



中国碳中和综合报告2020

中国现代化的 新征程

“十四五”到碳中和的
新增长故事

致谢

本报告是能源基金会与多个研究团队共同努力的成果。研究由能源基金会牵头，由马里兰大学全球可持续发展中心负责协调，国内国际多个研究机构参与。

能源基金会和研究团队向能源基金会中国中长期低碳发展战略综合工作组的国际咨询圆桌会专家、相关机构和报告评阅人表示感谢，他们为改进本报告的框架和具体研究内容提供了宝贵建议：

评阅人（按姓氏字母顺序排列）

Sonia Aggarwal	能源创新政策与技术公司副总裁
白荣春	全国能源基础与管理标准化技术委员会副主任
Richard Baron	2050 路径平台（2050 Pathways Platform）执行主任
Jae Edmonds	西北太平洋国家实验室（PNNL）全球变化联合研究所首席科学家
Michael Greenstone	芝加哥大学哈里斯公共政策学院米尔顿·弗里德曼讲席经济学教授
Cameron Hepburn	牛津大学史密斯学院院长，环境经济学教授
Frank Jotzo	克劳福德公共政策学院教授，气候与能源政策中心主任
姜克隽	国家发展与改革委员会能源研究所高级研究员
Elmar Kriegler	德国波茨坦气候影响研究所“转型途径”研究部代理主任
Amory Lovins	落基山研究所联合创始人兼荣誉主席
李俊峰	国家应对气候变化战略研究和国际合作中心首任主任和学术委员会主任
李晓江	中国城市规划设计研究院原院长
刘强	儿童投资基金会（英国）北京代表处项目总监
Bert Metz	IPCC 第三次和第四次评估报告缓解气候变化联合主席，气候政策专家
Artur Runge-Metzger	欧盟委员会环境部国际谈判和欧盟行动监测部门气候战略主管
Nicholas Stern勋爵	伦敦政治经济学院格兰瑟姆气候变化与环境研究所所长
Ronan Palmer	第三代环保主义组织（E3G）项目负责人
Jonathan Pershing	威廉与弗洛拉·休利特基金会环境项目主任，原美国气候变化特使
Jim Skea	伦敦帝国理工学院研究委员会英国能源战略研究员，教授，IPCC 第三工作组联合主席
Antonio Soria	欧盟委员会联合研究中心气候变化，能源与交通经济学主任
Robert Stowe	哈佛大学环境经济学项目执行主任，哈佛大学气候协定项目联席主任
Massimo Tavoni	米兰理工大学气候变化经济学教授，经济与环境欧洲研究所所长
Adair Turner勋爵	能源转型委员会主席，新经济思维研究所高级研究员
王毅	中国科学院科技战略咨询研究院副院长，全国人大常委会委员
王志轩	中国电力企业联合会常务副理事长
John Ward	Pengwern Associates 咨询公司常务董事
Matthias Weitzel	欧盟委员会联合研究中心项目官员
Harald Winkler	开普敦大学能源研究中心教授，IPCC 第六次评估报告第三工作组主要协调作者
谢春萍	伦敦政治经济学院格兰瑟姆气候变化与环境研究所政策研究员
周大地	中国能源研究会常务副理事长，国家发展与改革委员会能源研究所原所长，国家“十四五”规划专家委员会委员，国家“十四五”能源规划专家组副组长
周嵘	国际金融公司绿色金融专家

此外，感谢能源基金会徐薇、余岚和卢伊楚在该报告校对和制作过程中给予的支持。

中国现代化的 新征程

“十四五”到碳中和的
新增长故事

2020年12月

研究和作者团队

主要协调作者

- 能源基金会：傅莎，杜譔
- 美国马里兰大学：Leon Clarke，余莎

主要作者（按照单位和作者英文名字字母顺序排列）

- 交通运输部科学研究院：凤振华，王雪成
- 能源基金会：陈灵艳，杨卓翔
- 哈尔滨工业大学（深圳）：刘俊伶
- 绿色创新发展中心：杨鹏
- 国际应用系统分析研究所：Nicklas Forsell，郭非，Volker Krey
- 中国人民大学：陈敏鹏，王克
- 清华大学：柴麒敏，张强
- 美国马里兰大学：崔宜筠，Nathan Hultman，楼洁红，宋嘉玮

建议引文

能源基金会（2020）。“中国碳中和综合报告 2020——中国现代化的新征程：“十四五”到碳中和的新增长故事”。能源基金会，北京，中国。 https://www.efchina.org/Attachments/Report/report-lceg-20201210/Full-Report_Synthesis-Report-2020-on-Chinas-Carbon-Neutrality_ZH.pdf

前言

今年9月，习近平主席宣布了力度空前且具有雄心的气候目标：中国将努力争取2060年前实现碳中和。这是一个具有丰富深刻历史含义的里程碑，也是2015年《巴黎协定》以来全球气候治理进程中最为积极的进展。然而，中国实现碳中和目标也面临着巨大的挑战。

能源基金会是一家自1999年起就在中国开展工作的非营利性慈善组织，我们的愿景是通过推进可持续能源促进中国和世界的繁荣发展和气候安全。三年前，我们发起了第一个也是最重要的旗舰计划——中国中长期低碳发展战略综合工作组（LTS）。在过去的三年中，我们支持了一揽子政策研究并提供了策略性政策建议，为实现可持续繁荣与碳中和下的新增长模式奠定了基础。2019年6月，我们编制了能源基金会LTS工作组的发展战略，提出了2060年前实现碳中和及2070年前实现气候中和的总体目标。在同一周召开的中国环境与发展国际合作委员会（CCICED）年度会议上，我们率先向中国高层决策者提出了对中国长期气候目标的构想。近一年多以来，LTS工作组持续邀请国内外气候、能源、经济发展及重点行业的专家，为净零的可行性提供了技术支持及充分论证。

能源基金会充分调动国内外资源，竭尽全力支持碳中和愿景的实现。去年我们的LTS工作组与清华大学气候变化与可持续发展研究院联合发起了“中国长期低碳发展战略与转型路径研究”项目，共有国内24个顶级研究部门参与，为中国中长期低碳发展转型战略提供了技术支撑。同时，为吸纳国际观点、开拓国际视野，能源基金会与国际应用系统分析研究所、马里兰大学、欧盟联合研究中心等国际领先的智库和国际专家合作，并与国际能源署、波茨坦气候影响研究所、2050路径平台及E3G就LTS模型和技术展开探讨，为中国长期低碳发展战略提供建议。通过广泛的合作伙伴关系，能源基金会培育了全球LTS模型组网络，推动了气候和能源领域的知识共享，并建立了开放的多边知识合作平台。

此外，能源基金会通过“国际咨询圆桌会议”和“经济学家对话”推动“碳中和”在高层决策中主流化，并支持行业和地方层面低碳试点示范项目的落地生根。

今天，能源基金会第一份基于多模型比较研究的综合报告和大家见面，我感到分外激动，这是LTS工作组的一个重要里程碑。这份报告综合集成了国内外知名研究团队的观点，并发挥了能源基金会作为战略建议者、协调推进者和再捐资者的重要作用，为决策者提供全面的支持。

综合报告全面地阐述了中国低碳转型战略，有效地识别战略中整个经济体系以及各经济部门的关键要素，为后续研究工作指明方向，支持中国成功实现2060年前碳中和承诺以及高质量发展的长期目标，并为“十四五”规划提供决策参考。这份报告的面世再一次证明，中国正在以自信和开放的姿态引领全球气候进程，积极地与国际社会合作和交流，这将为以多边方式解决全球问题奠定基础。

今天的中国蓄势待发，准备好迈向更清洁、更具活力且普惠的新增长道路。能源基金会将继续积极支持中国探索“多赢”的长期低碳发展路径，推动实现绿色低碳转型和高质量发展，为未来书写全球绿色低碳发展大趋势下的“中国新增长故事”贡献力量。

2020年是跌宕起伏的一年，我们将这份综合报告作为新年献礼，伴随大家开启新的征程。这是来自中国、美国与欧洲的作者团队夜以继日通力合作的成果。在此，我由衷的感谢我们世界一流水平的作者团队，并感谢能源基金会LTS国际咨询圆桌会议的各位专家在百忙之中为我们提出宝贵建议。同时，我还要特别感谢能源基金会的梦之队，你们创造了奇迹，拥有你们，才能梦想成真！再次诚挚的感谢！



能源基金会首席执行官兼中国区总裁

二〇二〇年十二月

目录

1. 引言	2
2. 中国新增长故事	6
3. 长期战略的关键要素	12
4. 部门策略与机遇	26
4.1 电力部门转型	27
现状与趋势	27
长期战略要素	29
近期挑战、机遇与行动	34
4.2 建筑部门转型	36
现状与趋势	36
长期战略要素	38
近期挑战、机遇与行动	40
4.3 工业部门转型	42
现状与趋势	42
长期战略要素	44
近期挑战、机遇与行动	49
4.4 交通运输部门转型	50
现状与趋势	50
长期战略要素	51
近期挑战、机遇与行动	56
4.5 农业、林业和其他土地利用	57

现状与趋势	57
长期战略要素	59
近期挑战、机遇与行动	62

5. 金融部门在长期战略中的作用 66

5.1 为长期低碳转型提供融资	67
5.2 金融部门的气候和转型风险	71

6. 总结 76

7. 参考文献 78

图目录

章节 2

图 2-1: 国家目标的关键时点	P7
------------------	----

图 2-2: 中国人均 GDP 预测与部分国家 2019 年人均 GDP (图 A), 以及部分国家 65 岁及以上人口比率及预测 (图 B)	P7
---	----

图 2-3: 2017 年全球绿色经济规模 (图 A) 和 2019 年全球可再生能源从业人数 (图 B)	P8
---	----

章节 3

图 3-1: 部分国家 / 地区的历史 CO ₂ 排放量 (图 A); 部分国家 / 地区的历史碳排放强度 (相比经济产出) (图 B); 特定国家 / 地区的人均历史碳排放量 (图 C); 中国各部门的历史碳排放量 (图 D)	P13
---	-----

图 3-2: 1.5°C 和 2.0°C 情景下中国 CO ₂ 和部分非 CO ₂ 温室气体排放量	P15
---	-----

图 3-3: 1.5°C 情景下, 2015 年历史 CO ₂ 排放量及本报告所选模型在 2035 年和 2050 年的 CO ₂ 排放量 (上图); 相比 2015 年的各部门 CO ₂ 减排量 (下表)	P16
--	-----

图 3-4A: 本报告采纳的 1.5°C 情景下一次能源消费总量	P18
----------------------------------	-----

图 3-4B: 本报告采纳的 1.5°C 情景下终端能源消费量	P19
---------------------------------	-----

图 3-5: 跨部门减排策略及其在不同部门的应用	P20
--------------------------	-----

章节 4

图 4-1: 2000-2017 年不同技术的发电量	P28
----------------------------	-----

图 4-2: 1.5°C 和 2°C 情景下电力部门的 CO ₂ 排放量	P29
---	-----

图 4-3： 选定模型 1.5°C情景下中国传统煤电（左图）和非化石能源发电（右图）的占比	P30
图 4-4： 1.5°C情景下发电总量（图 A）和发电总量中不同技术的占比（图 B）	P32
图 4-5： 电力系统灵活性的来源	P33
图 4-6： 2017 年建筑部门的终端（运营）能源使用	P36
图 4-7： 2006 年 -2018 年的建筑存量动态	P37
图 4-8： 1.5°C和 2°C情景下建筑部门的直接 CO ₂ 排放	P38
图 4-9： 1.5°C情景下中国建筑部门的终端能源消费量	P39
图 4-10： 1.5°C情景下建筑部门的电气化率	P39
图 4-11： 中国主要工业产品产量及其在世界产量中占比的变化	P42
图 4-12： 中国主要工业产品至 2050 年需求预测	P43
图 4-13： 1.5°C和 2°C情景下工业部门的 CO ₂ 排放	P44
图 4-14： 1.5°C情景下工业终端能源消费	P45
图 4-15： 1.5°C情景下工业终端能源消费中电力、氢能和生物质能占比	P47
图 4-16： 2018 年不同交通运输方式能源相关 CO ₂ 排放及能源需求占比	P50
图 4-17： 1.5°C和 2°C情景下交通部门 CO ₂ 排放量	P52

图 4-18: 三个模型 1.5°C情景下货运和客运的活动水平变化（货运：吨公里； 客运：人公里）	P53
图 4-19: 交通运输部门的电气化率（图 A）以及两种代表模型的能源需求和 燃料结构（图 B）	P54
图 4-20: AFOLU（农业、林业和其他土地利用）部门温室气体排放量和清除 量的历史构成	P57
图 4-21: 不同情景下的中国人口预测	P58
图 4-22: 中国人均食品消费量预测	P59
图 4-23: 1.5°C和 2°C情景下 AFOLU 部门的温室气体排放总量预测	P60
图 4-24: 1.5°C和 2°C情景下 AFOLU 部门的 N ₂ O 和 CH ₄ 排放量预测	P61
图 4-25: 1.5°C和 2°C情景下 LULUCF 部门的净 CO ₂ 排放量	P62
图 5-1: 2010 年到 2019 年可再生能源累计投资排名前 20 位国家（左图） 和 2019 年可再生能源投资（右图）	P67
图 5-2: 1.5°C和 2°C情景下中国年度能源投资结构	P68
图 5-3: 与气候相关的风险、机遇和金融影响	P71
图 5-4: 转型风险压力测试	P72
图 5-5: 不同金融机构在风险管理中的作用	P73
图 5-6: 中英金融机构气候与环境信息披露试点	P74

章节 5







1. 引言

当今中国面临着一系列重大变化——科技、能源和产业革命飞速发展，国际领导地位不断提升，中等收入人群日益增加，经济增长速度逐步放缓。短期内，这些变化与全球经济下滑及新冠疫情所引发的健康和社会影响相互交织。在这些变化中，首屈一指的当属气候变化以及国际社会共同应对这一全球危机的迫切需求。上述变化给中国近期及中长期发展带来了一系列的挑战。

探索新的增长路径可以有效应对这些挑战，让中国在 2060 年前实现碳中和的发展目标。新的增长路径可以拉动经济发展，创造新的就业机会，促进创新和提高产业竞争力，从而实现建设“生态文明”的愿景。

中国践行新的增长路径不仅能促进本国经济发展，也将有利于解决全球气候变化问题。中国在减缓气候变化领域一直发挥着至关重要的作用。中国是目前全球最大的温室气体排放国，历史累计 CO₂ 排放量位列全球第二，仅次于美国。因此，中国在全球减排方面所做的贡献，将对全球升温幅度控制在科学预估的 1.5°C 或 2°C 之内目标的实现起到决定性作用。实施新的增长路径也将进一步提升中国的国际地位。中国以应对气候变化的实际行动向世界传递积极信号，彰显全球领导力。

全球温升控制在显著低于 2°C 以内才能避免气候变化所产生的恶劣影响，而国际社会希望温升能控制在 1.5°C 以内。这是一个巨大的挑战。必须在本世纪中叶左右将全球 CO₂ 排放量降为净零，才有可能将全球温升控制在 1.5°C 之内；而将全球升温控制在 2°C 以内则要求全球 CO₂ 排放量在 2070 年左右降至净零。中国实现碳中和的新增长路径，将为全球实现上述温控目标做出巨大贡献，并对中国能源、土地、城市发展与工业体系的转型产生全面、快速、深远的影响。

中国具有得天独厚的优势应对这些挑战。纵观历史，中国始终致力于制定成熟且具有前瞻性的国家规划，并因此得以建设从万里长城到南水北调这样的伟大工程。精心设计的国家规划让中国保持数十年经济和工业快速发展，并在现今的全球经济中占据领先地位。《中国国民经济和社会发展第“十四”五年规划纲要》将于 2021 年 3 月公布，第一个气候变化五年专项规划也将于同年秋季发布。与此同时，作为《巴黎协定》缔约方，中国也将更新国家自主贡献（NDC），制定本世纪中叶长期温室气体低排放发展战略（MCS）。中国近

期公布的 2060 年前实现碳中和以及 2030 年前碳排放达峰的承诺，是中国向气候目标迈出的重要一步。

在这样的背景下，能源基金会联合中国顶尖大学和智库以及国际领先的研究机构与专家，共同发起中国低碳发展路径的综合研究。该研究将持续开展，识别实现长期发展目标的关键要素及其对近期政策措施及“十四五”规划的短期需求，并建立由气候变化、能源、经济、环境等领域顶级学者组成的生态圈，以满足未来数十年共享信息和共同研究的需求。

本报告为能源基金会碳中和系列综合报告的开篇之作。报告旨在全面阐述实现内在关联的不同发展目标的路径及相应的问题与挑战，基于对不同研究机构和模型团队既有和新转型情景的综合分析，识别关键部门的长期战略以及近期可采取的行动，以支持中国成功实现低碳增长之路。作为开篇之作，本报告也识别了未来需要关注的重点问题和研究方向，为中国实现现代化发展及碳中和目标提供参考。

专栏I-I 本报告采用的模型情景

本报告系统分析了来自能源模型、综合评估模型和农业模型中的众多定量情景。全球模型（主要来自 CD-LINKS 项目），用以了解全球背景下中国碳中和目标的性质。这些模型包括：GCAM-China, IMAGE 3.0.1, MESSAGEix-GLOBIOM 1.0, POLES CD-LINK, REMIND MAgPIE 1.7-3.0 以及 WITCH-GLOBIOM 4.4 等。本报告还基于来自多个模型的系列情景探索中国整体经济和各部门低碳转型的细节问题，模型包括 C-GEM, DPEC, ERI-LEAP, GCAM-China, IPAC-AIM / technology, MESSAGEix-GLOBIOM, PECE V2.0, PECE_LIU_2019 和 POLES-JRC 2019 等全经济范围综合模型的情景结果，用于分析部门和跨部门战略；以及 AGHG-INV（农

业和土地使用），CBEM（建筑），ERI-Industry（工业），ICSDD-LoMLoG（电力）和 Transportation-CATS（交通）等部门模型的情景，用于分析具体部门转型的细节。部分模型情景来源于已发表的文献，而其他一些情景则是专门为本报告搭建的。在整份报告中，我们针对性地使用这些情景，论证结论并详细说明未来转型的关键要素。作为系列研究的第一份报告，本报告中的大多情景仅反映单一模型的计算结果，今后的报告将在基准线、部门核算方法以及影响多个模型之间可比性的其他方法学等方面尽可能的作出更多的协调。









2. 中国新增长故事

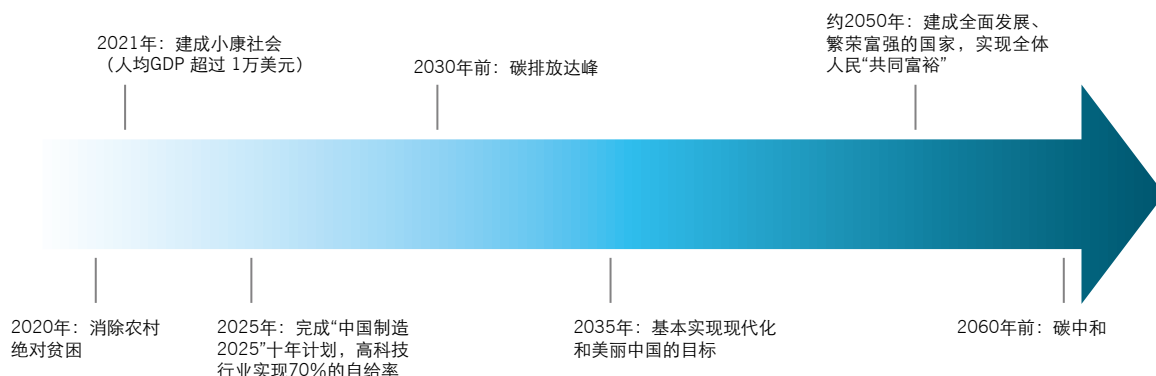
全球环境瞬息万变。科技革命特别是信息革命，极大地推动了互联互通以及生产力的重大变革。人工智能、大数据和量子通信等信息通讯技术的发展，正在改变我们的生活、工作以及彼此互动的方式。电池、光伏组件和电动汽车等清洁能源技术的飞速发展，甚至超过了十年前所有人的预期。这些趋势催生了全新的行业、经济发展机遇和商业模式，从根本上改变了全球发展。未来几十年至关重要，因为新增长动能将全面取代旧动能。

中国发展日新月异。自 1978 年改革开放以来，中国 GDP 每年以近 10% 的速度增长，超过 8.5 亿人摆脱了贫困（世界银行，2020）。中国目前是全球第二大经济体，其贸易、投资、国际领导力以及中国智慧使其全球影响力不断扩大。望眼未来，中国与世界其他国家日益加深的经济联系、贸易和投资的不确定性、国内经济结构性改革等一系列变化，都为中国带来机遇与挑战。事实证明，中国在高资源消耗、高污染排放的制造业、出口和投资以及廉价劳动力驱动下实现的高增长，是不可持续的。不断下降的生产力和劳动力等结构性限制已经使中国增速放缓。中国经济长期增长也引发了体制和社会问题。短期内，中国面临着新冠肺炎疫情和贸易争端所带来的挑战。长远来看，中等收入人群不断扩大，带来对安全、健康、幸福和平等生活的更高要求，现有模式下放缓的经济增长可能无法满足其需求。向更加稳健、更可持续的发展转型将创造新的机遇。

国际国内形势正在发生巨变。在此背景下，中国政府立足于改善民生和福祉，提出新的发展观，并制定相应的政策措施。中国目前已经开始着手建设“生态文明”，将可持续理念融入到经济社会发展当中，这种理念对中国未来的经济增长与发展起着决定性作用。在此过程中，中国政府提出“美丽中国”倡议，在新的框架下将环境保护、生态友好型发展模式 and 生活方式有机地结合起来，为全球生态安全做出贡献。在稳步迈向“生态文明”的大背景下，中国碳中和目标的提出恰逢其时。作为整个发展过程中的关键一环，碳中和目标将为中国践行新的发展观提供坚实的基础。

图2-1：国家目标的关键时点

（来源：习近平主席在中国共产党第十九次全国代表大会上的讲话：《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年计划和二〇三五年远景目标的建议》；习近平主席在第75届联合国大会一般性辩论上的讲话）



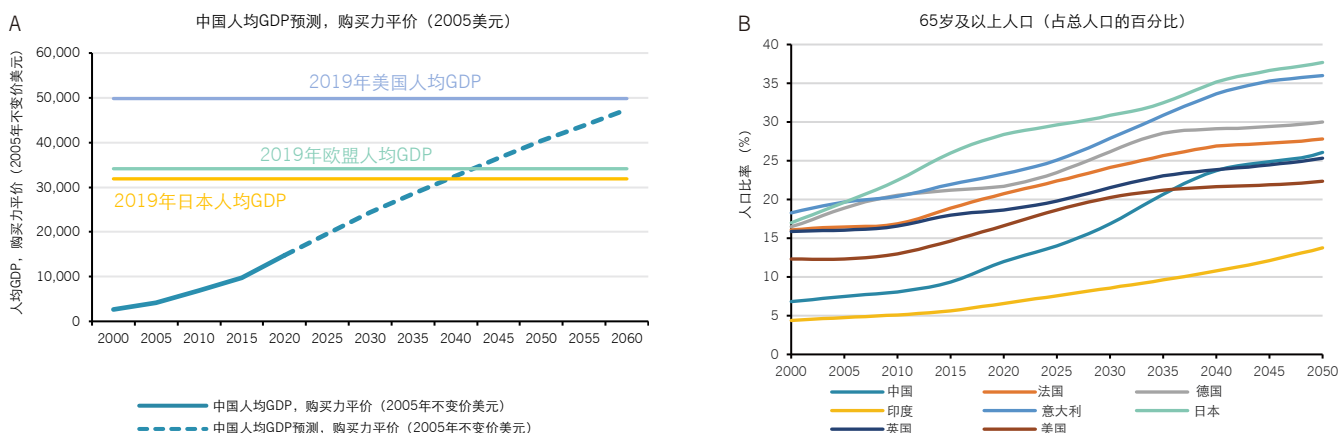
新发展观的基础是以更绿色、更高效和可持续的消费与生产为主要特征的可持续发展模式，帮助改善人民的生活水平并建设更健康的生态系统，共同谱写“生态文明”。新发展观要求将当前的工作重点，从过去单一追求GDP增长转移到追求更全面的高质量发展。新发展观正如习近平主席所强调的，要坚持“创新、协调、绿色、开放、共享”的发展理念。新发展观也体现在中国的“两个百年目标”中，即到2021年全面建成小康社会；以及到2049年将中国建设成为富强民主文明和谐美丽的社会主义现代化强国。新

发展观着眼于建设更高质量、更开放包容、更具凝聚力的经济、政治与社会体系（见专栏2-1）。

新增长路径关注的不是当今的中国，而是未来的中国，这一点至关重要。到2060年中国将发生翻天覆地的变化，届时，中国人民生活水平将接近当前大多数发达经济体（图2-2A），老龄化程度加深（图2-2B）。此外，中国城市人口将不断增加，到2050年中国城市化率将达到80%（联合国经济社会事务部，2018）。

图2-2：中国人均GDP预测与部分国家2019年人均GDP（图A），以及部分国家65岁及以上人口比率及预测（图B）

（图A 数据来源：Dellink R. 等（2017）的预测数据；2020年世界发展指标（WDI）的历史数据；图B 数据来源：UN-DESA，2019）



中国现有目标和政策将服务于碳中和目标所必须的新增长路径，近期政策也反映了中国新发展目标与整体技术环境和增长战略的衔接。2020年通过的《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》，概述了中国未来15年的主要发展目标。这些目标的主要特征如下：

- ▶ 关键核心技术实现重大突破，进入创新型国家前列；
- ▶ 基本实现新型工业化、信息化、城镇化、农业现代化，建成现代化经济体系；
- ▶ 形成广泛的绿色生产生活方式；

- ▶ 碳排放达峰后稳中有降，生态环境根本好转，美丽中国建设目标基本实现；
- ▶ 人民生活更加美好，人的全面发展、全体人民共同富裕取得更为明显的实质性进展；
- ▶ 加强各个领域的发展，包括但不限于经济、卫生、人均GDP、区际公平和技术。

总体而言，上述2035年目标显然与2060年碳中和战略一致。中国下一阶段的讨论和规划重点应放在制定相应的政策和行动上，推动当前的政策与2035年目标衔接，并保证转型方向与2060年长远目标相一致。

中国新增长路径的优势

以“生态文明”、“美丽中国”和碳中和目标所引领的经济转型为中国描绘了新增长路径的蓝图。新增长路径可以促进产业转型升级，提升竞争力，创造就业机会，推动经济结构化转型，通过减少空气污染提升公民健康，创造美好环境。

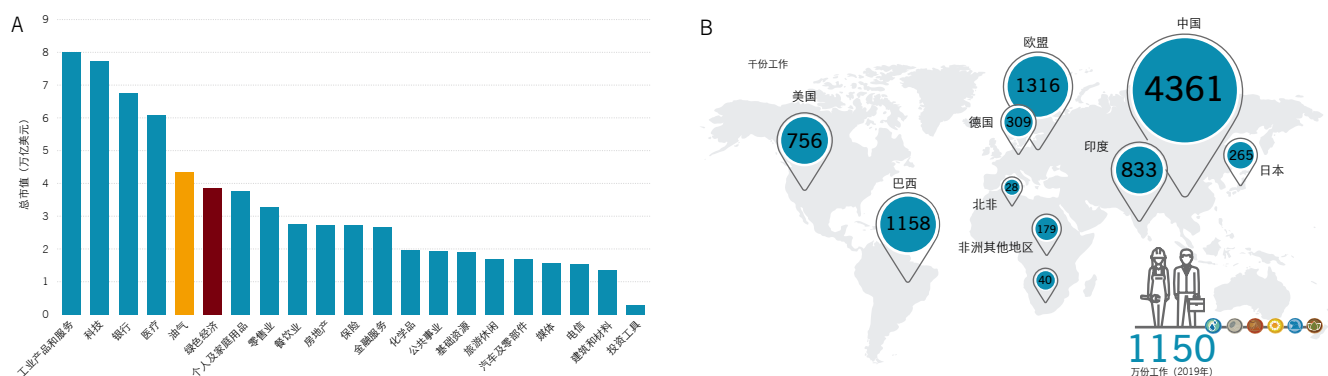
产业转型升级与提升竞争力：中国已成为全球新兴绿色技术（如光伏组件，电池和电动汽车）的领导者，并正在逐步成为5G技术和人工智能领域的领先国家。如果布局合理，新增长路径将加快上述新兴产业的创新与发展。对低碳技术与人才的投资，也将加速上述产业的创新与发展，从而推动全球新兴绿色经济的发展。新增长路径将巩固中国作为21世纪科技领域国际领先者的地位，有助于推动国内良性产业转型并提高长期的经济竞争力（见专栏2-2）。

就业与繁荣：2060年碳中和目标所体现的经济转

型，将促进强劲的就就业增长，创造普惠的经济繁荣。目前，全球绿色经济规模可与石油天然气领域相媲美（图2-3A），中国在绿色能源经济领域的优势红利已显现并将加速扩大。2010-2019年间，中国在可再生能源领域的投资额达到8180亿美元，成为全球最大的太阳能光伏和光热市场。2019年，中国可再生能源领域的就业人数达到440万，占全球该领域就业总人数的38%（图2-3B）。中国在实现碳中和目标的过程中必将面临巨大挑战，需要从化石燃料为基础的经济模式过渡到低碳的经济模式（见专栏2-3）。尽管如此，经济转型也会进一步扩大绿色经济领域的就业机会，包括电池生产、可再生能源、建筑（如既有建筑改造）及相关服务（如共享出行）（Huang等，2020年）。中国在关键技术领域中的领导地位将决定国际能源产业格局，也将会为中国带来强劲的就就业增长并推动产业转型升级（见专栏2-2）。

图2-3：2017年全球绿色经济规模（图A）和2019年全球可再生能源从业人数（图B）

（来源：FTSE Russell, 2018; IRENA, 2020）



结构性改革：碳中和目标将促进中国产业结构改革，从高污染、高碳产业模式向低碳产业转变。低碳转型将提升产业全要素生产率，改变生产方式，培育新的商业模式，从而实现结构调整、优化和升级的整体目标。

加强能源安全：作为全球最大的原油消费国之一，中国已经在 2018 年超过美国成为全球最大的原油进口国（IEA，2020 年）。中国也是全球最大的煤炭消费国和进口国。2019 年，中国的煤炭消费量高达 28.7 亿吨标准煤，占全球煤炭消费总量的 53%，煤炭进口量占全球煤炭进口总量的 21%（IEA，2020 年）。对进口化石燃料的严重依赖削弱了中国的能源安全。碳中和目标的实现，有助于提高国内可再生能源的装机容量，减少对进口化石燃料的依赖，从而提升国家能源安全水平。

改善空气质量和人体健康：碳中和目标有助于减少空气污染，提高公民健康水平，维护生命安全，改善自然环境。实行低碳转型战略将降低电力、工业以及建筑领域对煤炭的依赖，加速新一代低污染车辆的应用。这些措施将大大降低细颗粒物（PM_{2.5}）、二氧化硫（SO₂）以及氮氧化物（NO_x）排放所带来的健康风险。然而，现行的空气质量标准并不足以实现保障健康的长期目标。如果将中国空气质量目标与碳中和目标所隐含的绿色发展要求相结合，将推动中国实现世卫组织最严格的空气质量标准（见专栏 2-3）。

旧的经济增长与发展模式走向终结，中国即将在新愿景的指导下开启新的发展篇章。碳中和目标是新愿景的基础，它必将促进绿色、高效、可持续的消费与生产，建设更高质量、更开放包容和更具凝聚力的经济、政治与社会体系，推进人与自然和谐相处的生态文明。

专栏2-2 新经济领域就业

中国向低碳经济转型有助于带动多个行业的就业增长，实现普惠的经济繁荣。在转型过程中，就业机会将从化石燃料领域转向 21 世纪新兴产业。越来越多的分析强调新兴技术所带来的积极就业影响，同时也指出由于新兴技术比传统技术更加清洁、高效，采用新技术是顺应潮流的。拥抱变化并及时作出改变的国家将有机会成为 21 世纪全球经济的领导者。

低碳领域当前就业形势。中国目前在全球绿色能源经济领域的优势红利已经显现，新的就业机会不断增加，同时这种红利会快速扩大。过去十年低碳技术以及服务领域的就业显著增长，低碳经济转型会持续带动就业。2010 年到 2019 年间，中国在可再生能源领域的投资额达到 8180 亿美元，成为全球最大的太阳能光伏和光热市场。2020 年，中国可再生能源领域的就业人数约 440 万，占全球该领域就业总人数的 38%（IRENA，2020 年）。

实际上，中国在四大可再生能源产业的就业人数已居于全球领先地位。光伏发电、陆地及海上风力发电、水电以及太阳能供热与制冷行业的就业人数分别为 220 万、50 万、60 万和 70 万，占全球上述行业就业总人数的 59%、44%、29% 和 81%。

清洁能源领域就业的未来增长。在决定国际能源产业发展的关键技术领域，中国一直处于领先地位，这将有助于带动相关产业强劲的就业增长，创造经济产值。预计 2050 年全球可再生能源就业人数将增长四倍。在实现碳中和目标的过程中，中国将在可再生能源和储能、建筑以及相关服务如共享出行方面创造更多的就业机会（Huang 等，2020 年）。除了可再生能源相关行业创造的直接就业机会以外，中国目前力推的创新以及“环境友好、低碳及循环型”战略新兴产业，如新一代通信、人工智能、先

进机器人以及大数据等，不仅能创造新的就业机会，同时也有利于绿色就业增长，推动经济结构变革，最终实现低碳经济转型（MHRSS，2019 年）。

配套政策。低碳经济转型对整体就业形势会产生积极影响，但化石燃料和其他碳密集型产业短期内将出现就业机会流失。高碳就业机会流失与低碳产业和服务领域就业增长之间能否达到平衡，取决于中国所采取的具体政策措施。如果政策措施设计合理，在保持低碳经济就业增长趋势的同时，通过有针对性的政策设计将解决煤炭转型所导致的失业问题，从而实现公平合理的绿色经济转型。其他国家的数据有力地证明了低碳产业与服务领域实现公正转型与就业增长的可能性（Caldecott 等，2017 年；Gales 和 Hölsgens 等，2017 年；Herpich 等，2018 年）。此外，近期研究证实了绿色产业领域开展再就业培训的潜力（OECD，2019 年；Bowen 等，2018 年）。研究表明，如通过有针对性的配套政策管理就业转型，绿色经济领域短期内的就业增长可以实现，对工人的影响也会降到最低（Bowen 等，2018 年）。这些配套政策包括技能提升与培训、能力建设以及职业培训计划。由于煤炭工人通常受教育水平较低，就业选择面有限（Fei，2018 年），这些培训计划将是中国低碳经济政策战略的重中之重。

尽管前期研究成果在一定程度上坚定了转型的信心，但我们对就业市场动态变化的认识仍比较有限，未来需要考虑到中国各地不同的实际情况，对一揽子政策计划的就业影响进行更深入的研究，以改善气候政策决策基础。很多研究对中国低碳经济转型所带来的就业影响做了量化分析，未来需要更多的研究与分析，用以识别影响政策效率的重要因素。

大气污染物与温室气体同根同源，温室气体减排战略有助于改善空气质量，保护公众健康，反之亦然。大气污染物与温室气体的共同排放源主要包括化石燃料燃烧、工业过程、废物处理、农业以及土地利用变化（IPCC，1990 年）等。此外，大多数大气污染物（如黑碳、硫酸盐、硝酸盐及臭氧）也会对气候产生影响。目前全球大气气溶胶-辐射相互作用导致的直接辐射强迫和气溶胶总辐射强迫分别高达 -0.45 ($-0.95 \sim +0.05$) 瓦/平方米和 -0.9 ($-0.95 \sim +0.05$) 瓦/平方米（IPCC，2014 年）。

过去十年，尽管空气质量得到明显改善，中国依然面临着空气污染与公众健康方面的挑战。尤其在人口老龄化的背景下，人群健康对空气污染将更为敏感。

众多研究表明，相对于单独治理温室气体或大气污染物，协同治理更为有效且成本更低（Li 等，2019 年）。据 Nam 等 2013 年估算，如果中国在 2015-2050 年期间以每五年 8%-10% 的速度减少 SO_2 和 NO_x 的排放，到 2050 年可累计减少 200 亿吨 CO_2 排放量。Tong 等学者 2020 年的一项研究指出，如果中国能切实履行国家自主贡献目标和现有的清洁空气计划，主要大气污染物（如 SO_2 、 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 以及挥发性有机物）排放在 2015-2030 年间将减少 29%-52%。如果采用更严格的气候减排方案将温升控制在 2°C 以内并采用最佳末端治理措施，到 2050 年，这些主要污染物排放将在 2030 年基础上进一步下降 36%-61%（Tong 等，2020 年）。此外，Li 等学者在 2018 年的一项研究发现，与不采取气候减排措施相比，如实施碳定价政策并确保碳排放强度以每年 4% 的速度下降，到 2030 年，中国人口加权 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度将降低 12%，与 $\text{PM}_{2.5}$ 污染相关的过早死亡人数将减少 9.4 万人。Li 等人在 2019 年发表的一项研究指出，如果将 2°C 情景下的能源转型措施与最佳末端治理措施相结合，可将 2050 年中国人口加权 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降至约 $16\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。最新研究发现（Cheng 等，2020 年），现行的大气污染末端治理措施对 2030 年后空气质量的改善作用非常有限。只有将更严格的气候减排目标与末端治理措施相结合，中国的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染水平才能在 2050 年达到或低于世卫组织标准（年均浓度 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）。

燃煤电厂是中国大气污染物和碳排放的主要来源。电力部门的大气污染与碳排放协同治理工作，需要聚焦于低碳结构调整和发电效率提升两个方面。在大幅增加可再生能源发电比例的同时，提升现有设备的效率并关闭落后电厂，从而切实降低电力行

业煤耗。研究表明这些措施将有助于改善空气质量，减少碳排放。Yang 等学者发现，如果 2030 年中国光伏装机达到 4 亿千瓦，将减少 4.2% 的 CO_2 排放量和 1.2% 的空气污染相关过早死亡。Lu 等学者于 2019 年发表的一项研究认为，中国如果将 10500 亿千瓦时的煤炭发电量替换为生物质与煤共气化及碳捕集技术（CBECCS）， CO_2 与 $\text{PM}_{2.5}$ 排放将在 2015 年基础上分别下降 9.3% 和 12%。关闭小型以及低效机组有助于提升电力行业能效，减少排放。2030 年将大型机组（装机容量大于 600 兆瓦）的占比提高到 80%，可分别减少电力行业 25% 和 5% 的 CO_2 和 SO_2 排放（Tong 等，2018 年）。

工业部门在碳减排与大气污染防治方面也发挥着关键作用。工业部门的协同治理措施主要包括：技术升级提高能效、减少化石燃料使用、增加低碳能源比例等。以钢铁行业为例，研究发现，在 2030 年钢铁需求为 6.4 亿吨的情景下，如果将废钢利用率提高 50%，可额外利用废钢 1.9 亿吨，并分别减少 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 和 PM_{10} 排放 6770 万吨、11 万吨、2 万吨和 3 万吨。这些减排将进一步减少空气污染相关过早死亡 3-7 万人，减少经济损失 3.86-8.53 亿美元（Ma 等，2016 年）。

随着汽车保有量的快速增长，交通领域能源消耗大幅增加，空气污染物与温室气体排放也因此上升。能源效率提升、低碳燃料替代及交通模式转型是交通领域实现 CO_2 与污染物协同减排的主要措施。Liu 等于 2018 年发表的一项研究指出，到 2050 年，提高能效的措施可降低交通部门 38% 的 CO_2 排放，增加电动汽车的措施可降低 35% 的 CO_2 排放。两项措施将分别减少与空气相关的过早死亡病例 12 万人和 10.2 万人（Liu 等，2018 年）。

随着人民生活水平不断改善，住宅服务标准日益提高，相应的环境压力也因此增加。在中国广大农村和城市地区，利用电网供电、建筑光伏一体化（BIPV）和新型生物质能等清洁低碳技术替代散煤，有助于协同降低室内外空气污染及 CO_2 排放。基于成本效益分析方法的研究表明，减少住宅建筑领域煤炭以及传统生物燃料的使用，可大幅改善空气质量，减少相关健康影响，并协同减少碳排放。Liu 等 2019 年的研究发现，在住宅领域使用清洁燃料可减少室外空气污染相关的死亡人数 4%，而室内空气污染相关的健康效益则更为显著，相对于基准线可减少 31% 的死亡人数（Liu 等，2018 年）。





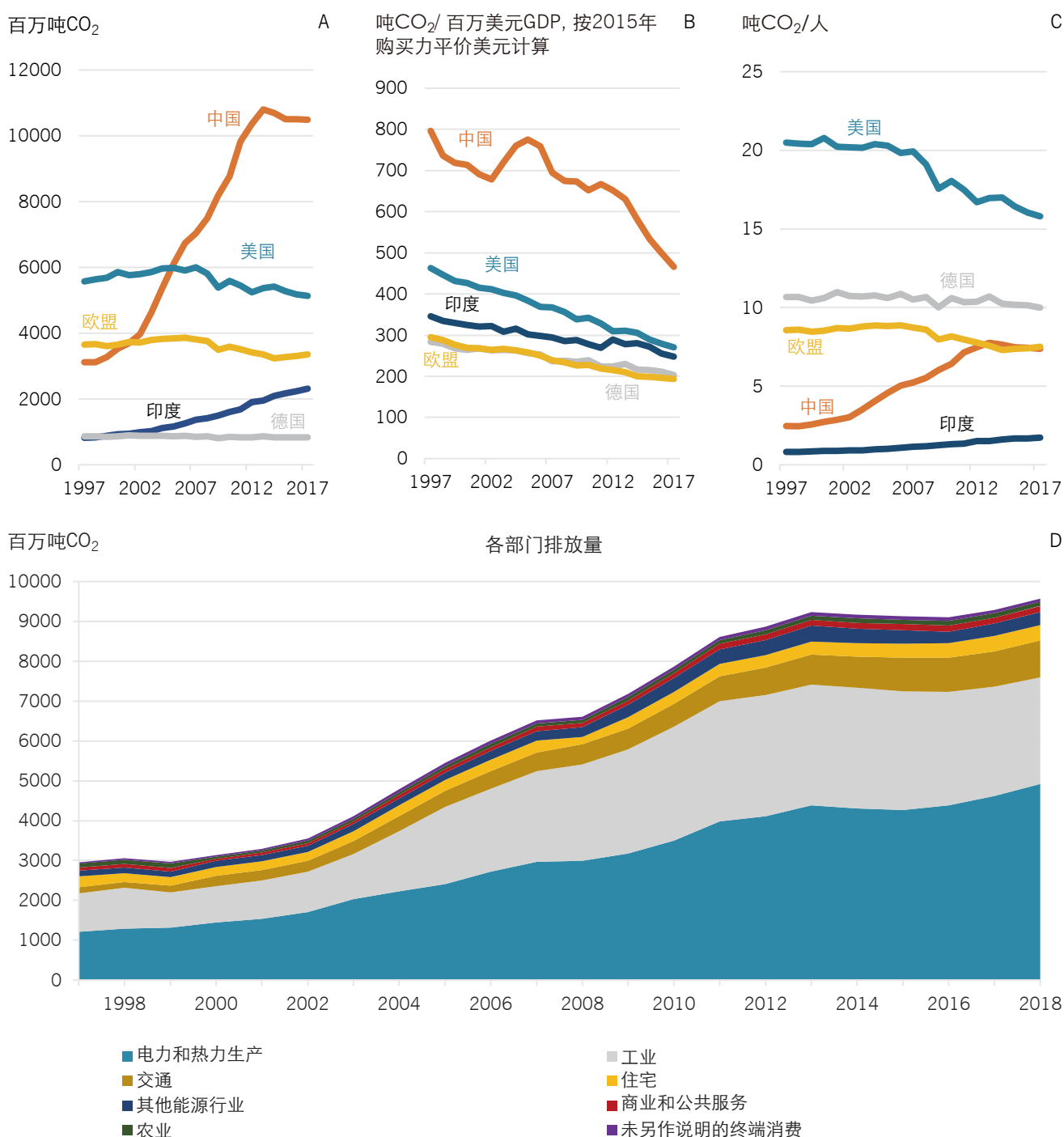
3. 长期战略的关键要素

2015 年,《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC) 缔约方会议第二十一届会议通过了《巴黎协定》,这是应对气候变化史上具有重要里程碑意义的协议。《巴黎协定》的重要目标之一是“在本世纪内将全球平均气温升幅控制在工业化前水平以上低于 2°C 之内,并努力将气温升幅限制在工业化前水平以上 1.5°C 之内”。为了履行《巴黎协定》的承诺,中国近期宣布了长期碳中和目标,希望为全球气候变化做出显著贡献。2020 年 9 月,国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布,中国“ CO_2 排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”。这一承诺表明:在瞬息万变的全球环境中,中国将在应对气候变化行动中发挥全球领导作用,并将采取更有力的气候变化减缓行动实现经济增长和普惠繁荣。中国这一承诺将为全球应对气候变化做出重大贡献。

中国在气候变化领域发挥领导作用至关重要。中国目前是世界第二大经济体,2006 年成为全球最大的 CO_2 排放国。同时,中国实现碳中和目标的途径需要考虑到自身的国情。作为一个不断增长的经济体,中国单位 GDP CO_2 排放量居世界第 16 位,人均 CO_2 排放量居第 49 位,约为美国的一半 (Gilfillan 等, 2019 年; UNFCCC, 2019 年; BP, 2019 年)。2018 年,中国化石能源和工业过程、全口径温室气体排放分别为 112 亿吨 CO_2 和 136 亿吨 CO_2 当量 (Olivier 和 Peters, 2020 年)。2010-2018 年,中国化石能源和水泥的 CO_2 排放量平均每年增长 1.4% (Friedlingstein 等, 2020)。2018 年,电力和供热的排放最大 (51%), 其次是工业 (28%) 和交通 (10%) (IEA, 2020a)。中国需要摆脱对传统化石能源的依赖,同时确保为普惠繁荣提供新机会。

图3-1: 部分国家/地区的历史CO₂排放量（图A）；部分国家/地区的历史碳排放强度（相比经济产出）（图B）；特定国家/地区的人均历史碳排放量（图C）；中国各部门的历史碳排放量（图D）

（数据来源：EIA, 全球碳计划；IEA, 2020a）



与其他国家一样，新冠疫情（COVID-19）影响了中国经济发展及温室气体排放。2020年上半年，中国CO₂排放量下降了3.7%。2月份的排放量降幅最大（-18.4%），其次是3月份（-9.2%）。然而，随着经济活动逐渐恢复，排放量也开始反弹，2020年5月

碳排放水平同比增长5%（Liu等，2020年）。疫情无疑将对中国的短期战略造成影响，但长期影响尚不明确。中国长期战略既需要考虑疫情的近期影响，也需要考虑经济发展的长期目标和愿景。

政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 最新研究表明：全球需要在 2050 年左右实现 CO₂ 的净零排放，即碳中和，才能实现 1.5℃ 目标；需要在 2070 年至 2080 年左右实现碳中和，才能实现 2℃ 目标。同期，非 CO₂ 温室气体的排放需要大幅减少 (IPCC, 2018)*。IPCC 的指导性建议来源于评估碳中和时间范围的相关科学研究。部分情景预测 2040 年实现全球 CO₂ 净零排放，部分情景认为 2060 年后才可能净零排放。不同的分析结果反映了不确定性和不同的战略选择。影响碳排放的许多关键因素未来都存在不确定性，比如人口变化、经济增长以及技术进步。这一结论背后的气候科学也是不断发展、充满不确定性的。战略选择包括未来几十年的减排路径，在本世纪下半叶对负排放技术的依赖程度（如植树造林、生物质能结合碳捕集与封存技术、直接空气捕获），以及非 CO₂ 温室气体、气溶胶、气溶胶前体物的减排程度等。总体而言，越晚实现 CO₂ 净零排放，需要的非 CO₂ 温室气体的减排幅度就越大，并且本世纪下半叶对负排放技术的依赖程度会更高。IPCC 的指导建议试图在目前可实现的目标和本世纪下半叶负排放技术的选择之间找到平衡。

鉴于此，中国承诺在 2060 年之前实现碳中和，将对全球 1.5℃ 温控目标的实现做出重大贡献。中国 2060 碳中和目标与全球范围内实现 1.5℃ 温控目标的“成本最优”路径大体一致（参见图 3-2）。中国若在 2060 年前，越早实现 CO₂ 排放量净零或接近零，1.5℃ 目标实现的可能性就越大。虽然全球目标是在本世纪中叶前后实现碳中和，不同国家实现碳中和的时间点可能各有差异，但并不影响全球共同努力，将全球温升控制在 1.5℃ 以内。在《巴黎协定》的背景下，各国需要根据具体国情制定长期战略，考虑国内低碳能源和土地资源、经济增长与发展战略、以及碳封存潜力和实现净零排放的最终减排能力。对于公平和公正的不同理解也会影响到各国对何时实现碳中和的认识。同样，从全球经济效率和公平的角度（例如以人均排放量或历史责任来衡量国家碳排放），有关各国何时碳中和的结论也不尽相同 (van den Bergh 等, 2020 年)。总之，各国出于不同层面的考虑，对于何时实现碳中和有不同的认识。但是这也提供了各种碳中和策略的可能性。

无论中国具体在哪一年达到碳中和，CO₂ 排放量都需要尽快达到峰值。中国还需要借鉴其他国家经验和做法，进一步强化应对气候行动，在本世纪中叶前后 CO₂ 排放趋于零，推动 1.5℃ 目标实现。然而，中

国不能等到 2060 年左右再开始减排行动。“碳中和”这一概念是国际行动的重要组织框架，但最终影响气候变暖趋势的是随时间推移的 CO₂ 排放总量，即“累积 CO₂ 排放”，而不仅仅是本世纪中叶单年的排放量。尽快达峰和长期快速减排可以有效限制中国的 CO₂ 累积排放量。事实上，国内外多项研究都认为：为达到全球 1.5℃ 温控目标，中国 CO₂ 排放应尽快达峰（图 3-2）；如果想达到全球 2℃ 温控目标，CO₂ 排放应在 2030 年前达峰（图 3-2）。

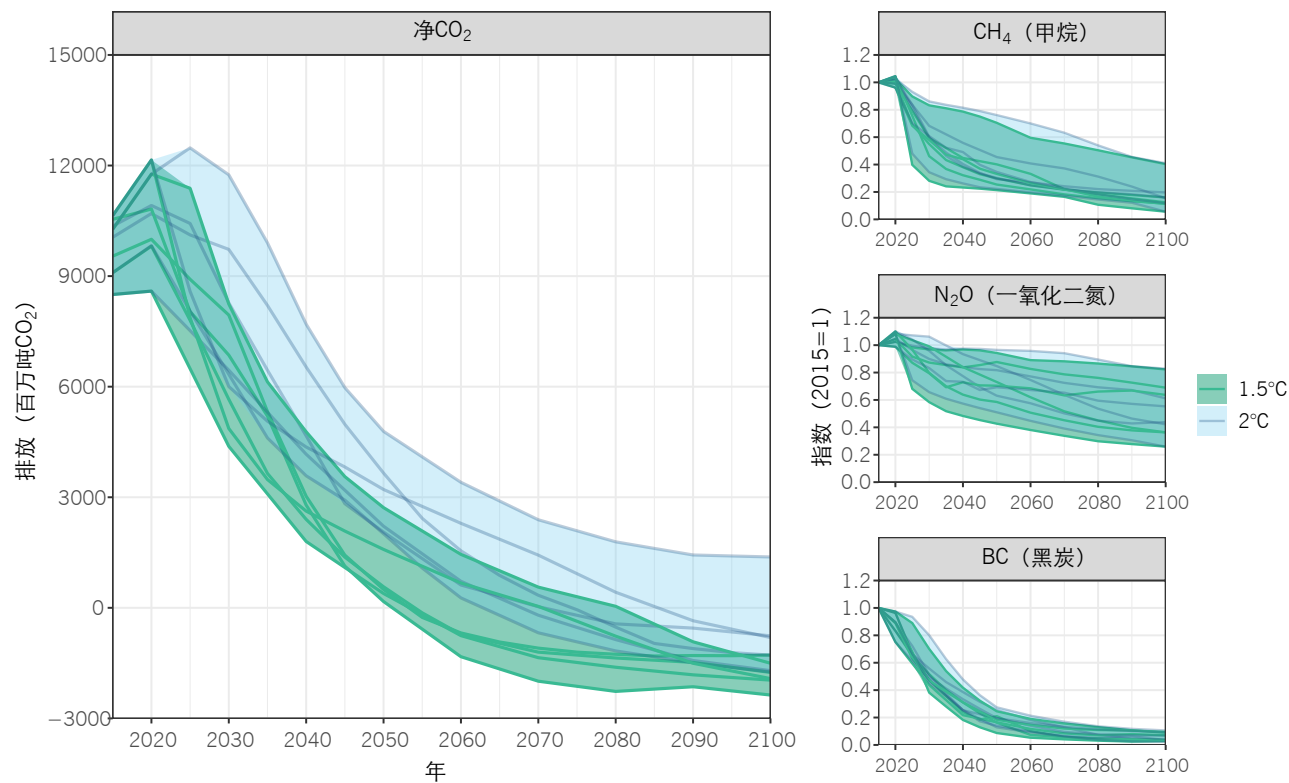
如果中国 CO₂ 排放量在 2030 年之前尚未达峰，不仅其累积排放量会更高，而且将对 2060 年实现碳中和以及控制累积排放带来巨大挑战。到那时，中国经济将长期锁定在高排放产业中（如燃煤电厂），更难摆脱原有经济发展模式；同时，中国更深层次的社会、经济和能源系统转型会相应延迟，这将使中国 2060 年实现碳中和面临巨大挑战。



* 注：这两个净零目标都不能保证将温升幅度控制在 1.5℃ 或 2℃ 以内，是指有 50% 的概率将温升幅度控制在 1.5℃ 和 66% 的概率将温升幅度控制在 2℃ 以内。

图3-2: 1.5°C和2.0°C情景下中国CO₂和部分非 CO₂温室气体排放量

下表展示了所选情景采用的关键变量的完整取值范围。
(数据来源: CO-LINKS 全球情景 (McCollum 等, 2018; Roelfsema 等, 2020) 和 GCAM-China 的中国排放路径)



	累计 CO ₂ 排放量 (2016-2050) [GtCO ₂]		相比 2015 年的 化石能源 CO ₂ 减排量 [%]		相比 2015 年的温 室气体减排比例 [%]		达峰年份	碳中和年份		
	包含 AFOLU*	化石 燃料	2035	2050	2035	2050		包含 AFOLU 的 CO ₂ 排放	化石燃 料的 CO ₂ 排放	《京都议定 书》温室气 体
1.5°C	150-260	120-220	45-65	75-100	45-70	75-90	~2020	2050-2080	2050-2080	2060-2090
2°C	200-330	170-290	10-45	60-80	15-55	55-75	2020-2030	2065-2100	2060-2100	2070-2100

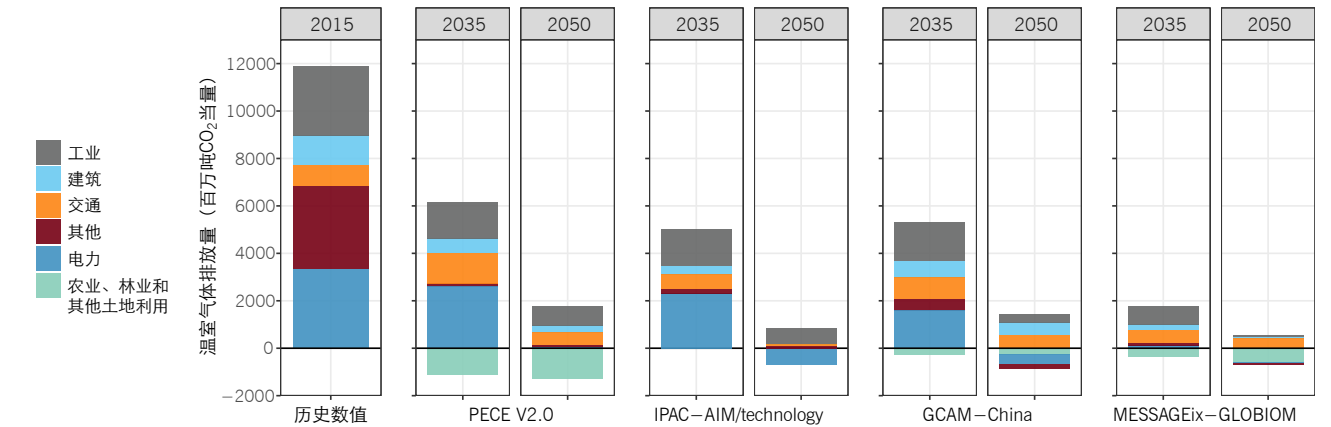
* 农业、林业和其他土地利用 (AFOLU)

碳中和目标是整体经济面临的挑战，需要各个经济部门（包括建筑、工业、交通、电力、农业和林业）大规模减少排放量，同时实现中国经济持续增长和净零排放。各个部门都将面临自己的机遇和挑战，并将遵循各自的碳中和时间表（图 3-3）。尽管如此，现有研究和支撑本报告的最新研究提出了至少两个战略性的意见。首先，由于众多低碳发电替代选择的存在以及风电和光伏经济竞争力的不断提高，相对于其他部门，电力部门存在更多的近期大幅度减排机会。同时，电力部门脱碳是通过电气化实现终端部门脱碳的关键促成因素。在强调电力部门可能比其他部门更快的减

少碳排放的同时，也需要其他部门立即采取减排行动。其次，许多设施和工艺目前还没有低成本减排方案，例如航空运输、工业过程和高温热等领域。根据相关研究预测，这些领域将最后实现脱碳，或者可能永远无法实现完全脱碳。因此，工业和交通部门的深度减排可能落后于其他部门。与此同时，减排技术发展日新月异，几十年后的减排机会可能与今天截然不同。因此，一个有效的战略不仅需要制定并推动目前的减排行动和措施的实施，而且应为未来技术调整提供更开放和包容的空间，引导更多投资转向难以脱碳部门的技术研发。

图3-3：2015年历史CO₂排放量及1.5℃情景下本报告所选模型在2035年和2050年的CO₂排放量（上图）；相比2015年的各部门CO₂减排量（下表）

注：考虑到基准年数据的差异，下表百分比是根据所选情景中 2015 年数据计算得到的（未根据中国排放清单计算）。基准年数值因模型之间各部门计算方法不同而呈现差异。负值表示增加。此外，计算各部门的范围时选用了所有模型集合的不同子集。有关各部门的情景选择请参考本报告第 4 章。下表使用的模型包括：ERI-Industry, GCAM-China, ICSDD-LoMLoG, IPAC-AIM/technology, MESSAGEix-GLOBIOM, PECE_LIU_2019, PECE V2.0, POLES-JRC 2019 和 Transportation-CATS。（2015 年数据来源：IEA，2019b）



部门	2035		2050	
	1.5℃	2℃	1.5℃	2℃
电力	20%-60%	0%-45%	100%-120%	80%-100%
建筑	0%-70%	0%-50%	50%-95%	20%-80%
工业	30%-70%	20%-35%	75%-95%	50%-80%
交通	-45%-25%	-60%- -5%	40-90%	25%-65%

专栏3-1 国家情景与中国碳中和目标、全球1.5℃温控目标

本报告旨在探讨如何推动整个经济和各部门转型，实现中国碳中和目标以及全球 1.5℃ 温控目标。国家整体层面和各部门低碳转型路径的分析研究基于对中国不同层面以及各部门进行详细描述的分析模型和工具。本报告采用的所有国家 1.5℃ 情景都与 2060 年前实现碳中和的目标相一致，甚至部分情景显示 2050 年后短期内即有望实现碳中和。

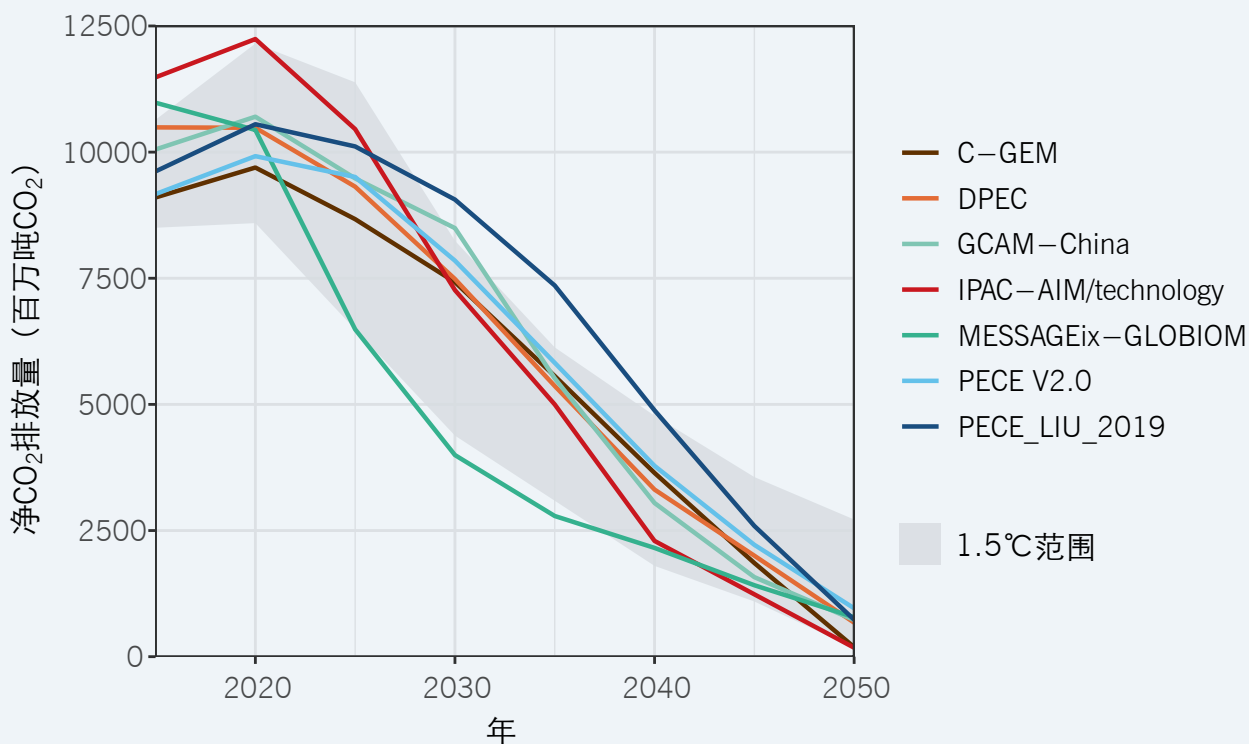
总体而言，这些模型纳入了更充分的部门情况，仅代表中国或中国某些部门未来的发展动向，无法体现世界其他地区正在发生的转型。也就是说，这些模型适用于理解国家和部门的未来动态，可以评估国家情景与中国碳中和目标的一致性。由于气候

变化是全球排放共同作用的结果，判断国家减排与全球长期温控目标（例如 1.5℃）的一致性必须借助于全球模型。只有将国家情景与全球情景进行比较，才能评估其与全球温控目标的一致性。

通过对比中国模型分析的能源排放量与全球模型分析的中国能源排放量，可以评估国家情景与全球温升控制 1.5℃ 的一致性。本报告采用的所有国家模型的 1.5℃ 情景排放都位于全球 1.5℃ 情景范围内，仅有个别情景在某一时间段内超出全球情景的范围。在国家 1.5℃ 情景下，2050 年相对于 2015 年排放量下降幅度在 90%-100% 之间。这一减排幅度处于全球 1.5℃ 情景的低限，基本认为与 1.5℃ 目标一致。

图1：全球模型和中国模型下的中国CO₂排放量

注：部分模型未包括 AFOLU（农业，林业和其他土地利用）产生的 CO₂ 排放量。

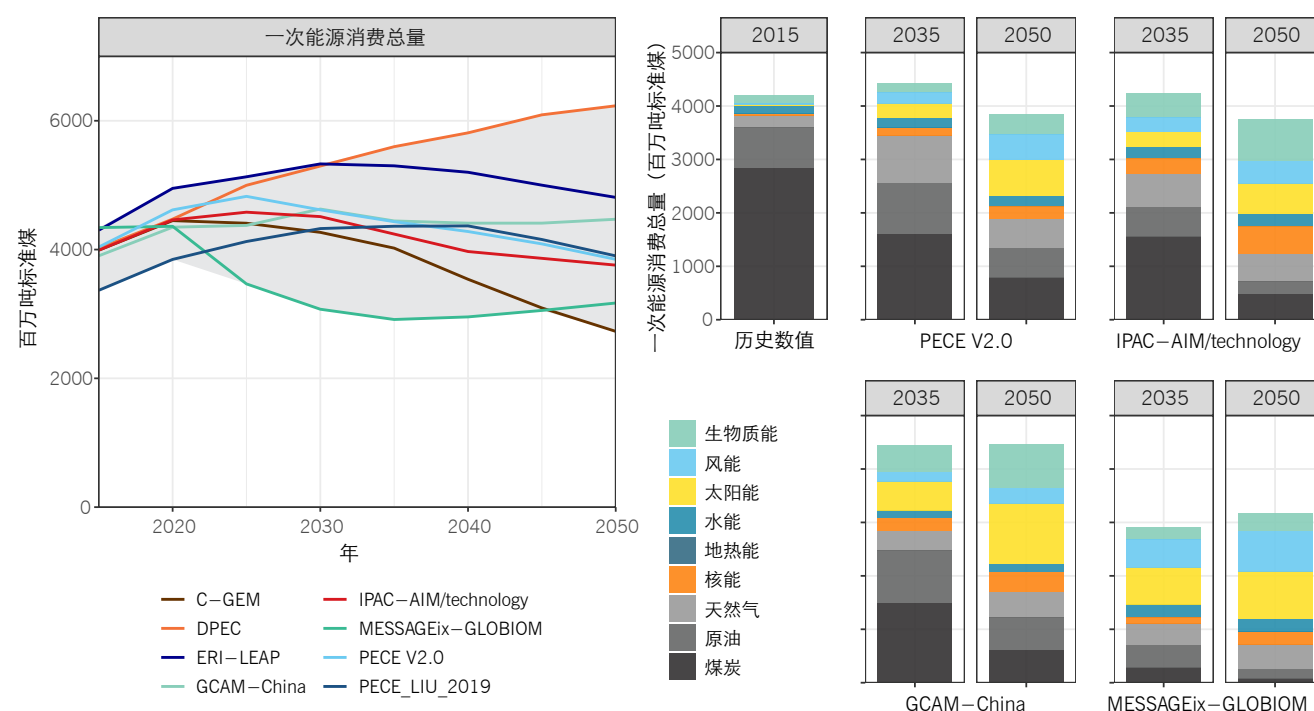


中国 2060 年前实现碳中和目标，意味着需要快速大规模地推广低碳能源，同时中国也要做好充足准备应对能耗增长的压力。中国能源系统发展的总体趋势具有不确定，取决于更广泛的社会经济和技术因素。本报告采用的情景认为能源生产和消费增长短期放缓，随后逐渐下降（图 3-4）。在 1.5°C 情景下，低碳能源（包括采用 CO₂ 捕集、利用和封存（CCUS）的化石

能源）占一次能源消费总量的比重，应从 2015 年的约 6% 增加到 2035 年的 30-65% 和 2050 年的 70-85%（图 3-4A）。这些与《IPCC 全球温升 1.5°C 特别报告》（IPCC，2018 年）中的目标基本一致。非化石能源占一次能源消费比重应从 2015 年的 6% 增长到 2035 年的 20-60% 和 2050 年的 50-75%。

图3-4A：本报告采纳的1.5°C情景下一次能源消费总量

左图显示所选情景的一次能源消费总量。右图显示四种示例情景的一次能源消费总量。由于所用清单、一次能源计算方法以及预测年份的差异（比如在某些模型中 2015 年是预测年），基准年数值各不相同。本报告采用电热当量法计算一次能源，未使用中国官方的发电煤耗法。

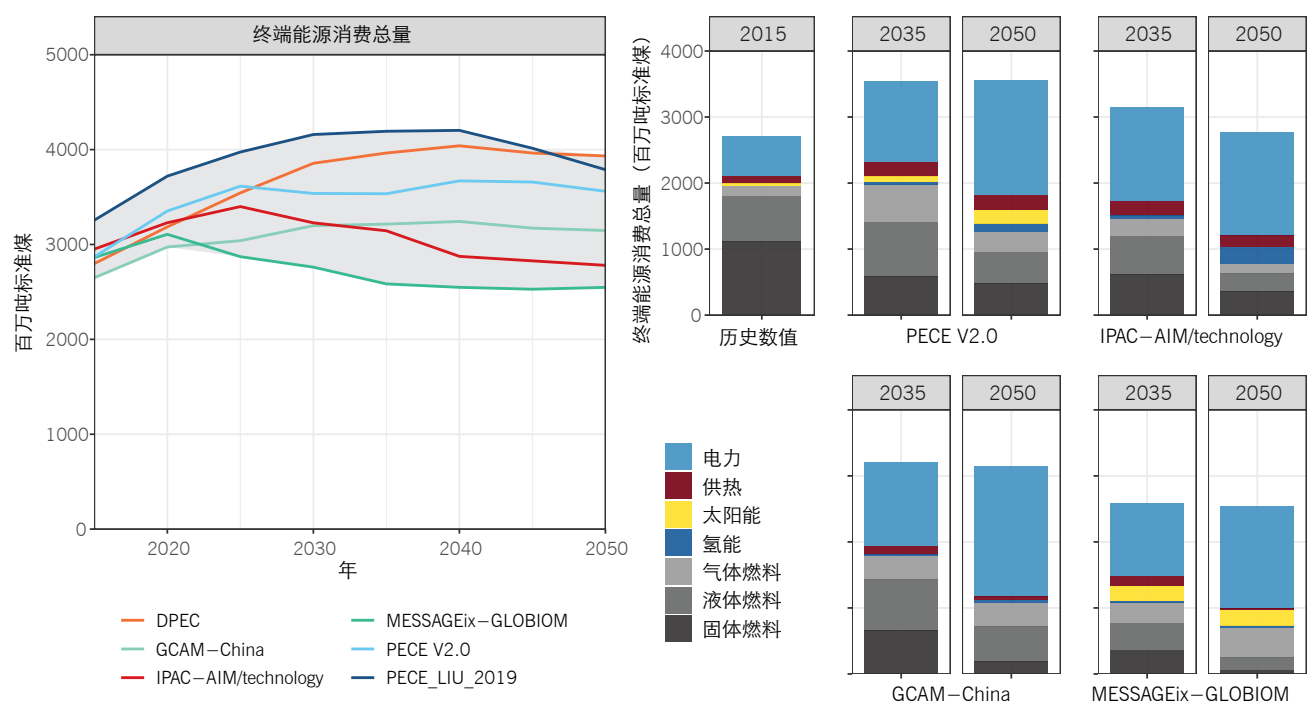


这些战略实施也会改变建筑、工业和交通等终端部门的能源构成。尤其值得关注的是，电力部门在中国未来能源系统中的作用将远远超过目前水平。尽管交通部门目前用电量很少，但未来该部门电气化水平会大幅度提高。工业部门普遍实现电气化面临较大的挑战，长期来看未来难以脱碳领域的减排可以考虑氢

能和生物质能源等替代燃料。加速实现电气化战略，还可以大幅提高众多应用场景的能源效率，为有效遏制终端能源消耗提供机会。以铁路运输部门为例，电动列车“从油箱到车轮”的能源效率要远高于内燃机列车。

图3-48：本报告采纳的1.5℃情景下终端能源消费量

左图是所选情景的终端能源消费总量。右图是四种示例情景的终端能源消费量。由于所用清单和预测年份的差异（比如在某些模型中 2015 年是预测年），基准年数值各不相同。



基于全经济范围的情景研究以及其他深度脱碳研究，本报告认为中国可以采取五项跨部门的脱碳策略来实现 2060 碳中和目标，这些跨部门脱碳策略针对各部门设定了相应的侧重点（图 3-5）。为了实现全球温升幅度控制 1.5°C 或 2°C 之内，这些脱碳策略还需辅以其他行动措施，如非 CO₂ 温室气体排放控制等。主要包括以下五方面：






- ▶ **推动终端部门可持续需求：**通过更高能效、结构调整、城市规划和生活方式转变等方式，在维持较高生活水平的时候，实现终端部门可持续能源消费；
- ▶ **电力部门脱碳：**淘汰未采用碳捕集、利用和封存（CCUS）技术的燃煤电厂，快速构建以化石

能源为主，核能和 CCUS 技术为辅的多元化电力供应系统；

- ▶ **终端部门电气化：**加速电动车发展，工业过程广泛采用电力供应低温热，建筑用电取暖和供应热水（如热泵）；
- ▶ **低碳燃料替代：**在难以实现电气化或者经济性较差的领域采用氢能和生物质能替代化石能源，如工业（作为燃料或原料）和交通（如长途货运、航运和航空）等领域；
- ▶ **固碳：**在难以脱碳实现净零排放的领域，如航空排放和工业高温热，采用自然系统（如森林和土壤）固碳，或利用 CO₂ 移除技术实现碳中和。

图3-5：跨部门减排策略及其在不同部门的应用

减排措施

部门	可持续需求	低碳发电	电气化	燃料转换	碳封存
 电力		✓			✓
 建筑	✓	✓	✓	✓	
 工业	✓	✓	✓	✓	✓
 交通	✓		✓	✓	
 农业、林业及其他土地利用	✓				✓

上述策略的根本是所有部门逐步淘汰未采用 CCUS 技术的煤炭消费（见专栏 3-2）。实现更严格的气候目标，需要全经济范围在不同程度上快速淘汰未采用 CCUS 技术的煤炭消费。煤炭消费占比最高的电力和工业部门首当其冲，可以考虑通过部署 CCUS 技术（如发电、氢和氨生产、粗钢水泥生产），从燃料燃烧和

工业过程中捕获大部分 CO₂，然后再利用或封存在地下，以缓解退煤对这两个部门的冲击。部署 CCUS 技术可以减缓煤矿关停和煤炭相关行业的重组速度，防止劳动力市场出现失序（见第 5 章）。当然，CCUS 技术的部署与快速退煤并不相悖。

专栏3-2 逐步淘汰能源系统中的煤炭

在中国的新增长路径中，逐步淘汰煤电是短期最具有技术可行性和获益最大的行动计划之一，当然也需要周密规划，保障就业和可持续的经济增长。作为世界上最大的煤炭消费和生产国，煤炭已深植于中国的能源体系及经济体系。2019年，煤炭占中国一次能源消费总量的58%（NBS，2020年），广泛应用于发电、钢铁和水泥生产、建筑材料、化学制品和建筑领域。“十二五”和“十三五”期间（2011-2020年），中国实施了一系列煤炭控制措施，2013年后中国煤炭消费总量有所下降，但近年来出现反弹势头，2019年煤炭消费量几乎反弹到2013年的水平。

为支持中国同时实现碳中和以及现代化远景目标的新增长路径，中国需要快速淘汰煤炭，推动能源系统向零排放能源转型。中国要进入新阶段，必须立即从控制煤炭增长转向加速淘汰未采用CCUS技术的煤炭消费。

- ▶ **各部门加速摆脱煤炭依赖。**考虑各部门技术和体制机制挑战各异，早期行动短期效果不同，摆脱煤炭依赖的时间表需要视部门情况而定。“十四五”期间，应基本解决散煤问题，淘汰小型工业燃煤锅炉和窑炉以及农村居民供热和炊事散煤燃烧（2021-2025年）。2040-2045年，淘汰未采用CCUS技术的燃煤发电。2055-2060年，难以实现脱碳的工业部门（如焦炭作为粗钢生产的原料）全面禁止未采用CCUS的煤炭消费。

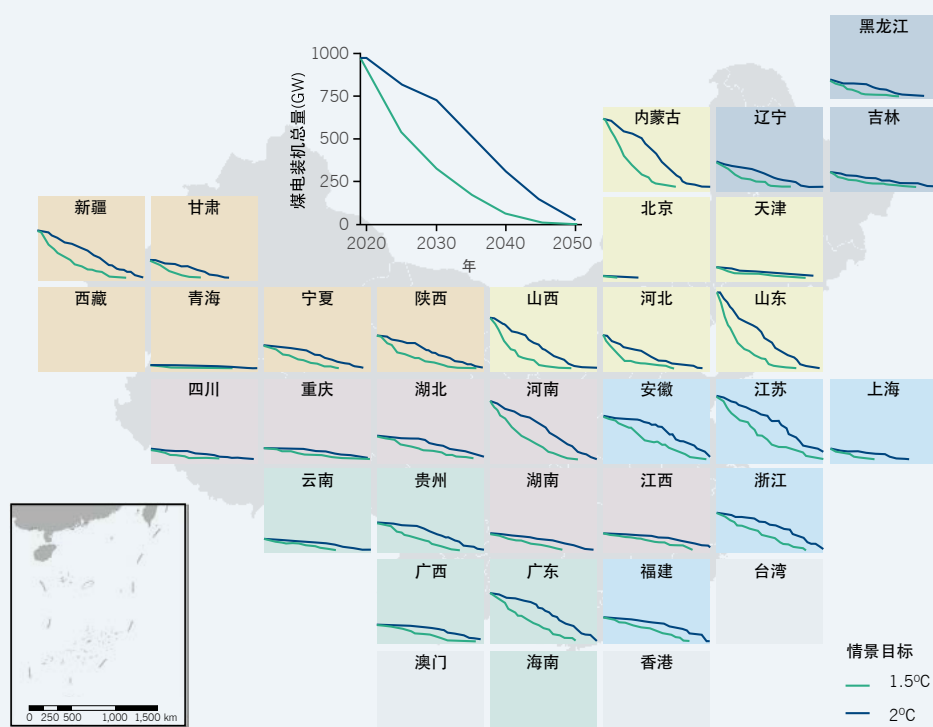
- ▶ **工业和民用散煤。**在过去十年中，京津冀地区在散煤治理方面进展显著。这些地区通过关停低效高污染的工业燃煤锅炉，实施煤改气、煤改电以及农村清洁取暖财政补贴政策等，基本建成无散煤区。这些治理经验应在全国迅速推广，并加速可再生能源的利用，包括居民住宅屋顶光伏和生物质能利用等。散煤治理一直是我国大气污染防治的关键措施之一，“十四五”期间需要进一步加大力度，基本解决工业和民用散煤问题。

- ▶ **燃煤发电。**电力行业的煤炭消耗约占中国煤炭消费总量的54%（EPPEI，2019年），中国必须逐步淘汰燃煤电厂。通过停止新建燃煤电厂，短期内迅速淘汰老旧落后和低效燃煤电厂，逐步降低现役燃煤发电机组的利用小时数，未采用CCUS的燃煤发电将在2040-2045年左右完全退出（Cui等，2020年）。另外，部分省份应更早更快采取行动，如山东、内蒙古和山西三个煤炭消耗大省。山东的落后煤电机组比重高于其他省份，其中，1/3以上的燃煤机组是工业自备电厂，这些燃煤机组由于政策执行不力和监管不严，造成严重的环境污染问题。山东的煤电厂由于技术属性差、盈利能力低、环境影响高，应相对加快淘汰速度和力度。加快淘汰煤电可以推动山东增加绿色能源的开发和利用（初期可从邻省外调绿电），优化经济结构。



图1: 1.5℃情景和2℃情景下国家和省级煤电淘汰路径

(来源: Cui 等, 2020 年)



- **工业燃煤。**钢铁生产、建筑材料、煤化工、水泥生产等工业部门煤炭消费占中国煤炭消费总量的 40% 以上 (EPPEI, 2019 年)。逐步淘汰这些未采用 CCUS 技术的部门煤炭消费需要制定综合替代计划, 包括能效提升, 提高电气化水平, 加快低碳燃料替代 (如绿氢或现代生物燃料), 以及通过产业结构和产品结构优化减少煤炭需求。部分措施可以立刻推广落实 (例如: 能效提升), 但有些措施还需要更长时间部署, 具体取决于技术进步和体制机制完善。

中国逐渐摆脱对煤炭的依赖不仅可以减缓气候变暖, 也会产生巨大的经济和社会效益, 如持续改善空气质量和健康, 提高可再生能源市场竞争力, 降低能源对外依存度, 创造新的绿色经济增长点以及就业机会。

- **空气质量和公众健康。**在过去的十年中, 中国通过关停落后燃煤设施和开展散煤治理行动, 明显改善了空气质量和公众健康。这些政策行动推动了京津冀地区空气质量持续改善, 但是, 山东、河南、山西等煤炭消耗大

省的主要城市仍面临严重的空气污染问题, 在全国城市空气质量排名中垫底。对于这些地区, 降低 PM_{2.5} 浓度是工业和生活散煤治理的核心动力。逐步摆脱对煤炭依赖不仅将带来显著、直接和普惠的健康效益, 也是长期改善空气质量、达到最严空气质量标准的必要途径之一 (Tong 等, 2020 年)。

- **地方经济结构调整。**逐步淘汰煤炭可以给内蒙古、山西、陕西等煤炭生产和输出大省带来发展机遇。随着经济发展的煤炭依赖度增加, 这些省份会不可避免落入 "资源诅咒" 的陷阱, 即当地经济过度依赖于附加值低且脆弱的低端化石资源开采业。近些年来, 由于煤炭价格的剧烈波动, 山西和内蒙古的经济处境比较艰难, 煤炭相关行业出现了断崖式下滑。这些省份应该充分发挥可再生能源资源丰富的优势, 推动以可再生能源为主导的能源结构多样化、提高经济结构和产业结构的多样性, 为长期经济增长提供持续动力。考虑到必然会发生的化石能源转型, 有必要从现在就开始行动, 应对危机, 实现平稳过渡, 而不是沿袭当前的发展路径。

► **就业。**逐步淘汰煤炭将减少整个煤炭供应链（包括采掘、煤炭加工转换和最终使用环节）中技术含量和效率低下的就业岗位数量。鉴于煤炭在目前中国经济社会的基础性地位，低碳转型过程会减少煤炭行业就业人数（Huang 等，2018 年，2019 年，2020 年；Shi 等，2018 年）。在煤炭消费停滞不前和煤炭采掘机械化程度不断提高的共同作用下，煤炭开采和洗选业的就业人数已从 2013 年的 530 万人减少到 2018 年的 320 万人，降幅超过 40%（He 等，2020 年）。可见，即使不强化气候减缓行动，煤炭行业就业人数减少的趋势也成为必然，而 2060 前实现碳中和的目标将会加速这一趋势的发展（Shi 等，2018 年）。各省的就业和经济形势都会受到不同程度的影响，曾经以煤炭经济为支柱的相关群体所

受到的打击最严重。山西和内蒙煤炭从业人数约各占中国煤炭从业总人数的 25%，其次是山东、河南、安徽和黑龙江。过去 5-7 年，这些地区在解决煤炭行业失业问题时都面临着不同程度的挑战，需要寻找更为有效的解决方案，应对加速煤炭淘汰带来的各类社会影响（China Coal Cap Project，2019 年）。

中国煤炭公平转型应列入政策重点。通过制定和实施全面的政策措施，为老年劳动力提供再安置和退休政策，为年轻劳动力提供再培训和教育方案，向个人和企业提供补偿和财政支持，并通过经济激励手段促进当地经济探索新模式与新的发展机会。煤矿开采工作条件艰苦，影响人体健康并且存在巨大安全隐患。有效管理煤炭淘汰进程，可以确保数百万煤炭工人和未来能源行业劳动力享受更高质量的生活。

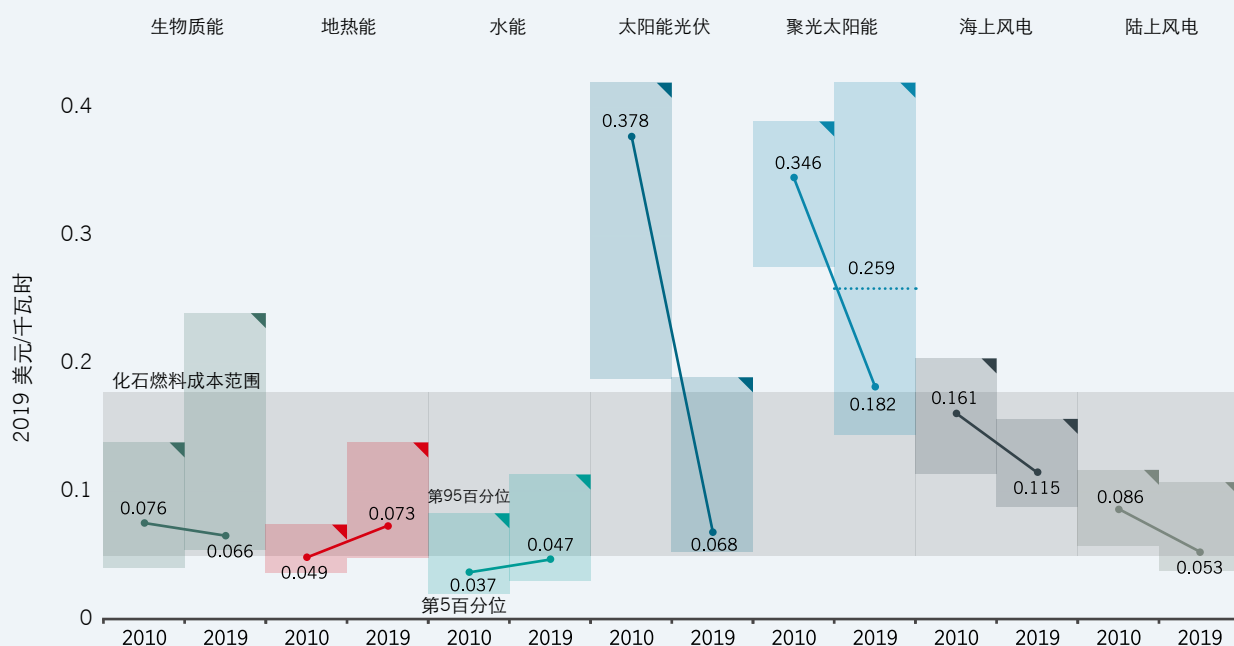
专栏3-3 能源技术的创新与快速变革

技术是减缓气候变化的核心。若没有推动化石燃料替代、空气污染治理等优先领域的技术进步，很难实现全球 1.5℃ 或 2℃ 以内的温控目标。光伏、

电池、数字技术等新技术的涌现正在改变减缓气候变化工作的整体格局，并为短期脱碳提供了成本有效的选择方案，但长期转型还需要更多的技术创新。

图1：2010年和2019年公用事业规模可再生能源发电的全球加权平均成本（LCOE）

（来源：IRENA，2020）



中国长期战略需要强调创新和技术领导力。处于全球技术领先地位的国家将引领新兴低碳经济发展，依靠其自身完善稳定的低碳技术创新体系向其他追随国家输出技术。中国近期规划及本世纪中叶战略需要投资创新，特别是加大对那些可以实现低成本减排并具有全球领导作用的战略性技术领域的投资。

持续加大关键技术的研发或示范。这些技术包括氢能、生物燃料、CCUS、核能和储能等。氢能和生物燃料可广泛用于不易实现电气化的领域，如长途货运、航运、化学制品生产和工业高温热工艺等。氢能还可以作为储能资源来优化电网系统。尽管氢能技术近期取得了显著进展，但氢能生产、储存、燃料电池等领域还存在技术挑战。生物燃料有望直接取代石油等液体化石燃料，然而生物燃料技术还不具备市场竞争力，而且大规模利用可能会对农业和土地利用产生不利影响。中国拥有丰富的地质碳存储能力，为 CCUS 技术部署提供了空间，可以支持中国在难以脱碳的发电和部分工业过程中继续使用化石燃料。利用生物质能结合碳捕集与封存技术（BECCS）可以实现负排放（即从大气中吸收 CO₂），并抵消难以脱碳部门的 CO₂ 排放量。核能仍然是现有

技术条件下作为基荷电源的可行方案之一，以小型模块化反应堆为例的先进核反应堆设计和新兴技术，有望在未来电网中发挥更大的作用。储能技术进步可以增强电网的灵活性，提高电网对风能和太阳能发电的接纳能力。

能源互联网（E-Energy）时代助力数字化和电气化发展。能源互联网融合了信息和通信技术与能源系统，旨在重塑能源系统，推动其向更灵活、更智能、更高效的方向发展。数字化和电气化将成为未来能源系统的基础，能源互联网有望成功整合未来电力系统的核心要素（可再生能源技术、氢能、电动汽车、建筑物和其他终端能源系统），创建更高效、更有韧性的能源体系。

广泛投资科技和创新领域，将有力支持脱碳进程并扩大技术全球领先的优势。创新和技术不仅是中国低碳转型的关键，也是长期经济繁荣的基础。除了低碳技术创新，融合传统科学和关键战略产业的科技创新也将加速中国的低碳转型。中国始终将高新技术作为促进产业转型的战略性支柱产业。在科技和创新方面的广泛投资可以带来双赢，有利于低碳转型和经济增长。





中央音乐学院
Central Conservatory of Music

南門 出口
Nanmen Exit
Beihai Park Exit, Right

南門 出口
Nanmen Exit
Beihai Park Exit, Right

出口
Exit



4. 部门策略与机遇

实现碳中和目标，中国需要制定全面的、全经济范围的行动计划。这些行动计划离不开电力、建筑、工业、交通以及农业、林业和其他土地利用（AFOLU）等关键部门的共同努力。实现碳中和目标对每个部门都意味着挑战，各部门均面临长期低碳转型的要求，同时各部门当前需采取的行动将是满足这些要求和挑战的前提。部门策略将成为减排行动的指南以及基本的组织框架。

跨部门方案对成功减排非常必要。每个部门的技术并非只应用于自身。一个部门技术的进步亦将支持其他部门的减排行动。例如，太阳能光伏不仅可以用于集中发电领域，也可作为分布式发电方式应用于建筑部门；电池不仅支持交通部门实现电气化，也可支持电力系统运营并应用于可再生能源发电，对建筑能源管理也具有重要价值；数字化等基础技术将对整个能源系统产生重要影响。

减排措施还涉及部门间的互动。例如，在工业中应用氢能提供高温热，需要在制氢过程中用可再生能源替代天然气，作为制氢的主要能源；工业、电力部门使用生物质能会对农业和土地利用部门产生影响，因为生物质能将引发农业、植树造林或森林采伐之间的相互影响或潜在竞争。除此之外，中国对风能和太阳能的日益依赖将导致对水泥、钢铁和玻璃等工业原料的需求增加，因此需要进一步加速工业部门的脱碳进程。

用电量增加也将加强部门间的联系。随着建筑、工业和交通领域电气化程度的提高，新增电力容量的需求也随之增加。例如，交通部门电气化可以减少从“油箱至车轮”的排放，但是需要同步实现电力系统脱碳以及降低车辆生产和最终处理过程中的排放，以实现整个系统的碳中和。同时，随着具有波动性的可再生能源占比增加，电力系统需要更大的灵活性以及终端部门的积极响应。

增强跨部门政策和行动的协调对中国低碳转型至关重要。成功低碳转型不仅需要能源系统内部转型，还需要加强能源、环境和农业部门的一致性，大力改进纵向（国家、省级和地方）和横向（部委间）政策的协调。碳定价等跨部门政策是有效的政策组合的一部分。同样，技术是中国未来引领新型绿色经济以及实现低碳转型的根本，对技术创新的投资也将成为支持跨部门行动战略的重要组成部分。

跨部门、跨机构的协调不应仅局限于能源和环境领域，还应加强财政和金融政策的协调（见第 5 章）。中国实现低碳转型，需大幅增加对低碳技术的投资，并推动资金立即从化石能源流向低碳领域。这种投资

格局的变化需要能源和金融政策相互协调，同时也需要通过财政体制改革推动公共投资与碳中和目标保持一致。

专栏4-1 部门转型所采用的模型情景

尽管本报告广泛收集了模型团队的许多模型情景，但本章的图表与数据只采用了部分模型来探讨部门转型。分析部门转型策略需要模型的颗粒度足以在情景中描述部门的关键特征，例如能源消费总量、燃料构成和部门 CO₂ 排放量。本报告中并非所有

情景的颗粒度都达到要求，有些情景数据不够或部门覆盖不足（如建筑部门的住宅部分），有些情景结果很初步不具备可比性。因此，在对比分析时排除了某些情景，每个部门所采用的模型会有所不同。

4.1 电力部门转型

现状与趋势

中国拥有全世界最大的电力部门，总装机容量为 19 亿千瓦，总发电量约 7 万亿千瓦时（He 等，2020 年；CEC，2019 年）。中国的电力需求已从 2000 年的 1.25 万亿千瓦时增加到 2018 年的 6.83 万亿千瓦时（IEA，2020 年）。钢铁、化工和铝等能源密集型产业一直是中国电力需求快速增长的主要推动力。随着当前的经济转型和向服务型产业的转变，服务业、居民消费以及潜在的交通用电消费在未来将更加突出（IEA，2019 年；Lin 等，2020 年）。

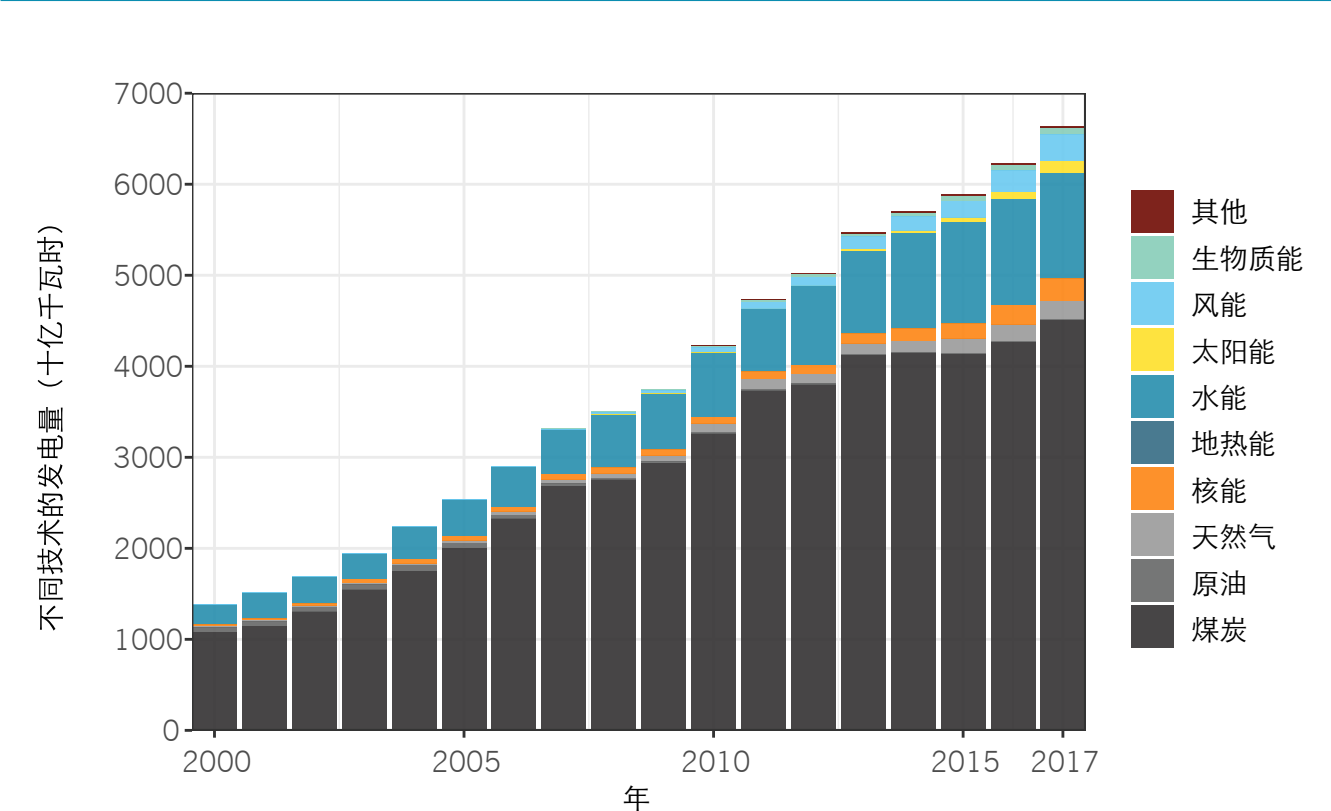
随着电力需求和电力生产的快速增长，中国发电相关的 CO₂ 排放量在 2000 年至 2017 年间增长了两倍。目前，电力和热力生产约占中国能源相关的 CO₂ 排放量的 50%。中国燃煤发电系统的碳排放强度尤其高，为 610 克 CO₂/千瓦时，而美国则为 410 克 CO₂/千瓦时，欧盟为 270 克 CO₂/千瓦时（IEA，2020 年）。

中国发电以煤炭为主（图 4-1）。2018 年，超过 1000 家燃煤电厂发电装机容量总计 10 亿千瓦，其发电占中国发电总量的 64%（CEC，2019 年）。现有的燃煤电厂多数在 2005 年后建成，剩余的设计寿命仍有数十年。提前关闭大型煤炭基础设施将带来搁浅资产的高风险。同时，由于产能过剩和日益激烈的可再生能源发电竞争，燃煤发电行业已经面临财务危机。煤炭装机容量增长的速度已大大超过燃煤发电增长的速度，也就是说大规模燃煤电厂无法得到充分利用。研究表明，燃煤电厂的平均利用率已降至 50% 以下（CEC，2020 年），现有燃煤电厂一半处于亏损状态。



图4-1: 2000-2017年不同技术的发电量

(数据来源: IEA, 2019c)



尽管非水可再生能源发电目前仅占中国发电量的一小部分, 中国已成为可再生能源开发和投资领域的全球引领者。过去四年中, 中国风电装机容量显著增长, 从2015年的1.3亿千瓦增至2019年的2.1亿千瓦, 同期, 中国的光伏发电装机容量增加了近4倍, 从2015年的0.42亿千瓦增长到2019年的2.1亿千

瓦(CEC, 2016年, 2020年)。目前, 中国风电装机容量占全球风电总装机容量的三分之一, 光伏发电装机容量占全球光伏总装机容量的四分之一。2013年以来, 中国已成为全球最大的可再生能源投资国, 占全球可再生能源总投资的三分之一(UNEP和BNEF, 2020年)。



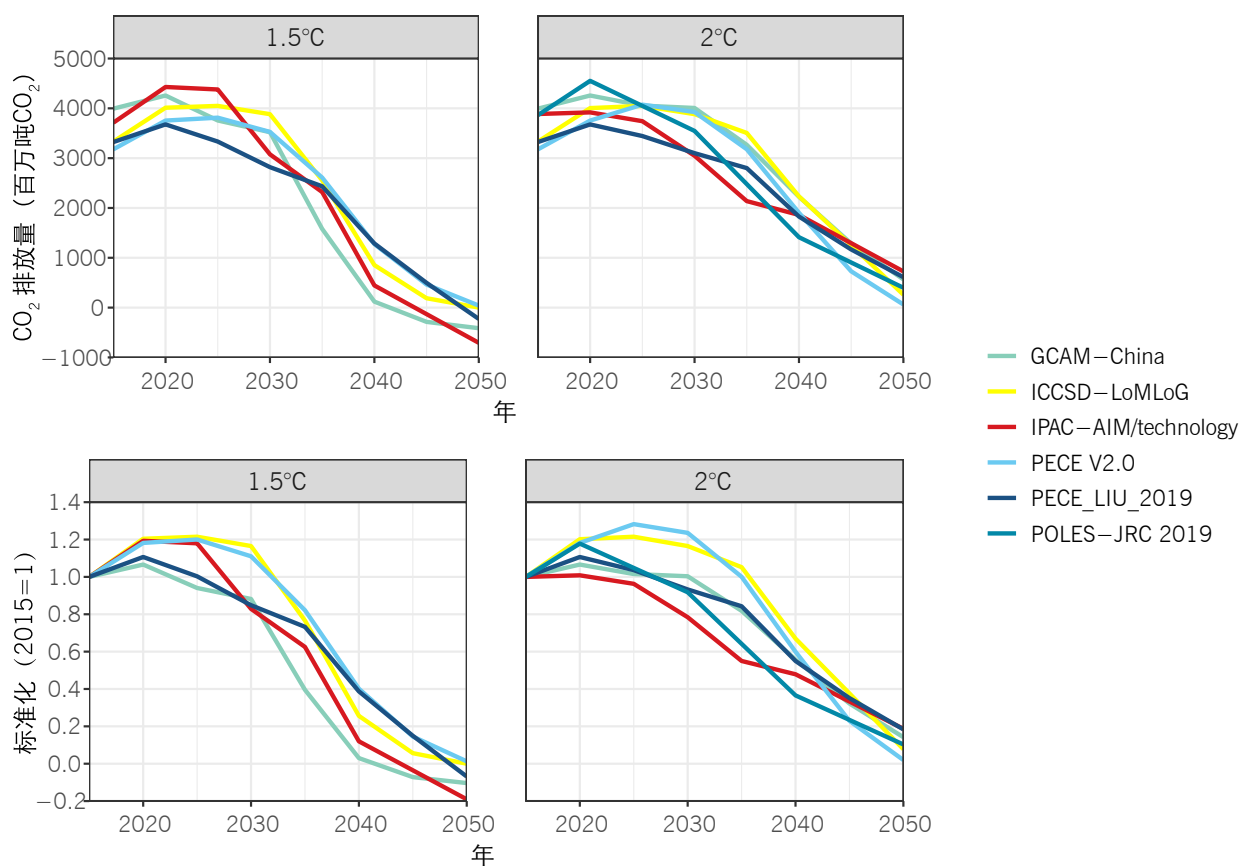
专栏4-2 电力：碳中和长期战略的关键要素

- ▶ 电力部门碳排放需尽快达峰并开始快速下降，到2050年实现零排放或负排放；
- ▶ 所有终端部门快速电气化；按照生活方式的转变、效率的提高以及技术选择的不同，到2050年，发电量可能比现有水平增长120-160%；
- ▶ 到2040年或2045年，基本淘汰未采用CCUS技术的常规燃煤电厂；
- ▶ 到2050年，可再生能源发电占总发电量的70%；
- ▶ CCUS技术及核能将作为低碳电力的补充选择，其实际贡献率主要取决于政策支持的程度；
- ▶ 通过灵活发电、改进电网基础设施、需求侧响应以及部署储能技术等措施提高电网灵活性以适应高比例的可再生能源。

电力部门碳排放需尽快达峰并开始快速下降；到2050年实现零排放或负排放，从而将全球温升控制在1.5°C之内。研究表明，电力部门的快速和深度脱碳是将全球温升控制在1.5°C之内的关键因素。根据多模

型比较分析得出，到2050年，电力部门需基本脱碳至零排放或负排放以实现1.5°C的温控目标。而在将全球温升控制在2°C的情景下，到2050年，电力部门的CO₂排放量需减少80-100%（图4-2）。

图4-2：1.5°C和2°C情景下电力部门的CO₂排放量



所有终端部门均需快速电气化。电力部门低碳化将伴随着来自收入增长、数字化，以及工业、建筑和交通领域日益增长的电力需求（见专栏 4-3 及后续章节）。由于生活方式的转变、效率提高和技术选择的

不同，到 2050 年电力需求将有较大不确定性。本报告综合考虑的多模型情景显示，2050 年电力需求将比当前水平增长 120-160%，达到 15 万亿千瓦时-18 万亿千瓦时（图 4-4A）。

专栏4-3 电气化在长期战略中的重要性

根据深度脱碳的研究显示，终端部门电气化与电力部门脱碳是长期低碳转型战略最关键的要素。将全球温升控制在 1.5°C 或 2°C 之内意味着到 2050 年电力可能成为终端能源消费的主要能源。考虑最大可行性的情况下，中国终端能源消费中电力的比重可能从 2015 年的 22% 增加到 2035 年的 35-45%（1.5°C 情景）和 35-40%（2°C 情景），2050 年达到 55-65%（1.5°C 情景）和 45-55%（2°C 情景）。持续增长的能源服务也将推动所有终端部门实现高度电气化，从化石能源转向电力；需要低温热的工业过程无需进行系统的根本性改变即可实现电气化；建筑部门

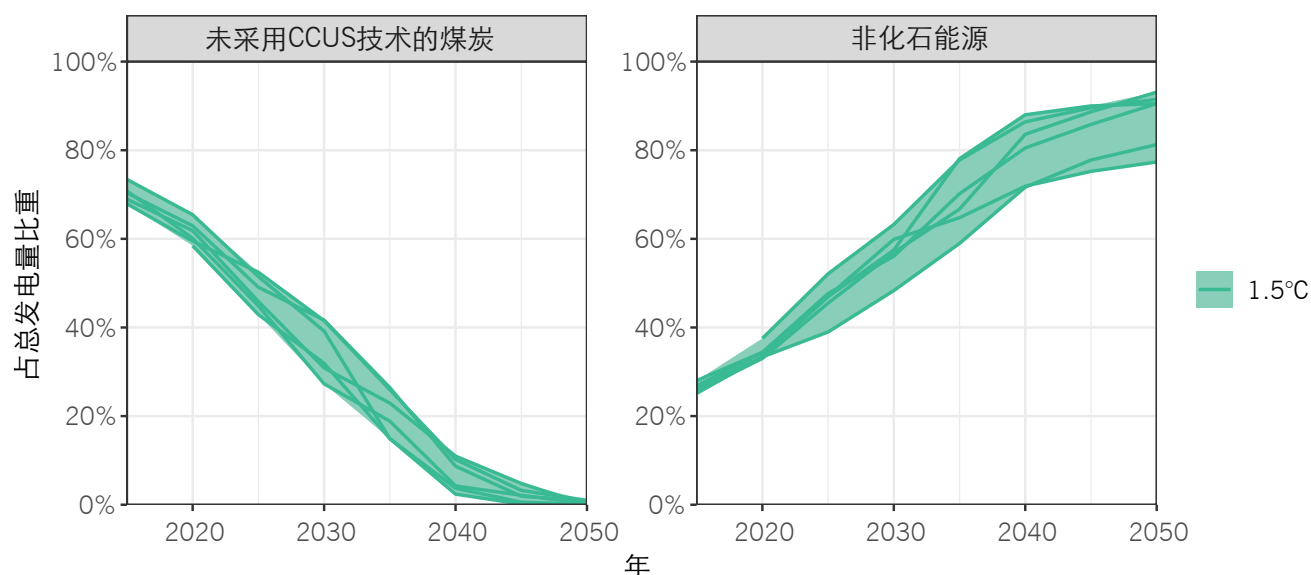
将通过提高数字化程度以及由化石燃料设备转向电气设备实现逐步转型；发展电动汽车是交通部门的一项重要战略，尤其是公路客运和铁路运输领域。借助这些机遇，到 2030 年，中国电动汽车保有量约为 5 千万辆，这将提供 30 亿千瓦时的存储容量和近 5 亿千瓦的灵活负载。到 2050 年，根据生活方式和技术选择的不同，中国电力总需求量可能达到 15 万亿千瓦时-18 万亿千瓦时（1.5°C 情景）和 12 万亿千瓦时-16 万亿千瓦时（2°C 情景）（图 4-4A）。

实现快速脱碳和电气化对电力部门的长期战略具有以下含义。首先，为了将全球温升控制在 1.5°C 之内，需要在 2050 年前逐步淘汰未采用 CCUS 技术的燃煤电厂。根据多模型比较分析，实现全球温升 1.5°C 的目标，需要在 2040-2045 年前逐步淘汰未采用 CCUS 技术的常规燃煤电厂。而为了实现 2°C 的温控目标，则需要在 2050-2055 年前淘汰未采用 CCUS 技术的常

规燃煤电厂（图 4-3）。电力部门的煤炭淘汰方式包括：停止新建未采用 CCUS 技术的燃煤电厂，快速关停一小部分老旧、高污染且低效率的电厂，逐步减少剩余的大多数燃煤电厂的使用，条件允许的情况下在现存以及新建电厂应用 CCUS 技术等。“不新建煤电”战略和快速关停落后产能电厂的短期行动，将带来即时的经济和社会效益（见第三章专栏 3-2）。

图4-3：选定模型1.5°C情景下中国传统煤电（左图）和非化石能源发电（右图）的占比

注：传统煤炭仅包括未采用 CCUS 技术的煤炭。非化石能源包括太阳能、风能、地热能、水能、核能和生物质能。



长远来看，逐步淘汰中国庞大且相对年轻的燃煤电厂，需要一条可行路径来保障多数现有电厂在最低保证寿命周期内运行，同时逐渐降低其利用小时数。这种做法可以避免提前关闭燃煤电厂，从而降低搁浅资产风险。随着利用小时数的降低，燃煤电厂将从基本负荷过渡到峰值发电。Cui 等学者 2020 年的研究发现，采用这种策略，1.5°C 路径下，未采用 CCUS 技术的燃煤电厂的最低保证寿命需缩短至 20 年，平均利用小时数需从现在的 4350 小时减少到 2030 年 2640 小时、2040 年 1680 小时以及 2045 年 0 小时。在 2.0°C 的路径下，大多数现有的燃煤电厂至少可以运行 30 年，平均运行时间则需要减少到 2030 年 3750 小时、2040 年 2500 小时、2050 年低于 1000 小时。

不同省份逐步淘汰常规燃煤电厂的速度不同。一些省份明显具有短期改善优势。比如，鉴于多项技术、经济和环境标准，山东、山西和内蒙古的燃煤电厂由于表现较差可以更快关停（见专栏 3-2）。

随着煤炭的逐步淘汰，需加大对零排放发电技术的投资，使非化石燃料发电占比达到 80% 甚至更多（图 4-3B）。如今，能源市场上已有多种零排放选择，包括风能、太阳能、核能、应用 CCUS 技术的化石能源和应用 CCUS 技术的生物能源。在中国及其他国家的研究中，并未就哪种方法最优达成共识（图 4-4B），主要因为成本、不同技术的可行性（如核能、应用 CCUS 技术的化石或生物能源等）以及对风能、太阳能发电能否并网存在不同看法。

尽管如此，研究普遍认为 **可再生能源发电需大幅提高并成为主力电源，到 2050 年贡献约 70% 的电力。**

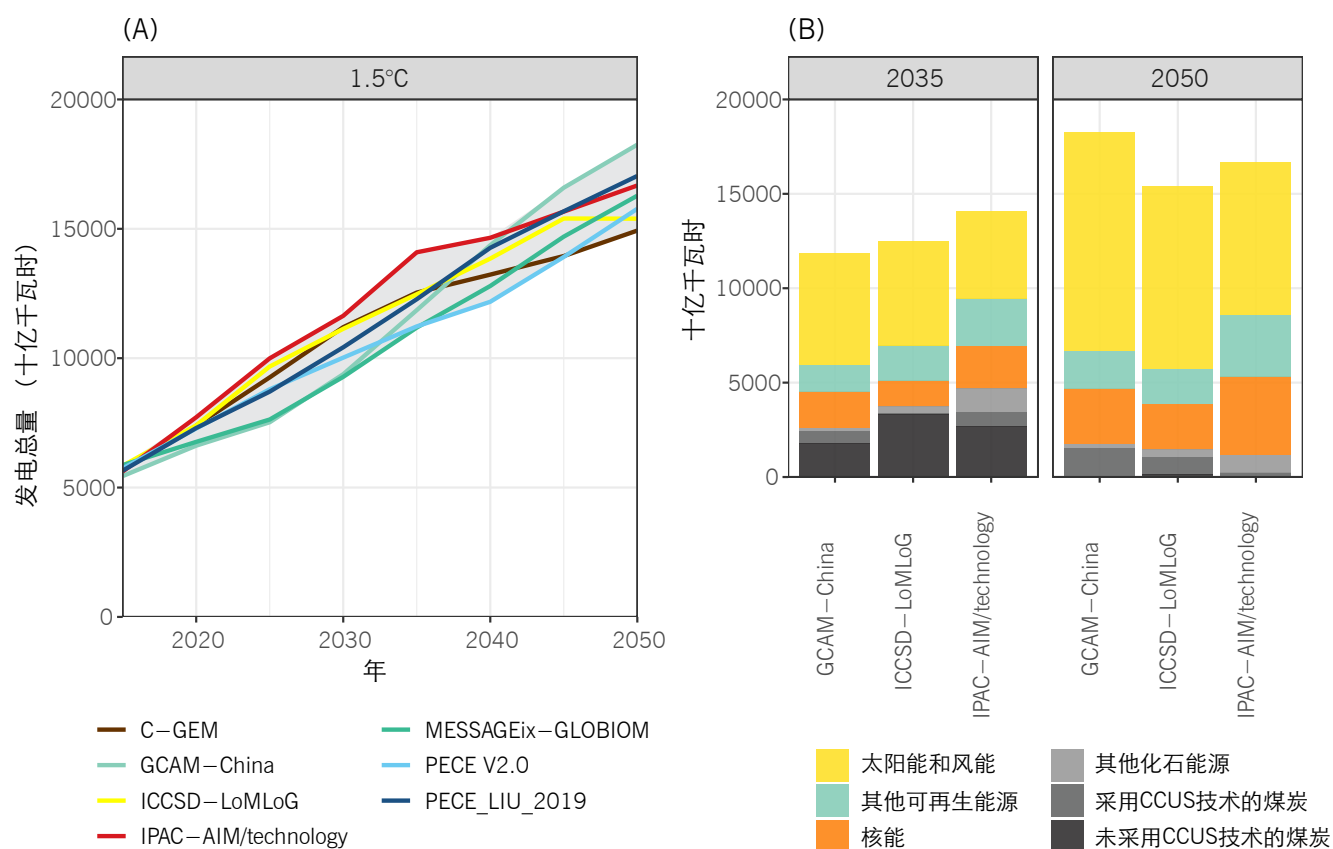
本报告涉及的 1.5°C 情景表明，到 2050 年可再生能源发电将占总发电量的 65% 至 75%。除气候治理和其他环境效益外，可再生能源还将带来重要的能源安全效益。同样 1.5°C 情景显示，到 2035 年，太阳能和风能发电总量将达到 4 万亿千瓦时-5.9 万亿千瓦时/年，在 2°C 情景下将达到 2.5 万亿千瓦时-4.2 万亿千瓦时/年。地理分布方面，He 等人于 2020 年研究表明，太阳能发电将集中在西北省份，即内蒙古、青海和陕西，到 2030 年，上述三省各省的装机容量将超过 1 亿千瓦。而风能的分布则更为平均，主要分布在西北、东北和沿海地区。到 2050 年，在 1.5°C 的综合情景下，太阳能和风能发电将占总发电量的 45-65%，而在 2°C 情景下，它们将提供总发电量的 30-60%。

CCUS 技术和核能是低碳电力非常必要的技术选择，其作用很大程度上取决于政策支持力度。事实证明，核能和应用 CCUS 技术的化石能源均可作为不稳定的可再生能源的补充。核能的作用将取决于基础设施开发、政策和公共支持以及核能部署的体制障碍等因素（Yu 等，2020 年）。在 1.5°C 情景下，2050 年，不同模型核能发电量差异很大，从不到 2 万亿千瓦时到超过 4 万亿千瓦时均有，且 2050 年核电发电量将占总发电量的 10% 到 25%（图 4-4B）。



图4-4：1.5℃情景下发电总量（图A）和发电总量中不同技术的占比（图B）

不同发电技术的发电量包括各模型子集的计算结果，这些结果演示了如何在 1.5℃ 情景下有效利用不同的发电技术实现发电量高速增长。



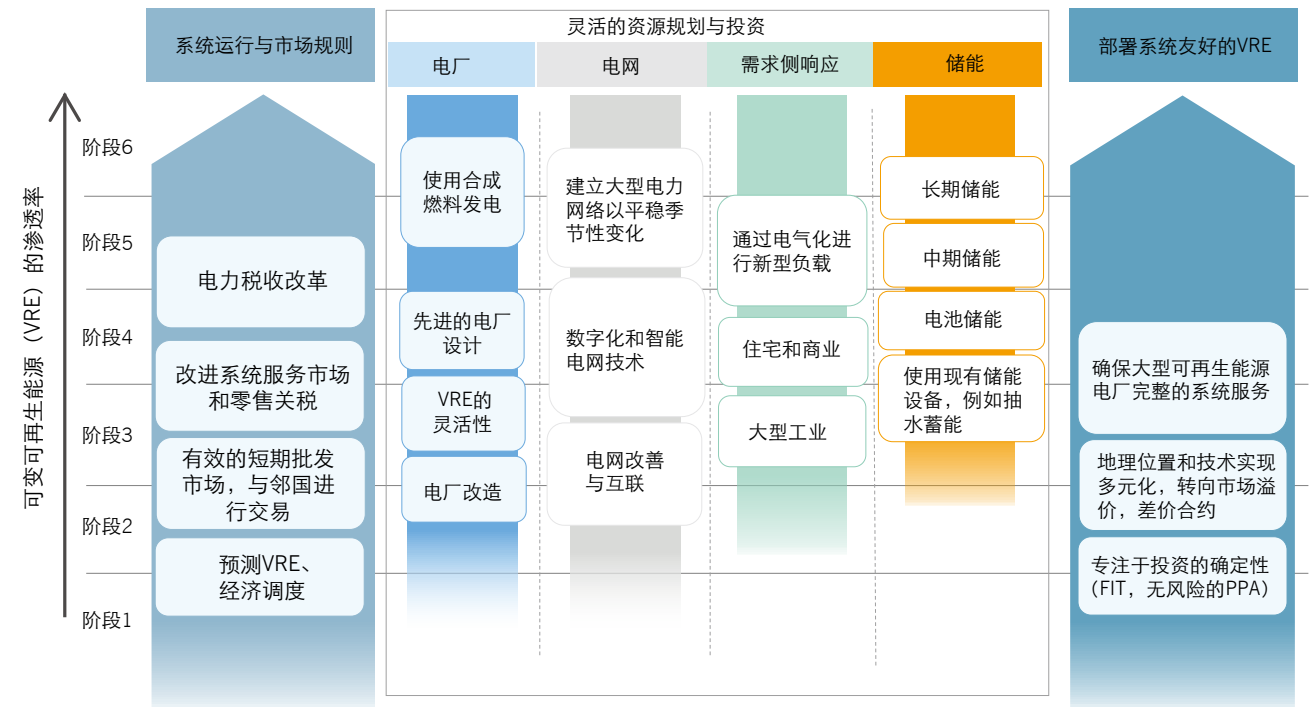
由于中国 CO₂ 封存潜力巨大且严重依赖化石燃料发电，CCUS 技术被公认为中国电力系统脱碳的重要技术选项 (Yu 等，2019 年)。CCUS 技术对能源转型具有重要意义，它为继续使用化石燃料提供可能，同时将煤炭淘汰的时间表至少延长十年，从而缓解搁浅资产以及煤电转型引发的就业问题。

通过灵活发电、改进电网基础设施、需求侧响应以及部署储能技术来提高电网灵活性。 尽管电力系统始终具有适应供需变化的能力，但是电力系统的灵活性是一个相对宽泛的概念 (图 4-5)。电力系统灵活性包括电网基础设施改变、需求侧响应、电力存储和电厂灵活运营。此外，一个运行良好的电力市场对管理突发事件和支持电网灵活性至关重要。



图4-5：电力系统灵活性的来源

(来源：IEA，2019a)



注：FIT=上网电价；PPA =购电协议。

分级整合可再生能源，需要不断提高电力系统的灵活性。IEA 制定了阶段分类方式，反映可再生能源的纳入对电力系统的影响及与电力系统的融合问题。按

国家来划分，中国目前处于第二阶段，而新疆、宁夏、甘肃和青海等省份则处于第三阶段（IEA，2019 年）。

专栏4-4 高效的电力市场对实现电网灵活性至关重要

改革电力市场、设置合理的定价机制对于电网灵活性至关重要。高效的市場设置将大大降低成本并优化系统效率，为灵活的电力需求和存储选择提供经济激励，有效整合水力发电和可变速可再生能源发电。IEA 最新研究表明，通过实施市场手段，扩大区域输电互联互通，中国可在 2035 年将年度运营成本降低 15%或 630 亿美元，并将电力部门的 CO₂ 排放量减少 7.5 亿吨（IEA，2019 年）。

增加调峰电源可以加强电网灵活性。改造后的燃煤电厂可以增加电网的灵活性。水电站和天然气联合循环发电厂也可提供很大的灵活性，但其作用相对有限。同时，鼓励发电厂作为平衡负载而非基本负载运行时，需要慎重设计过渡机制，因为这些发电厂可能面临成本增加而收入下降的局面。

改进输配电基础设施也可提高电网灵活性。增强区域输电互联，如建设特高压输电线路，可使电力在更大区域范围内传输，不仅提供更好的平衡能力，还可提高发电效率。建立互联的配电网也可提高分布式可再生能源价值（Aggarwal 和 Orvis，2016 年）。研究估计，到 2030 年，区域间输电能力可能会增加到 3 亿千瓦左右，到 2050 年增加到 5 亿千瓦（Li 等，

2016 年；SGERI, 2018 年），并可能在 1.5°C 和 2°C 路径下进一步提升。此外，一些研究指出，连接西北地区和中部地区电网的输电线路以及连接西北地区和东部地区电网的输电线路输电能力最大，西北地区已成为全国低碳电力的主要供应者（Li 等，2016 年；SGERI, 2018 年；He 等，2020 年）。

数字化为平衡电力供需开辟了新的选择，需求侧响应成为增加电网灵活性的有效方式。实时监控系統对电网的互联、负载和发电至关重要，可以通过改善终端部门的数字化水平和连接性来实现。例如，电动汽车动态充电可使充电周期适应电力系统条件和用户的需求，并根据配电电网限制、当地能源可得性以及用户偏好来优化充电过程（IRENA, 2019 年）。建筑智能恒温器、设备和控件也是有用的需求侧响应工具。需求侧响应的一个重要因素是有效的市场设计，使需

求侧响应对接所有电力批发市场（参见下面有关电力市场改革的讨论）。

储能技术也可提高电网灵活性。电网级电池储能系统可应对短期突发事件，而抽水蓄能和压缩空气储能系统则可以为长期储能提供选择。当间歇式可再生能源发电占比很高时，合成燃料和氢能将作为季节性储能的选择。

电力系统低碳转型和提高电网灵活性，不仅需要电力系统内部协调，还需跨系统协调。随着可再生能源占比增高，电力部门需不断完善发电、输电和配电的协调。此外，提高电网灵活性，也需鼓励更广泛的能源系统整合，并增强与终端部门（例如电动汽车和智能建筑技术）的协同。

专栏4-5 电力部门脱碳、能源安全、就业和经济增长

电力部门脱碳的益处不仅在于缓解气候变化。低成本太阳能和风能资源的增长，以及能源系统的电气化，将增强能源独立性，避免长期遭受燃料价格波动的影响，有助于改善电力可得性和负荷能力。此外，可再生能源发电对市场条件的变化更具弹性。新冠疫情危机期间，全世界几乎所有地区的燃煤发电都遭受重创（IEA, 2020 年；EIA, 2020 年）。中国 2020 年第一季度总发电量同比下降了 6.8%，火发电量却下降了 8.2%（Xu 和 Singh, 2020 年）。

电力部门脱碳可以带来新的就业机会促进地方经济发展。与煤炭相关就业相比，清洁能源领域就业质量更高，尤其对相对落后的农村来说，电力部门脱碳可以为电力服务欠缺的社区创造新的就业机会（Muro 等，2019 年）。

与此同时，中国电力系统脱碳也将大幅减少煤炭相关就业。2018 年，煤炭开采和洗煤创造了约 320

万个工作岗位，如山西省等煤炭相关就业集中的区域将受到较大影响（He 等，2020 年）。其他国家也采取了相关措施，包括制定过渡时间表帮助当地产业提早规划，为转型提供资金支持，制定在岗员工再培训转岗计划，加强当地基础设施投资以及制定教育培训、搬迁援助等社会保障计划（Bridle 等，2017 年；Sartor, 2018 年）。

从燃煤转向可再生能源发电可以推动中国经济增长。中国是全球制造业，同时也是可再生能源技术创新的领导者，处于全球能源转型的最前沿。2019 年，中国的可再生能源投资占全球可再生能源投资的约 30%（834 亿美元）（UNEP 和 BNEF, 2020 年）。中国在可再生能源专利方面也处于领先地位，2016 年，累计的可再生能源专利量占全球的 29%（其次是美国、欧盟和日本）（IRENA, 2019 年）。电力行业的低碳转型有助于中国保持在清洁能源领域的全球领导地位。

近期挑战、机遇与行动

专栏4-6 电力：支持长期转型的近期行动

- ▶ 停止新建未采用 CCUS 技术的燃煤电厂；
- ▶ 识别并关停燃煤电厂中的一小部分老旧、高污染且低效率的电厂；
- ▶ 继续增加非化石燃料发电的比例（到 2025 年提高至 45% 左右）；
- ▶ 建立电力现货市场；
- ▶ 通过电力市场改革增加跨省绿电交易；
- ▶ 强化 CCUS 政策以促进新建化石燃料电厂逐步采用 CCUS 技术，并 / 或在现有电厂进行 CCUS 改造。

停止新建未应用CCUS技术的燃煤电厂。近年来，煤电行业遭遇了财务危机。由于产能过剩和可再生能源竞争，2019年中国的燃煤电厂利用小时数均值为4290小时（负荷率低于50%）（CEC，2020年），一半以上燃煤电厂处于亏损状态（Bodnar等，2020年）。同时，目前中国还有约1亿千瓦在建新煤电项目和0.5亿千瓦的获批煤电项目（《全球能源监测》，2020年），表明中国的煤电总装机容量在“十四五”期间仍会继续增长。

持续建设燃煤电厂不仅会加剧行业财务危机，还将降低总燃煤电厂的利用率，带来更大的财务损失。此外，在尝试实现长期碳中和目标的同时继续新建燃煤电厂，这将导致新增电厂过早关停，加速淘汰现有电厂，此做法不仅将能源基础设施锁定在高碳路径还增加搁浅资产，从而间接加大实现长期碳中和目标的成本。因此，应在“十四五”规划中考虑立即采取行动停止新建燃煤电厂，这将是一项行之有效的近期措施。

识别并快速关停燃煤电厂中的一小部分老旧、高污染且低效率的电厂。2015-2018年，为了解决当地空气污染和产能过剩问题，中国总计关停3800万千瓦的小型、老旧、低效电厂（CEC，2016年，2017年，2018年，2019年）。各省均制定了具体目标和行动计划，计划在2020年底前淘汰落后电厂。建议“十四五”应继续开展此项工作，根据技术、经济和环境标准识别容易淘汰的电厂，制定关停目标和计划。快速关停小型、老旧、高污染且效率低下的电厂，这不仅是煤炭转型计划合理布局的重要组成部分，在短期内还能对空气质量、公共卫生和其他社会目标产生协同效益。

持续增加非化石燃料发电的比例。近期内不再新建燃煤电厂，快速关停效率低下的燃煤电厂，快速提高非化石燃料发电的比例。目前，约33%的电力来自非化石能源发电。在1.5℃情景中，这一份额到2025年将增加到40-50%，到2030年将增加到50-60%，到2035年将达到60%-80%（图4-3B）。

整合非化石能源发电需要改进可再生能源发电并网问题。尤其是市场调节和省际输电可以优先考虑低成本的可再生能源发电，增加可再生资源丰富地区的清洁能源供应，并激励对可再生能源发电容量的投资。与其新建化石能源（燃气或燃煤）电厂调峰，不如改造现有燃煤电厂，在近期内可以提高电网灵活性，支持可再生能源发电并网。“十三五”规划期间中国计划对2.2亿千瓦燃煤电厂进行改造并提高其灵活性，然而，截至2020年，计划仅完成了四分之一（Yuan等，2020年）。

建立电力现货市场。建立有效的电力市场对提高可变可再生能源普及率和电网灵活性至关重要。建立电力现货市场是改善市场规则和系统运行的主要组成部分。国际经验表明，运转良好的电力市场短期内对于推动电力系统转型至关重要（IEA，2019年）。因为短期电力市场可以显示不同时间和地点的实际电价，为长期电价提供参考，指导对新增发电装机容量的投资，并有助建立电力金融市场。此外，规则完善且流动性充裕的电力现货市场，有助于新参与者进入市场，例如储能和需求整合企业，这一点对于需求侧响应和电网灵活性至关重要。

中国正在从三公调度向市场化分配体系转变。当前，8个省份正在开展省级电力现货市场改革试点，这有助于监管机构了解不同区域的挑战以及资源组合对不同市场设计的影响。现货市场的设计需要解决几个挑战，包括发电企业、地方政府和其他利益相关方的潜在抵制，适当的奖惩规则以及监督现有发电企业的收入变化。

通过电力市场改革增加跨省绿电交易。将现今成熟的现货市场与跨区域输电以及电网投资相结合，可以显著提高电力系统的效率和灵活性，提高风能和太阳能等可变可再生能源占比。尽管中国目前已经开展了跨区域的中长期交易实践，但尚未普及到全国。仍需大力统筹各类市场，改善市场协调机制，鼓励国有和私营发电企业广泛参与（IEA，2019年）。

强化CCUS政策，促进新的化石燃料电厂采用CCUS技术，并/或在现有电厂进行CCUS改造。CCUS技术能否得到广泛应用仍存在不确定性，但CCUS仍是净零排放体系的重要选择。由于中国目前的能源体系仍以煤炭为基础，CCUS改造可以减少对现有化石燃料电厂的提前关停，从而降低搁浅资产风险。当与生物能源结合使用时，CCUS可以实现负排放，从而抵消航空或高温热等难以脱碳领域的排放。CCUS和生物能源结合使用仍面临许多问题和挑战，其中多与生物能源作物的生产相关。尽管如此，为电力部门脱碳以及在可能情况下实现负排放而提供多种选择是至关重要的。虽然CCUS有助于中国电力部门减排，但如果没有明确政策支持，仍然无法吸引投资。中国需要推动CCUS研发和试点项目，以便提高技术水平和推广CCUS。此外，CCUS的近期政策应着眼于促进新的化石燃料电厂采用CCUS技术，识别适合CCUS改造的现有电厂。

电力部门转型需要从电力生产到消费整个链条的共同努力，需要电力政策与建筑、交通和工业政策之间协调一致。终端部门快速电气化不仅可以促进电力需求，还可以提升需求侧响应和电力系统灵活性。

4.2 建筑部门转型

现状与趋势

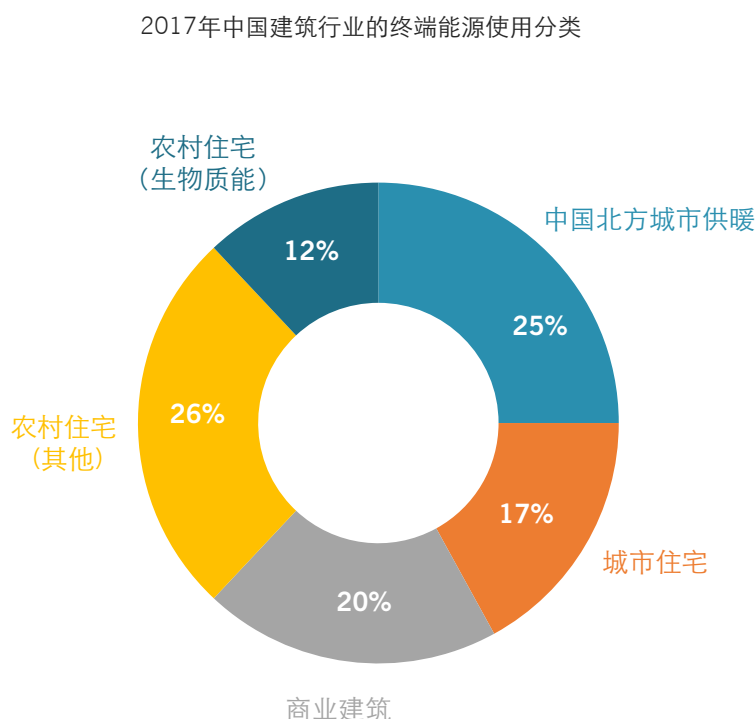
建筑部门用能既包括建筑运行能耗，也包括建筑建造能耗，即隐含能耗（用于生产水泥、钢铁等建筑材料的能源消耗）。过去十年，建筑运行能耗（终端能耗）快速增长。2005至2018年期间，建筑部门的终端能耗每年增长2.3%。2018年终端用能为6.3亿吨标煤，高于当年日本和英国所有终端部门能耗的总和（IEA，2020年）。根据清华大学的测算，就一次能源而言，建筑隐含能耗占建筑运行能耗的一半左右（THUBERC，2019年）。

2017年，中国北方城市的城市住宅、农村住宅、商业建筑和集中供暖，分别占中国所有建筑总运营用

能的17%、38%、20%和25%（图4-6）。中国北方城市建筑的电气化率，城市住宅约为47%，商业住宅约为59%，农村住宅约为9.7%，集中供暖约为3.3%。生物质能源占农村建筑能耗的30%。区域集中供暖在中国北方城市空间供暖中占主导地位，2018年占北方地区空间供暖的85%，约为150亿平方米。北方地区目前的热力来源约50%来自燃煤热电联产，3%来自燃气热电联产，35%来自燃煤热力厂，12%来自天然气热力厂（就供暖建筑面积而言）（THUBERC，2019年）。值得关注的是，我国大约有三分之一的区域集中供暖由燃煤热力厂提供。

图4-6：2017年建筑部门的终端（运营）能源使用

城市住宅和商业建筑的终端能耗不包括中国北方城市的供暖能耗。（数据来源：THUBERC，2019）



2008至2017年，仅建筑运行用能的能耗强度就增加了28%（从214兆焦耳/平方米增至273兆焦耳/平方米），这还不包括区域集中供暖的城市建筑能耗。农村建筑的能耗强度增加了20%（从346兆焦耳

/平方米增至363兆焦耳/平方米）、商业建筑能耗强度增加了20%（从586兆焦耳/平方米增加到703兆焦耳/平方米，不包括区域集中供暖的城市建筑能耗强度）。唯一能耗强度减少的是中国北方城市空间供

暖，能耗强度降低了17%（从527兆焦耳/平方米降至440兆焦耳/平方米）。能耗强度下降主要原因是过去几年建筑外立面保温有所改善，并且采用了更高效的区域热力厂（THUBERC，2019年）。

持续的城镇化、经济增长、数字化程度的提高以及向服务型经济转型等因素，不断驱动着中国建筑部门的能耗增长。强劲的经济增长促进了收入增长和中产阶级规模上升，改善了人民的生活水平，刺激了建筑服务需求。数字化进程也在重塑建筑用能。比如，由于在线购物的便捷性，人们待在家的时间更长，居家办公的人数增多。2019年，中国的网络零售额增长了约16.5%（NBS，2020年）。此外，中国正在向服务型经济过渡，新建更复杂、规模更大的商业建筑，推动了过去十年商业建筑能耗的快速增长。

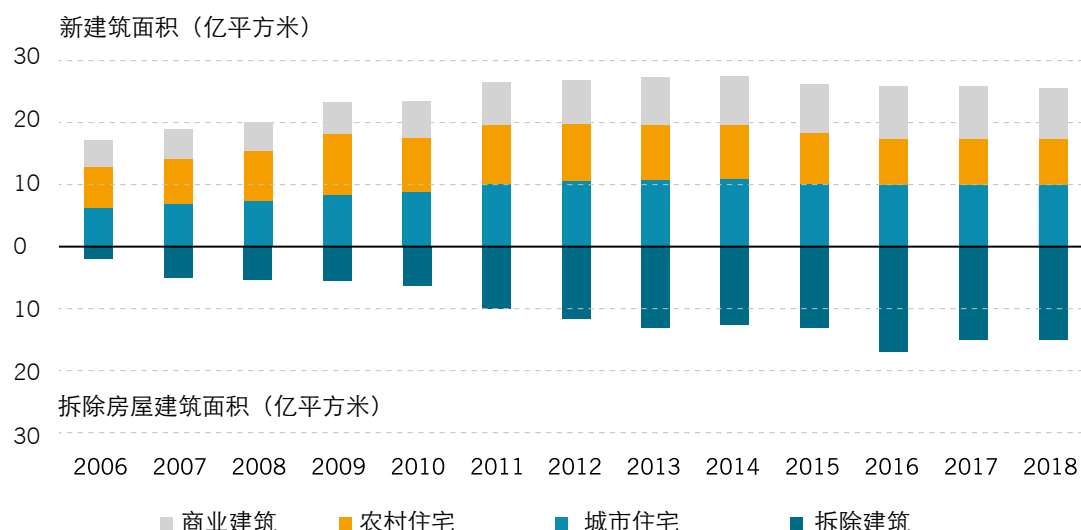
2018年中国的建筑总存量为600亿平方米，其中城市住宅240亿平方米，农村住宅230亿平方米，商业建筑130亿平方米（THUBERC，2019年）。中国持续的城镇化进程对建筑部门的脱碳战略具有重要影响。根据UNDESA在2019年的预测，中国将经历

快速城镇化进程，到2050年，城镇化人口占比将从目前的61%增长到80%。持续的城镇化进程将缩小城乡居民之间的建筑服务需求差距，造成建筑能耗增加。目前，中国城乡之间部分高能耗家用电器的拥有量存在明显差距，例如，农村地区每百户家庭拥有53台空调、63台热水器，而城市地区每百户家庭则拥有129台空调、91台热水器（NBS，2019年）。

过去几年中，中国的建筑总量变化具有两个重要特征（图4-7）。首先，近年来中国的建筑总量急剧增长。2011年以来建筑业快速发展，平均每年新增建筑面积约25亿平方米，总存量增加17%。每三到四年新增建筑面积相当于日本的总建筑面积（Yashiro，2009年）。建筑业繁荣主要是由于中国政府长期以来将房地产开发视为经济增长的主要驱动力之一。其次，除新建以外，中国每年不断拆除大量现有建筑。2018年，中国拆除建筑面积约15亿平方米，占当时总存量的2.5%。综上所述，中国建筑的平均寿命只有25-30年，远低于大多数发达国家通常超过50年的建筑平均寿命。

图4-7：2006年-2018年的建筑存量动态

（来源：THUBERC，2020）



尽管中国建筑总量急剧增长，但中国的人均建筑面积仍远低于发达国家。2017年，中国的人均住宅面积约为34平方米（城市人均住宅面积约为31平方米，农村人均住宅面积约为38平方米），而商业建筑则为9平方米（Wang，2018年）。中国的居住面积约为日本的85%，美国的60%；中国的商业建筑面

积约为日本的65%，美国的35%。如果中国保持目前的新建和拆除速度，即每年人均建筑面积增长约1.1平方米/人——其中三分之二来自住宅面积增长，三分之一来自商业建筑面积，预计2035年中国的人均建筑面积将达到日本的当前水平，2055年或2060年达到美国当前水平。

专栏4-7 建筑：碳中和长期战略的关键要素

- ▶ 碳排放快速达峰，到 2050 年排放比 2015 年减少约 90%；
- ▶ 到 2050 年，约 75% 的建筑用能通过电力供应；
- ▶ 到 2050 年，中国北方城市的大多数集中供暖系统实现脱碳；
- ▶ 通过翻新和 / 或使用高质量的建筑材料延长建筑使用寿命，降低建筑的隐含能耗；
- ▶ 在持续提高生活水平的同时，控制建筑总量的规模。

碳排放快速达峰，到2050年排放比2015年减少约90%。在 1.5℃情景中，中国建筑部门 CO₂ 的直接排放量应快速达峰并下降，到 2050 年排放比 2015 年减少约 50-95%（图 4-8）。为实现减排，中国需控制其能源需求增长。1.5℃情景表明，2050 年建筑终端

能源消耗要么接近今天的水平，要么远远超过今天。此结果反映了建筑领域能耗问题的悖论，一方面需要提高建筑用能效率，另一方面城镇化、建筑能源服务的需求增长提高了能源消耗（图 4-9）。

图4-8：1.5℃和2℃情景下建筑部门的直接CO₂排放

在 1.5℃ 情景下，到 2050 CO₂ 排放量较 2015 年相比降幅低于 50% 的模型未纳入本图。由于 CBEM 模型的 CO₂ 排放使用了不同的核算方法，也未纳入本图。POLES-JRC 模型没有 1.5℃ 情景。

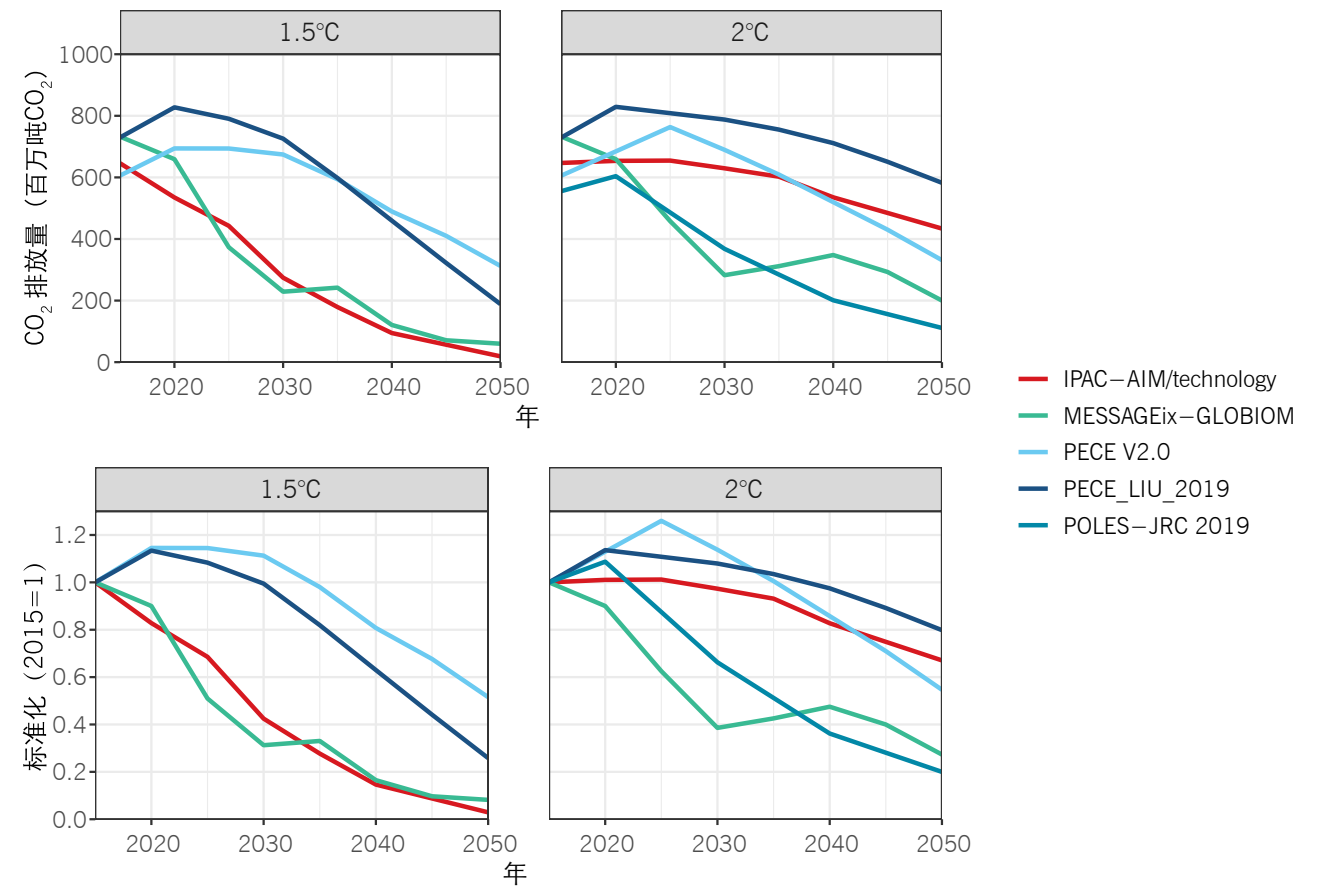


图4-9: 1.5°C情景下中国建筑部门的终端能源消费量

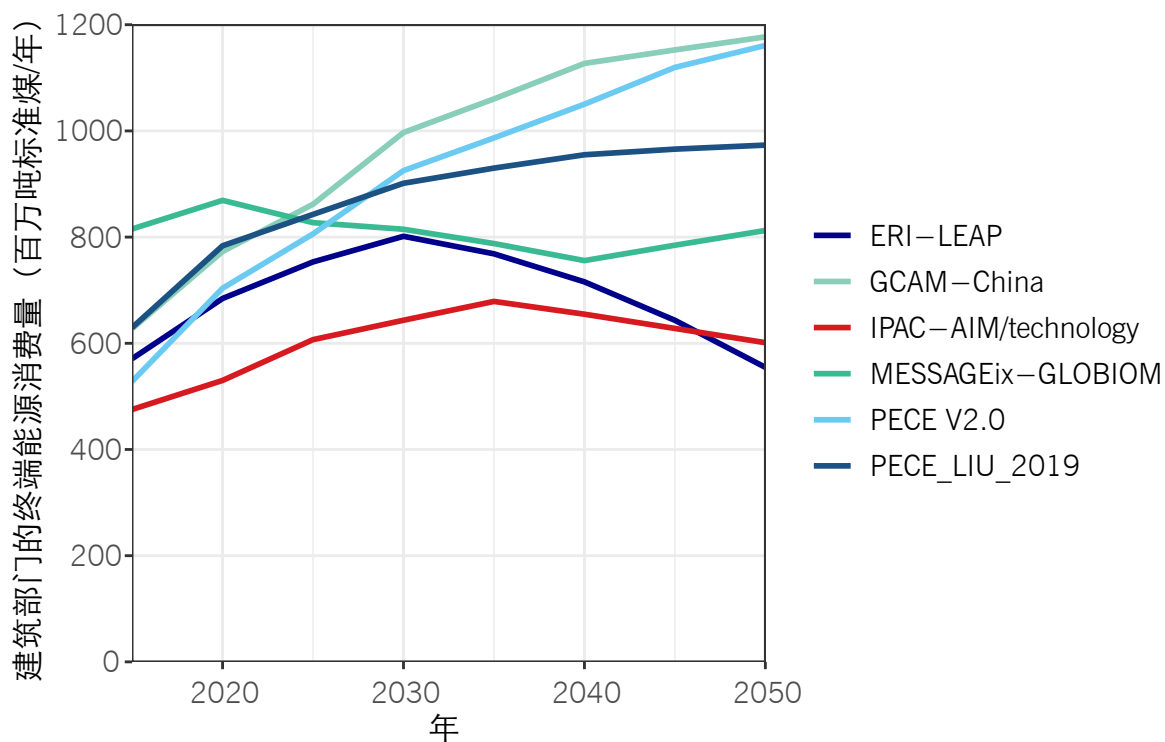
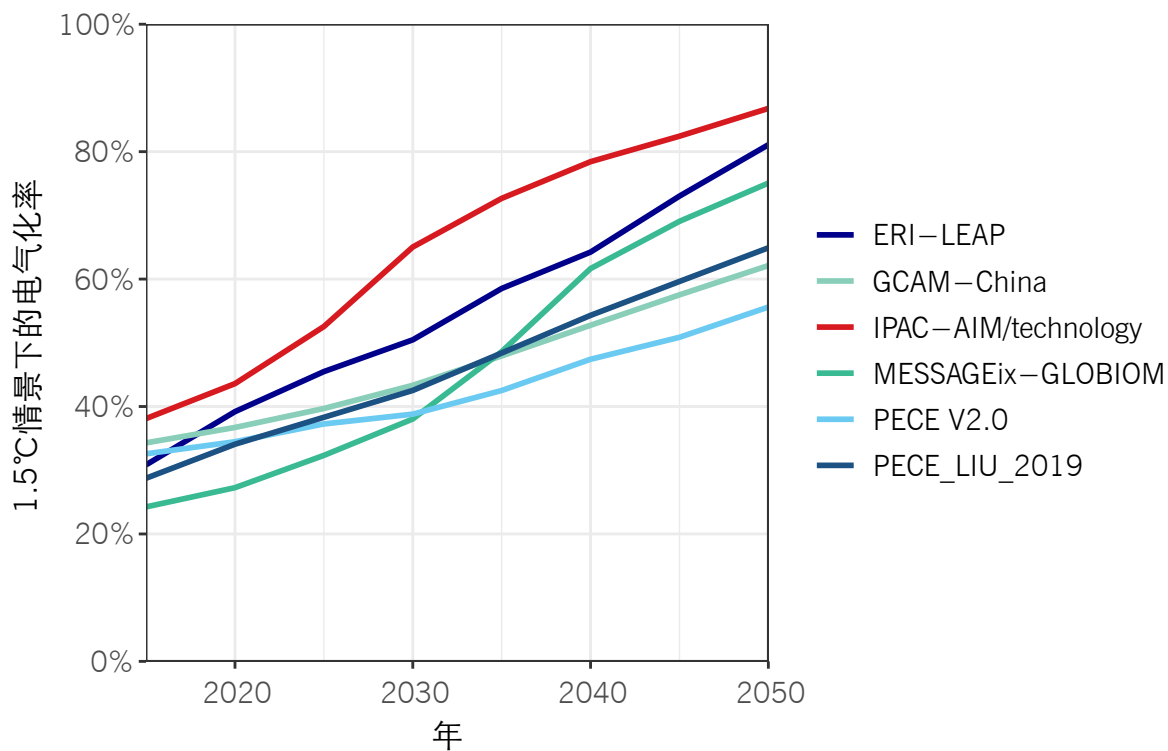


图4-10: 1.5°C情景下建筑部门的电气化率



到2050年，约75%的建筑用能可通过电力供应。

1.5°C情景显示了建筑部门电气化的两类水平：较高估值表明电力将占终端能源的75-85%；较低估值表明电力将占终端能源的55%-65%（图4-10）。这两种观点之间的主要区别在于未来热能和天然气的预计使用量不同。“低电气化”情景表明，热能和天然气将占建筑部门终端能耗的30%左右。“高电气化”情景表明，热能和天然气仅占15%。提高电气化水平意味着使用电能用于建筑取暖、烹饪和烧水。此外，在1.5°C“高电气化”情景中，中国建筑部门的用电量将从2015年1.45万亿千瓦时增长到2050年3.65万亿-5万亿千瓦时，每年的增长率为2.7%至3.6%。

到2050年，中国北方城市的大多数集中供暖系统将实现脱碳。集中供暖包括四个部分：热源、管网、建筑内部的供暖系统、围护结构及其热特性。后面三个部分的节能方式已经有充分研究，包括：改善管道隔热性能、调整水泵尺寸、改善和调节系统运行避免供暖系统热量分布不均（导致系统某些部分过热）以及提高围护结构能效等方式。长期战略需聚焦中国北方城市集中供暖的热源脱碳，有两种主要选择：使用热泵进行空间供热，提高建筑部门的电气化水平；在可行的地区，利用工厂、煤电厂或核电厂的余热供暖。鉴于中国工业加工设施和火力发电厂的余热资源丰富，这两个选项相比，余热供暖将更为经济，应优先考虑。2018年，中国北方地区集中供暖的总建筑面积约为120亿平方米，集中供暖消耗了约50亿吉焦的热量。据估计，中国北方城市工业设施的低温余热资源为8亿吉焦/年，燃煤电厂的低温余热资源为78亿吉焦/年，核电厂的低温余热资源为26亿吉焦/年。研究表明，此类余热发电的可利用率约为20-40%（THUBERC, 2019年）。仅仅使用15%的余热，每年将提供约17亿吉焦热量，约等于降低中国北方城市的空间供暖能耗的三分之一。

通过翻新和/或使用高质量的建筑材料延长建筑使用寿命，降低建筑的建造能耗。翻新建筑的能耗比新建建筑能耗少得多。另外，使用高质量的建筑材料（例如高质量的水泥）可以避免建筑过早拆除。目前中国的拆除率约为2.5%，相比之下，美国住宅建筑的拆除率约为0.3%至0.5%（EIA, 2018年）。如果中国的年拆除率可降低到1%（即每年减少9亿平方米的新建筑），整个建筑部门的CO₂排放量（包括建造能耗的间接CO₂排放量）可以减少约11%。建筑材料制造过程的低碳化，例如多使用可再生电力和氢能作为热源，也将有助于减少与建造能耗相关的CO₂排放（见4.3章）。

在持续提高生活水平的同时，控制建筑总量的规模。长远来看，除了延长建筑物使用寿命外，控制中国建筑总量规模对于建筑部门建造用能和运行用能脱碳至关重要。如上所述，在未来二十至三十年内，中国的人均建筑面积有望达到日本、欧洲和美国等发达国家的水平。考虑到中国的人口数量，人均建筑面积增加到美国水平可能会严重阻碍中国的可持续发展，特别是在能源消耗和土地利用方面。因此，规划合理的长期建筑总量发展路径（即设定建筑总量上限），对中国在2060年之前实现碳中和目标至关重要。但是，控制建筑总量不应妨碍低收入家庭购置住房。如果实施“总量上限”政策，政府需要考虑为某些受影响的社会群体提供社会保障住房。

建设部门脱碳战略也需要协调其他部门战略。建筑部门的电气化离不开电力部门的脱碳策略。为了使建筑充当电网电力的柔性负荷，有必要将智能光伏建筑一体化（BIPV）系统和电动汽车充电站集成到建筑能源系统中，这要求在电力、交通和建筑部门之间进行整体政策设计。此外，建筑寿命、建筑总量以及建筑材料在建设实践的变化可能影响工业产品（尤其是水泥和玻璃等产品）的需求和生产过程。这些联系强调了制定跨部门政策和战略的必要性。

近期挑战、机遇与行动

专栏4-8 建筑：支持长期转型的近期行动

- ▶ 进一步明确电气化和可再生能源在建筑领域的应用，以持续提高建筑节能设计标准；
- ▶ 继续完善家电能效标准和标签计划，纳入智能技术以实现系统节能；
- ▶ 通过促进分布式光伏发电和高效生物质利用，逐步淘汰农村住宅煤炭使用；
- ▶ 通过开发小型商业建筑，减少对大型商业建筑的依赖，鼓励使用自然通风和照明等被动技术；
- ▶ 部署智能技术，以改善需求侧响应和电网灵活性。

进一步明确电气化和可再生能源在建筑领域的应用，以持续提高建筑节能设计标准。目前，中国有五项建筑节能设计国家标准（也称建筑节能规范），三项针对不同气候区域的住宅建筑（即 JGJ 26、JGJ 75 和 JGJ 134），一项针对农村住宅建筑（即 GB/T 50824），一项针对商业建筑（即 GB 50189）。这些规范会随着相关技术的进步定期更新，特别在墙体保温材料、更高能效窗户和更有效的区域供热系统方面。未来，需要加严这些建筑节能规范，扩大其使用范围，以提高电气化水平并应用可再生能源。

继续完善家电能效标准和标签计划，纳入智能技术以实现系统节能。现有的能效标准和标签计划（EES&L）已涵盖建筑中的许多关键用能设备，包括空调、电视、洗衣机、灯具、制冷机、复印机、风扇、打印机、热水器、抽油烟机和电磁炉。这些能效标准和标签计划需要进一步完善，纳入智能支持技术以实现系统节能（例如设备的信息反馈功能、设备的最佳待机模式、提高非满负荷运行的效率等）。

通过促进分布式光伏发电和高效生物质利用，逐步淘汰农村住宅煤炭使用。中国农村住宅的近期脱碳策略包括使用光伏、生物质等可再生能源替代煤炭。农村家庭的主要能源是煤炭、生物质能和电力。煤和生物质用于烹饪、取暖和烧水。当前，中国农村家庭每年消耗约 9 千万吨标煤的自收集生物质（约占农村家庭用能的 30%）。农村住宅用能脱碳需要采取三项关键措施：在农村屋顶和庭院地面使用光伏发电；将自收集的生物质压实或将其转化为沼气，以提高生物质的能效；以电力、沼气或压实的生物质代替散煤。

据估计，中国农村地区可用于安装光伏的建筑面积约为 150 亿平方米（THUBERC, 2019 年），可容纳约 15 亿千瓦的光伏装机，并提供至少 2 万亿千瓦时的电力。2017 年，中国农村住宅的终端用能约为 2.4 万亿千瓦时（包括 2.62 亿吨标煤热力和 2290 亿千瓦时电力）。也就是说，中国农村潜在的分布式光伏发电量可以满足农村家庭约 80% 的能源需求。

通过开发小型商业建筑，减少对大型商业建筑的依赖，鼓励使用自然通风和照明等被动技术。中国商业建筑总体能耗高，很大程度上是由于大型建筑在商业建筑总量中占比较大。由于需要更多人工照明、机械通风、大型水泵和电梯，大型商业建筑（例如建筑面积大于 4 万平方米）的能耗强度通常比小型建筑高 30-100%（THUBERC, 2019 年）。小型商业建筑内部蓄热较低，因此制冷需要较少。此外，小型商业建筑因为面积小可以更有效地利用自然采光和通风，提供更健康节能的建筑环境。因此，制定鼓励发展小型而非大型商业建筑的政策或激励机制至关重要，特别是对于非一线城市。

部署智能技术，以改善需求侧响应和电网灵活性。高效智能技术和可再生能源的不断发展正在改变建筑供电和用电的方式。建筑物不仅可以充当电网的柔性负荷，而且还可以提供新型服务。需要抓住机遇采取创新的政策（见专栏 4-9），加快诸如智能传感器、电表、电器和分布式发电等技术的部署，以无缝、自动化的方式平衡电力需求。此外，为充分挖掘市场潜力，需要进行市场改革，允许建筑业主和运营方进入电力市场，并从节能和电力交易中获得经济收益。

专栏4-9 建筑作为电网的柔性负荷

为进一步提高建筑内大功率和小功率电器（例如电梯、水泵、风扇、空调、冰箱）的能效，目前最新的趋势是采用直流电机代替交流电机，便于控制速度。LED 灯、个人电脑和显示器等其他电器已经使用了直流电源。通过将交流电转换为直流电为建筑供电，在建筑内采用直流型微电网是可行且有益的。当光伏建筑一体化（BIPV）和智能电动汽车充电站结合时，这种转变可以使建筑物成为良好的缓冲。

在低层和高层建筑占主导地位的中国城市，发展 BIPV 可以极大促进光伏在当地的使用。此外，中国的电动汽车保有量迅速增加，对电动汽车充电站的需求不断增长。这三个“区块”的组合可以使建筑物充当电网的柔性负荷载体，甚至在特定时期充当额外的电源。目前深圳市正在实施柔性直流建筑试点项目。

专栏4-10 在中国农村地区推动烹饪和取暖固体燃料的替代以减轻室内空气污染

在中国农村地区，煤炭和未加工的生物质等固体燃料仍占能源使用量的 80% 左右，主要用于烹饪和取暖（THUBERC, 2016 年）。由于使用的取暖设备和炊具效率低下，固体燃料无法有效燃烧，导致室内空气污染严重。据报道，采暖造成的家庭空气污染，导致中国农村地区约 67 万早死和 1400 万伤残

（Chen 等，2018 年）。在中国农村住宅建筑中，尤其是西部、中部和东北部省份，用电（例如分布式光伏或风电）和天然气（如沼气）代替固体燃料进行烹饪和取暖，不仅可以降低 CO₂ 排放，也可以减少对住户（主要是老人、妇女和儿童）的负面健康影响。

随着制冷服务需求的增加和氟氯化碳（CFC）、氟氯氢（HCFC）的逐步淘汰，中国氢氟烃（HFCs）生产的温室气体排放将大幅增加。中国室内空调的HFCs排放量（R410a）从2006年的9.2吨增加到了2017年的1.2万吨（SN-CMA，2020年）。即使完全遵守《基加利修正案》，据估计，从2018年到2050年，中国室内空调的累计HFCs排放量仍将为约160

万吨，相当于32亿吨的CO₂排放量（SN-CMA，2020年）。采用低全球变暖潜值（GWP）制冷剂，尤其是用于空调的丙烷（R-290）和用于家庭制冷的异丁烷（R-600a）制冷剂，可大幅减少温室气体排放，也可以节省电力。据估计，与目前常用的制冷剂（R-410A）相比，改用丙烷（R-290）可以节省约1.6%的室内制冷用电（Purohit等人，2018年）。

4.3 工业部门转型

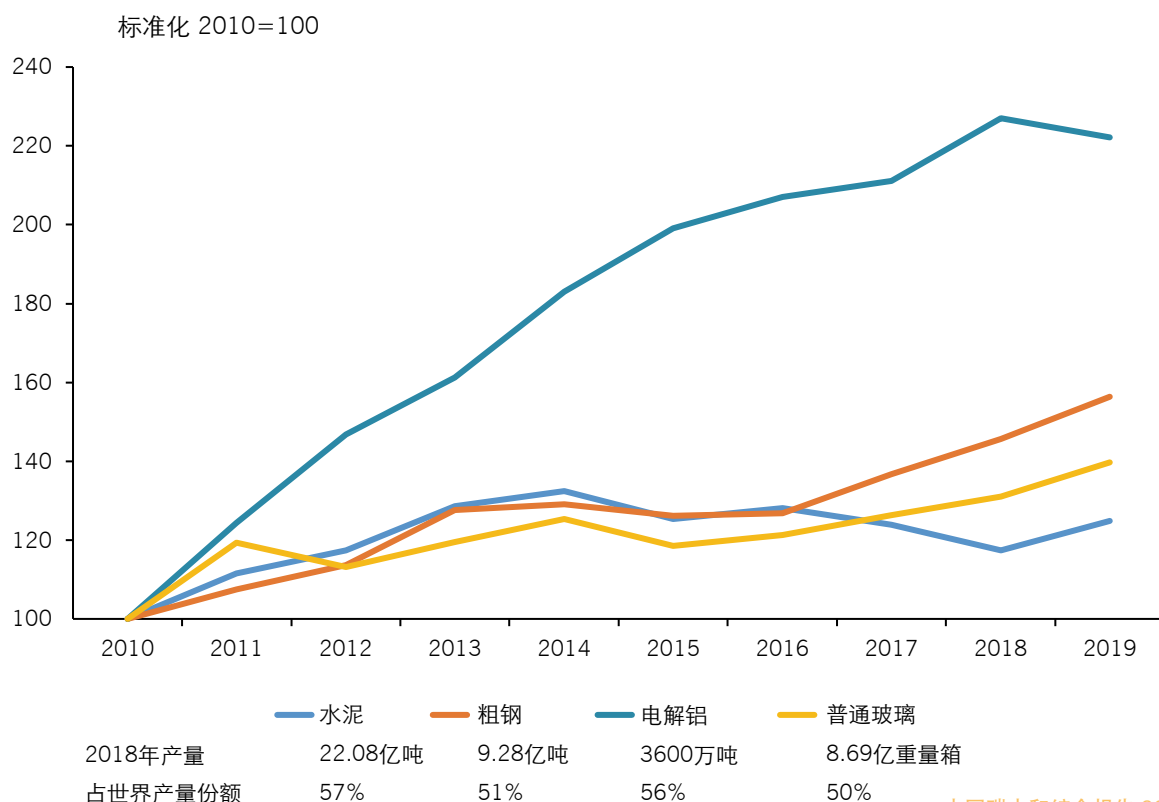
现状与趋势

过去十年中，中国主要工业产品产量持续快速增长。电解铝产量增加了一倍以上，粗钢产量增长了近60%（Figure 4-11）。2018年，中国生产了全球超过一半的水泥（57%）、粗钢（51%）、电解铝（56%）和大量其他工业产品（例如氨产量占全球的三分之一

以上）。2017年，中国工业部门贡献了GDP总值的41%，却消耗了中国终端能耗的65%（NBS，2019年），占能源相关CO₂排放量的68%（IEA，2019年）。

图4-II：中国主要工业产品产量及其在世界产量中占比的变化

（数据来源：国家统计局，2019；王，2020a）



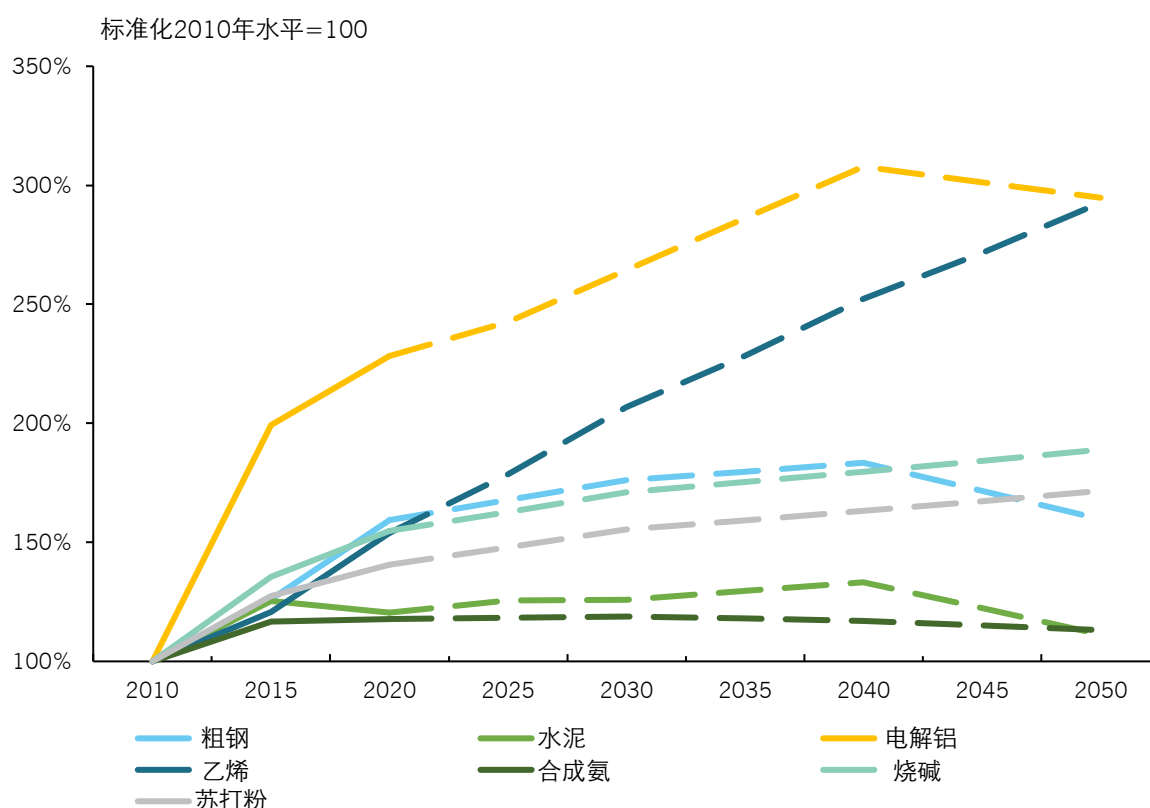
中国的工业可持续发展面临多重挑战。现今，中国工业增长依然过分依赖资源和能源投入。单位工业增加值能耗是发达国家的 5 到 8 倍（ERI，2020 年）。中国已成为世界上最大的铁矿石、原油、铝土矿甚至煤炭等大宗产品进口国和消费国（BP，2020 年），这导致中国越来越依赖海外资源，其经济安全风险不断上升。产能过剩是另一重大挑战，生产能力利用率低影响投资回报和资本收益，进而可能导致系统性金融风险。作为 SO₂（90 %）、NO_x（69 %）和粉尘（78 %）等空气污染物的最大来源，工业部门在控制大气污染方面面临巨大压力（MEE，2018 年）。中国的工业已与全球供应链密不可分，2020 年新冠疫情大流行可能会削弱全球化并重塑全球供应链。由于中国工业产品占全球份额较大，疫情后的经济复苏计划若没有完善的政策和投资指导，可能加剧中国的工业产能过剩及结构性问题，使工业部门陷入低效和落后生

产，增加转型难度。

国内方面，中国的全面现代化目标带来了持续的基础设施建设需求，预计短期内中国主要工业产品的需求仍将继续增长，并在未来保持强劲增长势头（图 4-12）。中国持续的城镇化进程带来新建和升级基础设施的巨大需求，对基础工业产品的需求将持续数十年。为了实现到 2050 年全面建成现代化强国的目标，中国的工业增加值需要翻两番。按照传统的增长模式，工业产值、能源消耗和碳排放量将增加近一倍。由于未来需求结构变化的不确定性，无法预知中国未来工业发展的确切特征。但是从研究中确实可以得出一些有力见解。在相对快速达到峰值之后，预计对粗钢和水泥的需求将保持稳定，而对主要石化产品和电解铝的需求将继续增长。

图4-12：中国主要工业产品至2050年需求预测

由于定义不同，不同模型对 2050 年中国工业产品需求的预测也有很大差异。此图使用的 PECE_LIU_2019 模型中，中国工业产品需求呈现先持续上升，稳定后最终开始下降的发展趋势。（来源：Liu 等，2019c）



专栏4-12 碳中和长期策略的关键要素

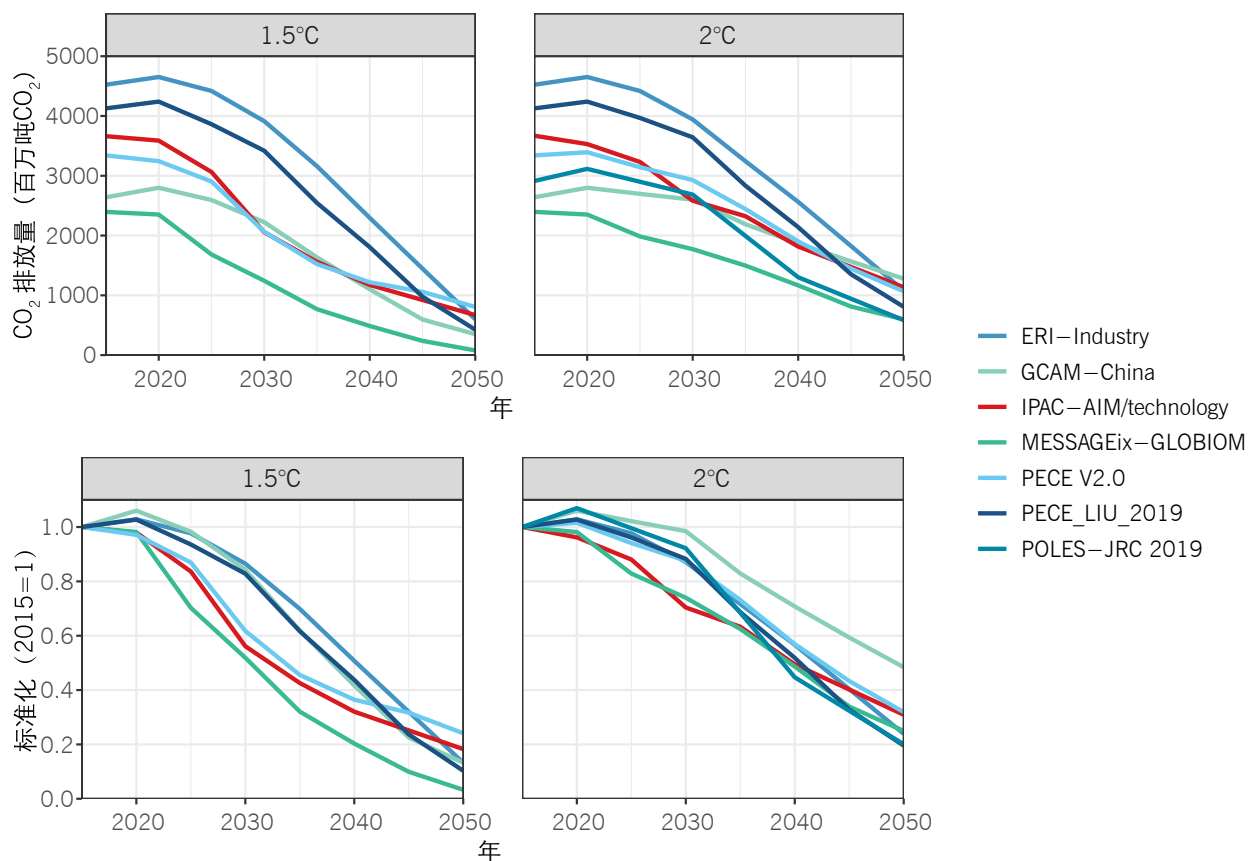
- ▶ 碳排放需尽快达峰，到2050年实现在2015年基础上降低约90%；
- ▶ 建设现代化工业体系，加速工业数字化进程，对制造业进行结构调整；控制工业能源需求的总体规模并降低碳强度；
- ▶ 通过能效提高、材料替代和循环经济等途径降低能源需求；
- ▶ 通过数字化转型以及从化石燃料转向电力，持续提高工业电气化水平；
- ▶ 对于难以实现电气化的设施，以绿氢或生物质能替代化石燃料；
- ▶ 在产生高浓度CO₂的设施中应用CCUS。

CO₂排放量需尽快达峰，到2050年实现在2015年基础上降低约90%。工业部门的低碳转型对于促进中国的高质量发展，维护经济、金融和能源安全，保护环境以及控制碳排放至关重要。此外，中国工业部门在全球生产、能源消费和排放中占比较大，在全球产业链中具有重要的地位，中国工业的低碳转型将重塑全球供应链。要实现2060年前碳中和的目标，必须快速减少工业部门的碳排放。工业部门尽快达峰将

为2030年前全国达峰和限制CO₂累计排放量奠定坚实基础（Lugovoy等，2018年；Zhou等，2018年；Liu等，2019年）。本报告采纳的全部1.5℃情景下，工业CO₂的排放都将尽快达峰，并以年均约2.5%至3.2%的速度下降。在2℃情景下，以年均约1.8%至2.7%的速度下降。到2050年，在1.5℃情景下，工业CO₂排放量将比2015年减少75%至95%。

图4-13：1.5℃和2℃情景下工业部门的CO₂排放

如上图所示，由于不同模型对工业部门的定义不同，基准年数据存在较大差异。为保证趋势比较的一致性，可使用模型的相对变化（如下面两图所示）。



建设现代化工业体系，加速工业数字化进程，对制造业进行结构调整；控制工业能源需求的总体规模并降低碳强度。未来中国工业部门的现代化程度将决定工业能源需求的规模和特征。向高附加值产业转型以及由制造型工业向服务型工业转移，有助于降低能耗强度并控制能源需求。通过提供生产者服务，建设服务型制造业，优化和升级产业内部结构以及促进服务业发展，可以显著增加工业总产值的总附加值，快速降低碳强度。新一轮工业革命以智能、数字化和互联网为标志，深化信息与工业一体化，在工业领域部署新一代信息技术，包括云计算、大数据、区块链、物联网（IoT）、5G 和其他新技术，可以系统化地提高生产力，并带来额外的节能效益。

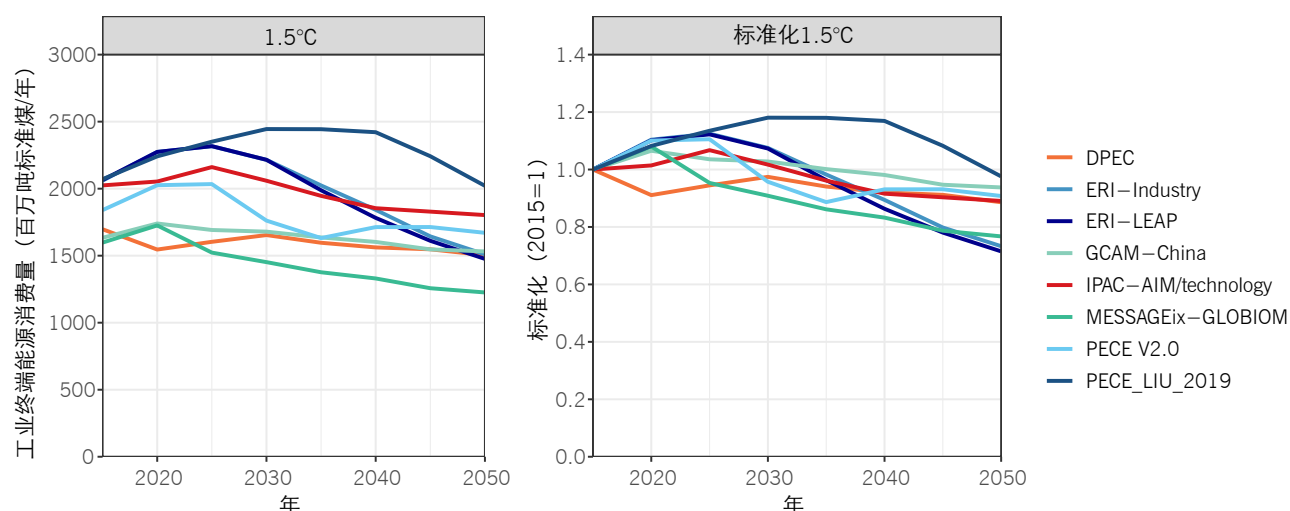
通过能效提高、材料替代和循环经济等途径降低能源需求。工业部门可以采用的提高能效技术多种多

样，比如高效发动机和热生产过程。向循环经济转型，聚焦减少、再利用和回收材料，将与工业现代化一起，产生不同的生产方式和材料替代，为提高效率提供机会。

模型情景反映了工业部门发展的多种可能性，阐明了未来能源需求的不同水平。本报告采纳的所有 1.5°C 情景均显示，无论减排路径以及总体减排水平有多大差异，到 2050 年能源需求必将降低。在某些情景中，2050 年工业终端能耗将在 2015 年基础上下降 2% 至 11%。而其他情景则显示，工业终端能耗将在 2015 年基础上下降近 30%（27% 至 28%）。不同模型间工业能源需求达峰时间也不尽相同，部分模型显示将尽快达峰，有一个模型显示最迟到 2030 年达到峰值。

图4-14：1.5°C情景下工业终端能源消费

如左图所示，由于不同模型对工业部门的定义不同，基准年数据存在较大差异。为保证趋势比较的一致性，可使用模型的相对变化（如右图所示）。



专栏4-13 中国工业部门深度脱碳的多个情景

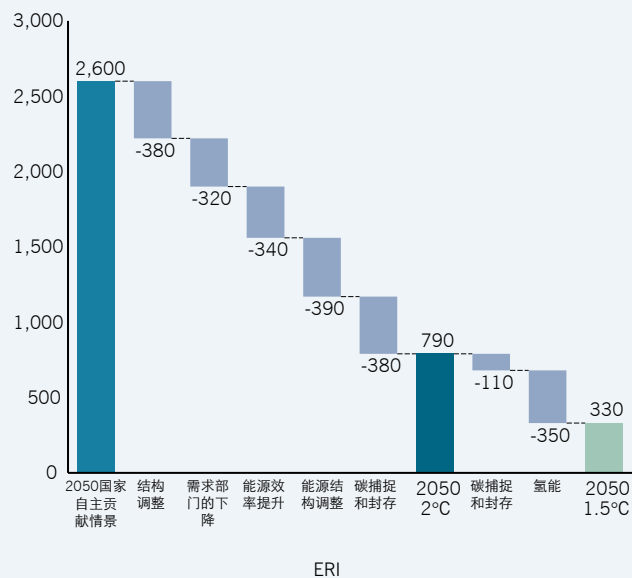
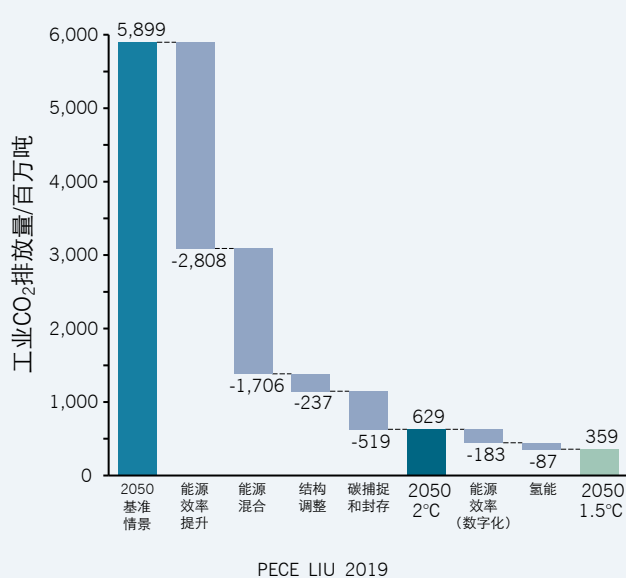
全球市场持续增长的潜力、原料和资源可得性以及碳中和目标，不再支持传统中国工业的发展模式。为解决上述限制因素的影响，中国工业部门必须推行低碳转型，提高能效，优化能源结构，增加可循环材料使用，并在保持大规模产品和附加值前提下应用 CCUS、氢能和其他新技术。未来工业发展和工业产品市场要面临的不确定性因素很多，因此实现工业部门脱碳有多种路径可供选择，不同情景对各种路径分别做了说明。

PECE_LIU_2019 模型和 ERI-工业模型的情景演示了不同措施对工业脱碳的相对贡献。在 PECE_LIU_2019 模型中，从基准情景（即未采取特殊减排措施的情景）到 2°C 情景，53% 的脱碳来自能源效率提高，32% 来自能源结构的转变，4% 来自产业结构调整，10% 来自 CCUS。如果要达到 1.5°C 温控目标，需要进一步提高能效，改用氢能。氢能占额外脱碳量的 33%。ERI-工业模型以中国国家自主贡献目标作为基础情景。从国家自主贡献情景到 2°C 情景，减排

同样来自工业结构、能效、能源结构、终端需求管理和 CCUS 应用。从 2°C 情景到 1.5°C 情景，24% 的额外减排量来自 CCUS 的进一步应用，76% 来自于氢能

替代。两个模型情景都表明，CCUS 和氢能等低碳技术对于工业部门脱碳至关重要，但可能存在不同的脱碳组合形式。

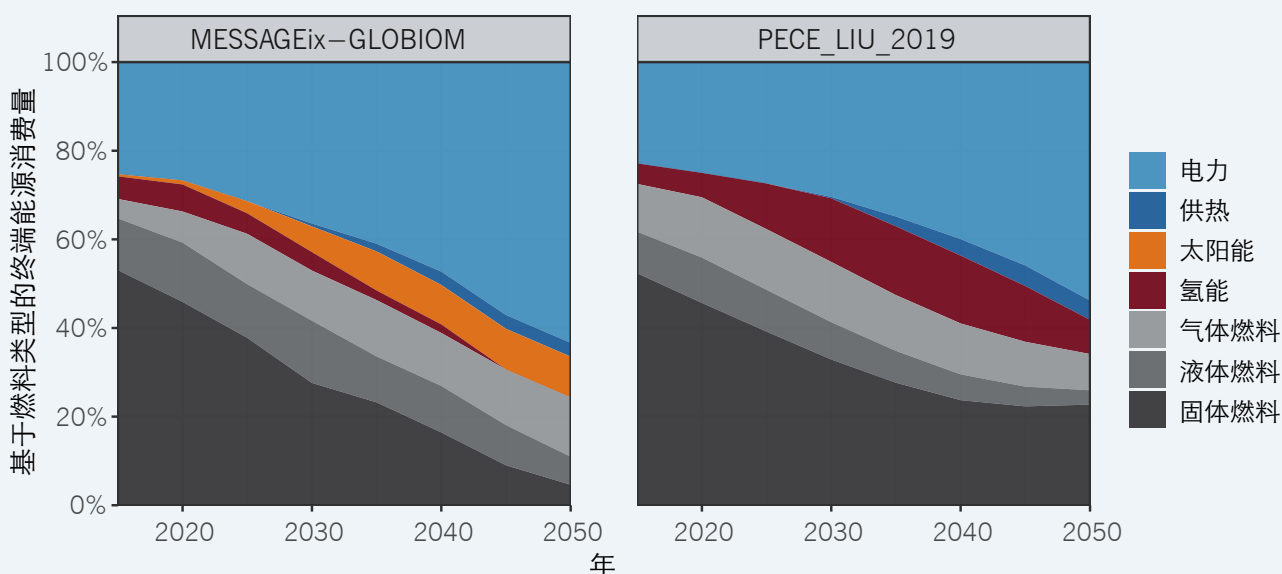
图1：在两个代表模型的1.5°C和2°C情景下，到2050年不同减排措施的减排贡献



工业部门脱碳将改变其用能的能源结构。在 2050 年实现 1.5°C 温控目标的情景下，工业部门终端能源结构在不同模型情景之间存在显著差异。例如，PECE_LIU_2019 模型中工业部门更依赖提高电气化水

平替代化石能源。相反，在 MESSAGEix-GLOBIOM 模型情景中，生物能源等化石能源的替代能源则发挥更大作用。

图2：两个代表模型1.5°C情景下的工业终端能源结构



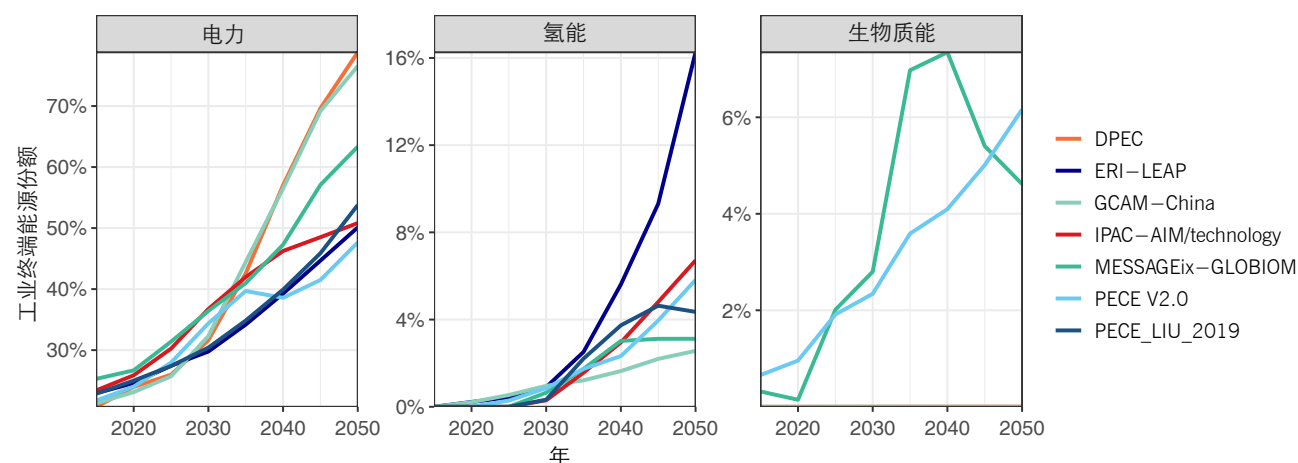
通过数字化转型以及从化石燃料转向电力，持续提高工业电气化水平。本报告综合考虑的 1.5°C 情景中，工业电气化率从 2015 年的 23% 上升到 2050 年的 45% 至 80%。工业部门电气化的实例包括：在钢铁生产中用电弧炉取代高炉，在大部分制造部门的低温加热过程中使用电力。

在工业过程和高温热生产中，以绿氢或生物质能替代化石燃料。在难以实现电气化的设备中加快推进

绿氢（由零碳电力制取）和可持续生物质能作为新能源载体和原料，可显著减少排放。氢能有望成为高效、清洁和灵活的二次能源，在工业部门深度脱碳中发挥重要作用。本报告 1.5°C 情景中，氢能将占 2050 年终端能源的 3% 至 18%，生物质能约占 5%。因此，开发绿氢生产和可持续生物质能生产示范项目，将绿氢和生物质能生产与石化、钢铁等部门应用结合至关重要。此举将推动必要的研发和示范，降低长期成本。

图4-15：1.5°C情景下工业终端能源消费中电力、氢能和生物质能占比

只有两个模型包含了到 2050 年生物质能百分比数据。PECE V2.0 模型中，分布式太阳能与终端电力分开计算，可能影响终端能源中电力的份额。



在产生高浓度CO₂的设施中应用CCUS。中国拥有相对充裕的地质碳储存能力。CCUS 可以用于发电和产生高浓度 CO₂ 的工业设备，例如钢铁，水泥和化工。应用 CCUS 可让工业部门保留一定的化石能源消耗，

以满足特定工业流程对高温热源和化石原料的需求，且不会增加 CO₂ 排放量。CCUS 也可用于以生物能源为来源制氢的过程，从而实现负排放。

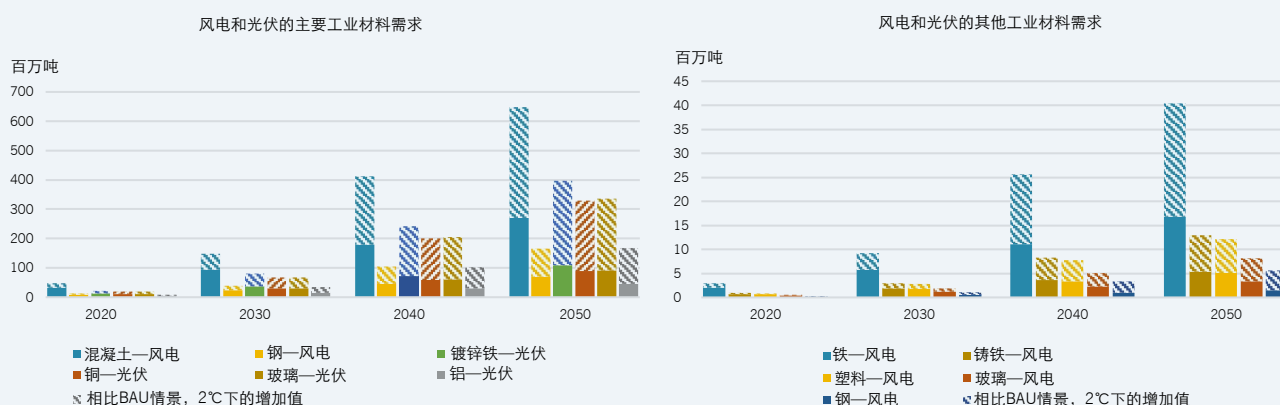
专栏4-14 为什么我们需要制订综合且跨部门的气候变化减缓策略和行动？可再生能源发电对中国工业原料和碳排放的影响

可再生能源遍布全球，预计可再生能源发电将成为中国脱碳战略的核心基石。然而，风电和光伏的建设、安装和维护会消耗大量的工业原料。风力涡轮机制造过程中消耗的主要工业原料是混凝土、钢和铁。光伏组件需要镀锌铁、玻璃、铜和铝。研

究（Wang 等，2020b）表明，为实现 2°C 温控目标，2020-2050 年间，中国风力涡轮机的生产可能消耗 6.5 亿吨混凝土、1.7 亿吨钢和 4000 万吨铁。同一时期，中国的光伏生产可能消耗 4 亿吨镀锌铁、3.4 亿吨玻璃、3.3 亿吨铜以及 1.7 亿吨铝。

图1：2℃情景下应用可再生能源导致的主要工业材料的增加情况

BAU 情景假设没有额外采取减排措施，且工业部门保持近几年的发展趋势。在 2℃ 情景下，风能和光伏发电量将显著提高，从而实现 2℃ 温控目标。（来源：Wang 等，2020b）

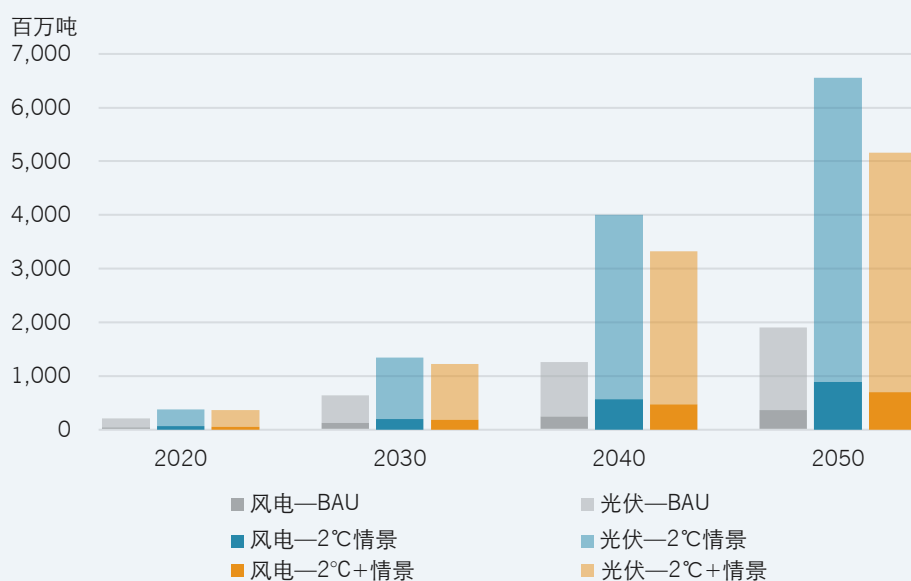


原材料需求不断增加，必然要求相关工业部门采取减排措施。在 2℃ 温控情景下，风电和光伏的大规模应用加大了对工业原料的需求，相应累计产生 CO₂ 排放量 66 亿吨，同期工业排放量增长 11%。如果考虑工业部门自身的技术进步（图 2 中的 2℃+

情景），上述工业原料的累计 CO₂ 排放量可能减少到 52 亿吨。研究发现，因风电和光伏大规模应用而增加的工业原料需求，不会影响 2℃ 温控目标的可行性，但对 1.5℃ 温控目标提出了更多挑战。

图2：2℃情景下可再生能源应用导致的工业材料CO₂排放量的增加值

BAU 情景假设没有额外采取减排措施，且工业部门保持近几年的发展趋势。2℃ 情景下，风能和光伏发电量将显著提高，以实现 2℃ 温控目标。2℃+ 情景假设工业部门进行了额外的技术创新，从而实现 2℃ 温控目标：工业部门通过节能技术降低风能和光伏制造过程中的材料需求和相关排放。（来源：Wang 等，2020b）



专栏4-15 工业：支持长期转型的近期行动

- ▶ 消除产能过剩，优化工业结构，提高效率和创新能力；
- ▶ 完善环境影响评价和能源技术评价的相关制度和标准，为限制高能耗工业投资提供指导，控制高耗能工业产能扩张；

- ▶ 采取需求管理措施，控制工业产品产量，降低总能源需求。；
- ▶ 优先部署节能技术，控制总能源需求；
- ▶ 提高电气化水平，特别是替代煤炭的使用。

“十四五”期间，工业部门将面临扩张冲动、行业集中度低、产能过剩、高耗能产品占比过大、产品附加值低、能效低以及区域分布不均等多重压力。

“十四五”时期将是中国经济结构，特别是需求结构发生重大变化的时期。在适应总体经济发展趋势以及应对上述挑战的同时，中国工业部门也将获得升级转型的重要机遇。中国工业部门的低碳转型将全面提高工业全要素生产率（TFP），改变生产方式，培育新的商业模式，实现结构优化，并为长期高质量发展奠定坚实基础。

进一步消除产能过剩，提高集中度，优化工业结构，提高效率和创新能力。产能过剩是近期工业转型的最大挑战之一。为有效消除过剩产能，有必要改变政府参与市场的方式，建立市场调节机制。在市场机制下，价格和生产要素的分配由企业竞争力决定，从而达到消除落后产能的目的。还应建立“绿色准绳”，在工业发展过程中综合考虑能效、环保、安全、质量和其他因素，达到消除过剩产能的目标。通过上述措施，“十四五”期间主要工业部门的整体产能利用率将提高5%以上。

完善环境影响评价和能源技术评价的相关制度和标准，为限制高能耗工业投资提供指导，控制高耗能工业产能扩张。中国地域广阔，东部、中部和西部地区的经济发展水平各异，产业结构、产业布局和技术水平也不尽相同。高能耗工业对中西部地区仍然具有吸引力。因此，完善环境影响评价和能源技术评价的相关制度和标准至关重要，可以为限制高能耗工业投资提供指导，控制高耗能工业跨地区转移。在制定应对新冠疫情的经济复苏计划时，也有必要控制工业产能进一步扩张。解决产能过剩的最主要目标是，“十四五”期间主要工业部门总产能不再增加。

采取需求管理措施，控制工业产品产量，降低总能源需求。可采取下述措施，在不影响居民消费的前提下，显著减少原材料需求：减少拆除和重建行为，将当前基础设施的寿命延长到50至100年；合理规

划建筑总量；发展循环经济，增加资源的循环利用。限制高耗能产品出口，也将降低对工业产品产量的需求。采取需求管理措施的目标是，到2025年之前粗钢和水泥等工业产品产量达到峰值，有效控制化学品和电解铝等工业产品的增长。“十四五”期间，建议对钢铁和水泥行业的CO₂排放量设定上限，有效纳入中国统一的国家层面碳交易市场。

优先部署节能技术，控制工业部门的总能源需求。

中国部分高耗能行业的能效水平处于领先地位，例如电解铝行业，但钢铁、水泥、乙烯、平板玻璃和烧碱等其他高耗能行业，国际先进的生产者单位产品能耗比中国低10%至30%（CCEEE，2019年）。充分挖掘现有技术的节能潜力，是最具成本效益的减排方法。

“十四五”期间，利用现有技术以最优成本提高能效的机会很多。为最大限度挖掘近期节能潜力，有必要突出此项工作的重要性，克服困难和挑战，在重点能耗企业加快成熟技术和设备的应用：一是提高重点企业和产品的能效，从部分环节和个体节能到全过程和全系统节能；其次，促进锅炉、发动机和变压器等关键耗能设备的绿色升级和能效改进；最后，加快数字化和信息技术在节能领域的应用。目标是将整体工业能效提高15%以上，多数工业能效指标在“十四五”期间达到国际先进水平。

提高电气化水平，特别是替代煤炭的使用。

提高电气化水平是工业现代化的内在要求。如果将电气化与电力行业脱碳有机结合，将对工业部门尽早达峰发挥至关重要的作用。实现电气化需要采取多项措施，包括促进工业方法创新，实现工业电气化与数字化和智能技术的协同发展；采用先进的用电生产工艺代替传统生产工艺，满足高规格产品生产需求；促进电热发展，通过电热泵提供低温热源；最后，完善市场机制，支持工业电气化，例如，根据工业企业的规模、时间分布和用电效率，完善用电峰谷价格、差价和分级价格政策。目标是在“十四五”期间将整体工业电气化率提高约5%。

专栏4-16 工业脱碳与中国长期增长和发展的关系

将工业低碳转型与增长和发展目标相结合，有助于建立共识，克服障碍，帮助中国工业部门更好明确其在中国总体经济增长和发展战略中的地位。要实现中国工业的低碳转型，必须将传统工业与智能、数字和网络技术、服务业深度融合并孕育新的工业子部门。工业部门在未来实现低碳转型，将更好地满足其他经济部门和人民对高质量工业产品的需求，促进中国整体经济的高质量发展。

低碳工业部门将更加依赖氢能和生物质能，从

而减少对传统化石能源的依赖。高质量工业产品不断取得突破，城镇化进程中高标准基础设施的需求得以满足，基础设施的耐用年限和能效将大大提高。工业部门的所有升级都将有助于改善整体能效、能源安全和环境保护。

此外，中国工业部门在全球生产、能源消耗和排放中占比较大，在全球供应链中具有重要的地位，因此中国工业的低碳转型将重塑全球供应链，刺激全球工业的低碳转型。

4.4 交通运输部门转型

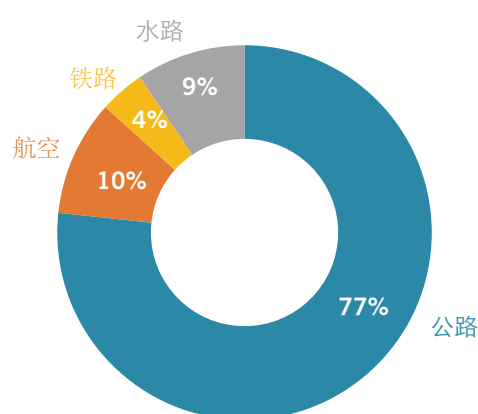
现状与趋势

交通运输部门是中国经济活动和社会连通性的关键推动因素，其能源消费和CO₂排放量加速增长。交通运输部门目前占中国终端能源消费总量的近12%，CO₂排放量从2005年的约4亿吨增至2018年的

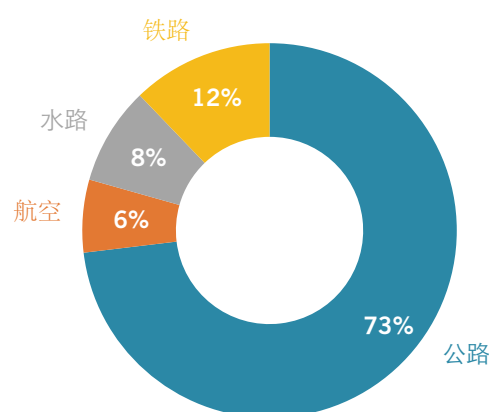
约11亿吨，目前占中国与能源相关的CO₂排放总量的近11%。公路运输是排放量最高的运输方式，占2018年交通运输部门能源相关排放总量的77%（图4-16）。交通运输部门几乎完全依赖液态化石燃料。

图4-16：2018年不同交通运输方式能源相关CO₂排放及能源需求占比

（来源：CATS，2020）



2018年不同交通运输方式产生的CO₂排放量 (%)



2018年不同交通运输方式的能源需求结构 (%)

在快速城镇化和工业化的推动下，中国运输服务需求高速增长。2005年至2019年，货运活动（吨公里）和客运活动（人公里）分别增长了172%和310%；城市客运活动增长了10倍。2019年，公共交通和私家车分别占城市客运量的38%和30%以上（CATS，2020年）。

交通结构和运输方式的分布是影响交通运输部门的能源消费和排放量的两大重要因素。货运方面，中国面临着从公路运输转向低碳运输方式的挑战。2005年至2019年，公路运输在货运活动中货运量占比例从66%增长至78%。煤炭、铁矿石、谷物以及其他大宗商品的运输是造成此项增长的主要原因。

受益于中国高速铁路网络的快速扩张，越来越多的客运活动逐渐从公路转向铁路。中国公路客运量于2014年达到11000亿人公里的峰值，2019年下降至8860亿人公里，占当年客运总量的29%。中国铁路客运量保持稳定增长，到2019年已增至14710亿人公里，约占当年客运总量的48%。中国已建成世界上最大的高速铁路网，覆盖范围广泛并已取代部分传统铁路活动。铁路电气化率从2005年的42%增长至2019年的72%。目前，中国新能源汽车的保有量居世界首位，达到380万辆，占中国汽车总数的1.5%。（Chen等，2018年；国家统计局，2019年）

长期以来，交通运输部门高质量发展和绿色转型已上升为国家战略，交通运输低碳发展是建设生态文明和美丽中国的迫切要求。中共中央、国务院于2019

年9月印发的《交通强国建设纲要》提出了“构建安全、便捷、高效、绿色、经济的现代化综合交通体系”的目标，并将“绿色发展节约集约、低碳环保”作为交通运输部门未来发展的战略重点。考虑到中长期发展趋势，交通运输部门迫切需要开展公路货运节能减排，推动城市公共交通工具和城市物流配送车辆全部实现电动化、新能源化和清洁化。

然而，中国交通运输部门低碳转型也面临着诸多挑战。首先，运输结构不合理，运输效率低。大部分大宗货物长距离运输仍采用高能耗和高排放的公路运输。其次，交通发展在某些地区造成生态和环境问题，而这些问题尚未得到解决。交通运输部门温室气体排放总量持续上升。最后，绿色交通治理能力以及统计监测以及标准体系仍有待完善。

展望未来，新兴技术和新的工作与生活方式将改变中国的交通运输体系，对交通运输部门脱碳产生积极的影响。新兴技术、商业模式改变以及不断变化的行为方式（例如远程办公、网上银行、在线购物、共享汽车、自动驾驶、无人机技术、电商和3D打印）将推动客运和货运需求不断改变。电动汽车、智能铁路、自动驾驶汽车和智能船舶的大规模应用，可能会彻底颠覆交通部门基础设施的设计和运营。中国政府正在探索航空领域的绿色替代燃料。随着先进内燃机技术和新型材料的应用，节能和新能源汽车普及度越来越高。此外，为适应多中心、小街区和多功能方式为特点的战略空间规划，城市交通基础设施也在逐步改进。

长期战略要素

专栏4-17 交通：碳中和长期战略的关键要素

- ▶ 交通运输部门CO₂排放量在2025年至2030年达峰，到2050年较2015年水平下降约80%；
- ▶ 推动整个交通运输部门向低碳能源转型，包括电能、可持续生物燃料和氢能；
- ▶ 制订综合交通体系规划，向高能效低碳运输方式转变；

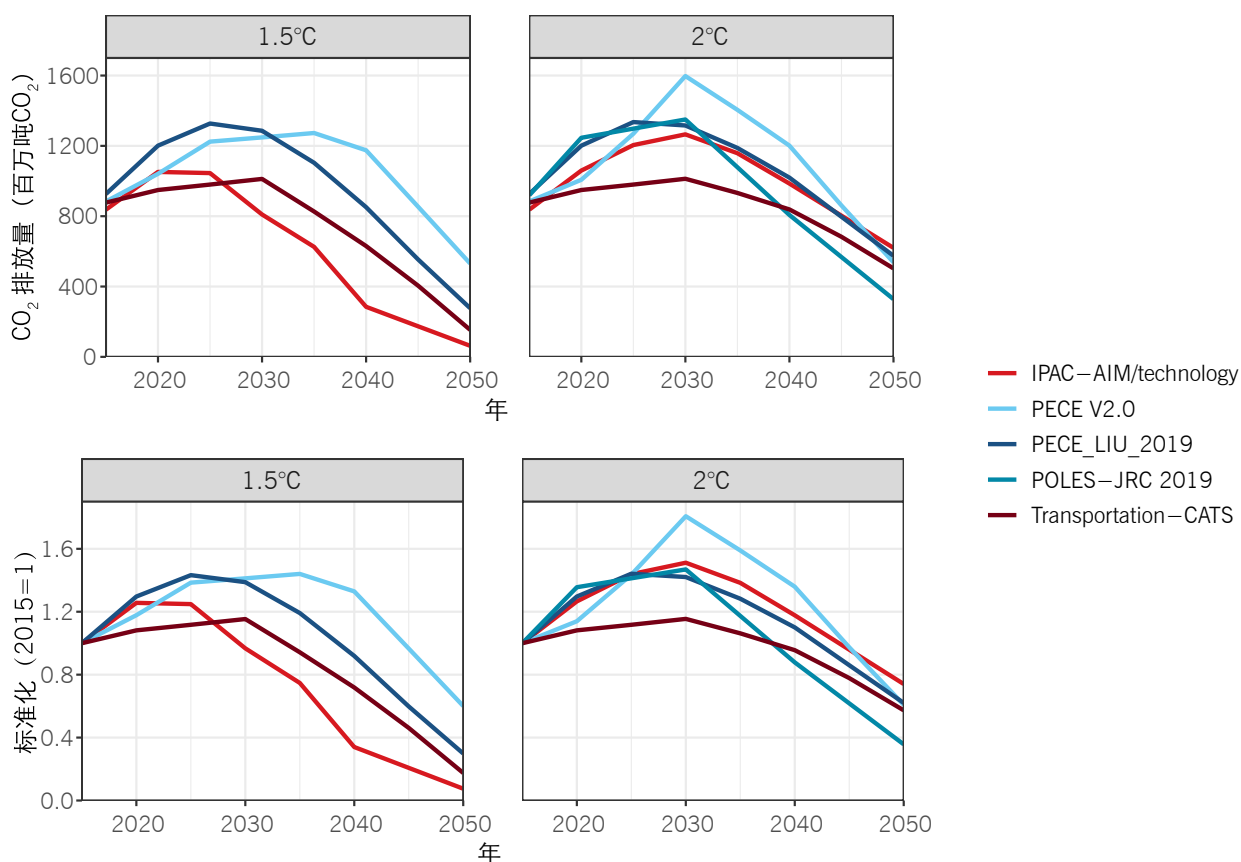
- ▶ 在交通基础设施和车辆中，广泛应用大数据、5G、人工智能、区块链、超级计算等新技术，构建电气化、智能和共享的交通运输体系。

交通运输部门CO₂排放量在2025年至2030年达峰，到2050年较2015年水平下降约80%。在2℃情景下，大部分模型预测碳排放将在2030年左右达峰。2050年的排放量较2015年水平降低25%-65%（图

4-17）。对未来交通运输服务情况存在多种不同假设，因此导致了各情景的差异，假设情况的差异因素主要包括未来经济和社会发展、节能方案以及多种交通运输部门脱碳技术组合。

图4-17: 1.5°C和2°C情景下交通部门CO₂排放量

由于不同模型采用的交通运输部门的计算方法，部门的范围和定义以及历史数据源不同，基准年数据因此存在差异。例如，包含国际航运和航空排放情景的模型，其基准年数据通常高于不含此类情景的模型数据。为保证趋势比较的一致性，可使用模型的相对变化（如下图所示）。核算方法的差异也意味着特定部门减排能力的差异。



交通运输部门未来如何发展还存在不确定性，不同的模型代表了对交通运输部门未来变革和潜在脱碳路径的不同愿景（图 4-18）。例如，中国能源环境综合政策评价模型（IPAC）认为未来社会对交通运输服务的需求很高，2050 年较 2015 年增长 3 倍。而 Transportation-CATS 模型则认为未来社会对交通运输服务的需求发展趋势较为平稳。

在货物运输方面，Transportation-CATS 模型采用的情景认为，2030 年前货运需求将持续缓慢增长。2030 年至 2040 年，受工业产值增长放缓的影响，货运需求增长率将进一步降低。2040 年后，货运需求达到峰值并开始缓慢下降。Transportation-CATS 情景假设中国的重载运输和大宗货物运输需求将在 2030 年前达峰。随着中国基本完成城镇化和基础设施体系，大宗货物运输需求将于 2030 年下降，并在之后保持相对稳定。该情景假设公路货运仍将是重要的货物运输方式。随着低碳交通运输政策的全面实施，部分公路货运需求将向铁路和水运转移。集装箱多式联运

的发展，将有效提高铁路和水路货运的增长潜力。航空和管道货运也将有所增加，但在总体货运活动中所占比例仍然较低。

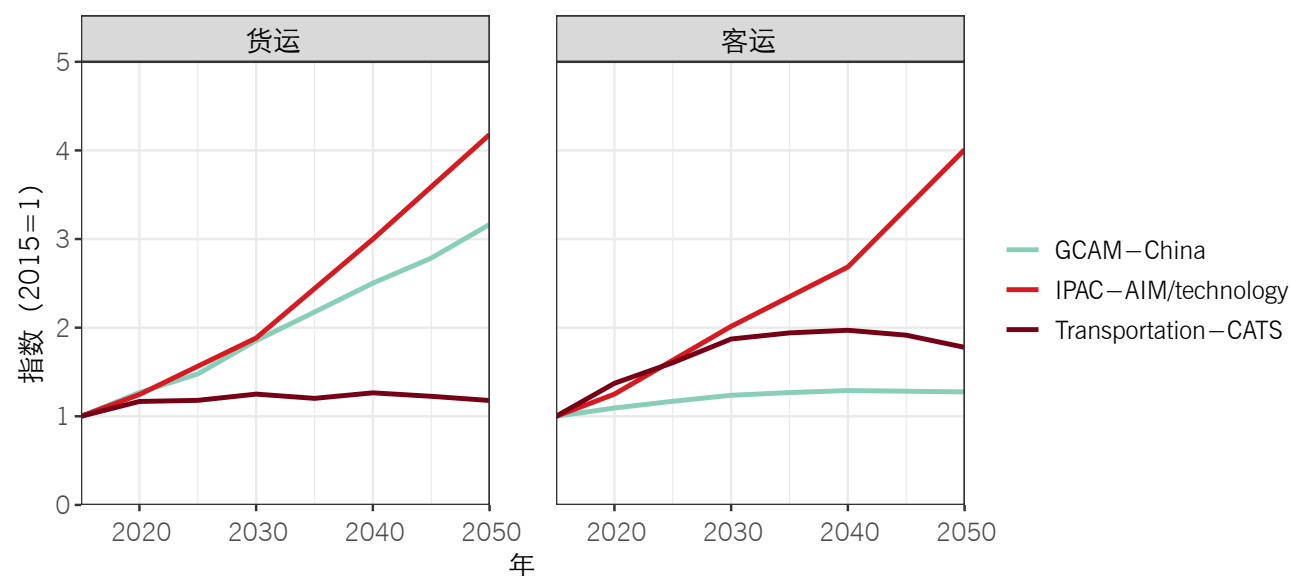
需要注意的是，各个模型对货物运输范围的界定不同，可能会影响模型结果。全球变化评估模型（GCAM-China）和 IPAC 模型包含了国际航运和航空货运，并且两个模型都预测国际航运和航空货运需求将出现增长。相比之下，Transportation-CATS 模型仅考虑国内航运和航空运输服务。

三个情景体现了客运的 3 种不同发展趋势。在 IPAC 情景下，客运活动持续快速增长，2015 年至 2050 年的总增长率为 400%。在 GCAM-China 情景下，客运活动的增长较为缓慢，总增长率为 130%。而在 Transportation-CATS 情景下，客运活动在 2040 年达峰前以每年 4% 的增长率缓慢增加，随后以每年约 1% 的速率下降。

Transportation-CATS 情景假设，2030 年以后城镇化速度放缓将显著影响客运需求。该情景假设中国在 2030 年前始终处于工业化和城镇化转型阶段，且中国的城镇化进程将在 2030 年至 2050 年逐渐进入成熟阶段，从而导致客运需求放缓。在这一情景下，民航的增速最快，其次是铁路运输。在城市出行方面，更快、

更舒适、更便捷以及可以自由选择路径的优势让人们更对私家车青睐有加。自动驾驶和共享汽车等新技术和交通方式在未来的发展，将进一步提高汽车出行的吸引力。不同类型的城市将形成不同的公共交通发展趋势。人口密度较低的城市公共交通需求将进一步下降。

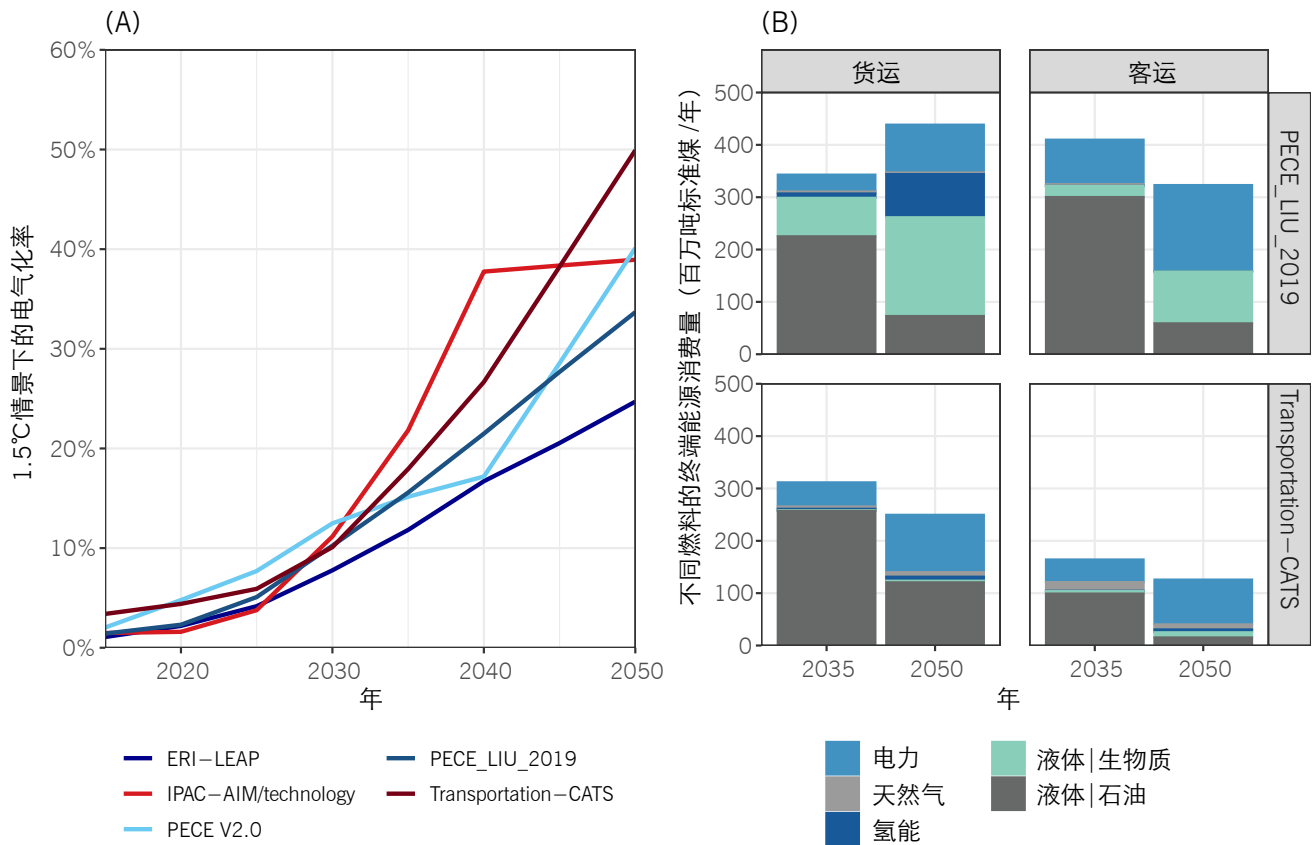
图4-18：三个模型1.5℃情景下货运和客运的活动水平变化（货运：吨公里；客运：人公里）



推动整个交通运输部门向低碳能源转型，包括电力、可持续生物燃料和氢能。用碳足迹较小的燃料替代液化化石燃料，是减少交通运输部门 CO₂ 排放的主要方法。本报告涉及的所有 1.5℃情景都考虑了电力、氢能和生物燃料。然而，每个情景中假设的低碳燃料结构各不相同，反映了未来技术发展方向以及哪些技术最终能够脱颖而出，发挥最大减排效力的不确定性（图 4-19）。在本报告涉及的所有 1.5℃情景中，2050 年电力在交通运输能源中所占比重介于 25% 至 50% 之间。例如，PECE_LIU_2019 情景下的电气化率相对较低，仅为 35%，但其生物燃料和氢能所占比重较高。在该情景下，到 2050 年电力、氢能和生物燃料在货运总能耗中所占比重将超过 80%（电力占 20%，氢能占 20%，生物燃料占 40%）。低碳燃料在客运总能耗中所占比重也将超过 80%（电力占 51%，生物燃料占 31%）。与其他情景相比，Transportation-CATS 情景下的 2050 年电气化率最高（50%），但其氢能和生物燃料所占比重较低：到 2050 年，在货运能源需求中，电力、氢能和生物燃料所占比重分别为 45%、3% 和 1%，在客运能源需求中所占比重分别为 65%、4% 和 8%。新能源汽车比重超过 80%，新能源船舶比重超过 50%，而生物质能和其他新能源则占民航能源的 90%。



图4-19：交通运输部门的电气化率（图A）以及两种代表模型的能源需求和燃料结构（图B）



制订综合交通体系规划，向更高效的低碳运输方式转变。加快开发水运、铁路等绿色运输方式，最大程度上提高结构性减排。从结构上调整货运方式，充分利用铁路和水运的比较优势，在满足日益增长的货运需求的同时，达到节能减排的目标。高铁将承载越来越多的城际交通需求，从而提高整体能效。

在交通基础设施和车辆中，广泛应用 **大数据、5G、人工智能、区块链、超级计算**等新技术，以构建**电气化、智能化和共享化**的交通运输体系。广泛的技术变革趋势正在影响整个中国经济，未来低碳能源体系将与交通基础设施网、运输服务网、能源网与信

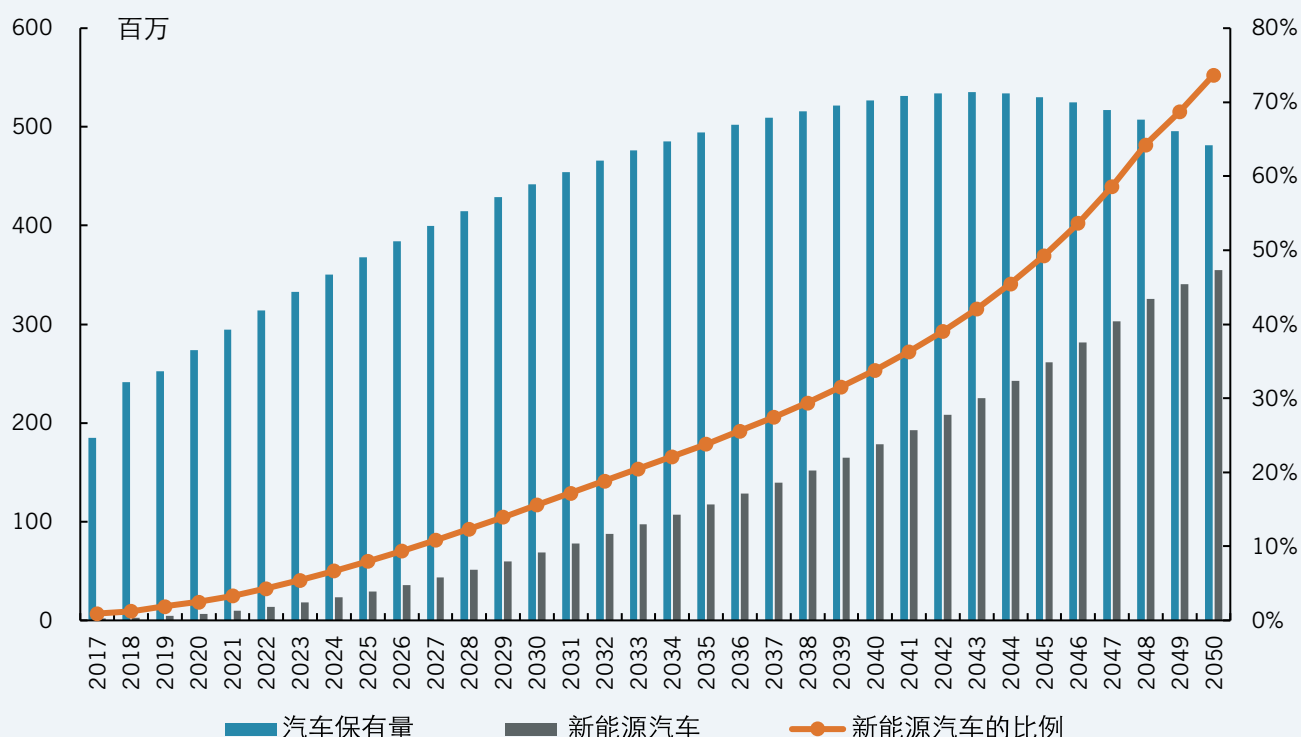
息网融合发展，在最大范围内构建先进的交通信息基础设施。重要的转型措施包括：建设综合交通大数据中心体系，深化交通公共服务和电子政务发展；推进北斗卫星导航系统在交通运输领域的应用；将无人驾驶技术应用于不同车辆类型，例如公共汽车、消防车、物流车辆、出租车、智能高速公路、景区无人渡轮和清洁车；开发分时租赁，网络租车以及针对新能源汽车的综合出行服务等业务模型，以满足未来的个性化出行需求。例如，在 Transportation-CATS 情景下，到 2050 年，自动驾驶车辆将占有所有车辆的 80% 以上，而智能船舶和智能码头则占相应系统的 90% 以上。



2019年，中国电动汽车保有量达310万辆。相关配套基础设施也实现迅速发展。截至2019年，已在810个高速公路服务区建成充电桩7600个（交通运输部，2020年）。中国在新能源汽车，尤其是公共汽车和电车的普及和应用方面取得了令人瞩目的成绩。2019年，中国共有69.3万辆公交车，其中新能源公交车超过41万辆，占公交车总量的58%以上（交通运输部，2020年）。2018年7月，国家发改

委发布了《关于创新和完善促进绿色发展价格机制的意见》，提出鼓励电动汽车提供储能服务，并通过峰谷电价差获得收益。电池及相关技术、充电桩修建和标准化设置还将不断突破，未来如何在电力系统中更充分地电动汽车提供支持和保障电动汽车，已成为交通运输部门和电力部门面临的一个跨领域问题。

图1: TRANSPORTATION—CATS模型1.5°C情景下的汽车保有量，新能源汽车数量和新能源汽车所占比例



电动汽车和电网的协调发展，对新能源汽车的大规模应用以及电网改进将产生协同效益。电动汽车可用于“削峰”，作为灵活负载帮助电网消纳更多的可再生能源。大型智能充电桩的应用，可促进电动汽车充电系统与建筑物内部配电网的融合。汽车电池作为建筑物灵活用电系统的组成部分起到“削峰填谷”的作用，在夜间消纳住宅建筑物的过剩电力，在日间/高峰用电期间支持办公/住宅建筑物的高峰用电。

例如，TRANSPORTATION-CATS1.5°C情景估计，新能源汽车将扩展至城市公共交通、出租车、城市物流配送车辆以及电动货车，氢燃料电池重型货运卡车数量也将增加。到2025年，新能源汽车在新车销量

占比将达30%，并将在2050年增至近100%。到2030年，中国电动汽车保有量将达6900万辆，提供35亿千瓦时的储能容量和近6.9亿千瓦的灵活负载。

综上所述，有必要协调发展电气化交通运输体系和低碳电力部门。重要的协作领域包括：通过顶层设计和政策机制研究，支持建设“车网融合”体系；研究和制定充放电价格政策，充分反映“车网融合”的价值，加强电动汽车与可再生能源的关联性；引导充电服务提供商直接、深入参与电力市场；研发和示范“车网融合”体系以及退役动力电池储能技术；开展“车网融合”示范项目，经测试后出台一系列技术解决方案、标准化协议以及市场机制。

专栏4-19 交通运输部门：支持长期转型的近期行动

- ▶ 加快调整长距离货运方式，重点支持铁路和水运；
- ▶ 以“公共交通和自行车出行/步行”为重点，加快改善绿色出行体系；
- ▶ 提高清洁技术水平，促进向新能源转型；
- ▶ 大力发展智能交通；
- ▶ 显著提高交通运输整体能效；
- ▶ 加强交通运输需求管理政策创新。

加快调整长距离货运方式，重点支持铁路和水运。

中共中央国务院《关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战的意见》、交通运输部《关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战实施意见》以及其他政策文件均要求减少公路货运量，增加铁路货运量。中国需要提高铁路和水路货运在大宗货物长距离运输中的比例，提高交通运输网铁路和港口密度，并逐步减少重型柴油货车在大宗货物长距离运输中的比例。

以“公共交通和自行车出行/步行”为重点，加快改善绿色出行体系。为促进交通运输减排，需优先考虑公共交通规划、土地利用、资本和路权（Jiang 等，2019 年）；加快建设快速公交系统、公交专用道和城市轨道交通，以及自行车道和人行道等慢行系统；修建大众运输系统；加快推广网约车、共享单车和汽车租赁等共享交通方式；持续提高公交出行分担率；最后，构建满足多样化需求的城市出行系统。

促进和支持向新能源汽车转型。随着中国新能源汽车产业的快速发展，新能源汽车的销量和渗透率将继续提高。中国需要继续加快修建新能源汽车充电桩，推进向新能源汽车的大规模转型（Li 等，2019 年）。中国可以制定目标，除重型货车以外禁止销售新燃油车（ICEV）。

大力发展智能交通。促进 5G 通信技术与车路协同系统的融合发展（Yang 等，2020 年）。到 2025 年在部分路段实现车路协同试点应用。提高交通运输基础设施规划、设计、修建、养护、运营和管理全周期的数字化水平，搭建大规模和系统性大数据集，以及覆盖运载车辆和基础设施的综合交通大数据中心体系。

显著提高交通运输整体能效。鼓励淘汰高耗能的老旧车辆和船舶，提高运输车辆的节能环保技术水平。随着铁路电气化、机车节能技术和智能管理技术的进步，到 2025 年，铁路能耗可降低 10%-15%。在公路运输方面，随着发动机和车辆制造技术的改进以及生态驾驶等技术的应用，到 2025 年，公路运输能耗将降低 15%-20%（Xie 等，2018 年），船舶大型化和船型标准化等技术可将水路运输的能效提高 10%-20%（Li 等，2017 年）。随着飞行管理技术、航空生物燃料应用技术以及新发动机/飞机研发应用的优化，到 2025 年，航空运输能效将提高 10%-30%（Yu 等，2020 年）。

加强交通需求管理政策创新。加强交通需求管理，充分利用绿色税收、使用者付费等经济政策杠杆，遏制私家车过度增长和过度使用。交通需求管理策略包括限购政策、差异化停车收费、智能停车管理、交通拥堵费和交错通勤措施。

专栏4-20 交通运输部门新基建、经济增长、就业和消费模式

作为新冠肺炎疫情后经济复苏的一部分，交通基础设施投资不仅是中国刺激经济增长的主要渠道，同时也是推动经济转型、增加就业和升级消费模式的重要渠道。新一轮投资聚焦 5G、城际高铁系统、城市轨道交通、新能源汽车和充电站。这些投资可以促进交通运输部门的低碳转型。据估算，2020 年至 2025 年，城际高铁系统和城市轨道交通的累计总投资规模将达 34,400 万亿元（招商证券，2020 年）。

这些新投资将推动上游产业对金属产品的需求。中国政府近期发布了一系列战略规划和扶持政策，以促进交通运输部门新型基础设施投资，如，2020 年 8 月和 11 月交通运输部分别印发了《关于推动交通运输领域新型基础设施建设的指导意见》以及国务院办公厅印发的《新能源汽车产业发展规划（2021-2035 年）》。

4.5 农业、林业和其他土地利用

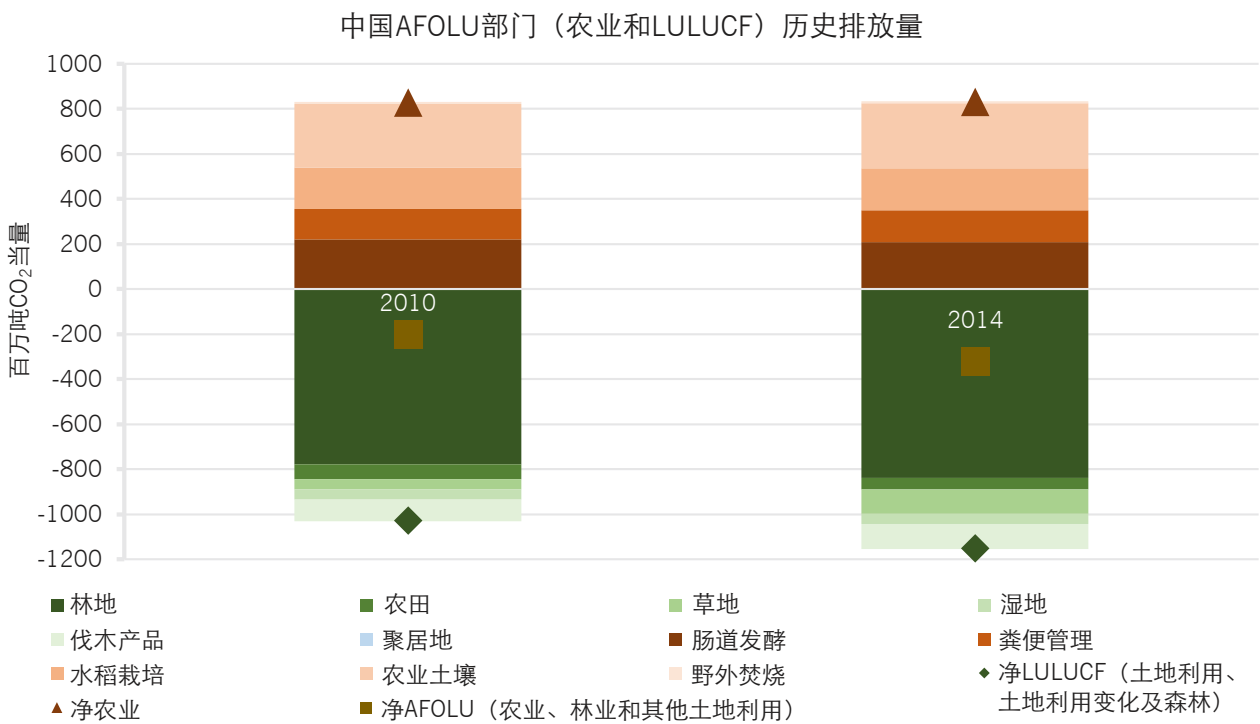
现状与趋势

作为人口大国，中国一直在努力养活世界 20% 左右的人口，并将保障粮食安全作为国民经济和社会发展的首要目标。中国全国耕地面积达 1.35 亿公顷，约占国土总面积的 14%，约占世界耕地面积的 7%。中国自 1980 年以来在农业领域取得的成就，在人类历史进程中是独一无二且史无前例的，大多数主要粮食作物和农畜产品的自给率稳定在 90% 以上（Lal，2018 年；Wilkes 和 Zhang，2016）。但是这些成就

也带来了巨大的环境影响（Lal，2018 年）。尽管农业、林业和其他土地利用（AFOLU）部门实现了温室气体净碳汇（图 4-20），但 1994 年至 2014 年，中国农业源温室气体排放量增长了约 37%（《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告》，2018 年；《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》，2004 年）。

图4-20：AFOLU（农业、林业和其他土地利用）部门温室气体排放量和清除量的历史构成

（资料来源：《中华人民共和国 2016 年第一次和 2018 年第二次气候变化两年更新报告》；《2004、2012 和 2018 年中华人民共和国气候变化初始、第二和第三次国家信息通报》）

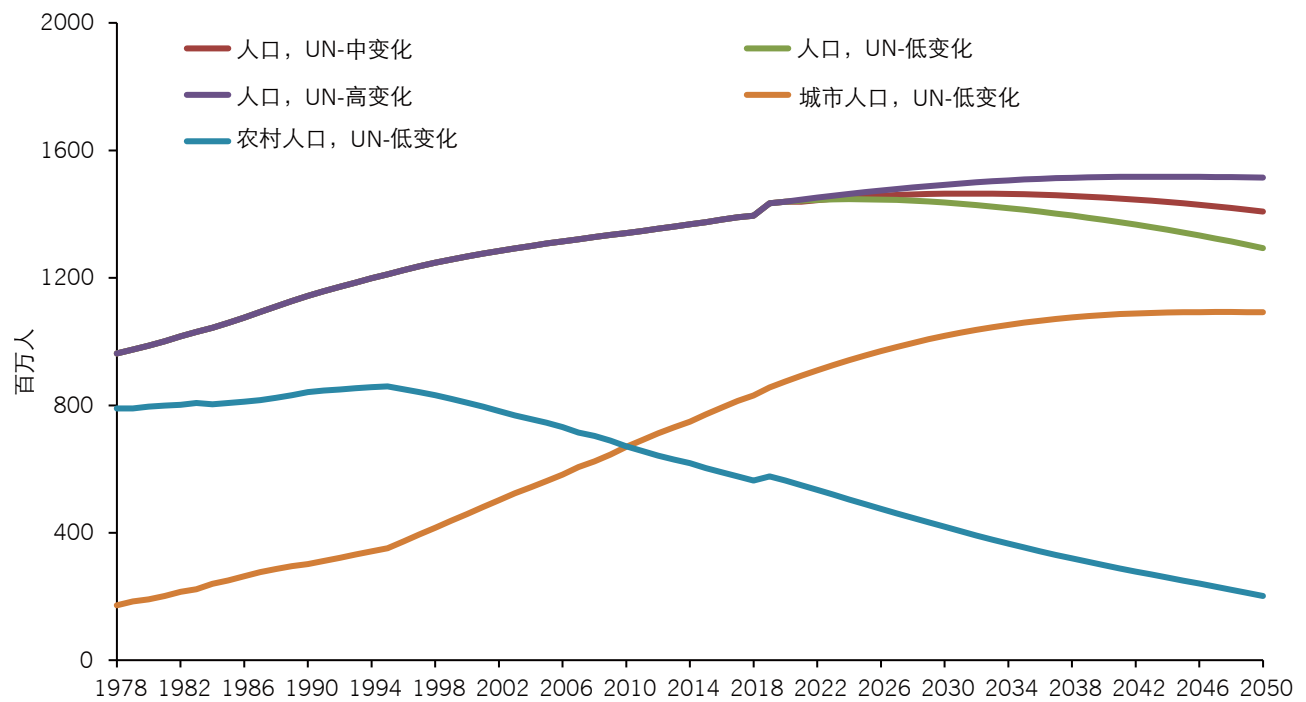


保障粮食安全始终是中国国家社会经济和农业战略的首要目标。1978 年至 2018 年，中国人口从 9.6 亿增长至 13.9 亿（国家统计局，2019 年）。农业发展对于保障中国长期粮食安全变得尤为重要。自 1978 年改革开放以来，农业部门持续快速发展。2015 年，中国全国粮食年产量实现“十二连增”，达 6.2 亿吨。

据联合国人口司预测，中国人口将于 2024 年稳定在 14.5 亿左右（图 4-21）。2016 年，中国人均粮食消费总量为 360 公斤（Xin，2018 年）。随着中国人均粮食需求量持续增长（2030 年左右达到峰值），粮食需求总量峰值也将出现在 2030 年左右。到 2030 年，中国粮食需求总量预计将达到 7.2 亿吨。

图4-21：不同情景下的中国人口预测

(来源：UN-DESA, 2018)



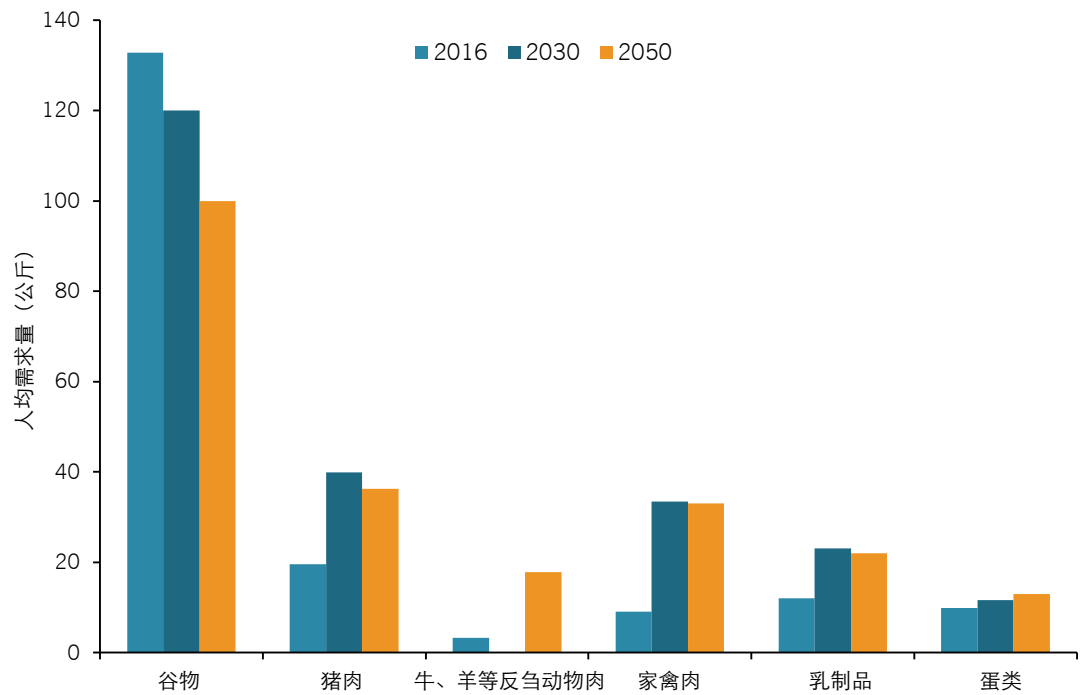
与此同时，中国老百姓的膳食结构也在持续改变。随着城镇化、家庭收入增长和生活质量的提高，高价食物，例如乳制品、牛肉、山羊和绵羊肉、水果和蔬菜，在中国膳食结构的比例将继续增加，而淀粉类主食的摄入继续减少（Hamshere 等，2014 年）。自 20 世纪 90 年代初以来，中国的反刍动物肉制品消费呈指数增长；自 21 世纪初以来，乳制品消费呈指数增长。目前，中国猪肉消费量约占全球 50%，鸡肉消费量占

全球 23%，但反刍动物肉制品和乳制品消费量仅占全球 14% 和 7%（Yu 等，2016 年；Xin，2018 年；Du 等，2018 年）。如果不采取措施改变膳食结构，到 2050 年，中国的人均粮食（不包括饲料粮）、猪肉、反刍动物肉制品、禽肉、乳制品和鸡蛋的需求量将分别达到 100 公斤、36 公斤、17.8 公斤、33 公斤、22 公斤和 13 公斤（图 4-22）。这将导致中国农业排放量增加，进而加剧中国的脱碳挑战。



图4-22：中国人均食品消费量预测

(来源：Xin, 2018 年；Du 等, 2018 年)



技术在中国农业发展变革中发挥了重要作用。2010 年至 2015 年，农业科技进步贡献率增至 56% (Xu 等, 2017 年)。目前 63% 的生产过程尚未应用任何耕种收割综合机械化耕作方法。

自 2010 年以来，中国出台了一系列支持农业可持续发展的国家战略。这些战略将减轻农业快速发展对环境的影响。2015 年，中国发布了《全国农业可持续发展规划（2015-2030 年）》，其中包含与化肥农药施用量零增长相关的两项行动方案，一项耕地质量保护行动方案。这些方案用来指导未来十年的农业可持续发展，包括资源（如土地、水、能源等）高效利用，农业废弃物（如粪便、农作物秸秆等）回收利用，碳捕集和减轻环境影响。这些战略将为减少 AFOLU 部门的碳排放创造机会。

中国拥有悠久且成功的植树造林史。一直以来，中国都在努力恢复天然林，并在全国大部分地区开展植树造林工程。为此，中国制定了一系列政策（包括年森林采伐限额、禁伐令等），并成功实施了多项关键工程，包括自 1978 年起实施的三北防护林工程，自 1999 年起实施的退耕还林还草工程，以及自 2000 年起实施的天然林资源保护工程。从 1973-1976 年开展首次全国森林资源评估（通常称为全国森林资源清查（NFI）到第 9 次全国森林资源清查（2014-2018），全国森林面积逐年递增，从 1.21 亿公顷增至 2.14 亿公顷 (Zeng 等, 2015 年；Xu 等, 2019 年)。同时，森林蓄积量从 87 亿立方米增至 163 亿立方米。

长期战略要素

专栏4-21 AFOLU：碳中和长期战略的关键要素

▶ 大幅降低农业源非 CO₂ 温室气体排放量，从而在 AFOLU 部门实现净碳汇以抵消排放量；

▶ 在农业部门应用技术减排方案（例如动物饲料补充剂、硝化抑制剂或厌氧消化池）和结构性减排方案（例如改进粪便管理，选用适当饲料，农牧业生产组合以及国际贸易转变）；

▶ 向更健康、更可持续且对环境影响较小的膳食结构转变；

▶ 通过持续造林和再造林，保持并增加中国森林碳汇。到 2050 年，将中国全国森林面积较 2015 年水平增加 3500 万公顷。

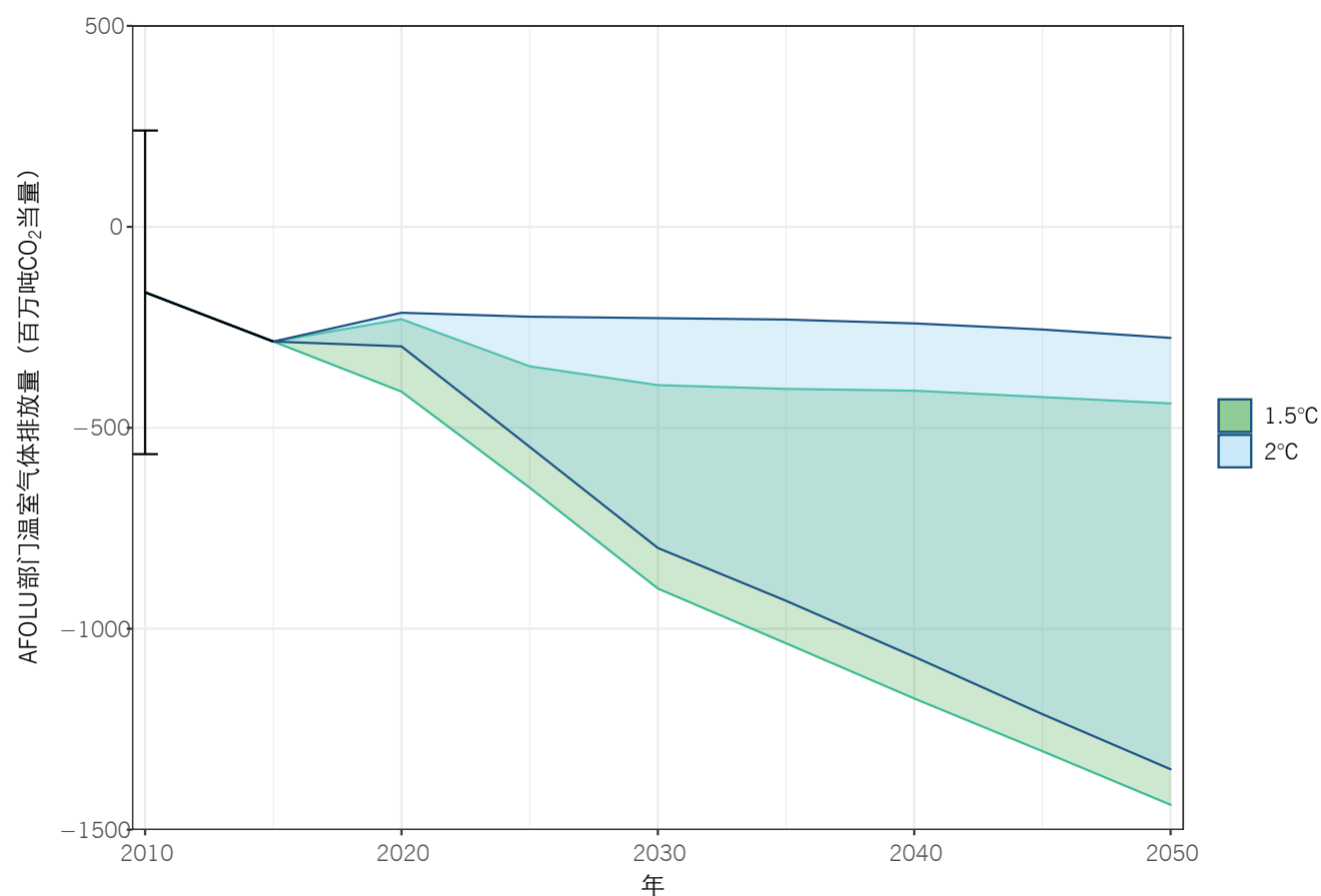
59 中国现代化的新征程：“十四五”到碳中和的新增长故事

需要大幅减少农业源非CO₂温室气体排放量，从而在AFOLU部门实现净碳汇以抵消排放量。长期预测表明，在当前条件下（即基准情景），农业排放量在2050年前将持续增长。例如，最新发布的一份报告称，农业源CO₂排放量将在2050年达到11亿吨，而2014年的排放量为8.3亿吨（He等，2020c）。为了将温升控制在1.5°C以内，中国必须遏制这一持续增长的趋势。在符合1.5°C（2°C）目标的路径下，农业排放量需要在2030年前达峰，2030年排放量达6.28

亿吨CO₂当量（2°C情景下为9.29亿吨CO₂当量），到2050年降至5.9亿吨CO₂当量（2°C情景下为8.72亿吨CO₂当量）（He等，2020c）。整个AFOLU部门应始终发挥其作为净碳汇的重要角色，以增强陆地生物圈和土壤中的碳储存潜力。在1.5°C目标路径下，到2050年，AFOLU部门的净碳汇将达10.20亿吨CO₂当量（2°C情景下为10.3亿吨CO₂当量）（图4-23）。

图4-23：1.5°C和2°C情景下AFOLU部门的温室气体排放总量预测

包括 GCAM-China、MESSAGEix-GLOBIOM、AGHG-INV 和 PECE V2.0 模型中的情景。黑色实线表示历史排放量和清除量。误差线表示中国向 UNFCCC（联合国气候变化框架公约）正式通报的温室气体排放清单中排放量和清除量的不确定性（来源：《中国2016年第一次和2018年第二次气候变化两年更新报告》）。预测中采用的固定协调系数始终保持不变，保证所有预测值与2014年温室气体清单估算协调一致。



在农业部门采用技术减排方案（例如动物饲料补充剂、硝化抑制剂或厌氧消化池）和结构性减排方案（例如改进粪便管理，选用适当饲料，农牧业生产组合以及国际贸易转变）。全球以及多模型评估表明，实施减排技术和结构性改革可以显著降低中国农业部门的排放量（图4-24）。到2050年，中国农业部门

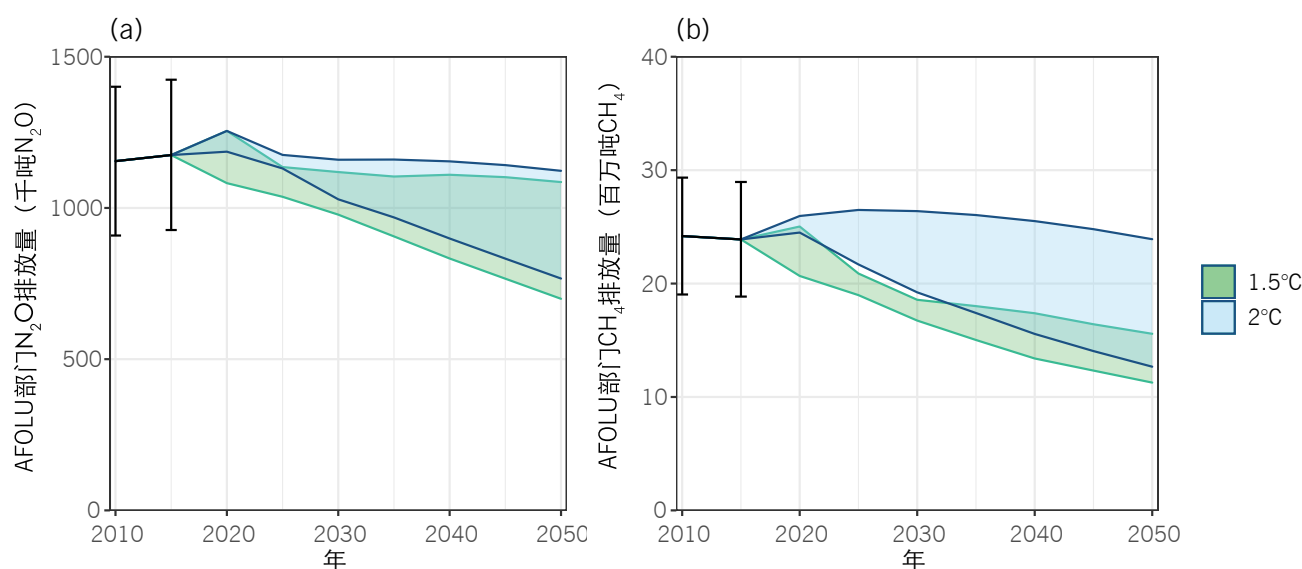
的经济减缓潜力预计为每年3.30至7.5亿吨CO₂当量。大部分减排量（占总减排量的30%-94%）是通过技术减排方案（例如动物饲料补充剂、硝化抑制剂或厌氧消化池）实现的（Frank等，2016年；Lin等，2019年）。结构性减排方案也可实现大规模减排（占总减排量的17%-49%），主要是通过管理体系、农牧

业生产组合以及国际贸易来实现。畜禽管理是农业部门中具有经济可行性的最大减排潜力来源，包括通过提高畜牧业生产力、选用适当饲料和粪便堆肥改进粪便管理和减少肠道发酵（Lin 等，2019 年）。然而，

与其他部门相比，中国为减少农业源非 CO₂ 温室气体排放量而制订的技术措施或直接战略仍然有限（Lin 等，2019 年）。

图4-24：1.5°C和2°C情景下AFOLU部门的N₂O和CH₄排放量预测

包括 GCAM-China, MESSAGEix-GLOBIOM 和 AGHG-INV 模型中的情景。黑色实线表示历史排放量。误差线表示中国向 UNFCCC（联合国气候变化框架公约）正式通报的温室气体排放清单中排放量的不确定性（来源：《中国 2016 年第一次和 2018 年第二次气候变化两年更新报告》）。预测中采用的固定协调系数始终保持不变，保证所有预测值与 2014 年温室气体清单估算协调一致。



向更健康、更可持续且对环境影响较小的膳食结构转变。根据国际评估，中国拥有通过改变膳食结构促进减排的巨大潜能。到 2050 年，可实现每年 1000 万至 6000 万吨 CO₂ 当量的减排量，因此向可持续膳食转变对于实现深度脱碳具有重大价值（Frank 等，2016 年）。

通过持续造林和再造林，保持并增加中国森林碳汇。中国 LULUCF 部门的碳汇作用一直在不断增长，在很大程度上归功于成功造林、严格的天然林保护措施、生态系统改进以及严格的生态建设措施。考虑到林地在中国 LULUCF 部门发挥的关键作用，保障和进一步增加森林碳汇是护航中国低碳转型的关键。例如，在 MESSAGEix-GLOBIOM 1.5°C (2°C) 情景下，到 2050 年，中国全国森林面积将较 2015 年水平增加 3400 万公顷（2700 万公顷）。造林和再造林不仅能产生更多的碳汇，还可以提供与许多其他生态系统服务相关的协同效益，例如生物多样性以及减少空气和水污染。但是，在规划这些大规模活动时，应正确评

估各部门之间的关联关系以及可能被林地替代的陆地活动。从本质上来讲，土地是一种有限的资源。扩大森林面积可能会替代农业生产活动用地，从而增加其他部门的温室气体排放量。

中国生物质能源的生产潜力是一个重要的不确定因素，其大小有待进一步评估。生物质能源的生产和利用，有助于降低能源部门的 CO₂ 排放量，同时保障和增加土地利用碳汇。截至目前，关于生物质能源潜力的预测仍然存在显著差异，预测结果主要取决于土地利用率和生物质给料组成的假设（例如 Bauer 等，2018 年；Jiang 等，2019 年；Qin 等，2018 年）。必须进一步评估国内所有可能给料（林业废弃物、木屑颗粒、木质纤维素能源作物、多年生植物、工业副产品、农业废弃物等）的潜力，制定有效政策利用这些给料，同时避免潜在负面影响。这一评估工作可促进科学与政策之间的讨论。

专栏4-22 AFOLU：支持长期转型的近期行动

- ▶ 推广循环农业，废弃物循环利用和提高资源利用效率，继续推进农业可持续发展；
- ▶ 鼓励农业部门采用新技术和创新，例如气候智能型农业和人工智能；
- ▶ 继续实施和强制执行可持续森林经营，保持并

增加森林碳汇；

- ▶ 实施能够产生协同效益的行动，积极考虑农业、水、污染、生物多样性、膳食和温室气体排放之间的联系。

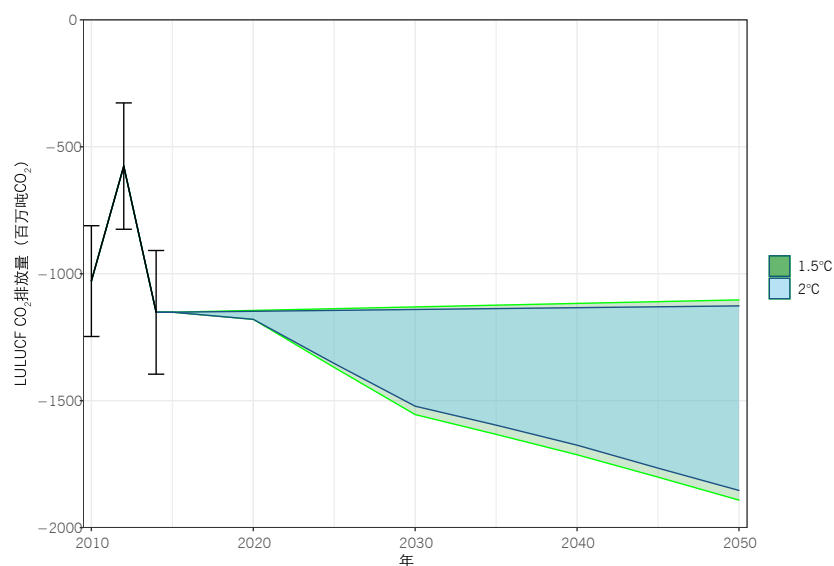
中国将通过推广循环农业，废弃物循环利用和提高资源利用效率，继续推进农业可持续发展。《全国农业可持续发展规划（2015-2030年）》明确表明，环境问题是未来几年中国农业发展必然面临的问题。《规划》制定了政策和行动框架，并设定了促进生态和循环农业发展、废弃物减少和回收利用、提高资源利用效率和减轻污染的目标。

有必要鼓励在农业部门应用新技术和创新，例如气候智能型农业和人工智能。技术和创新将在农业发展中发挥越来越重要的作用。但是，中国农业在优化整合最新科学和技术方面仍有进步空间。创新水平仍然相对较低。随着更先进技术的突破和普及，技术创新可以大幅提高中国农业的资源利用效率并减轻其环境影响。尤其需要注意的是，创新和新技术必须改善农作物-土壤-水-养分之间的平衡，同时农业部门还需要通过政策创新，鼓励在全国范围内推广农业新技术的应用。

短期战略的一项关键要素是继续实施和强制执行森林可持续经营，保持并增加森林碳汇。LULUCF部门目前是中国净碳汇，但碳中和目标的实现，需要更大规模的汇清除量，以抵消剩余的化石燃料排放和非生物成因排放。这些排放往往难以通过其他方式实现减排，或者减排成本过于高昂。但是，不同情景针对LULUCF碳汇发展趋势的预测存在高度不确定性。在本报告探索的1.5°C（2.0°C）情景中，到2050年，LULUCF碳汇的预测发展范围较大，包括稳定在现有水平或者较2015年水平增加5.6亿吨CO₂当量（5.2亿吨CO₂当量）（图4-25）。不确定的主要原因是不同模型框架包含的减排方案数量和类型存在差异。一般来说，模型中包含的减排方案集越大，所报告的为限制全球变暖需要的LULUCF碳汇就越高。造林和再造林工程可能在数十年后才能实现更多汇清除量，因此，制定转向更高碳汇的长期转型计划并立刻采取行动至关重要。

图4-25：1.5°C和2°C情景下LULUCF部门的净CO₂排放量

包括 GCAM-China, MESSAGEix-GLOBIOM 和 PECE V2.0 模型中的情景。黑色实线表示历史排放量。误差线表示中国向 UNFCCC（联合国气候变化框架公约）正式通报的温室气体清单数据中排放量的不确定性（来源：《中国2016年第一次和2018年第二次气候变化两年更新报告》；《中国2012年第二次国家信息通报》）。预测中采用的固定协调系数始终保持不变，保证所有预测值与2014年温室气体清单估算协调一致。



能够保障和增加 LULUCF 碳汇的最具潜力的减排措施包括：减少对环境影响的森林采伐、近自然森林经营、改进人工林、调整采伐强度、优化间伐。森林在保持 LULUCF 碳汇方面发挥着关键作用，森林经营对于 LULUCF 碳汇的未来发展至关重要。这意味着持续应用可持续、生态型、根据树种情况且因地制宜的经营方式仍然是保障森林碳汇的关键（Zhou 等，2013 年）。改进森林经营蕴含巨大减排潜力，且具有良好的成本效益，因此可以在不改变林权的前提下推广实施（Griscom 等，2017 年）。森林可持续经营以培育木材和 / 或提供多种生态系统服务的方式，在增加汇清除量的同时，提高气候变化适应能力（IPCC，2020 年）。

综上所述，政策制定者需要进一步实施、执行并激励各方从业者应用可持续的、生态友好型的森林经营实践。具体方法多种多样，包括制定法律要求应用因地制宜的森林经营实践，在发现非法活动时加强执法力度，开展从业者教育，实施森林认证体系以及收紧对生物质消费者的管制。如果能够结合当地的具体情况针对性地开展工作，可以产生改善空气质量和保

护生物多样性的协同效益。

寻找创新方法应对挑战是 AFOLU 部门减排政策的重点，例如如何激励数百万农民积极参与并引导其行为改变。中国有 2 亿至 3 亿个农民家庭，每个家庭耕地面积只有几公顷，农业系统严重依赖于高度甚至是过度投入（Cui 等，2018 年）。2010 年，约 70% 的中国农场面积不到 2 公顷。相比全球其他地区，平均而言，仅约 7% 的农场的耕地面积不到 2 公顷（Wu 等，2018 年）。在选择减排方案时，还需要考虑对产量和物资投入的影响，以及稳健的制度安排（Lin 等，2019 年）。

提高水分和养分效率的政策和技术，以及管制水体污染物的政策和技术也能够产生显著的减排协同效应。总而言之，**充分考虑农业、水、污染、生物多样性、膳食和温室气体排放之间的联系（例如：如何保障90%以上的主要粮食自给率）**，并在此基础上开展能够产生协同效应的行动，是 AFOLU 部门减排政策的重中之重。

专栏4-23 粮食安全、水、生物多样性和气候减缓

减少 AFOLU 部门的碳减排所产生的效益，远远超出气候减缓行动的效益。许多与土地相关的减缓方案，如养分管理和废弃物管理，能够产生气候适应的协同效应，进而增强农业韧性，保障粮食安全（Fujimori 等，2019 年）。改变膳食结构，向健康和可持续的方向转变，也有助于加强粮食安全。但是，

AFOLU 部门在设计减排政策时应保持谨慎，避免对产量造成严重的负面影响。造林和遏制乱砍滥伐可以减少荒漠化和土地退化，增强生态系统服务，但同时会加剧土地竞争，可能导致粮食危机以及粮食价格上涨（Kreidenweis 等，2016 年）。









5. 金融部门在长期战略中的作用

金融部门在中国低碳转型中发挥着至关重要的作用。金融部门近期应关注的重点是转型融资问题。具体而言，要明确哪些创新型金融工具和政策举措，可以促进市场转型并扩大清洁能源投资。此外，金融机构和政策制定者应当做好长期规划，避免发生高碳锁定和资产搁浅。当前的金融和监管体系，需要适应并纳入与气候变化相关的可能物理风险和转型风险。

同时，金融机构的风险收益状况可能发生重大变化。金融机构资产容易受到清洁能源政策、新技术以及气候变化物理风险的影响，从而使资产增长速度放缓和资产回报率降低。因此，不仅是金融机构及其被投资机构需要制定转型战略，形成多样化的投资组合（见本章第一部分），防范潜在风险（见本章第二部分）。政策制定者也需要采取积极行动，为低碳转型创造有利条件。

- ▶ 强化监管措施，为环境市场价格的确性提供保障，打击不可持续的实践行为，有效刺激银行业对绿色产品和绿色服务的需求；
- ▶ 调整财政政策，推动系统性变革，克服组织惰性；拓宽国家和地方财政的收入渠道，降低财税收入对碳的依赖程度；以碳中和为引领目标制订财政和预算激励措施，发挥政府采购和公共支出的作用，推动低碳转型；
- ▶ 丰富金融工具，利用多种金融工具实现长期转型，包括既有金融产品和工具（例如债券、赠款和贷款）以及创新金融工具（例如绿色债券和绿色银行）；
- ▶ 改革金融体系，提高市场透明度，强化信息披露，合理评估金融体系风险，利用金融科技为私营部门投资气候金融创造机遇，实现长期转型；
- ▶ 有效动员养老基金、保险公司、主权财富基金和共同基金（即互助基金）等机构投资者，大量投资低碳部门以成功实现低碳转型；
- ▶ 通过公私合营方式成功撬动私营资本，与有限的公共资本形成合力，促进低成本市场的发展，创造就业机会，加速经济增长。

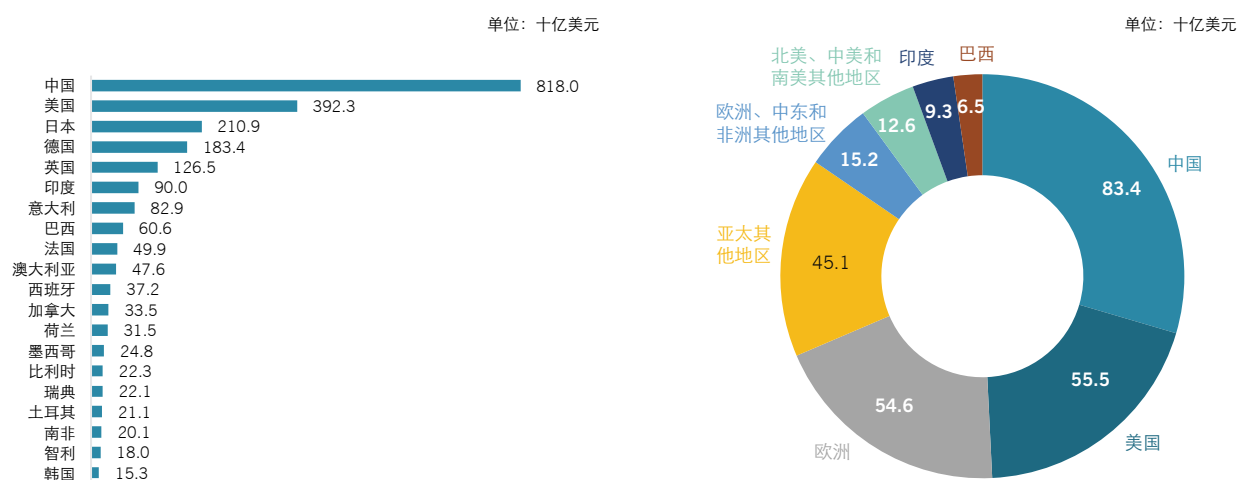
5.1 为长期低碳转型提供融资

中国正在引领全球清洁能源投资加速增长。2010年至2019年期间，全球可再生能源投资近2.7万亿美元（大型水电站除外），是前几十年投资总额的三

到四倍（UNEP和BNEF，2020年），中国贡献比例高达30%。自2013年以来，中国一直是全球可再生能源装机的最大投资国（图5-1）。

图5-1：2010年到2019年可再生能源累计投资排名前20位国家（左图）和2019年可再生能源投资（右图）

投资估算不包括大型水电项目。数据单位是十亿美元（2019年不变价）。2019年的投资估算包括未披露交易的项目。中国的可再生能源投资从2017年的1430亿美元下降到了2019年的834亿美元。（来源：UNEP和BNEF，2020年）



中国清洁能源投资为低碳转型奠定了坚实基础。在全球化石能源投资远远高于可再生能源和能效投资的大背景下，中国清洁能源投资已超过化石能源投资。2016年，中国在可再生能源和能效领域的投资额为1670亿美元，占中国能源投资总量的55%（其中化石能源投资比例为34%），相比之下，全球清洁能源投资仅占全球能源投资总量的33%（其中化石能源投

资比例为50%）（IEA，2018年）。

然而，进一步扩大清洁能源投资规模，实现低碳转型与新增长路径协调一致，将在短期和长期带来重大的金融机遇和挑战。McCollum等人（2018年）估计，为实现《巴黎协定》当前达成的国家气候承诺，未来十年全球需要在能效和清洁能源领域每年额外增

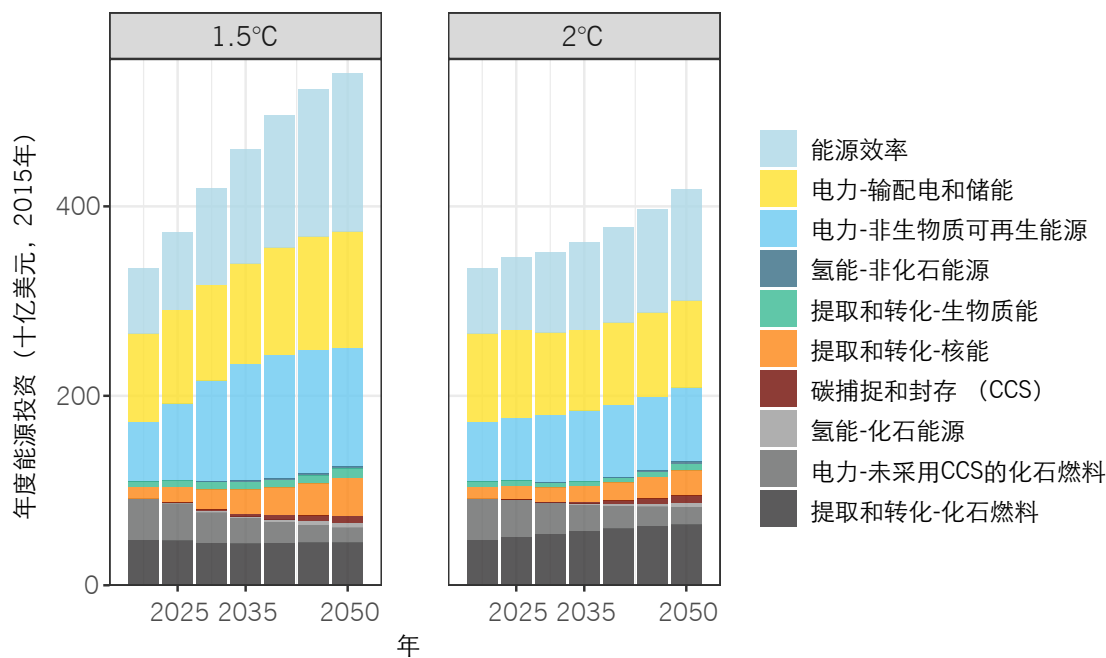
加 1300 亿美元的投资；如实现 1.5℃温控目标，则需增加 4600 亿美元。如此可观的投资数量将催生大量投资机遇。

中国也同样需要加速扩大能源基础设施的投资规模，不断改进能源投资结构。Zhou 等人（2019 年）预计，在现有国家政策和 NDC 情景下，中国每年能源投资规模为 3400 亿美元。如要实现 1.5℃温控目标，该投资额将增加到 5400 亿美元（2℃温控目标情景下，投资额为 4200 亿美元）。同时，为了实现 1.5℃ / 2℃温控目标，必须大幅提高低碳能源投资在能源总

投资中的比例。以中国 2015 年低碳能源投资额（1600 亿美元）为基准线，若要实现 2℃温控目标，到 2035 年中国低碳能源投资需增长 40%，达到 2200 亿美元；若实现 1.5℃温控目标，投资额需增长 110%，达到 3300 亿美元；到 2050 年，上述两个投资金额将分别达到 2800 亿美元（2℃温控目标）和 4200 亿美元（1.5℃温控目标）（图 5-2）。加速电气化和低碳转型，要增加向可再生能源发电、CCUS、输配电网和大规模储能等电力系统的投资。同时，也要加大在能源效率方面的投资，推广建筑节能和工业能效提升等低成本的减排方式（详见专栏 5-2）。

图5-2: 1.5℃和2℃情景下中国年度能源投资结构

（来源：Zhou 等，2019）



专栏5-2 中国低碳转型中不同部门的投资需求

电力

- ▶ 加大对可再生能源发电的投资；
- ▶ 加大对储能技术的投资；
- ▶ 大力建设现代化的电网基础设施和输电系统；
- ▶ 设立专项资金以支持煤炭淘汰和公平转型；
- ▶ 加大对其他清洁能源技术的投资（如大型水电站、CCUS、核能）。

非电转换

- ▶ 加大对氢能研发、应用及清洁氢能供应和基础设施的投资；
- ▶ 增加对先进生物燃料的投资。

建筑

- ▶ 加大建筑能效投资；
- ▶ 加速智能技术和可再生能源一体化领域的投资。

工业

- ▶ 加强对工业能效领域的投资；
- ▶ 升级工业技术及设施（例如氢能、CCUS）；
- ▶ 促进制造业创新发展和组织管理模式革新，建设现代化的工业部门。

交通运输

- ▶ 增加对电动汽车和其他新型交通技术的投资；
- ▶ 投资交通基础设施，创新基础设施建设模式，促进电动汽车和智能技术一体化发展。

中国碳中和综合报告 2020 68

当前的投资决策将直接影响今后的改革路径和转型成本。未来五年是转型升级的重要窗口期，当前的政策和投资决策将对未来几十年的发展轨迹产生影响。有必要大幅度提升对清洁能源基础设施的投资，以支持中国全面发展和经济转型。

目前，清洁能源投资面临诸多障碍，包括对于消费者而言高额的前期投入，对于投资者而言可感知的实际投资风险，对于项目商业情况而言不切实际的融资条件，以及体制性障碍和政策障碍，消费者和投资者之间信息不对称，传统的政府补贴计划不足以推动市场实际增长等问题。

为有效解决上述障碍，需要不断改进政策措施和金融手段，特别是针对服务水平尚不成熟的部分细分市场，比如建筑节能市场和新型能源技术市场（例如 CCUS、氢能）。本报告提出以下几点建议，希望对中国消除上述障碍，把握机遇，扩大投资规模并最终实现低碳转型有所帮助：

强化监管措施，为环境市场价格的确定性提供保障，打击不可持续的实践行为，有效刺激银行业对绿色产品和绿色服务的需求。长期政策目标若能一以贯之，可以有效降低清洁能源技术推广应用的风险，同时撬动更多的民间资本投资清洁能源。本报告第四章讨论的短期和长期能源政策若能得以有效实施，有助于推动清洁能源投资的增长。

调整财政政策，为低碳发展提供可持续性的财政

保障。财政政策的系统性变革需要下述具体行动：拓宽国家和地方各级政府的收入渠道，降低财税收入与碳之间的依赖程度；以碳中和为引领目标，制定财政和预算激励措施；发挥政府采购和公共支出的作用，推动市场向低碳转型（OECD 等，2018 年）。财政资金作为重要的市场信号，对于引导资金向清洁能源技术市场投入具有重要的作用，特别是对于处于初级发展阶段、具有较好减排潜力但风险较高的新技术（例如 CCUS 和 氢能）（Mazzucato 和 Semieniuk，2018 年）。

鼓励和引导私营部门资本参与低碳转型。金融和能源政策制定者要创造有利条件，创新政策体系，特别是改革金融系统，来鼓励和引导私营部门参与清洁能源基础设施的融资和开发。增强市场透明度，加强绩效、风险、成本和投资机会等方面的信息披露，能极大提升清洁能源资产的地位，同时撬动私营部门投资。例如，尽管具体落地实施还需要一段时间，但中国证券监督管理委员会（CSRC）已于 2020 年发布了针对所有上市公司的强制性环境、社会和公司治理（ESG）信息披露时间表。此外，强化风险意识、拉长投资期限，有利于合理地预估金融系统风险，从而帮助投资者在低碳转型中抓住机遇、应对风险（有关风险的讨论，参见本章第二节）。数字化也为调动私营部门投资气候金融带来了新机遇（参见专栏 5-3）。中国政府积极参与气候相关财务信息披露工作组（TCFD）和绿色金融体系网络（Network for Greening the Financial System）等国际合作，促进金融体系改革与国内外长期转型目标协同共进。

专栏5-3 数字化与绿色金融：金融科技促进低碳发展

金融科技可为私营部门投资清洁能源项目提供便利，助力绿色金融在中国的规模化发展。首先，金融科技促进投资协议的标准化和精细管理，降低交易成本，便于评估项目和追踪进展。第二，提高数据信息的可用性、透明度和可靠性，便于深入分析和合理管控投资风险。第三，金融科技能够实现资金分散，使大量投资者直接投资于低碳项目。

中国人民银行开发了绿色金融信息管理系统

资料来源：OECD 等，2018 年；保尔森基金会，2020 年。

（GFIMS），收集并分析跨区域的绿色资金流动，为未来绿色金融发展的标准化及战略决策奠定基础。GFIMS 是绿色贷款数据信息管理平台，采用大数据、人工智能、云计算和其他技术，存储绿色贷款的数据、统计分析、法律法规、政策实施计划等信息。中国人民银行目前已经在湖州开展试点项目。从长远来看，该系统将在国家绿色金融体系建设方面发挥积极作用，帮助金融监管机构实时监管绿色金融信息，并为宏观政策制定提供数据支持。

中国要实现低碳转型，需要广泛动员投资者，特别是养老基金、保险公司、主权财富基金和共同基金

等机构投资者（EaP Green，2017 年）。尽管投资者对清洁能源投资的态度正在快速转变，但由于意识或

能力欠缺，一些机构投资者尚未对此产生浓厚兴趣。监管机构需要继续加强宣传教育，激励相关投资者和其他利益相关方开发 ESG 产品、披露 ESG 信息（Ma 等，2020 年）。

利用现有金融产品，开发创新金融工具，助力中国低碳转型融资。在现有融资机制，如债券、赠款和贷款中纳入环境价值因素，可以成为基础设施领域行之有效的融资方法。中国于 2016 年启动了绿色债券

市场，发行了涉及空气污染防治、交通运输和可再生能源领域的 184 种、价值 740 亿美元的绿色债券。目前，绿色债券仅占中国债券总发行量的 2%，未来提升潜力巨大。预计这一数值增长到 20% 时，才能满足市场对清洁能源投资的需求。为确保绿色债券稳步增长，需要进一步采取行动降低风险和不确定性，例如统一债券分类标准，完善信息披露制度，加大机构投资者参与力度，纳入绿色建筑等欠发达市场等（Ma 等，2020 年）。

专栏5-4 绿色投资银行：新型公私合营伙伴关系，为气候融资提供解决方案

绿色投资银行，也称为清洁能源金融公司或清洁能源金融机构，是官方或半官方性质的，借助民间资本促进低碳转型投资和清洁能源市场增长的金融机构。一般来说，绿色银行有权通过市场干预手段来降低风险、促成交易，从而在公共资金的基础上撬动私营部门投资。例如，美国绿色银行的平均杠杆率为 1: 8（即 1 美元的公共资金可以撬动 8 美元的民间资本投资绿色项目），最高杠杆率可达 1: 20。

目前，全球有超过 16 家从国家级到市级的绿色银行。绿色银行有多种融资渠道，包括政府拨款的专项资金（比如现有财政专项资金的再利用）、公用事业基金（纳税人资金、附加费等）、碳税和排放权交易收入以及债券收益等。绿色银行一旦投入

运营，便可开展多种项目活动：获得信贷支持、共同出资和证券化等融资技术；提供贷款、租赁和信用融资等融资产品；开展技术援助、一站式产品设计和交付以及信息获取等市场开发项目；进行数据的收集、分析和发布。

2019 年，美国国会提出一项建立美国国家绿色银行（USGB）的法案，旨在为气候解决方案提供大规模融资，并为欠发达市场引入清洁能源投资。如果该法案得以通过，USGB 将在各州和地方的绿色银行部署高达 350 亿美元资本，并有望为气候行动筹集 1 万亿美元资金。为加速低碳转型，该法案将为受到淘汰化石燃料影响的社区提供直接投资，并为清洁能源项目提供资金支持。

资料来源：Frech 等，2020 年。



此外，还需要发展创新型融资机制以加速清洁能源投资。例如，绿色投资银行或清洁能源金融机构在低碳转型的融资越来越受到全球范围的广泛关注。绿色投资银行是官方或半官方性质的金融机构，它与私营部门合作开发融资产品和市场工具，鼓励和加快清

洁能源技术、能效提升技术以及其他低碳且具有气候韧性的基础设施的推广和建设。绿色投资银行是一种有效的公私合营伙伴关系，有助于解决市场壁垒，促进低成本市场增长，增加就业机会，促进经济发展和公共资本的长足发展（参见专栏 5-4）。

5.2 金融部门的气候和转型风险

金融行业将会越来越多地受到气候变化物理风险的影响。极端天气发生频率越来越高，长期气温变化和海平面持续上升等因素，造成资产减值，保险理赔增加，使银行业和保险业面临持续且严峻的风险。2017 年，全球自然灾害造成的损失约为 3400 亿美元，保险公司的理赔额破纪录地达到 1380 亿美元（Munich RE，2018 年）。2019 年保险理赔额为 520 亿美元（Munich RE，2020 年）。为了维持金融稳定，金融行业必须重视气候变化带来的风险。

低碳转型虽然可以减轻气候变化引起的物理风险，如果不加预防和合理管控，也会给金融行业造成风险。中国要实现低碳转型，必须将气候减缓和适应并重，进行全方位的政策、监管、技术和市场改革。改革可能给银行、保险公司和资产所有者带来不同程度的市场风险和声誉风险。转型的风险也会因不同行业、不

同资产类型、不同地理区域和时间段而有所区别。中国在境内（和中国的海外投资中）大规模削减煤炭而引起的大范围资产搁浅和公司贬值，会给金融系统带来挑战，而且这种不利影响在某些地区会额外明显。

绿色经济转型也为中国金融部门创造机遇（参见图5-3）。大量证据表明，企业通过提高生产销售效率可以有效降低运营成本。对新能源和技术（例如风能、太阳能、CCUS 和储能）的投资，将为金融部门创造新的机遇。金融机构应当主动在新市场或新开发的资产类型中寻找机遇，促进投资组合多样化，为低碳转型做准备。比如，高盛（Goldman Sachs）和摩根大通（JPMorgan Chase）近期已宣布，将减少对化石燃料基础设施的融资。其他新的机遇还包括承销绿色债券和基础设施（例如低碳能源生产、电网联通和交通运输网络）融资等。

图5-3：与气候相关的风险、机遇和金融影响

（来源：TCFD，2017）

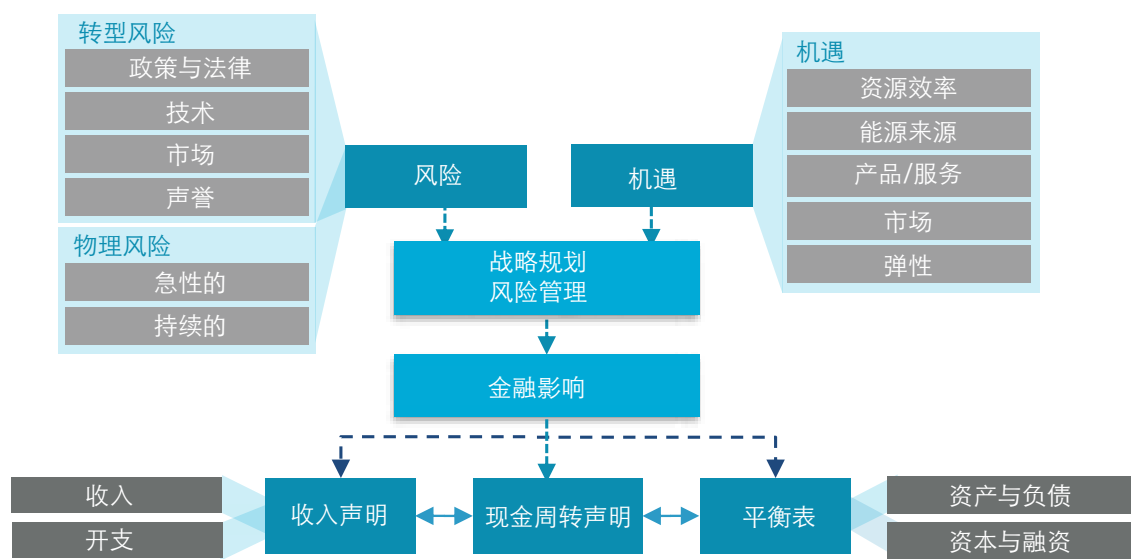
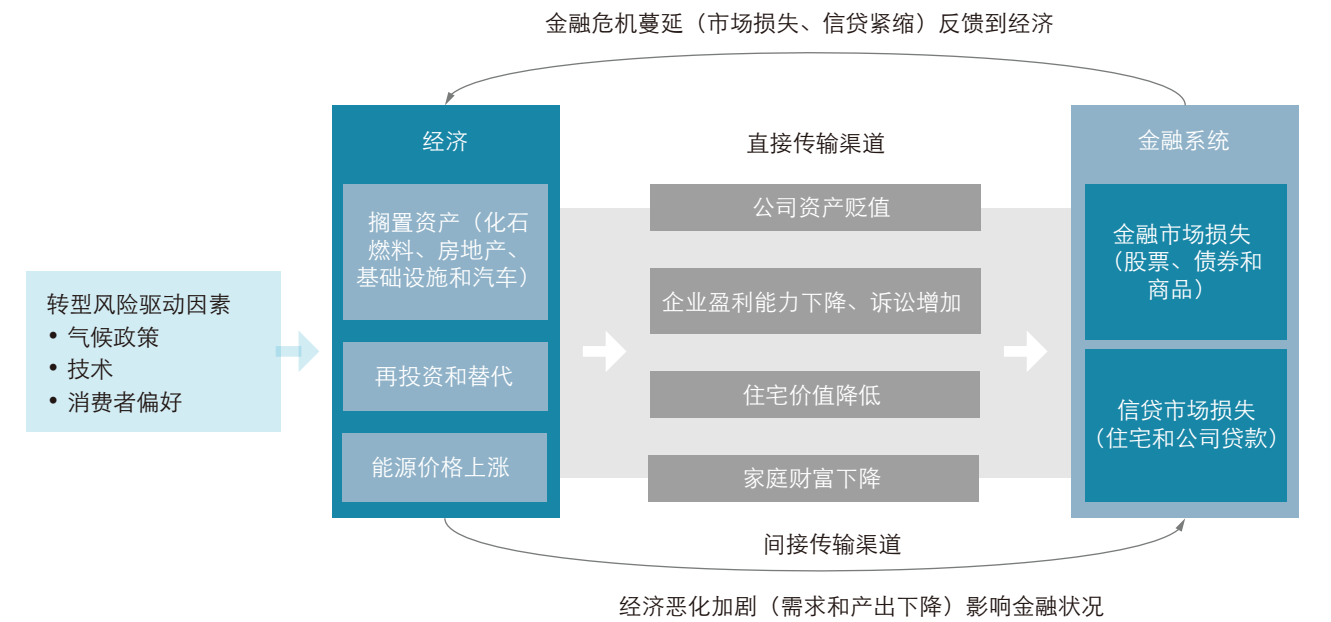


图5-4：转型风险压力测试

(来源：NGFS, 2020)



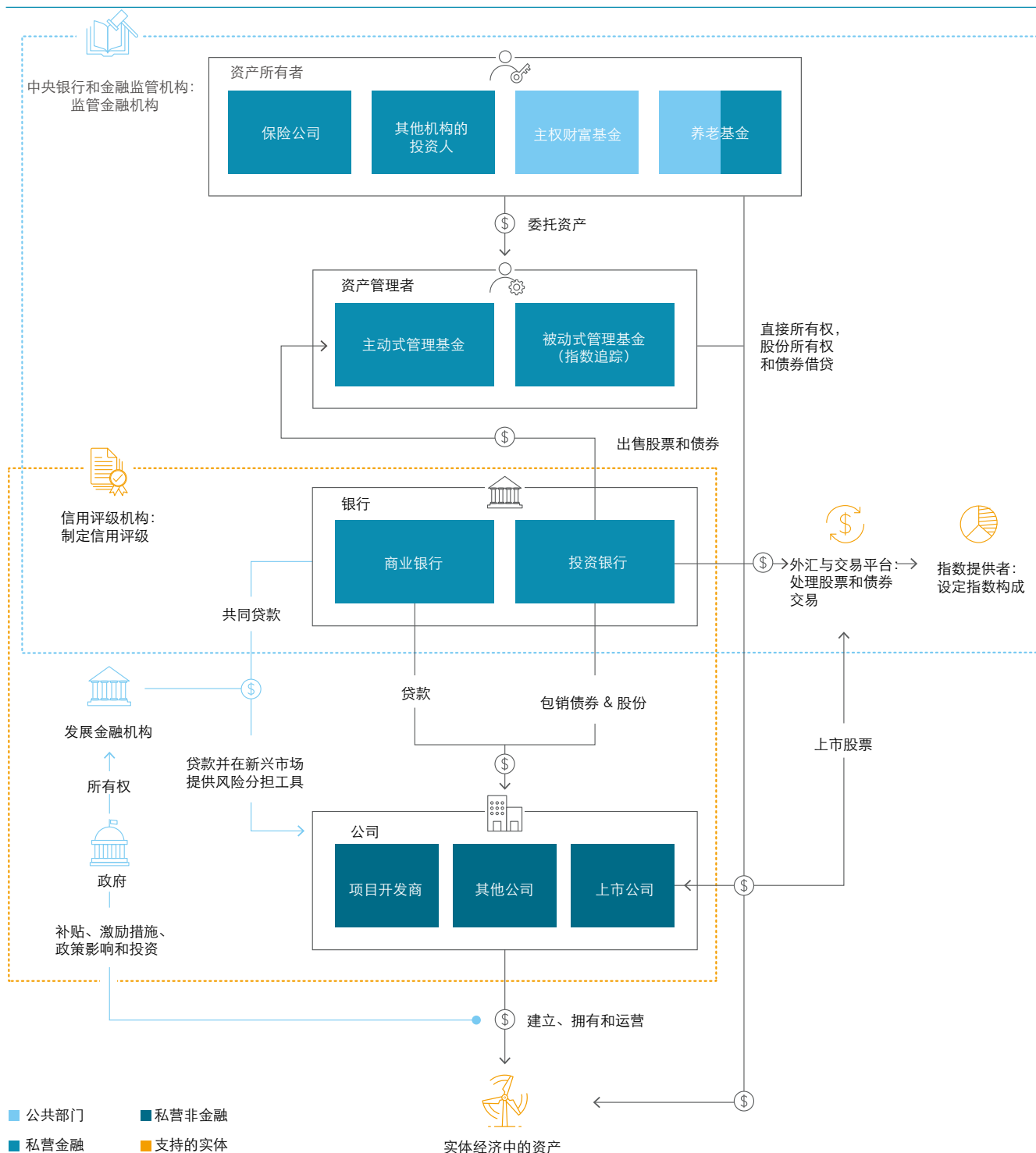
金融机构有必要采取行动，促进低碳转型，应对物理风险和转型风险。为了把控潜在的物理风险和转型风险，金融机构首先要对正在遭受这些风险影响的投资组合进行评估，并探索减轻和分散风险的方法；

其次，要分析资产可能遭受的财务风险，评估提升风险抵御能力的各种方案；最后，将物理风险和转型风险因素纳入财务模型，量化收益、投资选择和退出机制。



图5-5：不同金融机构在风险管理中的作用

(来源：CFI, 2019)



中国人民银行和其他金融监管机构正在考量气候相关的金融风险，制定政策以及采取行动来实现高质量增长目标。中国已经在国际金融市场规则制定方面取得良好开端，并且正在发挥更大的领导作用。中国人民银行高度重视气候相关风险及其与宏观经济稳定

性的关联作用。央行副行长陈雨露曾多次强调，气候变化将对金融稳定构成潜在风险。他指出，央行正在将气候风险纳入宏观审慎评估（MPA），并研究为应对转型风险宏观经济与金融行业的相互作用。2020年初，中国银行保险监督管理委员会发布《关于推动

银行业和保险业高质量发展的指导意见》，呼吁中国银行业和其他金融机构设立绿色金融部门，发展绿色信贷，管控潜在的环境社会风险，以建立完善环境和社会风险管理体系，提高机构能力水平。上述举措的主要目的在于确保银行保险业的高质量发展，以应对新冠肺炎造成的国内经济下滑。不过值得关注的是，环境和气候风险因素已成为银行授信的优先考虑事项之一。

2020年5月，中国人民银行、国家发改委和证监会共同发布了指导文件草案，首次将“清洁煤”和其他化石能源项目排除在绿色债券投资范围之外。被除名的项目包括燃煤电厂超低排放改造、煤炭清洁生产利用、灵活调峰燃煤发电厂运营改造、非常规油气勘探开发设施、煤层气开发利用等。这一重大政策突破，标志着中国控煤的又一里程碑。

中英气候与环境风险披露试点项目，在金融机构风险评估方面取得重大进展，试点项目不断扩大，试点机构不断增加。到目前为止，中英试点项目已经取

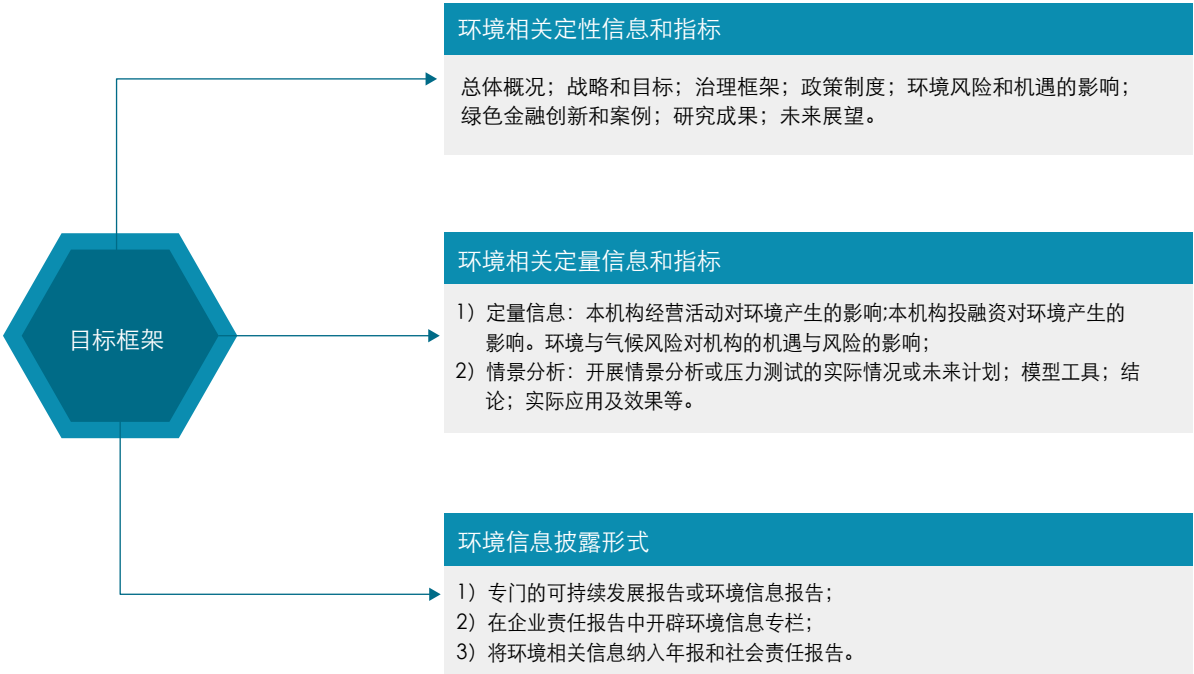
得突破性进展。一是试点范围扩大到所有金融领域。试点机构的数量从10家增加到13家，覆盖了包括银行、资产管理和保险在内的所有金融部门。英国政府在绿色金融战略中宣布，要求所有英国上市公司和大型资产管理公司在2022年之前按TCFD建议框架进行披露。

二是中英两国试点机构根据TCFD的建议，以及根据中国实际情况制定的《气候与环境信息披露框架》，对气候和环境信息进行了披露。2019年是《环境信息披露行动方案》的第一阶段，大多数中国参与机构以独立报告方式披露了环境信息。

三是试点工作影响力逐步扩大。湖州绿色金融改革创新试验区参照中英环境信息披露框架，进行环境信息整体披露；根据中国人民银行要求，中国工商银行、兴业银行、广碳所等金融机构组成标准制定小组，在中英试点项目实践及成果基础上，编制《金融机构环境信息披露指南》并积极参与国际标准的制定与讨论。

图5-6：中英金融机构气候与环境信息披露试点

(来源：中英金融机构气候与环境信息披露试点 2019 年度进展报告，2019)







6. 总结

中国已经做好充分准备，进一步加快新的增长路径，实现向清洁、充满活力的普惠经济过渡。此外，中国也将提供解决方案，为应对全球气候变化做出重大贡献并发挥全球领导作用。中国碳中和目标为新增长路径指明了方向，而中国现有的生态文明愿景及其广泛的发展目标，也将共同指导碳中和目标的实现。中国经济中的每个行业均需要基于低碳发展的长期战略安排近期的减排行动，以便推动中国向绿色低碳的发展模式转型。本报告的研究和分析表明，当前，中国已经开始向新增长路径迈进并且取得了显著进展。未来，中国向碳中和转型之路可以为建设现代化国家并全面实现社会经济目标提供坚实的基础。

尽管如此，中国实现碳中和目标仍然面临诸多挑战，需要通过重大规划、分析论证和政策措施来设定转型方向，并需要构建新的经济增长模式以实现这一愿景。在这一背景下，中国当前采取的行动对于成功实施低碳转型战略尤为重要，各经济部门均具有加速转型的机会与潜力。

尽管整个经济活动的总体范围和下一步行动是相对明确的，但仍需要进行额外的讨论和分析，以加深我们对长期路径和近期行动的理解，并制定能够平衡各种需求的政策方法。总体而言，未来需要进一步研究的关键问题包括：

► 新增长路径的共同愿景

如果全国上下和各经济部门都能充分认识到中国新增长路径所带来的收益，那么中国的新增长路径将更为成功。

► 工业转型

中国新增长路径中工业的转型和减排工作，将在工业现代化、中国整体经济战略，以及中国在国际市场上不断提升的角色定位等大背景下进行。

► 逐步在全经济范围淘汰煤炭使用

可抓住新的机会结构性淘汰燃煤电厂；同时推进其他部门的去煤化以实现全经济范围的煤炭淘汰，比如在工业等其他行业淘汰用煤、解决整个煤炭供应链的公平转型问题等。

► 可持续金融

在全国范围内调动新的资金来源对于绿色增长至关重要，具体取决于能源

投资政策、财政和货币政策以及金融政策的制定。

► 技术和技术转型

成功的技术研发和推广是减缓气候变化的核心；许多技术已经在改变排放和经济格局，而其他技术则即将出现并具有广阔的应用前景。

► 非CO₂温室气体

中国非 CO₂ 温室气体（包括甲烷、氧化亚氮、氢氟碳化物和六氟化硫等）的减排工作有待工业和能源等相关领域进一步关注。

► 省级战略和行动

上述各角度的综合分析，有助于理解各省在经济转型中的机会、战略和行动。随着中国继续制定向绿色经济转型的政策，帮助各省（区、市）更好理解实施国家碳中和总体战略的关键环节及低碳转型的效益，将成为实施国家碳中和总体战略的关键环节。

中国向碳中和迈进的方向清晰，然而道阻且长。构建基于新增长路径的高质量发展战略，不仅有助于实现总体经济目标以及健康、清洁空气和普惠繁荣的目标，还将推动经济向实现中国碳中和目标进行低碳转型。这条新增长之路将造福中国本身，并将展示中国对全球气候治理的引领作用。



7. 参考文献

1. Aggarwal, S., & Orvis, R. (2016). Grid Flexibility: Methods for Modernizing the Power Grid. <https://energyinnovation.org/wp-content/uploads/2016/05/Grid-Flexibility-report.pdf>
2. Bauer, N., Rose, S. K., Fujimori, S. et al. (2018). Global Energy Sector Emission Reductions and Bioenergy Use: Overview of the Bioenergy Demand Phase of the EMF-33 Model Comparison. *Climatic Change*, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2226-y>
3. Bodnar, P., Gray, M., Grbusic, T. et al. (2020). How to Retire Early: Making Accelerated Coal Phaseout Feasible and Just. Rocky Mountain Institute. <https://rmi.org/insight/how-to-retire-early>
4. Bowen, A., Kuralbayeva, K., Tipoe, E.L. (2018). Characterising Green Employment: The Impacts of ‘Greening’ on Workforce Composition. *Energy Economics* 72, 263–275. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.03.015>
5. BP. (2019). Statistical Review of World Energy 2019. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>
6. BP. (2020). Statistical Review of World Energy 2020. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>
7. Bridle, R., Kitson, L., Duan, H., Sanchez, L., & Merrill, T. (2017). At the Crossroads: Balancing the Financial and Social Costs of Coal Transition IJin China. International Institute for Sustainable Development. Global Subsidies Initiative. <https://www.iisd.org/system/files/publications/crossroads-balancing-financial-social-costs-coal-transition-china.pdf>
8. Caldecott, B., Sartor, O., Spencer, T. (2017). Lessons from Previous ‘Coal Transitions’ High-level Summary for Decision-makers. IDDRI and Climate Strategies. https://www.iddri.org/sites/default/files/import/publications/coal_synthesisreport_v04.pdf
9. 中国电力企业联合会（中电联）. (2016). 中国电力行业年度发展报告 2016.
10. 中电联. (2017). 中国电力行业年度发展报告 2017.
11. 中电联. (2018). 中国电力行业年度发展报告 2018.
12. 中电联. (2019). 中国电力行业年度发展报告 2019.
13. 中电联. (2020). 中国电力行业年度发展报告 2020.
14. Chen, Y., Shen, H., Smith, K. R. et al. (2018a). Estimating Household Air Pollution Exposures and Health Impacts from Space Heating in Rural China. *Environment International*, 119, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.054>
15. 陈荫三, 肖润谋, 闫晟煜, 李彬等. (2018b). 2017 中国高速公路运输量统计调查分析报告. 人民交通出版社.
16. Cheng, J., Tong, D., Zhang, Q. et al. (2020). Pathways of China's PM2.5 air quality 2015-2050, submitted to National Science Review.
17. 中国交通科学研究院 (CATS). (2020). 中国交通运输业低碳排放发展战略与路径研究. 内部报告: 未发布.
18. 中国煤控项目课题组. (2019). “中国煤控项目“十三五”中期评估与后期展望研究报告. <http://coalcap.nrdc.cn/datum/info?id=86&type=1>
19. 中国能效经济委员会 (CCEEE). (2019). 中国能源效率 2018.
20. 电力规划设计总院 (EPPEI). (2019). 中国电力发展报告 2019.
21. 招商证券. (2020). 新基建带动上游金属制品需求. <https://finance.sina.com.cn/roll/2020-07-03/doc-iircuyvk1855033.shtml>

22. Climate Finance Leadership Initiative (CFLI). (2019). Financing the Low-Carbon Future: A Private-Sector View on Mobilizing Climate Finance. <https://greenfinanceplatform.org/research/financing-low-carbon-future-private-sector-view-mobilizing-climate-finance>
23. 中国共产党中央委员会 . (2020). 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议 . http://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content_5556991.htm
24. Cui, R., N. Hultman, K. Jiang, H. et al. (2020). A High Ambition Coal Phaseout in China: Feasible Strategies through a Comprehensive Plant-by-Plant Assessment. Center for Global Sustainability: College Park, Maryland. 37 pp.
25. Cui, Z., Zhang, H., Chen, X. et al. (2018). Pursuing Sustainable Productivity with Millions of Smallholder Farmers. *Nature*, 555(7696), 363–366. <https://doi.org/10.1038/nature25785>
26. Dellink, R., Chateau, J., Lanzi, E., & Magné, B. (2017). Long-term Economic Growth Projections in the Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change*, 42, 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.06.004>
27. Du, Y., Ge, Y., Ren, Y. et al. (2018). A Global Strategy to Mitigate the Environmental Impact of China's Ruminant Consumption Boom. *Nature Communications*, 9. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06381-0>
28. EaP Green. (2017). Unlocking Private Finance for Energy Efficiency and Greener, Low-carbon Growth. OECD Publishing. <https://www.oecd.org/environment/outreach/Discussion%20Paper%20Brussels%2029-30%20June%20Final.pdf>
29. 能源研究所 (ERI). (2020). 工业部门转型升级及低碳排放发展的策略和方法研究 .
30. Fei, T. (2018). Coal transition in China. Options to Move From Coal Cap to Managed Decline under an Early Emissions Peaking Scenario. IDDRI and Climate Strategies. https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Rapport/20180609_ReportCOAL_China_0.pdf
31. Frank, S., Havlík, P., Stehfest, E. et al. (2018). Agricultural Non-CO₂ Emission Reduction Potential in the Context of the 1.5 °C Target. *Nature Climate Change*, 9(1), 66–72. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0358-8>
32. Frech, J., Lou, J., Yu, S. et al. (2020). Public-Private Partnership and Clean Energy Finance: the Green Bank Model. Center for Global Sustainability, University of Maryland, College Park, MD. 51pp.
33. Friedlingstein et al. (2020). The Global Carbon Budget 2020. Available at: Earth System Science Data.
34. FTSE Russell. (2018). Investing in the Global Green Economy: Busting Common Myths. https://content.ftserussell.com/sites/default/files/research/fr_investing_in_the_global_green_economy.pdf
35. Fujimori, S., Hasegawa, T., Krey, V. et al. (2019). A Multi-Model Assessment of Food Security Implications of Climate Change Mitigation. *Nature Sustainability*, 2(5), 386–396. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0286-2>
36. Gales, B., Hölsgens, R. (2017). Coal Transition in the Netherlands. IDDRI and Climate Strategies. <https://www.iddri.org/en/publications-and-events/report/coal-transition-netherlands>
37. Gilfillan, D., Marland, G., Boden, T., and R. Andres. (2019). Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. <https://energy.eppstate.edu/CDIAC>
38. Global Energy Monitor. (2020). Global Coal Plant Tracker. <https://endcoal.org/global-coal-plant-tracker/>
39. Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W. et al. (2017). Natural Climate Solutions. *PNAS*, 114(44), 11645–11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>, <https://doi.org/10.5281/zenodo.883444>
40. Hamshire, P., Sheng, Y., Moir, B. et al. (2014). What China wants: Analysis of China's food demand to 2050. ABARES conference paper 14.3. Canberra. March.
41. He, G., Lin, J., Sifuentes, F., Liu, X., Abhyankar, N., & Phadke, A. (2020a). Rapid cost decrease of renewables and storage accelerates the decarbonization of China's power system. *Nature Communications*, 11(1), 2486. doi:10.1038/s41467-020-16184-x <https://www.nature.com/articles/s41467-020-16184-x>

42. He, G., Lin, J., Zhang, Y. et al. (2020b). Enabling a Rapid and Just Transition away from Coal in China. *One Earth*, 3(2), 187-194. doi:10.1016/j.oneear.2020.07.012
43. 何建坤, 李政, 张希良. (2020c). 中国长期低碳发展战略与转型路径: 综合报告. 2020. 气候变化与可持续发展研究院, 清华大学. 2020.
44. Herpich, P., Brauers, H., Oei, P.-Y. (2018). A Historical Case Study on Previous Coal Transitions in Germany. *IDDRI and Climate Strategies*. <https://www.iddri.org/en/publications-and-events/report/coal-transition-germany>
45. Huang, H., Roland-Holst, D., Springer, C. et al. (2018). Emissions Trading Systems and Social Equity: A CGE Assessment for China. *Applied Energy* 235 (November 26, 2018): 1254–65. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.056>
46. Huang, H., Roland-Holst, D., Springer, C., Cai, W. (2019). How Will an Emissions Trading System Affect Household Income and Social Equity? A CGE-Based Case Study of China. *Energy Procedia* 158 (February 2019): 4017–22. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.838>
47. Huang, H., Roland-Holst, D., Wang, C., Cai, W. (2020). China's Income Gap and Inequality under Clean Energy Transformation: A CGE Model Assessment. *Journal of Cleaner Production* 251, 119626. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119626>
48. International Energy Agency (IEA). (2018). World Energy Investment 2018. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2018>
49. IEA. (2019a). China Power System Transformation: Assessing the Benefit of Optimised Operations and Advanced Flexibility Options. <https://webstore.iea.org/china-power-system-transformation>
50. IEA. (2019b). CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2019. <https://webstore.iea.org/co2-emissions-from-fuel-combustion-2019>
51. IEA (2019c). World Energy Balances and Statistics. <https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/world-energy-balances-and-statistics>
52. IEA. (2020a). CO₂ Emissions from Fuel Combustion for China. [https://www.iea.org/data-and-statistics?country=CHINAREG&fuel=CO₂%20emissions&indicator=CO₂BySource](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=CHINAREG&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2BySource)
53. IEA. (2020b). Global Energy Review 2020: The Impacts of the COVID 19 Crisis on Global Energy Demand and CO₂ Emissions. https://www.oecd-ilibrary.org/energy/global-energy-review-2020_a60abbf2-en
54. IEA. (2020c). Tracking Power 2020. <https://www.iea.org/reports/tracking-power-2020>
55. IEA. (2020d). World Energy Balances 2020. <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>
56. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1990). IPCC First Assessment Report. IPCC, Geneva: WMO.
57. IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf
58. IPCC. (2018). Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp. <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>
59. IPCC. (2019). Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

60. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2019a). Innovation Landscape Brief: Electric-vehicle Smart Charging. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_EV_Smart_Charging_2019.pdf?la=en&hash=E77FAB742226D29931E8469698C709EFC13EDB2
61. IRENA. (2019b). A New World: The Geopolitics of the Energy Transformation. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/publications/2019/Jun/A-New-World-The-Geopolitics-of-the-Energy-Transformation>
62. IRENA. (2020). Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2020. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/publications/2020/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2020>
63. Jiang, D., Hao, M., Fu, J., Liu, K., & Yan, X. (2019). Potential Bioethanol Production from Sweet Sorghum on Marginal Land in China. *Journal of Cleaner Production*, 220, 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.294>
64. Jiang, Y., Zhou, Z., & Liu, C. (2018). The Impact of Public Transportation on Carbon Emissions: A Panel Quantile Analysis Based on Chinese Provincial Data. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(4), 4000–4012. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3921-y>
65. Kreidenweis, U., Humpehöder, F., Stevanović, M. et al. (2016). Afforestation to Mitigate Climate Change: Impacts on Food Prices under Consideration of Albedo Effects. *Environmental Research Letters*, 11(8), 085001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/8/085001>
66. Lal, R. (2018). Sustainable Intensification of China's Agroecosystems by Conservation Agriculture. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.11.001>
67. Li, Y., Lukszo, Z., & Weijnen, M. (2016). The Impact of Inter-Regional Transmission Grid Expansion on China's Power Sector Decarbonization. *Applied Energy*, 183, 853–873. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.006>
68. Li, M., Zhang, D., Li, C.-T. et al. (2018). Air Quality Co-Benefits of Carbon Pricing in China. *Nature Climate Change*, 8(8), 750. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0241-7>
69. Li, N., Chen, W., Rafaj, P. et al. (2019). Air Quality Improvement Co-benefits of Low-Carbon Pathways toward Well Below the 2 °C Climate Target in China. *Environmental Science & Technology*, 53(10), 5576–5584. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06948>
70. Li, X., Fan, Y., & Wu, L. (2017). CO₂ Emissions and Expansion of Railway, Road, Airline and In-Land Waterway Networks over the 1985–2013 Period in China: A Time Series Analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 57, 130–140. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.008>
71. Li, Y., Zeng, B., Wu, T., & Hao, H. (2019). Effects of Urban Environmental Policies on Improving Firm Efficiency: Evidence from Chinese New Energy Vehicle Firms. *Journal of Cleaner Production*, 215, 600–610. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.099>
72. Lin, J., Khanna, N., Liu, X., Teng, F., & Wang, X. (2019). China's Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: Future Trajectories and Mitigation Options and Potential. *Scientific Reports*, 9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52653-0>
73. Lin, J., Xu, L., & Gang, H. (2020). Regional Electricity Demand and Economic Transition in China. *Utilities Policy*, 64, 101047. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101047>
74. Liu, L., Wang, K., Wang, S., Zhang, R., and Tang, X (2018). Assessing Energy Consumption, CO₂ and Pollutant Emissions and Health Benefits from China's Transport Sector through 2050. *Energy policy*, 116, 382–396. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.02.019>
75. Liu, J., Kieseewetter, G., Klimont, Z. et al. (2019a). Mitigation Pathways of Air Pollution from Residential Emissions in The Beijing-Tianjin-Hebei Region in China. *Environment International*, 125, 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.09.059>
76. Liu, J., Wang, K., Xiahou, Q. et al. (2019b). China's Long-Term Low Carbon Transition Pathway under the Urbanization Process. *Advances in Climate Change Research*, 2019. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S167492781930108X>
77. 刘俊伶, 夏侯沁蕊, 王克等. (2019c). 中国工业部门中长期低碳发展路径研究. 《中国软科学》, 2019(11):31-41+54.

78. Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., Lei, R. et al. (2020). Near-real-time Monitoring of Global CO₂ Emissions Reveals the Effects of the COVID-19 Pandemic. *Nature communications*, 11(1), 5172. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18922-7>
79. Lu, X., Cao, L., Wang, H. et al. (2019). Gasification of Coal and Biomass as A Net Carbon-Negative Power Source for Environment-Friendly Electricity Generation in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(17), 8206–8213. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812239116>
80. Lugovoy, O., Feng, X., Gao, J. et al. (2018). Multi-model Comparison of CO₂ Emissions Peaking in China: Lessons from CEMF01 Study, 2018. *Advances in Climate Change Research*, Volume 9, Issue 1, 2018, Pages 1-15. https://www.researchgate.net/publication/323248522_Multi-model_comparison_of_CO_2_emissions_peaking_in_ChinaLessons_from_CEMF01_study
81. Ma, D., Chen, W., Yin, X. and Wang, L. (2016). Quantifying the Co-Benefits of Decarbonization in China's Steel Sector: An Integrated Assessment Approach. *Applied energy*, 162, 1225-1237. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.005>
82. Ma, J., Liu, J., Chen, Z., & Xie, W. (2019). China's Green Bond Market. Research Center for Green Finance Development. Beijing. <https://www.climatebonds.net/resources/reports/china-green-bond-market-2019-research-report>
83. Ma, J., Cheng, L., Chen, Y., & Wu, Y. (2020). China's Pioneering Green Finance. Beijing. <http://eng.pbcsf.tsinghua.edu.cn/upload/default/20200321/d566b30adccb62eab7a0e67cc656fa3f.pdf>
84. Mazzucato, M., & Semieniuk, G. (2018). Financing Renewable Energy: Who is Financing What and Why it Matters. *Technological Forecasting and Social Change*, 127, 8–22. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.021>
85. McCollum, D. L., Zhou, W., Bertram, C. et al. (2018). Energy Investment Needs for Fulfilling the Paris Agreement and Achieving the Sustainable Development Goals. *Nature Energy*, 3(7), 589–599. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0179-z>
86. 生态环境部 (MEE). (2018). 《2018 中国生态环境状况公报》.
87. 交通运输部 (MOT). (2020). 2005-2019 年交通运输行业发展统计公报 . http://www.mot.gov.cn/fenxigongbao/hangyegongbao/index_1.html
88. 人力资源和社会保障部 (MHRSS). (2019). 人社部、市场监管总局、统计局联合发布新职业 . http://www.mohrss.gov.cn/SYRlzyhshbzb/dongtaixinwen/buneyaowen/201904/t20190403_313788.html
89. Mohler, D., & Sowder, D. (2017). Chapter 23 - Energy Storage and the Need for Flexibility on the Grid. In L. E. Jones (Ed.), *Renewable Energy Integration* (Second Edition) (pp. 309-316). Boston: Academic Press.
90. Munich RE. (2018). A stormy year – Natural disasters in 2017. <https://www.munichre.com/topics-online/en/climate-change-and-natural-disasters/natural-disasters/topics-geo-2017.html>
91. Munich RE. (2019). Tropical Cyclones Cause Highest Losses Natural Disasters of 2019. <https://www.munichre.com/topics-online/en/climate-change-and-natural-disasters/natural-disasters/natural-disasters-of-2019-in-figures-tropical-cyclones-cause-highest-losses.html>
92. Muro, M., Tomer, A., Shivaram, R., & Kane, J. W. (2019). Advancing Inclusion through Clean Energy Jobs. <https://www.brookings.edu/research/advancing-inclusion-through-clean-energy-jobs/>
93. Nam, K.-M., Waugh, C. J., Paltsev, S., Reilly, J. M., & Karplus, V. J. (2013). Carbon co-benefits of Tighter SO₂ and NO_x Regulations in China. *Global Environmental Change*, 23(6), 1648–1661. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.09.003>
94. 中国统计年鉴 (NBS). (2018). 中国统计年鉴 2018. 国家统计局编, 北京 . <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2018/indexeh.htm>
95. NBS. (2019). 中国统计年鉴 2019. 国家统计局编, 北京 . <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2019/indexeh.htm>
96. NBS. (2020). 2019 年社会消费品零售总额增长 8.0%. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202001/t20200117_1723391.html
97. Network for Greening the Financial System (NGFS). (2020). Guide for Supervisors Integrating Climate-related and Environmental Risks into Prudential Supervision. <https://www.ngfs.net/en/guide-supervisors-integrating-climate-related-and-environmental-risks-prudential-supervision>

98. OECD/The World Bank/UN Environment (2018), Financing Climate Futures: Rethinking Infrastructure, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264308114-en>
99. OECD. (2019). Innovation and Business/Market Opportunities Associated with Energy Transitions and a Cleaner Global Environment. <https://www.oecd.org/g20/summits/osaka/OECD-G20-Paper-Innovation-and-Green-Transition.pdf>
100. Olivier J.G.J. and Peters J.A.H.W. (2020). Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions: 2020 report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague.
101. Paul Institute. (2020). How a Local Chinese Bank Used Fintech to Go Green. <https://www.paulsoninstitute.org/green-finance/green-scene/how-a-local-chinese-bank-used-fintech-to-go-green/>
102. 2016 年《中华人民共和国气候变化第一次两年更新报告》和 2018 年《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告》。
103. 2004 年《中华人民共和国气候变化第一次国家信息通报》、2012 年《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》和 2018 年《中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报》。
104. Purohit P., Höglund L., & Wagner F. (2018). Impacts of the Kigali Amendment to Phase-down Hydrofluorocarbons (HFCs) in Asia. IIASA Report. Laxenburg, Austria. <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/15274/>
105. Qin, Z., Zhuang, Q., Cai, X. et al. (2018). Biomass and Biofuels in China: Toward Bioenergy Resource Potentials and Their Impacts on the Environment. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 2387–2400. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.073>
106. Roelfsema, M., van Soest, H.L., Harmsen, M. et al. (2020). Taking Stock of National Climate Policies to Evaluate Implementation of the Paris Agreement. Nature Communication 11, 2096 <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15414-6>
107. Sartor, O. (2018). Implementing coal transitions: Insights from Case Studies of Major Coal-Consuming Economies. <https://www.iddri.org/en/publications-and-events/report/implementing-coal-transition-insights-case-studies-major-coal>
108. 陕西省气象局. (2020). 4 种主要氢氯氟碳化物的排放量均在 2015 年前达到峰值后开始下降. http://sn.cma.gov.cn/xwmk/qxkp/202003/t20200318_1494675.html
109. Shi, Y., Sun, J., Wu, L. (2018). Analysis on the Synergistic Effect of Sustainable Development of Coal Industry under 1.5 °C Scenario. Advances in Climate Change Research 9, no. 2 (June 2018): 130–37. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.05.003>
110. 国网能源研究院 (SGERI). (2018). 中国能源和电力展望.
111. Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD). (2017). Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosure. <https://assets.bbhub.io/company/sites/60/2020/10/FINAL-2017-TCFD-Report-11052018.pdf>
112. 清华大学建筑节能研究中心 (THUBERC). (2016). 中国建筑节能年度发展研究报告 2016. 中国建筑工业出版社, 北京.
113. THUBERC. (2019). 中国建筑节能年度发展研究报告 2019. 中国建筑工业出版社, 北京.
114. THUBERC. (2020). 中国建筑节能年度发展研究报告 2020. 中国建筑工业出版社, 北京.
115. Tong, D., Zhang, Q., Liu, F. et al. (2018). Current Emissions and Future Mitigation Pathways of Coal-Fired Power Plants in China from 2010 to 2030. Environmental Science & Technology, 52(21), 12905–12914. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02919>
116. Tong, D., Cheng, J., Liu, Y. et al. (2020). Dynamic Projection of Anthropogenic Emissions in China: Methodology and 2015–2050 Emission Pathways under A Range of Socio-Economic, Climate Policy, and Pollution Control Scenarios. Atmospheric Chemistry and Physics, 20(9), 5729–5757. <https://doi.org/10.5194/acp-20-5729-2020>
117. U.S. Energy Information Administration (EIA). (2018). Residential Demand Module - NEMS Documentation. Available from: <https://www.eia.gov/analysis/pdfiles/m067index.php>
118. U.S. EIA. (2020). Short-Term Energy Outlook. <https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/>
119. UK-China Climate and Environmental Information Disclosure Pilot. (2019). UK-China Climate and Environmental Information Disclosure Pilot 2019 Progress Report. <https://www.unpri.org/download?ac=10546>

120. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2019). National Inventory Submissions. <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories-annex-i-parties/national-inventory-submissions-2019>
121. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (UN-DESA) (2018). World Urbanization Prospects 2018. <https://population.un.org/wup/>
122. UN-DESA. (2019). World Population Prospects 2019, Volume II: Demographic Profiles. (ST/ESA/SER.A/427). https://population.un.org/wpp/graphs/1_Demographic%20Profiles/China.pdf
123. UNEP & BNEF. (2020). Global Trends in Renewable Energy Investment 2020. https://www.fs-unep-centre.org/wp-content/uploads/2020/06/GTR_2020.pdf
124. 王庆一. (2018). 能源数据. 绿色创新发展中心汇总整理, 能源基金会资助.
125. 王庆一. (2020a). 2019 能源数据. 能源基金会资助.
126. Wang, Q. (2020a). Energy Data of 2019 supported by Energy Foundation China.
127. Wang, Y., Xiahou, Q., Wang, K. (2020b). The Impact of Renewable Energy Development on Industrial Materials and Carbon Emissions in China. http://www.globalchange.umd.edu/iamc/wp-content/uploads/2020/01/31_wang.pdf
128. Wilkes, A. & Zhang, L. (2016). Stepping Stones towards Sustainable Agriculture in China: An Overview of Challenges, Policies and Responses. IIED, London. <http://pubs.iied.org/14662IIED>
129. World Bank. (2020). China Overview. <https://www.worldbank.org/en/country/china/overview>
130. World Development Indicators (WDI) | DataBank. (2020). [GDP per capita, PPP], World Bank. <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>
131. Wu, Y., Xi, X., Tang, X. et al. (2018). Policy Distortions, Farm Size, and the Overuse of Agricultural Chemicals in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(27), 7010–7015. <https://doi.org/10.1073/pnas.1806645115>
132. Xie, C., Bai, M., & Wang, X. (2018). Accessing Provincial Energy Efficiencies in China's Transport Sector. *Energy Policy*, 123, 525–532. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.09.032>
133. Xin, L. (2018). Prediction of Food Consumption and Grain Demand in Chinese Mainland. *Chinese Journal of Engineering Science*, 20(5), 135. <https://doi.org/10.15302/j-sscae-2018.05.020>
134. Xinhuanet. (2017, November 3). President Xi Jinping's Speech Delivered at the 19th National Congress of the Communist Party of China. Xinhuanet. http://www.xinhuanet.com/english/special/2017-11/03/c_136725942.htm
135. Xinhuanet. (2020, September 22). Xi Focus: Xi Announces China Aims to Achieve Carbon Neutrality before 2060. Xinhuanet. http://www.xinhuanet.com/english/2020-09/23/c_139388764.htm
136. Xu, Y., Li, J., & Wan, J. (2017). Agriculture and Crop Science in China: Innovation and Sustainability. *The Crop Journal*, 5(2), 95–99. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.02.002>
137. 第九次全国森林资源清查. (2019). 国家林业局, 北京.
138. Xu, M., & Singh, S. (2020, April 20). China's April Electricity Consumption Rebounds as Lockdown Measures Ease. Reuters. <https://www.reuters.com/article/china-power/chinas-april-electricity-consumption-rebounds-as-lockdown-measures-ease-idUSL4N2C81C1>
139. Yang, J., Li, X., Peng, W., Wagner, F., & Mauzerall, D. L. (2018). Climate, Air Quality and Human Health Benefits of Various Solar Photovoltaic Deployment Scenarios in China in 2030. *Environmental Research Letters*, 13(6), 064002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabe99>
140. Yang, Z., Peng, J., Wu, L. et al. (2020). Speed-guided Intelligent Transportation System Helps Achieve Low-Carbon and Green Traffic: Evidence from Real-World Measurements. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122230>
141. Yashiro, T. (2009). Overview of Building Stock Management in Japan. CSUR-UT Series: Library for Sustainable Urban Regeneration, 15–32. https://doi.org/10.1007/978-4-431-74093-3_2
142. Yu, S., Horing, J., Liu, Q. et al. (2019). CCUS in China's Mitigation Strategy: Insights from Integrated Assessment Modeling. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 84, 204–218. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.03.004>

143. Yu, S., Yarlagadda, B., Siegel, J. E., Zhou, S., & Kim, S. (2020a). The Role of Nuclear in China's Energy Future: Insights from Integrated Assessment. *Energy Policy*, 139, 111344. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111344>
144. Yu, J., Shao, C., Xue, C., & Hu, H. (2020b). China's Aircraft-Related CO₂ Emissions: Decomposition Analysis, Decoupling Status, and Future Trends. *Energy Policy*, 138, 111215. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111215>
145. Yu, Y., Feng, K., Hubacek, K., & Sun, L. (2016). Global Implications of China's Future Food Consumption. *Journal of Industrial Ecology*, 20(3), 593–602. <https://doi.org/10.1111/jiec.12392>
146. 袁家海, 席星璇, 孟之绪等. (2020). 中国电力系统灵活性的多元提升路径研究. <https://www.greenpeace.org.cn/wp-content/uploads/2020/11/%E3%80%90%E5%B9%B4%E6%9C%88%E6%9B%B4%E6%96%B0%E7%89%88%E6%8A%A5%E5%91%8A%E4%B8%8B%E8%BD%E3%80%91.pdf>
147. Zeng, W. S., Tomppo, E., Healey, S. P., & Gadov, K. V. (2015). The National Forest Inventory in China: History - Results - International Context. *Forest Ecosystems*, 2(1). <https://doi.org/10.1186/s40663-015-0047-2>
148. Zhongying, W., & Sandholt, K. (2019). Thoughts on China's Energy Transition Outlook. *Energy Transitions*, 3(1), 59-72. doi:10.1007/s41825-019-00014-w
149. Zhou, L., Wang, S., Kindermann, G. et al. (2013). Carbon Dynamics in Woody Biomass of Forest Ecosystem in China with Forest Management Practices under Future Climate Change and Rising CO₂ Concentration. *Chinese Geographical Science*, 23(5), 519–536. <https://doi.org/10.1007/s11769-013-0622-9>
150. Zhou, S., Wang, Y., Yuan, Z., & Ou, X. (2018). Peak Energy Consumption and CO₂ Emissions in China's Industrial Sector. *Energy Strategy Reviews*, 20, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.02.001>
151. Zhou, W., McCollum, D. L., Fricko, O. et al. (2019). A Comparison of Low Carbon Investment Needs between China and Europe in Stringent Climate Policy Scenarios. *Environmental Research Letters*, 14(5), 054017. doi:10.1088/1748-9326/ab0dd8

排版印制 / 136 7111 7637

mirodesign

米 罗 空 间 品 牌 设 计



环保纸印刷



ENERGY FOUNDATION
能源基金会

想要了解更多, 请访问:
www.efchina.org