



# 迈向 2060 碳中和

## ——聚焦脱碳之路上的机遇和挑战



北京绿色金融与可持续发展研究院 & 高瓴产业与创新研究院

2021 年 3 月

# 目录

摘要 .....	3
<b>第一章 什么是碳中和.....</b>	<b>6</b>
1.1 全球已形成碳中和共识，减碳趋势不可阻挡 .....	6
1.2 全球碳排放来自何处 .....	7
<b>第二章 中国实现碳中和面临的挑战.....</b>	<b>9</b>
2.1 经济增速仍将远高于发达国家，能源需求尚未达峰 .....	9
2.2 电力供给结构以煤炭为主导，转型难度大 .....	11
2.3 交通、工业、建筑等部门脱碳技术仍待突破 .....	13
2.4 农业减排面临人均蛋白供应量继续上升等多重阻力 .....	14
2.5 地区与行业发展不平衡，公平性问题凸显 .....	16
<b>第三章 碳中和带来的投资机遇.....</b>	<b>17</b>
3.1 电力部门.....	17
3.2 交通部门.....	19
3.3 工业部门.....	20
3.4 新材料替代.....	21
3.5 建筑部门.....	22
3.6 农业部门.....	23
3.7 负碳排放：碳汇、CCUS、直接空气碳捕集（DAC）技术 .....	26
3.8 信息技术和数字化智能化转型 .....	26
<b>第四章 政府、企业和金融的作用.....</b>	<b>27</b>
4.1 政府层面：明确目标、价格信号和战略规划 .....	27
4.2 企业：开展碳核算，推动核心业务减碳 .....	29
4.3 金融机构：创新绿色金融，大力投资绿色技术 .....	31
<b>参考文献 .....</b>	<b>34</b>

## 摘要

由二氧化碳等温室气体排放引起的全球气候变化已经成为本世纪人类面临的最大挑战之一。在《巴黎协议》的框架下，到本世纪中叶实现碳中和是全球应对气候变化的最根本的举措。

2020年9月22日，中国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，中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。

中国的这一承诺是全球应对气候变化进程中的一项有里程碑意义的事件，也开启了中国以碳中和目标驱动整个能源系统、经济系统和科技创新系统全面向绿色转型的新时代。在实现这一目标的过程中会有许多困难和挑战，但同时会带来科技创新、能源和经济转型的重大机遇。相关的企业和投资机构如果能够把握好这个大的趋势，就可能开辟一系列新的高成长的业务领域和取得更好的长期收益，并有效规避低碳转型对传统高碳产业所带来的风险。北京绿色金融与可持续发展研究院和高瓴产业与创新研究院希望通过此项合作研究，梳理中国在实现碳中和目标过程中所面临的挑战和机遇，为投资机构、企业家和产业界应对业已到来的全球低碳转型大潮提供一定的参考和借鉴。以下是本报告结论的简要总结：

- 1) **全球已形成的碳中和共识将有力地引导长期投资向低碳领域配置。**截至2020年底，全球共有44个国家和经济体正式宣布碳中和目标，美国新任总统拜登在上任第一天就签署行政令让美国重返《巴黎协定》，并计划设定2050年之前实现碳中和的目标。中国、美国和日本等大国在最近几个月所做出的承诺显示，应对气候变化的全球共识和趋势已经无法逆转，未来各国将出台大量支持碳中和的政策措施。这为市场投资方向以及企业科技创新投入提供了更加稳定的长期预期和更大的确定性，将有力地引导大量社会资本转向碳中和领域。
- 2) **实现碳中和的目标意味着颠覆性的能源革命、科技革命和经济转型。**从能源系统的角度看，实现碳中和要求能源系统从工业革命以来建立的以化石能源（煤炭、石油、天然气）为主导的能源体系转变为以可再生能源为主导的能源体系，实现能源体系的净零排放甚至负排放（生物质能源+碳捕获与封存利用）。从科技创新的角度看，很多实现碳中和的技术还不成熟，需要重大领域的科技突破；实现碳中和涵盖的科技领域不仅包含能源，还涉及交通、建筑、工业、农业、生物科技、信息通信技术、人工智能等。从经济转型角度看，碳排放涉及整个经济系统，任何企业都有碳排放的问题，需要整个经济体系里的每一个经济个体的转型，也需要相关的基础设施和金融体系的转型。
- 3) **中国实现碳中和所面临的困难和挑战比发达国家更多。**虽然相较于欧洲和日韩等国家承诺2050年实现碳中和，中国所宣布的碳中和目标年份晚了10年，但是大多数发达国家更早实现了工业化和城市化，碳排放已经达峰并进入下降通道，而中国碳排放还在增长。中国从碳达峰目标到碳中和目标之间只有大约30年的时间，因此面临着更大的挑战。主要挑战包括：我国能源需求尚未达峰，工业用能占比高；电力

供给结构以煤炭为主导，转型难度大；交通、工业、建筑等部门脱碳技术仍待突破；地区与行业发展不平衡，公平性问题凸显，等等。

- 4) **实现碳中和是可行的并且能带来多重效益。** 尽管面临许多困难，但是，鉴于政府的强有力的政策执行力、社会共识和企业行为的积极变化以及全球绿色低碳科技的迅速进展，中国有信心在既定的时间表内实现碳中和目标。此外，实现碳中和也可以带来许多新的经济增长点，在低碳领域创造更多高质量就业和创业机会，带来经济竞争力提升、社会发展、环境保护等多重效益。中国实现碳中和可能需要数百万亿级的投资和持续数十年的努力，这也将塑造更高质量的经济和就业、更优美的生态环境以及更先进的科学技术。
- 5) **实现碳中和的八大重点领域包括电力、交通、工业、新材料、建筑、农业、负碳排放以及信息通信与数字化领域。在这些领域，投资者应该关注的机会包括：**
- 电力领域：光伏发电中硅片和电池片技术提升、新光伏材料钙钛矿技术以及光热发电技术；风电领域陆上风电的大功率风机、大尺寸叶片开发、海上风电全产业链进一步成本降低以及浮式风电技术的商业化；可接纳大规模可再生能源的智能电网改造、微网系统和分布式发电；储能技术的成本降低和广泛应用等。
  - 交通领域：交通电气化（电动汽车、电动卡车等）、更低碳的铁路运输、城市公共交通与低碳共享出行、氢能和生物质燃料在交通领域的应用、海运和航空领域的低碳技术创新等。
  - 工业领域：工业领域电气化、钢铁行业更大比例的废钢利用和电弧炉应用、氢能和生物能炼钢技术进步、水泥生产石灰石熟料替代技术等。
  - 新材料领域：材料的循环利用再生、生物基材料替代化石能源为基础的材料等。
  - 建筑领域：建筑节能改造、零碳建筑、电气化和多能互补系统、零碳采暖和制冷系统、建筑材料的零碳化等；
  - 农业领域：化肥和畜禽养殖排放相关减排技术、植物蛋白替代肉类和奶制品、人造肉、精准农业、基因编辑、垂直农业、水产养殖等；
  - 负碳排放领域：更低成本的碳汇、碳捕集封存和利用（CCUS）、直接空气碳捕集（DAC）等；
  - 信息技术与数字化领域：智慧建筑、智慧能源、智慧生活方式与健康、智能交通与智慧城市、智慧农业、智慧制造等。
- 6) **企业应规划和开展碳核算并制定减排行动计划。** 首先，企业应开展碳核算，了解自身碳排放情况，夯实碳管理的基础，这包括企业自身机构的碳排放、企业所生产的产品和服务的碳足迹、上下游价值链碳排放、以及企业通过自身的产品服务所带来的碳减排潜力；其次，企业应该了解自身所在行业的碳中和路径，设定与碳中和目标相一致的减排目标（如科学碳目标），制定措施开展减排行动，把碳减排与企业

核心业务密切结合，推动低碳转型和技术创新；此外，企业应该利用自身影响力，协助上下游企业以及社会公众推动碳减排。

- 7) **金融机构应该积极参与和支持绿色低碳科技发展。**应鼓励包括保险、养老资金在内的长期资金开展绿色股权（PE/VC）投资，吸引更多的国际资本投向绿色投资基金或绿色科技企业。鼓励绿色金融创新，通过“投贷联动”等机制，让银行等主流金融机构的资金参与绿色投资。通过明确绿色技术产业属于政府性融资担保体系的支持范围，使绿色科技企业能够获得更多融资担保。地方政府可设立绿色科技发展创新平台（或加速器），上市公司和大型企业可以把绿色和低碳科技发展作为企业战略投资的重点方向。支持第三方服务机构开展绿色科技企业环境效益评估和绿色科技企业投资预评估等服务。

# 第一章 什么是碳中和

## 1.1 全球已形成碳中和共识，减碳趋势不可阻挡

由二氧化碳等温室气体排放引起的全球气候变化已经成为全人类需要面对的重大挑战之一。科学界和各国政府对气候变化问题正在形成更加明确的共识，即气候变化会给全球带来灾难性的后果，世界各国应该行动起来减排温室气体以减缓气候变化，到本世纪中叶实现碳中和是全球应对气候变化的最根本的举措。根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）提供的定义，碳中和，也称为净零二氧化碳排放，是指在特定时期内全球人为二氧化碳排放量与二氧化碳消除量相等（如自然碳汇、碳捕获与封存、地球工程等）<sup>1</sup>。二氧化碳是造成气候变化的温室气体（GHGs）之一，而其它温室气体（如甲烷）也能以二氧化碳当量的形式体现，因此广义的碳中和涵盖包括二氧化碳在内的各种温室气体。本报告将从温室气体排放视角讨论中国的碳中和目标。

### 专栏 1 全球温室气体浓度变化

近百年来，工业的发展和人类活动规模与强度的空前增大，带来了全球平均气温的显著快速上升。根据 NASA 的观测数据，相较于 19 世纪末期，目前全球平均气温已升高超过 1.2°C。气温的普遍升高只是气候变化的一个方面，更严重的是由此产生的极端天气：热浪、洪水等“急性”自然灾害将日益频繁，干旱等“慢性”自然灾害也不断加剧；海洋水温上升加速水分蒸发，导致风速加大和风暴加重；冰川融化，海平面显著抬升，许多岛国和各国大片沿海地区面临被淹没的威胁。

而这些气候变化的直接推手就是温室气体的排放。大气中有多种具有温室效应的气体（二氧化碳是其中最主要的一类），它们能吸收并重新放出大气中的红外辐射，使地球表面变得越来越暖，从而带来的一系列气候变化。人类活动是温室气体浓度飙升的根本原因，主要源于发展过程中对化石能源和自然资源的过度开发使用。人类社会的发展历程也是对能源的开发利用史，从最早的钻木取火，到化石能源的开发利用，到电力改变用能方式，再到非化石能源的开发，几次能源革命带来了社会生产力的巨大进步，但也伴随着巨大的代价。尤其是工业革命后，随着化石燃料（煤炭、石油和天然气）的大规模开发使用，二氧化碳排放量显著增加。过去 170 年里，人类活动让大气中的二氧化碳浓度相对于工业革命之前的水平提高了 47%，这比自然环境下 2 万年时间能增加的浓度还多。这样的极速变化也使得物种和生态系统的适应时间大大缩短。

资料来源：美国国家航天局（NASA）GISTEMP Dataset，世界气候组织 WMO (2020), IPCC (2018), Diffenbaugh (2013), Hausteijn (2017), Millar (2018).

<sup>1</sup> IPCC, 2018: Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. 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.)]. In Press

中国国家主席习近平于 2020 年 9 月 22 日在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表讲话，宣布中国将力争于 2030 年前达到碳排放峰值，并努力争取 2060 年前实现碳中和。习主席的讲话，首次向全球明确了中国实现碳中和的时间表。作为 2019 年全球碳排放总量占比最高的国家，中国对碳中和的承诺是全球应对气候变化进程中的里程碑事件，具有巨大和深远的意义，也是中国对“人类命运共同体”建设的最实质性贡献。气候行动跟踪研究联盟（Climate Action Tracker）研究认为，中国碳中和目标有助于本世纪末全球气候变暖趋势降低 0.2-0.3℃。与此同时，中国的承诺也将为全球低碳发展注入信心。<sup>2</sup>

截至 2020 年底，全球共有 44 个国家和经济体正式宣布了碳中和目标，包括已经实现目标、已写入政策文件、提出或完成立法程序（见表 1）的国家和地区。其中，英国 2019 年 6 月 27 日新修订的《气候变化法案》生效，成为第一个通过立法形式明确 2050 年实现温室气体净零排放的发达国家。美国特朗普政府退出了《巴黎协定》，但新任总统拜登在上任第一天就签署行政令让美国重返《巴黎协定》，并计划设定 2050 年之前实现碳中和的目标。

表 1 承诺碳中和的部分国家和地区

承诺类型	国家和地区（承诺年份）
已实现	不丹，苏里南
已立法	瑞典（2045）、英国（2050）、法国（2050）、丹麦（2050）、新西兰（2050）、匈牙利（2050）
立法中	韩国（2050）、欧盟（2050）、西班牙（2050）、智利（2050）、斐济（2050）、加拿大（2050）
政策宣示	乌拉圭（2030）、芬兰（2035）、奥地利（2040）、冰岛（2040）、美国加州（2045）、德国（2050）、瑞士（2050）、挪威（2050）、爱尔兰（2050）、葡萄牙（2050）、哥斯达黎加（2050）、马绍尔群岛（2050）、斯洛文尼亚（2050）、马绍尔群岛（2050）、南非（2050）、日本（2050）、中国（2060）、新加坡（本世纪下半叶尽早）、中国香港（2050）

数据来源：ECIU，“一带一路”网

## 1.2 全球碳排放来自何处

根据 PBL 挪威环评机构的数据<sup>3</sup>，2018 年全温室气体排放量约为 556 亿吨二氧化碳当量，增速为 2%，碳排放量前五的国家排放了全体 62% 的温室气体，依次为中国（26%）、美国（13%）、欧盟 27 国家（8%）、印度（7%）和俄罗斯（5%）。

分部门来看，能源活动是全球温室气体的主要排放源，根据世界资源研究所（WRI）数据<sup>4</sup>，2017 年能源活动排放量占全球温室气体总排放量的 73%，农业活动排放占 11.8%，土地利用变化和林业排放占 6.4%，工业生产过程排放占比为 5.7%，废弃物处理排放占 3.2%。在能源排放活动中，发电和供热行业排放占全球温室气体排放比重最高，占 30.4%，交通运输

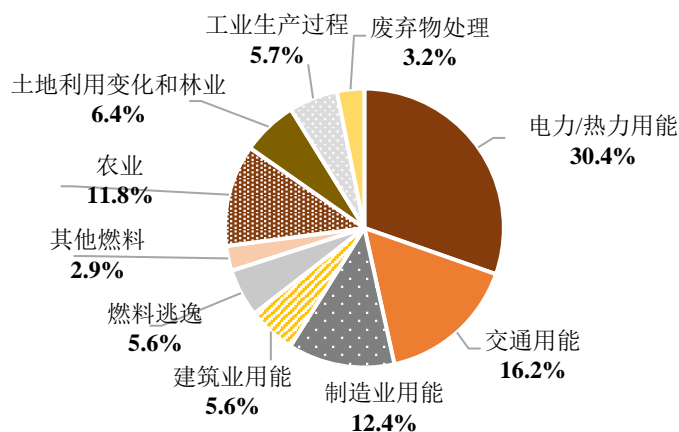
<sup>2</sup> Kate Abnett, China's carbon neutral pledge could curb global warming by 0.3°C: researchers.路透社，2020 年 9 月 24 日，<https://www.reuters.com/article/us-climate-change-china/chinas-carbon-neutral-pledge-could-curb-global-warming-by-0-3c-researchers-idUSKCN26E325>

<sup>3</sup> PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, Trends in Global CO2 and Total Greenhouse Gas Emissions, Trends in Global CO2 and Total Greenhouse Gas Emissions; 2020 Report | PBL Netherlands Environmental Assessment Agency

<sup>4</sup> 包括 LUCF 的温室气体排放总量，数据来源 Climate Watch data, WRI, [https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end\\_year=2017&start\\_year=1990](https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2017&start_year=1990)

输排放占全球碳排放的 16.2%，其中道路交通是主要来源，制造业和建筑业排放占全球总排放的 12.4%，建筑部门排放占全球总排放的 5.6%（见图 1）。

图 1 全球分部门温室气体排放 (2017)



数据来源：世界资源研究所（WRI）

因此，要实现碳中和，能源活动领域的零碳燃料替代是核心内容，同时要加快交通运输、制造业和建筑业的脱碳过程。农业等部门温室气体排放虽然目前占比较小，但减排路径面临更加复杂的挑战，同样不容忽视。

## 专栏 2 气候变化对人类生活的影响

气候变化的影响覆盖了人类生活的方方面面。全球气温升高将带来海平面的上升，随之而来的海水入侵、洪水加剧以及基础设施受损会让生活在岛屿、沿海地区以及三角洲的居民和经济活动面临更大风险。

气候变化会让全球范围内的极端天气变得更频繁，比如陆地系统可能出现更多的高温、干旱，在高海拔地区出现更多极端风暴。研究表明，气温的升高显著缩短了农作物的生育期，降低了生长速度，气温每上升 1°C，作物产量将降低 10%。海平面上升也将从环境、物种入侵等方面影响海洋生态系统，引发沿海资源的损失并降低渔业和水产养殖业的生产率。

而作为国民经济发展的基础，农业和渔业的所受的负面冲击将带来一系列蝴蝶效应，包括粮食供应短缺、工业生产受阻和服务需求萎缩等影响，并有可能传导至通货膨胀，威胁经济稳定。各个维度的极端后果也会反映在金融业和资本市场中，比如会使受极端气候灾害影响的项目和企业出现不良贷款、股权投资的估值下降、保险成本上升，无法获得融资等问题。

除此之外，气候变化还将对人类健康带来负面影响。比如高温使臭氧和空气中其它污染物的水平上升，加剧了心血管和呼吸道疾病的发作；超常高温甚至可直接造成心血管和呼吸道疾病患者死亡。洪水的频率和严重程度上升也将污染淡水供应，使水源性疾病的风险加大，并为蚊虫等携带疾病的昆虫形成繁殖场所。气候变化还可能延长重要病媒传播疾病的传播季节并改变其地理范围。比如，研究显示，气候变化可使暴露于登革热的人数继续增加。

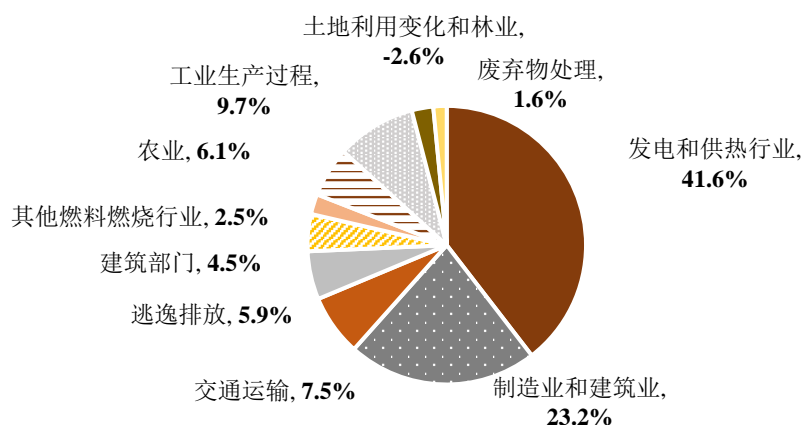
资料来源：IPCC(2018)，中国气象局（2011），世界卫生组织 WHO（2018）



## 第二章 中国实现碳中和面临的挑战

目前，中国已是全球温室气体排放的第一大国家。根据 WRI 数据<sup>5</sup>，分部门而言，2017 年中国发电和供热行业所产生的温室气体排放占全国总排放的 41.6%，制造业和建筑业占 23.2%，工业生产过程的温室气体排放占 9.7%，此外交通运输和农业部门的碳排放占比分别是 7.5%和 6.1%（见图 2）。和全球对比，中国在建筑、交通和农业部门碳排放占比明显偏低，而工业部门占比较高。

图 2 中国分部门碳排放 (2017)



数据来源：世界资源研究所（WRI）

### 2.1 经济增速仍将远高于发达国家，能源需求尚未达峰

相较于欧洲和日韩等发达国家，中国所宣布的碳中和实现时点晚 10 年，但欧美发达国家从碳排放达峰到承诺的碳中和之间，所用时间比中国长（多在 40-60 年之间），而中国从碳达峰到碳中和之间只有三十年的时间，因此任务会更加紧迫，也会面临着更大的挑战。

表 2 主要国家的碳排放达峰时间和承诺实现碳中和时间

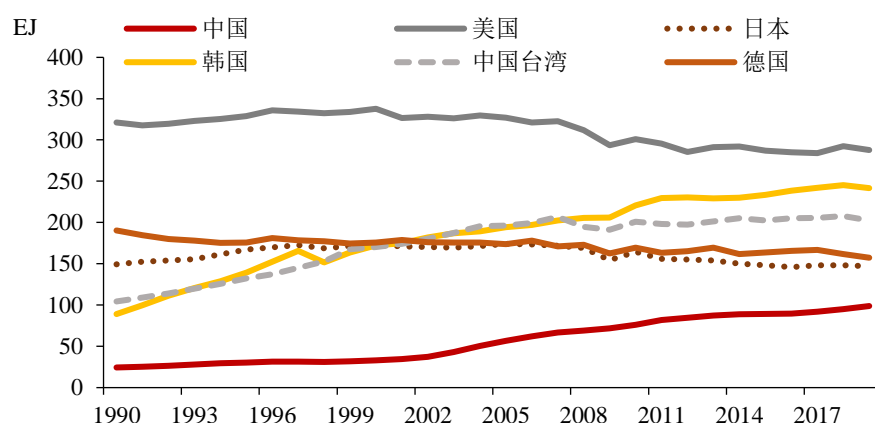
国家	达峰时间	承诺实现碳中和时间
英国	20 世纪 70 年代初达到峰值后，较长时间处于平台期，目前排放相对于峰值水平下降约 40%	2050
德国	20 世纪 70 年代末达到峰值后，较长时间处于平台期，目前排放相对于峰值水平下降约 35%	2050
美国	美国 2007 年达到峰值后，呈缓慢下降趋势，目前相对于峰值水平下降约 20%	2050
日本	日本 2013 年的排放水平是历史最高，未来趋势还有待观察	2050
韩国	韩国排放还未达到峰值	2050
中国	2030 之前（预计）	2060

数据来源：ECIU, IEA, EU, Crippa, M., Oreggioni, G., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Lo Vullo, E., Solazzo, E., Monforti-Ferrario, F., Olivier, J.G.J., Vignati, E., Fossil CO<sub>2</sub> and GHG emissions of all world countries - 2019 Report, EUR 29849 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-11100-9, doi:10.2760/687800, JRC117610.

<sup>5</sup> 包括 LUCF 的温室气体排放总量，数据来源 Climate Watch data, WRI, [https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end\\_year=2017&start\\_year=1990](https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2017&start_year=1990)

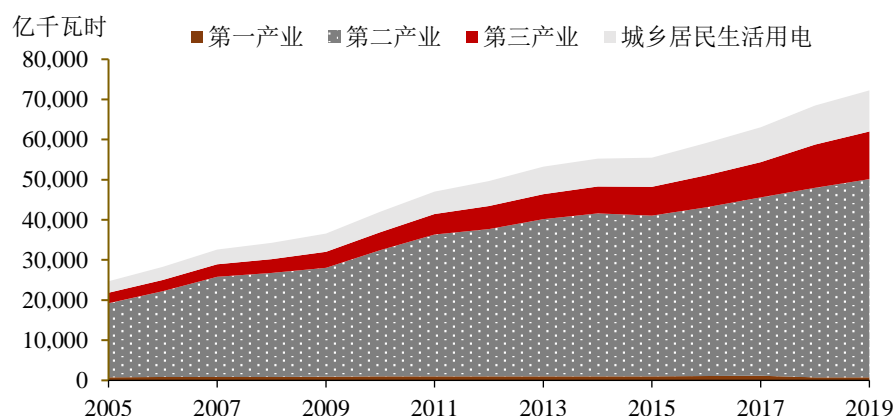
中国在未来碳中和路径中面临的最大的宏观挑战，是其经济增长仍将保持较高的速度，因此能源需求难以很快见顶。根据国际货币基金组织（IMF）的研究，发达国家目前平均经济增速约为 1%-2%，而中国更高的经济增速（5%以上）还将维持较长时间，经济的增长也将带来能源需求总量的增长。根据国家统计局数据，2019 年中国一次能源消费总量达 48.7 亿吨标煤，同比增速 3.3%。同时，中国人均能源消费仍有较大的提升空间（见图 3）。2019 年中国人均一次能源消费量约为 OECD 国家的一半，人均用电量是 OECD 国家的 60%。此外，中国的用电结构尤为特殊，工业用电占比达到 67%（图 4），而 OECD 国家的工业、商业、居民用电分布较为均衡，占比分别为 32%、31%、31%。若比较人均居民用电量，中国仅为 OECD 国家的 29%，显著偏低。随着现代化和城镇化进程的推进，居民生活水平逐步向发达国家看齐，居民用电需求仍将迎来大幅增长。

图 3 各国人均一次能源消费量对比



数据来源：BP 能源统计年鉴 2019

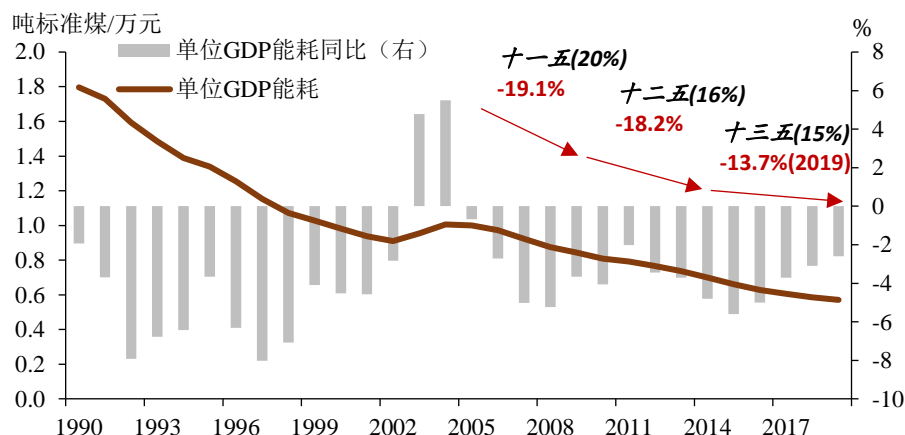
图 4 中国全社会用电量结构



数据来源：国家统计局

部门能源消费以工业为主。钢铁、有色、化工以及建材等等高耗能产业为主导地位的产业结构导致中国单位 GDP 的能源强度居高不下。近年来，随着中国产业结构的调整和能源利用效率的提升，2005-2019 年中国 GDP 能耗累计降幅达 42.9%（国家统计局统计公报，2019），但仍高于发达国家水平。随着能源利用效率边际提升的难度越来越大，能耗降幅逐年缩窄（见图 5），工业领域进一步的减排脱碳需要从技术到产业链更为深层的变革。

图 5 1990-2019 年中国单位 GDP 能耗变化



数据来源：国家统计局

值得注意的是，中国从 2013 年起经济增长动能转向第三产业，以互联网行业为代表的“新经济”增长迅速，传统意义上低能耗的第三产业或将成为新的能耗大户。中国作为全球数字经济领域的引领者，很难参考其他国家相关产业能耗增长数据。但从中国数据中心近年能耗情况，可预见未来第三产业的能耗需求不容小觑。根据国网能源研究院，2018 年全国大型及以上数据中心的总机架数达 204 万个，预计 2020 年、2025 年这些数据中心机架数量分别达到 498 万、802 万个。与之对应的能耗增速也增长迅速。根据中国电子节能技术协会的数据，中国数据中心的耗电量已连续 8 年增速超 12%，2020 年总耗电量将达 2962 亿 kWh。

因此，“2060 碳中和”目标是在中国经济持续增长、能源需求持续增加的背景下实现，这个过程的实现不仅需要中国能源结构的加速转型，更是中国经济结构的一次变革，是一场意义深远的供给侧和需求侧的革命。

## 2.2 电力供给结构以煤炭为主导，转型难度大

对中国而言，碳中和进程将进一步提升中国的电气化率，电力需求将在未来 40 年内继续较快增长。从总量上看，根据落基山研究院（RMI）的测算，中国在实现碳中和的过程中，同时需要将发电量从目前的约 7 万亿千瓦时增加到 2050 年的 15 万亿千瓦时。从电力占比看，根据清华大学气候变化与可持续发展研究院的测算，当前电力在终端能源消费中的占比约为 25% 左右，而实现碳中和要求 2030 年将电气化占比提升到 30% 以上，到 2050 年进一步提升至 55%。

### 2.2.1 伴随着电力需求的大幅提升，电力结构的清洁化转型亟需加速

中国能源禀赋多煤、贫油、少气，其目前的发电结构以火电为主，而火电以燃烧煤炭为主。根据中电联统计，2019 年中国发电量中火电的占比高达 72%，电力领域碳排放占全国碳排放总量的 30% 以上。根据清华大学气候变化与可持续发展研究院的测算，在碳中和的目标下，2050 年中国非石化发电量占总电量的比例将超过 90%，煤炭比例则将降至 5% 以下。可见中国电力结构低碳转型乃至最终实现净零所面临的十分艰巨。

### 2.2.2 低碳电源中水电和核电发展空间受限

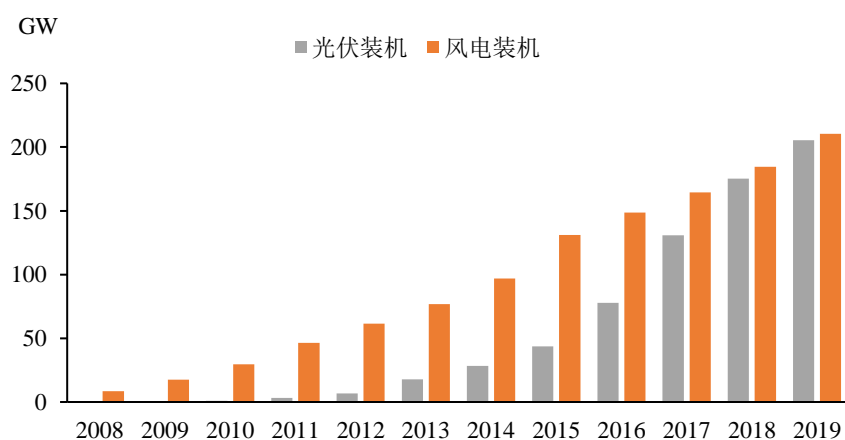
目前，中国可再生能源电力以水电为主，2019年其发电量占全部发电量的17.4%（中电联）。水电发电成本低、清洁、机组启停迅速，也是稳定的调峰、调频和事故备用电源。随着煤电等化石能源逐步退出电力系统，水电将发挥重要的电网安全保障作用。但目前中国主要的水电资源开发过半，主要流域中仅雅鲁藏布江流域仍有较多的待开发资源。总体来看，由于受环保限制、资源开发难度影响，其水电未来发展空间有限。

核电是除水电之外的清洁、稳定的电源，中电联的数据显示2019年核电站总发电量的比例为4.6%。现阶段中国的核电发展处于平稳推进状态，主要新增装机集中在远离城市生活中心的沿海或海岛区域。然而，核电仍面临较为严峻的安全问题，包括技术设计的隐患、人为操作的疏漏、自然灾害的发生以及恐怖袭击等都可能带来巨大的风险（Zhao, 2020），此外还面临核废料处理的污染问题以及中国铀资源稀缺的限制。目前技术上尚未完全解决以上隐患，全球范围内也已有多个核能大国宣布放弃和淘汰核电，如德国、瑞士、瑞典、奥地利和日本，美国核电站也面临着关闭潮。现阶段来看，核能难以成为碳中和背景下中国电力系统的主力能源。

### 2.2.3 光伏、风电资源供需存在区域错配、电力系统协调等问题仍待解决

从2010年开始，中国风电和光伏发电装机容量大幅增长（见图6），目前装机容量分别超过2亿千瓦，占全球份额也都超过30%。由于技术进步和发电成本大幅下降，风电和光伏将有巨大的发展前景。但目前来看，在中国电力系统中，风电和光伏发电量的占比仍然很低，2019年分别为2.9%和5.4%。前几年，在高速发展的背后也凸显出补贴资金缺口和“弃风弃光”率较高的问题。此外，中国可再生资源供需存在空间错配问题，即可再生资源丰富的地区和需求负荷中心错配，推高发电的系统成本。要解决空间错配，一方面要从技术层面亟需推动特高压、分布式、储能和调峰等技术的发展；另一方面从制度层面需要打破电力系统省间消纳的掣肘，加速电力市场改革。

图6 中国光伏和风电装机量变化



数据来源：国家统计局

此外,可再生电力比重的不断提升可能给电力系统的安全稳定带来冲击。风电和光伏现阶段无法承担调峰调频等主力电源的职责,未来的电力系统演化或将是传统电网的一场彻底变革。在智能电网、源荷互转、交直混联等新趋势下,电力系统从底层理论到协调技术方面都需要进一步的研究和实践。

## 2.3 交通、工业、建筑等部门脱碳技术仍待突破

加速交通、工业、建筑等终端用能部门的电气化可以一定程度上取代化石能源的直接燃烧和利用,并且有助于推进智能化和数字化发展。但是电气化并不能解决全部的碳排放问题。对于中国而言,要实现碳中和,必须推动在交通、工业和建筑领域的深度脱碳。

### 2.3.1 交通部门碳排放尚未达峰,商用车、民航等领域脱碳面临技术瓶颈

美国、欧盟和日本交通部门排放达峰时千人乘用车保有量分别约为845、423和575辆,而中国目前仅有173辆(王海林和何建坤,2019),汽车保有量仍然呈持续增长态势。目前,中国道路、民航、铁路和水运温室气体排放分别占交通部门总排放量的76%~80%、10%~13%、2%~3%和6%~11%(王海林,2017, Mccollum & Yang, 2009)。根据Zhang(2019)的测算,2017年中国道路交通二氧化碳排放近10.9亿吨(不含摩托车、两轮和三轮车),比2010年的2.2亿吨(国家发展和改革委员会能源研究所,2017)增长了近5倍。

得益于中国电动车领域“纯电驱动”产业路线的制定、政策补贴及汽车限购政策,中国在道路电气化上进展迅速(袁志逸,2020),2018年纯电动汽车保有量占新能源汽车保有量的81%,高于全球71%的平均水平(国际能源署,2019)。目前中国电动车主要应用于乘用车领域,而重型货车碳排放目前占中国道路交通二氧化碳排放的40%~55%,仍缺乏商业化量产的电动化技术。根据国际能源署预测,未来全球交通运输行业石油需求和碳排放增长主要来源于货运,其中,中国货运排放增长将占全球货运交通碳排放增长的90%(国际能源署,2017)。

目前纯电技术的电池能量密度有限,限制了货车的续航里程,且常规动力电池难以提供货车所需的强大动力;氢燃料电池虽然从原理上在重型货车领域适应性更强,但目前以“灰氢”为主的制氢过程仍然有较高的碳排放,并且受到基础设施的制约,燃料的储运仍面临技术障碍。虽然部分国内车企已开始量产氢能汽车,但市场规模很小且仅处于示范阶段。除此之外,民航领域的深度脱碳同样是现阶段的技术难题,生物质燃料和氢能或许是关键措施,但成本过高是现阶段推广的最大障碍,未来诸多技术路线仍待进一步的探索。

### 2.3.2 工业部门脱碳技术仍待探索,或颠覆现有材料

以工业部门的钢铁和水泥行业为例,二者都是能源密集行业,占全国碳排放的比重分别约为16%和15%<sup>67</sup>。钢铁行业脱碳的首要步骤是推动生产工艺转型,由高炉冶炼向电弧炉冶炼路线进行转变。然而,目前中国钢铁工业由于废钢资源供应不足、工业电价较高等因素,

<sup>6</sup> 世界资源研究所, Controlling CO2 Emissions in China's Cement Industry, <https://www.wri.org/our-work/top-outcome/controlling-co2-emissions-china%E2%80%99s-cement-industry>

<sup>7</sup> 经济参考报, 碳约束下钢铁行业兼并重组将提速, 2021年1月28日, <http://lc.sysu.edu.cn/content/6558>

电弧炉生产路线经济性不及高炉炼钢,2019年电弧炉生产路线的粗钢产量占比仅有10.4%,远低于全球平均水平27.7%。此外,更彻底的低碳炼钢方式(如氢气炼钢)仍待技术突破实现规模化应用,而进一步的脱碳则需要氢能冶金技术的突破。

水泥行业的脱碳路径更为艰难。水泥生产带来的碳排放来自石灰石原料本身的锻造过程,一条可行的脱碳路径是从底层实现原材料的颠覆,用非石化基材料替代石灰石原材料,与此相对应的燃料也需要实现零碳替代。由于对应的工业流程需要改变,涉及产业链的各个环节,因此该技术路径进展较为缓慢。

总体而言,工业生产过程上下游之间高度相关联,改变现有生产流程势必带来整体产业链的变革。与此同时,大量生产设备有着较长的生命周期,一旦重建和改造,成本较高,甚至导致资产搁浅和银行坏账,因此在技术突破和产业化之间也有较长距离。

### 2.3.3 建筑部门零能耗建筑技术经济性仍待改善,存量替换难度大

建筑部门预计碳达峰的时间较晚,或成为中国最晚实现碳中和的主要部门。根据中国建筑节能协会能耗统计专委会(2019)的预测,中国建筑行业的碳排放将继续增加,达到峰值时间预计为2039年前后,比全国整体实现碳达峰的时间预计晚9年。从碳排放的来源看,2018年建筑运行阶段碳排放占全国碳排放的21.9%,主要来自居民和工业的取暖/制冷。

实现碳中和一方面需要推动超低能耗建筑发展、消除现有的化石能源采暖方式,以被动式保温为基础,结合分布式可再生能源和先进热泵技术,有效降低建筑用能。另一方面规模庞大的存量建筑的低碳改造难度较大,此前进行的大规模农村地区“煤改电”给地方财政带来较大负担。充分发挥生物质、不产生额外碳排放的工业余热以及太阳能热等替代电力需求的潜力,并通过技术进步提高改造的经济性是建筑部门存量替代的关键。

## 2.4 农业减排面临人均蛋白供应量继续上升等多重阻力

受经济发展水平、气候环境、技术、政策等多重因素的影响,不同国家和地区农业碳排放总量与结构占比存在较大差异。从总量的横向对比来看,中国作为第一农业大国,农业碳排放量始终高于欧美(见图7),但由于本世纪初,中国碳排放总量陡峭爬升,农业碳排放占中国总排放的比例因此出现了明显下降,随后一直保持在7%-8%的水平上。虽然从总体上看农业碳排在中国的占比不算高,但随着“2060碳中和”目标的逐步推进,农业部门必须在减排上发挥更大作用。中国农业的减排至少还面临着人均蛋白质供应将继续上升、化肥替代技术尚不成熟、人造肉口感和价格瓶颈等问题。

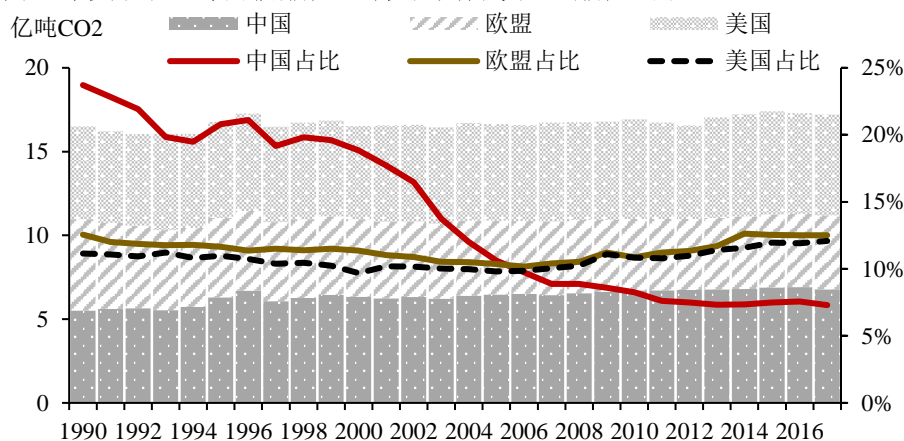
### 2.4.1 人均蛋白供应量不及发达国家水平

作为三大营养物质之一的蛋白质是人体组织的重要组成部分,因此蛋白质的摄取对于人类的生产生活至关重要,蛋白质供应量也因此成为衡量全球营养结构贫富差距的重要指标。<sup>8</sup>联合国粮食及农业组织(FAO)数据显示,在1961年至2014年间,全球的人均蛋白质供应量增加了约三分之一,由61克增长至81克。从分布来看,蛋白质供应的全球差距正

<sup>8</sup> 蛋白质供应量衡量的是可供家庭消费的食物,但不考虑任何在消费水平上浪费或未食用的食物。

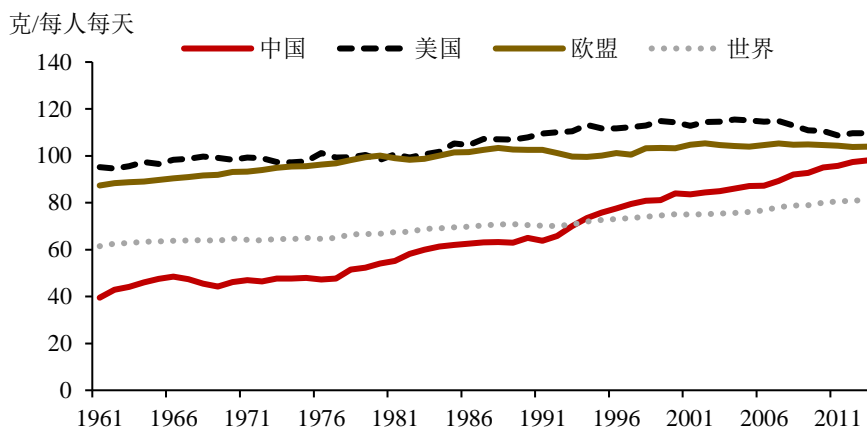
在缩小（见图 8），其中，发达国家由于一直远高于平均水平，在过去的几十年中，欧美的人均蛋白质供应增长已基本停滞；反观中国，人均蛋白质供应量持续增长，与欧美的差距也在进一步缩小。肉类作为蛋白质的主要来源，随着经济的发展，居民生活水平继续提高，中国肉制品的生产与消费预计将保持持续发展的态势。因此，在蛋白质供给赶超欧美的趋势下，畜牧业还将具有很强的发展潜力，由此带来的温室气体排放量不容小觑。

图 7 中美欧农业部门碳排放绝对值及其占本国总排放量的比重



数据来源：经合组织（OECD）

图 8 人均蛋白质供应量



数据来源：联合国粮食及农业组织（FAO）

#### 2.4.2 传统农业惯性强，新技术难以快速渗透

长期以来，使用化肥一直被当作增加单位面积产量的有效手段。事实上，这也是中国能以占世界 7% 的耕地养活世界 20% 人口的重要原因。有数据显示，中国一直是全球化肥增量的重要贡献者，平均每公顷农田年均施用氮肥 305 公斤，是世界平均水平的 4 倍以上<sup>9</sup>。化

<sup>9</sup> Briony Harris, China cut fertilizer use and still increased crop yields. This is how they did it. 世界经济论坛, 2018 年 3 月 26 日, <https://www.weforum.org/agenda/2018/03/this-is-how-china-cut-fertilizer-use-and-boosted-crop-yields/>

肥在生产、施用、降解各环节给土壤和环境带来的负面影响需要很长时间来消解，其使用习惯也需要很长时间转变。在缺乏优质环保的替代品存在的前提下，以合成氨工艺为代表的化肥工业的脱碳之路任重道远。

其次，劳动力资本可能成为现代农业发展的瓶颈。相比而言，我国的农业现代化程度远不及发达国家。农业新技术的普及和更迭对农民的要求较高，不仅要求农民懂得耕种，还要有丰富的植物学与环境科学知识。据估算，以欧洲的“植物工厂”为例，人工成本占总成本比重超过四分之一，足以见劳动力资本的贡献率之大。中国农民的教育水平和技术能力的缺乏，可能成为绿色农业科技推广的重要瓶颈。

### 2.4.3 口感和成本因素为植物蛋白的发展带来不确定性

中国猪肉产量和猪肉消费量排名世界第一。长期以来，中国猪肉消费量在全球占比超过40%（OECD），其他肉类短时间也很难替代猪肉在居民消费结构当中的地位，更不必说植物蛋白的替代。更重要的是，从饮食结构来看，中餐对肉食的加工过程相对复杂，国外已上市的人造肉汉堡肉、香肠肉等植物蛋白产品远不能满足中餐的烹饪需要。这主要来自于植物与动物分子的结构差异——真正的肉类蛋白分子相互缠绕、延展性强、排列有序，而植物蛋白较少缠绕、卷曲性好、杂乱无序。要在中国推广人造肉，需要解决的核心问题就是蛋白分子的拉伸问题，也就是解决口感的仿制效果问题。而为了满足口感的要求，在原材料选择、加工方式、技术设备等都需要下更大功夫，成本可能大幅上升。总之，口感和成本决定了人造蛋白肉的市场前景，能否有效提升口感和降低价格是行业发展仍待解决的瓶颈。

## 2.5 地区与行业发展不平衡，公平性问题凸显

区域发展不均衡是中国经济的一个长期特点。不同地区资源禀赋、生产优势和经济发展水平的差异性，造成了不同区域、不同行业低碳发展的成本有着显著差异。碳中和的实现过程对不同地区、不同行业将带来不同程度的冲击，或将加剧发展不平衡的问题。有研究表明，中国高收入地区的产出能源强度远低于低收入地区（Clarke Sather, 2011），因此在碳中和的过程中可能会让低收入地区承担更多的减排任务，或带来“穷人补贴富人”的不平等问题。比如在山西、内蒙等以煤炭为主的传统能源地区，其经济发展和财政能力相对落后，但减碳的任务却更为严峻，转型阵痛将更比沿海发达地区更为明显。

从行业角度来看，如果不能有效地采用低碳、零碳技术进行改造，碳中和过程将导致碳排放密集型行业（如煤炭、煤电、钢铁、水泥、石化、铝业等）的产品竞争力下降，市场份额将逐渐被低碳产品所替代。与此同时，低碳行业的发展也将带来新的投资和就业机会。在碳中和的目标下，这一替代过程将大幅提速，传统碳排放密集行业若不能及时做出调整转型，或将面临严重的失业问题和资产减值损失。因此，如何为兼顾公平性与高效率的转型机制提供支持和保障，让各地区各行业都能享受绿色转型的效益，是政策顶层设计中需要通盘考量的议题。



## 第三章 碳中和带来的投资机遇

“2060 碳中和”目标的实现需要全新的低碳发展转型战略，它将倒逼中国的能源转型，使其逐步摆脱对化石燃料、燃煤电厂的依赖，达到突破能源使用现状、颠覆已有技术、打破传统工业生态，实现社会经济体系、能源体系、技术体系的巨大转变。但也要意识到，作为世界最大的发展中国家和全球第一的碳排放大国，转型不仅需要强大决心，更需要庞大的资金和对绿色、低碳技术的大规模研发、应用和推广，以突破现有技术瓶颈和在多个行业的全面运用。本章将从电力、交通、工业、新材料、建筑、农业、负碳排放技术以及信息数字技术等八个领域分别简述目前全球范围内出现的可能的绿色技术创新点。这些创新点都有可能成为未来的重要投资机遇。

### 3.1 电力部门

#### 3.1.1 电力的绿色转型是实现碳中和的基础

电气化是碳中和的核心，而电力的绿色转型是实现碳中和的基础。由于其“标准化”和“可控化”，极高的能源利用效率和节能、清洁的用能方式，电力是工业化进程的“助推器”，也是优质的能源。电气化也是目前实现碳中和成本最低、最为成熟的技术路径，通过交通、工业和建筑等终端能源使用部门电气化水平的提升，将替代煤炭、石油等化石能源的消耗。

电气化将推动全球电力消费的快速增长。随着电力在能源消费中地位愈发重要，电力供应结构的低碳化转型是实现碳中和的必备条件。根据世界能源署（IEA）测算<sup>10</sup>，到 2050 年，全球电力消费量将是目前的 2.5 倍。根据国际可再生能源署（IRENA）的测算<sup>11</sup>，2050 年电力将占全球终端用能的一半。这意味着在 2℃ 目标下，2050 年全球电力消费量将达到 2019 年的两倍。根据 IEA 的预测，碳中和条件下，若满足未来新增的电力需求，未来 30 年全球可再生能源平均年度新增装机规模需达到 700GW，是 2019 年新增装机容量的 4 倍。国际可再生能源署（IRENA）预计 2050 年全球电力消费中约有 86% 的电力来自非化石能源（可再生能源和核能），即低碳电力将相比 2019 年增长 7 倍。

#### 3.1.2 风光发电可成为可再生电力的增长主力

在可再生能源发电中，光伏和风电被寄予了厚望。根据 IEA 预测<sup>12</sup>，全球光伏和风能在总发电量中的占比将从目前的 7% 提升至 2040 年的 24%。其中，太阳能光伏发电增长迅速，将在可再生能源发电中占据主导地位。

转换效率提升和制造业规模效益已经推动风光发电成本实现了大幅下降，未来十年仍有较大降本潜力：

<sup>10</sup> 国际能源署（IEA），Energy Technology Perspectives 2020，2020 年 10 月 28 日，Energy Technology Perspectives 2020 – Analysis - IEA

<sup>11</sup> 国际可再生能源署（IRENA），Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050，202 年 4 月 20 日 Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050 (irena.org)

<sup>12</sup> IEA，Energy Technology Perspectives 2020 - Special Report on Clean Energy Innovation，<https://webstore.iea.org/energy-technology-perspectives-2020-special-report-on-clean-energy-innovation>

- 1) 据 IRENA 测算<sup>13</sup>，全球光伏发电成本在过去十年间累计下降了 82%，2019 年并网大规模太阳能光伏发电成本降至 0.068 美元/千瓦时，并在绝大多数国家已经实现了平价上网（IEANA）。根据 IEA 预测，通过硅片、电池片等技术的提升，未来五年内太阳能光伏的发电成本还将下降 36%：硅片方面，通过减薄厚度、增加尺寸，有望继续摊薄综合成本；电池片方面，异质结（HJT）电池技术可提高双面电池光电转化效率，转换效率有望从 20% 进一步提升至 27%，提升发电量从而摊薄度电成本。被誉为“下一代光伏材料”的钙钛矿相较晶硅材料有更高的理论转换效率，产业化前景可期，有望推动光伏成本继续下降。此外，光热发电也具有较大发展潜力。光热发电输出稳定、可靠、灵活可调，可以作为基荷电源和调峰电源。近年来光热技术也在不断创新，成本不断下降。如在建的世界最大光热电站-迪拜 700MW 光热电站，由沙特和中国丝路基金联合投资，35 年购电合同电价 7.3 美分，接近新建天然气发电成本。
- 2) 全球陆上和海上风电的发电成本在过去十年间分别下降了 39% 和 24%，2019 年陆上风电和海上风电度电成本分别是 0.053 美元/kwh 和 0.115 美元/kwh。未来，陆上风电将通过发展大功率风机、大尺寸叶片摊低建设投资、提升发电量；而海上风电则向更深海域扩展，平均海深和离岸距离逐渐提高，其中浮式风电设备的应用潜力巨大，能够克服海床条件对固定地基的限制、减少安装和运维成本。在更深的海域，浮动风机开发能够借助石油和天然气行业的深水经验，实现更佳风能资源的部署，扩展风能的利用边界。

光伏和风电的全产业链创新和降低成本是未来实现可再生能源发电高速增长的最重要驱动力，也为创业和投资提供了重要机遇。随着更大规模的低成本的可再生能源发电供给，可再生能源电力制氢（“绿氢”）也将变得更加经济可行，使很多很难电气化的工业领域实现碳中和成为可能。

### 3.1.3 分布式光伏、储能技术和智能电网可实现大规模可再生能源接入

风电、光伏等可再生能源有明显的季节性、时段性，其发电比重的逐步提升会增大电力供应的波动性，因此对电力系统的跨时间、跨区域协调提出了更高的要求。分布式发电、储能技术和智能电网需求响应的发展有助于平滑风光发电的波动性，提高电力系统的灵活性。

除了大规模并网外，光伏分布式电源的应用场景较为广泛，可以小规模开发、就地消纳。比如美国加州积极推广用户的住宅屋顶光伏，德国多个地区在铁路和高速公路两侧建设的路面光伏电站，以及主要分布在东南亚国家在湖泊布置的水面光伏。

随着大规模可再生能源的接入，储能技术将成为电力系统的重要组成部分。通过配置合理规模的储能，能够抑制间歇性可再生能源输出功率的波动，提高电能质量、维护电网稳定。根据中关村储能产业技术联盟（CNESA）全球储能项目库的不完全统计，截至 2019 年底，全球已投运储能项目累计装机规模 184.6GW，抽水蓄能的累计装机规模最大（占 92.6%）；

<sup>13</sup> 国际可再生能源署（IRENA），Renewable Power Generation Costs in 2019，202 年 6 月 20 日  
[Renewable Power Generation Costs in 2019 \(irena.org\)](https://www.irena.org/publications/2019/06/renewable-power-generation-costs-in-2019)

电化学储能的累计装机规模紧随其后(占 5.2%)，其次是熔融盐储热和压缩空气储能。其中，电化学储能因受地形等因素影响较小，运用灵活，反应更迅速，已逐渐成为储能新增装机的主流；随着电池包结构的持续优化，电化学储能仍有较大降本空间。

电网稳定性需求和大数据等新技术可促进智能电网的快速发展。进行需求侧管理是智能电网主要特点，一方面，通过负荷调整管理用电需求，即搜集用发电信息进行实时响应、削峰填谷；另一方面，充分利用分布式电源、储能等装备反向供电，做到源-网-储-荷协调配合。

总之，碳中和情景下电网将从传输煤电为主到传输非化石能源发电为主，因此需要大量的技术创新和技术升级。电力系统大规模接入可再生能源依赖于储能技术的大规模发展和成本降低，以及电网技术的升级转型，因此这两个领域未来需要大量的投资。

## 3.2 交通部门

### 3.2.1 交通部门碳排放持续增长，脱碳力度亟需加强

交通领域产生的碳排放占全球碳排放总量的 16%。值得注意的是，在能源、工业等部门碳排放增速趋缓甚至下降时，交通部门的碳排放却在继续增加。比如，根据 PBL 数据<sup>14</sup>，中国交通部门的碳排放持续上升，2018 年已经成为了中国第四大碳排放部门，排放量达到 8.8 亿吨二氧化碳当量。

从运输方式来看，根据 IEA 数据，2017 年中国公路交通所产生的碳排放为 7.3 亿吨，占交通部门总碳排放的 82%，是减排的重点；航空、船舶和铁路交通产生的碳排放占比虽小却是减排的难点。

### 3.2.2 结构优化、电气化、氢能、生物质燃料等是实现交通减排的可能技术路线

公路交通的电气化是交通部门目前最为成熟的减碳方式。随着电动车锂电池等技术的突破，成本持续下降，电动车经济性的提升可促进其市场化普及。据彭博新能源预测<sup>15</sup>，美国 2025 年前纯电动车的购买价格将低于内燃机汽车。随着充电桩基础设施建设的推进、电池技术的不断进步带来续航里程和充电效率的加快，电动乘用车的使用场景将不断扩大，小轿车、短距离配货车、城市公交、两轮车、铁路等领域逐渐实现电气化和脱碳。

与公路和航空、航运相比，铁路运输总体上更有效率、更低碳且更容易实现电气化。可以基于过去中国高铁系统的长足发展经验，继续提升铁路运输在整个运输结构中的占比。

在航空和航运领域，同样可以通过电气化实现短距离交通的脱碳化，但长距离出行仍需利用新的零碳燃料。现阶段，氢能、生物质燃料、液态氨等燃料应用于交通领域暂不具备经济性，实现碳中和的最佳路径尚待进一步探索。具体选项包括如下几类，但各有尚未克服的缺陷：

<sup>14</sup> PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, Trends in Global CO2 and Total Greenhouse Gas Emissions, Trends in Global CO2 and Total Greenhouse Gas Emissions; 2020 Report | PBL Netherlands Environmental Assessment Agency

<sup>15</sup> 彭博社新能源财经交通，彭博社：电动车价格 7 年后将低于内燃车型 - 第一电动网 (d1ev.com)

- 1) 短距离航空领域可以利用电池或氢燃料电池的电力驱动飞机，但长距离的航线需要电池能量密度的大幅度突破；
- 2) 在重卡、长距离航空和船运领域，氢燃料电池具备零排放、续航里程长、加氢时间短等优点，但现阶段尚不具备经济性，加氢站等基础设施建设仍待推进；
- 3) 长途船运还可以采用氨燃料。氨气作为氮氢化合物，在燃烧时不会排放二氧化碳，具有供应稳定、便于运输等特点，但氨气的清洁制备、储运的环境要求以及经济性仍待解决。

除了燃料的替代，出行领域的数字化也将有助于碳中和的实现。自动驾驶技术、车联网与智能汽车等的有机联合将加快交通智能化进程，可以通过大数据技术进行资源配置优化、决策，提供更为灵活，高效、经济和环境友好的出行服务，同时促进共享汽车的应用。薛露露等（2019）的研究表明，如果城市采用自动化、电气化和共享出行的方式，可以削减高达80%的交通排放量。

此外，更好的城市规划和建设更宜居的城市社区可以进一步减少交通需求，从而通过公共交通（包括城市轨道交通）、自行车和步行等方式来替代私人车辆的使用，实现减排。

### 3.3 工业部门

#### 3.3.1 工业部门需要深度脱碳

工业部门的碳排放占比较高，且实现碳中和的技术难度大。根据世界资源研究所(WRI)的研究<sup>16</sup>，2016年工业过程直接排放的温室气体和因工业部门使用电力而间接排放的温室气体在全球温室气体排放中的占比达24.2%。工业部门近一半的碳排放来自于生产水泥、钢铁、合成氨、化工等。这些重工业的碳排放的产生主要来自三个方面，一部分来自于用于生产的原料，比如生产水泥过程中的石灰石和合成氨过程中所用的天然气；一部分来自工业生产高温加热的燃料燃烧，如高炉炼铁所用的燃料；剩余部分来自其他能源需求，比如用于生产中间产品、低温供热等的化石燃料。

表3 全球重工业主要部门碳排放（2019）

亿吨/年	钢铁	水泥
燃料燃烧	23	8
工业生产过程	3	15

数据来源：IEA - The challenge of reaching zero emissions in heavy industry

对工业部门而言，现阶段主要通过生产工艺流程的优化实现节能减排，但深度脱碳需要进一步实现燃料替换、生产方式的转变甚至原料的变革。以下以钢铁和水泥两个主要的工业行业为例，讨论其可行的脱碳技术路径。

<sup>16</sup> WRI, 4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors, 2020年2月6日, 4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors | World Resources Institute (wri.org)

### 3.3.2 钢铁行业深度脱碳需要氢能、生物能炼钢技术进步

钢铁行业是工业领域的碳排放大户。2017 年钢铁冶炼产生的碳排放占全球总碳排放的 7.2%，其中有 75%的用能和原料都使用煤炭（IEA，2020）。

钢铁生产目前主要有两种方式，其一是高炉/碱性氧气炉（BF-BOF）路线。全球有 70% 以上钢铁使用该路线生产。该路线以铁矿石为原材料、煤炭作为化学还原剂，并在过程中添加废钢来炼制钢铁。另一选项是通过电弧炉（EAF）路线生产，即基于废钢和电能，利用电弧的热效应加热炉料进行炼钢，目前主要通过化石燃料为反应提供还原剂和能量。<sup>17</sup>

现阶段钢铁行业碳排放强度的下降主要来自废钢生产和能源效率的提高，比如在钢铁生产过程通过工艺的优化和回收使用废钢来节约资源。但随着技术进步，炼钢效率和再利用接近技术极限，进一步脱碳需要从根本上改变生产方法。比如可利用氢气或生物能代替煤炭作为高炉炼钢的还原剂，并且将生产供能过程电气化。或者利用 CCUS 技术清除化石燃料产生的碳排放。也可综合利用炼钢所产生的一氧化碳/二氧化碳作为化学工业的原料生产燃料、肥料或其他有价值的产品。

### 3.3.3 水泥生产脱碳需要石灰石熟料的替代

根据 WRI 的研究，2017 年水泥行业的碳排放约占全球碳排放的 3%。目前主流的水泥产品为硅酸盐水泥，产生的碳排放主要来自两方面。一是水泥生产时燃料（如煤炭、焦油、生物质）加热到 1600℃所产生，这一过程的碳排放约为 40%。二是来自石灰石煅烧的化学过程产生的碳排放，约占 60%。

因此，水泥生产的碳中和首先需要燃料端实现零碳排放，比如利用绿氢、生物质燃料等替代传统石化燃料，对于生产过程的碳排放采用 CCS 的方式予以去除。更加深刻的转型需要对传统生产原料石灰石进行彻底的替代。现阶段使用熟料替代品降低熟料与水泥的比例已较为普遍，比如粉煤灰和矿渣、甚至氧化镁材料作为石灰石的替代品，但这类水泥目前可用性上受到限制，因此水泥行业深度减排仍待技术的突破创新。

## 3.4 新材料替代

### 3.4.1 碳中和的最后一公里

在碳中和过程中，下游石化行业将面临最强冲击，乃至颠覆性的冲击。由于生产过程的高碳特点，化纤、塑料等与百姓生活息息相关的许多材料最终都可能被彻底替代。除此之外，新材料的替代也可能为工业部门的钢铁、水泥等生产提供新的脱碳路径。

一个可能的路径是利用生物基高分子材料替代传统石化产品。这将带来一场底层材料革新，或将重塑整个工业体系与下游产业链。

<sup>17</sup> 中国矿业网，我国钢铁行业能源加快转型需要提高电炉钢占比，2020 年 12 月 18 日，<http://www.chinamining.org.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=6&id=34200>

### 3.4.2 碳中和或将彻底颠覆传统石化材料

传统石化产品通常由石油、天然气等化石能源提纯制造基本化工原料，并在此基础上进行化学合成。代表性的产品包括塑料、合成纤维、合成橡胶等，其全生产过程带来大量的碳排放。而生物基高分子材料来源于高分子有机物，通过发酵、DNA 剪辑、培育、筛选、提纯等一系列工序构造材料，可能实现对石化基材料的替代。

- 1) 以应用最广的塑料材料聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 为例，它被广泛用于塑料瓶和服装纤维等材料，它的可降解替代材料包括由生物质制得的淀粉基生物塑料、聚乳酸 (PLA)、聚羟基烷酸酯 (PHA) 等，以及由石化基制得的 PBAT 等。目前聚乳酸 (PLA)、PBAT 已有多家公司达到量产，但成本仍显著高于 PET 材料；而 PHA 还处于商业化前期，实现大规模的生产仍待进一步研发投入。
- 2) 再以仅次于 PET 的重要化纤原料聚酰胺 (PA) (俗称尼龙) 为例，其潜在替代物为生物基 PA56、PA6 等。这些材料处于研发阶段，分子结构和性能与传统尼龙几乎完全相同，将来有望大规模应用于纺织和工业管材等。
- 3) 生物基技术可充分利用农业废弃物资源价值。秸秆发电的瓶颈在于秸秆收集的经济性和物流效率。纤维素乙醇技术搭配秸秆发电，将有效提升项目经济性，同时解决农业废弃物的环境污染问题。

除此之外，采用循环经济模式，对传统石化产品进行降解循环利用也可以降低传统石化行业的碳排放。材料回收通常比从自然资源生产原始材料更节能。此外，材料领域也还有其它前沿技术处于探索阶段，比如利用捕获的二氧化碳结合回收的混凝土颗粒再利用，以提高材料强度；从空气中直接捕获二氧化碳制作固体混凝土材料；利用基因工程技术对塑料水解酶进行改造实现降解和循环等。

## 3.5 建筑部门

### 3.5.1 建筑部门是碳排放最高的终端消费来源

根据国际能源署 (IEA) 统计，建筑材料 (钢铁水泥等) 的制造过程所产生的碳排放以及居民和商用建筑的化石能源使用带来全球 9% 的直接碳排放，电力和热力使用带来 19% 的间接碳排放，另外建筑的建设过程产生的碳排放占 10%。

### 3.5.2 节能改造、电气化和多能互补系统将帮助建筑脱碳

在建筑部门实现碳中和的举措中，首要任务是建筑的节能改造，包括热力管网改造、加强墙体隔热、使用节能电气设备、改善采光、房顶绿植等等；其次是取暖和空调用能的脱碳化，比如使用光伏等清洁电力、地热能、生物质取暖等，还需要进一步推动炊事等用能电气化。

建筑节能改造方面，可以从建筑材料的减排和提效入手。可以使用中空或 Low-E 节能建筑玻璃削减建筑能耗，或是使用石膏板等轻质隔墙材料替代传统的水泥墙、砖墙，以减少水泥、建筑砖烧制和运输过程中的碳排放。

电气化是实现建筑零碳排放的首要步骤。目前，制冷、照明和家用电器已经实现了全面的电气化，为了使建筑物的排放几乎接近零，必须对供暖设备也进行脱碳。具体方法包括：

- 1) 使用热泵技术。热泵技术有助于推动取暖领域的电气化。相较于传统电阻加热炉，热泵的能耗仅为它的一半，在能源转换原理上具有优势，已逐渐成为欧洲国家的建筑取暖主流技术。但据 IEA 测算，2019 年热泵在全球家庭用能中的占比只有 5%，预计到 2030 年，这一比例将提高到 22%，这将降低取暖能耗，为建筑部门减少 50% 的碳排放。
- 2) 使用地热能、干热岩地热资源。这些能源是国际公认的清洁能源，具有资源量大、分布广等特点，是未来地热资源开发利用的重要方向。
- 3) 使用生物物质、不产生额外碳排放的工业余热以及太阳能热。生物物质和太阳能热可广泛用于农村地区的建筑采暖和热水加热。
- 4) 炊事电气化。这将是建筑部门节能减排贡献最大、却较难推广的举措，要求提升公众对电炊具的接受度、扩大居民建筑电网容量。

此外，推广零碳建筑还需多种能源协调配合，提供系统解决方案。比如采用光伏屋顶、生物质功能、氢能储热、电池或 EV 储能等结合方式，保证房屋在白天光照和夜晚非光照时间都可以实现零碳能源的供给。在建筑材料选择上，也可借助工业脱碳技术或新材料的替代实现零碳建造。

## 3.6 农业部门

提到应对气候变化，人们通常的关注点往往放在“清洁能源”这一解决方案上。事实上，包括生产过程在内的粮食系统，以及包括加工、分销在内的后农业系统也都是产生温室气体排放的关键环节。根据 Poore 和 Nemecek (2018) 测算，食品全行业排放的温室气体约占全球排放量的 26%。而根据 FAO 的保守估计，到 2050 年全球人口将达到 90 亿以上，因此粮食产量至少需要增加 70% 才能养活全部人口。可以预见，减少农业部门的碳排放将是未来几十年全球面临的巨大挑战之一。寻找可行的农业脱碳技术方案是首要解决任务。

### 3.6.1 农业对全球气候环境的影响广泛而深刻

农业生产与气候变化和温室气体排放密切相关。一方面，农业是最易遭受气候变化影响的产业；另一方面，农业是温室气体排放的重要来源。不仅如此，农业生产占用了全球 50% 以上的可利用土地，消耗了超过地球 70% 的淡水，78% 水体富营养化也归因于此，并且极大地影响了全球的生物多样性<sup>18</sup>。自 20 世纪 90 年代以来，全球的农业碳排放增加了 14%（美国国家环境保护局，2020）。

从生命周期的角度来看，农业部门产生的碳排放贯穿于从种养业生产、到能源和投入品使用、以及废弃物处理全过程中，具体可分为四个部分（括号中数字为该环节在农业温室气

<sup>18</sup> Hannah Ritchie and Max Roser, Greenhouse gas emissions, Our world in data. <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>

体排放中的占比):

- 1) 畜牧业和渔业 (31%)。牲畜,特别是反刍动物(如牛),会在正常消化过程中(称为“肠发酵”)产生甲烷,此类排放占农业部门温室气体排放量的四分之一以上。畜禽粪便处理过程产生的甲烷和一氧化二氮也是另一个重要部分。此外,牧场和渔船燃料消耗所导致的排放等也归类于畜牧业和渔业排放。
- 2) 粮食生产 (27%)。21%的排放来自与农作物生产,6%来自动物饲料的生产,主要归因于化学肥料(如尿素)、有机肥料和农药的生产和施用过程中释放的一氧化二氮等温室气体。对于水稻等一类采用浸水种植的作物,在灌溉模式下,土壤中残存的腐烂植物分解也会产生大量甲烷。另外,农业生产过程中会对使用氮肥对土壤进行管理,在增加氮的利用率的同时也释放了一氧化二氮。
- 3) 土地利用 (24%)。农业生产扩张使得牲畜土地用量、消费类作物占地量增加。这里的“土地利用”包含土地用途变化、草原燃烧和土壤翻耕等人类活动的总和,尤其是农业扩张导致森林、草原和其他碳“汇”转变为农田或牧场,再加上每年的收割活动,变相增加了二氧化碳的排放。
- 4) 食品供应链 (18%)。食品加工、运输、包装和零售都需要消耗能源和资源,从而导致碳排放。不过,运输排放仅占农业排放的很小一部分(6%),更主要的问题是食物浪费:据联合国粮食及农业组织估计<sup>19</sup>,全球有三分之一的粮食会在供应过程中被浪费掉,这些粮食不能被人类利用从而浪费掉此前的碳排放。

### 3.6.2 实现农业减排的技术探索

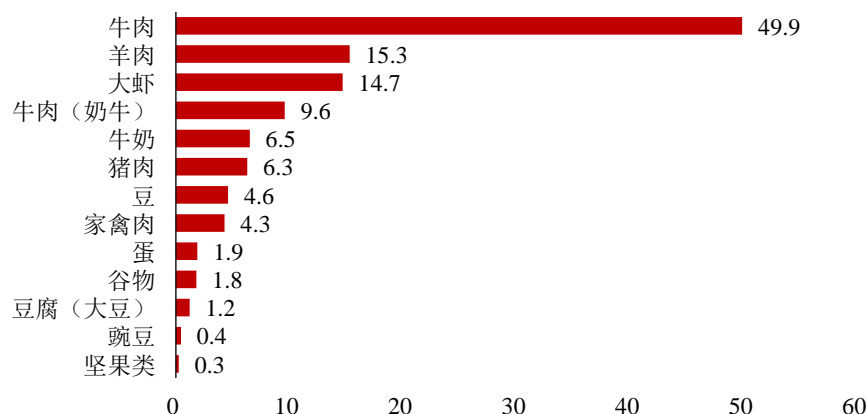
农业的全面脱碳需要更加深刻的调整和变革,需要一系列、全方位而非单一、片面的解决方案。这些方案需要包括改变饮食习惯、减少食物浪费、创新农业生产技术与方式、寻找低碳食品等。同时还要改善农业投资生态,吸引资本及优秀人才,提高农业生产效率。以下简要讨论农业减排的若干具体方式:

- 1) **植物蛋白**: 植物蛋白替代肉类和奶制品是有效降低畜牧业碳排放的举措之一。例如,平均每生产 100g 蛋白质,牛肉将带来近 50kg 温室气体排放,而豌豆仅产生 0.4kg 温室气体(见图 9)。从需求的角度看,消费者的偏好也在逐步变化。比如,近年来世界素食者的数量大大增加,美国素食者的数量已从 2014 年的 400 万增加到 2018 年的约 2000 万,增长了 600% (见表 4)。
- 2) **精准农业**: 指在农业生产中采用一些高技术含量的工艺和技术,在提高单产的同时减少肥料和农药的使用。这些技术包括无人机、传感器、卫星数据、自动化、机器人和 AI 技术等。这些技术的有效使用可以提高资源利用率和有效性,让农业实现“环境影响可测、生产过程可控、产品质量可溯”的目标。

<sup>19</sup> FAO, Food Loss and Food Waste, [Food Loss and Food Waste | FAO | Food and Agriculture Organization of the United Nations](#)



图9 每100克食品中蛋白质的温室气体排放量



数据来源: Our World in Data-Top Trends in Prepared Foods 2017

表4 素食主义者人数变化

国家	素食者占比	人数	增速
美国	5-8% (2018)	1200-2000 万	从 2014 年的 400 万到 2018 年的 2000 万, 增长了 600%。
意大利	7.1-10% (2016)	424 万	在 2011 年至 2016 年期间增长了 94.4%。
英国	7% (2018)	325 万	过去五年内人数增加了 3 倍。
印度	20-40% (2020)	3.75 亿	
奥地利	10% (2020)	88 万	
德国	10% (2019)	800 万	
中国	4-5% (2014)	5-7 千万	
日本	4.7% (2014)	1837 万	

数据来源: 世界能源署 (IEA), 世界银行

- 3) **基因编辑:** 在过去的 30 年中, 种子的创新为提高单产做出了积极的贡献。预计基因编辑技术的进步将以比转基因生物技术更有力地影响未来的粮食供应。它能够提高氮肥利用效率, 有效减少农作物损失, 还在节省土地和水等资源方面具有巨大潜力。
- 4) **垂直农业:** 垂直农业, 也称为植物工厂, 是指在高度受控的环境中以高空间密度生产蔬菜、药用植物和水果。与传统的田间耕作相比, 其生产过程不使用农药, 用水量可减少 90%, 并可节省多达 95% 以上的土地。但是, 由于高昂的生产成本, 其商业应用目前仅限于高价值农作物, 例如绿叶蔬菜和草药等。展望未来, LED 和设备的成本有望继续降低, 使得垂直农业的生产成本也相应下降。此外, 消费者对无公害食品和本地生产的低碳足迹食品的偏爱可能会继续支持垂直农业的快速增长。
- 5) **水产养殖:** 鱼提供了健康的低脂蛋白质来源, 其生产过程的碳密集度大大低于牛肉。但是, 全球海洋渔业已经过度捕捞, 人工水产养殖对于满足全球对鱼类不断增长的需求可能至关重要。多项水产养殖的研发和新项目正在进行中, 这些项目一般会聚焦限制抗生素的使用、增加可持续饲料的使用、以及鱼粉和池塘沉积物的回收等。

### 3.7 负碳排放：碳汇、CCUS、直接空气碳捕集（DAC）技术

碳汇是指通过植树造林、森林管理、植被恢复等措施，利用植物光合作用吸收大气中的二氧化碳，并将其固定在植被和土壤中，以减少空气中二氧化碳的浓度。增加碳汇是应对气候变化的一项重要措施。通过认证机制确认的碳汇（证明碳汇的额外性）将可以进行交易，购买碳汇的机构和个人可以用来抵消自身的碳排放。碳汇发展的瓶颈是土地资源及种植和养护成本，这些因素限制了可增加碳汇的规模。

CCUS（Carbon Capture, Utilization and Sequestration）是指碳捕集、利用与封存，就是把二氧化碳收集起来进行利用或者进行封存（如地下、海底等）。目前制约 CCUS 广泛运用的主要因素是其成本高昂，目前全球只有大约 20 个商业化 CCUS 项目运营，但是近年来已经规划建设另外 30 多个商业化 CCUS 项目。CCUS 成本包括捕集成本、运输和储存成本以及最后的利用或封存成本，不同的项目成本区别较大。仅以捕集成本举例，工业过程中高浓度二氧化碳捕集成本大约每吨二氧化碳 15-25 美元，低浓度二氧化碳（如水泥、燃煤电厂排放的二氧化碳）捕集成本为每吨 40-120 美元<sup>20</sup>。

直接空气碳捕集（Direct Air Capture）技术是从空气中捕集二氧化碳并转化为产品封存起来。目前收集到的二氧化碳可以转化为合成燃料、注入水泥中或岩石中，或用作化学和塑料生产的原料等。但是 DAC 成本比 CCUS 的成本还要高，目前约 400-600 美元每吨，因此产品应用市场有限<sup>21</sup>。

CCUS 和 DAC 技术作为负碳技术，是实现碳中和的重要技术路径，是其他领域很难完全实现零排放的时候需要的技术。对煤炭、煤化工、石化行业等行业，在碳中和目标下，这类负碳技术的大规模、低成本的商业化开展是延续其生存的唯一希望，可以作为这些产业转型的重点探寻方向。

### 3.8 信息技术和数字化智能化转型

信息通讯技术（ICT）应用广泛，正在改变整个产业和社会。根据全球电子可持续发展倡议组织（Global e-Sustainability Initiative, GeSI）的估算，2020 年全球 ICT 行业碳排放占全球碳排放的 2.3%。随着数字化转型的加速和对算力需求的增长，以及 5G 的更广泛应用，信息通讯技术本身的能耗可能会持续增加。因此 ICT 行业本身的能耗和碳排放需要得到关注，主要通过节能降耗技术创新、新技术应用、以及更大比例地应用可再生能源来实现减碳。

与此同时，ICT 行业可以通过赋能其它行业来促进这些行业的碳减排和碳中和。据 GeSI 的研究，ICT 技术在未来十年内有潜力通过赋能其他行业帮助减排全球碳排放的 20%。<sup>22</sup>大数据、人工智能、物联网、区块链等技术都有与能源、建筑、交通、工业、农业等行业进行结合来促进降低碳排放的应用场景。全球移动通信系统协会（GSMA）与碳信托（Carbon Trust）合作撰写的《全球通讯技术赋能减排报告》（The Enablement Effect）显示，2018 年移

<sup>20</sup> [Is carbon capture too expensive? – Analysis - IEA](#)

<sup>21</sup> CTVC, The Air Mining Rush of Carbon Capture, 2021 年 1 月 25 日, <https://climatetechvc.org/carbon-capture/>

<sup>22</sup> GeSI, SMARTer2030 – ICT Solutions for 21st Century Challenges, 2015 年, <https://smarter2030.gesi.org/>

动技术使全球温室气体排放量减少了约 21.35 亿吨，约等于俄罗斯的年碳排放总量，几乎 10 倍于移动行业自身的碳足迹，而这些赋能减排主要通过智慧建筑、智慧能源、智慧生活方式与健康、智能交通与智慧城市、智慧农业、智慧制造等领域的应用而实现。

因此，加大力度进行 ICT 技术领域的创新，以及 ICT 与碳中和技术的融合应用可以加速碳中和目标的实现。大型 ICT 企业目前是全球最富有的企业，拥有很多资源和能力，它们应该把碳中和远景纳入企业发展和创新的目标。

## 第四章 政府、企业和金融的作用

尽管现阶段我国实现碳中和还面临着许多挑战，但从现实上看，中国也确有许多其他国家难以望其项背的优势。首先是集中力量办大事的制度优势。2020 年我国抗疫率先在世界范围内取得阶段性胜利，再一次展示了中国高效动员全社会资源和力量组织实施重大系统工程的能力。“2060 碳中和”目标的设定恰逢“十四五”规划的布局之年，这意味着未来的规划一定会纳入碳强度的硬约束性指标，明确各区域和重点行业的达峰目标、路线图、行动方案 and 配套措施。自上而下的政策信号释放将为碳达峰、减排、再到净零提供重要的指引。其次是中国巨大的市场和强大的规模化能力。中国的绿色低碳市场是全球最大规模的市场，将为各类绿色科技的应用提供最广阔的空间，也能通过规模效益大大降低相关技术、设备和生产成本。基于市场规模和政府的大力支持，企业就会有投入研发和规模化生产的动力，为产业链的完善和延伸提供了保障。第三个优势来源于我国绿色金融体系的支撑。我国早在 2016 年就启动了绿色金融体系的建设，并已初步建成了包括界定标准、披露要求、激励机制和产品创新能力的绿色金融业态，绿色金融市场正积极动员社会资本参与绿色低碳的投资。

但是，这些优势并非中国实现碳中和的充分条件。在实现碳中和的过程中，还需要经济体系中不同主体之间的合作和良性互动，尤其是政府、企业、投资机构都将在碳中和的过程中发挥不可或缺的作用。下文简要讨论这三类主体应该着力规划和推进的具体措施。

### 4.1 政府层面：明确目标、价格信号和战略规划

#### 4.1.1 设立碳总量目标并逐年递减、加快建设碳市场和碳税制度

政府作为碳中和行动中的主导者、监督者和政策制定者，应该负责顶层制度设计和推动落实。一方面，政府应该设定碳排放总额，并根据 2060 碳中和目标使配额逐年递减，督促各部门各行业形成较为明晰的减排规划。这类自上而下的政策相当于形成了温室气体排放的隐形碳价，释放出明确的政策信号和长期减排的决心，可以降低绿色企业的投资风险预期，激励企业尽早开展低碳转型（邹骥等，2019），同时促进高碳企业开展节能减排或退出市场。

另一方面，政府需要完善碳定价机制，包括碳交易、碳税和可再生能源激励政策等。在各项碳定价政策中，以碳交易机制和碳税制度为代表的政策作为经济手段，是众多国家实现温室气体排放控制目标的主要措施。在碳市场交易机制下，企业通过免费发放或拍卖的方式获得排放配额，由于企业间的减排成本不同，边际减排成本较低的企业会通过采用节能技术、

改造生产流程和改进管理模式等来实现履约，同时将多余的配额出售获利；而边际减排成本较高的企业可以通过购买配额以较低的成本实现减排目标。最终，在碳交易机制的作用下，全社会将以最低的减排成本实现既定的总减排目标。

中国从 2013 年开始在七省市相继开展碳排放权交易试点工作，已成为配额成交量规模全球第二大的碳市场。试点中控排对象多以二氧化碳排放为主，覆盖电力、钢铁、石化、水泥等主要高耗能行业；排放配额多基于基准线法或历史强度法进行免费分配。近年来市场均价逐渐稳定在 15-40 元/吨的价格区间。已有诸多基于试点碳市场的实证研究观察到碳价信号对减排和绿色技术创新的正向作用，但与欧盟和加州碳市场超过 100 元/吨的价格相比，中国碳市场的活跃度和价格发现作用依然较弱。2017 年中国宣布建设全国碳市场，目前全国碳市场分配方式也已出台。全国碳市场的运行有望逐步提升碳市场的流动性和稳定性。在未来市场机制建设方面，可参考欧盟碳市场的建设经验，更多引入金融机构参与，并借助碳金融工具来活跃二级市场，提升碳定价的有效性，引导大量非控排企业的节能减排行为。碳金融工具（如碳期货、碳期权与碳远期等）除了可以增加市场流动性之外，还可以为企业提供针对碳价格和气候转型风险的对冲工具，同时为投资者提供一种新的资产类别。

长期来看，除了碳排放交易体系，也可考虑碳税制度作为补充（昆山杜克大学环境研究中心，2019）。根据世界银行的数据，目前全球已实施或规划中的碳定价机制国家（或地区）共有 61 个，其中 31 个是碳排放权交易体系，30 个是碳税。碳税由于法律效力更高，更易通过法治化手段为市场主体提供稳定、明确的“碳排放成本”（一种广义的“碳价”）预期。在全国碳交易市场运行的基础上，政府引入碳税可以扩大碳定价覆盖范围：碳交易市场主要覆盖排放量大且监管成本低的排放行业和企业，而碳税可主要覆盖成本高的中小型排放源，两者起到互相补充的作用。此外，碳税还可以为碳交易市场的提供价格参考，形成价格联动机制，提升碳市场运行的有效性。

#### 4.1.2 推动电力市场改革，建立多层次绿色低碳电力市场

“2060 碳中和”目标下的电力系统将发生根本性的改变。随着具有间歇性特征的可再生能源占比越来越高，需要进一步进行顶层设计与统筹协调，构建更具包容性和灵活性、促进绿色低碳发展的电力市场。

首先，应理顺电价关系，形成市场化定价机制。我国现行电价管理仍以政府定价为主，市场化改革不彻底带来价格信号的扭曲。一方面发电侧电价调整滞后，无法及时合理反映资源稀缺性和环境成本；另一方面需求侧电价缺乏弹性，峰谷价差难以凸显，无法与供给侧形成联动，不利于可再生能源消纳。通过有序放开发用电计划，赋予供需两端自主选择权，实现多方直接交易，在为用户提供更加经济优质电力保障的同时，可以进一步促进发电侧的低碳转型。同时，电力市场的改革需要与碳交易市场形成联动，理顺不同电源之间的比价关系，提高清洁低碳电源在电力市场中的竞争力。

其次，要打破电力市场省间壁垒，优化跨省协调运营方式，充分发挥地区间能源资源与负荷差异的互补。中国的可再生电力资源与负荷存在空间错配，而跨省输电存在省间政府博弈因素，主要通过一年一度的国家计划分配，省际之间市场的有效程度较低。应该对标美国、

欧洲等国的电力市场改革，建立更大范围跨区域的电力市场，以促进新能源消纳、保障电网稳定运行。

第三，要大力发展与电力市场相适应的辅助服务市场、容量市场，建立电力金融市场。可再生能源的高波动性将提高系统对于运行备用的需求，同时或带来更高的发电预测偏差，辅助服务越发重要。未来，也需要建立流动性强、自由度高的电力金融市场，交易电力衍生品合约（如电力期货合约、电力期权合约、电力差价合约、电力远期合约等），以强化价格发现功能，引导投资者做出合理的电力投资决策；同时提供风险管理工具，降低发电和售电公司所面临的由于电价波动带来的风险。

第四，要建立和完善绿色电力交易体系，让希望购买可再生能源电力的企业和个人能够比较便利地和以可承受的价格购买绿色电力，激励更多的企业和公众为了实现自身减排而购买绿电，进而为可再生能源发电提供更多的需求侧激励，形成支持可再生能源发展的良性循环。随着可再生能源政府补贴电价的逐渐退出，绿色电力消费侧的激励将可以发挥更重要的作用。

#### 4.1.3 制定战略性产业规划

除了创造一个更有效的市场机制，对战略性绿色低碳产业进行规划并引导投资也是实现碳中和的一个重要方面。碳中和目标完全可以和产业发展和升级、能源安全等战略目标有机结合起来。中国发展电动汽车就是一个很好的例子：国家政策带动电动汽车的发展，带来了多重效益。第一重效益是实现碳减排，而且缓解了燃油车交通带来的空气污染问题。第二重效益是培育了新兴产业，实现中国汽车产业弯道超车。中国在传统燃油车领域落后世界水平，很难进行赶超，但是电动车领域是新的领域，与世界处于同一起跑线，通过国家政策的扶持，中国电动车行业发展迅速，已经位于世界前列。第三重效益是减少石油进口依赖，有利于国家能源安全。第四重效益是带动了电池产业的高速发展，使其技术不断迭代和成熟，成本不断降低，同时支撑了储能产业的发展。第五重效益是中国通过电动车和电池产业的规模化制造，实现成本的降低，可以出口到世界各地，为世界其它国家的低碳发展提供了解决方案。

## 4.2 企业：开展碳核算，推动核心业务减碳

企业是碳排放的主体，也是落实碳中和目标的主体。目前，中国企业在应对气候变化和碳减排方面工作的总体上还处在初级阶段，绝大多数企业还不了解自身的碳排放情况，更没有具体的碳减排和碳中和的规划。国家宣布了碳中和目标之后，企业，尤其是大中型企业，就应该尽快制定碳中和的路线图并开展碳管理。

### 4.2.1 开展企业碳核算，夯实碳管理的基础

任何企业要管理和降低自身的碳排放，第一步就是要了解自身的排放情况。在一些重点行业和重点地区，中国开展了企业的碳盘查工作，但是绝大多数企业还没有开展这项工作。以下类别的企业需要更紧迫地开展碳排放的核算工作：

- 1) 纳入或将要纳入碳市场的企业。碳市场的交易基于企业碳排放数据的准确可得，随

着全国性碳市场的建立和不断扩大范围，更多的行业和企业将需要开展碳排放的核算和盘查工作。

- 2) 上市公司。上市公司因为接受大范围的投资者投资，因此需要公开碳排放情况，以及碳排放对企业未来发展及财务的影响，以利于投资者判断投资风险。国际上已经有气候变化相关的信息披露框架，如 Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD)，中国企业可以以此作为参照来制定自身的碳核算和披露计划。
- 3) 金融机构。金融机构为大量企业提供贷款和投资，在推动接受其资金的企业开展低碳、零碳活动方面处于十分有利的地位。一方面，金融机构可以通过自身的碳排放核算和碳中和活动，向企业提供示范；另一方面，金融机构可以通过对贷款和投资所支持项目的碳核算，并对减碳效果好的项目和企业提供优惠融资条件，来促进和倒逼企业加速碳减排。中国人民银行作为中国绿色金融的主管部门，正在研究建立金融机构环境和气候信息（包括碳足迹）的披露制度。
- 4) 国有企业。国有企业作为政府持股的企业，更应体现社会责任，需要更积极地参与应对气候变化，争取率先实现碳中和。
- 5) 国际供应链企业。处于国际供应链核心环节的企业（如大型电商平台、物流企业、大规模采购原材料、零部件的企业）可以将其碳减排的偏好有效地传到至供应链上的其他企业，尤其是供货企业。许多大型国际企业已经开始要求供应商开展碳排放的核算和减排工作。中国企业也将融入这个绿色供应链的大趋势。

除了企业层面的碳排放核算之外，企业所生产的产品的碳足迹也越来越受到关注。由于现代经济的分工和外包体系，产品的碳排放需要关注产品整个生命周期的碳排放。例如，英国 Carbon Trust（碳信托）和英国标准协会开发的 PAS2050 标准提供了产品碳足迹核算的一项国际标准。

#### 4.2.2 推动核心业务减排

在核算企业碳排放量的基础上，企业应制定减排的战略和措施，尤其是核心业务的减排计划。企业开展碳减排和实现碳中和的主要选项包括：

- 1) 设定碳减排目标。最好是将短期目标和中长期目标结合，最终达到碳中和的目标。
- 2) 减排措施研究和实施。一般包括：建筑、交通、工业等行业企业的节能措施、可再生能源替代措施、产品和服务的绿色低碳设计措施、低碳原材料替代措施等。
- 3) 行业和技术转型。煤炭、石油、煤电、煤化工、石化等行业在碳中和过程中面临最大的挑战。原因是其高碳排放的特点本质上是与碳中和相矛盾的。根据国际能源署等机构的研究，要实现《巴黎协定》要求的控制全球温升不超过 1.5 度的目标，全球必须设定碳排放总量的限额（碳预算），因此全球现存煤炭储量的 80%和石油储量的 70%可能将不会得到利用。除非碳捕集和利用封存（CCUS）技术以及直接碳移除技术变得可行且在成本上可以接受，这些行业都将因为碳中和而最终被淘汰。因此这

些行业的企业或者需要转型，放弃原来的主业，转型到低碳能源行业，或者就要大力研发碳捕集和利用封存技术及直接碳移除技术。但后者是否能够实现商业化运行还存在巨大的不确定性。

### 4.3 金融机构：创新绿色金融，大力投资绿色技术

碳中和的目标将带来巨大的绿色低碳投资需求。根据清华大学气候变化与可持续发展研究院的估算，实现 1.5°C 目标导向转型路径需累计新增投资约 138 万亿元人民币，超过每年 GDP 的 2.5%。我们的初步研究显示，这个估计仍然是十分保守的。这些绿色低碳投资的大部分需要依靠社会资本，因此，旨在动员和组织社会资本开展绿色投资的绿色金融体系在实现碳中和的过程中将发挥关键的作用。

我国的绿色金融体系在过去几年中已经取得了长足的进展，但与碳中和的目标相比仍然面临许多短板和不足（马骏 2021）。我们认为，未来的绿色金融体系需要在界定标准、披露要求、激励机制和产品创新等领域进一步与应对气候变化的要求接轨。另外，未来支持碳中和所要求的大量绿色科技的创新和运用，必须大力推动支持绿色技术的金融体系建设。

#### 4.3.1 以碳中和为目标完善绿色金融体系，推动产品创新

中国目前已有的绿色金融产品包括绿色信贷、绿色债券、绿色基金、绿色保险、绿色信托、绿色PPP等，其中绿色信贷和绿色债券是最主要的金融工具。下一阶段，围绕落实碳中和目标，满足低碳、零碳项目的巨大融资需求，金融机构应该进一步关注如下产品领域：

- 1) 银行：创新适合于清洁能源和绿色交通项目的产品和服务；推动开展绿色建筑融资创新试点，围绕星级建筑、可再生能源规模化应用、绿色建材等领域，探索贴标融资产品创新；积极发展能效信贷、绿色债券和绿色信贷资产证券化；探索服务小微企业、消费者和农业绿色化的产品和模式；探索支持能源和工业等行业绿色和低碳转型所需的金融产品和服务，比如转型贷款。
- 2) 绿色债券：发行政府绿色专项债、中小企业绿色集合债、气候债券、蓝色债券以及转型债券等创新绿债产品；开发与碳足迹挂钩的绿色债券；改善绿色债券市场流动性，吸引境外绿色投资者购买和持有相关债券产品。
- 3) 环境权益市场和融资：尽快将控排范围扩展到其他主要高耗能工业行业以及交通和建筑领域等，同时将农林行业作为自愿减排和碳汇开发的重点领域。开展环境权益抵质押融资，探索碳金融和碳衍生产品。
- 4) 绿色保险：大力开发和推广气候（巨灾）保险、绿色建筑保险、可再生能源保险、新能源汽车保险等创新型绿色金融产品。
- 5) 绿色基金：鼓励设立绿色基金和转型基金，支持绿色低碳产业的股权投资，满足能源和工业行业的转型融资需求。
- 6) 私募股权投资：鼓励创投基金孵化绿色低碳科技企业，支持股权投资基金开展绿色项目或企业并购重组。引导私募股权投资基金与区域性股权市场合作，为绿色资产

（企业）挂牌转让提供条件。

值得强调的是，要实现碳中和，不仅仅要支持纯绿的项目（如清洁能源、新建的绿色交通和绿色建筑项目等），也要支持化石能源企业向清洁能源转型、老旧建筑的绿色低碳改造、高碳工业企业的节能减排和减碳项目等。后者一般被称为转型经济活动，也需要大量融资和一定的激励机制。欧洲已经建立了一些转型基金，支持高碳企业向低碳转型，同时避免失业；也推出了一些转型债券，支持传统能源企业引入新能源项目，将废旧矿山改造为生态景区等。中国也应借鉴这些经验，在认定标准、披露要求、激励机制等方面探索建立支持转型融资的机制，支持金融机构推出转型债券、转型基金、转型保险等金融工具。

### 4.3.2 构建支持绿色科技的金融服务体系

我国目前的绿色金融业务以绿色贷款和绿色债券为主。而绿色科技研发和运用的一个特点是风险较高、项目回报的周期较长，这是银行和债券市场的风险偏好所难以容忍的。为了支持大量碳中和所要求的绿色低碳科技项目及成果转化，必须建立以股权投资（尤其是 PE、VC 基金）为主体，股票市场和投贷联动为支撑的金融服务体系。

早中期的绿色技术企业通常商业模式未完全成熟，技术路线不确定性高，项目风险较大，主要的外部融资来源通常是私募股权（PE）和风险投资（VC）。但国内专业化的绿色 PE/VC 基金管理机构参与度较低，是现阶段中国绿色技术投资的一大瓶颈。根据基金业协会的统计，目前在协会注册的、冠名为绿色的各类基金共有 700 多只，但绝大部分投资于绿色上市公司和使用成熟技术的绿色项目，很少有基金涉足绿色技术创新领域（马骏等，2020）。国内的 PE/VC 近年来投资热点集中于互联网、生物医药、金融等行业，在绿色技术企业方面的投资规模较为有限。

但随着中国绿色发展战略的深化，碳排放带来的外部性效应逐步显性化，比如碳价未来大幅上涨、碳税征收以及绿色金融激励政策的逐步到位，绿色项目有望在长期维度上体现出更高的回报，股权（PE/VC）投资的深度参与也有望为中国碳中和的实现发挥更大的作用。我们认为，要推动更多的股权投资支持绿色科技，应该从如下几个方面入手：

- 1) 多渠道增加向绿色低碳科技企业投资的股权（PE/VC）投资的中长期资金来源，鼓励保险公司、养老基金、政府产业引导基金等逐步增加对绿色科技投资的比例。全国社保和大型保险公司在这一领域的示范带头作用尤其重要。
- 2) 更大幅度地向国际资本开放绿色股权（PE/VC）投资市场，吸引更多的国际资本投向绿色（PE/VC）投资基金或绿色科技企业。
- 3) 鼓励绿色金融创新，通过“投贷联动”等机制，让银行等主流金融机构的资金更多地支持绿色股权（PE/VC）投资。
- 4) 为绿色科技企业提供担保。政府可以通过明确绿色技术产业属于政府性融资担保体系的支持范围，使绿色科技企业能够获得更多融资担保。
- 5) 设立地方绿色转型（或碳中和转型）发展创新平台（或加速器），基于地方的绿色转



型需求，引进并支持绿色科技企业的发展。

- 6) 上市公司和大型企业也可以设立绿色转型创新平台以及把绿色和低碳发展作为企业战略投资的重点方向。
- 7) 政府积极支持第三方服务机构开展绿色科技环境效益评估和绿色科技企业投资预评估，提供融资服务和加速服务，降低绿色（PE/VC）投资机构的投资风险和评估成本。

## 北京绿色金融与可持续发展研究简介

北京绿色金融与可持续发展研究院（以下称“研究院”）是为中国和全球绿色金融与可持续发展提供政策、市场、产品研究以及国际合作平台的智库。作为一家非盈利机构，研究院的目标是在绿色金融、自然资本融资、低碳发展和能源转型等领域成为有全球影响力的智库，为改善全球环境和应对气候变化做出实质性贡献。

研究院现下设五个研究中心，分别是绿色金融国际合作研究中心、能源与气候变化研究中心、ESG 投资研究中心、绿色科技研究与投资促进中心以及自然资源与投融资中心。研究院的重点工作领域包括：为中国有关部门和中央及地方政府、“一带一路”沿线国家以及国际组织提供绿色金融和低碳发展的政策研究与规划设计；为金融机构开发服务于环境改善和低碳发展的绿色金融产品、方法和分析工具；支持 GIP 秘书处北京办公室及其指导委员会、NGFS、IPSF 以及中英、中法、中欧绿色金融合作机制的工作；为发展中国的金融监管机构和银行、证券、资管等金融机构提供能力建设和交流平台；与英国碳信托（Carbon Trust）合作管理绿色科技研究与投资促进中心。

## 高瓴产业与创新研究院简介

高瓴产业与创新研究院是高瓴旗下基于宏观经济和产业与技术变革等要素进行分析研究的专业性研究机构，是高瓴自主、专业、深度研究能力的智识分享平台。依托高瓴在科技创新与科技赋能、气候变化与新能源、医疗健康、新基建、先进制造等领域产业生态的深入布局和研究，高瓴产业与创新研究院敏锐洞察和捕捉技术发展趋势和产业变革方向，为社会经济发展持续输出高品质研究成果。

高瓴成立于 2005 年，专注于长期结构性价值投资，发现价值，创造价值。作为中国人创立的国际化创新型投资机构，经历 16 年发展，高瓴已成为中国最大的创业投资和私募股权投资机构，依靠深度研究基因、高效资源配置，坚持重仓中国，积极推动原创创新与产业变革，持续创造经济、社会价值。高瓴受托管理资金主要来自于目光长远的国内外机构投资人，包括全球顶尖大学的捐赠基金、主权财富基金、养老基金及家族基金等。作为具有全球视野的长期价值投资者，高瓴以创造可持续的长期增长为目标，寻找最优秀的企业家和管理团队，通过科技创新、独立自主的研究、行业专长和世界级的运营及管理能力，协助企业不断提升战略及运营管理水平，充分挖掘并发挥企业家潜能，共同创造价值。高瓴资本的投资覆盖医疗健康、硬科技、企业服务、消费与零售、TMT、先进制造等领域。

报告作者：

梁红 高瓴产业与创新研究院院长

赵立建 北京绿色金融与可持续发展研究院绿色科技研究与投资促进中心主任

碳信托（Carbon Trust）中国区首席代表

张文艺 北京绿色金融与可持续发展研究院绿色科技研究与投资促进中心特邀研究员

杨 鹏 北京绿色金融与可持续发展研究院能源与气候变化研究中心副主任

马 骏 北京绿色金融与可持续发展研究院院长

致谢：

胡 敏 北京绿色金融与可持续发展研究院执行院长、能源与气候中心主任

吴宛忆 北京大学国家发展研究院硕士研究生

梁 焯 中国人民大学财政金融学院博士生

欧德赞 北京大学国家发展研究院硕士研究生

## 参考文献

- 昆山杜克大学环境研究中心. 中国碳定价顶层设计的经济学分析[R]. 北京: 能源基金会, 2019.
- 马骏,安国俊,刘嘉龙.构建支持绿色技术创新的金融服务体系[J].金融理论与实践,2020(05):1-8.
- 马骏. 以碳中和为目标完善绿色金融体系[N].金融时报, 2021年1月18日, <http://greenfinance.org.cn/displaynews.php?cid=77&id=3088>.
- 气候债券倡议组织, 中央结算公司中债研发中心. 中国绿色债券市场 2019 研究报告[R]. 北京: 气候债券倡议组织, 2020.
- 清华大学气候变化与可持续发展研究院, 中国长期低碳发展战略与转型路径研究[R].北京: 清华大学气候变化与可持续发展研究院, 2020.
- 人民银行. 中国绿色金融发展报告(2018)[R]. 北京: 人民银行, 2019.
- 世界钢铁协会. 钢铁统计年鉴(2020)[R]. 布鲁塞尔: 世界钢铁协会, 2020.
- 世界卫生组织, 气候变化与健康[N]. 2018年2月1日, <https://www.who.int/zh/news-room/factsheets/detail/climate-change-and-health>.
- 王海林, 何建坤. 交通部门CO<sub>2</sub> 排放、能源消费和交通服务量达峰规律研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2018,28 (2): 59-65.
- 王海林. 中国低碳交通转型机制与政策的模型仿真 [D]. 北京: 清华大学, 2017.
- 徐丽, 于贵瑞, 何念鹏. 1980s-2010s 中国陆地生态系统土壤碳储量的变化[J]. 地理学报, 2018, 73(11): 2150-2167.
- 薛露露, 靳雅娜, 禹如杰, 等. 中国道路交通2050年“净零”排放路径研究[R]. 工作论文, 北京: 世界资源研究所, 2019.
- 袁志逸,李振宇,康利平,谭晓雨,周新军,李晓津,李超,彭天铎,欧训民.中国交通部门低碳排放措施和路径研究综述[J/OL].气候变化研究进展:1-10[2020-12-31].
- 郑国光, 科学应对全球气候变暖提高粮食安全保障能力[N]. 中国气象局, 2015年4月21日, [http://www.cma.gov.cn/2011zwxx/2011zbgk/2011zjld/2011zjzgg/2011zjzggldjh/201504/t20150421\\_280019.html](http://www.cma.gov.cn/2011zwxx/2011zbgk/2011zjld/2011zjzgg/2011zjzggldjh/201504/t20150421_280019.html).
- 中国建筑节能协会能耗统计专委会. 中国建筑能耗研究报告(2019)[R]. 北京: 中国建筑节能协会, 2020.
- 邹骥, 柴麒敏, 陈济, 等. 碳市场顶层设计路线图[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(3): 217-221.
- Allen M, Antwi-Agyei P, Aragon-Durand F, et al. Technical Summary: 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[J]. 2019.
- Clarke-Sather A, Qu J, Wang Q, et al. Carbon inequality at the sub-national scale: A case study of provincial-level inequality in CO<sub>2</sub> emissions in China 1997–2007[J]. Energy Policy, 2011, 39(9): 5420-5428.
- Clarke-Sather, A, Qu, JS, Wang, Q, et al. Carbon inequality at the sub-national scale: A case study of provincial-level inequality in CO<sub>2</sub> emissions in China 1997-2007[J]. Energy Policy, 2011,

39 (9): 5420-5428.

Cook-Patton S C, Leavitt S M, Gibbs D, et al. Mapping carbon accumulation potential from global natural forest regrowth[J]. *Nature*, 2020, 585(7826): 545-550.

Diffenbaugh N S, Field C B. Changes in ecologically critical terrestrial climate conditions[J]. *Science*, 2013, 341(6145): 486-492.

Dudley B. BP statistical review of world energy[R]. BP Statistical Review, London, UK, 2018.

Energy Transitions Commission. China 2050: a fully developed rich zero-carbon economy[R]. Energy Transitions Commission, Beijing, 2020.

Fischetti, M. What's Inside? Meat vs. Meatless Burgers: A look at ingredients and nutrition[J]. *Scientific American*, 2020, 322, 2(74).

Goldman Sachs. Carbonomics: China net zero: The clean tech revolution [R]. 2021.

Goldman Sachs. The EU Green Deal Green Upside: Climate Champions' re-rating likely to continue [R]. 2020.

GSMA, The Enablement Effect [R]. London, 2019.

Haustein K, Allen M R, Forster P M, et al. A real-time global warming index[J]. *Scientific reports*, 2017, 7(1): 1-6.

Huang J, Shen J, Miao L. Carbon Emissions Trading and Sustainable Development in China: Empirical Analysis Based on the Coupling Coordination Degree Model[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(1): 89.

IEA, World Energy Outlook 2020[R]. Paris, 2020.

International Renewable Energy Agency. Renewables: 2020 analysis and forecast to 2025[J]. London, 2020.

J.P. Morgan. Roadmap to China Carbon Neutrality: Deep-dive analysis on key sectors and top stock ideas[R]. Hong Kong, 2020.

Lu X, McElroy M B. Global potential for wind-generated electricity[M]. *Wind Energy Engineering*. Academic Press, 2017: 51-73.

Mccollum D, Yang C. Achieving deep reductions in US transport greenhouse gas emissions: scenario analysis and policy implications [J]. *Energy Policy*, 2009, 37 (12): 5580-5596

Millar R J, Friedlingstein P. The utility of the historical record for assessing the transient climate response to cumulative emissions[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2018, 376(2119): 20160449.

Poore J, Nemecek T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers[J]. *Science*, 2018, 360(6392): 987-992.

Qi S, Zhou C, Li K, et al. The impact of a carbon trading pilot policy on the low-carbon international competitiveness of industry in China: An empirical analysis based on a DDD model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 281: 125361.

Shen J, Tang P, Zeng H. Does China's carbon emission trading reduce carbon emissions? Evidence from listed firms[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2020, 59: 120-129.

U.S. Environmental Protection Agency. Global Anthropogenic Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gas Emissions 1990-2020[R]. Washington, DC, 2020.

Watts N, Amann M, Arnell N, et al. The 2018 report of the Lancet Countdown on health and climate change: shaping the health of nations for centuries to come[J]. *The Lancet*, 2018, 392(10163): 2479-2514.

Yanan Zhao; Minjun Peng; Genglei Xia: Safety Evaluation of the Flashing-driven Natural Circulation IPWR Against Loss-of-Feedwater Accident [J]. Annals of Nuclear Energy, 2020(142).

Zhang L, Long R, Chen H, et al. A review of China's road traffic carbon emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 569-581.

Zhang Z. Carbon emissions trading in China: the evolution from pilots to a nationwide scheme[J]. Climate Policy, 2015, 15(sup1): S104-S126.

Zhao Y, Peng M, Xia G. Safety evaluation of the flashing-driven natural circulation IPWR against Loss-of-Feedwater accident[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 142: 107408.