

引用格式: 孙艺心, 段宏波. 《巴黎协定》温控目标下石油的角色与转型路径[J]. 世界石油工业, 2024, 31(2): 11-22.  
SUN Y X, DUAN H B. Role of oil in energy transition toward Paris Agreement climate vision[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(2): 11-22.

# 《巴黎协定》温控目标下石油的角色与转型路径

孙艺心, 段宏波

(中国科学院大学经济与管理学院, 北京 100190)

**摘要:** 实现《巴黎协定》温控目标的核心在于清洁能源对传统化石能源的实质性替代, 能源转型压力驱动了对石油产业转型的广泛关注和研究。采用主题文献分析和统计分析相结合的方法, 系统分析石油在能源清洁化转型中承担的关键角色, 探索综合评估模型下石油及化工产业未来可行的转型路径。采用合作网络、共现分析、聚类分析等方法对石油产业转型研究进行扩展分析。结果表明, 碳中和愿景要求石油产业链进行从产能技术到产业布局的根本性变革, 包括限制石油储量开采, 逐步淘汰高成本原油开采, 积极寻找石化制品的替代方案等。主要石油生产国的未来发展和定价策略会对世界石油格局产生重要影响, 硬性的石油系统能源转型可能导致不同群体的多重损失, 下游产业的适应和社会影响尤其值得关注。分析表明, 欧洲地区是当前石油转型路径研究的重心, 而中国的相关研究略显不足, 基于综合评估模型的多模型比较研究、未来石油企业的策略行为与气候变化的关系分析、重点地区的石油产业政策和未来石油供需情况、立足于符合中国国情的石油清洁化转型研究等是未来的重要研究方向。

**关键词:** 石油部门; 能源清洁化; 产业转型; 《巴黎协定》; 综合评估模型

**中图分类号:** TE-9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-0030(2024)02-0011-012 **DOI:** 10.20114/j.issn.1006-0030.20230830002

## Role of oil in energy transition toward Paris Agreement climate vision

SUN Yixin, DUAN Hongbo

(School of Economics & Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** It is the kernel for climate target of Paris Agreement that cleaner energy should substantially take the place of traditional fossil fuels in future. The strain of the energy transition has prompted a lot of attention and research on the transition of the oil sector. It is proposed a framework combined with relevant subject literature and statistical analysis to investigate the crucial role that oil plays in the transition to clean energy and to explore feasible transition pathways for the petroleum and petrochemical industries under integrated assessment models. Additionally, cooperation networks, co-occurrence analysis and clustering analysis are adopted to make extended analysis for oil industry transition. Results indicate that under ambition of carbon neutrality, the oil industry chain is required to make fundamental changes from production capacity technology to industrial layout, including untapped oil reserves control, phase-out of expensive crude oil extraction and alternatives to petrochemical products. The development of major oil-producing nations and price strategy put a significant impact on global oil market. An abrupt shift in oil could cause multiple damages to various groups. Particularly concerning are downstream industries' adaptation and social effects. Europe leads the way in research on the oil transition road at the moment, whereas China's research in this area is manifestly lacking. In the future, multi-model comparison based on the IA model may be essential.

**Keywords:** petroleum sector; energy cleanness; industrial transformation; Paris Agreement; integrated assessment model

## 0 引言

气候问题正在对全球生态环境产生深刻影响, 气候变化所涉及的经济、能源、政治等综合性战略

问题已成为全球共同面临的挑战<sup>[1]</sup>。2015年12月, 《巴黎协定》(Paris Agreement)首次达成具有法律约束力的气候变化协议, 签署国家通过自主贡献的方式自愿申报碳减排目标。截至2022年年底, 已

收稿日期: 2023-08-30

修回日期: 2023-12-15

基金项目: 国家自然科学基金“能源-经济-环境综合评估建模理论与应用”(72022019; 72325008); 中国科学院青年创新促进会(2021164), 环境保护基金会(EDF2022)

第一作者: 孙艺心(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事综合评估建模研究。E-mail: sunyixin22@mailsucas.ac.cn

通信作者: 段宏波(1985—), 男, 博士, 教授, 长期从事环境与资源经济学、气候经济综合评估建模、碳大数据与金融等领域的教学和研究工作。E-mail: hbduan@ucas.ac.cn

有140多个国家承诺2050年或者2060年前实现碳中和。《巴黎协定》的长期目标是将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在2℃以内，并努力将温度上升幅度限制在1.5℃以内<sup>[2]</sup>。实现温控目标的核心路径在于零碳可再生能源对高化石能源的根本性替代。然而，目前化石燃料仍然在能源系统中占据主要地位，2021年全球化石能源消费占一次能源消费总量（TPEC）的82%，其中石油消费占比30%以上，因此必须尽早减少化石能源的使用<sup>[3-4]</sup>，特别是应大力推动石油生产和消费转型，以实现《巴黎协定》温控目标。国际能源署（IEA）表示，2050年前需要禁止开采全球超过1/3已探明储量的化石能源，以保证气候安全<sup>[5]</sup>。中国2060年实现碳中和目标，需要将石油消耗、TPEC和碳排放分别减少79%、32%和98%以上<sup>[6-7]</sup>。由此可见，化石能源仅具有短期“压舱石”地位，从长期来看不可持续，有序退出具有必然性<sup>[8]</sup>。

目前，全球能源系统正面临供应安全与低碳能源转型的双重严峻挑战，石油安全与能源转型压力驱动了对石油产业转型的广泛关注和研究。为探明《巴黎协定》温控目标下石油的角色和产业转型路径，本文采用主题文献分析和统计分析相结合的方法，系统分析石油在能源清洁化转型中承担的关键角色，探索综合评估模型下石油及化工产业未来可行的转型路径。采用合作网络、共现分析、聚类分析等方法对石油产业转型研究进行扩展分析。指出未来针对《巴黎协定》温控目标下石油的角色与转型路径研究主要有3个方向。基于综合评估模型（Integrated Assessment Model, IAM）的多模型比较框架研究将在石油产业转型评估中扮演愈加重要的角色，亟待评估矿产资源利用、石化企业资产、交通运输能源替代等能源转型导致的广泛系统性传导影响，亟待对重点地区的石油产业政策和未来石油供需情况进行异质性分析。

## 1 温控目标下石油行业转型存在的问题

### 1.1 气候目标实现面临多重挑战

在《巴黎协定》温控目标约束下，石油行业面临石油保供、重新调整商业运营模式与努力贡献温室气体减排的多重挑战<sup>[9]</sup>。各国净零目标的提出，促使全球石油需求达峰时间提前至2030年之

前<sup>[10]</sup>。随着电动汽车等低碳产业的快速发展，交通运输业的“去石油化”加速长期石油需求的下降。在碳减排目标约束与石油需求下降的双重背景下，石油行业既需要满足能源服务需求，又需要提供创新性的气候解决方案<sup>[11]</sup>。因此，石油行业必须及时调整发展模式与运营战略，以适应能源重构性变革<sup>[12]</sup>。

### 1.2 低碳能源领域技术投资不足

石油行业的雄厚资本对于一些关键的资本密集型清洁能源技术走向成熟至关重要，但目前其在推动能源转型领域的努力还远远不够<sup>[13]</sup>。目前，全球多家油气公司在其核心业务领域以外的投资还不到总资本支出的1%<sup>[5]</sup>，对石油和天然气的投资仍在继续增长，各国政府对低碳能源转型实际实施的政策还远未及有效<sup>[14]</sup>。石油行业的大型工程、项目管理能力和丰富资源可以在帮助解决一些最难减排部门的碳排放方面发挥核心作用<sup>[5]</sup>，包括碳捕集、利用与封存技术（CCUS），以及低碳氢、生物燃料和海上风能的开发和利用等，能否利用先进技术有效降低替代能源成本是石油企业实现转型的关键。此外，对当前和潜在的投资者而言，由于未来大量石油储量将被限制开采，对石油能源的投资面临搁浅的风险，石油企业融资前景不容乐观。

### 1.3 石油基产品的可持续生产和消费，加大石油行业低碳转型难度

与煤炭等其他化石燃料不同，石油不仅可作为能源使用，其相关副产品也是众多消费品的重要组成部分，涉及房地产、建筑、汽车、纺织服装等诸多行业<sup>[15]</sup>，这为石油产业转型带来叠加挑战。2020年，经济合作与发展组织（OECD）成员国的原油需求中，交通领域占比最高，达到48.6%；石化行业和其他工业占比分别为16.2%和12.6%；建筑和电力占比分别为9.8%和3.0%。其中，石化工业产品渗透到现代社会各个领域，包括以聚乙烯和聚苯乙烯为原料的塑料制品、以石油为原料合成氨的化肥、以石化丁二烯为成分的合成橡胶，甚至洗衣粉中的表面活性剂和聚酯纤维等<sup>[16]</sup>。在未来经济“脱油”的背景下，这些石油基产品如何可持续地生产和消费，石化企业如何应对能源转型挑战以实现绿色高质量发展，是石油产业转型不可回避的问题，已有研究尚未对此引起足够的重视。

## 2 研究方法

已有诸多文献探讨了化石能源如何适应2 °C或1.5 °C温控目标下的能源体系，其中包括石油能源在碳约束下关键时点的具体开采目标<sup>[5, 17-18]</sup>、石油产业未来可能的转型发展方向<sup>[6]</sup>等。诸多学者围绕碳中和目标下石油产业转型相关主题开展了一系列研究，涵盖石油供应<sup>[19]</sup>、石油消费与石油价格<sup>[20]</sup>、石化产业转型<sup>[21]</sup>、温控目标与转型路径、产业链减排等多个方面。综合评估模型（IAM）作为系统性分析能源、经济、气候问题的框架依据，被广泛用于化石能源退出的情景分析。

本文基于定性内容分析与描述性定量统计相结合的文献综述方法，配合简单的文献计量工具，系统分析《巴黎协定》温控目标下石油的角色和可能的转型路径，从研究方法、分析视角、低碳化实践等多个维度，给出未来石油领域研究和相关产业转型发展的潜在方向。具体研究路径：（1）定义4

个关键综述主题，分别为石油开采现状及石油在能源转型中的关键角色、IAM研究中《巴黎协定》温控目标下的石油产业转型路径、评估目前努力与实现目标的不确定性、针对石油产业转型措施的社会经济影响。（2）在Web of Science核心合集（Web of Science Core Collection）中针对2003—2023年的文献数据进行关键词和主题检索，并依据学科分类和人工筛选，选取相关文献作为研究对象。（3）使用基于描述性统计的文献计量方法，对《巴黎协定》温控目标下石油的角色与转型路径研究的相关文献进行趋势统计分析。（4）为深入了解石油低碳转型路径的文献发展脉络，使用基于CiteSpace软件的关键词共现分析和聚类分析等方法，检验对相关主题关注程度较高的地区机构异质性和研究热点发展趋势，以帮助相关研究者或企业更好地追踪研究动态，深刻理解《巴黎协定》温控目标下石油的角色与转型路径。《巴黎协定》温控目标下石油的角色与转型路径整体研究框架见图1。

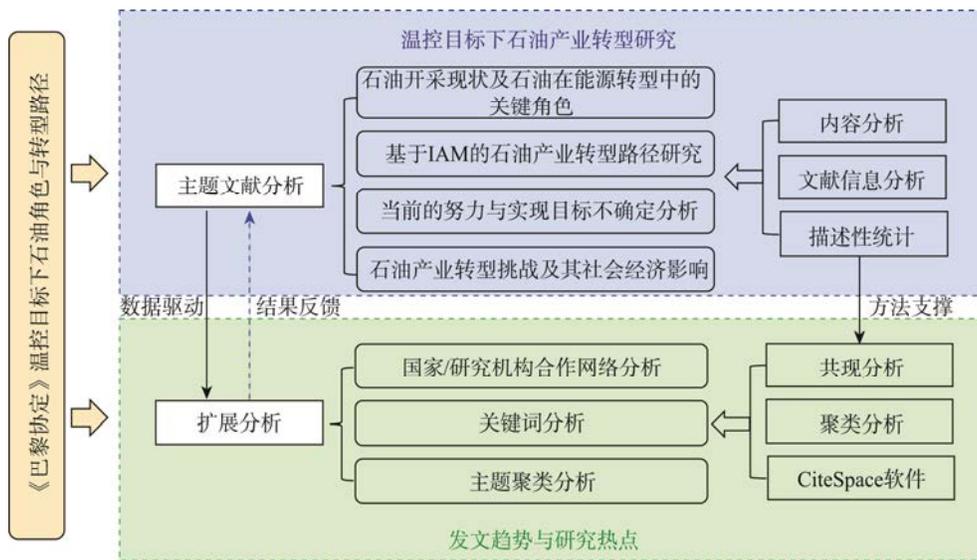


图1 《巴黎协定》温控目标下石油的角色与转型路径研究框架

Fig.1 Research framework of the role of oil in transition toward Paris Agreement climate vision

## 3 主要研究结果及分析

### 3.1 石油开采现状及石油在能源转型中的关键角色

根据《bp世界能源统计年鉴》2022年版，近10年来，全球探明石油总储量一直保持稳定趋势。截至2020年年底，全球石油探明总储量 $17\ 323.0 \times 10^8$  bbl，中东地区占比48.3%，石油输出国组织（OPEC）占比

70.1%；2020年全球石油生产总量 $9\ 384.8 \times 10^4$  bbl/d，OPEC、北美、中东地区分别占比36.30%、26.9%、32.80%（见图2）。其中，主要产油国和储量高的国家并不完全重合，例如委内瑞拉、伊朗虽然拥有较多的储量，但其产量并不高；反之，美国、俄罗斯虽然产量较高，但储量有限。全球石油消费量在2020年断崖式下降至 $8\ 850.0 \times 10^4$  bbl/d之前，2009—2020年

之间始终呈现不断上涨趋势。2020—2022年，全球石油消费量逐年回升，2022年为 $9\,730.9 \times 10^4$  bbl/d，其中亚太地区占比最高，其次为北美和欧洲地区，非洲地区占比最低。在亚太和北美地区，石油、天然气仍在一次能源需求中占比较大，预示着该地区蕴含“去石油化”的巨大潜力<sup>[22]</sup>，欧洲地区以天然气为基础的能源结构已较为稳定，石油需求逐渐被清洁能源替代。

在石油开采造成的碳排放上，全球炼油碳排放强度在国家层面为 $13.9 \sim 62.1$  kg/bbl，在原油层面为

$10.1 \sim 72.1$  kg/bbl二氧化碳当量<sup>[23]</sup>。由于石油和天然气的开采需要大量能源来驱动钻机、泵、压缩机和其他工艺设备，2022年全球上游油气作业所需燃料供应导致的间接碳排放超过 $7 \times 10^8$  t<sup>[24]</sup>。Kühne等<sup>[25]</sup>通过计算全球425个最大化石燃料开采项目的潜在碳排放量，发现这些碳排放量总和超过将全球气温上升幅度控制在 $1.5^\circ\text{C}$ 以内的碳预算的2倍。Luderer等<sup>[26]</sup>估计，尽管进行了大规模的努力和应用二氧化碳清除（Carbon Dioxide Removal, CDR）技术，化石燃料的碳排放量仍可能会超过碳预算。

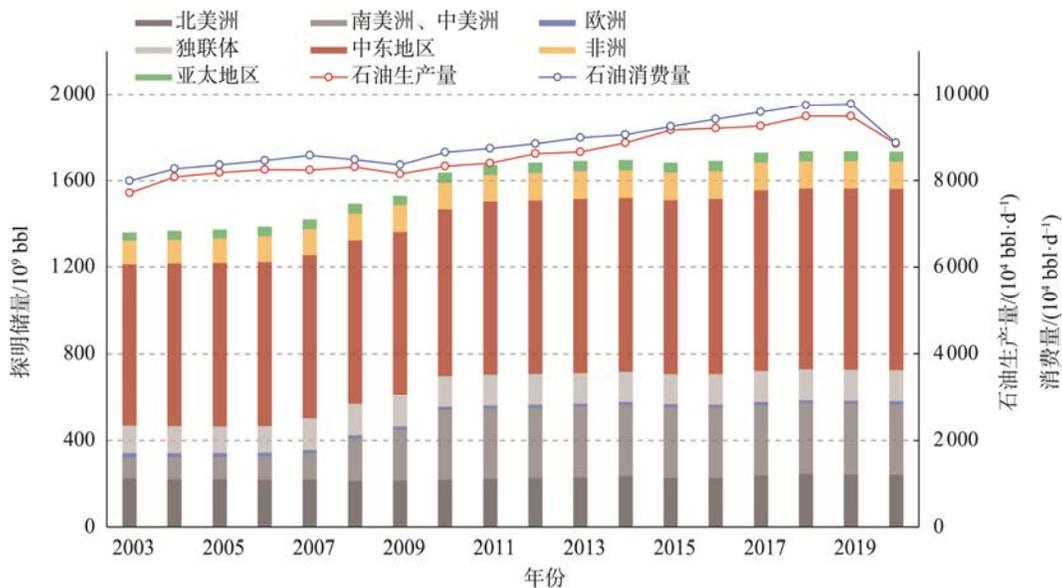


图2 全球石油探明储量与生产量、消费量

Fig.2 Global proven reserves, production and consumption

数据来源：《bp世界能源统计年鉴》2022年版，其中石油储量数据公布至2020年

近年来，由于石油危机、乌克兰危机等不稳定因素，导致全球能源需求剧烈波动，油价冲击、能源供应链中断、能源投资受阻等现象频发，给石油供给带来诸多不稳定因素。（1）对石油进口国而言，若市场波动因素迫使石油供给国单方面减少产量，化石能源供给的稀缺性将导致能源危机、社会动荡和地缘政治紧张，以及对本土能源需求的增加<sup>[27]</sup>。

（2）出于对能源安全的担忧考虑，石油进口国减少了对石油的未来进口预期，对本土生产能源的偏好增加，这种情况在中国和印度尤其明显，两国目前使用的石油能源有75%~85%依赖进口。（3）地缘政治对全球石油贸易供给的影响不容忽视，在乌克兰危机发生之前，俄罗斯是世界上最大的能源出口国，受乌克兰危机影响，俄罗斯减少了石油产量。

在国际多边框架下积极推动供给侧政策制定，妥善协调石油输出国的生产能力和战略定价，可以一定程度减少石油供给的不稳定性，但供给侧气候条约同样受制于“搭便车困境”，大国拥有参与多边框架制定和协调设定生产目标的权利；小国家会缺乏采取气候行动的激励，易受到激励而偏离合作策略<sup>[14]</sup>。

### 3.2 基于IAM的石油产业转型路径研究

IAM作为评估温控目标经济可行性和气候政策综合影响的重要工具，在对石油等化石能源退出时间、总量、能源技术替代的研究中不可或缺，模型研究对温控目标下石油可采量、排放量提出的潜在要求见表1。IAM从模型逻辑上分为BU（自下而上）、TD（自上而下）2类，其中TD模型又分为ESM（能

源系统模型)和EBM(基于工程系统模型)。模型结果表明,要实现全球气温上升幅度控制在2℃以下,三分之一的石油储量应该留在地下<sup>[4]</sup>,要以50%的概率实现将全球气温上升幅度控制在1.5℃以下,到2050年开采的石油储量占2018年储量基数的百分比约为58%<sup>[18]</sup>。MESSAGE模型(替代能源供给系统和环境影响模型)通过设置高低油价情景,评估对能源系统的影响<sup>[37]</sup>,研究发现随着燃料替代的动态演变,能源系统对油价设置敏感,为确保全球气温上升幅度控制在2℃以内,累计碳排放变化幅度高达5%~20%。来自巴西的COFFEE模型通过引入石油生产模块和CDR等负碳技术<sup>[29]</sup>,发现未来在CDR等技术支持下,更高的原油产量在IAM中是可能实现的。DNE21+、IPAC等多模型比较结果显示,碳中和目标要求中国石油消费量在2025年左右达到峰值,2060年下降至 $190.16 \times 10^8$  t,但即使在严格的温控限制下,石油也不会在未来40年内完全退出能源结构<sup>[6]</sup>。此外,一些石油生产模型如OPGEE也被应用到石油产业转型路径评估中<sup>[30]</sup>,结果指出,面对小于2.5%的石油需求冲击,大部分重质原油将被取代,减少石油需求的碳排放效益取决于需求下降的幅度和全球石油市场结构。

对石油产业低碳化的能源技术投入和应用,如能效节约技术、低碳能源替代、CCUS技术等,是驱动石油产业转型的关键因素<sup>[31]</sup>。能源技术和能效节约技术的丰度会影响特定温控目标下石油产业转型路径的模型评估<sup>[32]</sup>。其中,CCUS技术和CDR是中国实现1.5℃温控目标的关键技术抓手,对石油产业而言更是不可或缺的技术手段。IEA在2023年能源展望<sup>[24]</sup>中认为,为石油生产过程配备CCUS技术是加快石油产业减排的5个关键杠杆之一。CDR可以延长石油生产寿命,在生产、贸易和精炼方面允许对石油资源进行时间优化<sup>[33]</sup>,这是由于CDR技术可以部分补偿在中短期内难以实现石油产品替代的部门。此外,作为油气产业链上游最大的排放源,海上油田的能效提升和低碳技术发展也至关重要。钟诚等<sup>[34]</sup>基于油气-生态的碳反馈循环概念模型,提倡将海洋保护与海上油气田的开发设计更紧密的结合,开发低碳绿色油田材料等策略,充分发挥海洋丰富的“蓝碳”潜力。总体而言,低碳电力和更高的能源效率是碳减排努力的核心,但应对气候变化没有单一或简单的解决方案,石化产业更高水平的一体化可以对石油需求高峰提供对冲,带来协同效应并提高供给灵活性<sup>[6]</sup>。

表1 石油脱碳路径的跨模型研究

Tab.1 Model assessments of oil decarbonization pathways

作者	模型	模型类型	石油脱碳路线	年份
Welsby, et al. <sup>[18]</sup>	TIMES	ESM; BU	到2050年,近60%的石油必须保持不开采,以允许50%的概率实现将全球气温上升幅度控制在1.5℃以内	2021
McGlade & Ekins <sup>[4]</sup>	TIMES	ESM; BU	到2050年,三分之一的石油储量应该留在地下,以实现将全球气温上升幅度控制在2℃以内	2015
Deshmukh, et al. <sup>[35]</sup>	Oil-production model	EBM	美国加利福尼亚州石油供应侧政策中的关停等策略,带来了最大的避免死亡率福利和最大的工人损失补偿	2023
Masnadi, et al. <sup>[30]</sup>	OPGEE	EBM; BU	面对小于2.5%的石油需求冲击,大部分重质原油将被取代	2021
McCollum, et al. <sup>[28]</sup>	MESSAGE	ESM; BU	持续的低油价或高油价可能对全球能源系统产生重大影响,确保全球气温上升幅度控制在2℃内的累计碳排放变化幅度高达5%~20%	2016
Draeger, et al. <sup>[29]</sup>	COFFEE	ESM; BU	通过应用CDR等技术,在IAM中可能实现更高的原油产量	2022
Bauer, et al. <sup>[36]</sup>	REMIND	TD	到2100年,化石燃料租金的净现值为 $30 \times 10^{12}$ 美元,其中石油占比最大。实现 $550 \times 10^6$ 和 $450 \times 10^6$ 的CO <sub>2</sub> 当量温控目标使化石燃料租金分别下降为 $9 \times 10^{12}$ 美元和 $12 \times 10^{12}$ 美元	2013
Trout, et al. <sup>[37]</sup>	UCube	EBM; BU	实现将全球气温上升幅度控制在1.5℃以内的碳预算(50%的概率),意味着保留近40%的化石燃料“已开发储量”不进行开采	2022
Ding, et al. <sup>[6]</sup>	DNE21+, IPAC, AIM/CGE, IMAGE, REMIND, WITCH, and POLES	ESM; BU; TD	碳中和目标要求中国石油消费量在2025年左右达到 $744.25 \times 10^8$ t的峰值,然后到2060年平均下降至 $190.16 \times 10^8$ t	2023

石油等化石能源退出的设计路线是复杂的, 选择配合退出路线的政策工具同样充满挑战<sup>[38]</sup>。碳税等需求侧政策的公平性饱受质疑, 在各国气候政策不一致的情况下, 需求侧政策会导致碳泄漏<sup>[39]</sup>, 碳税的大部分成本不成比例地转嫁给脆弱的最终消费者, 造成区域不公平的经济福利损失。供给侧政策直接、易操作的特点能一定程度弥补需求侧政策的弊端<sup>[40]</sup>。供给侧政策可以通过制造化石燃料市场的稀缺性, 提高化石燃料的国际市场价格, 在严格执行条件下能够规避需求侧政策不一致导致的碳泄露问题<sup>[41]</sup>; 同时, 高油价提高主要石油能源出口国的减排积极性, 同时在地理上储量集中具有易于监测碳排放的优势<sup>[41-42]</sup>。忽略金融风险的化石能源退出可能导致资产搁浅(资产搁浅是指由于破坏性政策和/或技术变革而使投资资本/资产未来利润预期崩溃的过程), 价值损失首先反映在投资者对企业价值的预期中, 进而传导至市场价格。供给侧政策被认为不受“绿色悖论”的影响, 因此能够避免对化石燃料上游部门投资的预期, 减少未来的搁浅资产<sup>[43]</sup>。利用E3ME-FTT-GENIE综合评估建模框架评估石油资产搁浅影响<sup>[44]</sup>, 研究表明资产搁浅的大部分市场风险由私人投资者承担, 特别是OECD国家, 包括养老基金和金融市场的风险暴露。但相较于燃煤、天然气电厂, 多模型评估的稳健结果表明燃油电厂只占电厂搁浅的很小部分<sup>[45]</sup>。

### 3.3 当前努力与实现目标的不确定分析

2019年, 全球平均温度已比工业化前平均温度上升1.1℃<sup>[46]</sup>, 如果到2100年要将全球平均气温上升幅度控制在2℃以内, 需限制化石燃料使用不能超过碳预算<sup>[5]</sup>。现实中, 地区间脱碳目标、化石燃料退出时间的不同, 以及政策异质性等不确定因素是需要考虑的重要内容<sup>[14]</sup>。油企行为也是能源市场中的不确定因素之一, 主要体现为石油企业的投资决策、石油价格预测等因素可能会引起盈利波动, 导致企业无力兑现温控目标。目前, bp公司、意大利埃尼集团、挪威国家石油公司、荷兰壳牌石油公司和法国道达尔能源公司等5家欧洲石油公司都明确宣布了2050年碳中和目标和中期碳减排目标<sup>[22]</sup>。但是, 国际石油公司在碳中和目标实现时间和目标界定上存在很大差异<sup>[29, 47]</sup>。例如, 挪威国家石油公司已明确承诺到2030年全面实现碳中和运营, 到2050年实现净零排放; 荷兰壳牌石油公司、美国埃

克森美孚公司提出了短期明确的碳强度目标; 意大利埃尼集团、沙特阿拉伯国家石油公司承诺了范围1(直接碳排放)、范围2(能源间接碳排放)的碳减排目标; 法国道达尔能源公司将范围3(价值链内碳排放)的碳减排也考虑在内。Trencher等<sup>[12]</sup>对bp公司、荷兰壳牌石油公司、美国雪佛龙公司和美国埃克森美孚公司的净零战略进行分析, 结果发现没有一家石油巨头的脱碳路径反映了旨在摆脱化石燃料的根本商业模式转型。

对未来油价的预测具有高度不确定性<sup>[23]</sup>, 价格在情景研究中反映了油气开采成本与收益之间的动态周期性关系, 起到调节石油供需的关键角色<sup>[48]</sup>。有研究认为, 供给侧政策提高石油开采成本导致的高油价, 将成为石油退出的重要推力<sup>[14]</sup>。一项针对美国联邦气候政策的研究表明, 考虑到燃料价格和能源技术资本成本的不确定性, 当天然气和电动汽车的成本下降、而煤炭和石油的价格相对于基线上涨时, 会呈现美国能源相关温室气体排放最低的情景<sup>[49]</sup>。但也有研究认为, 未来如果伴随稳定的低油价, 主要资源持有者可能会选择扩大市场的战略<sup>[5]</sup>。IEA的可持续发展情景(Sustainable Development Scenario, SDS)限制对高成本石油的需求以平衡市场, 因此该情景下石油价格较低, 从2020年的70美元/bbl逐渐下降并稳定在60美元/bbl<sup>[5]</sup>。此外, 模型研究表明, 如果不考虑石油市场持续动荡的可能性, 可能会导致石油价格在数年内高于长期市场平衡价格<sup>[50]</sup>。

能源稀缺性的感知将在最终能源替代中扮演重要角色<sup>[52]</sup>, 模型对石油可耗竭性、开采成本、内生学习率的不同设置, 导致估计的碳价格、石油价格存在差异。因此, 有必要关注模型中石油储量可用性的假设<sup>[31]</sup>。累计供给成本曲线的形状影响未来能源技术竞争。Capellán-Pérez等<sup>[50]</sup>考察了指数、逆函数和logistic函数形式的累计成本函数给模型结果带来的不确定影响, 表明成本函数差异解释了累计碳排放不确定性的1.7%、辐射强迫不确定性的2.7%。Jaccard等<sup>[51]</sup>基于11个综合评估模型(IAM)的研究结果表明, 石油生产成本呈现2025年前温和上升、之后快速逆转的趋势。Kriegler<sup>[32]</sup>研究结果表明, 虽然化石资源假设对能源技术自然发展的基准情景(Baseline)有实质性影响, 但由于温控目标提出的强制性要求, 石油可用性假设对减缓气候变化情景的影响有限。

### 3.4 石油产业转型挑战及其社会经济影响

《巴黎协定》温控目标下,石油行业的压力不仅仅来自于能源本身的转型,还面临石油化工产业发展的挑战。石化产业是最大的工业能源消费者,但长期以来一直是气候和能源政策研究中的盲点。石化产业在过去的一个世纪发展迅速,2010—2019年全球化学品销售额每年增长约7.5%<sup>[43]</sup>,其中塑料制品的使用尤为突出<sup>[5]</sup>,积极推动石化制品的可持续替代转型将是未来石油产业转型的关键一环。从本质上讲,工业化学家是通过将石油和天然气中的碳氢化合物分解和精炼成更小的化合物来制造大多数分子。因此,越来越多的科学家和化工企业认为可以通过利用可再生能源来制造同样的终端化合物<sup>[54]</sup>。然而,目前使用电力直接合成大多数复杂的碳氢化合物仍然效率低下且成本高昂。生物质材料被视为解决石油制品问题的另一可能解决方案,即将生物基产品作为传统石油衍生产品的替代品,如润滑剂、洗涤剂<sup>[55]</sup>。可再生原料的植物材料如木质纤维素,可通过微生物发酵生产燃料和化学品作为石化产品的理想替代品<sup>[56]</sup>,生物降解聚合物的生产成本与石化衍生塑料的生产成本相当<sup>[57]</sup>。

在全球碳减排和经济社会可持续发展的大趋势推动下,石化行业正在进行重大的产品和工艺创新<sup>[58]</sup>。然而,石化产业与采油业高度耦合的供应链结构导致石化产业在低碳化转型中缺乏灵活性,石化企业的技术和产品转型方向仍在探索之中。(1)目前石化企业的应对措施集中在提高效率和流程集约化<sup>[59]</sup>,经济动机主导了对低碳承诺与企业技术创新之间的冲突<sup>[60]</sup>。(2)将现有的石化产业集群转变为塑料回收的热化学回收厂被视为解决方案之一,已有研究认为利用现有基础设施对石化产业集群进行改造在技术上是可行的<sup>[61]</sup>。例如,印度尼西亚石化行业减排的系统动力学模型结果显示,工艺优化可以适当减少碳排放,而生物基原料的利用和先进技术的实施则可以显著减少碳排放<sup>[62]</sup>。

强制石油产业转型可能导致不同群体的多重损失,因此必须更好地探索这种转型的中长期社会影响。研究表明,直接关停、停止发放许可证等生产端政策工具被证实相较于消费端手段更具有过程公平和结果公平<sup>[16, 35, 42]</sup>;高度依赖碳密集型产业的地区更容易受到低碳转型相关风险的影响<sup>[64]</sup>。因此,通常认为,与发达国家相比,公正的过渡应该允

许其他国家在更长的时间内继续使用化石燃料<sup>[65]</sup>。逐步淘汰石油开采的国家顺序因所采用的标准而异,基于个别标准的排序可能导致考虑不周的结果<sup>[63]</sup>。

石油出口地区的劳动力市场将遭受低碳能源转型的冲击,包括直接就业损失和其他部门的间接就业影响<sup>[66]</sup>,例如高度依赖油砂开采的加拿大阿尔伯塔省劳动力市场在面对石油需求下降时的就业影响<sup>[67]</sup>。油价下跌可能导致地区经济衰退,但合理的模式和选址不仅可以直接在战略领域创造企业和就业机会,还可以将家庭和服务企业重新导向这些领域<sup>[68]</sup>。在净零碳排放情景下,从现在起到2030年,全球清洁能源的就业岗位将增加1 400万个,但石油、天然气和煤炭行业的就业岗位预计仅减少约500万个<sup>[24]</sup>。

## 4 基于文献计量的进一步分析

通过搜索石油、综合评估模型、巴黎协定、石油化工产业、石油制品、碳排放、能源技术、化石能源等关键词和主题,在Web of Science核心合集中检索2003—2023年的文献数据,并依据学科分类和人工筛选,得到155篇相关研究文献。使用合作网络分析和聚类分析等方法,检验基于CiteSpace软件的主题集群文献发表趋势。

### 4.1 当前以欧美为重心的石油产业转型研究

将筛选过的样本数据按时间统计发文数量,可以清晰地反映碳中和目标下石油产业转型领域的受关注程度。2003—2013年相关发文数量一直保持较低水平,2013年之后稍有上升,在2016年之后进入快速增长期,2020年后呈现爆炸式增长,这可能与《巴黎协定》背景下各国陆续颁布国家温室气体减排(Nationally Determined Contribution, NDC)目标及气候问题逐渐被重视有关。2020年中国提出“双碳”目标,也催化了这一领域文献的快速增长。

以样本文献中的发文机构和所在国家作为对象进行分析,可以清晰看出相关研究的地区偏好性。石油脱碳路径研究的重心主要集中在欧洲高校和研究机构,如英国牛津大学、法国国家科学院研究中心(CNRS),国际应用系统分析学会(IIASA)等,并且形成了IIASA、荷兰乌德勒支大学、英国伦敦大学联盟等机构合作群。2020年后,“石油在碳中和路径中的关键角色”这一文献主题受关注度明显增加,研究机构也从传统关注能源系统分析的

科研机构向更多国家的高校扩展,但欧洲以外地区的研究机构影响力仍有限。

在石油脱碳路径发文国家合作网络中,共产生51个国家节点,形成162条国家之间的合作连线。其中,英国、美国、法国和荷兰为最重要的发文国家,分别与中国、日本、希腊、意大利、西班牙等国家建立了密切的合作关系,4个国家发文总和约占筛选文献的61.9%。近年来,石油脱碳路径研究的发文重心仍主要集中于欧洲地区和美国,其次为沙特阿拉伯、阿拉伯联合酋长国、俄罗斯等产油国和亚太、南美等地区。但沙特阿拉伯、阿拉伯联合酋长国等石油资源国与其他国家的发文合作较少,不利于重要研究力量的形成和成果转化,未来石油脱碳路径研究的发文机构之间需要加强横向交流<sup>[69]</sup>。

#### 4.2 温控目标下能源重构驱动石油产业转型研究

关键词作为对文献内容的精炼概括,有着举足轻重的作用,对关键词进行共现分析,可以发现文献中出现频率较高的关键词,从而揭示文献的主题和热点,体现文献的研究价值和方向。中介中心性指的是一个结点担任其他2个结点之间最短路径的桥梁的次数,是用于刻画节点重要性的指标,在CiteSpace中,中介中心性超过0.1的节点称为关键节点。使用CiteSpace软件分析得到的核心关键词共现图谱显示共有283个节点,1121条连接线,网络密度为0.0281。气候变化、化石燃料、可再生能源、能源转型、排放、能源等关键词出现次数较多,说明石油产业转型研究主要由温控目标下能源转型的压力所驱动,涉及化石燃料与可再生能源更替和排放变化等。从中介中心度角度看,气候变化、化石燃料、可再生能源、排放、捕获、石油峰值等关键词出现次数较多,对相邻节点的控制程度也较大,是学者们进行研究的核心理念。

#### 4.3 石油产业转型的社会影响关注度初显

使用潜在语义索引算法(LSI),以“Cluster”为对象,对石油产业转型相关的Green Transition(绿色转型)、Energy Transition(能源转型)、Petroleum Production(石油生产)、Public Opinion(公众观点)、Renewable Energy Consumption(可再生能源消费)、Oil Availability(石油可得性)、CCS Policies(CCS政策)等7大类关键词进行基于共现的聚类分析,得到关键词聚类结构图谱,经计算得到聚类相似度为0.8752,表明聚类显著(一般认为高于0.7

为聚类显著)。这些关键词大体覆盖了石油产业转型路径研究比较热门的领域,将7个类别关键词分为3个主题,可以得到石油碳中和转型研究的一些特征:(1)石油能源特性主题,主要关键词包括石油生产、石油可得性等。石油作为不可再生能源,石油储量、石油产量作为石油供给的基础,在石油市场均衡、价格稳定和平稳转型的进程中,起到支撑性的关键作用。(2)石油退出主题,主要关键词包括绿色转型、能源转型、可再生能源消费、CCS政策等。在《巴黎协定》温控目标和各国碳中和目标下,石油等化石能源退出是净零排放路径的必经之路,研究能源组合优化、规划石油退出和可再生能源进入是加快能源转型的关键措施。(3)社会影响主题,主要关键词是公众观点、公正转型等。石油产业转型伴随经济转型和技术革命,带来经济产出、分配公平等一系列问题,不少研究开始关注石油产业转型措施的短期和长期影响,并使用量化工具评估其影响程度。

## 5 结论及建议

(1)从气候变化约束看,在交通运输业“去石油化”的长期趋势下,石油需求量将在未来逐渐下降,要实现《巴黎协定》温控目标,石油产业链需要进行从关键技术到产业布局的根本性变革。从总量上看,要实现将全球气温上升幅度控制在1.5℃以内,至少全球40%的石油储量将保持不开采。未来30年需逐步淘汰成本较高、质量偏低地区的石油开采,加强石油产业的一体化程度,增强供给的协同性和灵活性,逐步将其转变为其他燃料需求高峰的对冲能源。同时,也要注意石油衰退导致撤资的金融风险,尽量降低化石燃料退出造成的资产搁浅水平。

(2)从产业发展看,OPEC国家、俄罗斯、美国等主要石油生产国的未来发展战略和定价策略将对世界石油格局产生重要影响。例如,转向零碳能源和负碳技术的研发投资战略将加快石油产业转型,而定价策略通过油价传导机制影响全球原油供给稳定。因此,研究经济有效的石油产业发展战略和政策工具,评估现有石油产业政策的有效性、分析技术投资等政策实施的预期影响是必要的。将供给侧政策制定进入国际多边框架可以一定程度减少石油供给的不稳定性,但供给侧和需求侧政策

的实施都要尽量避免“搭便车困境”。从企业维度来看,国际石油公司和国家石油企业亟需实施摆脱化石燃料的根本商业模式转型战略,才能实现化石能源转型中企业的盈利和可持续发展。

(3)从社会经济影响看,石油清洁化转型不仅涉及能源技术变革,也紧密关系到下游石化产业的可持续发展。强制性的石油产业转型可能导致不同群体的多重损失。研究表明,利用可再生能源来制造化合物、生物基产品或成为未来石油制品替代转型的重要途径。针对石化行业产业政策的福利影响和就业影响往往具有地区异质性,直接关停、停止发放许可证等生产端政策工具相较于消费端手段,更具过程公平和结果公平。总体而言,近年来对《巴黎协定》温控目标下石油产业公正转型的关注度大幅提升,但对于转型的多重影响和政策协同性研究仍不充分。

(4)从模型技术看,IAM已广泛应用于化石能源退出的能源技术发展评估研究中,其系统性和经济、能源、气候交互反馈,为评估石油能源退出的政策影响提供了有力的支持。当前应用于石油产业转型研究的模型可以根据建模结构分为“自下而上”和“自上而下”2类。对单个模型而言,对石油可耗竭性、开采成本、内生学习率的假设是影响模型评估结果的重要因素。对模型组而言,多模型比较已成为评估石油产业目前的努力与实现目标不确定性的研究框架,多模型评估给予决策者在多重不确定因素下进行政策制定时更多的稳健性。

进一步分析表明,虽然已对温控目标下的化石能源转型问题开展了广泛研究,但对石油产业转型的针对性评估仍有相当大的空白有待填补。温控目标下石油产业转型路径的研究重心主要集中在欧洲高校和研究机构,亚太地区研究机构的影响力有限且没有形成稳定的合作群。其中,英国、美国、法国和荷兰为最重要的发文国家,4个国家发文总和占研究文献总数的61.9%。气候变化、可再生能源等关键词在近5年来的研究文献中出现频率显著上升。温控目标下的石油产业转型研究主要由该目标下的能源转型压力所驱动,涉及化石燃料与可再生能源更替和排放变化等。通过聚类分析发现,《巴黎协定》温控目标下的石油产业转型研究可以分为石油的能源特性、石油退出、社会影响3大类,涉及能源转型、石油生产、公众观点、可再生能源消费、CCS政策等多个方面;研究主题总体上从传统

关注石油能源特征和石油价格波动,到更关注石油需求达峰、可再生能源、《巴黎协定》温控目标、气候公平,以及气候变化与石油产业转型之间的关系。除此之外,涉及中国的石油产业转型研究整体较少,对中国石油产业转型在世界能源系统转型中承担的角色等问题,尚未得到充分论证。

未来针对《巴黎协定》温控目标下石油的角色与转型路径研究主要有3个方向。

(1)IAM特别是基于IAM的多模型比较框架研究,预计将在石油产业转型评估中扮演愈加重要的角色,其不仅在联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)《全球升温1.5℃特别报告》,以及最新发布的第六次评估综合报告《气候变化2023》中多次被提及,而且已广泛应用于全球和区域层面上许多局地气候政策和影响评估中<sup>[6]</sup>。

(2)针对《巴黎协定》温控目标下的石油建议开采量、可再生能源技术投资需求等,已有较成熟的研究支撑,但能源系统转型涉及广泛而深刻的经济、技术和社会变革,其影响不仅局限于石化行业和能源产业,其对矿产资源利用、石化企业资产、交通运输能源替代等各方面都具有传导性影响。目前,对于严格温控目标下石油产业转型的气候减缓成本尚不明确,未来石油企业的策略行为与气候变化的关系仍缺少有力的理论论证和系统的评估分析。

(3)石油产业转型的长短期影响具有人群异质性和地区异质性,亟待对重点地区的石油产业政策和未来石油供需情况进行分析。如美国加利福尼亚州的停止发放新油井许可证政策可以大幅减少碳排放,并改善该州的环境正义<sup>[42]</sup>。未来可能需要更多地区层面石油产业转型政策的社会影响分析,包括主要石油出口国的石油开采政策和发展中国家石油产业转型的气候和社会影响研究等。特别需要注意的是,目前国家石油公司油气产量占全球油气总产量的近50%<sup>[70]</sup>,全球石油产业在碳达峰、碳中和背景下面临巨大的转型压力,中国碳中和目标的实现和未来中长期能源转型政策的制定有赖于更多立足于符合中国国情的石油清洁化转型研究。

## 参考文献:

- [1] 邹才能,陈艳鹏,熊波,等.碳中和目标下中国新能源使命[J].中国科学院院刊,2023,38(1):48-58.

- ZOU C N, CHEN Y P, XIONG B, et al. Mission of new energy under carbon neutrality goal in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 48-58.
- [2] IPCC. Climate change 2023 synthesis report[R/OL]. [2023-09-22]. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_LongerReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf).
- [3] MEINSHAUSEN M, LEWIS J, MCGLADE C, et al. Realization of Paris Agreement pledges may limit warming just below 2 °C[J]. Nature, 2022, 604(7905): 304-309.
- [4] MCGLADE C, EKINS P. The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C[J]. Nature, 2015, 517(7533): 187-190.
- [5] IEA. The oil and gas industry in energy transitions[R/OL]. [2023-09-22]. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/4315f4ed-5cb2-4264-b0ee-2054fd34c118/The\\_Oil\\_and\\_Gas\\_Industry\\_in\\_Energy\\_Transitions.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/4315f4ed-5cb2-4264-b0ee-2054fd34c118/The_Oil_and_Gas_Industry_in_Energy_Transitions.pdf).
- [6] DING Y, DUAN H, TANG X, et al. Exploring China's oil consumption pathways toward 2060 under different climate targets[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2023, 103: 107233.
- [7] DUAN H, ZHOU S, JIANG K, et al. Assessing China's efforts to pursue the 1.5 °C warming limit[J]. Science, 2021, 372(6540): 378-385.
- [8] 段宏波, 汪寿阳. 中国的挑战: 全球温控目标从2 °C到1.5 °C的战略调整[J]. 管理世界, 2019, 35(10): 50-63.
- DUAN H B, WANG S Y. From 2 °C to 1.5 °C: China's challenges to attain the global warming-limit targets[J]. Journal of Management World, 2019, 35(10): 50-63.
- [9] BACH M S. Is the oil and gas industry serious about climate action?[J]. Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 2017, 59(2): 4-15.
- [10] TRENCHER G, BLONDEEL M, ASUKA J. Do all roads lead to Paris? Comparing pathways to net-zero by bp, Shell, Chevron and ExxonMobil[J]. Climatic Change, 2023, 176(7): 83.
- [11] 辛靖, 王连英. “双碳”愿景对炼化产业的影响及其路径展望[J]. 石油学报(石油加工), 2021, 37(6): 1504-1510.
- XIN J, WANG L Y. Impacts of "Dual Carbon" vision on refining and chemical industry and prospects for its paths[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section), 2021, 37(6): 1504-1510.
- [12] 吴裕根, 娄钰, 门相勇. 油气是保障中国能源安全的重要基础[J]. 世界石油工业, 2022, 29(6): 19-25.
- WU Y G, LOU Y, MEN X Y. Oil and gas providing foundation for energy security in China[J]. World Petroleum Industry, 2022, 29(6): 19-25.
- [13] ALOVA G. Oil majors' slow transition[J]. Nature Energy, 2022, 7(6): 472-473.
- [14] ANDREONI P, REIS L A, DROUET L, et al. Fossil extraction bans and carbon taxes: Assessing their interplay through multiple models[J]. iScience, 2023, 26(4): 106377.
- [15] TICKNER J, GEISER K, BAIMA S. Transitioning the chemical industry: The case for addressing the climate, toxics, and plastics crises[J]. Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 2021, 63(6): 4-15.
- [16] IEA. The Future of Petrochemicals: Towards a more sustainable chemical industry[R/OL]. [2023-09-22]. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/bec4ef3a-8876-4566-98cf-7a130c013805/The\\_Future\\_of\\_Petrochemicals.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/bec4ef3a-8876-4566-98cf-7a130c013805/The_Future_of_Petrochemicals.pdf).
- [17] GRUBLER A, WILSON C, BENTO N, et al. A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies[J]. Nature Energy, 2018, 3(6): 515-527.
- [18] WELSBY D, PRICE J, PYE S, et al. Unextractable fossil fuels in a 1.5 °C world[J]. Nature, 2021, 597(7875): 230-234.
- [19] SHAHBAZ M, KABLAN S, HAMMOUDEH S, et al. Environmental implications of increased US oil production and liberal growth agenda in post-Paris Agreement era[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 271: 110785.
- [20] IVAN M D, BANTI C, KELLARD N. Prime money market funds regulation, global liquidity, and the crude oil market[J]. Journal of International Money and Finance, 2022, 127: 102671.
- [21] VAN DE GRAAF T. Is OPEC dead? Oil exporters, the Paris agreement and the transition to a post-carbon world[J]. Energy Research & Social Science, 2017, 23: 182-188.
- [22] WANG Z, LI S, JIN Z, et al. Oil and gas pathway to net-zero: Review and outlook[J]. Energy Strategy Reviews, 2023, 45: 101048.
- [23] LIANG C, UMAR M, MA F, et al. Climate policy uncertainty and world renewable energy index volatility forecasting[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2022, 182: 121810.
- [24] IEA. Oil 2023: Analysis and forecast to 2028[R/OL]. [2023-09-22]. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/6ff5beb7-a9f9-489f-9d71-fd221b88c66e/Oil2023.pdf>.
- [25] KÜHNE K, BARTSCH N, TATE R D, et al. "Carbon Bombs"-Mapping key fossil fuel projects[J]. Energy Policy, 2022, 166: 112950.
- [26] LUDERER G, VRONTISI Z, BERTRAM C, et al. Residual fossil CO<sub>2</sub> emissions in 1.5 ~ 2 °C pathways[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(7): 626-633.
- [27] LIU L J, JIANG H D, LIANG Q M, et al. Carbon emissions and economic impacts of an EU embargo on Russian fossil fuels[J]. Nature Climate Change, 2023, 13(3): 290-296.
- [28] MCCOLLUM D L, JEWELL J, KREY V, et al. Quantifying uncertainties influencing the long-term impacts of oil prices on energy markets and carbon emissions[J]. Nature Energy, 2016, 1(7): 1-8.
- [29] DRAEGER R, CUNHA B S L, MÜLLER-CASSERES E, et al. Stranded crude oil resources and just transition: Why do crude oil quality, climate ambitions and land-use emissions matter[J]. Energy, 2022, 255: 124451.
- [30] MASNADI M S, BENINI G, EL-HOUJEIRI H M, et al. Carbon implications of marginal oils from market-derived demand shocks[J]. Nature, 2021, 599(7883): 80-84.
- [31] WITTMANN N. OPEC: How to transition from black to green gold[J]. Energy Policy, 2013, 62: 959-965.
- [32] KRIEGLER E, MOURATIADOU I, LUDERER G, et al. Will economic growth and fossil fuel scarcity help or hinder climate stabilization? Overview of the RoSE multi-model study[J]. Climatic Change, 2016, 136: 7-22.
- [33] RIAHI K, BERTRAM C, HUPPMANN D, et al. Cost and attainability of meeting stringent climate targets without overshoot[J]. Nature Climate Change, 2021, 11(12):

- 1063-1069.
- [34] 钟诚, 杜鹏, 刘自亮, 等. 碳中和与中国海洋油气发展的内在联结性[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(4): 32-40,47.  
ZHONG C, DU P, LIU Z L, et al. Interconnection between carbon neutrality and development of offshore oil and gas in China[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2023, 52(4): 32-40,47.
- [35] DESHMUKH R, WEBER P, DESCHENES O, et al. Well setbacks limit California's oil supply with larger health benefits and employment losses than excise and carbon taxes[J]. *Nature Energy*, 2023,8:562-564.
- [36] BAUER N, MOURATIADOU I, LUDERER G, et al. Global fossil energy markets and climate change mitigation-an analysis with REMIND[J]. *Climatic change*, 2016, 136: 69-82.
- [37] TROUT K, MUTTITT G, LAFLEUR D, et al. Existing fossil fuel extraction would warm the world beyond 1.5 °C[J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(6): 064010.
- [38] FÆHN T, HAGEM C, LINDHOLT L, et al. Climate policies in a fossil fuel producing country: Demand versus supply side policies[J]. *The Energy Journal*, 2017, 38(1): 77-102.
- [39] FISCHER C, SALANT S W. Balancing the carbon budget for oil: The distributive effects of alternative policies[J]. *European Economic Review*, 2017, 99: 191-215.
- [40] ALATIQ A, ALJEDANI W, ABUSSAUD A, et al. Assessment of the carbon abatement and removal opportunities of the Arabian Gulf Countries[J]. *Clean Energy*, 2021, 5(2): 340-353.
- [41] HARRISON K, BANG G. Supply-side climate policies in major oil-producing countries: Norway's and Canada's struggles to align climate leadership with fossil fuel extraction[J]. *Global Environmental Politics*, 2022, 22(4): 129-150.
- [42] ERICKSON P, LAZARUS M, PIGGOT G. Limiting fossil fuel production as the next big step in climate policy[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(12): 1037-1043.
- [43] ZAKKOUR P D, HEIDUG W, HOWARD A, et al. Progressive supply-side policy under the Paris Agreement to enhance geological carbon storage[J]. *Climate Policy*, 2021, 21(1): 63-77.
- [44] SEMIENIUK G, HOLDEN P B, MERCURE J F, et al. Stranded fossil-fuel assets translate to major losses for investors in advanced economies[J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12(6): 532-538.
- [45] LU Y S Y, COHEN F, SMITH S M, et al. Plant conversions and abatement technologies cannot prevent stranding of power plant assets in 2 °C scenarios[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 806.
- [46] LEE J Y, MAROTZKE J, BALA G, et al. IPCC. Climate change 2021: the physical science basis. Future global climate: scenario-42 based projections and near-term information[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021: 1-195.
- [47] 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: 879-903.
- [48] 金锺, 秦雪伦, 江如意, 等. 油气行业数字孪生研究述评与展望[J]. 世界石油工业, 2022, 29(5): 17-25.  
JIN L, QIN X L, JIANG R Y, et al. Review and prospect of digital twin research in oil and gas industry[J]. *World Petroleum Industry*, 2022, 29(5): 17-25.
- [49] ESHRAGHI H, DE QUEIROZ A R, DECAROLIS J F. US energy-related greenhouse gas emissions in the absence of federal climate policy[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(17): 9595-9604.
- [50] CAPELLÁN-PÉREZ I, DE BLAS I, NIETO J, et al. MEDEAS: A new modeling framework integrating global biophysical and socioeconomic constraints[J]. *Energy & Environmental Science*, 2020, 13(3): 986-1017.
- [51] JACCARD M, HOFFELE J, JACCARD T. Global carbon budgets and the viability of new fossil fuel projects[J]. *Climatic Change*, 2018, 150: 15-28.
- [52] DE BLAS I, MIGUEL L J, CAPELLAN-PEREZ I. Modelling of sectoral energy demand through energy intensities in MEDEAS integrated assessment model[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2019, 26:100419.
- [53] DUTT D. Weak states, fast transitions? Exploring the role of actors, governance capacity, and tensions in Indian energy politics[J]. *Energy Research & Social Science*, 2022, 94: 102876.
- [54] SERVICE R F. Without fossil fuels, reactors churn out chemicals[J]. *Science*, 2020, 368(6491), 566-567.
- [55] EZEONU C S, EZEONU N C. Alternative sources of petrochemicals from readily available biomass and agro-products in Africa: A review[J]. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 2016, 7(5): 1-12.
- [56] MAHESHWARI N V. Agro-industrial lignocellulosic waste: An alternative to unravel the future bioenergy[M]// KUMAR A, OGITA, S, YAU Y Y. *Biofuels: Greenhouse Gas Mitigation and Global Warming: Next Generation Biofuels and Role of Biotechnology*, 2018: 291-305.
- [57] PAGLIANO G, VENTORINO V, PANICO A, et al. Integrated systems for biopolymers and bioenergy production from organic waste and by-products: A review of microbial processes[J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2017, 10(1): 1-24.
- [58] PAGLIARO M. An industry in transition: The chemical industry and the megatrends driving its forthcoming transformation[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2019, 58(33): 11154-11159.
- [59] SHINKEVICH A I, GALIMULINA F F, POLOZHENTSEVA Y S, et al. Computer analysis of energy and resource efficiency in the context of transformation of petrochemical supply chains[J]. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2021, 11(3): 529-536.
- [60] GEELS F W. Conflicts between economic and low-carbon reorientation processes: insights from a contextual analysis of evolving company strategies in the United Kingdom petrochemical industry (1970—2021)[J]. *Energy Research & Social Science*, 2022, 91: 102729.
- [61] THUNMAN H, VILCHES T B, SEEMANN M, et al. Circular use of plastics-transformation of existing petrochemical clusters into thermochemical recycling plants with 100%

- plastics recovery[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2019, 22. e00124.
- [62] SYLVIA E, SUNITIYOSO Y. A system dynamic model for Indonesian petrochemical industry emission reduction[J]. International Journal of Energy Sector Management, 2023.
- [63] SANCHEZ F, LINDE L. Turning out the light: Criteria for determining the sequencing of countries phasing out oil extraction and the just transition implications[J]. Climate Policy, 2023: 1-15.
- [64] TAGLIAPIETRA S. The impact of the global energy transition on MENA oil and gas producers[J]. Energy Strategy Reviews, 2019, 26. 100397.
- [65] RAMACHANDRAN V. Blanket bans on fossil-fuel funds will entrench poverty[J]. Nature, 2021, 592(7855): 489-489.
- [66] DOMINISH E, BRIGGS C, TESKE S, et al. Just transition: Employment projections for the 2.0 °C and 1.5 °C scenarios[J]. Achieving the Paris Climate Agreement Goals, 2019: 413-435.
- [67] SCHEER A, SCHWARZ M, HOPKINS D, et al. Whose jobs face transition risk in Alberta? Understanding sectoral employment precarity in an oil-rich Canadian province[J]. Climate Policy, 2022, 22(8): 1016-1032.
- [68] GE J, POLHILL J G, CRAIG T, et al. From oil wealth to green growth-An empirical agent-based model of recession, migration and sustainable urban transition[J]. Environmental Modelling & Software, 2018, 107: 119-140.
- [69] 郭鹏. 伊朗和伊拉克油气对外合作政策发展分析[J]. 世界石油工业, 2023, 30(3): 9-15.
- GUO P. Analysis on the development of oil and gas foreign cooperation policies between Iran and Iraq[J]. World Petroleum Industry, 2023, 30(3): 9-15.
- [70] 黄飞, 张慕真, 雷占祥, 等. 能源转型背景下国家石油公司动态与启示[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(6): 80-87.
- HUANG F, ZHANG M Z, LEI Z X, et al. Trends of national oil companies in the context of energy transition and enlightenments[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(6): 80-87.
- (编辑: 鄢爱民 王克楠)

## 《世界石油工业》第一届青年编委会委员招募启事

作为国内外能源行业的重要学术阵地,《世界石油工业》始终致力于推动油气及能源行业技术的创新与发展,传播最新研究成果和前沿动态。为进一步服务广大青年学者,提供展示研究成果、交流学术思想、促进职业发展的平台,提升期刊的学术影响力和青年学者的参与度,现面向广大青年学者公开招募第一届青年编委会委员。

### 申请条件:

- (1) 从事油气及能源行业相关的科研、生产、技术、教学、管理等工作;
- (2) 年龄不超过45岁,具有副高及以上职称;
- (3) 学术态度严谨,坚守学术诚信底线,无学术不端行为;
- (4) 以第一作者或通信作者发表SCI、Ei检索文章,参与国家及国际科研项目的优先;
- (5) 参与本刊相关工作(包括但不限于投稿、组稿、审稿、宣传)的优先。

### 申请方式与截止时间:

- (1) 申请方式:

邮箱报名:请至本刊投稿平台<https://ssyy.cbpt.cnki.net>左侧下载中心下载《青年编委申请表》,填写完成后发送至wpi\_journal@cnpc.com.cn(邮件标题为:青年编委+人名+研究方向);

微信报名:扫描下方二维码按要求填写相关信息并提交。



- (2) 报名截止时间:2024年6月30日

联系电话:010-62065255 邮箱:wpi\_journal@cnpc.com.cn

地址:北京市西城区六铺炕街6号《世界石油工业》编辑部 邮编:100724