



## 我国脱碳路径与油公司能源转型策略研究

廖璐璐 李根生 宋先知 冯连勇 高启超 程世忠

### The Study on Decarbonization Pathway and Structural Transformation of Oil Companies in China

LIAO Lulu, LI Gensheng, SONG Xianzhi, FENG Lianying, GAO Qichao, CHENG Shizhong

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2022120>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 碳中和约束下油气行业发展形势及应对策略

Development Situation and Countermeasures of the Oil and Gas Industry Facing the Challenge of Carbon Neutrality

石油钻探技术. 2021, 49(5): 1–6 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021070>

#### 耐高温低碳烃无水压裂液室内研究

Experimental Research on Performances of Hydrocarbon-Based Heat-Resistance Low-Carbon Fracturing Fluid

石油钻探技术. 2017, 45(4): 93–96 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201704016>

#### 大数据技术在石油工程中的应用现状与发展建议

Application Status and Development Suggestions of Big Data Technology in Petroleum Engineering

石油钻探技术. 2021, 49(2): 72–78 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020134>

#### 可溶桥塞整体式卡瓦结构优化设计

Optimization of the Structural Design of the Integral Slip of a Soluble Bridge Plug

石油钻探技术. 2019, 47(1): 69–75 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018151>

#### 低油价下石油工程技术创新特点及发展方向

The Characteristics of Petroleum Engineering Technology Design and Innovation in a Low Oil Price Environment

石油钻探技术. 2018, 46(6): 1–8 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018133>

#### 东风港油田特低渗透油藏微观孔隙结构及渗流特征试验研究

Experimental Study on Micro-Pore Structure and Seepage Characteristics of Ultra-Low Permeability Reservoirs in the Dongfenggang Oilfield

石油钻探技术. 2017, 45(2): 96–100 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201702016>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀低碳减碳▶

doi:10.11911/syztjs.2022120

引用格式: 廖璐璐, 李根生, 宋先知, 等. 我国脱碳路径与油公司能源转型策略研究 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(1): 115-122.

LIAO Lulu, LI Gensheng, SONG Xianzhi, et al. The study on decarbonization pathway and structural transformation of oil companies in China [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(1): 115-122.

## 我国脱碳路径与油公司能源转型策略研究

廖璐璐<sup>1,2</sup>, 李根生<sup>1</sup>, 宋先知<sup>1</sup>, 冯连勇<sup>1</sup>, 高启超<sup>2</sup>, 程世忠<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206)

**摘 要:** 2015 年,《巴黎协定》提出本世纪末全球平均气温较工业化前水平上升幅度控制在 2℃ 之内,为积极应对气候变化,我国政府提出了“2030 碳达峰,2060 碳中和”的目标,但低碳运行下的经济体转型仍面临严峻挑战。为此,基于碳市场、碳交易与碳政策的现状,利用数据挖掘和人工智能数据分析,对全球 CO<sub>2</sub> 排放现状和“双碳”目标下国际油气公司的能源转型举措进行了调研分析,并基于我国碳排放及油气领域实用“脱碳”技术现状,给出了我国“脱碳”路径的 4 项建议,包括推广低碳新材料和新技术、推行通用碳市场标准、制定绿色转型企业保护性政策和激励低碳研发等,提出了我国油公司能源转型的 5 个关键方向,包括加速低碳化油气勘探开发、开展碳足迹全链评价、推进页岩气智能集约开发、加快氢能技术和 CCUS 技术研发等。这对我国双碳目标的实现和油公司的顺利转型具有一定的指导意义。

**关键词:** 脱碳路径; 结构转型; 转型策略; 双碳政策; CCUS; 低碳开发

中图分类号: X321

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)01-0115-08

## The Study on Decarbonization Pathway and Structural Transformation of Oil Companies in China

LIAO Lulu<sup>1,2</sup>, LI Gensheng<sup>1</sup>, SONG Xianzhi<sup>1</sup>, FENG Lianyong<sup>1</sup>, GAO Qichao<sup>2</sup>, CHENG Shizhong<sup>1</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing, 102206, China)

**Abstract:** The 2015 Paris Agreement proposed that the global average temperature rise by the end of the century should be controlled within 2℃ above pre-industrial levels. In order to actively respond to climate change, the Chinese government has put forward the goal of “carbon peaking by 2030 and carbon neutrality by 2060”. However, the economic transformation under low-carbon operation still faces severe challenges. In this regard, based on the carbon market, carbon trading and carbon policy, the status of global CO<sub>2</sub> emissions and the energy transformation measures taken by international oil and gas companies for the dual carbon goal were investigated and analyzed with data mining and artificial intelligence data analysis. Based on the status of carbon emission in China and the practical decarbonization technologies in the oil and gas field, four key recommendations for decarbonization pathways were put forward, including popularizing new low-carbon material and technologies, promoting general carbon market standards, formulating protective policies for green transformation enterprises, and encouraging low-carbon research and development. What's more, five key areas for the energy transformation of oil companies in China were proposed, which are accelerating low-carbon development and exploration of oil and gas, carrying out carbon footprint full-chain evaluation, promoting intelligent and intensive development of shale gas, expediting research and development of hydrogen energy and CCUS technology. The research results can provide a valuable reference for the achievement of the dual carbon goal and the smooth transformation of oil companies.

**Key words:** decarbonization pathway; structural transformation; transformation strategy; dual carbon policy; carbon capture, utilization and storage; low-carbon development

收稿日期: 2022-07-07; 改回日期: 2022-11-06。

**作者简介:** 廖璐璐 (1988—), 女, 湖北松滋人, 2011 年毕业于中国石油大学 (北京) 油气储运专业, 2013 年获美国德州农工大学石油工程专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事油藏工程、数值模拟、大数据和人工智能在油气田中的应用、二氧化碳评估与监测等方面的研究。E-mail: lulu.liao.sripe@sinopec.com。

**通信作者:** 李根生, ligs@cup.edu.cn。

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划项目“复杂油气智能钻井理论与方法” (编号: 2019YFA0708300) 和中国石化科技前瞻项目“基于 AI 的加拿大 Wapiti 致密储层工程参数优化” (编号: P21031-1) 联合资助。

2020年,全球产生了 $380 \times 10^8 \text{ t CO}_2$ (占总温室气体的67%)。中国、美国、印度、欧盟27国、英国、俄罗斯和日本的化石燃料消耗总量占全球化石燃料总消耗量的62%,占全球化石燃料 $\text{CO}_2$ 总排放量的67%<sup>[1]</sup>。全球环境形势日益严峻,中国在第75届联合国大会上提出将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施, $\text{CO}_2$ 排放力争于2030年前达到峰值、2060年前实现碳中和。

目前,全世界面临的一项重大挑战是如何在提供更多能源的条件下减少碳排放。自20世纪70年代以来,虽然全球最终能源消耗量翻了一番,但能源结构一直保持相对稳定,其中碳氢能源占比一直稳定在80%左右(煤炭约占2/3),生物质能约占10%(大部分为粪便和木质燃料),核能占6%,水电占3%,可再生能源(如太阳能和风能)占比约1%~2%<sup>[2]</sup>。21世纪以来,随着新兴技术的大量涌现和环境压力不断增加,中国经济面临新的机遇和挑战,亟需改变能源结构,但低廉的煤炭价格和便捷的油气使用现状,使得这种改变难以自发完成<sup>[3]</sup>。实现净零排放需要进行能源体系的结构性转型,包括减少传统一次能源(如石油、天然气、煤炭等)的消耗,提升可再生能源和核能等绿色能源的比例、提高能源转化效率,以及家庭、办公室、运输系统和工业中能源的利用效率等。社会能够以多快的速度

进行脱碳,能够达到什么程度,主要取决于能源和材料的需求模型能否改变,以及这种改变能达到什么程度。为了实现“双碳”目标,实现可持续发展,亟需立足现实,提出一套科学可行的实用脱碳路径和转型策略<sup>[4]</sup>。为此,基于碳市场、碳交易、碳政策现状,立足社会和油气工程层面,全面分析了世界能源结构的现状和趋势、不同行业的“脱碳”潜力以及石油天然气领域的实用“脱碳”技术现状,提出了我国4项脱碳建议和油气公司转型的5个关键方向。

## 1 全球 $\text{CO}_2$ 排放现状及特点

“碳中和”中的“碳”狭义上指的是 $\text{CO}_2$ ,更为宽泛的则指温室气体。国际能源署(IEA)的统计数据显示,全世界排放的温室气体73%为 $\text{CO}_2$ 。为此,分析全球 $\text{CO}_2$ 排放现状可以为我国在“碳中和”背景下的脱碳路径选择提供借鉴。

近年来全球 $\text{CO}_2$ 排放量总体上升,为此,对网络数据进行数据挖掘,收集了全球100多个国家和地区 $\text{CO}_2$ 排放量的数据、各国的减碳政策以及石油领域内各大型跨国公司的战略措施等信息,结合人工智能(AI)分析结果,按照碳排放趋势将不同国家和地区分为3类,如图1所示。

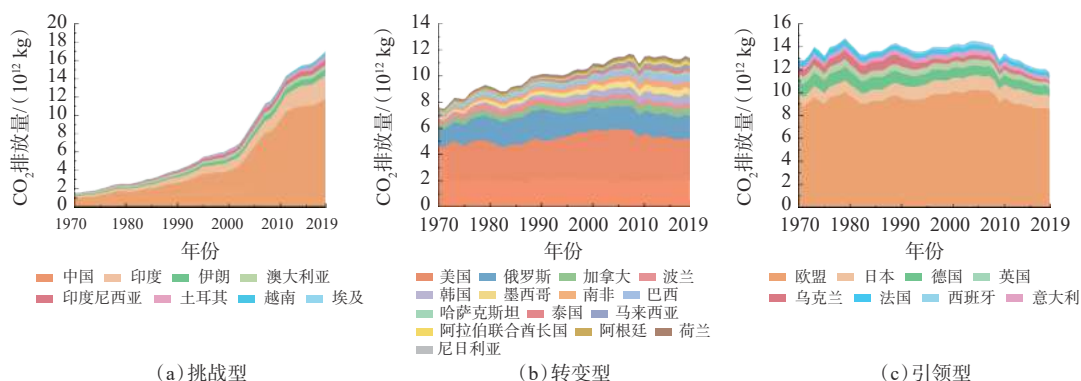


图1 基于碳排放趋势的全球不同国家或地区分类

Fig.1 Classification based on the trend of carbon emissions in different countries and areas around the world

1) 控碳挑战严峻型(挑战型): 主要代表为中国、印度、伊朗、澳大利亚、印度尼西亚、土耳其、越南和埃及等国家,这一类国家普遍是经济发展中国家,工业化发展还未完全成熟,城市化进程不完全,经济向上驱动力强。 $\text{CO}_2$ 排放总量增长趋势的分析结果发现,此类国家由于前期工业化发展起步较晚,前期 $\text{CO}_2$ 排放量低且增长缓慢;近30年来,随

工业化、城市化发展, $\text{CO}_2$ 排放量有显著增长趋势。工业化和城市化发展的需求常伴随高 $\text{CO}_2$ 排放,因此,此类国家所面临脱碳挑战较为严峻。

2) 控碳挑战转变型(转变型): 主要代表国家有美国、俄罗斯、加拿大、波兰、韩国、墨西哥、南非、巴西、哈萨克斯坦、泰国、马来西亚、阿联酋、阿根廷、荷兰和尼日利亚等国,该类国家经济普遍较发

达, CO<sub>2</sub> 排放总量整体上呈缓慢增长的趋势, 由于工业化、城市化发展比较健全, 工业能耗相对稳定, 因发展产生的新增 CO<sub>2</sub> 排放较少, 虽经济向上驱动力较强, 但所面临脱碳挑战不大。

3) 控碳挑战引领型 (引领型): 主要代表国家有德国、意大利、法国、西班牙、英国、乌克兰和日本等国, 这一类国家普遍经济发达, 工业化、城市化已经完成, 虚拟经济总量超过实体经济总量, 经济向上驱动力较弱, CO<sub>2</sub> 排放总量整体上维持稳定, 近 30 年逐渐降低, 控制 CO<sub>2</sub> 排放与其发展趋势相匹配, 因此所面临脱碳挑战较低。

## 2 我国“脱碳”路径分析

数据表明, 我国近 30 年 CO<sub>2</sub> 排放量显著增加。从 CO<sub>2</sub> 排放量总体趋势来看, 我国是典型的控碳“挑战型”国家, 如图 1(a) 所示, 1990—2005 年, 我国碳排放量开始了第 1 轮显著增长, 排放量增加了 100%; 2005—2020 年, 开始了第 2 轮显著增长, 排放量增加了 75%。另一方面, 从不同领域排放量在碳排放中的占比看, 我国工业排放占比较大, 这也对一次能源的开发和利用提出了更高的脱碳要求。因此, 我国将面临一条较为艰辛的“碳中和”之路, 在实现“双碳目标”的过程中, 需统筹兼顾 3 个要求: 1) 满足我国经济发展过程中, 人们对美好生活提升的要求; 2) 满足地理广阔却差异性极大的自然地域性差异要求; 3) 满足稳步过渡和国家能源安全的要求。

我国能源转型的布局将多元化, 除了可再生能源 (包括太阳能、风力、生物质能) 外, 水力发电、核能驱动、地热和天然气等绿色低碳能源, 都是多元能源战略, 对于改善能源结构、保护生态环境、应对气候变化、实现经济社会可持续发展、保障国家能源安全以及提升居民生活水平都具有重要意义<sup>[5]</sup>。

我国的脱碳政策可从以下 4 方面展开:

1) 制定支持长期基础设施建设的政策, 推动低碳新材料和新技术的推广使用。

2) 通过碳交易、碳排放税和碳排放交易标准等方式制定全国通行的碳定价, 建立低成本、高效益机制, 协调全国各地的碳减排激励措施。

3) 建立保护性政策, 缓解能源转型对弱势经济领域和社会各阶层产生的负影响。同时, 该保护性

政策应有一定时效性, 主要目的是减少在实现“碳中和”目标过程中必要转型重组对经济产生的扰乱和负面影响。

4) 为低碳研究和发展提供其他经济支持和激励机制, 尤其是在关键行业、前景技术的早期研发和部署阶段。该项政策与“碳交易”“碳市场”等活动的持续推广和认可度的增加, 将产生推动技术持续进步的涌现效应。

## 3 国际油气公司的能源转型策略

占比 27% 的非 CO<sub>2</sub> 温室气体同样对环境产生着巨大影响<sup>[5]</sup>。CH<sub>4</sub> 在非 CO<sub>2</sub> 温室气体中占比较大, 是天然气的主要成分<sup>[6]</sup>。空气中的 CH<sub>4</sub> 主要来源于油气开采和储运过程中的泄漏, 同时农业活动中也会产生 CH<sub>4</sub> 排放。据 IEA 统计, 2018 年全球 CH<sub>4</sub> 排放量为  $5.7 \times 10^8$  t, 相当于  $171 \times 10^8$  t CO<sub>2</sub>。CH<sub>4</sub> 百年尺度的增温潜势是 CO<sub>2</sub> 的 21 倍左右, 是实现有效减排需要着重控制的一类温室气体<sup>[7]</sup>, 因此, 国际油气公司能源转型中, 也多涉及 CH<sub>4</sub> 的控排策略。总体而言, 国际油气公司的能源转型策略可划分为激进型和温和型 2 类<sup>[8]</sup>。

国际油气公司的能源转型策略存在明显差异, 以 BP、壳牌、道达尔能源、雷普索尔、挪威国家石油公司等为代表的部分欧洲石油公司采取了较激进的能源转型策略<sup>[8]</sup>。在战术层面上, 不同国际油气公司的转型策略与主要指标如表 1 所示。在战略层面上, 欧洲石油公司普遍认为, “去碳化”和“电气化”是未来能源发展的方向, 油气需求逐年减少, 油气公司必须向“大能源”企业转型。

### 3.1 激进型能源转型策略

采取激进型能源转型策略的油气公司对减碳抱有更高的热情, 主动采取更为大胆的措施, 大幅降低碳排放强度, 并计划 2050 年在全球范围内实现净零排放。

这些油气公司通常会降低油气主业的比例, 引入和发展风能、电能、太阳能等业务, 最终将转型为清洁能源公司。例如, BP 宣布将积极应对全球能源市场的新变化, 力争 2050 年前实现净零排放, 在持续降低公司油气生产产生碳排放的同时, 增大对非油气业务的投资比例。壳牌近年来坚持执行“压油、增气、拓绿”战略, 也计划购买更多在可再生能源领域拥有专长的技术公司, 将电力等融入公司的新商业模式, 并扮演世界领先者的角色, 计划 2050



表 1 不同国际油气公司的能源转型策略及主要指标  
Table 1 Main indicators and transformation strategies of different international oil companies

公司	主要指标
BP	2025年, 油气生产的CH <sub>4</sub> 排放强度下降到0.2%
	2030年, 运营所产生的碳排放放在2019年基础上减少30%~35%, 产品碳强度在2019年的基础上降低15%
	2050年或之前, 成为净零排放公司, 上游油气产品排放达到净零, 产品碳排放强度降低50% (全生命周期)
壳牌	2025年, 油气生产的CH <sub>4</sub> 排放强度下降到0.2%
	2035年, 能源产品碳足迹将比2016年减少30%
	2050年或更早实现能源业务净零排放, 产品制造过程实现净零排, 协助客户使用壳牌能源产品实现净零排放, 能源产品碳足迹减少65%
雷普索尔	2016年为基准, 到2025年碳排放强度下降10%, 以炼油为主的工业领域直接排放减少25%, 低碳发电领域增加至7.5 GW
	2030年碳排放强度下降20%, 2040年下降40%, 2050年实现净零排放
	2026年可再生能源产能提高10倍, 达到4~6 GW
挪威国家石油	2030年挪威地区油气生产过程中的排放量降低40%, 消除常规火炬, 实现CH <sub>4</sub> 净零排放
	2035年可再生能源产能增加至12~16 GW, 发展成为全球海上风电产业巨头
	2040年挪威地区油气生产过程中的排放量降低70%
	2050年碳排放强度降低50%, 挪威地区油气生产过程实现净零排放
道达尔	2025年CH <sub>4</sub> 排放强度控制在0.2%以下
	2030年全球生产和能源产品碳排放强度降至15%
	2050年或之前, 在全球范围内实现净零排放

年或更早实现能源业务净零排放。

### 3.2 温和型能源转型策略

采取温和型能源转型策略的油气公司认为减碳是一个长期过程, 因而被动采取相对保守的减碳措施, 以稳定油气主业为主, 逐步完成低碳、去碳目标。

这些油气公司通常会维持和稳定主业优势, 研发碳捕集与封存技术(CCS), 发展天然气等低碳资源。例如, 以埃克森美孚和雪佛龙为代表的美国油气公司, 认为疫情是石油大周期中的短波动, 后疫情时代石油需求将延续增长态势, 且碳达峰至少还需要 10~15 年, 石油需求市场长期向好, 因此采取以“去碳化”为主的相对保守的能源转型策略。其中, 埃克森美孚在稳定主业、持续降低生产成本的基础上, 采取了多种措施实现公司业务低碳化, 包括提高天然气业务比例、加强碳捕集与封存技术研发、投资生物质能, 以及持续剥离油砂等“高碳”资产。

总体来说, 无论是激进的去传统能源标签, 还是保守的开发碳捕集技术, 油公司与油服公司能源转型的主要举措可总结为:

- 1) 设定低碳发展目标, 实施绿色低碳战略;
- 2) 加速低碳转型, 大力发展新能源业务;
- 3) 加快减排能力建设, 强化低碳减排技术攻关与应用。

## 4 我国油气公司能源转型发展方向

我国油气资源的特点是少油多气、非常规资源丰富, 重工业发展对化石能源存在刚性需求, 油气公司在油气钻探开发方面具有技术优势, 而且短时间内化工、物料基础性材料具有不可替代性<sup>[9]</sup>, 因而, 我国油气公司能源转型应在 5 个关键方向上进行发力。

### 4.1 低碳化油气勘探开发

据 IEA 统计, 化石能源是现今碳排放的主要来源。2019 年, 煤炭、石油、天然气及其他能源的碳排放量分别占总碳排放量的 44%, 34%, 21% 和 1%。其中, 天然气因具有较高的热值和较低的碳排放量, 被称为“低碳能源”<sup>[10]</sup>。

从安全环保和燃烧效能角度看, 天然气燃烧释放较多能量的同时能产生较少的 CO<sub>2</sub>。相对于石油和煤炭, 天然气具备燃烧高效、排放低碳、清洁等方面的优点, 或将成为未来全球唯一保持增长的化石能源。天然气的热值约为 34 727 kJ/m<sup>3</sup>, 标准煤的热值约为 29 288 kJ/kg, 当二者燃烧释放 41 840 kJ 热量时, 天然气产生的 CO<sub>2</sub> 约为 2.26 kg, 标准煤产生的 CO<sub>2</sub> 约 5.14 kg, 天然气所产生的 CO<sub>2</sub> 仅为煤炭的一半。另外, 天然气的化学成分较为单一, 不含杂质, 燃烧产物为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O, 而石油和煤炭燃烧产生碳排放的同时, 还会产生氮氧化物和硫氧化物等污染

物,对环境造成较多负面影响。

从资源储量和开发效率角度看,以美国“页岩革命”为代表的非常规油气高效开发,不仅实现了美国油气资源的自给自足,还完成了由进口国向出口国的华丽转变,深刻地改变了全球能源供给格局。未来的油气勘探开发重点是非常规(页岩油气、致密油气、油砂、油页岩、天然气水合物等)、海洋(尤其是深水 and 超深水)、深层和超深层油气资源。其中,页岩气、致密气、煤层气等非常规天然气的勘探开发突破,使其在全球天然气产能贡献中的占比提升,且大幅提高了世界天然气的总产量,因而技术研发的重点就是如何更高效地开发这些非常规天然气。一是持续提升自动化、数字化、智能化和远程化水平,不断减少用工人数,降低劳动强度;二是坚持安全第一,持续加强 HSE 管理,确保人员、物资和井眼安全,减少占地和降低噪声,保护自然环境,节能减排,努力实现零伤害、零污染、零排放。

从科技赋能和专业技术角度看,非常规油气资源高效开发面临一系列挑战:如何利用石油工程新技术不断提高作业效率,缩短非生产时间;如何降低作业成本和单位质量原油的开发成本,同时更好地保护油气层和创新井型,提高储层钻遇率、探井成功率、单井产量和油田采收率;如何经济高效地勘探开发各类油气资源,尤其是深层、“三低”油气藏和非常规油气资源。未来石油工程技术创新的主攻方向,一是自动化、信息化、数字化、网络化、智能化,同时研发出与之相配套的新材料、新技术、新工艺、新方法和新工具;二是更加强调地质工程一体化,随着大数据、云计算、工业互联网、人工智能等信息技术的快速发展<sup>[11-12]</sup>,上游多学科交叉融合已是大势所趋,例如电缆测井越来越多地被 LWD 和集成 LWD 的旋转导向钻井系统所取代,地震采集、处理、解释一体化,地震、钻井、测井、录井、导向一体化,工程设计一体化,工程施工和监督一体化(例如工厂化作业)等<sup>[13]</sup>;三是更加强调安全环保,实现安全工程和绿色工程等。

随着人们对环境保护要求的不断提升、非常规油气藏开发需求的稳步增加、地质工程一体化和多学科技术一体化的趋势日益明显,低碳、高效和安全地开发以天然气为代表的油气资源将是我们未来的重要发展方向。

## 4.2 碳足迹评价

1995—2015 年,我国 CO<sub>2</sub> 累计排放量约为 1 300×10<sup>8</sup> t,即大约人均 100 t。其中,各种原材料加工生产

及重货运输的合计排放量约占三分之一以上,成为出口导向型发展战略(如今富裕的亚洲经济体即是成功案例)的支柱。石油化工行业作为保障国民经济基础的原材料和道路交通燃料的关键产业,温室气体排放量大,从中碳能源向低碳能源倾斜,是该行业未来 15 年最现实的转型途径,但从低碳转向零碳能源,则是“碳中和”提出的最终要求<sup>[14]</sup>。

国内石油行业已经开始进行“碳足迹”的计算的研究,并进行碳捕集技术试验。2009 年,中国化工标准化研究院、英国标准协会在河北盛华化工有限公司(以下简称“盛华化工”)开展了氯碱行业产品碳足迹评价试点工作,计算出单位质量 PVC 产品的碳足迹(排放 CO<sub>2</sub> 当量)约为 1 765.3 kg/t。中国石化抚顺石油化工研究院以某企业的沥青产品为评价对象,计算出单位质量沥青产品的碳足迹为 2 958.0 kg/t。石油化工行业产品生产阶段的碳足迹核算均是针对产品生产过程的加工流程进行的<sup>[15]</sup>,由于石化生产过程具有典型的流程加工特点,即上游加工过程的产品会成为下游加工过程的原料,这种流程顺序体现了物料在生产过程演变的生命周期顺序。因此,碳足迹所反映的产品各生命周期阶段的时间流程,体现在石化生产过程中,即为物料依次经过不同工艺装置的生产流程。

国内石油行业进行了大量碳捕集技术试验<sup>[16-17]</sup>,例如,中国石油吉林油田 CO<sub>2</sub> 捕集驱油、中国石化胜利油田 CO<sub>2</sub> 捕集驱油、华能北京高碑店热电厂 CO<sub>2</sub> 捕集示范工程以及神华集团内蒙古 CO<sub>2</sub> 捕集封存项目。从 2008 年开始,吉林油田建成了 4 个 CO<sub>2</sub> 驱油与埋藏试验区,CO<sub>2</sub> 年埋存能力 35×10<sup>4</sup> t,年产量超过 10×10<sup>4</sup> t,是目前国内规模最大的 CO<sub>2</sub> 驱油与埋存项目。大庆油田、长庆油田和新疆油田也均有针对性地开展了 CO<sub>2</sub> 驱油与埋藏技术攻关和先导试验。

目前,国内石油化工行业已对碳减排或碳利用效率提升开展了研究与试验,但仍处于发展初期,对 CO<sub>2</sub> 排放所带来的危机缺乏深度理解。同时,缺少油气勘探开发中碳排放评估方法与钻完井过程中碳排放预测方法<sup>[18]</sup>。因此,开展针对性的碳排放机理研究和评价方法研究将是未来碳足迹评价的重要着力点。

## 4.3 碳捕集利用与封存(CCUS)技术

在油气领域,通过 CCUS 技术,将捕集来的 CO<sub>2</sub> 注入枯竭油井而封存在地下,可达到减排与增产的双重目的。短期内我国以煤为主的能源结构无法改

变,作为实现化石能源低碳利用的有效技术,CCUS技术具有巨大潜力,在宏观规划、技术研发、推广应用和国际合作方面均取得了显著成果<sup>[19]</sup>。

从CO<sub>2</sub>利用环节看,化工利用技术取得了较大进展,整体处于中试阶段,部分技术如重整制备合成气技术、合成可降解聚合物技术和合成有机碳酸酯技术等完成了示范;生物利用方面的产品附加值高,经济效益好,目前转化为食品和饲料的利用技术已实现大规模商业化,其他技术仍处于研发或小规模示范阶段<sup>[20]</sup>;与化工利用技术和生物利用技术相比,地质利用技术的发展潜力最大,也较为成熟,CO<sub>2</sub>强化石油开采技术(CO<sub>2</sub>-EOR)已应用于多个CO<sub>2</sub>驱油与封存示范项目。

从封存环节看,我国已完成了CO<sub>2</sub>理论封存潜力评估,陆上地质利用与封存CO<sub>2</sub>的理论总容量为万亿吨以上,已完成了陆上咸水层封存10×10<sup>4</sup> t级CO<sub>2</sub>的示范应用,完成了海底咸水层、枯竭油田和枯竭气田封存CO<sub>2</sub>中试方案的设计与论证。国家能源投资集团有限责任公司(神华)煤制油分公司深部咸水层CO<sub>2</sub>地质封存示范工程,是中国首个、也是世界上规模最大的全流程煤基CO<sub>2</sub>捕集和深部咸水层地质封存示范项目。CO<sub>2</sub>从煤制氢装置变换单元的尾气中截流后,经气液分离、除油、脱硫、净化、精馏等工艺,将纯度为88.8%的CO<sub>2</sub>提纯至99.99%以上。然后用低温罐车将CO<sub>2</sub>运至封存区,首先导入缓冲罐内,再经加压、加热后注入地下(见图2)。监测缓冲罐和注入井内的压力、温度等参数,并将监测数据实时传输至后方管理部门,实现了全过程监测。



图2 深部咸水层CO<sub>2</sub>地质封存流程

Fig.2 Geological sequestration process of CO<sub>2</sub> in deep saline aquifer

从捕集环节看,部分捕集技术已达到或接近商业化应用水平。当前第一代捕集技术的成本和能耗仍然偏高,缺乏大规模示范工程经验,第二代捕集技术处于实验室研究或小型试验阶段,尚未实现现代衔接。

从运输环节看,CO<sub>2</sub>陆路车载运输和内陆船舶运输技术已成熟。CO<sub>2</sub>陆地管道输送技术最具应用潜力和经济性,我国已完成100×10<sup>4</sup> t年输送能力的管道项目的初步设计,正在制定相关设计规范,海底管道输送技术尚处于概念研究阶段。

整体而言,我国CCUS各环节关键技术的发展迅速,多种新技术不断涌现。CO<sub>2</sub>的利用和封存已有显著发展,可以成功示范区为起点促进推广,在实践中完善流程和提高效率;CO<sub>2</sub>的捕集和运输尚处于研发阶段,应将其作为攻关重点,不断加强国际合作交流,以完善CCUS全流程技术体系。

#### 4.4 氢能技术

据中国氢能联盟发布的《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》预计,到2025年我国氢能产业产值将达到万亿元。我国正进入一个更为低碳环保的“氢能时代”,如何有序推进氢燃料供给体系建设、完善氢能产业链及生态圈,并在推动商业示范上走在行业前列,已经成为以中国石化为代表的我国能源巨头们的转型目标<sup>[21]</sup>。

中国石化以打造世界领先洁净能源化工公司为愿景目标,加快构建以能源资源为基础,以洁净油品和现代化工为两翼,以新能源、新材料、新经济为重要增长极的“一基两翼三新”产业格局,显而易见,氢能作为新能源的重要一极,将成为未来的主攻方向<sup>[22]</sup>。但战略转型绝非易事,重资产运营的行业特性、巨无霸式的体量和行业地位,注定其在战略布局与决策上需要慎之又慎。

截至2020年底,中国石化累计开展加氢站试点项目27个,分布于广东、上海、浙江、广西和贵州等地,并规划到2025年,利用原有30 000座加油站、870座加气站的布局优势,建设1 000座加氢站或油氢合建站,以消费终端为突破口带动产业链的能源转型。目前中国石化已开始在氢能交通、化工领域全面发力,打通制氢、储运、加注的全供应链环节,年产氢量约为384×10<sup>4</sup> t,占全国的11.5%。2021年5月12日,中国石化与长城控股集团签署了氢能战略合作框架协议,将会在氢能产业、氢能技术研发、氢能资本等领域展开深度合作,加速氢能产业自主核心技术与装备发展,带动产业链上下游资产价值



创造,推动中国氢能产业高质量发展。

目前,中国石化向氢能的战略转型进展顺利,在氢能产业链上的位置举足轻重,氢气产量居全国首位,领先优势巨大。另外,该公司在氢能领域有着丰富的产业经验和竞争优势,把氢能作为其新能源业务的主要方向,可以充分利用产业、技术和网络优势,以自主创新、合作研发、战略投资等方式打造涵盖氢能全产业链的一体化协同运营模式,构建自有的氢能生产、提纯、运输和销售全流程产业链。

总的来说,油田企业本身就有丰富的资源和强大的制氢能力,成本也相对低廉。氢能产业未来发展可以先充分利用现有炼化企业的副产氢,同时关注光伏发电、风电等低成本发电形式的电解水制氢,未来在副产氢基础上引入绿氢,加快氢源由蓝向绿转变。

#### 4.5 页岩气智能集约开发

相对于煤和石油,天然气具有热值高、碳排放少的双重优势。我国页岩气分布广泛、储量世界第一,但开发难度很大,年开采量仅有 0.21%。其原因是我国页岩气区块多分布在丘陵山野地区,地面条件恶劣,大规模水力压裂作业难以顺利开展。同时,页岩气藏多为非均质、断块构造,受工程技术的限制,埋深 3 500~4 000 m 的页岩气未能获得实质性突破,大规模商业化开采模式一直未出现突破。因此,要把这宝贵的绿色资源开采出来,需要把握开源、节流、储备 3 大要素,通过深化体制改革、公司改革和技术革命,实现降本增效,这是我国实现页岩气商业开发的必经之路。

美国的页岩气笼统开发模式在我国水土不服,精准预测、精细调控和智能管理才能实现页岩气的高效开发<sup>[23-24]</sup>。以机器学习为代表的 AI 技术在处理高维非线性问题上有明显优势,可为地质、工程和信息技术的深度融合提供新手段。因此,基于大量历史井信息,结合传统产能预测方法,通过数据挖掘和 AI 技术精确快速预测产量,建立多约束条件下的工程参数优化模型,形成一套适用于目标研究区域的地质工程一体化参数协同优化平台,可为页岩气开发探索新的挖潜增效手段<sup>[25]</sup>。中国石化拥有国内最大的页岩气田——涪陵页岩气田,可以收集到大量的页岩气井数据,包含地质、油藏、工程和生产等大量数据,基于这些宝贵的数据资源,利用 AI 的产量预测和工程优化核心技术方法,为一体化页岩储层评估,工艺优化软件的研制、推广和应用奠定了良好基础<sup>[26-27]</sup>,从而促进页岩气的集约化低

碳化开发。

针对页岩气商业开发存在的主要难题,应当基于大量的数据信息和实践经验,建立一套适用于我国页岩气地质特点的储层评价标准和技术方法,攻克“卡脖子”技术、掌握核心技术,实现页岩气智能开发技术自主化。同时,要积极寻找战略合作者,开发海外高潜区页岩气,尤其在目前中美贸易对抗下,我国油气行业面临高昂的生产成本和外围政治经济的双重压力,广泛交流、真诚合作才可以实现商业共赢。

## 5 结束语

我国提出“2030 碳达峰,2060 碳中和”的目标,低碳运行下经济体转型面临着严峻挑战。无论是世界的“净零排放”,还是我国的“碳达峰、碳中和”,在满足人民美好生活和社会经济繁荣的前提下,碳减排工作任重而道远。目前,我国能源转型尚在初期阶段,更有针对性、系统性和即时效果的政策将有助于最大程度地降低能源、经济和生产力结构的变革阻力。我国“脱碳路径”应聚焦在长期低碳技术材料支持政策、国际通用的碳市场标准机制、绿色转型企业的保护性政策和低碳科研激励措施等方面。另外,应当在油气田低碳高效勘探、上中下游碳足迹全链评价、页岩气智能集约开发、氢能和 CCUS 等方面重点投入,以助力国家更高质量、更快速度地完成双碳目标。

## 参 考 文 献

### References

- [1] BATAILLE C, ÅHMAN M, NEUHOFF K, et al. A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 187: 960-973.
- [2] GOULDER L H, HAFSTEAD M A C, DWORSKY M. Impacts of alternative emissions allowance allocation methods under a federal cap-and-trade program[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2010, 60(3): 161-181.
- [3] LAMB W F, WIEDMANN T, PONGRATZ J, et al. A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(7): 073005.
- [4] ABRAHAM-DUKUMA M C. Dirty to clean energy: Exploring 'oil and gas majors transitioning'[J]. *The Extractive Industries and Society*, 2021, 8(3): 100936.
- [5] HARTMANN J, INKPEN A C, RAMASWAMY K. Different shades of green: global oil and gas companies and renewable energy[J]. *Journal of International Business Studies*, 2021, 52(5):



- 879–903.
- [6] WEN Huwei, LEE C C, ZHOU Fengxiu. Green credit policy, credit allocation efficiency and upgrade of energy-intensive enterprises[J]. *Energy Economics*, 2021, 94: 105099.
- [7] FLAKSMAN A S, KOKURIN D I, KHODZHAEV D K, et al. Assessment of prospects and directions of digital transformation of oil and gas companies[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 976: 012036.
- [8] MIKOVA N, EICHHAMMER W, PFLUGER B. Low-carbon energy scenarios 2050 in north-west European countries: towards a more harmonised approach to achieve the EU targets[J]. *Energy Policy*, 2019, 130: 448–460.
- [9] 张蒙丽, 岳小文. 国际石油公司发展新能源业务的启示[J]. *国际石油经济*, 2019, 27(4): 66–70.
- ZHANG Mengli, YUE Xiaowen. Enlightenments of new energy business development in the international oil companies[J]. *International Petroleum Economics*, 2019, 27(4): 66–70.
- [10] ROMERO J P, GRAMKOW C. Economic complexity and greenhouse gas emissions[J]. *World Development*, 2021, 139: 105317.
- [11] 王敏生, 光新军, 耿黎东. 人工智能在钻井工程中的应用现状与发展建议[J]. *石油钻采工艺*, 2021, 43(4): 420–427.
- WANG Minsheng, GUANG Xinjun, GENG Lidong. Application status and development suggestions of artificial intelligence in drilling engineering[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(4): 420–427.
- [12] 窦宏恩, 张蕾, 米兰, 等. 人工智能在全球油气工业领域的应用现状与前景展望[J]. *石油钻采工艺*, 2021, 43(4): 405–419.
- DOU Hongen, ZHANG Lei, MI Lan, et al. The application status and prospect of artificial intelligence in the global oil and gas industry[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(4): 405–419.
- [13] 杨传书, 李昌盛, 孙旭东, 等. 人工智能钻井技术研究方法及其实 践[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(5): 7–13.
- YANG Chuanshu, LI Changsheng, SUN Xudong, et al. Research method and practice of artificial intelligence drilling technology[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(5): 7–13.
- [14] 王敏生, 姚云飞. 碳中和约束下油气行业发展形势及应对策略[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(5): 1–6.
- WANG Minsheng, YAO Yunfei. Development situation and countermeasures of the oil and gas industry facing the challenge of carbon neutrality[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(5): 1–6.
- [15] DAVIS S J, LEWIS N S, SHANER M, et al. Net-zero emissions energy systems[J]. *Science*, 2018, 360(6396): eaas9793.
- [16] 柏明星, 张志超, 白华明, 等. 二氧化碳地质封存系统泄漏风险研究进展[J]. *特种油气藏*, 2022, 29(4): 1–11.
- BAI Mingxing, ZHANG Zhichao, BAI Huaming, et al. Progress in leakage risk study of CO<sub>2</sub> geosequestration system[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(4): 1–11.
- [17] 高冉, 吕成远, 伦增珉, 等. 二氧化碳驱替与埋存一体化数值模拟[J]. *特种油气藏*, 2021, 28(2): 102–107.
- GAO Ran, LYU Chengyuan, LUN Zengmin, et al. Integrated numerical simulation of carbon dioxide displacement and sequestration[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(2): 102–107.
- [18] MENG Xiangyu, GU Alun, WU Xinguo, et al. Status quo of China hydrogen strategy in the field of transportation and international comparisons[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(57): 28887–28899.
- [19] LU Jun, ZAHEDI A, YANG Chengshi, et al. Building the hydrogen economy in China: Drivers, resources and technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 23: 543–556.
- [20] BUIRA D, TOVILLA J, FARBES J, et al. A whole-economy deep decarbonization pathway for Mexico[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2021, 33: 100578.
- [21] HASAN M M F, FIRST E L, BOUKOUVALA F, et al. A multi-scale framework for CO<sub>2</sub> capture, utilization, and sequestration: CCUS and CCU[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2015, 81: 2–21.
- [22] REN Xusheng, DONG Lichun, XU Di, et al. Challenges towards hydrogen economy in China[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(59): 34326–34345.
- [23] 蒋廷学, 王海涛. 中国石化页岩油水平井分段压裂技术现状与发展建议[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(4): 14–21.
- JIANG Tingxue, WANG Haitao. The current status and development suggestions for Sinopec's staged fracturing technologies of horizontal shale oil wells[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 14–21.
- [24] 苗娟, 何旭晟, 王栋, 等. 水平井精细分段深度酸化压裂技术研究与应用[J]. *特种油气藏*, 2022, 29(2): 141–148.
- MIAO Juan, HE Xusheng, WANG Dong, et al. Study and application of fine segmented deep acid fracturing technology for horizontal wells[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(2): 141–148.
- [25] LIAO Lulu, ZENG Yijin, LIANG Yu, et al. Data mining: a novel strategy for production forecast in tight hydrocarbon resource in Canada by random forest analysis[R]. IPTC-20344-MS, 2020.
- [26] 陈作, 刘红磊, 李英杰, 等. 国内外页岩油储层改造技术现状及发展建议[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(4): 1–7.
- CHEN Zuo, LIU Honglei, LI Yingjie, et al. The current status and development suggestions for shale oil reservoir stimulation at home and abroad[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 1–7.
- [27] 李宗田, 肖勇, 李宁, 等. 低油价下的页岩油气开发工程技术新进展[J]. *断块油气田*, 2021, 28(5): 577–585.
- LI Zongtian, XIAO Yong, LI Ning, et al. New progress in shale oil and gas development engineering technology under low oil prices[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2021, 28(5): 577–585.

[编辑 曹耐]