

高碳资源利用演化及低碳化实现的途径

梁鼎成¹, 谢珠璨¹, 葛君函¹, 解强¹, 刘广波², 椿范立³, 陈庆平¹

(1. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 山东 青岛 266101;

3. 日本国立富山大学 应用化学系, 日本富山 9308555)

摘要:在过去的半个多世纪里,高碳资源主要作为能源使用。虽然有力促进了人类社会繁荣发展,但也给地球环境带来了严重的破坏,特别是高碳资源的燃烧会释放大量的温室气体,严重威胁人类可持续发展。从全球高碳资源发展和利用过程来看,推动高碳资源的低碳化利用是未来发展的必然趋势,也是解决气候变暖和生态破坏等重大环境问题的必由之路。为此,系统阐述了高碳资源的发展历程及其面临的问题,分析了实现高碳资源低碳化利用的必要性,并探讨了煤炭、石油和天然气等高碳资源低碳化利用的具体途径。结论认为:①在短期内,可通过优化能源结构、提高资源利用效率以及推广碳捕集、利用与封存(CCUS)技术等措施,逐步降低高碳资源的碳排放强度,实现其从源头、过程到终端全过程的低碳、清洁和高效利用;②在长期内,充分利用高碳资源的原料属性,通过不断优化与创新利用技术,推动高碳资源的精细化与高值化利用,以生产化学品的方式有效减少碳排放,为实现可持续发展和长期碳中和目标奠定基础。③展望未来,随着可再生资源的快速发展,高碳资源与可再生资源进一步融合,将成为应对全球能源转型和碳减排挑战的重要路径。

关键词:高碳资源;低碳化利用;能源结构;化工产品;可持续发展;碳中和

中图分类号:F407.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2025)02-0051-12

Research on the evolution of high-carbon resource utilization and pathways to achieve low-carbonization

LIANG Dingcheng¹, XIE Zhucan¹, GE Junhan¹, XIE Qiang¹, LIU Guangbo², Tsubaki Noritatsu³, CHEN Qingping¹

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China; 3. Department of Applied Chemistry, Graduate School of Engineering, University of Toyama, Toyama 9308555, Japan)

Abstract: High-carbon resources have primarily been used as energy sources for over half a century. Although it has greatly promoted the prosperity and development of human society, it has also caused serious damage to the Earth's environment, especially the burning of high carbon resources that releases a large amount of greenhouse gases, posing a serious threat to sustainable human development. From the perspective of global development and utilization of high carbon resources, promoting low-carbon utilization of high carbon resources is an inevitable trend for future development and a necessary way to solve major environmental problems such as climate change and ecological damage. Therefore, systematically elaborates on the development process of high carbon resources and the problems they face, analyzes the necessity of achieving low-carbon utilization of high carbon resources, and explores specific ways of low-carbon utilization of high carbon resources such as coal, oil, and natural gas. The conclusion is that: ① In the short term, measures such as optimizing the energy structure, improving resource utilization efficiency, and promoting carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technology can be taken to gradually reduce the carbon emission intensity of high carbon resources, achieving low-carbon, clean, and efficient utilization throughout the entire process from source to end. ② In the long run, fully utilizing the raw material properties of high carbon

收稿日期: 2024-08-15; 策划编辑: 白娅娜; 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.YS24081501

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3701900); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(22008255); 中央高校基本科研业务费资助项目(2024ZKPYHH08)

作者简介: 梁鼎成(1989—), 男, 安徽淮南人, 副教授, 博士生导师。E-mail: liangdc@cumt.edu.cn

引用格式: 梁鼎成, 谢珠璨, 葛君函, 等. 高碳资源利用演化及低碳化实现的途径[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(2): 51-62.

LIANG Dingcheng, XIE Zhucan, GE Junhan, et al. Research on the evolution of high-carbon resource utilization and pathways to achieve low-carbonization[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(2): 51-62.



resources. By continuously optimizing and innovating the use of technology, promoting the refinement and high-value utilization of high carbon resources. Effectively reducing carbon emissions through the production of chemicals lays the foundation for achieving sustainable development and long-term carbon neutrality goals. ③ Looking ahead to the future, with the rapid development of renewable resources. Further integrating high carbon resources with renewable resources will become an important path to address the challenges of global energy transition and carbon reduction.

Key words: High-carbon resources; low-carbon utilization; energy structure; chemical products; sustainable development; carbon neutrality

0 引言

高碳资源, 又称高碳能源, 指的是在作为能源使用时, 其碳元素排放系数较高的一类化石能源。就燃烧时每吨物质产生的 CO_2 排放量而言, 煤炭燃烧产生的 CO_2 排放量最高, 达到 2.66 t, 石油燃烧产生的 CO_2 排放量为 2.02 t, 天然气燃烧产生的 CO_2 排放量为 1.47 t。这些排放量显著高于核能、太阳能、风能、水能、生物质能、潮汐能和地热能等非化石能源燃烧产生的 CO_2 排放量^[1]。因此, 煤炭、石油和天然气均被归类为高碳资源。

关于煤炭、石油、天然气等高碳资源的起源, 目前存在众多假说。被广泛接受的观点认为, 这些高碳资源是由远古时期动植物遗骸在复杂地质作用下, 经过数亿年的演变形成的, 属于短期内不可再生的宝贵资源。在过去的几个世纪里, 高碳资源主要作为能源使用, 尽管极大地推动了人类社会和经济的高速繁荣发展, 但是这种快速的发展却是以高投入、高消耗、低产出的粗放式增长为主要特征, 伴随着高碳资源的大量消耗、生态环境持续恶化以及气候变化等众多问题^[2]。在此背景下, 开展高碳资源低碳化利用, 成为人类应对社会可持续发展和环境变化的必然选择^[3]。2009年中国工程院院士谢克昌在中国能源科学家论坛上提出“高碳能源低碳化利用”的概念, 强调了高碳能源(如煤炭、石油、天然气等)从源头、过程到终端使用的各环节, 需实现高效率、低排放、少污染, 以达到低碳化利用的目标。此后, 国内外学者纷纷开展相关研究, 探索如何有效实现高碳资源的低碳化利用。在产业结构因素上, 优化和升级产业结构是实现低碳目标的首要举措和关键环节, 必须优先推进。王震等^[4]研究认为通过调整优化产业结构、控制能源消费总量以及改进能源消费结构等措施, 能够推动中国的能源转型, 实现能源清洁低碳化利用。赵婷婷等^[5]利用中国 2006—2021年 30个省份的面板数据, 对产业结构优化对碳排放的影响进行了实证分析, 发现产业结构合理化和高级化均有助于降低碳排放。刘志雄等^[6]利用 2007—2021年国内 30个省份的面板数据, 构建空间计量模型, 实证研究产业

结构升级对碳排放强度影响的空间溢出效应。结果表明, 产业结构优化不仅为当地碳排放强度的下降发挥积极作用, 而且其空间溢出效应可以带动邻近地区碳排放强度的降低; 在技术因素方面, 先进技术的开发和应用是实现高碳资源低碳化利用的核心推动力和关键保障^[7]。董康银等^[8]基于 2006~2022年我国 286个城市的数据, 从空间溢出的视角探讨了中国低碳能源技术创新对碳排放效率的积极影响。吕清刚等^[9]提出了化石能源高效清洁利用的思路, 并重点从煤炭的高效燃烧与转化、石油天然气的高效利用, 以及煤化工“三废”处理等方面提出了技术发展建议。蔡睿等^[10]和肖宇等^[11]阐明了科技创新在实现“双碳”目标过程中的核心作用, 并提出以多能融合为核心的科技发展路径。李晓敏等^[12]研究发现可再生能源能够通过优化能源结构与提升能源利用效率, 发挥碳减排效应。姚星等^[13]指出了碳捕集、利用与封存(CCUS)技术在高碳资源低碳化利用中的关键性。王国法等^[14]、宫彦双等^[15]和徐葱葱等^[16]则强调智能化技术在提升资源利用效率中的关键作用。通过产业结构的优化、升级以及先进技术的开发、应用, 可以实现高碳资源的低碳化利用, 为实现全球碳减排目标和可持续发展做出重要贡献。

尽管当前关于高碳资源低碳化利用的研究已取得一定进展, 且相关文献数量较多, 但在系统性和全面性分析方面仍有不足, 亟需整合现有成果, 构建更为综合的研究框架。本文对煤炭、石油和天然气等高碳资源的发展历程及其在开采和利用过程中面临的问题进行了深入分析, 结合当前可再生资源快速发展的现状, 设定了高碳资源低碳化利用的短期和长期目标, 并提出了针对不同高碳资源的低碳化路径, 这不仅能够提升能源使用效率, 减少碳排放, 还为实现全球碳减排目标和可持续发展奠定了坚实基础。

1 高碳资源利用演化

在人类历史的长河中, 煤炭、石油、天然气等高碳资源不仅支撑了人类社会的文明进步, 还推动了工业革命、经济腾飞和现代化进程的发展。自从

人类掌握了这些高碳资源,社会的生产力和生活质量得到了显著提升,从蒸汽机的发明到内燃机的普及,再到电力的广泛应用,每一次技术的突破和进步都与高碳资源的开发与利用息息相关。因此,人类文明的发展史,某种程度上也是一部高碳资源的利用和演变史。从早期对木炭的使用,到煤炭的广泛开采,再到石油和天然气成为全球能源体系的核心,高碳资源在人类历史上经历了一个漫长而重要的演变历程(图1)^[17]。

18世纪以前,人类对能源的使用,还只限于风力、水力、畜力及木柴等天然能源,特别是木柴在很长时期内占据一次能源的主体地位。到18世纪末

第一次工业革命掀起各领域的技术革新,并催生一批新兴产业,工业革命触发能源革命,能源革命又促进工业革命的成功。尤其是随着蒸汽机的发明,机械力开始大规模代替人力,低热值的木材已经满足不了巨大的能源需求,煤炭以其高热值、分布广的优点成为全球第一大能源,并在人类历史上持续长达百余年。这也随之诞生了一批煤炭转化利用的里程碑技术,比如煤焦炼铁、煤炭制气、煤气内燃机、煤炭制油、煤炭发电等,带动了钢铁、铁路、军事等工业的迅速发展,大大促进了世界工业化进程,煤炭时代所推动的世界经济发展超过了以往数千年的时间,因此也赢得了“工业粮食”的美誉。

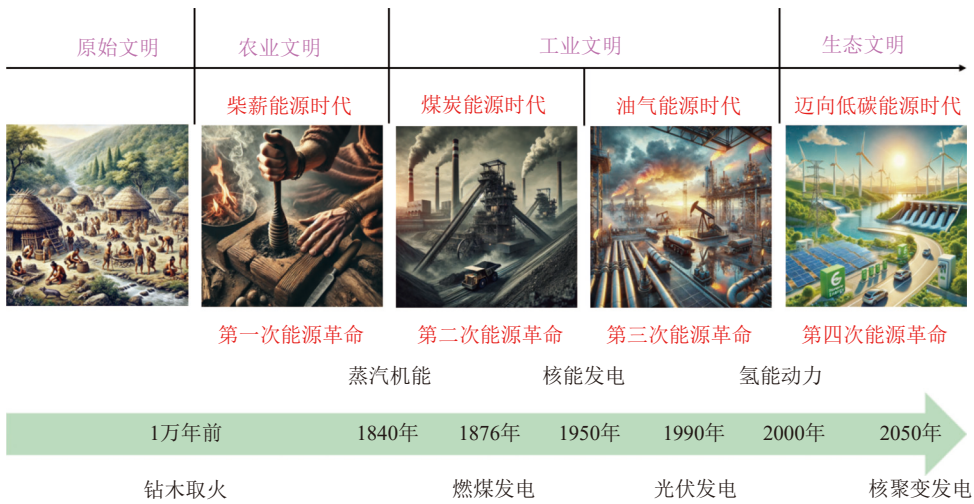


图1 高碳资源利用的演变历程与文明发展路径^[18]

Fig. 1 The evolution of high-carbon resource utilization and pathway of civilization development^[18]

19世纪初,随着电磁感应现象的发现,世界由“蒸汽时代”跨入“电气时代”,内燃机的发明解决了长期困扰人类动力不足等问题,由蒸汽轮机作动力的发电机出现起,煤炭被转换成更加便于输送和利用的二次能源,也就是电能。而到了19世纪末,内燃机的发明和汽车工业的兴起进一步推动了石油需求的增加。油气能源逐渐取代煤炭,成为主要的运输燃料和工业原料,并于20世纪60年代取代了煤炭第一能源的地位,成为新一代主体能源。

20世纪中期,天然气因其燃烧效率高、污染物排放少,被广泛应用于发电、供暖和工业生产。20世纪中后期,跨国天然气管道的建设促进了天然气的全球贸易和广泛使用。尤其是到了20世纪70年代,世界出现的第2次石油危机,各国开始寻求替代石油的能源,这给天然气工业大发展提供了良好的机遇。天然气开发利用进入高速发展阶段。进入21世纪,天然气被视为一种相对清洁的化石燃料,越来越多的国家将其纳入能源结构转型的战略

之中,以减少对煤炭和石油的依赖,降低碳排放。

迄今为止,高碳资源作为能源的利用已经完成了两次能源转换,第1次发生在40万年以前,以煤炭取代木柴成为主体能源为完成的标志。第2次发生在18世纪的英国,以油气取代煤炭成为主体能源为完成的标志。然而,随着高碳资源的大规模使用,空气污染、温室气体排放等环境问题日益严重,引发了全球对气候变化的关注。

21世纪以来,随着全球各国推动经济转型和“碳中和”目标的实现,产业结构逐渐从依赖高碳资源向可再生资源过渡。这一转型不仅有助于减少温室气体排放,还将推动经济和技术创新。然而,由于可再生资源的间歇性、储能技术限制、全球能源基础设施差异和现有系统对高碳资源的依赖性,在当前阶段,仍然需要可再生资源和高碳资源一起使用。比如,内蒙古宝丰煤基新材料有限公司正在实施的“绿氢+”煤制烯烃项目,代表了通过可再生资源与传统化工产业相结合的创新路径,推动高

碳产业向低碳转型。这一技术探索不仅契合了“碳中和”目标，也提升了能源和资源的利用效率。高碳资源作为一种稳定的过渡性资源，能够确保能源系统的可靠性，直到可再生资源技术、储能系统和基础设施足够成熟，才能实现全面的低碳化转型。

在此背景下，进行高碳资源的低碳化利用不仅是应对气候变化和环境污染的迫切需要，也是实现能源可持续发展、提高能源效率和保障能源安全的重要途径。通过采取多种低碳化措施，可以在减少环境负担的同时，实现经济和社会的协同发展。

2 高碳资源开采及利用面临的环境问题

如前所述，高碳资源在人类发展进程中扮演了重要的角色，从工业初期一直到现在，在能源体系中长期占据主体地位，为人类实现工业化、迈向现代化做出了突出的贡献。然而，大规模的资源开采及利用不仅导致了土地退化、水资源污染和生态系统的破坏，还释放出大量的有害物质，如颗粒物、二氧化硫和氮氧化物，严重影响空气质量，危害人类健康。特别是煤炭、石油和天然气等高碳资源的燃烧，产生了大量的温室气体（如二氧化碳和甲烷），加剧了全球气候变暖和气候变化。随着高碳资源需求的增加和过度开发，这些环境问题日益凸显，成为全球可持续发展的重大挑战。

煤炭、石油和天然气等高碳资源的粗放开采利用，特别是在技术不够先进、环保标准较低的背景下，给环境带来了严重的负面影响。首先，在土地方面，露天煤矿开采和石油、天然气的钻探活动会破坏地表植被，导致土地退化、塌陷和沙化，从而影响生态系统的稳定性。煤矿区的大面积沉陷、石油钻井区的土地破坏以及天然气水力压裂技术造成的地质结构变化，都使得土壤无法恢复原状，不利于生态系统的重建和土地的可持续利用；其次，地下水的过度消耗和污染问题尤为严重。煤矿开采常会抽取地下水用于矿井降水，导致周边水资源枯竭。同时，矿井水中的重金属和有害物质可能污染地下水源，威胁人类的饮水安全。石油开采中的溢油事故和天然气压裂过程中使用的大量化学添加剂都有可能渗入地下水层，造成污染。尤其是天然气压裂技术的广泛应用，虽然提高了天然气的开采效率，但也引发了对地下水资源长久污染的担忧。在水体和海洋环境中，石油泄漏事故对生态系统的影响尤为显著，海洋生物因油膜覆盖而窒息死亡，导致海洋生物链的中断和渔业资源的破坏。特别是大型石油泄漏事故，不仅会影响周围的海洋生态系统，还会对沿海经济带和当地居民的生活带来持久

影响；再者，高碳资源的粗放开采利用也对生物多样性造成了巨大威胁。煤炭矿区的植被被大面积破坏，石油开采过程中的土地占用和化学品泄漏破坏了动植物的栖息地，天然气开采的钻井活动也影响了敏感生态区的稳定性，导致动植物种群的数量锐减。同时，油气开采活动产生的噪音和光污染会干扰野生动物的生活习性，进一步破坏生态平衡。

此外，煤炭、石油和天然气的开采与燃烧对大气污染的贡献尤为显著。高碳资源开采和燃烧会释放出大量的空气污染物，如碳氧化物（CO_x）、硫氧化物（SO_x）、氮氧化物（NO_x）和细颗粒物（PM_{2.5}、PM₁₀）等。这些污染物不仅是雾霾的主要成因，还可能引发酸雨，破坏生态环境，对人类的呼吸系统和心血管系统造成严重影响。尤其是CO₂大量排放带来的气候变暖，已经逐步威胁人类的生存环境^[19]。2023年，全球一次能源消费总量达到620 EJ的历史新高，其中高碳资源使用量增长1.50%，达到504 EJ，在全球能源消费中的占比高达81.47%，短期内还将主导全球能源结构（表2）。由于高碳资源的高碳排放特性，按照标准煤换算，煤炭的二氧化碳排放量约为2.66 t，石油为2.02 t，天然气为1.47 t，以及其在能源消费中的显著占比，2023年全球因使用能源排放的CO₂量高达374亿t，占当年全球CO₂总排放量的90%以上，较2022年增长1.10%，超过过去10年平均每年0.50%的增幅，比达成《巴黎协定》的2015年高出6%（图2）。同时，与2022年相比，2023年每种高碳资源的碳排放量均有所增加，其中，煤炭增加1.10%，占全球CO₂排放量的40%；石油，占全球CO₂排放量的32%，上涨1.50%；天然气占全球

表1 2019—2023年全球高碳资源消费占比

年份	consumption share from 2019 to 2023			%
	煤炭消费 占比/%	石油消费 占比/%	天然气消费 占比/%	总计消费 占比/%
2015	29.21	32.94	23.85	86.00
2016	27.95	34.37	23.18	85.50
2017	27.62	34.21	23.36	85.19
2018	27.20	33.60	23.90	84.70
2019	27.04	33.06	24.23	80.33
2020	27.20	31.21	24.72	83.13
2021	27.20	31.20	24.70	83.10
2022	26.60	31.55	23.76	81.91
2023	26.47	31.70	23.30	81.47

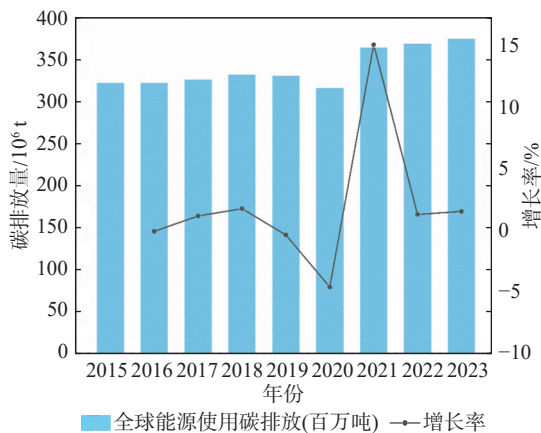


图2 2015—2023年全球能源使用碳排放及增长率

Fig. 2 Global energy-related carbon emissions and growth rate from 2015 to 2023

CO₂排放量的21%，上涨0.50%。尽管一些国家和地区在减少碳排放方面取得了进展，但全球碳排放总量仍在持续增长。国际能源机构(IEA)相关研究指出，地球大气中的CO₂浓度已达到83万年来的最大值，20世纪是过去两千年来最温暖的100年，如果不采取新的相关控制措施，全球CO₂排放量将持续增长，到2030年全球CO₂排放量将比2000年增加69%。

随着CO₂排放量的显著增加，温室效应进一步加剧，对地球生态和人类环境将带来广泛而深远的影响^[20]。首先，极端天气事件，如洪水、干旱和热浪等发生频率和强度增加，这些极端天气对农业、基础设施和人类生活造成了严重损害。与此同时，由于气温升高，两极地区冰川融化，海平面升高，许多沿海城市、岛屿或低洼地区将面临海水上涨甚至被海水吞没的威胁。此外，许多物种无法适应快速变化的气候，导致栖息地丧失和物种灭绝，严重破坏生态系统。更最重要的是气候变暖可能导致登革热、疟疾等疾病的传播范围扩大，对人类的健康和生命安全构成威胁。由此可见，CO₂过度排放引起的温室效应影响和威胁着人类赖以生存和发展的自然生态环境，给全球各国社会经济发展带来不可估量的影响和损失^[21]。气候变化问题已经被国际社会列为全球十大环境问题之首，成为国际社会关注的焦点。在过去几十年中，中国经济快速增长，同时产生了巨大的能源需求，尤其是在制造业、建筑业和重工业等高能耗行业。这些行业大量依赖煤炭、石油和天然气等高碳资源，从而导致碳排放量大幅增加。自2005年起，我国CO₂排放总量超过美国，成为世界CO₂排放量第一大国。2023年，中国的碳排放量达到128亿吨，占全球总量的31%，并且所有化石燃料来源的排放量均有所增长。作为

全球碳排放总量和增量最大的国家，中国面临碳减排的国际压力日益增大。

综上所述，煤炭、石油和天然气的粗放开发利用不仅对土壤、水体、空气质量、生物多样性和全球气候带来深远的负面影响，还直接导致了大量的碳排放，严重加剧了温室气体的累积，推动全球气候变暖。为应对这些挑战，必须大力推动高碳资源的低碳化利用，重点开发并广泛应用清洁能源技术，从源头减少碳排放。同时，应通过优化产业结构，提升能源资源利用效率，减少资源的过度消耗和环境污染。只有通过综合运用技术创新与产业升级，才能在实现可持续发展的同时，有效控制碳排放，减轻气候变化的影响，最终实现生态环境保护与经济增长的双赢目标。

3 高碳资源低碳化利用实现的途径

随着可再生资源的快速发展和低碳化利用技术的创新升级，高碳资源迎来了向低碳化利用转型的契机。在短期内，由于可再生资源尚未具备大规模替代高碳资源的能力，高碳资源作为一次能源的消耗量仍将保持刚性增长。因此，通过优化现有生产工艺，推动高碳资源高效清洁利用，以及引入CCUS技术等，成为减少高碳资源生产和利用过程中的碳排放的关键措施。从长期来看，随着碳中和进程的推进，可再生资源利用水平将大幅提高，高碳资源的需求量将逐步下降，其用途也将从以燃料为主转向以原料为主。通过拓宽和强化高碳资源的原料属性，可实现固碳减排的长期目标。基于此，应结合高碳资源转型的短期和长期目标，树立全生命周期绿色低碳理念，推动高碳资源向安全高效、绿色低碳、可持续的方向发展。

3.1 煤炭低碳化利用实现的途径

煤炭作为我国自主可控且储量丰富的自给能源主力军，在我国能源结构中长期占据主导地位。根据现有资源分布情况，我国的煤炭储量远远超过石油和天然气等其他化石能源，这使得煤炭在确保国家能源安全和稳定供应方面扮演着至关重要的角色。在未来相当长的一段时间内，煤炭将继续作为主体能源，尤其是在面对能源需求增长和能源供需结构转型的复杂局面时，煤炭仍将发挥“压舱石”的作用。然而，随着国内环保要求日益严苛、国际碳减排压力的不断增大，煤炭行业面临着前所未有的挑战。在这一背景下，开展煤炭低碳化利用是实现煤炭行业高质量、低碳化发展的必由之路，也是实现能源安全“兜底保障”和“碳中和”双重目标的必然选择，更是提升我国能源自主性、增强国际

竞争力的战略举措^[22]。

煤炭开采是实现煤炭低碳化利用的关键起点^[23]。通过高效的开采技术、完善的环境保护措施以及智能化技术的应用,可以有效提升煤炭开采的效率和安全性,减少对环境的负面影响。据统计,煤炭开采和利用过程中排放的CO₂是我国碳排放的主要来源,约占全国碳排放总量的60%~70%,是我国碳减排的关键所在^[24]。其中,煤炭开采过程中还会排放大量的甲烷,排放的甲烷气体占到了甲烷总排放量的33%,是占比最高的行业,这些甲烷带来的温室效应是CO₂的120倍,因此,必须通过技术创新,研发煤炭开采的节能减排技术,以有效减少甲烷和CO₂的排放^[25-26]。比如针对甲烷排放问题,通过煤层气高效勘探开发、煤矿瓦斯高效抽采、低浓度与乏风瓦斯利用、以及关闭矿井煤层甲烷抽采利用等技术能够有效减少煤炭开采过程中排放的甲烷^[27];借助机器人化采矿、无排废采选、绿色矿山、智慧矿业等理念可以降低CO₂排放;利用煤炭开采矿区具有的采空区碎裂岩层、未采煤层、深部咸水层等地下深部空间,为CO₂封存提供合适的场所^[25]。

煤炭燃烧是实现煤炭低碳化利用的关键环节。通过先进的洗选技术和燃烧技术,不仅能提高能源利用效率、降低运行成本,还能助力碳减排目标的实现。现阶段开采后的煤炭主要作为火力发电的原料,在生产电力的同时,排放出大量的CO₂,因

此,降低燃煤过程中CO₂排放,并对其进行捕集,是短期内实现碳减排的有效手段^[28]。比如,在煤炭燃烧之前,可以通过煤炭高效洗选,在一定程度上降低煤中的杂质,提升燃料质量,使煤炭在燃烧过程中更均匀、充分;或可在煤炭燃烧的过程中,利用超临界锅炉、超超临界锅炉等先进的煤粉燃烧技术来提高煤炭燃烧效率,减少CO₂和有害气体的生成;还可凭借液相吸收或多孔材料吸附去捕集烟道气中的CO₂等。通过这些措施不仅有助于减少煤炭燃烧过程中的碳排放,还能显著提高煤炭转为电力的效率。

煤化工技术是实现煤炭低碳化利用的重要途径。通过煤气化、液化等先进技术,煤炭可以转化为多种化学品和清洁燃料,这不仅提高了煤炭的附加值,还减少了直接燃烧带来的污染物排放。特别是气流床煤气化技术的革新,大幅提高了煤炭通过化学转化生产化学品的可能,这为煤炭高值化利用并且固碳、减碳提供了可能,尤其是结合煤炭化学组成特性,发挥煤制大宗含氧化合物优势,比如开发以煤气化为龙头的煤制乙醇技术、煤制聚甲氧基二甲醚技术、以及煤制低碳醇技术,在获得含氧清洁燃料及化学品的同时,减少CO₂的排放^[29]。又或是结合煤的分子结构特点,在煤转化制烯烃/芳烃技术方面进行突破,尤其是针对煤分子结构的直接剪裁,从而避免整个过程中CO₂排放。

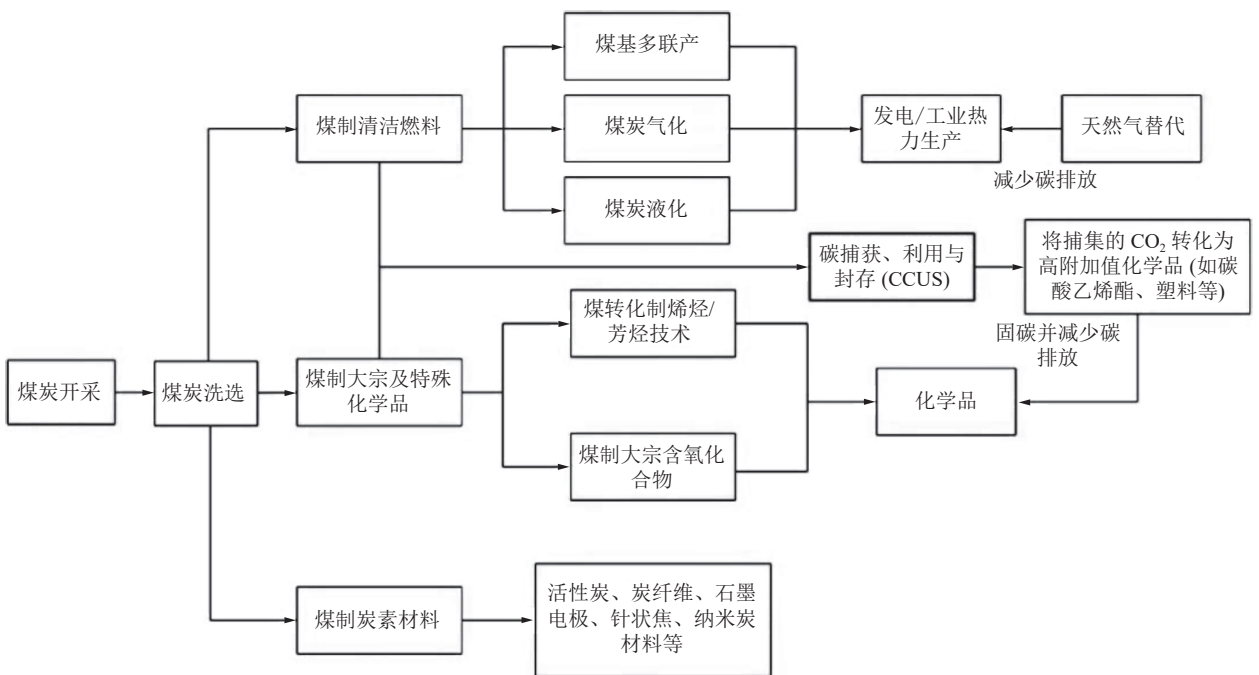


图3 煤炭产业链及其深加工路径

Fig. 3 Coal industry chain and its deep processing pathways

煤炭利用与可再生资源结合是实现煤炭低碳化利用的重要策略。通过将煤炭与可再生资源进行互补利用,不仅可以提升整体资源利用效率,还能优化能源结构,推动低碳化和可持续发展。比如,在传统的煤炭火力发电中引入太阳能或风能等可再生资源,组成混合发电系统,能够通过优化资源调度,减少煤炭消耗,降低碳排放。又或是在深入研发煤炭的清洁高效利用技术(如煤气化与液化等)的过程中,结合可再生资源,既可以促进技术创新,又能实现煤炭的低碳化转型。以煤气化为例,煤炭气化过程生成的合成气(主要包含氢气与一氧化碳)可以与通过风能或太阳能驱动电解水产生的绿色氢气结合。结合后的混合气体作为化工原料,可广泛应用于甲醇、氨气及合成燃料的生产中,从而在显著减少化石燃料使用带来的碳足迹的同时,推动化工行业向更加绿色、可持续发展的方向^[30-31]。还可将煤炭燃烧与可再生资源结合,为混合燃烧技术提供更多可能性,如生物质和煤炭的共燃技术,在有效提升燃料的综合利用效率的同时,还能显著降低整体的CO₂排放水平。此外,在煤炭发电或煤

化工的产业链中,产生的CO₂可以通过先进的CCUS技术进行有效捕集和安全封存。可再生资源在这一环节中可以发挥重要作用,它们不仅能够为CCUS技术提供必要的额外能源支持,推动捕集和封存过程的顺利进行,还能与捕集的CO₂结合,通过创新技术将其转化为合成燃料或高价值化学品,实现碳元素的循环利用,构建低碳高效的循环经济体系。

此外,通过直接加工成碳材料(如活性炭、炭黑、碳纤维、石墨电极、针状焦、纳米碳材料等)也是一种重要的低碳化利用途径。这种方式不仅可以有效减少传统煤炭燃烧产生的CO₂排放,还能拓宽煤炭资源的应用领域,提升其经济价值。综上所述,煤炭产业链及其深加工路径(见图4),涵盖了多种实现煤炭高效清洁利用的手段。通过创新研发煤炭开采节能减排技术、提升煤炭燃烧效率、发展煤气化和液化技术、推广煤化工、CCUS技术以及碳材料加工,煤炭资源能够实现更高效、更环保的利用。同时,煤炭与可再生资源的结合既提升了能源供应的稳定性和效率,又减少了碳排放,推动了能源系统的低碳转型和可持续发展。

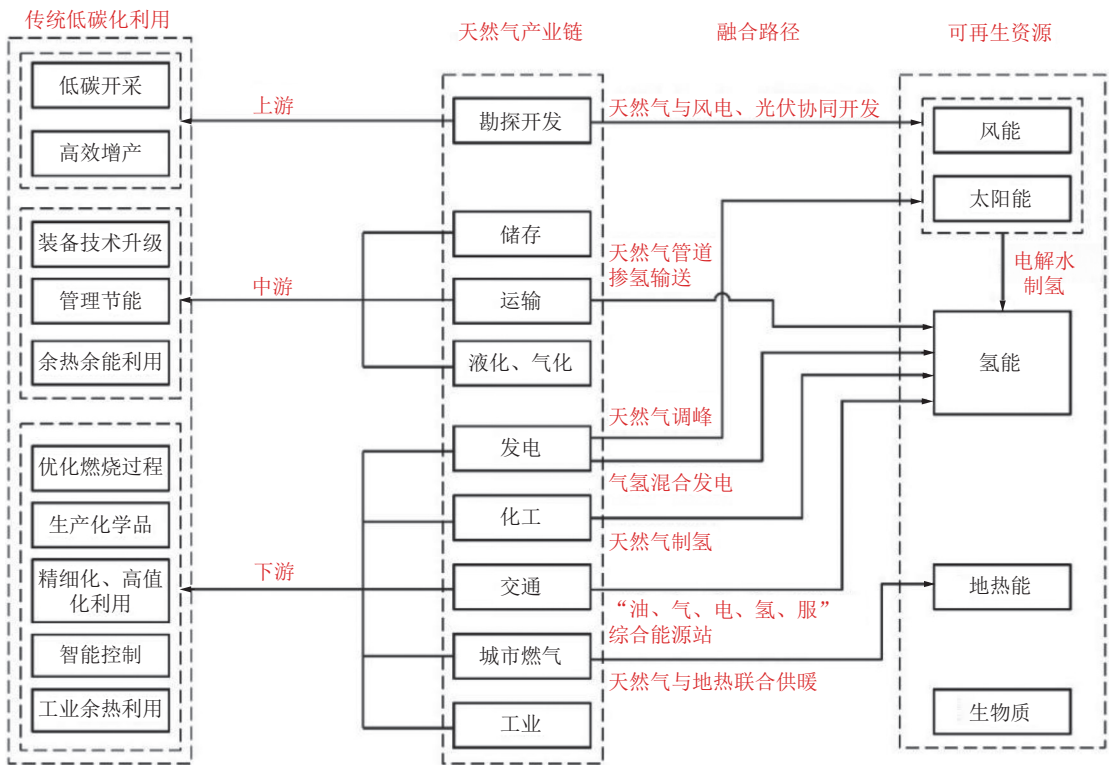


图4 天然气产业链及可再生资源融合发展路径

Fig. 4 Integration pathway of the natural gas industry chain and renewable resource development

3.2 石油低碳化利用实现的途径

石油作为全球能源体系中不可或缺的重要组成部分,长期以来在能源结构中占据主导地位。尽管各国正加速推动可再生资源的开发和应用,但在未

来相当长的一段时间内,石油仍将作为支柱能源的主要载体,是保障国计民生的重要资源^[32]。根据统计数据,2023年全球石油消费量达到45.31亿t,较2022年的44.22亿t增长2.45%,创下历史新

高,且随着全球人口增长、经济发展以及工业化进程的加快,短期内石油需求预计将继续上升。在全球应对气候变化、减少碳排放的背景下,如何实现石油的低碳化利用成为了一项亟待解决的重要课题。提高石油的利用效率、减少开采和使用过程中的碳排放,开发更加环保、清洁的石油衍生技术,是降低温室气体排放、实现能源转型的重要举措。同时,通过结合CCUS等新兴技术,将石油与低碳技术相融合,有望大幅减少石油的碳足迹,为全球碳中和目标的实现提供有力支持。

石油在开采、运输、储存到利用的全生命周期内均会排放包括CO₂和甲烷在内的温室气体。据美国麦肯锡公司统计分析,油气生产利用过程中,温室气体排放量主要集中在上游工段,尤以逃逸气体的占比最大。因此,控制上游开采、运输和储存过程中的气体逃逸,是降低碳排放重要的突破口^[33]。在石油开采环节,通过水平钻井技术、多分支井技术、提高采收率技术(EOR)^[34]、智能油田技术、以及钻井废弃物处理和环保型钻井液技术等多种创新手段,可以有效提高采收率、减少环境影响;在石油运输过程中,利用管道优化与智能监控系统,实时监测管道运行状况,防止泄漏和能量损失。采用双层油罐船等技术能够有效减少海上漏油事故,保护海洋环境。此外,推广低排放运输技术,如使用低碳燃料和高效节能发动机,进一步减少运输过程中的温室气体排放;在石油储存环节,创新技术的应用有助于减少污染、提升安全性和能源利用效率。比如,浮顶油罐和蒸汽回收系统、废油和污水处理系统、自动化监测系统与高效密封技术、双层储罐设计和防腐技术。这些措施共同推动了石油在开采、运输和储存过程中的清洁高效管理。

目前,石油作为生产燃料油的重要原料,在炼化过程中会排放大量的CO₂。因此,减少石油炼化中的碳排放,是短期内实现低碳转型的有效途径。比如,通过优化全厂工艺流程和物料平衡,降低原油加工过程中的能耗和碳排放,尤其是在制氢环节,短期内可以采用天然气、脱乙烷干气等低碳制氢原料替代石油,远期则可以通过扩大“绿氢”的使用规模来满足炼油厂的用氢需求,从源头上减少CO₂的排放^[35-36]。此外,通过引入先进的炼化技术(如催化裂化、加氢裂化、催化重整等),高效节能设备(如余热锅炉、余热利用燃烧器、配备高效塔内件和热集成技术的蒸馏塔等)以及运用智能化的管理(先进过程控制、能源管理系统等)可以提高炼化过程的能效,进一步减少石油利用过程中的碳排放,推动炼化行业向绿色、可持续方向发展。

与此同时,随着电气化的快速发展,特别是新能源汽车技术的成熟,使其具有绿色出行、低成本等优势,大幅度分享了传统汽油车的市场,这导致未来市场对成品油的需求将急剧下降。因此,推进炼化企业从“燃料型”向“化工型”转型成为必然趋势。通过优化传统炼化工艺,调整产品构成,尤其是构建以生产化学品为主的技术体系,如蒸汽裂解和催化裂解技术,可以将石油炼化得到的燃料油,如汽油、柴油、减压柴油等,进一步转化为乙烯、丙烯等化学品。这种化学转化可以将碳固定在化学品中,减少其作为燃料时的碳排放;还可以通过甲醇石脑油耦合制烯烃、甲醇-原油共催化裂解制烯烃等石油基与煤基原料耦合制烯烃芳烃技术,构建石油制烯烃/芳烃等化学品的新技术体系^[37-38];同时,将炼厂气、石油焦等低值化产物通过技术手段转化为高价值的芳烃或者石墨产品等^[39]。这样不仅实现了石油加工全链条的低碳、清洁、高值利用,还能有效提高我国基础化工原料的自给率,助力“双碳”战略的实施。

此外,随着可再生资源的快速发展,将石油利用和可再生资源相结合,已成为优化能源结构、降低碳排放、提升资源利用率的重要途径。比如,将可再生资源驱动与地热能辅助石油开采相结合,不仅能减少化石能源的消耗和碳排放,还能提高石油采收率,为石油工业的可持续发展开辟新路径。又或是将可再生资源(如太阳能、风能等)作为石油炼化的重要辅助能源,可以为石油加工过程中的高能耗环节(如蒸汽裂解、催化裂解等)提供绿色电力,减少对化石燃料的依赖。同时,通过电解水制氢技术为炼油厂提供清洁的氢气,这些氢气除了可以作为化学反应的媒介,促进石油基原料向高附加值化学品的转化,还可与捕集的CO₂结合,生产甲醇、合成燃料等,实现碳的循环利用。在炼化过程中,还可将生物质(如植物油、废油脂)与石油产品共炼,生产生物基燃料(如生物柴油、绿色航空燃料)。这种方式可以在现有石油炼化设施中实现部分生物质的替代,减少石油的使用量并降低碳足迹。最后,石油开采和炼化过程中产生的CO₂可以通过CCUS技术进行捕集,并结合可再生资源制氢实现碳的循环利用。捕集的CO₂既可以与绿色氢气反应,合成低碳燃料,如甲醇或合成天然气,又可以作为原料,用于生产化工产品,如塑料、化肥等,实现碳的资源化利用。这不仅能降低对传统石化资源的依赖,还能减少碳排放。

3.3 天然气低碳化利用实现的途径

天然气既是与可再生资源协同发展的纽带,又

是高碳资源向低碳化转型的桥梁,在能源改革中发挥着重要作用。尤其是当前中国已经步入增量与存量替代并存的能源发展阶段,天然气肩负起了安全供给与绿色低碳的双重使命,并在不同阶段发挥着不同作用。因此,推动天然气的低碳化利用,成为构建清洁低碳、智慧高效、经济安全能源体系的必然选择^[40]。

在2030年实现“碳达峰”之前,作为CO₂排放量最低的高碳资源,天然气已被定义为清洁能源,并成为重要的民用燃料,其消费占比稳步提升。然而,天然气在开采和利用的过程中,若不采取必要的减排措施,同样会产生大量的甲烷和CO₂,导致严重的温室效应^[41]。因此,短期内,天然气的低碳化利用目标是采用低碳开采和高效增产技术,实现低碳减排开采的同时,提高天然气在高碳资源中的使用比例。比如,CO₂驱采增气新技术可有效提升天然气采收率,同时将碳封存,实现近零排放。此外,推动天然气“集中利用+CCUS”技术的应用,也能显著提高采收率并减少碳排放;在储运环节,可以通过加大管道气和液化天然气(LNG)布局,减少天然气的损失;也可利用地下页岩原位加热油气化技术、以及地下煤岩原位加热油气化等技术,通过将地层中的煤岩在地下原位进行有控制地燃烧,将物理采煤转变为化学采油气,在提高天然气的采收率的同时减少了开采过程中的碳排放;又或是通过打造“煤岩地下油气化-CO₂驱油-热采原油/改质页岩油-CO₂封存”和地面“甲烷-氢能发电-煤化工”等“煤岩地下油气化”产业集群,可实现煤岩地下油气化与油气产业的高度融合发展,显著提升天然气的利用效率、减少环境污染和碳排放^[42]。

现阶段,天然气主要作为燃料使用,虽然其提供了清洁、高效的热源和电力,但仍会排放大量温室气体,因此,降低天然气作为燃料使用时的碳排放,并对排放气体进行捕集,是短期内实现碳减排的有效手段。通过优化燃烧过程,如预混燃烧技术、燃气轮机联合循环发电、复合循环燃烧技术、高效热电联产(CHP)、燃料电池技术、等温燃烧技术和阶梯燃烧等技术,可以提高天然气的利用效率,减少污染物和碳排放,实现天然气的高效、清洁利用。此外,据预测,天然气的能源需求将在2035年前后达到峰值,之后将在可再生资源的冲击和替代下逐步降低。然而,随着经济和社会发展对高端化工产品需求的增加,天然气的化工利用有望成为碳富集、碳固化和碳封存的重要途径,并在后达峰时代成为主要利用方向之一。比如,天然气可

以通过直接转化或重整制合成气的方式,生产甲醇、氨、液体燃料、二甲醚、乙二醇、乙炔、氢氰酸等重要化学品和燃料^[43];又或是朝着精细化、深加工和高附加值方向发展,甲烷裂解制氢、甲烷氧化偶联制乙烯、甲烷转化制芳烃(苯、甲苯和二甲苯等)等,进一步减少天然气利用过程中的碳排放^[44]。

以碳中和目标为导向,促进天然气利用与可再生资源的融合发展是实现天然气低碳和高效清洁利用的重要路径。比如,天然气与风能、太阳能的互补发电,以及天然气联合循环发电与可再生资源的结合等,展现了能源领域的高效互补策略,实现了电力供应的稳定调节;又或是将可再生资源电解水制氢与天然气转化工艺相结合,构建混合能源利用系统,既减少了碳排放,又增加了能源利用的灵活性。还可利用可再生资源提供的额外能源对天然气发电或工业使用过程中产生的CO₂进行捕集,并进一步转化为合成燃料或化学品,从而实现碳的循环利用。此外,天然气化工与可再生资源的融合发展是未来发展的重要方向,既可以采用可再生资源电解水生产的“绿氢”与天然气耦合生产化工产品,又可以利用天然气灵活调峰弥补部分可再生资源产能不稳定等特性,共同降低碳足迹^[45]。

综上所述,天然气的低碳化利用途径涵盖了开采、运输、储存及终端使用各环节(见图4)。通过优化天然气利用技术和工艺,不仅实现了更清洁的能源利用,还减少了甲烷泄漏等潜在的环境危害。同时,天然气与可再生资源的结合,如风能、太阳能的互补利用,进一步提高了能源系统的稳定性和灵活性,促进了绿色化工和清洁能源的创新发展。推动天然气的低碳化利用,既能显著减少温室气体排放、提升能源利用效率、推动能源转型、增强能源安全和促进绿色经济发展,还可以为全球应对气候变化和实现可持续发展目标提供了强有力的支撑。

4 结 语

高碳资源是全球能源供应的主要来源,提供了大部分的电力、热能和燃料,满足了工业、交通和居民生活的需求,在现代工业社会中具有重要的地位。但是,高碳资源作为一次能源的过渡消费,在促进经济增长的同时也带来了能源耗竭、环境污染等系列问题,尤其是CO₂大量排放带来的气候变暖,已经逐步威胁人类的生存环境。与此同时,随着经济增长、科技进步、生活水平的提高,人们对化学品的需求也大幅增加,这意味着需要改变传统高碳资源的利用方式,达到高碳资源转化为化学品

的高级低碳排放技术层次。此外,近年来在国家政策推动和技术创新双重作用下,可再生资源发展迅速,在替代高碳能源作为一次能源使用过程中发挥了决定性的作用。由此可见,亟需进行高碳资源的低碳化利用。然而,在实现“碳达峰”和“碳中和”目标的过程中,高碳资源在不同阶段有着不同的角色定位和作用。因此,必须结合高碳资源转型的短期和长期目标,树立全生命周期绿色低碳理念,推动高碳资源利用向着安全高效、绿色低碳、可持续发展的方向发展。

1) 短期内,在实现“碳达峰”目标前的很长一段时间,高碳资源仍将是我国的主要能源。因此,推动高碳资源的低碳化利用显得尤为重要。通过研发创新的高碳资源开采技术,降低能耗并减少源头碳排放;或是引入先进的燃烧与炼制工艺、高效节能设备以及运用智能化的管理来提高资源利用效率,减少利用过程中的碳排放;此外,借助CCUS技术,捕集并利用或永久封存产生的CO₂,可有效减少碳排放,助力实现碳中和目标。

2) 长期内,在碳中和发展阶段,随着可再生资源利用水平的显著提高,高碳资源作为能源的需求量将持续下降,其用途也将逐步从以燃料为主向以原料为主转变。因此,实现高碳资源的高值化、精细化利用,生产化工产品将成为未来发展的重要方向。通过将高碳资源转化为化学品并将碳固定于其中,不仅可以提高资源利用效率、增加附加值,更有助于减少碳排放,为实现可持续发展和环境保护提供重要支持。

3) 展望未来,随着可再生资源的快速发展,将传统高碳资源与可再生资源进一步融合,能有效减少高碳资源的碳排放,提高能源利用效率,为实现全球气候目标做出积极贡献。此外,未来的研究应进一步探索新技术、新材料和新工艺的应用,同时加强跨学科合作,以实现更高效、更经济的低碳化利用路径。只有在技术创新、政策支持和社会参与的努力下,才能为实现“双碳”目标提供坚实的理论基础和技术支撑,推动能源结构的绿色转型和可持续发展。

参考文献 (References):

[1] 鲍健强,施祺方,陈锋,等. 低碳能源技术发展战略与路径选择[J]. *未来与发展*, 2011(5): 18-22.
BAO Jianqiang, SHI Qifang, CHEN Feng, et al. The development strategies and path selections of low carbon energy technologies[J]. *Future and Development*, 2011(5): 18-22.

[2] 方文君,邓峰,张战仁,等. 环境目标约束对能源结构低碳转型的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2024, 34(1): 84-96.

FANG Wenjun, DENG Feng, ZHANG Zhanren, et al. Impact of environmental target constraints on the low-carbon transformation of China's energy structure[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2024, 34(1): 84-96.

[3] 赵彤阳,龚华俊,朱彬彬. 我国石化化工原料低碳化发展路径[J]. *化学工业*, 2023, 41(1): 1-12.
ZHAO Tongyang, GONG Huajun, ZHU Binbin. Low-carbon raw materials development route of petrochemical and chemical industry in China[J]. *Chemical Industry*, 2023, 41(1): 1-12.

[4] 王震,刘明明,郭海涛. 中国能源清洁低碳化利用的战略路径[J]. *天然气工业*, 2016, 36(4): 96-102.
WANG Zhen, LIU Mingming, GUO Haitao. A strategic path for the goal of clean-and-low-carbon energy in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(4): 96-102.

[5] 赵婷婷,姚婷. 经济发展视角下产业结构优化对中国碳排放的影响[J]. *科技和产业*, 2024, 24(12): 16-23.
ZHAO Tingting, YAO Ting. Impact of industrial structure optimization on China's carbon emissions from the perspective of economic development[J]. *Science Technology and Industry*, 2024, 24(12): 16-23.

[6] 刘志雄,刘艳荣. 我国产业结构升级对碳排放强度影响的空间溢出效应研究[J]. *煤炭经济研究*, 2024, 44(3): 93-104.
LIU Zhixiong, LIU Yanrong. A study on the spatial spillover effect of China's industrial structure upgrading on carbon emission intensity[J]. *Coal Economic Research*, 2024, 44(3): 93-104.

[7] 谢克昌. 高碳能源要低碳化利用[J]. *山西能源与节能*, 2010(4): 1-4.
XIE Kechang. Low-carbonizing utilization of high-carbon energy[J]. *Shanxi Energy and Conservation*, 2010(4): 1-4.

[8] 董康银,杨森森. 低碳能源技术创新对碳排放效率的影响研究: 基于空间溢出效应视角[J]. *工业技术经济*, 2024, 43(8): 26-36.
DONG Kangyin, YANG Senmiao. Research on the impact of low-carbon energy technology innovation on carbon emission efficiency: A spatial spillover perspective[J]. *Journal of Industrial Technology and Economy*, 2024, 43(8): 26-36.

[9] 吕清刚,柴祯. “双碳”目标下的化石能源高效清洁利用[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(4): 541-548.
LYU Qinggang, CHAI Zhen. Highly efficient and clean utilization of fossil energy under carbon peak and neutrality targets[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(4): 541-548.

[10] 蔡睿,朱汉雄,李婉君,等. “双碳”目标下能源科技的多能融合发展路径研究[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(4): 502-510.
CAI Rui, ZHU Hanxiong, LI Wanjuan, et al. Development path of energy science and technology under “dual carbon” goals: Perspective of multi-energy system integration[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(4): 502-510.

[11] 肖宇,彭子龙,何京东,等. 科技创新助力构建国家能源新体系[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(4): 385-391.
XIAO Yu, PENG Zilong, HE Jingdong, et al. Science and technology innovation promotes construction of new national energy system[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(4): 385-391.

[12] 李晓敏,刘世哲,薛栋. 可再生能源发展对碳排放的影响效应研

- 究[J]. 软科学, 2024, 38(12): 86–92, 100.
- LI Xiaomin, LIU Shizhe, XUE Dong. Research on the impact of renewable energy development on carbon emissions[J]. *Soft Science*, 2024, 38(12): 86–92, 100.
- [13] 姚星, 温心, 吴佳豪, 等. 面向碳中和的CCUS政策研究[J]. 能源环境保护, 2024, 38(3): 135–144.
- YAO Xing, WEN Xin, WU Jiahao, et al. CCUS policy research for carbon neutrality[J]. *Energy Environmental Protection*, 2024, 38(3): 135–144.
- [14] 王国法, 刘峰, 庞义辉, 等. 煤矿智能化: 煤炭工业高质量发展的核心技术支撑[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 349–357.
- WANG Guofa, LIU Feng, PANG Yihui, et al. Coal mine intellectualization: The core technology of high quality development[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(2): 349–357.
- [15] 官彦双, 吴超, 安超, 等. 智能化技术在石油化工行业的应用现状与前景分析[J]. 智能建筑与智慧城市, 2023(3): 166–168.
- GONG Yanshuang, WU Chao, AN Chao, et al. Analysis of application status and prospects of intelligent technology in the petrochemical industry[J]. *Intelligent Building & Smart City*, 2023(3): 166–168.
- [16] 徐葱葱, 刘冰, 张妮, 等. 智能化技术发展对油气管道行业的启示[J]. 油气田地面工程, 2019, 38(12): 1–5.
- XU Congcong, LIU Bing, ZHANG Ni, et al. Revelation of intelligent technology development on oil and gas pipeline industry[J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2019, 38(12): 1–5.
- [17] 侯梅芳. 碳中和目标下中国能源转型和能源安全的现状、挑战与对策[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2023, 45(2): 1–10.
- HOU Meifang. Current situation, challenges and countermeasures of China's energy transformation and energy security under the goal of carbon neutrality[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2023, 45(2): 1–10.
- [18] 葛世荣, 樊静丽, 刘淑琴, 等. 低碳化现代煤基能源技术体系及开发战略[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 203–223.
- GE Shirong, FAN Jingli, LIU Shuqin, et al. Low carbon modern coal-based energy technology system and development strategy[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 203–223.
- [19] ADU D, DU J G, ASOMANI S N, et al. Energy generation and carbon dioxide emission: The role of renewable energy for green development[J]. *Energy Reports*, 2024, 12: 1420–1430.
- [20] BOUBAKER S, LIU Z Y, MU Y H, et al. Carbon dioxide emissions and environmental risks: Long term and short term[J]. *Risk Analysis*, 2024.
- [21] SOLOMON S, DANIEL J S, SANFORD T J, et al. Persistence of climate changes due to a range of greenhouse gases[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(43): 18354–18359.
- [22] 侯梅芳, 梁英波, 徐鹏. 中国式现代化目标下构建新型能源体系之路径思考[J]. 天然气工业, 2024, 44(1): 177–185.
- HOU Meifang, LIANG Yingbo, XU Peng. The path of building a new energy system under the goal of Chinese modernization: A discussion[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(1): 177–185.
- [23] 郝成亮. 我国煤炭清洁高效利用现状与未来发展方向研究[J]. 煤炭经济研究, 2022(12): 38–42.
- HAO Chengliang. Current situation analysis and future trend research on clean and efficient utilization of Chinese coal[J]. *Coal Economic Research*, 2022(12): 38–42.
- [24] 郑德志. 新型能源体系下煤炭功能定位与发展路径研究[J]. 煤炭经济研究, 2023, 43(12): 36–41.
- ZHENG Dezhi. Research on the function orientation and development path of coal under the new energy system[J]. *Coal Economic Research*, 2023, 43(12): 36–41.
- [25] 王双明, 刘浪, 朱梦博, 等. “双碳”目标下煤炭绿色低碳发展新思路[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 152–171.
- WANG Shuangming, LIU Lang, ZHU Mengbo, et al. New way for green and low-carbon development of coal industry under the target of “dual-carbon” [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 152–171.
- [26] WARMUZINSKI K. Harnessing methane emissions from coal mining[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2008, 86(5): 315–320.
- [27] 桑树勋, 袁亮, 刘世奇, 等. 碳中和地质技术及其煤炭低碳化应用前瞻[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1430–1451.
- SANG Shuxun, YUAN Liang, LIU Shiqi, et al. Geological technology for carbon neutrality and its application prospect for low carbon coal exploitation and utilization[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(4): 1430–1451.
- [28] 张松. 新型能源体系下我国煤炭清洁高效利用途径研究[J]. 煤炭经济研究, 2023, 43(9): 71–77.
- ZHANG Song. Study on clean and efficient utilization of coal in China under new energy system[J]. *Coal Economic Research*, 2023, 43(9): 71–77.
- [29] 严晓辉, 杨芊, 高丹, 等. 我国煤炭清洁高效转化发展研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 19–25.
- YAN Xiaohui, YANG Qian, GAO Dan, et al. Development of clean and efficient coal transformation in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(6): 19–25.
- [30] YANG Q C, CHU G Y, ZHANG L H, et al. Pathways toward carbon-neutral coal to ethylene glycol processes by integrating with different renewable energy-based hydrogen production technologies[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 258: 115529.
- [31] ZHANG J Q, LIU R N, ZHANG G Z, et al. Techno-economic analysis and life cycle assessment of coal-to-aromatics process with integration of renewable energy-based hydrogen generation technology[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 139841.
- [32] 侯梅芳, 潘松圻, 刘翰林. 世界能源转型大势与中国油气可持续发展战略[J]. 天然气工业, 2021, 41(12): 9–16.
- HOU Meifang, PAN Songqi, LIU Hanlin. World energy trend and China's oil and gas sustainable development strategies[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(12): 9–16.
- [33] 朱红钧, 李英媚, 陈俊文, 等. “双碳”目标下中国石油企业绿色低碳减碳路径[J]. 天然气工业, 2024, 44(4): 180–189.
- ZHU Hongjun, LI Yingmei, CHEN Junwen, et al. Carbon reduction paths for Chinese oil companies under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(4): 180–189.

- [34] 刘江枫, 张奇, 吕伟峰, 等. 碳捕集利用与封存一体化技术研究进展与产业发展策略 [J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2023, 25(5): 40–53.
LIU Jiangfeng, ZHANG Qi, LV Weifeng, et al. Research progress and industry development strategy of integrated carbon capture, utilization and storage technology[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2023, 25(5): 40–53.
- [35] PIVAC I, JAKOV Š, BARBIR F, et al. Reduction of greenhouse gases emissions by use of hydrogen produced in a refinery by water electrolysis[J]. *Energy*, 2024, 296: 131157.
- [36] AL-SUBAIE A, MAROUFMASHAT A, ELKAMEL A, et al. Presenting the implementation of power-to-gas to an oil refinery as a way to reduce carbon intensity of petroleum fuels[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(30): 19376–19388.
- [37] ZOU H, PAN T, SHI Y W, et al. Light olefin production by catalytic co-cracking of Fischer–Tropsch distillate with methanol and the reaction kinetics investigation[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2020, 28(1): 143–151.
- [38] CHENG Q T, SHEN B X, LIU J C, et al. Reaction kinetic model of naphtha–methanol catalytic conversion for light olefins over HZSM-5 based on structure-oriented lumping[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(13): 10786–10795.
- [39] KHOJASTEH SALKUYEH Y, ADAMS T A. Integrated petroleum coke and natural gas polygeneration process with zero carbon emissions[J]. *Energy*, 2015, 91: 479–490.
- [40] POWELL J B. Natural gas utilization: Current status and opportunities[J]. *Catalysis Today*, 2020, 356: 27–36.
- [41] KONDASH A J, ALBRIGHT E, VENGOSH A. Quantity of flow-back and produced waters from unconventional oil and gas exploration[J]. *The Science of the Total Environment*, 2017, 574: 314–321.
- [42] 孔令峰, 张军贤, 李华启, 等. 我国中深层煤炭地下气化商业化路径 [J]. *天然气工业*, 2020, 40(4): 156–165.
KONG Lingfeng, ZHANG Junxian, LI Huaqi, et al. Commercialization path of medium–deep underground coal gasification in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(4): 156–165.
- [43] 宋鹏飞, 张超, 侯建国, 等. 碳约束条件下天然气化工技术发展及碳减排量预测 [J]. *低碳化学与化工*, 2023, 48(2): 71–77.
SONG Pengfei, ZHANG Chao, HOU Jianguo, et al. Technology development and carbon emission reduction forecast of natural gas chemical industry under carbon constraints[J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2023, 48(2): 71–77.
- [44] 潘珍燕, 石勇. 中国天然气化工技术现状及发展方向 [J]. *石油化工应用*, 2020, 39(11): 14–16.
PAN Zhenyan, SHI Yong. The technical present situation and development direction of natural gas chemical industry in China[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2020, 39(11): 14–16.
- [45] 邹才能, 林敏捷, 马锋, 等. 碳中和目标下中国天然气工业进展、挑战及对策 [J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(2): 418–435.
ZOU Caineng, LIN Minjie, MA Feng, et al. Development, challenges and strategies of natural gas industry under carbon neutral target in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(2): 418–435.