

文章编号:1009-9603(2023)02-0181-06

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202204009

# 中国CCUS-EOR项目经济效果及其提升手段研究

孟新

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 102206)

**摘要:**二氧化碳捕集、驱油利用与封存(CCUS-EOR)作为最具创效潜力的CCUS技术,是实现双碳的重要手段之一,然而目前经济性正制约其发展应用。为了探究CCUS-EOR项目实际经济效果及其提升手段,对中国4个典型项目进行了经济评价,采用关键参数对比与敏感性分析方法研究了影响项目经济性的关键经济参数,通过基准平衡分析技术测算了关键经济参数的基准平衡边界。结果显示:在CO<sub>2</sub>价格为300元/t时,大部分项目需要在国际油价为70美元/bbl左右内部收益率才能达标,项目经济效果主要受油价、增油量、CO<sub>2</sub>价格、换油率、吨油建设投资影响,为保证项目收益率达标,应至少保证CO<sub>2</sub>价格低于300元/t、换油率小于4.5 tCO<sub>2</sub>/t油、吨油建设投资小于700元/t,CO<sub>2</sub>价格、换油率和吨油建设投资越低,项目内部收益率越高。最后从碳交易收益、财政支持与税收优惠、多储层同步埋存3个方面探讨了从外部提高项目经济效果的途径,以期为CCUS-EOR技术发展规划与项目实施提供参考。

**关键词:**CCUS;经济评价;CO<sub>2</sub>价格;换油率;基准平衡分析

中图分类号:TE357.45

文献标识码:A

## Research on economic effect of China's CCUS-EOR projects and its improvement methods

MENG Xin

(SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing City, 102206, China)

**Abstract:** As the most effective and potential carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technology, Carbon dioxide capture, EOR-utilization and storage (CCUS-EOR) is one of the important means to realize carbon peaking and carbon neutrality goals. However, its development and application are restricted by economical efficiency at present. To explore the actual economic effect of CCUS-EOR projects and its improvement methods, this paper conducted the economic evaluation of four typical projects in China and probed into the key economic factors influencing its economical efficiency via the comparative analysis of key parameters and sensitivity analysis. Then, the benchmark balance boundary of key economic parameters was calculated by the benchmark balance analysis technology. The results show that the international oil price of about 70 US dollars/barrel is needed for the internal rate of return of most projects to reach the standard when the CO<sub>2</sub> price is 300 yuan/ton. The economic effect of CCUS-EOR projects is mainly influenced by the oil price, oil production increment, CO<sub>2</sub> price, oil draining ratio, and construction investment. In a bid to ensure that the projects' rate of return can reach the standard, the CO<sub>2</sub> price should be less than 300 yuan/ton, the oil draining ratio smaller than 4.5 tCO<sub>2</sub>/toil, and the construction investment less than 700 yuan/ton. The lower these are, the projects' internal rate of return is higher. The paper also discussed three ways of carbon trading benefits, financial support and tax incentives, and simultaneous storage of multiple reservoirs to improve the economic effect of the projects from the outside in hope of providing reference for CCUS-EOR technology development planning and project implementation.

**Key words:** CCUS; economic evaluation; CO<sub>2</sub> price; oil draining ratio; benchmark balance analysis

低碳化是未来企业发展的必然要求。目前,中国已经明确提出了双碳目标,石油企业也在发展规

收稿日期:2022-04-06。

作者简介:孟新(1987—),女,辽宁锦州人,高级经济师,博士,从事油气资源经济评价与战略规划。E-mail: mengxin.syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“碳排放约束下化石能源生产补贴退出机制研究”(71804187)。

划与实际行动上积极响应。实现“双碳”不仅是国有企业的政治和社会责任,也关系企业在未来低碳环境要求下的生存发展,而碳捕集、利用与封存(CCUS)是必不可少的碳减排手段。据国际能源署(International Energy Agency,简称IEA)《世界能源展望2020》预测,CCUS是世界第三大减排技术,将贡献15%的累积减排量,如果不实施CCUS,实现双碳的减排成本将增加138%<sup>[1]</sup>。二氧化碳捕集、驱油利用与封存(CCUS-EOR)兼具驱油和埋存效益,是与石油企业相关性最高、可操作性最强,最具发展基础的减排手段。

目前,中国石油企业都在大力推进CCUS项目实施,中国石油将启动以松辽盆地300万吨CCUS重大示范工程为代表的“四大工程示范”和“六个先导试验”,中国石化将建成中国最大的齐鲁石化-胜利油田CCUS全链条示范工程,中国海油正式启动了我国首个海上CO<sub>2</sub>封存项目。然而,经济效益一直是制约CCUS技术发展应用的瓶颈问题。提高CCUS项目经济效果不仅关系该技术的推广应用,也关系实施企业的经济效益,是确保实现双碳目标,同时保障企业经营效益和生存发展必须要解决的问题。

笔者从目前CCUS中技术最为成熟、最具创效潜力的CCUS-EOR项目经济性研究入手,选取中国4个典型的CCUS-EOR项目进行经济评价,深入探

究项目实际经济效果,采用关键经济参数对比与敏感性分析方法研究项目经济性关键影响因素,通过基准平衡分析技术测算了关键经济参数的基准平衡边界,最后对关键经济参数的优化以及如何从外部提升项目经济效果提出了建议,以期对CCUS-EOR产业发展规划与项目实施提供参考。

## 1 典型CCUS-EOR项目经济评价

为利于对比判断,提高项目经济效果评价结论的准确性与普适性,选取中国4个典型CCUS-EOR项目进行了经济评价(4个项目分别以A,B,C,D项目代替)。4个项目的基本情况参数见表1。经济评价主要采用折现现金流法,将净现值(NPV)和内部收益率(IRR)作为主要的评价指标<sup>[2]</sup>。在参数的选择确定上,遵循投资、成本等项目个性参数尊重现场、贴合实际,贷款利率、汇率、销售费用占收入的比例等共性参数尽量相同以增加评价结果可比性的原则。投资、成本、CO<sub>2</sub>价格采用项目实际数据,国际油价统一采用60美元/bbl,汇率为6.5。

经评价,在统一的国际油价60美元/bbl、项目实际CO<sub>2</sub>价格条件下,4个项目的内部收益率分别为2.6%,13.8%,11.9%,-7.6%(表2)。其中,B和C项目的CO<sub>2</sub>价格较低,项目内部收益率可以达到8%的要求;但A和D项目的CO<sub>2</sub>价格较高,所以项目内部

表1 4个典型项目基本情况  
Table1 Basic situation of four typical projects

项目	CO <sub>2</sub> 体积分数/%	注气方案	总井数		注气规模/ (10 <sup>4</sup> t·a <sup>-1</sup> )	总注气 量/10 <sup>4</sup> t	CO <sub>2</sub> 价格 (捕集+运输+注入)/(元·t <sup>-1</sup> )	累积增 油量/10 <sup>4</sup> t	换油率/ (tCO <sub>2</sub> ·t油 <sup>-1</sup> )
			油井/口	气井/口					
A	8~12	水气交替注入	166	73	71.2	1 068	300	227.3	4.7
B	22	连续注CO <sub>2</sub>	106	43	52	365	111	56.3	6.5
C	>90	水气交替注入	14	5	6	25	200	14	1.8
D	20~30	连续注气半年 后水气交替注入	697	171	87.2	839.4	650	331.4	2.5

表2 不同CO<sub>2</sub>价格下项目的净现值与内部收益率  
Table2 Net present value(NPV)and internal rate of return(IRR)of four projects under different CO<sub>2</sub> prices

项目	实际CO <sub>2</sub> 价格		CO <sub>2</sub> 价格为300元/t	
	净现值/10 <sup>4</sup> 元	内部收益率/%	净现值/10 <sup>4</sup> 元	内部收益率/%
A	-28 377	2.6	-28 377	2.6
B	7 960	13.8	-32 940	-7.4
C	1 622	11.9	363	8.9
D	-204 567	-7.6	-40 218	4.8

收益率较低,未能达标。可见,在实际运行的项目中,在不同地区实施、有着不同注气方案及来自不同气源的CCUS-EOR项目经济效果差别很大,项目内部收益率大体在±15%之间。

通过对比不同项目内部收益率与CO<sub>2</sub>价格发现,项目内部收益率的高低与CO<sub>2</sub>价格有极大的负相关性,因此,为了剔除不同气源价格对CCUS-EOR项目经济评价结果的影响,统一测算了CO<sub>2</sub>价格为300元/t条件下的项目内部收益率,300元/t是目前中国大部分稳定CO<sub>2</sub>气源的较低价格水平<sup>[3]</sup>。

结果显示,当CO<sub>2</sub>价格为300元/t时,项目内部收益率大致在±8%之间(表2),较难达到当前国内石油企业对投资项目8%的内部收益率要求。因此,CCUS-EOR项目的规划实施,应首先明确影响项目经济性的关键经济参数,做好关键经济参数的管控与优化,以利于项目经济效果的提升与保障。

## 2 关键经济参数及其基准平衡边界

### 2.1 关键经济参数分析

#### 2.1.1 关键经济参数对比

项目内部收益率是否达标,取决于油价与项目盈亏平衡价格的高低关系。其中,油价是不确定因素,所以较低的盈亏平衡价格是保障项目经济效果的关键,通过对比不同项目盈亏平衡价格构成项的差距可以分析影响项目经济性的关键经济参数。盈亏平衡价格主要由吨油建设投资和财务费用、吨油CO<sub>2</sub>成本和其他经营成本、吨油税金构成,通过对比4个项目的盈亏平衡价格及其构成参数(表3)发现:①真正使项目盈利能力拉开差距的是吨油CO<sub>2</sub>成本,差距取决于CO<sub>2</sub>价格和换油率(增产单位产量原油的CO<sub>2</sub>使用量),在CO<sub>2</sub>价格为300元/t的条件下,4个项目中吨油CO<sub>2</sub>成本最高和最低值相差了1420元/t。②其次影响较大的是吨油建设投资,其差距取决于地面可利用设施情况及项目方案,项目中最高和最低值相差了370元/t。③吨油财务费用与其他经营成本影响基本相当,吨油财务费用差距取决于投资总额和贷款比例,项目中最高和最低值相差144元/t,吨油其他经营成本差距取决于成本标准及方案,最高和最低值相差了134元/t。④影响最小的是吨油税金,由国家相关税收规定决定,是不可改变因素,项目中最高和最低值相差了55元/t。

可见,不考虑油价和增油量,影响CCUS-EOR项目经济性的关键经济参数及其重要性排序是吨油CO<sub>2</sub>成本、吨油建设投资、吨油财务费用、吨油其他经营成本、吨油税金,其中吨油财务费用和吨油

税金主要受国家财税政策、贷款利率和公司筹融资政策影响,不再做进一步分析。

#### 2.1.2 关键经济参数敏感性分析

敏感性分析是定量测算分析项目内部收益率对关键经济参数敏感性的方法,敏感性越高代表参数越重要、影响越大。吨油CO<sub>2</sub>成本是换油率与CO<sub>2</sub>价格的乘积,因此敏感性分析中由CO<sub>2</sub>价格替换,换油率与CO<sub>2</sub>价格在变动相同幅度的情况下对吨油CO<sub>2</sub>成本及项目内部收益率的影响是一致的,因此不再重复进行敏感性分析,同时增加油价和增油量这2个参数,对4个项目的油价、增油量、CO<sub>2</sub>价格、吨油建设投资和吨油其他经营成本5个关键经济参数的敏感性进行分析(图1)。

分析结果显示:油价、增油量、吨油建设投资、吨油其他经营成本4个因素的敏感性排序基本一致,为油价>增油量>吨油建设投资>吨油其他经营成本,仅CO<sub>2</sub>价格的排序变化较大。

观察发现对于换油率较高的A和B项目,其增加相同产量原油需要更多的CO<sub>2</sub>,因此对CO<sub>2</sub>价格更为敏感,而换油率相对低的C和D项目对CO<sub>2</sub>价格的敏感性则略弱。同理,在项目实际固定的CO<sub>2</sub>价格下,CO<sub>2</sub>价格高的项目CO<sub>2</sub>成本更高,其对换油率变化也更为敏感,而CO<sub>2</sub>价格较低的项目对换油率的变化敏感性则略弱。可见,项目的换油率与CO<sub>2</sub>价格对项目的内部收益率影响是比较大的,甚至影响CCUS-EOR项目对关键经济参数的敏感性排序,只有在换油率和CO<sub>2</sub>价格均比较低、吨油CO<sub>2</sub>成本较低的情况下,其对项目内部收益率的影响才相对弱一些。因此,影响CCUS-EOR项目经济性的关键经济参数及其排序为:油价>增油量>CO<sub>2</sub>价格&换油率>吨油建设投资>吨油其他经营成本,与关键经济参数对比分析的认识是一致的。

在影响CCUS-EOR项目经济性的关键经济参数中,油价是不可控因素,增油量和吨油其他经营成本受油藏、储层条件、经营管理水平影响,较难有很大程度改变和提升,因此,提高CCUS-EOR项目

表3 4个项目的盈亏平衡价格及其构成参数对比

Table3 Comparison of break-even prices and their constituent parameters of four projects

项 目	盈亏平衡价格	投 资		成 本		税 金
		吨油 建设投资	吨油 财务费用	吨油 CO <sub>2</sub> 成本	吨油 其他经营成本	吨油 税金
A	2 761	425	82	1 394	648	212
B	3 309	513	137	1 985	517	157
C	2 315	715	226	565	643	166
D	2 550	795	104	822	651	179

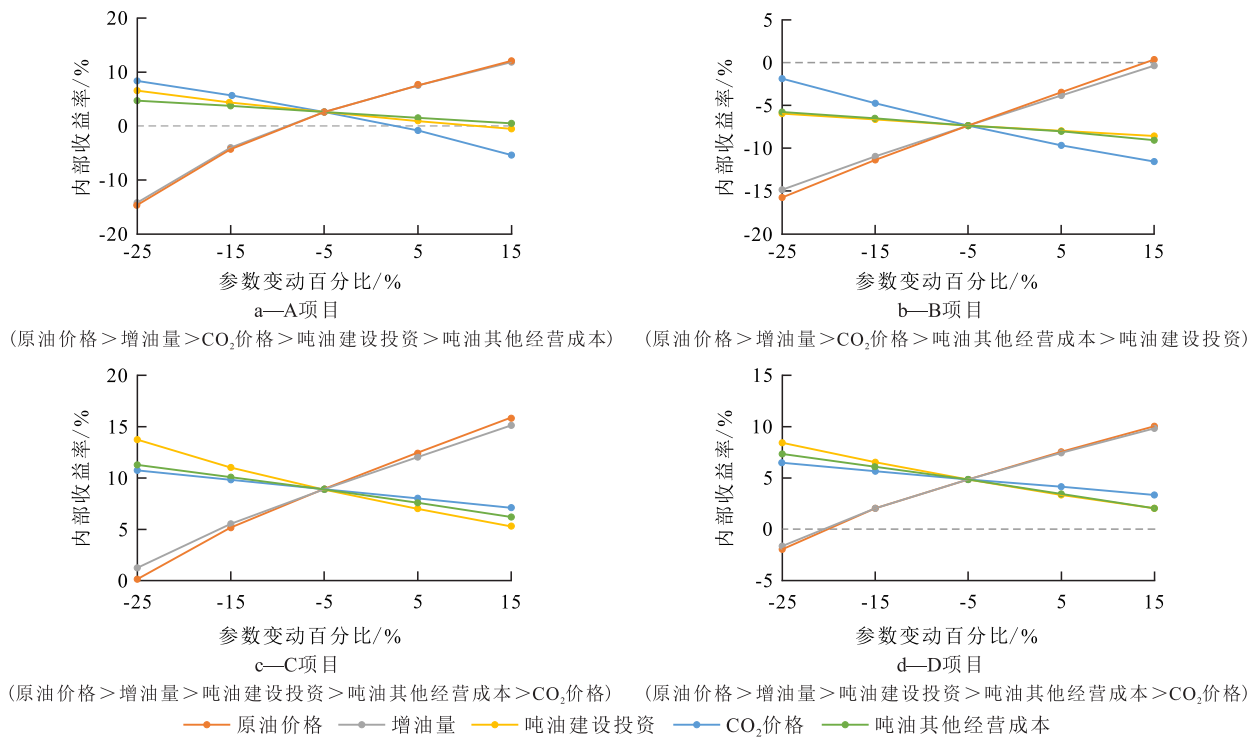


图1 4个项目内部收益率对关键经济参数的敏感性分析

Fig.1 Sensitivity analysis of IRR to key economic parameters of four projects

本身经济效应重点从换油率、CO<sub>2</sub>价格、吨油建设投资着手。

### 2.2 关键经济参数基准平衡边界测算

基准平衡边界是项目内部收益率为基准收益率(国内油气投资项目目前为8%)时的参数临界值,测算关键经济参数的基准平衡边界,可以为项目方案设计与优化、项目筛选提供有效参考。因此,采用基准平衡分析方法对4个项目可以重点优化的CO<sub>2</sub>价格、换油率、吨油建设投资3个参数及原油价格的基准平衡边界进行了测算。其中,原油价格和CO<sub>2</sub>价格不是变量时,分别采用的是60美元/bbl和300元/t。

测算结果(表4)显示:①项目基准平衡油价大致为60~90美元/bbl,大部分项目在70美元/bbl左右,即70美元/bbl是项目内部收益率达标的基本价

表4 4个项目关键参数基准平衡边界测算结果

Table4 Calculation results of benchmark balance boundary of key economic parameters of four projects

项目	基准平衡油价/ (美元·bbl <sup>-1</sup> )	吨油建设投资/ (元·t <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> 价格/ (元·t <sup>-1</sup> )	换油率/ (tCO <sub>2</sub> ·t油 <sup>-1</sup> )
A	66.4	313	245	4.2
B	85.9		154	4.4
C	58.6	739	328	1.9
D	67.3	650	181	2.2

格。②吨油建设投资,即单位增油量的建设投资不能大于700元/t。③CO<sub>2</sub>价格最高不能超过300元/t,仅少量极好项目可略高,大部分项目在250元/t以内才能满足收益率要求。④换油率需小于4.5 tCO<sub>2</sub>/t油,大部分项目为2~4 tCO<sub>2</sub>/t油,在2 tCO<sub>2</sub>/t油以下可以基本保证项目内部收益率达标。

### 3 提升项目经济效果的外部手段研究

推动形成碳交易收益 CCUS项目可以实现CO<sub>2</sub>的永久封存减排,但是减排量并不能直接在国家碳市场进行交易,需要按照规定程序采用经国家主管部门备案的方法学(项目减排量核证的规范),由经国家主管部门备案的审定机构审定,进行项目备案审批后,形成中国核证自愿减排量(Chinese Certified Emission Reduction, CCER),项目减排量才可以进入国家碳市场交易<sup>[4]</sup>。目前,尽管国家CCER项目审定暂缓后即将重启,但是仍然缺乏CCUS项目备案的方法学,应积极引领、配合、推动CCUS项目核证方法学的备案,促进CCUS项目减排量进入国家碳市场。

经测算,按照当前中国碳市场40元/t的碳交易价格,碳交易可使项目内部收益率提高1%~5%,要

使所有项目内部收益率达标,碳交易价格需达到165元/t(25美元/t)以上,若按当前国际市场40美元/t的碳交易价格测算碳交易收益,项目内部收益率可达13.5%~26.3%。专家表示,为实现《巴黎协定》2℃的温度目标,碳价应达到40~80美元/t,所以预计未来碳价将大幅提高,CCUS项目的碳交易收益将非常可观!

**推动形成财政支持、补贴或减免税收益** 全球多国已实施CCUS项目财政补贴与税收优惠政策,尤其以欧美国家居多<sup>[5-9]</sup>(表5)。欧洲多在项目落地过程中给予直接财政支持;美国则实施了全球力度最大、最精准有效的所得税抵免政策。实施适度的补贴和税收优惠,可以降低碳交易或碳税对企业经营成本的影响,不仅可以促进CCUS等碳减排技术发展与项目实施,促进国家碳减排目标达成,同时可以降低对企业、国家经济发展的影响<sup>[10-11]</sup>。

**推动多类储层CO<sub>2</sub>封存利用技术研究储备** 二氧化碳驱油与封存技术是目前最成熟、最具效益的CCUS技术,同时CO<sub>2</sub>在咸水层、煤层气、天然气、页岩油气等储层的利用与封存研究也一直在进行中。当前受经济性制约,其他储层研究应用较少。然而,随着碳税和碳交易价格的不断提高、碳减排压力的不断加大,未来CCUS项目将由CO<sub>2</sub>的利用为主转为封存为主,成为实现碳中和的兜底技术。因此,开展多类储层封存利用技术研究储备,实施多类储层同步埋存,扩大埋存量,可以获得更多的碳交易收益。

## 4 结论

CCUS-EOR是最成熟、最具创效潜力的CCUS技术,但是其经济性并不理想,目前盈利的多为200

元/t以内的低价气源项目。在油价为60美元/bbl、CO<sub>2</sub>成本为300元/t条件下,项目内部收益率大致在±8%之间,大部分项目在国际油价70美元/bbl以上内部收益率才能达到8%。

CCUS-EOR项目经济性主要受原油价格、增油量、CO<sub>2</sub>价格、换油率和吨油建设投资影响。提高项目本身经济效果应重点从CO<sub>2</sub>价格、换油率和吨油建设投资入手,至少要保证CO<sub>2</sub>价格<300元/t、换油率<4.5 tCO<sub>2</sub>/t油、吨油建设投资<700元/t,超过该标准的项目内部收益率较难达标。如果项目CO<sub>2</sub>价格在200元/t以下或换油率在2 tCO<sub>2</sub>/t油以下基本可以保证项目盈利。

CCUS项目可以通过碳交易、碳减排项目财政支持和税收减免等方式获得外部收益:一是应积极跟踪推动CCUS项目核证方法学的编制备案,推进CCUS项目减排量进入国家碳市场;二是要积极呼吁争取国家对碳减排技术与项目的直接财政支持与所得税等税收优惠政策,降低减排成本、促进减排技术发展与目标实现;三是开展多类储层封存利用技术研究储备以及多储层同步埋存研究,为扩大埋存量以及CCUS产业发展奠定技术基础。

## 参考文献

- [1] IEA. World energy outlook 2020 [EB/OL]. 2020. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.
- [2] 孟新,罗东坤.CO<sub>2</sub>驱油提高采收率项目的经济评价方法[J].技术经济,2014,33(12):98-102,122.  
MENG Xin, LUO Dongkun. Economic evaluation method for CO<sub>2</sub> enhanced oil recovery project [J]. Technology Economics, 2014, 33(12):98-102, 122.
- [3] 刘牧心,梁希,林千果.碳中和背景下中国碳捕集、利用与封存项目经济效益和风险评估研究[J].热力发电,2021,50(9):18-26.

表5 全球各国CCUS项目主要支持政策  
Table5 Main support policies of CCUS in world

类别	政 策
财政 补贴	美国:《美国复苏与再投资法案》中34亿美元拨款与CCUS相关;
	欧洲:“欧洲能源复兴计划”批准了首批6个全流程CCS示范项目,资助共计10亿欧元;
	挪威:投入数十亿挪威克朗,建立蒙斯塔德碳捕集技术中心;
	英国:投入10亿英镑支持境内4个全流程CCS示范项目;
税收 优惠	加拿大:加拿大政府和阿尔伯塔省政府分别投入10亿和15亿加元支持3个CCS项目; 目前全球19个大型一体化CCUS项目中(捕集规模超过50×10 <sup>4</sup> t/a),有13个项目在落地过程中都得到了政府的资金支持 <sup>[2]</sup>
	美国:45Q法案,按照封存的CO <sub>2</sub> 量进行所得税抵免(12 a)。2008年颁布,当时抵免额为10/20美元/t;2018,2021年分别修订一次。三次采油2020年抵免额为20.22美元/t,之后每年根据通货膨胀率调整,到2026年提高到35美元/t;永久封存2020年抵免额为31.77美元/t,之后每年根据通货膨胀率调整,到2026年提高到50美元/t

- LIU Muxin, LIANG Xi, LIN Qianguo. Economic analysis and risk assessment for carbon capture, utilization and storage project under the background of carbon neutrality in China [J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(9): 18-26.
- [4] 李月清. 推进 CCUS 商业化对策与建议 [J]. *中国石油企业*, 2021, (8): 51.  
LI Yueqing. Countermeasures and suggestions for promoting CCUS commercialization [J]. *China Petroleum Enterprise*, 2021, (8): 51.
- [5] 薛华. “碳中和”背景下中国油气行业 CCUS 业务发展策略 [J]. *油气与新能源*, 2021, 33(3): 67-70.  
XUE Hua. Strategic study on “Carbon Neutrality” targeted CCUS development in China petroleum industry [J]. *Petroleum and New Energy*, 2021, 33(3): 67-70.
- [6] Energy Ventures Analysis. Understanding 45Q: The carbon capture tax credit [EB/OL]. (2020-10-08) [2021-03-11]. [https://www.evainc.com/energyblog/45q-the-carbon-capture-tax-credit/#: ~: text=45Q% 20is% 20a% 20performance-based% 20tax% 20credit% 20incentivizing% 20carbon, liability% 20offset% 20per% 20captured% 20tonne% 20of% 20carbon% 20dioxide](https://www.evainc.com/energyblog/45q-the-carbon-capture-tax-credit/#:~:text=45Q%20is%20a%20performance-based%20tax%20credit%20incentivizing%20carbon,liability%20offset%20per%20captured%20tonne%20of%20carbon%20dioxide).
- [7] 彭斯震. 国内外碳捕集、利用与封存 (CCUS) 项目开展及相关政策发展 [J]. *低碳世界*, 2013, (1): 18-21.  
PENG Sizhen. Development and related policy development of carbon capture, utilization and storage (CCUS) projects at home and abroad [J]. *Low Carbon World*, 2013, (1): 18-21.
- [8] 秦积舜, 李永亮, 吴德彬, 等. CCUS 全球进展与中国对策建议 [J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(1): 20-28.  
QIN Jishun, LI Yongliang, WU Debin, et al. CCUS global progress and China's policy suggestions [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(1): 20-28.
- [9] 郭敬晓, 蔡闻佳. 全球碳捕捉、利用和封存技术的发展现状及相关政策 [J]. *中国能源*, 2013, 35(3): 39-42.  
GUO Minxiao, CAI Wenjia. Status of the global CCUS technology development and related policy recommendations [J]. *Energy of China*, 2013, 35(3): 39-42.
- [10] 张贤. 碳中和目标下中国碳捕集利用与封存技术应用前景 [J]. *可持续发展经济导刊*, 2020, (12): 22-24.  
ZHANG Xian. The application prospect of CCUS in China under the target of carbon neutrality [J]. *China Sustainability Tribune*, 2020, (12): 22-24.
- [11] 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(9): 29-33.  
ZHANG Xian, LI Kai, MA Qiao, et al. Orientation and prospect of CCUS development under carbon neutrality target [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(9): 29-33.

编辑 林璐