



# 中国2050： 一个全面实现现代化国家的 零碳图景



# 目录

执行摘要	1
第一章:简介——全球背景和本报告的目的与框架	7
第二章:2050年的中国 - 一个达到中等发达国家水平的富裕经济体	10
第三章:工业部门脱碳	14
钢铁行业脱碳	15
背景:中国的钢铁生产与消费现状	15
钢铁消费展望以及生产路径转换	15
钢铁生产能效提升	16
钢铁生产过程脱碳	17
针对中国具体情况的经济性分析	18
水泥行业脱碳	19
背景:中国水泥生产与消费现状	19
大幅提高资源效率情景下的需求展望	20
水泥生产能效提升	21
水泥生产过程脱碳	22
针对中国具体情况的相对经济性分析	23
化工行业脱碳	24
背景:中国化工行业现状	24
充分提升利用效率和循环利用水平下的消费需求展望	25
化工行业能效提升	26
化工生产过程脱碳	27
成本经济性和中国情况的考虑	29



<b>第四章:交通部门脱碳</b>	<b>31</b>
背景:中国当前的交通运输活动水平与能源消费	31
需求展望和减缓需求增长的潜力	32
交通领域能源脱碳	34
<b>第五章:建筑部门脱碳</b>	<b>38</b>
背景:中国建筑部门能源消费现状	39
加速城市化之下,对“更好”建筑的需求展望	40
建筑能效提升	41
建筑部门完全脱碳	43
<b>第六章:能源需求对供给侧的影响</b>	<b>44</b>
电力和基于电力燃料需求的大幅增加	46
增长的生物质能需求及其重点领域	47
化石燃料的有限角色	47
相应的碳捕集、封存和利用需求	48
对一次能源的影响	48
<b>第七章:大规模的零碳电力及资源、技术和经济可行性</b>	<b>50</b>
背景:中国电力生产和消费现状	51
电力和基于电力的燃料需求的大幅增长	51
零碳情景下的发电结构	52
资源禀赋和技术可行性	53
灵活性及储能和需求侧响应的重要作用	55
成本经济性和基于中国情况的考虑	58
加速的投资和总投资成本	60
<b>第八章:氢能的重要作用</b>	<b>61</b>
2050年前不断增长的氢能需求	62
零碳氢气的多种生产路径	62
相对成本:电解法的竞争力将逐渐增强	64

<b>第九章: 生物质能源利用和碳捕集与封存</b>	<b>67</b>
<b>生物质能源: 资源有限, 利用应有侧重</b>	<b>68</b>
中国生物质可持续供地的潜力	68
生物质的优先利用领域	69
生物质的成本竞争力	70
<b>碳捕集与封存: 一种战略性选择, 将发挥一定的作用</b>	<b>71</b>
背景: 中国实施CCS的路径	71
有限但仍然关键的作用	71
碳捕集、利用和封存的技术可行性	72
碳捕集、运输和封存的成本	73
<b>第十章: 脱碳路径: 有限的成本, 重要的机遇</b>	<b>75</b>
单位二氧化碳减排成本	76
总体经济成本很小: 增长与投资	77
对生产者和消费者的成本: 关于“竞争力”挑战	79
技术发展、就业机会, 以及空气质量的改善	80
<b>第十一章: 推动转型的政策支撑</b>	<b>83</b>
制定清晰的2050目标	84
分部门、分步骤构建有力的政策体系	84



## 执行摘要

### 中国 2050——一个全面实现现代化国家的零碳图景

全球气候变化对全球人类社会构成重大威胁。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 2018 年 11 月发布的报告认为<sup>1</sup>, 为了避免极端危害, 世界必须将全球变暖幅度控制在 1.5 摄氏度以内。只有全球都在本世纪中叶实现温室气体净零排放, 才有可能实现这一目标。

全球能源转型委员会在其发布的两份报告——《更好的能源, 更大的繁荣》(2017) 及《可完成的任务》(2018)——中认为, 世界范围内现有的技术可以实现这一目标, 并且对经济发展和消费者生活水平的影响很小。这一观点甚至也适用于那些“难脱碳”的经济部门, 如重工业和重型/长途运输行业。这些行业的脱碳成本可以被控制在 GDP 总量的 0.6% 以下, 对面向消费者的商品价格也仅有极小的影响。

与其他国家一样, 中国也将受到气候变化的威胁。中国在经济高速发展的过程中也成为了全球主要温室气体排放国。从人均排放水平看, 中国与富裕的欧洲发达经济体相当, 虽然只有美国极高人均排放水平的 45%。不过中国的绝对规模使其成为了全球最大的温室气体排放国, 每年 98 亿吨的二氧化碳排放占全球排放总量的 28%。因此, 无论对于整个世界还是对于中国自身而言, 中国探索到本世纪中叶实现净零碳排放的战略路径意义重大。

本报告显示, 实现这一目标在技术上和经济上都是可行的。考虑到中国的高储蓄率和投资率, 中国有实现该目标所需投资能力, 并且对 2050 年中国人均 GDP 的影响也将是非常有限的。追求到 2050 年实现零碳排放将刺激投资和创新, 从而进一步加速零碳发展, 这不仅不会阻碍中国实现到 2050 年实现现代化强国这一目标, 还将大幅改善地方空气质量, 并为中国在多个行业的技术领先地位创造巨大机遇。

<sup>1</sup> IPCC 指出, 2018 年, 全球升温幅度 1.5 摄氏度。

要实现净零碳排放，需要发电部门的完全脱碳，并大规模扩大电力使用，在尽可能多的经济部门实现电气化，还需要氢的生产和使用增加到三倍以上，以及在增加生物能开发和碳捕集、利用与封存方面发挥重要但有限的作用。中国的自然资源、制造业水平、储蓄和投资率使这些不同的技术路线有可能实现并推动零碳经济发展，同时保证中国的交通、建筑供暖和制冷等以能源为基础的服务部门继续快速发展。

实现零碳经济的关键部门行动包括：

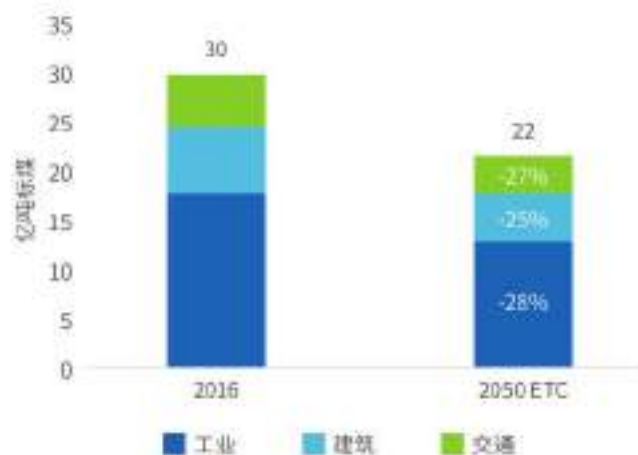
- 路面运输（公路和铁路服务）全面电气化，同时支持将运输使用量增加到至少三倍。在轻型车领域（汽车和城市货运），电动车将很快在经济性上超过内燃机车，而氢燃料电池电动车（FCEV）将最终主导重型公路运输。中国庞大的高铁网络和广泛的地铁系统将在一定程度上帮助控制道路交通的增长，并对国内航空交通增长有一定的抑制作用。所有的铁路出行都可在远早于2050年前完成电气化。因为电动发动机与内燃机相比具有更高的能效，这些地面运输部门的电气化将导致终端能源需求的下降。同时，由于电动车固有的长期成本优势，这些行业的脱碳将增加而不是降低人均GDP水平。

- 使用生物燃料、合成燃料、氢能或氨来推动长途国际航空和海运部门脱碳，同时在短途运输中使用电池电动氢能和混合动力等选项。这些燃料可能比现有的化石燃料成本更高，意味着国际运费和机票价格可能会更高。然而，随着时间的推移，技术进步和规模经济可能会推动成本的显著下降。

- 向循环经济转型，并显著提高关键材料的利用率和回收率，包括钢铁、水泥、肥料和塑料等。随着中国人口趋于稳定并开始下降，以及城市化进程接近尾声，支撑建筑业的初级钢铁和水泥生产总需求将会不可避免地出现下降。因此，产自回收废钢的钢铁产量占总产量的比例将从现在的不到10%上升到60%。在水泥方面，回收的潜力比较有限，但改进的建筑设计 and 材料质量可以使总需求量在照常发展情景基础上减少近50%。通过以可行方式大幅提高肥料利用率，肥料需求可减少三分之一。随着物理和化学回收技术的广泛发展，中国52%的塑料用量可能来自回收塑料。

- 利用电气化、氢能、碳捕集和封存以及生物能源来实现重工业领域的完全脱碳，包括钢铁、水泥和化工（合成氨、甲醇、高价值化学品即HVC）等部门。直接电气化最适用于中低温度要求的工业领域，而氢能和生物能可用于满足高温

本研究认为，中国到2050年的能耗总量为22亿吨标煤（64EJ），比2016年水平低近30%。



图表A: 中国各部门终端能源需求（工业、建筑和交通）

数据来源：中国统计年鉴；能源转型委员会/落基山研究所项目组

要求。氢气还可以作为钢铁的还原剂和化学生产的原料。生物质可能成为另一种重要的化工原料。碳捕集与封存将在处理工业过程碳排放和剩余的化石燃料相关碳排放方面发挥作用。

- 更广泛地采用先进热泵技术和最先进的建筑保温材料，以零碳方式为住宅和办公室提供供暖和制冷，并在建筑部门的有关领域发挥长距离工业废热运输和生物质的作用。到2050年，中国建筑领域的能效将显著提高，以确保在服务水平不断提高的情况下经济有效地使用能源。到那时，75%的建筑供暖和制冷将由电力提供。由于热泵技术固有的能效优势，电气化与热泵相结合能够降低终端能源需求。即使在今天，热泵技术都可以将每千瓦时电力输入转变为4千瓦时热力输出，并且这一“性能系数（COP）”随着时间的推移可能还会得到进一步的大幅提高。

钢铁和水泥需求的降低、更多的资源（尤其是塑料资源）循环利用以及因地面交通和建筑供热领域的电气化实现的相关能效进步，可以推动中国人均GDP和生活质量标准达到当前水平的三倍，同时将终端能源需求总量从当今的30亿

吨标煤（88EJ或24万亿千瓦时）降低到2050年的22亿吨标煤（64EJ或17.8万亿千瓦时）。其中，工业总终端能源需求将经历最大降幅（30%），但其在2050年占终端能源需求总量的比例仍将高达60%（图表A）。

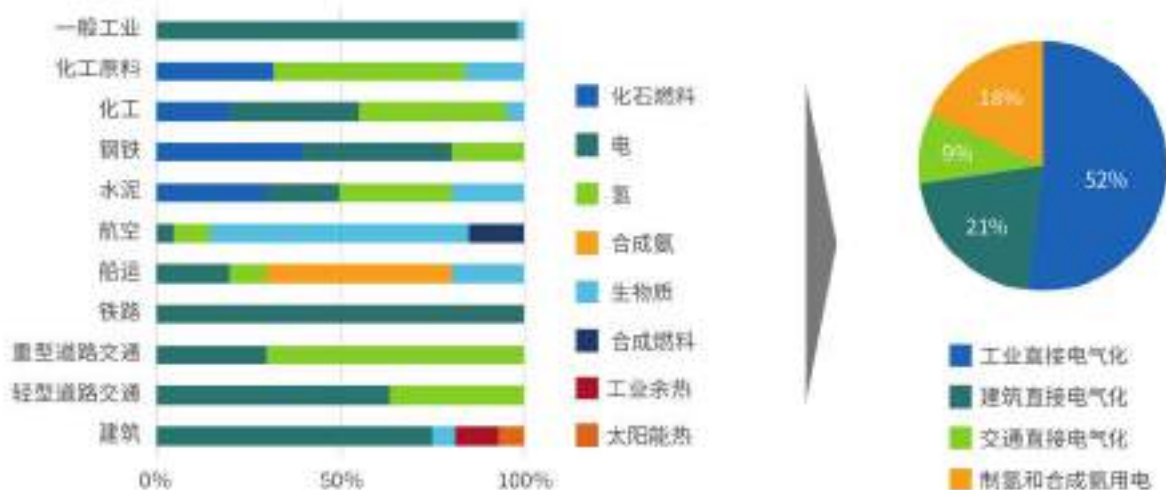
这些能源需求可以通过四个方面的零碳技术措施来实现：电力 - 完全利用可再生能源、核能等非化石能源发电实现零碳电力；氢能 - 利用零碳电力电解水制氢，也可以用氢制氨用于终端能源消费；生物能 - 可作为零碳燃料和原料使用；以及在与碳捕集、利用与封存技术相结合的前提下，继续使用一些化石燃料。图表B列出了2050年可用于各经济部门的不同能源组合。

电力将在其中扮演最重要的角色，可以直接使用，也可以用来生产氢气、氨气或其他合成燃料。总的来说，要实现零碳经济，中国需要将发电量从目前的7万亿千瓦时增加到2050年的15万亿千瓦时左右（图表C）。此外，氢气的用量需要从目前的每年2500万吨增加到8100万吨以上。

要通过零碳方式生产这些电力，将需要2500GW光伏、

以零碳方式满足这些能源需求意味着能源供给组合的重大转变，包括大量的直接或间接电气化，生物质和CCS技术的应用，以及化石燃料使用的大幅缩减。

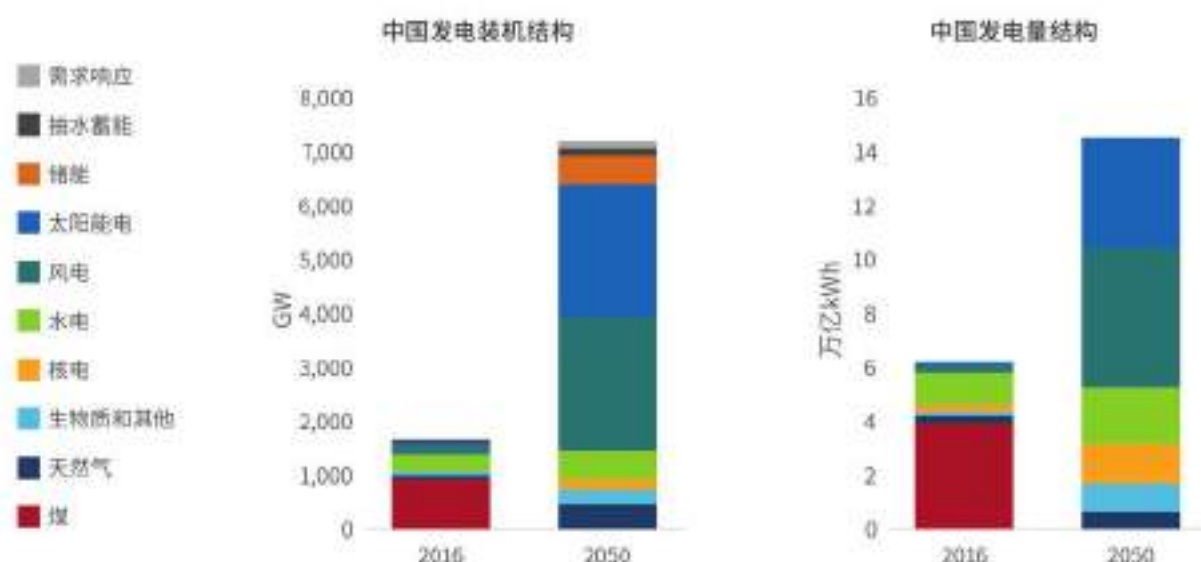
2050年的总发电量将达到近15万亿度。



图B：中国2050年各部门终端能源消耗和能源载体组合

数据来源：能源转型委员会/落基山研究所项目组

要实现零碳经济,总计需要将发电量从2016年的6万亿千瓦时增加到2050年的15万亿千瓦时左右。



图表C: 中国的发电装机量和发电组合

数据来源: 中国统计年鉴; 能源转型委员会/落基山研究所项目组

2400GW 风电、230GW 核电和 550GW 水电装机。考虑到中国的风能、太阳能和水力资源,以及已经确定的适合建造核电站的沿海地区数量,这一组合在技术上是可行的。

考虑到太阳能资源丰富的地区面积占国土面积的三分之二,中国将需要投入不到 1% 的土地面积来提供所需的 2500GW 太阳能发电装机;而中国的风能资源估计可达 3400GW 陆上装机和 500GW 海上装机,已超过了所需的容量。

建设所需的可再生发电装机需要大幅提高年度投资力度(光伏投资达到现在的两倍,风电投资达到现在的 3-4 倍),但投资的财务成本仍不到中国 GDP 的 0.4%。这在经济上显然是可行的,因为中国目前的投资占 GDP 的 40% 以上,其中一些投资浪费在了空置的房地产上,随着人口数量趋于稳定和城市化进程接近完成,房地产和非能源基础设施投资需求将不断下降。

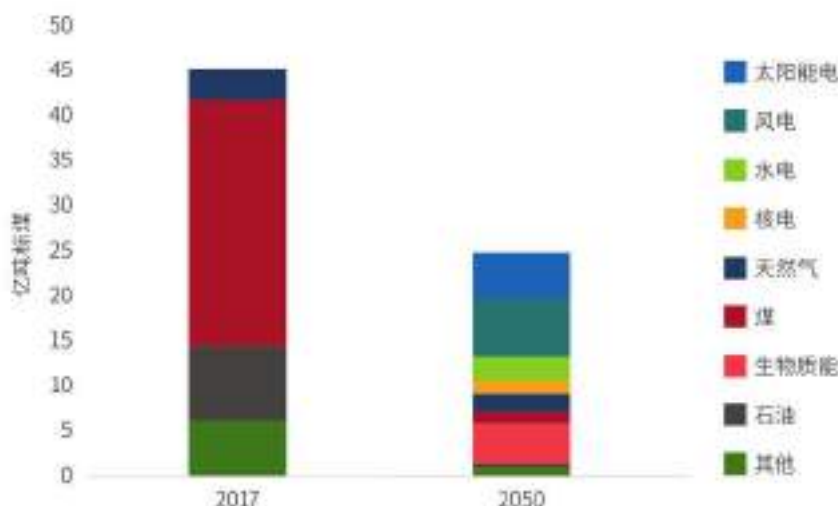
如图表 C 所示,电力系统中 75% 以上的电力将来自于随天气条件变化的风能和太阳能资源,但通过部署储能技术规模化应用、加大输电基础设施投入、推进需求侧管理等措施

提升电力系统灵活性实现电网的供需平衡。此外,140GW 的抽水蓄能容量还可以提供更长期的季节性补充。随着成本的持续下降,电池储能的容量将会从目前微不足道的水平增长到 2050 年的 510GW。利用过剩电力生产氢气可以作为一种有效的需求响应机制,提供至少 100GW 的容量。只要具备适当的软件系统和到位的市场激励措施,工业和住宅部门的各种需求响应技术都可以发挥关键作用。以生物质或化石能源为燃料并采用碳捕集技术的火电厂每年将只运行少量时间以提供短期的备用电力,其作用将十分有限但仍然非常关键。

除了电力和氢能,实现零碳经济还需要每年生产大约 4.4 亿吨标煤 (13EJ) 的生物能源(当前每年仅 3400 万吨标煤或 1 EJ),以可持续的方式实现这些生物能的供应将是一个重大挑战,但理论上,中国有能力开发 4.0-8.5 亿吨标煤 (12-25 EJ) 可持续生物能源。鉴于生物能源资源的稀缺,中国的生物能需要在那些没有其他脱碳选择的行业优先应用,例如,航空可能是其中的一个优先应用领域,但货运不足。

在一些工业过程中还需要应用碳捕集技术,并将二氧化碳

一次能源结构将发生巨大变化,其中化石燃料需求降幅超过90%,风能、太阳能和生物质能将成为主要能源。



图D: 中国一次能源需求,按能源品种划分

数据来源: 中国统计年鉴; 能源转型委员会/落基山研究所项目组

运输和地质封存,或运用二氧化碳混凝土固化等碳利用技术永久性储存所捕集的二氧化碳。这一需求虽然有限,但仍然十分关键。在考虑250公里内进行碳排放源汇匹配的情况下,中国碳封存能力远远超过每年储存10亿吨的需求量。

总之,中国一次能源需求总量可能会从目前的45亿吨标煤(132 EJ)下降到2050年的25亿吨标煤(73 EJ),降幅达到45%。一次能源需求的降幅大于终端能源需求的降幅(30%),这在很大程度上是由于避免了当今火力发电系统所涉及的能源损失。在能源需求总量降低的同时,能源的来源还将发生巨大的转变,化石燃料的需求将下降90%以上,而非化石能源的需求将增加3.4倍(图D)。

技术和经济的不断发展将持续推动形成脱碳路线与能源供给方式之间的平衡。但本文展示的情景表明,以极低的成本实现零排放是可能的,对2050年中国人均GDP和生活水平的影响不太可能超过1%。

如果考虑对零碳排放目标的承诺对技术进步和成本下降的促进作用,这一成本甚至会更低甚至是负值。但本文的计

算并未考虑这种因素。

如要实现这一可行的零碳经济路径,必须制定清晰的目标,并推行强有力的公共政策。首先,国家层面明确的零碳排放目标将提供指导行动和制定路径框架的方向,引导国有企业和私营部门进行科学投资战略决策。长期目标必须和短期目标以及投资计划相结合,例如与即将出台的国家、地方和部门等层面“十四五”相关规划和落实规划的一系列政策措施及机制安排,具体政策领域包括:

- 推动在发电、输电、配电和储能等领域制定加大零碳电力系统建设力度的政策。
- 加快全国碳市场的建设,以支持全社会尤其是重工业领域的脱碳。
- 设立相关法律法规以推动路面交通和建筑供暖的全面电气化,同时不断加强相关标准以提升建筑能效水平。
- 继续深入发展循环经济,强化法律法规体系和政策激励

机制建设,尤其在塑料行业。

- 建立支持技术进步尤其是早期阶段技术突破的相关政策,以助推零碳技术和产业生态体系的构建。

中国的政治体制和经济发展水平使中国具备“集中力量办大事”的体制、资金和技术优势,能够在确定了长期战略目标后制定和实施长期、大规模投资和持续行动,这为中国推动到2050年实现零碳排放奠定了坚实基础。事实上,中国在实现零碳排放的过程中,也将持续不断的挖掘经济增长和环境改善的潜力,为其实现2050年其他经济社会发展目标作出贡献。



**第一章**  
简介——  
全球背景和本报告的  
目的与框架

巴黎气候协定承诺，全世界需要把全球变暖幅度在工业化前水平基础上控制在远低于2摄氏度的范围内，且应将其尽可能控制在1.5摄氏度范围内。人类活动导致的全球变暖已在多个领域造成了重大的负面影响。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）的最新报告指出，全球变暖幅度达到2摄氏度将会带来更严重的后果，包括对水资源、土地利用、粮食生产和人类健康的严重负面影响。因此，它敦促世界各国致力于将全球变暖幅度控制在1.5摄氏度以内。

能源转型委员会（ETC）是一个全球性联盟，其成员包括来自能源领域的各部门公司和机构，包括能源生产商、能源用户、设备供应商、投资者、非盈利组织和学术组织等。能源转型委员会的理事会成员名单在本文的第II页，他们均支持将全球变暖幅度控制在理想的1.5摄氏度以内，至少也要低于2摄氏度。

为了实现这一气候目标，世界经济需要在本世纪中叶左右达到净零碳排放。ETC认为，具体的目标应该是所有完全发达的经济体到2050年实现净零碳排放，发展中国家到2060年实现净零碳排放。我们在两部重要报告中阐述了如何实现这一目标：

- 在2017年4月发布的《更好的能源，更大的繁荣》报告中，我们描述了全球经济脱碳的总体路径，并特别指出，建立一个可再生能源占比高达85%，且成本可与化石燃料发电完全竞争的电力系统是可行的。世界将可以速度更快、成本更低地建设零碳电力系统。
- 在2018年12月发布的《可完成的任务》报告中，我们指出，对重工业（尤其是钢铁、水泥和石化部门）、长途运输（卡车运输、航空和航运）等所谓“难脱碳”经济部门进行脱碳也是可行的。

这两份报告共同表明，打造零碳经济不仅是技术可行的，而且如果现在实施强有力的政策，到本世纪中叶实现这一目标对经济增长和消费者生活水平的影响将是非常小的（约

为1%）。今年12月，ETC将综合这两份报告的发现，发布全球零碳经济发展路径的最新概述。

ETC目前正在世界各地开展工作，以发现和推动所需的具体公共政策行动及私人投资，以实现到本世纪中叶实现净零碳排放的可行目标。我们在欧盟和印度有大量的工作正在进行，在澳大利亚发起了新的倡议，并在全球范围内与各个“难脱碳”部门合作展开具体倡议行动。ETC于今年4月开始了在中国的工作，致力于将中国打造成脱碳行动中的重要成员，并为中国能源转型相关议题做出重大贡献。

中国的碳排放量在2003年和2006年先后超过欧盟和美国，已成为全球最大的二氧化碳排放国。2018年，中国二氧化碳排放总量达92亿吨，占全球总量的28%。当然，这也与中国人口众多且在过去30年经济高速增长有关。经济的持续增长推动了中国人民生活水平的不断提升并使得推动中国成为了一个主要净出口大国。这也使得中国人均消费碳排放量<sup>2</sup>增长到与欧盟相当，且已是美国的45%。中国到2050年将实现现代化目标，经济发展达到中等发达国家水平，应和所有发达经济体一样从现在开始探索净零碳排放路径，否则全球将气候变暖幅度控制在2摄氏度以下的目标可能无法实现，更不用说实现1.5摄氏度温升控制目标。

中国政府已在《巴黎协定》国家自主贡献框架内做出承诺，将降低中国经济增长的碳强度，并确保碳排放量在2030年左右达峰。目前，更具雄心的目标正在讨论当中，更多行动也正在展开。我们希望中国能够基于全球2摄氏度温升控制目标的要求，制定更加雄心勃勃且技术和经济上均可以实现的2050年低碳发展战略目标。

因此，ETC决定描绘一幅中国2050年实现净零碳排放的可能图景，以此作为我们在中国工作的开始。为此，我们与我们的成员单位落基山研究所进行了密切的合作，共同开展了此项研究。

这份报告——《中国2050：一个全面实现现代化国家的零

2. 根据联合国气候变化框架公约生产碳排放计算方法学，一国的碳排放是在该国境内生产中产生的所有排放，不论所生产的产品和提供的服务是否在别国消费或对外出口；另一种基于消费端的碳排放计算，则在生产端排放的基础上扣除出口排放，增加进口排放所得结果。



碳愿景》——提出了关键的结论：中国在2050年实现净零碳排在技术上和经济上都是可行的，并且这对国家发展和消费者生活水平产生的经济成本非常有限，同时中国也具备有利条件从净零碳排放转型中获得更多的技术竞争优势。但是，第十一章中也会指出，净零碳排放转型的实现不能缺少强力的政策支持。

本报告仅反映了6个月的工作，并涵盖了中国经济的所有领域。因此，报告还无法对中国经济各个具体部门的技术减排选择和成本进行详细分析。为了使我们能够迅速地进行全面的分析，我们大量借鉴了以上提及的ETC全球报告的分析方法和相关结论，但将侧重点特别关注于那些中国的具体情况可能使全球性结论不再适用的领域。特别是：

- 我们假设，全球适用的相关脱碳技术方案也适用于中国；中国的减排成本，以及不同选择之间的相对成本驱动因素将与其它国家类似；并且用于实现脱碳的整体技术组合（电力、氢能、生物能源和碳捕集）在中国与其他国家大体相似。

- 但我们在以下方面特别关注了中国独有的因素：(1) 能源需求可能发生的变化：比如基础设施投资以及与之相关的钢铁和水泥生产对中国经济的更大影响；(2) 现有的产业基础：例如煤炭作为化工原料在中国比在其他国家更加重要的作用；(3) 中国的可用自然资源：无论是风能、太阳能还是水力资源、生物能源或碳封存能力；(4) 现有政策和趋势：例如，中国在公路运输电气化方面取得的快速进展，以及高速铁路更加重要的作用。

因此，我们关于中国2050年实现零碳排放愿景的描绘是基于对中国独特国家特点的分析。

但是，读者也需要了解到本报告并未涵盖一些内容。本报告的重点是到2050年达到目标的可行性，但是我们并没有对几十年的转型路径进行描述，也没有明确提出何时需要完成什么内容才能实现2050年的目标的时间表。我们的分析使我们相信，中国可以通过有力的政策来达到最终目的。在能源转型委员会的下一阶段中国区工作中，我们将进一步重点关注如何实现目标以及短期内需要采取行动。

报告按照以下次序进行了论述：

- 综述（第二章）中国经济在人口和结构的变化形势下将如何发展，进而在2050年成为一个全面实现现代化的发达经济体。

- 在第三到五章分别对工业、交通和建筑部门未来能源需求进行分析，并在第六章中总结中国2050年的整体能源需求。

- 第七至九章分析为了满足零碳能源需求而大规模增加零碳电力和氢能供应，并显著提高生物能源产量和碳封存能力的技术和经济可行性。

- 第十章综合分析全面脱碳对经济增长、投资和消费者生活水平的经济影响。

- 第十一章总结为推动迈向零碳经济所需的主要公共政策和技术发展。

能源转型委员会和落基山研究所期待与各政府部门、企业和公共政策专家讨论报告的结论及其分析。



## 第二章

2050年的中国——  
一个达到中等发达国家水平的  
富裕经济体



目前,中国的人均GDP仅为美国的25% (按购买力平价计算,或按市场汇率计算则为15%),但将在2050年达到目前的发达国家水平。



图表2-1: 各国人均GDP对比

数据来源: IMF (2019), 世界经济展望数据库; UNESDA (2015), 世界人口展望: 2015年修订版

中国过去30年的经济表现令世人瞩目,在2018年之前的30年里,中国实际GDP年均增长率高达9.5%。但如图表2-1所示,如果按购买力平价 (PPP) 计算,中国的人均GDP仍仅为美国水平的25% (按市场汇率MER计算则为15%),中国仍有巨大的快速增长潜力,有望在生产率和生活水平方面赶上发达经济体。

面向未来,中国已公布的长期发展目标,包括到2020年全面建成小康社会,到2050年建成富强民主文明和谐美丽的社会主义现代化强国。根据清华大学中国经济研究中心的研究<sup>3</sup>,上述目标意味着:

- 到2035年基本实现社会主义现代化,人均GDP达到美国水平的60%。
- 到2050年全面实现现代化,人均GDP达到美国水平的70%。考虑到中国人口是美国人口的4倍,这意味着中国经济到那时将达到美国的大约2.5-3倍。

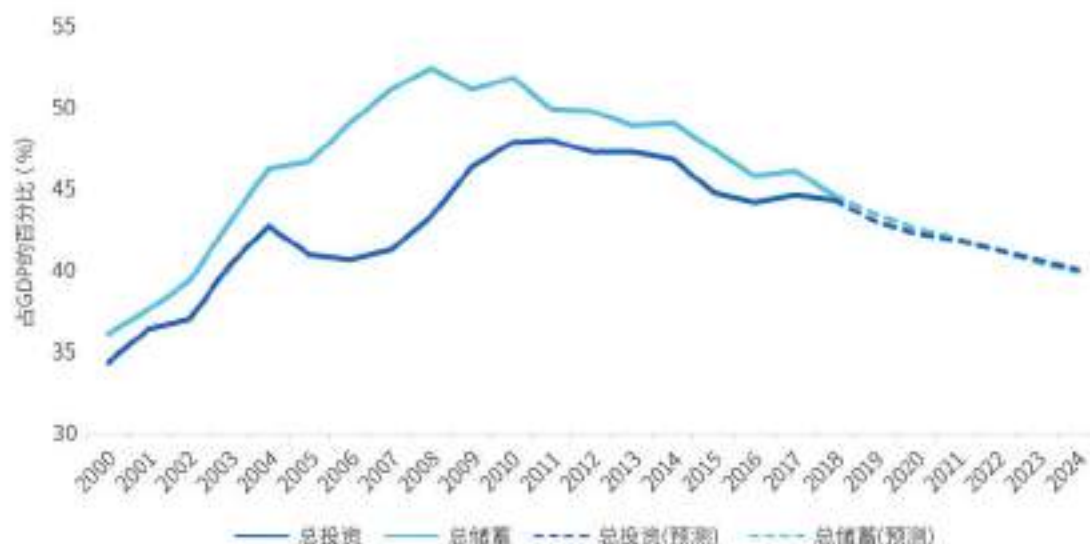
中国正全力以赴朝以上目标奋进,由此带来的中国生活水平和消费支出的增长,将对未来能源密集型产品和服务的需求产生重要影响。公路、铁路、航空运输需求将快速增长,中国人民在建筑供暖和制冷等领域追求与富有发达国家相同的舒适度水平。这些变化对能源需求的影响将在第四章和第五章中加以讨论。

然而,在生产和投资方面,中国经济也将不可避免地发生重大变化,包括在某些方面会减少对能源的需求,特别是:

- 考虑到独生子女政策的长期影响,中国人口很可能从目前约14.2亿的基础上在2020年代末达到约14.4亿的峰值,然后预计将缓慢下降至2050年的13.6亿<sup>4</sup>。这将不可避免地意味着,对新建筑和基础设施的长期投资将大幅下降,就像日本过去30年发生的情况一样。
- 未来10至15年,中国的城镇化进程将继续为这些投资提供支持。但到2030年代中期,这一进程将接近完成。城市人口占比从2010年的50%,到2019年已达到60% (比2020

3.清华大学中国经济研究中心主任李稻葵2017年12月在《瞭望中国》第373期撰文阐述上述分析结论。

过去五年,中国的总投资量大幅下降,投资和储蓄的差距有所减少,消费支出在GDP的百分比有所上升。



图表2-2: 2000年到2020年中国国家储蓄与投资占GDP的比例

注: 虚线代表预测数据

数据来源: IMF, (2019), 世界经济展望数据库

年的目标提前1年),最迟到2030年将达到70%,并在2030年代期间达到发达国家75-80%的一般水平。随着城市化步伐放缓,钢铁和水泥需求将不可避免地出现下降。

- 与此同时,由于中国经济在全球经济总量中所占的比例越来越大,中国维持巨额经常项目盈余的能力(制造业产能远远超过国内需求)将不可避免地下降。相对较小的经济体可以运行占GDP百分比非常大的经常盈余,但洲际规模的经济体是不可能这样的。

作为对这些长期结构性变化的反应,中国经济在过去的五年里已经见证了投资率的实质性下降,储蓄和投资之间的差距(等于经常账户盈余<sup>4</sup>)越来越小,以及消费支出占GDP比例的不断增加(图表2-2),但由于投资率仍然超过GDP的40%,远高于大多数发展中国家,更不用说发达经济体,这一数字在未来几十年仍有很大的下降潜力。

决定中国未来能源需求总量和结构的一个关键因素将是中国经济继续向工业倾斜的程度。如图表2-3所示,工业(包括重工业、一般制造业和建筑业)在2016年占中国经济增值总量的39.9%,远远高于德国、日本等出口导向型经济体28%-29%的份额,更不用说英国和美国的18%-20%。

多项预测认为,中国工业占经济总量份额将在2050年前继续保持在38%的水平左右,而对能源需求的预测有时也反映了这一假设。但有充分的理由相信,鉴于以下因素,这一比例将会降至甚至低于日本和德国的水平:

- 没有理由相信,中国2050年的国内需求会比今天的日本和德国更倾向于制造业和建筑业(而非服务业)。
- 作为一个洲际规模的经济体,中国不可能将经常账户盈余占GDP的比例维持在德国目前8%的水平。

4. 经常账户包括的产品贸易收支、服务贸易收支及转移收支等。经常账户也可用储蓄与投资的差额进行计算。贸易顺差减小是一国的经常账户盈余减小的主要原因。



目前,中国工业在经济中的占比较高,到2050年,中国很可能仍将以工业为主,且工业占比很可能高于目前的日本和德国的水平。



图表2-3: 不同国家各部门增值占GDP的比例

注: 根据世界银行数据库,“其他”指除农业、工业和服务业以外的,和它们共同构成100%总量的其他部分。  
数据来源: 2017年度数据来自世界银行数据库; 2050年中国数据来自中国发改委能源研究所预测

因此,长期趋势必然是工业占GDP的比例显著下降。从短期和中期来看,如果“一带一路”倡议行动的基础设施投资得到中国重工业出口的支持,这种趋势可能会被推迟。但一旦中国成为一个完全发达的富裕经济体,其经济结构将几乎不可避免地会与当前富裕的发达国家相似。

这种基础设施投资不可避免的下降将对钢铁和水泥等重工业部门的能源需求产生重要影响,这些内容将在第三章中加以讨论。一般制造业将继续增长,以满足日益增长的消费需求,但将日益侧重于更高附加值的产品,这些产品的生产往往会对电力有更高需求,而不是某些重工业对高温热力的需求。信息和通信技术也将在中国经济中扮演越来越重要的角色,从而再次产生巨大的额外电力需求。

以下的三章将对本章所述的整体趋势对各部门能源需求的影响加以详细解读。



### 第三章 工业部门脱碳

## 钢铁行业脱碳

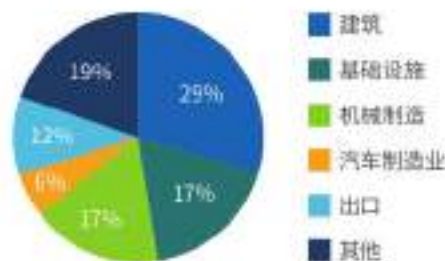
在中国，钢铁行业碳排放占2017年全国二氧化碳排放总量的15%左右<sup>51</sup>。随着中国的城市化进程完成，对建筑钢材的需求也将会下降，而且更多的钢材将来自于废钢循环利用，因此钢铁行业碳排放的比例将随之减小。此外，在现有高炉生产技术的基础上，钢铁生产效率还有潜力得到进一步提高。但为了实现钢铁部门的零碳排放，中国还需要在长流程钢铁生产中采用更彻底的脱碳技术。

### 背景：中国的钢铁生产与消费现状

中国是世界上最大的钢铁生产国和消费国。世界钢铁协会的数据显示，2015年中国钢铁产量为8.04亿吨，消费量为6.72亿吨，分别占全球总量的48%和45%。中国2015年出口钢铁1.12亿吨，进口1500万吨，净出口9700万吨。

城市化和工业化推动了中国钢铁消费的快速增长。中国近一半（48%）的钢材用于建筑或铁路和公路等基础设施。制造业钢铁用量中汽车行业占最大份额（图表3-1）。

中国的钢铁产量与消费量在历史上呈同步增长趋势，从1990年的6600万吨（仅占全球总量的9%）增长到目前的8亿多吨。中国钢铁行业90%以上的产能是采用高炉（BOF）技术生产的长流程钢。使用废钢和电力的电炉技术（EAF，目前，建筑和基础设施建设占到中国钢铁消费量的50%。



图表3-1：中国2015年各行业钢铁用量比例

数据来源：中国钢铁工业协会；国际钢铁协会

也称短流程钢）仅占生产总量的9%，并主要用于生产高端特殊钢制品。

相比于美国钢铁总产量中的70%来自电炉技术路线，中国的钢铁低回收率反映了一个处于早期发展阶段国家的典型状况——人均钢铁存量仍在增长，废钢供应相对于需求非常有限。

### 钢铁消费展望以及生产路径转换

发达经济体的人均钢铁存量常常会稳定在10至15吨左右的水平，达到饱和（图表3-2）。尽管增长迅速，中国的人均钢铁存量尚未达到这一水平。到2019年，中国的人均钢铁存量预计约为8吨/人。

以目前的生产和消费增长速度，中国将在10-15年内达到一般发达国家水平。随着中国的城镇化率按照规划速度，从目前的60%上升到2030年的70%左右，用于房地产和新基础设施建设的建筑用钢材需求将会必然下降。

我们的模型显示，到2050年，中国的钢铁年均消费量可降至4.75亿吨左右，与国际能源署（IEA）报告中的“2°C情景”的估计相一致。此外，我们预计未来将有越来越多的钢材来自循环利用废钢的短流程生产；随着越来越多的建筑、汽车和其他设备达到使用年限，废钢的供应预计将以每年10%的速度增长，废钢价格也很可能将会大幅下降。

我们估计到2050年，短流程钢将占中国钢铁总产量的60%。这一目标需要政策支持，以确保最大限度地实现高质量钢铁的回收利用<sup>52</sup>。按照这一预测，中国初级钢年产量将可能从目前的7.6亿吨下降到2050年的1.9亿吨。

然而，对中国2050年总钢铁产量和长流程钢铁产量的一些其他研究，有得出更高的估计值。主要的不确定性存在于：

- 中国未来的直接钢铁出口量。我们的基本情景假设2050

51. 目前，中国钢铁回收面临的主要挑战是缺乏有效的回收、分拣和配送体系，导致废钢成本过高。

中国的人均钢铁存量目前为8吨左右,并将在2030-2035年达到饱和。

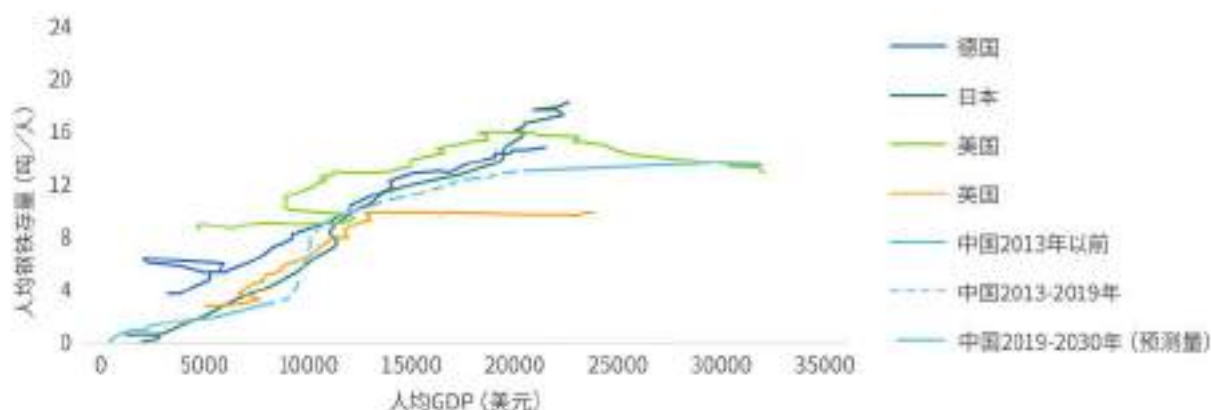


图3-2: 各国人均钢铁存量

数据来源: Bleischwitz, R. et al. (2018) Extrapolation or saturation - Revisiting growth patterns, development stages and decoupling. Global Environmental Change, 48:86-96; 能源转型委员会/洛基山研究所项目组

年的出口量保持在7000万吨的当前水平<sup>6</sup>,但未来,中国钢铁企业可能通过增加钢铁出口,特别是支持发展中国家的基础设施建设等方面,在弥补国内钢铁需求量的降低;

- 中国未来钢铁间接出口(包含在制品中的钢铁)量,特别是中国是否可以成为汽车,公共汽车和卡车的主要出口国。

考虑到这些不确定性,我们还考虑了一种高需求情景对能源需求(以及氢气或CCS容量)的影响,即2050年中国钢铁总产量为7亿吨,长流程钢产量为2.8亿吨。如果长流程钢铁生产中化石能源路线仍然占到一半(另一半为氢气直接还原铁路线),则CCS需求也将增加9500万吨二氧化碳。

在ETC中国工作的下一阶段,我们将更详细地探讨不同的情况,并适当调整我们的预测<sup>7</sup>。

## 钢铁生产能效提升

2015年,中国钢铁行业消费占煤炭消费总量的18%,占能

源消费总量的15%(6.4亿吨标煤),2015年,钢铁生产的单位能耗为每吨钢铁573千克标煤。

近年来,中国钢铁生产的能源效率已经得到显著提高,根据十三五计划,到2020年钢铁单位能耗将进一步降低到每吨钢铁560千克标煤。

中国钢铁行业还有一定的节能技术推广、能效提高的空间。如余热回收(TRT等技术)、高级干熄焦技术(CDQ)等仍然可以帮助落后钢铁企业提高能效。其他新兴技术还包括喷射式碱性氧气转炉技术(Jet BOF),全球数据显示,这项技术可以减少60%的电力消耗、37%的焦炉煤气消耗和16%的煤炭消耗。

持续地推动钢铁行业能效提高工作是至关重要的,但是考虑到中国整体已经达到了相当高的能效水平,进一步的节能改进不太可能使吨钢能耗和排放减少15%~20%以上。要实现净零碳排放,中国还需要采用全新的初级钢铁生产方法。

6. 2018年,中国钢铁出口量为6900万吨。

7. 一些行业分析师还认为,如今中国的钢铁生产基准可能会高于目前使用的8亿吨(来自世界钢铁协会的估计数据),其原因是观察到中国对于过去几年的钢铁总量会进行向上修正。在下一阶段的工作中,我们将与中国的钢铁专家紧密合作,以确保对生产基准有更充分的了解。

## 钢铁生产过程脱碳

由于电炉钢生产的碳强度远低于高炉生产，因此电炉钢生产份额的增加将自动造成钢铁生产平均碳强度的降低。即使按照目前中国电力系统的碳排放强度（596克CO<sub>2</sub>/千瓦时）计算，电炉钢生产路线的碳排放强度也只有每吨钢铁0.5吨CO<sub>2</sub>左右，而高炉钢生产路线的碳排放强度约为每吨钢铁2.1吨CO<sub>2</sub>。随着电力系统的脱碳，电炉钢生产路径的碳排放强度将可逐渐下降至零（图表3-3）。

因此，支持中国钢铁脱碳的最主要政策将是支持零碳的可再生能源和核能的发电量扩大。在本报告的零碳情景下，到2050年，电炉短流程钢产量将达到3.33亿吨，这将带来0.16万亿千瓦时的零碳电力需求<sup>[34]</sup>。

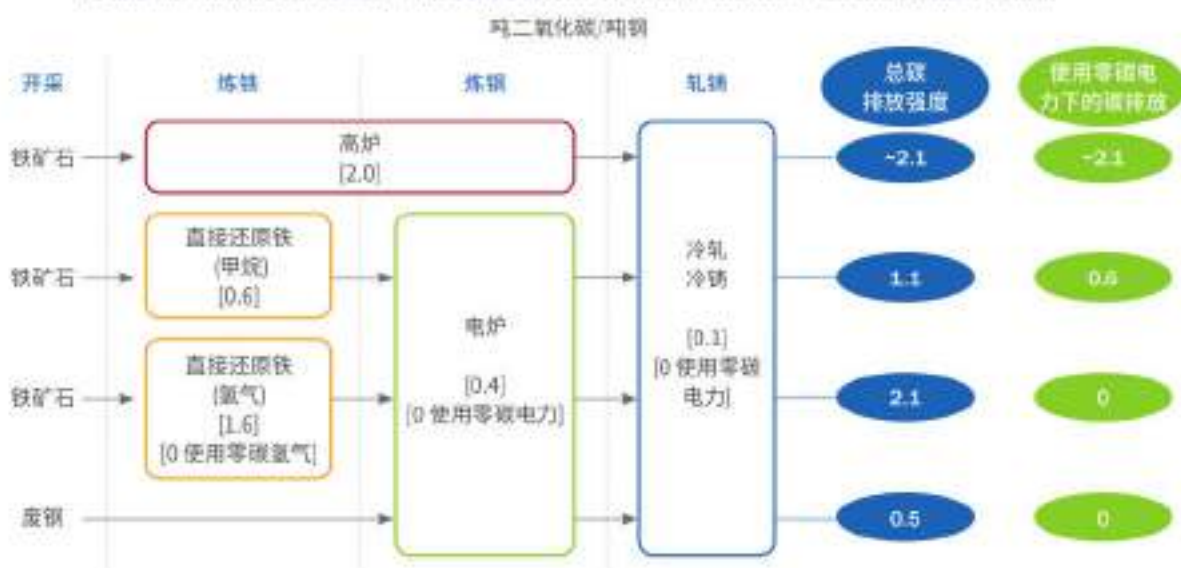
并且，通过政策支持和适当的市场设计来支持废料回收系统发展也至关重要。许多研究预测，到2050年，中国每年将有3-4亿吨的废钢供应，这足以满足我们模型中短流程钢的需求。

除此之外，对于剩余的长流程钢铁生产，中国还可采用以下的脱碳技术路线：

**基于氢气的直接还原铁（DRI）：**如果氢气本身以零碳的方式生产，无论是通过电解水，还是通过将碳捕集和封存（CCS）技术应用于甲烷蒸汽重整或煤化工制氢，氢气直接还原铁都可以帮助实现钢铁生产的零碳化。瑞典SSAB钢铁公司已经开始氢气直接还原铁（DRI）试点工厂建设，并计划在2040年代初达到零碳钢铁生产的目标。德国Salzgitter钢铁公司也在进行试点工程，全球最大的钢铁公司——安赛乐米塔尔（Arcelor Mittal）公司也在考虑这项技术。在中国，2019年，宝武集团开始与中核集团及清华大学在炼钢用氢方面展开合作，并将与力拓（Rio Tinto）集团在低碳冶金创新方面开始合作。

**碳捕集与封存（CCS）：**碳捕集技术可应用于处理高炉尾气中的二氧化碳。一些技术，如印度塔塔钢铁（Tata Steel）公司正在开发的HIsarna技术（使用粉煤并回收顶部高浓度二氧化碳的反应炉技术）可以配合更高效的CCS应用，提

废钢回收利用和零碳电力支持下的直接还原铁（DRI）技术可以帮助中国实现钢铁生产脱碳。



图表3-3: 主要钢铁生产技术路线的温室气体排放强度

数据来源: 能源转型委员会/洛基山研究所项目组

高钢铁生产节能和减碳的效率。这一技术路线的可行性将取决于CCS技术的可行容量和位置。

**电解法炼钢：**通过电解直接还原炼铁也是一种技术可行的路线，并且从长期来看，其经济将进一步提升。安塞乐米塔尔（Arcelor Mittal）、波士顿金属研究所（Boston Metal）等钢铁公司或研究机构已经开始开发这项炼铁技术。

**使用生物质：**在高炉内使用木炭而不是焦煤作为燃料和还原剂也是一种可能的路线。目前，巴西正在使用这种技术，当地丰富的木材资源使得技术经济性较好。如果木炭是由森林再生供给的，该技术就将是零碳的。因此，该技术的可行性取决于当地可用的生物质供应。另外，从技术上讲，生物质可包括废弃物、城市垃圾、农业秸秆等形式，可用于生产生物煤、生物燃料和沼气，并在钢铁脱碳中发挥作用。

## 针对中国具体情况的经济性分析

氢气直接还原铁（DRI）技术与碳捕集（CCS）技术的相对成本在很大程度上取决于用于制氢的零碳电力价格。如图表3-4所示，根据ETC的全球模型，对于新建项目，当零碳电力的价格低于每兆瓦时45美元时，氢气直接还原铁制钢将比配合CCS技术的成本更低；对于已建项目，电力的价格则须达到每兆瓦时25美元以下，氢气直接还原铁制钢才更具成本竞争力。

而中国目前高炉钢铁生产力巨大，已建高炉设备的碳捕集改造更具有参考价值。因而，短期来看，CCS改造项目更具有经济性，但是如本文第七章所述，在2050年前，中国丰富的可再生能源资源有望使得可再生电力价格达到每兆瓦时25美元以下，推动氢气直接还原铁的应用。

图表3-4的成本比较预测，将影响未来技术发展趋势：

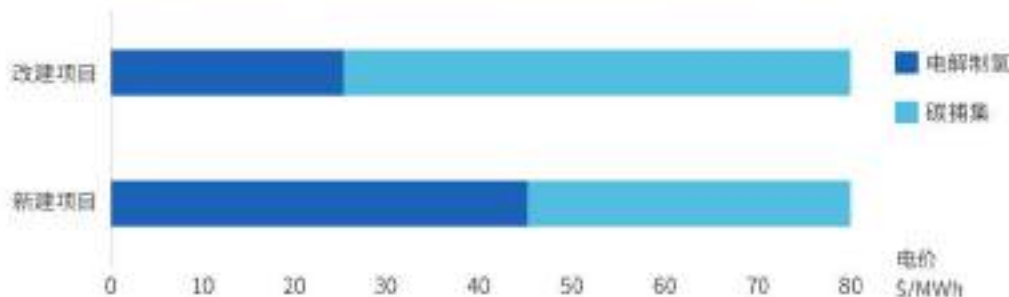
- 氢气直接还原铁路线的成本预测，是基于电解水制氢设备的成本会在未来由于大规模生产的规模效应和学习曲线效应的影响，从目前的每千瓦650美元降低至每千瓦200美元的假设得出的。电解槽价格的显著降低将减少制氢成本中的固定投资成本，使得电解槽大规模应用成为可能。在这种情景下，电解水制氢将可以实现尽可能利用弃风弃光等极便宜的电力，尽管运行小时数较低，但仍可实现经济性。

- 对于碳捕集路线，由于需要根据个案进行具体的工程设计，且批量生产的潜力也较小，我们的基本情景假设认为其成本不太可能在未来得到大降幅。

但是相反，在未来也存在着氢气成本下降速度不会太快，且CCS成本大大降低的可能性。这意味着钢铁生产脱碳的最佳途径将更可能是CCS技术，而氢直接还原铁技术的作用将减小。

考虑到中国有限的生物质资源，以及航空等其他较缺乏其

电解制氢路线相对于碳捕集路线的成本竞争力很大程度上取决于电价。



图表3-4：钢铁生产的供给侧脱碳成本

数据来源：麦肯锡公司（2018）《工业部门的脱碳：下一个前沿》报告



他脱碳路径的部门对生物质资源的需求,我们认为使用生物质的炼钢在中国应用的可行性不高。

电解法炼钢技术与碳捕集技术相比,经济性也取决于零碳电力的价格。

在钢铁产量的基础情景下,到2050年,如果中国使用氢气直接还原铁(DRI)技术满足所有1.9亿吨长流程钢的生产需求,将带来0.675万亿千瓦时的零碳电力需求。如果所有的初级钢生产都采用CCS技术实现零碳排放,那么所需的二氧化碳封存容量将达到每年4亿吨左右。但是,在中国2050年钢铁总产量7亿吨、长流程钢产量2.8亿吨的高需求情景下,完全采用氢气直接还原铁实现零碳排放需要消费约1万亿千瓦时零碳电力,完全采用CCS技术路线实现零碳排放需要每年封存二氧化碳6亿吨左右。

在以下的章节中,我们将使用钢铁总需求为4.75亿吨、短流程钢铁生产占60%、长流程钢铁生产中采用氢气直接还原铁和CCS技术各占50%的假设。值得强调的是,即使在高需求情景下,中国仍然有足够的可再生能源、碳捕集容量来支持钢铁生产的零碳化。

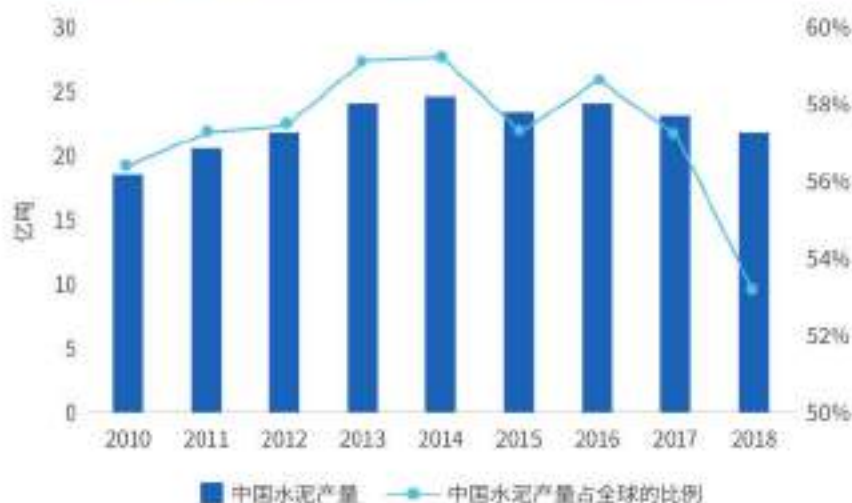
## 水泥行业脱碳

2017年,中国水泥行业二氧化碳排放达12亿吨,约占全球水泥行业排放总量的一半。与其他国家相比,中国的人均水泥存量和消费量已经处于较高水平,但由于基础设施建设热潮接近尾声,中国未来的水泥产量和消费量将呈下降趋势。虽然中国的水泥行业能效水平已处于世界领先地位,但仍有进一步提升的空间。但若要实现水泥行业的完全脱碳,还需要采取更积极的措施,如在生产中使用零碳热源等。另外,CCS技术将成为水泥行业中不可或缺的脱碳手段,以消除以石灰石为原料的生产工艺过程中的二氧化碳排放。

### 背景:中国水泥生产与消费现状

中国的水泥产量高于世界其他所有国家的总和,2018年占世界水泥总产量的53%。经过多年的增长,中国的水泥产量在2014年达到了24.8亿吨的峰值,然后在2016年下降到24.0亿吨(尽管从2015年到2016年略有增长)。此后,在2018年进一步下降到21.8亿吨(图表3-5)<sup>9</sup>。中国的水泥产量是世界水泥产量排名第二的印度的10倍左右<sup>10</sup>。与生产成本相比,水泥的运输成本较高,因此,进出口水泥的量很少。2018年,中

中国的水泥产量高于世界其他所有国家的总和,2018年占世界水泥总产量的53%。



图表3-5:2010-2018年中国水泥产量

数据来源:中国统计年鉴;Statista数据库

国进口水泥量为1360万吨,出口水泥仅有460万吨<sup>17</sup>。

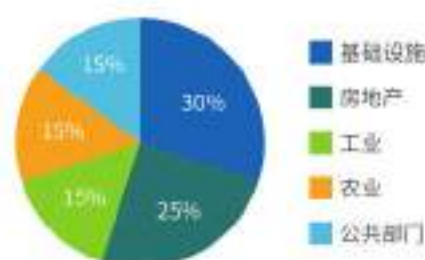
快速的城市化和工业化是中国建筑热潮的主要推动因素,进而催生了中国的大量水泥需求。从2010年到2014,中国水泥的消费量增长达33%。基础设施和房地产行业的水泥需求占总需求的比例达55% (图表3-6)。

假设将中国的水泥行业视为一个经济体,它的二氧化碳排放量将位列全球第三。其二氧化碳排放不仅来自于将水泥窑加热到1600摄氏度以上的燃料燃烧,也来自于由于石灰石分解的生产过程本身的二氧化碳排放,且后者的二氧化碳排放约占总量的60%。除了这两项碳排放来源,还有一小部分二氧化碳排放来自磨碎原料和熟料所需的电力。

## 大幅提高资源效率情景下的需求展望

中国水泥消费总量在2014年达到峰值,达峰时的人均水泥消费量高达1.8吨/人,而超出了主要发达国家达峰时的人均水泥消费量的范围,即从英国的0.4吨/人(1973年)到韩国的1.3吨/人(1997年)(图表3-7)。此后,中国的人均水泥消费量呈下降趋势。事实上,中国工业和信息化部已经出台了淘汰水泥落后产能的指导意见,目标是淘汰至少5亿吨的低

基础设施和房地产行业的水泥需求占总需求的比例达55%。



图表3-6: 中国水泥消费来源

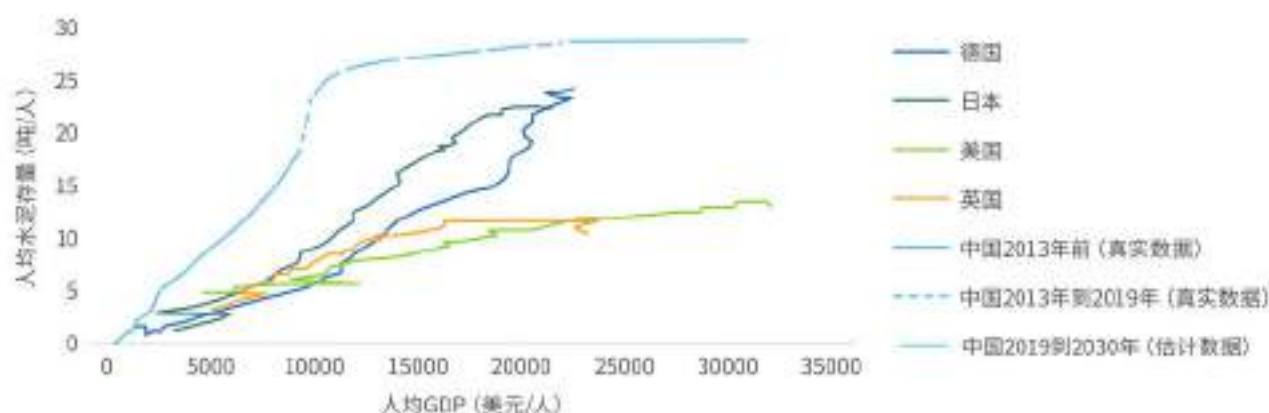
数据来源: 中国产业信息网公开资料整理

图表3-7: 各国人均水泥消费量峰值

国家	峰值年	人均水泥消费量峰值 (吨)
中国	2014	1.81
美国	1974	0.41
英国	1973	0.40
日本	1960	0.83
韩国	1997	1.28

数据来源: Dianqing Xu, Ying Liu. (2018). Understanding China's Overcapacity.

主要发达国家的人均水泥存量均不超过25吨,中国已经超过了这一水平。



图表3-8: 各国人均水泥存量

数据来源: Raimund Bleischwitz et al. (2019). "Extrapolation or Saturation – Revisiting Growth Patterns, Development Stages and Decoupling," Global Environmental Change, 48: 86–96; 能源转型委员会/洛基山研究所课题组

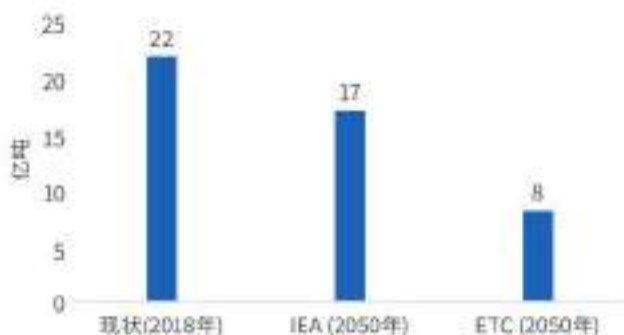
品位产能。同时，国际能源署也预计，在2°C情景下，中国的水泥消费量将从目前的约24亿吨下降到2050年的17亿吨。

结合中国目前的人均水泥存量 and 发达国家的对比情况，中国未来的水泥生产和消费量将很可能大幅下降。发达国家的人均水泥存量均不超过25吨，而中国在2017年就已经超过了这一水平（图表3-8）。即便中国的水泥人均年消费量立即从目前的21.8亿吨降至国际能源署2°C情景中的2050年水平，即1.2吨/人，也意味着到2050年，中国的人均水泥存量将达到50吨，这是任何其他发达国家都从未达到的极高水平。

随着基础设施建设浪潮的退去，混凝土和水泥的消费量将下降。同时，需求减量的潜力还可通过以下几方面进一步挖掘：

- 增长建筑的使用年限。目前，中国建筑的使用寿命极短，只有25-30年，与美国的80年、法国的85年和英国的130年存在较大差距<sup>19</sup>。
- 降低建筑的空置率。目前，较高的建筑空置率（20%-30%，而发达国家仅为5%-10%）<sup>20</sup>也造成了相当大的水泥浪费。通过更加合理的城市规划和管理，中国的建设规模可以减少20%<sup>21</sup>。
- 使用高性能混凝土，提高资源使用效率。通过提高混凝土

国际能源署预计中国2050年水泥产量为17亿吨，而本研究认为，该产量可进一步下降至8亿吨。



图表3-9：中国目前和2050年的水泥产量

数据来源：中国统计年鉴；IEA (2017), Energy Technology Perspectives 2017；能源转型委员会/惠基山研究所项目组

强度，根据不同设计结构，可节省10%-40%混凝土。通过适当掺加粉煤灰、钢渣粉、沸石粉、硅粉等材料，还可以进一步提升混凝土质量，从而降低水泥的需求量。高性能混凝土实际上更具成本吸引力。在相同强度水平下，每立方米高性能混凝土的成本比普通混凝土低4.7-8.4美元<sup>22</sup>。

- 使用其他替代方案。包括正交层板胶合木（Cross-Laminated Timber, CLT）的利用，以及具有更轻碳足迹的水泥材料的使用等。建筑材料使用规范等相关的政策将有利于这些替代方案的推广。

综上所述，我们预计中国的水泥年产量到2050年将下降到8亿吨（图表3-9）。

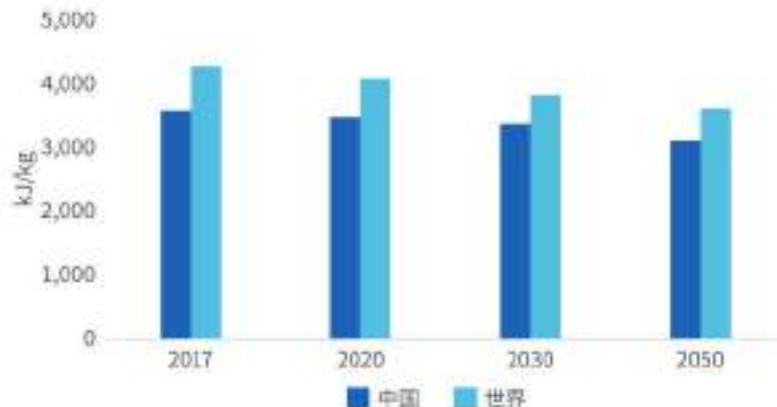
## 水泥生产能效提升

经过40年的持续技术创新，中国已经成为了世界水泥生产领域高能效的先行者。大多数水泥厂都配备了先进的干法窑炉，而不是能耗较大的湿法窑炉。目前，中国水泥熟料的热耗强度为每千克3600千焦，比世界平均水平低15%（图3-10），生产每吨水泥的电耗强度也低于每吨水泥90千瓦时（图3-11），中国水泥行业的目标是在2050年前，能效水平进一步提升13%-16%<sup>23</sup>。

余热发电领域也存在着巨大的潜力。目前，中国已有80%的水泥窑利用余热发电，总装机达4950兆瓦，每年可回收350亿千瓦时电，相应地减少了260万吨二氧化碳排放，几乎是水泥工业间接排放的1/3，且余热发电的效率还有进一步提升的空间。来自丹麦的工程公司FLSmidth已取得突破性的进展，每吨熟料发电量可达40千瓦时。中国的目标是到2050年实现每吨熟料发电56-60千瓦时，达到目前水平的两倍，领先于世界其他国家。中国已制定了到2035年实现熟料生产完全不依赖外部电力的目标。与此同时，现有的商业模式（如：DBB模式、EPC模式、BOT模式等）可大大推动这一目标的实现。

使用替代能源协同生产来替代化石燃料是另一个能效提升的途径。目前，德国和荷兰的热替代率（TSR）<sup>24</sup>分别高

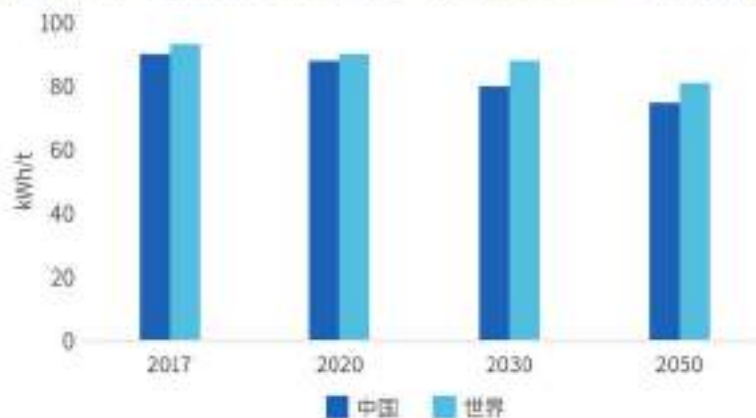
中国已经是世界水泥生产高能效的先行者,水泥熟料热耗强度只有世界平均水平的约85%,并且到2050年还可进一步下降13.6%。



图表3-10: 中国和世界水泥熟料热耗能源强度

数据来源: 高长明 (2019), 2050年世界及中国水泥工业发展预测与展望

中国水泥生产电耗强度已经低于世界平均水平,并且到2050年还将再降低16.7%。



图表3-11: 中国和世界水泥生产电耗强度

数据来源: 高长明 (2019), 2050年世界及中国水泥工业发展预测与展望

达70%和90%。主要发达国家现在的目标是实现100%的TSR。尽管起点TSR只有1.2%,但中国已承诺到2020年实现15%的TSR,并且有研究认为中国TSR到2050年可以达到70%<sup>87</sup>。中国还有可能达到更高的TSR值,与TSR值达到90-100%的水泥行业强国水平相当。然而,值得关注的是,如果协同处置使用的替代能源本身就是来自化石燃料——例如废轮胎、机油、塑料——那么这就不能算作零碳路径。

## 水泥生产过程脱碳

尽管提高效率可以节约能源并减少二氧化碳排放,但中国仍需要采取进一步措施来实现水泥行业全面脱碳。这些选择包括: 使用零碳能源提供热力输入、用CCS技术处理化石燃料燃烧和生产过程碳排放,以及使用石灰石或熟料以外的替代原料等。

87. TSR衡量的是使用其他能源替代化石能源作为热源的比例。



**用零碳能源提供热力输入** 用沼气或生物质代替化石燃料是一项已成熟的技术，只需要对水泥窑进行小幅改造即可。在需要高温的工艺中，可以用氢气作为燃料。然而，这将需要重新设计窑炉并大范围改造现有场地。当电力本身来自零碳资源时，热力输入的直接电气化也是一种可行的脱碳方式。然而，电炉水泥生产尚未商业化，建设所需的投资成本依然较高。

**碳捕集与封存 (CCS)** 从化学过程看，水泥生产过程不可避免地会释放二氧化碳（每吨硅酸盐水泥大约330千克二氧化碳），CCS将是水泥脱碳的必要手段。对水泥窑排放的废气采用CCS技术可以避免燃料燃烧和石灰石煅烧产生的二氧化碳排放。采取技术手段可以增加捕集二氧化碳的浓度，进而降低捕集成本。其中一个很好的案例是采用创新的窑炉设计（被称为LEILAC技术），可将燃料燃烧的废气（二氧化碳含量低）与煅烧废气（接近纯二氧化碳）分离。富氧燃烧也是一种技术选择。不过，CCS技术要考虑源汇匹配，最好用于靠近碳封存地点的水泥厂。

**使用替代原料** 使用替代矿物代替石灰石或熟料有助于减少化学工艺中固有的二氧化碳排放。粉煤灰和矿渣等替代品已被广泛使用，然而，在零碳经济中，由于依赖转炉的钢铁生产和燃煤电厂的减少，粉煤灰和矿渣等的产量也将下降。其他如氧化镁和碱/地质聚合物粘合剂等原料都有很大潜力，但相关技术仍在测试当中，同时也可能受当地矿产资源的限制。

## 针对中国具体情况的相对经济性分析

能源转型委员会(ETC)的合作伙伴麦肯锡公司的分析认为，使用生物质供热配合CCS技术来处理水泥行业工艺排放可能是在任何条件下成本均最低的水泥生产脱碳路径。然而，对于改建项目来说，当零碳电力成本低于每兆瓦时22美元，或对于新建项目来说，零碳电力成本低于每兆瓦时42美元，那么用电气化供热配合CCS技术处理水泥工艺排放可以成为比应用CCS技术捕捉供热和工艺两方面排放更好的选择（图表3-12）。

考虑到中国已经有大量的水泥厂，改建项目方案在中国可能更具有适用性。在可再生能源资源丰富的地区，每兆瓦时零碳电价可能低至22美元。

在现有技术条件下，将生物质燃料用于水泥生产是最有可能实现中国该行业脱碳的途径。它不仅最具经济可行性，而且得到了最多的政策支持。2016年，中国工业和信息化部联合6个部委宣布开展水泥窑协同处置生活垃圾的试点工作。这也有助于处置中国每年增长8%-10%的城市生活垃圾。但是，生物质的使用会受到资源短缺和当地可行性的限制，且生物质资源应优先用于航空等领域的脱碳，在水泥行业使用生物质资源的空间有限。因此其他解决方案需发挥更大的作用。

如报告第九章所述，中国具有足够的碳捕集和封存潜力来满足处理剩余碳排放的需求。对于水泥行业而言，在90%的捕获率下，碳捕集、运输和封存的全链条成本大致在每吨二氧化碳40美元到100美元间<sup>16</sup>。

成本最低的生产过程脱碳路径取决于电价



图表3-12: 水泥零碳生产路径的成本

数据来源: 麦肯锡公司 (2018)《工业部门的脱碳: 下一个前沿》报告

## 化工行业脱碳

2016年,中国的石化和化工行业能源消耗占工业能耗总量的28%<sup>[13]</sup>,且根据国际能源署在其2°C情景中的预测,该比例在2050年仍将高达23%<sup>[16]</sup>。通过发展循环经济,提升相关材料 and 产品利用效率以及回收率,可大大挖掘化工行业对原材料需求减量的潜力。然而,要实现完全脱碳,还须依赖于零碳生产路线。对于中国的化工行业而言,煤炭既是主要的能源,也是主要的原料之一。本研究认为,到2050年,以煤炭为基础的生产路线仍将在中国化工行业中发挥重要作用,但其规模要远小于现有规划水平,而且需要采用CCS技术。此外,Power-to-X(将电力储存在X物质,包括氢、甲烷、甲醇等各种储能物质)和基于生物质的新兴生产路线也将得到较程度的发展,从而也将扮演重要的角色。

### 背景: 中国化工行业现状

化工行业所生产的产品无处不在,已成为现代社会不可或缺的组成部分。因此,该部门也成为了整个经济中增长最快的能源消费来源之一。2016年,化工行业能耗占中国工业能耗总量的28%,而国际能源署的2°C情景预计该比例在2050年仍将高达23%。

在化工行业的数千种产品中,仅氨、甲醇和HVC(高价值化学品,包括烯烃和芳烃)三大类基础化工产品的终端能耗总量就占到该行业的四分之三左右<sup>[17]</sup>。与此同时,这些基础化工产品还是生产整个化工行业各类产品的关键组分。

中国是世界上最大的合成氨生产国,2017年产量达4900万吨,其中大部分用于生产化肥。从2010年到2015年,中国化肥消费量呈现年均增长2.4%的趋势,并在2015年达到4980万吨的峰值后,到2016年降至4780万吨。其中,绝大部分化肥供国内消费。中国的合成氨年出口量也仅有几千吨,进口量约几万吨,和产量相比,进出口量均非常小。

塑料是甲醇和HVC需求的主要来源。甲醇是生产多种HVC的中间原料。作为多种化工产品生产过程的反应物(尤其是烯烃),HVC被广泛用于生产塑料等聚合物。在大多数国

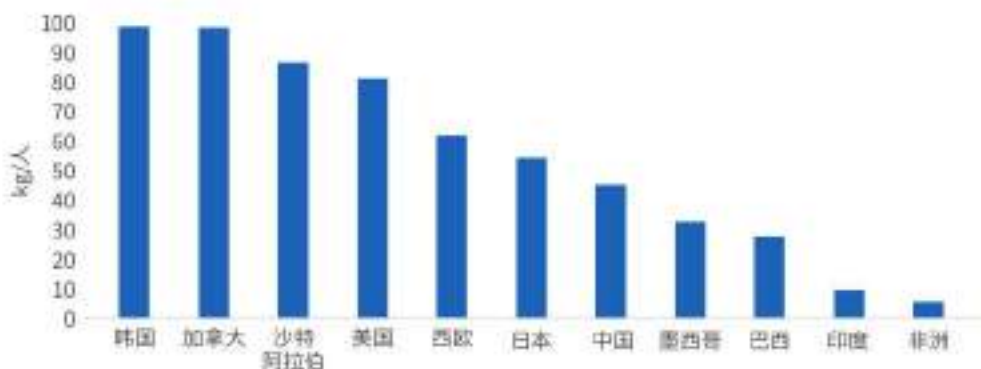
一直以来,中国的化工行业对煤炭的依赖程度均远大于其他国家。



图表3-13: 中国与世界其他地区主要化工产品的原料对比

数据来源: 国家能源集团北京低碳清洁能源研究院, IEA. (2019). The Future of Petrochemicals.

中国目前人均年塑料消费量为45公斤,并有可能到2050年增加到与发达国家水平相当的100公斤,使塑料消费总量达到1.35亿吨。



图表3-14: 各国主要塑料产品人均需求量 (2015)

数据来源:IEA. (2019). The Future of Petrochemicals

家,HVC主要通过石油油等的催化裂化和重组路径来生产,而在中国,尽管目前也主要石油油作为原料,但甲醇制烯烃(MTO)和甲醇制芳烃(MTA)工艺因其日益凸显的经济性和中国对能源安全问题的考虑,正逐渐扮演越来越重要的角色。而中国的合成氨和甲醇的生产原料则与其他国家不同,主要使用煤,体现了中国煤炭资源的充足性和价格优势。(图表3-13)。

2017年,中国的塑料产量高达7500万吨,占全球总产量的四分之一以上。中国目前人均每年使用45公斤塑料,全国塑料年均消费量总计5300万吨。如果中国的人均年塑料消费量到2050年增加到100公斤的水平,与一些发达国家目前的水平相当(图表3-14),届时,中国的塑料消费总量将达到每年1.35亿吨<sup>9</sup>。

## 充分提升利用效率和循环利用水平下的消费需求展望

### 化肥使用效率提升带来的合成氨需求下降

到2050年,合成氨将在一些新领域发挥重要作用(尤其是在航运中,见第四章),但化肥生产仍然是最主要的应用。随着中国人口增长放缓、渐趋稳定并缓慢下降,中国的国内化肥

消费量将逐渐呈平缓趋势。再加上目前中国的单位耕地面积化肥使用量已经处于高位,未来化肥使用减量的潜力将得到较大程度的挖掘。

2016年,中国耕地单位面积化肥使用量为444公斤/公顷,位居世界前列,约为主要发达国家水平的两倍(图表3-15)<sup>10</sup>。由于化肥的过量使用,中国的化肥使用效率较低,2017年仅为35%,远不及美国的52%和欧洲的68%的水平<sup>11</sup>。中国的化肥消费量占全球总量的30%以上,与其仅占全球7%的可耕地面积不成比例,这是中国面临的一个严峻挑战。

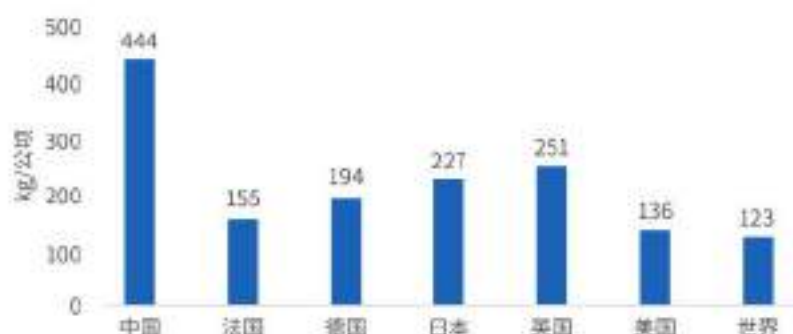
因此,提高中国化肥使用效率势在必行。一些研究指出,在不降低作物产量的情况下,中国的化肥用量可以有效减少30-50%<sup>12</sup>。也有研究<sup>13</sup>指出,由于作物组合和既有的耕作方式的差异,即使中国的氮肥利用率(NUE)<sup>14</sup>不太可能和美国一样高,但与目前水平相比,中国的NUE仍然可以提高一倍。事实上,中国已经实施了一系列政策来鼓励化肥的高效利用,其中包括2015年启动的“化肥零增长行动计划”。

结合以上因素,本研究认为:

- 在照常发展情景下,中国的化肥消费将从2016年的每年4800万吨以每年1%的速度增长至2050年的5700万吨;

9.按照氮的利用量除以氮的输入总量来计算。

中国的化肥单位耕地面积平均用量全球最高，是发达国家的2倍。



图表3-15: 中国和主要发达国家单位耕地面积化肥平均用量 (2016)

数据来源: 联合国粮农组织数据库

- 但通过利用效率的提高,中国化肥的消费量可以减少2000万吨,降幅达1/3以上;
- 由此,合成氨产量从照常发展情景下的6700万吨减少到4300万吨(图表3-16)。

#### 塑料循环利用率的提升带来的HVC和甲醇需求下降

塑料的使用、回收和处理方式对初级塑料的产量有很大的影响。在能源转型委员会的全球研究中,Material Economics的分析<sup>10</sup>表明,到2050年,欧洲将有62%的塑料需求可由回收再利用的塑料满足,从而将塑料生产带来的二氧化碳排放量减半。根据该研究,到2050年,这可以将欧洲的塑料年需求量减少1300万吨<sup>10</sup>。国际能源署在其清洁技术情景(Clean Technology Scenario, CTS)<sup>11</sup>中也得出了类似结论,即全球塑料回收率在2050年达到43%,来自于回收再利用的二次塑料的产量将翻一番,从而减少约7000万吨的基础原料需求。

目前,中国的塑料回收率达50%,但由于再生产再利用过程中的损失率较高,总体的塑料回收利用率仍然较低。然而,在2050年前,塑料回收率很有可能达到甚至超过发达国家当前的水平。本研究认为,2050年,中国的塑料需求中52%

可由回收再利用的二次塑料提供。在此情景下,中国的初级塑料产量将为6500万吨,与国际能源署的照常发展情景(Reference Technology Scenario, RTS)中的回收率水平下的产量相比减少45%。相应地,与国际能源署的照常发展情景相比,这种不断增加的塑料回收利用可使HVC和甲醇的需求分别较照常发展情景大幅减少40%和18%(图表3-16)。

塑料的回收可分为物理回收和化学回收,而后者需要较大量的能源投入<sup>12</sup>。因此,正如Material Economics的分析指出,经济性仍然是目前塑料回收循环再用的一大挑战,但在未来,其经济性有望进一步提高<sup>10</sup>。通过更清洁的材料选择、更合理的产品设计,以及规模化效应、市场专业度的提升与技术改进,塑料回收的成本有望降低16%。同时,通过产品质量的提升和产出比的提高,还有望实现71%的收入增长。

相应地,出台相关激励措施,适当提高原材料的成本,是促进塑料循环利用产业链发展的必要措施。同时,还应设置相关的政策和标准,以最大化塑料回收利用的可行性和效益。

## 化工行业能效提升

中国已提出在2020年使化工行业领域能效达到世界先进水平的目标,并且已经取得了持续性的成果。2018年,中国

10. 本研究第六章所展示的能源需求量并未反应塑料回收所需的能源投入。我们将在下一阶段研究中对这进行更详细地研究。

与国际能源署参考技术情景相比,提高化肥使用效率和塑料回收率可大幅降低化工产品需求量,使合成氨、HVC和甲醇的需求量分别较照常情景下降35%、38%和18%。

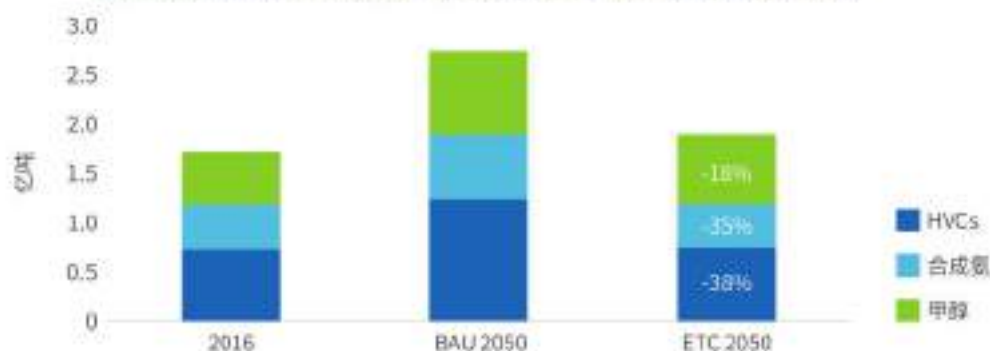


图3-15: 中国基础化工产品产量

数据来源: IEA. (2019). The Future of Petrochemicals; 能源转型委员会/清基山研究所项目组

化工行业单位 GDP 的能源强度下降了 10.0%<sup>[21]</sup>,大部分主要产品生产过程的能耗都有所下降。

目前,中国化工行业相关试点项目的能效水平已经可以达到甚至超过国际同类项目。例如,中国生产合成氨、甲醇和乙烯的能源强度已分别达到 1.06 吨标煤 (31GJ)/吨、1.12 吨标煤 (33GJ)/吨和 0.75 吨标煤 (22GJ)/吨。然而,由于整个行业的能源利用效率水平极不平衡,所以整个行业的能效水平还有较大的提高空间。

在能源转型委员会的全球研究中,其合作伙伴麦肯锡公司的分析指出,乙烯的生产能效还可在目前的基础上提高 15%-20%<sup>[22]</sup>。此外,虽然在过去的 30 年里,生产每吨合成氨的能源使用量已经下降了 30%,但采用现有最佳技术仍可将能耗进一步减少 20%-25%<sup>[23]</sup>。因此,持续推动能效提升是减少化工领域碳排放的重要举措。

## 化工生产过程脱碳

如上文所述,即使是较为积极的需求控制和能效提升措施也不足以完全避免二氧化碳排放。因此,为了实现完全脱碳,还需要采用新的化工产品生产路径,去除或捕集生产过程中因化石燃料燃烧或化石能源原料产生的碳排放。

一个行之有效的方法是在生产过程中使用电力、氢气和生物质等作为主要燃料和原料投入。然而,考虑到成本因素和能源安全问题,中国仍将在很大程度上依赖其丰富的煤炭资源。在基于煤炭的生产路径中,CCS 将发挥重要作用。

**基于化石燃料并结合 CCU/S 技术的生产路径** 一直以来,中国的化工行业对煤的依赖程度较高。本研究认为,煤在中国未来的化工行业中仍将发挥相当大的作用。基于煤的化工生产是典型的碳密集型工业过程,因此必须应用 CCU/S 技术处理其中的碳排放。

与其他一些行业不同的是,煤化工行业的二氧化碳排放量且纯度高 (70-98%),因此碳捕集成本相对较低。现有的煤化工结合 CCUS 的试点项目包括神华集团鄂尔多斯 CCUS 项目,该项目每年减排二氧化碳量达到 5100 万立方米;此外,新疆庆华集团煤制天然气项目中利用二氧化碳提供生产过程中所需的压强<sup>11</sup>。然而,需要指出的是,煤制气过程本身会带来大量的碳排放,这实际上与零碳目标相悖。

对于在化工产品生产过程 (不论是基于煤还是基于石油产品) 中捕获的二氧化碳,既可以将其封存,也可以将其用作原料,生产相关的产品。只要这些产品可以回收再用,或在燃烧过程中再次使用 CCS 技术,整个系统也将是零碳排放的。

11. 煤制气过程中产生的碳排放量大于煤的直接燃烧,因此,能源转型委员会并不支持这一做法。

**Power-to-X生产路径** 化工生产是以氢和碳为基础元素的有机转化过程。以氢气、一氧化碳和二氧化碳为原料进行的合成反应,可形成化工行业价值链中的众多主要产品。Power-to-X生产路径使用零碳电力电解水生产的氢气和二氧化碳为主要原料。其中,作为反应物的二氧化碳可来自于燃烧尾气、工业过程或CCUS过程等。

在合成氨生产方面,基于零碳电力电解水产生的零碳氢气可以用于以氢气和氮气为原料的哈伯法合成氨工艺。根据DECHEMA<sup>[27]</sup>的计算,生产每吨合成氨需要178公斤氢气,用电量为9.1 MWh。此外,生产每吨合成氨的压缩过程和其他过程还分别需要消耗1.4 MWh和0.33 MWh的电能。

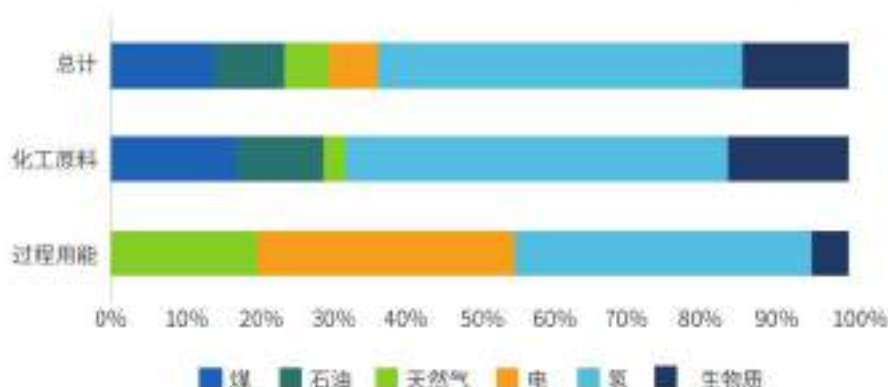
在甲醇生产方面,二氧化碳和氢气反应用于甲醇生产的催化剂已经实现了商业化生产,一些试点工厂也已开始运行。位于冰岛的公司碳循环国际(Carbon Recycling International, CRI)利用这一工艺,目前每年可生产4000吨零碳甲醇,并计划将产能扩大到4万吨。其所用的二氧化碳原料来自一家地热发电厂,用于制氢的5兆瓦电解水设备的动力也来自地热。日本的三井化学也已建成一个使用氢气和二氧化碳合成甲醇的试点工厂,并进行了工业化生产的可行性研究。

在HVC生产方面,虽然可以直接将氢气和二氧化碳转化为

烯烃和芳香烃(苯、甲苯、二甲苯等)的工艺的技术成熟度仍然较低,但已经出现了以甲醇为原料生产烯烃(MTO工艺即methanol-to-olefins,或MTP工艺即methanol-to-propylene)和芳香烃(MTA工艺即methanol-to-aromatics)的商业化生产。若甲醇原料来自于上述零碳氢气和二氧化碳生产的甲醇,HVC生产的脱碳化进程将得到极大的推进。目前,采用最优技术的MTO/MTP工厂生产每吨轻烃的能耗是5 GJ,MTA的能耗水平也与之类似,而中国达到该水平的将大大早于2050年。

**以生物质为基础的生产路径** 另一种零碳生产路径以生物质为原料,以零碳能源作为工艺过程能源。厌氧消化和气化是利用生物质生产塑料的两种方式。浙江宁波的一家公司开发了一种用玉米制造的塑料,这种塑料可以进一步制成餐具、玩具、包装等。这家公司的年产量达到了1000吨,产品远销欧美市场。海南省则宣布从2025年起禁止生产、消费和使用不可降解的塑料产品。政府、企业和学术机构正致力于淀粉和纤维素转化、生物基高分子材料等领域的合作。但是,正如第九章所讨论的,中国面临着可持续的生物质资源有限的挑战,中国不太可能在塑料生产中大量使用生物质资源。此外,基于生物质生产路径的能源消耗量也远远高于传统的化石燃料生产路径。

2050年,零碳情景下,中国化工行业中,氢气可成为主要的生产原料(占52%),而电能(35%)和氢能(40%)可成为主要的生产过程能源。



图表3-17: 零碳情景下中国2050年化工行业能源需求组

数据来源: 能源转型委员会/落基山研究所项目组

## 成本经济性和中国情况的考虑

对于上文提及的基础化工产品，其原料成本通常占生产总成本的60-70%<sup>[1]</sup>。能源转型委员会的全球研究表明，对于新建项目，当电力成本低于每兆瓦时25美元时，乙烯生产所使用电能供热的成本将低于使用化石燃料结合CCS的技术路线<sup>[2]</sup>；对于改建项目而言，实现上述条件的电力成本应低于每兆瓦时15美元。如果仅计算生产过程中的排放，使用生物柴油作为生产原料的二氧化碳减排成本高达每吨1000美元，如果还考虑到产品的整个生命周期的排放，则每吨二氧化碳的减排成本将显著降低至200美元。

然而，值得注意的是，基于生物质的生产路径的实际成本与工厂设施、产能规模和当地情况密切相关，对于生产同类产品的工厂而言，最高成本和最低成本的差距可能达到5倍之多。

一般来说，新型生产路径（如Power-to-X以及基于生物质的路径等）的成本将高于传统的化石能源路径，因此需要有力的政策支持来扶持新型生产路径的规模化发展。在2050年实现零碳目标是一项紧迫的任务，亟需发展涵盖整个化工行业价值链的新商业模式，将零碳实践渗透到从产品设

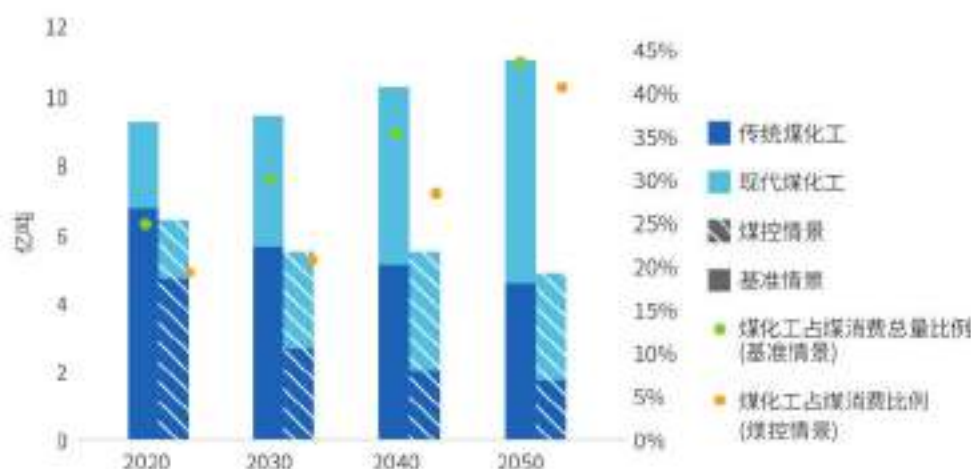
计到产品寿命结束的整个生命周期。

对于中国而言，除非电能转化和基于生物质的生产路径具备明显的经济优势，否则，以煤炭为基础的化工产品生产路径仍将在未来数年内占据主导地位。化工领域煤炭清洁利用已被列为中国的战略发展政策，煤化工的总体规划规模还将进一步扩大。

然而，本研究认为，煤化工行业的规模需要在现有计划基础上大幅缩减，这不仅出于对碳排放的考虑，也是出于对水资源保护和防止空气质量恶化的考虑。在山西、河南、陕西、内蒙古、新疆、青海和宁夏等7个煤化工发展省份中，已有6个省份面临着缺水甚至是严重缺水问题。此外，这7个煤化工产能集中的省份均面临着较严重的空气质量问题。

自然资源保护协会(NRDC)的研究<sup>[3]</sup>显示，到2050年，即使在煤控情景下，尽管煤化工产业的用煤量将较基准情景减少56%即10.9亿吨，煤化工行业的煤炭消费量仍将高达4.8亿吨(图表3-18)，而正如第六章所述，根据本研究结论，中国2050年的煤消费总量可以降低到1.5亿吨。控制化工行业的煤炭消费量可能比电力行业更具挑战性，这将是一项长期的任务。

到2050年，基准情景下，中国化工行业的煤炭消费量预计占煤炭消费总量的40%，使该部门的控煤挑战比电力部门更加艰巨。



图表3-18: 中国化工行业的煤炭消费量

数据来源: 自然资源保护协会



**第四章**  
交通部门脱碳



2014年,交通运输部能源需求占中国能源需求总量的17.2%,而其排放占中国排放总量的8.5% (8.7亿吨二氧化碳),但人均出行距离仍远低于发达经济体水平。如果按照目前的需求增长趋势和使用现有技术,到2050年,中国交通运输部排放可能增长到33亿吨以上,可能占中国排放总量的30%。然而,中国完全有可能在满足快速增长的交通服务需求的同时,在2050年实现零碳排放。这将需要地面运输的全面电气化,而中国有条件比任何其他主要国家都更早实现这一目标。在航空和航运领域实现零碳排放,则需要利用电气化满足短距离出行需求,利用新的零碳燃料来满足长距离出行需求。

## 背景: 中国当前的交通运输活动水平与能源消费

在过去的四十年里,中国在交通基础设施领域进行了大规模的投资建设。全国性主要公路网已经建成,总里程在2014年就已超过美国,并在2018年达到14.3万公里。然而,中国的每千人公路里程为0.1公里,仍然只有美国水平的33%<sup>[1]</sup>。中国的乘用车销量也大幅增长,目前年销量已超过美国,2018年全国汽车总量已超过2.4亿辆,其中私家车占2.2亿辆<sup>[2]</sup>。

铁路网络的发展使中国成为了高铁领域的世界领导者。中国国家铁路局的数据显示,2018年全国商业铁路里程已超过

13万公里,其中2.9万公里为高速铁路<sup>[3]</sup>。在城市地铁方面,中国也进行了大规模的投资。截止到2018年,中国地铁总长度达到5700公里,领先于德国2600公里成为世界第一<sup>[4]</sup>。

随着公路、铁路网络的不断完善,中国的客运量和货运量都取得了巨大的增长。图表4-1和4-2显示了在1978、2000和2018年,各交通方式的客运周转量和货物周转量官方数据。其中客运周转量的单位为人公里,货物周转量的单位为吨公里。图表中的数据并不完整,因为其中不包括私家车和一部分城市公交服务。但是即使在统计不完整的情况下,在过去的40年间,客运周转量和货运周转量也分别增长了17.6倍和18倍<sup>[5]</sup>。

尽管总量增长幅度很大,但中国的人均交通服务使用量仍远低于全面发达的富裕经济体。中国每千人的汽车保有量(包括所有车型)仅为170辆左右,而美国和欧洲国家的水平分别达到了大约840辆和500-600辆(图表4-3(a))。客运人均年行驶里程仅为4700公里<sup>[6]</sup>,而美国和欧洲的水平分别为18300公里和10400公里(图表4-3(b))<sup>[7]</sup>。尽管出境游增幅巨大,但中国的人均飞行里程仍仅有770公里,而欧洲和美国的人均飞行里程分别为1330公里和3400公里<sup>[8]</sup>。

中国的人均货运周转量与其它富裕国家水平更具可比性,这反映出中国在制造业中的重要地位。如图表4-4所示,中

图表4-1: 中国1978、2000、2018年客运周转量(亿人公里)

年份	1978	2000	2018
公路 <sup>1</sup>	550	6160	9270
铁路	1150	3950	14150
国内航空	19	410	7890
国际航空	1	410	2820
航运	120	110	80
总计	1840	11040	34210

数据来源:1978年和2000年数据来自国家发改委能源研究所等(2017)《重塑能源·中国》;2018年数据来自中国交通运输部(2019)《2018年交通运输行业发展统计公报》

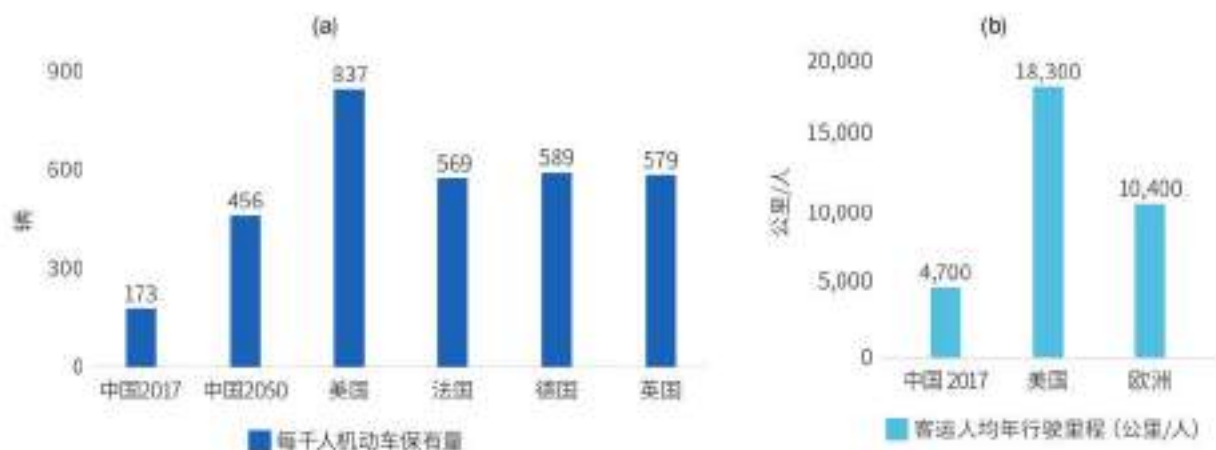
图表4-2: 中国1978、2000、2018年货运周转量(亿吨公里)

年份	1978	2000	2018
公路	500	6270	71250
铁路	5740	13030	28820
航空	0	50	270
航运	4250	22630	99050
总计	10490	41980	199390

数据来源:1978年和2000年数据来自国家发改委能源研究所等(2017)《重塑能源·中国》;2018年数据来自中国交通运输部(2019)《2018年交通运输行业发展统计公报》

12.官方统计数据中,客运活动量(人公里)均不包括私家车。

中国机动车保有量和客运人均年行驶里程仍远低于发达国家。



图表4-3: 各国千人汽车保有量(辆)和客运人均年行驶里程(公里/人)

数据来源: 世界银行; 汽车之家网站

国人均公路货运周转量达到了5100吨公里,而美国和欧洲的水平分别为9000吨公里和3900吨公里<sup>[20]</sup>;中国人均船运货物周转量为7100吨公里,而欧洲的水平则为2300吨公里。

与所有国家一样,中国绝大多数(98%)当前的公路运输是由内燃机汽车提供的,而航空运输动力几乎完全来自于以化石燃料为基础的航空燃料,船舶则依赖于重燃料油的驱动。不过,强有力的政府政策已经使中国成为了全球新能源车领域的领导者。2018年,中国电动车销量达98.4万辆<sup>[21]</sup>,约占全球电动车总销量的50%<sup>[22]</sup>。具体来说,中国贡献了全球99%的电动巴士销量和90%以上的城市电动车销量<sup>[23]</sup>。

中国政府发布的《节能与新能源汽车产业发展规划》提出了到2020年新能源汽车总销量达500万辆的目标。为了支持这一目标,国家和地方政府还制定了各种综合补贴和道路权优惠政策来加速新能源车的推广,帮助电动车增加到了2018年的210万辆<sup>[24]</sup>。

## 需求展望和减缓需求增长的潜力

随着中国全面实现现代化,其人均交通运输服务用量必将显著增加。中国在高铁和地铁系统方面的领导地位,以及实

施优化城市规划的能力,可能使其能够以比当今发达国家少得多的公路和国内航空运量,提供与发达国家水平相当的交通服务。

图表4-5展示了我们模型对于2050年国内客运交通增长的预测。我们预计,包括道路交通、铁路交通、国内航空在内的总客运周转量将从9万亿人公里上升到28万亿人公里,增加了两倍。其中,铁路客运占到的比例将大于其他发达经济体。客运总量的增长与真实GDP的增长保持一致。

### 客运交通: 公路和铁路

与公路和航空相比,铁路本质上是一种节能运输方式,因此中国在高铁和地铁系统上的巨额投资将有助于减少中国的运输能源总需求。

目前中国高铁网络长度为2.9万公里,目标到2025年增长到3万公里,到2030年增长到4.5万公里。对于所有距离在1000公里以内的出行,乘坐高铁将比飞机更为方便。对地铁系统的持续投资也将确保主要城市中的大部分市内出行可以通过地铁完成。总体而言,我们假设到2050年,地铁出行将占中国城市客运运输总量的20%,铁路总客运周转量将



中国的人均货运周转量与发达国家水平更具可比性。

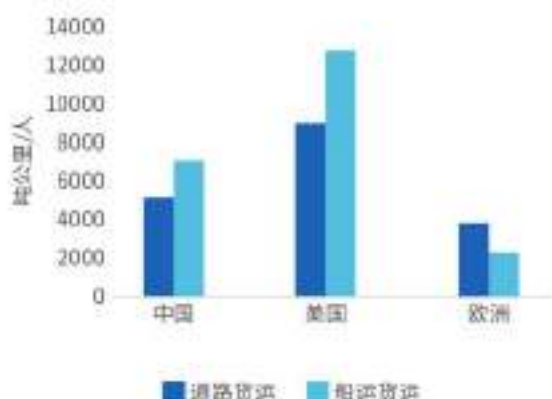


图4-4: 中美欧人均货运活动量

数据来源: 中华人民共和国公安部

在ETC分析中,到2050年,道路交通、铁路交通占国内客运活动总量的比重将分别达到50%、40%。

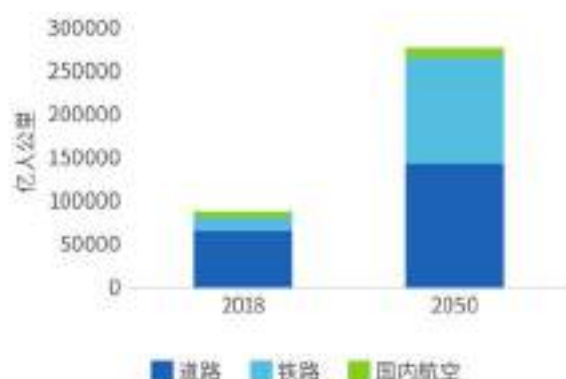


图4-5: 中国2018和2050年国内客运交通总量

数据来源: 能源转型委员会/德基山研究所项目组

达到12万亿人公里,将占客运周转总量的40%<sup>[11]</sup>。

扩建的铁路线路将可用于满足部分国内航空出行需求,这将在下文的航空部分中进行论述,但这也将有助于减缓公路运输的总体增长。因此,我们的模型假设,到2050年,中国每千人的汽车数量约为460辆,仍将略低于欧洲目前的约550辆,并且将远远低于美国目前的约840辆<sup>[12]</sup>。

但是,汽车保有量的显著增长将推动公路客运总量的大幅增长。智慧城市规划、产城融合以及信息与通信技术可以帮助将每年的车辆行驶里程控制在1.2万公里,而美国目前为2.2万公里,但道路客运周转量仍将增长120%,达到14万亿人公里。

#### 货运交通: 公路和铁路

在货运方面,铁路和多式联运方式得到了《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等多项国家和地方政府政策的支持,铁路货运也已经在很多情况下比公路货运更具经济性。因而,本研究模型假设铁路货运周转量将在2050年前占到总体货运周转量的25% (图4-6)<sup>[13]</sup>。

铁路货运量的增长也可以在一定程度上帮助放缓公路货运量的增长,但是公路货运量仍然会随着未来经济发展,由目前的7万亿吨公里增长到2050年的29万亿吨公里,增加了三倍。

#### 航空: 国内和国际

中国航空运力主要用于客运运输,其中国内客运距离为每人570公里,国际客运距离为每人340公里,水平仍然较低 (见图4-7)。随着未来居民收入的稳步增长,人们有更多的收入用于休闲和旅游,航空旅游出行量一定会得到显著增长,商务旅行出行量也会有所增长。中国目前在机场等相关航空基础设施方面投资巨大,每年达到700-800亿人民币。目前,航空客运量和航线数量的年增长率均达到了近12%<sup>[14]</sup>。

在国内航空方面,高铁网络的大量投资,可为距离在1000公里以下的出行提供了有吸引力的替代选择。因此,我们预计中国人均国内航空里程将一直远低于美国目前的水平 (人均3600公里),预计在2050年达到人均860公里 (图4-7)。在本研究模型中,中国2050年的国内航空活动总量将达到1.2万亿人公里。

但在国际航空方面,在中国全面实现现代化的条件下,我们

本研究认为,到2050年,道路交通、铁路交通占国内货运活动总量的比重将分别达到60%、25%<sup>[9]</sup>。

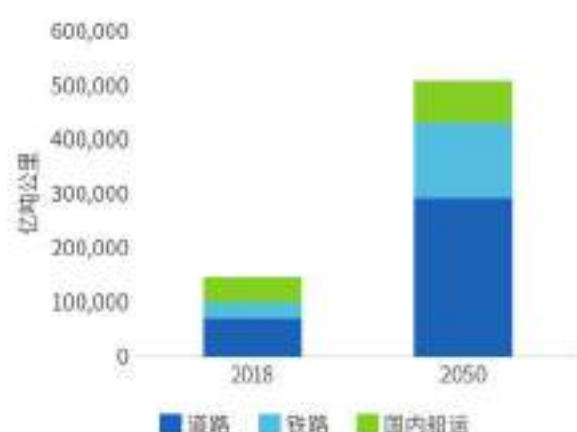


图4-6: 中国2018和2050年国内货运交通总量

数据来源: 能源转型委员会/落基山研究所项目组

预计,到2050年,中国人均航空客运里程将达到1860公里左右,与美国2018年的水平相当,总规模达到2.5亿人公里。

### 航运交通

航运是重要的货物运输渠道,尤其在进出口领域。在2018年,中国水路货运量达到9.9万亿吨公里,其中内河、沿海和海外货运量分别占16%、32%和52%<sup>[9]</sup>。

国内航运货运方面,中国推出了相关政策,支持在可能的条件下将公路货运向船运货运转换。对外航运货运量方面,虽然中国GDP将会达到目前的三倍水平,且保持主要制造和贸易国家地位,但是货运增长将主要体现在货物价值上,对于货运周转量来说增长空间并不大。本研究模型假设,中国对外航运货运周转量将保持在目前的每年人均3.7吨公里,总船运货运周转量将达到13万亿公里。

## 交通领域能源脱碳

鉴于未来总体交通活动量的巨大增长,尽可能地提高能源效率是至关重要的。但是在使用原有发动机和燃料的情况下,能源效率提高并不能实现交通领域零排放,甚至也无法

2050年,中国人均国内航空飞行里程将依然低于美国当前水平,但人均国际航空飞行里程将与美国当前水平相当。

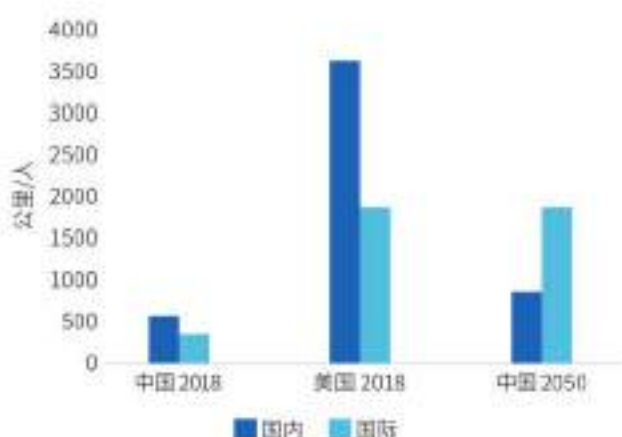


图4-7: 中美人均航空活动量对比

数据来源: 能源转型委员会/落基山研究所项目组

抵消需求量增加带来的能源需求量和碳排放量的增长。因此,本研究认为,交通运输部门要实现完全脱碳,将需要地面交通完全电气化,同时长途航空和船运改用零碳燃料等行动。前者预计可在长期中实现成本竞争力,但是后者的成本预计将在未来相当一段时间内仍保持在较高水平。

图4-8展示了在我们的零碳情景下,2050年交通领域的能源构成:中国交通运输行业将总计消耗3.8亿标准煤(11.2EJ)能源,且不使用汽油、柴油和天然气。电力将从2014年的接近零增长到1.6亿标准煤(4.8EJ,主要用于公路和铁路运输),另外需要1.1亿标准煤(3.1EJ)的新增氢能,生物燃料和氨将分别提供6480万吨标准煤(1.9EJ)和4780万吨标准煤(1.4EJ)。且氢能、氨等替代零碳能源都将以可再生电力作为生产来源(第八章将重点讨论),电力部门脱碳将为交通部门脱碳打下基础。

### 道路交通全面电气化: 纯电动汽车或燃料电池汽车

能源转型委员会的《可完成的任务》全球报告显示,道路的未来发展方向将是完全电动化——纯电动汽车(BEVs)或燃料电池汽车(FCEVs)等形式。这反映了电动机固有的能源效率和未来成本优势。我们相信,中国也

有条件比其他发达国家更快地完成电气化转型。

电动车从本质上比内燃机车效率更高，后者消耗的能量有60%-80%将以热量的形式被浪费掉，而没有转换为动能。因而，电动化可以使得中国的公路和铁路交通在出行需求大量增长的情况下实现最终能源消费量减少。在中国目前的发电结构下，电力碳排放强度为590gCO<sub>2</sub>/kWh，电动车完整使用寿命周期内可减少约20-33%的排放<sup>13</sup>。据能源转型委员会全球报告分析，电动车使用的全生命周期成本预计到2020年将低于内燃机汽车。随着中国电网可再生能源的比例越来越高，电动车的减排比例还将进一步增加。

纯电动车成本在全生命周期内的成本已经低于内燃机汽车，彭博新能源财经也预测，在2025年前纯电动车的购买价格也将低于内燃机汽车。未来，随着充电基础设施的扩张、电池能量密度和储电量的不断增强、充电速度的加快，纯电动车将成为包括小轿车、厢式货车、短距离配送货车、城市公交、两轮车等在内的所有轻型车辆车型的首选。

在强有力的政策支持下，中国已成为全球电动车推广领域

的领导者。深圳、太原等城市已经实现了出租车100%电气化。中国的两轮车电动化发展迅速，远超过其他国家。中国的制造企业已经成为电动轿车、电动公交、电池等领域的佼佼者。

基于目前的发展情况和未来的发展速度，我们的模型假设，中国的轻型路面交通将在2050年前达到100%电动化。中国也将在技术领域占据领先地位，获得较强的竞争优势。在轻型车辆上，纯电动汽车相较氢燃料电池汽车有很大优势，但是对于长途出行来说，氢燃料电池车可能会有优势。即使在氢燃料电池车在总轻型车辆中仅占20%的情况下，氢也将提供通部门能源消费总量的35%。

目前，中国高铁已经实现了电气化，随着高铁网络总长度逐渐扩展到4.5万公里，高铁的电气化也将成为路面交通电气化的重要组成部分。于此同时，普通速度的铁路交通也有可能逐步实现电气化。我们模型假设，到2050年，大部分的铁路货运交通将完全电气化，但是对于超长距离的货运线路电气化而言，投资成本可能较大。氢能的利用也有可能为铁路交通脱碳提供另一可能性。

ETC零碳情景下，中国2050年交通部门各子部门终端能源需求和能源构成

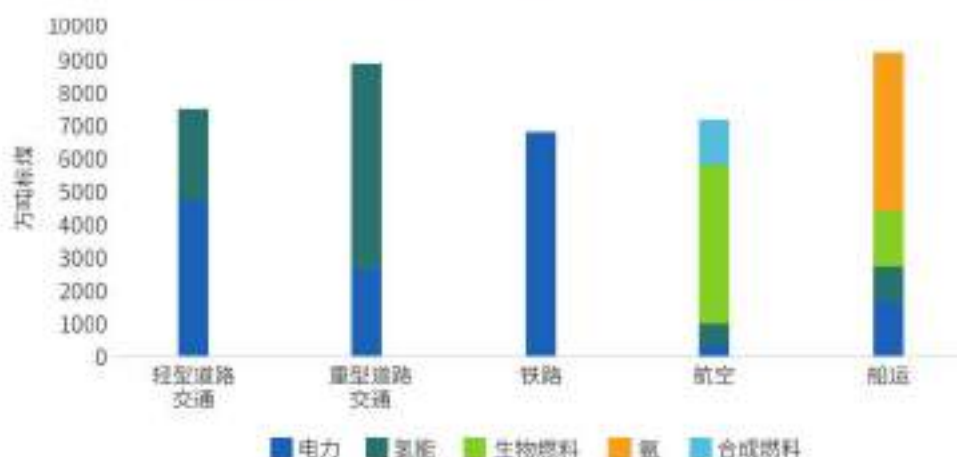


图4-8: ETC零碳情景下，中国2050年交通部门各子部门终端能源需求和能源构成

数据来源：能源转型委员会/清基山研究所项目组

13. 同时我们需要注意到，中国电网进一步的脱碳化对于氢燃料电池汽车减排非常重要。为使得氢燃料电池汽车（假设氢气全部来自电解水）的碳排放与内燃机汽车持平，电力碳排放强度需达到440gCO<sub>2</sub>/kWh以下。这比目前电网的碳排放强度更低，反映了制氢过程中的能量损失。

尽管纯电动汽车和燃料电池汽车的相对市场发展前景仍有一定不确定性，氢能在长距离货运和城际公交领域的潜在巨大作用仍然是可预见的。未来电池密度和充电速度的提高将会最终使得纯电动汽车可以成为长途货运的较优解决方案<sup>75</sup>；但是电解槽和燃料电池设备成本的快速下降也有可能使得氢燃料电池汽车在中长途距离范围内，与纯电动汽车具有同样的成本优势。但是，我们更应该注意到：(i) 纯电动汽车和燃料电池汽车都使用电动引擎，而不是内燃机；(ii) 如果燃料电池汽车使用的氢气来自电解水，那么燃料电池汽车和电动汽车都会增加电力需求（零碳氢气生产的经济性问题将在第八章中详细讨论）。

我们目前模型中的假设认为，氢能将在长途货运中占据主要作用，并且中国也已经制定计划发展氢燃料电池汽车。从2018年开始，北京、如皋和佛山等地已积极开展氢燃料卡车和公交车试点。2022年冬奥会期间，将有4893辆氢燃料电池车用于运送运动员、观众和货物。根据工信部发布的《节能与新能源汽车技术路线图》，中国计划在2020年实现5000辆燃料电池车上路，建造100座充电站；2025年实现5万辆燃料电池车上路，建造300座充电站；2030年实现100万辆燃料电池车上路，建设1000座充电站<sup>76</sup>。此外，《中国氢能产业基础设施发展蓝皮书（2016）》也指出，中国目标在2050年实现燃料电池车总量达到1000万辆<sup>77</sup>。而目前我国货运卡车共2400万辆<sup>78</sup>。

基于以上的各种因素考虑，我们假设纯电动汽车将在未来主导中短距离的货运卡车，而燃料电池汽车可在长距离货运卡车中占主要地位，并在城际公交中占70%。因而，模型显示，重型道路交通的大约70%能源需求将来自氢燃料电池汽车（见图表4-8）。

#### 航运与航空的燃料替代

在2050年前，如图表4-8所示，中国的航运和航空交通的能源需求之和将与总道路交通（轻型和重型）的水平相当，而在2014年前者只是后者的最多30%。这反映了在航运航空领域应用电动机的空间较小，并不能利用电气化带来能效的显著提高。

对于航运和航空，短距离交通的电气化可能性在逐渐增加，但是长距离交通的脱碳化则必须依靠零碳的新型燃料开发，并尽可能不对现有发动机进行改动。

主要的航空公司和一些小型创业公司正在开发使用电池或燃料电池的电力驱动飞机，这种飞机在2030年前很有可能将在短距离小型飞机领域发挥主要作用。一些技术乐观主义者认为，电力驱动飞机未来的适用范围有望达到500公里以下、100座以内。但是在电池能量密度没有得到大幅（约6-8倍）突破的情况下，电力驱动飞机还没有办法支撑国际航线，而国际航线将占中国2050年航空客运周转量的70%（见图表4-5）。

长距离航空交通的脱碳化则将必须依靠可持续的航空燃油（sustainable aviation fuels, SAFs），其与传统航空燃油在化学成分上类似，但是其生产来自生物质转化或使用零碳电力的氢气和二氧化碳的合成过程。在全球范围内，能源转型委员会从许多航空和发动机公司处了解到，将这些可持续的航空燃油100%用于现有发动机，已经或即将在技术上实现可行性；在中国，2015年，中石化等中国石油公司、海南航空和波音公司通过合作，以废油为燃料，成功实现了从海口至上海的飞行试航。

所以，长距离航空交通的脱碳化的关键问题并不是技术可行性，而是：(1) 生物航空燃油和合成航空燃油的成本经济性；(2) 中国的可持续生物质资源供应问题。本研究认为：

- 根据能源转型委员会全球研究，生物航空燃油和合成航空燃油的价格将在未来相当长时间内高于传统航空燃油，但是价格差额将通过生产量扩大的规模效应和学习曲线效应逐步缩小，并且对于消费者而言，机票价格小幅提高对于消费者生活水平的影响将极小（详见第十章）。
- 在中国，和全球范围内相同，在航空部门作为生物质优先利用领域的情况下，生物质资源足以支持航空部门的脱碳（详见第九章）。考虑到中国相对于其他国家生物质资源比较有限，并且可再生能源资源比较充足，合成航空燃油可能会在中国发挥更大的作用。



对于航运领域的零碳化,到2050年,中国内河和沿海航运可以通过电气化实现。欧盟的经验已证明现有技术能够在10年内实现这一目标。但对于国际运输而言,还需要其他选择来满足里程范围的需求。从市场的角度来看,更有可能出现的情况是多种燃料的组合,而非严重依赖于可再生能源成本的单一燃料选择。

同样,对于航运领域的零碳化,中国内河和沿海航运有很大可能性使用电池或燃料电池实现电气化,内河和沿海航运也已占到中国航运交通量的50%。但是在不实现技术突破的情况下,长距离的航运也较难进行电气化,原因有二:(1)所需的电池重量过大;(2)虽然氢气的重量能量密度比船用燃料油高,所需的氢燃料重量要轻得多,但其极低的体积密度意味着氢气存储将占用大量的货物空间。

但是,从技术上讲,通过对船用发动机的改装,并使用生物燃料或氨对长途航运进行脱碳。世界上最大的集装箱运输公司马士基公司(Maersk)已经承诺在2050年之前实现运输零排放,对未来充满信心。根据能源转型委员会《可完成的任务》全球报告,伦敦大学学院大学海事咨询机构(University Maritime Advisory Service, UMAS)的模型显示,使用氨燃料将显著增加航运的总货运成本,但是,正如第十章所述,其对消费者生活水平的影响将是微乎其微的。综上,如图表4-8所示,本研究认为,电力、氢能、生物燃料和氨等能源的综合使用将帮助中国航运业实现脱碳。对氢气和氨的需求都将进一步刺激零碳电力需求,其可行性将在第七章中进行讨论。



## 第五章 建筑部门脱碳

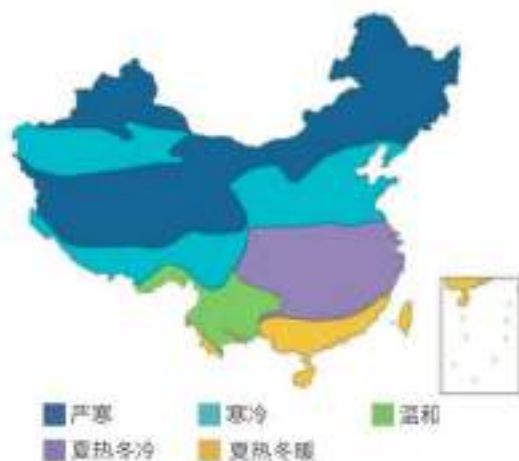
目前,中国的建筑部门每年的二氧化碳排放达21.3亿吨,约占全国碳排放总量的20%。然而,随着更多建筑节能技术的应用,如热泵、LED、高效空调和被动式房屋等的推广,建筑部门的能源消耗将大幅下降。此外,本研究认为,建筑部门的电气化率将在2050年前逐步提高到75%。考虑到电力部门的完全脱碳,以及太阳能热、生物质、工业余热和地热能的利用,中国的建筑行业将能够在本世纪中叶实现零碳排放。

## 背景: 中国建筑部门能源消费现状

供热和制冷是中国建筑部门的主要能源消费来源。根据不同的气候特征和供暖需求,可将中国划分为5个主要气候区(图表5-1)。不同的气候区适用于不同的供热设计规范,同时对于农村和城市地区,规范也可能存在一定差异。中国北方地区在冬季有供暖需求。城市和农村的供暖系统,也由于建筑密度的不同而存在差异,建筑密度较高的城市地区以集中供暖系统为主,而农村地区则主要为独立供暖系统。中国在全国范围内都有制冷需求,居民建筑普遍使用空调制冷,商用建筑则多采用中央空调制冷系统。

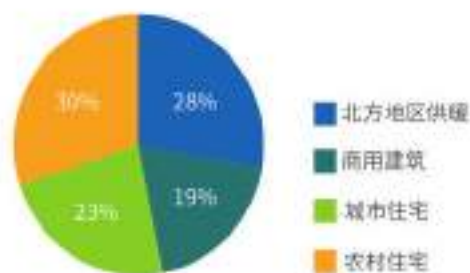
中国的建筑能耗在过去十年中增长迅速。清华大学的一项研究显示,2017年中国建筑部门能源消耗总量为6.8亿吨标煤<sup>10</sup>。图表5-2显示了按建筑类型划分的能源使用情况。因能耗量大,图中单独列出北方区域供暖耗能。

中国可划分为五个气候区,不同气候区对建筑供热和制冷模式的需求和规范不同。



图表5-1: 中国的主要气候区

数据来源: 清华建筑节能研究中心(2019), 中国建筑能源年度报告



图表5-2: 中国2017年建筑部门能耗来源

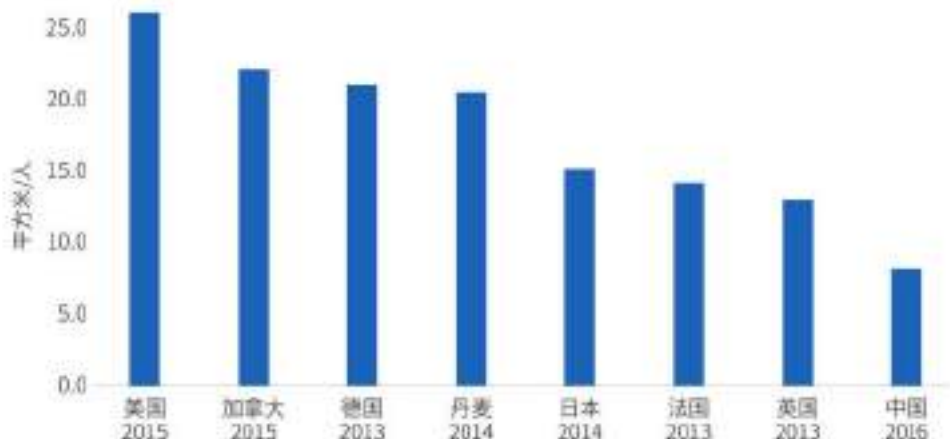
数据来源: 清华建筑节能研究中心(2019), 中国建筑能源年度报告



图表5-3: 主要国家人均住宅建筑面积对比

数据来源: IMF;《重塑能源-中国》建筑卷;中国国家统计局

中国人均商用建筑面积水平依然很低，是美国的1/3，英国、法国和日本的50%-60%。



图表5-4: 各国人均商用建筑面积

数据来源: 清华建筑节能研究中心 (2019), 中国建筑能源年度报告

快速的城市化进程是建筑部门发展的主要动力。自2001年以来,中国每年的新建建筑面积超过15亿平方米<sup>[10]</sup>。虽然中国的人均住宅建筑面积已经赶上欧洲发达国家,但相较美国仍然很低(图表5-3)。中国的人均商用建筑面积,如图5-4所示,占英国、法国和日本水平的50%-60%,但只有美国水平的三分之一。

目前,中国人均建筑能耗仅为美国水平的四分之一、欧盟水平的三分之一左右。该部门近60%的终端能源消费来自于建筑采暖和制冷。化石燃料是最大的能源来源,占终端能耗总量的40%。相比之下,电力目前仅占终端建筑能耗总量的28%(图表5-5)。

## 加速城市化之下,对“更好”建筑的需求展望

中国建筑部门能源需求的主要驱动因素包括城市化进程的加快和建筑舒适度的需求增加。根据清华大学的研究,中国的城市化率将从2017年的58%提高到2050年的75%<sup>[11]</sup>。从目前的发展趋势来看,城市化率达到70%的目标很有可能在2030之前实现,2050年城镇化进程完成的可能性较大。

随着城市化进程的加快,人们正从农村地区向城市地区迁

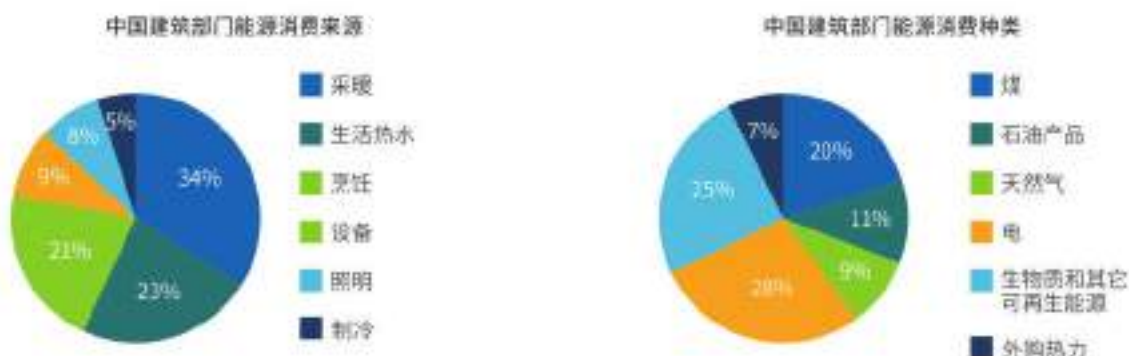
移,这将导致更多的城市新增建筑需求。图表5-5显示了各国平均住宅建筑面积的对比。2016年,中国已基本赶上了欧洲发达国家,预计到2050年,中国人均住房面积还将有小幅提高。

城市化进程的推进还将推动商用建筑面积急剧增加,包括办公室、购物中心、酒店、学校、医院、博物馆、图书馆、体育场、机场、火车站等。本研究认为,到2050年,中国的人均商用建筑面积将赶上发达国家水平,而总建筑面积(包括住宅和商用)将达到850亿平方米。

与此同时,随着人们对美好生活的需求不断增长,公众对建筑的要求也将不断提升,提供更舒适、更健康、更安全的建筑环境。目前,对于长江以南夏热冬冷地区,即使在1月、2月室外温度低于5°C时,也没有足够的供暖服务。到2050年,随着生活质量的显著提高,该地区的住宅建筑也将具备更高的供暖服务覆盖水平。图表5-6显示了我们模型对于2019年和2050年建筑服务覆盖率变化情况的假设。

与此同时,中国人代代相传的勤俭节约的生活方式很有可能得以延续,使得中国建筑部门的能源需求一直低于发达国家目前水平。根据一项关于中国城市家庭关于制冷需求的行为调查<sup>[12]</sup>,大多数家庭只在一两个房间里打开空调,而

中国60%的建筑部门能源消费来自建筑采暖和制冷,化石燃料目前是最大的能源来源。



图表5-5: 按活动类型和能源类别划分的中国建筑能耗

数据来源:IEA, (2017). Energy Technology Perspectives 2017

且通常只有在房间有人时才使用空调 (图表 5-6)。由于能源浪费现象很少,中国民众很有可能在能源消费量相对较少的情况下,获得更完善的建筑能源服务。

## 建筑能效提升

中国的节能和能效相关政策在提高建筑能效方面发挥了重要作用,尤其是在建筑采暖方面贡献突出。通过实施强制性标准和补贴政策,中国北方城市地区建筑采暖能效大大提升,区域供暖的能源强度已从 187 千瓦时/平方米降至 114 千瓦时/平方米,但能效依然存在进一步提升的空间。

自 20 世纪 60 年代以来,中国的建筑节能设计标准已就城市地区建筑围护结构的保温要求进行显著加强,但仍有进一步改善的潜力,包括被动房屋和一体化设计解决方案等,进而实现建筑的近零/净零能耗。此外,这些标准也可进一步推广于农村地区。

自 2017 年以来,中国的清洁采暖政策已强制禁止单独使用煤炉,大力推广燃气锅炉和热泵,并给予大量补贴,大量燃气锅炉和空气源热泵在农村地区得到安装。但由于中国的天然气资源短缺和天然气价格的飙升,2019 年清洁供暖政

策中已弱化天然气的作用,转而推广生物质锅炉和热泵,作为农村地区的主要供暖来源。

热泵以电力为驱动力,可从低温空气中吸收热量,提供供热服务 (与空调制冷原理恰好相反)。在  $-3^{\circ}\text{C}$ - $10^{\circ}\text{C}$  温度范围内,空气源热泵的制热能效比 (COP) 约为 3-3.5 (即投入 1 千瓦时电力,加上从低温空气中吸收的 2-2.5 千瓦时热量,可供热 3-3.5 千瓦时)。COP 随着空气热源温度上升而增高。水源热泵和地源热泵,由于水和土壤的蓄热能力较好,也可具备较高的制热能效比。空气源热泵具有适应性强、限制少的特点,可以满足中国南方地区逐渐增长的供热需求。可逆热泵更可以代替空调,同时作为夏季制冷和冬季制热的设备。热泵技术的大量普及可以显著提高供暖的整体能效水平。

除供暖外,制冷和照明也是提高建筑能效的关键领域。虽然中国是最大的室内空调市场和生产国,但中国的平均制冷能效只能达到当前可用最佳技术的 60%。本研究认为,到 2050 年,通过提高制冷能效标准最低值,中国的制冷能效可以进一步提高 30%。随着室内空调潜在的技术突破,制冷效率也还有进一步提高的空间,可以将季节性能效比 (SEER)<sup>14</sup> 数值从 3 提高超过 3 至 10.5 倍。

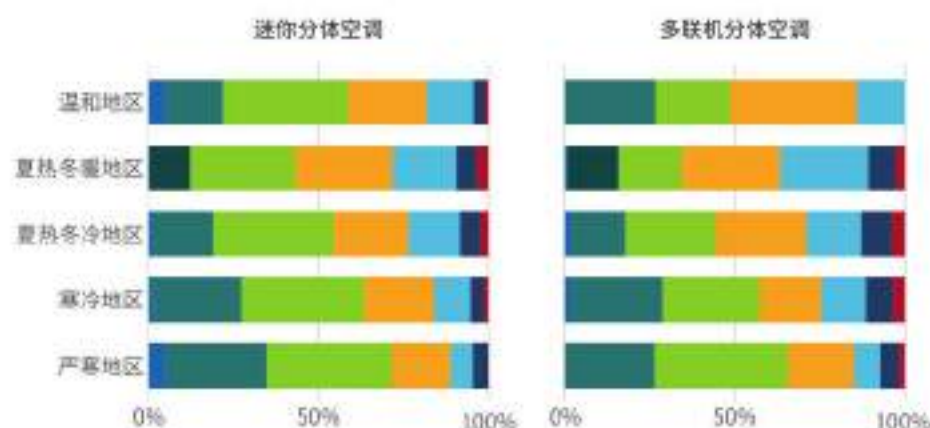
14. 季节性能效比 (SEER) 指典型制冷季节的制冷输出除以同期的总电能输入。它与 COP 概念类似,但是 SEER 并非在单一运行条件下进行评估,而是表示稳定位置在典型年份的天气下的预期总体性能表现。

图表5-6: 2019年和2050年中国建筑服务覆盖率

建筑类型	终端应用类型	服务覆盖率		
		2019	2050	
住宅	制冷	严寒地区、寒冷地区、温和地区-城市	100%	100%
		严寒地区、寒冷地区、温和地区-农村	10%	100%
		夏热冬冷地区-城市	100%	100%
		夏热冬冷地区-农村	50%	100%
		夏热冬暖地区-城市	100%	100%
		夏热冬暖地区-农村	80%	100%
	供热	严寒地区和寒冷地区	100%	100%
		夏热冬冷地区	30%	100%
		夏热冬暖地区和温和地区	5%	10%
	电器和其他设备	冰箱-农村	80%	100%
		抽油烟机-农村	20%	100%
		冰箱-城市	100%	100%
商用建筑	供热	严寒地区和寒冷地区	100%	100%
		夏热冬冷地区	70%	100%
		夏热冬暖地区和温和地区	5%	10%
	制冷	严寒地区、寒冷地区和温和地区	100%	100%
		夏热冬冷地区	100%	100%
		夏热冬暖地区	100%	100%

数据来源: 能源转型委员会/落基山研究所项目组

## 中国人普遍具有勤俭节约的生活方式。



图表5-7: 按气候区和设备类型划分的中国城市家庭制冷需求行为 (2015年)

注: 样本数量包括 6225 台迷你分体空调和 608 台多联机分体空调, 样本比例按气候区区域内省份人口加权计算。中央空调数量很少, 一般按照 B4-7 行为运行。B1: 从不用空调; B2: 在炎热时使用并在睡觉前关闭; B3: 在炎热时使用并在离开房间时关闭; B4: 在炎热时使用, 并在离开房间时关闭; B5: 在房间时就使用, 离开房间时关闭; B6: 在整个公寓内使用, 并在离开时关闭; B7: 夏季持续使用。

数据来源: Hu et al. (2017). A survey on energy consumption and energy usage behavior of households and residential building in urban China.



从2010年到2018年,发光二极管(LED)照明技术的发展迅速,已将能源效率从每瓦特50流明提高到了每瓦特100流明<sup>15</sup>。到2050年,LED照明的能效水平可达每瓦特200流明,意味着将能效再提高100%。

综上所述,本研究认为,到2050年,中国建筑部门能效的提高将使建筑能耗强度降低50%-60%。

## 建筑部门完全脱碳

除了如上所述的能效提升外,要实现建筑部门的完全脱碳,建筑中所有的能源输入都必须来自零碳来源。这将需要电力部门的完全脱碳和低碳可再生能源的利用,包括生物质、太阳能热和工业余热等。如表5-2所示,本研究预计,到2050年,电力占建筑部门能耗总量的比重将达到75%,剩下的25%则将来自其他可再生能源,或不产生额外碳排放的工业余热。

电气化是实现零碳建筑的关键。目前,制冷、照明和家用电器已经实现了100%电气化,建筑电气化的难点在于供暖和烹饪。随着电力部门的脱碳,与化石燃料相比,热泵技术在气候变化影响方面的优势将得到更广泛的认可。本研究预计到2050年,在零碳情景下,热泵技术占建筑采暖和热水供热比例可达到60%。随着电力烹饪技术的进步,到2050年,住宅和高用建筑的烹饪都可实现100%的电气化。由于

建筑部门75%的能源都由电力提供,建筑用电量将增加到3.2万亿千瓦时,第七章将详细讨论电力部门的脱碳路径。

生物质、不产生额外碳排放的工业余热以及太阳能热也可替代电力需求。生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。虽然工业设施正在迁出城市,但工业余热的理论输送距离已达到200公里,完全可以作为中国北方城市的集中供暖的热源之一。需要注意的是,在零碳情景下,工业余热的量将相较目前有所减少,因此热泵很可能发挥更为主要的作用。到2050年,在零碳情景下,建筑行业将逐步淘汰化石燃料。

综上所述,能效提升、建筑电气化是中国建筑部门在2050年实现完全脱碳的两大关键策略。生物质、工业余热和太阳能热也将发挥辅助作用。

图表5-8: 2050年建筑部门终端能源消费结构

能源类型	万亿kWh	占比
煤炭	0.00	0%
天然气	0.00	0%
电力	3.01	75%
工业余热	0.49	12%
生物质	0.25	6%
太阳能热	0.27	7%
终端能源消费总量	4.02	100%

数据来源: 能源转型委员会/ 落基山研究所项目组

15. 随着成本下降,LED灯泡的能效预计将继续提高。



**第六章**  
能源需求对  
供给侧的影响



结合第三章到第五章对各部门终端能源需求的描述,本研究认为,到2050年,中国的终端能源需求总量将达到22亿吨标煤(64EJ),这比2016年的水平30亿吨标煤(88EJ)低30%,比国际能源署2°C情景预测的中国2050年终端能源消费水平低25%<sup>16</sup>。

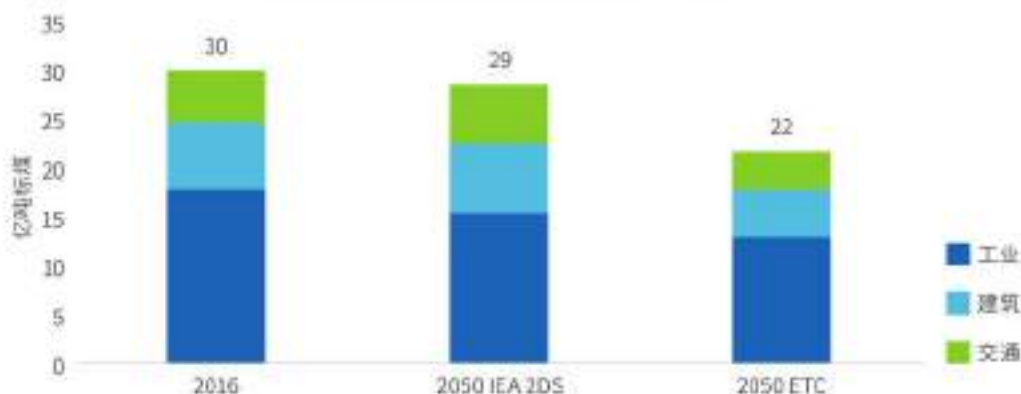
在本研究的情景中,工业仍是中国最大的能源消费部门,占终端能源需求总量的60%。但由于工业部门能源需求较当前水平下降了近30%,而建筑和交通部门的终端能耗分别下降26%和24%,因此中国工业部门所占的能源需求比例将略有下降。一个主要的不确定因素,如第三章指出,是中国2050年的钢铁产量。在基础情景中我们假设钢铁产量为4.75亿吨,其中1.9亿吨为长流程钢,2.85亿吨为短流程钢。如果我们采用高需求情景,2050年钢铁每年产量为7亿吨,其中2.8亿吨为长流程钢,则2050年终端能源需求将增加6500万吨标准煤(1.9EJ)<sup>17</sup>,这会使得工业领域终端能源

需求下降幅度缩小至25%。

值得一提的是,即便经济仍将持续发展,且人们的出行公里数、享受到的空调服务等典型能源服务的水平将增加,依然可以实现能源需求的大幅下降。其原因在于产品和服务的更高效生产和消费方式,其具体表现包括(但不限于)以下几个方面:

- 随着基础设施建设热潮的结束,钢铁和水泥需求量减少,且建筑设计将进一步完善,建筑寿命显著延长;
- 随着循环经济的大力发展,材料的回收利用率大大提升,进而长流程钢和新塑料制品的产量将有所下降;
- 由于使用效率的提高,化肥需求量将较照常发展水平有所下降;

本研究认为,中国到2050年的终端能源需求总量为22亿吨标煤(64EJ),比2016年水平低30%,比国际能源署2DS情景预测的2050年水平低25%。



图表6-1: 中国各部门(工业、建筑和交通)终端能源需求总量

数据来源: 中国统计年鉴; IEA, (2017). Energy Technology Perspectives 2017; 能源转型委员会/落基山研究所项目组

16. 在本研究的部分分析中,我们将某些部门的能源需求与国际能源署的研究进行了比较,用于对比的情景主要是:(1) 国际能源署的照常发展情景(Reference Technology Scenario, RTS),该情景综合考虑各国已有的能源和气候相关发展目标,反应了全世界当下水平的应对气候变化雄心;(2) 国际能源署2°C情景(2 Degree Scenario, 2DS),该情景描述了在强有力的限制升温范围在2°C以内的公共政策作用下的能源需求情况。本研究的结果与国际能源署存在差异且某些部门需求低于国际能源署结论的原因在于:(1) 情景的目标不同——与本研究相比,国际能源署2°C情景的升温控制目标为2°C以内,而不是1.5°C以内,因此,按照该情景假设,达到净零排放的时间点可能晚于本研究设定的2050年;(2) 对于特定部门的需求量和相应的能源需求形式的假设不同——例如,本研究认为到2050年,水泥的需求量可大大降低,而路面交通可实现电气化,等等。尽管存在这些差异,国际能源署的2°C情景为本研究提供了非常有用的基础,也促使我们进一步分析本研究与其存在的假设差异及其原因。对于部分本研究尚未深入分析的部门,我们参考了国际能源署2°C情景的数据,例如一般制造业的能源需求等。

17. 高需求情景下额外增加的2.25亿吨钢铁产量,在短流程钢占60%、氢气直接还原铁的长流程钢占20%、高炉结合CCS技术的长流程钢占10%的假设下,将增加2000万吨标准煤的煤炭消耗,3700亿千瓦时零碳电力需求(用于电炉和生产氢气)。

- 考虑到电动车固有的高能源转化效率，道路运输中每公里出行距离的能耗将大幅下降。

在零碳排放的条件下满足这些能源需求意味着能源供给组合的重大转变，特别体现在以下几个方面：

- 电力的使用范围大幅扩大，包括直接电气化以及以电力为基础的燃料，如氢气、合成氨和合成燃料的利用等；
- 生物质的应用范围扩大，其中包括作为能源载体和工业原料两种利用方式；
- 化石燃料的利用大幅缩减；
- 碳捕集、封存和利用技术（CCS/U）广泛运用于处理工业过程二氧化碳排放（如水泥生产工艺的排放）和由于剩余的化石燃料燃烧带来的二氧化碳排放。

图表6-2列举了在本研究的情景中，各部门能源需求（含原

料)的组成情况。

## 电力和基于电力燃料需求的大幅增加

如果中国要实现零排放，零碳电力利用的大规模扩张将是必不可少的。2018年，中国的总电力消费量为7万亿千瓦时，而到2050年，在零碳情景下，中国的电力需求总量将增长至大约15万亿千瓦时（54 EJ）<sup>18</sup>。

其中，80%的电力将用于直接电气化，其余20%用于将生产以电力为基础的燃料，尤其是氢气和合成氨。到2050年，氢气的需求将从现在的每年2500万吨增加到每年8100万吨。电力需求的急剧增长主要来源于建筑、轻型公路运输、铁路运输中大规模的直接电气化以及电力在工业部门的大规模应用。氢能的使用也将成为重型运输领域的间接电气化的手段。此外，氢气还将被广泛用作工业热力来源和工业生产的清洁原料，例如，中国将更多地利用电弧炉炼钢，Power-to-X技术也将得到大规模发展。

以零碳方式满足这些能源需求意味着能源供给组合的重大转变，包括大量的直接或间接电气化，生物质和CCS技术的应用，以及化石燃料使用的大幅缩减。

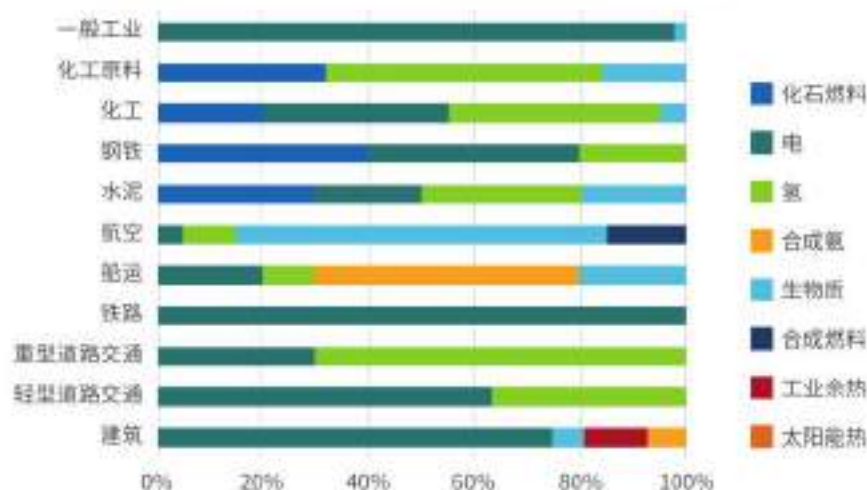


图6-2: 按能源基体划分的中国不同部门的终端能源消费

数据来源: 能源转型委员会/落基山研究所项目组

18. 如第三章所述，若假设2050年钢铁年产量是7亿吨，而不是基础情景的4.75亿吨，电力需求量将上涨3700亿千瓦时。



图表6-3展示了各部门的电力需求,其中工业部门需求占总量的50%,建筑和交通部门分别占21%和9%。同时,工业和交通部门也是氢能需求的主要来源。

## 增长的生物质能需求及其重点领域

在中国2050年的零碳情景中,生物质能将扮演有限但重要的角色,它既可以是能源载体,也可以作为工业生产的原料。本研究认为,到2050年,中国一次生物质能的总需求将增加到4.4亿吨标煤(13.0EJ)。在这些一次生物质能中,将有48%即2.1亿吨标煤(6.2EJ)将用于发电,1.8亿吨标煤(5.2EJ)生物质能将被直接利用,其余0.5亿吨标煤(1.5EJ)将被用作工业原料。直接利用的一次生物质能中,83%将被用于工业和交通部门。

与中国丰富的可再生电力资源情况不同,中国可利用的可持续生物质能供给资源十分有限。因此,应需生物质能资源的应用进行细致地规划,并优先应用于经济性更好或其他脱碳解决方案较为有限的领域。本研究认为,航空和化工生

产是生物质能运用的两大优先领域,而在发电方面,生物质能的作用则体现在为可再生能源主导的电力系统提供灵活性。本报告的第十章将更详细地讨论可持续生物质能的供给和优先领域的应用等问题。

## 化石燃料的有限角色

在本研究的情景中,到2050年,中国91%的终端能源需求将由电能、氢能和生物质能提供,但在一些工业过程中,化石燃料依然是难以替代的,包括在化工行业中的利用以及在煤气化制氢中的利用等。天然气也将在电力系统提供灵活性方面发挥一定作用。

总体而言,在本研究情景中,煤的消耗量将从目前的38.6亿吨标煤(113EJ)下降至约1.5亿吨标煤(4.3EJ)。天然气使用量将为1.8亿立方米(5.3EJ)。而由于地面运输将全面实现电气化,并且以石油为基础的海洋和航空燃料将被合成氨、生物燃料或其他合成燃料取代,石油使用量将大幅下降至仅约0.2亿吨标油(1.0EJ,或每天50万桶)。

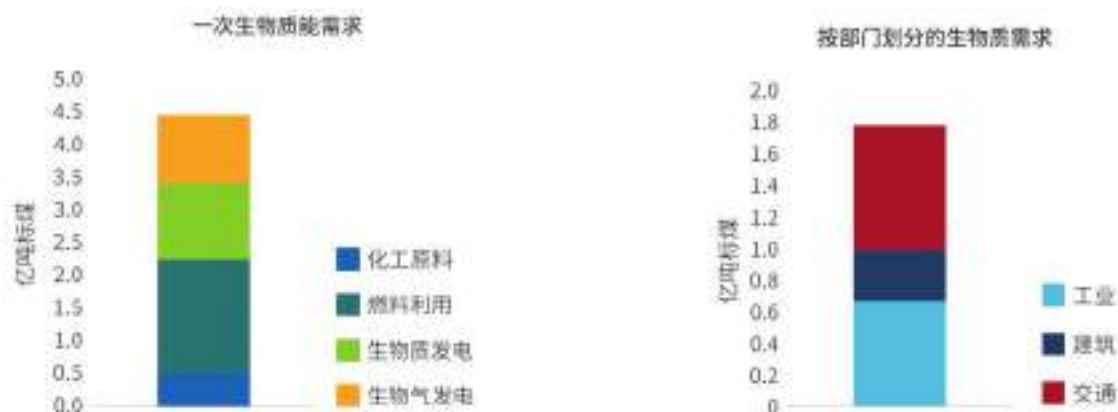
工业需求占用电需求总量的50%,建筑和交通部门分别占21%和9%。  
同时,工业和交通部门也是氢能需求的重要来源。



图表6-3: 2050年中国各部门电能和氢能的需求

数据来源: 能源转型委员会/落基山研究所项目组

一次生物质能的需求量将增加至4.4亿吨标煤,其中2.1亿吨标煤用于发电,1.8亿吨标煤被直接利用。直接利用的一次生物质能中,83%将用于工业和交通部门。



图表6-4: 按应用领域划分的终端和一次生物质能需求

数据来源: 能源转型委员会/清基山研究所项目组

## 相应的碳捕集、封存和利用需求

在本研究的情景中,化石燃料的作用虽有所减弱,但仍有一些部门有所应用。此外,在以碳酸钙为原料生产水泥的过程中的碳排放也仍较大。到2050年,本研究的情景中,中国每年的二氧化碳总排放量将达10亿吨,分部门的来源如图表6-5所示。因此,要实现零碳经济,碳捕集、封存和利用将得到更大规模的推广。我们假设,碳捕集效率为90%时,剩余二氧化碳排放量将小于1亿吨。第九章将进行进一步介绍。

## 对一次能源的影响

图表6-5展示了本研究的零碳情景中2050年中国的一次能源结构。随着终端能源需求将从30亿吨标煤(88EJ)下降30%至22亿吨标煤(64EJ),一次能源需求降幅将更大,将从45亿吨标煤(132EJ)降至25亿吨标煤(73EJ),降幅达45%。一次能源比终端能源降幅更大,在很大程度上反映了目前的热电生产系统中能源损失较高的问题。

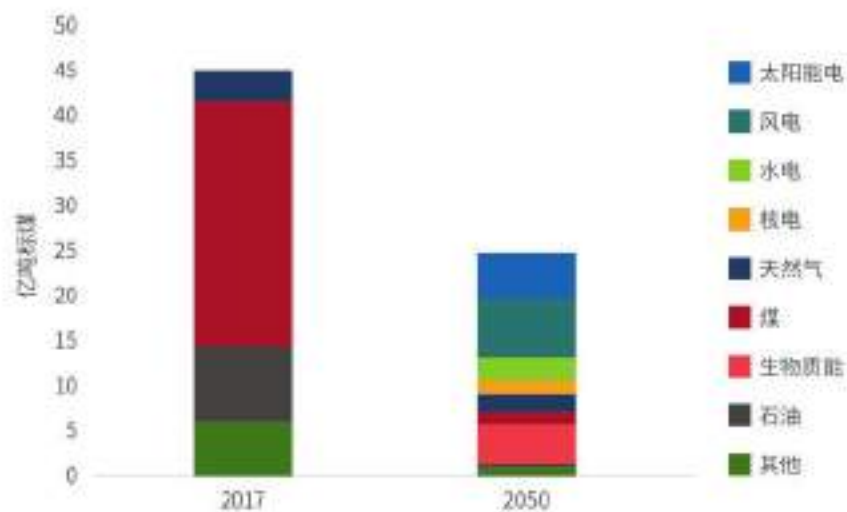
随着一次能源需求的减少,能源供应的组合也将发生巨大变化,其中化石燃料需求降幅超过90%,而非化石能源将增

加到原来的3.4倍。

到2050年,风能(6.3亿吨标煤或19EJ)、太阳能(5.1亿吨标煤或15EJ)和生物质能(4.4亿吨标煤或13EJ)将成为中国最大的一次能源来源,共占一次能源需求总量的三分之二。与当前水平相比,核能和水能的规模也将大幅增加,到2050年分别达到1.8亿吨标煤(5EJ)和2.7亿吨标煤(8EJ)。

因此,要实现零碳排放的目标,中国能源结构将发生巨大变化。其中的关键问题是,在技术和经济上是否有可能实现这种情景所需的零碳电力的大幅增加,氢气生产和生物质能供应的显著增加,以及CCS/U应用的规模化发展。这些问题将在第七章到第九章进行讨论。

一次能源结构将发生巨大变化,其中化石燃料需求降幅超过90%,  
风能、太阳能和生物质能将成为主要能源。



图表G-5: 按能源品种划分的中国一次能源需求

注: 因数据统计方法不同, 2017年数据中的“其他”项包括水电、风能、太阳能和其他。  
数据来源: 中国统计年鉴; 能源转型委员会/落基山研究所项目组



## 第七章 大规模的零碳电力及 资源、技术和经济可行性

目前,中国火力发电量占全国发电总量的70%以上,电力部门二氧化碳排放量占全国排放总量的40%左右。如第六章所述,到2050年,本研究的情景下,中国的电力需求将增加到15万亿千瓦时,如果维持目前的发电结构,来自电力部门的碳排放量将超过目前的两倍。因此,在大规模电气化的趋势下,电力的全面脱碳至关重要。中国有丰富的风能和太阳能资源,再加上核能和水能,足以满足这一用电需求。此外,通过充分利用多种储能、灵活性和需求响应等措施,可以使这一以可再生能源为主的电力系统具备满足实时匹配电力供需灵活性的能力。而实现这一转变的总成本对中国经济增长的影响将微乎其微的。不过,中国要在2050年之前实现这一目标,需要大幅增加投资规模,并对零碳能源转型进行全面规划。

## 背景: 中国电力生产和消费现状

上世纪90年代初以来,中国电力生产快速增长,于2011年超过美国,成为全球最大电力生产国。2016年,电力占中国终端能源需求的17.2%。相比之下,能源转型委员会的全球分析表明,在任何可行的零碳经济路径中,电力在终端能源需求中所占的比例都将高达60%-70%,且这些电力应该完

全产自零碳能源。

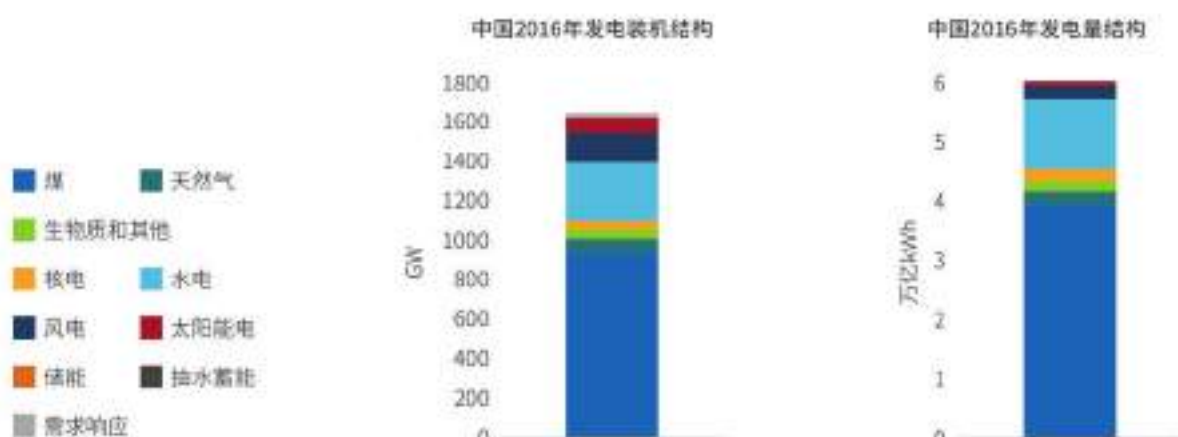
2016年,全国发电装机总容量为1650 GW,发电量共计6000 TWh。其中,72%发电量来自化石燃料(其中66%来自煤炭),19%来自水力发电,3%来自核能,约5%来自风能、太阳能和其他来源<sup>[1]</sup>(图表7-1)。尽管煤炭占主导地位,但从2013年到2016年,随着可再生能源的蓬勃发展,煤炭发电量呈下降的趋势。

中国火力发电占发电装机总量的比例高达64%,其中更有近90%来自煤炭。然而,随着成本的持续下降,光伏和风电发展势头迅猛。2016年,中国风电装机容量达147 GW,光伏装机容量达76 GW,水电305 GW,生物质发电46 GW,可再生能源装机总容量占全世界的30%。截至2018年底,中国可再生能源发电装机容量已达730 GW,比上年增长10%<sup>[2]</sup>。

## 电力和基于电力的燃料需求大幅增长

中国的全面脱碳需要大规模的零碳电气化。本研究认为,中国的电力需求总量将从2016年的约6万亿千瓦时(2018年7万亿千瓦时)增加到2050年的约15万亿千瓦时。与全球的

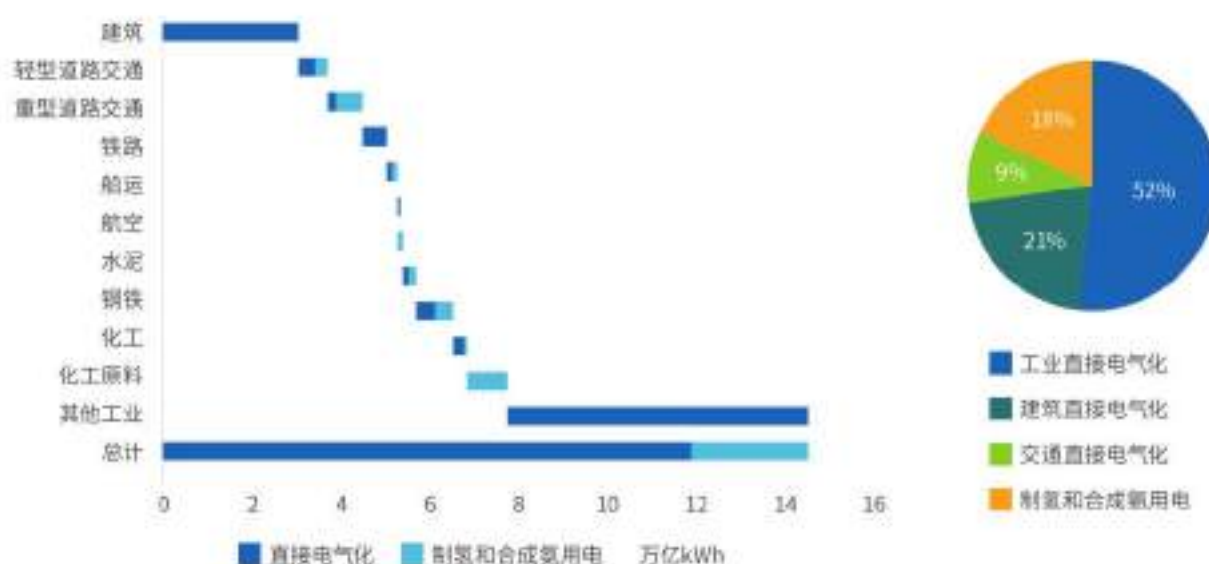
2016年,中国发电装机总容量为1650 GW (64%为火电装机),发电量共计6万亿千瓦时。其中化石燃料发电占72% (其中煤电占66%),水电占19%,核电占3%,风电、光伏和其他来源占5%左右。



图表7-1: 2016年中国发电量和发电装机容量

数据来源: 中国统计年鉴

在中国的零碳经济中,终端电力消费将达到15万亿度,其中80%将用于直接电气化,18%用于生产氢气和氨等以电力为基础的燃料。



图表7-2: 零碳情景下,中国发电量和各部门用电量

数据来源: 能源转型委员会/落基山研究所项目组

情况类似,这一大规模电气化主要源于建筑和运输部门的大规模直接电气化以及电力在工业部门中的广泛应用。总体来看,82%的电能将用于直接电气化,其中的52%来自于工业部门。此外,电力在氢气和以氢为原料的化工产品以及合成氨等燃料的生产中也起着重要作用。到2050年,18%的电力将用于生产氢气和合成氨等燃料(图表7-2)。

## 零碳情景下的发电结构

在本研究情景中,为了提供大规模的零碳电力,中国的零碳发电装机容量将有显著的增长。到2050年,全国总发电装机容量将达到7100 GW,但发电装机的结构和目前相比,将有较大的变化(图表7-3)。主要特点包括:

- 风电装机和太阳能光伏发电装机容量将显著提升。到2050年,中国的发电结构中将有2400 GW的风电装机,2500 GW太阳能光伏发电装机,且来自风能和太阳能的发电量占到全社会总发电量的70%;

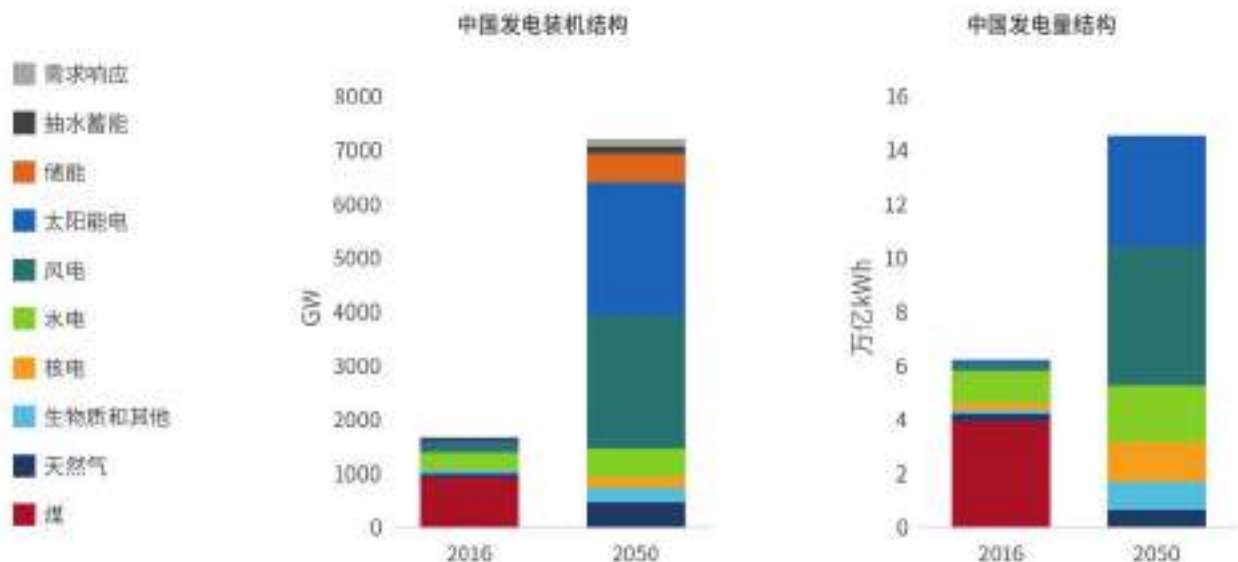
- 核电的作用将进一步扩大。核电装机容量将由目前的45 GW增长到2050年的230 GW,且核电发电量将从4%增长到10%;

- 水电装机容量将小幅上升。水电装机容量将从目前的350 GW增长到2050年的550 GW,且水电发电量占全社会发电总量的14%;

- 煤电将基本退出。来自火电的发电量将从目前的72%下降到2050年的7%,且火电将基本由天然气而不是煤来提供。煤电的退出以及相应的煤的需求量下降将影响相关产业的就业情况,尤其是在煤矿资源集中的地区。第十章将就此展开更详细的讨论。

这表明,当前的发电结构将在未来发生巨大的变化,由此将引发大量的新增投资。本研究认为,考虑到中国丰富的相关资源,本研究给出的零碳情景下的发电结构以及灵活性需求都是切实可行的。

在本研究情景下,中国的电力需求总量将从2016年的6万亿千瓦时增加到2050年的15万亿千瓦时,其中90%以上的电力将来自零碳能源。



图表7-3: 中国的发电装机和发电量构成

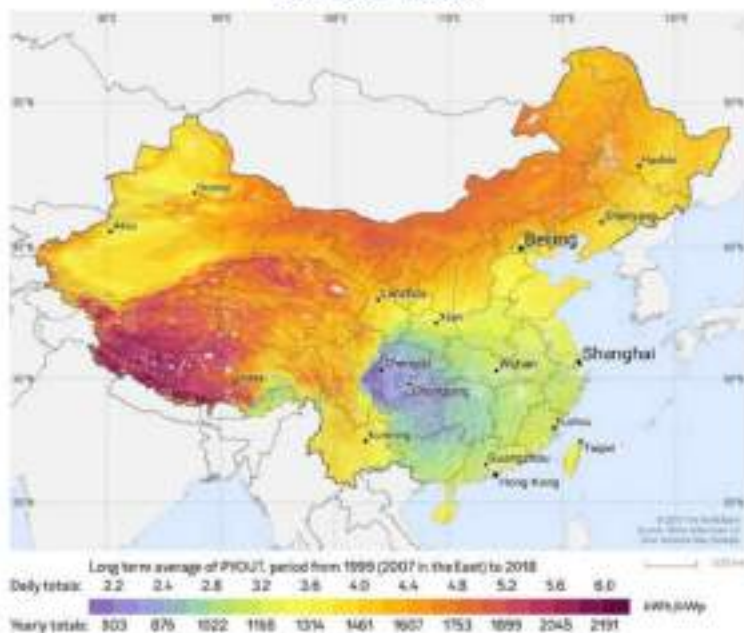
数据来源: 中国统计年鉴; 能源转型委员会/落基山研究所项目组

## 资源禀赋和技术可行性

**太阳能发电** 考虑到中国巨大的潜在太阳能资源, 将太阳能光伏发电装机从目前的174 GW提高到2050年所需的2500GW是可以实现的。如图表7-4所示, 年太阳辐射超过5000 MJ/m<sup>2</sup>, 年日照时间在2200小时以上的土地面积占全国土地面积的三分之二。相比之下, 根据美国国家可再生能源实验室的研究<sup>[50]</sup>, 按照每GW需要32平方公里面积计算, 安装2500GW的光伏发电设备仅需要8万平方公里土地面积, 仅占中国国土面积的0.8%。因此, 即使是更大规模的太阳能发电装机也是很可能实现的。

**风电** 中国的风力资源也非常丰富 (图表7-5), 足以支持风电装机从目前的184GW增长至本研究情景中2050年的2400GW。据中国国家发改委能源研究所估算<sup>[50]</sup>, 在中国所有风力资源超过300W/m<sup>2</sup>的地区中, 100米高度的陆上可

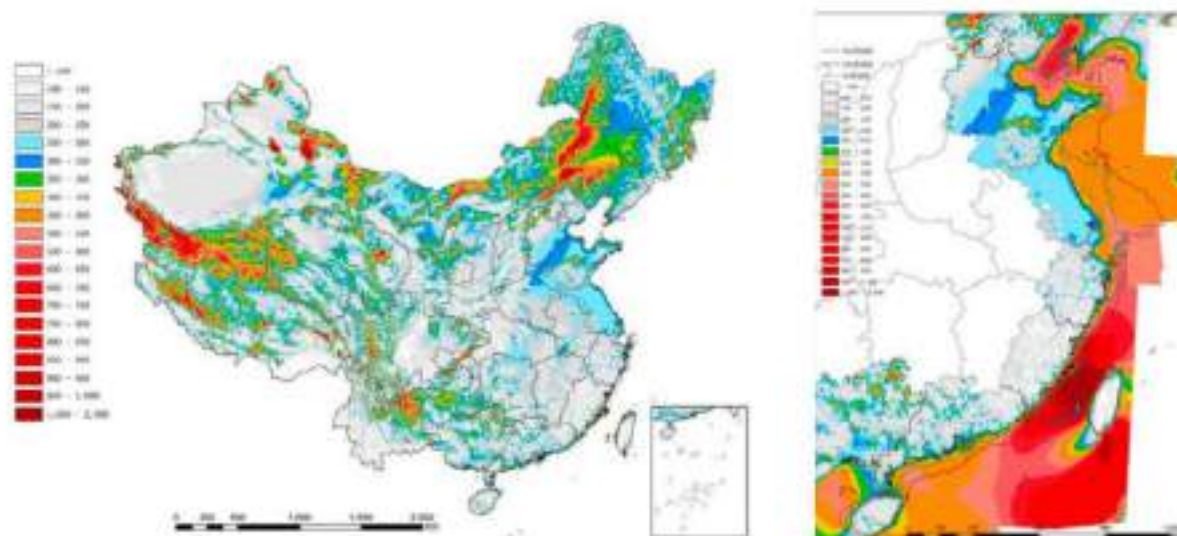
年太阳辐射超过5000 MJ/m<sup>2</sup>, 年日照时间在2200小时以上的土地面积占全国土地面积的三分之二, 安装2500GW光伏设备仅需要中国0.8%的土地面积。



图表7-4: 中国光伏发电潜力

数据来源: Solargis数据库

100米高度陆上可用风能总储量约为3400GW；另外还有500GW海上风能资源。



图表7-5: 中国70米高度陆地(左)和海上(右)风能资源(单位:瓦/平方米)

数据来源:国家发改委能源研究所;IEA. (2011). Development Roadmap for China's Wind Power 2050

用风能总储量约为3400GW；而在水深5-50米的海域中，100米高度海上风能资源总量达到了500GW。

**水电** 长期以来都在中国电力的低碳转型中发挥着战略性作用。鉴于其较高的技术成熟度和能源密度以及较优的经济性，在可行的范围内，应优先探索水电进一步发展的潜力。据中国国家能源局估算<sup>19)</sup>，中国的潜在水电装机容量高达660GW，其中约500GW是在技术上可开发且经济上可行的<sup>20)</sup>。因此，本研究认为，到2050年，中国可利用的水电资源将得到较为充分的开发，水电装机将达到550GW。实际上，这一规模的水电资源开发可能到2035年前就可以实现，此后进一步开发的潜力将相对有限。然而，值得注意的是，水电的发展将带来一系列的环境和社会影响，同时也需要广泛的国际合作。需要妥善处理好人员安置及跨国界河流水利工程项目协调等工作。

**核电** 装机将从目前的45GW增加到230GW。中国核电过去

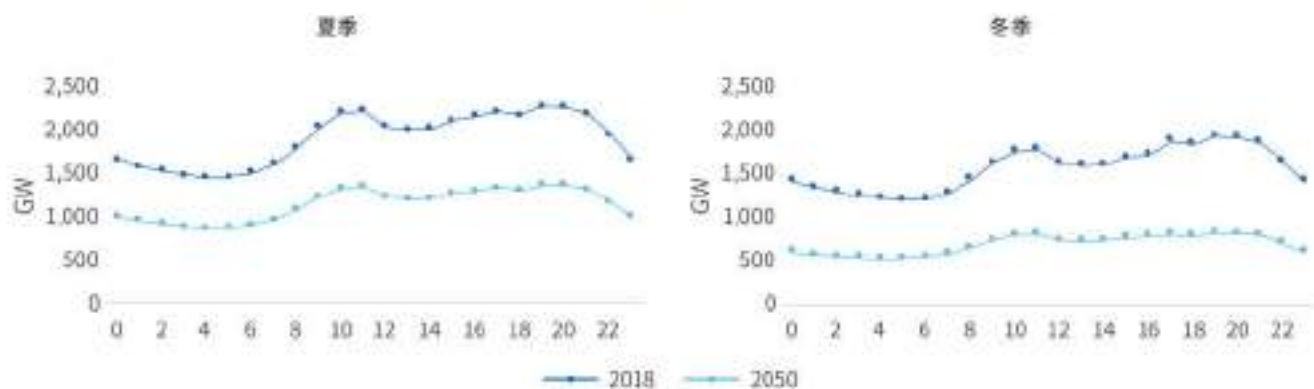
5年的平均年增长装机容量约为10GW，若按照这一速度，2040年之前就可能完成230GW装机的建设。根据国家规划，中国具有230GW核电建设潜力，而如果核电在内陆地区也能开发，将再额外增加400GW的潜力。然而，本研究的情景并未考虑沿海地区以外的核电装机扩张。核电选址适宜性问题和规划建设周期长是中国核电发展的主要制约。

**生物质发电和采用CCS技术的天然气发电** 都能在一个高比例可再生能源的电力系统中发挥良好的灵活性，可以在风能和太阳能不足以满足需求的时候提供可靠的电力调度。然而，生物质能的利用取决于当地资源的实际情况，受资源量的制约。在本研究的情景中，2050年，中国电力系统中将包含230GW的生物质发电装机和500GW的天然气发电装机，相应地，每年可提供1.7万亿千瓦时电力（占总量的12%），这将需要2.1亿吨标煤（6.25 EJ）的生物质能和2.04亿吨的碳封存容量。相关资源的可行性将在第九章进一步讨论。

19. 中国国家电网专家咨询意见



夏季的需求负荷高峰远高于冬季，但不论在夏季还是冬季，日高峰都出现在中午和晚上。



图表7-6. 2018年和2050年中国用电负荷曲线

数据来源: 能源转型委员会/落基山研究所项目组

## 灵活性及储能和需求侧响应的重要作用

太阳能和风能具有间歇性特点，其日间和夜间的资源可利用量受天气影响较大，具有一定不确定性。而根据本研究模型，到2050年，中国70%的电力将来自太阳能和风能。为了在高比例可再生能源系统中平衡电力供给和需求，电网系统必须要结合储能和灵活性高的电源，解决高峰用电需求和该时段电力供应短缺之间的矛盾。此外，还应充分发挥需求侧响应机制的作用，鼓励用户在发电资源最为充分、电价最低的时候用电。

大规模零碳电气化对电网灵活性提出了更高的要求，需要对整个系统日间、年间的电力需求和供给特点有详尽的把握，同时充分体现中国不同地区在用电负荷和电源结构的特点。在能源转型委员会中国项目的下一步工作中，我们将对此进行更为深入的研究。在目前的初步探索中，我们仅粗略预估了中国未来的电力需求和供给情况，且认为通过采取储能、灵活性装机、需求侧管理等一系列技术和管理手段，中国到2050年的高比例可再生能源电力系统也将具有能满足供需的灵活性和可靠性。

本研究根据一组典型的北方城市和南方广东省典型日电力负荷数据，模拟了2018年全国的夏季和冬季典型日的需求

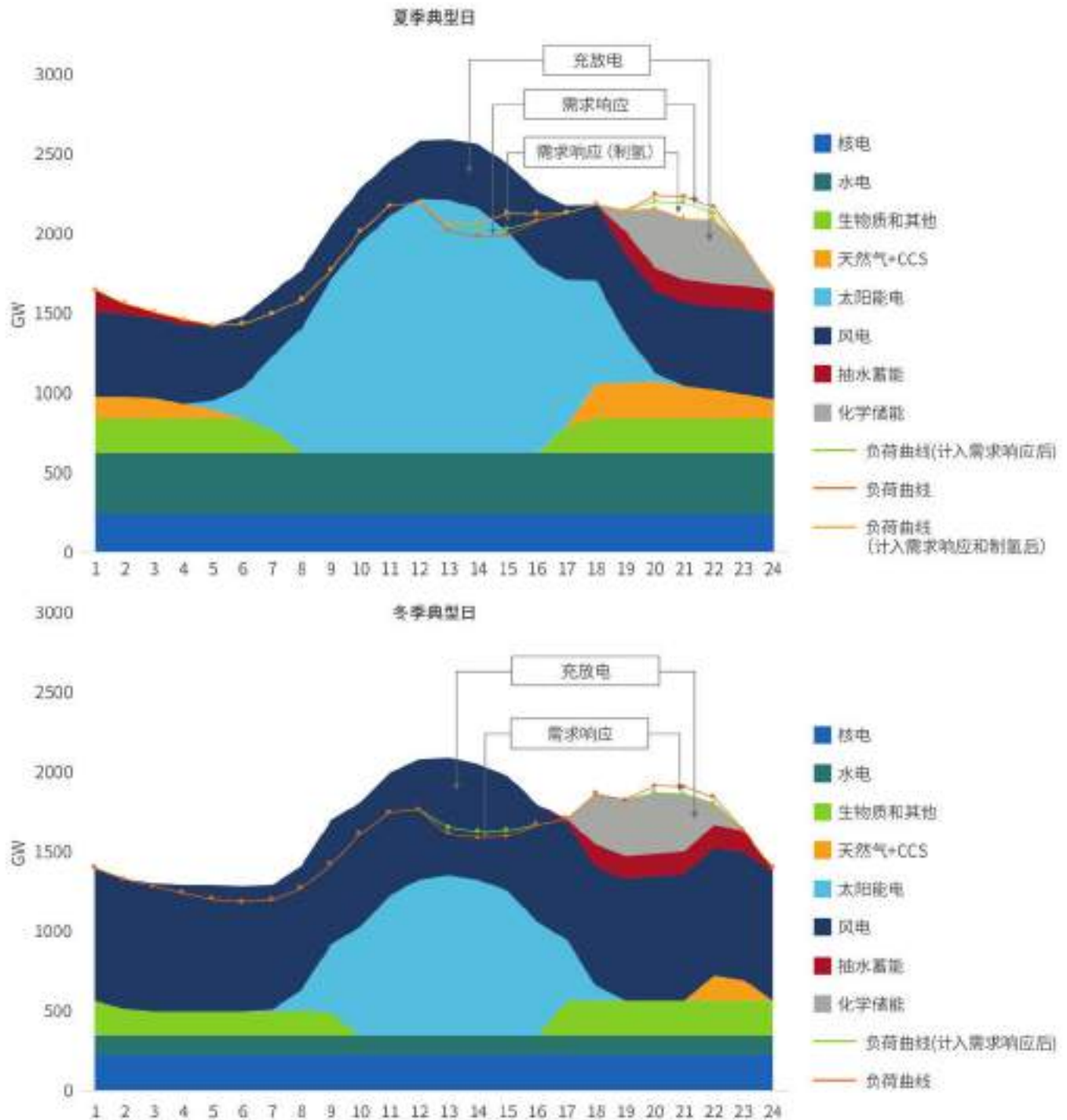
负荷曲线（图表7-6）。如该曲线所示，夏季的需求高峰显著高于冬季，而在两个季节中，负荷高峰时段均集中在接近中午的时段和晚上时段。这体现了居民用电的特征（很多国家的负荷曲线中也出现了晚高峰）。此外，中国工厂典型的轮班生产方式也贡献了一定夜间用电的需求。需要特别强调的是，该模拟负荷曲线仅为帮助我们更清晰的解释中国典型日电力负荷的总体特征，我们并不掌握中国实际电力负荷数据。

根据本研究模型，到2050年，中国的总用电需求将是目前的两倍以上，相应地，一天内的用电需求曲线也将高于目前的水平。但与此同时，由于用电需求来源的变化（如更多的空调使用需求、车辆充电需求等），夏季和冬季需求高峰以及相应的一天内不同时段用电需求的变化特点也可能发生改变。

本研究对2050年电力负荷曲线的模拟进行了简化处理，假设一天内不同时段的用电负荷曲线特征与目前基本一致。我们假设唯一影响负荷曲线特征的因素是到2050年热泵的大规模运用，冬季的用电需求将相较于夏季有显著增长。基于此，我们得出了2050年中国的用电需求曲线（图表7-6中位于上方的曲线）。本研究的模型假设，到2050年，夏季和冬季的系统高峰负荷分别为2240GW和1900GW。

图表7-7显示了2050年一天内按小时展示的电力供需情

尽管本研究中,太阳能和风能在电网中的比例很高,但借助组合式的电网灵活性解决方案可实现电力系统的供需平衡。



图表7-7:夏季和冬季的电力系统日平衡

数据来源:能源转型委员会/麻省山研究所项目组

况。如图所示，在中午时段，供给大于需求，原因在于这一时段的太阳能资源相对丰富；而在晚高峰时段，下班后的居民用电需求增加了总需求，且此时太阳能资源大大减少，使得需求大于供给<sup>20</sup>。

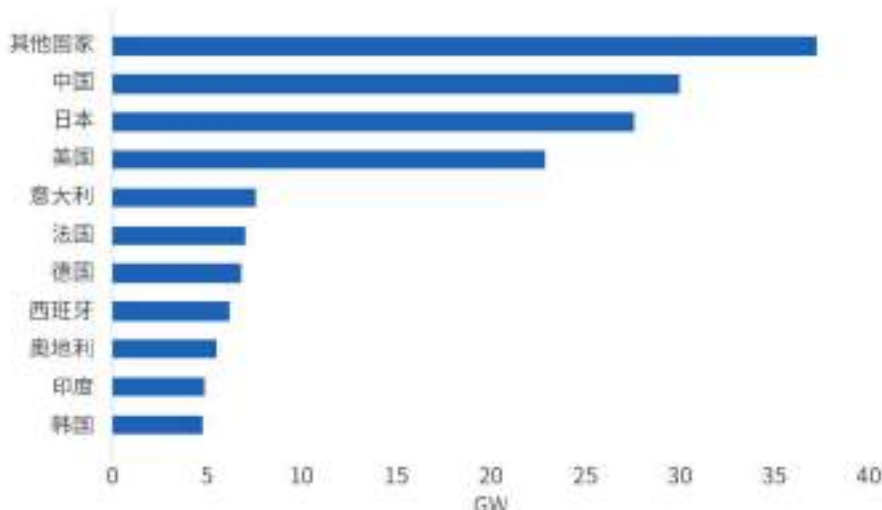
如图表7-7所示，在一天内，电力需求和供给之间的差距需要通过日间的灵活性手段进行调整，包括储能技术、需求响应等。除此之外（未在图表7-7中显示），电力系统还需要满足旋转容量和负荷跟踪、短期电力储备以及季节平衡等，这可以通过采用多种技术和管理手段来提供相应灵活性方案。

**抽水蓄能**目前占全球储能的95%。由于其技术的较高成熟度，抽水蓄能可提供更长时间的大量峰值能源供给。天然水库和人工水库都可应用抽水蓄能。纯抽水蓄能电站可利用电能抽水储存在没有天然径流汇入的上游水库中，混合式抽水蓄能电站则结合有径流汇入的水库的传统水力发电站，也可满足常规发电需求。中国目前的抽水蓄能容量为30GW，居世界第一（图表7-8），预计这还将以较快的速度增长到2050年的140GW。

**电池储能**技术的经济性也在大幅改善，并已成为最具潜力的提供日间平衡、满足短时间高峰负荷的技术手段之一。目前在美国，市场上已出现了可再生能源和供电时间达4小时的电池储能结合的组合方案。电动汽车市场的急速扩张加速了中国电池储能成本的下降，这也使得电池储能有望在约2025年后快速发展，并到2040年左右将超过抽水蓄能成为最常用的储能方式<sup>[10]</sup>。在本研究的模型中，到2050年，中国的电池储能总容量将达到510 GW，大约是彭博新能源财经预计的全球总量的一半<sup>[11]</sup>。对于电池储能的形式，不论用锂离子和铅蓄电池，还是电动车电池的二次利用等，都将扮演一定角色。此外，随着电池技术的发展，电池储能还有望在将来满足长期储能的需求。然而，大量的电池储能需求将相应催生金属材料（尤其是镍、锰、钴、锂等）的需求，但能源转型委员会全球分析表明，目前的资源存量足以满足相应需求。在我们的下一步研究中，也将对中国的相关资源情况进行更深入的探讨。

**利用过剩电力生产的氢气** 利用过剩电力或成本较低的电力进行电解水制氢也可提高整个能源系统的灵活性，并成

中国目前的抽水蓄能装机容量为30GW，居世界第一（全世界总量160GW），预计到2050年将增加至140GW。



图表7-8：全球抽水蓄能装机容量

数据来源：国际水电协会，2019水电现状报告

20. 本研究假设在电力供给中，核机组将连续满负荷运行，水电机组在夏季满负荷运行，而在冬季则由于水资源较为短缺，运行小时数减少。研究目前假设典型日中风能和太阳能资源按小时的变化情况和加州的情况类似（这主要是由于加州有非常详细的公开数据），但后续将针对中国的情况，考虑当地的气候和资源特点，进行更深入的研究。此外，生物质装机和配合CCS技术的天然气装机根据其最大装机量，也参与相应的供需平衡。

为有效的储能手段。这部分氢气可以通过燃气轮机燃烧发电，也可以借助燃料电池转化为电能。本研究模型预计，中国用作提供电网灵活性的氢气生产容量将至少有 100 GW。此外，对大规模氢储能的需求也将大大增加。

**需求响应** 在传统的以火电为主的电力系统中，用户通常根据自身需求用电，而供电侧可灵活地响应需求。然而，用户的多种需求实际上可根据价格信号进行调控，通过智能消费管理，工业用户和家庭用户都可以实现自动交互，从而提供很大的错峰用能空间，以最小的经济成本满足用电需求。这些可动态响应的需求包括电动汽车充电、冰储能、热水储能、隔热效果较好的建筑中的供暖和制冷，以及众多工业生产过程等。在工业生产中，常可通过在电力短缺或电价较高时减少负荷来进行调整（例如通过可变速泵或其他设备的使用等）。需求响应具有非常大的理论潜力。到2050年，仅大约 4.2 亿辆电动车的灵活充放电就足以提供相当于整个化学储能总量四分之一的巨大储能能力<sup>[7]</sup>。在本研究的模型中，需求响应可提供大约 120GW 的容量。然而，需要注意的是，需求响应的发展受市场机制的影响较为显著，只有充分发挥市场的作用（如消费者价格激励等），并进行智能化的消费侧系统化管理，需求响应的潜力才能得到充分的发挥。

**可调度的火力发电** 在以可再生能源为主的电力系统中，当风电、太阳能电、核电、水电等供给不足以满足需求时，在部分特定时段运行火电机组也可提供了足够供给来满足需求。由于火电机组仅在部分时段运行，对已有资产的利用率相对低下，但由于该时段电价较高，短时运行的火电依然是具备经济性的。在本研究模型中，2050年，中国的生物质发电装机容量为 230GW，天然气发电（结合 CCS 技术）装机容量为 500GW，年平均运行 2330 小时，利用率约为 27%。

图表 7-7 显示了 2050 年中国电力系统中，多种灵活性或储能技术对电力供需进行平衡的情况。主要特点包括：

- 在中午及其附近时段，当太阳能资源较为丰富时，生物质发电和天然气发电（结合 CCS 技术）机组关闭，但在夜间运行；

- 抽水蓄能和电池储能均将在日间发电供给充足时充电蓄能，并在夜间太阳能资源短缺时放电供能；
- 需求响应手段将帮助夜间高峰需求向日间转移；
- 氢气储能主要在夏季发挥作用。

综上所述，到 2050 年，可满足日间供需平衡的技术都是具有可行性的。与此同时，能源转型委员会针对其他地区进行的分析表明，即便在间歇性可再生能源比例高达 85% 的电力系统中，提供包含所需的灵活性解决方案在内的全系统服务的成本也不会超过可再生能源发电平准化成本的 130% 到 175%，而到 2050 年，可再生能源的发电平准化成本将是煤电的一半甚至更低。

因而，本研究认为，到 2050 年，中国在满足年 15 万亿千瓦时用电需求的同时保证电网灵活性的整个系统成本将与基于化石燃料的电力系统成本持平，甚至低于后者的成本。

## 成本经济性和基于中国情况的考虑

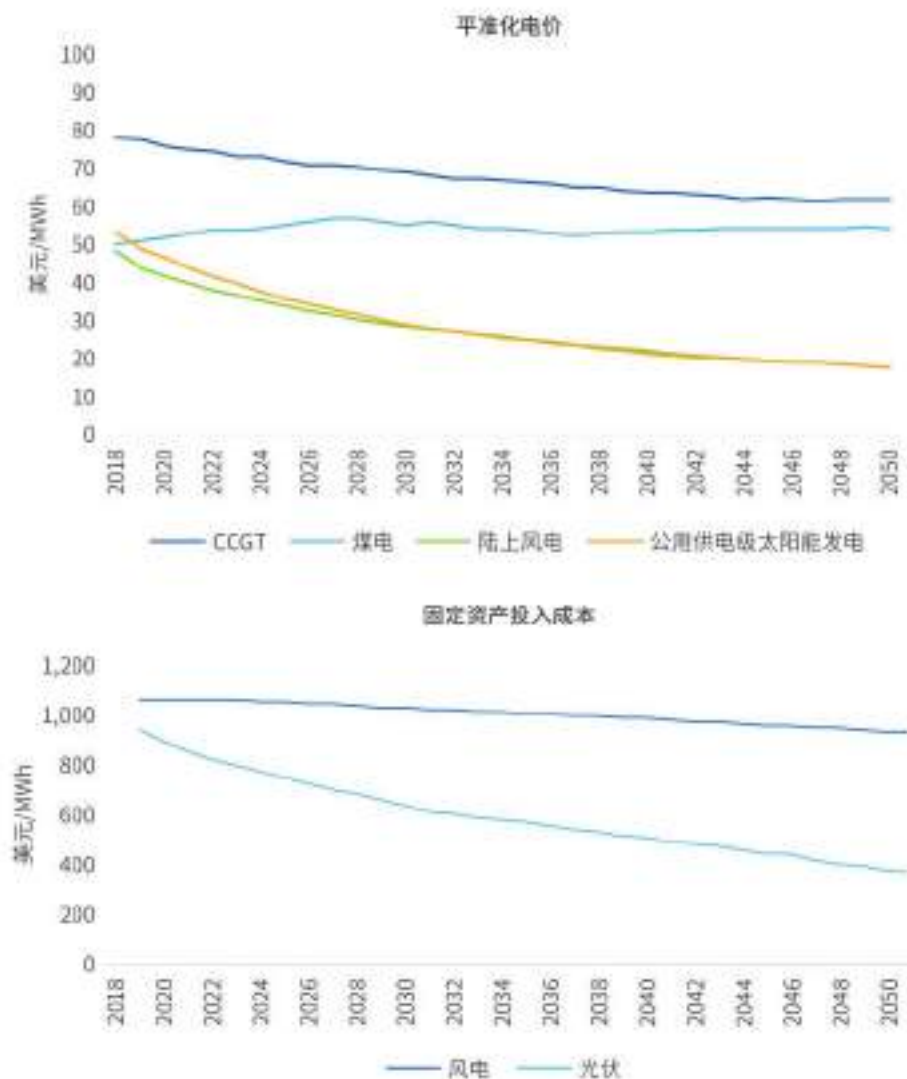
未来光伏和风电成本大幅下降的预期使得中国电力系统脱碳在经济上是可行的，相应的成本将很小，甚至还能带来经济效益。与此同时，储能技术成本的下降也使得系统中的电力供需平衡具有经济性。

自 2010 年以来，光伏发电基准价格已大幅下降 84%，海上风电则下降一半以上，陆上风电也下降 49%，光伏和风电成本性逐渐显现。彭博新能源财经进一步预计，得益于技术学习曲线和规模经济效应，2050 年前，中国陆上风电的平准化成本还将下降 60%，从 2018 年的 \$56/MWh 降至 \$21/MWh，光伏的基准价可能还将下降 70%，低至 \$21/MWh（图表 7-9）<sup>[7]</sup>。这些估计体现了对光伏太阳能板未来成本大幅下降，风电市场逐步完善、风险减小、风机效率得到提升、成本进一步下降的预期。

光伏和风电的成本下降将使其逐渐比包括煤电和气电在内的火电更有成本竞争力，即便没有应对气候变化的压力，光



到2050年,设备和开发成本的持续下降以及能效的提高,可能会使中国的陆上风电和光伏的平准化发电成本再分别降低60%和70%,投资成本也将继续下降。



图表7-8: 光伏与风电的平准化发电成本与投资成本

数据来源: 彭博新能源财经, 可再生能源展望2018

伏和风电也将在不远的将来占据市场主体地位。

如前面所讨论的, 整个电力系统的成本还包括提供灵活性的成本和储能成本等, 但这些成本也将在未来出现较大幅度的下降。

类似地, 得益于电动车电池的迅速发展, 锂电池储能的成本

自2010年以来已下降超过85%。与此同时, 用于电网储能的电池成本也有大幅下降, 到2030年, 其成本可能进一步下降50%~60%<sup>(1)</sup>, 到2040年的价格降幅将达到75%<sup>(2)</sup>, 并且到2050年还有可能进一步下降<sup>(3)</sup>。

在接下来的几十年里, 随着消费需求扩张和生产规模扩大, 电解水制氢的成本也将大幅下降。能源转型委员会在《可

完成的任务》报告中指出,从全球看,2050年的氢气产量将是目前的10倍(从6000万吨增长到6亿吨),在此情况下,技术学习曲线和规模经济效应将推动电解槽设备成本大幅下降,而中国有望成为该进程中的行业引领者。根据彭博新能源财经分析,中国的碱性电解槽的成本(约\$200/kW)目前已大大低于欧洲(约\$1200/kW),并将在2030年左右下降到\$125/kW,到2050年下降到\$90/kW<sup>[7]</sup>。兆瓦级的质子交换膜(PEM)电解槽系统的成本下降相对缓慢,但也有望从目前的\$1400/kW下降到2050年的\$100/kW到\$200/kW。

当电解槽的成本大大下降时,即便在较低的设备利用率下(例如10%),制氢也将具备成本效益,尤其是在可再生电力成本低于图表7-9所示平准化成本的时段制氢,其成本将更具优势。

结合这些因素,彭博新能源财经分析指出,用可再生电力制氢的成本将有望从2019年的\$2.5/kg到\$6.9/kg下降至2050年的\$0.9/kg<sup>[8]</sup>。在此成本下,氢气将成为高比例可再生能源电力供给中的极具成本优势的储能手段。

在能源转型委员会于2017年发布的报告《更好的能源,更大的繁荣》中指出,当灵活性和储能技术具有成本优势时,在2030年左右就可实现以可再生能源为主的电力系统的电力成本低至\$70/MWh,与火电成本持平。而实际情况显示,相关的成本下降趋势甚至比该报告所假设的更为迅速。中国拥有以较低成本大规模生产太阳能光伏板、电池、电解槽等设备的能力,因此,中国的相关发电成本极有可能低于全世界的平均水平。

因此,中国完全有能力在较低的成本甚至负成本的条件下,实现其电力系统的全面脱碳。

在这样的零碳电力系统中,本研究的情景认为,火电机组(主要是生物质发电和结合CCS技术的天然气发电)仍然会发挥一定作用,且其作用主要聚焦在提供灵活性方面。然而,在短期内,已有的煤电机组也可通过灵活性改造,为电网提供灵活性服务,但由此产生的碳排放需要通过CCS进行处理。而从长期看,若其他形式的储能成本如彭博新能源

财经预测的那样逐渐具有成本效益,未来用于平衡电力供需的手段很有可能以储能为主。

## 加速的投资和总投资成本

中国有能力建设一个可在2050年提供15万亿千瓦时电力的零碳电力系统。在此条件下,2050年的电价将有望低于目前水平。然而,实现这一愿景需要加速投资,尤其是对于光伏和风电领域。在2018年风电新增装机20 GW,光伏新增装机44 GW的基础上,到2050年,每年风电和光伏新增装机需要达到70 GW和80 GW。

然而,即使按照这样的增长速度,光伏和风电装机的总投资成本占中国年GDP的比例也将不到0.4%。同时,由于风能和太阳能资源与人口密度大的负荷中心之间距离较远,能源的输送需要长距离超高压(UHV)输电,进而增加了系统总成本。配电网的投资也需要增加,用以支持热泵等更大规模电气化。此外,尽管储能的成本会有大幅下降,也需要大规模初始投资的投入。

目前,本研究并未细致地量化地研究这些所需投资,但能源转型委员会中国项目计划于2020年就此进行更深入的研究。中国的相关成本很可能比其他国家的更低。例如,在欧洲,超高压输电系统的建设成本中,土地成本、法律成本等占了很大一部分,而中国则不会出现这种情况。与此同时,去中心化技术的发展也将缓解潜在的基础设施大规模扩张压力,并助推需求响应的发展和应用。

然而,即便系统中的其他各项成本增长率高达75%,中国的零碳电力系统的年均总成本仍然不大可能超过全国年均GDP的0.7%。对比中国目前投资占GDP比重达40%,且还将减少在房地产领域的投资,这使得中国投资零碳电力系统在经济上非常可行。第十章将就成本和投资问题展开更深入的讨论。



**H<sub>2</sub>**  
Hydrogen

**第八章**  
氢能的重要作用

氢能极有可能在难脱碳行业的碳减排工作中发挥重要作用,且在成本经济性上极具竞争力。此外,氢能也将在电力系统中扮演能源储存和灵活性调节的重要角色。本研究分析表明,要实现净零碳排放,中国需要将氢气年产量从目前的2500万吨提高到2050年的8100万吨(2.52万亿千瓦时)。届时,大规模的零碳氢气将由多种生产方式的组合来提供,但长期来看,电解水制氢由于其日渐增强的成本竞争力,很可能成为其中的最主要途径。

## 2050年前不断增长的氢能需求

氢能将在中国重工业、重型运输的脱碳以及电力系统灵活性方面发挥重要作用。本研究模型表明,如果中国要在2050年成为零碳排放经济体,氢的年需求量将需要从现在的2500万吨增加到2050年的8100万吨左右<sup>21</sup>。

**重工业:** 氢能将在重工业实现零碳的过程中发挥重要作用。它可为水泥等许多工业提供直接热源。它还可在直接还原(DRI)技术中被用作还原剂,以生产零碳钢铁。此外,以氢气、一氧化碳和二氧化碳的混合物作为原料,可以生产化工行业价值链中的几乎所有主要产品。基于可再生能源电解水制氢的Power-to-X技术可以成为化工行业的脱碳选择之一。零碳氢气也可满足将快速增长的合成氨的需求,包括现有合成氨需求及用作航运零碳燃料的新增氢气需求(每年总计4300万吨氨)。在甲醇方面,用于二氧化碳氢化作用的催化剂已经实现商业化生产,全球范围一些试点工厂也已开始运行。

**道路交通:** 在轻型道路交通领域,纯电动车(BEV)很可能在未来占据主导地位,但氢燃料电池车(FCEV)也可能受到少数长途旅行需求较大用户的青睐。同时,氢燃料电池车具有续航里程长、燃料补充速度快等优点,在重型长途货运中可起到重要作用。中国也已经制定了打造大规模加氢站基础设施的计划。

**航运:** 在零碳发展目标下,BEV和FCEV也可在河流、沿海等

短途航运领域发挥重要作用,且它们的经济性也将逐步改善。然而,对于长途航运,由于电池重量过大,BEV将不具备可行性或经济性,而由于燃料存储对空间需求过大,FCEV也将不具备经济性。对于零碳的长途航运领域,氢气可能会发挥主要作用,而且这些氢气将主要来源于以氢气为主要原料的哈伯法,由此将带来每年760万吨的氢气需求。

**航空:** 在航空部门,以氢为燃料的飞机可能成为中短途飞行的一种脱碳选择路径<sup>22</sup>。目前,全世界已有多种机型正在开发,一些专家认为,氢或电池可以应用于驱动100座以下、飞行距离在300-500公里内的飞机<sup>23</sup>。但是航空领域的氢燃料电池应用仍需要持续加大研发力度<sup>24</sup>。

**电力系统灵活性:** 利用过剩电力生产氢气有望成为有效的储能机制,帮助提高整个能源系统的灵活性。如前文第七章介绍的,在本研究模型中,2050年零碳电力系统中的弃风弃光可支持每年至少100GW的氢气生产,这些氢气可通过与天然气等气体混合或以燃料电池的形式为系统提供灵活性服务。如这部分弃风弃光可全部利用,则将需要100万吨(303亿千瓦时)的氢气储能容量。

如图表8-1所示,在零碳情景下,为满足2050年交通运输和工业部门的需求,中国每年需要生产8100万吨氢气,其中钢铁、化工原料和重型运输部门的需求量最大。此外,氢气的生产和使用也将和电力部门紧密相关。

而中国如要实现零碳经济,则必须要考虑如何以零碳的方式来生产这些氢气。

## 零碳氢气的多种生产路径

中国可通过多种技术可行的途径生产所需的零碳氢气:1) 利用零碳电力电解水制氢;2) 将碳捕集与封存技术应用于煤气化与甲烷蒸汽重整(SMR);3) 在不增加化石能源消耗的情况下收集和利用工业副产氢。

21.如第三章所述,若假设2050年钢铁年产量是7亿吨,而不是基础情景的4.75亿吨,氢气年需求量将上涨350万吨。

在零碳情景下,中国氢气消费量可能达到每年8100万吨。

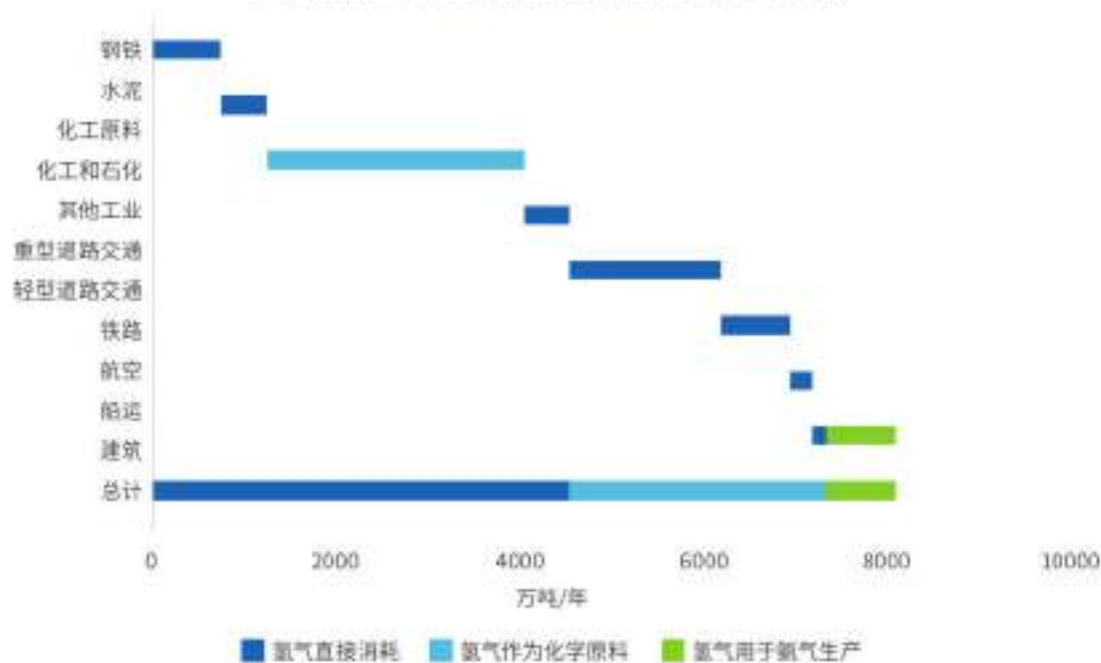


图8-1: 在ETC零碳情景下,中国2050年各部门和应用领域的氢能需求

数据来源: 能源转型委员会/德意志研究所项目组

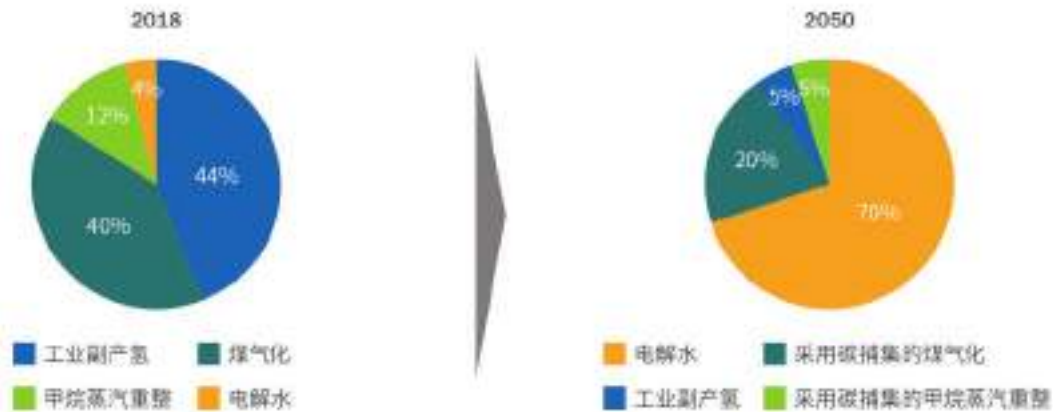
在目前中国每年生产的2500万吨氢气中,40%来自煤气化,12%来自甲烷蒸汽重整,另外40%的氢是钢铁生产中的炼焦过程、氯碱生产、轻烃脱氢和裂解反应中的副产品。如果不需要消耗额外的化石能源来收集和提纯氢气,那么工业副产氢也可以算作一种零碳氢气,否则这些氢气就会被浪费掉。目前,部分工业副产氢可在现场被用作原料或热源,其余部分则可采用变压吸附(PSA)法进行提纯,收集到高纯度的氢气。

目前,电解水制氢法成本仍然较高,因此用电解水方法生产的氢气只占总产量的4%,且主要为碱性电解法。此外,由于火电在中国发电制仍占主导地位,电力供应的碳强度仍然较高,电解水制氢至今还不是一种完全零碳的制氢途径。事实上,按照目前中国发电的碳强度(约590克CO<sub>2</sub>/千瓦时)计算,电解水制氢的碳强度可能是煤气化的3-4倍。

为实现氢气生产在2050年完全零碳化,需注意以下几点:

- 中国电力生产的零碳化,是大幅提升电解水制氢的基础。如果未来8100万吨氢气需求中有70%来自电解水技术,那么零碳电力的增量需求将达到2.60亿千瓦时。
- 甲烷蒸汽重整或煤气化过程中产生的二氧化碳纯度较高,利于捕集。因此在这些制氢过程中使用碳捕集(CCS)技术的经济性将优于其他领域。虽然目前的碳捕集技术可以有效地减少90%的二氧化碳排放,达到每公斤氢气排放2公斤二氧化碳的水平,但未来的技术进步可能会使碳减排比例提高至98%,达到每公斤氢气排放0.4公斤二氧化碳的水平。
- 其他零碳制氢技术包括使用核电高温气冷堆等热源的热化学技术、甲烷热解、光电化学技术等,在长远来看可能为制氢提供更多的清洁路径,但目前还远未实现商业应用。
- 在甲烷蒸汽重整工艺中使用生物甲烷替代天然气也是一种技术上可行的方法,但由于中国可持续的生物质资源有

在ETC零碳情景中,使用可再生能源电力的电解水制氢将成为氢气生产的主要途径。



图表8-2: 2018年和2050零碳情景下中国的氢气生产路径

数据来源: 中国氢能联盟(2018年数据); 能源转型委员会/洛基山研究所项目组(2050年数据)

股,其他领域有着更高的优先利用等级,生物甲烷在制氢方面可能不会发挥主要作用。

## 相对成本: 电解水制氢的竞争力将逐渐增强

目前在中国,煤气化是最具经济性的制氢方法。但是,随着时间的推移,电解水制氢的成本可能会大幅下降,而以化石燃料为基础的生产路线的成本可能会保持稳定,并且随着CCS的应用,后者的成本还有可能增加。因此,电解水很可能在成为成本最低的零碳氢气生产方式。电解水制氢成本大幅下降的主要驱动因素有两个——电解槽设备固定成本的下降,以及零碳电力成本的下降。

由于规模效应和学习曲线效应,电解槽的成本很有可能会在全球范围内迅速下降,而在中国,随着电解水的自动化推进、劳动力成本降低,电解槽投资成本可能会以更快的速度下降。如第七章所述,研究显示,中国目前的碱性电解槽投资成本已经远低于欧洲水平(中国每千瓦200美元,欧洲每千瓦1200美元),并且有望在未来下降至每千瓦90美元左

右<sup>22</sup>。而非瓦规模的PEM系统投资成本也预测可在2050年降低至每千瓦100-200美元。

此外,随着可再生能源及核电的大规模应用,零碳电力的成本很可能会稳步下降。根据第七章描述的优化电力系统设计,到2050年,可再生能源的平准化发电成本可能降至每兆瓦时20-30美元<sup>23,24</sup>。

但在一个以可再生能源为主的电力系统中,电价将由供需平衡决定。若在电价最低的时段进行生产,制氢的用电成本还可进一步降低。一旦电解槽的投资成本降至足够低的水平,即使设备利用率较低(如20%或更低),仍可具备成本经济性。事实上,如果使用弃风弃光电力,则边际成本将为零。彭博新能源财经认为,到2030年,随着电解槽投资成本的下降,电解水制氢即使在设备利用率仅为6%-7%的情况下仍更具成本竞争力<sup>25</sup>。另外,在可再生能源占主导地位的电力系统中,灵活的制氢工艺可以成为一种有效的需求响应手段。

相比之下,由于技术已经成熟且化石燃料的成本较为稳定,

22. 国际能源署(IEA)的The Future of Hydrogen报告中预计2050年碱性电解槽系统的成本降至\$200-\$700/kW; 彭博新能源财经的Hydrogen: The Economics of Production from Renewables报告中预计400MW级别碱性电解槽项目可降至\$80-\$98/kW; 国际可再生能源机构(IRENA)的Hydrogen: A Renewable Energy Perspective报告中预计为\$200/kW。

当电价在每兆瓦时30美元时,使用可再生能源电力的电解水制氢将是比应用CCS的煤气化制氢成本更低的方式,但其成本仍高于未应用CCS的煤气化制氢。

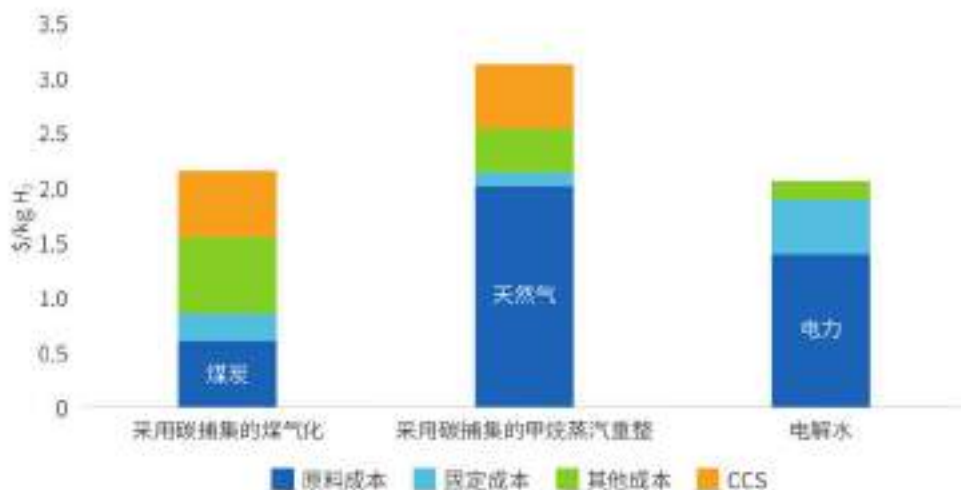


图8-3: 零碳制氢成本分解 (美元/每公斤氢气)

注: 1. 假设: 电价=30美元/兆瓦时; 电解槽系统投资成本=400美元/千瓦;  
2. 原料: 煤化工原料为煤炭; 甲烷蒸汽重整原料为天然气; 电解水原料为电力。  
数据来源: 能源转型委员会/落基山研究所项目组

要使电解水制氢成本与不采用CCS的煤气化制氢成本持平,在电价为每兆瓦时20美元情况下,系统投资成本需要低于每千瓦350美元。

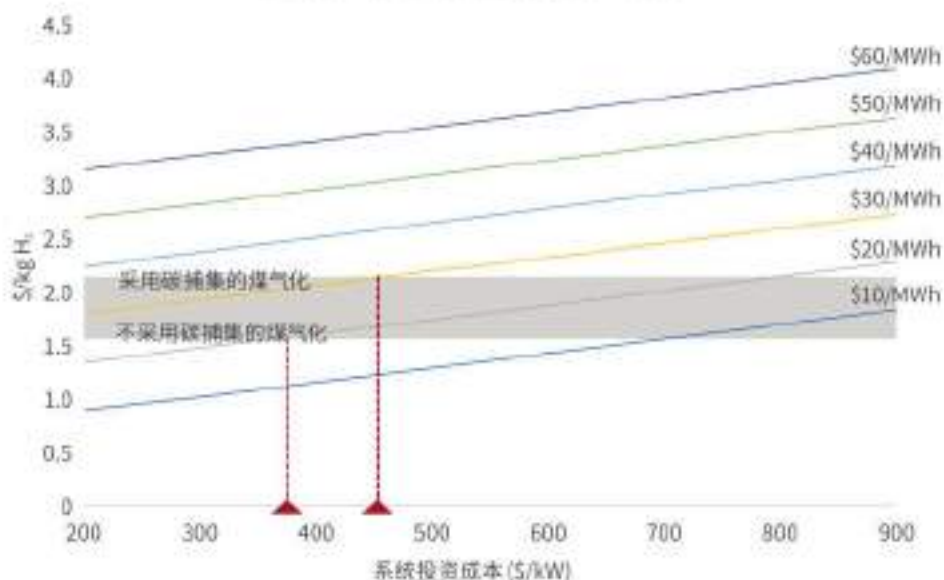


图8-4: 不同电价下的电解制氢成本

数据来源: 能源转型委员会/落基山研究所项目组


基于化石燃料的制氢方式的成本下降空间较小。此外,采用碳捕集和封存(CCS)技术会使每公斤氢气的生产成本增加0.6美元,使煤气化和甲烷蒸汽重整的总成本分别达到每公斤氢气约2.15美元和3.12美元。

图表8-3和8-4显示了在不同电解槽固定成本和电力成本的组合下,不同氢气生产路线的成本比较。如图表8-3所示,在可再生能源电力价格为每兆瓦时30美元时,如果系统投资成本低于每千瓦400美元,则电解水制氢成本将低于不采用CCS的甲烷蒸汽重整制氢成本,低于采用CCS的煤气化制氢成本,但是仍然高于不采用CCS的煤气化制氢成本。要使电解水制氢成本与不采用CCS的煤气化制氢成本持平,则电价需不高于每兆瓦时20美元,且系统投资成本需不高于每千瓦370美元左右。

基于未来的成本趋势,本研究认为,电解制氢将可能在未来成为成本最低的零碳制氢方式。但是,由于目前煤气化制氢的成本更低,已经有大规模的生产设施在运行,且数量仍在增加,煤气化制氢在未来短期内将继续发挥重要作用,因此发展CCS技术对于零碳制氢也是至关重要的。

在2050年零碳情景下,本研究预计,随着成本的降低,可再生能源电力电解制氢工艺将提供氢气总产量的70%,而应用碳捕集技术的煤气化制氢仍将贡献氢气总产量的20%。

要推动氢能的规模化发展及其在各领域脱碳化进程中的应用,需要有强有力的政策引导。同时,可再生能源电力电解水制氢以及应用CCS的煤气化制氢等零碳制氢模式也亟需政策方面也需要相关政策支持。此外,行业利益相关方的积极行动和技术的进步在扩大氢气生产规模和降低成本等方面也是不可或缺的。

A large pile of wood chips is being processed by a conveyor belt system. The conveyor belt is moving the wood chips from the right side of the frame towards the left. The wood chips are piled up in a large, conical shape. The background shows a clear blue sky and some trees in the distance.

**第九章**  
生物质能源利用和  
碳捕集与封存

## 生物质能源：资源有限，利用应有侧重

在零碳经济中，生物质既可以作为零碳能源，又可以作为零碳原料，但利用生物质较为复杂，其原因包括：1) 生物质与粮食等其他生产领域对土地、水等资源存在一定竞争关系；2) 生物质来源和生物质终端能源品种需求的多样性使得生物质能源转化必须针对具体条件和需求进行；3) 需要与行业中其他替代低碳路径进行成本比较。因此，目前中国对生物质的利用十分有限。为了使中国在2050年实现净零碳经济，本研究提出了以下关于生物质利用的建议：1) 中国潜在的可持续生物质资源供应最多可以达到每年5.8亿吨标煤（17 EJ），但这需要基于土地利用支持政策和有效生物质收集系统的发展；2) 在供应有限的情况下，生物质能源应优先应用于航空、航运、化工原料和发电；3) 与其他脱碳路线相比，生物质能路线的成本几乎没有竞争力，因此相关政策支持对于推动生物质能的发展及其经济性的提高至关重要。

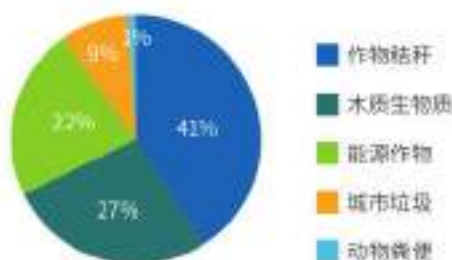
### 中国生物质可持续供给的潜力

已有研究对中国生物质能供应潜力的估算结果差异较大，从每年不到4.1亿吨标煤（12 EJ）到大约8.5亿吨标煤（25 EJ）不等。本研究认为，中国的每年生物质能供给大约可以达到最多5.8亿吨标煤（17 EJ），其中约2.4亿吨标煤（7 EJ）来自农作物秸秆和其他农业废物，1.3-1.7亿吨标煤（4-5 EJ）来自木材废物，1-1.3亿吨标煤（3-4 EJ）来自能源作物，3400-6800万吨标煤（1-2 EJ）来自城市垃圾（图表9-1）。随着城市化进程的推进，城市垃圾量可能会增加到发达国家的水平，但更完善的垃圾回收和管理体系也有利于减少垃圾量。对于农作物秸秆，本研究假设50%将被用作肥料或饲料，与当前的比例相同。

但在目前，每年中国生物质能使用量只有大约3400万吨标煤（1 EJ），也从侧面显示了目前生物质在多个领域的应用都面临着一定障碍。

- 作物秸秆：中国大规模的农业种植使得作物秸秆成为中国最大的生物质资源。中国是世界上人口最多的国家，可耕

作物秸秆、木质生物质和能源作物是支持2050年中国实现零碳经济中潜力最大的生物质能来源。  
(100%=5.8亿吨标煤)



图表9-1: 2050年中国的年生物质资源潜力

数据来源：能源转型委员会/落基山研究所项目组

地面积的利用率较高，在未来中国人口大致保持稳定的预期下，耕地面积到2050年也不会有较大变化。因此，本研究预计，未来全国作物秸秆产量极有可能保持在目前每年4.1亿吨标煤（12 EJ）的水平。然而，作物秸秆利用的主要障碍在于收集效率低下。由于缺乏大规模的系统收集机制，作物秸秆在最终消费端的价格大幅上涨，而农民在生产端得到的收入又较低。在缺乏完善的收集和物流系统的情况下，中国作物秸秆生物能利用率非常低。

- 能源作物，如玉米、甘蔗、甜高粱、油料作物等。能源作物每公顷能源产量最高，也最容易被转化为生物燃料，但它们面临着土地利用的限制。中国农业部颁布的《农业生物质能产业发展规划（2007-2015年）》中指出，中国西部地区仍有不适合种植正常作物的盐碱地可用于种植高粱，另外3亿公顷的荒地、裸土地或季节性闲地可用于种植木薯、甘蔗和其他能源作物。但由于存在与粮食生产和城市化的竞争，并考虑到这些土地的使用成本还不明晰，能源作物的可用性还存在较大的不确定性。

- 木质生物质：木质生物质包括修剪的薪柴和来自伐木及木材加工业的残留废物。前者需要大规模的再造林和林业管理支持。幸运的是，中国正在实施大规模的造林计划来保护沙地，尤其是在西部地区，对森林保护非常重视。因此，未来可收获的森林作物有可能会增加。但与作物秸秆一样，所有木质生物质资源也面临着缺乏完善收集系统的问题。



- 藻类可能是未来生物质的另一种重要来源，可以通过实验室栽培实现大量生产。但该领域发展还处于初级阶段，其真正潜力还有待进一步研究和挖掘。

有效的生物质资源收集体系对于扩大中国生物质市场、将生物质价格降至合理水平至关重要，它需要政策的指导和商业模式发展的支持。详细的土地利用规划也对确保生物燃料的能源作物生产十分关键。考虑了使用过程中的损失等因素，本研究认为，中国每年可以实现最多5.8亿吨标煤（17 EJ）的生物质供应，本研究也将基于这些估计，对生物质优先利用领域进行分析。

## 生物质的优先利用领域

中国多个部门都正在使用或有潜力使用生物质能或生物质原料来推动脱碳。在中国，每年最多5.8亿吨标煤（17 EJ）的可持续生物质供应将远远不足以满足零碳经济下工业、交通、建筑和电力领域对生物质的可能需求。因此，生物质能的使用必须集中在其他替代脱碳途径选择最少、经济可行性最低的领域。基于优先级考虑后，2050年零碳情景下生物质消费量将为每年4.4亿吨标煤（13 EJ）。

在难脱碳领域中，综合分析其他替代脱碳方案的技术和经济可行性，本研究认为，在零碳目标下，中国生物质利用应优先在航空、航运和化工领域。

- 航空：生物燃料和合成燃料都可作为长途飞行的零碳解决方案。虽然相对成本趋势尚不明朗，但生物燃料极有可能在中国航空脱碳进程中扮演重要角色。目前，UOP集团和埃尼集团等在航空生物燃料技术开发方面处于领先地位，中石化和中石油等中国石油公司也已开始在该领域与这些国际公司开展合作。中石化、中国海南航空公司和波音公司已合作进行了生物燃料飞机的试飞。

- 航运：在航运方面，生物柴油和其他生物燃料在短期内可能比氢气和合成氨的成本更低。但是，随着未来氢气和合成氨生产成本的大幅降低，该领域对生物能的需求将会逐渐减小。

- 道路交通：考虑到电动发动机能源效率较高，以及纯电动车（BEV）和燃料电池车（FCEV）在中国的大力推广，生物燃料和沼气可能不会在公路运输中发挥较大作用，且较难有良好的经济性。本研究分析认为，中国2050年的零碳情景下，纯电动车将更多地应用于乘用车领域，而在重型卡车领域则更倾向于应用燃料电池车。

- 重工业：生物质在化工行业中可以发挥重要作用，它可作为生产化工产品单体的原料，而生产中排放的二氧化碳又可被生物质生长中吸收的碳排放所抵消。中国政府、企业和学术机构均纷纷积极推动以生物质为原料的塑料生产。以玉米为原料的塑料生产已经实现了商业化生产。生物质还可以直接用于重工业的热力供应。但是，正如第三章所描述的，工业的供给侧脱碳也有其他替代途径，如使用氢气、直接电气化和碳捕集等，而生物质能与这些途径相比可能不具备成本竞争力。

除了难脱碳领域以外，生物质也可以支持建筑和电力部门的脱碳：

- 建筑供暖：虽然电气化将是建筑能源应用脱碳的主要途径，但生物质可以在农村地区发挥较为经济可行的补充作用。利用农村现有的农业和森林资源，可节省运输成本，降低生物质利用成本，从而推动生物质在农村地区的应用。截至2015年，中国农村地区已建成沼气项目约10万个，产能达到190亿立方米（0.4 EJ）。

- 发电：如第七章所述，中国经济的脱碳需要建立一个高度依赖可再生能源的电力系统，生物质可在帮助提高电网灵活性方面发挥作用。技术成熟的生物质或沼气热电联产（CHP）也可以帮助满足农村地区或工业区的需要。截至2015年，中国生物质发电装机容量已达10300兆瓦，其中一半为垃圾发电。

考虑到中国有限的生物质供给，本研究分析建议：

- 航空和化工原料将是使用生物质进行脱碳的最优先领域。到2050年，航空将需要大约1亿吨标煤（2.92 EJ）的生物质

供给,但如果合成燃料的成本下降,航空领域对生物质的需求可能会更低。化工行业每年将消耗4900万吨标煤(1.45 EJ)的生物质原料,用量仅次于氢气原料(用于Power-to-X路径),但化石能源仍将是化工行业中重要原料。

- 生物质的最大需求将来自发电,2.1亿吨标煤(6.29 EJ)生物质将用于供应中国7%的电力。但如果未来可再生能源发电和储能、需求响应等电网灵活性服务的成本大幅下降,生物质发电需求可能会大幅减少。

- 生物质还将有助于航运、建筑供暖和重工业热力供应等领域的脱碳,但是中国有限的生物质资源较难为这些领域提供可持续且成本较低的生物质供给。因而本研究建议,在这些领域,尤其是重工业领域中,应该优先考虑其他脱碳途径。

## 生物质的成本竞争力

生物质能的成本评估较为复杂,原因包括:1) 地区性差异; 2) 不同生物质资源的成本差异; 3) 不同生物质的收集与运输损失; 4) 各种转化过程的商业化成本趋势的不确定性。如前文所述,缺乏有效的收集体系可能会大大增加生物质终

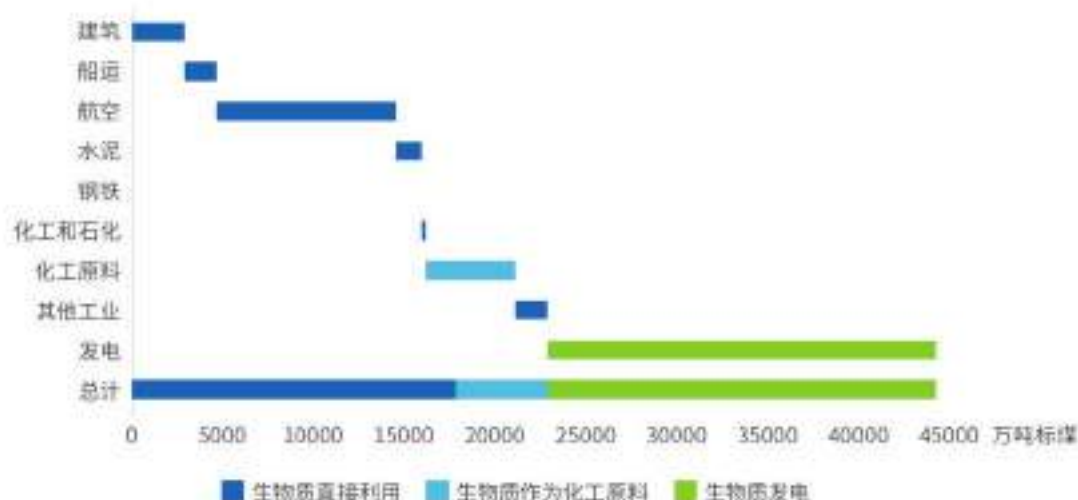
端应用的成本。由于不同地区的农耕模式和资源的可获得性不同,目前作物秸秆的成本也会从东北地区的每吨42美元到东南地区的每吨169美元不等。

城市垃圾是成本最低的生物质来源。城市垃圾制成的生物燃料或沼气的成本可完全具备与化石燃料或天然气竞争的能力。但城市垃圾的总量非常有限(5500万吨标煤或1.6 EJ)。

生物质能在不同应用场景中的不同转化成本使得终端生物质能的成本存在较大不确定性。目前研究对液体生物燃料成本的估算差异很大,而且未来新技术的出现带来的变数较大。根据目前的估计,生物航空燃料的生产成本与传统航空燃料相比有很大的成本溢价(可达到100%)。有研究认为,即使从长期来看,生物燃料也只有在原油价格升至每桶60-80美元以上时,才能与汽油和柴油竞争。考虑到今后石油价格可能会下降,如果需求下降,价格由较低的边际成本生产商决定,那么,为了使生物燃料具有成本竞争力,还需要碳价格政策的支持。

在沼气方面,中国农村地区沼气发电和供暖项目的成本可能具有竞争力。但Ecofys的研究显示<sup>[10]</sup>,就大规模利用而

2050年中国零碳情景下,生物质能源应优先应用于航空、化工和发电等领域。



图表9-2: 2050年零碳情景下中国的生物质消费情况

数据来源: 能源转型委员会/蒂基山研究所项目组



言,沼气的成本明显高于天然气,而且这种情况几乎肯定会持续下去。

目前,中国用于发电的固体生物质成本也远远高于煤炭或天然气,只能在强制性配额或补贴的支持下才能具有竞争力。此外,麦肯锡公司的研究认为,无论电价如何,在化工产品生产中,生物质路线的成本都将是氢能或碳捕集路线的至少3倍。

因此,在未来,大多数形式的生物质的成本都很可能继续远高于化石燃料,这意味着需要较高碳价或其他形式的政策支持,才能使它们具备经济竞争力。在一些应用领域,基于生物质的解决方案可能比电气化、氢能或碳捕集等其他脱碳途径的成本更高,进而会自然地和市场淘汰。在这种情况下,未来生物质在能源系统中发挥的作用将比本研究情景假设的水平更低。

## 碳捕集与封存:一种战略性选择,将发挥一定的作用

考虑到中国非常丰富的可再生能源电力资源和开发氢能和生物质能等脱碳选项的潜力,碳捕集与封存(CCS)在中国实现零碳经济进程中将仅发挥有限的作用,但仍然不可或缺。其应用主要集中在工业和制氢领域,而电力部门次之。本研究预计,中国每年的碳捕集需求将仅约10亿吨,与中国较强的碳封存潜力相比,这具有较高的可行性。

### 背景:中国实施CCS的路径

作为以煤为主的经济体,中国长期以来一直将CCS作为目前能够使其燃煤电厂和高耗煤工业实现完全脱碳的重要技术路径。CCS更被视为一种过渡性战略选择,为向低碳能源体系全面转型争取更多的时间。因此,中国政府早在“十一五”(2005-2010)初期就投入了资金和研究力量用于CCS的研发。

目前,中国已有许多处于不同发展阶段的试点和大规模示范项目<sup>100</sup>。例如,中石油吉林油田2007年启动了二氧化碳

捕集封存与提高采收率(CCS-EOR)示范项目,年碳减排能力为10万吨;华能北京热电联产燃烧后捕集试点项目于2008年开始运行,年捕集能力为3000吨,同时华能天津整体煤气化联合循环电厂还从2011年开始进行燃烧前碳捕集技术的试验;2011年,华中科技大学开展了富氧燃烧碳捕集试点,年二氧化碳捕集能力为5万-10万吨。

然而,尽管中国采取了一些措施,却依然缺乏清晰而坚定的计划来广泛部署CCS技术。当前大多数项目的推动确实得益于驱油的需求,这种技术也有助于为CCS创造商业可行性,但其不可避免地会造成化石燃料产量增加,这些增加的化石燃料将最终产生更多的碳排放。

在战略层面,CCS技术的有限进展也在一定程度上反映出中国政府在是否将煤炭结合CCS技术的路径作为能源转型的主要途径问题上的不确定。能源转型委员会《可完成的任务》报告提到,考虑到电气化和氢气将直接推动能源转型的巨大潜力,未来巨大的成本下降空间、中国丰富的风能和太阳能资源等因素,与大力发展CCS相比,中国实际上确实有其他的选择。

### 有限但仍然关键的作用

在本研究的情景下,碳捕集技术将需要应用于捕获约10亿吨碳排放,在90%的捕获率下,可将碳排放减少到每年约1亿吨(图表9-3)。碳捕集的主要应用领域包括:(1)煤气化制氢以及甲烷重整制氢过程;(2)工业部门的化石燃料燃烧过程;(3)化工原料相关碳排放和水泥生产的过程排放等(在图表9-3中均计为工业原料排放);(4)电力部门中的应对短期和季节性峰值的火力发电。

本研究还考虑化工产品的全生命周期排放,即塑料产品在丢弃后进行焚烧处理的二氧化碳排放。研究假设,在未来土地稀缺更严重的情况下,难以提供足够的填埋场地,焚烧更有可能作为相关产品使用寿命结束后的处理方式。但由于焚烧尾气中二氧化碳密度更低,收集二氧化碳的难度更大。对塑料等产品的全生命周期管理、回收利用和安全填埋将大大有利于减少焚烧中对CCS的需求。

ETC2050年零碳情景下,碳捕获技术将应用于处理约10亿吨碳排放,在90%的捕获率下,剩余碳排放减少到每年约1亿吨。

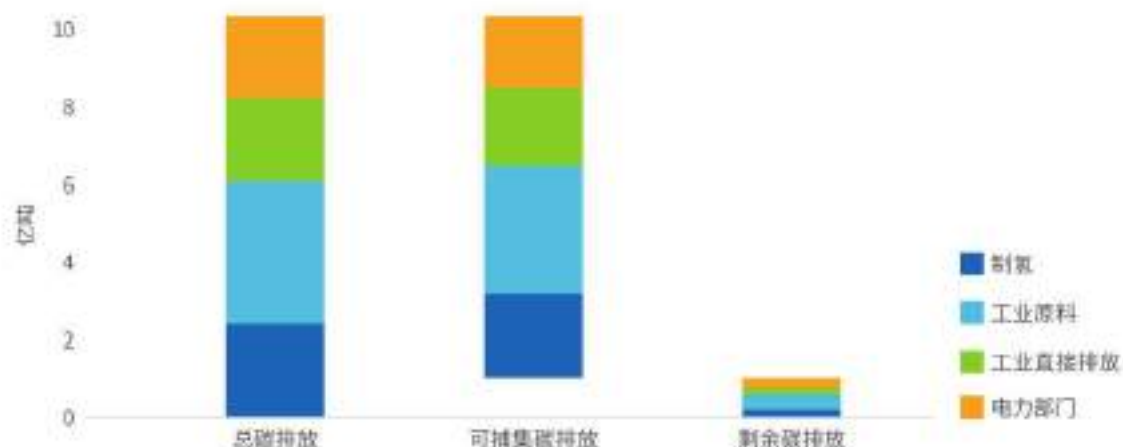


图9-3: 2050年零碳情景下中国总碳排放、可捕集碳排放和剩余碳排放

数据来源: 能源转型委员会/布鲁山研究所项目组

另外,如第三章所述,如果钢铁行业采用高需求情景下的假设,2050年基于化石能源的长流程钢生产路线的钢铁产量为1.4亿吨(而不是基础情景下的9500万吨),则额外需要9500万吨二氧化碳捕集容量。

与其他情景研究对比,本研究中的10亿吨的碳捕集需求总量大大低于其他研究的结果。国际能源署“2摄氏度以下”情景中估计值为每年26亿吨二氧化碳。中石油经济技术研究院的“美丽中国”情景估计的2050年碳捕集量为每年13亿吨二氧化碳,每年净排放量则仍高达33亿吨(图表9-4)。

本研究认为,要在2050年实现净零碳排放,碳捕集的角色相对次要,因此需求量也较低,相比之下,其他脱碳途径(尤其是电力和氢气)将更可能发挥更重要的作用,且更具可行性。

## 碳捕集、利用和封存的技术可行性

被捕集的二氧化碳既可以在地下封存,也可被利用。利用二

氧化碳的方式有很多种,但在零碳性方面,需要注意的是:

- 碳的矿化,或将二氧化碳用于混凝土养护<sup>23</sup>,从而消除这部分的碳排放,符合真正发展零碳经济的要求;
- 利用二氧化碳作为原料之一用于塑料生产<sup>24</sup>,若塑料再次使用后可重复再用而不是废弃焚烧,仍符合零碳经济需求;
- 用于微藻、甲醇和化学合成的生物燃料,二氧化碳虽然被用于生产过程中,但随后仍随着燃料的燃烧排放出去。这种形式的利用通过有效地“二次利用碳分子”而减少了排放,但这些手段无法实现零碳经济<sup>25,26,27</sup>;
- 通过使用碳封存来实现石油采收率提高(EOR)或煤层气采收率提高(ECBM),而这些化石燃料燃烧时仍然造成碳排放,且还会造成高碳强度经济的锁定作用,不利于实现零碳经济。

尽管Solidia公司已证明矿化和混凝土固化方案具有相当

23.例如,美国公司Solidia已开发利用这一技术。

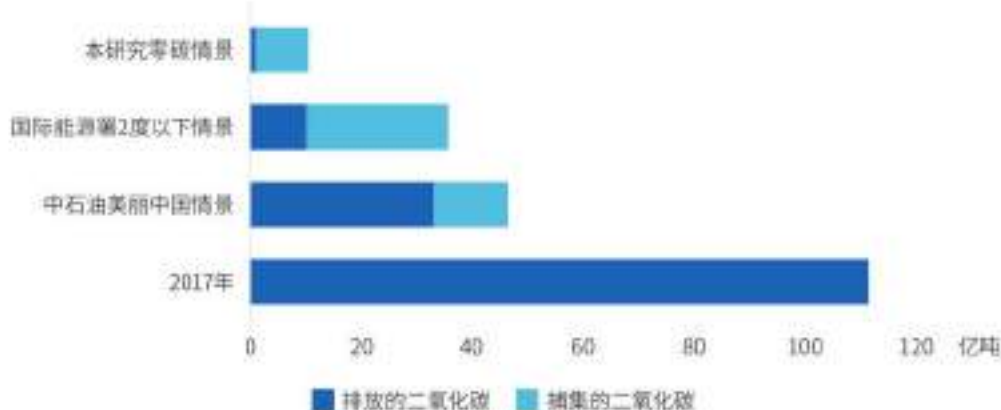
24.四川大学等研究团队正在进行使用被捕集的碳生产高附加值化学产品的技术的开发。

25.我们认为,虽然EOR和ECBM有助于降低CCS成本,并可作为关键技术促进CCS的应用,但它们会帮助生产更多化石燃料,所以我们未将其视为零碳解决方案。

26.2019年,中国科学技术大学的团队开发了一种新的催化剂,可将二氧化碳转化为甲醇。

27.中国新能源集团试点测试了微藻碳吸收系统应用于捕集燃煤电厂碳排放。

10亿吨总二氧化碳排放大大低于其他情景中最大捕集量26亿吨。  
捕集这部分二氧化碳将比其他情景具有更强的技术和经济可行性。



图表9-4: 不同情景下中国2050年二氧化碳排放量和捕集量

数据来源: IEA. (2017). Energy Technology Perspectives 2017; 中石油经济技术研究院, 世界和中国能源展望2050; 能源转型委员会/葛基山研究所项目组

大的潜力, 应该得到大力发展, 但大多数被捕集的二氧化碳很可能还是需要被封存。对中国碳封存总容量的估计显示, 可行性较高, 且可将运输成本降至较低水平。

根据中国科学院武汉岩土力学研究所的一项研究, 中国的理论碳封存容量约为2.5万亿吨, 其中大部分为盐水层封存(图表9-5)。综合考虑技术效率、环境和地质风险管理以及社会经济影响等相关因素后, 可以得出中国碳封存的有效容量为1.5万亿吨, 从理论上说, 若每年封存10亿吨二氧化碳, 这些资源共可使用1500年。

此外, 中国科学院武汉岩土力学研究所的一项研究表明(图表9-6), 如果假设排放源和封存地点之间的距离上限为250公里, 中国碳封存的“源汇匹配容量”每年达到10亿吨二氧化碳是可行的。且实现这一情景, 也不需要中国东海岸生产的二氧化碳输送到如西北地区鄂尔多斯盆地盐水层等较远地区, 从而可避免更高的运输成本。

## 碳捕集、运输和封存的成本

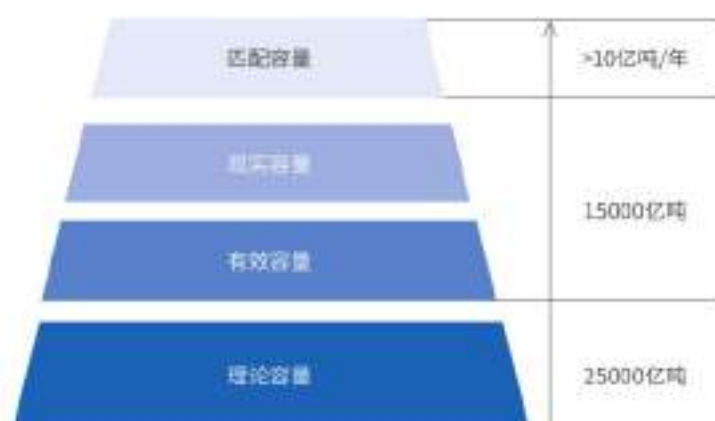
在未来, 在中国应用CCU/S的成本将与全球的成本相近, 甚至更低。

- 《可完成的任务》基于全球碳捕集与封存倡议(Global CCS Initiative)的研究显示, 不同部门应用中的碳捕集成本可能存在显著差异, 如: 在甲烷重整中可低至每吨二氧化碳12美元, 钢铁生产中每吨二氧化碳约60美元, 水泥生产中约90美元。如果碳捕集技术应用于电力部门, 还必须考虑显著的效率损失。

- 运输成本主要取决于运输距离, 而封存成本则取决于封存地点位于陆上还是海上。对于全球而言, 陆上运输加封存的成本为每吨7-12美元, 海上运输加封存的成本为每吨16-37美元。

根据中科院武汉岩土力学研究所的研究, 中国有丰富的碳封存容量, 封存成本估计介于渤海湾的每吨2美元到鄂尔多斯盆地的每吨10美元之间, 再加上对长途运输的需求十分有限, 中国的碳封存加运输总成本很可能会低于其他地方。考虑到中国的经济和工业部门的巨大规模, 通过规模经济和学习曲线效应, 中国的碳捕集成本可能会进一步降低。武汉研究所估计, 如要实现每年封存10亿吨碳封存量, 各种应用领域中碳捕集、运输和封存的总成本平均值可能在每吨二氧化碳55美元左右。

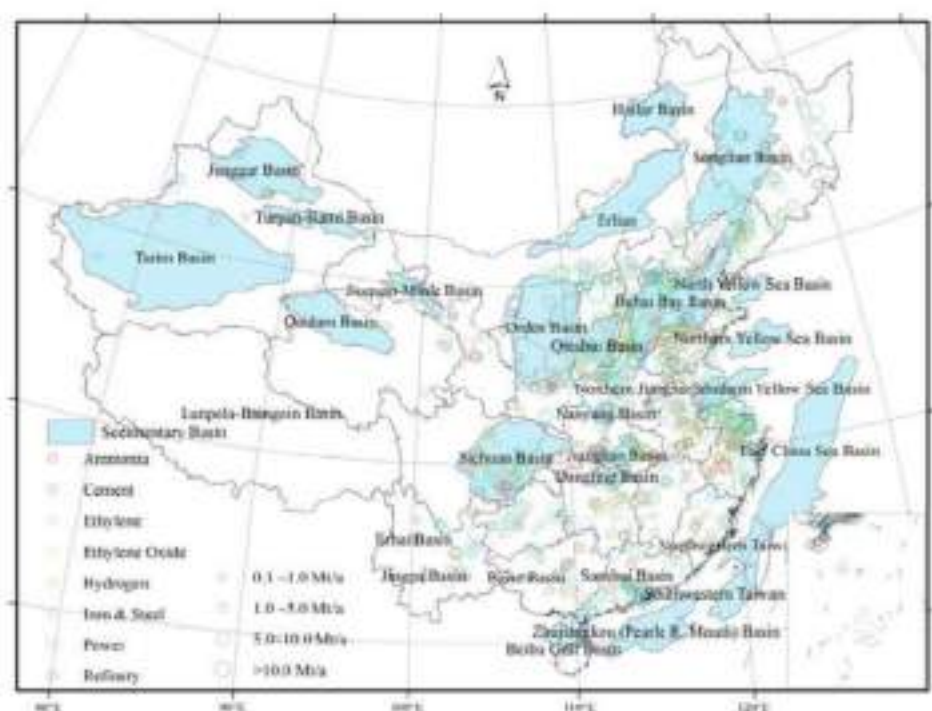
中国的理论碳封存容量约为2.5万亿吨,其中1.5万亿吨为有效和现实容量,若每年封存10亿吨,理论上这些资源共可使用1500年。



图表9-5: 中国的碳封存容量


数据来源: 中国科学院岩土力学研究所

考虑到排放源和封存地点之间的距离,中国有足够的“匹配”封存容量来满足本研究情景预测的封存需求。



图表9-6: 中国碳排放源和封存场地

数据来源: Ning Wei, Xiaochun Li, et al. (2015). Regional resource distribution of onshore carbon geological utilization in China. Journal of CO2 Utilization. (11), 20-30



## 第十章

脱碳路径：有限的成本，  
重要的机遇

本报告第三章至第五章的分析显示，中国工业、建筑和交通部门最终实现脱碳在技术上是可行的，且有多种技术路径选择（见图表 10-1）。如第七章至第九章所述，提供足够的零碳电力、氢能和可持续生物质，或使用源汇匹配的碳捕集和封存以实现中国在 2050 年完全脱碳也是可行的。本章将说明，这种脱碳可以在对整体经济和消费者产生较低成本的情况下实现。本章将依次讨论：

- 在不同领域的单位二氧化碳减排成本。
- 实现“2050 年零碳”所需的总体经济成本以及对经济增长和投资的影响。
- 消费者和生产者的额外成本以及对对中国相关领域竞争力的作用。
- 零碳情景下的其他经济、社会和环境效益，包括对就业的影响等。

总体来讲，实现零碳经济的成本将远小于对气候变化不采

取任何措施对中国乃至全世界经济带来的损失。

## 单位二氧化碳减排成本

能源转型委员会的《可完成的任务》报告，以及 2017 年发布的《更好的能源，更大的繁荣》报告已指出，在脱碳进程中，各部门的边际减排成本存在一定差异。在电力部门，即便对于可再生能源发电量占比高达 85% 的电力系统，考虑保障全天候供电所需的灵活性强的电源装机和储能设施的成本，电力系统的成本也将在 2030 年代中期就完全可以与基于化石燃料的系统相竞争。因此，电力行业的长期边际减排成本将为零甚至为负值。

与之类似，在地面交通的电气化方面，轻型车辆将在短期内实现显著的成本下降，重型车辆也将在长期获得成本竞争力。但是，在难脱碳领域，本研究预计，至少在近中期，边际减排成本依然较高，从钢铁部门的每吨二氧化碳 25-60 美元，到航运部门的每吨二氧化碳 150-350 美元不等（图表 10-2）。

本研究还没有专门对中国的边际减排成本进行分析，但中国



图表 10-1：各领域的多种脱碳路径选择

数据来源：能源转型委员会/落基山研究所项目组

特殊的发展情况使得一些部门的减排成本有可能低于全球平均水平。尤其表现在:

- 虽然当前较低的煤价使得零碳电力的成本在短期内与火电相差明显,但从长远来看,中国丰富的风能和太阳能资源使其有望以很低甚至为负值的成本完成电力部门脱碳。廉价的可再生能源电力也可推动中国钢铁(通过氢直接还原)或航运(以零碳氢气制得的氨作为燃料)等领域以低于全球平均水平的成本实现脱碳。
- 中国巨大的经济规模和高储蓄率将使其有望在电解槽等关键技术上发挥规模效应和学习曲线效应,并以比其他国家更低的投资成本调动大规模投资(特别是可再生能源电力)。
- 此外,如第九章描述的,中国有条件以相对较低的成本部署碳捕集技术。
- 不过,中国生物质资源供应很可能比其他一些国家(如北美和南美)更为有限,从而造成生物能成本高于全球平均水平。

根据能源转型委员会在中国未来的工作计划,将对中国具体的减排成本进行更详细的分析,但总的来说,基于能源转型委员会对全球单位减排成本来估计中国的脱碳成本是较为合理的。

考虑到中国特定的有利因素,以及未来有可能更快的技术突破速度,中国未来脱碳的实际成本可能还会显著降低。例如,如果未来在水泥、化工、电池密度或生物燃料生产等方面的新技术路线上取得重大突破,中国脱碳的总成本就将进一步降低。

## 总体经济成本小: 增长与投资

从2006年开始,多项全球研究显示<sup>[7]</sup>,以不超过2050年GDP的1%-2%为代价来实现全球经济的脱碳是可能的。基于本研究对全球边际减排成本的估算与中国具体的产业结构和产品产量,我们认为中国脱碳所需的经济代价将会更低。

从长远来看,电力脱碳和地面交通电气化的成本将接近于零,甚至可能为负。对于难脱碳领域,我们认为其潜在脱碳成本将

难脱碳领域单位碳减排成本差别很大。

高成本情景、低成本情景下能源供给侧单位碳减排成本  
\$/吨CO<sub>2</sub>

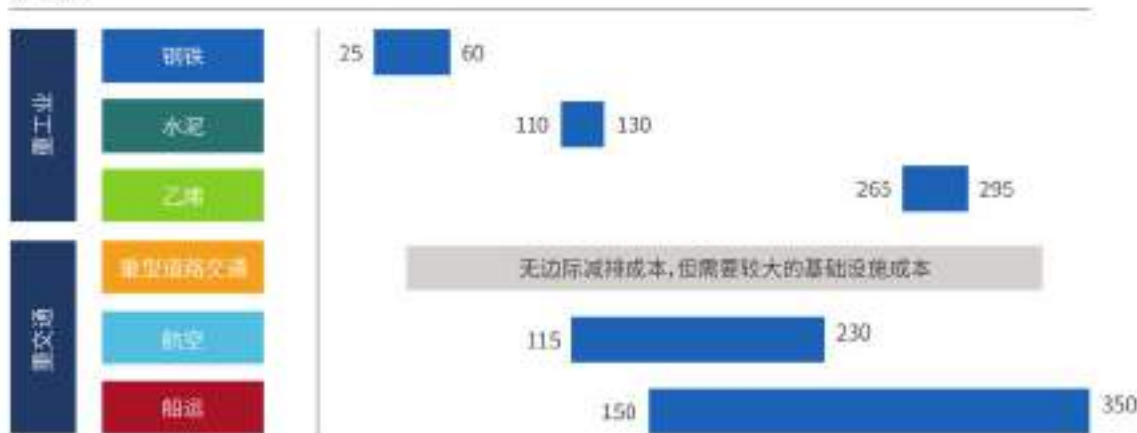
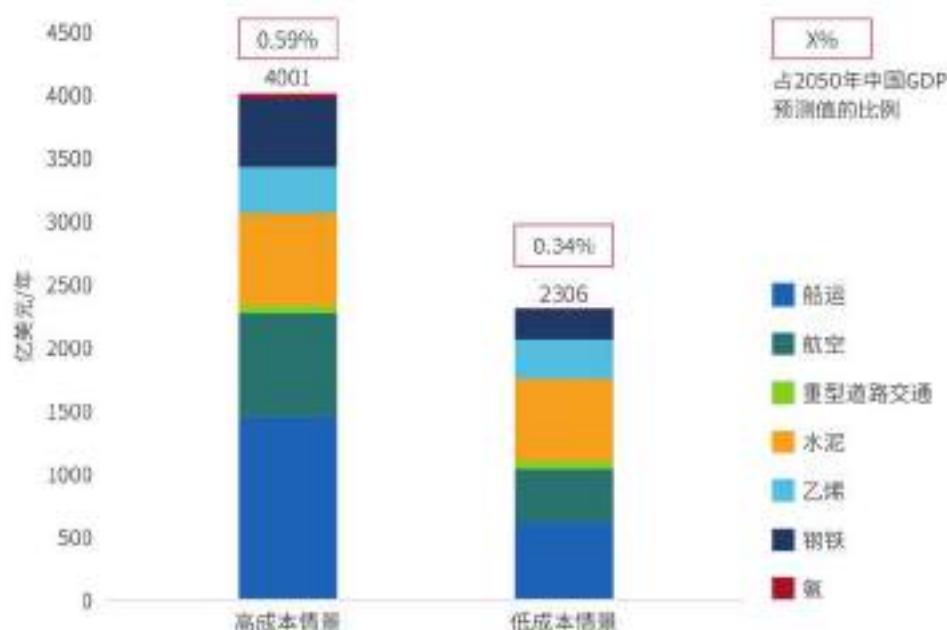


图10-2: 难脱碳领域单位二氧化碳减排成本

数据来源: 工业领域数据来自麦肯锡公司(2018)《工业部门的脱碳: 下一个前沿》报告; 航运领域数据来自UMAS分析; 其他交通领域数据来自SYSTEMIQ分析

ETC2050年零碳情景下，潜在消费侧脱碳成本将占GDP的0.3%-0.6%。与全球情况类似，其中最显著的额外成本将来自航运、航空和水泥等方面。



图表10-3: 消费侧脱碳的总成本预测

数据来源: 能源转型委员会/落基山研究所项目组

占GDP的0.3%-0.6% (图表10-3), 与全球情况类似, 其中最显著的额外成本将来自航运、航空和水泥行业。

此外, 改善建筑隔热和安装热泵所需的额外投资可能给建筑部门带来部分净成本。但总体而言, 中国经济脱碳的总成本不太可能超过2050年GDP的1%。

与此同时, 尽管所需的额外投资的绝对量非常大, 但与中国的储蓄和投资能力相比, 这一代价非常小。

政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 对实现1.5°C气候目标所需额外投资的评估显示, 未来30年每年所需投资的平均值约为0.9万亿美元, 约占同期全球GDP的0.6%。到目前为止, 最大的投资支出来自于建设大量可再生能源装机的资本支出。本研究分析结果也与其他机构的结果保持一致:

- 麦肯锡公司对于工业领域脱碳的分析报告显示<sup>[10]</sup>, 在2020年至2050年间, 工业部门脱碳所需的额外投资总额可

能占全球GDP的0.4%-0.8%。中国工业部门额外投资需求占GDP的比例将与该数字相当。

- 与此同时, 在中国和世界各地, 建设零碳经济将需要大量的风电和光伏发电装机, 该领域投资力度需达到当前水平的二至四倍。但就中国而言, 本研究分析表明, 要实现这一装机容量所需的额外资本投资仍将低于未来30年中国GDP总量的0.4% (图表10-4)。即使考虑到输配电系统的增量

年新增装机	ETC零碳情景要求		2018年实际值
	2018-2033年	2030-2050年	
风电	76 GW	65 GW	20 GW
光伏	73 GW	83 GW	44 GW

图表10-4: 中国新增风电和光伏装机和投资总额

数据来源: 能源转型委员会/落基山研究所项目组

投资,总额也不太可能超过GDP的0.7%。

目前,中国储蓄和投资占GDP的比例超过40%,相比之下,脱碳对额外投资的需求是很小的。此外,随着中国人口先稳定后缓慢下降,以及城市化进程在未来10-15年内接近完成,基础设施和房地产投资必然会逐渐下降,预计在2050年前可以有更多的资金用于支持建立零碳经济。从宏观经济的角度看,零碳经济领域的发展和投资量增大,可以弥补其他领域投资需求的减少,对保持经济增长活力作出积极贡献。

## 对生产者和消费者的成本:关于“竞争力”挑战

考虑到完全脱碳对GDP增长的影响很小,其对消费者生活水平的影响也将较小。但值得注意的是,在某些行业,脱碳对中间产品价格的影响仍可能很大,并需要相关政策的支持。

图表10-5和图表10-6展示了脱碳对生产者和消费者价格的不同影响。对工业部门而言:

- 钢铁生产脱碳可能会使每吨钢铁的成本增加20%,但对

于完全使用零碳钢铁的汽车而言,制造成本增量将不超过目前普通汽车价格的1%。

- 类似地,水泥脱碳可能会导致水泥成本增加高达100%,但对整体建筑成本的影响很小,只有3%。

- 对塑料而言,乙烯价格可能增加50%,但对一瓶一升装软饮料瓶的价格影响几乎可以忽略。

这意味着,尽管中国重工业全面脱碳对消费者生活水平的影响将微乎其微,但在企业层面,脱碳行动不可能完全避免竞争劣势的影响。因此,碳价或相关规定对于全面推动脱碳进程至关重要;而且,某些领域(特别是钢铁)将需要各国间政策协调,建立国内碳定价体系并建立各国碳价的互联机制,避免本国企业在国际竞争力方面处于劣势,我们将在第十一章中对此做进一步的讨论。

在重型和长途交通方面,情况则有所不同:

- 长期而言,脱碳可能不会造成成本损失,也不需要政策上考虑对国际竞争力的影响。

难脱碳领域的脱碳将对中间产品价格产生较大的影响

		对中间产品价格的影响 美元或 价格上升比例	
重工业	水泥	+\$100 每吨水泥 (+\$30 每吨混凝土)	+100% (+30%)
	钢铁	+\$120 每吨钢铁	+20%
	塑料	+\$500 每吨乙烯	+50%*
重交通	重型道路运输	无显著影响	无
	航运	+\$400万(平均) 散货船每年航程成本	+110%
	航空	+\$0.3-0.6 每吨航油	+50-100%

图表10-5: 难脱碳领域脱碳对中间产品成本的影响

数据来源:能源转型委员会中国项目,SYSTEMIQ分析

难脱碳领域的脱碳将对最终消费者价格产生很小的影响

		对最终产品成本的影响 美元 或 价格上升比例	
重工业	塑料	+50.01 一瓶饮料	<1%
	钢铁	+5180 一辆汽车	<1%
	水泥	+515,000 一套50万美元的住宅	<1%
重交通	重型道路运输	无显著影响	无
	航运	+50.03 一吨所运输的糖的价格	<1%
	航空	+540-80 一张6500公里经济舱机票	+10-20%

图表10-6：难脱碳领域脱碳对终端消费品成本的影响

数据来源：能源转型委员会中国项目，SYSTEMIQ分析

● 通过使用新的低碳燃料（如生物燃料或氢）来实现国际航运的脱碳可能造成运费的大幅提高，但分摊到所运输的消费品上，对其价格的影响很小。

● 航空业的中间成本将大幅增加，并可能对消费者成本产生重大影响。如果生物燃料或合成航空燃料的价格比传统航空燃料高出50%-100%，这可能会使机票价格上升10%-20%。

因此，正如第十一章也将讨论的那样，虽然各国可以采取单方面行动来推动国内货运、航运和航空的脱碳，但国际航运和航空领域脱碳的最佳途径需要国际各国及平台间协调的支持。

## 技术发展、就业机遇，以及空气质量的改善

如前文所说，2050年实现净零碳排放对中国经济增长率及消费者生活水平的影响很小。并且，净零碳排放还将为发展新技术和竞争优势、创造就业和改善空气质量带来重大机遇。但是对于一些地区，就业影响需要采取一定的引导和扶持。

**技术优势和竞争优势。**到2050年实现净零碳排放的目标，将刺激多个领域的技术进步，增强中国在全球技术领域的领导地位，尤其是：

● 大规模的电气化将推动风电和光伏技术的进一步发展，中国已经拥有世界前五大风力涡轮机制造商中的两家和世界前十大的太阳能电池板制造商中的八家。

● 电解槽和燃料电池等电化学技术方面的进步，以及规模经济和学习曲线效应带来的成本下降，都有助于加速氢能经济的发展。在所有这些领域，鉴于目前在电池技术领域已经占据的强势地位，中国都有条件成为全球领导者。

● 在2050年大力发展道路电气化，将有机会使新电池密度化学和能源密度方面实现技术突破，并在电动车、公共汽车、卡车和火车制造领域具备全球领先的竞争力。

● 中国在钢铁和水泥生产领域的巨大市场份额使其有机会大规模开发和应用已成熟的技术（氢气直接还原炼铁等）和还处于开发初期的新技术（直接电解铁和新型水泥化学）。

国际可再生能源机构（IRENA）预计，中国可再生能源行业已经创造了400万个工作岗位，占全球总数的36%；到2050年，这一数字可能上升到1000万，远远超过目前煤炭行业的就业人数。



图表10-7: 部分国家可再生能源行业的工作岗位数量

数据来源: 国际可再生能源机构就业数据库

国家发改委预计，最早在2020年，新能源产业总产值就可能达到2万亿美元。氢能联盟预计，到2050年，仅氢气工业总产值就可能达到1万亿美元规模<sup>[7]</sup>。

**创造就业。** 零碳经济将创造大量就业机会。国际可再生能源机构（IRENA）估计，2018年全球可再生能源行业（包括太阳能、风能、水电、生物能、太阳能供暖和制冷、热泵、地热能等）已创造就业岗位1100万个，其中中国占400万个，占全球总数的36%。到2030年，这一数字可能会上升到全球2400万个，到2050年达到2900万个，其中中国大约将达到1000万个工作岗位——远高于目前煤炭行业的就业人数。此外，电动车电池行业、保温性能高且节能的高质量建筑行业和其他许多行业也将创造大量就业机会。

而对于其他一些行业，则不可避免地会出现大量失业，尤其是煤炭开采业等行业。据估计，到2018年底，中国煤炭开采业就业人数约为330万人<sup>[8]</sup>。总的来说，中国目前每年创造

超过1000万个新的城市就业机会，就业人口（20-64岁的人口）也预计将从今天的9.26亿下降到2050年的7.5亿，因而煤炭开采业就业人数的大幅减少对于三十年的时间尺度来说是可以控制的。在过去的六年中，中国政府开展了强力的煤炭去产能工作，化解了大约200万采矿业的职业分流。一批落后小煤窑被关闭，产业向大型国有企业集中，如神华集团和中煤能源集团等大型企业的劳动生产率则是全国平均水平的两倍<sup>[9]</sup>。此外，据估计，有将近75%的采矿工人为40岁以上，大部分将在2050年之前离开采矿业。然而，中国煤炭开采业集中在特定的省份（中国煤炭产量的四分之一来自山西），一些地区和城市的煤炭开采业就业分流可能会对当地经济造成严重影响，因此需要谨慎进行政策引导和扶持。

**改善空气质量。** 发电部门零碳发展，以及地面交通和建筑供暖行业的电气化也将大幅改善空气质量。

- 道路车辆是城市地区氮氧化物和颗粒物排放的主要来源；即使电力仍然来自火力发电，车辆电气化也可以大力减少局部污染效应。当发电部门完成脱碳，所有上游排放就将同时消除。

- 以煤炭为基础的住宅供暖是中国冬季颗粒物排放的另一个主要来源。研究数据显示，与非供暖季节相比，华北地区的供暖会造成PM2.5排放量增加50%。自2017年以来，公共政策开始寻求将中国北方的供暖热源从煤炭改为天然气或电力。然而，中国有限的天然气供应限制了应用天然气的可能。尽管天然气供暖对空气质量的影响比煤炭要少，但最新研究表明<sup>[10]</sup>，与电气化的零排放解决方案相比，天然气对空气质量也有显著的负面影响。因此，荷兰、英国和加州部分地区已经计划在不久的将来禁止新建住宅使用天然气。



## 第十一章 推动转型的政策支撑

中国在2050年实现净零碳排放在技术和经济上都是可行的。但如果没有一个明确的战略目标,没有政府最高层面的支持,没有多种强有力的政府政策和投资计划,就不可能实现这一目标<sup>28</sup>。中国特殊的经济和政治体系推动形成了举国体制下的“集中力量办大事”的制度优势。具体而言,中国具备以明确、量化、有约束力的规划目标为指引,充分发挥市场工具作用,并紧密结合强有力的监管和政府长期持续的投资能力,使其具有绝佳的机会能够快速推动零碳目标下的能源转型。与此同时,省、市等地方政府也具有发挥重要作用的潜力,地方行动往往在出台创新政策方面更具优势,更有竞争意愿,而且一些地方已经在应对气候变化领域制定了目标,启动了实质性行动。

## 制定清晰的2050目标

许多国家现在都在制定零碳排放目标和具体的实现时间。正如联合国气候变化框架公约(UNFCCC)秘书处在2019年9月报告的那样,目前全球已有60个国家承诺到2050年甚至更早实现零碳排放。英国现在已在法律上承诺到2050年实现净零排放,法国也在相同的路径上做着努力。瑞典、挪威和芬兰都设置了远早于2050年的日期。欧盟可能很快就会确定到2050年实现零碳排放的目标。

中国可通过设定2050年实现零碳排放的目标展现全球领导作用。鉴于中国的政治和决策环境,设定这样一个目标本身就会产生重大的影响,改变国有和私营企业的行为方式,并为国家发改委、国家能源局、生态和环境部、工业和信息化部 and 国资委等多个相关政府机构的后续决策提供清晰的框架,进而对推进国家领导人提出的能源革命产生深远影响。

## 分部门、分步骤构建有力的政策体系

在明确的最终目标范围内,中国可以利用一系列政策手段和具体的国家投资行动来确保进展,包括:

- 建设相互协调的分部门能源转型量化指标体系,例如可再生能源和核电发电量占比。

- 关键基础设施领域的持续大规模投资,例如输电系统、高铁网络和车辆充电基础设施等。

- 建立碳价体系,利用市场激励的力量来推动企业和决策部门寻找成本最低的解决方案。欧盟和美国等国家和地区正在酝酿制定碳关税政策,拟对来自没有碳价体系国家的工业产品征收调节性关税。例如,美国气候领导委员会目前在美国提出的一项建议是,初始碳价每吨40美元,每年上涨5%。中国正在建设全国碳市场,为避免碳关税在全球范围内形成趋势后对中国工业产品出口造成不利影响,中国应加快建设以碳市场为基础的碳定价体系。

- 法规可以在推动工业、商业和住宅建筑能效提高、确保循环经济发展以及推动地面交通全面电气化方面发挥重要作用。

- 充分利用政府采购持续推动低碳产品消费水平。中国财政部有关数据显示,中国2018年中央财政政府采购金额达到GDP的4%,如果考虑到地方政府以及国有企业相关的产品和服务采购,中国公共部门采购具有巨大的影响力。

- 支持关键技术的研发、示范和推广,推动“难脱碳”部门尽早部署关键技术和生产工艺,避免锁定效应。

这些不同政策杠杆之间的平衡将会也应该因部门而异。在一些部门,如航空和水运,中国政策与全球行动协调起来将能够发挥最好地效果。关键部门的优先政策领域包括:

### 电力

电力生产脱碳需要将风电和光伏领域投资加快2-4倍,同时加强核电项目建设并大力开发水电。有效的碳价设置可以

28. 需要指出的是,中国政府在制定相关气候目标时也应综合考虑与能源安全、环境污染、扶贫和经济增长等其他社会经济的协调,保障落实气候目标的同时推动其他领域的共同发展。



在鼓励这些发展方面发挥重要作用,但要取得迅速进展,还需要国家或私营部门对必要的投资作出明确的长期承诺。因此,该部门的政策应包括:

- 制定明确的全国和各省电力的碳强度(每克二氧化碳/每千瓦时)下降阶段性目标,包括2030年和2040年中间目标,以实现在2050年零碳排放。
- 设定可再生电力增长的量化目标,并推进竞价上网,确保最低成本提供不断增长的可再生能源;持续加大降低弃风弃光弃水力度,加强可再生能源的消纳。
- 制定明确的战略计划和投资承诺,以支持全国可再生能源发电所需的输电线路建设。
- 改革电力市场,消除可再生能源发电调度的障碍。
- 大力支持多种储能技术的创新。

## 工业

电力行业可以相对统一地通过定义清晰和明确的政策推动零碳转型。但是,工业脱碳将需要不同行业和采取不同生产工艺的国有和私营企业采取多样的行动,以寻求成本最低的脱碳途径。因此,中国应通过建立碳市场,引导各部门、各个企业根据自身碳排放和能源需求的特点寻求成本最低的零碳路径。在全球形成碳关税体制的情景下,中国还可对来自不征收类似碳税的国家的进口产品征收边境碳关税,并对自身的出口产品实行碳排放相关的退税。

但在推动能源效率提高和发展循环经济方面,监管也应发挥关键的作用。因此,该部门的政策还应包括:

- 利用公共采购来支持在公共投资的基础设施建设中使用零碳材料(尤其是钢铁和水泥),并制定法规要求在私人投资项目中使用零碳产品。
- 加强对塑料分类和回收过程的监管,最大限度地发挥机

械回收的潜力。

- 禁止塑料出口、填埋和焚烧,确保所有塑料以机械或化学方式回收。

## 建筑

在建筑部门,监管是比价格更有力的政策工具。该部门的适当政策包括:

- 严格落实对新建建筑和既有建筑改造的节能标准。
- 针对公共建筑和居住建筑的制冷及采暖,持续推进更加严格的标准法规。
- 制定明确的近期规划目标,逐步淘汰燃煤和燃气供暖,转向全电气化解决方案,并尽可能应用热泵。

## 地面交通

在这一部门,监管和量化目标与价格同样重要,但公共投资也可以发挥关键作用。该部门的关键政策包括:

- 设定明确的量化目标来推动从内燃机到电动发动机的转变,同时在卡车和长途公共汽车部门做好纯电动车和燃料电池车之间的平衡。
- 对内燃机汽车和(以及随后的轻型和重型卡车)的新车销售设定明确的禁售日期。一些国家已经设定了这样的日期,包括挪威2025年、法国2040年、英国2040年以及爱尔兰2032年。英国还很有可能将禁售日期进一步提前。考虑到中国在电动车领域已经拥有的强大领导地位,以及通过快速转向电动车而获得竞争优势的潜力,中国可以设定一个领先世界的日期。
- 公共或强制性投资于充电网络和潜在的氢燃料补给网络。
- 继续建设高速铁路网,投资地铁和其他公共交通系统,并

制定政策,通过电气化或氢能火车的部署完成铁路网剩余部分的完全脱碳。

### 水运与航空

对于国内航空和水运,中国的脱碳行动领域包括:

- 实施零碳航空燃料强制政策,要求国内航空燃料中来自零碳来源的比例不断上升。
- 强制要求将内河和沿海水路运输在规定的时间内转向电力、混合动力、氢或其他零碳技术。

对于国际航空和水运,需要积极参与国际层面的协调和合作,脱碳才能以最迅速和最平稳的方式进行。国际海事组织(IMO)和国际民航组织(ICAO)已经制定了到2050年将二氧化碳排放量降低50%的指示性目标。在这些组织内部,中

国应发挥领导作用,争取在强有力的国际法规和燃料效率规定的支持下,推动该目标向100%减排目标转变。

### 对技术创新和就业的支持

本报告已说明,利用当前已知技术在2050年实现零碳排放,在技术和经济上都是可行的。但其中一些技术仍处于发展的早期阶段,还需要大规模部署以降低成本。此外,多维度的技术进步可以带来产业的加速度发展,从而大幅降低零碳经济转型成本。中国完全有能力推动这些技术的发展,并因此获得竞争优势。

因此,公共政策应该同时支持新技术的基础发展和已知技术的早期阶段部署。

图表11-1和11-2展示了政策支持对这些优先焦点领域的初步评估。

塑料回收	物理回收和化学回收的成本下降与效率提升
新型水泥生产路径	开发新的原料替代石灰石 利用二氧化碳而不是水来进行水泥固化
碳捕集	开发新型溶剂或过程设计来降低成本
第三代生物燃料 (航空用)	降低以木质生物质、废弃物、藻类和其他潜在可持续来源为原料的生产成本
合成燃料	降低以氢气和从空气中捕获的二氧化碳为原料生产合成燃料的成本

图表11-1: 技术发展侧重与机遇: 燃料、材料和碳捕集

太阳能光伏	通过技术提升（如钙钛矿的运用）进一步提高转化效率（从20%提升至30%）
电解水制氢	通过规模经济的实现降低电解设备初始投资成本（从每\$850/kW到\$200/kW）
氢燃料电池	推动成本下降和效率提升
氢气/合成氨存储	压缩气体或液体形式；以金属氢化物形式
核聚变	持续加大研发力度，推动尽早实现经济性
电池	锂电池的进一步成本下降（\$150/kWh到\$50/kWh）和能量密度的提升（250Wh/kg到500Wh/kg） 通过新的化学过程实现能量密度的提升和充电速度的加快
其他储能方式	相变材料、液态空气、熔盐、压缩空气等
热泵	提高性能系数（COP），尤其是在寒冷天气里的性能

图表11-2: 技术发展侧重与机遇: 电能与氢能

## 参考文献

- (1) 联合国人口数据库, 中值预测。
- (2) 前瞻产业研究院 (2018)。中国钢铁行业发展趋势分析。
- (3) McKinsey & Company. (2017). The Growing Importance of Steel Scrap in China.
- (4) UBS. (2018). How Will a Lower Long-term Scrap Price Impact the Industrial Value-chain?
- (5) 中国统计年鉴。
- (6) 相关数据来自环球水泥网站和中国水泥研究院。
- (7) 相关数据来自海关总署、中国水泥协会和数字水泥网站。
- (8) 国家发改委能源研究所, 劳伦斯伯克利国家实验室, 落基山研究所 (2017)。《重塑能源: 中国》。
- (9) 清华大学建筑节能研究中心 (2019)。中国建筑节能年度发展研究报告。
- (10) 国家发改委能源研究所, 劳伦斯伯克利国家实验室, 落基山研究所 (2017)。《重塑能源: 中国》。
- (11) 国家发改委能源研究所, 劳伦斯伯克利国家实验室, 落基山研究所 (2017)。《重塑能源: 中国》。
- (12) 高长明 (2019)。2050年世界及中国水泥工业发展预测与展望。
- (13) 高长明 (2019)。2050年世界及中国水泥工业发展预测与展望。
- (14) 中国科学院武汉岩土力学研究所。
- (15) 《中国统计年鉴》。
- (16) IEA. [2017]. Energy Technology Perspectives 2017.
- (17) IEA. [2019]. The Future of Petrochemicals.
- (18) IEA. [2019]. The Future of Petrochemicals.
- (19) 联合国粮农组织数据。
- (20) 能源数据 (2018), 绿色创新发展中心
- (21) Allen G. Good and Perrin H. Beatty. [2011]. "Fertilizing Nature: A Tragedy of Excess in the Commons," PLoS Biol 9(8): e1001124.
- (22) Xin Zhang et al. (2015). "Managing Nitrogen for Sustainable Development," Nature 528: 51-59.
- (23) Material Economics. (2019). The Circular Economy – A Powerful Force for Climate Mitigation.
- (24) Material Economics. (2019). Industrial Transformation 2050: Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry.
- (25) IEA. [2019]. The Future of Petrochemicals.
- (26) Material Economics. (2019). The Circular Economy – A Powerful Force for Climate Mitigation.
- (27) 中国石油和化学工业联合会数据。
- (28) McKinsey & Company. (2018). Decarbonization of Industrial Sectors: The Next Frontier.
- (29) OECD and IEA. (2007). Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions.



- [30] Alexis Michael Bazzanella and Florian Ausfelder, (2017). Low Carbon Energy and Feedstock for the European Chemical Industry.
- [31] DECHEMA. (2017). Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry – technology study.
- [32] 能源转型委员会 (2018)。《可完成的任务》。
- [33] 自然资源保护协会, 中国煤控项目。
- [34] 中国交通运输部 (2019)《2018年交通运输行业发展统计公报》。
- [35] 中国公安部公开数据 (2019)。
- [36] 中国铁路 (2019)《2018年中国铁路统计公报》。
- [37] 中国城市轨道交通协会 (2019)。中国城市轨道交通2018年度统计和分析报告。
- [38] 国家发改委能源研究所, 劳伦斯伯克利国家实验室, 落基山研究所 (2017)。《重塑能源: 中国》。
- [39] 中国产业信息 (2018)。2017中国机动车数量和结构分析。
- [40] 美国交通局数据 (2018)。
- [41] 美国交通局数据 (2018)。
- [42] 美国交通局数据 (2018)。
- [43] 中国产业信息 (2019)《中国2018年新能源车销量统计》。
- [44] 汽车之家数据。
- [45] LARGE数据。
- [46] 中华人民共和国公安部数据。
- [47] 国家发改委能源研究所, 劳伦斯伯克利国家实验室, 落基山研究所 (2017)。《重塑能源: 中国》。
- [48] Hong Huo et al. (2007). Projection of Chinese Motor Vehicle Growth, Oil Demand, and CO<sub>2</sub> Emissions through 2050, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (2038) 69–77.
- [49] 国家发改委能源研究所, 劳伦斯伯克利国家实验室, 落基山研究所 (2017)。《重塑能源: 中国》。
- [50] 国家发改委能源研究所, 劳伦斯伯克利国家实验室, 落基山研究所 (2017)。《重塑能源: 中国》。
- [51] 中国民用航空总局 (2019)。《2018年民航行业发展统计公报》。
- [52] 中华人民共和国交通运输部 (2019)。《2018年交通运输行业发展统计公报》。
- [53] 能源转型委员会 (2018)。《可完成的任务》。
- [54] 德国国际合作机构 (2013)。《中国电气化出行的气候与环境影响评价》。
- [55] Rocky Mountain Institute. (2019). Breakthrough Batteries: Powering the Era of Clean Electrification.
- [56] 中国工信部 (2016)。节能与新能源汽车技术路线图。
- [57] 中国国家氢能标准委员会 (2016)。《中国氢能产业基础设施发展蓝皮书》。
- [58] Statistica数据 (2017)。中国2007到2017年货车数量。
- [59] 清华大学建筑节能研究中心 (2019)。《中国建筑能源年报》。
- [60] 《中国统计年鉴》(2001-2017)。
- [61] 清华大学建筑节能研究中心 (2019)。《中国建筑能源年报》。
- [62] IEA. [2018]. The Future of Cooling.

- (63) 中国国家统计局数据。
- (64) 国家可再生能源中心 (2018)。《中国可再生能源展望2018》。
- (65) NREL (2013). Land Use Requirements for Solar Plants in the United States.
- (66) 中国发改委能源研究所, 国家可再生能源中心, 国际能源署 (2014)。《中国风电发展路线图2050》。
- (67) 中国国家能源局 (2016)。水电发展“十三五”规划。
- (68) International Hydropower Association. (2019). 2019 Hydropower Status Report.
- (69) 国家发改委能源研究所数据。
- (70) 国网能源研究院 (2018)。《中国能源电力发展展望》。
- (71) Bloomberg New Energy Finance. (2019). Energy Storage Outlook 2019.
- (72) 国家发改委能源研究所, 劳伦斯伯克利国家实验室, 落基山研究所 (2017)。《重塑能源: 中国》。
- (73) Bloomberg New Energy Finance. (2019). New Energy Outlook 2019.
- (74) China National Renewable Energy Center. (2018). China Renewable Energy Outlook 2018.
- (75) IRENA. (2017). Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030.
- (76) 欧盟科学中心。
- (77) Bloomberg New Energy Finance. (2019). Hydrogen: The Economics of Production.
- (78) Bloomberg New Energy Finance. (2019). Hydrogen: The Economics of Production.
- (79) IRENA. (2018). Hydrogen from Renewable Power: Technology Outlook for the Energy Transition.
- (80) ICAO Secretariat. (2019). Chapter 4: Electric, Hybrid, and Hydrogen Aircraft – State of Play, 2019 Environmental Report.
- (81) IEA. (2019). The Future of Hydrogen.
- (82) IEA. (2019). The Future of Hydrogen.
- (83) IRENA. (2019). Hydrogen: A Renewable Energy Perspective (IRENA, 2019).
- (84) Seddon D. (2006). The Hydrogen Economy: Economics of Hydrogen Production from Natural Gas.
- (85) Ecofys. (2018). Gas for Climate.
- (86) 亚洲开发银行 (2015)。《中华人民共和国碳捕集和封存示范与应用路线图》。
- (87) LSE. (2006). The Economics of Climate Change: The Stern Review.
- (88) McKinsey & Company. (2018). Decarbonization of Industrial Sectors: The Next Frontier.
- (89) 中国氢能源及燃料电池产业创新战略联盟 (2019)《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》
- (90) CEIC数据。
- (91) 对外经贸大学全球价值链研究院, 中国社会科学院城市发展与环境研究所 (2019)。煤炭转型中的就业问题研究。
- (92) Xuan Liang et al. (2015). “Assessing Beijing’s PM2.5 Pollution: Severity, Weather Impact, APEC and Winter Heating,” Proc. Royal Society A. 471: 20150257.
- (93) Rocky Mountain Institute. (2019). Getting the Facts Right: Clean, Electric Buildings Can Reduce Greenhouse Gas Emissions and Save Money in New Construction.

