



CHILDREN'S
INVESTMENT FUND
FOUNDATION

中国能源转型展望

2023

中国宏观经济研究院能源研究所

COP27 特别报告

—— 面对国际国内新形势新挑战
坚定走向净零排放能源转型目标

执行单位



资金支持单位



技术支持单位



本报告仅反映 CETO 项目组的研究观点，并不代表各支持机构的观点或立场。除特别说明外，报告中的数据均来自 CETO 模型数据库及相关的分析结果。

"中国将力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和，这需要付出艰苦努力，但我们会全力以赴。"

习近平主席

在第七十六届联合国大会一般性辩论上的讲话

2021年9月21日

前言

当前，世界之变、时代之变、历史之变正以前所未有的方式展开，人类社会面临前所未有的挑战。气候变化和能源问题的挑战性随着国际地缘政治局势的一系列新变化进一步增强。在此背景下，我们必须更加坚定地凝聚全球共识，共同行动，加大力度推动能源转型，更加积极地应对气候变化。

自2005年建立能源合作伙伴关系以来，中丹两国在能源领域开展了广泛的政府间合作。两国都坚信绿色增长，并长期致力于绿色能源转型。本COP27特别报告深入总结并探讨了中丹两国的能源转型成果以及为双方为应对气候变化挑战所做的努力。

习近平主席在2020年9月的联合国大会一般性辩论上的讲话中宣布，中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。

中国把碳减排行动视作一场深刻的经济社会变革，自去年以来，出台了确保碳达峰碳中和目标实现的1+N政策体系文件，陆续发布了包括能源绿色转型行动、工业领域碳达峰行动、交通运输绿色低碳行动、循环经济降碳行动等重点领域和行业碳达峰的实施方案，以及科技、碳汇、财税、金融等一系列支撑保障措施。这些政策措施加大了中国以太阳能和风能为主的清洁能源的开发力度，也加快了中国传统能源的绿色低碳转型步伐，同时也为电动汽车、氢能、储能和各种分布式能源的大发展扩展了更加广阔的空间和前景。

丹麦作为世界上能源绿色转型的先行者，在能源规划与立法，政策执行与监管，清洁能源技术开发与部署方面有着多年经验。气候法案规定丹麦须在2030年二氧化碳与1990年相比减排70%，2050年实现碳中和。得益于对环境外部性政策的强调与早年海上风电的大规模部署，丹麦目前风光发电占比已超50%。成熟的电力市场，注重能源安全，注重提高系统灵活性和终端部门电气化，使得丹麦可再生电力在未来有着极大的增长空间。北海的能源岛为作为在世界上有影响的里程碑式项目，为丹麦电力部门进一步脱碳，部门耦合以及多国电力大规模互联提供了基础。丹麦能效居全球前列，更是区域供暖普及率最高的国家之一，储能与热泵是丹麦未来建筑部门热电耦合的关键。丹麦正加速能源新技术的转化与应用，其大力倡导的P2X将推动未来交通和工业领域的深度脱碳，而碳捕集、利用与封存则将为碳中和目标的实现提供有效保障。

近年来的全球能源格局变化和各国的能源转型实践也使我们深刻认识到，能源系统在确保经济社会稳定发展和民生福祉基础上的低排放、零排放转型路径，是实

现气候目标和推动经济社会全面绿色化低碳化转型的关键，能源供应链的稳定性和能源系统的韧性也是能源系统转型中不可忽视的重要问题。

在《中国能源转型展望2023》研究中，我们吸纳了中丹两国在绿色转型中的成功经验，力图充分考虑当前世界之变给能源转型的前景和路径带来的新机遇和新挑战，识别和分析能源转型的不足和短板，提出进一步优化中国能源转型路径的对策建议。希望本报告的发布能够使关注中国能源转型的有识之士和国际社会更多地了解中国的能源转型和碳达峰碳中和工作的进展，也希望据此与国际同行进行深入交流与合作。

在此，感谢能源研究所（ERI）团队的努力，感谢丹麦能源署（DEA）、哥伦比亚大学全球能源政策中心（CGEP）和挪威开发合作署（NORAD）等国际合作伙伴对研究工作提供的大力支持和投入，更要感谢我们的长期合作伙伴——英国儿童投资基金会（CIFF）对《中国能源转型展望 2023》研究工作和编写本特别报告提供的支持。《中国能源转型展望 2023》完整报告将在明年的年初与大家见面。

王仲颖

中国宏观经济研究院能源研究所 所长

目录

前言.....	1
目录.....	3
主要结论.....	6
第一章：全球应对气候变化和能源转型面临新形势新挑战	9
(一) 全球气候变化形势日趋严峻，二氧化碳排放波动增长	9
(二) 地缘政治加剧能源供需失衡，能源转型困难挑战增加	11
(三) 碳中和共识在新动荡中强化，能源系统韧性成为新宠	12
第二章：中国持续推进能源转型为碳达峰碳中和提供有力支撑	14
(一) 清洁能源开发力度加大，开创能源发展新格局	14
(二) 煤炭煤电绿色低碳转型，保安全稳经济惠民生	17
(三) 调节能力储备能力增强，现代能源体系建设提速	18
(四) 能源利用效率持续提升，低碳技术创新加速推进	19
第三章：中国主要区域能源转型成就和趋势	22
(一) 长江经济带区域	22
(二) 粤港澳大湾区	25
(三) 长江三角洲区域	28
(四) 京津冀区域	30
(五) 黄河流域	32
第四章：2060 能源领域碳中和展望的重点结论	36
(一) 中国实现碳中和的两条技术路径图	36
(二) 中国能源转型的动力：保障清洁、碳中和、安全、高效的能源系统	36
(三) 中国能源转型的主要内容：能源效率、电气化、绿色供电	37
(四) 电气化和能源效率有助于实现终端能源结构减碳	39
(五) 风能和太阳能主导电力行业，覆盖 90% 以上的用电量	40
(六) 抽水蓄能和新能源储能将是新型电力系统长期安全稳定运行的主要保障	41

(七) 市场驱动是能源转型的关键.....	42
(八) 总结.....	42
第五章：丹麦的气候政策.....	45
(一) 丹麦气候工作的现状和预测.....	46
(二) 丹麦绿色转型的未来发展方向是电气化.....	48
(三) 《气候法案》.....	48
(四) 绿色税收改革.....	49
(五) 市政层面的规划.....	50
(六) 最新挑战.....	50
(七) 能源安全.....	53
第六章：丹麦能源转型案例.....	56
(一) 能源岛.....	56
(二) 碳捕集、利用和封存和电力多元化转换.....	57
(三) 绿色供热.....	57
(四) 丹麦模式的借鉴.....	58
参考文献.....	60

写作组

中国宏观经济研究院能源研究所

王仲颖 韩文科 单国瑞 白 泉 赵勇强 郑雅楠 安 琪 何 则 刘 坚
谷立静 张建国 符冠云 伊文婧 裴庆冰 田聿申 刘政昊 杨宏伟 侯文森

丹麦能源署 (DEA)

Jens Hein Xu Jie Wang Xinnan Mourad Boucenna Matteo d'Andrea

Ea 能源分析 (Ea)

Luis Boscán Lars Bregnbæk Anders Kofoed-Wiuff

路孚特 (Refinitiv)

Qin Yan

主要结论

- 全球气候变化形势日趋严峻，二氧化碳排放在波动中逐渐增长。世界能源供需版图深度调整，国际环境错综复杂，能源市场的不稳定性、不确定性明显增加，为全球能源转型增加了难度。尽管如此，全球迈向碳中和的共识在动荡中不断增强，能源系统韧性等新话题引发了世界各国政府和产业界的关注。
- 中国作为世界最大的发展中国家和最大的能源消费国，正在坚定不移地推动能源转型。中国加大了清洁能源的开发力度，可再生能源进入发展高比例、大规模发展阶段。煤炭、煤电等化石能源系统在保障经济社会稳定发展和安全运行的同时，加速向绿色低碳转型。同时，中国注重增强能源系统的调节能力和储备能力，现代能源体系的建设正在提速。在能源消费方面，中国的能源利用效率持续提升，低碳技术创新加速推进，绿色的发展方式和生活方式正在加快形成。长江经济带、粤港澳大湾区、长三角、黄河流域等重点区域结合本地特点推进绿色低碳发展和能源转型，形成了推动中国能源转型的新的区域版图。
- 丹麦是国际公认的能源转型和气候领域先行者之一。通过制定立法、实施政策、开展试点和技术示范等方面的努力，丹麦已经建立了一个世界级的绿色能源系统，在确保供应安全的同时，为人们的日常生活提供了更多绿色、更实惠的能源。通过制定雄心勃勃的气候目标，大规模部署风电（海上和陆上），鼓励终端用能电气化，采用基于区域供暖和热泵的绿色供暖，以及开发绿色电力多元化转换（Power-to-X, PtX）和 CCUS 技术，丹麦在过去 40 年里实现了二氧化碳显著减排，经济稳固增长和能源效率提高。
- 中国和丹麦都有减少能源部门二氧化碳排放的宏伟目标，都对未来的碳中和能源系统有长期的愿景。尽管两个国家特点和情况不同，但能源转型有几个相似的要素。需要提高需求端的能源效率，以确保供应端发展步伐能够跟上并维持所需的经济增长。受益于技术进步和成本降低，可再生能源将能大量提供清洁能源，主要由可再生电力支持的绿色供暖将取代化石能源供暖。电气化与电力供应去碳化相结合，将支持工业、交通和建筑部门摆脱化石燃料。氢能成为一种重要的能源载体，基于充足经济的绿电制氢，为难以减排的终端部门提供绿色能源。绿氢与碳捕获相结合，可以为较难减排的部门创造燃料，如重型运输、航运和航空。二氧化碳封存技术为负排放和碳汇创造了“最后的选择”。负排放可以补偿能源系统中仍然存在的少量排放，以确保碳中和。最后，需要驱动转型变革的各种力量，包括长期规划、坚持创新和有力落实相关战略，并推动各利益相关方的国内和国际合作。

- 能源转型必须是全球性的行动。中国的能源转型不仅关系到国内的绿色低碳发展，对全球气候目标也有深远的影响。在全球范围内实现净零排放是一个至关重要并艰巨的目标，需要世界各国的紧密合作。
- 拟于 2023 年春季发布的《中国能源转型展望 2023》是国际合作的一个良好范例，综合国际经验，对中国未来能源部门实现净零碳排放作出分析。报告设置了三个发展情景，希望通过不同场景的分析比较，为中国把握未来能源转型的时间表、路线图，统筹处理能源转型与能源安全的关系，提供更详实和量化的分析，以及更加深入的思考。

第一章：全球应对气候变化和能源转型 面临新形势新挑战



第一章：全球应对气候变化和能源转型面临新形势新挑战

近两年，全球气候变化形势日趋严峻，热浪、干旱、缺水、极寒天气等极端气候现象频繁发生。同时，受新冠肺炎疫情、乌克兰危机、地缘政治形势等影响，全球能源市场出现大幅波动，能源安全和经济承受力成为普遍关注的焦点话题，能源转型面临短期困难和长期挑战，转型的复杂性、系统性凸显。

尽管存在这些挑战，但全球对应对气候变化行动的必要性共识并未改变，对能源安全和能源价格的担忧也可能进一步推动全球范围内的绿色能源转型。本章简要概述全球形势，为后续详细探讨中国和丹麦绿色能源转型发展提供背景和框架。

（一）全球气候变化形势日趋严峻，二氧化碳排放波动增长

近两年，全球气候变化的影响越来越明显，极端天气现象频发。根据世界气象组织发布的《2021年全球气候状况》报告，2015年至2021年，是有记录以来最热的年份。2021年全球平均气温比1850年至1900年间的世界平均气温（“工业化前平均水平”）高出约1.11摄氏度，2021年也是全球有记录以来位列前十的温度最高年份之一。在北美西部和地中海，人们经历了打破纪录的“异常热浪”，2021年7月9日加利福尼亚州的死亡谷的气温为54.4摄氏度，该温度是1930年代以来的世界最高气温。2021年7月中旬，西欧发生了有史以来最严重的洪水。德国西部和比利时东部受灾最严重。2021年7月，美国西南部科罗拉多河上的米德湖水库蓄水量下降至低于满负荷线47米，为有记录以来的最低水位。今年夏季，中国的长江中下游地区遭遇数十年不遇的严重干旱和持续的高温天气，造成数亿人口聚集的长江中下游地区严重缺水。全球气候变化对人类生产生活的影响日趋显著。世界气象组织呼吁各国加快应对气候变化，保护人类地球家园。

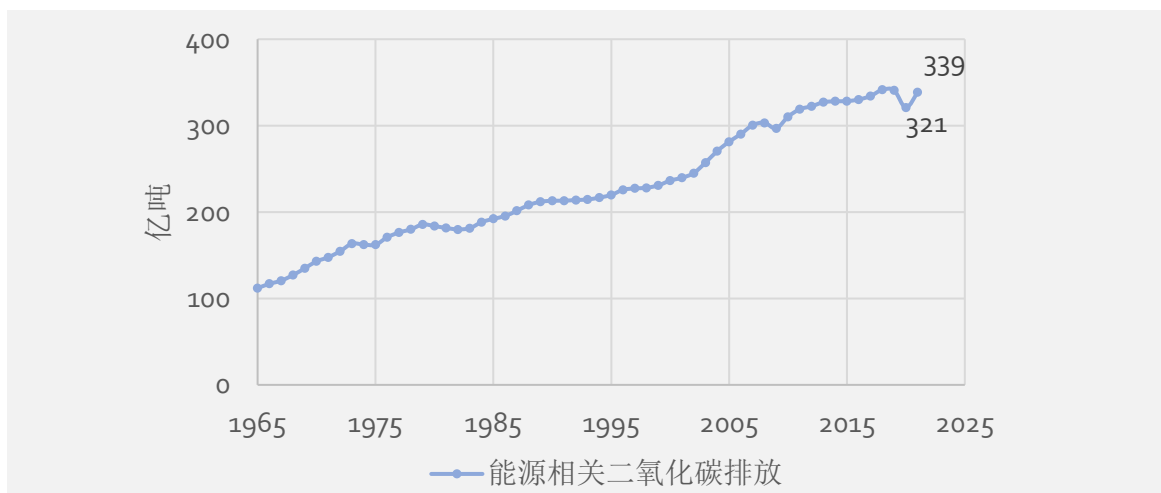


图1 全球能源相关的二氧化碳排放

资料来源：BP 能源统计年鉴 2022

尽管如此，全球二氧化碳排放仍在波动中增长。根据BP能源统计年鉴公布的数据，2020年全球能源相关二氧化碳排放比2019年降低了5.9%，但2021年又增长了5.6%，达到339亿吨。尽管全球多数国家都已提出了本国的碳中和目标，但从全球碳排放的现实看，距离将温升控制在2°C甚至1.5°C的目标仍存在较大差距。IPCC第六次评估报告指出，按照目前各国提交的国家自主贡献（NDCs），到本世纪末全球温升可能达2.8°C。如果要实现1.5°C温升控制目标，全球温室气体排放需要在2025年前达到峰值，2030年比峰值水平下降约43%，2050年实现二氧化碳的净零排放。要想实现上述目标，各国需要加快能源转型，采取更大力度的措施，共同应对气候变化。

专栏 1 IPCC 第六次评估报告第三工作组报告发布

2022年4月4日，政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布了第六次评估报告（AR6）第三工作组报告《气候变化2022：减缓气候变化》。该报告较为全面地归纳和总结了第五次评估报告（AR5）发布以来国际科学界在减缓气候变化领域取得的新进展，阐述了全球温室气体排放状况、将全球变暖限制在不同水平下的减排路径、气候变化减缓和适应行动与可持续发展之间的协同等内容，揭示了为实现不同温升控制水平全行业实施温室气体深度减排，特别是能源系统减排的重要性和迫切性。同时，强调在可持续发展、公平和消除贫困的背景下开展气候变化减缓行动更容易被接受、更持久和更有效。

报告指出，限制全球变暖需要能源部门进行重大转型。这将涉及大幅减少化石燃料的使用、广泛推广电气化、提高能源效率以及使用替代燃料（如氢能）。

“落实了正确的政策、基础设施和技术，改变我们的生活方式和行为，到2050年可以使温室气体排放量减少40%-70%。这提供了尚未发掘的巨大潜力。证据还显示，生活方式的改变还可以改善我们的健康和福祉。”IPCC第三工作组联合主席Priyadarshi Shukla说。

城市和城市地区也为减排提供了重要机会。通过降低能源消耗（如创建紧凑、适合步行的城市）、结合低排放能源的交通电气化以及利用大自然加大碳吸收和储存，就能实现减排。并且，对于老牌的、快速发展的和新的城市，都有多种选择。

“几乎在所有的的气候条件下，都能看到零能耗或零碳建筑的例子。这十年中的行动对于把握建筑的减排潜力至关重要。”IPCC第三工作组联合主席Jim Skea说。

减少工业部门的排放，需要提高材料使用效率、重复使用和回收产品以及最大程度地减少浪费。对于钢铁、建筑材料和化学品等基本材料，低至零温室气排

放的生产过程正处于试点到接近商业的阶段。

工业部门约占全球排放量的四分之一。实现净零排放将非常困难，需要新的生产工艺、低排放和零排放的电力、氢能，必要时还需要进行碳捕获与封存。

农业、林业和其他土地利用可以做到大规模的减排，以及大规模清除并储存二氧化碳。然而，土地不能补偿其他部门的延迟减排。应对方案有益于生物多样性，帮助我们适应气候变化并保障生计、粮食、水和木材供应。

（二）地缘政治加剧能源供需失衡，能源转型困难挑战增加

近两年，新冠肺炎疫情对全球发展带来前所未有的冲击，加上乌克兰危机、发达国家超级宽松货币政策等影响，世界能源市场动荡加剧。2021年下半年以来，全球能源价格大幅上涨，国际油价一度逼近140美元/桶，欧洲、北美、亚洲天然气价格分别上涨90%-400%不等。欧洲多国陷入能源危机，能源短缺、能源价格上涨存在向全球蔓延的趋势。世界银行预计，2022年全球能源价格将上涨50%以上，并且到2024年可能仍将维持历史高位。近两年，欧洲油气供应短缺形势日趋严峻，许多欧洲国家不得不将增加煤炭和启用煤电作为应急保障措施和战略储备。除了欧洲以外，能源市场供需的波动和能源价格的高涨，对东亚地区的能源价格和能源稳定供应也带来了许多不利的影响，影响到不少国家的经济和民生。

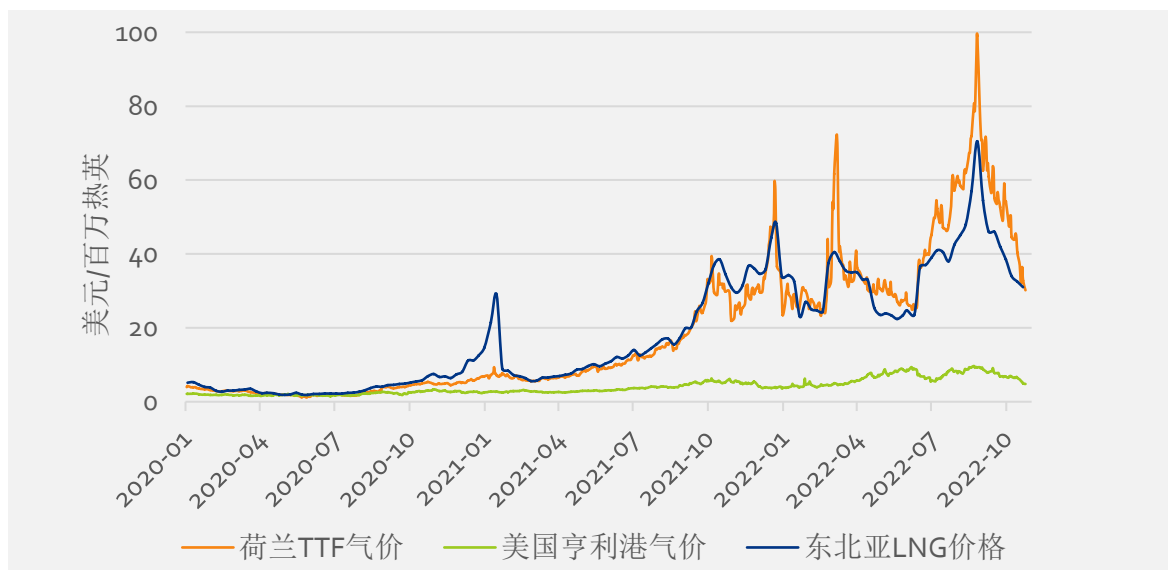


图2 美欧亚天然气价格变化


资料来源：Refinitiv

能源市场波动加剧，是多重因素叠加的综合结果。从短期因素看，新冠肺炎疫情不断演变、反复频发，乌克兰危机悬而未决、前景难测，全球经济增长前景充满变数，能源需求复苏面临较大不确定性。从中期因素看，前几年在低碳转型、投融资成本上升等因素的影响下，2016-2020年全球油气上游投资仅3920亿美元，比2010-2015年下降37%，油气开采等上游领域投资意愿不足导致近两年化石能源供应能力支撑不足问题凸显。从长期因素看，全球需退出化石能源，发展碳中和能源系统。在多种因素影响日趋复杂的局面下，如果不能稳妥应对各种复杂因素的频繁冲击，必将对全球能源转型带来不利影响。

（三）碳中和共识在新动荡中强化，能源系统韧性成为新宠

尽管近两年能源市场的动荡加剧，但发达国家大多把加快新能源发展、早日实现能源转型视为保障能源安全、有效应对全球气候变化的根本途径，力争实现碳中和的共识进一步增强。欧盟预计，到2025年其风电和光伏装机容量将翻倍，2030年达到目前的三倍，即新增4.8亿千瓦的风电装机和4.2亿千瓦的光伏装机，到2030年将替代1700亿立方米的天然气需求。同时，欧盟还计划到2030年，生物质天然气产量达到350亿立方米，氢能替代250亿到500亿立方米的天然气。德国将本国的碳中和目标年从过去的2050年提前到2045年，同时，为确保实现2045年碳中和目标，要求2022年底前出台全部转型所需的法律、法规和配套措施。德国新一届政府还在考虑将淘汰煤炭时间从过去的2038年提前到2030年，并在2030年前将可再生能源电量占全部发电量的比重提高到80%，力争早日实现能源独立和碳中和。

能源系统韧性是近年全球能源界讨论的热点话题。增强能源系统的韧性，一方面与可再生能源随机性、间歇性、波动性的先天特征有关。传统意义上，以“大容量、高参数、远距离”为代表的集中式能源供应模式，对能源流的控制力比较强，不需要能源系统提供额外的韧性服务。随着世界各国可再生能源比重的不断提高，提高电网、热网的储能能力、调峰能力、需求侧灵活性，增强能源系统韧性已成为稳步推进能源转型的必然选择。另一方面，随着各种突发事件对化石能源产业链、供应链冲击的增多，提高储备能力，增强能源系统韧性，也成为保障国家能源安全，确保经济社会正常运行的重中之重。随着全球范围内能源产业链供应链所受冲击的持续加剧，能源系统韧性问题正在被越来越多的国家所关注。



第二章：中国持续推进能源转型为碳达峰碳中和提供有力支撑

第二章：中国持续推进能源转型为碳达峰碳中和提供有力支撑

中国2020年、2021年在全球抗疫中经济复苏较快，能源电力需求快速反弹，尽管受国际地缘政治变化、全球能源市场动荡、国内产业和能源格局调整等因素影响，发生了一些区域性、时段性及个别能源品种的供应紧张，但能源安全总体得到了较为充分的保障，能源转型稳步推进。

（一）清洁能源开发力度加大，开创能源发展新格局

在创新、协同、绿色、开放、共享的新发展理念指导下，中国加大非化石能源的发展力度，不断增强产业优势，实现了非化石能源的高速发展。根据国家统计局公布的数据，2021年中国清洁能源（包括非化石能源和天然气）在一次能源消费中占比达到25.5%，同比提高1.2个百分点。其中，非化石能源在一次能源消费中占比约16.5%，同比提高0.6个百分点。2021年非化石能源消费量约为8.7亿吨标煤，同比增长9.3%。其中：可再生能源电力折合7.48亿吨标煤，同比增长11%，在一次能源消费中占比14.3%，同比提高约0.8个百分点；核电贡献量达到1.16亿吨标煤，在一次能源消费中占比2.2%，同比提高0.1个百分点。

随着风电、光伏大规模建设的推进，非化石能源实现了“十四五”良好开局和新突破，呈现出三个新特点。

一是非化石能源发电装机首次超过煤电，可再生能源装机规模突破10亿千瓦。2021年全年新增非化石能源装机1.37亿千瓦，占全国新增装机的78.0%。新增可再生能源装机1.34亿千瓦，占全国新增装机的76.1%。截至2021年底，中国累计非化石能源装机达到11.2亿千瓦，历史上首次超过煤电装机，占总装机容量的47%，比上年提高2.3个百分点。累计可再生能源装机达到10.63亿千瓦，占总发电装机容量的44.8%。全国非化石能源发电量达2.89万亿千瓦时，同比增加12%，占全部发电量的34.5%。可再生能源发电量达2.48万亿千瓦时，占全部发电量的29.7%。

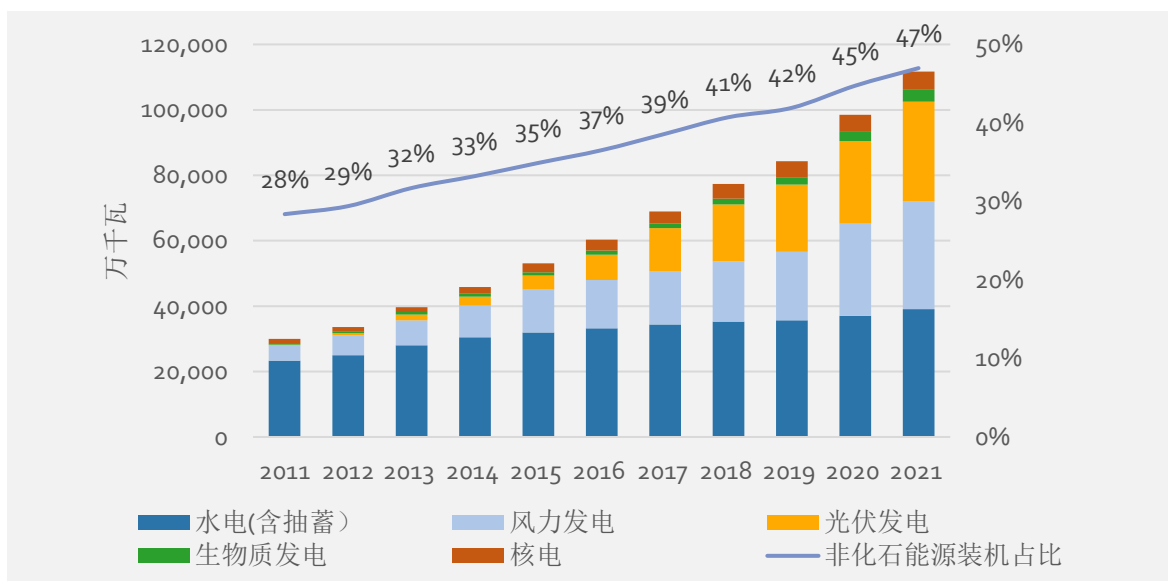


图3 各类可再生能源电力装机容量及占比情况

资料来源：国家能源局

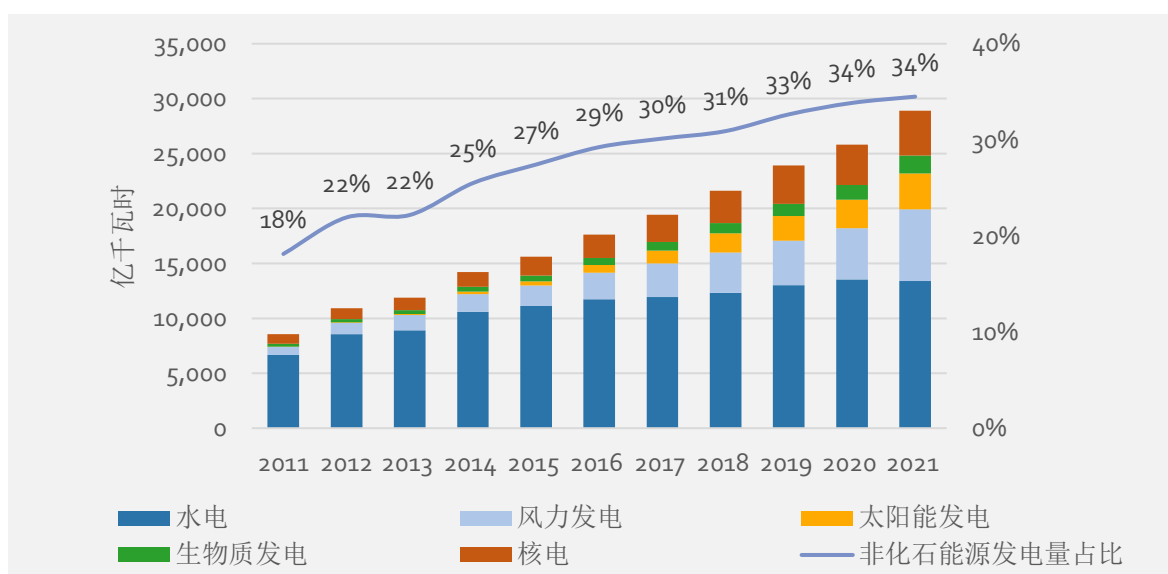


图4 各类可再生能源电力发电量变化及占比情况

资料来源：国家能源局

二是风电和光伏发电装机均突破3亿千瓦，风光发电量占总发电量比重首次超过10%。风电保持较快增长，中东部和南方地区新增装机占比超过60%，尤其是海上风电2021年新增装机达到1690万千瓦，同比大幅增加4.5倍，累计并网达到2639万千瓦。光伏发电新增装机再创历史新高，分布式光伏新增装机同比增长89%，达到2928万千瓦，首次超过集中光伏电站新增装机，累计分布式光伏装机突破1亿千瓦，累计光伏装机达到3.06亿千瓦。2021年，全国风电和光伏发电占总发电量的比重分别达到7.8%和3.9%，风光发电量占总发电量比重首次超过10%。

三是终端用能的清洁替代加快。北方地区清洁取暖提前完成了规划目标，清洁取暖面积达到156亿平方米，清洁取暖率达到73.6%，累计替代散煤超过1.5亿吨，对降低PM_{2.5}的浓度、改善空气质量的贡献率超过1/3。加快电动汽车充电设施的建设，截至2022年6月份，已累计建成392万台充电桩，形成全球最大规模的充电基础设施，2025年将满足超过2000万辆电动车的充电需求。

专栏2 中国电力市场改革提速

近年来，中国电力市场改革明显提速。2015年，中国启动了新一轮的电力行业改革，其标志是中共中央国务院《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》的发布。改革最基本和最重要的内容是构建一个“公平、规范、高效、竞争、开放、非歧视”的电力批发市场，实现电力市场化交易。它还包括建立相对独立的电力交易所、完善电力系统发展的整体规划和政府监管的关键领域等方面的内容。深化改革借鉴了一些国家电力市场的发展经验，旨在推进电价的市场化转变。

2021年10月，在经历了夏秋相交季节的电力短缺之后，电力市场改革进一步提速。国家发改委宣布了对燃煤发电上网电价的市场化改革（第1439号文件），并扩大了电力交易覆盖范围。这是中国电力市场改革的一个重要里程碑，标志着改革进程的进一步提速。第1439号文件规定煤电必须通过电力市场实行市场化交易，并扩大了市场化电价的波动范围，从以前的+10%和-15%扩大到±20%。这使得煤炭价格能够进一步传导到电价上，并部分抵消燃煤电厂的亏损压力。燃煤发电全部市场化交易，所有工商业用户，直接或通过电网公司从市场购买电力。这极大地扩大了电力交易的覆盖面。2022年，预计中国全部发电量的70%以上将被市场化交易所覆盖，而2021年仅为45%。

2021年11月，中国出台了《关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》，改革进一步提速。该指导意见为中国的电力部门改革制定了明确的路线图，旨在建立一个由中长期市场、现货市场和辅助服务市场组成的多层次电力市场体系，并逐步将省级和区域电力市场纳入全国市场，鼓励跨省和跨区域电力资源的市场化配置，大幅增加绿色电力交易。这一过程将分两个阶段进行，在2025年前建立体系，并在2030年前完成建设。

与此同时，监管机构正着手扩大现货交易试点。2022年，第一批8个现货交易试点省份进入连续交易，第二批6个现货交易试点在6月前开始试运行。在未来几年，将持续推进现货交易试点的深化和进一步推广工作。同时，至少在2025年前，中长期交易仍将是主要的交易类型，现货市场将在2030年前全面发展。电力市场化改革的推进将促进更有效地利用发电资源和电网，建立脱碳电力系统，并激励清洁能源的发展。

（二）煤炭煤电绿色低碳转型，保安全稳经济惠民生

2021年，中国发电装机容量增加到23.8亿千瓦，其中煤电装机容量为11.1亿千瓦，占发电装机容量的比重下降到46.7%。¹ 达到污染物超低排放限值的煤电机组约10.3亿千瓦，约占全国煤电总装机容量的93.0%。² 2021年，全国6000千瓦及以上火电厂供电标准煤耗301.5克/千瓦时，比上年降低2.01克/千瓦时；全国6000千瓦及以上火电厂厂用电率为4.36%，比上年降低0.29个百分点，煤电的发电效率稳步提高。2021年，全国单位火电发电量二氧化碳排放约为828克/千瓦时，比2005年降低21.0%。近年来，煤电发电量占全部发电量的占比持续下降，2021年已经下降到60%。2021年，由于新增电力需求增长较快，新增可再生能源发电量难以满足当年新增电力需求，为了保证经济正常运行，2021年煤电发电量增长了8.9%，气电发电量增长了13.7%。在电力短缺的关键时刻，煤电、气电有效发挥了电力安全“压舱石”的重要作用。

煤炭消费结构中，非电力部门用煤下降、电力部门用煤占比提高，有利于推动煤炭减污降碳和更清洁高效利用。根据中国煤炭工业协会的统计数据，2021年中国煤炭消费量为42.7亿吨，其中电力、钢铁、化工和建材四个行业用煤合计39.5亿吨，占全社会煤炭消费量的比重为93%左右³，小锅炉、小窑炉等分散式利用的“散煤”占煤炭消费的比重越来越少。2021年全社会新增煤炭消费量中，发电用煤占到90%以上，更多的煤炭进入到发电行业，使煤炭的消费模式变得相对清洁和高效。中国致力于推动煤炭逐步向清洁燃料、优质原料和高品质材料转变。据初步测算，工业领域用作原料、材料的煤炭，年转化量超过1亿吨标准煤。

专栏 3 中国于 2021 年启动全国碳市场

中国新建立的全国碳排放交易体系（ETS）预计将成为协助中国2030年前实现碳达峰并于2060年前实现碳中和的“双碳”目标的主要工具。

2021年，中国在试点项目经验基础上，经过十年的酝酿，推出了全国碳排放交易体系。全国碳排放交易体系覆盖了电力行业的2000多家企业，每年二氧化碳排放量接近45亿吨，约占中国排放总量的四成。与欧盟等国家实施的类似计划不同，中国的排放配额分配不是通过绝对上限预先决定的，而是在排放强度基准（tCO₂/MWh）的基础上，考虑到不断增长的能源需求以及与国家层面基于强度的能源和碳排放目标的匹配性而决定的。一个配额意味着一家公司被允许排放一吨的碳。燃煤机组高于基准排放强度的企业，将从那些效率较高且低于基准强度的发电厂购买配额。此外，企业可以用中国核证自愿减排量（CCER）来清缴其5%的履约义务，核证自愿减排量是由政府认证的国内减排项目发放的信用额度。示例活动包括可再生能源发电、林业项目和废弃物转制能源项目等。

在交易方面，全国碳排放交易体系在第一年的表现是有限的。自2021年7月16日启动交易以来，中国碳排放配额（CEA）的价格一直相对较低，处于40至60元人民币之间，2021年的114个交易日中，平均价格为43.85元（6欧元）/吨。总共成交1.79亿吨。此价格水平只为更成熟的排放交易价格的一个零头，如欧盟排放交易体系价格达80欧元/吨。因此，目前在推动减排方面，它的影响是有限的。此外，场外交易占主导地位以及大多数时段的低交易量表明，流动性水平仍有一些改进的空间。每日交易量保持在数十万吨的低水平，但在年底履约期届满前的12月，交易量猛增到每天一百万吨。

2021年12月31日，生态环境部正式宣布，第一个履约周期已经结束。从所覆盖的排放量来看，履约率为99.5%。这意味着该计划中的2,162家电力行业企业中的大多数在截止日期前完成了其配额清缴工作，履行了其2019-2020年期间的履约义务。

中国的全国碳排放交易体系将持续改进，政策框架将变得更加强大和全面，配额分配规则也将更为严格，交易流动性将进一步增强。下一个履约周期将涵盖2021年和2022年。与第一个履约周期内的追溯覆盖形成对比，届时，它将对发电决策产生影响，势必形成进一步的行业扩张和引入更多类型的交易参与者及碳衍生品。同时，现有的八个省级试点排放交易计划将逐步纳入全国排放交易体系。展望未来，全国排放交易体系预计将覆盖所有工业部门，最终超过全国总排放量的70%。正如2022年3月发布的《政府工作报告》中所述，国家对能源消费总量和强度的评估将过渡到对碳排放总量和强度的评估。排放交易体系将和更广泛的碳定价机制一道，促使企业更加关注碳成本，更为注重减排，并通过排放交易体系设定的上限和相关气候融资机制，协助中国实现碳达峰和碳中性的承诺。

（三）调节能力储备能力增强，现代能源体系建设提速

中国的新型储能逐步从研发示范进入到商业化发展初期，新型储能的市场应用规模稳步扩大。2021年中国新型储能的装机规模已超过400万千瓦，新型储能技术在提高效率、降低成本、延长寿命以及提高安全性方面都取得了长足的进步，对能源转型的支撑作用初步显现。新型储能的应用场景和商业模式不断拓展，新能源加储能、基地电源配储能、“互联网+储能”、“分布式智能电网+储能”等多元化的应用场景不断地涌现。新型储能的政策体系和市场机制初步建立，在创新规划、应用项目管理、参与电力市场和调度运行等方面，一批有利于储能发展的新机制、新政策相继出台。

2022年3月22日，中国政府发布了《“十四五”现代能源体系规划》，从三个方面推动建设现代能源体系。一是**增强能源供应链安全性和稳定性**。从“十四五”时

期开始，中国从战略安全、运行安全、应急安全三个维度加强能源综合保障能力，预计到2025年中国的一次能源综合生产能力将达到46亿吨标准煤以上，以满足经济社会发展和保障民生的需要。二是推动能源生产消费方式绿色低碳变革。“十四五”是中国实现碳达峰的关键期、窗口期，中国将重点做好增加清洁能源供应能力的“加法”和减少能源产业链碳排放的“减法”，推动形成绿色低碳的能源消费模式。到2025年，非化石能源消费比重将提高到20%左右。三是提升能源产业链现代化水平。“十四五”时期，中国进一步把科技创新作为能源发展的第一动力，增强能源科技创新能力，加快能源产业数字化和智能化升级，推动能源系统效率大幅提高，全面提升能源产业基础高级化和产业链现代化水平。

（四）能源利用效率持续提升，低碳技术创新加速推进

2021年，中国能源消费总量约52.4亿吨标准煤，较上年增长5.2%。2021年，中国单位GDP能耗比2020年年下降2.7%，降幅较上年扩大2.6个百分点。2021年中国规模以上工业单位增加值能耗较上年下降5.6%，重点耗能工业企业单位电石综合能耗下降5.3%，单位合成氨综合能耗与上年持平，吨钢综合能耗下降0.4%，单位电解铝综合能耗下降2.1%，每千瓦时火力发电标准煤耗下降0.5%⁴，能源效率稳步提高。

建筑部门和交通运输部门低碳发展取得新的进步。在建筑领域，截至2021年底中国累计建成绿色建筑面积超过85亿平方米，全国城镇新建绿色建筑占当年新建建筑面积比例达到84%，累计建设完成超低能耗、近零能耗建筑面积近1000万平方米。在交通运输领域，2021年中国新能源汽车销量超过350万辆，保有量达到784万辆，均居全球首位。截至2022年6月，中国新能源汽车保有量达到1001万辆，首次超过1000万辆大关，其中纯电动汽车保有量达810.4万辆，占新能源汽车总量的80.9%。截至2020年底，中国新能源公共汽车保有量达到46.61万辆，占公交车总量的66.2%，汽油车、柴油车在城市公交系统中被新能源车所替代。

专栏 4 中国碳达峰碳中和政策进展

在党中央、国务院的统一部署下，在碳达峰碳中和领导小组的组织实施下，中国稳妥有序推进“双碳”各项工作扎实推进。

（一）建立统筹协调机制。中央层面成立碳达峰碳中和工作领导小组，国家发展改革委承担领导小组办公室职责，加强组织领导和统筹协调，形成上下联动、各方协同的工作体系。

（二）构建“1+N”政策体系。党中央、国务院出台《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》，国务院印发《2030年前碳达峰行

动方案》，各个有关部门制定出台分领域、分行业实施方案和支撑保障政策，各省（区、市）也都制定了本地区碳达峰实施方案，碳达峰碳中和“1+N”政策体系已经建立。

（三）稳妥有序推进能源绿色低碳转型。立足以煤为主的基本国情，大力推进煤炭清洁高效利用，推动减污降碳，实施煤电机组“三改联动”，在沙漠、戈壁、荒漠地区规划建设4.5亿千瓦大型风电光伏基地。目前，中国可再生能源装机规模已突破11亿千瓦，稳居世界第一。

（四）大力推进产业结构优化升级。积极发展战略性新兴产业，着力推动重点行业节能降碳改造，坚决遏制“两高一低”项目盲目发展。与2012年相比，2021年中国能耗强度下降了26.4%，碳排放强度下降了34.4%，水耗强度下降了45%，主要资源产出率提高了58%。


（五）推进建筑、交通等领域低碳转型。积极发展绿色建筑，推进既有建筑绿色低碳改造。2021年全国城镇新增绿色建筑面积达到20多亿平方米。加大力度推广节能低碳交通工具，新能源汽车产销量连续7年位居世界第一，保有量占全球一半以上。

（六）巩固提升生态系统碳汇能力。坚持山水林田湖草沙一体化保护和修复，科学推进大规模国土绿化行动。中国森林覆盖率和森林蓄积量连续保持“双增长”，已成为全球森林资源增加最多的国家。

（七）建立健全相关政策机制。优化完善能耗双控政策，建立统一规范的碳排放统计核算体系，推出碳减排支持工具和煤炭清洁高效利用专项再贷款，启动全国碳市场。完善绿色技术创新体系，强化“双碳”专业人才培养。深入推进绿色生活创建行动，倡导绿色生活方式，鼓励绿色消费。

（八）积极参与全球气候治理。在多双边机制中发挥积极建设性作用，推动构建公平合理、合作共赢的全球环境治理体系。深化应对气候变化南南合作，扎实推进绿色“一带一路”建设，支持发展中国家能源绿色低碳发展。

第三章：中国主要区域能源转型成就 和趋势



第三章：中国主要区域能源转型成就和趋势

区域是经济社会发展和生态环境保护的重要空间，也是能源生产供给和消费流通的关键载体。十八大以来，中国陆续提出了“四个革命、一个合作”能源安全新战略，同时提出了京津冀协同发展、长三角一体化发展、长江经济带、粤港澳大湾区以及黄河流域生态保护和高质量发展等区域重大发展战略，对能源转型和绿色低碳发展做出了相应的区域部署和空间指引，取得了一系列具有代表性的成绩，建成了一批标志性的清洁能源工程和设施。

（一）长江经济带区域

长江经济带是横跨中国东中西三大区域的流域经济带，地域范围覆盖了上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、贵州和云南等从东南到西南的 11 个省市，约占 1/5 国土面积，人口和经济总量均超过全国的 40%，具有生态地位重要、综合实力较强、发展潜力巨大的典型特征。2016 年 9 月，《长江经济带发展规划纲要》的发布，把长江流域共抓大保护、不搞大开发上升为国家战略。2017 年 7 月，《长江经济带生态环境保护规划》对长江经济带能源结构优化及煤炭消费总量控制提出了阶段性目标，规定“到 2020 年，煤炭消费总量控制在 12 亿吨标准煤以下”的要求。随着长江经济带战略深入推进，沿线省市逐步走出了一条生态优先、绿色发展和能源转型之路。

1. 流域整体性保护和开发的政策体系逐步完善

习近平主席记多次视察长江经济带发展工作，2016年、2018年、2020年，先后在长江上游的重庆、中游的武汉、下游的南京主持召开座谈会并发表重要讲话，为长江经济带“共抓大保护，不搞大开发”的绿色低碳发展明确了方向、立下了规矩。“十四五”期间，长江经济带领导小组办公室组织编制了《“十四五”长江经济带发展实施方案》和重点领域、重点行业的专项规划和实施方案，形成了以《“十四五”长江经济带发展实施方案》为统领，以综合交通运输体系规划和环境污染治理“4+1”工程、湿地保护、塑料污染治理、重要支流系统保护修复等系列专项实施方案为支撑的“十四五”长江经济带发展“1+N”规划政策体系。

2. 产业转型取得实效，能源消费强度持续下降

长江经济带战略实施以来，沿线省市积极推动产业转型，带动能源消费强度降低。数据显示，2016年-2020年，长江经济带累计搬改关转化工企业8000多家；电子信息、装备制造等产业规模占全国比重超过50%，沿线省市基础研究、关键技术攻关等方面在全国的地位凸显，数字经济、电子信息、生物医药、航空航天等产业领

跑全国。综合来看，沿线11省市三次产业结构平均值由2000年的15.66：46.54：37.8调整至2020年的7.23：38.75：54.02，第一和第二产业比重显著下降，第三产业比重上升16.2个百分点。在产业结构升级的带动下，2000年以来，长江经济带沿线11省市的经济总量从4.07万亿元增长至2020年的47.16万亿元，增长了约11.59倍，名义增速高达13%；与此同时，能源消费强度从由2000年的1.33吨标准煤/万元下降至2019年的0.38吨标准煤/万元，充分体现了长江经济带实施绿色低碳转型发展路径的成效。

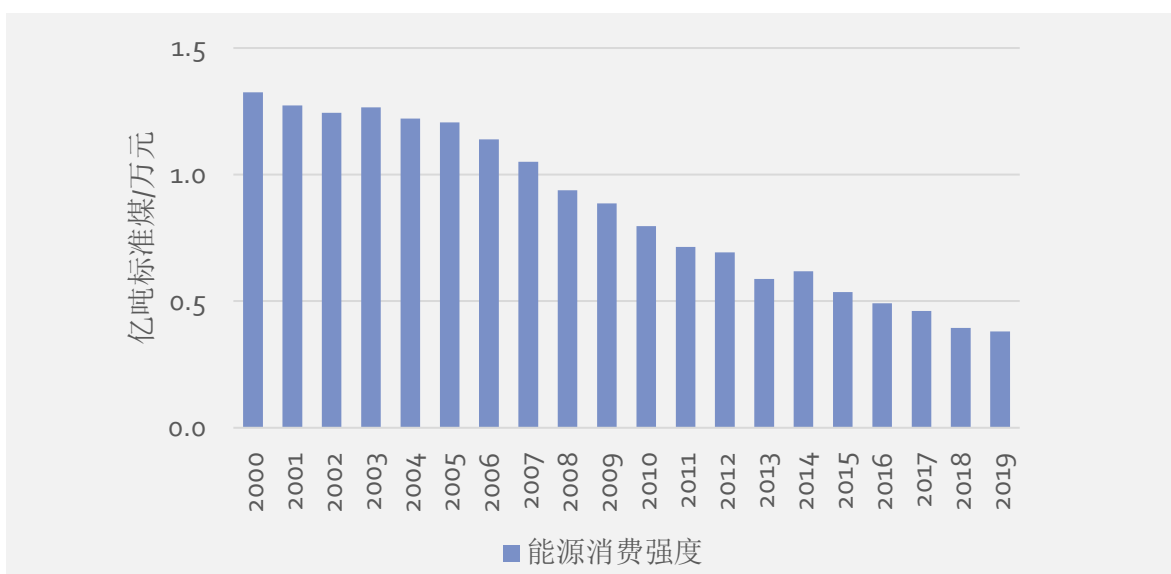


图5 2000-2019年长江经济带能源消费强度变化

3. 超级水电站建设成绩世界瞩目

长江经济带以长江为依托，丰富的水能资源是其最为突出的资源优势。基于丰富的水能资源，一批超级水电站建设取得了世界瞩目的成绩。其中，三峡水电站于2009年建成，电站总装机2250万千瓦，是世界上规模最大的水电站，也是中国有史以来建设的最大型的工程项目。自三峡大坝建成以来，中国在长江及其支流上又陆续建造了4座超级水电站，分别是乌东德水电站（1020万千瓦）、溪洛渡水电站（1386万千瓦）、向家坝水电站（640万千瓦）和白鹤滩水电站（1600万千瓦），其装机规模均位居世界前列。它们不仅能为长江沿线省市提供源源不断的清洁电力，同时也可为两岸生态环境做出积极贡献。

专栏 5 长江沿线的超级水电站建设

自长江顺流而下，分别分布着长江三峡、乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝等五座超级水电站。其中，三峡水电站总装机2250万千瓦，是世界上规模最大的水电站。乌东德水电站设计独特，大坝底部厚度为51米，顶部最薄处只有0.19米，依靠拱形设计的坝体以及采用的新施工材料和工艺来承受住水流的压力，是一座看似单薄却坚固耐用的大坝。白鹤滩水电站是仅次于三峡的中国第二大水电站，总装机容量1600万千瓦，是金沙江下游干流河段梯级开发的第二个梯级电站，年均发电量624.43亿千瓦时，每年可节约标煤1968万吨，减少排放二氧化碳5160万吨。2014年和2015先后建成的向家坝和溪洛渡两个水电站，是位于金沙江上的具备互为调节功能的水库，向家坝水电站还装备了全球最大升船机。



三峡水电站



乌东德水电站



白鹤滩水电站



溪洛渡水电站



向家坝水电站

图6 长江沿线4座超级水电站照片

资料来源：图片来自于网络

（二）粤港澳大湾区

粤港澳大湾区地域范围包括广东省的广州市、深圳市、珠海市、佛山市、东莞市、中山市、惠州市、江门市、肇庆市等9个城市和香港特别行政区、澳门特别行政区，总面积5.65万平方千米。2021年，粤港澳大湾区经济总量达到12.6万亿元，以不到1%的国土面积创造出占全国约11%的经济总量；区内分布有世界500强企业24家、高新技术企业5.7万家，是中国经济体量最大和创新活力最强的世界级城市群地区之一。

2019年，中共中央、国务院正式印发《粤港澳大湾区发展规划纲要》，标志着大湾区建设进入新阶段。伴随着粤港澳大湾区建设的深入推进，区域内能源消费结构持续优化。2020年，粤港澳大湾区能源消费总量为2.64亿吨标准煤。从能源消费增速看，除2010年增速超10%以外，粤港澳大湾区能源消费增速整体呈下降态势。从能源消费结构来看，2010年，粤港澳大湾区综合能源消费结构以化石能源为主，其中煤炭、石油和天然气分别占能源消费总量的39.5%、35.1%和5.7%，合计占80.3%，电力及其他非化石能源仅占19.7%。2020年，粤港澳大湾区的煤炭和石油消费占比均下降至30.6%，天然气消费比重提升至12.6%，电力及其他非化石能源增加至26.3%，能源消费持续清洁化。

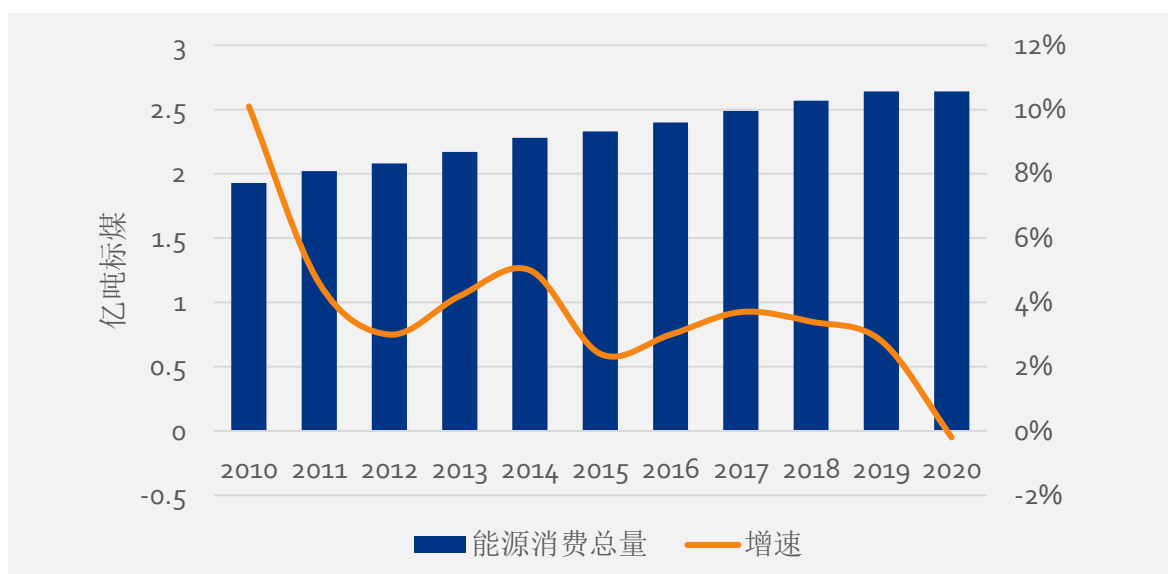


图7 2010-2020年粤港澳大湾区能源消费总量及增速

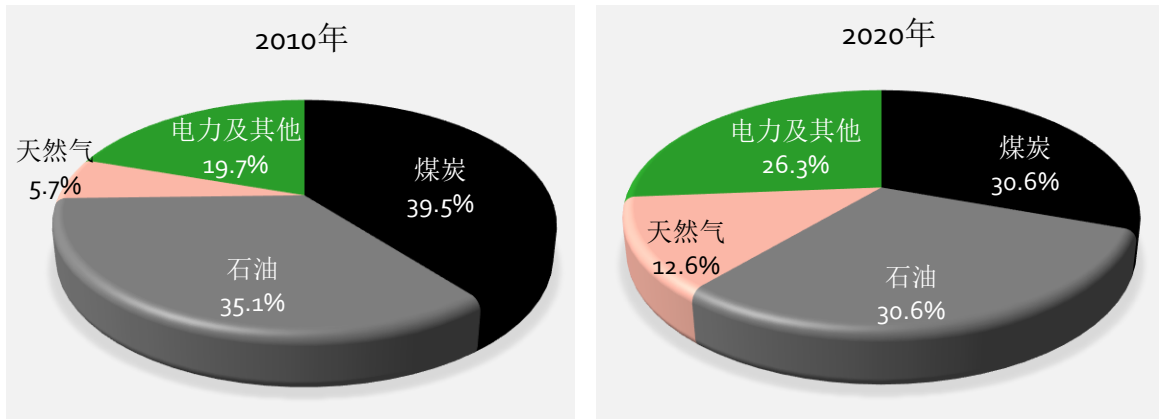


图8 2010年和2020年粤港澳大湾区能源消费结构

1. 在城市层面率先提出“碳达峰”

粤港澳大湾区能源消费集中在主要城市，率先提出“碳达峰”目标，领先于中国整体目标。2020年，广东省九市能源消费总量2.44亿吨标准煤，占粤港澳大湾区能源消费比重的92.7%。从主要城市来看，广州、深圳综合能源消费总量分别为0.63亿吨标准煤、0.46亿吨标准煤，占粤港澳大湾区综合能源消费总量的比重分别为24%、17.4%，合计41.4%。东莞、佛山、惠州的综合能源消费总量分别为0.31亿吨标准煤、0.3亿吨标准煤、0.28亿吨标准煤，其余6个城市综合能源消费总量均低于0.2亿吨标准煤。从碳排放情况看，近年来，香港、澳门碳排放量较为平稳，已经进入碳排放峰值波动区间。广东省多个城市提出“十四五”期间率先达峰的发展目标，在碳中和领域起到先行示范作用。具体而言，广州、深圳和中山等低碳试点城市分别提出了2020年、2020-2022年、2023-2025年达到碳排放峰值的目标，领先于中国提出的2030年前实现碳达峰的整体目标。

2. 产业结构优化引导城市低碳发展

由于城市第三产业占比相对较高，粤港澳大湾区单位GDP碳排放量低于其他地区。2020年，香港和澳门第三产业占GDP的比重分别为93.7%和95.7%，其次，广东和深圳的第三产业占比超过60%，服务型经济发展已经具有一定规模。在此基础上，2020年广州、深圳和澳门等城市的第三产业用能比重均高于40%，相应的这些城市的单位GDP的碳排放量相对较低。据《粤港澳大湾区碳中和年度研究报告》统计，粤港澳大湾区各个城市中，单位GDP碳排放量最低的是澳门，其次是深圳、香港、广州，这三个城市单位GDP碳排放量与英国、挪威等国家的水平相当，略低于美国。而江门和惠州等城市的产业结构仍以制造业为主，2020年这些城市的第二产业用能比重大于50%，因此其单位GDP碳排放量高于中国平均水平30%~50%。

3. 区域协同助力湾区用能清洁化

粤港澳大湾区清洁能源供应占比超过60%。2020年，粤港澳大湾区电力供应中，区域内的清洁电力占比约为58.7%，电量约为1812亿千瓦时。通过“西电东送”的清洁电力占比约74%，电量约1530亿千瓦时。即使不计入广东省内其他地区送入粤港澳大湾区的清洁电力，2020年粤港澳大湾区清洁能源的占比也已经达到了60%。

粤港澳大湾区本地电源供应不足，“西电东送”和省内协调具有重要作用。2020年，粤港澳大湾区全社会用电量5545亿千瓦时，其中来自于粤港澳大湾区内的总电量供给为3087亿千瓦时，仅占粤港澳大湾区全社会用电量的55.7%。在区内电量难以满足需求的情况下，粤港澳大湾区全社会用电量的44.3%来自于区域协作供给，其中来自“西电东送”的电量为2058亿千瓦时，占全社会用电量的37.1%，此外粤东、粤西和粤北等地区向粤港澳大湾区2020年的送电量约为400亿千瓦时，占全社会用电量的7.2%。“十四五”时期，在推进粤港澳大湾区能源协同发展方面，《广东省能源发展“十四五”规划》进一步提出，要以“湾区所向、港澳所需、广东所能”为导向，积极推动粤港澳大湾区能源协同发展，形成粤港澳统筹协调、互联互通、优势互补、合作共赢的格局。

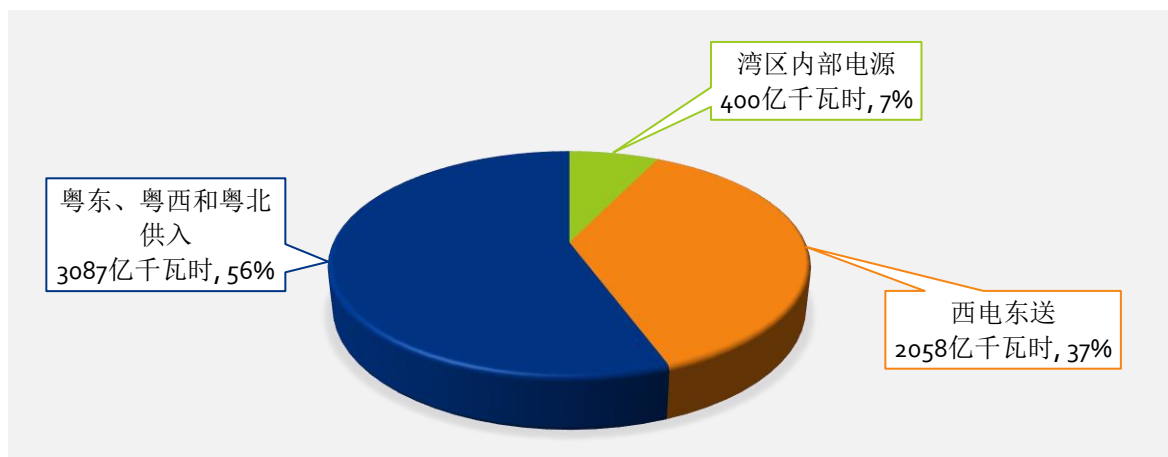


图9 2020年粤港澳大湾区电量供应占比

4. 海上风电装机规模快速增长

2020年，粤港澳大湾区新能源发电量164亿千瓦时，同比增长了18%，占发电总量的比重为5.4%，比2010年提高了4个百分点。同时，粤港澳大湾区充分利用其位于沿海地区的区位优势和资源禀赋，海上风电装机规模取得了快速增长。2020年，广东省风电装机量达到565万千瓦，相比2010年的62万千瓦，增长了8倍多。其中，海上风电呈现高速增长态势，2020年底，广东省海上风电并网装机容量达到101万千瓦，同比增长了257%。

专栏6 粤港澳大湾区海上风电发展介绍

随着海上风电发展逐步从近海向深远海推进，粤港澳大湾区突破了近海深水区和深远海区域的海上风电的送出的技术瓶颈，掌握了深海岸风电送出关键技术，形成了相关风电装备研发和集成供货能力，为全国其他地区海上风电提供了技术和经验借鉴。2021年4月2日11时18分，广东能源集团所属的珠海金湾海上风电场项目全部55台风机实现并网发电，该项目作为广东省第二批启动建设的重点海上风电项目，自2020年11月18日首台风机并网投产以来，仅历时不到五个月就实现了全容量并网投产，是目前粤港澳大湾区建设规模最大的海上风电场。按火力发电标准煤计算，每年可节约标煤22.96万吨、减排二氧化碳45.63万吨。



图10 珠海金湾海上风电场项目掠影

资料来源：广东省人民政府国有资产监督管理委员会

（三）长江三角洲区域

长江三角洲地区（简称“长三角地区”）是中国经济发展最活跃、开放程度最高、创新能力最强的区域之一。长三角地区包括上海市、江苏省、浙江省、安徽省三省一市，面积35.8万平方公里，2020年人口总量2.35亿，GDP总量24.5万亿元，以全国3.7%的国土面积，汇集了16.7%的人口，创造了24.2%的经济总量，全员劳动生产率位居全国前列。2019年12月印发的《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》提出了2035年前长三角地区发展的战略定位，即成为“全国发展强劲活跃增长极、全国高质量发展样板区、率先基本实现现代化引领区、区域一体化发展示范区和新时代改革开放新高地”。

长三角地区既是中国能源消费最集中的区域之一，也是能源资源最贫乏的区域之一，近年来清洁低碳能源开发利用快速增长。由于传统能源资源匮乏，长三角地区高度依赖其他省份能源输入，是“北煤南运”、“西气东输”、“西电东送”等跨省跨区重大能源基础工程的主要目的地，外调电比例持续较高。2020年，长三角地区用电量占全国20.3%，人均年用电量5551千瓦时，为全国平均水平的1.2倍；三省一市风电、太阳能发电、核电发电量分别达到341亿千瓦时、438亿千瓦时、1068亿千瓦时，

“十三五”期间年均增速分别高达21%、51%、12.9%。

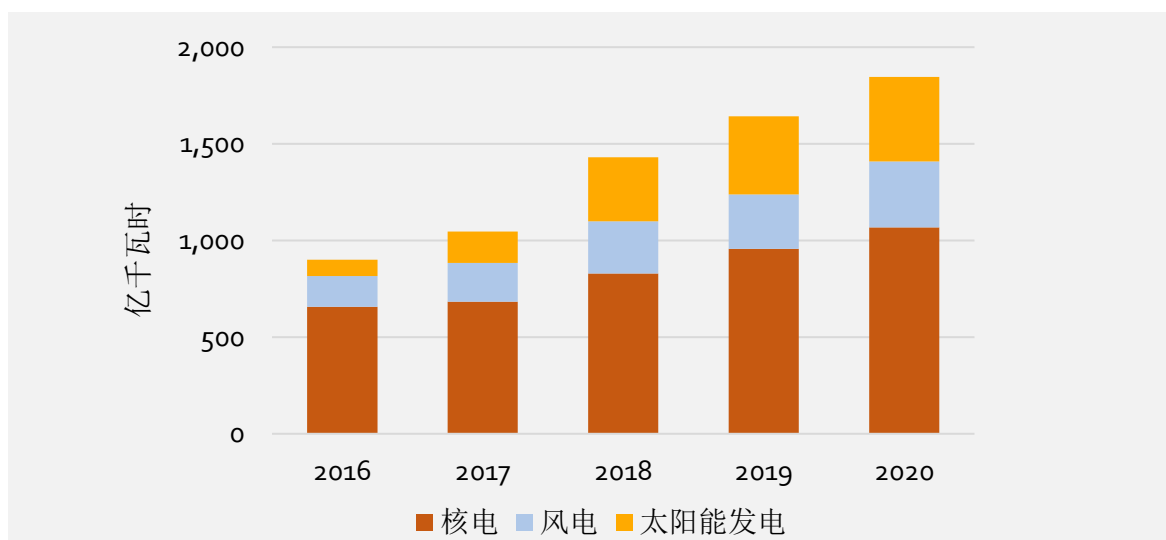


图 11 2016-2020 年长三角地区低碳能源发电量 (单位: 亿千瓦时)

资料来源: 中国能源统计年鉴, 国家发展改革委能源研究所

1. 建设分布式可再生发电阵地

长三角地区工业园区集中, 厂房屋顶资源丰富, 也有大量的渔业养殖水域和农业大棚, 为发展分布式光伏提供了良好的契机。截至2019年底, 江苏、浙江、上海共计开发分布式光伏1693万千瓦, 占全国分布式光伏装机总量的27%, 是分布式光伏的主阵地之一。根据相关研究评估⁵, 江苏、浙江、上海两省一市的分布式光伏装机潜力可达1.8亿~2亿千瓦, 分散式风电开发潜力约为3261万~8268万千瓦。但目前受限于电网的配网结构和运行模式, 分布式电源接入电网的承载力尚远小于开发潜力。

稳步推进海上风电规模化开发。长三角、山东半岛、闽南、粤东和北部湾为中国五大海上风电基地。2021年, 嘉兴2号海上风电送出工程在浙江平湖正式投产运行, 并入嘉兴电网的嘉兴1号、嵊泗2号风电项目也进入了最后的调试阶段。三者共同组成了长三角最大的在建海上风电集群, 共安装有188台风电机组, 总装机容量达到100万千瓦。

依靠抽水蓄能提升新能源供给稳定。浙江省和安徽省的抽水蓄能电站承担起华东电网调峰、填谷和储能等重任。浙江省是目前全国投建抽水蓄能项目最多的省份, 已投入运营的抽水蓄能电站共5座, 在建项目7个, 还有20多个项目处于规划、选址和待建阶段⁶。除了大型电站, 浙江省内不少地区也在规划建设中小型抽水蓄能电站。安徽省已建成投运抽水蓄能电站4座, 装机容量348万千瓦, 居全国第3位; 到2025年、2030年和2035年, 全省累计建成抽水蓄能电站装机容量预计分别达到468万千瓦、1000万千瓦以上和1600万千瓦以上。

2. 打造跨区域一体化低碳发展样本

依托一体化发展布局，长三角推动特高压、配电网、氢能等区域间能源电力新型基础设施互联互通。长三角已在全国率先建成了特高压骨干电网结构。2020年9月，嘉善到青浦10千伏电力联络线工程竣工投运，青浦到吴江10千伏互联工程也正式建成贯通，实现了上海与浙江、江苏的配电网跨省互联互通，使跨区域电力融合发展进入了一个新的阶段⁷。2020年6月，长三角三省一市的四家能源企业共同签署《长三角能源基础设施一体化合作框架协议》，拟建立长三角能源企业合作机制，推进区域间能源基础设施互联互通，打造长三角氢能物流示范线路。近年来，长三角地区“互联网+”智慧能源、储能、区块链、综合能源服务等一大批能源新技术新模式新业态蓬勃兴起，推动建立集成优化、区域联动、智能调控、物理信息融合的能源系统，推动区域创新发展。

2022年10月，位于沪苏浙交界处的长三角生态绿色一体化发展示范区发布了《长三角生态绿色一体化发展示范区碳达峰碳中和工作的实施方案》和《水乡客厅近零碳专项规划》。提出到2025年，力争示范区能耗强度较2020年降低15%左右，碳排放强度较2020年下降20%以上。文件提出，积极推动绿色低碳先进技术的先行先试，大力推广应用分布式光伏、地（水）源热泵、氢能、生物质能、近零碳建筑等技术设施。“三园”（江南圩田、桑基鱼塘、水乡湿地）建设聚焦近零碳建筑、低碳循环立体农业等方式，大力实施增湿扩绿，持续提升碳汇能力，着力打造长三角低碳发展样本。

3. 新能源产业成为经济发展“绿色引擎”

长三角地区三省一市根据各自的资源禀赋和产业基础，共同面向能源转型的巨大市场需求，打造技术产业相互融合的新能源产业生态。据新华日报数据，长三角大型电力装备约占全国总产量的1/3，太阳能电池产量约占全国的一半，海上风机产量占全国的60%⁸。其中，江苏省拥有完整的光伏产业链条和风电整机制造商，分布式光伏装机规模位居全国第二，建立了具有国际竞争力的光伏全产业链，硅片、晶硅电池、晶硅组件等产量均占全国的40%以上。上海市在新能源技术研发与国际营销方面具有引领示范作用，浙江省光伏产业和核电零部件产业特点突出，安徽省在新能源电气产品和生物质发电应用方面领先。

（四）京津冀区域

京津冀区域包括了北京、天津和河北三地。三地山水相依，地域相连，经济发展密切互动，生态环境密不可分，构成了同呼吸、共命运的生态共同体。京津冀地区是中国最具发展活力的3大经济增长极之一，整体定位是“以首都为核心的世界级城市群、区域整体协同发展改革引领区、全国创新驱动经济增长新引擎、生态修复

环境改善示范区”。

1. 多措并举协同治霾

10年前，京津冀城市能源以煤炭为主，且煤炭消费总量不断增长，环境污染状况日益加剧，京津冀地区雾霾严重。在此背景下，《京津冀能源协同发展规划（2016-2025年）》提出，要打破行政区域限制，推动能源生产和消费革命，促进绿色循环低碳发展。北京市多措并举治理雾霾，特别是大力扶持新能源汽车企业，加快提高汽车尾气处理技术，加速车用燃油品质的提升。天津市全力推进“以电代煤”“以电代油”支持冀雾霾治理。河北省积极推动钢铁、电力、水泥、石化等重点行业污染治理，积极推行清洁生产和资源综合利用。此外，京津冀区域率先建立生态环境监测系统和数据库以及环保联合执法，对于高耗能、高污染企业采取严、控、管、关等措施倒逼其结构的转型。

2. 清洁能源加速替代煤炭

近年来，京津冀加快推进清洁能源替代，以煤炭为主的能源结构逐渐向多元化、清洁化方向转变。“十三五”时期北京市煤炭消费量由2015年的1165万吨，大幅削减到2020年的173万吨，煤炭在能源消费中比重由13.7%降为1.9%。⁹北京市平原地区基本实现“无煤化”，天津市除山区使用无烟型煤外，其他地区取暖散煤基本清零，河北省平原农村地区取暖散煤基本清零。¹⁰截至2020年底，京津冀（含京津唐电网、河北南网）新能源装机容量合计1.33亿千瓦，新能源发电量合计8201亿千瓦时，装机容量和发电量占比分别达到36.11%和7.54%。在新能源装机容量集中的冀北地区，截至2020年底，新能源装机容量占比达到54.29%，发电量占比接近15%。¹¹

3. 市场机制促进京津冀三地清洁能源消纳

2020年12月30日，国家能源局华北监管局印发了《京津冀绿色电力市场化交易规则》及配套优先调度实施细则，以充分协调京津冀区域各省级电网新能源电量生产与消费不平衡，以市场化手段实现清洁能源高效消纳、新能源发电合理定价，助力京津冀地区能源结构的清洁低碳转型。具体机制方面，一是侧重在新能源消纳保障性收购政策基础上，发挥市场在资源优化配置方面的作用；二是重在激发新能源场（站）市场参与积极性，便利用户或售电公司与新能源场（站）签约工作。

专栏 7 张北柔性直流电网试验示范工程

张北柔性直流电网试验示范工程由国家电网建设，是世界首个柔性直流电网工程，也是目前全球电压等级最高、输送容量最大的柔性直流工程。该工程于2018年2月28日正式开工建设，2020年6月正式投运，每年可向北京输送140亿千瓦时的清洁电力，相当于北京年用电量的 $1/10^{12}$ ，大幅提升了张家口清洁能源的输送能力，有效化解了张北地区千万千瓦级清洁能源消纳难题。

张北柔直工程为汇集和输送大规模风电、光伏、储能、抽蓄等多种形态能源的四端柔性直流电网。工程依托666千米 ± 500 千伏直流输电线路，新建张北、康保、丰宁、北京4座换流站，实现最大输送能力450万千瓦、总换流容量900万千瓦¹³。

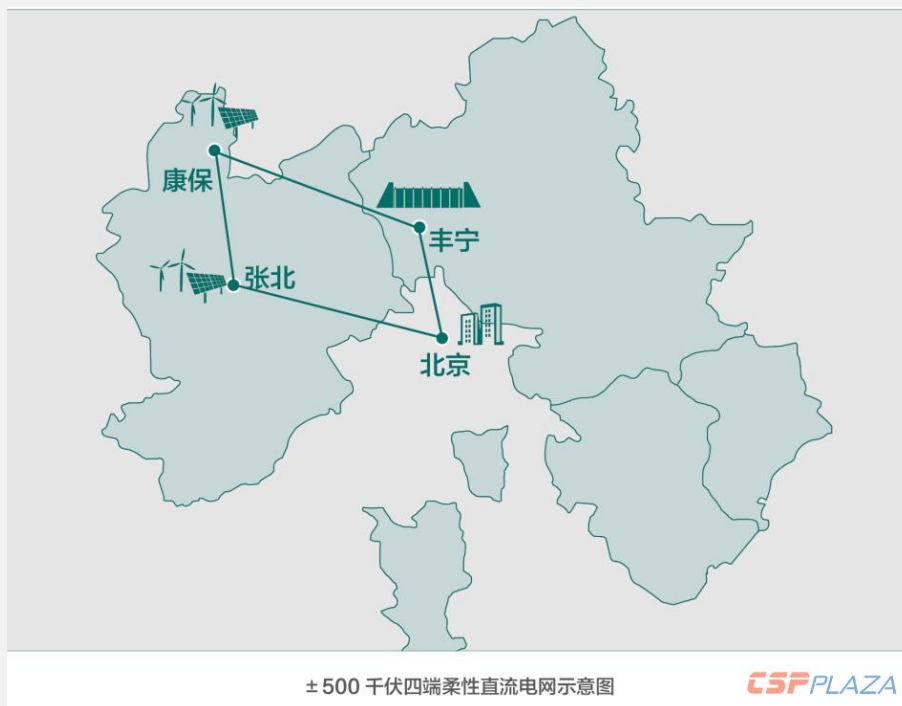


图 12 张北柔性直流电网试验示范工程示意图

资料来源：光热发电网

（五）黄河流域

黄河流域总面积80万平方公里，横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原、华北平原等四大地貌单元和我国地势三大台阶，既是传统资源富集区，也是中国能源转型任务最重的区域。黄河流域含煤区域逾35.7万平方公里；煤炭资源经济可采量和煤炭产量，目前均为全国首位；国家规划的14个大型煤炭生产基地，有9个在沿线分布。

《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》要求坚持生态优先、绿色发展，调整区域产业布局，发展新兴产业，推动清洁生产，坚定走绿色、可持续的高质量发展之路。目前，随着以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型风电光伏基地项目建设加快推进，黄河流域风电、光伏装机量分别达到1.4亿千瓦、1.2亿千瓦，占全国的46.7%、43.3%。中国首个百万吨级二氧化碳捕集利用与封存项目也在黄河出海口所在地的山东胜利油田建成¹⁴。

1. 以光伏发展治理采煤沉陷区^{15, 16}

采煤沉陷区治理与光伏结合，为传统能源地区转型的提供了重要途径。2015年黄河中游的山西省就开始了以光伏治理采煤沉陷区的相关探索。2016年国家计划建设550万千瓦光伏领跑基地，其中有450万千瓦结合了采煤塌陷区治理。国内第一批光伏领跑者基地就是在山西省北部的大同市南郊区、新荣区和左云县形成的1687.8平方公里的采煤沉陷区实施的。近年来，大同市依托丰富的太阳能资源在采煤沉陷区内建设光伏电站，同步开展光伏场区及回填区种植等生态治理，目前已建成15万千瓦光伏治理采煤沉陷区基地。鉴于采煤沉陷区居民搬迁后土地闲置、生态植被脆弱现状，以农光互补、林光互补等多样光伏电站开发模式，可带动矿区生态治理，并通过废旧矿山综合利用缓解光伏电站用地矛盾。

2. 沙漠戈壁荒漠光伏和风电基地¹⁷

在沙漠戈壁荒漠地区建设大型风电光伏基地，可以充分发挥这些地区风能太阳能资源富集、建设条件好的优势。光伏治沙作为近几年最新探索出的成果，光伏组件的铺设，除了能挡风防风外，还能吸收光照、降低土地温度、减少土壤水分蒸发、增加土壤水分累积，实现沙漠地区太阳能资源高效利用和沙漠变绿洲的双重收益。第一批以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型风电光伏基地项目约1亿千瓦，主要分布在内蒙古、青海、甘肃、宁夏、陕西、新疆6省（区）和新疆等地，目前已全部开工。第二批大基地项目，以库布齐、乌兰布和、腾格里、巴丹吉林沙漠为重点，以其他沙漠和戈壁地区为补充，综合考虑采煤沉陷区，总规模约4.55亿千瓦的大型风电光伏基地项目将在“十四五”和“十五五”期间陆续建成。

3. 青海水风光多能互补基地

近年来黄河上游的青海省着力推动清洁能源开发、新型电力系统构建、储能多元打造，打造国家级光伏发电和风电基地。2016年，习近平主席在青海考察时提出“使青海成为国家重要的新型能源产业基地”，2021年考察青海时进一步明确“打造国家清洁能源产业高地”的更高目标。截至2021年底，全省电力装机达到4286万千瓦，清洁能源装机占比达90.83%，新能源装机占比达61.36%，两项指标均居全国第一。2022年上半年，青海清洁能源发电量占全省总发电量高达84.8%，其中风光

等新能源发电量占比42.3%，新能源日发电量超过水电的天数为96天。¹⁸


4. “三江源”清洁取暖¹⁹

青海省三江源地区是世界上海拔最高、面积最大的高原湿地，也是中国重要的水源涵养地。长期以来，当地主要依靠烧煤和牛粪取暖，能效低下、取暖质量不高，造成污染排放。三江源智慧用能清洁供暖建设和改造工程启动于2020年5月，按照试点先行、分类分步实施的原则，逐步将传统的燃煤土锅炉改造成高效清洁的电锅炉。根据清洁能源试点经验，青海已经形成了学校、卫生服务等公共场所优先，先城镇、后农村牧区等可操作性强的清洁取暖改造方案。

5. 山东光伏装机水平全国第一²⁰

山东省位于黄河下游，作为全国先行的新旧动能转换试验区，随着“整县推进光伏”政策的积极落实，山东省户用光伏装机量持续多年处于国内领先水平。2021年，山东省新增并网容量1070.9万千瓦，是唯一一个“破千”的省份，占全国新增并网容量的19.51%；光伏发电累计装机达3343.4万千瓦，在全国各省光伏新增装机与累计装机排名第一。国家能源局数据显示，2021年户用光伏项目纳入规模管理指标中的新增装机规模为2159万千瓦，山东省排在全国首位。2022年上半年，山东省新增并网容量371.1万千瓦，其中分布式光伏为341.3万千瓦，再次占据全国首位。其中，户用分布式光伏新增装机191.7万千瓦，位列全国第三。截至2022年6月底，山东省光伏发电累计装机达3714.5万千瓦，持续保持全国领跑地位。

第四章：2060能源领域碳中和展望的重点结论



第四章：2060 能源领域碳中和展望的重点结论

《中国能源转型展望2023》以2060前实现碳中和为驱动、以2030年前碳达峰行动为导向，基于全球能源转型形势发生新变化和中国能源转型取得新成效的基础和分析，设计了能源系统发展的三条技术路径，采用情景分析和自主开发的模型决策支持系统，对中国2060能源系统进行了研究和展望。本专题报告主要介绍碳中和情景1（CNS1）和碳中和情景2（CNS2）的重点结论。

（一）中国实现碳中和的两条技术路径图

《中国能源转型展望2023》报告设计了三个情景，包括参考情景（BLS）、碳中和情景1（CNS1）和碳中和情景2（CNS2）。这三个情景都将满足生态环境保护目标与能源系统安全目标，并纳入已经发布的政策、措施和标准。不同点在于，BLS是依据当前能源部门的发展情况，结合近期内外部环境及风险，推演未来能源发展趋势。CNS1和CNS2则均需实现2030年前碳达峰、2060年前碳中和¹目标，即在目标倒逼下的研究并提出两种转型解决方案。

- **CNS1**：在用的煤电机组逐步降低年运行小时数，实施自然退役措施，最长寿命煤电机组运行到2055年左右；中长期适度部署负碳技术，随着新型储能技术、电动汽车储能（V2G）、绿氢等新技术的发展，能源系统能够在2055年左右实现净零碳排放。
- **CNS2**：以更大的力度加速部署新能源发展，尤其是风电、光伏的发展要进一步加快，从而可以加速替代存量煤电；与此同时，新型储能技术、电动汽车储能（V2G）、绿氢（包括储存暨运输）等新技术的商业化应用以更快的速度扩张，新商业模式、新发展业态的配套措施更有力，能源系统能够在2055年前实现净零碳排放。

（二）中国能源转型的动力：保障清洁、碳中和、安全、高效的能源系统

中国能源转型的总体目标是发展清洁、低碳、安全、高效的能源体系。清洁的能源系统将不会污染空气、水和土壤，同时，安全的能源系统将确保能源供应安全，高效的能源系统将在确保能源供应成本效益的同时高效利用能源。此外，转型过程确保公平、保障和进一步发展人民的生计同样重要。

¹ 本年度展望“碳中和”的定义拟采取《碳达峰碳中和干部读本》的描述，仅包括二氧化碳中和。

《碳达峰碳中和干部读本》第13页“知识链接”：碳中和为“某个国家或地区在规定时期内人为排放的二氧化碳，与通过植树造林、碳捕及利用与封存等移除的二氧化碳相互抵消”。

具体而言，在碳排放方面，两种碳中和情景均确保中国能源方面的二氧化碳排放量将在 2030 年前达到峰值，然后逐渐下降。在CNS2情景中，2055年前将实现净零碳排放，为2060年中国经济社会系统实现碳中和提供有力保障。

（三）中国能源转型的主要内容：能源效率、电气化、绿色供电

关于中国经济的一个基本设想，是预计将在 2060 年增长到 2020 年水平的 4 倍左右。为了在碳排放限制下支持这种增长，能源系统的效率必须有所提高，其关键在于终端用能部门的能源效率，以及减少供应部门的能源损失。对于终端用能方面，从化石燃料向电力的转化将是转型过程中最重要的步骤之一，以确保高效和低环境影响。

在电力领域，需要快速、大规模地部署风能和太阳能，以满足日益增长的电力需求，并逐步减少燃煤电厂的使用。煤电的角色将逐渐转变为灵活能源，以支持风能和太阳能的可变电力生产。

非化石能源（包括氢能）在一次能源总量中的比重将继续上升，2040-2045年非化石能源将成为我国主要能源。在CNS2情景下，预计非化石能源占比到 2035 年将达到 40% 左右；到2060年达到95%以上。其中，可再生能源将占一次能源消费的90% 以上。

如下图所示，能源系统的重大变化体现在 2020 年和 2060 年的能源流差异中。由于电气化和能效措施，2060 年的最终能源消耗总量将低于 2020 年，太阳能和风能的大量使用将电力部门的损失降至最低，并大幅降低整体煤炭消耗量，以确保在 2060 年前实现碳中和。

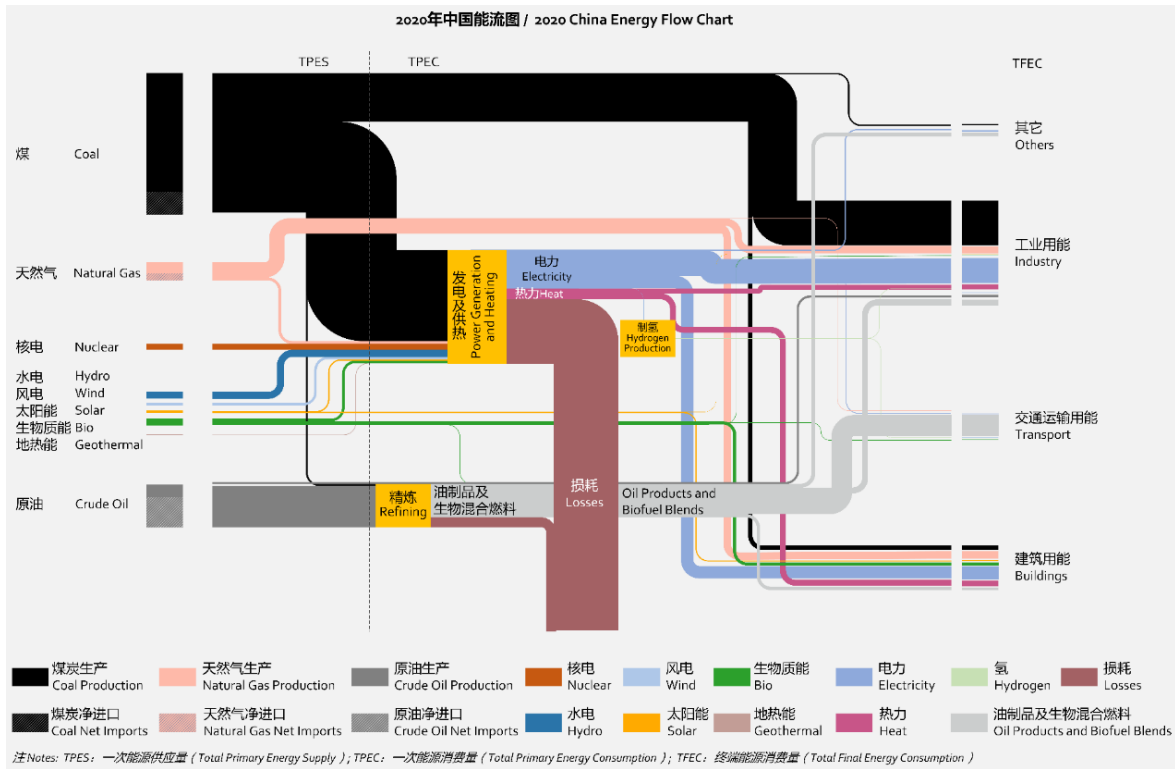


图 13 2020 年中国能流图

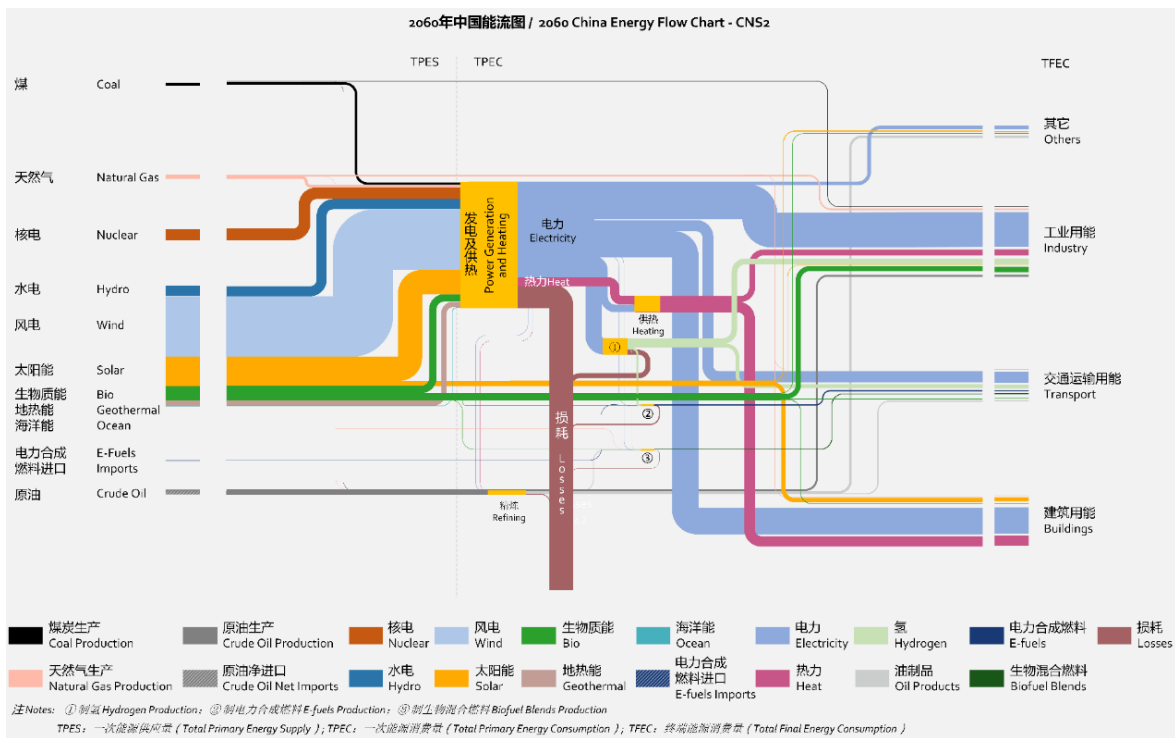


图 14 CNS2 情景的 2060 年中国能流图

（四）电气化和能源效率有助于实现终端能源结构减碳

终端能源结构不断优化，建筑、工业、交通等领域用电、用氢占比逐步提升。

在建筑领域，随着经济社会发展和人民生活水平的提高，终端能源消费将继续增长，随着能源效率的不断提高而逐渐达到峰值，然后缓慢下降，两个碳中和情景在这一点上仅在达峰的时间和幅度上有所不同。超低/近零能耗建筑的大规模推广、可再生能源在建筑中的应用以及电气化率的提高，将有助于减缓建筑行业能耗增加的趋势。2060年，建筑行业电气化率将在85-90%左右。

工业领域是终端能源消费脱碳的关键领域。钢铁和水泥行业落后产能的淘汰和煤化工工业的有序发展，将带动煤炭消费量稳步下降，工业能源消费趋于稳定，预计在2030年左右达到峰值。在CNS2情景下，得益于能源效率的显著提高、新技术的引入、设备的转移以及电力和绿色氢能的大规模应用，到2060年工业领域在终端能源消耗中的份额将低于50%。

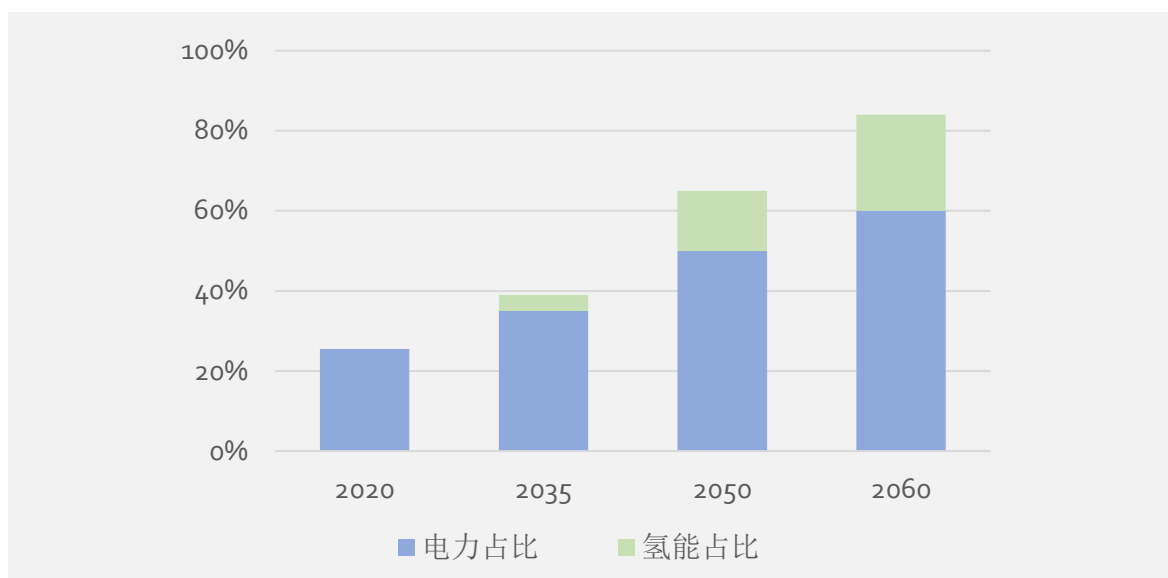


图 15 CNS2 情景的电力和氢气在工业终端能源需求中的预计份额

在交通领域，2035年后碳排放量将开始下降。电动汽车保有量快速增长，到2060年乘用车几乎全部为电动或氢燃料电池汽车。氢燃料电池汽车的发展主要面向重型商用车和公共汽车。到2030年，铁路电气化率进一步提高到80%以上，到2050年达到100%。生物燃料和电力多元化转换（Power-to-X, PtX）在航空业的大规模利用也将在交通运输业的低碳发展中发挥重要作用。

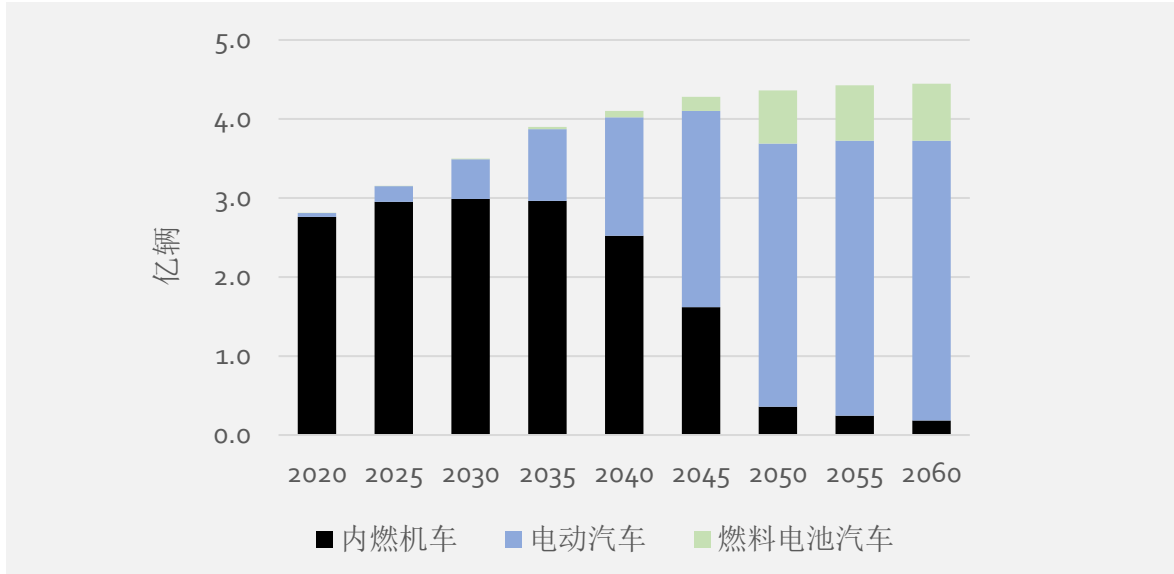


图 16 CNS2 情景的中国汽车保有量和燃料结构预测

（五）风能和太阳能主导电力行业，覆盖 90%以上的用电量

由于终端用电行业的电气化，中国的发电装机将继续增长，到2060年电力行业的装机容量将超过8000吉瓦。风能和太阳能将逐渐成为能源系统的支柱。

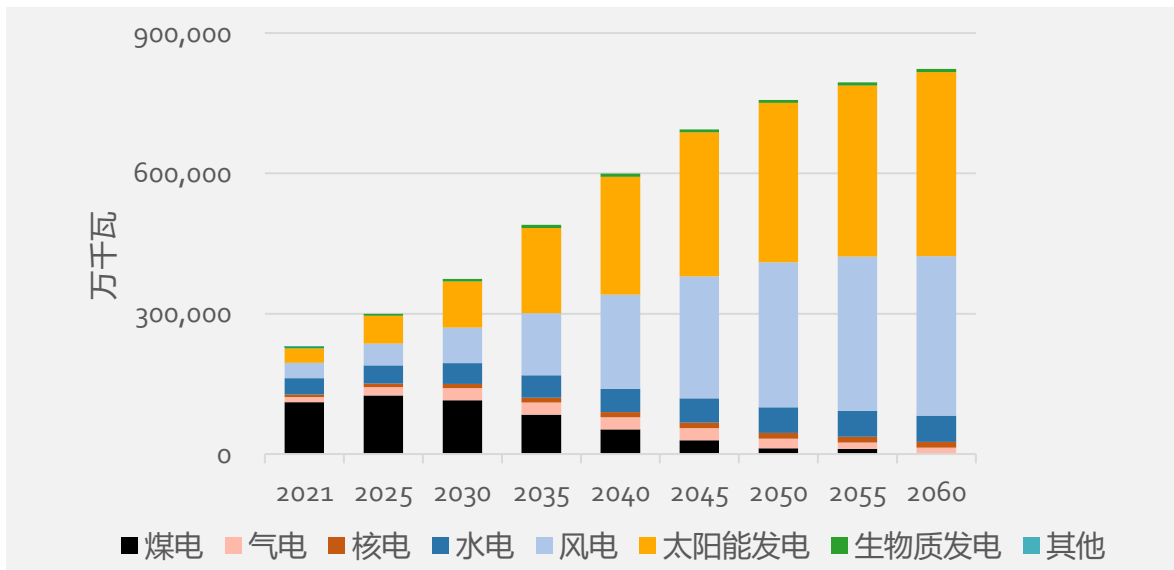


图 17 CNS2 情景的 2021-2060 年装机容量

到2035年，可再生能源发电份额将达到50%以上；此后，随着煤电加速退役，到2060年，可再生能源发电份额将进一步上升到发电量的90%以上。

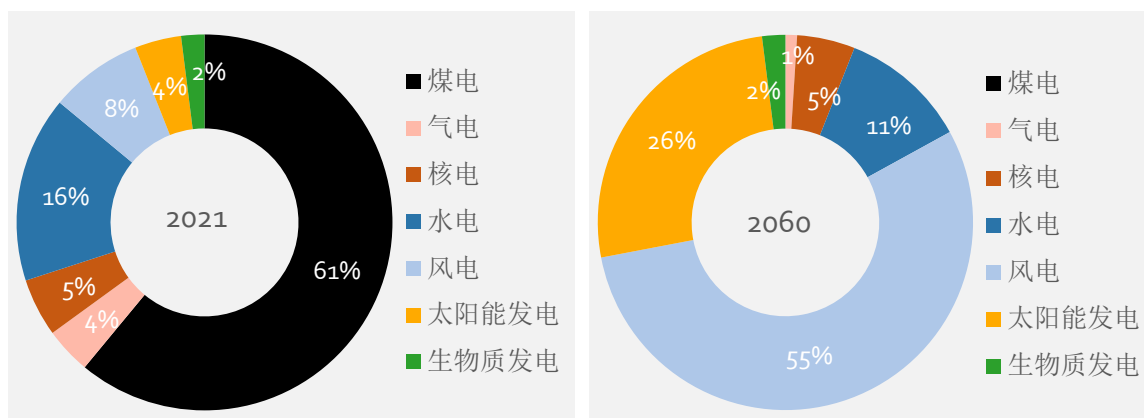


图 18 CNS2 情景的发电情况及其结构

(六) 抽水蓄能和新能源储能将是新型电力系统长期安全稳定运行的主要保障

在以新能源为主的新型电力系统中，燃煤发电占比将大幅降低，供电侧、电网侧和用电侧的灵活资源将得到大规模应用。当风能和太阳能等波动电源产生大量电力时，将能以经济最优的方式确保电力系统的运行稳定性。到2060年，抽水蓄能和储能电池将在电力供需平衡中发挥最显著的调节作用，电动汽车有序充电、V2G、需求侧响应等资源占比将显著提升。太阳能发电占比高，且午间电价低，抽水蓄能、蓄电池、电动汽车和需求响应负载都可利用低谷电价充电或用电；当晚间用电高峰出现电价上涨时，将蓄能释放到电力系统中，可在提供辅助服务的同时增加收入。

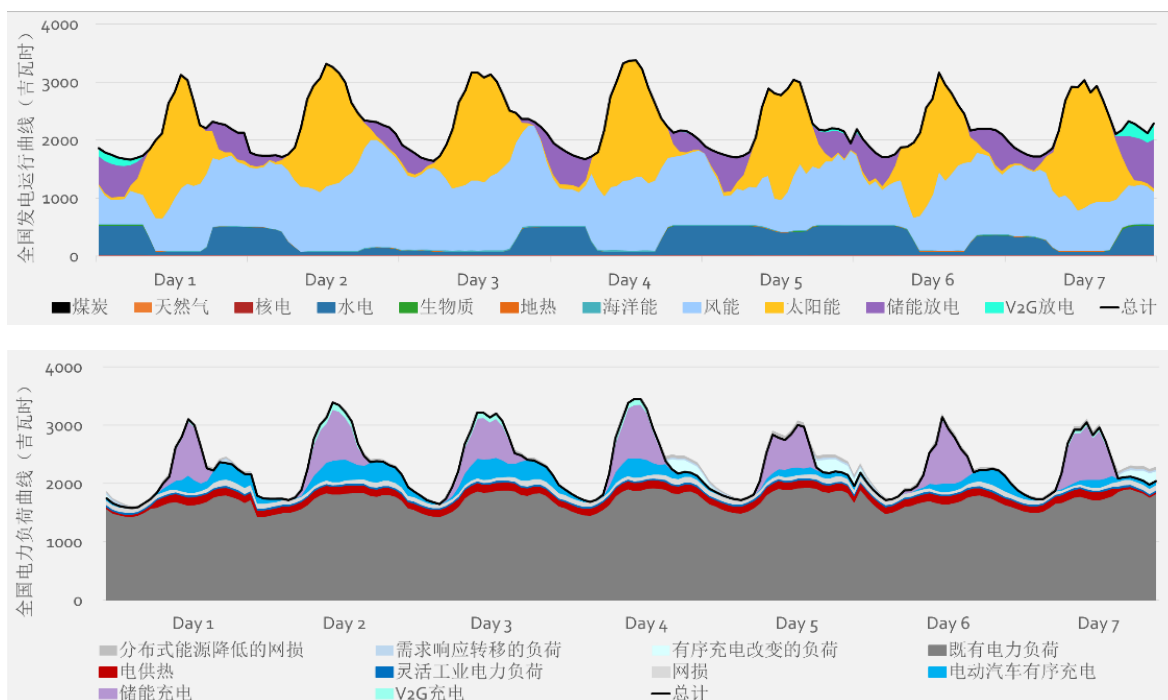


图 19 CNS1 和 CNS2 的 2060 年夏季全国电力系统一周小时级电力平衡

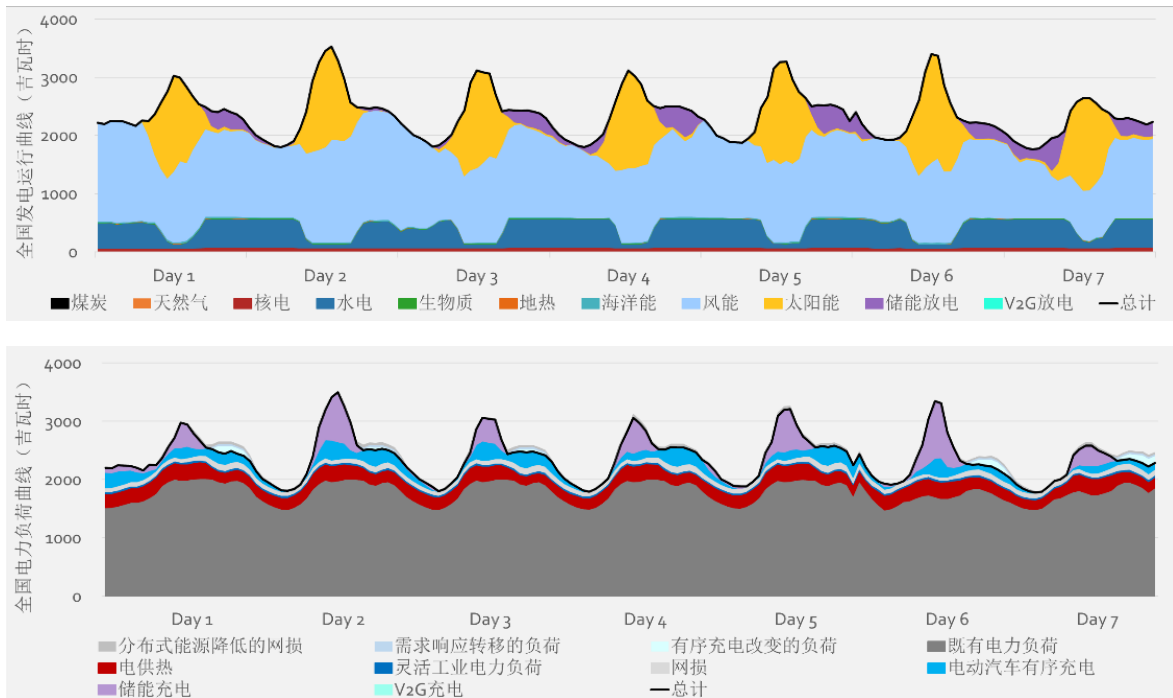


图 20 CNS1 和 CNS2 的 2060 年冬季全国电力系统一周小时级电力平衡

（七）市场驱动是能源转型的关键

从技术上看，能源转型是可行的，经济上也是可行的，能源转型将实现碳中和、能源安全和能源价格经济的目标。但要确保实施能源转型，需要消除制度障碍，且有制度驱动。

在市场驱动因素中，最重要的是运行良好的电力市场和高效的碳市场。总的来说，如今风能和太阳能已经能够与新的化石燃料发电厂竞争。尽管如此，现货市场和长期电力购买协议这两点仍对于单个项目的经济可行性至关重要。动态定价（基于使用时间）对于发展需求侧响应以及对储能和电力系统灵活性的投资至关重要。当可变能源发电的份额增加时，独立的系统服务（如辅助服务和系统充裕度）市场将是必要的。对于电力领域和工业领域，足够高的二氧化碳排放价格就是能源转型的强大动力。

应消除省级在逐步淘汰煤炭和部署可再生能源方面的障碍，重点关注各省鼓励能源快速转型的经济激励措施。

（八）总结

《中国能源转型展望》中的情景详细说明了如何实现碳峰值和碳中和的目标。

需求方需提高能源效率，以确保供应方做出相关部署的步伐能够跟上并维持所

需的经济增长。

绿色能源供应方面，技术进步和成本降低使风能和太阳能能够提供大量清洁能源，主要通过可再生电力，绿色供暖将取代化石燃料供暖。

电气化将支持工业、交通运输和建筑等行业摆脱化石燃料，同时实现电力供应的脱碳。

氢能将成为一种重要的能源载体，其为廉价绿色电力的充足供应和最难减排的行业搭建起桥梁。绿色氢能与碳捕捉相结合，可以为重型运输、航运和航空等行业制造燃料。

碳封存将作为备选方案或最后的选择，尤其是在碳负排放和碳汇的情况下。负碳可以补偿系统中仍然适度存在的碳排放水平，以确保碳中和。

最后，需要推动转型变革的动力，包括电力市场、碳市场、长期规划、具体的创新和实施战略，以及地方、国家和国际利益相关者之间的合作。

在三个情景中，随着能源结构低碳转型的不断深入，我国能源领域的二氧化碳排放将均在2030年前实现达峰，随后逐步下降，其中CNS1和CNS2降速更为显著。在CNS1情景中，2055年左右实现净零碳排放；CNS2情景中，2055年前实现净零碳排放，这将为中国经济社会系统在2060年前实现碳中和提供有力的保障。

第五章：丹麦的气候政策



第五章：丹麦的气候政策

过去四十年，丹麦已完成了从几乎完全依赖化石能源到实现总体可再生能源高比例利用的转型。截至2021年，可再生能源在能源消费中占比达43.1%。如图21所示，随着经济活动的增长，与之相对应的是能源强度的下降、能源效率的提高和二氧化碳排放量的降低。

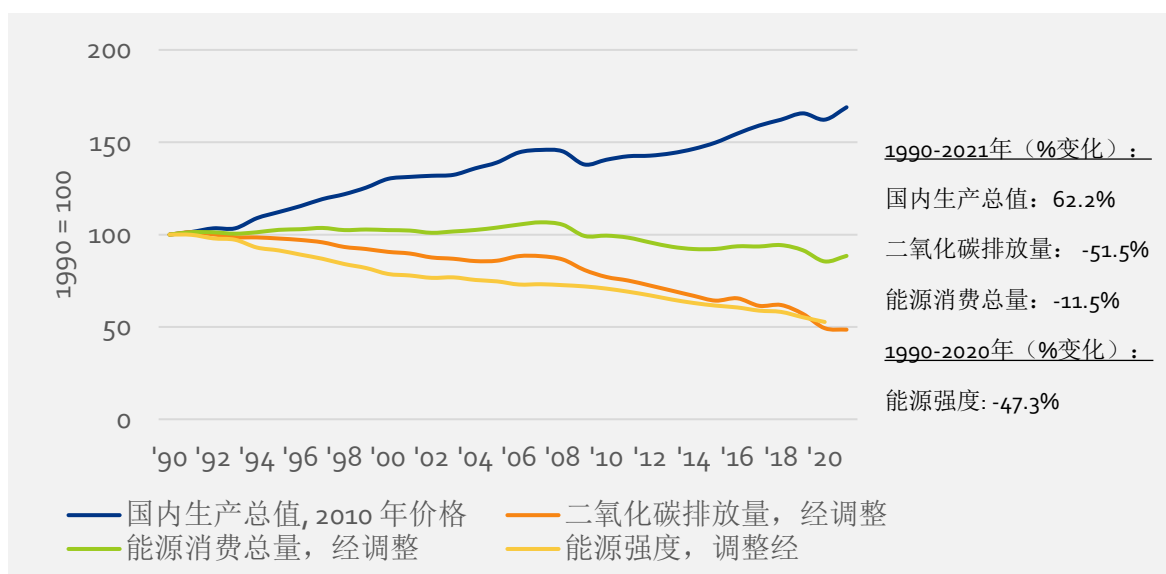


图 21 1990-2020 年丹麦的国内生产总值、二氧化碳排放量和能源消费总量

资料来源：丹麦能源署能源统计年鉴

构成这种转型的基础是长期以来的能源和气候政策协议。在大多数情况下，这些协议得到了丹麦议会广泛的政治支持，而这种对能源和气候转型的广泛政治支持促进了机构设置、政策和法规的建立，确保了丹麦在中长期内执行其能源和气候目标和承诺。

早在1990年，丹麦议会就批准了《能源2000》战略，其中包含了面向2005年的二氧化碳减排目标，也是世界上首个此类目标，随后在2000年代和2010年代又分别签订了几个新的能源和气候协议。2020年，丹麦议会批准了丹麦《气候法案》，该法案要求承诺到2030年将温室气体排放量 (GHG) 相较1990年减少70%，并最迟在2050年实现气候中和。这些气候目标符合《巴黎协定》，该协定承诺将全球气温上升幅度限制在1.5摄氏度以内。

表1为丹麦的气候和能源目标、承诺概况。

表 1 丹麦在气候变化方面的国家气候目标、协议和国际承诺概览

丹麦《气候法案》	
相关领域	描述
10 年温室气体 (GHG) 减排目标	到 2030 年，丹麦的温室气体排放量比 1990 年减少 70%。
5 年指标性温室气体减排目标	到 2025 年，丹麦的温室气体比 1990 年减少 50-54%。
净零排放	到 2050 年，丹麦的温室气体排放量不超过其吸收量。
丹麦议会成员通过的部分部门协议	
相关领域	描述
能源	到 2030 年，丹麦的能源部门不再依赖煤炭、石油和天然气。丹麦的雄心目标是将包括太阳能和陆上风能在内的陆上可再生能源产量提高四倍（2020 年这些能源的产量为 118 亿千瓦时）。此外还一致同意到 2030 年将海上风力发电量提高五倍，达到 1290 万千瓦。
减少农业和林业的温室气体	到 2030 年，这两个部门的温室气体排放量比 1990 年减少 55-65%。
减少公路运输中的二氧化碳排放量	到 2030 年，公路运输减少 210 万吨的二氧化碳当量排放（到 2025 年减少 100 万吨二氧化碳当量）。目标是拥有 100 万辆零排放和低排放车辆，占全部车辆的 30%。
欧盟的“减碳 55%”一揽子计划 (Fit for 55)	
相关领域	描述
欧盟排放交易体系内的部门	相对于 2005 年，相关部门在 2030 年总计减少 61% 的温室气体排放量。
可再生能源	欧盟国家致力于共同实现在整个能源结构中可再生能源占比 40% 的目标。
能源效率	欧盟国家在 2030 年共同减少 36% 的最终能源消费（相对于 2007 年欧盟参考情景），即相较 2020 年欧盟参考情景减少 9%。

注：在欧盟委员会通过其官方立场后，欧盟的“减碳 55%”一揽子计划已进入最终批准前的机构间协商的最后阶段，该立场将成为与欧盟议会协商的基础。

（一）丹麦气候工作的现状和预测

根据丹麦能源署的最新气候状况报告和预测，到 2020 年底，丹麦的温室气体排放量比 1990 年减少了 43%。

根据丹麦政府在《2022 年气候计划》中的最新估计（其中包括迄今为止采取的所有相关政策），预计到 2025 年减排工作将致力于达到 49.5%，到 2030 年则是达到 63.6%。相较于丹麦到 2025 年减少 50-54% 的目标，留下了 0.5-4.5 个百分点的减排赤字，而相较于丹麦到 2030 年减少 70% 的目标，则留下了 6.4 个百分点的赤字。图 22 概述了丹麦各部门的历史和预测排放量。

气候计划中包括最近达成的二氧化碳税收政策、卡车运输收费项目、以及关于

扩大可再生能源（包括空间供热）方面的进一步协议。丹麦当前气候工作的一个显著特点是，在1990-2020年期间，发电和区域供暖的排放已经下降了84%，使农业和交通成为最需要关注的部门。这两个部门在2020年的温室气体排放总量中占比达63%。

在没有额外政策的情况下，预计2030年农业部门排放量将达1511万吨二氧化碳当量，并占总排放的43%，根据议会关于该问题的协议，预计到2030年将减少55-65%的排放量。然而，预计减排工作中占比最大的部分将取决于棕色生物炼制（热解）等领域是否能实现技术进步，因为目前在不大幅限制生产的情况下限制农业排放极具挑战性。

丹麦气候目标是否能取得成功，另一个重要领域是公路运输，占有排放量的约26%。特别值得一提的是，乘用车交通在所有与运输有关的排放中占最大比例。对于该部门，减排工作的成功主要取决于电气化，其目标是到2030年100万辆车达到低排放标准。根据丹麦统计局最新数据，电动汽车（EV）、插电式混合动力汽车（PHEV）和其他低排放汽车方面目前进展明显，在2021年10月至2022年9月期间销售的新车中，有39.1%属于这种类型。禁止销售以汽油和柴油为燃料的新车仍然遥不可及，因为目前这尚不在欧盟立法范围内。然而，欧盟层面正在讨论一些建议，允许在2035年之前禁止使用化石燃料汽车。

丹麦减排工作的另一个重要方面是碳捕获与封存（CCS）的预期贡献。预计将在2025年开始捕获碳排放，并到2030年，捕获4%的碳排放量。这项技术对于工业、农业和其他工艺，如垃圾焚烧供热和垃圾焚烧发电具有特别意义，否则这些工艺可能很难脱碳。

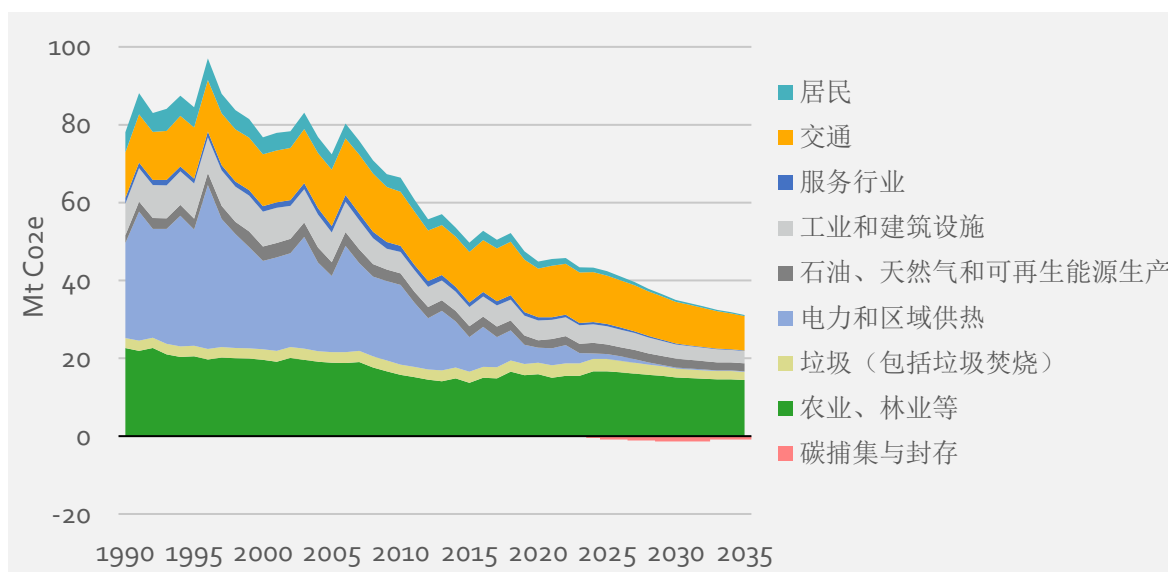


图 22 1990-2035 年丹麦各部门的总排放量

资料来源：丹麦能源署。注：图中最新的统计年份为 2020 年，其余年份为预测值。

（二）丹麦绿色转型的未来发展方向是电气化

丹麦绿色转型最显著的一个特点是其对电气化的关注。如图22所示，电力和热力生产几乎完全脱碳，这为交通、供暖以及其他潜在工业流程的直接电气化创造了一个坚实的起点。而通过PtX流程（如电解）中的合成燃料生产而形成的间接电气化预计也将发挥重要作用。

如图23所示，可变可再生能源电力生产和消费都将增加，这将使丹麦成为一个通过跨境互联网络向邻国输送电力的净电力出口国。

此外，随着电动汽车和热泵等灵活消费模式进入系统，需求结构预计将发生重大变化。预计到2030年，家庭和企业的典型消费将占总量的约二分之一，这低于其2019年90%的占比。新投入使用的大型数据中心预计也会增加电力需求，但由于其相对稳定的消费模式，它们对灵活性的提升贡献不大。此外，电力系统的互联互通程度预计将比目前更深，因为海上风电生产促进了丹麦与德国、比利时和荷兰等邻国共建国际海上风电枢纽的努力。

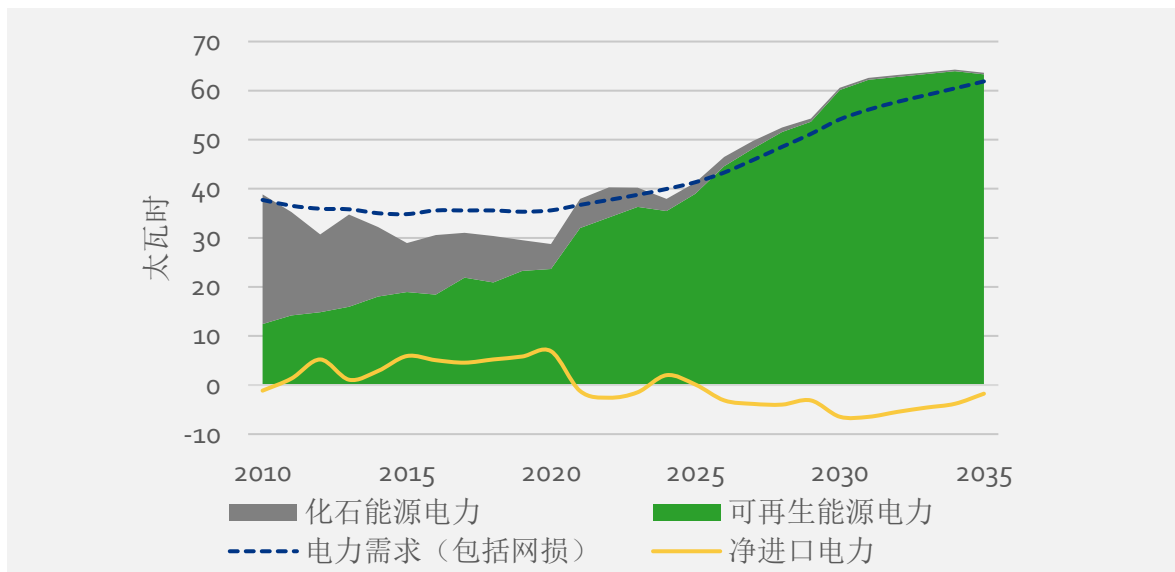


图 23 2010-2035 年电力生产、需求和进口

资料来源：丹麦能源署

（三）《气候法案》

2020年，丹麦议会颁布了《气候法案》。除了设定具有法律约束力的目标和义务以外（见表1），该法还定义了一个治理框架，以确保气候政策的长期延续性。

《气候法案》指定丹麦气候变化委员会（DCCC）作为一个公正专家机构，就丹麦气候政策提供相关咨询和监督：

- DCCC 就丹麦气候工作（包括目标和承诺的设定），向气候、能源和公共事业部提供建议；
- DCCC 将分析 2050 年前向低碳社会转型的各种潜在手段，并确定实现温室气体减排的可能措施，同时考虑其技术可行性和社会经济效益及成本；
- DCCC 将逐年评估政府的气候政策，并将建议对气候、能源和公共事业部部长提出的行动计划进行审查，前提是委员会认为这些计划不足以实现其目标；
- DCCC 将参加气候变化方面的公共辩论，并与相关利益相关者（如行业和劳动力市场组织以及民间团体代表）进行接触。
- 《气候法案》要求气候、能源和公共事业部部长每五年制定一个新的十年气候目标，该目标应至少与之前制定的目标一样雄心勃勃。此外，《气候法案》还规定了一个年度气候政策周期，包括：
 - ✓ 每年二月，DCCC 将提出相关建议，并评估政府是否可以按期实现其具有约束力的目标和承诺；
 - ✓ 每年四月，气候、能源和公共事业部都应提交一份关于气候政策的现状和预测报告。这些报告应概述各部门的具体减排政策：能源、住房、工业、交通、能源效率、农业以及土地利用变化和林业等；
 - ✓ 每年九月，气候、能源和公共事业部部长将提出其气候计划，并概述相关气候倡议以及资金来源，并将其纳入公共融资法案当中；
 - ✓ 每年十二月，议会将对公开辩论中提出的倡议进行评估。



图 24 《气候法案》规定的年度气候政策周期

（四）绿色税收改革

丹麦气候政策的另一个重要元素是最近批准的一项广泛税收改革，其目的是促进符合2030和2050年目标的绿色转型。虽然多年来丹麦的税收制度一直都在应对经

济活动产生的各种环境负外部性，但政府认为还是有必要建立一个更统一的税收制度，来直接应对二氧化碳排放问题。

当前的税收体制中包含了对燃料征收的单独能源税和二氧化碳税，以及适用于几个工业部门的欧盟排放交易体系配额价格。对于运输和空间供热用途的燃料，其二氧化碳排放的有效税负比工业活动的要高得多。

随着改革的推进，到2030年，欧盟排放交易体系配额制度内外的行业都将被征收二氧化碳排放税，并在2025年将现有的能源税转换为化石燃料二氧化碳税。新税制的预期影响为430万吨二氧化碳当量的减排量。另外，当排放交易体系价格较低时，它还将采用一个价格底线机制。表2简要描述了将采用的税率。

表2 丹麦的绿色税收改革简介

公司类别	2030年税率（EUR/CO ₂ ）
欧盟排放交易体系外	101
欧盟排放交易体系内	50
参与矿物学过程（水泥、玻璃、矿棉、砖块生产等）	17

注：税率以欧元为单位，按丹麦国家银行2022年10月11日公布的1欧元=7.4381丹麦克朗的汇率计算。

作为协议的一部分，农业不会被征收二氧化碳税，但丹麦已成立一个专家组，研究如何最适当地监管该部门的排放。专家组在其分析和建议中将审视减少农业部门非能源相关排放的各种政策选项，包括二氧化碳税、国家援助机制和其他监管举措在内的组合选项等。

（五）市政层面的规划

丹麦市政部门对生活在特定地区公民的诸多政策有着相当大的影响力，同时也是热力规划和陆上风电和太阳能发电厂物理规划的主要决策者。鉴于上述分散式决策模式，丹麦各市镇对其二氧化碳足迹可产生巨大的影响。在丹麦，市镇一级的规划与更广泛的国家能源规划并存，而国家规划的主要作用是从社会成本效益角度确定了一个项目评估的总体框架。

作为市镇层面规划的一个例子，丹麦98个市镇中有95个已经设定或正在设定具有约束力的协议，以设计和制定自己的气候行动计划，这些计划都将符合《巴黎协定》的要求。

（六）最新挑战

新型冠状病毒（COVID-19）大流行后经济复苏、供应链中断以及扩张性财政货币政策的作用造成了当前巨大的通货膨胀压力，丹麦和世界其他地区都受到影响。

丹麦的消费者价格指数（CPI）在2022年8月上升了8.9%，这是自1983年1月以来同比价格上涨的最高水平。

近期因乌克兰危机而经历的地缘政治紧张局势加剧了通货膨胀上升的影响，并最终使欧洲和丹麦的消费者面临创纪录的高价格水平，特别是在电力和天然气市场。

为解决这一问题，丹麦议会已通过决议，消费者有望在较长时间内（5年）被允许以低利率推迟支付部分能源账单。当能源（天然气、电力、供热）价格超过预先设定的水平（相当于2021年第四季度的价格）时，消费者可推迟支付超过限值部分的账单。该机制将持续12个月，试图在消费者保护和价格信号之间取得平衡，从而为急需的灵活性和节能措施提供支持。丹麦政府将为消费者债务提供担保，并在必要时以政府贷款的形式向能源公司提供流动性。

1. 电力

高昂的电价，加之所有丹麦家庭都是按小时计量和计费这一事实，不但提高了消费者意识，也有助于激励灵活电力消费。电力的批发价格往往在高低点之间波动，前者是由天然气发电商制定的价格，而后者则发生在风力和太阳能发电量充足的时候。

在最近的一项分析中，丹麦能源行业协会——丹麦绿色电力公司——观察到，高价格促使消费者将消费从一天中最昂贵的时段转移到最不昂贵的时段，这证明了价格信号是有效的。大哥本哈根地区的配电系统运营商（DSO）也观察到了类似趋势，它们注意到，2022年10月5日14:00至15:00之间，当批发价格几乎为零时，消费者的消费相对于前两天的同一小时增加了27%。

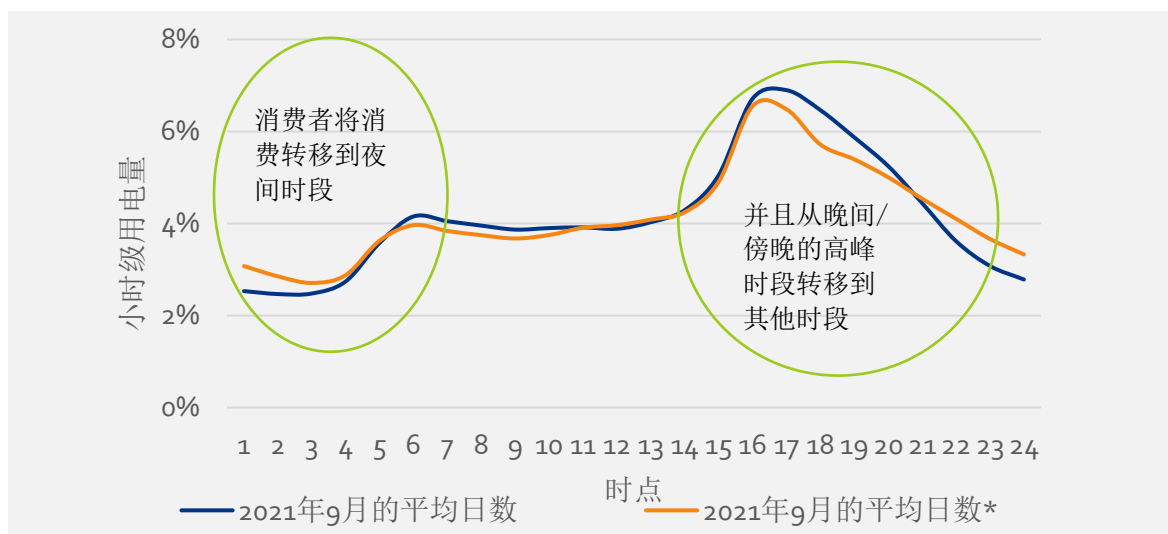


图 25 2021 年 9 月和 2022 年 9 月工作日的平均每小时用电量

资料来源：丹麦绿色电力公司（基于 Energidataservice）

为应对最新挑战和对电力供应不足的潜在担忧，丹麦政府采取的另一项措施是决定将三家化石燃料发电厂的关闭时间推迟到2024年。政府评估认为，由于天然气市场的状况，即将到来的两个冬季可能具有挑战性，因此选择依靠国内生产来弥补高峰时段可能出现的短缺。

2. 气体燃料

因乌克兰危机，丹麦的沃旭能源（Ørsted）与俄气（Gazprom）之间的长期合同已被终止，令丹麦供应商在更大程度上要依赖欧洲现货市场来履行其承诺。丹麦政府与其他欧盟成员国做出的直接反应是寻找共同替代方案，以获得所需的供应，同时加快绿色转型的速度。

在国内方面，丹麦已经宣布最迟在2035年淘汰用于空间供暖的天然气，并制定了到2030年完全依靠绿色气体燃料供应的目标。目前，大约有40万户丹麦家庭使用天然气锅炉供暖，另有5万户使用燃油锅炉供暖。图26显示了这种转换挑战的规模，第二和第三大最常见的空间供暖形式分别是燃油锅炉和天然气锅炉。该图还显示了在过去11年中，区域供暖和个人热泵是如何取代石油和天然气而增加其份额的。

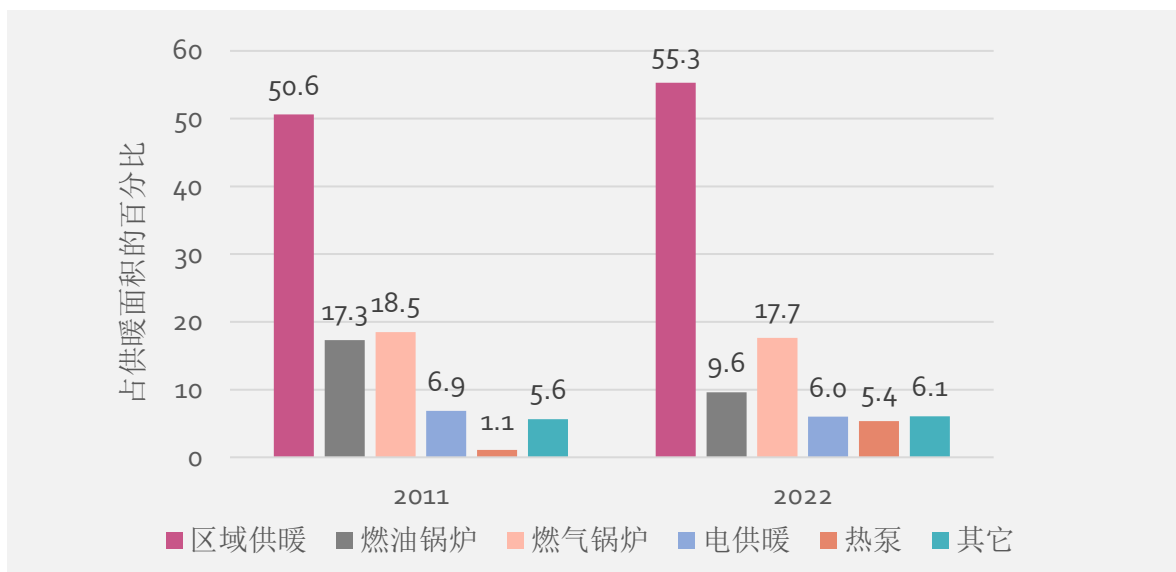


图 26 按供暖形式划分的供暖空间百分比（截至 2022 年 1 月 1 日和 2011 年 1 月 1 日）

资料来源：丹麦统计局

在技术和经济上可行的情况下，这些家庭将有可能转由区域供暖，并最迟在2028年实现。政府估计，大约30-50%的由燃气供暖的住宅将转由区域供暖，而另外20%的住宅将选择单独的供暖方案，如热泵。燃气锅炉在2030年将依然存在，但将由绿色气体燃料供应，这些绿色气体燃料主要来自成熟和有机废物的分解。

（七）能源安全

丹麦在确保能源安全的广泛政策方面与欧盟在这一问题上的广泛政策密切相关，其中包括旨在确保充分燃料供应的合作框架及充分天然气和原油储备的共同战略等诸多问题。近期地缘政治紧张局势的加剧促使欧盟成员国加强协调，实施节能措施，并与新的供应商建立新的能源伙伴关系、达成共同协议，以加快清洁能源转型。

这一共同框架也跨越了几个机构层面，并涉及到关键能源基础设施领域更广泛的安全和防御问题。正如最近在波罗的海的丹麦和瑞典专属经济区内发生的北溪1号和2号爆炸事件所显示的那样，政府间的合作和最高级别的对话已变得尤为必要。

一个较为狭隘但与能源安全高度相关的观点是对欧洲电力系统的充裕性进行定期评估和监测，这一点在欧洲资源充裕性评估（ERAA）框架中已有概述。这种定期评估将确定欧盟、各国和投标区层面上的系统充裕性。

关于欧洲天然气市场的天然气供应问题，欧盟立法框架考虑了三个危机级别：“预警”级、“警戒”级和“紧急”级。

专栏 8 哥本哈根并未放弃碳中和目标

在丹麦气候行动的大背景下，哥本哈根作为首都责无旁贷成为行动先驱。哥本哈根在2012年制定了《哥本哈根2025气候规划》，提出了2025年达到碳中和目标。该计划分三个阶段执行（2012-2016、2017-2020、2021-2025），每个阶段均附有一份路线图提出该阶段的具体方案。最新的路线图《哥本哈根2025气候规划——2021~2025路线图》于2020年发布。

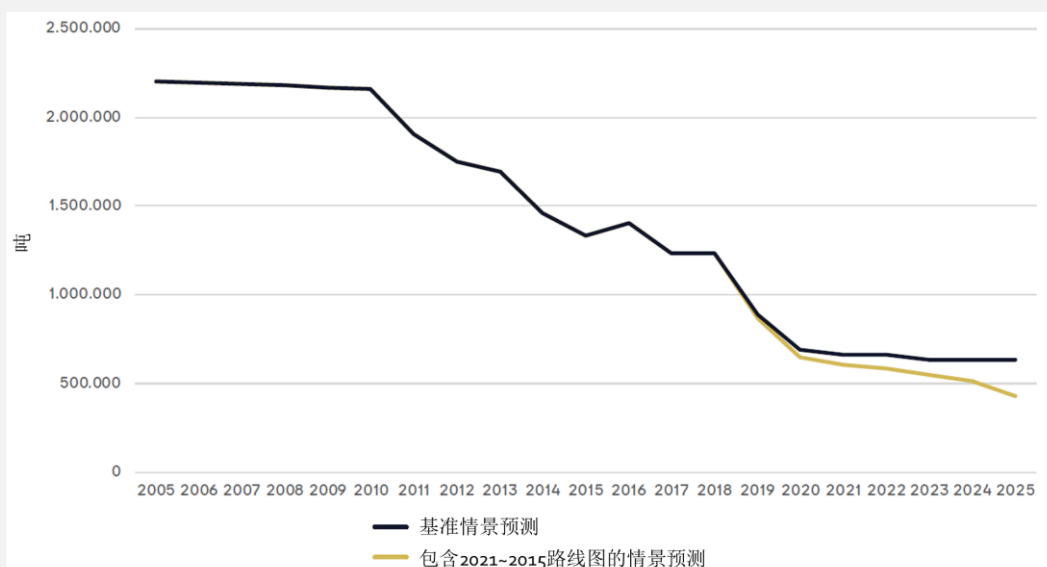


图 27 2005-2025 年哥本哈根碳排放

《哥本哈根2025 气候规划》基于四个重点领域：能源消费、能源生产、交通减排和城市管理。每个领域都包括一揽子行动方案和行政令，例如不同建筑类型的能效计划、公共交通电气化计划、可再生能源的发电与供热、产品与服务的生态标签等。该气候计划实施情况良好。该计划中哥本哈根的碳排放基线为2005年的230万吨二氧化碳，到2018年，该市碳排放量已经减少了近120万吨，主要来自于发电和区域供热的脱碳。截至目前，哥本哈根已减排80%——高于今年70%的目标。

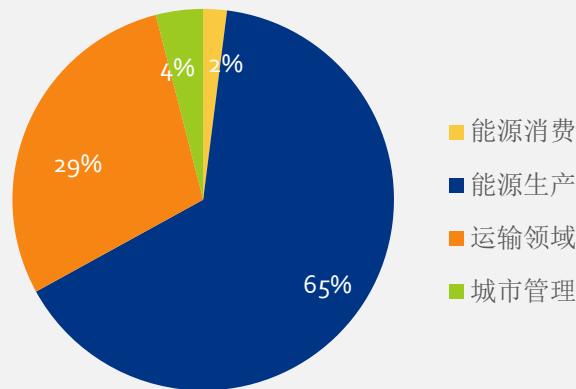


图 28 哥本哈根 2025 气候计划中 2021-2025 年碳减排路线图

四大领域的碳减排潜力为基年总排放量的80%，剩余的碳排放主要集中在运输领域。哥本哈根计划利用生物垃圾发电加CCS，产生负碳排以及PtX，用于替代目前交通液体燃料和中和剩余碳排放。

因此，哥本哈根通过了一个专项规划，由ARC（Amager Ressource Centre）公司主导，在其目前的垃圾焚烧厂基础上建立一个CCS示范，该示范满负荷的碳捕集能力为每年50万吨，完全可以吸收哥本哈根的剩余碳排放。该示范应于2022年夏季开始试点运行，2025年实现满负荷运行。但在2022年8月初，由于未满足股权资本要求，ARC没有申请到丹麦能源署的CCS基金，因此无法按时完成计划的CCS示范。由于没有CCS来及时中和剩余的碳排，哥本哈根无法在2025年实现其碳中和承诺。

但这并不意味着哥本哈根将放弃碳中和目标。正如哥本哈根市长 Sophie Hæstorp Andersen 最近所说，“非常不幸的是，我们无法在2025年实现目标。我对此感到非常难过。但这并不意味着我们不能在2026年、2027年或2028年实现碳中和。我们仍然有成功的希望。”一旦ARC获得CCS基金，哥本哈根可以迅速重新回到碳中和的轨道上。

第六章：丹麦能源转型案例



第六章：丹麦能源转型案例

作为其气候政策目标的一部分，丹麦正在推进一些减缓气候变化的举措，其关注重点是增加可再生能源供给和提升全社会电气化水平——包括直接和间接的电气化。交通和供暖是可以直接电气化的两个领域，而工业活动则可能需要采用一个更为间接的方式，例如通过PtX解决方案。

（一）能源岛

自1991年建立世界上第一个海上风电场Vindeby以来，丹麦一直致力于推进海上风电技术和生产。2010年（90万千瓦）至2022年（230万千瓦）期间，其海上风电装机容量已经翻了一番多。基于2020年的广泛议会协议，丹麦决意进一步提高其雄心目标，在北海和靠近波罗的海的博恩霍尔姆岛建立两个装机分别达到1000万千瓦和300万千瓦的能源岛项目。

考虑到所有相关议会协议和专项资金情况，丹麦的目标是到2030年将海上风电装机扩大到1290万千瓦，这比当前容量增加了五倍。

这些能源岛项目将被打造成为大规模海上风电汇集站，作为未来海上输电网络发展的节点，将丹麦和荷兰、德国等相邻国家的电力系统互联起来。



图 29 丹麦能源岛位置

资料来源：丹麦政府

上述能源岛项目代表了一种彻底的范式转变，脱离了当前将海上风电场与陆上耦合点相连接的放射状互联方式。在未来，互联海上风电场将起到双重作用，即在向本地市场供电的同时，向国际互联电网输送电力。这种混合型基础设施的一个早

期例子是Kriegers Flak联合电网解决方案，它将丹麦水域的Kriegers Flak风电场与德国水域的波罗的海1号和2号风电场相互连接起来。

此外，由于相关基础设施预计将被直接部署在能源岛或陆上停放区内，因此能源岛预计将在开发PtX解决方案方面发挥重要作用。预计将在风能和太阳能发电的基础上生产氢气，然后可能将所生产的氢气输送到丹麦参与的未来欧洲氢骨干网（EHB）基础设施中，或直接用于生产合成燃料。

（二）碳捕集、利用和封存和电力多元化转换

丹麦气候目标和承诺的实现在一定程度上依赖于技术的进步，尽管这些技术已被证实，但仍处于商业化前阶段。两个相关的例子是碳捕集、利用和封存和电力多元化转换技术。

针对碳捕集、利用和封存技术，丹麦政府已经制定了一系列协议，旨在支持该技术价值链在本国的发展，其中一个关注的重点是生物源（biogenic sources）。丹麦已在数个立法协议中采取相关步骤：

- 确定封存地点并建立相关监管框架，在丹麦境内对二氧化碳进行封存；
- 启动一项为期二十年的竞争性国家援助分配方案，以支持建立一个初步的碳捕集、利用与封存（CCUS）项目，预计到2026年实现减排约40万吨二氧化碳当量。到目前为止，已经有三个项目通过了预审，预计将在2023年1月1日前对获得国家援助的项目作出最终决定。

根据最新估计，预计到2030年，CCUS项目将达到140-650万吨二氧化碳当量的减排潜力。

关于电力多元化转换技术，已确立的目标是到2030年达到400-600万千瓦的电解槽容量。但相较于化石燃料和生物燃料，这种技术在市场上还缺乏竞争力。丹麦已经启动了一系列措施，以促进PtX价值链的发展：

- 针对PtX和氢气项目领域投资，实施竞争性国家援助分配方案。预计将在2023年进行一轮国家援助招标，以支持PtX应用的产业化和规模扩大。
- 实施旨在改善项目经济条件的监管改革，例如引入地域差异化价格机制，以激励电解槽最佳扩容决策和灵活运行。
- 提出发展基于PtX燃料的航空运输的相关建议。

（三）绿色供热

历史上，市镇一级规划发挥重要作用的一个高度相关的领域是区域供热的发展。根据沟槽长度（3万公里）在住宅部门的覆盖率（65%）和可再生能源在热力生产中

的占比（69%），丹麦在区域供热方面处于领先国家行列。丹麦区域供热部门所带来的若干好处中最为明显的即是能源效率和部门耦合，通过热电联产和更多地使用大型热泵的方式。

此外，区域供热——到2028年预计可达73%的住宅覆盖率潜力——是整个能源系统灵活性的一个重要来源，因而它也促进了可再生能源的整合。储热装置与热电联产一起，对灵活电力生产提供了支持。同样，储热装置与大型热泵一起也可以实现灵活的电力消费。

当然，区域供热并不是唯一可用的绿色供热形式。独立热泵提供了非常高的能源效率（以性能系数COP来衡量），它也是能源系统中另一个重要的灵活性来源。

由于丹麦政府决意在2035年前逐步淘汰天然气作为空间供暖燃料，该国正在大力促进从化石燃料锅炉向区域供热和独立热泵的转换（见图26）。主要措施包括2022年6月通过的一项税收改革方案，其中包括降低所有消费者支付的电力消费税，以及为扩大区域供热提供更多资金，并从2024年开始降低热泵电费。

（四）丹麦模式的借鉴

首先，得益于一系列针对外部环境的早期政策以及对风电开发和区域供热的积极支持，丹麦在过去40年中实现了显著的二氧化碳减排、经济稳定增长和能源效率提高。这一长期的转型实际上已经使电力和热力生产脱碳，为应对气候变化的前瞻性的、紧急的工作提供了坚实基础，并支持丹麦在短期（2025年）、中期（2030年）和长期（2050年）的宏大计划。为了支持实现这些目标并加以监测，丹麦《气候法案》制定了一个具有制衡系统的治理框架，以确保持续监测气候目标、承诺和计划。政府有义务履行其具有法律约束力的承诺，丹麦气候变化委员会作为一个独立机构发挥咨询和监测作用，丹麦议会则对气候政策拥有最终决定权。如今，地方和国家层面的规划和市场政策相结合，为丹麦的能源转型奠定了基础。这种政策组合有助于实现具有成本效益的绿色转型，且丹现有能源领域将沿用这一总体方法。另一个重要的政策要素，是丹麦政府提出的全面税制改革，该改革将从2030年开始实施。这项改革直接解决了二氧化碳排放问题，并涵盖了欧盟排放交易体系已涵盖的经济活动领域。此外，税制改革促进了区域供热、热泵等电气化和绿色供暖解决方案的应用。

其次，展望未来丹麦经济中最具挑战性的减排领域是公路运输和农业，这将需要依靠各种技术进行转型部署。就前者而言，丹麦政府的目标是，到2030年有100万辆电动和混合动力车上路；对于后者，根据议会协议，为其设定了到2030年减排55-65%的目标。为了实现国家气候目标和国际承诺，丹麦将重点放在电气化上——包括直接和间接电气化。运输业和供暖是直接电气化的两个主要领域，同时，使用电解

等工艺的多样化电力转换解决方案，将支持海运和空运等其他难以减排的部门的脱碳。为实现减缓气候变化的战略，丹麦将同时依赖现有的成熟技术解决方案，以及有待开发的技术解决方案。丹麦将继续推广作为旗舰技术的海上风电，并计划建设世界第一座和第二座能源岛。这两个能源岛将专注于生产海上风电，并将其作为即将形成的海上电网的起点，进一步将丹麦与邻国以及欧盟内的电力市场连接起来。除风电外，丹麦还使用目前相对不成熟的技术，如CCUS技术以及PtX技术。对于上述两类技术，对于具有具体、适用和可衡量的气候变化缓解成果的项目，丹麦政府将通过提供早期支持和国家援助来加速其学习进程。与许多其他国家一样，丹麦最近面临着严重的通胀挑战，而乌克兰危机加剧了这种挑战。丹麦在政策上的反应一直是加速绿色转型，同时实施消费者保护措施，以使得消费者能接触到有利于灵活性和能源效率的价格信号。丹麦政府的首要任务，是确保整体能源安全，具体来说就是确保电力和天然气部门的供应安全。为此，丹麦最近推迟了两座化石燃料发电厂的退役，以确保丹麦电力系统能够度过当前的能源危机。作为丹麦能源体系特点之一，丹麦政府致力于保障高水平的能源供应安全，同时确保供需双方的灵活性。

参考文献

- ¹ 李海等, “供需形势日益复杂 需统筹发展和安全”, 《中国能源》, 2022 年第 3 期。
- ² 中国电力联合会, “中国电力行业年度发展报告 2022”, 2022 年 7 月。
- ³ 蒋茂荣, “煤炭保障能力大幅增强”, 《中国能源》, 2022 年第 3 期。
- ⁴ 谷立静, “节能成绩来之不易 任务依然艰巨”, 《中国能源》, 2022 年第 3 期。
- ⁵ “长三角地区分布式可再生能源发展潜力及愿景”, 《中国宏观经济研究院能源研究所、世界资源研究所》, 2021 年 5 月。
- ⁶ “华东地区最大抽水蓄能电站筹备工程在建德开工”, 《澎湃新闻》, 2022 年 9 月 15 日, 访问链接 https://m.thepaper.cn/baijiahao_19918426。
- ⁷ “长三角首条配电网跨省线路贯通: 青浦嘉善十千伏互联工程建成”, 《澎湃新闻》, 2019 年 9 月 10 日, 访问链接 <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1644253045224122875&wfr=spider&for=pc>。
- ⁸ “能源“清洁化”, 长三角勇探“绿色之路”, 《新华日报》, 2020 年 12 月 31 日, 访问链接 https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/cjsjyth1/xwzx/202012/t20201231_1261108.html?code=&state=123。
- ⁹ 北京: “十三五”时期煤炭占比能源消费由 13.7%降为 1.9%, 《新华社》, 2021 年 1 月 18 日, 访问链接 http://www.gov.cn/xinwen/2021-01/18/content_5580893.htm。
- ¹⁰ “加强京津冀能源协同, 共同构建区域清洁低碳安全高效能源体系”, 《光明网》, 2022 年 9 月 2 日, 访问链接 https://share.gmw.cn/www/xueshu/2022-09/02/content_35998244.htm。
- ¹¹ “浅议双碳背景下的京津冀绿色电力市场化交易”, 《中国能源网》, 2021 年 5 月 20 日, 访问链接 <https://news.bjx.com.cn/html/20210520/1153656.shtml>。
- ¹² “张北柔性直流电网试验示范工程(简称“张北柔直工程”)正式投运”, 《中国环保协会》, 2021 年 4 月 16 日, 访问链接 http://www.zhb.org.cn/hbqy/hbqy_1/2021-04-16/11283.html。
- ¹³ “张北柔性直流电网试验示范工程创 12 项世界第一”, 《电网头条》, 2020 年 5 月 15 日, 访问链接 <https://www.cspplaza.com/article-17978-1.html>。
- ¹⁴ “发改委: 黄河流域风电、光伏装机量分别占全国的 46.7%、43.3%”, 《国际风力发电网》, 2022 年 9 月 20 日, 访问链接 <https://wind.in-en.com/html/wind-2421977.shtml>; “国家发改委: 黄河流域生态保护和高质量发展取得阶段性重要进展”, 《腾讯新闻》, 2022 年 9 月 20 日, 访问链接 <https://new.qq.com/rain/a/20220920A0313000>。
- ¹⁵ “国家能源局: 风光大基地应开尽开、能开尽开, 大力推动农村可再生能源发展”, 《中国能源网》, 2022 年 5 月 20 日, 访问链接 http://society.sohu.com/a/548961885_121123868。
- ¹⁶ 李东侠等, “浅谈光伏发电与采煤沉陷区治理的融合发展”, 《电气时代》, 2022 年第 5 期 36-37。
- ¹⁷ “中国电建中标国内最大光伏治沙项目”, 《中国能源新闻网》, 2022 年 5 月 23 日, 访问链接 https://www.cpn.com.cn/news/nyqy/202205/t20220523_1515227.html。
- ¹⁸ 青海日报, 2022 年 10 月 20 日, 第 10 版: 特刊。
- ¹⁹ “新华社: 清洁电力温暖三江源”, 《国务院国有资产监督管理委员会》, 2021 年 12 月 6 日, 访问链接 <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588139/c22084650/content.html>。
- ²⁰ “你相信光吗① | 雄霸全国第一, 山东光伏凭什么”, 《半岛网》, 2022 年 9 月 30 日, 访问链接 <http://news.bandao.cn/a/664835.html>。

中国能源转型展望

2023

COP27 特别报告