

当前，极端天气的发生频率和幅度在全球范围内激增，气候变化的不利影响日益显现，人类正面临着现实而紧迫的危机。世界气象组织（WMO）发布的《2023年全球气候状况》报告指出，2023年是有记录以来最热的一年，2023年全球平均气温比工业化前水平约高出了（ 1.45 ± 0.12 ） $^{\circ}\text{C}$ ，全球温室气体浓度、地表温度、海洋热量和酸化、海平面上升、南极海冰面积和冰川消融等多项气候变化指标创下新纪录。气候变化不仅导致全球部分地区热浪、洪涝、干旱、飓风等极端天气事件频发，造成海平面上升、冰川融化、物种减少，给全球生态系统带来了不可逆的损害，而且也导致粮食减产，威胁着基础设施的建设与运行，可能带来系统性金融风险，对全球和地区经济造成重大打击，还会致使居民流离失所。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告指出，近期的气候变化范围广、速度快、强度大，数千年未见，气候变化通过多种方式影响了地球上的每一个区域，是全球面临的共同挑战；报告还指出，人类活动造成了气候变化是毋庸置疑的事实，如果不采取有力度的减排行动，全球温升将于2021—2040年超过 1.5°C ，2041—2060年超过 2°C ，到21世纪末，全球平均温升很有可能达到 4°C 甚至更高。

随着气候变化挑战日趋严峻、紧迫，各国越来越认识到，生活在地球上的人类相互依存形成了命运共同体，必须尽快采取有力度的减缓和适应气候变化的行动。各国于2015年达成的政治共识——《巴黎协定》确立了将全球温升控制在 2°C 以内、争取实现 1.5°C 的全球温升控制幅度目标，还提出“尽快达到温室气体排放的全球峰值”“在本世纪下半叶实现温室气体源的人为排放与汇的清除之间的平衡”，即碳中和（净零排放）目标。截至2024年6月，《巴黎协定》的194个缔约方提交了到2030年的国家自主贡献（National Determined Contributions, NDC）^①；148个国家提出碳中和的目标^②。面向碳中和的经济社会全面转型已

① 《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）秘书处：https://unfccc.int/sites/default/files/resource/GST_SR_23c_30Mar.pdf. [2023-11-05].

② 碳追踪：<https://zerotracker.net/>. [2024-6-27].



成为全球发展的趋势和潮流，特别是能源转型和科技创新两方面成为各国的战略重点。

我国坚持积极应对气候变化国家战略，2020 年 9 月 22 日，习近平总书记在联合国第 75 次大会上发表重要讲话：“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。”我国将实现碳达峰、碳中和作为一场广泛而深刻的经济社会系统性变革，把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局，构建完成并持续落实双碳政策体系，努力推动全社会面向碳达峰、碳中和的转型。气候变化归根结底是一个发展问题，应对气候变化是要在可持续发展大系统中，统筹考虑经济、社会、环境、安全、能源、粮食、健康、科技和气候变化等方面的问题，实现协同增效。我国将以碳达峰、碳中和为抓手推动经济社会全面绿色低碳转型，加快形成绿色低碳的产业结构、生产方式、生活方式和空间格局。同时，我们需要根据《巴黎协定》的目标和原则，承担与不断上升的综合国力和国际影响力相一致的国际责任及义务，推动和引领全球气候治理进程，为构建绿色、低碳、可持续发展的人类共同未来作出贡献。

我国已提出全面建成社会主义现代化强国的“两步走”战略安排：从 2020 年到 2035 年基本实现社会主义现代化；从 2035 年到 21 世纪中叶把我国建成富强民主文明和谐美丽的社会主义现代化强国。要做好碳达峰、碳中和工作与经济社会发展、能源转型的衔接，当前还有一系列问题亟待深入研究和解决，特别是，如何结合我国的发展阶段和发展需求，做好各部门、分阶段有序实施碳达峰、碳中和的路径安排；如何在新时代社会主义现代化建设的宏伟蓝图中绘制好低碳发展的时间表、路线图和施工图。

为此，国内二十几家机构联合成立“碳中和背景下中国 2035 年和中长期低碳发展战略研究”项目平台，在已经明确“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”等碳排放目标的基础上，聚焦中国 2035 年和中长期低碳发展战略与转型路径，共设计了 21 个专项课题，分为三大部分，总体研究思路如图 1-1 所示：第一部分研判经济社会发展趋势，分析全球气候治理与各国应对气候变化的趋势，包括生态文明建设目标愿景与路径、全球气候治理趋势、低碳消费模式及低碳社会建设、循环经济贡献与对策、空气质量改善对气候目标的协同等方面，并开展碳中和路径与政策的国际比较；第二部分研究关键部门和主要行业面向 2035 年和 2060 年的排放路径与减排措施，包括工业、电力、建筑、交通、农林、能源等部门和民航、水运、铁路、道路等细分行业，以及控制非二氧化碳温室气体（简称“非二”气体，下同）排放等课题；第三部分是综合分析，基于以上两部分的研究结论，面向 2035 年和 2060 年，展望我国应对气候变化的趋势和情景，提出结构化的目标、路径、行动方案、判断和建议，提出我国参与国际气候治理、构建人类命运共同体的对策。研究采用“自下而上”和“自上而下”相结合的方法，既有“自下而上”对各部门和行业的能源消费及 CO₂ 排放的情景分析和技术分析，又有“自上而下”的宏观模型计算和政策评估，并以多个模型相互配合、软连接的方式实现了各部门分析与宏观政策模型间的协调衔接。

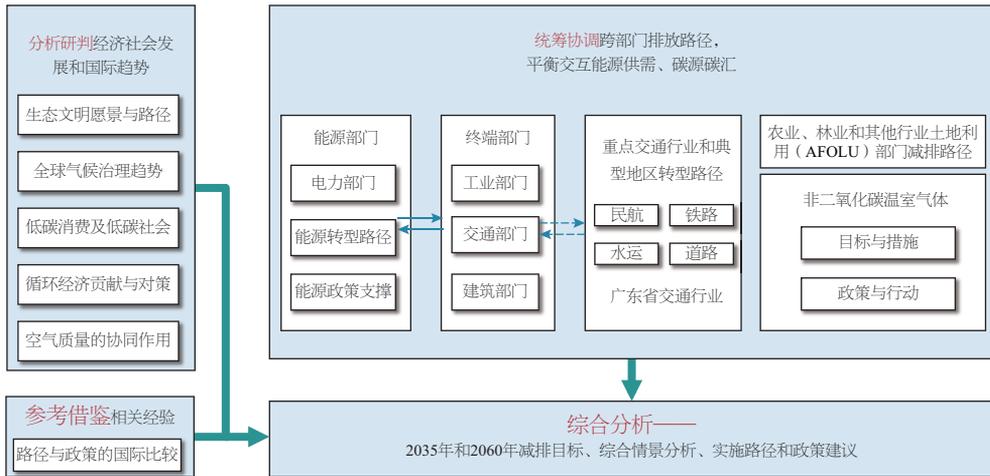


图 1-1 本项目的研究框架和思路

本报告是“碳中和背景下中国 2035 年和中长期低碳发展战略研究”项目平台的综合课题成果，以各专项课题的认识判断、定量分析、结论启示为基础，开展系统综合研判，给出整体和分部门、分时段、分技术的发展路径和政策建议，旨在为碳达峰、碳中和的愿景制定提供全面、详细的战略参考，服务于 2030 年前碳达峰目标、2035 年美丽中国愿景目标以及 2060 年前实现碳中和的目标。

全书共分为 11 章。

第 1 章是引言，介绍本报告的研究背景、目的、总体思路和章节安排。

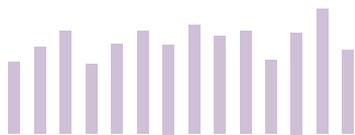
第 2 章是国际形势研判，介绍主要经济体的低碳转型政策及全球气候治理的总体形势，分析我国开展国际气候合作面临的新形势，提出我国参与全球气候治理的原则。

第 3 章是中国长期低碳发展情景分析与路径选择，在中国长期经济社会、能源和碳排放趋势展望的基础上，开展长期低碳减排的情景分析，提出以碳中和目标为导向的我国中长期和长期低碳发展目标与路径。

第 4~9 章是部门、行业研究。其中，第 4~7 章分别介绍工业、交通、建筑部门和电力系统的发展现状和主要特点，测算以上部门行业面向碳中和目标的能耗与碳排放情况，基于对关键低碳技术和发展趋势判断，提出低碳发展路径及相关政策建议；第 8 章针对农业和林业部门，介绍温室气体排放和碳吸收的现状与特点，从农林部门温室气体排放和森林碳汇两方面开展情景分析，提出减排增汇目标与措施建议；第 9 章主要介绍非二氧化碳温室气体排放的现状与趋势，提出碳中和下的发展路径和政策建议。

第 10 章估算了我国实现碳中和的能源转型投资需求。

第 11 章是全书的结论与政策建议，在前面研究的基础上，提出我国以碳中和目标为导向，到 2030 年、2035 年和 2060 年的长期低碳发展总体目标及转型路径、重点部门和行业的低碳发展目标 and 转型路径，以及政策建议。



全球气候治理形势和主要经济体的 低碳转型政策

全球应对气候变化是依托于《联合国气候变化框架公约》(以下简称《公约》)和《巴黎协定》的集体行动安排。一方面,全球气候治理事关国际社会的共同利益和地球的未来,是为了解决全球应对气候变化问题所作的制度安排及相应的运行机制。另一方面,实现碳中和是各国共同应对气候变化挑战的关键举措。全球正在步入一个将应对气候变化视为经济增长机遇的新时代,主要经济体均已出台长期气候战略,确定了中长期减排目标和途径,并制定了相应的气候政策体系予以落实。本章在分析当前全球气候治理形势的基础上,梳理主要经济体的碳中和路径、政策和对我国的借鉴意义,探讨我国与其他主要国家在气候领域的合作和博弈,提出对我国参与全球气候治理的建议。

2.1 全球和主要经济体应对气候变化进展

2.1.1 全球总体进展

截至 2023 年 9 月,《巴黎协定》194 个缔约方提交了到 2030 年的国家自主贡献(National Determined Contributions, NDC)。截至 2024 年 6 月底,全球已有 148 个国家、159 个地区、268 个城市及 1084 家企业提出了碳中和目标,覆盖了全球 88% 的排放、92% 的 GDP(以购买力平价计)及 89% 的人口。

从已提出碳中和目标的国家来看,尽管已经有超过 140 个国家承诺实现碳中和,但只有 78 个国家在其政策或法律中设定了目标年份。德国等 29 个国家和地区已就碳中和目标完成立法,还有 15 个国家和地区正处于立法进程中。多个欧洲国家承诺的碳中和年份早于 2050 年,例如,芬兰计划到 2035 年实现碳中和,于 2019 年颁布了“中期气候变化政策计划”及“国



家气候和能源战略”。冰岛和奥地利承诺到 2040 年实现碳中和，德国和瑞典承诺到 2045 年实现碳中和。其他大多数做出碳中和承诺的国家都将 2050 年设定为目标年，中国、沙特阿拉伯、斯里兰卡、乌克兰、尼日利亚、巴西、巴林和俄罗斯的碳中和目标年是 2060 年；印度提出到 2070 年实现碳中和。在第 26 届联合国气候变化大会（COP26）上，不丹和苏里南发起了“负碳俱乐部”，目前贝宁、加蓬、几内亚比绍、圭亚那、柬埔寨、利比里亚和马达加斯加也都加入了该倡议，这一群体都是经济相对不发达的小国，其温室气体排放量小，并且有较高的森林覆盖率。

联合国环境规划署对 2020—2022 年提交的共 166 份自主减排贡献进行了评估，结果表明，现有的减排承诺和措施距离将全球变暖控制在远低于 2℃（力争 1.5℃）的目标还很遥远。现有的自主贡献减排目标只能实现到 2030 年将全球温室气体减排 5%~10%，而 2℃ 目标情景需减排 30%，1.5℃ 目标情景需减排 45%。按照现有 NDC 到 2030 年的减排力度，21 世纪末温升将达到 2.4~2.6℃。如果叠加各国提出的净零排放目标，并且保证 2030 年减排目标和排放路径的一致性，21 世纪末有望将温升控制在 1.8℃。然而，基于各国当前的排放水平、近期 NDC 目标和长期净零排放目标之间的差异，这一情景的可信度是非常低的。按照各国当前的政策措施力度推算，21 世纪末的温升将达到 2.8℃^[2]。

2.1.2 欧盟：保持能源转型和气候科技方面的领先优势

欧盟一直是全球温室气体减排的积极领跑者，其二氧化碳排放量在 1979 年达到峰值（46.6 亿吨），此后一直处于缓慢下降趋势。欧盟践行低碳发展 40 余年，在气候目标制定与顶层框架设计方面始终走在全球前列。2019 年欧盟发布《欧洲绿色新政》，率先确立了 2050 年温室气体中和的目标，并在之后明确了 2030 年目标，包括减少 55% 的温室气体排放量和 9% 的能源消费，终端能源消费中的可再生能源占比达到 40%，电力供应中的可再生能源占比高于 60%（基年为 1990 年）等。2021 年 6 月，《欧洲气候法》（European Climate Law）正式确立了《欧洲绿色新政》中减排目标的法律约束力。2021 年 7 月，欧盟委员会正式提出针对实现 2030 年减排目标的“减碳 55”（Fit for 55）一揽子气候立法提案。

关于到 2050 年的能源转型路径，欧盟的研究中只明确了 2030 年前的路径，2030 年后的路径讨论了高技术水平（1.5TECH）和消费模式转型（1.5LIFE）两种情景（图 2-1）。从能源消费总量上来看，2030 年将比 2015 年下降 12%，而 2050 年的两种情景下将比 2015 年分别降低 19% 和 30%，发展循环经济和更为集约的商业和消费模式能够显著降低能源消费需求（1.5LIFE 情景）。从能源结构来看，可再生能源、核能和电制燃料等非化石能源将成为主要的能源品类，2050 年化石能源占比将降到 7% 左右（2015 年为 67%），可再生能源占比将达到 61% 以上（2015 年为 13%），核能占比约为 17%（2015 年为 14%），电制燃料和甲烷合计占比约为 6%，化石燃料的非能源使用占比为 8%~9%。

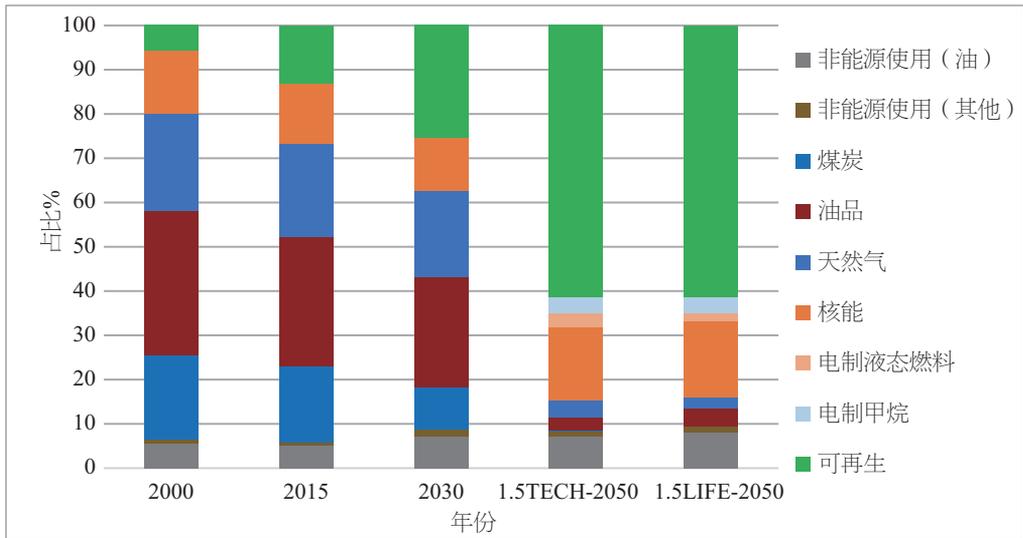


图 2-1 欧盟能源未来消费结构预测 [3]

注：(1) 各国对于能源的划分和统计口径有很大差异，图中能源消费的准确名称是总内陆消费（gross inland consumption），除包括常见的一次能源消费外，还包括化石燃料的非能源使用、由清洁电力制取的电制液态燃料和电制甲烷。

(2) 非能源使用（其他）包含煤炭、天然气和生物质。

(3) 情景说明：

① 1.5-TECH，增加所有技术的减排贡献情景，大量使用生物质能碳捕集利用技术（BECCS）；

② 1.5-LIFE，较少依赖技术，假设欧盟的商业和消费模式向更循环的经济发展，减少碳密集饮食、增加共享交通设施等。

欧盟的能源转型路径具有高度依赖能效措施、电气化和较高的生物质能利用的特点。具体来看，欧盟的主要措施包括：①最大限度地提高能效，包括零排放建筑；②最大限度部署可再生能源发展和电气化，能源领域完全脱碳；③构建清洁、安全和互联的出行系统；④建立有竞争力的产业和循环经济，作为温室气体减排的关键推动因素；⑤发展智能网络基础设施和互连；⑥发展生物经济和碳汇；⑦通过碳捕集和封存（CCS）解决剩余的二氧化碳排放问题（低优先级）。

从气候政策体系来看，欧盟在“绿色新政”下又推出了一系列战略，除了对其长期减排目标进行部门分解外，还注重生物多样性、可持续发展和气候变化的协同，以及设立“公正转型基金”来降低气候变化带来的社会转型风险（图 2-2）。此外，欧盟力求通过气候变化立法来保障减排目标的法律约束力。为保证 2030 年减排目标的实现，欧盟推出了“减碳 55”一揽子气候立法提案，该提案中包括 12 项更为积极的系列举措，包括对欧盟碳排放权交易体系、减排分担条例等八项现有法规的修订，以及碳边境调节机制、可持续航空燃料计划、社会气候基金等四项新法规。欧盟委员会表示，这其中包括碳定价、目标、标准和支持措施之间的“谨慎平衡”。该一揽子立法提案是欧盟委员会迄今在气候和能源问题上提出的最为全面的立法提案，将为实现欧盟经济的韧性和可持续性奠定基础，也将为欧盟以公平、经济、高



效和具有竞争力的方式实现碳减排和经济转型目标提供法律保障。为此，欧盟议会和理事会根据该一揽子提案启动了一系列的立法和法规修订工作。

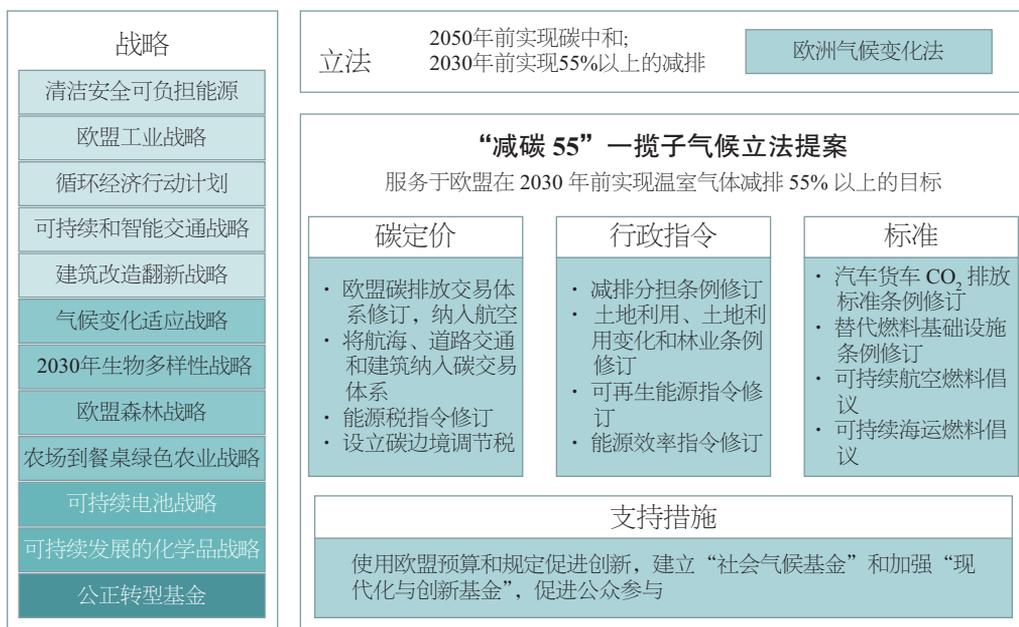


图 2-2 “欧洲绿色新政”政策体系构成

2.1.3 英国：把握绿色工业革命机会，加速实现净零排放

英国早在 1972 年就已经实现本土碳达峰。以 1990 年为参照，2019 年英国的碳排放量已经降低了 44%，与此同时 GDP 增长了 78%，成功地探索出了一条经济增长和温室气体减排双赢的路径。2019 年，英国提出《2050 年目标修正案》，修订了 2008 年的《气候变化法》，正式确立到 2050 年实现温室气体中和的目标。此外，英国还提出了 2030 年和 2035 年的具体目标，2030 年目标为减少 68% 的温室气体排放量（基年为 1990 年），禁售燃气锅炉、汽车和燃油车。2035 年目标为减少 78% 的温室气体排放量，实现电力系统脱碳和所有汽车零排放。目前，英国已经制定了 2030 年的一揽子政策，且这些政策正在陆续发布过程中。

英国国内温室气体减排计划按照《气候变化法》下的碳预算安排进行实施（每五年一期），目前仅明确了到 2037 年的能源系统转型路径和减排目标，为长期路径保留了不确定性。面向 2050 年减排战略，英国考虑了高电气化、高氢能、高技术创新三种情景（图 2-3）。从能源结构来看，2019 年，英国的一次能源消费仍然以化石能源为主，占比 82%（其中煤炭占 2%，石油占 39%，天然气占 41%），可再生能源占比为 15%（其中生物质能占 11%，其他可再生能源占 4%），核能占 3%。到 2050 年，三种情景下的能源消费总量均将大幅降低，其中高氢能情景中降幅最小（约 15%），高电气化情景中降幅最大（约 27%）。总的来看，到 2050 年，煤

炭占比将降到 0.3%~0.5%，石油占比将降到 6%~8%。在高氢能和高技术创新的情景下，天然气制氢技术均将得到大规模应用，所以天然气在两种情景下仍保留了较高的占比，分别为 34% 和 28%。三种情景下，2050 年可再生能源占比均将大幅增长，达到 50%~66%；核能占比也将达到 6%~19%。

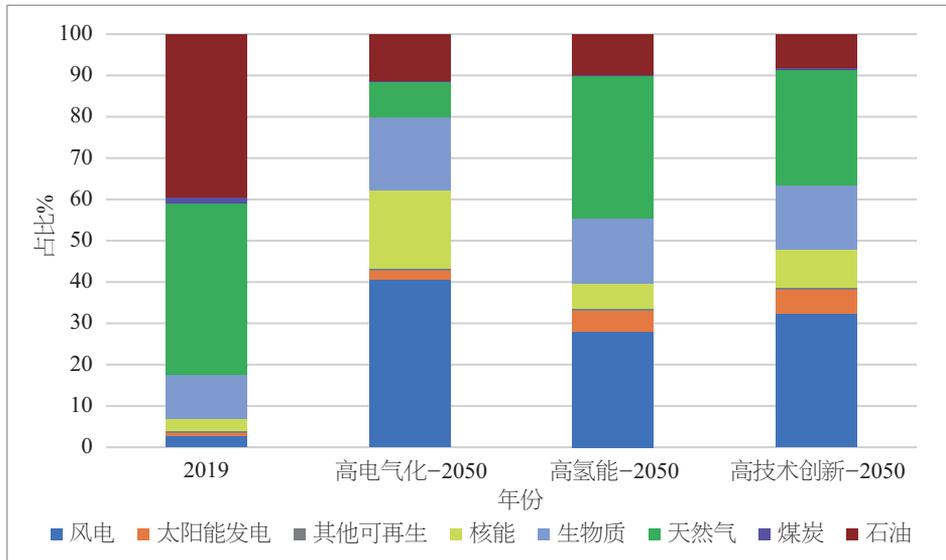


图 2-3 英国 2019 年与 2050 年三种情景的一次能源消费结构比较^[4]

情景说明：① 高电气化情景——在终端部门更多地推进电气化，电解制氢、建筑部门供暖电气化。

② 高氢能情景——更多地使用蓝氢（天然气制氢+CCS），终端部门更多采用氢能，建筑部门采用氢能供暖。

③ 高技术创新情景——更多地使用直接碳捕获，更多地减少航空排放。

总的来看，英国实现碳中和的主要脱碳途径包括：①依靠可再生能源和 CCS 技术实现电力系统脱碳；②通过能效提升，降低终端部门（工业、交通、建筑）能源消费需求；③实现终端部门脱碳，一方面通过电气化替代化石燃料，另一方面在航空、海运和工业过程等难减排部门推广氢能和低碳燃料替代；④减少非二氧化碳温室气体排放；⑤推行大规模土壤碳汇和工程脱碳策略。

英国为实现净零目标做出了系统部署（表 2-1）。可以看出目前的政策体系设计包括全经济系统脱碳方案，2030 年减排目标在各部门间的分解，还包括林业、自然、基础设施投资和资金支持方案。《净零排放战略》描绘了全经济（含 9 个部门）脱碳方案，提出了将每年政府研发资金投入提高到 220 亿英镑、力争在 2027 年使总研发投入增加到 2.4%GDP 的目标。《绿色工业革命十点计划》提出基于优势领域建立未来十大绿色产业，包括清洁能源、交通、自然、创新技术和金融等。从政策类型层面来看，这些政策大多是基于部门的计划、战略和白皮书，不具备强制约束力，还没有落实到具体的政策工具，这些政策的实施效果有待进一步观察。



表 2-1 英国碳中和政策体系（包括已出台和即将出台的措施）

领域	政策名称	目标	投资 / 亿英镑	创造就业 / 万人
绿色产业	绿色工业革命十点计划	打造绿色产业优势，聚焦十个重点发展领域	政府：120 私营：400	25
能源	能源白皮书：赋能净零排放未来	在 2032 年前减少能源、工业和建筑领域 2.3 亿吨 CO ₂	NA	22
基础设施	国家基础设施战略	基础设施网络脱碳		
经济转型	净零排放战略	全经济（9 个部门）脱碳系统方案	900（2030 年）	44
工业	工业脱碳战略（2021 年 3 月）	描绘低碳工业部门蓝图		
交通	交通脱碳计划	交通系统脱碳		
建筑	供热和建筑战略	低碳供暖转型和建筑脱碳		
氢能	氢能战略	氢能在工业、热力、重型运输和电力领域提供价值		
资金	财务部净零碳排放审查	为转型提供资金、降低成本		
林业	英格兰林业战略	支持植树和泥炭地恢复		
自然	自然战略	保护和增强生物多样性		

2.1.4 日本：依托零碳转型，积极培育优势产业和拓展国际市场

日本是全球第六大温室气体排放国，在 2008 年实现了碳排放量达峰，之后一直保持着稳定的下降趋势。日本将碳中和视为新的经济增长机会，希望借机引领全球脱碳进程。日本于 2020 年 10 月公布碳中和战略《绿色增长战略》，它本质上是一个产业政策，在明确其减排目标的同时，重点识别了未来 14 个增长的产业和领域，并部署相应的政策支持体系。此外，日本于 2021 年 5 月修订了《全球气候变暖对策推进法》。日本到 2050 年的目标为实现温室气体中和，2030 年的目标为减少 46%~50% 的温室气体排放量（基年为 2013 年），2035 年实现电力系统脱碳。日本仅明确了它在 2030 年前的能源转型路径，保留了远期脱碳路径的技术不确定性，目前明确的 2030 年后的技术选择包括氢能、氨、碳捕集、利用与封存（CCUS）和碳回收等。

当前日本与能源相关的碳排放量占其总碳排放量的 80% 以上。日本在 2021 年颁布的“第六期能源基本计划”提出了 2030 年的目标：通过提高能效将终端能源消费目标维持在 2019 年的水平，提高独立开发石油和天然气的能力；可再生能源发电占比从 2019 年的 18% 提高到 36%~38%，核电占比从 2019 年的 6% 提高到 20%~22%，化石能源发电量从 2019 年的 76% 降到 41%。到 2050 年，可再生能源发电占比提高到 50%~60%，核电和火力发电量（含 CO₂ 回收利用）合计占比 30%~40%，生物质能和氢 / 氨发电占比 10% 左右，此外需要为 2050 年