

# 全生命周期视角下CCUS-EOR项目碳减排核算与评价： 以延长石油 $5 \times 10^4$ t/a示范项目为例

王苛宇<sup>1</sup>, 梁全胜<sup>1</sup>, 李琦<sup>2</sup>, 刘瑛<sup>1</sup>, 蔡博峰<sup>3</sup>,  
沈振振<sup>1</sup>, 王宏<sup>1</sup>, 庞凌云<sup>3</sup>, 王贺谊<sup>1</sup>

(1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西 西安 710075; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 3. 生态环境部 环境规划院 碳达峰碳中和研究中心, 北京 100043)

**摘要:**在“双碳”目标下,碳捕集、利用与封存(CCUS)是实现能源行业深度减排的关键技术,其中二氧化碳驱油(CCUS-EOR)因其兼具碳减排和增产效益而成为研究重点。然而,针对CCUS-EOR全流程项目,目前尚缺乏统一、可操作的全生命周期碳核算方法学,导致碳减排效益评估的科学性不足。以延长石油 $5 \times 10^4$  t/a CCUS-EOR示范项目为研究对象,构建了一套覆盖“筹建-建设-运营-闭场”全过程的碳减排核算与评价方法。该方法基于排放因子法,系统界定了捕集、运输、驱油封存、伴生气回收和安全监测的核算边界与基准线情景。采用2023年陕西省电力二氧化碳排放因子(0.6335 kg/(kW·h))等数据,对该示范项目在全生命周期各阶段的碳排放情况进行了核算。结果表明,示范项目年基准线排放量为50065.9 t,全生命周期年均排放量为8520.5 t,年净减排量为41545.4 t,全生命周期平均减排效率为83.0%。该方法不仅验证了CCUS-EOR项目显著的碳减排效益,还为构建可核查、可推广的CCUS项目碳核算方法学提供了参考。

**关键词:**CCUS-EOR; 全生命周期评价; 碳减排; 排放因子法

中图分类号:TQ028.1 文献标志码:A 文章编号:2097-2547(XXXX)XX-001-08

## Accounting and evaluation of carbon emission reduction of CCUS-EOR project from perspective of full life cycle: Case study of Yanchang Petroleum's $5 \times 10^4$ t/a demonstration project

WANG Keyu<sup>1</sup>, LIANG Quansheng<sup>1</sup>, LI Qi<sup>2</sup>, LIU Ying<sup>1</sup>, CAI Bofeng<sup>3</sup>,  
SHEN Zhenzhen<sup>1</sup>, WANG Hong<sup>1</sup>, PANG Lingyun<sup>3</sup>, WANG Heyi<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China; 3. Carbon Peak & Carbon Neutrality Research Center, Chinese Academy of Environmental Planning, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100043, China)

**Abstract:** Under the “carbon peaking and carbon neutrality” goals, carbon capture, utilization and storage (CCUS) is a key technology for achieving deep emission reductions in energy industry. Among them, carbon dioxide-enhanced oil recovery (CCUS-EOR) has become a research focus due to its dual benefits of carbon emission reduction and production enhancement. However, for the entire CCUS-EOR process, there is a lack of a unified and operable life-cycle carbon accounting methodology currently, which leads to insufficient scientific rigor in the assessment of carbon emission reduction benefits. Taking Yanchang Petroleum's  $5 \times 10^4$  t/a CCUS-EOR demonstration project as the research object, a carbon emission reduction accounting and evaluation method was constructed to cover the whole process of “preparation-construction-operation-closure”. Based on the emission factor method, the approach systematically defines the accounting boundaries and baseline scenarios for capture, transportation, oil displacement and storage, associated gas recovery, and safety monitoring. Using data such as the 2023 carbon dioxide emission factor for electricity in Shaanxi Province (0.6335 kg/(kW·h)), the carbon emissions of the demonstration project at each stage of its life cycle were calculated.

收稿日期: 2026-02-02; 修回日期: 2026-03-10。

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFE0206700); 陕西省重点研发计划-关键核心技术攻关项目(2025CY-GJHX2-02)。

第一作者: 王苛宇(1987—), 硕士, 高级工程师, 研究方向为CCUS技术和油气田开发, E-mail: ycsywky@163.com。

The results show that the annual baseline emissions of the demonstration project are 50065.9 t, the average annual life-cycle emissions are 8520.5 t, the annual net emission reductions are 41545.4 t, and the average life-cycle emission reduction efficiency is 83.0%. The method not only verifies the significant carbon emission reduction benefits of the CCUS-EOR project, but also provides a reference for constructing a verifiable and scalable carbon accounting methodology for CCUS projects.

**Keywords:** CCUS-EOR; full life cycle evaluation; carbon reduction; emission factor method

在全球积极应对气候变化的背景下,碳捕集、利用与封存(CCUS)技术被视为实现化石能源行业深度减排、达成“碳中和”目标的关键路径<sup>[1]</sup>。国际能源署(IEA)指出,到2050年CCUS技术需贡献约20%的减排量,才能将温室气体体积分数控制在 $450 \times 10^{-6}$ 以内<sup>[2]</sup>。中国作为全球主要的碳排放国之一,煤炭消费占比较高,CCUS技术对于煤电、煤化工等领域的低碳转型具有不可替代的战略意义。在CCUS技术的多种技术路线中,二氧化碳驱油(CCUS-EOR)因其兼具碳封存潜力和原油增产性能,已成为目前最具经济可行性的规模化应用方向<sup>[3]</sup>。然而,CCUS-EOR项目涉及二氧化碳捕集、运输、驱油、封存和安全监测等多个环节,系统边界复杂且排放源多样,其真实碳减排效益并非直观可得,需通过科学、规范的全生命周期碳核算进行评估。准确核算CCUS-EOR项目的碳减排量,不仅是项目参与碳市场交易和实现减排价值转化的基础,也是国家层面制定碳减排政策和优化技术路线的重要依据。

围绕CCUS-EOR项目的碳减排核算与评价,研究人员已开展了一系列研究。在方法学层面,国际标准化组织提出的ISO/TR 27915:2017等技术标准为二氧化碳捕集、运输与地质封存的量化与核查提供了框架性指导<sup>[4]</sup>;欧盟通过EU 2018/2066等法规对设施级排放监测与报告提出了强制性要求。近年来,我国在CCUS方法学建设方面取得了积极进展。在国家层面,用于CCUS项目温室气体减排量评估的规范GB/T 46879—2025将于2026年7月1日实施,这标志着统一核算规范即将正式确立;在地方层面,山东省于2022年发布了《二氧化碳驱油封存项目碳减排量核算技术规范》(DB37/T 4548—2022)<sup>[5]</sup>,新疆维吾尔自治区于2023年跟进开展了相关工作,这些是地方先行先试的探索;在行业层面,陕西延长石油(集团)有限责任公司在2023年发布了相关团体标准<sup>[6]</sup>,为项目级核算提供了直接技术依据。此外,研究人员还对CCUS项目碳减排核算方法确立与优化进行了一系列研究,如魏宁等<sup>[7]</sup>以福山油田CCUS项目为例进行了核算分析,为量化CCUS

项目对海南高碳排放企业的碳减排潜力与“碳中和”贡献提供了参考。高炜等<sup>[8]</sup>认为核算边界不统一和排放源识别不完整是导致目前碳减排评估结果存在显著差异的主要原因。汪芳等<sup>[9]</sup>提出了覆盖捕集-运输-驱油-埋存全流程的核算模型。郭育婷等<sup>[10]</sup>认为需要进行动态模拟研究。刘宏彬等<sup>[11]</sup>探讨了CCUS示范工程减排量核算方法的应用实践。康蓉等<sup>[12]</sup>基于国际可持续准则理事会(ISSB)标准构建了CCUS全流程温室气体核算体系,为方法学框架构建提供了标准化思路。刘航等<sup>[13]</sup>在新能源背景下对核算边界进行了拓展。上述研究为CCUS-EOR碳核算提供了参考,但该领域研究仍面临显著挑战:(1)核算边界不统一,多数研究聚焦运营阶段,忽略了建设期材料与设备的“隐含碳”以及闭场期封井、长期监测等环节的碳排放,导致核算完整性不足,无法准确反映项目的整体减排效益;(2)核算方法多采用静态模型,缺乏对长期封存效率时变特征的动态考量,难以体现实时“过程排放-累计影响”的关联性。

针对上述问题,本研究以延长石油 $5 \times 10^4$  t/a CCUS-EOR示范项目为实证案例,采用排放因子法与全生命周期评价相结合的方法,构建一套覆盖“筹建-建设-运营-闭场”全过程的碳减排核算与评价体系。通过明确各环节核算边界和基准线情景,实现全流程碳排放的精细化核算,旨在验证CCUS-EOR项目的实际净碳减排效益,并为建立可操作、可核查和可推广的CCUS项目碳核算方法学提供借鉴。

## 1 CCUS-EOR项目全生命周期碳减排评价方法

### 1.1 核算方法选择

在项目或企业层级开展全流程CO<sub>2</sub>排放核算时,常用的方法主要有排放因子法、质量平衡法和实测法。其中,实测法虽然理论上具有较高的精度,但其对连续监测设施的完备性要求比较严格、初始投资较大,并且在CCUS全流程多环节、多排放源的复杂场景下适用性较低;质量平衡法作为一种新兴核算方法,其方法体系尚未完全统一,核算结

果的权威性与横向可比性仍存在争议。相比之下, 排放因子法具有数据基础成熟、核算流程规范和应用广泛等优势, 其结果易于核查且接受度较高, 更适用于CCUS全流程项目的标准化碳排放核算。

根据上述比较结果, 本研究选择排放因子法作为核心核算方法。核算涵盖CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O, 最终结果均以CO<sub>2</sub>当量(t)表示。核算范围覆盖项目的全生命周期, 包括筹建期、建设期、运营期和闭场期4个阶段。依据政府间气候变化专门委员会(IPCC)指南中“关键源”识别原则<sup>[14]</sup>, 本研究仅在运输等明确存在燃料燃烧的环节对CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O进行同步核算, 其余环节则聚焦于CO<sub>2</sub>排放, 以便在确保科学性的同时提高可操作性。

## 1.2 全生命周期核算体系

本研究参照ISO 14064—2<sup>[15]</sup>和清洁发展机制(CDM)<sup>[16]</sup>中关于基准线设定和减排量核算的基本框架, 构建了完整的全生命周期核算体系。减排量为基准线情景排放量与项目情景排放量之差, 具体计算方法见式(1)~式(3)。

$$ER = BE - PE \quad (1)$$

$$BE = E_{\text{捕集}} + E_{\text{运输}} + E_{\text{驱油封存}} + E_{\text{伴生气回收}} + E_{\text{安全监测}} \quad (2)$$

$$PE = E_{\text{筹建期}} + E_{\text{建设期}} + E_{\text{运营期}} + E_{\text{闭场期}} \quad (3)$$

式中, ER为减排量, t; BE为基准线情景排放量, t; PE为项目情景排放量, t;  $E_{\text{捕集}}$ 为基准线情景下捕集环节排放量, t;  $E_{\text{运输}}$ 为基准线情景下运输环节排放量, t;  $E_{\text{驱油封存}}$ 为基准线情景下驱油封存环节排放量, t;  $E_{\text{安全监测}}$ 为基准线情景下安全监测环节排放量, t;  $E_{\text{筹建期}}$ 为项目全生命周期中筹建期排放量, t;  $E_{\text{建设期}}$ 为项目全生命周期中启动和建设期排放量, t;  $E_{\text{运营期}}$ 为项目全生命周期中运营期排放量, t;  $E_{\text{闭场期}}$ 为项目全生命周期中闭场期排放量, t。

各分项排放量的核算基于排放因子法确定, 并根据排放源类型采用相应计算方法。其中, 外购电力消耗产生的间接排放量( $E_{\text{电力}}$ , t)的计算方法见式(4); 柴油和汽油等燃料燃烧产生的温室气体排放量( $E_{\text{燃料}}$ , t)的计算方法见式(5); 筹建期设备材料生产产生的隐含碳( $E_{\text{材料}}$ , t)的计算方法见式(6); 运输和驱油封存等环节的无组织逸散排放量( $E_{\text{逸散}}$ , t)的计算方法见式(7); 闭场期和运营期的监测活动排放量( $E_{\text{监测, 年均}}$ , t/a)按活动频率折算为年均值, 其计算方法见式(8); 筹建期、建设期和闭场期封井作业等一次性排放量( $E_{\text{阶段, 总}}$ , t/a)在项目运行年限内按直线法折摊, 其计算方法见式(9)。

$$E_{\text{电力}} = EC_{\text{电力}} \times EF_{\text{电力}} \quad (4)$$

$$E_{\text{燃料}} = \sum (FC \times EF_i \times GWP_i) \quad (5)$$

$$E_{\text{材料}} = \sum (m_i \times EF_i) \quad (6)$$

$$E_{\text{逸散}} = Q \times \lambda \quad (7)$$

$$E_{\text{监测, 年均}} = E_{\text{单次}} / f \quad (8)$$

$$E_{\text{阶段, 年均}} = E_{\text{阶段, 总}} / N \quad (9)$$

式中,  $EC_{\text{电力}}$ 为电力消耗量, kW·h;  $EF_{\text{电力}}$ 为电力排放因子, kg/(kW·h); FC为燃料消耗量, t;  $EF_i$ 为第*i*种温室气体的排放因子(燃烧1 t燃料产生的温室气体质量), kg/t;  $GWP_i$ 为第*i*种温室气体的全球增温潜势;  $m_i$ 为第*i*种材料的质量, t;  $EF_i$ 为第*i*种材料的碳排放因子(1 t材料产生的CO<sub>2</sub>排放量), t/t;  $Q$ 为CO<sub>2</sub>处理量或注入量, t;  $\lambda$ 为逸散率;  $E_{\text{单次}}$ 为单次监测活动排放量, t;  $f$ 为监测周期, a;  $E_{\text{阶段, 总}}$ 为某阶段一次性排放总量, t;  $N$ 为项目运行年限, a。

## 2 延长石油5 × 10<sup>4</sup> t/a示范项目全生命周期碳减排量分析

### 2.1 示范项目概况

延长石油5 × 10<sup>4</sup> t/a示范项目由陕西延长石油(集团)有限责任公司独立全流程一体化运行, 该项目横跨陕西省榆林市和延安市, 依托榆林煤化有限公司的煤化工装置与靖边油田乔家洼油区, 构建了“煤化工低碳发展-致密油藏绿色开发”联动模式。项目包含由捕集、运输、驱油封存和安全监测4个系统构成的完整技术链条。其中, 捕集系统位于榆林煤化有限公司厂区内, 以低温甲醇洗装置产生的高浓度CO<sub>2</sub>为原料进行提纯; 运输系统采用公路罐车将液态CO<sub>2</sub>输送至220 km外的靖边油田; 驱油封存系统针对鄂尔多斯盆地典型的低孔、低渗和低压岩性油藏开展注入作业; 安全监测系统为“地下-地表-地面”三位一体全方位监测系统。作为百万吨级CCUS项目的关键前期验证工程, 该示范项目可为我国CCUS规模化发展提供重要的技术支撑和实践经验。

### 2.2 核算边界和排放源

CCUS-EOR全流程示范项目碳核算边界涵盖所有耗能工艺单元和潜在泄漏路径, 包括捕集单元、运输单元和驱油与封存单元。其中, 捕集单元边界为捕集装置入口至捕集装置外输气源出口的所有地面工艺设施, 包含边界内其他耗能装置; 运输单元边界为罐车计量装置入口至罐车与采油厂储罐卸车接收装置的所有地面工艺设施; 驱油与封存单元边界起点为注入系统入口, 终点为地面采油装置和环境检测装置。地面边界包括注采、集输、

回收处理和循环注入的地面密闭工艺装置系统;地下边界包括CO<sub>2</sub>自注入井进入地层后在地质体中的

压力波及范围。CCUS-EOR项目碳核算边界示意图见图1。

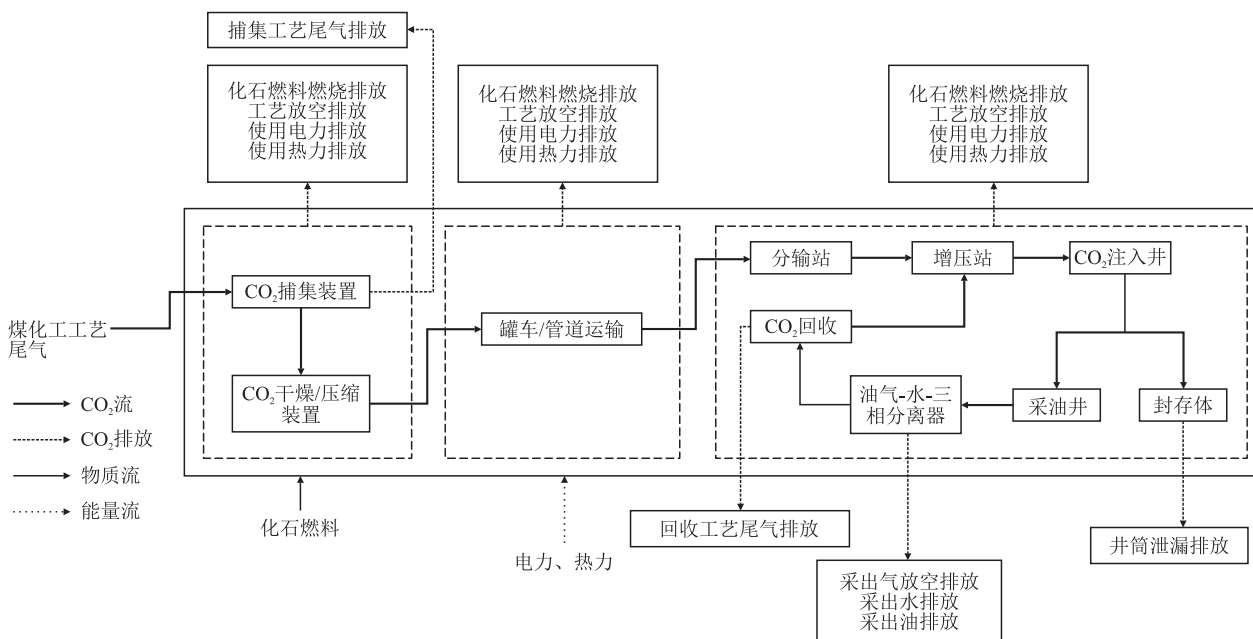


图1 CCUS-EOR项目碳核算边界示意图

Fig. 1 Schematic diagram of carbon accounting boundary of CCUS-EOR project

### 2.3 项目基准线情景分析

根据ISO 14064—2要求,确定本项目活动时的基准线情景。没有开展CCUS-EOR项目之前,对于捕集环节,榆林煤化有限公司生产过程中产生的 $5 \times 10^4 \text{ t/a}$  CO<sub>2</sub>将直接排入大气,即 $E_{\text{捕集}} = 50000 \text{ t}$ ;对于运输环节, $E_{\text{运输}} = 0$ ;对于驱油封存环节,维持注水驱替原油开发, $E_{\text{驱油封存}}$ 按照水驱核心耗能设备的电力消耗计算;对于伴生气回收环节, $E_{\text{伴生气回收}} = 0$ ;对于安全监测环节, $E_{\text{安全监测}} = 0$ 。

基准线排放总量由直接排空的CO<sub>2</sub>量和维持水驱开发所需的能耗排放量共同构成。根据2025年运行数据,该区块注水系统年运行约4000 h,年耗电量为 $1.04 \times 10^5 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。排放因子采用《2023年电力二氧化碳排放因子》中陕西省的排放因子( $0.6335 \text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ )<sup>[17]</sup>。最终,计算出基准线情景下 $E_{\text{驱油封存}} = 65.9 \text{ t}$ 。因此,本研究中示范项目的BE约为50065.9 t。

### 2.4 项目全生命周期各阶段碳排放量核算分析

项目全生命周期碳排放总量为筹建期、建设期、运营期和闭场期各阶段排放量之和<sup>[18-20]</sup>。为保障核算结果的科学性和可核查性,各环节均明确界定了排放源类型和主要温室气体种类,并基于实际消耗数据或工程设计参数进行了量化,同时结合行业一般水平对消耗数据的合理性进行了分析。

#### 2.4.1 筹建期排放量

筹建期排放量主要来源于关键设备材料(压缩机、储罐、换热器和管线等)生产产生的隐含碳。根据主要设备清单,设备总质量为850 t,其中钢材和铝合金质量在总质量中占比分别为80%和20%。参考IPCC排放因子数据库,钢材碳排放因子为2.1 t/t,铝合金排放因子为8.1 t/t。将数据代入式(6)计算出 $E_{\text{筹建期}} = 2805.0 \text{ t}$ 。根据式(9)将 $E_{\text{筹建期}}$ 在20年运营期内进行折摊,计算出 $E_{\text{筹建期,年均}} = 140.0 \text{ t}$ 。

#### 2.4.2 建设期排放量

建设期排放量主要来源于为期3年的场地建设和设备安装能耗,主要排放源包括施工机械设备柴油消耗和施工用电消耗。本阶段排放源类型为燃料燃烧排放(柴油)和间接能源消耗排放(外购电力),主要温室气体为柴油燃烧产生的CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O,以及电力消耗产生的CO<sub>2</sub>。

对于柴油消耗产生的排放,按照柴油消耗量为150 t,参考生态环境部温室气体排放因子数据库(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放因子分别为3100 kg/t、0.3 kg/t和0.6 kg/t,GWP分别为1、28和265)<sup>[21]</sup>,根据式(5)计算出 $E_{\text{柴油}} = 471.7 \text{ t}$ 。

对于施工用电排放,按施工用电消耗量为50000 kW·h,根据式(4)和2023年陕西省电力排放因子计算出 $E_{\text{电力}} = 31.7 \text{ t}$ 。

对于建设期总排放量( $E_{\text{建设期}}, t$ ), 其值为 $E_{\text{柴油}}$ 和 $E_{\text{电力}}$ 之和, 即 $E_{\text{柴油}} + E_{\text{电力}} = 503.4 t$ 。将建设期总排放量在20年内折摊, 根据式(9)计算出 $E_{\text{建设期, 年均}} = 25.2 t/a$ 。

### 2.4.3 运营期排放量

运营期排放量主要来自捕集、运输、驱油封存、伴生气回收和安全监测5个子系统<sup>[22-23]</sup>。本阶段是项目全生命周期中持续时间最长、排放源最复杂的阶段, 各子系统排放源类型包括燃料燃烧排放(运输柴油消耗)、工艺能耗排放(电力消耗)和逸散排放(无组织泄漏)等, 主要温室气体为 $CO_2$ 。运输环节同步核算 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放量。考虑到运营期在全生命周期中的重要性, 运营期排放总量( $E_{\text{运营期}}, t$ )可参考式(2)进行计算(式(10))。

$$E_{\text{运营期}} = E_{\text{捕集}} + E_{\text{运输}} + E_{\text{驱油封存}} + E_{\text{伴生气回收}} + E_{\text{监测}} \quad (10)$$

式中, 各分项分别为捕集系统、运输系统、驱油封存系统、伴生气回收系统、安全监测系统的年排放量,  $t$ 。

#### (1) 捕集系统

捕集系统核算边界自捕集装置入口起, 至罐车装车出口计量装置止, 包括压缩、液化、制冷和储装全流程。以榆林煤化有限公司 $5 \times 10^4 t/a$   $CO_2$ 提纯装置为例, 其主要耗电设备为 $CO_2$ 压缩单元(含进料缓冲罐、气液分离器、加压泵和压缩机)、800 kW丙烯制冷压缩机等。系统年运行8000 h, 耗电量 $788 \times 10^4 kW \cdot h$ 。根据式(4)计算出捕集系统电力消耗排放量 $E_{\text{捕集, 电}} = 4992.0 t$ 。将操作人员通勤等辅助活动产生的间接排放按15.0 t进行折算, 计算出 $E_{\text{捕集}} = 5007.0 t$ 。

#### (2) 运输系统

采用公路罐车运输液态 $CO_2$ , 运输距离220 km, 罐车空载返回。全年柴油消耗约258.7 t, 根据式(5)计算出柴油燃烧排放 $E_{\text{运输, 燃料}} = 803.6 t$ 。

运输过程逸散排放主要发生在装卸环节, 参考IPCC泄漏系数(0.05%~0.10%)和同类项目经验值, 取泄漏系数为0.05%, 估算出逸散排放约2.5 t。因此,  $E_{\text{运输}} = E_{\text{运输, 燃料}} + 2.5 t = 806.1 t$ 。

#### (3) 驱油封存系统

驱油封存系统主要设备包括储罐、注入泵和喂液泵等, 总功率279 kW, 年运行8000 h, 耗电量 $223.2 \times 10^4 kW \cdot h$ 。根据式(4)计算出该系统的电力消耗排放量 $E_{\text{驱油封存, 电}} = 1414.0 t$ 。

对于驱油封存系统, 无组织泄漏主要发生于井口、阀门等潜在泄漏点, 参考同类项目经验值取泄漏系数为0.01%进行估算, 年泄漏量约5.0 t。因此,

驱油封存系统年排放总量 $E_{\text{驱油封存}} = 1419.0 t$ 。

#### (4) 伴生气回收系统

伴生气回收系统采用膜分离法提纯伴生气, 随后压缩回注。排放源为电力消耗, 主要温室气体为 $CO_2$ 。系统年运行约6000 h, 压缩注入单元电耗 $127.2 \times 10^4 kW \cdot h$ , 膜分离单元电耗约 $45.0 \times 10^4 kW \cdot h$ , 总电耗 $172.2 \times 10^4 kW \cdot h$ 。根据式(4)计算出伴生气回收系统电力消耗排放量 $E_{\text{伴生气回收}} = 1090.9 t$ 。

#### (5) 安全监测系统

对于安全监测系统, 空中采用无人机巡护与遥感卫星监测; 地面布设太阳能供电的大气 $CO_2$ 浓度传感器、土壤通量监测站和井口压力仪表; 地下主要通过时移垂直地震剖面(VSP)技术分析 $CO_2$ 注入前后储层的地震响应变化, 确定 $CO_2$ 的运移范围和方向。其中, 无人机和遥感卫星数据由专业机构提供, 其间接排放已计入社会平均排放, 在本项目中可视作零; 地面监测设备完全依托太阳能供电, 运行期无直接碳排放。因此, 安全监测系统的碳排放主要是地下VSP监测的作业能耗。参考《油气田勘探开发建设项目碳排放核算指南》, 单次作业消耗柴油15000 L(约12.75 t), 按每两年作业一次, 年均柴油消耗量为6.375 t。根据式(5)计算出安全监测系统的排放量 $E_{\text{监测}} = 20.8 t$ 。将运营期内各系统排放量进行了汇总分析, 结果见表1。由表1可知, 运营期内该项目的 $CO_2$ 年排放量总计8342.2 t, 包含 $CH_4$ 和 $N_2O$ 折算结果的合计年碳排放量为8343.8 t。

表1 运营期内延长石油 $5 \times 10^4 t/a$ 示范项目年排放量分析结果  
Table 1 Analysis results of annual emissions of Yanchang Petroleum's  $5 \times 10^4 t/a$  demonstration project during operation period

系统	排放量 / t		
	$CO_2$	$CH_4$	$N_2O$
捕集	5007.0	—	—
运输	804.5	0.52	1.08
驱油封存	1419.0	—	—
伴生气回收	1090.9	—	—
安全监测	20.8	—	—

运营期内各系统的排放构成见图2。在运营期内, 捕集系统是碳排放的最大来源, 其产生的排放量在排放总量中的占比高达60.0%, 主要原因在于 $CO_2$ 压缩、液化过程均属于高能耗过程; 驱油封存和伴生气回收系统的占比分别为17.0%和13.1%, 这两种系统的碳排放主要来自泵注设备的电力消耗; 运输系统的占比为9.7%, 碳排放主要来源于柴油燃

烧;监测系统的占比为0.2%,碳排放强度最低。由此可见,在考虑如何降低CCUS技术碳排放强度时,可优先考虑提升捕集系统的能效,其次是优化驱油封存和伴生气回收系统的能效。

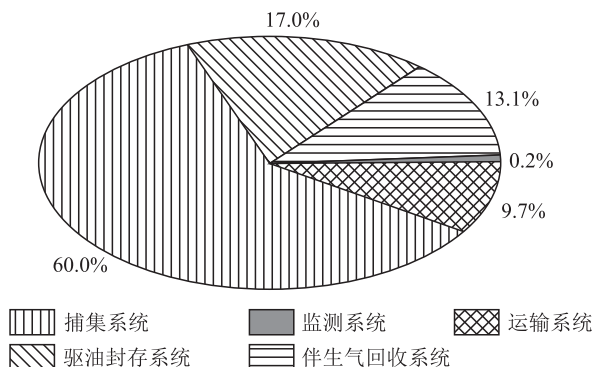


图2 运营期内各系统碳排放构成

Fig. 2 Compositions of carbon emission of each system during operation period

#### 2.4.4 闭场期排放量

闭场期碳排放主要源于封井作业和后续长期监测两个阶段。闭场期排放源类型为封井作业的设备燃料(柴油)燃烧排放和监测活动的能耗排放,主要温室气体为 $\text{CO}_2$ ,同步核算柴油燃烧产生的 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 。闭场期排放总量( $E_{\text{闭场期}}$ ,t)的计算方法见式(11)。

$$E_{\text{闭场期}} = E_{\text{封井}} + E_{\text{监测,闭场}} \quad (11)$$

式中, $E_{\text{封井}}$ 为封井作业产生的温室气体排放量,t; $E_{\text{监测,闭场}}$ 为闭场后长期监测产生的折摊排放量,t。

对于封井作业,按照1年集中实施考虑,柴油消耗量为20 t,根据式(5)计算出 $E_{\text{封井}} = 62.9$  t。对于闭场后长期监测,主要监测活动为地下VSP监测,监测频率为5年一次。参考运营期VSP监测的单个作业能耗(约12.75 t),闭场后长期监测年均柴油消耗量折算为约2.55 t,根据式(5)计算出 $E_{\text{监测,闭场}} = 8.34$  t。将封井作业一次性排放量折摊至20年,根据式(9)计算出闭场期年均排放量 $E_{\text{闭场期,年均}} = 11.5$  t。

#### 2.5 全生命周期碳排放分析

将筹建期、建设期和闭场期的总排放量在项目20年运营期内进行折摊,对全生命周期各阶段的年碳排放量进行了分析,结果见表2。由表2可知,项目全生命周期年均碳排放量为8520.5 t,其中运营期碳排放在全生命周期排放中占比为97.9%,是项目排放的主体阶段;筹建期(1.6%)、建设期(0.3%)和闭场期(0.1%)的占比合计为2.1%。该结果系统纳入了前端建设和后端闭场的碳排放影响,体现了全

生命周期核算的完整性,真实、完整地反映了CCUS-EOR项目的实际净碳减排效益,从全生命周期视角有力验证了CCUS-EOR技术在化石能源低碳化利用中的深度减排性能,为其参与碳市场交易和获取减排收益提供了一定量化依据。

表2 全生命周期各阶段延长石油 $5 \times 10^4$  t/a示范项目的年碳排放量分析结果

Table 2 Analysis results of annual carbon emission of Yanchang Petroleum's  $5 \times 10^4$  t/a demonstration project at each stage of full life cycle

阶段	年排放量/t	占比/%	备注
筹建期	140.0	1.6	设备隐含碳折摊
建设期	25.2	0.3	将3年能耗排放折摊至20年
运营期	8343.8	97.9	主体运行排放
闭场期	11.5	0.1	封井和监测折摊

结合式(1)和表2计算出 $ER = 41545.4$  t,然后对示范项目碳减排核算结果进行了汇总分析,结果见表3。由表3可知,在20年全生命周期内,项目累计净减排量约为 $83.1 \times 10^4$  t,相当于减少约 $36 \times 10^4$ 辆乘用车一年的碳排放量,平均减排效率为83.0%。

表3 延长石油 $5 \times 10^4$  t/a示范项目碳减排核算分析结果

Table 3 Analysis results of carbon emission reduction accounting of Yanchang Petroleum's  $5 \times 10^4$  t/a demonstration project

项目	数值	备注
BE/t	50065.9	捕集环节直接排空+水驱能耗
PE/t	8520.5	包括筹建、建设、运营和闭场
ER/t	41545.4	综合考量设备能效衰减和地质封存效率的时变特征,动态模拟
全生命周期平均减排效率/%	83.0	ER与BE之比
项目运行年限/a	20	按设计运行期
20年累计净减排量/t	$83.1 \times 10^4$	

### 3 结论

本文以延长石油 $5 \times 10^4$  t/a CCUS-EOR示范项目为案例,构建并验证了一套覆盖“筹建-建设-运营-闭场”全生命周期的碳减排核算与评价方法,得出如下结论。

(1)构建了基于排放因子法的全生命周期碳核算方法。该方法将系统边界划分为捕集、运输、驱油封存、伴生气回收和安全监测,基准线情景设定为 $\text{CO}_2$ 直接排空和水驱开发,核算范围包括筹建期(设备隐含碳)、建设期(施工能耗)、运营期(生产能

耗和逸散)和闭场期(封井和长期监测)4个阶段。

(2)实证量化了延长石油 $5 \times 10^4$  t/a CCUS-EOR示范项目的全生命周期净减排效益。其中,项目年基准线排放量为50065.9 t,全生命周期年均排放量为8520.5 t,年净减排量为41545.4 t,全生命周期平均减排效率为83.0%。在20年运营期内,项目的累计净减排量为 $83.1 \times 10^4$  t。

(3)捕集系统是示范项目自身碳排放的最大来源,其运营期排在在排放总量中的占比为60.0%。

### 参考文献

- [1] 张贤,李凯,马乔,等. 碳中和目标下CCUS技术发展定位与展望[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31: 29-33.  
ZHANG X, LI K, MA Q, et al. Orientation and prospect of CCUS development under carbon neutrality target [J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31: 29-33.
- [2] MING Q H, RAN B, YANG L. A review of CO<sub>2</sub> capture utilization and storage in China: Development status, cost limits, and strategic planning [J]. Processes 2025, 13: 905.
- [3] LU Y J, FAN Q B, YANG M P. Research and prospect of CCUS-EOR technology and carbon emission reduction accounting evaluation [J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2025, 15(1): 79-97.
- [4] International Organization for Standardization. Carbon dioxide capture, transportation and geological storage—Quantification and verification: ISO/TR 27915 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.
- [5] 山东省市场监督管理局. 二氧化碳驱油封存项目碳减排量核算技术规范: DB37/T 4548—2022 [S]. 济南: 山东省市场监督管理局, 2022.  
Shandong Provincial Administration for Market Regulation. Technical specification for carbon emission reduction accounting of carbon dioxide flooding and storage projects: DB37/T 4548—2022 [S]. Jinan: Shandong Provincial Administration for Market Regulation, 2022.
- [6] 延长石油(集团)有限责任公司. 二氧化碳捕集、利用与封存项目碳减排量核算技术指南: T/YCY 001—2023 [S]. 北京: 延长石油(集团)有限责任公司, 2023.  
Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd. Technical guide for carbon emission reduction accounting of carbon capture, utilization and storage projects: T/YCY 001—2023 [S]. Beijing: Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., 2023.
- [7] 魏宁,林克瑶,刘胜男,等. CCUS碳减排潜力与碳中和贡献研究方法: 多尺度优化与实证[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(9): 1-10.  
WEI N, LIN K Y, LIU S N. A methodology for CCUS carbon reduction potential and carbon neutrality contribution: Multi-scale optimization and empirical exploration [J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(9): 1-10.
- [8] 高炜,白平,王鸿,等. CCUS项目的温室气体排放核算方法学思考[J]. 中国国土资源经济, 2022, 35(4): 12-21.  
GAO W, BAI P, WANG H, et al. Consideration on greenhouse gas emission accounting methodology of CCUS project [J]. Natural Resource Economics of China, 2022, 35(4): 12-21.
- [9] 汪芳,廖广志,苏春梅,等. 二氧化碳捕集、驱油与封存项目碳减排量核算方法[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(4): 862-871.  
WANG F, LIAO G Z, SU C M, et al. Carbon emission reduction accounting method for a CCUS-EOR project [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 862-871.
- [10] 郭育婷,王浩璠,李琳,等. 二氧化碳捕集与封存技术碳减排量核算方法研究[J]. 环境工程, 2025, 43(12): 222-236.  
GUO Y T, WANG H F, LI L, et al. A carbon emission reduction calculation method for carbon dioxide capture and storage technology [J]. Environmental Engineering, 2025, 43(12): 222-236.
- [11] 刘宏彬,孟岚,尤元鹏,等. CCUS示范工程碳资产开发减排量核算方法研究与应用[J]. 石油科技论坛, 2024, 43(1): 59-65+77.  
LIU H B, MENG L, YOU Y P, et al. Research and application of accounting method for reduction of carbon emission based on carbon asset development from CCUS demonstration project [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2024, 43(1): 59-65+77.
- [12] 康蓉,李晓岚,刘德超,等. ISSB标准下CCUS项目全流程温室气体核算体系的构建[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2025, 55(5): 979-993.  
KANG R, LI X L, LIU D C, et al. Construction of greenhouse gas accounting system for the whole process of CCUS project under ISSB standard [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2025, 55(5): 979-993.
- [13] 刘航,陈誉荣,张紫萱,等. 新能源背景下的CCUS全流程碳排放核算[J]. 世界石油工业, 2025, 32(4): 141-153.  
LIU H, CHEN Y R, ZHANG Z X, et al. Carbon emission accounting for full CCUS process in the context of new energy [J]. World Petroleum Industry, 2025, 32(4): 141-153.
- [14] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Kanagawa: IPCC, 2006.
- [15] International Organization for Standardization. Greenhouse gases—Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements: ISO 14064—2 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2019.
- [16] UNFCCC. Clean development mechanism (CDM) methodology booklet [R]. Bonn: UNFCCC, 2020.

- [17] 中华人民共和国生态环境部. 关于发布2023年电力二氧化碳排放因子的公告[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, (2025-12-31)[2026-03-10]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202512/t20251231\\_1139517.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202512/t20251231_1139517.html). Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Announcement on issuing the 2023 carbon dioxide emission factors for electricity [EB/OL]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, (2025-12-31)[2026-03-10]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202512/t20251231\\_1139517.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202512/t20251231_1139517.html).
- [18] 乔明, 李刚, 于淼, 等. 油田二元驱地面系统碳排放核算与减排对策[J]. 石油与天然气化工, 2025, 54(6): 146-154. QIAO M, LI G, YU M, et al. Carbon emission accounting and emission reduction countermeasures for polymer-surfactant binary flooding ground system in oilfield [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2025, 54(6): 146-154.
- [19] 余晓钟, 刘梦薇, 白龙, 等. “双碳”背景下油气企业高质量发展的内涵、挑战及路径[J]. 油气储运, 2024, 43(4): 457-463. YU X Z, LIU M W, BAI L, et al. Discussion on connotations, challenges, and paths for high-quality development of oil and gas enterprises under the background of “dual carbon” [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(4): 457-463.
- [20] 汪芳, 马建国, 李明卓, 等. 基于碳排放核算的CCUS源汇匹配和部署研究[J]. 石油科技论坛, 2024, 43(1): 78-85. WANG F, MA J G, LI M Z, et al. Research on CCUS source-sink matching and distribution based on accounting carbon emission reduction [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2024, 43(1): 78-85.
- [21] 中华人民共和国生态环境部. 国家温室气体排放因子数据库(第二版)正式发布[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, (2026-03-01)[2026-03-10]. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtz/202603/t20260301\\_1145117.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtz/202603/t20260301_1145117.shtml). Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. National greenhouse gas emission factor database (Second Edition) has been officially released [EB/OL]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, (2026-03-01)[2026-03-10]. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtz/202603/t20260301\\_1145117.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtz/202603/t20260301_1145117.shtml).
- [22] 王维波, 汤瑞佳, 江绍静, 等. 延长石油煤化工CO<sub>2</sub>捕集、利用与封存(CCUS)工程实践[J]. 非常规油气, 2021, 8(2): 1-7+106. WANG W B, TANG R J, JIANG S J, et al. The engineering practice of CO<sub>2</sub> capture, utilization and storage (CCUS) in coal chemical industry of Yanchang Petroleum [J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(2): 1-7+106.
- [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. KANG Y L, BAI Y W, JIANG S J, 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.