



北京理工大学学报(社会科学版)

Journal of Beijing Institute of Technology(Social Sciences Edition)

ISSN 1009-3370,CN 11-4083/C

《北京理工大学学报(社会科学版)》网络首发论文

题目: 中国碳达峰碳中和时间表与路线图研究
作者: 魏一鸣, 余碧莹, 唐葆君, 刘兰翠, 廖华, 陈景明, 孙飞虎, 安润颖, 吴郢, 谭锦潇, 邹颖, 赵子豪
DOI: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2022.1165
收稿日期: 2022-05-29
网络首发日期: 2022-05-31
引用格式: 魏一鸣, 余碧莹, 唐葆君, 刘兰翠, 廖华, 陈景明, 孙飞虎, 安润颖, 吴郢, 谭锦潇, 邹颖, 赵子豪. 中国碳达峰碳中和时间表与路线图研究[J/OL]. 北京理工大学学报(社会科学版).
<https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2022.1165>



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: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2022.1165

收稿日期：2022-05-29

基金项目：国家自然科学基金项目（71822401，71603020，71521002）；北京市自然科学基金项目（JQ19035）

作者简介：魏一鸣（1968—），男，教授，博士生导师；E-mail: wei@bit.edu.cn; 余碧莹（1986—），女，教授，博士生导师，E-mail: yubiyang_bj@bit.edu.cn

中国碳达峰碳中和时间表与路线图研究

魏一鸣¹，余碧莹¹，唐葆君¹，刘兰翠²，廖华¹，陈景明¹，孙飞虎¹，安润颖¹，

吴郢¹，谭锦潇¹，邹颖¹，赵子豪¹

(1. 北京理工大学 能源与环境政策研究中心 能源经济与环境管理北京市重点实验室，北京 100081；2. 北京师范大学 经济与工商管理学院，北京 100875)

摘要：实现中国碳中和目标时间紧，任务重，是一项复杂系统工程。科学制定减排的时间表和路线图，需要处理好长期与短期、减排与发展、局部与总体的协同关系。为此，本文应用自主设计并构建的国家能源技术模型（C³IAM/NET），提出了兼顾经济性和安全性的中国碳达峰碳中和时间表和路线图，明确了中国碳排放总体路径、行业减排责任、重点技术规划等多个层面的具体行动方案。结果表明：当2060年碳汇可用量为10~30亿吨时，为达到低成本和安全实现“双碳”目标的要求，在不同社会经济发展情景下，中国需在2026—2029年间实现碳达峰，峰值不超过127亿吨CO₂（含工业过程排放）；2060年的碳排放主要来源于电力、钢铁、化工、交通等部门；为实现碳中和目标，能源结构需加速转型，但2040年前中国仍将是煤为主的能源格局，2030年煤炭占比不低于44%。在全国和行业路线图基础上，进一步给出了实现全国“双碳”目标对应的钢铁、水泥、有色、化工、建筑、交通、电力等重点行业的碳排放路径和技术布局方案，为中国引领和参与全球气候治理提供了科学依据和可操作性的行动方案。

关键词：碳达峰碳中和；国家能源技术模型；时间表；路线图；重点行业；技术布局

中图分类号：F205

文献标识码：A

气候变化是全球共同面临的巨大挑战。IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 第六次评估报告的最新研究指出，预计未来20年（2040年前后）地球表面变暖将达到1.5℃，要实现在本世纪末将全球温升控制在不超过工业化前1.5℃的目标，未来10年全球需大幅减少CO₂排放^[1]。中国积极实施减缓气候变化的国家战略，提出“力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”的目标。根据中国气候变化综合评估模型C³IAM的评估结果显示^[2]，中国2060碳中和目标是超越2℃，面向1.5℃目标的深度脱碳行动。

然而，中国实现碳中和目标时间紧，任务重，是一项复杂系统工程。科学制定减排的时间表和路线图，需要处理好长期与短期、减排与发展、局部与总体的协同关系^[3-4]。为此，综合碳中和路径优化设计的实际需求，本文应用自主设计构建的C³IAM/NET模型，综合考虑社会、经济、行为、

技术的不确定性对终端用能产品（如钢铁、水泥、化工产品、铝、造纸等工业产品）和服务需求（取暖、制冷、照明、客/货物运输等服务）的影响，以满足未来各行业产品和服务供给需求为前提，以需定产，从能源供需系统总成本最优的角度动态优化 2022—2060 年的全行业技术布局，最终提出多情景下兼顾经济性和安全性的中国碳达峰碳中和时间表和路线图，明确中国碳排放总体路径、行业减排责任、重点技术规划等多个层面的具体行动方案，旨在为中国引领和参与全球气候治理提供可操作的方案。C³IAM/NET 模型目前涵盖一次能源供应、电力、热力、钢铁、水泥、化工（乙烯/甲醇/合成氨/电石等多种关键产品）、有色、造纸、农业、建筑（居民/商业）、交通（城市/城际，客运/货运）、其他工业等 20 个细分行业的重点技术^[5-18]。本文将重点介绍在各行业共同合作下，以经济最优方式实现全国总体碳达峰碳中和目标对应的全国及行业时间表和路线图。关于模型方法的具体介绍以及情景和参数的设定请见本文的姊妹篇（中国碳达峰碳中和路径优化方法）。

一、中国碳达峰碳中和路径

本节将基于 C³IAM/NET 模型优化结果，对实现中国“双碳”目标的全国及分行业碳排放路径、碳排放强度和能源结构转型路径等进行介绍。

（一）碳排放总量

2020 年全国能源相关 CO₂ 排放约 113 亿吨（含工业过程排放），煤炭、石油、天然气对应碳排放占比分别为 66%，16%，6%（图 1），电力、钢铁、水泥、交通等重点排放部门。若延续当前发展趋势，全国碳排放将长期维持在百亿吨以上。为促进碳中和目标达成，需在现有减排努力基础上进一步开展能源系统低碳转型。考虑未来社会经济行为发展不确定性对终端产品需求的影响、能源系统各类先进技术的发展速度和碳汇可用量的不确定性，图 2 给出了实现中国“双碳”目标的多种排放路径。2060 年相比于 BAU 情景需进一步减排 80%以上，全国碳排放需在 2026—2029 年间达峰，能源相关 CO₂ 排放（含工业过程排放）峰值为 117~127 亿吨。

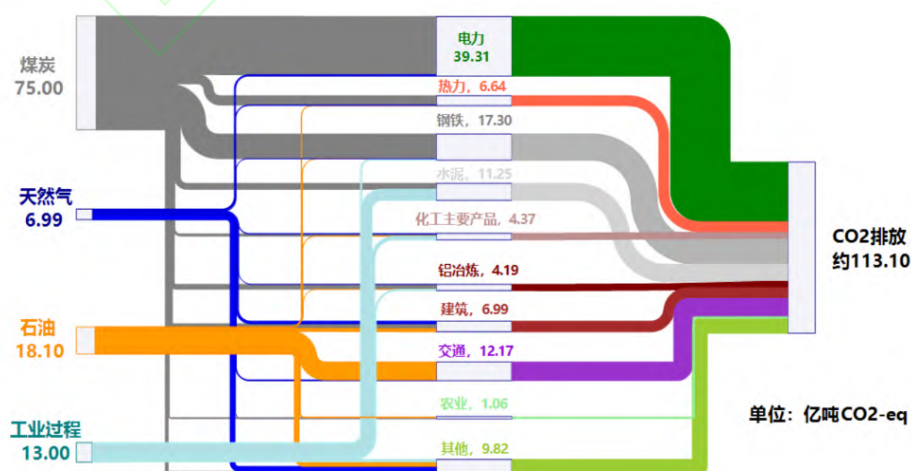


图 1 2020 年全国碳流图（含工业过程排放）

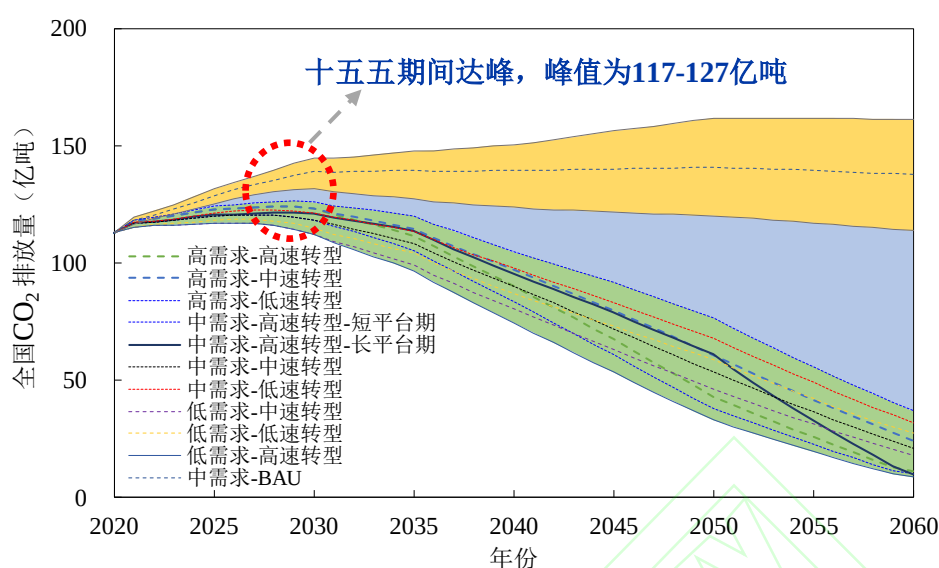
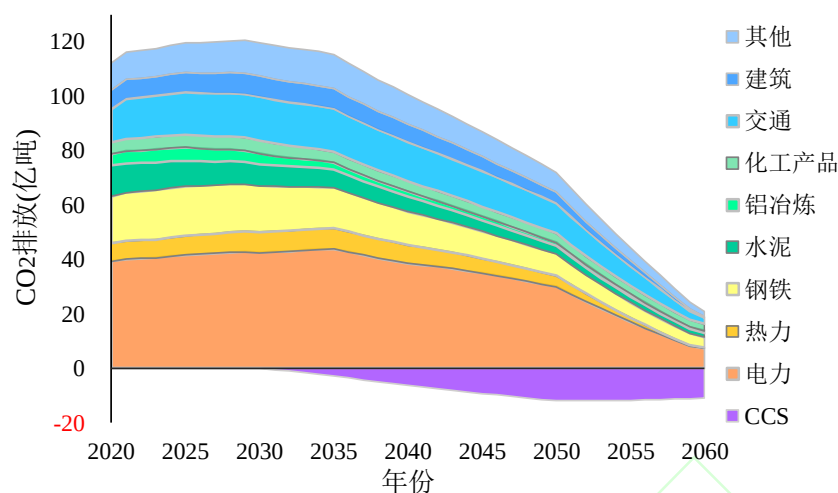


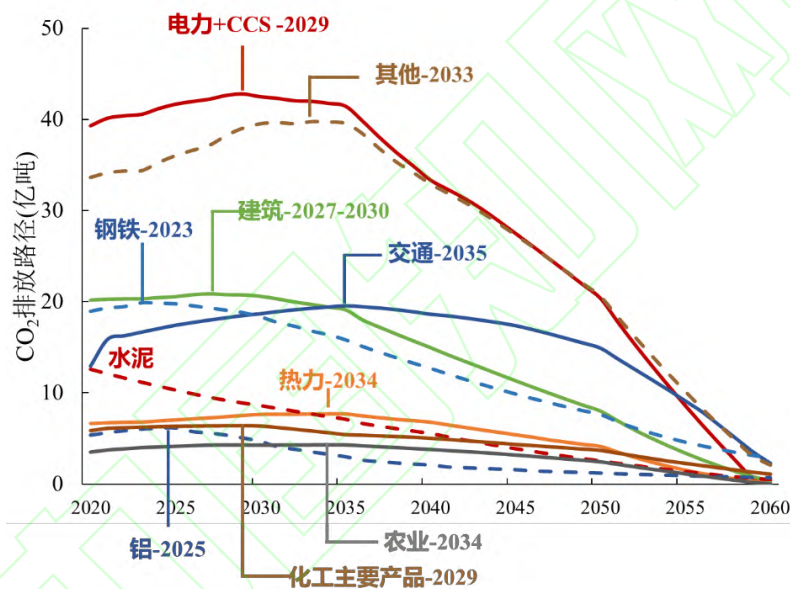
图2 全国能源相关 CO₂ 排放路径（含工业过程排放）

当社会经济发展速度适中、2060 年自然碳汇可用量为 10 亿吨时（对应中需求-高速转型情景），为低成本安全实现碳中和目标，2060 年能源系统相关 CO₂ 排放（含工业过程排放）需降至 21 亿吨左右，电力、钢铁、化工、交通等部门将是排放的主要来源，CCS 技术需捕集 CO₂ 11 亿吨以上（图 3a）。该情景下，2025—2035 年间为潜在平台期，2028—2029 年需实现碳达峰，峰值约为 122 亿吨 CO₂，2035—2050 年进入下降期，年平均减排率需约 4%，2050—2060 年为加速下降期，年均减排率需提高至 15% 及以上。CCS 将成为中国在以煤为主的能源格局中实现大量 CO₂ 减排的主要措施之一，2030 年前后开始大规模部署 CCS，至 2060 年累计捕集 CO₂ 排放 240 亿吨以上。

为确保全国按时碳达峰，重点行业部门的碳排放达峰时间有所差异。其中，工业行业整体碳排放（含间接碳排放）需于 2025 年前后达峰，峰值为 80~86 亿吨，2060 年下降至 6~22 亿吨。具体来说，水泥行业碳排放基本已经达峰，处于震荡时期；钢铁和铝冶炼行业需在“十四五”期间达峰并尽早达峰；建筑行业预期于 2027—2030 年间达峰；电力行业 and 关键化工品（乙烯、合成氨、电石和甲醇）碳排放需在 2029 年前后达峰；热力、交通、农业以及其他工业行业达峰时间相对较晚，但不能晚于 2035 年。具体达峰时间和路径见图 3b。



a 分行业累积碳排放



b 分行业碳排放路径

注：图 3a 中终端行业或部门的碳排放不包含电力热力生产的间接碳排放，图 3b 中终端行业或部门的排放路径和达峰时间是涵盖电力热力间接排放的结果；化工产品主要包括乙烯、合成氨、电石、甲醇）

图 3 2020—2060 年各行业 CO₂ 排放路径（以中需求—高速转型—长平台期情景为例）

（二）碳排放强度

为实现“双碳”目标，中国单位 GDP 二氧化碳排放需快速下降。图 3 展示了中国与主要发达国家单位 GDP 二氧化碳排放量的对比情况。目前，中国单位 GDP 二氧化碳排放水平较高（2020 年约为 0.77 吨/千美元），依照图 3 中提出的碳中和路径，中国单位 GDP 二氧化碳排放将于 2040—2050 年间降至与主要发达国家当前水平相当；2060 年中国单位 GDP 二氧化碳排放仅为 2020 年的 2% 左右，全社会整体将进入低碳发展模式，2020—2060 年单位 GDP 二氧化碳排放年均下降速度需达到 9% 以上。

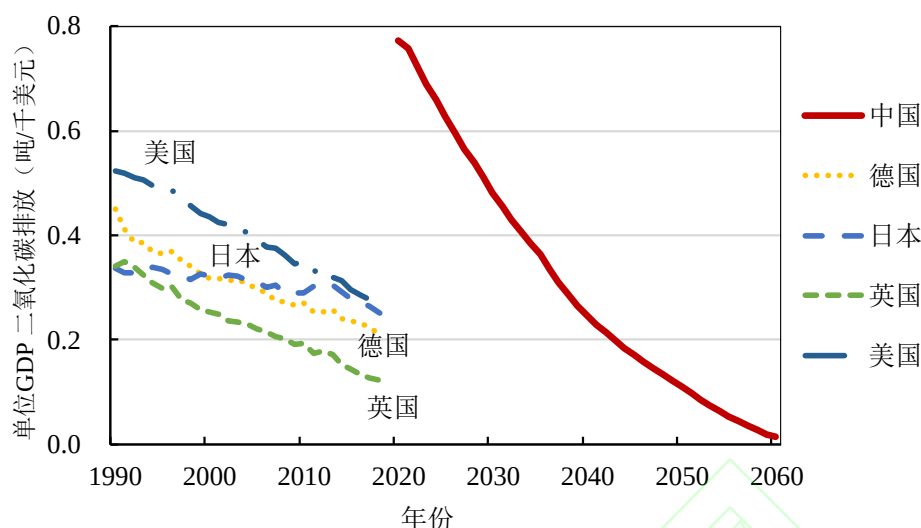


图4 中国与主要发达国家单位 GDP 二氧化碳排放量对比（2015 年不变价）
（以中需求—高速转型—长平台期情景为例）

（三）能源结构

“双碳”目标下全行业能源结构需加快转型（见图 5），非化石能源在一次能源结构中的比重应显著提高，2025 年达到 21%，并于 2030 年超过 25%，到 2060 年非化石能源在一次能源消费中的占比超过 80%。煤炭在一次能源中的占比稳步下降，但在很长时期内中国将仍是以煤为主的能源格局，2030 年煤炭占比不低于 44%，2060 年煤炭仍将为保障能源安全发挥重要作用。2025 年前石油在一次能源中的占比稳中有升，随后开始逐步下降，2025—2060 年间平均每年下降率约 3%。天然气占比呈现出先增长后下降的趋势，天然气的消费比重在 2035 年达到 12%左右，并一直保持到 2050 年，此后随着可再生能源技术和储能技术的成熟及高比例应用，天然气消费占比将回落至 7%左右。

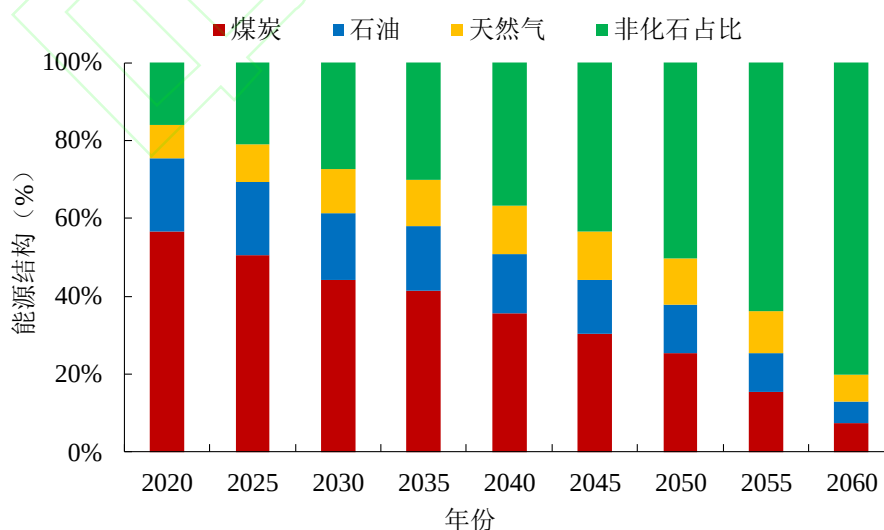


图5 一次能源消费结构（中需求—高速转型—长平台期情景）

（四）终端电气化水平

碳中和目标将促使终端电气化进程不断推进，按照国家能源局公布口径，以中需求—高速转型—长平台期情景为例（图 6），2030 年终端电气化率约为 34%，并于 2060 年达到 77%以上。分部门来看，建筑部门设备的电气化推进易于其他部门，因而其电气化水平整体高于其他部门，2020—2060 年间年均电气化增长率为 2%，2060 年建筑部门电气化水平需达到 90%。工业部门是耗电量最大的部门，因而其电气化发展水平对终端部门整体的电气化水平影响较大，2060 年电气化率需达到 73%以上；交通部门 2040 年前的电气化进程较为缓慢，其电气化推广主要集中于短途客运交通，2040 年后城际客运交通和货运交通电气化开始重点发力，带动整体交通部门电气化水平快速增长，并于 2060 年达到 84%。

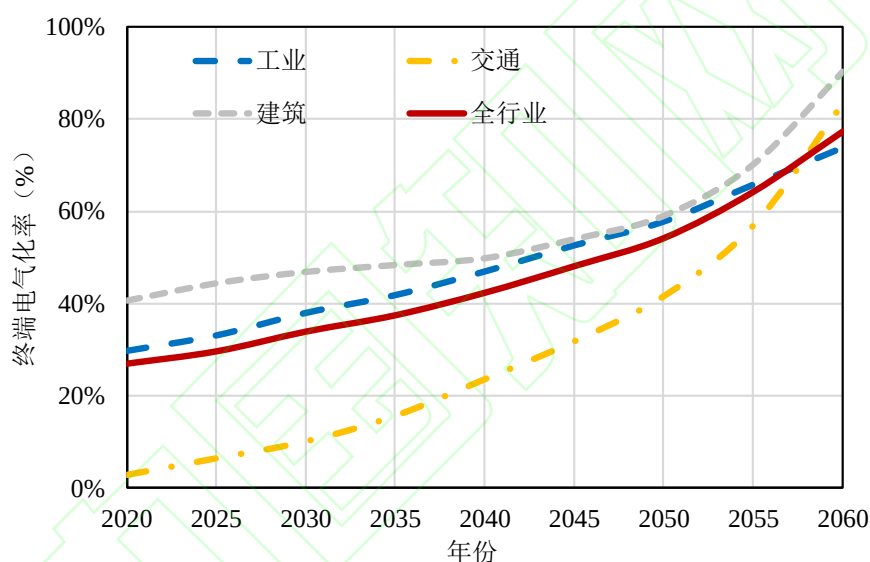


图 6 全国及分部门终端电气化率 (中需求—高速转型—长平台期情景)

二、 行业行动方案

全国“双碳”目标的实现，是各个行业合作转型的结果。下面对钢铁、水泥、化工、有色、建筑、交通、电力等重点行业在满足其未来产品和服务供给需求前提下的低碳转型行动进行分别介绍。

（一）钢铁行业

从钢材消费量的变化来看，钢材需求将于 2023—2025 年间达峰，峰值在 11.8~12.0 亿吨。达到消费峰值后，钢材消费量将在其后 30 年左右的时间逐渐下降。伴随钢产品需求变化和全国碳中和目标的约束，钢铁行业的碳排放量总体呈现下降趋势（图 7）。钢铁行业 CO₂ 排放需在“十四五”中期达到峰值（19.3~20.0 亿吨），并尽早达峰，2028 年前为潜在平台期。由于钢铁行业存在部分碳排放难以避免，在全面实施节能技术改造升级、持续推广短流程炼钢、加快二氧化碳回收利用、加

大突破性深度减排技术研发和应用等减排措施作用下，2060 年中国钢铁行业产生的 CO₂ 排放预计在 2.7~5.6 亿吨，难以实现行业的零排放。

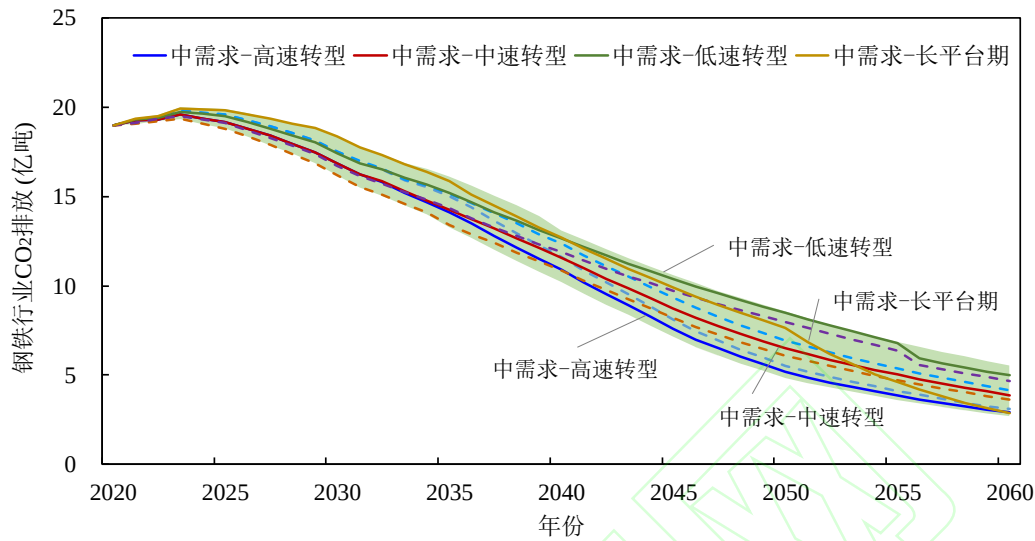


图 7 钢铁行业 CO₂ 排放量预测（2020—2060 年）

上述碳排放路径对应的技术部署方案如图 8 所示。短期内，高炉喷煤技术、转炉负能炼钢及轧钢加热炉蓄热式燃烧技术节能效果显著，2030 年市场占比需分别增至 81%、75%和 74%，同时钢铁行业各环节余能回收发电技术也需在 2030 年实现 60%~80%渗透。长期来看，电弧炉占比需显著提升。2030 年，高速转型情景下电弧炉钢占粗钢比重应达到 13%以上，2050 年达到 30%，2060 年快速增至 60%以上。氢冶金、薄板坯连铸技术、无头轧制等先进工艺技术在中后期需加快普及。2040 年高炉富氢还原技术在炼铁工艺中得到初步发展，市场推广率占比约为 12.9%，2060 年成为炼铁环节主流技术（70.0%）。薄板坯连铸和无头轧制技术取代传统的轧制环节，2060 年市场占有率分别达到 10%和 32%以上。2030 年后，焦炉和高炉-转炉过程将会逐步发展 CCS，力争 2060 年 CCS 的加装比例达到 60%以上。

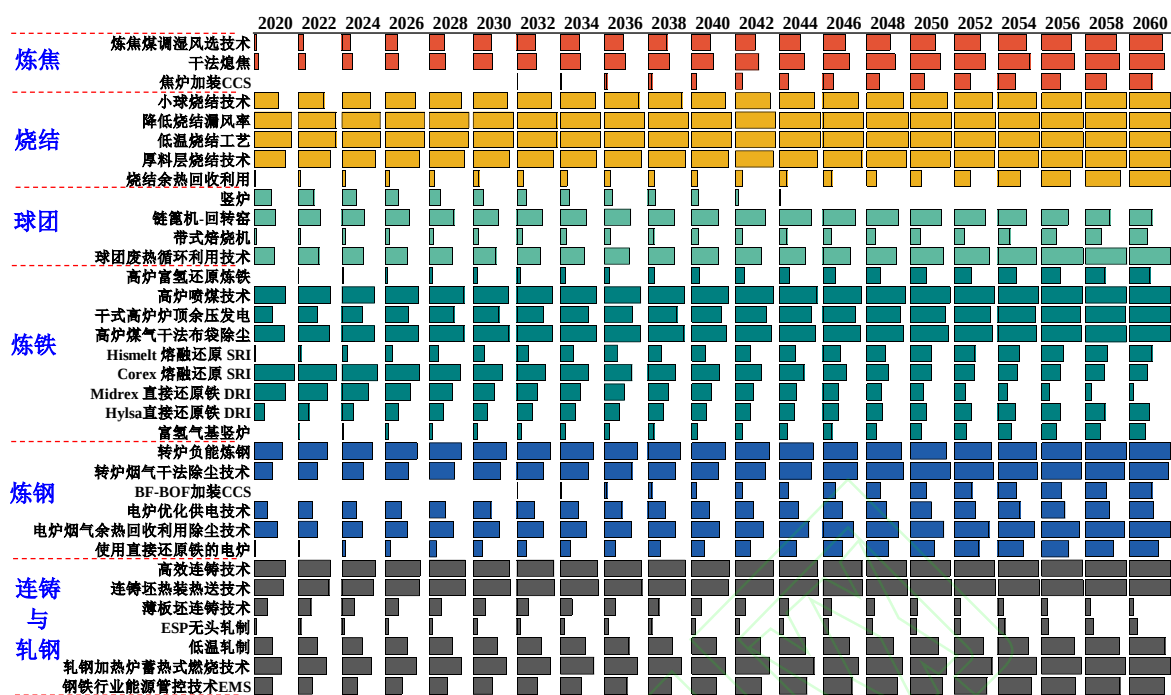


图8 钢铁行业低碳技术市场占有率（2020—2060年）

（二）铝冶炼行业

铝冶炼行业可以分为原铝冶炼和再生铝冶炼。再生铝行业未来将大力发展，2040年前后，再生铝产量达到2 700万吨，此后将占主导地位。原铝产量在2025年达峰后由于再生铝的替代而逐渐减少，峰值约为5 040万吨。为满足社会对铝产品的需求并低成本实现全国“双碳”目标，铝冶炼行业需在2025年左右实现碳达峰，峰值不超过6.2亿吨CO₂，2060年CO₂排放量需降至1亿吨以下（图9）。

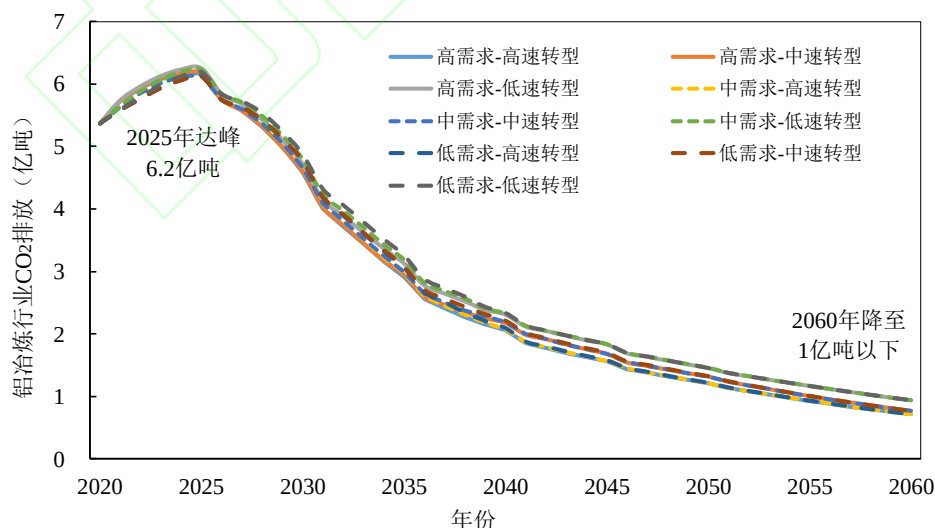


图9 原铝行业未来CO₂排放路径（2020—2060年）

上述碳排放路径对应的重点技术发展路径如图10所示。在氧化铝精炼环节，应大力推广一段棒磨二段球磨-旋流分级技术和强化溶出技术，2060年实现100%普及，此外，多效管式降膜蒸发技

术也应得到广泛推广，尤其是以三水矿石为原料的七效管式降膜蒸发技术，到 2060 年应推广至 64% 以上。在阳极制备环节中，先进技术为大型高效阳极焙烧炉系统控制节能技术，此项技术节能效果显著，到 2060 年，该技术使阳极制备环节节约能源 150 万吨标准煤，普及率应达到 75%。对于大型电解槽，目前主流槽型为 300~400 千安电解槽，为了提高能效，电解槽的大型化是未来铝冶炼行业长期关注和发展的重点，到 2050 年，应实现小型电解槽逐渐被淘汰，全部电解槽大于 500 千安，到 2060 年 600 千安槽型推广率争取达到 70% 以上。在电解铝环节中，到 2060 年，铝电解槽新型焦粒焙烧启动技术、低温低电压铝电解槽结构优化技术、低温低电压铝电解工艺用导气式阳极技术、铝电解槽“全息”操作及控制技术、预焙铝电解槽电流强化与高效节能综合技术等先进技术预计累计节电约 8 000 亿千瓦时，这几项技术到 2060 年的技术普及率应达到 100%、45%、45%、58%、43%。除推广上述重点先进技术外，铝冶炼行业应加快发展水电铝合营模式以及再生铝工艺，加快低碳转型进程。

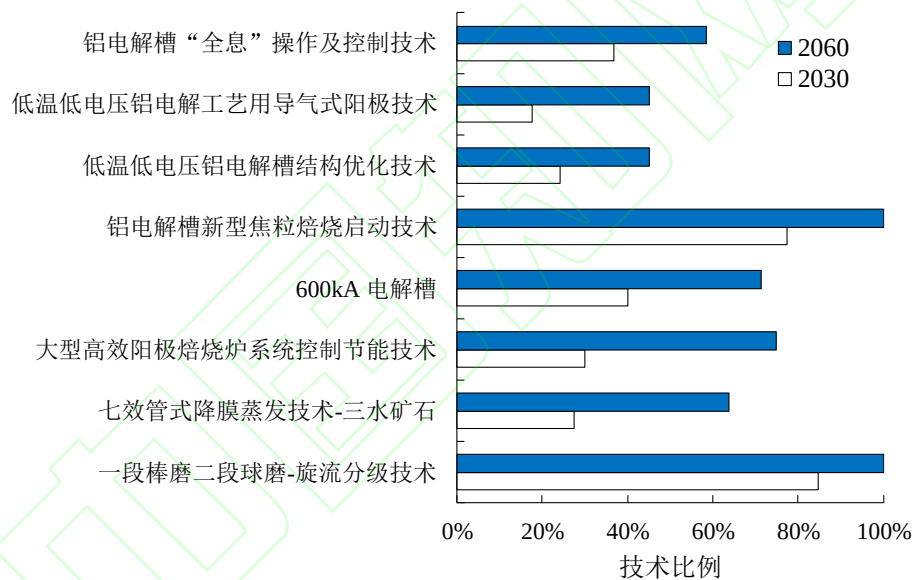


图 10 铝行业关键技术发展变化

（三）水泥行业

中国水泥需求量已经过了快速增长期，总体来看，当前基本达峰，处于震荡期。到 2060 年，水泥产品需求量约为 5.5~11.1 亿吨。为满足全社会对水泥产品的需求并低成本实现全国“双碳”目标，水泥行业碳排放需逐步下降。当前水泥行业碳排放基本达峰，但随着国家基础设施政策的波动，有望出现碳排放的略微反弹。未来 CO₂ 排放总量下降的幅度将逐渐增大。2060 年水泥行业 CO₂ 排放量应降至 0.3~1.6 亿吨。

水泥行业相应的技术布局如图 11 所示。熟料煅烧环节是水泥行业 CO₂ 排放产生的主要环节，需加快淘汰落后产能，推广先进技术。具体来说，小型新型干法窑等高耗能技术需在 2030 年前逐渐

被淘汰，中型和大型干法窑等技术需进行节能改造升级或效率提升，分别加装高固气悬浮预热分解和多通道燃煤技术，到 2060 年争取达到 60%和 90%的改造率。在熟料煅烧过程中，需充分利用预处理技术和能源二次循环使用技术，如预烧成窑炉技术和余热发电技术，这些技术的占比应逐年增加，到 2060 年，预烧成窑炉技术和余热发电技术的占比分别达到 40%和 90%以上。除推广节能减排技术外，原料替代和燃料替代等深度减排措施也需要发挥重要作用，力争到 2060 年分别达到 80%和 35%以上的替代程度。CCUS 技术在 2030 年后开始规模应用，逐渐增大其应用程度，到 2060 年增至 80%以上。加速推广 ERP（Enterprise Resource Planning，企业资源计划）解决方案，到 2060 年争取实现 50%以上的普及。

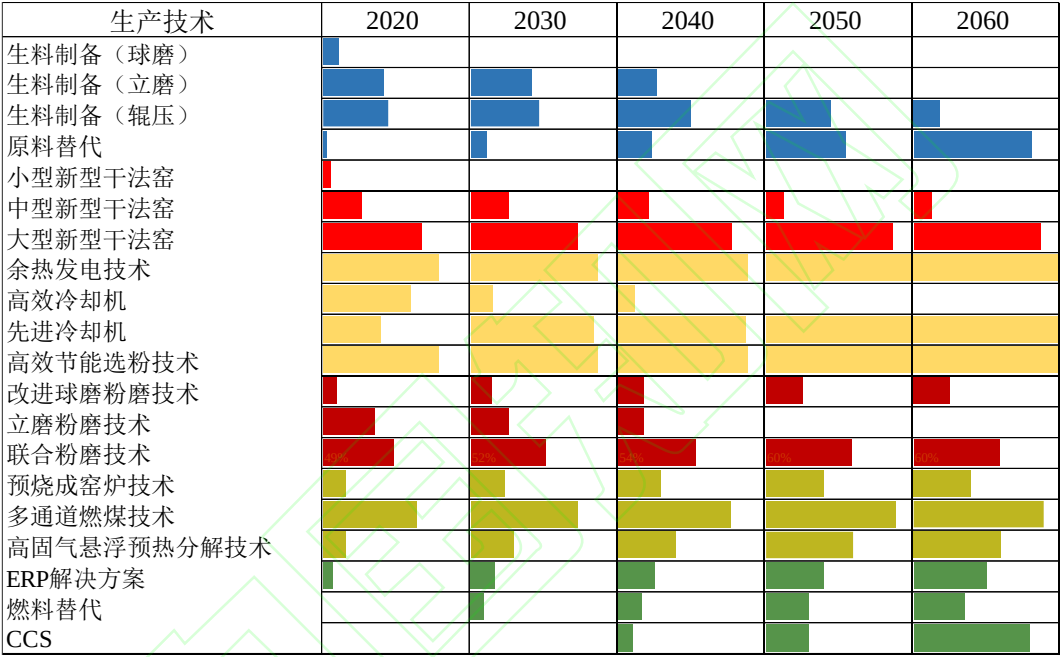


图 11 水泥行业技术布局情况

（四）化工行业

未来关键化工产品需求将持续增加，致使碳减排面临严峻挑战。在经济增长相对平稳的中需求情景下，2060 年乙烯需求将达到 6 923 万吨，而若经济增长速度更高和更低时，则其需求将分别为 9 617 万吨和 4 880 万吨左右。受未来产业结构中第一和第二产业占比逐渐下降影响，合成氨需求将总体呈现下降趋势，到 2060 年，在高、中、低需求情景下将分别下降至 2 900 万吨、2 419 万吨和 2 054 万吨。电石和甲醇作为重要的大宗基础化工品且位于产业链的上游，在经济发展和社会经济转型的双重作用下，其需求将呈现总量增长、增速放缓的趋势。2060 年时，甲醇需求在 0.985~1.32 亿吨，电石需求为 4 745~6 371 万吨。

以乙烯、合成氨、电石和甲醇四种关键化工产品为例，其低碳转型主要从以下几个方面着重开展：（1）优化生产方式，优先使用低能耗、低排放的生产方式；（2）改善原料结构，推动其轻质化发展；（3）改进生产工艺，如推广高能效技术，并加强对末端治理技术的使用；（4）引入突破性技

术，如生物质转化技术、基于低碳 H_2 及 CO_2 利用的技术等。通过这些途径，合成氨应于“十四五”初期碳排放达峰至 2.6 亿吨左右；电石、乙烯和甲醇行业碳排放需分别于 2030 年前后、2030—2040 年和 2030—2035 年达峰，其峰值分别为 0.96~1.04 亿吨、1.11~1.44 亿吨和 1.68~1.94 亿吨（图 12）。

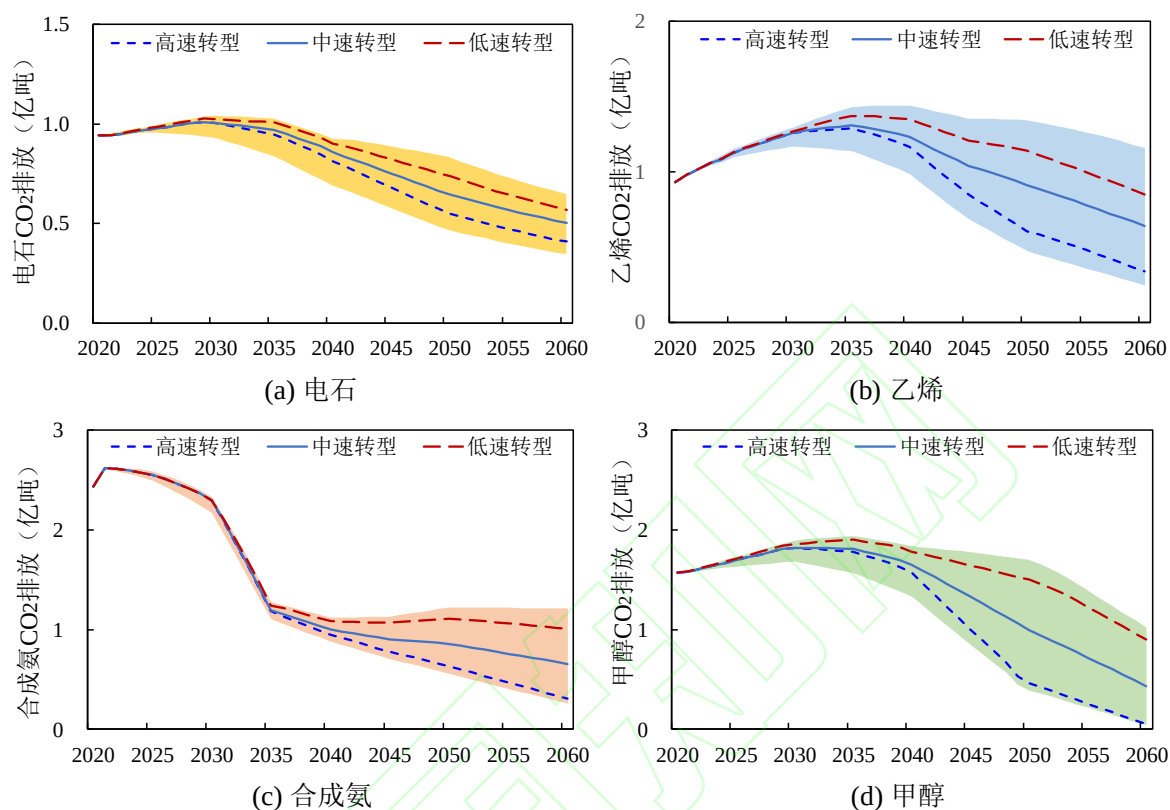


图 12 关键化工产品未来碳排放路径

为促进化工行业低碳发展，以乙烯、合成氨、电石和甲醇四种关键化工产品为代表，以高速转型（长平台期）情景为例，提出其低碳发展路径，如图 13 所示。对于电石生产，其原料制备工艺中 CCS 技术推广率应在 2047 年前达到 50%，到 2060 年达到 80% 以上；在电石制造工艺中，密闭式炉逐步替代内燃炉，2030 年所占份额达到 95%，并于 2040 年前完成全部替代。合成氨生产中，煤制氨作为一种高排放的生产方式，将逐步向基于低碳 H_2 的生产路线转变，2060 年突破性低碳 H_2 路线需对煤化工路线进行 50% 以上的替代。而在煤制氨的生产中，也存在着清洁技术替代，CCS 技术在 2050 年时推广率达到 57% 左右，至 2060 年实现全覆盖。甲醇生产方式较为多样，多种方式融合发展。煤化工路线在前期作为主要的生产源，但逐渐被更清洁的生产方式所替代，其份额在 2047 年左右降至 50% 以下；其中，煤化工生产路线中，CCS 技术在 2030 年后开始推广，至 2060 年时实现对煤化工路线的 100% 应用。焦炉气制甲醇作为一种循环经济路线，其生产份额逐步增加，但在后期随着突破性技术的引入而呈现下降。生物质路线和 CO_2 催化加氢路线 2030 年后逐步得到推广，2060 年时二者所占份额争取达到 25% 和 30%。乙烯生产仍然以蒸汽裂解为主，但其原料结构需要轻质化发展，轻烃和乙烷原料份额在 2060 年需增至 50% 和 35% 左右。对于少量的煤制烯烃，其在气

化环节将逐步加装 CCS，2060 年达到 65%以上；在甲醇制烯烃环节，将更多地采用新一代技术。

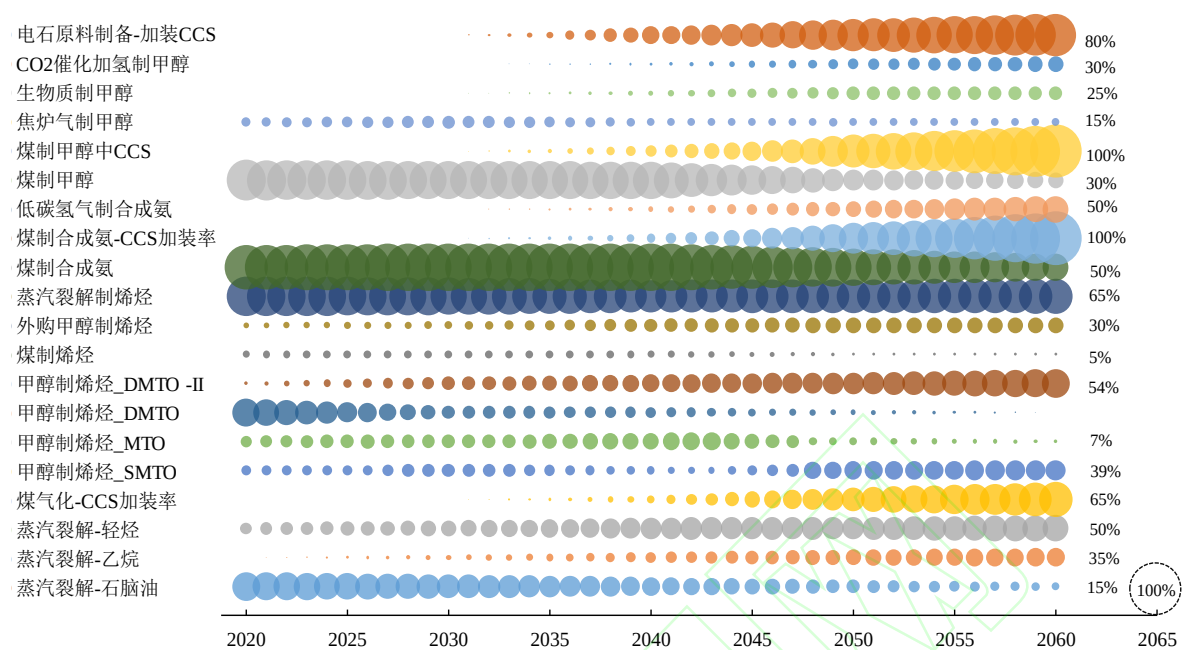


图 13 关键化工产品低碳技术发展路径（2020—2060 年）

（五）建筑部门

建筑部门包括公共建筑和居民建筑。在建筑运行阶段需要提供采暖、制冷、热水、炊事、照明等能源服务，由此产生大量的直接碳排放和间接碳排放。未来随着人均收入的增加以及人均建筑面积的增长，预计建筑部门运行阶段的能源服务需求将由 2020 年的 13.1 亿吨标准煤持续增长至 2060 年的 26~31.6 亿吨标准煤。其中，居民部门能源服务需求由 2020 年的 7.3 亿吨标准煤增长至 2060 年的 11.5~14.6 亿吨标准煤。商业部门能源服务需求增速较居民部门更高，由 2020 年的 5.8 亿吨标准煤增长至 2060 年的 14.4~17 亿吨标准煤，增长 1.5~1.9 倍（图 14）。在满足能源服务需求的前提下，为了低成本实现全国“双碳”目标，居民建筑部门碳排放峰值需控制在 14.8 亿吨 CO₂ 以内；商业建筑部门碳排放峰值不超过 6.8 亿吨 CO₂；建筑部门累计 CO₂ 排放需在 2027—2030 年达峰，各种情景下，峰值不超过 22 亿吨 CO₂。

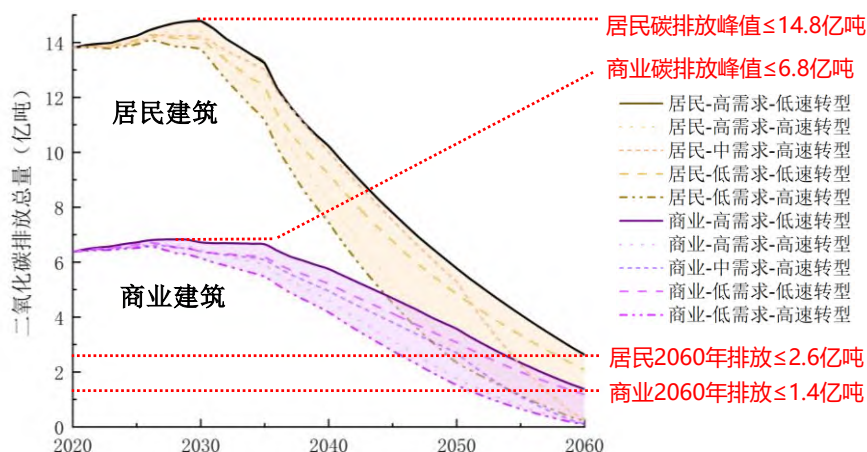


图 14 建筑部门碳排放路径

在满足能源服务需求的前提下，为了实现全国“双碳”目标，同时考虑现实资源约束、政策规划、技术进步等，建筑部门需加快推广清洁、高效设备，其中，高效供暖空调（国家标准一级能效）、高效制冷空调（国家标准一级能效）、热泵热水器、高效电炊具（热效率达 90%）、高效 LED 灯（相对效率达白炽灯的 14 倍及以上）与其他高效电器分别提供居民建筑供暖、制冷、热水、炊事、照明和电器服务的 92%、100%、90%、81%、68%和 100%，高效供暖中央空调（国家标准一级能效）、高效制冷中央空调（国家标准一级能效）、高效热泵热水器（国家标准一级能效）、高效 LED 灯（相对效率达白炽灯的 14 倍）与其他高效电器分别提供商业建筑供暖、制冷、热水、照明和电器服务的 64%、95%、92%、85%、85%。

（六）交通部门

本部分将交通部门划分为城市客运、城际客运和货运三个子部门。在不同的社会经济行为变化情景下，城市间客运需求量将在 2050 年达到峰值，峰值为 18.6~19.5 万亿人公里。到 2060 年城市间客运交通需求预计达到 18.1~19.4 万亿人公里。城市客运周转量将呈现持续上升趋势，到 2060 年预计将达到 8.6 万亿人公里，是 2020 年城市客运量的近三倍。未来货运周转量将在电子商务和经济发展的驱动下持续上涨，到 2060 年达到 34.9~53.6 万亿吨公里。

为了满足全社会交通运输服务需求并低成本实现全国碳中和目标，城市间客运交通 CO₂ 排放量需在 2035 到 2039 年间达峰，峰值控制在 5.6-6 亿吨 CO₂，但由于部分传统技术难以被替代，到 2060 年将仍可能存在 0.8-3.2 亿吨的 CO₂ 排放。城市客运交通 CO₂ 排放量需在“十四五”末或“十五五”初达峰，峰值控制在 3.7 亿吨 CO₂ 左右。货运交通 CO₂ 排放量需在 2035 年前后达峰，峰值不超过 12 亿吨 CO₂，到 2060 年仍可能存在 1.1 到 6.3 亿吨的 CO₂ 排放。从交通部门整体来看，需在 2035 年前后达峰，峰值约为 17.8~22 亿吨 CO₂。相关碳排放路径如图 15 所示。

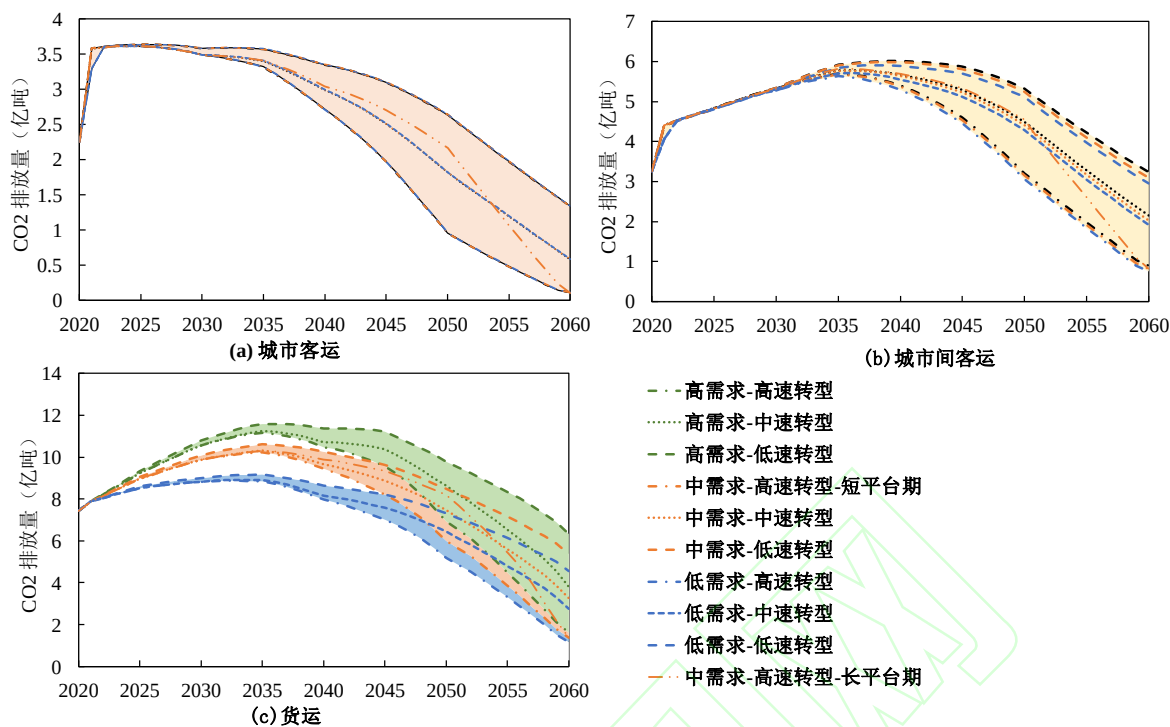
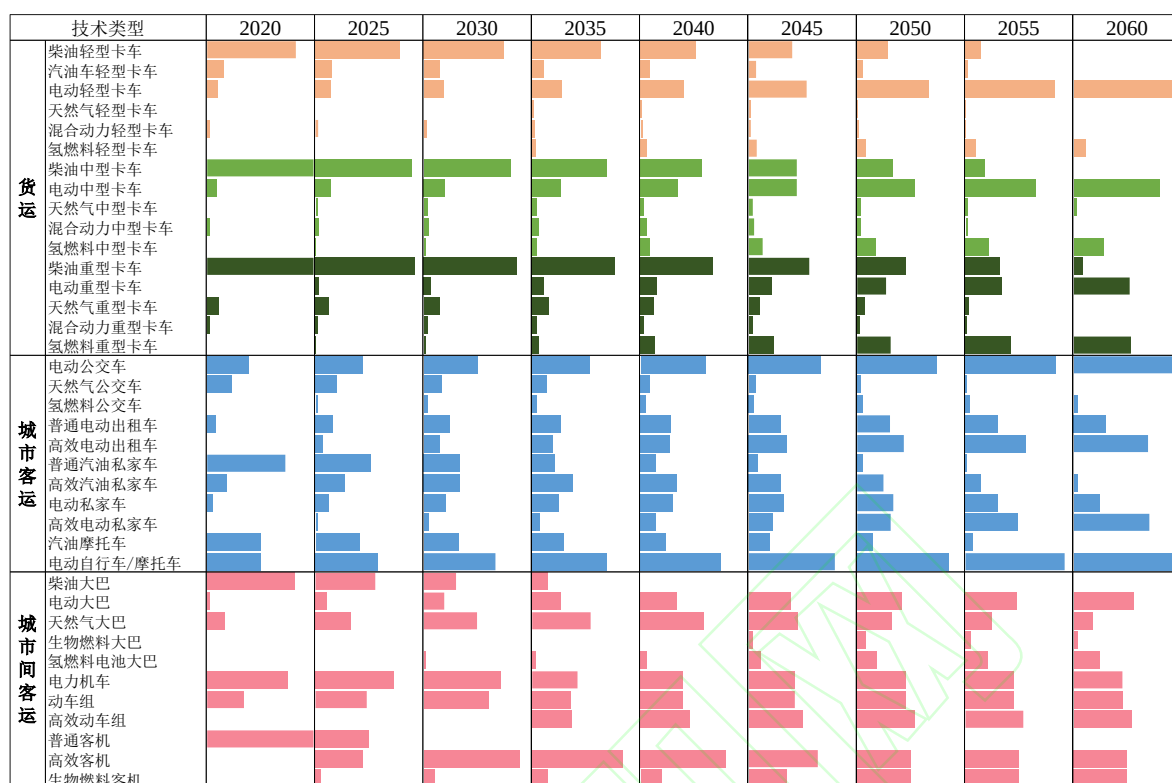


图 15 交通部门碳排放变化趋势

上述碳排放路径下，各类运输设备都应向着燃料高效化、清洁化、电动化的方向发展（图 16）。对于城市间客运而言，公路运输中的柴油客车逐渐被电动客车替代，应在 2040 年退出市场；到 2060 年，电动小汽车和氢燃料电池车的渗透率应分别达到 55%和 9%以上；到 2050 年铁路客运应争取实现 100%电气化；就航空客运而言，生物航空燃料应最晚于 2025 年进入航空市场，到 2060 年，至少 50%的航空运输服务由生物燃料飞机提供。对于城市客运而言，应重点推广电动私家车与出租车，到 2060 年渗透率应分别达到 85%以上；柴油公交车应在 2060 年前全部淘汰，纯电动公交车 2060 年占比应至少达到 95%；对于货运交通的技术布局，2020 年货运道路交通使用的燃料以柴油和汽油为主，到 2060 年则主要被电力和氢燃料替代；轻型、中型卡车到 2060 年以电动车为主；2030 年逐步推广氢燃料重型卡车和电动重卡的规模化应用，到 2060 年渗透率应分别达到 45%以上；2020 年水路货运以燃料油为主要能源，2060 年生物燃料船舶应在水路货运中占有重要地位。



注：柱子长度代表推广比例，满格为 100%。

图 16 交通部门低碳技术发展路径

（七）电力行业

除了上述钢铁、水泥、化工（乙烯/甲醇/合成氨/电石等多种关键产品）、有色、建筑（居民/商业）、交通（城市/城际，客运/货运）等重点行业，C³IAM/NET 模型还对一次能源供应、热力、造纸、农业、其他工业等进行了详细刻画，此处不逐一介绍。

综合集成各个终端行业的电力需求以及为了提供这些电力需求电力行业产生的电力消耗，最终得到全社会用电量变化曲线（如图 17 所示）。结果表明，到 2030 年时，电力需求总量将达 10.9~12.2 万亿千瓦时，此后需求增速有所下降；2050 年后逐渐趋于平缓，至 2060 年总量达到 12.0~21.5 万亿千瓦时。从用电结构变化来看，货运、客运和其他工业部门的电能替代深度发展，是电力需求增长的主要来源，也是 2060 年用电占比较高的部门。

在持续增长的电力需求下，电力部门低碳转型面临更大挑战。电力排放总量（不含终端行业自备电厂的排放）需快速进入平台期，并在 2027—2029 年实现碳达峰，峰值控制在 45 亿吨 CO₂ 以下。2035 年后进入深度减排阶段，并在 2060 年实现电力近零排放（图 17）。

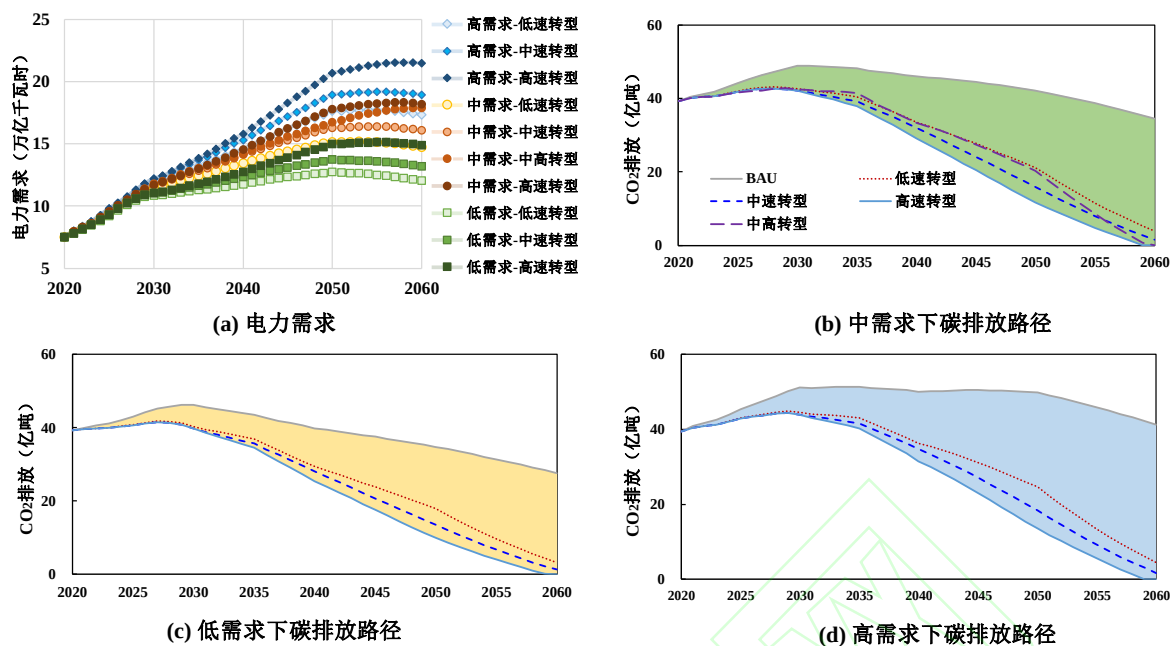


图 17 电力需求及不同需求模式下电力行业 CO₂ 排放路径（不含终端行业自备电厂排放）

为实现这一减排路径，发电技术布局需持续优化，如图 18 所示。在中等电力需求下，考虑低速、中速和高速电力转型情况，煤电机组总量控制在 12 亿千瓦以内，并在 2040 年后加速退出，2060 年保留 2.4-3.6 亿千瓦装机规模，配置 CCS 作为灵活性调峰电源。电力 CCS 技术不可或缺，需在 2030 年后加快部署，2060 年 CO₂ 捕集能力达 6.6-7.9 亿吨。天然气发电作为清洁火电需快速发展，2060 年约为 2020 年装机规模的 6 倍。核电也需有序扩建，2030 年达 1.2~1.4 亿千瓦，2060 年进一步扩张至 2.2-3.0 亿千瓦。风电和光伏装机仍需加快建设，2030 年分别达到 9.5-10.0 亿千瓦和 11.7~13.2 亿千瓦，2060 年分别达 27.8~37.3 亿千瓦和 32.1~49.4 亿千瓦。

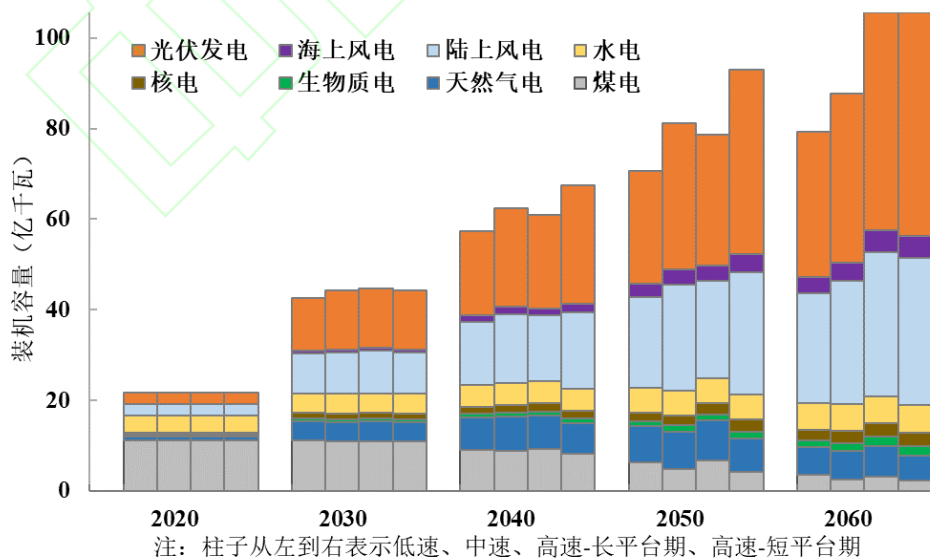


图 18 电力行业未来装机结构（中需求模式）

三、碳达峰碳中和时间表和路线图

根据上述结果,本文进一步提出实现中国 2030 年前碳达峰、2060 年碳中和的时间表和路线图,为国家超前部署提供科学依据。具体如图 19 所示。



注: 非电力行业的碳排放均包含电力热力生产的间接排放

图 19 重点行业碳达峰碳中和时间表和路线图

1.电力行业。建议电力行业在 2029 年前实现碳达峰,峰值不超过 45 亿吨 CO₂,继续扩大风电、太阳能发电的装机容量,实现以新能源为主体的新型电力系统建设,但同时保留一定比例的火电,并加装 CCS,用于灵活性调峰电源和安全保障,电力行业 2060 年前应实现近零排放。

2.工业部门。建议钢铁行业 and 有色行业在“十四五”期间达峰,并尽早达峰,化工行业争取在 2030 年前实现碳达峰。钢铁行业 CO₂ 排放峰值不超过 20 亿吨,铝冶炼行业峰值控制在 6.2 亿吨以内。钢铁行业短期主要加快推进低碳烧结技术、高炉喷煤技术、轧钢加热炉蓄热式燃烧技术等的改造升级,中长期主要依靠电弧炉炼钢、氢能炼钢和 CCS 技术的集成应用。水泥行业短期应优先推广先进节能减排技术和能源综合利用技术,中长期加快燃料替代、原料替代、CCS 技术等深度减排措施的重点部署。铝冶炼行业是有色行业中碳排放最高的行业,未来应继续推广先进技术并发展水电铝合营模式,扩大再生铝替代原铝规模。化工行业由于部分关键产品仍然面临需求快速增长的趋势,应加快发展轻质化原料、先进煤气化技术、基于低碳制氢和 CO₂ 利用的生产技术、及 CCS 技术。

3.民生部门。建议建筑和交通等民生部门进一步加快电气化进程,建筑部门争取 2030 年前碳达峰,峰值不超过 22 亿吨 CO₂,交通部门碳排放总量在“十五五”期间争取达峰,峰值亦不超过 22

亿吨 CO₂。建筑部门应继续提高采暖制冷效率，大幅提升电气化水平，因地制宜发展分布式能源；交通部门应继续优先铁路、水路运输，发展电动客/货车、氢燃料车、生物燃料飞机和船舶等先进技术。

为加快推动各个行业顺利实现低碳技术和措施的实施，从而确保全国碳达峰碳中和目标的达成，需进一步确立低碳发展在国家法律法规和重大决策部署中的地位，深度推进各行业重点低碳技术、储能与 CCS 等技术的科技创新，加快突破性技术的规模化应用，健全低碳发展的激励机制，科学评估各地区能源资源潜力，结合资源禀赋，因地制宜，在碳排放总量和强度控制的基础上，制定各地区实现碳中和目标的多能互补能源长期战略，从顶层设计和体制机制上为安全、低成本降碳提供科学支撑。

本文对各个行业的碳减排技术和措施进行优化组合，提出了兼顾经济性和安全性的中国碳达峰碳中和时间表、路线图。需要说明的是，本文主要考虑了当前国内主流技术、国际先进技术以及当前处于研发有待推广的突破性技术，未来，随着更多颠覆性技术的出现，对中国的减排路径可能产生显著影响。因此，应持续追踪碳减排技术和措施的类别及发展进程，及时更新和调整中国的碳中和路线图。

参考文献:

- [1] MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P, PIRANI A, et al. IPCC. climate change 2021: the physical science basis. contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 2021.
- [2] WEI Y M, HAN R, WANG C, et al. Self-preservation strategy for approaching global warming targets in the post-Paris agreement era[J/OL]. Nature Communications, 2020,11: 1624. <https://www.nature.com/articles/s41467-020-15453-z>.
- [3] WEI Y M, KANG J N, CHEN W. Climate or Mitigation Engineering Management[J/OL]. Engineering, 2021. <http://engineering.ckceest.cn/default/page/loadPageIndex?pageId=ab4265bb601844d298ec9cd21f046661&id=34204>.
- [4] WEI Y M, CHEN K, KANG J N, et al. Policy and management of carbon peaking and carbon neutrality: A literature review[J]. Engineering, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.12.018>
- [5] 魏一鸣, 廖华, 余碧莹, 等. 中国能源报告(2018): 能源密集型部门绿色转型研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [6] 余碧莹, 赵光普, 安润颖, 等. 碳中和目标下中国碳排放路径研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021,23(2): 17-24.
- [7] 张呈尧. 水泥行业节能减排路径模拟方法及其应用研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [8] 易兰丽君. 造纸行业节能减排路径模拟方法及其应用研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2020.
- [9] 吴郢, 余碧莹, 邹颖, 等. 碳中和愿景下电力部门低碳转型路径研究[J]. 中国环境管理, 2021,3: 48-55.
- [10] AN R Y, YU B Y, RU L, et al. Potential of energy savings and CO₂ emission reduction in China's iron and steel industry[J]. Applied Energy, 2018, 226:862-880.
- [11] CHEN J M, YU B, WEI Y M. Energy technology roadmap for ethylene industry in China[J]. Applied Energy, 2018, 224:160-174.

- [12] LI X, YU B Y. Peaking CO₂ emissions for China's urban passenger transport sector[J]. Energy Policy, 2019, 133:110913. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421519304914>.
- [13] YU B Y, ZHAO Z, ZHANG S, et al. Technological development pathway for a low-carbon primary aluminum industry in China[J/OL]. Technological Forecasting and Social Change, 2021, 173. https://econpapers.repec.org/article/eetefoso/v_3a173_3ay_3a2021_3ai_3ac_3as0040162521004844.htm.
- [14] TANG B J, LI R, YU B Y, et al. How to peak carbon emissions in China's power sector: a regional perspective[J]. Energy Policy, 2018, 120:365-381.
- [15] TANG B J, LI X Y, YU B Y, et al. Sustainable development pathway for intercity passenger transport: a case study of China[J/OL]. Applied Energy, 2019, 254. <https://ideas.repec.org/a/eee/appene/v254y2019ics0306261919313194.html>.
- [16] TANG B J, GUO Y Y, YU B Y, et al. Pathways for decarbonizing China's building sector under global warming thresholds[J/OL]. Applied Energy, 2021, 298. https://econpapers.repec.org/article/eeeappene/v_3a298_3ay_3a2021_3ai_3ac_3as0306261921006371.htm.
- [17] ZHANG C Y, YU B Y, CHEN J M, et al. Green transition pathways for cement industry in China[J/OL]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 166: 105355. <http://www.socolar.com/Article/Index?aid=100085767706&jid=100000004625>.
- [18] ZHAO G, YU B Y, AN R, et al. Energy system transformations and carbon emission mitigation for China to achieve global 2 °C climate target[J/OL]. Journal of Environmental Management, 2021, 292: 112721. <https://sme.bit.edu.cn/2018gb/research/researcha/publications/06560884fd8945428543cd1614692956.htm>.

Roadmap for Achieving China's Carbon Peak and Carbon Neutrality Pathway

WEI Yiming¹, YU Biying¹, TANG Baojun¹, LIU Lancui², LIAO Hua¹, CHEN Jingming¹, SUN Feihu¹,

AN Runying¹, WU Yun¹, TAN Jinxiao¹, ZOU Ying¹, ZHAO Zihao¹

(1. Beijing Key Lab of Energy Economics and Environmental Management, Center for Energy and Environmental Policy Research, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. School of Business, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Achieving carbon neutrality is a complex project, facing the challenges of very limited time and heavy task. To formulate a scientific roadmap for emission reduction, it requires us to balance the synergy between long-term and short-term actions, emission reduction and economic development, and local and overall targets. To this end, this study applied the National Energy Technology Model (C³IAM / NET) to put forward the timetable and roadmap for achieving China's carbon peak and carbon neutrality goal that takes into account the cost-effectiveness and safety. The specific action plan of national carbon emission path, sectoral emission reduction responsibility, and key technology layout is clearly present here. The results show that if the natural carbon sink is 1-3 billion tons available in 2060, China needs to achieve the carbon peak during 2026-2029 depending on the scenarios of the socio-economic development; the carbon emissions in 2060 are mainly from power industry, iron and steel industry, chemical industry, transportation sector, etc.; and it is necessary to accelerate the energy transition towards clean energy, but coal will still be the largest energy source in China before 2040, which needs to be no less than 44% in 2030. In addition, this study further gives the carbon emission path and technology layout plan for key industries

corresponding to the national carbon peak and carbon neutrality roadmap, such as iron and steel, cement, nonferrous metals, chemical, and power industry as well as building and transportation sectors. This can provide a scientific basis and operational action plan for China to lead and participate in global climate governance.

Keywords: carbon peak and carbon neutrality; national energy technology model; timetable; roadmap; key industry; technology layout

[责任编辑：孟青]

