

煤基能源动态碳中和模式及其保供降碳效益评估

葛世荣¹, 王兵^{2*}, 冯豪豪², 姜鑫茹², 李雪²

(1. 中国矿业大学(北京)机械与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083)

摘要: 减煤增气、发展可再生能源的常规能源转型路径不能满足新形势下我国能源发展的安全需求, 煤基能源动态碳中和模式的构建是破解煤炭能源高碳排放困境和保障国家能源安全的前瞻性发展方向。本文结合国际能源转型模式的经验, 针对我国煤炭能源保供降碳现状及面临的挑战, 分析了保供降碳需求下低碳化煤基能源开发的紧迫性和重要性; 阐述了煤基能源动态碳中和模式的科学内涵, 构建了煤基能源动态碳中和模式的体系架构, 揭示了煤基能源动态碳中和模式的保供降碳机理; 建立了基于系统动力学的效益评估模型, 评估了煤基能源动态碳中和模式在能源安全、减排降碳、社会发展等方面的效益。结果表明: 相比煤炭能源开发利用, 2060年不同情景下煤基能源开发利用可实现46%~55%的减排潜力, 油气对外依存度降低到20%以内, 考虑到煤基碳捕集与封存(CCS)技术固碳能力, 煤基能源动态碳中和模式的降碳潜力可达84%, 进一步实现降碳目标需依赖于碳捕获、利用与封存(CCUS)技术的全流程应用和矿区碳汇; 煤基能源开发利用可作为油气储备技术, 有助于显著提升能源安全保障能力, 但2030年之前我国依然面临较大的油气缺口, 煤基能源发展刻不容缓。研究建议, 建设以煤基能源动态碳中和技术体系为支撑的新型能源体系, 实现能源自主可控, 并兼顾“双碳”目标, 近中期发展煤炭地下气化技术、富油煤开发技术、煤层气开发技术, 远期发展煤炭流态化开采技术。

关键词: 煤炭能源; 煤基能源; 动态碳中和; 能源安全; 保供降碳

中图分类号: TM73 文献标识码: A

Dynamic Carbon Neutrality Mode for Coal-Based Energy Systems and Effectiveness Assessment Thereof

Ge Shirong¹, Wang Bing^{2*}, Feng Haohao², Jiang Xinru², Li Xue²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The conventional energy-transition pathway, that is, reducing coal, increasing gas, and developing renewable energies, cannot fully satisfy the requirement of China for energy security under the new situation. Creating a novel dynamic carbon neutrality mode for coal-based energy systems is a forward-looking development approach to solving the problem of high carbon emissions and ensuring national energy security. This study summarizes the international energy transition modes and analyzes the urgency and importance of developing a low-carbon coal-based energy system in response to the challenges of energy security and emissions reduction. Moreover, it clarifies the scientific intension, establishes a system framework, and discloses the security guarantee and emissions reduction mechanisms of the dynamic carbon neutrality mode for coal-based energy systems. An effectiveness assessment model based on system dynamics is established to assess the effectiveness of the mode in terms of energy security, emission reduction,

收稿日期: 2023-09-11; 修回日期: 2023-10-15

通讯作者: *王兵, 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院副教授, 研究方向为能源系统工程; E-mail: bingwang_bit@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国煤炭行业碳中和发展科学体系及战略路径研究”(2022-XBZD-09), “我国能源安全战略研究”(2022-JB-05), “推动能源强国建设战略研究”(2022-XBZD-10)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

and social development. The results indicate that compared to the conventional coal-fueled systems, the coal-based energy system can potentially reduce carbon emissions by 46% to 55% and external dependence on oil and gas to be below 20% in 2060 under different scenarios; the carbon emissions can be reduced by 84% using the dynamic carbon neutrality mode and the carbon capture and storage technology, and is expected to be further lowered owing to the carbon capture, utilization, and storage technology and carbon sinks in mining areas. Coal-based energy development and application can serve as a strategic technology for oil and gas reserves, thereby ensuring energy security. However, China still faces a significant oil and gas gap before 2030, and thus the development of the coal-based energy is urgent. Furthermore, we propose that a novel coal-based energy system supported by dynamic carbon neutrality technologies should be built to achieve energy independence and security as well as achieve the carbon peaking and carbon neutrality goals. Coal underground gasification, tar-rich coal utilization, and coalbed gas development technologies should be regarded as a potential technology portfolio in the short and medium term and the coal in-situ fluidization mining technology could be a long-term choice.

Keywords: coal-fueled energy; coal-based energy; dynamic carbon neutrality; energy security; carbon emission reduction

一、前言

国际环境和全球能源格局发生深刻变革，我国能源发展和安全保障面临新挑战。俄乌冲突引发了国际能源紧缺，加剧了世界能源供需失衡，欧洲国家在能源方面高度依赖俄罗斯，这些国家“能源动荡”的根源与其普遍缺少兜底保障性能源供应密切相关，能源自给率过低容易引发能源安全风险。2021年，欧盟天然气对外依存度高达83%，石油对外依存度高达92%，煤炭的对外依存度也达到了42%，整体能源自给率低于43%。“北溪二号”水下爆炸事故的出现例证了极端情景下保障能源安全的重要性，能源进口通道的战略安全问题日益凸显，地缘政治局势演变的溢出效应进一步凸显了能源安全的重要性^[1]。煤炭占我国化石能源资源禀赋的90%以上，能源消费总量的56%左右，国际新形势和我国能源资源禀赋彰显了煤炭在我国国家安全战略中的重大责任。

以煤为主的能源结构需要在较长一段时期内肩负起保供降碳的重要责任。改革开放以来，煤炭作为国民经济的动力来源，为促进经济快速发展、保障能源安全和维持社会长期稳定提供了重要支撑。我国提出碳达峰、碳中和目标之后，各领域积极谋划减煤降碳行动，煤炭供应一度出现了供应不足问题，2021年9月发生的电力短缺、拉闸限电和企业关停等事件，对社会经济发展造成了一定的影响^[2]。从我国能源资源禀赋出发，煤炭行业首先要为能源供应安全和国民经济的有序运行发挥顶梁柱和压舱石作用^[3]。

世界经济复苏提升了能源需求，能源价格急剧攀升，煤炭的稳定器作用日益凸显。我国以煤为主的能源结构支撑了社会经济长期平稳运行，煤炭行

业的科技创新能力显著提升，为能源安全乃至国家安全发挥了重要作用。为适应新时代保障能源安全和实现“双碳”目标的双重重任，煤炭工业亟待从传统的煤炭能源转向煤基能源体系，聚焦煤炭清洁高效开发，利用新方向探索煤基能源动态碳中和体系的新思维、新路径、新技术非常必要和迫切。本文通过界定煤基能源的内涵和煤基能源动态碳中和模式的体系架构，基于学习曲线模型模拟了不同煤基能源技术的降碳潜力，采用系统动力学模型分析了煤基能源动态碳中和模式的保供降碳效益，以期为制定煤基能源发展规划提供决策支撑。

二、煤基能源的内涵及其保供降碳的重任

为适应新形势下我国能源安全保障和新型能源体系建设的迫切需求，应对煤炭行业高碳排放的挑战，煤炭能源亟待转变发展方式和思路，采取非常规手段、非常规思路、非常规路径建设煤基能源体系，攻克煤炭清洁低碳利用过程的巨量二氧化碳消纳技术^[4]。

煤基能源是基于煤炭开发利用技术创新，生产清洁化煤电（含煤浆发电、爆燃发电）、煤系气（煤层气抽采、地面煤制气、地下煤制气）和煤制油（地面煤制油、地下原位热解采油）等能源产品，并在矿区原位消纳转化流程所捕集的二氧化碳，从而改变煤炭传统的固态燃用方式，把高碳排放的固态煤炭产品变为低碳排放的液/气形态产品。

煤基能源开发利用能够在以煤为主的能源结构转型中发挥“一主体、三支撑、一突破”作用，具体体现在：“一主体”是指发挥新型低碳煤电在电力供应中的主体地位；“三支撑”是指发挥煤基能源在国家油品战略储备、天然气进口量替代、氢能

体系发展中的支撑作用；“一突破”是指突破煤炭清洁利用的动态碳中和技术。“一主体、三支撑”是能源安全保障的外在需求，“一突破”是碳中和目标下实现以煤为主的能源结构低碳发展的内在要求。

(一) 国外碳达峰国家并未放弃煤炭能源

主要国家的能源转型经历表明，一些已经实现碳达峰、且正在转向碳中和的国家并没有完全去除煤炭能源，其仍把煤炭作为现代能源体系中的稳定器，主要体现在煤炭供能基本保障方面：煤炭在能源消费结构中的占比长期保持在20%以上，典型的碳达峰路径减煤增气总幅度在20%以上，已经碳达峰且为电力大国的煤电占比普遍超过20%。

(1) 碳达峰国家煤炭消费占比整体稳中有降，但并未完全弃煤。在已达峰的排放量前10名国家中，有4个国家（德国、韩国、澳大利亚、波兰）在达峰前煤炭消费占比高达40%以上，2个国家（土耳其、英国）高达30%以上（见图1）；此外，欧盟作为一个整体已实现碳达峰，其达峰前煤炭消费占比达31%。更重要的是，这些国家在实现碳达峰之

后，其煤炭消费占比并非在短期内快速下降，而是进入了一个相对缓慢降低或不断波动的平台期。

(2) “减煤增气”已成为发达国家碳减排与碳达峰的重要路径选择。经济与合作发展组织(OECD)国家整体煤炭占一次能源消费比重从1985年的25%降低到2020年的13%，而天然气从18%增加到29%，减煤幅度为12%，增气幅度为11%。能源结构调整使单位能源消费量的二氧化碳排放强度从 $65.7 \text{ tCO}_2/\text{TJ}$ 降低到 $49.6 \text{ tCO}_2/\text{TJ}$ ，降幅为24.5%。其中，欧盟国家整体煤炭占一次能源消费比重从1985年的31%降低到2020年的11%，降幅为20%；天然气从15%增加到25%，增幅为10%。减煤增气虽是实现碳达峰的有效路径，但必须建立在本国天然气资源储量丰富或天然气进口通道便捷、风险低的基础之上。

(3) 碳达峰国家的燃煤发电占比普遍高于20%。2022年，全球及OECD国家的化石能源发电占比均超过了50%^[5]（见表1）。美国、日本、澳大利亚、韩国等主要碳达峰国家的化石能源发电占比超过60%，燃煤发电占比超过或接近20%。在用电量较高的碳达峰国家中，加拿大和巴西的可再生能源发电占比超过40%，其他国家非化石能源占比大多不超过30%。

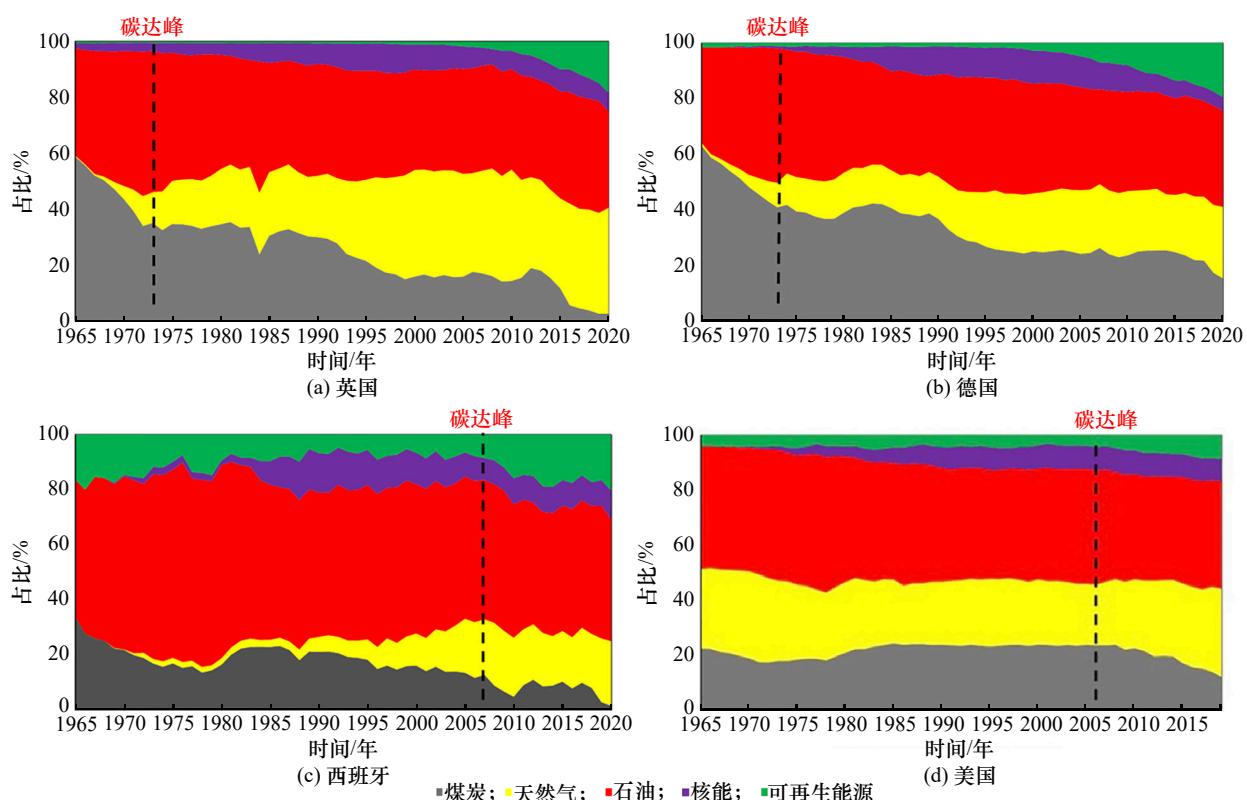


图1 主要国家减煤增气的能源消费结构演变过程

表1 2022年全球部分国家或地区化石能源及煤电占比

国家或地区	化石能源发电占比/%	煤电占比/%
全球	60.61	35.38
OECD 国家	51.20	19.35
欧盟	37.74	16.40
澳大利亚	66.59	47.84
日本	64.75	29.90
韩国	62.67	33.65
美国	60.38	19.88
德国	45.87	31.28
英国	40.80	1.72
加拿大	17.86	5.17

注：数据来源于《BP Statistical Review of World Energy 2023》。

（二）我国需依靠煤基能源承担保供降碳重任

煤炭是我国的主要能源和重要工业原料，承担着重点行业的能源保供责任，同时煤炭利用在降碳方面也取得了重要进展。中国电力企业联合会数据显示，我国 6000 kW 及以上电厂供电标准煤耗由 2008 年的 345 g/(kW·h) 降至 2021 年的 302.5 g/(kW·h)，降幅为 12.3%。与国外对比，我国发电煤耗在 2011 年后低于美国，并于 2017 年达到欧洲的平均煤耗水平。2022 年，全国单位火电发电的二氧化碳排放量约为 824 g/(kW·h)，比 2005 年降低了 21.4%；全国单位发电量的二氧化碳排放量约为 541 g/(kW·h)，比 2005 年降低 36.9%。据统计，我国煤炭开采和洗选综合煤耗由 2012 年的 4.08×10^8 t 降至 2020 年的 1.69×10^8 t，下降约 60%。

当前，我国能源利用效率与世界发达国家水平存在很大差距，煤炭能源利用仍是我国能源相关碳排放的主要来源，亟需改变煤炭传统开发利用方式，提高煤炭利用效率，发展煤基能源开发利用，在实现“双碳”目标的未来进程中承担保供降碳重任。

地缘政治紧张局势引发能源兜底保障需求，能源系统的稳健性和柔韧性日益重要，煤基能源可有力发挥能源的保供重任。我国是世界上最大的石油进口国、仅次于美国的石油消费国，石油的对外依存度一直居高不下，且 80% 的原油进口经过马六甲海峡，通道路程长、风险源较多，极易受到地缘政治局势影响。为实现油气保供，降低油气进口比例，我国需拓展煤基油气产业，发挥煤基能源体系的兜底保障作用^[6]。

煤基天然气开发既能显著降低煤炭能源的碳排

放，也可以在一定程度上提高能源清洁转换效率，从而实现保供兼顾降碳的双重重任。高饱和度的碳氢化合物在燃烧过程中碳与氧结合生成二氧化碳属于一种相对完全燃烧反应，会产生更少的碳排放^[7]。而碳氢化合物中丰富的氢原子能够提供足够的氧气供碳原子燃烧，从而实现完全燃烧。而煤炭及木材燃烧期间的碳氢比为 1:1，石油的碳氢比为 1:2，天然气的碳氢比为 1:4。煤基能源生产过程通过脱硫、脱氮和脱碳等操作形成固体废渣，提高了碳氢饱和度的过程，从而有效减少碳排放^[8]。因此，在煤基能源生产过程中，煤制油通过直接液化、间接液化或原位热解产生油，煤炭通过气化产生合成气，都是通过改变分子结构产生更多能量同时降低碳排放。

煤基油气，特别是富油煤开发和煤层气开发，有望成为石油战略储备技术的重要选择。低阶煤通过中低温热解反应可获得煤焦油、热解气和兰炭。我国富油煤资源总量约为 5×10^{11} t，按焦油收率 10% 计算，可得到油、气分别为 5×10^{10} t、 7.5×10^{13} m³。“十三五”期间，煤层气（煤矿瓦斯）累计利用 3.4×10^{10} m³，相当于节约了 4.08×10^7 tce，减排二氧化碳 5.1×10^8 t。2022 年，经过多轮资源评价，我国煤层气预测资源量约为 2.6×10^{13} m³，全部利用状态下预计可降碳 3.9×10^{11} tCO₂。煤基油气保供降碳潜力巨大，在保障能源安全兼顾实现碳中和方面大有所为。

三、煤基能源动态碳中和模式的科学内涵

（一）煤基能源动态碳中和的体系架构

煤基能源是指改变煤炭固态利用为主，以煤炭为主要原料进行清洁高效可持续开发利用的能源形式。这一过程的产碳能力将有效降低，通过用碳和固碳，进一步挖掘其降碳能力，助力实现“双碳”目标，同时发挥其对于能源系统稳定性的压舱石、顶梁柱作用。因此，本文提出了煤基能源动态碳中和的体系架构，通过煤基能源开发利用保障能源安全的同时兼顾“双碳”目标。煤基能源动态碳中和体系架构如图 2 所示，其模式是指以煤炭勘探—开发—利用全生命周期为视角，将煤炭勘探“采炭”、智能开采“低碳”、高效利用“减碳”、清洁转化“替碳”形成煤炭低碳开发利用系统，将碳捕获、利用与封存技术（CCUS）“用碳/固碳”、矿后生态修复“储碳”耦合构成煤基能源碳闭环系统，构建智能、

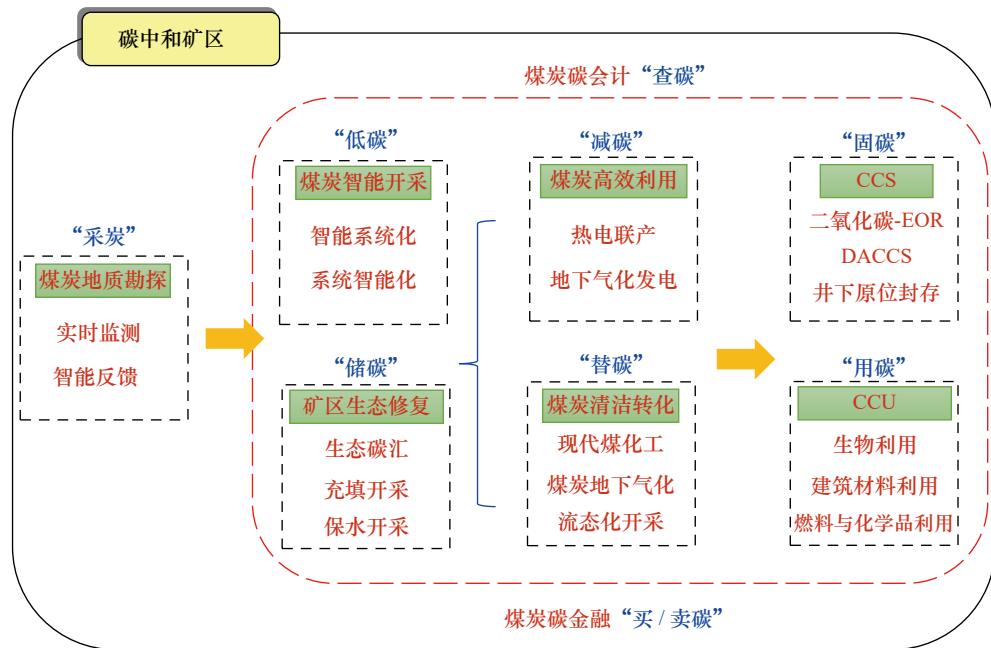


图2 煤基能源动态碳中和体系架构

注：CCS为碳捕获和封存；DACCs为直接空气碳捕获和储存；CCU为碳捕集利用；EOR为强化采油技术。

安全、高效、清洁的煤炭工业技术体系。煤基能源动态碳中和模式在企业层面需要考虑碳会计“查碳”和碳金融“买/卖碳”对企业碳资产的经济管理功能，形成煤炭开发、利用、转化、CCUS、碳会计、碳金融和碳汇的封闭碳循环产业链。

(二) 煤基能源动态碳中和的降碳能力

图2所示的煤基能源动态碳中和体系架构中，煤基能源动态碳中和模式突出特点体现在产碳—用碳—固碳能力上的显著变化。

煤基能源动态碳中和模式的“产碳”能力体现在以下几个方面。① 煤炭勘查环节应充分体现节约、高效、绿色的工作理念，这是支撑实现煤炭智能柔性保供的基石。开展煤炭资源绿色精细勘查的重要性主要体现在：摸清我国煤炭资源数量、质量和赋存规律，增加煤炭资源可采储量，为矿区规划和矿井建设提供资源基础；减少勘查环节对地质和生态环境的损害，为绿色低碳开采提供地质依据，为开展矿区资源综合利用与碳封存提供地质保障。② 煤炭绿色智能开发能够有效降低煤炭开发环节的产碳能力，降低煤炭开采与洗选过程能耗，推进煤炭开发的清洁化和低碳化。例如，煤矸石井下处理技术，我国每生产 1×10^8 t煤炭，约产生煤矸石 1.4×10^7 t，煤矸石中的碳含量平均为14.2%，实现

煤矸石井下处理，对构建绿色低碳友好型矿区环境至关重要；智能无人开采、智能感知、协同控制等可以有效提高煤炭产量、降低煤矿灾害和提高回采率；煤与瓦斯共采技术有效阻止了煤层中的瓦斯（主要成分包括 CH_4 和 CO_2 等）释放到大气中，避免瓦斯卸压与瓦斯事故，同时减缓瓦斯气体排放引起的温室效应；煤炭地下气化开采则能够将自身绿色低碳开采、清洁高效利用的特性融入动态碳中和循环模式，实现煤炭气化利用。③ 煤炭清洁转化能够降低煤炭资源利用端的碳排放。加快煤气化、煤制油、煤制烯烃、煤制醇类等关键技术攻关，推动由燃料向高端化工原料和碳基新材料领域的转型发展，实现煤炭能源的低碳利用^[9]。

煤基能源动态碳中和模式的“用碳”能力体现在碳捕集、利用技术的用碳能力上。CCU技术是实现煤炭清洁化利用的碳闭合技术体系的重要环节。以煤炭地下气化开采技术为例，由于整个利用与转化过程均在地下完成，煤炭地下气化产生的二氧化碳除了利用气化腔就地封存固碳以外，还可以利用煤炭地下气化生成的合成气制备化学品，其脱碳阶段会排放出大量高纯度的二氧化碳，由于其纯度高，有助于大幅降低捕集环节的总成本，通过加氢制甲醇实现资源化有效利用。此外，这些二氧化碳还可能在煤矿驱替煤层气、油田驱油增产等方面发挥重要价值。

煤基能源动态碳中和模式的固碳能力体现在：① 地质封存（咸水层）与深地原位地下封存。以煤炭地下气化开采技术为例，其气化腔理论上具备封存所产生的 70% 的二氧化碳。因此，通过技术耦合与集成，开展煤炭清洁转化领域碳封存和碳循环利用关键技术攻关，可实现碳、氧、氢资源高效转化和循环利用，构建循环式低碳产业链。② DACCS 和生态增汇进一步挖掘矿区碳汇潜力，通过产生负排放可抵消整个循环中多余的碳排放，是推动形成动态碳中和模式的托底技术保障。DACCS 从空气中直接捕集 CO₂，并将其注入深层地质构造以永久封存，土地资源占用小且高度灵活，可利用矿井采空区或废弃矿井地下空间满足封存需求，设施布置灵活，可避免长距离运输。矿区生态修复是增加生态碳汇的有效途径，亟待推动开展全生命周期矿山生态修复理论与技术链，发展减沉保水协调开采、充填开采、土壤修复与生物多样性恢复关键技术等^[10]，修复矿区损毁土地，改善土壤碳截获能力，增加植物碳储量。

四、煤基能源动态碳中和模式的效益评估

系统动力学 (SD) 方法是一种定性与定量相结合的仿真模拟方法，广泛应用于能源领域的仿真研究中^[11]。从社会和系统层面关注具备多变量、高阶次、多回路复杂时变能源系统演化机制的研究，通过改善能源系统的运行机制，从而实现能源可持续发展与环境保护。彭生江等^[12]通过 SD 方法构建了风—氢—煤耦合发展系统动力学模型，并针对性地分析了风煤耦合发展的减排效益和经济效益；杜振东等^[13]运用系统动力学构建了我国电力市场的发展演化模型，并分析了不同情景下的电力市场的演化趋势以及碳排放水平；Yang 等^[14]基于我国煤炭产能结构构建了 SD 模型，对不同政策下我国煤炭的产能规模进行了仿真模拟。煤基能源动态碳中和模式是对煤炭行业低碳发展的有益探索，针对煤基能源动态碳中和这一具有复杂非线性的能源利用模式，可以通过构建 SD 模型来实现其对能源、环境等方面定性、定量评估。

(一) 系统动力学模型构建

1. 系统边界

本节研究应用煤基能源动态碳中和模式所带来

的效益，包括低碳效益和能源安全效益两方面。主要根据煤基能源行业的发展实际，以能源结构、煤基能源的转化利用以及碳排放之间的交互关系作为建模的基础，来对煤基能源动态碳中和系统进行边界界定。根据系统内各变量间的层次关系和相关程度，将其划分为煤基能源子系统、碳排放子系统以及能源安全子系统。

2. 系统因果回路图

根据前文的分析给出煤基能源动态碳中和系统的因果回路图，如图 3 所示。

煤基能源动态碳中和系统因果回路图主要包含以下回路：

回路 1：经济发展 → 煤炭清洁利用水平 → 清洁能源产量 → 碳减排量 → 煤基能源碳排放量 → 煤基能源综合效益 → 经济发展（正反馈回路）

回路 2：经济发展 → 能源消费 → 能源缺口 → 能源安全 → 煤基能源综合效益 → 经济发展（正反馈回路）

回路 3：清洁能源产量 → 能源缺口 → 能源安全 → 煤基能源综合效益 → 经济发展 → 煤炭清洁利用水平 → 清洁能源产量（正反馈回路）

回路 4：碳减排量 → 煤基能源碳排放量 → 煤基能源综合效益 → 经济发展 → 煤炭清洁利用水平 → 清洁能源产量 → 碳减排量（负反馈回路）

3. 模型流图及方程构建

基于煤基能源碳中和问题的复杂性，本文对研究范围进行界定，降碳效益主要关注关键煤基能源转化技术的降碳能力，对于保供效益主要聚焦于未来煤基油气和颠覆性技术的发展，因此该研究在建立 SD 模型时做出如下设定：① 煤基能源碳排放考虑关键

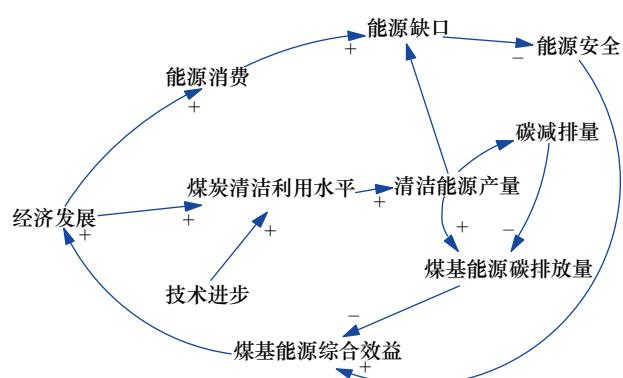


图 3 煤基能源系统效益评估的因果反馈回路
注：“+”为正因果链；“-”为负因果链。

颠覆性技术，包括煤制油、煤制气、煤制氢的清洁转化利用，煤炭地下气化、煤层气的煤系气转型利用以及富煤油油气开发技术所产生的碳排放。② 经济发展水平作用于系统外部，且具有阶段性的特征，传统煤化工技术相对较为成熟，因此没有纳入到低碳化煤基能源的范畴。③ 各种煤基能源的清洁利用水平是作为外生变量给定的，通过我国能源结构优化的中长期发展规划以及未来可能的能源缺口确定。

结合 SD 模型分析，本研究预测了煤基能源动态碳中和模式的降碳能力。由于煤炭的清洁利用是未来发展的必然趋势，不同的煤基能源技术会带来不同的减碳效益，并且随着技术的进步其减碳效益也会有相应的改变。通过 SD 模型可分析并预测煤基能源在不同发展情景下的超低碳能力。最终建立煤基能源效益评估的系统动力学流图如图 4 所示。不同煤基能源技术的碳排放会随着技术的进步而降

低，本研究采用学习曲线来模拟未来煤基能源的碳排放变化趋势并将其拟合结果内生到SD模型中。本文采用式（1）曲线模型来预测我国煤基能源因技术进步带来的CO₂排放系数变化趋势：

$$y = A_1 \times e^{(-x/t)} + y_0 \quad (1)$$

式(1)中, y 表示单位产品的 CO_2 排放系数, x 表示年份。分别计算煤制油、富油煤产油、地面煤制气、煤制氢、地下气化产气的 CO_2 排放系数变化趋势, 得到煤基能源 CO_2 排放系数(见表2)及煤基能源生产过程中 CO_2 排放系数的百分比变化(见图5)。该模型中涉及的关键方程如表3所示。

4. 模型有效性检验

本文选取能源消费总量进行 SD 模型参数敏感性检验，调节 2020—2060 年的 GDP 增速来观测能源消费量的趋势变化，如图 6 所示。能源消费总量变化趋势没有发生大的变化，说明模型具有良好的

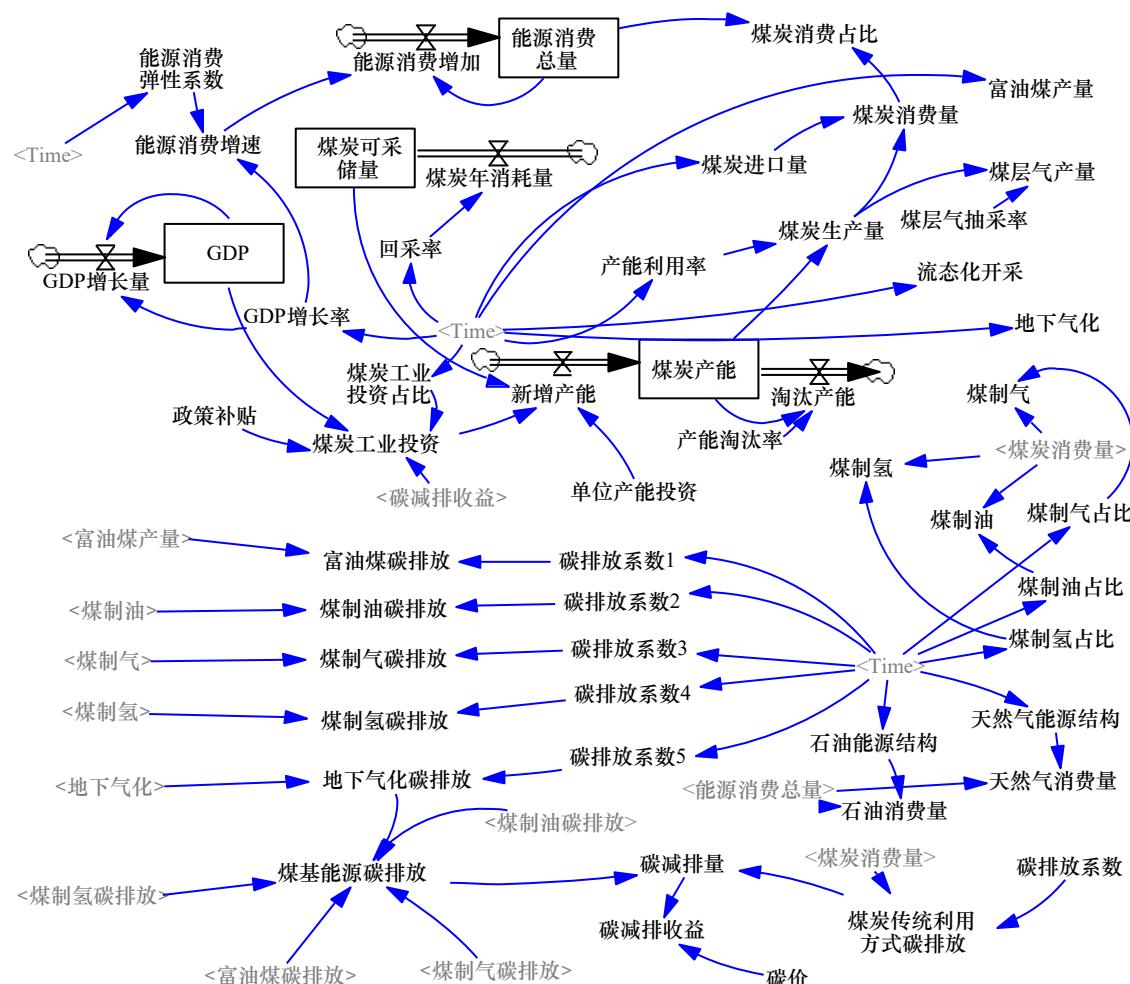


图4 煤基能源动态碳中和模式SD流图

注：GDP表示国民生产总值；Time为模型影子变量，表示外生参数在不同年份的取值，根据不同情景进行设置。

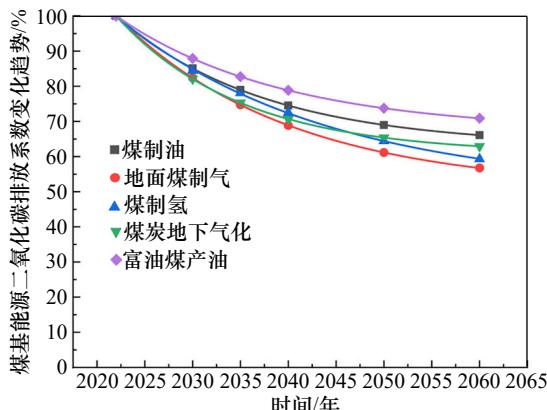


图5 煤基能源碳排放系数下降趋势

适应性和鲁棒性。

在敏感性分析的基础上,本研究采用历史性检验方法对比分析2014—2019年运行值和实际值之间的误差来校对模型的有效性。通常情况下,SD模型的仿真结果应尽可能地接近现实情况,将误差控制在合理范围内。选取GDP、能源消费量进行对比分析,结果如表4和表5所示。历史值和模拟值之

间的相对误差均在10%以内,说明该模型是合理的,可以模拟煤基能源动态碳中和系统的发展现状以及未来趋势。

(二) 煤基能源动态碳中和的效益分析

1. 情景设置

本文煤基能源关键技术主要包括煤制油、煤制气、煤制氢的清洁转化利用,煤炭地下气化、煤层气的煤系气转型利用以及富煤油油气开发技术。以上煤基能源技术可以将我国丰富的煤炭资源转化为汽油、柴油等液体燃料和气体燃料,部分替代常规石油基汽油、柴油和天然气,可有效缓解我国石油供需矛盾,满足终端优质能源需求^[15],特别是在极端气候和突发事件的影响下,煤基油气技术在保障我国能源安全、社会基本运行与人民生活基本保障等方面意义重大。考虑煤基能源发展特征以及未来发展战略^[21,22],提出以下四种情景进行仿真模拟。

(1) 基准情景

在基准情景下,通过制定更全面的非化石能源

表2 煤基能源碳排放系数

时间/年	煤制油CO ₂ 排放系数(t CO ₂ /t油)	地面煤制气CO ₂ 排放系数(tCO ₂ /×10 ⁴ m ³ CH ₄)	煤制氢CO ₂ 排放系数(tCO ₂ /t H ₂)	煤炭地下气化CO ₂ 排放系数(tCO ₂ /×10 ⁴ m ³ CH ₄)	富油煤产油CO ₂ 排放系数(tCO ₂ /t油)
2022	4.180 1	61.18	22.290 1	12.100 1	1.760 5
2030	3.556 3	50.41	18.820 1	9.933 1	1.547 3
2035	3.300 1	45.72	17.407 0	9.108 0	1.456 2
2040	3.114 6	42.13	16.157 9	8.550 1	1.388 1
2050	2.883 4	37.41	14.363 1	7.909 7	1.298 4
2060	2.762 4	34.72	13.214 7	7.613 1	1.247 9

注:以煤制油为例,其生产过程排放系数 $4.18 \times 10^8 \text{ tCO}_2/\times 10^8 \text{ t油}$ 来源于中国能源统计年鉴中的煤制油转换系数41.816 MJ/kg和单位煤制油生产过程的碳排放系数0.1 kgCO₂/MJ,由此可得煤制油生产过程排放系数为 $4.1816 \text{ kgCO}_2/\text{kg油}$,经转换后得到 $4.18 \times 10^8 \text{ tCO}_2/\times 10^8 \text{ t油}$,其他部分详细数据见参考文献[16~20]。

表3 煤基能源动态碳中和模式系统动力学模型关键方程

参数	单位	公式
GDP	亿元	INTEG {GDP 增长量, 410 354}
煤炭产能	×10 ⁸ t	INTEG {新增产能-淘汰产能, 41.94}
能源消费总量	×10 ⁸ tce	INTEG {能源消费增加, 36.1}
能源消费增速	%	GDP 增长率 / 能源消费弹性系数
煤炭生产量	×10 ⁸ t	煤炭产能×产能利用率
煤炭消费量	×10 ⁸ t	煤炭进口量+煤炭生产量
煤制油碳排放	×10 ⁸ tCO ₂	1.091 26E57*exp (-time/15.447 74) +2.629 52
煤制气碳排放	×10 ⁸ tCO ₂	2.680 61E46*exp (-time/17.939 58) +0.003 11
地下气化碳排放	×10 ⁸ tCO ₂	1.980 16E64*exp (-time/12.986 77) +7.357 55E-4
煤制氢碳排放	×10 ⁸ tCO ₂	9.363 49E39*exp (-time/22.560 21) +11.146 97
富煤油碳排放	×10 ⁸ tCO ₂	1.872 42E50*exp (-time/17.385 27) +1.182 97
煤基能源碳排放	×10 ⁸ tCO ₂	煤制油碳排放+煤制气碳排放+地下气化碳排放+煤制氢碳排放+富油煤碳排放

注:time为模型时间变量,表示模型仿真年份。

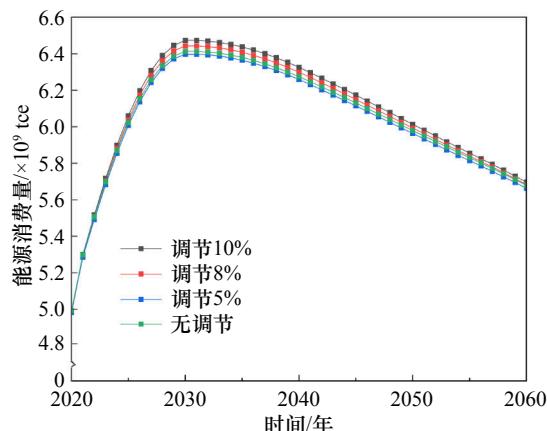


图6 能源消费指标敏感性分析

表4 能源消耗总量模拟值与实际值对照表

能源消耗	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
模拟值/ $\times 10^8$ tce	44.7	46.0	46.9	48.1	50.3	52.9
实际值/ $\times 10^8$ tce	42.8	43.4	44.1	45.6	47.2	48.7
误差/%	4.4	5.9	6.3	5.4	6.6	8.6

表5 GDP总量模拟值与实际值对照表

GDP	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
模拟值/亿元	600 799	660 879	726 967	799 664	879 630	967 593
实际值/亿元	644 380	685 571	742 694	830 945	915 243	983 751
误差/%	6.7	3.6	2.1	3.7	3.8	1.6

发展目标政策，储能技术实现突破，新能源技术高速发展，煤基能源按照现有水平可实现一定规模的发展。在该情景下，2060年煤基能源清洁转化用煤占煤炭消费比例约为50%。

(2) 煤基能源利用情景

在能源转型背景下，煤炭行业将实施更加严格的碳排放约束政策，低碳化煤基能源技术创新取得突破，煤基能源规模不断增加，常规煤炭清洁利用稳步发展，即煤基能源利用情景。在该情景下，2060年煤基能源清洁转化用煤占煤炭消费比例约为87%。

(3) 极端气候保供情景

在煤基能源利用情景的基础上，考虑到极端气候对能源供应的影响，这部分需求由煤炭清洁转换提供，即极端气候保供情景。在该情景下，在2060年煤基能源清洁转化用煤占煤炭消费比例约为75%。

(4) 突发事件保供情景

考虑到突发事件对油气保供的影响，这部分需

求可由煤基油气替代，即突发事件保供情景。在该情景下，2060年煤基能源清洁转化用煤占煤炭消费比例为77%。

2. 煤基能源动态碳中和的保供效益

不同保供情景（极端气候保供和突发事件保供）下煤基能源产油（以标准煤计）预测如图7(a)和图7(b)所示，2060年，预计煤基能源产油量为 2.57×10^8 tce 和 3.57×10^8 tce。从煤基产品结构上看，保供情景下煤制油占比相对较高，这表明未来煤制油技术的战略价值会凸显。富油煤产油的占比呈现出逐渐升高的趋势，这是由于富油煤技术发展潜力较高，尤其是在能源结构多元化和能源安全方面，预计未来富油煤产油量仍具有很大的增长空间。虽然煤制油在能源保供方面具有很大的优势，但也应积极推动清洁能源技术的发展，逐步减少对煤制油的依赖，促进能源结构多元化。

不同保供情景（极端气候保供和突发事件保供）下煤基燃气产量（以标准煤计）预测如图7(c)和图7(d)所示，从结构上来看，煤基燃气结构逐步形成以煤炭地下气化为基础的多元化格局，煤层气和煤炭地下气化的开发利用将成为天然气供应安全的重要保障。其中，煤炭地下气化产气占煤基天然气的比例在2060年将达到64%~66%。从总体上看，煤炭地下气化技术具备巨大的发展潜力，可以实现煤炭高效利用和能源可持续发展目标。然而，为充分挖掘其潜力，需要解决地质风险、环境保护、技术创新等问题。

3. 煤基能源动态碳中和的降碳效益

不同情景下煤基能源碳排放趋势预测结果如图8所示。在基准情景下，其碳排放于2030年左右达到峰值后缓慢降低，预计2030年、2060年的二氧化碳排放量将分别达到 6.16×10^8 t、 4.46×10^8 t。在该情景下煤炭发挥基础保障性作用，新能源快速发展并能满足经济社会发展需求。在煤基能源利用情景下，煤炭行业全面提升煤炭清洁利用水平、扩大煤基能源产业规模，煤基能源产量迅速扩大。

在煤基能源利用情景下，煤基能源技术迅速发展，且各种技术的碳排放因子随着技术进步将不断降低，随着煤基能源规模的增加，其碳排放仍呈现出缓慢增加趋势，在2030年、2060年的二氧化碳排放量将分别达到 7.1×10^8 t、 9.2×10^8 t，但其发挥的碳减排效益将不断增加；在保供情景（极端气候

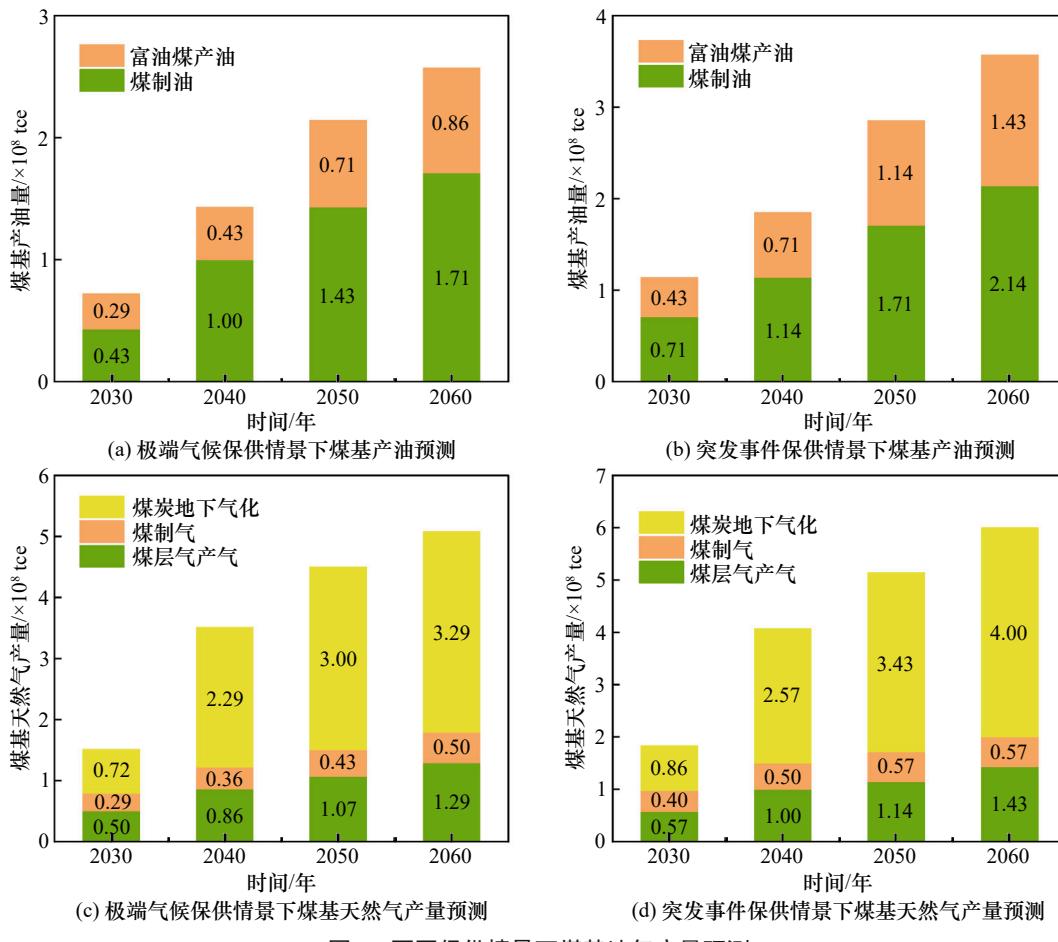


图7 不同保供情景下煤基油气产量预测

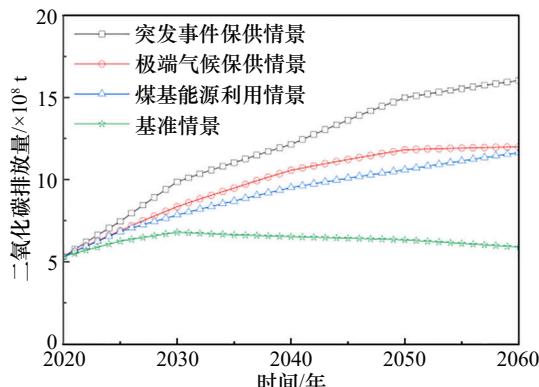


图8 不同情景下煤基能源碳排放变化趋势

和突发事件)下,能源供应受到外界因素的影响,这部分的能源缺口由煤基能源保供。因此,相比煤基能源利用情景,保供情景下煤基能源产量进一步增长。2060年,在保供情景下煤基能源的碳排放量将分别为 9.7×10^8 t和 1.23×10^9 t,比煤基能源利用情景分别增加 0.5×10^8 t和 3.1×10^8 t。

煤基能源的碳减排潜力主要从以下几个方面来分析:①煤炭清洁利用方式相比煤炭的传统利用方式具有一定的降碳潜力。②考虑技术学习曲线,各项煤基能源技术的单位碳排放会随着技术的进步而降低。③对于煤层气而言,其主要成分是甲烷。甲烷的温室效应约为二氧化碳的25倍。煤层气的开发利用具有巨大的减排潜力。

为评估不同情景下煤基能源体系的减碳效益,通过将煤炭清洁利用方式的碳排放与传统利用方式(本研究假定以燃煤发电为例)所产生的碳排放进行对比。基于本研究的结果,利用公式(2)计算传统利用方式所产生的碳排放量:

$$Q = \varepsilon \times c_1 \times \beta \quad (2)$$

式(2)中, Q 为碳排放量, ε 为碳排放系数(本研究取 $2.46 \text{ tCO}_2/\text{tce}$), c_1 为各煤基能源转化系数, β 为煤基能源产量。

不同情景的碳排放结果对比如图9所示,在基准情景下,煤基能源产业规模不大,2060年的碳排

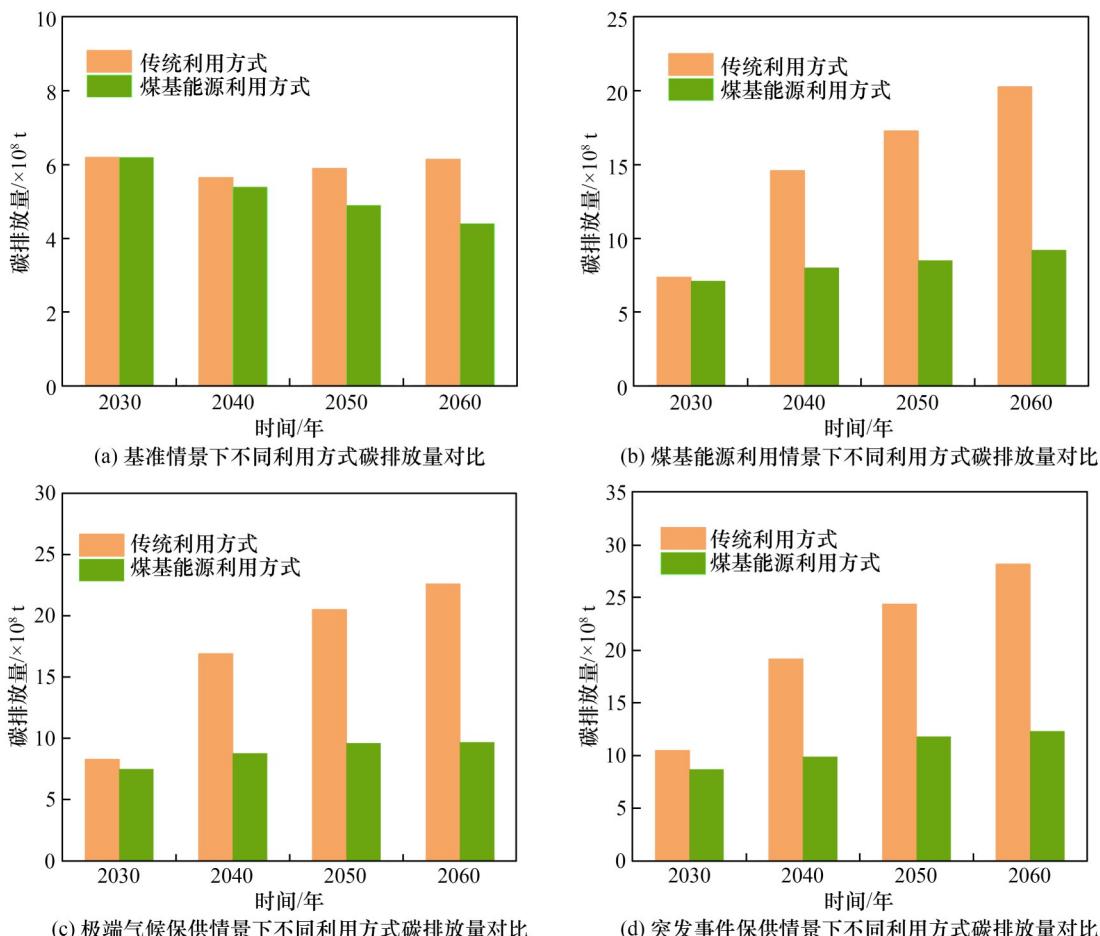


图9 不同情景下煤基能源碳排放与传统利用方式结果对比

放量为 $4.4 \times 10^8 \text{ tCO}_2$ ，相比传统利用方式碳排放量降低了 $1.75 \times 10^8 \text{ tCO}_2$ ；在煤基能源利用情景下，考虑技术进步，煤炭清洁利用水平稳步提升，煤基能源产业结构不断优化，2060年煤基能源碳排放量为 $9.2 \times 10^8 \text{ tCO}_2$ ，相比传统利用方式碳减排潜力可达 55%。在保供情景下，煤基能源产业规模进一步扩大从而保障因极端气候和突发事件所带来的能源供应缺口；预计在 2060 年，相比传统利用方式，保供情景下煤基能源体系碳减排潜力将分别达到 47% 和 46%。进一步考虑煤炭地下气化等技术在地下气化腔的储碳能力（以 70% 为理论值^[23]），煤基能源动态碳中和模式考虑固碳能力之后的碳减排潜力有望达到 84% 左右。在此基础上，考虑矿区复垦碳汇、DACCs 等技术，煤基能源动态碳中和模式有望最终实现。

如图 10 所示，在煤基能源清洁利用情景下，2060 年煤基能源体系（煤基能源利用占比 87%，煤

炭传统利用占比 13%）仍将产生 $1.36 \times 10^9 \text{ t}$ 的二氧化碳，通过煤基 CCS、矿区 CCUS（假设理想条件下采空区 5% 的空间可用来封存二氧化碳，煤炭地下气化腔的储存利用率为 70%，矿区 CCUS 捕集封存率为 90%）可降低 38% ($1.28 \times 10^9 \text{ t}$) 的碳排放，剩余的碳排放需通过矿区碳汇、负排放技术吸收，进而实现煤基能源体系的动态碳中和。

煤层气开发利用技术是煤基能源动态碳中和技术体系中的重要组成部分，煤层气的开发利用具有巨大的减碳效益。不同情景下煤层气产量如图 11 所示。煤层气在我国有着得天独厚的资源优势，可以保障我国天然气供应和助力碳中和目标的实现。在煤基能源利用情景下，煤层气产业快速发展，2030 年之前增长速度趋势较快，随后稳步上升。煤层气的产量在 2030 年和 2060 年将分别达到 $3.5 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 、 $8 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。

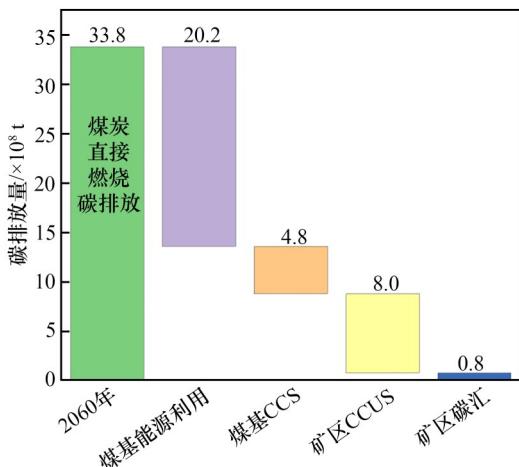


图 10 煤基能源利用情景下 2060 年煤基能源“减碳-降碳-固碳”结构

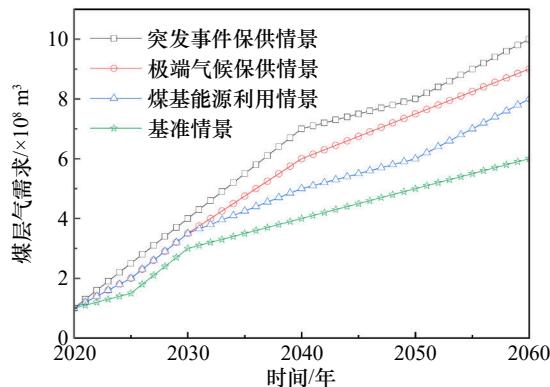


图 11 不同情景下煤层气开发利用需求

4. 考虑碳交易市场政策的煤基能源减排效益

“双碳”背景下，碳交易政策的引入可以在煤基能源的清洁发展进程中发挥重要作用。在高碳价政策下，传统高碳能源的成本将会上升，低碳化煤基能源由于其低碳排放的特性将更具竞争力。同时，政府还可以针对煤炭清洁利用的不同产品给予税收优惠或者政策补贴以进一步促进煤基能源发展。因此，煤基能源行业在排放成本压力和减排政策激励的双重作用下，煤基能源的清洁利用水平将会进一步扩大。不同碳价水平下的煤基能源利用方式和传统利用方式对比如图 12 所示。2060 年，不同碳价水平下煤基能源利用碳减排潜力将达到 56%~61%。

不同碳价政策对煤基能源产业规模的影响结果显示，随着碳价的升高，2060 年煤基能源占煤炭消费的比例将达到 90%~97%。可见在外部碳价政策的驱动下，煤基清洁利用有望完全替代传统的煤炭

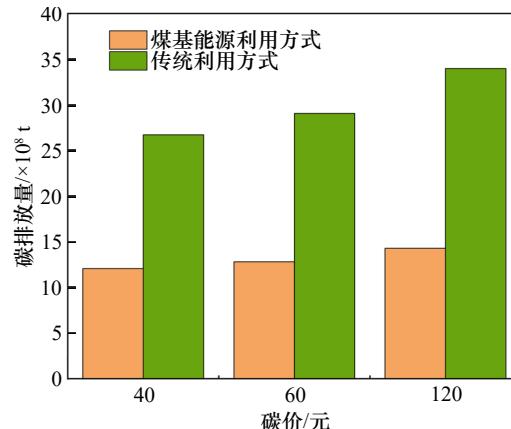


图 12 不同碳价水平下煤基能源碳排放对比

利用方式。煤层气等煤系气技术还未纳入碳交易市场中，未来在煤层气减排收益计入的情况下，碳交易政策有利于进一步推动煤基能源体系的建设。

五、结语与展望

结合煤基能源发展现状，本研究揭示了煤基能源动态碳中和体系的内涵，通过 SD 方法构建了煤基能源动态碳中和模式综合效益评估的 SD 模型，并基于该模型提出了四种情景进行模拟，科学地评估了煤基能源发展的碳减排效益和能源安全保障能力，给出了不同阶段分情景煤基能源发展规模，得出了如下结论。

煤基能源油气供给将为我国能源安全做出重要贡献。煤基能源油气供给可增加能源供应的多样性，提升能源安全保障能力。在极端气候保供情景和突发事件保供情景下，煤基石油在 2060 年将分别达到 $2.57 \times 10^8 \text{ tce}$ 和 $3.57 \times 10^8 \text{ tce}$ ，煤基石油供给将提高我国油气来源多样性，有力支撑石油安全。从近期来看，由于煤基油气技术发展相对缓慢，煤基油气战略储备不足以支撑突发情况下我国油气安全，发展煤基能源刻不容缓。

煤基能源体系中煤层气开发利用和煤炭地下气化可有效支撑我国未来天然气的供应以及碳中和目标的实现。在煤基能源利用情景下，煤层气产量在 2030 年和 2060 年可分别达到 $3.5 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 、 $8 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，2060 年煤炭地下气化产气规模预计达到 $2 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，可发挥巨大的减排潜力和安全保供潜力。

总体来看，煤基能源开发利用具有较大的降碳

潜力。上述四种情景中，煤基能源利用情景可作为最优发展情景，在该情景下，2060年煤基能源体系的直接和间接碳排放量为 9.2×10^8 t，相比传统利用方式，煤基能源碳减排潜力可达55%，结合地下气化腔封存二氧化碳技术，煤基能源碳减排潜力可达84%，考虑传统CCUS、矿区复垦碳汇、DACCs等技术，煤基能源开发利用有望建成动态碳中和模式，实现煤基能源技术革新。

综上所述，本研究给出以下措施建议：① 煤基石油作为战略技术可以显著提高石油来源多元化程度，建议政府在能源政策中鼓励煤基石油储备的战略价值，实现能源结构多元化。② 煤层气开发利用和煤炭地下气化需要制定稳健的发展目标、政策支持和严格的环境保护标准，确保开发过程中的环境影响最小化，实现非二氧化碳温室气体排放的降低。③ 在煤基能源开发利用过程中，应不断推动技术创新，提高能源利用效率，减少碳排放，鼓励企业投资研发清洁煤技术，实现能源的可持续发展。④ 富油煤开发、煤炭地下气化是两个近中期安全可行和稳妥可控的油气替代方案，远期来看，煤炭流态化开发是煤炭能源缩短循环周期和降低碳足迹的颠覆性技术。⑤ 煤基能源动态碳中和模式的建立是以煤基能源产业发展为基础，以煤基CCS技术、碳储科学与工程、二氧化碳资源化利用为支撑的体系革新，在煤炭能源向煤基能源的转型过程中，碳金融政策的支持必不可少。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: September 11, 2023; **Revised date:** October 15, 2023

Corresponding author: Wang Bing is a associate professor from the School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing. His major research field is energy systems engineering. E-mail: jie.qiao@263.net

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Scientific System and Strategic Path of Carbon Neutral Development in China’s Coal Industry” (2022-XBZD-09), “Research on China’s Energy Security Strategy” (2022-JB-05), “Strategic Research on Promoting the Construction of Energy Power” (2022-XBZD-10)

参考文献

- [1] 杨宇, 夏四友, 钱肖颖. 能源转型的地缘政治研究 [J]. 地理学报, 2022, 77(8): 2050–2066.
Yang Y, Xia S Y, Qian X Y. Geopolitics of the energy transition [J].

Acta Geographica Sinica, 2022, 77(8): 2050–2066.

- [2] Iakubovskii D, Krupenev D, Komendantova N, et al. A model for power shortage minimization in electric power systems given constraints on controlled sections [J]. Energy Reports, 2021, 7: 4577–4586.
- [3] 王江, 张翔. 可持续能源转型: 模型构建与分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(3): 74–82.
Wang J, Zhang X. Modelling sustainable energy transitions [J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(3): 74–82.
- [4] 顾永正. 煤基能源碳捕集利用与封存技术研究进展 [J]. 现代化工, 2023, 43(9): 38–41, 46.
Gu Y Z. Research progress on carbon dioxide capture, utilization and storage technology for coal-based energy industry [J]. Modern Chemical Industry, 2023, 43(9): 38–41, 46.
- [5] 张宁, 薛美美, 吴潇雨, 等. 国内外能源转型比较与启示 [J]. 中国电力, 2021, 54(2): 113–119, 155.
Zhang N, Xue M M, Wu X Y, et al. Comparison and enlightenment of energy transition between domestic and international [J]. Electric Power, 2021, 54(2): 113–119, 155.
- [6] 张涛, 姜大霖. 碳达峰碳中和目标下煤基能源产业转型发展 [J]. 煤炭经济研究, 2021, 41(10): 44–49.
Zhang T, Jiang D L. Transformation and development of coal based energy industry under the goal of carbon peaking and carbon neutrality [J]. Coal Economic and Research, 2021, 41(10): 44–49.
- [7] 张磊, 张俊杰, 王顺森, 等. 煤基分布式能源技术研究与经济性分析 [J]. 节能技术, 2021, 39(5): 403–406, 412.
Zhang L, Zhang J J, Wang S S, et al. Coal-based distributed energy technology research and economic analysis [J]. Energy Conservation Technology, 2021, 39(5): 403–406, 412.
- [8] Wang C, He B, Yan L, et al. Thermodynamic analysis of a low-pressure economizer based waste heat recovery system for a coal-fired power plant [J]. Energy, 2014, 65: 80–90.
- [9] 张宏. 推动“双碳”战略实施构建煤炭产业发展新格局 [J]. 中国煤炭, 2022, 48(2): 1–4.
Zhang H. Research on promoting the strategy implementation of carbon peak and carbon neutrality and building a new pattern of coal industry development [J]. China Coal, 2022, 48 (2): 1–4.
- [10] 谭杰. 煤炭矿区生态修复发展现状及问题探讨 [J]. 能源环境保护, 2018, 32(5): 45–47.
Tan J. Discussion on current situation and problems of ecological remediation in coal mining area [J]. Energy Environmental Protection, 2018, 32(5): 45–47.
- [11] 王其藩. 系统动力学 [M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2009.
Wang Q F. System dynamic [M]. Shanghai: Shanghai University of Finance & Economics Press, 2009.
- [12] 彭生江, 杨淑霞, 袁铁江. 面向风煤富集区域的风-氢-煤耦合系统演化发展系统动力学 [J]. 高电压技术, 2023, 49(8): 3478–3489.
Peng S J, Yang S X, Yuan T J. System dynamics of the evolutionary development of coupled wind-hydrogen-coal system for wind-coal enriched areas [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3478–3489.
- [13] 杜振东, 徐尔丰, 张笑弟, 等. 绿色电力证书市场下中国各类电源规模及发电成本演化发展 [J]. 中国电力, 2019, 52(7): 168–176.
Du Z D, Xu E F, Zhang X D, et al. Research on evolution and development of power generation scale and cost under tradable

- green certificates market in China [J]. Electric Power, 2019, 52(7): 168–176.
- [14] Yang Q, Zhang L, Zhang J, et al. System simulation and policy optimization of China's coal production capacity deviation in terms of the economy, environment, and energy security [J]. Resources Policy, 2021, 74: 102314.
- [15] 武强, 涂坤, 曾一凡, 等. 打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1625–1636.
Wu Q, Tu K, Zeng Y F, et al. Discussion on the main problems and countermeasures for building an upgrade version of main energy (coal) industry in China [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1625–1636.
- [16] Liu H, Liu S. Life cycle energy consumption and GHG emissions of hydrogen production from underground coal gasification in comparison with surface coal gasification [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(14): 9630–9643.
- [17] Li J, Cheng W. Comparative life cycle energy consumption, carbon emissions and economic costs of hydrogen production from coke oven gas and coal gasification [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(51): 27979–27993.
- [18] 陈馨. 典型制氢工艺生命周期碳排放对比研究 [J]. 当代石油石化, 2023, 31(1): 19–25.
Chen X. Comparative study on life-cycle carbon emissions of typical hydrogen production processes [J]. Petroleum Petrochemical Today, 2023, 31(1): 19–25.
- [19] 张源, 顾斌, 周长冰, 等. 煤炭地下气化过程产气特征数值模拟研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(6): 1169–1176.
Zhang Y, Gu B, Zhou C B, et al. Numerical simulation on gas production characteristics during underground coal gasification [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(6): 1169–1176.
- [20] 金玲, 郝成亮, 吴立新, 等. 中国煤化工行业二氧化碳排放达峰路径研究 [J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 368–376.
Jin L, Hao C L, Wu L X, et al. Pathway of carbon emissions peak of China's coal chemical industry [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 368–376.
- [21] 严晓辉, 杨芋, 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 X H, Yang Q, Gao D, et al. Development of clean and efficient coal transformation in China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 19–25.
- [22] 黄震, 谢晓敏, 张庭婷. “双碳”背景下我国中长期能源需求预测与转型路径研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 8–18.
Huang Z, Xie X M, Zhang T T. Medium- and long-term energy demand of China and energy transition pathway toward carbon neutrality [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 8–18.
- [23] 刘淑琴, 刘欢, 纪雨彤, 等. 深部煤炭地下气化制氢碳排放核算及碳减排潜力分析 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 531–541.
Liu S Q, Liu H, Ji Y T, et al. Carbon emission accounting and carbon reduction analysis for deep coal underground gasification to hydrogen [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 531–541.