

2025-2035 年中国社区能源管理系统愿景

日立（中国）有限公司，日立制作所，清华大学

摘要

中国目前已成为世界上最大的碳排放国，2019 年的二氧化碳排放量占全球的 28%。2020 年，中国宣布在 2030 年前实现碳达峰，在 2060 年左右实现碳中和（30·60 目标）。

为了实现这一目标，在供给侧，从化石能源向风能、太阳能、水能、核能等清洁能源转型已成为潮流。在需求侧，节能降耗，从化石能源向电能和氢能等非化石能源转型，碳捕集及碳循环技术已成为主导趋势。

中国政府一直致力于推动减排脱碳及放松对电力方面的管制。中国政府已提出了 2030 年前碳达峰十大行动，并通过电力体制改革建立了全国统一的电力市场体系。

为了在 2060 年左右实现碳中和目标，中国有必要进一步采取措施实现 2°C 和 1.5°C 的情景目标。

首先是工业领域，该领域脱碳远比其他产业困难。为此，有必要研发具有突破性的先进技术，比如利用氢能进行零碳炼铁的技术，从而减少工业过程产生的二氧化碳排放，同时从化石能源转向电能。在电力领域，发展碳捕集与封存技术并提高波动性可再生能源的渗透率至关重要。为了将大量的波动性可再生能源连接到电网，较可行的解决方案是加强特高压（UHV）和高压直流输电（HVDC）等电网基础设施，并提高利用的灵活性。换言之，为了兼

顾波动性可再生能源的大量引进和稳定的电力供应，需要通过电网稳定控制系统以及智能逆变器来确保灵活性。

注：本文来自清华大学第一期（2019-2021 年）合作项目。

一、 能源和二氧化碳的排放趋势

随着经济的快速发展和城市化进程的推进，中国目前已成为了世界上最大的碳排放国，2019年的二氧化碳排放量占全球的28%^[1]（图1a）。中国的二氧化碳排放量在2007年超过了美国，并在2012年超过了美国、欧盟27国和英国的二氧化碳排放量总和，2007年到2013年期间增长了45%^[2]。根据2013年至2016年^{[2][3][4]}左右观察到的负增长，人们认为中国的二氧化碳排放量已达到峰值。然而，此后出现的排放量反弹表明，实施长期减排仍是中国和世界在政策上面临的一项关键挑战。

一直以来，随着社会经济的发展，中国的碳排放在不断演变中。1970年以前，中国的二氧化碳排放总量还不到9亿吨，人均排放量约为全球平均水平的四分之一。但是，自20世纪70年代改革开放以来，特别是2000年加入世界贸易组织(WTO)后，中国经济的飞速发展伴随着二氧化碳排放的增长(图1a)。实际上，中国的二氧化碳排放量在20世纪70年代平均增长了10%，80年代增长了5%，90年代增长了3%，21世纪00年代增长了9%，21世纪10年代增长了3%。。同时，人均二氧化碳排放量也有所增加，在2000-2013年期间快速增长，之后趋于稳定（图1b）。同时，碳强度（单位GDP二氧化碳排放量）自1980年以来呈现出下降趋势（图1c）。截至2019年，这些关键特征的二氧化碳排放量达到103亿吨（±13%，置信区间（CI）=90%），人均二氧化碳排放量约为7.4吨^[5]（图1d）。

2020年，中国宣布在2030年前实现碳达峰，在2060年左右实现碳中和（30·60目标）。中国将在这两个目标之间设定大约30年的差距，这成为世界上最短的差距。相比之下，欧盟、美国和日本将分别相差71年、43年和37年。

中国致力于逐步提高非化石能源消费比重，计划2025年达到20%左右，在2030年达到25%左右，在2060年超过80%。计划到2025年，与2020年相比，单位GDP的二氧化碳排放量将下降18%，到2030年，与2005年的水平相比，单位GDP的二氧化碳排放量将下降65%以上^[7]。

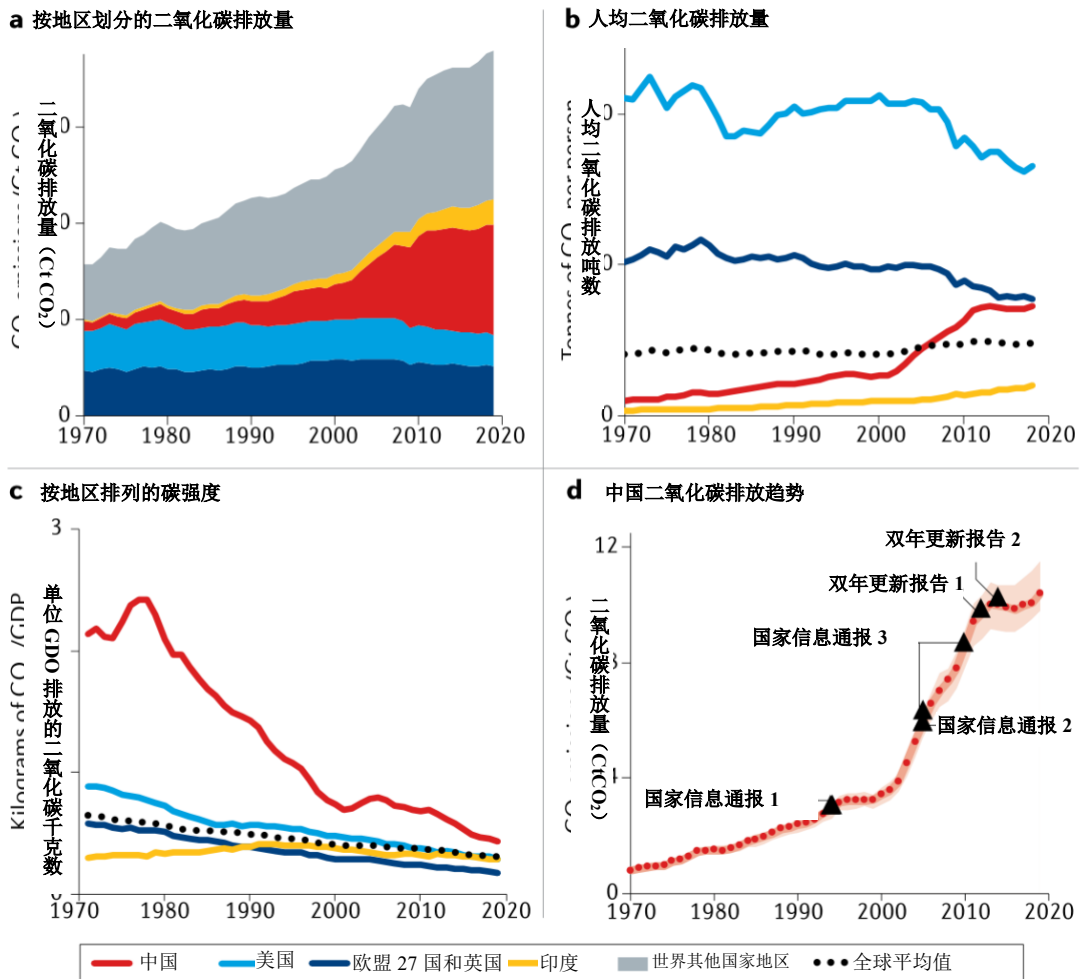


图1|中国的碳排放趋势。a|主要排放地区中来源于燃料燃烧和水泥生产的二氧化碳年排放量。b|主要排放地区中人均二氧化碳排放量。c|主要排放地区

的碳强度（单位经济产出的碳排放量）。d|来自全球碳项目（GCP）、国际能源署（IEA）、BP、电子化数据收集（EDGAR）、二氧化碳信息分析中心（CDIAC）和中国碳核算数据库（CEADs）的中国二氧化碳排放趋势，以及通过国家信息通报和双年更新报告向《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）提交排放清单的年份。红色阴影表示数据库之间的不确定性。自1980年以来，中国在全球二氧化碳排放中所占的份额增长迅速，人均排放量在21世纪以来大幅增加，但在2010年后趋于稳定和波动状态。

在供给侧，从化石能源向风能、太阳能、水能、核能等清洁能源转型已成为潮流。未来，以化石燃料为基础的发电机必须具备碳捕集功能。根据全球能源互联网发展合作组织（GEIDCO）的数据，2020年的化石燃料发电机容量占比为53.5%，2025年该比值将下降至42.5%，2030年下降至32.5%，2050年下降至8.4%，2060年下降至4.0%。较2020年的43.4%相比，以清洁能源为基础的发电机容量占比将于2025年上升至57.5%，2030年上升至67.5%，2050年上升至92%，2060年上升至96%。尤其是风能和太阳能发电机，2060年其容量将从2020年的12.7%和11.3%分别显著增加到31.2%和47.4%^[8]。

在需求侧，节能降耗，从化石能源向电能和氢能等非化石能源转型，碳捕集及碳循环技术已成为主导趋势。

与化石能源相比，中国的风能和太阳能已经颇具成本竞争力^[9]。尤其是太阳能的竞争力最强，因此分布式光伏（PV）和集中式光伏预计将在今后得到最广泛的普及。2021年，新安装的分布式光伏装机占所有新安装光伏装机容量的55%，在中国历史上首次超过半数，主要分布在东部人口密集的省份（山东、河北、河南、安徽、浙江、江苏、北京、上海等）地区^[10]。

需求方面，电动汽车（EV）和插电式混合动力汽车（PHV）是化石能源转向电力的典型体现。在中国，电动汽车和插电式混合动力汽车被归类为新能

源汽车（NEV），且占2019年新能源汽车的99.8%。根据中国汽车工程学会发布的《节能与新能源汽车技术路线图2.0》，中国汽车行业碳排放量将先于国家碳减排承诺，在2028年左右达到峰值，到2035年碳排放总量将比峰值降低20%以上。此外，有人提出，到2035年新能源汽车市场占比将达到50%，燃料电池汽车（FCV，新能源汽车中的一类）的数量将达到约100万辆，传统汽车将实现完全混合动力，汽车行业将实现电力转型^[11]。

二、 政府碳中和政策

（一） 脱碳

2021年7月，发电行业启动了碳排放权交易机制（ETS），2021年9月两家主要电力公司启动了绿色电力交易机制。

中国政府针对2030年之前碳达峰提出了十大行动^[12]：

- 能源绿色低碳转型行动
- 节能降碳增效行动
- 工业领域碳达峰行动
- 城乡建设领域碳达峰行动
- 促进绿色低碳交通运输行动
- 循环经济助力降碳行动
- 绿色低碳科技创新行动
- 碳汇能力巩固提升行动
- 绿色低碳全民行动
- 各地区梯次有序碳达峰行动

(二) 电力系统放松管制

通过电力系统改革，中国建立了电力市场，并正在放松对电力系统的管制。现在，中国的电力零售商、电力交易所和交易参与者的数量均已经超过日本。

三、 实现碳中和的途径

以下是进行长期低碳转型的四种情景：

- **政策情景：** 在中国根据《巴黎协定》提出的国家自主贡献（NDC）目标、行动计划和相关政策的基础上，继续维持当前低碳转型趋势和政策情景
- **强化政策情景：** 根据政策情景，进一步加强降低GDP能源强度和二氧化碳浓度的程度和范围，并进一步提高非化石能源在一次能源消耗中的比例和其他指数
- **将升温控制在2°C的情景：** 实现将全球升温控制在2°C的目标
- **将升温控制在1.5°C的情景：** 在将升温控制在1.5°C目标的指导下，力争在21世纪中叶实现二氧化碳净零排放和其他温室气体的深度减排

图2和图3分别显示了在不同情景下按行业划分的二氧化碳排放量和按能源来源划分的一次能源消耗^[13]。2050年，尽管2°C目标和1.5°C目标情景下的一次能源消耗量并不比其他情景的少，单这两个情景的二氧化碳排放量远小于其他情景。为了在2060年左右实现碳中和目标，中国有必要采取措施实现2°C和1.5°C的目标。

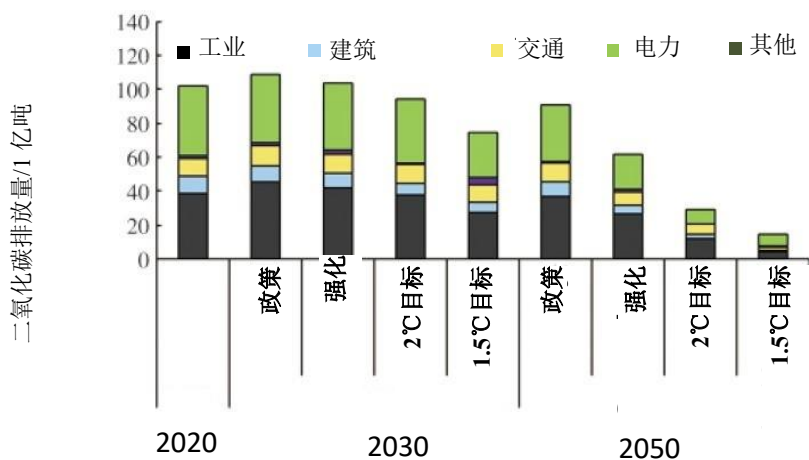


图2 在不同情景下按行业划分的二氧化碳排放量的成分

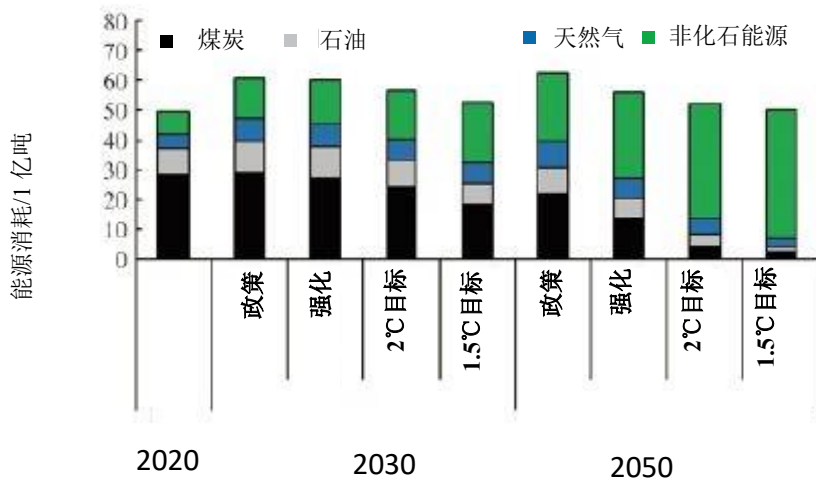


图3 在不同情景下按能源来源划分的一次能源消耗的成分

图4至图7分别显示在不同情景下不同行业（电力、建筑、工业、交通）的二氧化碳排放量^[13]。

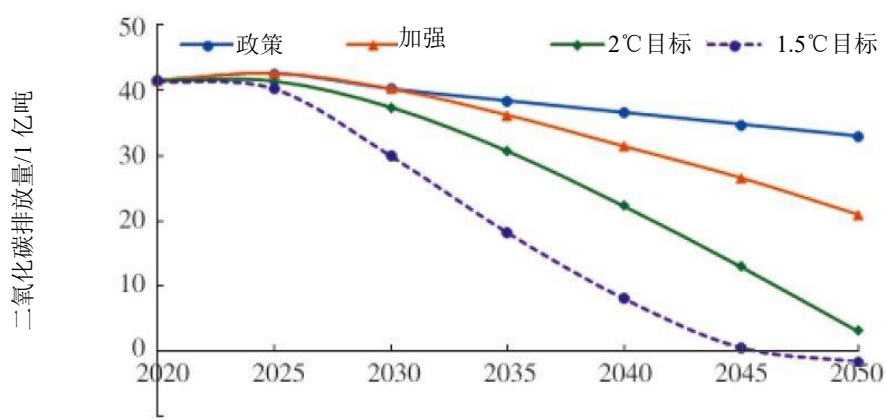


图4 在不同情景下电力行业的二氧化碳排放量（包括碳捕集与封存（CCS））

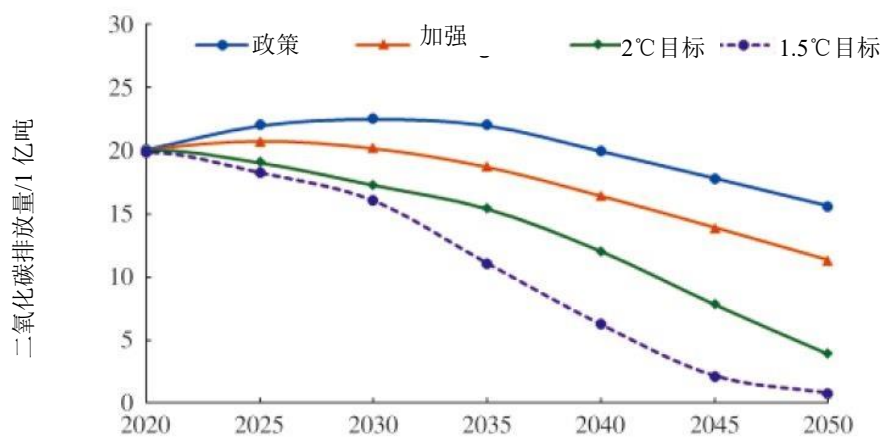


图5 在不同情景下建筑行业的二氧化碳排放量（包括间接排放）

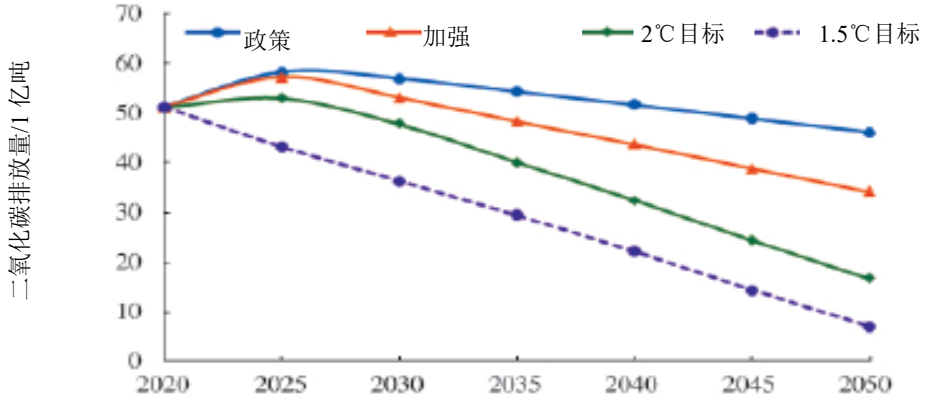


图6 在不同情景下工业行业的二氧化碳排放量

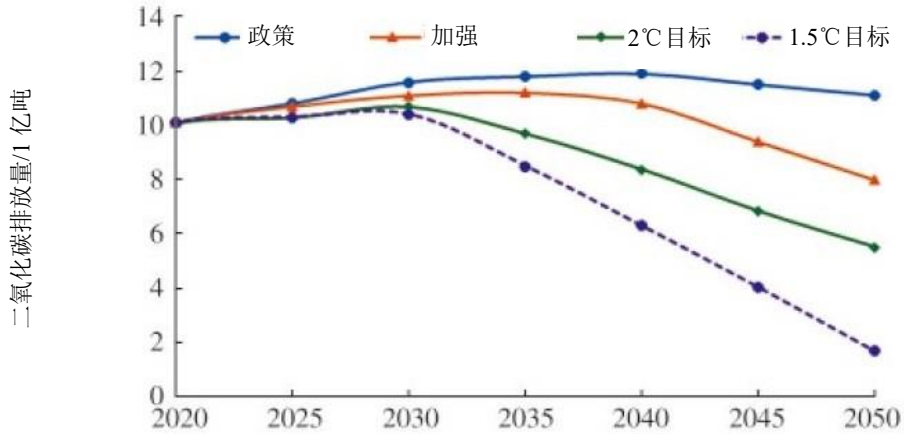


图7 在不同情景下交通行业的二氧化碳排放量

在2°C和1.5°C目标情景下，与其他行业相比，电力行业（包括碳捕集与封存）的二氧化碳排放量减速最快，而工业行业的二氧化碳排放量减速最慢。这体现出了工业行业脱碳的难度。为了减少钢铁、水泥和化学品等工业过程的碳排放，有必要研发具有突破性的先进技术，比如利用氢能进行零碳炼铁的技术。此外，也有必要转换能源，将化石燃料转换为电力。

碳捕集与封存和波动性可再生能源（VRE，指风能和太阳能）都应该渗透进电力行业。大多数情况下，波动性可再生能源用于电网中。将波动性可再生能源用于电网中面临的主要挑战有天气状况和造成的发电不稳定以及波动性可再生能源位置分布不均匀导致的过载。较可行的解决方案是加强特高压（UHV）和高压直流输电（HVDC）等电网基础设施，利用抽水蓄能水电和电池、电动汽车、建筑等分布式能源资源（DER）的灵活性。2021年，中国政府提出将“源、网、荷、储”一体化作为灵活的应用方式^[14]。在波动性可再生能源高度渗透的情况下，电网稳定控制系统、智能逆变器和分布式能源资源管理系统（DERMS）等创新技术通过自主或远程控制提供与电网状态相对应的多样化系统服务，这些创新技术将是电力稳定供应的必要条件。^[15]

四、 结论

当前，中国是世界上最大的碳排放国，2019年中国碳排放量占全球总量的28%。2020年，中国提出在2030年之前实现碳达峰，在2060年左右实现碳中和（30·60目标）。

在供给侧，从化石能源向风能、太阳能、水能、核能等清洁能源转型已成为潮流；在需求侧，节能降耗，向电能、氢能等非化石能源转型，碳捕集及碳循环技术发展已成为主导趋势。

中国政府一直致力于推动减排脱碳及放松对电力方面的管制。中国政府已提出了2030年前碳达峰十大行动，并通过电力体制改革建立了全国统一的电力市场体系。

为了在2060年左右实现碳中和目标，中国有必要进一步采取措施实现2°C和1.5°C的情景目标。

在这一过程中，工业领域脱碳远比其他产业困难。为减少工业生产过程的碳排放，发展利用氢能的零碳炼铁等先进突破性技术，推动化石能源向电能转型尤为必要。在电力领域，发展碳捕集与封存技术并提高波动性可再生能源的渗透率至关重要。加强特高压和高压直流输电等电力基础设施的建设，灵活利用抽水蓄能水电以及电池、电动汽车、建筑物等分布式能源，有助于推动波动性可再生能源融入电网。开展技术创新，研发电网稳定控制系统、智能逆变器及分布式能源管理系统，对于充分灵活利用能源系统、实现电力稳定供应大有裨益。

五、 参考文献

- [1] Friedlingstein, P. 等人。2020 年全球碳预算，《地球系统科学数据》12, 3269 - 3340 (2020)。
- [2] Guan, D. 等人。中国通过工业和能源系统转型实现二氧化碳排放结构性下降，《自然地球科学》11, 551 - 555 (2018)。
- [3] Jackson, R. B. 等人。实现碳达峰，《自然气候变化》6, 7 - 10 (2015)。
- [4] Peters, G. P. 等人。追踪《巴黎气候协定》当下进展和未来目标的关键指标，《自然气候变化》7, 118 - 122 (2017)。
- [5] 蓝碳地图（公众环境研究中心，2021），
<http://wwen.ipe.org.cn/MapLowCarbon/LowCarbon.html>。
- [6] 中华人民共和国驻美国大使馆：《中国1+N气候政策体系》
http://www.china-embassy.org/eng/zl/climatechange/202111/t20211117_10449121.htm#:~:text=In%20September%202020%2C%20China%20updated,United%20States%2043%20years%20and, (2021)。
- [7] 中华人民共和国国务院：《中共中央国务院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》
<http://english.www.gov.cn/policies/latestreleases/202110/24/con>

- tent_WS61755fe9c6d0df57f98e3bed.html, (2021)。
- [8] 全球能源互联网发展合作组织:《中国 2030 年能源电力发展规划研究及 2060 年展望》, https://yhp-website.oss-cn-beijing.aliyuncs.com/upload/%E3%80%8A%E4%B8%AD%E5%9B%BD2030%E5%B9%B4%E8%83%BD%E6%BA%90%E7%94%B5%E5%8A%9B%E5%8F%91%E5%B1%95%E8%A7%84%E5%88%92%E7%A0%94%E7%A9%B6%E5%8F%8A2060%E5%B9%B4%E5%B1%95%E6%9C%9B%E3%80%8B_1616498546246.pdf (中文版), (2021)。
- [9] 中国宏观经济研究院/国家发展和改革委员会能源研究所:《2020 中国可再生能源展望报告》(2021)。
- [10] 国家能源局:“2021 年光伏发电建设运行情况”, http://www.nea.gov.cn/2022-03/09/c_1310508114.htm (中文版), (2020)。
- [11] 中国汽车工程学会:“《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》正式发布”, <http://www.sae-china.org/news/society/202010/3957.html> (中文版), (2020)。
- [12] 中华人民共和国国务院:《2030 年前碳达峰行动方案》: <http://www.xinhuanet.com/english/download/2021-10-27/FullTextActionPlanforCarbonDioxidePeakingBefore2030.doc>, (2021)。
- [13] 清华大学:《中国长期低碳发展战略与转型路径研究综合报告》(2020)。
- [14] 国家发展和改革委员会:“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”(中文版), 发改能源规(2021) 280 号, (2021)。
- [15] 日立东大实验室:《实现电力系统支持“社会 5.0”的建议(第 2 版)》 http://www.ht-lab.ducr.u-tokyo.ac.jp/en/research/energy_en/, (2019)。

符号和缩写

CCS: 碳捕集与封存
DER: 分布式能源资源
ETS: 碳排放权交易机制
EV: 电动汽车
FCV: 燃料电池汽车
GEIDCO: 全球能源互联网发展合作组织
GDP: 国内生产总值
HVDC: 高压直流输电
NDC: 国家自主贡献
NEV: 新能源汽车
PHV: 插电式混合动力汽车
PV: 光伏
UHV: 特高压
VRE: 波动性可再生能源