

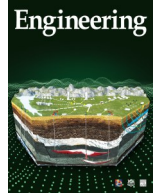


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Frontier Research on Carbon Neutrality—Review

碳达峰、碳中和研究进展与综述

魏一鸣^{a,b,c,*}, 陈楷元^{a,b,c}, 康佳宁^{a,b,c}, 陈炜明^{a,b,c}, 王翔宇^{a,b,c}, 张小曳^d

^a Center for Energy and Environmental Policy Research, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

^b School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

^c Beijing Key Laboratory of Energy Economics and Environmental Management, Beijing 100081, China

^d State Key Laboratory of Severe Weather & Key Laboratory of Atmospheric Chemistry of China Meteorological Administration, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 June 2021

Revised 11 November 2021

Accepted 19 December 2021

Available online 8 March 2022

关键词

碳达峰

碳中和

系统综述

碳减排管理

摘要

碳达峰与碳中和目标(简称双碳目标)的提出为我国经济社会高质量发展指明了方向。实现碳达峰、碳中和,是一项长期而复杂的系统工程,离不开相关科学研究的支撑与指导。现有研究虽从多方面对如何实现碳达峰、碳中和这一依赖于社会经济系统化发展的命题进行了分析与讨论,但研究庞杂而分散。因此,有必要从历史文献中对这个重要命题进行系统回顾、梳理和总结,厘清相关研究发展脉络,深入挖掘其中热点和难点,凝练基础科学问题,为后续研究明晰方向,为实现碳达峰、碳中和提供支撑。基于此,本研究构建了一套知识集成分析框架,通过对国内外1105篇碳达峰、碳中和相关文献进行汇总梳理,从时空维度追踪领域内国际趋势与发展规律,从技术维度剖析研究热点及主题变迁,从行业维度挖掘支持双碳目标的关键发力点。在此基础上,凝练并提出碳达峰、碳中和研究的关键科学问题,并对我国实现双碳目标的行动方案、优先任务和政策措施提出对策建议。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

全球气候变化是人类迄今面临的最重大的环境问题,也是21世纪人类面临的最复杂的挑战之一[1]。根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告,2011—2020年全球地表平均温度已较1850—1900年平均温度升高了1.09 °C。由于温室气体(GHG)排放带来的许多改变在数百年甚至近千年的时间内不可逆转,尤其是海洋、冰盖和全球海平面的变化。国际社会围绕减缓全球变暖进行了多轮气候谈判,随着《京都议定书》《巴黎协定》等

一系列国际条约的通过和签署,各国在减排问题上取得了实质性进展。但是,多项研究表明,即使各缔约方均兑现2015年《巴黎协定》中提交的国家自主减排贡献(NDC)方案,全球平均温升也可能达到3 °C以上,无法实现2 °C或1.5 °C温控目标[2–5]。因此,要想将大气中温室气体浓度稳定在能实现地球可持续发展的水平,国际社会仍任重道远。

严峻的减排形势使得未来全球各国温室气体可排放空间越来越小。IPCC评估报告指出,为实现将全球平均温升控制在低于工业化水平前1.5 °C以内,各国需在2050年

* Corresponding author.

E-mail address: wei@bit.edu.cn (Y.-M. Wei).

前实现二氧化碳（CO₂）净零排放，即实现碳中和[1]。全球已有124个国家在2020年11月举行的世界气候峰会前做出了碳中和承诺[6]。其中，大部分国家或地区承诺将2050年作为实现碳中和的时间节点，如欧盟、美国、英国、加拿大、日本、新西兰、南非等。中国作为负责任的大国，也多次向国际承诺将力争于2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和。

随着各国纷纷做出碳中和承诺，应对气候变化这一课题站在了新的历史交汇点，迎来重大机遇期；当下已然成为汲取并凝练既有知识，以指导未来碳达峰、碳中和研究的最佳时机[7]。基于此，本研究通过系统分析总结碳达峰与碳中和相关研究，凝练面向碳中和的重大基础科学问题及战略需求，对未来重点研究方向提出若干思考。

为回答上述问题，需首先明晰碳达峰与碳中和的定义？这将直接决定本文的研究范畴与综述对象。基于IPCC报告与国际共识，本研究将碳达峰定义为：在某一个时间点，CO₂排放不再增长而达到峰值，之后逐步回落，这一时间点为达峰时间，对应的CO₂排放量为CO₂峰值；将碳中和定义为：与某一主体相关的人为CO₂排放量与人为CO₂清除量相平衡的状态[1,8-9]。

随之而来的问题是碳达峰与碳中和目标（简称双碳目标）间存在怎样的内在逻辑关联？从客观规律性来看，双碳目标具有深厚的理论渊源和现实基础，蕴含了经济增长与碳排放脱钩理论及环境库兹涅茨曲线（EKC）假说等经济学内涵[10-11]。碳中和目标下的碳排放曲线峰值点在一定程度上可类比为EKC曲线中的环境拐点（图1）。从主观能动性来看，双碳目标也符合人类在满足基本物质需求后对美好生活的追求。良好的生态环境已成为全球经济社会可持续发展的支撑[12]。此外，由于实现碳达峰的时间点及其峰值水平直接决定了从碳达峰到碳中和转变的可用时间和需要完成的减排体量，因此，必须在碳中和目标的牵引和约束下对碳达峰行动方案进行统筹规划。

另一个关键问题是实现减排目标的具体途径有哪些？

已有大量学者通过对社会经济系统转型情景进行预测，采用各类综合评估模型（IAM）得到实现减排目标的合理路径。但当前研究呈现碎片化、场景化、主题化等特征[13]，加之各经济体在发展阶段、技术进步、能源需求、政策措施以及气候风险等方面存在不确定性，导致许多研究在面对相同预测情景时，分析结果间也缺乏一致可比性。总而言之，当前庞杂而分散的研究结果仍难以系统性回答如何实现碳中和这一依赖社会经济系统一体化发展的命题。因此，亟需一个针对碳达峰、碳中和研究的系统性综述，以便读者快速把握相关研究发展脉络，梳理未来研究重点与难点，并引导相关学者更加高效、精准、系统地开展后续研究。

综上，本研究旨在回答两个核心问题：一是针对碳达峰与碳中和研究进展如何？二是未来有哪些重要发展方向？为回答上述问题，本文从时空维度追踪相关领域研究的国际趋势与发展规律，从产业维度剖析研究现状及热点变迁，并挖掘支撑双碳目标实现的路径与着力点。进而厘清双碳目标的科学内涵，提炼关键科学问题。最后面向未来双碳目标理论研究及实践需要，围绕实现路径、优先任务及政策措施等方面提供决策支撑。

2. 文献计量分析方法

本文采用的一套自主开发的知识集成分析框架，可被普适地应用于结构化的文献分析[14]。该方法框架整合了文献计量学和类型学分析工具（图2），可用于分析一个学科的结构、特征及其演变过程，并可通过绘制知识图谱评估当前研究进展与规律。

本研究的文献数据来源于Web of Science Core Collection（WoS核心收录）中的科学引文索引扩充版和社会科学引文索引数据库。WoS数据库是最著名的电子文献数据库之一，包含了广泛的自然和社会科学方面的学术资料，已被广泛应用于科学计量分析[15-17]。

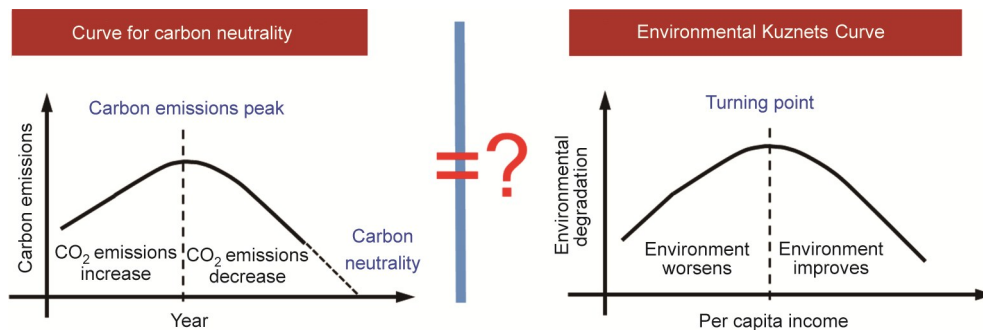


图1. 碳达峰与碳中和的经济学内涵。

本文分析的第一步是通过关键词检索，从 WoS 文献数据库中采集可能与本综述主题相关的全部文献，具体检索策略可参见附录 A 中的第 S1 节。第二步，进行文献除噪，基于 WoS 数据库自定义的研究方向，仅保留初筛文献中与能源、资源、政策、经济和生态环境相关方向的文献（详见附录 A 中的表 S1）。接着，本文作者对剩余文献的摘要和主要内容进行了“背靠背”的独立多轮审查，人工剔除不相干文献，得到碳达峰相关文章 187 篇，碳中和相关文章 918 篇。

然后，采用类型学分析，对保留下来的每篇文献根据研究主题、关注国家或地区、特定部门或行业、支撑举措（12 种）与关键时间节点等 5 个方面进行手工编码。在这一步中，评审小组的每个成员先分别对文献进行类型分析，再通过面对面的讨论达成共识。

最后，通过知识图谱将综述结果进行可视化分析，从多维度视角评估该领域研究现状，对全球进展和热点议题进行分析，进而提炼出关键科学问题。

3. 研究趋势及热点问题

基于提出的知识集成分析框架，本文首先对碳达峰、碳中和研究领域的发文趋势与热点进行文献计量分析，以衡量该领域的知识存量和表征规律。

3.1. 时空发展规律

在时间维度（图 3）上，最早一篇关于碳中和主题的研究发表于 1995 年，Schlamadinger 等[18]尝试通过构建碳中和评价指数来回答“替代化石燃料的生物质能源在全

生命周期是否真的为碳中和”这一争议。在过去的 15 年间，碳中和逐渐从一个科学概念转变成应对气候变化讨论的中心议题。2008 年，英国通过《气候变化法案》，成为首个为温室气体减排立法的国家[6]。2018 年，IPCC 发布《全球变暖 1.5 °C 特别报告》，给出了碳中和的明确定义[2]。在国际公约的推动下，各国也纷纷制定自己的碳中和目标，相关的科学研究也在快速增加。

相比之下，碳达峰研究起步较晚，最早的一篇研究发表于 2000 年，De Vries 等[19]基于 1994 年 IPCC 报告中的 IS92 情景，采用 IMAGE（Integrated Model to Assess the Global Environment）综合评估模型预测全球碳排放将于 2040 年达峰，峰值约为每年 128 亿吨碳，并预计照此趋势至 2100 年平均升温仅为 1.4 °C。然而，碳排放的实际增长已经大大偏离了他们最初的预想。对于发展中国家而言，在保持经济高速发展的前提下尽早实现碳排放达峰是一个极为艰巨的任务。2014 年，中国在《中美气候变化联合宣言》中首次提出到 2030 年实现碳达峰的目标。在此推动下，越来越多的科学研究聚焦碳达峰实现路径与峰值预测，以期为中国为代表的发展中国家献计献策。

在空间尺度（图 4）上，本文依据研究对象的地理分布特点将综述文献划分为三个尺度，范围由大到小依次为全球、国家和区域尺度。结果表明，碳达峰研究主要聚焦国家尺度，尤其中国受到的研究关注较多，约占 66%。这其中，研究话题主要聚焦于中国各能源密集型部门[20–21]、低碳试点城市[22]和城市群[23–24]的达峰路径。由于大多数发达国家已经达到了排放峰值，碳达峰研究目前主要集中在排放仍在增长的发展中国家。相比之下，在碳

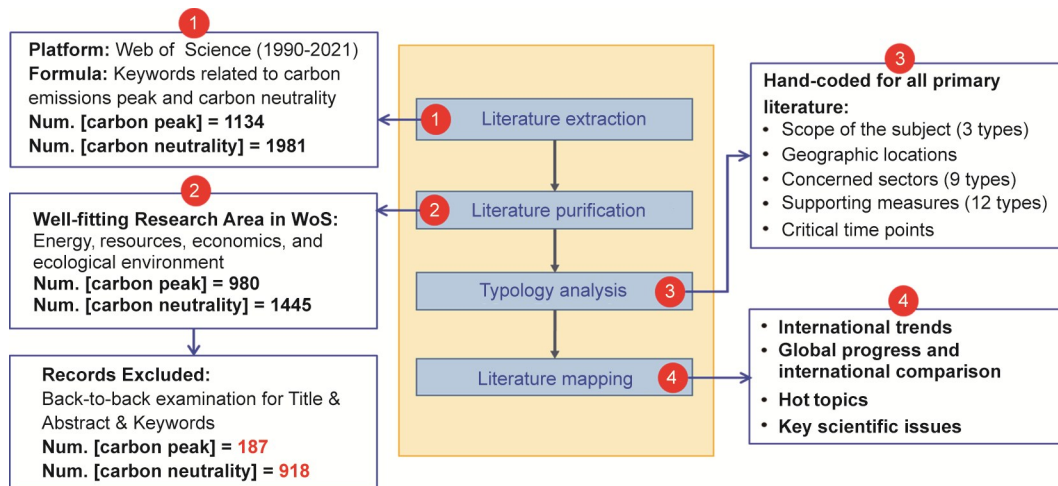


图 2. 知识集成分析系统框架。Num. 表示此项分析中保留的研究的数量。主要包括三个分析维度：时间维度、行业维度、技术维度。9 个行业包括：电力、钢铁、运输、水泥、化工、建筑、住宅、农业和其他。12 种支撑措施包括：行为改变；废弃物零碳处理；零碳工艺；零碳材料；碳中和示范；生物质；碳捕集、利用与封存（CCUS）；生态系统碳汇；其他负排放技术（NET）；生物质能耦合碳捕集与封存（BECCS）；人工光合作用；能源结构优化。

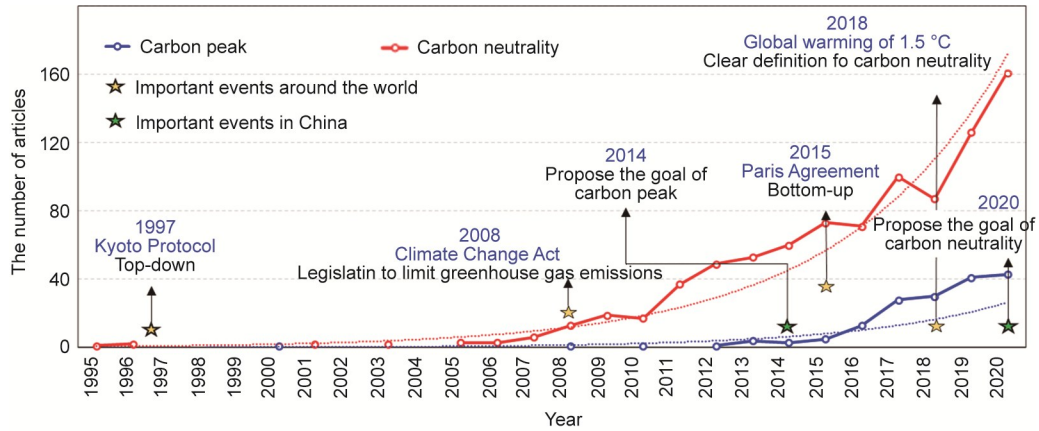


图3. 碳达峰与碳中和研究发文趋势。

中和研究中，对区域尺度的关注有所增多，以欧盟成员国为代表的发达国家是碳中和研究的重点对象。

3.2. 重点行业

从行业维度（图5和图6）看，碳达峰与碳中和研究的关注重点与发展趋势也不相同。早期的碳达峰研究多关注交通部门，随后研究重点逐步转向电力部门。而居民部门[25–26]与水泥部门[27–28]的碳达峰路径与峰值水平也在近几年成为研究热点。

对于碳中和研究而言，对电力与交通部门实现碳中和的可行技术路径与综合影响的研究体量最大。不同的是，农业、建筑和化工部门已成为碳中和研究的新兴热点[29–31]。正因为电力部门（44.3%）、工业部门（22.4%）和陆上运输部门（20.6%）是全球CO₂排放的主要贡献者，这些传统的能源密集型部门对于实现碳达峰目标至关重要。尽快达到排放峰值可以为实现碳中和预留更多的准备时间[32]。正如前文所述，对于很多发展中国家而言，实现碳中和目标时间紧，任务重。因此，迫切需要对第一、二、

三产业和基础设施进行全面绿色升级，同时在农业、制造业、服务业和重要技术领域推广清洁生产以及可再生能源的使用。

3.3. 实现碳达峰与碳中和的支撑举措

为抓住实现碳达峰与碳中和的主动权，需要抓好发力点（图7）。针对碳达峰研究，本文总结出4大类支撑举措，即零碳技术突破、减排市场机制、能源市场改革与能源系统优化。其中，能源系统优化最为关键。同时，人们愈加认识到除技术手段外，市场手段也必不可少[33]。

对于碳中和而言，研究主要关注以下12项支撑举措的实施效果、技术组合与系统影响：行为改变，废弃物零碳处理，零碳工艺，零碳材料，碳中和示范项目，生物质，碳捕集、利用与封存（CCUS），生态系统碳汇，生物质能耦合CCUS（BECCS），其他负排放技术（NET），人工光合作用，能源结构优化。碳中和时代要求在满足人类能源需求并保持经济竞争力的前提下，实现经济增长与CO₂排放的脱钩。能源系统发展惯性大、路径依赖性强。

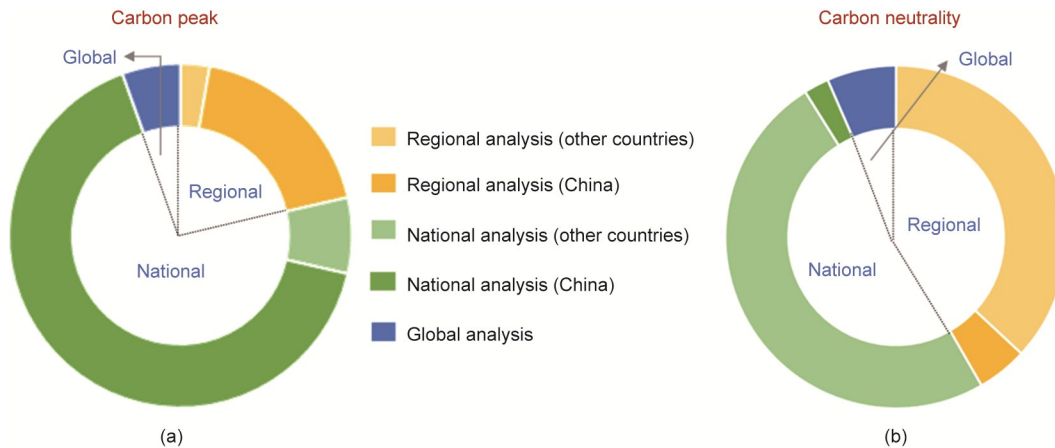


图4. 空间尺度上碳达峰与碳中和的研究兴趣。(a) 在碳达峰方面的所有研究中，地区、国家和全球层面的研究分别占比21.4%、73.1%和5.5%；(b) 在碳中和方面的所有研究中，地区、国家和全球层面的研究分别占比41.7%、51.8%和6.5%。

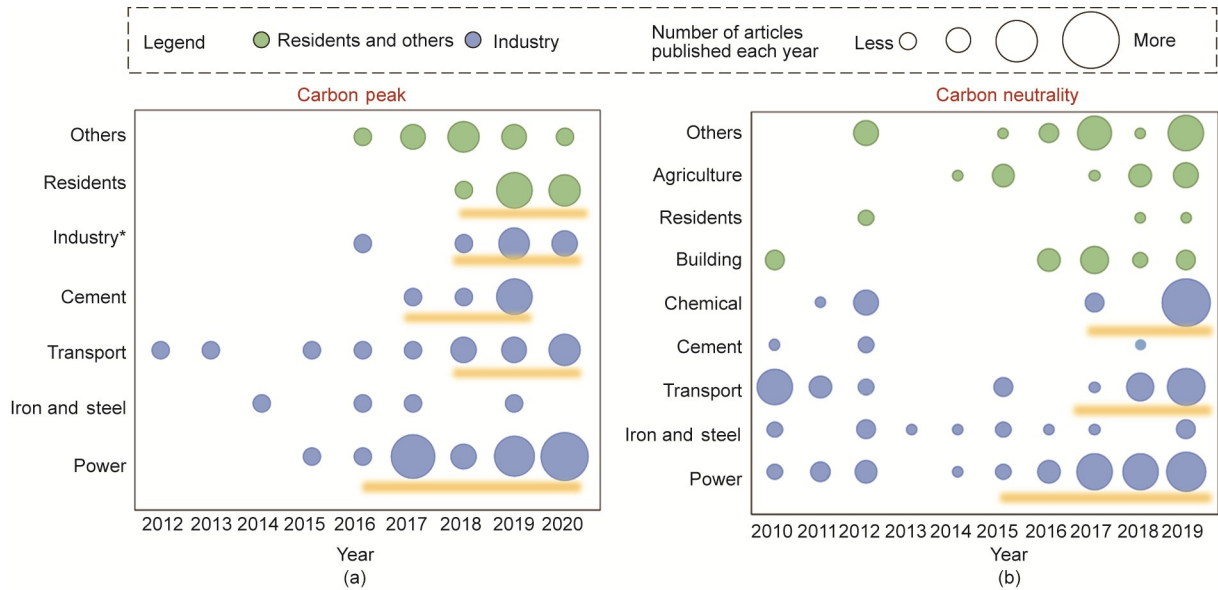


图5. 基于行业视角的碳达峰、碳中和研究热点。(a) 碳达峰；(b) 碳中和。*表示专注于整个工业领域而非特定行业的研究；每个领域相关的文章数量列于附录A中的表S2和表S3。

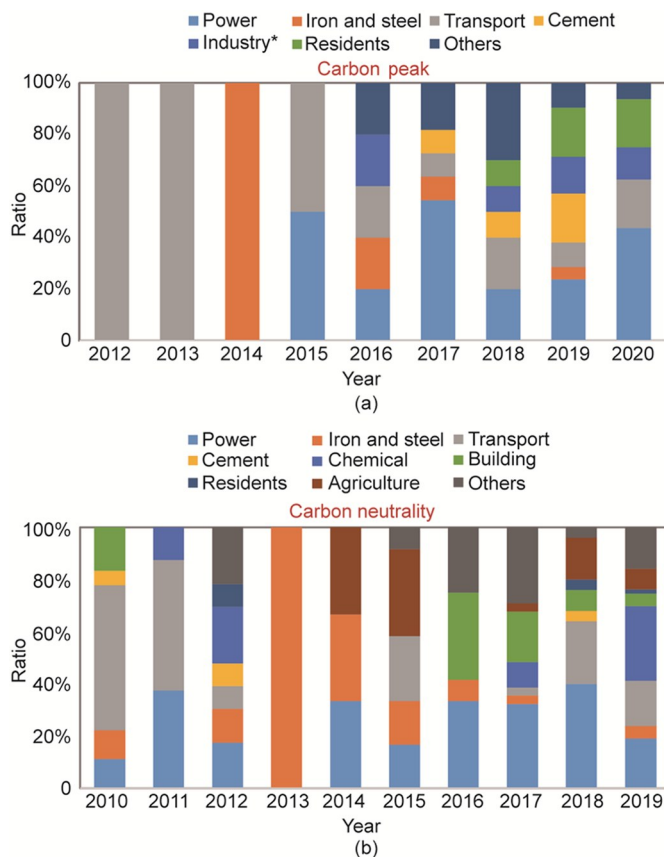


图6. 碳达峰、碳中和研究对不同部门关注度的动态演化。*表示专注于整个工业领域而非特定行业的研究。

因此，与发达国家相比，实现中国碳中和承诺是一项极具挑战性的任务[34]。在新发展模式下，技术进步和创新将是推动能源革命和转型发展的根本动力，也是实现碳中和目标的关键驱动力。基于对科学研究的总结，研究发现零碳

工艺、生物质能源、CCUS与NET等正在成为新兴热点话题。如何将它们与传统能源系统进行有机耦合，以帮助能源结构实现根本性优化是未来研究值得探讨的重要方向。

4. 新兴研究前沿

基于文献计量结果，本文在研究热点基础上，进一步遴选出了4个新兴前沿，通过分析解读挖掘其中的优先任务。

4.1. 负排放技术

根据2020年IPCC报告，如果要实现《巴黎协定》的1.5℃升温愿景，负排放技术不可或缺[35]。负排放技术可以从大气中去除和封存CO₂，是实现碳中和的关键技术。负排放技术不仅关乎全球气候治理和生态安全，还可能成为未来科技竞争的新领域。考虑负排放技术大规模部署的可行性与经济性，现有文献重点关注了BECCS、生物炭、直接空气捕捉和生态系统碳吸收等负排放技术，并从管理科学研究视角出发，面向成本效益、资源消耗、生态影响等方面探讨了负排放技术的发展潜力与系统规划方案。

具体地，针对负排放技术经济性的分析主要集中在评估具体技术的成本效益[36–37]，以及利用综合评估模型剖析技术实施的宏观经济影响[38]。现有研究基于不同的能源成本和技术参数假设，对特定负排放技术实施方案的成本进行了估算或比较，并将其纳入应对气候变化的最优组合方案中评估系统的福利与损失变化[39–40]。但是，

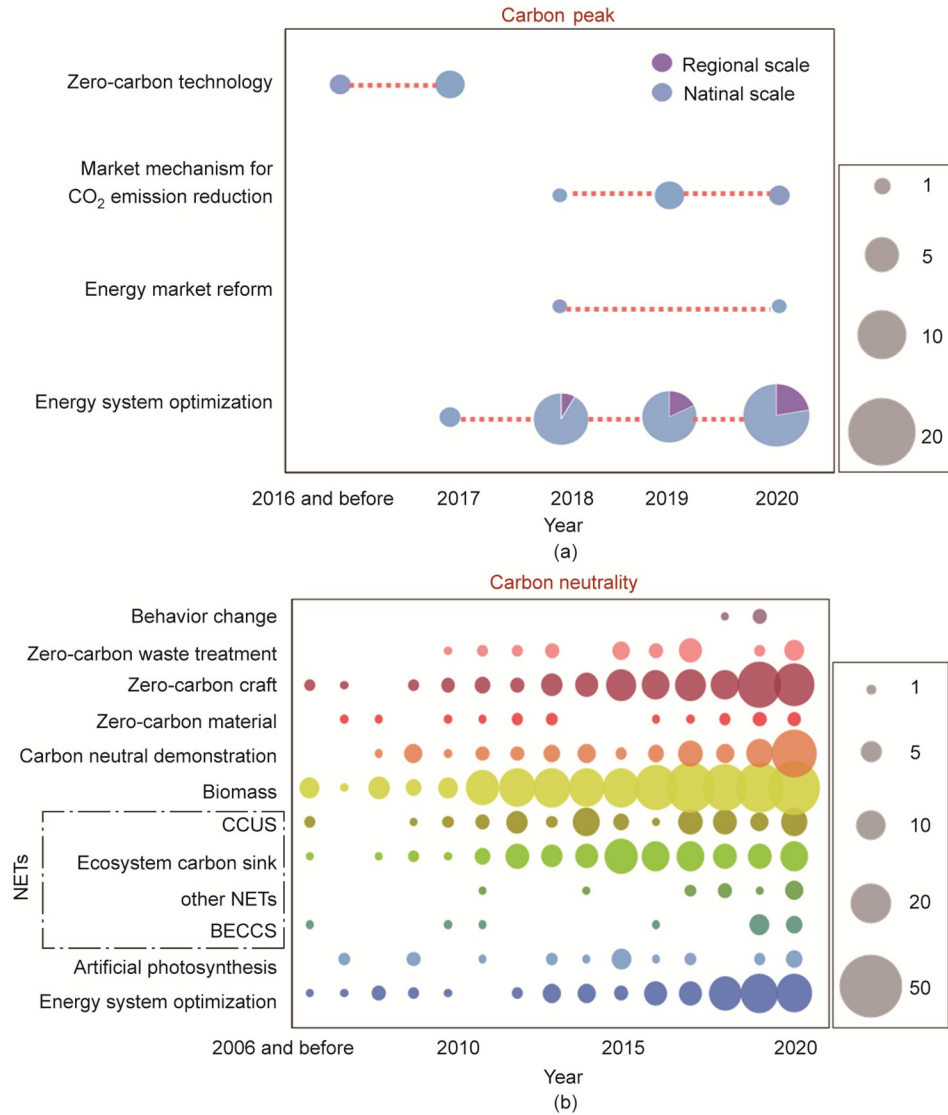


图7. 实现双碳目标的关键支撑举措。年份是指相关文献发表的年份；圆圈的大小表示发表的研究的数量。

相关研究已表明，负排放技术发展可能伴随资源消耗问题，一些基于自然生态系统的负排放技术可能引发次生风险，如对生物多样性、土地利用方式和生态系统的外部影响[41–42]。基于这一担忧，研究人员开始采用地理信息分析、全生命周期评价、物质流分析等模型，探讨负排放技术发展所需外部资源的可获得性；同时定量刻画不同技术规模下的外部生态影响量级[43–44]。

以上研究为负排放技术规模化部署提供了指导。然而，这些工作在研究对象、研究视角和研究方法上都相对独立，研究结果之间的共性特点和科学规律尚需进一步探索。基于上述研究基础，本文提出三个未来研究方向：①负排放技术发展与社会-经济-生态系统的相互反馈刻画；②负排放技术部署与可持续发展间的协同；③负排放技术发展中引发的伦理与公平问题。

4.2. 零碳技术/工艺

工业行业一直是碳排放的重要贡献者，传统工业仍存在高投入、高消耗、高排放的发展特征。双碳目标必将倒逼这些碳密集型传统工业进行技术创新和重大变革。由于节能降耗存在理论上限，因此碳中性技术的研发与推广正受到青睐。其中，碳中性甲醇工艺、新型零碳燃料电池、光电化学水解、绿氢制取、零碳建筑材料、生物基复合材料等是当前研究热点。围绕这些技术，研究者从工艺管理的各个方面开展了一系列研究。

传统工业要实现转型升级，绿色制造是必由之路。其中，低碳原料替代和工艺清洁化改造是降低工业过程碳排放的重要技术路线与主攻方向[45]。此外，科学家也正在寻找新的方法以制造新型的碳基燃料、催化剂、化学品和其他材料，用以将CO₂从污染物转变为一种有用资源[46–

47]。对 CO₂ 进行高值化利用，不仅可减少碳排放、缓解温室效应，还能产生显著的社会经济价值。但一个关键的管理问题是如何确定这些工艺是真正低碳或零碳的，这要求研究人员在工艺研发过程中需要同时兼顾标准设计与技术要求两方面。碳中和是一个全生命周期的概念，从这一角度讲，强化全生命周期碳排放核算标准与管理体制是实质推动工艺绿色升级的先行条件[48]。在此基础上，可以实现对不同应用层面（企业、行业与国家）碳足迹进行科学核算与评估，有效支撑市场化碳减排机制的建立与完善，从而在国际气候谈判中掌握话语权。

4.3. 碳定价机制

市场机制是控制 CO₂ 排放的有效手段之一。目前，碳定价机制主要包括价格型工具（如碳税）和数量型工具（如碳交易市场）。据世界银行统计，2020 年全球已有 61 项碳定价机制正在实施或计划实施，其中 31 项关于碳排放交易体系、30 项关于碳税，覆盖 120 亿吨 CO₂，约占全球温室气体排放量的 22% [49]。

由于各国国情不同，不同定价工具适用的经济部门也不同。研究人员就特定市场主体比较了两种碳定价机制的实施效果与路径[50–51]，从而为规模更大且充满流动性的全球交易市场提供决策支撑。碳定价政策的实施会产生相应成本。大量研究表明，实施碳定价机制可能会引发对未来区域和产业发展不公平性的担忧[52]。尤其对于正处在转型时期，且社会贫富差距较大的发展中国家，碳定价机制的收入分配效应需要进行更加谨慎的事前评估[53–54]。

企业是市场机制的行为主体。在碳市场中，企业碳管理的效果将直接决定控排企业在碳市场中的生存情况。对于一个国家而言，企业碳管理核心包括企业范围的合理选取以及碳排放数据的准确核查与监测[55]。基于此，才能针对不同企业的减排潜力制定合理的减排目标。而无论采取何种定价机制，科学、公平与高效永远都是市场机制设计的基础原则，也是保障市场力量真正发挥减排作用的基石。

4.4. 示范与标准

示范是集成技术、产业、政策等多维要素的可复制、可推广的实施范例。实现碳中和是一个系统工程，需要长期性和全局性思维指导国家、行业、企业与个人等多主体在各个层面相互协作。示范是论证一个碳中和系统可持续发展潜力的最好表征。世界各地正在各种领域开展不同类型的示范与试点。对于示范项目而言，负排放技术、零碳技术和碳定价机制等都是实现碳中和目标的可行选择。在

大型赛事方面，2022 年北京冬奥会使用 100% 绿色能源或可再生能源，并通过进一步采用 CO₂ 跨临界直接冷却系统、碳市场交易、场馆区域生态修复等方式实现了整个比赛的碳中和。坐落于美国的苹果公司新总部将采用 100% 的可再生能源提供能量，为企业层面的碳中和方案提供范本[56]。从校园实践上看，泰国 VISTEC 大学通过智慧储能系统集成水上光伏、屋顶光伏、充电桩等基础设施，实现了校园零碳电力供应。德国 Greifswald 大学也在积极推行“碳中和大学”计划[57]，为智慧校园和零碳建筑推广提供可行的技术路径。在城市层面，研究人员通过结构化访谈对具有碳中和引领作用的城市，如对以垃圾清洁处理为代表的芬兰赫尔辛基、坐落在沙漠中的零碳新城马斯达尔，以及素有“绿色国度”美称的哥斯达黎加首都圣何塞的建设进行了调研，以期探索碳中和城市建设的最佳方案[58–59]。虽然现有研究围绕碳中和示范及配套技术管理问题进行了一些讨论，但未来还有几个方面亟待关注，如碳中和示范工程建设管理及示范区内能源供需管理、碳中和技术市场化推广及其科学布局，以及不同类型碳中和示范项目的支撑政策优选。

5. 面向碳中和的关键管理科学问题

实现碳达峰与碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革。在这场关系人类命运共同体的行动中，不同国家已经给出了各具特色的行动方案与纲领，提供了丰富的实践案例。但无论选择何种实践路径，实现碳中和都需要科学的思想、科学的数据和科学的评估给予支持与指导。双碳目标不仅对经济社会系统的生产发展、技术研发提出了新挑战，也对统筹管理的科学性提出了更高要求，需要充分发挥管理科学的前瞻性思维、全局性谋划规划、战略性布局、整体性推进等优势，才能避免战略误区，以最低社会成本和最快速度实现双碳目标。基于此，本文抛砖引玉提出面向双碳目标的 5 个重要管理科学问题。

5.1. 双碳目标的内在联系和关键影响因素

加速实现碳达峰将为以低成本实现碳中和赢得时间和信心。碳排放峰值水平及达峰时间将直接决定实现碳中和目标的紧迫性和艰巨性。基于此，针对重点行业的碳达峰时间表与路线图的研究备受关[60–61]。当前距离中国承诺实现碳达峰目标的时间已不足 10 年，考虑能源利用模式、技术路线、产品性能等方面的异质性，不同行业在全国实现碳达峰目标中的作用有别、进程不一[6,62]，应支持有条件的地方、关键行业和重点企业率先实现碳达峰

峰。在管理目标的制定上，既要考虑不同行业之间的差异，避免简单“一刀切”，也要对同一行业的所有企业一视同仁，在同一标准和尺度下开展碳减排工作。在此基础上，部分研究对不同的达峰策略开展了经济效益和环境影响评价，从技术措施、改造成本、环境效益等多个维度综合优化达峰路径[63–65]。

区别于自下而上的研究思路，一些研究采用分解分析、指数构建和机器学习等经典方法识别碳排放的关键驱动因素，量化并评估长期减排潜力，总结符合区域或行业特征的代表性减排路径[66–67]。随着研究深入，对驱动低碳经济发展主要因素的探讨已从最初的人口规模、经济发展水平、能源强度、单位能耗碳排放等逐步扩展到能源消费结构、产业结构、城镇化、国际贸易分工、颠覆性技术等更广泛的领域。未来，可以根据不同因素的影响程度锁定减排的努力方向；研究不同驱动因素之间的协同关系；制定科学的协同减排策略；充分考虑驱动因素的区域和产业异质性，为精准施策提供重要的理论依据。

5.2. 经济增长与碳排放脱钩的内在机制与现实条件

双碳目标充分体现了碳排放与经济发展脱钩的发展愿景。现有研究从经济增长与碳排放脱钩理论的内在机理入手，厘清减排的阶段性特征，通过阶段性对比以及指标评估剖析经济发展和低碳转型进展[68]。然而，当前描述性评估研究偏多，缺少量化分析，较难对比判断不同时期和不同领域政策及行动的实施效果。未来，应更加关注低碳经济结构演化特征和不同发展阶段的动力机制。明确不同阶段的减排目标，提高配套政策的科学性和有效性。此外，碳排放与经济增长脱钩取决于不同地区的现实条件。结合不同国家或地区的资源禀赋、发展阶段和产业结构，现有文献探索了经济增长与碳排放脱钩的社会、经济和技术条件，开展了一系列横向和纵向比较研究[69–70]。未来的研究应重点突出特定行业、地区或主体的条件优势，识别其关键发展瓶颈。

5.3. 经济社会系统低碳转型中的不确定性及其影响

不确定性是经济社会系统的固有特征，对未来低碳转型路径选择带来了巨大挑战。然而，科学家可以通过数学建模来提高未来预测的准确性[71]。因此，识别经济社会系统低碳转型中的关键不确定性是首要任务。本研究从社会、经济、技术、行为和政策维度，全面总结了转型路径中的五大不确定性。需要注意的是，这些不确定性并非完全独立，它们相互交织共同影响整个社会经济系统转型。

(1) 社会转型不确定。由于人口规模、年龄结构和城

市化率等因素具有不确定性，社会转型的过程和方向充满了诸多可能[72–73]。未来的社会转型可能表现为非连续的骤变，也可能是在很长一段时间内发生的相对连续变化。因此，探讨如何应对低碳转型带来的社会转型挑战是未来研究的关键。

(2) 经济发展不确定。经济层面的市场波动造成的不确定性可能会扰乱宏观经济趋势以及微观个人决策。具体而言，经济发展的不可预见性将在宏观层面冲击低碳转型政策实施的积极性和有效性，在微观层面直接影响减排主体的行为模式与资源配置。以往研究常根据国内生产总值(GDP)增长率、股票价格指数或汇率等时间序列数据的波动性来衡量投资、就业和经济产出的不确定性[74]。随着全球化进程加深，经济发展的不确定性来源已从传统的周期性波动外溢到重大突发事件的暴发，包括贸易摩擦、地缘冲突、局部灾害等[75]。这些新变局使得精确量化系统的经济不确定性变得更加困难，也对未来碳中和实现路径的鲁棒性提出了更高要求。

(3) 技术进步不确定。技术进步几乎引领了每一次的工业革命。在实践中，实现碳达峰、碳中和的动态路径和技术途径有很多。研究人员基于不同的技术发展场景，考虑技术成本的下降潜力及颠覆性技术冲击，研究讨论了能源系统的技术演化路径和结构特征[76–77]。值得注意的是，当前的分析更侧重于技术创新对低碳转型的积极影响，较少关注可能出现的区域不平等和失业率上升等负面结果。这就要求未来研究应加强对世界各国尤其是发展中国家可能受到技术革命影响的关键地区和人口的关注。

(4) 消费行为不确定。生产的最终目的是消费，消费是碳排放的根源。实现双碳目标不仅需要减少生产方面的排放，还需要改变消费者的行为模式。现有研究一般采用调查和统计数据相结合的方法评估行为变化可能产生的减排潜力[78–79]。然而，行为模式通常具有一定程度的惯性，可能导致消费侧碳排放的锁定效应[80]。此外，消费行为和用能行为也受到收入水平、社会文化和认知能力的影响。因此，碳中和基础研究不能忽视消费侧的碳排放，亟需制定高效、可操作、可接受的政策，有效引导企业 and 个人的绿色低碳行为。

(5) 政策不确定。实现碳达峰、碳中和需要经济、能源和技术方面的重大变革，需要完善的保障、支持和激励机制。然而，经济社会系统转型是一个长期过程，宏观政治环境与产业政策的不确定性使得这一过程的复杂度陡然提升[81–82]。这类政策和政治环境的不确定性可能来自政府层面的选举换届、政治事件、改革转型，以及其他引起人们对未来政策和政府行动担忧的事件[83–84]。碳中

和愿景将推动世界各国出台各类扶持政策，而这些政策拐点又将反过来影响未来的社会-经济-能源-技术体系改革。为此，未来应深入探讨政策不确定性与低碳转型的互馈机制，或将政策不确定性纳入定量研究框架，探索如何完善和优化不确定性条件下的政策措施、监管体系和制度框架。

降低系统转型风险、提高转型路径鲁棒性的难点在于通过有限计算识别关键不确定性因素，并规避他们造成的风险与影响。基于此，本研究提出了5个有待进一步研究的问题：①不确定因素对替代转型路径的影响机制是什么？②如何准确刻画不确定性的影响？③面对不确定性较高的未来发展情景，如何设计风险最低且经济最优的转型路径？④不同转型路径抵抗极端不确定性干扰的稳健性如何？⑤不同干预措施应对不确定性的作用机制？

5.4. 碳中和目标下的区域一体化协同管理机制

实现碳达峰、碳中和是复杂系统工程。要从全局视角出发，建立省级尺度综合评估体系，设计区域协同优化路径，实现区域低碳发展以及区域之间的协同发展。通过设计以区域碳排放和碳汇调查为基础的生态补偿机制，可以激发区域自愿减排的积极性，避免不公平转型带来的严重社会问题[85]。此外，为确保跨区域碳排放权交易或补偿核查的科学性，需要制定构建边界统一、数据可比、模型可算的方法体系。在此基础上，进一步加强对区域碳排放核算、碳泄漏的公平性评估、跨区域碳市场链接机制设计等方面的定量研究，为碳中和目标下区域协作与共同治理策略提供科学支撑。

另一方面，可以依托京津冀、长三角和粤港澳大湾区等大型城市群，率先建设碳达峰、碳中和试点示范区[86–87]。重点探讨低碳试点城市联合治理模式，研究碳中和路径下不同区域的生态环境承载力，开展多区域优势互补联动发展机制设计，以点带面形成示范效应，推动形成区域低碳发展新格局。

5.5. 基于市场的工具，设计灵活操作的碳市场和混合政策

有效的减排政策对于应对气候变化、实现减排目标至关重要。市场机制减排手段因更具经济效率而广受青睐，在世界各地得到广泛应用。自2013年以来，中国先后建立了8个区域碳市场试点，并于2017年启动了全国性的碳市场[88]。提出双碳目标后，中国不断加快完善全国碳市场建设。目前，全国碳交易市场已正式启动，可以交易包括碳配额现货和国家核证自愿减排量（CCER）等在内的产品。

本研究总结了文献中重点关注的管理科学问题：一是碳市场运行机制设计，包括事前的配额总量设置、覆盖部门设置、配额分配原则及方案研究；二是事中的灵活调控机制、配额退出机制的设计；三是碳交易政策效果的事后评价[89–91]。关于碳税的相关研究从税收制度设计出发，重点关注税率制定、税收中性研究以及碳税的经济、环境、分配和替代效应[92–93]。已有研究表明混合机制具有更高效率，也更符合目前各国的实际政策框架[94]。正因如此，混合机制研究越来越受研究者的青睐，主要表现为两种形式，一是在现有碳市场基础上引入价格调控手段，优化减排成本；二是探讨碳市场与碳税并行的双轨机制，为包括中国在内的更多国家采用混合机制提供思路。然而，也有观点指出现阶段较低的碳价尚不足以刺激大幅减排。当前，很少有关于市场机制有效性的实证分析，关于市场机制作用机理及有效性还需深入探究。其中，关键难点在于在论证市场机制有效性时如何消除其他能源环境政策对碳减排的影响。只有充分厘清碳管理市场机制的减排机理，才能科学精准地倒推出碳达峰、碳中和目标下的碳定价水平，为市场机制的政策设计提供指导。

6. 结论和启示

通过对碳达峰、碳中和相关的1105篇文献进行梳理，本文从时空维度追踪领域的国际趋势与发展规律，从技术维度剖析研究现状及热点变迁，从行业维度挖掘支撑双碳目标实现的路径与着力点。厘清双碳目标的科学内涵，提炼关键科学问题。基于文献评述，围绕未来相关研究的优先任务与保障机制提出几点建议。

碳中和及管理涉及各地区各行业，是多主体协同治理的典型问题。现阶段，生态文明理论体系中缺乏碳中和管理理论和方法。因此，有必要将碳中和纳入生态文明总体框架内，深层次探讨这一理念的学理意蕴，构建生态文明范式下的碳中和管理理论和方法论体系。中国的生态文明建设，可望对工业文明转型与实现可持续发展的世界发展难题做出科学解答。

碳达峰与碳中和愿景下的低碳转型具有长期性、系统性、革命性与前瞻性，在这场广泛而深刻的系统性变革中，本文筛选出以下值得优先关注的研究方向：①研究碳排放总量与增速等约束性指标的确定方法，支撑碳达峰、碳中和行动方案的制定；②模拟行业碳中和路径，支撑行业碳达峰方案的设计；③研究碳税与碳排放权交易制度，提高市场工具的有效性；④探索产业结构优化对碳排放的影响机制，促进产业低碳转型；⑤量化CCUS在碳中和中

的潜力与贡献，支撑重大工程的布局。

在保障机制方面，建议搭建产学研结合的智库平台，支持多学科交叉融合。通过组织包括但不限于经济、社会、能源、地理、气象、生态、环境、健康等领域的跨学科智库平台，形成结构合理的交叉学科技术创新团队，增强从事碳达峰与碳中和领域基础研究和应用研究的科技力量。同时，加强气候变化经济学的基础研究，推动设立气候变化经济学研究的全国重点实验室（或科学中心）。以碳达峰与碳中和重大战略任务为导向，以基础科学和应用科学研究为核心，开发气候经济数据库和知识库，长期并持续开展国家和全球气候政策模拟与评估，为高质量发展和引领国家参与全球气候治理体系建设提供科学决策支持。

致谢

感谢国家自然科学基金项目(71521002、72104025和72004011)、国家重点研发计划项目(2016YFA0602603)和中国博士后科学基金项目(2021M690014)对本研究的支持。感谢审稿人以及北京理工大学能源与环境政策研究中心的同事对本研究给予的指导与建议。

Compliance with ethics guidelines

Yi-Ming Wei, Kaiyuan Chen, Jia-Ning Kang, Weiming Chen, Xiang-Yu Wang, and Xiaoye Zhang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.12.018>.

References

- [1] Wei YM, Han R, Liang QM, Yu BY, Yao YF, Xue MM, et al. An integrated assessment of INDCs under shared socioeconomic pathways: an implementation of C³IAM. *Nat Hazards* 2018;92(2):585–618.
- [2] Special Report IPCC. Global warming of 1.5 °C. Report. Cambridge: Report. Cambridge University Press; 2018.
- [3] United Nations Environment Programme (UNEP). Emissions gap report 2020—executive summary. Report. Nairobi: United Nations Environment Programme; 2020.
- [4] Rogelj J, den Elzen M, Höhne N, Fransen T, Fekete H, Winkler H, et al. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature* 2016;534(7609):631–9.
- [5] Wei YM, Han R, Wang C, Yu B, Liang QM, Yuan XC, et al. Self-preservation strategy for approaching global warming targets in the post-Paris Agreement era. *Nat Commun* 2020;11:1624.
- [6] Black R, Cullen K, Fay B, Hale T, Lang J, Mahmood S, et al. Taking stock: a global assessment of net zero targets. Report. London: Energy & Climate Intelligence Unit and Oxford Net Zero; 2021.
- [7] Keyßer LT, Lenzen M. 1.5 °C degrowth scenarios suggest the need for new mitigation pathways. *Nat Commun* 2021;12:2676.
- [8] Pineda AC, Chang A, Faria P. Foundations for science-based net-zero target setting in the corporate sector, version 1.0. Report. Paris: Science Based Targets Initiative (SBTi); 2020.
- [9] Rogelj J, Schaeffer M, Meinshausen M, Knutti R, Alcamo J, Riahi K, et al. Zero emission targets as long-term global goals for climate protection. *Environ Res Lett* 2015;10(10):105007.
- [10] Grossman GM, Krueger AB. Environmental impacts of a North American free trade agreement. Working Paper No. 3914. Cambridge: National Bureau of Economic Research; 1991.
- [11] Stern DI. Economic growth and energy. *Encyclopedia Energy* 2004;2(00147):35–51.
- [12] Assembly UNG. Work of the statistical commission pertaining to the 2030 agenda for sustainable development. New York City, NY, USA: United Nations; 2017.
- [13] Van Vuuren DP, Van der Wijst KI, Marsman S, van den Berg M, Hof AF, Jones CD. The costs of achieving climate targets and the sources of uncertainty. *Nat Clim Chang* 2020;10(4):329–34.
- [14] Kang JN, Wei YM, Liu LC, Han R, Yu BY, Wang JW. Energy systems for climate change mitigation: a systematic review. *Appl Energy* 2020;263:114602.
- [15] Wei YM, Mi ZF, Huang Z. Climate policy modeling: an online SCI-E and SSCI based literature review. *Omega* 2015;57:70–84.
- [16] Bornmann L, Mutz R. Growth rates of modern science: a bibliometric analysis based on the number of publications and cited references. *J Assoc Inf Sci Technol* 2015;66(11):2215–22.
- [17] Zhang K, Wang Q, Liang QM, Chen H. A bibliometric analysis of research on carbon tax from 1989 to 2014. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;58:297–310.
- [18] Schlamadinger B, Spitzer J, Kohlmaier GH, Lüdeke M. Carbon balance of bioenergy from logging residues. *Biomass Bioenergy* 1995;8(4):221–34.
- [19] De Vries B, Bollen J, Bouwman L, Den Elzen M, Janssen M, Kreileman E. Greenhouse gas emissions in an equity-, environment- and service-oriented world: an IMAGE-based scenario for the 21st century. *Technol Forecast Soc Change* 2000;63(2–3):137–74.
- [20] Yu S, Zheng S, Li X, Li L. China can peak its energy-related carbon emissions before 2025: evidence from industry restructuring. *Energy Econ* 2018;73:91–107.
- [21] Tang B, Li R, Yu B, An R, Wei YM. How to peak carbon emissions in China's power sector: a regional perspective. *Energy Policy* 2018;120:365–81.
- [22] Zhang Y, Liu C, Chen L, Wang X, Song X, Li K. Energy-related CO₂ emission peaking target and pathways for China's city: a case study of Baoding City. *J Clean Prod* 2019;226:471–81.
- [23] Yan Q, Wang Y, Li Z, Balez'entis T, Streimikiene D. Coordinated development of thermal power generation in Beijing–Tianjin–Hebei region: evidence from decomposition and scenario analysis for carbon dioxide emission. *J Clean Prod* 2019;232:1402–17.
- [24] Zhou Y, Shan Y, Liu G, Guan D. Emissions and low-carbon development in Guangdong–Hong Kong–Macao greater bay area cities and their surroundings. *Appl Energy* 2018;228:1683–92.
- [25] Yan Y, Zhang H, Long Y, Zhou X, Liao Q, Xu N, et al. A factor-based bottom-up approach for the long-term electricity consumption estimation in the Japanese residential sector. *J Environ Manage* 2020;270:110750.
- [26] Huo T, Ma Y, Cai W, Liu B, Mu L. Will the urbanization process influence the peak of carbon emissions in the building sector? A dynamic scenario simulation. *Energy Build* 2021;232:110590.
- [27] Shan Y, Zhou Y, Meng J, Mi Z, Liu J, Guan D. Peak cement-related CO₂ emissions and the changes in drivers in China. *J Ind Ecol* 2019;23(4):959–71.
- [28] Li W, Gao S. Prospective on energy related carbon emissions peak integrating optimized intelligent algorithm with dry process technique application for China's cement industry. *Energy* 2018;165:33–54.
- [29] Zhang Q, Lei H, Yang D, Xiong L, Liu P, Fang B. Decadal variation in CO₂ fluxes and its budget in a wheat and maize rotation cropland over the North China Plain. *Biogeosciences* 2020;17(8):2245–62.
- [30] Lippiatt N, Ling TC, Pan SY. Towards carbon-neutral construction materials: carbonation of cement-based materials and the future perspective. *J Build Eng*

- 2020;28:101062.
- [31] Gabrielli P, Gazzani M, Mazzotti M. The role of carbon capture and utilization, carbon capture and storage, and biomass to enable a net-zero-CO₂ emissions chemical industry. *Ind Eng Chem Res* 2020;59(15):7033–45.
- [32] Le Quéré C, Jackson RB, Jones MW, Smith AJP, Abernethy S, Andrew RM, et al. Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nat Clim Chang* 2020;10(7):647–53.
- [33] Ding S, Zhang M, Song Y. Exploring China's carbon emissions peak for different carbon tax scenarios. *Energy Policy* 2019;129:1245–52.
- [34] Normile D. China's bold climate pledge earns praise—but is it feasible? *Science* 2020;370(6512):17–8.
- [35] Rueda O, Mogollón JM, Tukker A, Scherer L. Negative-emissions technology portfolios to meet the 1.5 °C target. *Glob Environ Change* 2021;67:102238.
- [36] House KZ, Baclig AC, Ranjan M, van Nierop EA, Wilcox J, Herzog HJ. Economic and energetic analysis of capturing CO₂ from ambient air. *Proc Natl Acad Sci USA* 2011;108(51):20428–33.
- [37] Lu Xi, Cao L, Wang H, Peng W, Xing J, Wang S, et al. Gasification of coal and biomass as a net carbon-negative power source for environment-friendly electricity generation in China. *Proc Natl Acad Sci USA* 2019;116(17):8206–13.
- [38] Fuhrman J, McJeon H, Patel P, Doney SC, Shobe WM, Clarens AF. Food–energy–water implications of negative emissions technologies in a +1.5 °C future. *Nat Clim Chang* 2020;10(10):920–7.
- [39] Fajardy M, Mac DN. Can BECCS deliver sustainable and resource efficient negative emissions? *Energy Environ Sci* 2017;10(6):1389–426.
- [40] Rajbhandari S, Limmeechokchai B. Assessment of greenhouse gas mitigation pathways for Thailand towards achievement of the 2 °C and 1.5 °C Paris Agreement targets. *Clim Policy* 2021;21(4):1–22.
- [41] Lawrence PJ, Chase TN. Investigating the climate impacts of global land cover change in the community climate system model. *Int J Climatol* 2010;30(13):2066–87.
- [42] Bonan GB. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 2008;320(5882):1444–9.
- [43] Yang B, Wei YM, Hou Y, Li H, Wang P. Life cycle environmental impact assessment of fuel mix-based biomass co-firing plants with CO₂ capture and storage. *Appl Energy* 2019;252:113483.
- [44] Melara AJ, Singh U, Colosi LM. Is aquatic bioenergy with carbon capture and storage a sustainable negative emission technology? Insights from a spatially explicit environmental life-cycle assessment. *Energy Convers Manage* 2020;224:113300.
- [45] Loh JYY, Kherani NP, Ozin GA. Persistent CO₂ photocatalysis for solar fuels in the dark. *Nat Sustain* 2021;4(6):466–73.
- [46] Yao B, Xiao T, Makgae OA, Jie X, Gonzalez-Cortes S, Guan S, et al. Transforming carbon dioxide into jet fuel using an organic combustion-synthesized Fe–Mn–K catalyst. *Nat Commun* 2020;11(1):6395.
- [47] Jiao J, Lin R, Liu S, Cheong WC, Zhang C, Chen Z, et al. Copper atom-pair catalyst anchored on alloy nanowires for selective and efficient electrochemical reduction of CO₂. *Nat Chem* 2019;11(3):222–8.
- [48] Rumayor M, Dominguez-Ramos A, Irabien A. Innovative alternatives to methanol manufacture: carbon footprint assessment. *J Clean Prod* 2019;225:426–34.
- [49] International Carbon Action Partnership (ICAP). Emissions trading worldwide: status report 2020. Report. Berlin: International Carbon Action Partnership; 2020.
- [50] Tang BJ, Wang XY, Wei YM. Quantities versus prices for best social welfare in carbon reduction: a literature review. *Appl Energy* 2019;233–234:554–64.
- [51] Weitzman ML. Prices or quantities can dominate banking and borrowing. *Scand J Econ* 2020;122(2):437–63.
- [52] Maestre-Andrés S, Drews S, van den Bergh J. Perceived fairness and public acceptability of carbon pricing: a review of the literature. *Clim Policy* 2019;19(9):1186–204.
- [53] Hubacek K, Baiocchi G, Feng K, Patwardhan A. Poverty eradication in a carbon constrained world. *Nat Commun* 2017;8:912.
- [54] MacKay DJC, Cramton P, Ockenfels A, Stoff S. Price carbon—I will if you will. *Nature* 2015;526(7573):315–6.
- [55] Hua G, Cheng TCE, Wang S. Managing carbon footprints in inventory management. *Int J Prod Econ* 2011;132(2):178–85.
- [56] Thai C. Renewable distributed and centralized generation dynamic's impact on transmission and storage upgrades to achieve carbon neutrality [dissertation]. Irvine: University of California, Irvine; 2019.
- [57] Udas E, Wölk M, Wilmking M. The “carbon-neutral university”—a study from Germany. *Int J Sustain High Educ* 2018;19(1):130–45.
- [58] Sucharda P, Gimson M. City of Hamilton signs climate change emergency declaration, reduces energy consumption in water system. *J Am Water Works Assoc* 2020;112(11):22–30.
- [59] Reiche D. Renewable energy policies in the Gulf countries: a case study of the carbon-neutral “Masdar City” in Abu Dhabi. *Energy Policy* 2010;38(1):378–82.
- [60] Li X, Yu B. Peaking CO₂ emissions for China's urban passenger transport sector. *Energy Policy* 2019;133:110913.
- [61] Tang B, Li R, Yu B, An R, Wei YM. How to peak carbon emissions in China's power sector: a regional perspective. *Energy Policy* 2018;120:365–81.
- [62] Wei YM, Liao H, Yu B, Tang BJ. Green transition in energy intensive sectors. China energy report. Beijing: Science Press; 2018. Chinese.
- [63] Yu S, Zheng S, Li X, Li L. China can peak its energy-related carbon emissions before 2025: evidence from industry restructuring. *Energy Economics* 2018;73:91–107.
- [64] Wang H, Lu X, Deng Y, Sun Y, Nielsen CP, Liu Y, et al. China's CO₂ peak before 2030 implied from characteristics and growth of cities. *Nat Sustain* 2019;2(8):748–54.
- [65] Yang X, Pang J, Teng F, Gong R, Springer C. The environmental co-benefit and economic impact of China's low-carbon pathways: evidence from linking bottom-up and top-down models. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;136:110438.
- [66] Wang Z, Huang W, Chen Z. The peak of CO₂ emissions in China: a new approach using survival models. *Energy Econ* 2019;81:1099–108.
- [67] Zhang X, Geng Y, Shao S, Dong H, Wu R, Yao T, et al. How to achieve China's CO₂ emission reduction targets by provincial efforts?—An analysis based on generalized Divisia index and dynamic scenario simulation. *Renew Sustain Energy Rev* 2020;127:109892.
- [68] Wang Y, Su X, Qi L, Shang P, Xu Y. Feasibility of peaking carbon emissions of the power sector in China's eight regions: decomposition, decoupling, and prediction analysis. *Environ Sci Pollut Res Int* 2019;26(28):29212–33.
- [69] Wang X, Zhang S. Exploring linkages among China's 2030 climate targets. *Clim Policy* 2017;17(4):458–69.
- [70] You Z, Zhao T, Song C, Wang J. Analyzing China's coal-related carbon emissions from economic growth perspective: through decoupling and decomposition model. *Environ Sci Pollut Res Int* 2021;28(3):3703–18.
- [71] Fawcett AA, Iyer GC, Clarke LE, Edmonds JA, Hultman NE, McJeon HC, et al. Can Paris pledges avert severe climate change? *Science* 2015;350(6265):1168–9.
- [72] Hubacek K, Guan D, Barrett J, Wiedmann T. Environmental implications of urbanization and lifestyle change in China: ecological and water footprints. *J Clean Prod* 2009;17(14):1241–8.
- [73] Yu B, Wei YM, Kei G, Matsuoka Y. Future scenarios for energy consumption and carbon emissions due to demographic transitions in Chinese households. *Nat Energy* 2018;3(2):109–18.
- [74] Jacoby HD, Eckaus RS, Ellerman AD, Prinn RG, Reiner DM, Yang Z. CO₂ emissions limits: economic adjustments and the distribution of burdens. *Energy J* 1997;18(3):31–58.
- [75] Liu LJ, Creutzig F, Yao YF, Wei YM, Liang QM. Environmental and economic impacts of trade barriers: the example of China–US trade friction. *Resour Energy Econ* 2020;59:101144.
- [76] Duan H, Mo J, Fan Y, Wang S. Achieving China's energy and climate policy targets in 2030 under multiple uncertainties. *Energy Econ* 2018;70:45–60.
- [77] Capros P, Zazias G, Evangelopoulou S, Kannavou M, Fotiou T, Siskos P, et al. Energy-system modelling of the EU strategy towards climate-neutrality. *Energy Policy* 2019;134:110960.
- [78] Dubois G, Sovacool B, Aall C, Nilsson M, Barbier C, Herrmann A, et al. It starts at home? Climate policies targeting household consumption and behavioral decisions are key to low-carbon futures. *Energy Res Soc Sci* 2019;52:144–58.
- [79] Chen H, Long R, Niu W, Feng Q, Yang R. How does individual low-carbon consumption behavior occur?—An analysis based on attitude process. *Appl Energy* 2014;116:376–86.
- [80] Seto KC, Davis SJ, Mitchell RB, Stokes EC, Unruh G, Ürges-Vorsatz D. Carbon lock-in: types, causes, and policy implications. *Annu Rev Environ Resour* 2016;41(1):425–52.
- [81] Adedoyin FF, Ozturk I, Agboola MO, Agboola PO, Bekun FV. The implications of renewable and non-renewable energy generating in Sub-Saharan Africa: the role of economic policy uncertainties. *Energy Policy* 2021;150:112115.
- [82] Pegels A, Lütkenhorst W. Is Germany's energy transition a case of successful green industrial policy? Contrasting wind and solar PV. *Energy Policy* 2014;74:522–34.
- [83] Lockwood M. The political sustainability of climate policy: the case of the UK climate change act. *Glob Environ Change* 2013;23(5):1339–48.
- [84] Dunlap RE, McCright AM, Yarosh JH. The political divide on climate change:

- partisan polarization widens in the US. *Environment* 2016;58(5):4–23.
- [85] Yu G, Liu D, Liao X, Wang T, Tian Q, Liao Y. Quantitative research on regional ecological compensation from the perspective of carbon-neutral: the case of Hunan Province, China. *Sustainability* 2017;9(7):1095.
- [86] Song M, Zhao X, Shang Y. The impact of low-carbon city construction on ecological efficiency: empirical evidence from quasi-natural experiments. *Resour Conserv Recycling* 2020;157:104777.
- [87] Sun L, Liu W, Li Z, Cai B, Fujii M, Luo X, et al. Spatial and structural characteristics of CO₂ emissions in East Asian megacities and its indication for low-carbon city development. *Appl Energy* 2021;284:116400.
- [88] Fan JH, Todorova N. Dynamics of China's carbon prices in the pilot trading phase. *Appl Energy* 2017;208:1452–67.
- [89] Brink C, Vollebergh HRJ, van der Werf E. Carbon pricing in the EU: evaluation of different EU ETS reform options. *Energy Policy* 2016;97:603–17.
- [90] Cong RG, Wei YM. Potential impact of (CET) carbon emissions trading on China's power sector: a perspective from different allowance allocation options. *Energy* 2010;35(9):3921–31.
- [91] Holt CA, Shobe WM. Reprint of: price and quantity collars for stabilizing emission allowance prices: laboratory experiments on the EU ETS market stability reserve. *J Environ Econ Manage* 2016;80:69–86.
- [92] Zhang K, Xue MM, Feng K, Liang QM. The economic effects of carbon tax on China's provinces. *J Policy Model* 2019;41(4):784–802.
- [93] Baranzini A, Goldemberg J, Speck S. A future for carbon taxes. *Ecol Econ* 2000;32(3):395–412.
- [94] Cao J, Ho MS, Jorgenson DW, Nielsen CP. China's emissions trading system and an ETS-carbon tax hybrid. *Energy Econ* 2019;81:741–53.