:①捕集方式不同,燃烧前捕集成本小于燃烧后捕集成本。②运输方式不同,管道运输成本小于罐车运输成本。③封存成本根据实际情况有浮动空间。

CCUS-EOR驱油收入趋势预测曲线(图7)展示了每注入1 t CO₂带来的增油收益。假设驱油项目自2025年开始运行,原油开采后即刻出售,因此每年的收入与油价和驱油效率有关。油价高低对驱油收入具有较大影响,而驱油效率对驱油收入的影响主要体现在随时间变化上,由于驱油效率随时间先增后降,收入也呈相同趋势。

CCUS-EOR碳减排收入趋势预测曲线(图8)展示了每注入1 t CO₂带来的碳减排收益。假设封存效率为80%,每注入1 t CO₂,能实现0.8 t CO₂的封存量。由于碳市场的结算周期通常为1 a,因此碳减排

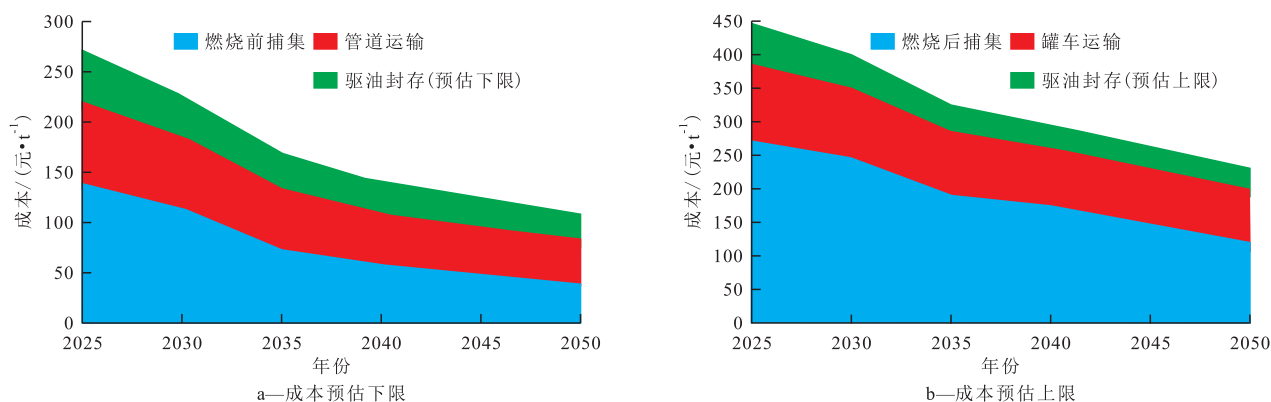


图6 CCUS-EOR全流程成本及结构预测
Fig.6 Full-process cost and structure prediction of CCUS-EOR

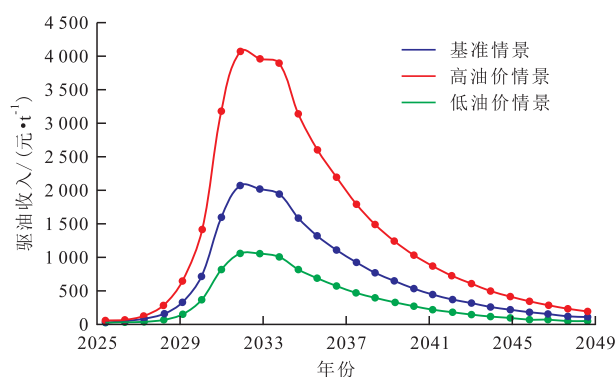


图7 CCUS-EOR驱油收入趋势预测
Fig.7 Benefit prediction of CCUS-EOR

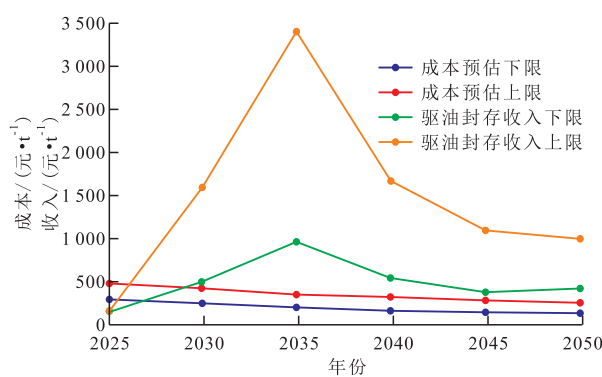


图9 CCUS-EOR成本与收入对比
Fig.9 Comparison between costs and benefits of CCUS-EOR

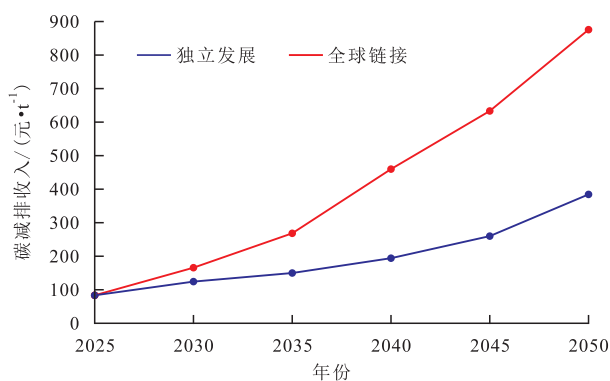


图8 CCUS-EOR碳减排收入趋势预测
Fig.8 Benefit prediction of emission reduction of CCUS-EOR

的年收入与当年的碳价紧密相关。该部分年收入随时间增加,主要原因是未来碳价攀升。

CCUS-EOR成本与收入对比曲线(图9)分析了每注入1 t CO₂的成本和收入变化趋势。其中,驱油封存收入下限是指考虑低油价情景和中国碳市场独立发展情景;收入上限是指考虑高油价情景和碳市场全球链接情景。假设项目于2025年建成并运行,按时间顺序,收益可分为3个阶段:①上升阶段,前10 a收入不断攀升,5 a内收入可明显高于成本,主要原因是驱油效率不断攀升,增油量带来的收入成为主导,且附带了碳价上升带来的碳减排收入提

升。②达峰后速降阶段,10~20 a收入达峰后快速下降,主要原因是驱油效率下降,但该阶段收入明显高于成本,成为项目资金回收并盈利的主要阶段。③稳定阶段,20 a以后驱油效率较低,但碳价逐步走高,碳减排收入将成为主导,使整体收益稳定在一定范围。

从驱油封存收入上限来看,收入曲线在时间轴上的积分明显大于成本曲线的积分,即项目整体盈利明显,这以油价持续走高、碳市场全球链接后碳价飙升为前提,如果油价持续走低,碳价上升有限(驱油封存收入下限曲线),项目盈利能力下降明显。

2.2 不同模式下CCUS-EOR的经济性分析

由图10可知,当碳价和油价一定时,若坐标点落在盈亏平衡线右上方为盈利,在左下方为亏损。考虑目前中国CCUS-EOR多为试点项目,尚未形成集群式发展,CO₂气源多来自自身油气田设施,项目规模不大,碳排放源与碳汇距离不远。假设平均运输距离为50 km,平均驱油效率为0.15,则罐车运输和管道运输模式差别不大。但捕集方式不同对项目盈亏的影响较大,燃烧前捕集明显优于燃烧后捕集。目前中国多采用燃烧后捕集方式,且由于石油

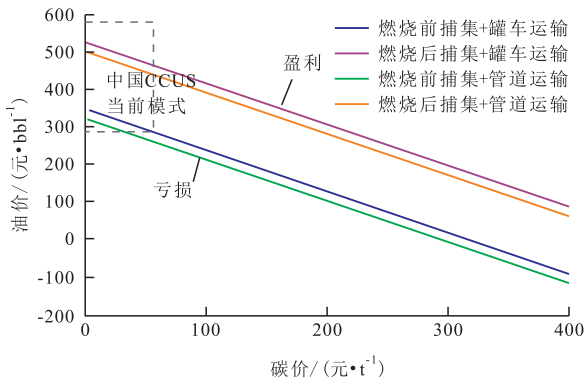


图10 当前CCUS-EOR盈亏分析

Fig.10 Profit and loss analysis of current CCUS-EOR

石化行业CCUS的碳减排收益尚未落实即碳价为0,若要实现明显盈利则需油价至少高于500元/bbl。当前中国CCUS-EOR项目的盈亏情况大多在图中虚线范围,且由于各个项目实际运输距离、驱油效率与本分析设定有差异,加上项目税金、贷款利息等其他成本因素,整体看各个项目经济性差异较大,无法完全保证明显盈利。

由图11可知,未来随着CCUS-EOR项目集群发展,CO₂气源更广,不仅可来自自身油气田和自备电厂,也可来自距离较远的大规模工业园区,包括炼化厂、化工厂、电厂、热厂等。届时项目规模和数量将不断扩大,但也面临较为复杂的源汇匹配问题。考虑平均运输距离为150 km,则管道运输相较罐车运输具有较明显的优势。由于CCUS-EOR各环节成本降低,且未来碳价、油价有所提升,不同项目模式在未来都有望具备应用场景,但其中燃烧前捕集和管道运输的经济性更具优势。

综合考虑图10和图11结果,认为基于源汇匹配实际情况和利润最大化原则,综合考虑多种应用场景^[14-21],以下2种模式在未来值得重点考虑:①分布式发展模式。在油田规模不大、离大型工业园区较远的地方,由自身油气田、自备电厂等设施提供CO₂气源。该模式下,可按需求灵活选择燃烧前、燃烧后等多种捕集方式。由于运输距离较近,优先选用罐车运输节省项目前期成本投入。②集群化发展模式。在离大型工业园区较近、油田数量和规模较大的地方,采用自备气源和外来气源相结合的方式,气源不仅来自自身油气田、自备电厂,还可以是附近其他炼化厂、化工厂以及分布式电源。在该模式下气源充足,可优先选择燃烧前捕集方式节省碳捕集环节成本,将捕集的CO₂输送至气藏封存,当油田需要驱油时再将CO₂输出,并通过管道运输降低长距离运输成本,优化CO₂的储运调度。

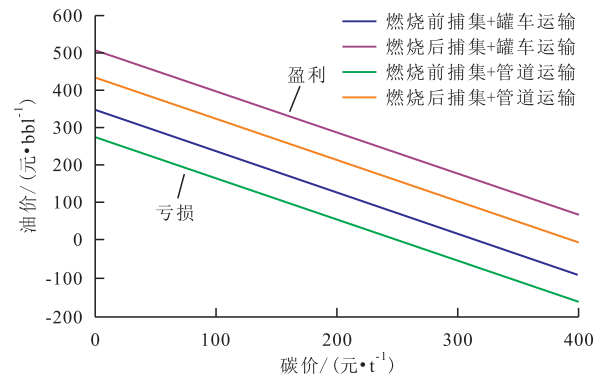


图11 未来(2035年)CCUS-EOR项目集群发展盈亏分析

Fig.11 Profit and loss analysis of future CCUS-EOR cluster development by 2035

3 结论

建立了分析未来中国CCUS-EOR经济性的分析框架,重点考虑了CCUS-EOR全流程的成本变化以及驱油和碳减排双重收益,并进行了未来不同模式下CCUS-EOR的盈亏敏感性分析,得到如下结论:(1)未来CCUS-EOR全流程的成本将逐步下降,其中碳捕集环节成本占比最高,具备较大下降潜力。运输环节受距离影响较大,主要可通过优化源汇匹配降低成本。(2)CCUS-EOR的驱油效率随时间变化,需从项目全周期评估驱油收益,尤其重点考虑项目中后期驱油效率达峰后下降阶段,避免评估项目时对驱油收益估计偏差。(3)CCUS-EOR未来具备一定经济性,但由于当前石油石化行业尚未纳入碳交易市场,CCUS-EOR项目难以获取碳减排实际经济收益。从中长期来看,碳价的变化对未来CCUS-EOR收益影响较大。(4)未来可因地制宜考虑CCUS-EOR的小规模分布式和大规模集群化2种发展模式。在有条件的区域建设CO₂输送网络,统筹源、网、储、汇各环节设施布局与运行,推动CCUS-EOR项目和产业集约化发展。

本研究建立在大量的假设前提下,对于未来中国碳市场及碳价的分析,尤其是远期的预测,还存在较大不确定性。未来可在碳价预测中,基于国家发展阶段、产业竞争力水平,结合气候谈判进程,更合理地分析碳市场及碳价问题。此外,主要考虑CCUS-EOR项目未来随时间发展的经济性趋势和发展模式,具备一定宏观参考价值,在实际分析某一特定项目的可行性时,仍需更全面、具体地核算和评估项目各项成本及收益,包括前期资金投入、投资回报周期、内部收益率等重要指标。

通过分析计算不同情景下CCUS-EOR的成本

效益,下一步可拓展研究CCUS-EOR技术在支撑石油石化行业转型及碳减排过程中的发展潜力、规模和定位等系列问题。

符号解释

B_{CO_2} ——碳减排收益,元;
 B_{EOR} ——增油量收益,元;
 C ——捕集成本,元;
 $C_{r,i}$ ——成本函数;
 C_{CCUS} ——CCUS全流程成本,元;
 $d_{r,i}$ ——产品需求量,t;
 E_{EOR} ——增油量,t;
 i ——部门;
 I_{CO_2} ——CO₂注入量,t;
 $k_{r,i}$ ——生产要素,人或km²或t;
 $M_{r,i}$ ——给定收入,元;
 $p_{r,i}$ ——物品价格,元;
 P_{CO_2} ——碳价,元;
 P_{oil} ——油价,元;
 r ——区域;
 R_{CO_2} ——CCUS的碳减排量,t;
 t ——时间,a;
 T ——运输成本,元;
 U ——封存与利用成本,元;
 $w_{r,i}$ ——要素价格,元;
 $W_{r,i}$ ——产品的最大化福利,元;
 $x_{r,ji}$ ——中间投入,t;
 $y_{r,i}$ ——产量水平,t;
 η_{EOR} ——驱油效率,%;
 η_{CO_2} ——CO₂封存效率,%;
 $\pi_{r,i}$ ——利润,元;
 $\phi_{r,i}$ ——生产关系函数。

参考文献

- [1] 薛振乾,谢祥,马浩铭,等. CO₂捕集、利用和封存在能源行业的应用:全球案例分析和启示[J].大庆石油地质与开发,2024,43(1):14-21.
 XUE Zhenqian, XIE Xiang, MA Haoming, et al. Applications of CO₂ capture, utilization and storage in energy industry: Global cases review and insights[J]. Petroleum Geology & Oil-field Development in Daqing, 2024, 43(1): 14-21.
- [2] LAU Hon Chung, RAMAKRISHNA Seeram, ZHANG Kai, et al. The role of carbon capture and storage in the energy transition [J]. Energy & Fuels, 2021, 35(9): 7 364-7 386.
- [3] 向勇,侯力,杜猛,等.中国CCUS-EOR技术研究进展及发展前景[J].油气地质与采收率,2023,30(2):1-17.
 XIANG Yong, HOU Li, DU Meng, et al. Research progress

and development prospect of CCUS-EOR technologies in China [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(2): 1-17.

- [4] 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]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(6): 793-804.
- [5] IEA. Energy technology perspectives 2020[R]. Paris: IEA, 2020.
- [6] 张贤,杨晓亮,鲁玺,等.中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2023)[R].北京:中国21世纪议程管理中心,全球碳捕集与封存研究院,清华大学,2023.
 ZHANG Xian, YANG Xiaoliang, LU Xi, et al. CCUS progress in China-A status report (2023) [R]. Beijing: The Administrative Center for China's Agenda 21, Global CCS Institute, Tsinghua University, 2023.
- [7] 刘斌. CCUS-EOR项目经济评价技术与发展方向[J].石油科技论坛,2023,42(2):57-66.
 LIU Bin. Economic evaluation technology and development direction of CCUS-EOR project[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2023, 42(2): 57-66.
- [8] 王高峰,廖广志,李宏斌,等. CO₂驱气机理与提高采收率评价模型[J].油气藏评价与开发,2022,12(5):734-740.
 WANG Gaofeng, LIAO Guangzhi, LI Hongbin, et al. Mechanism and calculation model of EOR by CO₂ flooding[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(5): 734-740.
- [9] EIA. Annual energy outlook 2023[R]. Washington: EIA, 2023.
- [10] 翁玉艳,张希良,何建坤,等.全球碳市场链接对实现国家自主贡献减排目标的影响分析[J].全球能源互联网,2023,3(1):27-33.
 WENG Yuyan, ZHANG Xiliang, HE Jiangkun. Impacts of the linkage of global carbon markets on the achievement of emissions reduction targets in nationally determined contributions [J]. Global Energy Interconnection, 2023, 3(1): 27-33.
- [11] SPRINGER U. The market for tradable GHG permits under the Kyoto Protocol: a survey of model studies[J]. Energy Economics, 2003, 25(5): 527-551.
- [12] 张希良,张达,余润心.中国特色全国碳市场设计理论与实践[J].管理世界,2021,37(8):80-94.
 ZHANG Xiliang, ZHANG Da, YU Runxin. Theory and practice of China's national carbon emissions trading systems[J]. Management World, 2021, 37(8): 80-94.
- [13] 蒋佳妮,邵逸飞.国际碳排放权交易模式的更替发展与协同优化路径[J].中国环境管理,2023,15(4):26-34.
 JIANG Jiani, SHAO Yifei. Alternation and development of international carbon emissions trading models and optimization of cooperative pathways[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2023, 15(4): 26-34.

- [14] 黄程, 霍丽如, 吴辰泓. 基于非常规油气开发的CO₂资源化利用技术进展及前景[J]. 非常规油气, 2022, 9(1): 1-9.
HUANG Cheng, HUO Liru, WU Chenhong. Progress and prospect of CO₂ resource utilization technology based on unconventional oil and gas development[J]. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9(1): 1-9.
- [15] 王子强, 葛洪魁, 郭慧英, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔页岩油不同温压CO₂吞吐下可动性实验研究[J]. 石油实验地质, 2022, 44(6): 1 092-1 099.
WANG Ziqiang, GE Hongkui, GUO Huiying, et al. Experimental study on the mobility of Junggar Basin's Jimsar shale oil by CO₂ huff and puff under different temperatures and pressures [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(6): 1 092-1 099.
- [16] 雷梦, 屈亚光, 万翠蓉, 等. CO₂辅助重力驱油开发效果影响因素分析[J]. 特种油气藏, 2022, 29(6): 133-140.
LEI Meng, QU Yaguang, WAN Cuirong, et al. Analysis of influencing factors on the development effect of CO₂ assisted gravity flooding [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(6): 133-140.
- [17] 李岩, 张葑, 樊晓伊, 等. 低渗透砂砾岩油藏二氧化碳驱提高采收率[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(1): 59-65.
LI Yan, ZHANG Di, FAN Xiaoyi, et al. EOR of CO₂ flooding in low-permeability sandy conglomerate reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(1): 59-65.
- [18] 高志豪, 赵锐锐, 成建梅. 砂岩含水层CO₂封存中考虑盐沉淀反馈作用的数值模拟: 以鄂尔多斯盆地为例[J]. 地质科技通报, 2022, 41(1): 269-277.
GAO Zhihao, ZHAO Ruirui, CHENG Jianmei. Numerical simulation of CO₂ sequestration in sandstone aquifers with feedback effect of salt precipitation: A case study of Ordos Basin [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(1): 269-277.
- [19] 郭肖, 冯金, 王鹏鲲, 等. 碳酸盐岩气藏注CO₂埋存及提高采收率机理研究进展[J]. 断块油气田, 2023, 30(6): 888-894.
GUO Xiao, FENG Jin, WANG Pengkun, et al. Progress on mechanism of CO₂ injection for storage and enhanced gas recovery in carbonate gas reservoir [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2023, 30(6): 888-894.
- [20] 刘合, 陶嘉平, 孟思炜, 等. 页岩油藏CO₂提高采收率技术现状及展望[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 127-134.
LIU He, TAO Jiaping, MENG Siwei, et al. Application and prospects of CO₂ enhanced oil recovery technology in shale oil reservoir [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 127-134.
- [21] 陈欢庆. CO₂驱油与埋存技术新进展[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(2): 18-26.
CHEN Huanqing. New progress of CO₂ flooding and storage technology [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(2): 18-26.

编辑 单体珍