

不同煤电退役路径下 CCUS 技术的综合效益评估

侯荟芸^{1,2}, 杨琳^{1,2}

(1. 内蒙古大学 经济管理学院, 内蒙古 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古能源与碳中和战略研究院, 内蒙古 呼和浩特 010021)

摘要: 碳捕集利用与封存 (CCUS) 技术对电力系统低碳转型至关重要, 但 CCUS 在不同煤电退役速率下的综合效益尚不明晰。使用全球变化评估模型 (GCAM) 计及煤电退役速率设定 3 种共享社会经济路径-代表性浓度路径 (SSPs-RCPs) 耦合情景: SSP1-2.6 (提前退煤情景)、SSP2-4.5 (逐步退煤情景)、SSP5-6.0 (缓慢退煤情景), 基于技术学习曲线模型动态量化 CCUS 技术应用在电力系统低碳转型中的不同成效。结果显示: 到 2060 年, 3 情景仍有 5.0 亿~6.5 亿 t 的碳排放, 因此需要提前部署空气捕集 (DAC) 负碳技术; SSP1-2.6 经济代价最高, 较 SSP2-4.5 和 SSP5-6.0 分别高 13.54% 和 6.31%; 总体来看, 到 2060 年 3 情景 CCUS 将缓解 21.79 亿~38.24 亿 t 水资源压力, 减少 6.85 亿~9.25 亿 t 的 CO₂, 填补 43.74 万~191.33 万因煤电退役而造成的就业缺口, 但也将会增加 6.39%~11.75% 的能源消耗。

关键词: 电力转型; CCUS; 水-能-碳-经济-社会; 煤电退役路径; 效益评估

中图分类号: X701; F426.61 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4772(2024)10-0148-12

Assessment of comprehensive benefits of CCUS technology under different coal power retirement paths

HOU Huiyun^{1,2}, YANG Lin^{1,2}

(1. School of Economics and Management, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2. Inner Mongolia Institute of Energy and Carbon Neutrality Strategy, Hohhot 010021, China)

Abstract: Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) technologies are crucial for the decarbonization of the power sector, yet the comprehensive benefits of CCUS under varying rates of coal power decommissioning remain unclear. This study employed the Global Change Assessment Model (GCAM) to integrate coal retirement rates within three Shared Socioeconomic Pathways - Representative Concentration Pathways (SSPs-RCPs) scenarios: SSP1-2.6 (accelerated coal phase-out), SSP2-4.5 (gradual coal phase-out), and SSP5-6.0 (slow coal phase-out). It dynamically quantified the varying impacts of CCUS technology on the power sector's transition to low carbon using a technology learning curve model. The results indicated that by 2060, all three scenarios would still emit (500-650) million tonnes of carbon, necessitating the early deployment of Direct Air Capture (DAC) carbon-negative technologies. Economically, SSP1-2.6 proved to be the most costly, being 13.54% and 6.31% higher than SSP2-4.5 and SSP5-6.0, respectively. Overall, by 2060, CCUS under these scenarios was projected to alleviate water resource pressures by (2.179-3.824) billion tonnes, reduce CO₂ emissions by (685-925) million tonnes, bridge employment gaps caused by coal retirement ranging from 43.74 thousand to 191.33 thousand jobs, but it also increased energy consumption by 6.39% to 11.75%.

Key words: power transition; CCUS; water-energy-carbon-economy-society; coal power retirement paths; benefit assessment

0 引言

《巴黎协定》设定将全球平均气温比前工业化水平上升幅度控制在 2 °C 以内, 并努力达到升温

1.5 °C 以内的目标^[1]。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 在《全球升温 1.5 °C 特别报告》中指出, 在全球升温 1.5 °C 目标下, 到 2030 年全球净人为 CO₂ 排放量从 2010 年的水平上减少约 45%, 到

收稿日期: 2024-04-28; 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CCUS24042802

基金项目: 国家自然科学基金地区资助项目 (72363024); 内蒙古自治区高等学校碳达峰碳中和研究专项资助项目 (STZX202223); 内蒙古自治区高等学校“青年科技英才”支持资助项目 (NJYT22102)

作者简介: 侯荟芸 (1999—), 女, 河南焦作人, 博士研究生。E-mail: hhyeah0829@126.com

通讯作者: 杨琳 (1988—), 女, 陕西渭南人, 特聘研究员, 博士生导师。E-mail: yanglin0413@hotmail.com

引用格式: 侯荟芸, 杨琳. 不同煤电退役路径下 CCUS 技术的综合效益评估 [J]. 洁净煤技术, 2024, 30(10): 148-159.

HOU Huiyun, YANG Lin. Assessment of comprehensive benefits of CCUS technology under different coal power retirement paths [J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(10): 148-159.



2050 年达到净零排放。2022 年全国能源相关的二氧化碳排放量已经超过 36.8 Gt, 较 1990 年高约 80%^[2], 其中, 中国排放量为 12.1 Gt, 占全球总排放量的 32.9%^[3], 国际能源署 (IEA) 在《中国能源体系碳中和路线图》中指出, 中国未来几十年的减排速度, 是世界能否成功将全球变暖控制在 1.5 °C 以内的重要因素^[4]。中国碳排放总量中 88% 由能源燃烧贡献, 其中电力行业排放约占 41%, 电力系统低碳转型与技术变革对于应对气候变化和确保未来能源供应至关重要^[5]。

全球已有众多国家设置了煤电退役时间表, 我国煤电机组约占全球的 50%^[6], 作为全球煤电机组最多的国家更应加快提出煤电机组退出速度和煤电减排措施。目前已有较多学者探讨如何在有限时间窗口期实现煤电低碳转型, 从而避免大量煤电机组提前退役而造成资产搁浅。张希良等^[7]在研究我国能源转型路径时提出 CCUS 技术和碳移除技术对经济尺度碳中和具有重大意义。李政等^[8]从成本可负担角度探究中国电力低碳转型的路径, 研究显示若想实现《巴黎协定》的气候目标, 必须在增加可再生能源电力的同时加快燃煤电厂退出和 CCUS 技术。陈语等^[9]从时空角度刻画了煤电 CCUS 的发展路径, 证明煤电耦合 CCUS 技术拥有技术经济可行性。袁家海等^[10]研究现实煤电和生物质发电加装碳捕获技术 (BECCS) 改造是中长期电力系统保留部分煤电机组和实现负排放经济可行性选项。魏宁等^[11]研究显示部分 CCUS 改造电厂相对于现有燃气发电与风能发电具有一定优势。众多研究者证实了 CCUS 技术对电力低碳转型具有重大意义, 但煤电是选择加速退役或是耦合 CCUS 技术实现低碳转型的发展路径尚未明确, 目前我国尚未出台相关战略规划^[12], 法律法规也尚未纳入 CCUS 相关内容^[13]。因此, 笔者将设置 3 种适合我国国情的煤电退役速率, 分别为提前退煤情景、逐步退煤情景和缓慢退煤情景, 并为各情景的火电设置相应比例的 CCUS 技术, 从时间维度探究不同煤电退役速率耦合 CCUS 技术对电力转型环境、经济、社会、能源的一系列影响, 为政策制定者设置 CCUS 发展路径提供参考。

国内外众多学者在探究电力系统低碳转型的模式中均考虑了 CCUS, 但主要聚焦于评估电力系统转型对单一可持续发展的影响, 例如: 资源利用^[14-15]、经济适用^[16]、环境排放^[17]、社会就业^[18]等, 而较少探究电力低碳转型中 CCUS 技术在多个可持续发展目标下的作用。LUDERER 等^[19]研究发现, 电力系统转型在环境方面具有重大的协同效益, 电力系统

转型将会使碳排放大大下降, 但也会加剧土地需求和矿产资源枯竭。袁家海等^[20]从省级煤电退出路径角度出发评估煤电机组退役对就业的影响, 研究结果显示若 2045 年实现零碳电力, 将有 16.76% 的煤电相关就业人员面临失业。煤电机组快速扩张将会增大区域水资源压力^[21], 但未来若煤电无新增并有一部分因碳约束而提前退役, 则会大大缓解水资源压力^[22]。从多维可持续发展角度探究电力系统转型中 CCUS 的贡献有助于分辨 CCUS 发展面临的困境, 从而可提前规避风险提升防范意识。

综上所述, 笔者研究基于 GCAM 模型设置 SSPs-RCPs 情景, 同时考虑了煤电退役速率对气候变化和社会经济发展的响应, 采用技术学习曲线模型动态评估不同煤电退役速率耦合 CCUS 的多维效益, 揭示了不同经济发展和气候变化情景下电力系统转型过程中 CCUS 技术对温室气体排放、经济成本、设备退役和新建以及技术进步升级对能源和水资源消耗的影响, 有助于了解各发电技术在电力转型中的发展路径, 以期可为可再生能源以及碳捕获技术的推广部署提供有价值的见解。

1 研究方法

1.1 情景设置

本研究基于 GCAM (Global Change Assessment Model, 全球变化评估模型) 模型, 计及煤电退役情景, 使用技术学习曲线方法和就业系数法评估不同情景下 CCUS 在能源消耗、经济效益、环境效益和社会效益方面的动态演化过程。运用 GCAM 考虑共享社会经济情景 (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs)^[23]、碳减排目标以及气候变化情景代表性浓度路径 (Representative Concentration Pathway, RCPs)^[24], 来确定碳中和路径下中国电力部门的综合发展情况。考虑到中国社会-经济-环境的众多指标来描述未来的发展路径, SSPs 中选择化石燃料发展 (SSP5)、中等发展 (SSP2) 和可持续发展 (SSP1) 的气候变化趋势, 将 SSP2 作为中间路径。RCPs 中选择 RCP6.0、RCP4.5 以及 RCP2.6。由于 RCP8.5 和 SSP1.9 路径具有较大风险, 中国实行此发展路径的可能性较小, 因此被排除在外。图 1 展示了 GCAM 模型的核心操作概念示意。

根据研究需要, 本研究使用 GCAM 模型结合电厂实际情况和相关政策规划对电力行业碳中和路径进行探索, 确定了 2025—2060 年的总电力需求以及各技术承担的年度电力需求。为考察电厂实际情况, 本研究使用全国电厂数据库模拟各种发电方式退役以及新增装机, 此数据库中包含已退役机组、

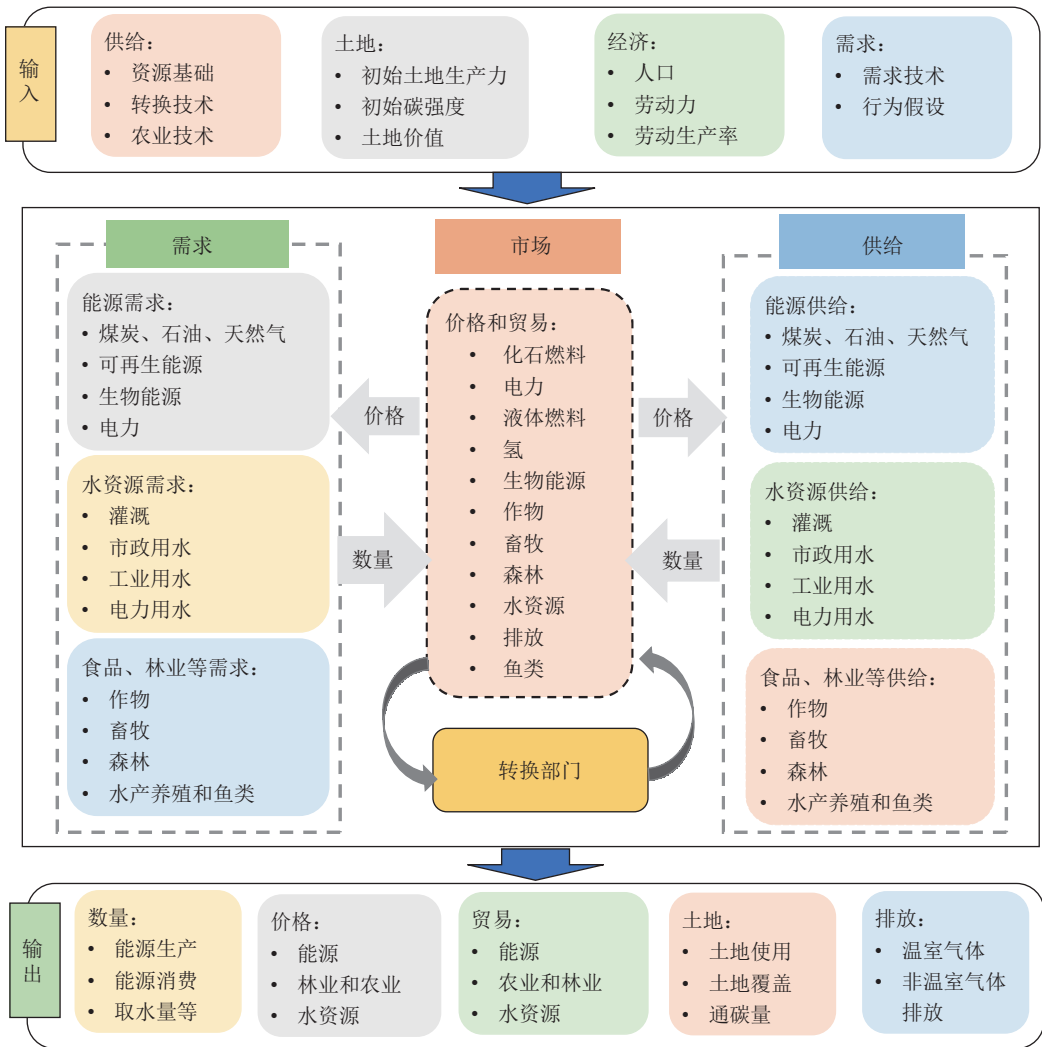


图1 GCAM模型核心操作概念示意

Fig. 1 Conceptual diagram of the gcam model's core operations

在运行机组、已宣告项目、预许可项目、许可项目、在建项目等, 准确评估 CCUS 对能源、经济、环境、社会等方面的贡献。具体来说, 在电厂退役后, 如果剩余总容量超过 GCAM 提供的发电技术发电容量, 将引入提前退役策略, 强制多余的电厂退役, 相反, 则新增电厂以补充剩余总容量。组合使用最符合中国未来发展情况的 SSP1+RCP2.6、SSP2+RCP4.5、SSP5+RCP6.0 三种情景, 可将 3 种情景按照煤电退役速度进行分类, SSP1+RCP2.6 情景为加速退煤、低 CCS 技术发展水平和高可再生能源发展水平情景, 因此, 又可称为提前退煤情景; SSP2+RCP4.5 情景按照煤电 40 a 平均运行寿命逐步退役^[25-26] 中间 CCS 技术发展水平以及中间可再生能源的, 因此, 又可称为逐步退煤情景; SSP5+RCP6.0 情景为高化石能源、高 CCS 发展水平和低可再生能源发展水平, 并且煤电在达峰之后仍有新增, 因此, 此情景又称缓慢退煤情景。本研究所选择的

径并不意味着涵盖所有可能的电力系统未来。

1.2 学习曲线模型

学习曲线模型表示随着重复的制造生产者技术的进步和经验的积累可以改进生产过程, 不断提高生产效率/生产效益的过程。考虑到成本逐步降低或生产效率逐步提高的技术学习曲线已得到验证, 多个研究者建立了相应的各种学习曲线模型^[27-29]。本研究利用技术学习曲线模型来预测电力行业各技术的能源消耗、水资源消耗量、碳排放以及成本的动态演化过程, 考察 CCUS 对电力转型过程中能源消耗、环境效益及成本的影响程度。本研究中各发电技术的技术学习率均来自于相关文献。

1.2.1 能源消耗计算

2022—2060 年总能源消耗量计算公式为

$$T_E = \sum_{k=1}^n \sum_{t=2022}^{2060} E_k(2022) \left(\frac{C_k(t)}{C_k(2022)} \right)^{-\beta_{E_k}} P_k(t) \quad (1)$$

式中, T_E 为所有发电技术 2022—2060 年的总能源消

耗量; $E_k(2022)$ 为 2022 年发电技术 k 的单位能源消耗量; 发电技术 k 包括煤电、气电、生物质电、核电、水电、抽水蓄能、风电、光伏、煤电 CCS、气电 CCS 以及 BECCS, k 为 1~11。本研究仅考虑煤电、气电、生物质电、煤电 CCS、气电 CCS 以及 BECCS 的能源消耗。另外, 为方便对比, 本研究统一使用消耗能源的能量代表消耗能量; $C_k(t)$ 和 $C_k(2022)$ 分别为第 t 年和 2022 年发电技术 k 的装机容量; β_{E_k} 为发电技术 k 的能源消耗学习速率指数, $0 < \beta < 1$; $P_k(t)$ 为第 t 年发电技术 k 的发电量。

1.2.2 碳排放量计算

2022—2060 年总碳排放量计算公式为

$$T_{CO_2} = \sum_{k=1}^{11} \sum_{t=2022}^{2060} F_{CO_2k}(2022) \left(\frac{C_k(t)}{C_k(2022)} \right)^{-\beta_{CO_2k}} P_k(t) \quad (2)$$

式中, T_{CO_2} 为 2020—2060 年所有发电技术的总碳排放量; $F_{CO_2k}(2022)$ 为 2022 年发电技术 k 的单位碳排放量; β_{CO_2k} 为发电技术 k 的碳排放的学习速率指数, $0 < \beta < 1$ 。

1.2.3 水资源消耗量计算

2022—2060 年总水资源消耗量计算公式为

$$T_W = \sum_{k=1}^{11} \sum_{t=2022}^{2060} W_k(2022) \left(\frac{C_k(t)}{C_k(2022)} \right)^{-\beta_{W_k}} P_k(t) \quad (3)$$

式中, T_W 为 2022—2060 年的总水资源消耗量; $W_k(2022)$ 为 2022 年发电技术 k 的单位水耗, 具体数值见表 1; β_{W_k} 为发电技术 k 水资源消耗的学习速率指数, $0 < \beta < 1$ 。

1.2.4 成本计算

各发电技术的成本包括碳成本、资本成本、运维成本和燃料成本, 2022—2060 年的总成本公式为

$$M_k(2022) = M_{CO_2k}(2022) + M_{C_k}(2022) + M_{OM_k}(2022) + M_{F_k}(2022) \quad (4)$$

$$T_{M_k} = \sum_{k=1}^{11} \sum_{t=2022}^{2060} M_k(2022) \left(\frac{C_k(t)}{C_k(2022)} \right)^{-\beta_{M_k}} P_k(t) \quad (5)$$

式中, $M_k(2022)$ 为 2022 年发电技术 k 的总度电成本; $M_{CO_2k}(2022)$ 、 $M_{C_k}(2022)$ 、 $M_{OM_k}(2022)$ 、 $M_{F_k}(2022)$ 分别为 2022 年发电技术 k 的碳成本、资本成本、运维成本和燃料成本; T_{M_k} 为总成本; β_{M_k} 为发电技术 k 成本的学习速率指数, $0 < \beta < 1$ 。

1.3 就业系数法

就业系数法常被用于估计与能源生产、存储和传输相关的就业岗位变化, 可以针对特定环境进行修改^[34]。本研究使用就业因素法评估碳中和目标下电力低碳转型过程中所造成的工作变化, 基于不同电力技术的价值链, 考察其在设备制造 (M)、建

表 1 各发电技术度电水耗

Table 1 Water consumption per kwh for various power generation technologies

发电技术	单位水耗 / (m ³ · (MWh) ⁻¹)
煤电	1.390
核电	1.700
气电	0.135
水电	13.000
抽水蓄能	0.975
生物质电	1.150
煤电+一代CCS	1.330
煤电+二代CCS	0.970
气电CCS	1.423
BECCS	1.900
CO ₂ 运输	0.031 8
CO ₂ 封存	-1.500

注: 数据来源: 文献[30-33]。

筑和安装 (C&I) 和运维阶段 (O&M) 中所提供的工作数量。设备制造阶段指的是发电设备的制造, 建筑和安装阶段指的是提供商品或服务建造发电厂, 这 2 个阶段均为电力系统阶段性的工作, 因此使用新增装机容量来计算工作数量。运维阶段是指发电厂在日常运行过程各个阶段所需运营和维护, 此阶段贯穿电厂的整个生命周期, 使用累计装机容量计算:

$$J_{M_k}(t) = \frac{F_k^M(2022)}{L_k} \left(\frac{C_k(t)}{C_k(2022)} \right)^{-\beta_{L_k}} \times (C_k(t) - C_k(2022)) \quad (6)$$

$$J_{CI_k}(t) = \frac{F_k^{CI}(2022)}{L_k} \left(\frac{C_k(t)}{C_k(2022)} \right)^{-\beta_{CI_k}} \times (C_k(t) - C_k(2022)) \quad (7)$$

$$J_{OM_k}(t) = F_k^{OM}(2022) \left(\frac{C_k(t)}{C_k(2022)} \right)^{-\beta_{OM_k}} C_k(t) \quad (8)$$

$$J = \sum_{k=1}^{11} \sum_{t=2022}^{2060} (J_{M_k}(t) + J_{CI_k}(t) + J_{OM_k}(t)) \quad (9)$$

式中, $J_{M_k}(t)$ 、 $J_{CI_k}(t)$ 和 $J_{OM_k}(t)$ 分别为第 t 年发电技术 k 在 M、C&I、O&M 阶段所提供的工作数量; J 为 2022—2060 年总就业人数; $F_k^M(2022)$ 、 $F_k^{CI}(2022)$ 、 $F_k^{OM}(2022)$ 分别为 2022 年发电技术 k 在 M、C&I、O&M 的就业系数, 具体数值见表 2; L_k 为发电技术

表2 各发电方式就业系数

Table 2 Employment coefficient of each power generation

发电技术	就业系数/(人·(a·MW) ⁻¹)		
	建筑和安装	设备制造	运维阶段
煤电	9.200	4.950	0.135
气电	1.400	5.015	0.160
生物质电	13.918	3.564	1.816
水电	8.925 6	5.447	2.756 7
抽水蓄能	14.800	7	0.400
风电	6.642	11.618	0.439
光伏	11.706	9.880	0.550
核电	13.367	1.333	0.370
储能	16.900	16.200	0.600
煤电CCS	17.265	17.265	0.445
气电CCS	13.447 5	13.447 5	0.470
BECCS	18.981	18.981	2.126

注：数据来源：文献[35-36]。

k 的寿命； β_{Lk} 、 β_{Ck} 、 β_{Om_k} 分别为发电技术 k 在M、C&I、O&M的学习速率指数， $0 < \beta < 1$ 。

2 结果分析

2.1 计及煤电退役速率的电力转型路径

当前，我国煤电机组普遍较年轻，中国现役煤电机组平均服役年限为11 a，其中服役时间小于15 a的煤电机组超过75%，大规模退役势必面临严峻的资本搁浅与能源安全风险。因此，安全合理的规划煤电退役路径至关重要，CCUS技术作为目前实现化石能源低碳化利用的唯一技术选择^[37]。本研究设置3种煤电退役路径，分别为提前退煤情景、逐步退煤情景和缓慢退煤情景，3条路径下的煤电装机容量变化如图2所示。提前退煤情景下，煤电装机容量将在2026年达到峰值，随后按煤电40 a预期寿命和搁浅成本最小推算，约有1 027.97 GW煤电提前退役，2060年仅保留1.6%。逐步退煤情景煤电装机在2031年达峰，随后按使用寿命自然退役，预计2047年之后煤电大规模退役，到2060年剩余煤电装机约为347.37 GW。缓慢退煤情景煤电装机约在2032年达峰，峰值约为1 326 GW，并且在达峰后仍需继续加装一定数量的煤电以满足需求，到2060年煤电装机仍保留508 GW，较煤电加速退役情景和煤电逐步退役情景高约46.4%、266.8%。

从全球范围来看，CCUS大规模发展，2020年

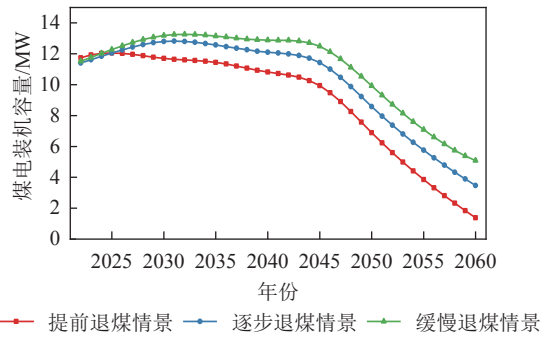


图2 2022—2060年3条路径下煤电装机

Fig. 2 Coal power installation capacity under three paths from 2022 to 2060

以来，碳捕集能力年均增长在60%左右。截至2023年7月，全球共有392个大型CCUS项目，其中我国有109个，加装CCUS的火电机组均为煤电，装机容量约为126 MW。本研究分别对不同路径下的火电机组（煤电、天然气、生物质电）均加装一定量的CCUS技术，2022—2060年3条路径下加装CCUS技术的火电装机容量变化趋势如图3所示^[38-42]。根据煤电退役速率和CCUS技术进展，2022—2030年间煤电CCUS技术改造将以第1代捕集技术为主，2030年后随着第2代捕集技术的成熟，将逐步推广第2代捕集技术。煤电CCUS技术约在2030年后规模增大，逐步退煤情景和提前退煤情景煤电CCUS改造需在2050年前完成，否则将面临煤电机组年龄较大，CCUS设备服务年限较低从而造成损失，而缓慢退煤情景在煤电装机达到峰值之后仍有新增煤电机组，所以仍可继续加装CCUS设备。2060年缓慢退煤情景煤电加装第1代CCUS装机容量达到11 249 MW，较提前退煤情景和逐步退煤情景高约13.80%和14.09%，加装第2代捕集技术的煤电装机容量将增加到137.75 GW，较提前退煤情景和逐步退煤情景分别高约149.21%和21.48%。由于目前气电自身成本较高，加装CCUS

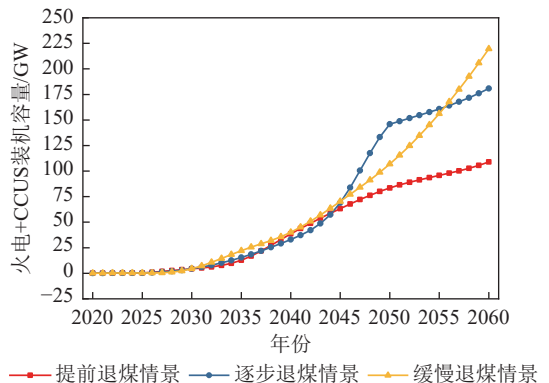


图3 3条路径下火电+CCUS装机容量

Fig. 3 Installed capacity of thermal power + CCUS under three paths

技术成本较大,预计在 2029 年之后开始应用,到 2060 年,3 情景有 (9.562~17.000) GW 气电加装 CCUS 设备,缓慢退煤情景气电+CCUS 装机预计较提前退煤情景和逐步退煤情景高 77.78% 和 23.08%。BECCS 集成了可再生资源利用、清洁能源生产、CO₂ 减排等多项应用的技术要点和优势,在创造和增加负碳排放方面有着巨大优势。

电力系统低碳转型需要以可再生能源发电技术为主的稳定能源支撑体系。本研究使用 GCAM 模型和实际电厂情况更准确的预测了 SSPs-RCPs 路径下人类活动对电力的需求。其中,3 情景下各类发电技术的装机容量和发电量演化趋势如图 4、5 所示,2060 年 3 条路径下各发电方式的装机和发电量见表 3、4。

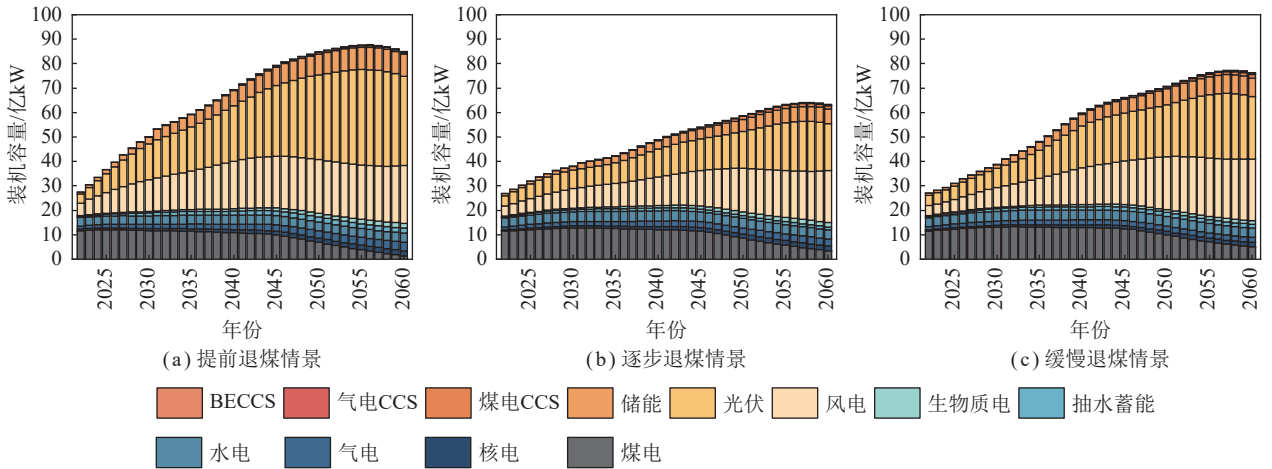


图 4 2022—2060 年 3 情景下装机结构

Fig. 4 Installed structure from 2022 to 2060 under the three scenarios

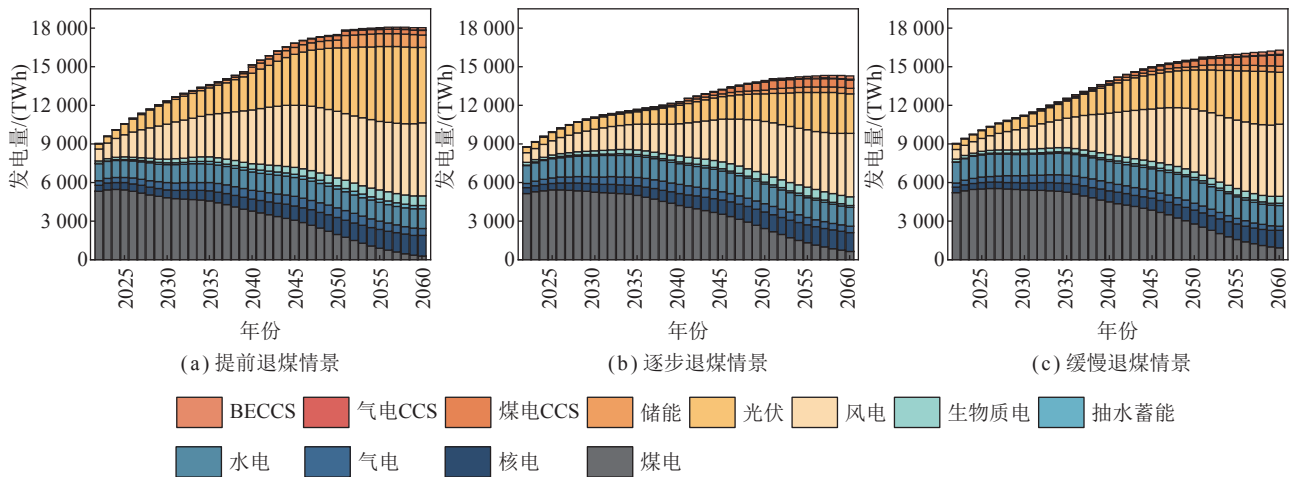


图 5 2022—2060 年 3 情景下发电量结构

Fig. 5 Power generation structure from 2022 to 2060 under three scenarios

2.2 电力转型终 CCUS 环境效益

3 条路径下均加装了一定量的 CCUS 设备,可以捕集 90% 的额外碳排放量。提前退煤情景、逐步退煤情景和缓慢退煤情景 3 条路径下的大风时间分别为 2026 年、2027 年和 2028 年,峰值约为 47.17 亿、46.17 亿和 47.09 亿 t。到 2060 年,3 条路径下的净 CO₂ 排放量约为 5.03 亿、5.40 亿和 6.56 亿 t,CCUS 技术减少了 6.85 亿、7.89 亿和 9.25 亿 t 的 CO₂。图 6 为 3 情景下的 CO₂ 排放路径,可以看出,前期煤电的排放量最大,随着煤电退役和加装

CCUS 设备,到 2060 年煤电的碳排放量约占总排放量的 17.98%。而到 2060 年光伏的碳排放量约占总碳排放量的 64.68%,为最大的碳排放来源。据测算,2060 年提前退煤情景、逐步退煤情景和缓慢退煤情景的火电机组排放分别约占总排放的 -11.7%、-11.17% 和 6.49%,其余排放为生产制造发电设备排放。2022—2060 年缓慢退煤情景的累计捕集量约为 112.91 亿 t,较提前退煤情景和缓慢退煤情景高约 3.00 亿和 16.42 亿 t。

电力和水资源是满足人类生存发展的重要资

表3 3条发展路径下2060年装机容量

Table 3 Installed capacity in 2060 under three development paths 亿kW

发电技术	提前退煤情景	逐步退煤情景	缓慢退煤情景
煤电	1.39	3.47	5.08
气电	3.45	2.88	2.09
生物质电	2.00	1.81	1.50
核电	2.05	1.95	1.80
水电	3.85	3.74	3.83
抽水蓄能	1.99	1.20	1.57
风电	23.52	21.25	25.17
光伏	36.53	19.17	25.43
煤电CCUS	0.68	1.23	1.49
气电CCUS	0.1	0.14	0.17
BECCS	0.31	0.44	0.54
储能	11.90	6.06	5.22

表4 3条发展路径下2060年发电量

Table 4 Power generation in 2060 under three development paths 万亿kWh

发电技术	提前退煤情景	逐步退煤情景	缓慢退煤情景
煤电	0.27	0.66	0.91
气电	0.57	0.48	0.35
生物质电	0.73	0.66	0.55
核电	1.61	1.46	1.35
水电	1.50	1.46	1.60
抽水蓄能	0.28	0.17	0.17
风电	5.70	4.94	5.60
光伏	5.83	3.06	4.06
煤电CCUS	0.35	0.65	0.88
气电CCUS	0.03	0.05	0.06
BECCS	0.17	0.25	0.31
总计	17.04	13.84	15.84

源，2者有着紧密的联系。电力行业作为我国最大的温室气体排放源和工业用水户，电力部门每年消耗大量的水来冷却电力，增加了我国的水资源压力，造成发电的脆弱性。CCS技术会增加成本的同时消耗大量的水资源，以燃煤电厂为例，预计增加90%的水消耗。图7为3情景下电力行业水资源消耗的变化趋势，可以看出，当前水电是耗水最大的发电技术，其次是煤电，后期随着CCUS技术的规模化发展和煤电的逐步退役，煤电不再消耗大量的水资源，到2060年，提前退役情景下煤电水耗仅占总水耗的1.78%，较逐步退役情景和缓慢退煤情景低约2.77%和4.03%。到后期，由于CO₂-EWR技术的应用，会大大缓解水资源压力。据本研究测算，若发电过程捕集到的CO₂100%的用于封存驱水(EWR)，到2060年，3情景去除由于水电由于

蒸发造成的水资源消耗量以及核电所使用的海水资源，仅考虑其他发电技术的耗水量，总水资源消耗量分别为-10.1367亿、-10.4970亿、-5.5849亿m³，共计可缓解19.5亿~30.8亿t水资源压力。

2.3 经济效益评估

图8为碳中和尺度下3种情景电力系统各年度各发电技术经济代价的动态变化趋势。可以看出，3条路径下总成本呈现上涨趋势，而大力发展可再生能源发电技术的提前退煤情景到2060年综合成本约58573.5亿元，综合减排成本要高于其他2个情景。2030年提前退煤情景、逐步退煤情景以及缓慢退煤情景电源侧总成本分别较2022年上涨38.88%、32.33%和36.87%，2060年分别较2022年上涨107.91%、89.64%和100.24%。总成本上涨的原因有：一是可再生能源波动性强，需要依靠其他可靠

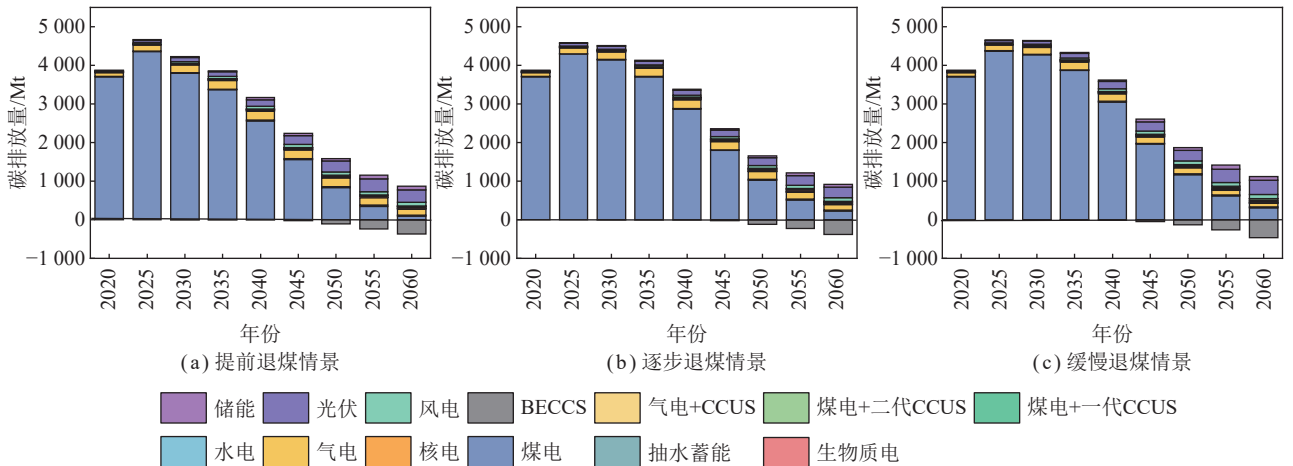


图6 2022—2060年3情景碳排放量

Fig. 6 Carbon emissions from 2022 to 2060 under three scenarios

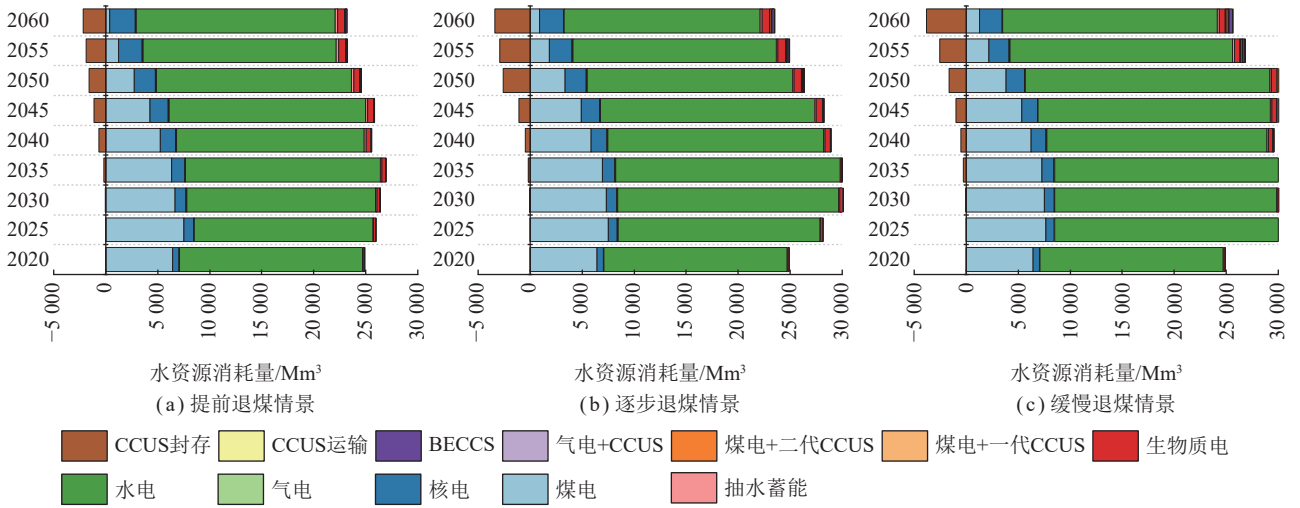


图 7 2022—2060 年 3 情景水资源消耗量

Fig. 7 Water consumption from 2022 to 2060 under three scenarios

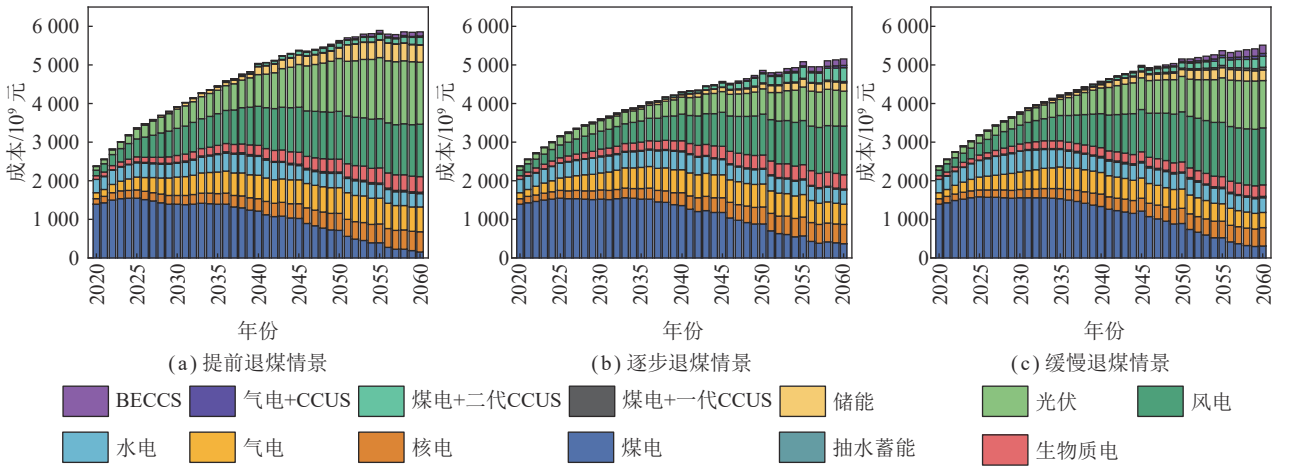


图 8 2022—2060 年 3 情景各发电技术经济代价

Fig. 8 Economic cost of each power generation technology from 2022 to 2060 under three scenarios

电源平滑出力波动,降低其他电源利用率,造成其他电源成本上升;二是可再生能源实际利用小时远低于煤电等传统电源,随着渗透率提高,电网利用效率也会随之下降,一定程度上推高电力供应成本。

分发电技术类型来看,煤电度电成本将逐步上升,是由于煤电功能转变,由发电主力转变为削峰填谷,利用小时数由 2022 年的 4 448 h 降至 2060 年的 1 500 h,度电固定成本将大幅提高。而提前退煤情景煤电度电成本在后期将高于其他 2 个情景,这是由于此情景煤电提前退役而造成的资产搁浅成本较逐步退役情景高约 67.32%。气电受燃料价格上涨、利用小时数下降影响,度电成本预计呈上升趋势,发电小时数将从 2025—2040 年的 3 000 h 以上下降至 2060 年的 1 600 h 左右,2060 年工业用气价格将较 2020 年上升 1.77 元/m³,2060 年,缓慢退煤情景的气电度电成本略高于其他 2 个情景,这是由于此情景受技术进步率的影响,装机增加越多,成本下

降越快,而此情景气电装机增量低于其他情景。生物质发电度电成本预计远期呈缓慢下降趋势,2060 年提前退煤情景、逐步退煤情景以及缓慢退煤情景生物质度电成本将较 2022 年分别下降了 14.20%、11.26% 和 12.23%,主要是由于随着生物质收储站建设完善和优化运输成本,形成良好的生物质发电供应链体系,将会从根本上降低生物质发电成本。受技术进步的影响,火电 CCUS 技术相关度电成本均呈下降趋势,主要原因在于火电 CCUS 捕集设备投资成本预计 2035 年下降至 2 500 元/kW 左右,2060 年进一步降至 1 500 元/kW,加装 CCUS 技术并不会显著提高电源侧成本,反而其捕集的 CO₂ 会带来一部分收益。

2.4 社会效益评估

电力行业低碳转型过程中不仅会改变能源-经济-环境的格局,也将会对就业产生深远影响。例如,我国大力推动发展可再生能源等会造成可再生

能源装机增加从而产生新的就业机会，而关停小型燃煤电厂、传统火电机组提前退役等措施也将会导致就业岗位流失。2022年各发电技术就业人数如图9所示，2060年3情景各发电技术的就业岗位占比如图10所示。根据我们模型的结果，随着智能管理技术的进步，就业强度将进一步下降，但发电装机仍在不断增加，到2060年，逐步退煤情景就业机会较2022年有所下降，约有4367220名工人，而提前退煤情景和缓慢退煤情景有所增加，分别增加了187789和1158943名工人。2060年缓慢退煤情景煤电CCUS就业人数约占总就业人数的22.3%，较提前退煤情景和缓慢退煤情景多，是由于此情景到2060年仍有一定数量的火电进行CCUS改造，而相同装机的煤电加装CCUS技术将会提供更多的就业岗位，例如，煤电CCUS(0.445人/(a·MW))的就业强度较煤电O&M阶段(0.135人/(a·MW))高，同时，加装CCUS技术的煤电机组平均产出将高于煤电，因为前者(5500h)的年平均发电小时数高于后者(1600h)，2022—2060年间CCUS共计可填补2708万因煤电退役而减少的就业岗位。

2.5 能源效益评估

电力系统低碳转型对能源高质量发展提出了更高的要求，能源应用将向着更高效、更清洁的方向发展。2022—2060年电力转型过程中3条路径下能源消耗变化趋势如图11所示。可以发现，随着技术的进步，低效率煤电机组的加速淘汰和煤电机组装机容量容量的减少，我国能源消耗量将会逐渐下降。CCUS技术将会增加一部分的能源消耗量，煤电+CCUS机组单位能源为12796.9 MJ/MWh，较单独煤电机组多消耗约30.36%的热值，气电+CCUS机组的单位能耗为7200 MJ/MWh，较气电机组高约19.98%，而生物质+CCUS技术的单位能耗为14400 MJ/MWh，较生物质发电机组高约20%。提

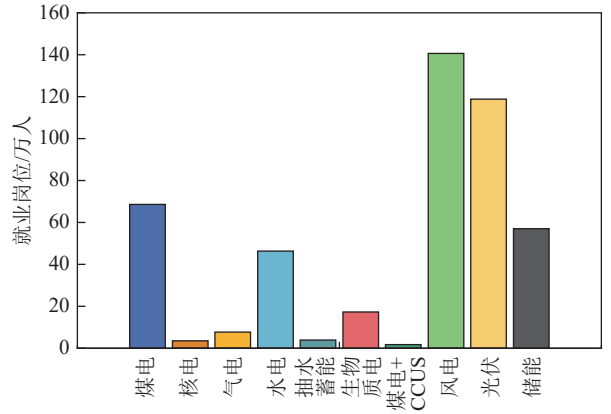


图9 2022年各发电技术就业岗位

Fig. 9 Employment positions in various power generation technologies in 2022

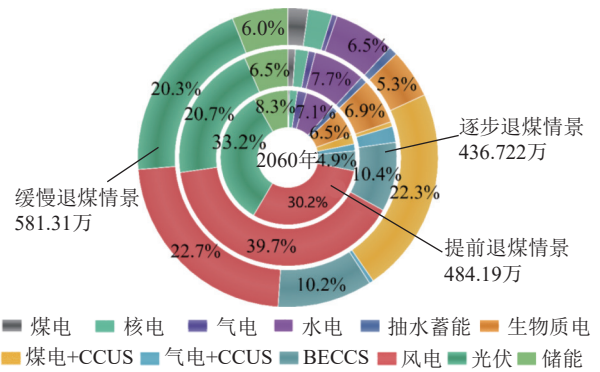


图10 2060年3条路径下各发电技术就业岗位占比

Fig. 10 Proportion of employment positions in various power generation technologies under three paths in 2060

前退煤情景、逐步退煤情景和缓慢退煤情景下能源消耗的达峰时间依次为2026年、2029年和2034年，达峰后能源消耗量逐渐下降。到2030年，3情景中煤电能源消耗量虽然在能源消耗总量中占比有所下降，但仍为最高。2060年，提前退煤情景所需的能源总热值约为1710.81 MJ，较逐步退煤情景和缓慢退煤情景低约44.98%和61.74%。提前退煤情景下

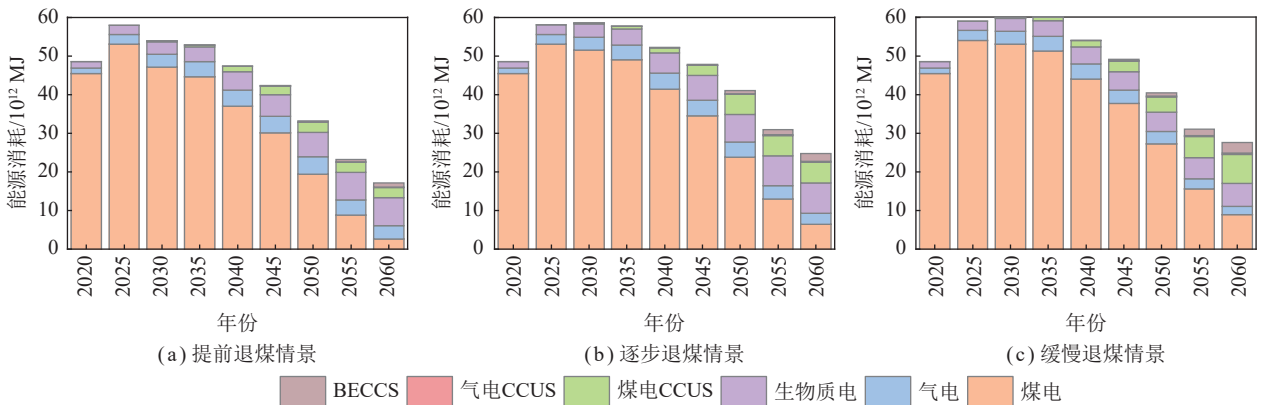


图11 2022—2060年各情景能源消耗量

Fig. 11 Energy consumption by scenario from 2022 to 2060

大力发展生物质可再生发电技术,生物质所需热值约为 729.94×10^{14} MJ,占比最高,而缓慢退煤情景中煤电仍占最高比例,约为 896.57×10^{15} MJ。总体来看,到 2060 年,提前退煤情景、逐步退煤情景和缓慢退煤情景 CCUS 技术将增加 6.39%、9.25% 和 11.75% 的能耗。

3 结 论

1) 电力行业作为我国能源供需双侧实现碳减排的中心环节,转型压力最大,而 CCUS 作为碳中和目标下保持电力系统灵活性的主要技术手段,碳中和目标下火电耦合 CCUS 技术将会发挥重要的兜底保障作用,科学评估 CCUS 在电力行业转型过程中的多维效益有利于为新能源与 CCUS 协同减排路径提供新的可能性。本文基于 GCAM 模型,计及煤电的退役速率预测 3 种 SSPs-RCPs 情景下电力系统的技术发展路径,并使用学习曲线模型和就业系数法结合历史数据对电力系统能源、经济、环境、社会多个维度进行模拟预测,解释 CCUS 技术在电力系统碳中和路径下的作用机理。

2) 本研究结果表明,CCUS 技术在保障电力安全供应的同时也将会实现电力部门的碳减排任务以及减少水资源压力、稳定社会就业岗位和减少经济代价等多重作用。我们发现,水资源消耗随着能源结构转型将会得到一定的缓解,大力推广 CCS 技术应用并不会加大水资源短缺的风险,反而到 2060 年 CCUS 技术将缓解 19.5 亿 ~ 30.8 亿 t 水资源。2060 年 CCUS 技术可减少 6.85 亿 ~ 9.25 亿 t 的 CO_2 ,但仍有 5.0 亿 ~ 6.5 亿 t 的碳排放,其中仅有 -11.7% ~ 11.2% 的碳排放为火电机组和火电加 CCUS 技术排放,多路径模拟证明若想电力系统在 2050 年前实现碳中和仍需要提前部署 DACCS 零碳技术。2022—2060 年能源使用量呈现倒“U”型发展趋势,CCUS 技术将会增加 6.39% ~ 11.75% 的化石能源消耗。另外,电力转型和社会经济增长将会带来总成本以及平均度电成本的增加,CCUS 并不会大幅增加成本,反而对比提前退役情景和缓慢退役情景发现,2060 年缓慢退役情景较提前退役情景经济代价少 7.33%。同时,CCUS 的大规模应用将会填补因煤电退役而造成的就业缺口,2022—2060 年间将会增加 2 708 万左右的就业岗位。

3) 为推动煤电有序退出并耦合 CCUS 技术助力碳中和、气候变化和实现美丽中国等重大战略目标的实现,本研究基于上述研究结论并结合当前我国 CCUS 发展面临的困境,提出以下政策建议:一是加强顶层设计,明确煤电退出速率和 CCUS 在我

国低碳转型发展中的战略位置。充分考虑与其他产业耦合发展的基础上,积极推动 CCUS 中“U”和“S”的技术研发和示范项目,抢占碳循环利用技术创新高地,有序推进火电加装 CCUS 技术和 DACCS 技术的应用规模,缓解环境污染。二是积极推动市场建设,探索将 CCUS 相应减排量纳入全国统一碳市场。通过完善电力交易市场和碳交易市场为 CCUS 发展提供政策激励,实行调峰补贴、发电小时数补贴等措施减少火电 CCUS 规模化发展的成本负担,保障投资者收益。三是统筹社会保障和就业政策,建立电力转型过程中社保和就业互相促进的良性机制,适时优化完善调整援企稳岗政策,制定国家绿色就业中长期规划,引导绿色就业发展。与此同时,也应为煤电职工提供相应的绿色技能培训,保障其顺利转型。

参考文献 (References):

- [1] 蔡斌,秦恺承,杨明煜,等.考虑煤电 CCUS 规模化发展的电力转型路径优化 [J/OL]. 洁净煤技术: 1-10 [2024-04-23]. <https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.CN23102801>.
CAI Bin, QIN Kaicheng, YANG Mingyu, et al. Optimization of the power transition pathway considering the large-scale development of coal power with CCUS[J/OL]. Clean Coal Technology: 1-10[2024-04-23]. <https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.CN23102801>.
- [2] IPCC. Global Warming of 1.5 °C[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2020.
- [3] IEA. World Energy Investment 2023[R]. Paris: International Energy Agency, 2023.
- [4] IEA. An energy sector roadmap to carbon neutrality in China[R]. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [5] CREUTZIG F, AGOSTON P, GOLDSCHMIDT J C, et al. The underestimated potential of solar energy to mitigate climate change[J]. *Nature Energy*, 2017, 2(9): 17140.
- [6] YANG F, JIA L C, ZHOU Y, et al. Life cycle assessment shows that retrofitting coal-fired power plants with fuel cells will substantially reduce greenhouse gas emissions[J]. *One Earth*, 2022, 5(4): 392-402.
- [7] 张希良,黄晓丹,张达,等.碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究 [J]. *管理世界*, 2022, 38(1): 35-66.
ZHANG Xiliang, HUANG Xiaodan, ZHANG Da, et al. Research on the pathway and policies for China's energy and economy transformation toward carbon neutrality[J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(1): 35-66.
- [8] 李政,陈思源,董文娟,等.现实可行且成本可负担的中国电力低碳转型路径 [J]. 洁净煤技术, 2021, 27(2): 1-7.
LI Zheng, CHEN Siyuan, DONG Wenjuan, et al. Feasible and affordable pathways to low-carbon power transition in China[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(2): 1-7.
- [9] 陈语,姜大霖,刘宇,等.煤电 CCUS 产业化发展路径与综合性

- 政策支撑体系[J]. *中国人口·资源与环境*, 2024, 34(1): 59–70.
- CHEN Yu, JIANG Dalin, LIU Yu, et al. Development path and comprehensive supporting policy system of coal power's CCUS industrialization[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2024, 34(1): 59–70.
- [10] 袁家海, 张凯. “碳中和”目标下, 新型电力系统中常规煤电退出路径研究[J]. *中国能源*, 2021, 43(6): 19–26, 66.
- YUAN Jiahai, ZHANG Kai. Coal power phase-out pathway in the new power system under carbon neutral target[J]. *Energy of China*, 2021, 43(6): 19–26, 66.
- [11] 魏宁, 姜大霖, 刘胜男, 等. 国家能源集团燃煤电厂 CCUS 改造的成本竞争力分析[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(4): 1258–1265, 1416.
- WEI Ning, JIANG Dalin, LIU Shengnan, et al. Cost competitiveness analysis of retrofitting CCUS to coal-fired power plants[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(4): 1258–1265, 1416.
- [12] 黄晶. 碳捕集利用与封存(CCUS)技术发展的几点研判[J]. *中国人口·资源与环境*, 2023, 33(1): 100.
- HUANG Jing. Some understanding of the research on the development of carbon capture, utilization, and storage(CCUS) technology[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2023, 33(1): 100.
- [13] 赵震宇, 姚舜, 杨朔鹏, 等. “双碳”目标下: 中国 CCUS 发展现状、存在问题及建议[J]. *环境科学*, 2023, 44(2): 1128–1138.
- ZHAO Zhenyu, YAO Shun, YANG Shuopeng, et al. Under goals of carbon peaking and carbon neutrality: Status, problems, and suggestions of CCUS in China[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(2): 1128–1138.
- [14] 张凯, 袁家海, 丁保迪, 等. 新型电力系统灵活性资源提升效益评估[J/OL]. *气候变化研究进展*: 1–14[2024–04–23]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5368.p.20240422.1232.002.html>.
- ZHANG Kai, YUAN Jiahai, DING Baodi, et al. Evaluation of flexibility enhancement benefits for the new power system[J/OL]. *Climate Change Research*: 1–14[2024–04–23]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5368.p.20240422.1232.002.html>.
- [15] FISHMAN T, GRAEDEL T E. Impact of the establishment of US offshore wind power on neodymium flows[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 332–338.
- [16] KEČEK D, MIKULIĆ D, LOVRINČEVIĆ Ž. Deployment of renewable energy: Economic effects on the Croatian economy[J]. *Energy Policy*, 2019, 126: 402–410.
- [17] WANG P, CHEN L Y, GE J P, et al. Incorporating critical material cycles into metal-energy nexus of China's 2050 renewable transition[J]. *Applied Energy*, 2019, 253: 113612.
- [18] BOHLMANN H R, HORRIDGE J M, INGLES-LOTZ R, et al. Regional employment and economic growth effects of South Africa's transition to low-carbon energy supply mix[J]. *Energy Policy*, 2019, 128: 830–837.
- [19] LUDERER G, PEHL M, ARVESEN A, et al. Environmental co-benefits and adverse side-effects of alternative power sector decarbonization strategies[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 5229.
- [20] 袁家海, 王媛, 杨晓文, 等. “双碳”目标下省级煤电退出的就业影响与脆弱性评估[J]. *中国人口·资源与环境*, 2023, 33(7): 67–80.
- YUAN Jiahai, WANG Yuan, YANG Xiaowen, et al. Employment impact and vulnerability assessment of China's provincial coal power phase-out under the 'dual carbon' goals[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2023, 33(7): 67–80.
- [21] 陈倩云, 安婷莉, 王玉宝, 等. 我国北方重点煤电基地发展伴生的水资源压力分析[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(7): 30–34.
- CHEN Qianyun, AN Tingli, WANG Yubao, et al. Analysis of water resources stress associated with the development of major coal bases in north of China[J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(7): 30–34.
- [22] 袁家海, 付珊. 《巴黎协定》下中国燃煤发电耗水压力的长期评估[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(9): 132–142.
- YUAN Jiahai, FU Shan. Long-term assessment of water consumption stress by coal-fired power in China under the Paris Agreement[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(9): 132–142.
- [23] RIAHI K, VAN VUUREN D P, KRIEGLER E, et al. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview[J]. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 153–168.
- [24] THOMSON A M, CALVIN K V, SMITH S J, et al. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100[J]. *Climatic Change*, 2011, 109: 77–94.
- [25] WANG Z H, LI H, ZHANG B, et al. Unequal residential heating burden caused by combined heat and power phase-out under climate goals[J]. *Nature Energy*, 2023, 8: 881–890.
- [26] DAVIS S J, SOCOLOW R H. Commitment accounting of CO₂ emissions[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(8): 084018.
- [27] KAHOULI-BRAHMI S. Technological learning in energy–environment–economy modelling: a survey[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(1): 138–162.
- [28] JAMASB T. Technical change theory and learning curves: patterns of progress in electricity generation technologies[J]. *The Energy Journal*, 2007, 28(3): 51–72.
- [29] LIN B Q, HE J X. Learning curves for harnessing biomass power: what could explain the reduction of its cost during the expansion of China?[J]. *Renewable Energy*, 2016, 99: 280–288.
- [30] YANG L, LV H D, WEI N, et al. Dynamic optimization of carbon capture technology deployment targeting carbon neutrality, cost efficiency and water stress: Evidence from China's electric power sector[J]. *Energy Economics*, 2023, 125: 106871.
- [31] ALI B, KUMAR A. Development of life cycle water footprints for gas-fired power generation technologies[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 110: 386–396.
- [32] YANG L, LV H D, JIANG D L, et al. Whether CCS technologies will exacerbate the water crisis in China? — a full life-cycle analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 134: 110374.
- [33] WU Z T, ZHAI H B. Consumptive life cycle water use of biomass-to-power plants with carbon capture and sequestration[J]. *Applied Energy*, 2021, 303: 117702.
- [34] RAM M, AGHAHOSSEINI A, BREYER C. Job creation during the

- global energy transition towards 100% renewable power system by 2050[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 151: 119682.
- [35] ZHANG X L, CUI X Q, LI B, et al. Immediate actions on coal phaseout enable a just low-carbon transition in China's power sector[J]. *Applied Energy*, 2022, 308: 118401.
- [36] WEI M, PATADIA S, KAMMEN D M. Putting renewables and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US?[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(2): 919-931.
- [37] 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.
- [38] 项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(11): 1-25.
Project synthesis report writing team. Comprehensive report on China's long-term low-carbon development strategy and transformation path[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(11): 1-25.
- [39] 舒印彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(5): 1663-1672.
SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(5): 1663-1672.
- [40] ZHUO Z Y, DU E S, ZHANG N, et al. Cost increase in the electricity supply to achieve carbon neutrality in China[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 3172.
- [41] 蔡博峰, 李琦, 张贤, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2021)——中国 CCUS 路径研究 [R]. 生态环境部环境规划院, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 中国 21 世纪议程管理中心, 2021.
- [42] 张贤, 杨晓亮, 鲁玺, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023) [R]. 中国 21 世纪议程管理中心, 全球碳捕集与封存研究院, 清华大学, 2023.