



气候变化研究进展
Climate Change Research
ISSN 1673-1719,CN 11-5368/P

《气候变化研究进展》网络首发论文

题目：“双碳”目标下中国低碳转型路径多模型比较研究
作者：张枢，陈文颖
收稿日期：2026-05-26
网络首发日期：2026-08-24
引用格式：张枢，陈文颖.“双碳”目标下中国低碳转型路径多模型比较研究[J/OL]. 气候变化研究进展. <https://link.cnki.net/urlid/11.5368.P.20260824.0923.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2026.133

“双碳”目标下中国低碳转型路径多模型比较研究

张 枢，陈文颖

清华大学能源环境经济研究所，北京 100084

摘 要：随着“双碳”战略向纵深推进，中国低碳转型已迈入多部门协同减排的关键时期。面对长周期、深度减排过程中技术进步、经济增长、社会演化的多重不确定性，单一模型的情景评估愈发难以规避模型底层逻辑的局限性及其参数假设的结构性偏差。鉴于此，系统开展多模型比较研究，通过交叉验证提炼跨模型的稳健共识，已成为客观识别转型规律、降低决策风险的关键途径。本研究综合比较了 2021 年以来发表的 22 个国内外能源与气候模型最新结果，系统研判了中国碳达峰碳中和转型的温室气体排放路径、能源系统演化趋势、能源资源安全风险以及转型过程中投资需求与经济成本。结果表明：中国温室气体排放有望在“十五五”早期达峰，2035 年国家自主贡献目标（NDC）温室气体排放下降 7%~10% 的目标能够顺利实现；一次能源消费（电热当量）与终端能源消费将于 2030 年前后达峰，至 2060 年非化石能源占比（发电煤耗）及终端电气化率将分别跃升至约 80%（第 10~第 90 百分位数范围为 77%~97%）和 62%（第 10~第 90 百分位数范围为 56%~77%）；低碳转型虽能减少油气对外依赖，但也带来电网灵活性与关键金属供应等新型安全挑战；碳达峰碳中和转型能源供应部门需 123 万亿~246 万亿元的投资。研究建议紧抓“十五五”碳达峰关键窗口期，加速前瞻性减排布局，构建多部门联动、多气体协同的深度脱碳范式，集中力量打通氢能、长时储能及碳捕集利用与封存等战略性前沿技术链条的堵点难点，驱动社会经济实现安全、经济、可持续的全面转型。

关键词：气候变化减缓；碳达峰碳中和；减排路径；多模型比较；能源转型；综合评估模型（IAM）

引 言

应对气候变化是当前人类社会面临的最严峻挑战之一，推动经济社会全面绿色低碳转型已成为全球各国长期可持续发展的共识。作为世界上最大的发展中国家和能源消费国，中国在全球气候治理中扮演着至关重要的角色。2020 年，中国宣布了“力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和”的宏伟愿景，并在 2021 年^[1]和 2025 年^[2]两次更新中国国家自主贡献（NDC）目标。碳达峰碳中和目标的提出，不仅彰显了中国积极应对全球气候变化的大国担当，也意味着中国必须在未来几十年内完成从高化石能源主导向清洁低碳能源主导的能源跨越。

实现碳达峰碳中和目标是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革，转型路径的选择将直接关系到国家安全、经济增长与长期可持续发展的全局。碳达峰与碳中和转型路径的设计是一个涉及能源、经济、环境与技术等多个领域的复杂工程，每一个环节均具有强不确定性^[3]。综合评估模型（IAM）、自下而上的能源技术模型以及自上而下的可计算一般均衡（CGE）模型被广泛应用于国家和全球层面的减排路径模拟中^[4]。然而，现有研究大多依赖单一模型进行情景分析。由于不同模型在理论基

收稿日期：2026-05-26；**修回日期：**2026-07-08

资助项目：国家科技重大专项（2024ZD1406606）；国家自然科学基金项目（72504162）；气候变化与碳中和国际合作联合行动（20253080082）

作者简介：张枢，男，助理研究员；陈文颖（通信作者），女，教授

基础、结构框架、参数设定以及底层机制假设上存在显著差异，单一模型的评估结果难以全面反映转型过程中的多维风险和不确定性^[5]。

为了克服单一模型的局限性并降低决策风险，开展多模型比较研究已成为国际气候变化经济学和能源政策研究的前沿趋势^[6]。通过将不同类型的模型置于统一的宏观社会经济假设与气候目标情景下进行横向对比，能够有效识别出具有多模型共识的稳健结论，还能深入剖析导致模型结果差异的内在驱动机制，为国家气候变化综合评估提供重要支撑。

立足全球气候治理新形势与我国“双碳”目标下低碳转型深化推进的关键阶段，开展多部门、分阶段、多维度的“双碳”目标下低碳转型路径模拟，科学研判不同发展情景下的减排潜力与转型路径具有重要意义。鉴于此，本研究聚焦中国“双碳”转型战略的路径选择需求，系统性开展中国“双碳”目标下低碳转型路径多模型比较研究。本研究构建了统一的情景收集标准和数据统计规范，纳入 22 个国内外模型团队的能源与气候模型，旨在重点探讨以下核心问题：（1）中国实现碳达峰与碳中和的中长期排放路径和各部门减排贡献；（2）能源系统转型的演化特征以及关键减排技术的部署规模与时序差异；（3）深度脱碳对中国社会经济发展、能源资源安全及减排成本的综合影响。本研究期望为厘清中国低碳转型的复杂逻辑提供坚实的科学依据，并为决策部门制定统筹经济增长与中长期气候治理的政策组合提供前瞻性参考。

1 模型与情景

1.1 模型

中国作为世界上最大的温室气体排放国和能源消费国，其能源转型和温室气体减排进程受到全球范围的关注。本研究涵盖了不同底层架构的模型，覆盖了国内外主流的模型研究团队，能够较好地反映近期学界、企业界、政界的最新研究成果，其中包括 GCAM 6.0、GCAM-China、GCAM-TU、MESSAGEix-China、REMIND-China 等 IPCC 代表性综合评估模型，也有 C³IAM、C-GEM、China DREAM、China EPS、China-MAPLE、China TIMES、CRESOM、ERI-LEAP/ERI-EDO/CETPA、IPAC、PECE_LIU 等国内外研究机构自主开发的能源与气候模型，此外，本研究还纳入了包括碳中和与清洁空气协同科学评估与决策支持平台（CNCAP）、中国石油、中国石化等机构对碳中和目标下的中国能源转型与碳减排路径的相关研究结果，具体模型名称、所属单位、主要模型特征如表 1 所示。

表 1 参与情景对比的模型

Table 1 Models participating in the comparison of scenarios

模型名称	所属单位	模型类型	土地利用	空间 分 辨 率	全温室气 体	系统灵活性
C ³ IAM ^[7-8]	北京理工大学	IAM 模型	考虑	中国	—	考虑
C-GEM ^[9-10]	清华大学	CGE 模型	—	中国	—	—
China DREAM ^[11]	美国加州大学伯克利分校	能源模拟模型	—	省级	—	考虑
China EPS 3.4.9 ^[12]	美国能源创新政策与技术公司	系统动力学模型	考虑	中国	考虑	考虑
China-MAPLE ^[13]	美国哈佛大学、清华大学	能源优化模型	—	中国	—	—
China TIMES ^[14-15]	清华大学	能源优化模型	考虑	中国	—	考虑
CNCAP ^[16]	清华大学	IAM 模型	考虑	省级	考虑	考虑

CRESOM ^[17]	清华大学	能源优化模型	—	电网	—	考虑
ERI-LEAP/ERI-EDO/CETPA ^[18]	中国宏观经济研究院	能源模拟模型	考虑	中国	—	考虑
GCAM ^[19]	清华大学、马里兰大学	IAM 模型	考虑	中国	—	考虑
GCAM 6.0 ^[20]	美国马里兰大学	IAM 模型	考虑	中国	考虑	考虑
GCAM-China ^[21]	清华大学、北京大学	IAM 模型	考虑	省级	考虑	考虑
GCAM-TU ^[22]	清华大学、中国人民大学	IAM 模型	考虑	中国	—	考虑
iGDP ^[12]	绿色创新发展研究院	系统动力学模型	考虑	中国	考虑	—
IPAC-AIM/technology ^[23]	中国宏观经济研究院	IAM 模型	考虑	中国	—	考虑
MESSAGEix-China ^[24-25]	奥地利国际应用系统分析研究所	IAM 模型	考虑	中国	考虑	考虑
PECE_LIU_2024 ^[26]	中国人民大学、哈尔滨工业大学	能源模拟模型	—	中国	—	—
REMIND-China ^[27]	德国波茨坦气候影响研究所	IAM 模型	考虑	中国	考虑	考虑
北京大学—刘宇 ^[28]	北京大学	CGE 模型	—	中国	—	—
清华大学气候院 ^[29]	清华大学	行业情景模型	考虑	中国	考虑	考虑
中石化 ^[30]	中国石化经济技术研究院	行业情景模型	—	中国	—	—
中石油 ^[31]	中国石油经济技术研究院	行业情景模型	—	中国	—	—

注：本文整理已发表文献和公开报告中的情景结果，部分模型并未完整披露能源系统灵活性、非 CO₂ 覆盖和土地利用的具体刻画方式，“—”表示原文献未明确披露或本文未采用该信息，不等同于模型本身不具备该能力。

1.2 情景协议和情景筛选准则

本研究整理了 2021 年以来主要能源与气候建模多模型比较计划、已公开发表的学术期刊论文、高影响力研究报告的主要研究成果，收集了各模型的碳中和情景进行结果比较。研究主要比较了温室气体排放、一次和终端能源消费、能源结构、发电量和发电装机，以及转型拉动的投资及其产生的成本等核心宏观变量。并非所有模型都报告了全部排放、能源、经济变量，但至少需要包含能源二氧化碳（CO₂）、化石燃料与工业过程 CO₂ 或温室气体排放中的一类数据才会被纳入研究。能源基金会组织的多模型比较计划的相关结果^[32-33]具有统一的情景协议和质量审查过程，其核心假设包括冻结当前气候政策至 2030 年以反映系统转型惯性、在 2030 年以前实现碳达峰、2060 年实现化石燃料和工业过程 CO₂ 排放净零等。为提高不同情景的可比性，作者对来自学术期刊和研究报告中的情景进行了可靠性筛选，在力求覆盖多样化情景的基础上，基于基年正确性、近期合理性和远期可行性设定了以下 3 项筛选原则：（1）2020 年排放数据较官方数据误差不超过 20%（参考 IPCC 情景审核标准）；（2）2025 年及以后实现 CO₂ 排放达峰（反映中国 2020—2025 年现实变化趋势）；（3）2060 年 CO₂ 排放不高于 18 亿 tCO₂（综合树龄、气候和碳肥效应的 2020—2060 年土地碳汇乐观估计值^[34]），从而保证减排情景符合近期排放变化规律，也最大限度覆盖了计入碳汇后能够实现碳中和的转型情景。

1.3 社会经济假设

表 2 汇总并比较了国内外主要模型团队和研究机构对中国未来经济增速和人口变动的预测或设定^[7, 9, 14, 17-18, 22, 29-30, 33, 35-37]。与 2035 年远景目标和 2050 年现代化目标相衔接，中国经济增长正从依赖投资和规模扩张驱动逐步转向创新和效率提升驱动的高质量发展新阶段：2030 年增速区间约

为 3.8%~4.8%，2035 年约 2.9%~4.4%，2050 年回落至 1.2%~3.2%，2060 年进一步下探至 0.6%~2.6%。产业结构总体将由“二产主导”转向“服务业与先进制造并重”，传统高耗能行业增加值占比与需求强度总体呈下降趋势。到 2035 年，第三产业比重提升至 61%~67%，第二产业调整至 28%~34%；到 2050 年后，第三产业占比将进一步扩大到约 70%，而第二产业则收缩至约 27%。

随着经济社会发展和人口年龄结构变化，中国人口增长已由增量扩张转向人口负增长阶段，并呈现老龄化、区域人口增减分化等结构性特征。中国人口在 2021 年达到峰值（约 14.13 亿），随后总量进入下降通道。根据联合国全球人口展望预测^[38]，2030 年中国人口约 14.0 亿、2040 年约 13.63 亿、2050 年约 12.97 亿、2060 年约 11.92 亿，降幅呈加速趋势。2024 年更新的第三版 SSP^[39]对中国 2050 年人口的估计均较高。2019—2025 年中国城镇化率由 62.7%升至 67.9%，年均提升不足 1 个百分点。多数机构假设中国城市化率将在 2030 年达到 70%，2060 年增至 84%左右。

表 2 中国 2030—2060 年主要社会经济假设

Table 2 Key socioeconomic assumptions for China from 2020 to 2060

指标	2030 年	2035 年	2040 年	2045 年	2050 年	2055 年	2060 年
国内生产 总值增速	4.45% (3.75%~4.83%)	3.70% (2.91%~4.39%)	3.30% (2.08%~4.00%)	2.76% (1.74%~3.60%)	2.35% (1.21%~3.20%)	1.72% (1.02%~2.84%)	1.42% (0.63%~2.58%)
第二产业 占比	32.8% (31.0%~36.1%)	30.6% (27.7%~33.9%)	28.4% (26.2%~32.2%)	27.3% (25.5%~30.6%)	26.5% (24.6%~29.4%)	26.5% (24.8%~28.3%)	25.0% (24.6%~27.0%)
第三产业 占比	61.9% (57.5%~63.0%)	66.0% (60.5%~66.8%)	68.5% (62.7%~68.9%)	69.9% (64.8%~70.2%)	70.4% (66.8%~71.7%)	71.0% (68.4%~71.3%)	71.0% (70.0%~72.6%)
总人口	14.00 (13.74~14.30)	13.87 (13.43~14.10)	13.63 (13.04~13.92)	13.33 (12.60~13.59)	12.97 (12.30~13.30)	12.42 (11.54~12.80)	11.92 (10.91~12.50)
城镇化率	69.8% (64.6%~71.0%)	72.8% (66.1%~73.8%)	75.6% (67.5%~76.6%)	77.8% (68.9%~79.0%)	80.0% (70.2%~81.2%)	81.6% (71.4%~83.2%)	83.7% (72.6%~84.9%)

注：数据为各模型假设的中位数，括号内数据范围为第 10~第 90 百分位数数值。

需要说明的是，本文纳入的 22 个情景并非基于事先定义情景设计和输入驱动因素的模型模拟，而是来自不同团队、模型架构和文献来源的碳中和情景结果。不同模型在目标函数、部门划分、技术刻画、社会经济假设和时空分辨率等方面存在差异，其结果具有“目标约束相近、结构假设不同”的特征。为提高比较结果的稳健性，本文对纳入情景进行了筛选，要求其符合中国碳达峰碳中和目标、且近期排放与现实偏差较小，同时对核心指标进行了统一口径处理。本文报告的中位数和第 10~第 90 百分位数（P10~P90）范围主要用于反映多模型结果的集中趋势和离散程度，不代表统计意义上的置信区间。

2 “双碳”目标下中国低碳转型路径

2.1 温室气体减排路径

多模型模拟结果显示，能源 CO₂、化石燃料和工业过程 CO₂、《京都议定书》规定温室气体排放在“十五五”早期达峰（图 1），达峰时间与峰值水平主要受经济发展预期、能源服务需求增长与短期减排措施影响。各模型的排放峰值水平有所不同，进而影响累计排放量、长期减排压力、气候投融资水平以及化石燃料基础设施退役。

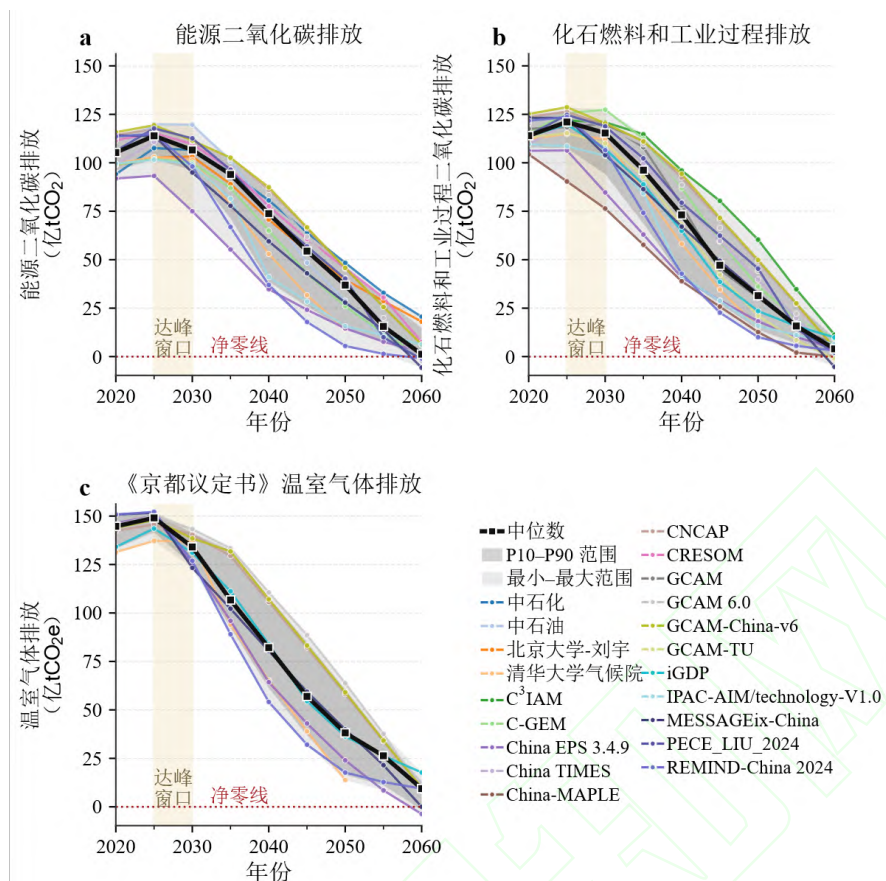


图 1 2020—2060 年中国能源 CO₂(a)、化石燃料和工业过程 CO₂(b)、温室气体(c)排放路径

Fig. 1 China's emission pathways of energy CO₂ (a), fossil fuel and industrial process CO₂ (b), and greenhouse gases (c) from 2020 to 2060

2025—2035 年是我国碳排放实现达峰并开始绝对减排的转折期，社会经济发展、地缘政治冲击、低碳技术突破等多重因素交织，导致该时期路径不确定性较大。多模型结果显示到 2035 年能源 CO₂、化石燃料和工业过程 CO₂、温室气体排放分别较 2030 年下降 14.4% (7.5%~24.5%)、16.2% (7.5%~24.8%)、16.1% (6.3%~30.3%)，大概率能够完成 2035 年 NDC 目标，并有更大幅度减排可能。情景间差异主要源于电力系统脱碳速度、终端电气化率、工业过程减排、非 CO₂ 温室气体治理力度。

2035 年后碳减排速度需明显加大，2035—2060 年碳排放年均降幅需达到 5%~7%，到 2050 年碳排放水平约降至 2020 年的 30%~40%。尽管不同模型模拟得到的转型路径和减排节奏有所不同，但为实现碳中和，多数模型结果均要求在能源供应侧实现高比例可再生能源接入和大规模配置电网灵活性资源，在需求侧实现低碳燃料、电制化工产品、氢冶金、低碳材料、碳捕集利用与封存 (CCUS) 等技术规模应用。

2060 年，多数模型路径显示中国能实现能源 CO₂ 中和，能源 CO₂ 剩余排放为 0.0 亿 tCO₂ (-5.7 亿 tCO₂~7.5 亿 tCO₂)，化石燃料和工业过程 CO₂ 剩余排放为 4.0 亿 tCO₂ (-0.7 亿 tCO₂~9.7 亿 tCO₂)、温室气体剩余排放为 9.4 亿 tCO₂e (-1.5 亿 tCO₂e~13.0 亿 tCO₂e)。剩余排放集中在难减排工业（如水泥熟料、化工等）以及土地利用部门。为确保 2060 年碳中和的实现，能源供应与终

端部门均需要实现深度脱碳，并需要大力开发生物质能集成 CCS（BECCS）和直接空气捕集集成 CCS（DACCS）等负排放技术以及植树造林、森林管理等基于自然的负碳解决方案，抵消难以完全消除的剩余排放。

对比中国减缓目标与全球碳预算公平分担结果发现，中国减缓行动符合全球 1.5°C/2°C 温控目标^[40]。从 2050 年排放水平与净零排放时间的角度，中国的碳达峰碳中和目标符合全球 1.5°C 温控目标。2020—2060 年中国累计排放为 2700 亿~3400 亿 t CO₂，符合全球 2°C 温控目标，但距离 1.5°C 目标仍需进一步减少约 6%。若近期减排力度不足，累计排放可能偏离与全球 1.5°C 目标相容的轨道。

对于 CO₂ 排放而言，能源供应、工业、交通、建筑等部门在不同阶段具有不同贡献（图 2）。图 3 展示了 2020—2035 年、2035—2050 年和 2050—2060 年各部门直接能源 CO₂ 排放较该阶段起始年份的下降量。电力和热力排放归属于能源供应部门，不作为间接排放分摊至终端部门，以避免重复计算。2025—2035 年，电力和工业部门由于排放集中且受强制碳市场约束，将成为减排的主力。由于可再生能源发电快速部署并逐步替代火电电量，电力部门贡献约 10 亿 t CO₂ 的减排量。工业部门通过推行严格的能效标准、淘汰落后产能以及技术升级，预期贡献约 9 亿 t CO₂ 的减排量。相比之下，交通和建筑部门在该阶段的贡献相对有限。交通减排主要依赖新能源汽车渗透，而建筑减排涉及建筑的围护结构改造和节能产品推广。2035—2050 年，减排的紧迫性进一步加强。电力部门减排量预计达到约 28 亿 t CO₂。这一阶段风能、太阳能等可再生能源将从补充能源转变为主体电源。工业部门贡献约 17 亿 t CO₂ 减排量，其减排策略从能效提升逐步转向燃料和原料低碳替代以及末端碳捕集措施，例如在钢铁、水泥、化工等难减排行业推广应用氢能和 CCUS 技术。2050—2060 年，随着低成本减排的技术选项逐步耗尽，各部门进一步减排的边际成本急剧上升。在该阶段，能源供应和工业部门凭借其在负排放方面的潜力，依然是最终实现净零目标的关键支撑，交通和建筑部门则需要在此阶段完成深度电气化和氢能化转型，实现近零排放。对于土地利用部门，2020—2060 年间，年平均负排放潜力为 6.7 亿 t CO₂~16.5 亿 t CO₂，森林生态系统碳汇占碳汇潜力的 48.6%~49.2%，碳汇成为应对气候变化的核心解决方案之一。

报告全温室气体或非 CO₂ 温室气体减排路径的模型和研究显示，中国非 CO₂ 温室气体排放约占全国温室气体总量的 20%，主要来源涵盖能源、农业、工业过程以及废弃物处理等领域。煤炭开采、稻田种植和畜牧养殖是甲烷排放核心来源，氧化亚氮主要集中于农业生产和特定化工行业，而含氟气体则来自制冷、化工和电力设备。近期随着政策推动，甲烷排放有望逐步下降，2035 年较 2020 年下降 25%~40%，到 2060 年可降至 2020 年的 41%~61%。氧化亚氮减排的长期潜力较大，但受技术瓶颈影响短期减排量有限，2030 年氧化亚氮最大减排潜力可达 46%，2050 年提升至 63%。含氟气体得益于配额管理、替代技术和回收利用等强制措施，预计能在达峰后持续下降。由于不同模型公开结果的细化程度不同，部分文献未完整披露分气体、分部门和分技术的治理措施，本文暂无法对具体非 CO₂ 温室气体治理技术贡献进行归因。

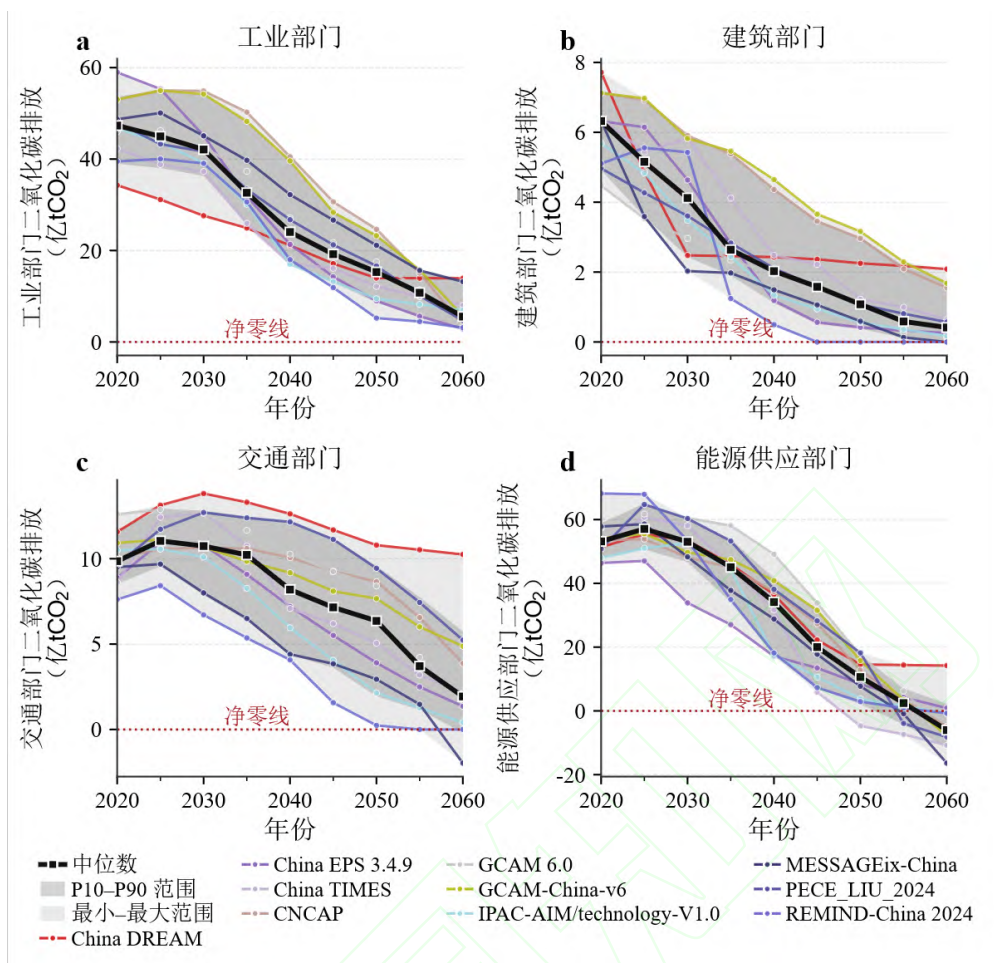


图 2 2020—2060 年中国工业（含工业过程）(a)、建筑(b)、交通(c)、能源供应（含电力、热力、炼油、制氢和其他燃料加工领域）(d)部门 CO₂ 路径

Fig. 2 China's CO₂ pathways for industry (including industrial processes) (a), buildings (b), transportation (c), and energy supply (including electricity, heat, oil refinery, hydrogen production, and other fuel processing industries) (d) sectors from 2020 to 2060

CCUS 是中国碳中和转型中实现难减排部门深度脱碳和贡献负排放的关键技术。多模型结果显示，在碳中和情景下，中国 CCUS 规模需要快速扩张，2035 年 CO₂ 捕集量约 4.5 亿 t CO₂（1.6 亿 t CO₂~11.8 亿 t CO₂）；2050 年升至 16.0 亿 t CO₂（4.6 亿 t CO₂~25.0 亿 t CO₂）；2060 年进一步达到 17.7 亿 t CO₂（8.6 亿 t CO₂~27.9 亿 t CO₂）。从应用结构看，CCUS 并非集中于某一部门，而是广泛应用于电力、工业和制氢等多个领域。水泥、钢铁、化工等行业有望较早部署 CCUS，2060 年工业部门 CO₂ 捕集量约占总捕集量的 19%。电力部门 CCUS 部署规模在所有部门中最大，2060 年捕集量可达 9 亿 t CO₂，前期多为煤电 CCUS 技术，2050 年后 BECCS 技术占主导。制氢相关 CO₂ 捕集量在 2035 年后增长较快，尤其是与生物质制氢结合形成负排放氢能在多个模型中是负排放的重要部分。负排放是 CCUS 技术潜在价值的重要体现，BECCS 是最主要的工程负排放来源，2060 年 BECCS 负排放中位数约为 9.4 亿 t CO₂（5.7 亿 t CO₂~10.9 亿 t CO₂）。DACCS 在少数模型中被大规模采用（高达 4.2 亿 t CO₂），但其应用高度依赖低成本可再生能源，更适合作为实现深度脱碳的远期兜底选项。此外，除了进行碳封存，部分模型将碳利用视为更具产业前景的方案，尤其是在合成燃料、化工原料和碳循环利用场景中。中国 CCUS 技术发展正由重视碳封存逐步转向碳封存与碳

利用并重，在支撑净零排放的同时促进低碳燃料和绿色化工产业发展。

贯穿整个碳达峰碳中和路径研究的核心议题之一是减排路径的内在不确定性。例如，在 2035—2050 年间，电力部门减排贡献的不确定区间最宽（图 3），反映出各模型对于光伏和风电成本下降、储能规模部署、核能角色以及电网承载能力等关键变量的判断存在显著差异。同样，“其他”项的不确定性较大，表明对土地利用、制氢、DACCS 等领域的减排潜力预测以及负排放技术规模化前景的认知仍存在分歧。

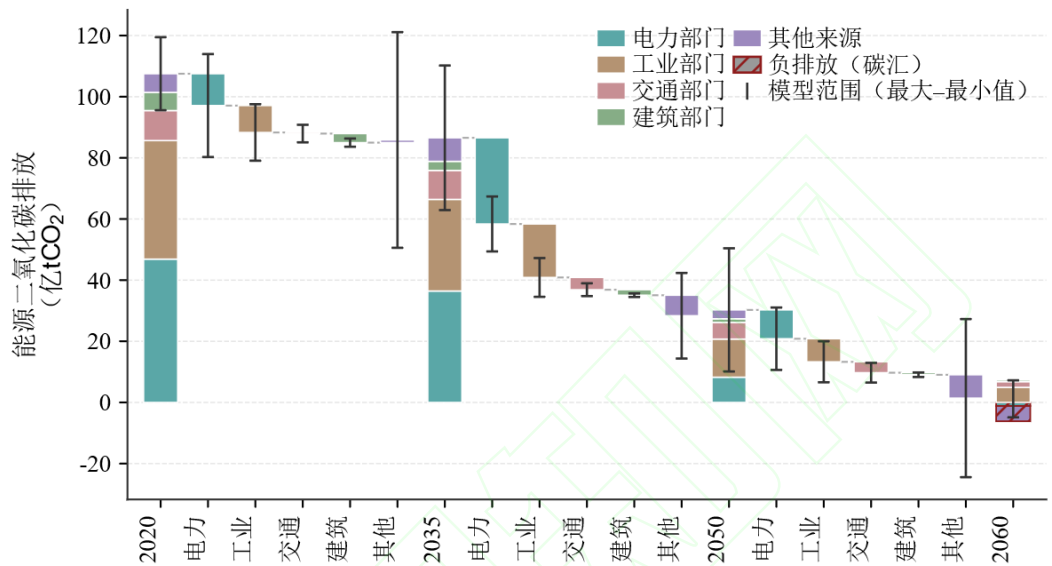


图 3 不同时期各部门减排贡献

Fig. 3 Emission reduction contributions of different sectors in different periods

2.2 能源供需格局

2020—2030 年，一次能源消费（按电热当量统计）总体仍处于上行区间，经济发展对能源需求的拉动效应仍大于同期能效改善带来的抑制效应，且结构转型尚不足以在规模上抵消需求增长。2030 年，一次能源消费中位数上升至约 56 亿 tce，P10~P90 范围为 47.9 亿~63.8 亿 tce。一次能源消费有望在 2030 年前后接近或达到峰值。到 2035 年，一次能源消费中位数较峰值下降约 0.6 亿 tce，非化石能源占比（按发电煤耗统计）提升至 35%（P10~P90 范围为 31%~47%），能够完成 2035 年 NDC 中非化石能源比重的相关指标。到 2050 年，一次能源总量较峰值下降超过 10 亿 tce，同期非化石能源比重中位数约 65%。多数模型显示，一次能源消费达峰后总体呈现持续下降趋势，2060 年一次能源降低至约 42 亿 tce，非化石能源比重约 80%。少数模型一次能源消费路径在 2050 年后出现反弹，主要在于燃料替代带来的能效提升不足以抵消终端部门需求带来的能耗上涨，叠加 CCUS、生物质、氢能、DACCS 等技术的使用导致总体能源效率下降，从而使得能源消费量有所回升（图 4）。随着风电、光伏等可再生能源电力快速增长，若采用发电煤耗法，非化石能源折算量会显著提高，从而可能推高一次能源消费总量，并使非化石能源占比高于电热当量法结果。

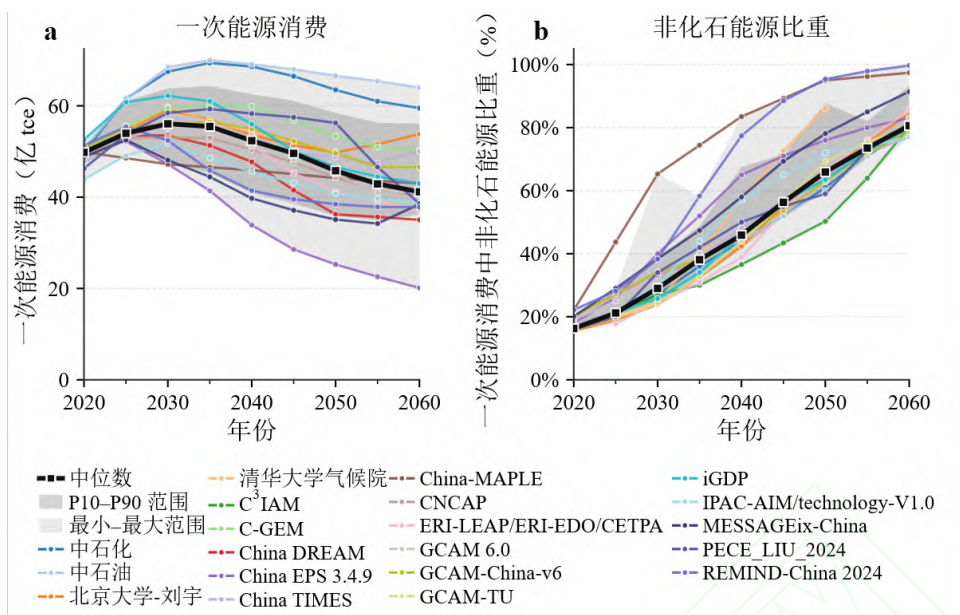


图 4 2020—2060 年中国一次能源消费（电热当量）(a)和非化石能源占比（发电煤耗）(b)

Fig. 4 China's primary energy consumption (electric heat equivalent) (a), and non-fossil energy share (coal equivalent) (b) from 2020 to 2060

终端能源消费的演化轨迹及结构转型是评估碳达峰碳中和目标可实现性的重要维度之一。综合多模型模拟结果（图 5），终端能源消费总量呈现先增后降的典型达峰特征：峰值预计出现在 2030 年前后，峰值中位数约 38 亿 tce，P10~P90 范围为 35.7 亿~42.6 亿 tce；到 2035 年终端能源消费降至约 37 亿 tce，2050 年约 34 亿 tce，2060 年约为 31 亿 tce，较 2030 年峰值下降约 19%。在 2030 年前的上升阶段，经济增长以及工业化、城镇化推进是终端用能需求上行的主要动力，随后的终端能源消费下降主要由节能增效与燃料替代两大核心因素协同强化所驱动。

多模型结果显示，到 2030 年，中国电气化率的中位数提升至 30%~38%。这表明在终端能源消费达峰的平台期，电能替代成为结构优化的重要驱动。至 2050 年，电气化率达到 47%~61%，到 2060 年进一步升至 56%~77%。电气化率持续提升将显著替代工业锅炉、居民采暖、公路交通中的化石燃料使用，从源头上减少终端碳排放；由于电能的转换与利用效率通常高于化石燃料直接燃烧，电气化还同时带来节能效应，有助于降低终端能源消费总量；随着电力系统清洁化水平不断提高，终端电气化的减碳效益将被进一步放大。与电气化并行推进的，是氢能作为新兴二次能源载体在终端部门的应用。模型结果显示，氢能在终端侧将经历从无到有、逐步加速的渗透过程。到 2030 年，氢能在终端能源消费中的占比中位数仅为 0.3%，2035 年后，氢能发展开始提速，占比中位数达到 1.1%，并在 2050 年和 2060 年分别达到 5.0%和 7.7%。

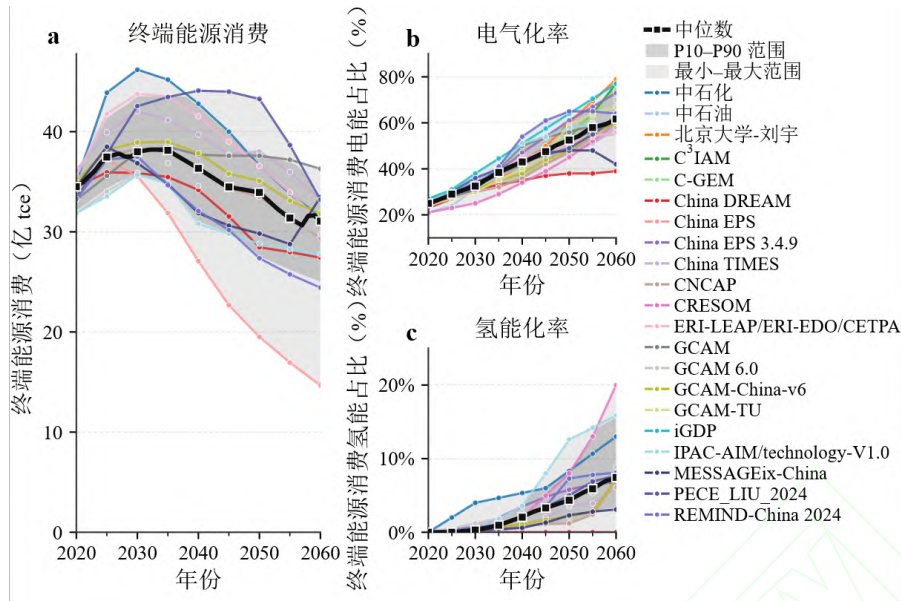
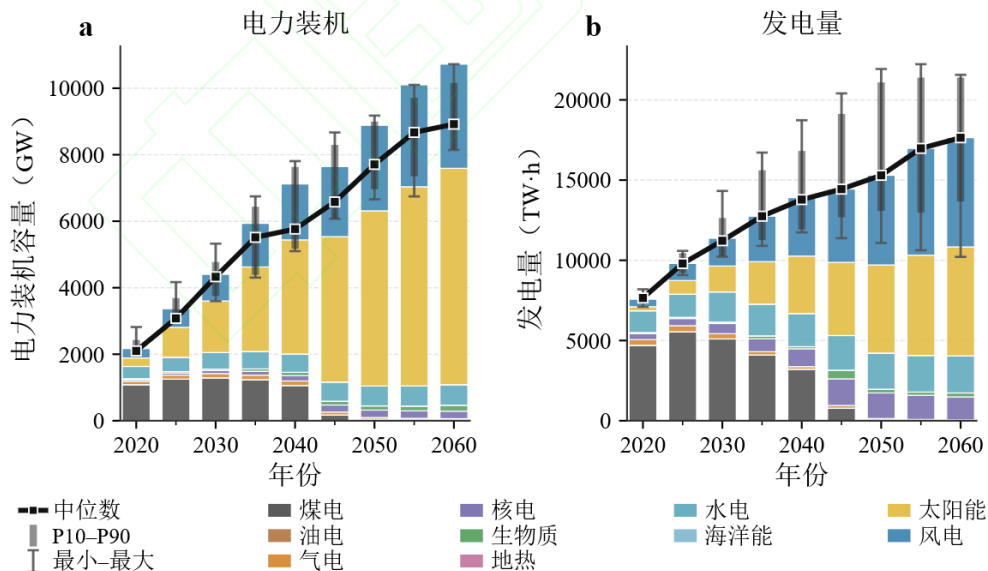


图 5 2020—2060 年中国终端能源消费(a)、电气化率(b)和氢能化率(c)

Fig. 5 China's final energy consumption (a), electricity (b), and hydrogen (c) energy share from 2020 to 2060

2.3 电力供应格局

电力部门的低碳转型是中国实现碳中和目标的关键（图 6）。2025 年，全国电力总装机约 3891 GW，其中火电 1539 GW，核电 62.5 GW，水电 448 GW，风电 640 GW，光伏 1202 GW，非化石能源发电装机占比超过 60%。随着碳中和进程推进，可再生能源发电技术持续发展，风电和光伏装机容量快速上升，到 2060 年，碳中和情景下电力总装机 8177~10724 GW。可再生能源占比 75%~90%。



注：总电力装机和总发电量范围源自多模型比较结果，电力装机结构和发电结构选自 China TIMES 模型结果

图 6 2020—2060 年中国电力装机(a)和发电量(b)路径

Fig. 6 China's power capacity (a) and power generation (b) from 2020 to 2060. (Data ranges for total power capacity and total power generation are derived from multi-model intercomparison result, power capacity mix and power generation mix are sourced from the China TIMES model)

2025 年, 中国发电量约 10575 TW·h, 其中火电、水电、风电和太阳能发电量分别为 6327 TW·h、1462 TW·h、1128 TW·h 和 1173 TW·h。“十五五”期间, 增量电力需求绝大部分被可再生能源满足, 煤电在发电量中的占比将低于 50%, 随后煤电发电量相继被风能、太阳能、水能超越, 直至退出主体发电机组序列。碳中和转型过程中, 受终端电气化提速驱动, P10~P90 范围的发电量在 2060 年达到 13664~21390 TW·h, 火电由能量主体电源转为调节型电源, 年利用小时数由当前超 4000 h 逐步下降到 2300 h 左右。

2.4 能源与资源安全

碳达峰碳中和转型过程中, 可再生能源对传统化石燃料的大量替代, 从源头降低了我国对外部油气资源的依赖。但可再生能源、电动汽车、储能等的快速发展, 也带来了电网灵活性、关键金属供应等新型能源安全风险。这种安全风险的转变, 意味着风险焦点从传统的海外油气供应中断, 转向高比例可变可再生能源规模并网下的系统平衡, 以及关键矿产资源供应链的稳定与自主可控。

模型结果表明, 国内原油产量未来小幅增长, 随着油品需求收缩, 供需缺口有望缩小, 从而带动石油自给率回升, 尽管存在差异, 到 2050—2060 年石油自给率有望回升至较高水平, 部分模型预测可实现完全自给(图 7)。天然气自给率演变也呈先降后升的特点。在碳达峰过渡阶段, 天然气作为替代煤炭的能源品种, 需求仍可能增长, 短期内会继续加剧进口依赖; 到 2030 年, 天然气自给率仍维持在 50%~60% 的相对低位。随着能源系统向零碳目标迈进, 天然气自给率在 2035 年后开始回升。到 2050 年后, 天然气实现完全自给成为多数模型共识。

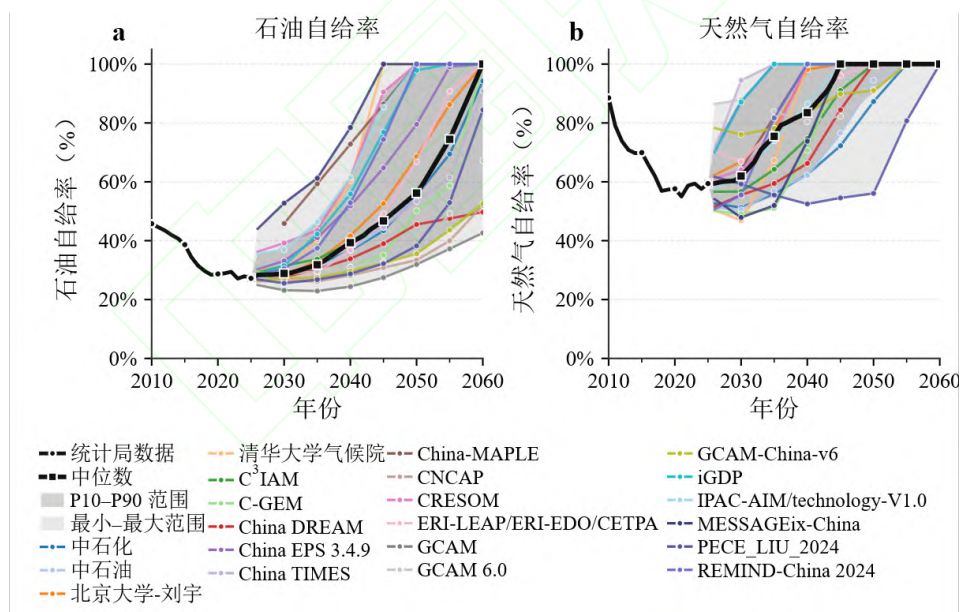


Fig. 7 China's self-sufficiency rate of oil (a) and natural gas (b) from 2020 to 2060

高比例风电和光伏发电并网使得电力系统需在多时间尺度上承担更高强度的平衡与调节任务, 因而现有电网基础设施灵活性需要大幅强化。除了提高机组调节能力和储能规模建设外, 特高压输电、多样化需求侧响应和新型可调节负荷, 可通过促进资源的时空互补、调节用电时间和规模, 替代部分高成本备用容量和储能建设。

大规模部署可再生能源带来了多种关键金属需求增长，关键金属可能成为新型供应链约束。根据 China TIMES 模型结果结合物质流分析测算^[41]，中国铜资源禀赋相对不足，铜需求将随低碳转型进程显著增长。铜的静态储采比仅 24 年，在 2020—2060 年期间，铜的对外依存度长期超过 70%，中国将面临较大的铜供应短缺风险。中国电池相关金属资源储量在全球占比均较低。预计到 2040 年，钴、镍、锂对外依存度约为 78%、63%和 44%。氢电解槽需要使用铂族金属作为电极，预计到 2060 年中国制氢行业对铂族金属的累计需求将高达 4200~5000 t。但中国铂族金属资源极度匮乏，超过 95%依赖进口，具有较大的供应风险。

2.5 碳中和转型新增投资与转型成本

能源结构由化石燃料主导向清洁能源转变，要求对能源系统进行系统性改造，并对能源基础设施（可再生能源、储能以及电网）进行大规模投资。相应地，传统产业升级和高碳排放行业脱碳同样依赖持续投入，尤其是绿色氢能、工业高温热电气化及 CCUS 等先进技术领域的投资，对实现低碳技术产业化、规模化增长至关重要。

结果显示，2025—2035 年中国能源供应部门累计投资额达 23 万亿~59 万亿元，2025—2060 年则为 123 万亿~246 万亿元，主要投资方向包括可再生能源建设、电网扩容，以及储能和电网平衡技术。电力部门占能源供应总投资的 90%以上。2025—2035 年电力部门累计投资额为 20 万亿~34 万亿元，2035—2060 年为 45 万亿~82 万亿元。其中，超过一半投资将用于低碳发电技术，其余主要投向电网基础设施及储能等电网平衡资源。此外，具有负排放潜力的 BECCS 将成为实现长期碳中和的关键技术，在 2035—2060 年贡献近 3%的中国减排总量，对应累计投资额为 1.2 万亿~5.7 万亿元。

终端部门同样需要大量投资用于改造现有基础设施、新建配套设施、推广电气化及其他低碳技术。工业部门脱碳在 2025—2060 年间预计较未考虑气候目标情景新增投资 5 万亿~19 万亿元，年均额外新增投资在 2035—2040 年间达到峰值。额外新增投资主要集中于工艺创新、材料替代、CCUS、节能技术、低温热能及高温热能。建筑领域的额外新增投资主要集中在推广节能建筑和热泵供暖，2025—2060 年年均额外新增投资分别为 2600 亿~6800 亿元和 400 亿~1900 亿元。轻型纯电动汽车、电动卡车、充电基础设施和氢燃料电池卡车是交通部门额外新增投资的主体。预计 2025—2035 年交通部门需约 1.6 万亿~6.2 万亿元的额外新增投资，2035—2060 年约 6 万亿~24 万亿元。

尽管不同模型中边际减排成本或碳价的定义并不完全一致，但在碳中和情景下，所有模型边际减排成本（最优碳价）呈现持续上升趋势，且呈现逐渐发散的趋势。不同模型对边际减排成本及其增长幅度的估计存在差异，主要由于各模型在技术约束、能源价格、需求弹性、贴现率、政策工具和负排放技术可用性等方面设定不同。多模型比较分析发现，中国 2050 年边际减排成本分布在 350~1750 元/t CO₂，反映出路径存在高度不确定性。尽管不同模型结果在数值上存在分歧，但一致强调尽早行动的重要性。尽早行动不仅能降低排放峰值，更为后续能源系统转型争取时间。若近期减排不足，近期排放将快速消耗可用碳预算，使 2035 年后减排压力陡增，并迫使系统在较短时间

内完成煤电退役、可再生能源扩张、电网改造、储能建设以及氢能、CCUS 和 BECCS 等关键技术部署，这将增加高碳基础设施资产搁浅风险，并推高深度减排阶段的边际减排成本。已有情景研究^[42-43]表明，较早达峰虽会增加近期低碳投资，但能够显著降低长期福利损失、边际减排成本和对碳移除技术的依赖。若延迟减排，后期边际减排成本将急剧攀升，并加大经济社会转型风险。

2.6 模型间差异及其对转型路径不确定性的影响

在探寻深度脱碳路径中，不同模型在碳排放峰值、2035—2050 年各部门减排贡献、2060 年剩余排放与负排放规模，以及氢能、CCUS 等新兴技术部署规模上判断存在明显差异，使排放路径、能源结构、投资需求和减排压力等关键指标呈现较宽不确定性区间。总体来看，模型间差异主要源自模型架构、数据基础、社会经济假设和技术刻画四个方面。

模型架构差异会直接影响转型路径判断。自下而上的能源系统优化模型通常以全系统成本最小化为目标，能够细致刻画能源技术、设施寿期和技术替代关系，但由于宏观经济反馈不足，可能推导出较高的边际减排成本。自上而下的 CGE 模型更强调宏观经济反馈和产业关联，其替代弹性设定可能使成本变化更平滑，但由于对深度减排技术和基础设施约束刻画有限，可能低估净零转型难度。时空分辨率差异尤其会影响电力部门结果。若模型仅采用年度及国家尺度，便难以捕捉风光出力的日内波动、季节差异、跨区输电瓶颈和系统可靠性约束，从而导致储能、需求侧响应、电网扩容、煤电退役速度和可再生能源渗透率等判断存在明显差异。

底层数据和统计口径不同也是重要来源。不同团队在能源消费和温室气体排放核算边界上存在差异，例如化石能源作为原料使用、生物质燃料排放因子选择、非二氧化碳气体减排优化方法，以及基年校核采用的数据来源等。由于能源和排放统计存在发布时滞，基年差异会在长期动态演进中被放大，进而影响峰值排放、一次能源消费和终端电气化水平等结果。

宏观社会经济假设决定未来能源服务需求规模。经济增速、人口结构、城镇化、产业结构和居民消费模式等设定不同，会改变建筑、交通和工业部门的基准需求。尽管多数模型均声明采用了 SSP2 或类似情景，但由于 SSP 版本不同以及对于中国经济人口发展趋势的判断差异，不同模型的宏观经济假设整体可比但差异存在。

关键技术参数设定会进一步放大模型差异。风电、光伏、储能、核电、氢能、CCUS、BECCS 和 DACCS 等技术的成本、效率、寿命、技术学习率、部署速度和部署上限，都会影响其在模型中的竞争力。例如，较低的绿氢成本会增强其在钢铁、化工和重型交通中的作用；较低的 CCUS 成本和较高封存潜力则会提高 CCUS 在化石能源和工业过程中的减排贡献。相反，若模型纳入土地利用、关键金属、输电网络和 CO₂ 运输及封存等现实约束，则会限制部分技术的扩张，使路径更加趋向于选择多技术组合。

3 结论与政策建议

利用国内外 22 个能源与气候模型模拟结果，本研究对 2021 年以来相关模型结果研究进行了综合评估。结果显示，中国的碳排放有望在“十五五”前期达峰，达峰后至 2035 年需较峰值下降约 10%。实现碳中和能源供应部门需要约 123 万亿~246 万亿元的投资，边际减排成本将随时间有所上升，尽早强化气候变化减缓行动可以避免高昂的转型成本与资产搁浅风险。

基于多模型情景比较研究，我们提出以下政策建议：

（1）分阶段、分部门、多气体协同推进全社会脱碳。推动中国能源结构优化，加快可再生能源建设步伐，完善电网和储能能力，推动可再生能源在非电多元应用，提升全社会清洁能源消纳水平。“十五五”时期在继续保持可再生能源建设的基础上，应将煤电灵活性改造、电网扩容、储能建设和需求侧响应作为工作重点，避免新能源增长受系统调节能力制约。加快终端电气化和氢能化进程，促进终端用能由分散化石燃料消费向电、氢等清洁能源转变。注重 CO₂ 与非 CO₂ 温室气体协同减排，将甲烷、氧化亚氮、含氟气体等纳入综合减排体系，其中甲烷治理应作为近期减排重点，优先控制煤炭开采、油气系统、畜禽养殖和废弃物处理排放。

（2）强化深度脱碳与巩固能源资源安全协同。围绕锂、镍、钴、铜等关键矿产，建立国家战略储备，完善需求预测机制。推动多元化进口和国际产能合作，布局全球供应链，加强高依赖矿产品类自主掌控。促进再生资源回收和材料替代，提高应对市场波动与地缘风险能力。关键矿产保障应作为新能源、电动汽车、储能和电解槽规模化部署的前置条件。推进煤电等传统电源向灵活支撑性电源转型，加快储能、抽水蓄能、需求侧响应等灵活性资源部署，提升电力系统灵活性和新能源并网能力。完善面向极端天气、自然灾害的应急调控机制，建立分级预案及极端事件库，实现多能源协同应急和跨部门联动。

（3）围绕关键瓶颈，促进关键低碳技术创新。集中更多研发资源于系统约束性强、模型不确定性高、长期成本影响大的环节，如长时储能、低碳工业高温热、长时储能、氢电解槽、CCUS 全链条技术与关键装备。鉴于氢能、CCUS、BECCS 和 DACCS 等技术对长期深度减排和 2060 年剩余排放抵消具有重要影响，应在近期优先开展绿色氢氨醇化工、工业 CCUS、CO₂ 运输封存网络和长时储能的试点和示范。正视 AI 发展与算力基础设施建设的新增排放压力，将数据中心和算力集群纳入能耗与碳排放双控重点领域，通过算力布局向可再生能源富集区迁移、引导数据中心参与负荷调节、设立数据中心绿电比例和能效标准等手段，防范数字化转型削弱减排成效。

（4）完善市场机制，实现资源优化配置与减排责任公平分担。推动碳市场从“强度约束”向“总量约束”有序过渡，在电力、钢铁、水泥等行业逐步引入排放总量限制，提高有偿配额和拍卖比例，使碳价能够真实反映边际减排成本。市场机制设计应优先缓解高减排成本领域的后期减排压力，发展与碳市场联动的长期绿色融资工具，稳定收益成本预期引导企业提前投资低碳技术，降低资产搁浅风险。在电力市场中，引入灵活性、容量和可靠性等多维市场机制，将储能、需求侧响应、调频调峰等服务通过独立市场或补偿机制定价。

（5）推进自主综合评估模型建设，提升本土气候情景模拟能力。加强自主气候变化综合评估模型研发，建立统一的国家气候情景数据库，实现数据标准化报告、常态化更新及定期比较校对机制。针对目前模型情景研究仍存在较大不确定性的领域，未来模型开发应优先提升对小时级电力平衡、关键金属供需、CO₂ 运输封存网络、工业过程减排、土地碳汇和非 CO₂ 温室气体治理的刻画能力。推动本土能源与气候数据高效采集融合的创新方法开发，增强数据系统性、可靠性与时效性。加快制定与国际接轨的数据标准，推动本土模型纳入国际权威情景数据库，增强中国在全球能源与

气候政策领域的话语权。鼓励产学研用协同创新，强化跨学科人才培养，打造高水平建模团队。

参考文献

- [1] 国务院. 中国落实国家自主贡献成效和新目标新举措[R]. 北京: 国务院, 2021. The State Council. China's achievements, new goals and new measures for Nationally Determined Contributions [R]. Beijing: The State Council, 2021 (in Chinese)
- [2] 国务院. 2035 年中国国家自主贡献报告[R]. 北京: 国务院, 2025. The State Council. China's 2035 Nationally Determined Contributions report [R]. Beijing: The State Council, 2025 (in Chinese)
- [3] Panos E, Glynn J, Kypreos S, et al. Deep decarbonisation pathways of the energy system in times of unprecedented uncertainty in the energy sector [J]. *Energy Policy*, 2023, 180: 113642
- [4] Dekker M M, Daioglou V, Pietzcker R, et al. Identifying energy model fingerprints in mitigation scenarios [J]. *Nature Energy*, 2023, 8 (12): 1395-1404
- [5] Dekker M M, Hof A F, van den Berg M, et al. Spread in climate policy scenarios unravelled [J]. *Nature*, 2023, 624 (7991): 309-316
- [6] Sognaes I, Gambhir A, van de Ven D-J, et al. A multi-model analysis of long-term emissions and warming implications of current mitigation efforts [J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11 (12): 1055-1062
- [7] 魏一鸣, 余碧莹, 唐葆君, 等. 中国碳达峰碳中和时间表与路线图研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022, 24 (4): 13-26. Wei Y M, Yu B Y, Tang B J, et al. Roadmap for achieving China's carbon peak and carbon neutrality pathway [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2022, 24 (4): 13-26 (in Chinese)
- [8] Yu B, Zhao Z, Wei Y M, et al. Approaching national climate targets in China considering the challenge of regional inequality [J]. *Nature Communications*, 2023, 14 (1): 8342
- [9] 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 X L, Huang X D, Zhang D, 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 (in Chinese)
- [10] Zhang D, Huang X D, Zhong J T, et al. A representative CO₂ emissions pathway for China toward carbon neutrality under the Paris Agreement's 2 °C target [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2023, 14 (6): 941-951
- [11] Zhou N, Khanna N, Zhang J, et al. China energy outlook 2022 [R]. Berkeley: LBML, 2022
- [12] 绿色创新发展研究院. 支持碳中和实现的能源转型之路: 基于能源政策模型(EPS CHINA 2024) [R]. 北京: 绿色创新发展研究院, 2024. Institute for Global Decarbonization Progress. Energy transition pathways supporting China's carbon neutrality based on EPS [R]. Beijing: Institute for Global Decarbonization Progress, 2024 (in Chinese)
- [13] Yang X, Nielsen C P, Song S, et al. Breaking the hard-to-abate bottleneck in China's path to carbon neutrality with clean hydrogen [J]. *Nature Energy*, 2022, 7 (10): 955-965
- [14] Zhang S, Chen W, Zhang Q, et al. Targeting net-zero emissions while advancing other sustainable development goals in China [J]. *Nature Sustainability*, 2024, 7 (9): 1107-1119
- [15] Zhang S, Chen W. Exploring the feasible net-zero transition pathway in China considering energy system flexibility [J]. *Nature Communications*, 2026, 17 (1): 5440
- [16] 中国碳中和与清洁空气协同路径 2024 年度报告工作组. 中国碳中和与清洁空气协同路径(2024) [R]. 北京: 清华大学碳中和研究院, 2024. Working Group on the China's Carbon Neutrality and Clean Air Synergistic Pathway Report 2024. China's carbon neutrality and clean air synergistic pathway report 2024 [R]. Beijing: Institute for Carbon Neutrality of Tsinghua University, 2024 (in Chinese)
- [17] Song S, Li T, Liu P, et al. The transition pathway of energy supply systems towards carbon neutrality based

- on a multi-regional energy infrastructure planning approach: a case study of China [J]. *Energy*, 2022, 238: 122037
- [18] 中国能源转型展望项目组. 中国能源转型展望 2024 [R]. 北京: 中国宏观经济研究院能源研究所, 2025. Working Group on the China Energy Transformation Outlook. China energy transformation outlook 2024 [R]. Beijing: Energy Research Institute of Chinese Academy of Macroeconomic Research, 2025 (in Chinese)
- [19] Wang J, Lu X, Wang H, et al. Reassessing immediate coal phase-out: dual imperatives of capacity control and renewables expansion in China's net-zero strategy [J]. *Nexus*, 2025, 2 (3): 100081
- [20] Cui R Y, Hultman N, Cui D, et al. A plant-by-plant strategy for high-ambition coal power phaseout in China [J]. *Nature Communications*, 2021, 12 (1): 1468
- [21] Sun Y, Jiang Y, Xing J, et al. Air quality, health, and equity benefits of carbon neutrality and clean air pathways in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58 (34): 15027-15037
- [22] Ma X, Peng T, Zhang Y, et al. Accelerating carbon neutrality could help China's energy system align with below 1.5 °C [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 337: 117753
- [23] Xiang P, Jiang K, Wang J, et al. Zero-carbon ammonia technology pathway analysis by IPAC-technology model in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 400: 136652
- [24] Guo F, van Ruijven B J, Zakeri B, et al. Implications of intercontinental renewable electricity trade for energy systems and emissions [J]. *Nature Energy*, 2022, 7 (12): 1144-1156
- [25] Dong J, Cai B, Zhang S, et al. Closing the gap between carbon neutrality targets and action: technology solutions for China's key energy-intensive sectors [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57 (11): 4396-4405
- [26] Liu J, Yin M, Xia-Hou Q, et al. Comparison of sectoral low-carbon transition pathways in China under the nationally determined contribution and 2 °C targets [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 149: 111336
- [27] Gong C C, Ueckerdt F, Bertram C, et al. Multilevel emission impacts of electrification and coal pathways in China's net-zero transition [J]. *Joule*, 2025, 9 (6): 101945
- [28] 刘宇, 羊凌玉, 李欣蓓, 等. 碳中和目标实现下中国转型发展路径研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022, 24 (4): 27-36. Liu Y, Yang L Y, Li X B, et al. Research on the pathway for China's transformation and development toward carbon neutrality [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2022, 24 (4): 27-36 (in Chinese)
- [29] 清华大学气候变化与可持续发展研究院. 中国长期低碳发展战略与转型路径研究: 综合报告[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2021. Institute of Climate Change and Sustainable Development of Tsinghua University. Comprehensive report on China's long-term low-carbon development strategies and pathways [M]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2021 (in Chinese)
- [30] 中国石化集团经济技术研究院有限公司, 中国石化咨询有限责任公司. 中国能源展望 2060 (2025 版) [R]. 北京: 中国石化, 2025. Sinopec Economics & Development Research Institute Company Limited, Sinopec Consulting Company Limited. China energy outlook 2060 (2025) [R]. Beijing: Sinopec, 2025 (in Chinese)
- [31] 中国石油集团经济技术研究院. 2060 年世界与中国能源展望 (2024 版) [R]. 北京: 中国石油, 2024. CNPC Economics & Technology Research Institute. World and China energy outlook 2060 (2025) [R]. Beijing: CNPC, 2024 (in Chinese)
- [32] Energy Foundation China. Synthesis report 2022 on China's carbon neutrality: electrification and China's carbon neutrality pathway [R]. Beijing: Energy Foundation China, 2022
- [33] Energy Foundation China. Synthesis report 2024 on China's carbon neutrality: investing in the net zero transition [R]. Beijing: Energy Foundation China, 2025
- [34] Xu H, Yue C, Zhang Y, et al. Forestation at the right time with the right species can generate persistent carbon

- benefits in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2023, 120 (41): e2304988120
- [35] Crespo Cuaresma J. Income projections for climate change research: a framework based on human capital dynamics [J]. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 226-236
- [36] 张晓晶, 汪勇. 社会主义现代化远景目标下的经济增长展望: 基于潜在经济增长率的测算[J]. *中国社会科学*, 2023 (4): 4-25, 204. Zhang X J, Wang Y. Prospects for economic growth under the long-range objectives of socialist modernization: based on the measurement of the potential economic growth rate [J]. *Social Sciences in China*, 2023 (4): 4-25, 204 (in Chinese)
- [37] 杨丰铭, 翟建青, 苏布达, 等. 共享社会经济路径 (SSP1~5) 中国及分省经济预估数据集_v2 [J]. *气候变化研究进展*, 2024, 20 (4): 498-503. Yang Y M, Zhai J Q, Su B D, et al. National and provincial population projection databases under Shared Socioeconomic Pathways (SSP1—5) v2 [J]. *Climate Change Research*, 2024, 20 (4): 498-503 (in Chinese)
- [38] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World population prospects 2024* [R]. New York: United Nations, 2024
- [39] KC S, Moradhvaj, Potancokova M, et al. Wittgenstein Center (WIC) population and human capital projections: 2023 [DS/OL]. (2024) [2026-05-26]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14718294>
- [40] 杨雷, 潘勋章, 陈文颖. 碳中和目标的公平性评价: 基于碳配额分配模型[J]. *中国人口·资源与环境*, 2023, 33 (6): 1-10. Yang L, Pan X Z, Chen W Y. Fairness evaluations of carbon neutrality targets in major countries based on the burden sharing model [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2023, 33 (6): 1-10 (in Chinese)
- [41] Dong H, Zhang T, Geng Y, et al. Sub-technology market share strongly affects critical material constraints in power system transitions [J]. *Nature Communications*, 2025, 16 (1): 1285
- [42] Zhang S, Chen W. Assessing the energy transition in China towards carbon neutrality with a probabilistic framework [J]. *Nature Communications*, 2022, 13 (1): 87
- [43] Zhang S, Chen W. Probabilistic scenarios reveal the impacts of China's energy system net-zero transition on the water–energy–food nexus [J]. *Environmental Science & Technology*, 2026, 60 (32): 22377-22388

Multi-model intercomparison study of China's low carbon transition pathways under the “Dual Carbon” goal

ZHANG Shu, CHEN Wen-Ying

Institute of Energy, Environment and Economy, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: China's low carbon transition under the “Dual Carbon” goal has entered a critical stage characterized by deep, substantive implementation and coordinated action across multiple sectors. In the face of complex technological, economic, and social uncertainties inherent in long-term and deep decarbonization, scenario assessments based on a single model are often subject to structural biases arising from differences in underlying mechanisms and parameter assumptions. Consequently, systematically conducting multi-model intercomparison studies to extract robust, cross-model consensus through cross-validation has emerged as a crucial way for objectively identifying transition dynamics and mitigating decision-making risks. This study synthesizes and compares the latest results from 22 domestic and international energy and climate models published since 2021. It provides a systematic assessment of China's low carbon transition pathways under the “Dual Carbon” goal in terms of greenhouse gas emissions trajectories, energy system evolution, energy and resource security risks, and the investment requirements and economic costs of the transition. The results show that China's carbon emissions are likely to peak in the early years of the Fifteenth Five-Year Plan (FYP) period and decline by approximately 10% from the peak level by 2035. Both primary (electric heat equivalent) and final energy consumption are projected to

peak around 2030. By 2060, the share of non-fossil energy in primary energy consumption (coal equivalent) and the electrification rate of final energy demand are expected to rise to approximately 80% (10th–90th percentile range: 77%–97%) and 62% (10th–90th percentile range: 56%–77%), respectively. Although the low-carbon transition can fundamentally reverse China’s dependence on imported oil and gas, it will also give rise to new energy security challenges, particularly those related to power system flexibility and the supply of critical minerals. The additional investment required to achieve carbon neutrality in the energy supply sector is estimated at RMB 123–246 trillion. Based on these findings, we recommend seizing the critical window of opportunity during the Fifteenth FYP to accelerate forward-looking emission reduction deployments. It is imperative to construct a deep decarbonization paradigm characterized by multi-sectoral coordination and multi-gas synergy. Furthermore, concerted efforts must be concentrated on overcoming the bottlenecks in strategic frontier technology chains, such as hydrogen energy, long-duration energy storage, and CCUS (carbon capture, utilization, and storage) to facilitate a comprehensive socioeconomic transition that is secure, economically viable, and sustainable.

Keywords: Climate change mitigation; Carbon peaking and carbon neutrality; Decarbonization pathways; Multi-model intercomparison project; Energy transition; Integrated assessment model (IAM)