DOI 10.15302/J-SSCAE-2021.06.011

碳中和政策机制及社会共识的国际经验与启示

杨雷，毕云青，郑平，金之钧

（北京大学能源研究院，北京 100871）

摘要：现阶段，大部分发达国家碳排放已达峰且进入排放快速下降时期，纷纷出台更加积极有效的措施，力争在实现碳中和的同时占据新兴产业发展的优势地位。本文旨在梳理发达国家实现碳达峰、推进碳中和过程中的政策机制及促进社会共识方面的相关措施，为我国提供发展借鉴。梳理不同发达国家的经验并比较分析了其可取之处，总结了发达国家碳中和政策机制方面给我们带来的启发，据此形成我国碳中和路径的发展建议。国际经验表明，碳中和是一项系统工程，需要多措并举、有序推进，在减少转型成本的同时加快培育新兴产业；碳中和愿景的实现需要完善的市场化机制并加快能源市场化改革；碳中和不仅是能源和经济的转型，也将对个人的生活方式带来改变，因而普遍的社会共识是成功实现碳中和的重要保障。研究建议，做好顶层设计和分阶段的碳减排行动计划，加快和深化能源市场化改革，加强社会动员以凝聚公众的全面共识，不断深化国际合作。

关键词：碳中和；国际经验；系统工程；能效；市场化改革；社会共识

中图分类号：X24　　**文献标识码：**A

The International Practices of Policy Mechanism and Social Consensus for Reaching Carbon Neutrality and Their Key Implications to China

Yang Lei, Bi Yunqing, Zheng Ping, Jin Zhijun

(Institute of Energy, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Most developed countries have reached their carbon emissions peak and entered a period of rapid decline in emissions. These countries have introduced active measures in efforts to achieve carbon neutrality while occupying a dominant position in emerging industries. This article aims to sort out the policies and mechanisms in the process of achieving carbon peaks, promoting carbon neutrality, and promoting social consensus in developed countries, so as to provide reference for China's carbon peaks and carbon neutrality. By reviewing the experiences of different developed countries, this study compares and analyzes their lessons, summarizes the inspirations that developed countries have brought to us in terms of carbon neutral policy mechanisms, and provides suggestions for China's path to carbon neutrality. International experience shows that carbon neutrality is a systematic project that requires multiple measures and orderly progress. While reducing transformation costs, it is necessary to accelerate the cultivation of emerging industries; the realization of the carbon neutrality vision requires a sound market mechanism to accelerate the energy market reform; carbon neutrality is not only a transformation of energy and economy, it will also bring changes to individuals' lifestyles. Therefore, the

收稿日期：2021-10-13；**修回日期：**2021-11-10

通讯作者：杨雷，北京大学能源研究院研究员，研究方向为能源战略与政策；E-mail: yanglei.energy@pku.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“国际清洁、低碳发展经验研究”(2021-HZ-10)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

general social consensus is an important guarantee for the successful realization of carbon neutrality. The research suggests that in order to achieve China's carbon neutrality goals, we must do a good job of top-level design and a step-by-step action plan of carbon emission reduction; accelerate and deepen energy market reforms; raise social awareness and promote people's overall consensus on carbon neutrality; and continue to deepen international cooperation.
Keywords: carbon neutrality; international experience; systems engineering; energy efficiency; market reform; social consensus

一、前言

基于全球气候变化的紧迫形势，自 2020 年以来，世界多个国家和地区纷纷提高自主贡献的力度，加快碳减排进程 [1]。根据国际能源署（IEA）统计，截至 2021 年 5 月，全球 70% 以上二氧化碳排放的国家和地区都以不同形式作出了到 21 世纪中期实现碳中和的承诺 [2]。2020 年 9 月，我国在联合国气候大会上郑重宣布，2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和，随后不断细化具体目标和指标，得到了国际社会的普遍认可和高度评价。

我国是发展中大国，相对高能耗的经济结构、高煤炭占比的能源结构以及相对较短的碳达峰到碳中和的过渡期带来了更大的挑战，而“双碳”目标的实现也要求我们付出更多的努力。在这一背景下，认真梳理发达国家的碳中和战略及相关政策，学习其先进经验以避免不必要的试错成本，对我国稳妥实现碳达峰目标、碳中和愿景具有重要的现实意义。

已有学者从不同行业角度如天然气、新能源等领域入手 [3,4]，分析了不同行业领域关于碳达峰、碳中和的国内外政策。本文在总结相关政策的基础上，提出碳中和是一项系统工程，重点从推进市场机制及社会共识方面总结国外经验，深入分析发达国家的政策措施，结合我国能源转型现状及面临挑战，形成相关启示并提出我国实现碳中和路径的发展建议。

二、碳中和是一项系统工程

碳中和的实现是一项复杂的系统工程，不仅与能源的低碳转型相关，还涉及产业、经济结构的变化甚至经济、社会等诸多方面。如何从系统的角度着手，多措并举、有序推进，既避免过高的转型成本，又促进本国及本地区的优势产业发展，是各国政府都非常重视的战略问题。

（一）能效是第一能源

根据 IEA 的相关研究，在以巴黎协议为目标的可持续发展情景中，为实现“巴黎协定”不超过温控 2℃目标，可再生能源（包括风、光、水电、生物质等）的贡献率是 32%，而能效的贡献率最高，为 37% [5]。这里的能效不仅包括了狭义上的能源节约，也包括了整个系统和经济结构的能效提高。国际可再生能源署（IRENA）也有类似研究，归类标准有所不同；按照相关模型模拟，为实现“巴黎协定”不超过温控 2℃目标，可再生能源与能效的贡献率各占 25%，单列出来的电气化贡献率为 20% [6]。电气化的最大优势是能够大幅度提高能效，这也从侧面反映了能效的重要性。能效是第一能源的理念在 IEA、IRENA 的分析预测中都得到了很好的体现。除能效和可再生能源之外，氢能、碳捕获利用与封存（CCUS）以及其他碳汇技术等也将发挥重要作用。

（二）碳中和的实现可以有多种模式

关于能源转型的目标模型，来自欧洲、美国机构的研究并未设定某种特定的路径，而是强调了多种选项的可能性。比较典型的是由美国多个政府相关机构参与的“零碳美国”（Net Zero America）研究 [7]，给出了 5 种比较典型的碳中和模式，在设定达到净零排放目标的前提下，化石能源的占比从 0 到超过 30% 不等。这 5 种典型模式分别是高电气化 + 全部可再生、高电气化 + 可再生受限、低电气化 + 高生物质、高电气化（高电动汽车）、低电气化。上述研究为探索如何优化净零排放路径提供了参考依据，其中最重要的参数之一是降低能源转型的成本。

（三）有序转型

当前，实现碳中和的相关技术约有 40% 以上仍处于实验室或小规模试验阶段 [8]，如 CCUS 技

术、氢能开发利用等，尚未实现大规模的商业化应用。与此同时，风电、光伏等技术已进入大规模商业化开发阶段，因此电力部门在减碳早期阶段会相对容易。

为描述不同领域减碳的额外成本情况，有关研究提出了“绿色溢价”概念 [9]，即实现碳减排所要付出的额外成本。例如，热泵技术相对于传统取暖方式更加便宜，即为负溢价，属于绿色溢价降低的领域；而采用零碳技术的水泥或钢铁行业，需要额外支付几倍于当前的成本，属于绿色溢价较高的领域。因此，绿色溢价较低的领域可优先开展转型。

Agora 等机构开展了德国碳中和路线图研究，凸显了能源、工业等各部门有序转型以实现碳中和的理念 [10]。根据该路线图，德国 2030 年前的重点减碳领域是以电力为主的能源行业，减碳量为 2.07×10^8 t，占该阶段全部减碳量的 50%，与此同时工业领域的减碳量仅占 17%；2030 年后，随着氢能等先进低碳技术在工业领域的大规模应用，工业领域将超越电力、能源行业成为最重要的减碳领域，在 2030—2050 年实现零碳目标，减碳量达 1.11×10^8 t，与此同时电力、能源领域的减碳量变为 0.95×10^8 t。

在划分不同领域、不同地区减碳先后次序时，需要重点考量如何以较低的成本实现低碳转型并提高技术成熟度。值得重视的是，发达国家普遍强调能源转型及碳中和带来的新兴商业机会。对于新能源、储能、新材料、电动汽车、先进制造业等未来产业竞争的重点领域，及早谋划并优化产业布局，形成以较低的成本投入早日实现可持续发展的商业模式，在实现碳中和、提升未来产业格局方面都将发挥重大影响。

三、碳中和需要完善的市场化机制

（一）新型能源系统需要市场价格引导

电力系统脱碳是能源系统脱碳的核心环节。含高比例可再生能源的新型电力系统是实现碳中和的核心，这一论断已成为国内外的基本共识。德国的可再生能源发电量占比较高，2021 年以风、光为主的可再生能源发电量约占德国全部发电量的 70% [11]。然而，以风、光为主的可再生能源电力系统波动性较大，调度难度也较高，对电力系统的稳定性构成挑战。

当风、光等波动性可再生能源发电量在系统中占比不超过 5% 时，依靠适当安排调度就可以实现并网，这与我们对电网早期的认识基本一致 [12,13]。随着波动性可再生能源发电量占比的提高，仅靠电网自身无法完全满足相应的并网要求，需要更多的备用容量（如建设抽水蓄能、天然气调峰电站等）才能提高系统的灵活性，以保障没有风、光时电力系统有足够的出力。然而电力系统备用容量的增多带来了高额的新增投资，再加上利用率不足，导致整个能源系统成本越来越高 [14]。这也说明仅依靠不断增加备用容量的方式来提高能源系统灵活性，将不能持续有效地为高比例可再生能源并网提供支撑。

尽管不同地区、不同电网存在差异性，但波动性发电量占比一旦超过 10% 就会对整个电力系统优化提出新的要求。2021 年，国家发展和改革委员会、国家能源局提出了促进源网荷储一体化发展的指导意见 [15]，阐述了对新型电力系统的要求，即负荷和储能作为系统灵活性的重要来源，需求侧响应、分布式能源、储能、电动汽车是电力系统中活跃的组成部分。在源网荷储一体化的电力系统中，需求侧、供应侧的界限不再清晰，需求侧响应、分布式能源等基于市场实时供求关系的价格信号将在供需平衡方面发挥决定性作用。

在欧洲、美国，能源市场化体系更多是能源市场发展的结果，先后完成了电力、天然气的市场化改革。这一体系在高比例可再生能源系统中发挥了越来越重要的作用，驱动了新型商业模式的兴起。为了精确体现实时供需状况，大部分现货电价区间已经缩短到 5 min 出清一个价格。市场化的能源价格机制对于减少弃风弃光，提高系统灵活性，推动储能、辅助服务市场建设，建立新型商业模式发挥了基础性作用 [16]。

能源市场化建设需要有确保电力和能源安全的政策设计，在这方面容量市场机制发挥了重要作用。确保能源系统有充足的容量是能源安全的重要保障，应在能源现货市场建设的同时，通过容量市场机制提高能源系统中的容量充裕度。

（二）新型商业模式需要更加开放的市场体系

实现碳中和离不开持续的技术和商业模式创新，涉及众多领域和产业，因此需要不断引入创新

资源，扩大市场准入。

与传统的集中式、金字塔型的能源供应模式不同，以可再生能源和新能源为主体的能源系统将更加分散，分布式能源将发挥越来越重要的作用，能源生产供应主体也将呈指数增长。以屋顶分布式光伏项目为例，到 2050 年，全球将有 1.67×10^8 户家庭和 2.3×10^7 家企业在房屋、厂房等建筑物的屋顶采用光伏设备发电，总装机容量将达 2.2×10^9 kW，比 2020 年的 2.7×10^8 kW 增长一个数量级 [17]。借助大数据、区块链等技术，还将催生新的分布式能源开发运营模式。例如，美国纽约市布鲁克林区的智能微网引入区块链技术，采用共识机制和电子合约，可以直接开展用户对用户的新能源电力贸易，提高了小规模能源生产者的信用水平；欧洲也有不少类似的创新模式，甚至还创造了基于区块链的能源代币 [18]。2021 年，国家能源局通知在全国组织开展整县（市、区）推进屋顶分布式光伏开发试点工作，公布了 676 个试点地区名单 [19]。

分布式光伏的成本及收益率是决定其未来发展的关键因素，受到地理和光照条件的影响，也与技术成本、商业模式、融资成本有重要关系。为此，应积极引入多元化的市场开发主体，创新商业模式，推动技术进步，同时降低融资门槛，减少并网约束；进一步激发市场积极性和创新力，扩大分布式可再生能源规模并提高其系统灵活性，与集中式能源形成互补。分布式能源商业模式创新的前提是开放能源市场，能够进行“隔墙售电”。

提高能效是实现碳中和的重要方面，进一步提高能效需打破能源的行业壁垒，如电、气、热等能源品类长期以来的条块分割问题。2020 年，欧盟发布了能源一体化战略，要求整合不同品种的能源，实现综合利用并尽可能提高能效 [20]。打破能源的条块分割、实现能源综合利用的重要前提是完善能源市场建设，提供更加开放的市场环境。

无论是发展可再生能源，还是提高能效，都需要中小企业的积极参与、创新作用的充分发挥。欧盟注重中小企业的发展，在应对气候变化的主要政策框架“欧盟绿色新政”中，专门制定了针对中小企业的发展战略；通过“欧盟绿色新政投资计划”给予中小企业资金支持，帮助中小企业拓展融资渠道以推进绿色创新行动，降低市场壁垒 [21]。

（三）碳交易市场是有力的工具

在碳减排领域，建设碳排放交易市场是有力工具。欧盟是全球最早建设规模化碳排放交易体系的地区，欧盟碳排放交易体系（ETS）在所有欧盟国家以及冰岛、列支敦士登、挪威运行，覆盖面占欧盟温室气体排放量的 40% 左右；2005 年以来，ETS 所涵盖的主要行业的碳排放量下降了 42.8% [22]。近年来欧洲碳价不断高涨，进一步推动了碳减排的力度。

ETS 采取的是“总量控制与交易”原则，对系统覆盖的温室气体排放总量设置上限；在上限内，公司获得或购买排放配额并根据需要相互交易；碳排放上限逐年下降，以此控制总排放量。配额交易带来了灵活性，确保减碳方面社会成本的最低化。建立在高质量的数据基础之上，具有完整、一致、准确、透明的监测、报告及核查系统，这是碳排放市场的根本保障。碳价格的上涨也促进了对清洁低碳技术的投资。

2021 年 7 月，欧盟委员会为实现“到 2030 年至少削减 55% 温室气体排放”的目标，提议对 ETS 体系进行修改，如逐步取消发放给航空领域的“免费”排放配额并在 2027 年之前实现配额的全面拍卖，将航运纳入 ETS 系统，在道路运输和建筑部门新建独立的交易系统，采用排放交易的“上游方法”并要求燃料供应商而不是住户或汽车拥有者来负责购买配额 [23]。这些新的政策提议意在通过碳交易市场促进重点排放部门的进一步减排，支持实现日益强化的气候控制目标。

四、社会共识对实现碳中和至关重要

国际经验表明，广泛的社会共识对推动相关政策的出台与实施至关重要。公众对碳中和的共识是实现碳中和的社会基础，碳中和进程带来的新工作岗位与生活方式又能进一步推进公众的思想转变，强化对能源转型的共识。

（一）公众共识是实现碳中和的社会基础

发达国家在设立碳中和目标的同时，已经积极开展相关工作来推进社会共识、促进公众思想与行为方式的转变。

英国政府为了鼓励公众选择更加绿色低碳的生

活方式，推出了一系列“气候变化与行为转变”措施，如减少乱扔垃圾、鼓励骑行、减少汽车和飞机出行等 [24]，旨在从社区、街道层面鼓励公众加强加深对能源转型与气候变化的认识。调查显示，80% 的英国公众对气候变化感到担忧，其中 33% 的人感到非常担忧 [25]；多数人支持气候变化的策略与行动。在采取一系列措施和取得公众共识后，2021 年 4 月英国政府宣布了气候立法，即相比于 1990 年的温室气体排放量，到 2035 年要减少 78%。碳中和既是技术的挑战，更是社会的挑战，因而社会与行为的改变是达成净零排放目标的重要组成部分 [26]。公众既应参与碳中和的政策制定，为其建言献策，也要积极行动，力求从我做起，转变消费与行为模式，将低碳、绿色落实到生活的方方面面。相关政策的制定与从个人做起的减碳共识是相辅相成、相得益彰的。

法国为实现 2030 年较 1990 年温室气体排放量下降 40% 的目标，从全国居民中推选出 150 人组成“公民气候委员会”，专门为国家的气候变化和环保主题建言献策 [27]，成为一项重要的制度创新。同时，法国很多城市推出了旧城改造项目，为居民提供更绿色的生活环境，鼓励采取更低碳的生活方式。例如，巴黎在 2015 年宣布将塞纳河沿岸的高速公路改造成步行道，鼓励居民骑行、步行，减少机动车出行，支持碳减排工作，促进碳中和进程；还推出了多条“绿道”，为市民绿色出行提供基础保障。

（二）碳中和为社会发展提供更多就业机会

在碳中和进程中，新兴产业的蓬勃发展会提供更多的就业机会，有助于增强能源转型的社会共识。对能源转型的社会共识与碳中和是互相促进、共同发展的关系。

根据 IRENA 统计，2019 年全球可再生能源行业从业人数达到 1150 万人（较 2018 年增长了 50 万人），其中太阳能行业有 380 万人 [28]。在相对发达或是发展中的能源市场，可再生能源的使用都可以创造就业机会、提高当地收入。在可再生能源利用方面，尽管当前仅有少数几个国家处于领先地位，但很多国家都拥有可观的发展潜力，可以通过促进相关产业发展、培训从业者来增加就业机会，进而推进能源转型进程。碳中和也将带来更多的工作机会 [29]。按照 IEA 净零排放情景，到 2030 年，虽然全球化石燃料部门可能减少 5×10^6 个职位，但在清洁能源、能效提升、低排放技术方面总共可以创造超过 3×10^7 个工作岗位。

发达国家将能源转型与地区经济发展紧密结合起来，利用能源转型带来的新契机大力发展经济，创造就业机会。例如，美国纽约市为实现 2025 年市政供电 100% 为清洁电力的目标，启动实施两个绿色能源基础设施项目，分别从纽约州北部、加拿大获得额外的可再生电力（风能、太阳能、水力发电）；两个项目将为本地创造约 1×10^4 个工作岗位，带来约 82 亿美元的经济效益 [30]。

由此可见，能源转型可与社会、环境、经济目标有效结合，产生更广泛的协同效益。碳中和不仅可以减缓气候变化，更可以推动就业、发展经济、改善环境、促进民生；而这一过程又能提升公众对碳中和的认识并加强社会基础。气候行动规划具有多重效益，产生深远的社会影响；实现碳中和需要社会支持，碳中和进程也促进了社会发展 [31]。

五、启示与建议

（一）启示

制定碳中和的顶层设计和长期战略至关重要。实现碳达峰、碳中和是一个长期过程，需要制定长期的宏观战略。相关部门应针对性制定战略规划，相互协调、有序推进，在此基础上落实各项政策。多数发达国家制定了应对气候变化及能源转型的长期战略与规划，部分发达国家还制定了中长期分行业的温室气体减排具体目标。

加快能源市场化改革是有效推进碳达峰、碳中和的基础。新型能源系统的建立需要市场价格引导，同时新型商业模式需要更加开放的市场来提供支持。多个发达国家完成了电力、天然气的市场化改革，在助推可再生能源、助力新商业模式发展方面发挥了积极的作用。欧盟设立了较为完善的碳市场系统，用于促进碳减排、鼓励投资新技术、支持低碳转型。全方位推进能源市场化改革是走向碳中和的重要方面。

社会共识对推进低碳转型至关重要。广泛的社会共识可显著提高政策的实施效率，能源转型带来的社会效益可使公众更清晰地认知能源转型的益处，从而相互促进并形成良性循环。相关案例表明，

低碳政策不仅可以促进碳排放量下降，还可带来社会、经济、环境等多重效益。形成社会共识有助于推动低碳方案实施，而低碳方案的实施本身亦可一举多得。

（二）对策建议

做好顶层设计和分阶段的碳减排行动计划。鉴于不同领域的碳减排难度和成本存在差异性，应分类施策，促进有序减排，不宜“一刀切”。长期战略宜明确碳减排目标，而分阶段的行动计划应具有针对性并可适度调整，确保整体目标的实现和路径的优化。

加快并深化能源市场化改革。在能源革命推动下，能源市场化改革应不断深化，推进电力领域改革不断取得进展、天然气领域实现输售分离，为配置竞争性市场创造条件。为了充分发挥市场在资源配置中的决定性作用，电力领域应加快电力现货市场、辅助服务市场建设，扩大配电网改革试点，真正实现“隔墙售电”；天然气领域应加快培育多元化的市场主体，推进区域市场建设，尽快打造具有国际影响力的天然气价格指数。对于已经启动的电力行业碳排放交易市场，应完善配套体系，逐步扩大交易品种和主体的参与程度，通过碳价来发现和引导对新能源领域的投入。

加强社会动员，凝聚公众共识。能源转型需要公众支持这一社会基础，同时创造就业机会、更好促进社会转型。应加强宣传引导，扩大公众认识，鼓励公众参与碳中和进程并积极建言献策，在深刻认识到气候变化与能源转型必要性的基础上认真落实碳中和的方针政策；鼓励公众转变思想与行为方式，低碳出行、绿色生活，从个体、细节做起，实现能源与社会、经济、环境的协同效益最大化。

不断深化国际合作。实现碳中和是全球共同付出、共同受益的过程，是构建人类命运共同体最重要的内容之一。一方面，国际经验为我国政策制定与落实提供了宝贵的经验与教训；另一方面，我国的发展情况可为其他发展中国家提供良好借鉴。应加强与世界各国的合作交流，学习并吸取已经实现碳达峰国家可取的路径及措施，同时讲好中国故事，为中国经验“走出去”打下基础；保持与 IEA、IRENA 等国际组织的良好合作，对标国际能源标准与技术，跟踪了解国际前沿研究与产业发展动态，培养具有国际化视野的复合型碳中和人才。

参考文献

[1] The Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2021: The physical science basis: Summary for policymakers [R]. Paris: The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021.

[2] International Energy Agency. Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector [R]. Paris: International Energy Agency, 2021.

[3] 丁国生, 丁一宸, 李洋, 等. 碳中和战略下的中国地下储气库发展前景 [EB/OL]. (2021-10-29) [2021-10-30]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20211028.1418.006.html.
Ding G S, Ding Y C, Li Y, et al. The development prospects of China’s underground gas storage under the carbon neutral strategy [EB/OL]. (2021-10-29)[2021-10-30]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20211028.1418.006.html.

[4] 丁剑, 方晓松, 宋云亭, 等. 碳中和背景下西部新能源传输的电氢综合能源电力网构想 [EB/OL]. (2021-10-22)[2021-10-30]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20211022.1336.004.html.
Ding J, Fang X S, Song Y T, et al. Conception of electric and hydrogen integrated energy power grid for new energy transmission in western China under the background of carbon neutrality [EB/OL]. (2021-10-22) [2021-10-30]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20211022.1336.004.html.

[5] International Energy Agency. World energy outlook 2019 [R]. Paris: International Energy Agency, 2019.

[6] International Renewable Energy Agency. World energy transitions outlook: 1.5℃ pathway [R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2021.

[7] Larson E. Greig C, Jenkins E J, et al. Net-zero America: potential pathways, infrastructures, and impacts [R/OL]. New Jersey: Princeton University, (2020-12-15)[2021-09-10]. https://netzeroamerica.princeton.edu/the-report.

[8] International Energy Agency. An energy sector roadmap to carbon neutrality in China [R]. Paris: International Energy Agency, 2021.

[9] Bill G. How to avoid a climate disaster: The solutions we have and the breakthroughs we need [R]. New York: Alfred A. Knopf, 2021.

[10] Prognos, Oko-Institute, Wuppertal Institute. Towards a climate-neutral Germany by 2045: How Germany can reach its climate targets before 2050 [R]. Berlin: Agora Energiewende and Agora Verkehrswende, 2021.

[11] Strommarktdaten für Deutschland. Electricity generation and consumption in Germany [EB/OL]. (2021-08-08)[2021-09-30]. https://www.smard.de/en.

[12] Mackay M, Eric M, Sadie C, et al. Status report on power system transformation: A 21st century power partnership report [EB/OL]. (2015-05-01)[2021-09-30]. www.nrel.gov/docs/fy15osti/63366.pdf.

[13] International Energy Agency. Status of power system transformation 2019 power system flexibility [EB/OL]. (2019-05-01)[2021-09-30]. https://iea.blob.core.windows.net/assets/00dd2818-65f1-426c-8756-9cc0409d89a8/Status_of_Power_System_Transformation_2019.pdf.

[14] Heptonstall P J, Gross R J K. A systematic review of the costs and

impacts of integrating variable renewables into power grids [J]. Nature Energy, 2020, 6(1): 1–12.

[15] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见 [EB/OL]. (2021-02-25)[2021-09-30]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202103/t20210305_1269046.html?code=&state=123.
National Development and Reform Commission, National Energy Commission Administration. Guidance on promoting the integration of power source network load storage and multi energy complementary development [EB/OL]. (2021-02-25)[2021-09-30]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202103/t20210305_1269046.html?code=&state=123.

[16] International Energy Agency. China power system transformation: Assessing the benefit of optimised operations and advanced flexibility options [EB/OL]. (2010-02-01)[2021-09-30]. https://iea.blob.core.windows.net/assets/fd886bb9-27d8-4d5d-a03f-38cb34b77ed7/China_Power_System_Transformation.pdf.

[17] Bloomberg Finance L.P. Realizing the potential of customer-sited solar [EB/OL]. (2021-09-15)[2021-09-30]. https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/BNEF-Schneider-Electric-Realizing-the-Potential-of-Customer-Sited-Solar_FINAL.pdf.

[18] 杨雷. 能源的未来——数字化与金融重塑 [M]. 北京:石油工业出版社, 2020.
Yang L. The future of energy: Digitalization and financial reshaping [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020.

[19] 国家能源局综合司. 关于公布整县(市、区)屋顶分布式光伏开发试点名单的通知 [EB/OL]. (2021-09-08)[2021-09-30]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-09/08/c_1310186582.htm.
Comprehensive Department of National Energy Administration. Notice on publishing the pilot list of roof distributed photovoltaic development in the whole county (city, district) [EB/OL]. (2021-09-08)[2021-09-30]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-09/08/c_1310186582.htm.

[20] European Commission. Powering a climate-neutral economy: An EU strategy for energy system integration [EB/OL]. (2021-07-08)[2021-09-30]. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1594897435427&uri=CELEX:52020DC0299.

[21] European Commission. An SME strategy for a sustainable and digital Europe [EB/OL]. (2020-10-03)[2021-09-30]. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1593507563224&uri=CELEX-%3A52020DC0103.

[22] European Commission. Questions and answers-emissions trading-putting a price on carbon [EB/OL]. (2021-07-14)[2021-09-30]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_21_3542.

[23] European Commission. Revision of the EU emission trading system [EB/OL]. (2021-07-14)[2021-09-30]. https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/revision-eu-ets_with-annex_en_0.pdf.

[24] Local Government Association. Behaviour change and the environment: Changing behaviours to reduce climate change and protect our environment [EB/OL]. (2021-02-01)[2021-09-20]. https://www.local.gov.uk/behaviour-change-and-environment.

[25] Taylor R. Public engagement with the government's net zero target [EB/OL]. (2021-05-24)[2021-09-30]. https://lordslibrary.parliament.uk/public-engagement-with-the-governments-net-zero-target/.

[26] Demski C. Net zero public engagement and participation [EB/OL]. (2021-03-24)[2021-09-30]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/969428/net-zero-public-engagement-participation-research-note.pdf.

[27] Giraudet L G, Apouey B, Arab H, et al. Deliberating on climate action: Insights from the French citizens' convention for climate [EB/OL]. (2021-01-26)[2021-09-30]. https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-03119539.

[28] International Renewable Energy Agency. Renewable energy jobs continue growth to 11.5 million worldwide [EB/OL]. (2020-09-29)[2021-09-30]. https://www.irena.org/newsroom/pressreleases/2020/Sep/Renewable-Energy-Jobs-Continue-Growth-to-11-5-Million-Worldwide.

[29] Cozzi L, Motherway B. The importance of focusing on jobs and fairness in clean energy transitions [EB/OL]. (2020-07-06)[2021-09-30]. https://www.iea.org/commentaries/the-importance-of-focusing-on-jobs-and-fairness-in-clean-energy-transitions.

[30] The Official Website of the City of New York. Major green energy infrastructure projects to power New York City with new wind, solar and hydropower (2021) [EB/OL]. (2020-09-20)[2021-09-30]. https://www1.nyc.gov/office-of-the-mayor/news/630-21/climate-week-major-green-energy-infrastructure-projects-power-new-york-city-new-wind-.

[31] C40 Cities Climate Leadership Group. Urban climate action impacts framework [R]. London: C40 Cities Climate Leadership Group, 2021.