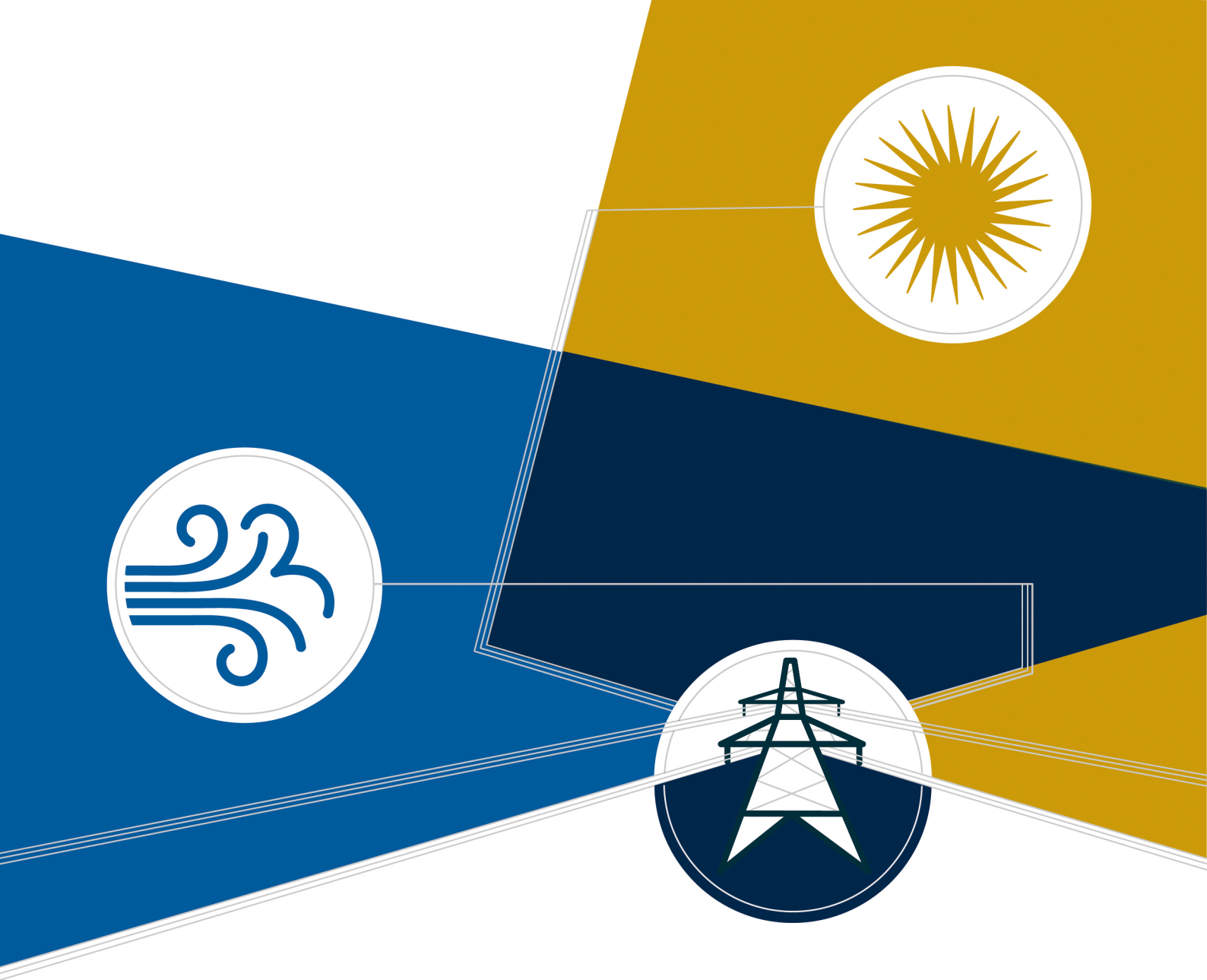




中国实现碳中和的可再生能源路径

2023年5月

决策者摘要



清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

Berkeley Law

California-China
Climate Institute



POWER
TRANSFORMATION
LAB

作者

张振华¹，朱子恒²，Jessica A. Gordon（杰西卡·戈登）³，鲁玺⁴，张达²，Michael R. Davidson（迈克尔·戴蔚森）^{1,5}
Zhenhua Zhang¹，Ziheng Zhu²，Jessica A. Gordon³，Xi Lu⁴，Da Zhang²，Michael R. Davidson^{1,5}

¹ 加利福尼亚大学圣迭戈分校机械与航天工程学院

² 清华大学能源环境经济研究所

³ 加利福尼亚大学伯克利分校加州气候研究院

⁴ 清华大学环境模拟与污染控制国家重点联合实验室

⁵ 加利福尼亚大学圣迭戈分校全球政策与战略学院

关于加州中国气候研究院

加州中国气候研究院于2019年9月成立，是由加州大学伯克利分校法学院法律、能源和环境中心和Rausser自然资源学院联合设立的加州大学项目。它由加利福尼亚州前州长杰里·布朗担任主席，加利福尼亚州空气资源委员会前主席玛丽·尼科尔斯担任副主席。该研究所与加州大学的其他校区、部门密切合作。通过加州和中国之间的联合研究、能力建设和政策对话，该研究所旨在为决策者提供参考，促进中国与加州的气候变化合作与伙伴关系，并在各个层面推动气候解决方案。

关于电力转型实验室

加州大学圣迭戈分校电力转型实验室致力于研究有关大规模部署低碳能源的工程和制度要求，通过与学术届、政府部门、民间组织和工业届等各领域人士密切合作，共同推进以电力网络角色为核心、应对气候变化挑战的相关研究课题和解决方案。该实验室的重点研究领域包括可再生能源资源的规划、经济和可靠的低碳电力市场，以及产业政策和企业低碳转型的政治经济学问题。

关于清华大学能源环境经济研究所

清华大学能源环境经济研究所始创于1980年，是清华大学核能与新能源技术研究院和清华大学经济管理学院、清华大学公共管理学院共建的校级研究机构，是中国高校中最早开展能源与应对气候变化研究的团队，是全国高校中最早具有博士学位授予权的单位，拥有管理科学与工程博士点和博士后流动站，所属学科管理科学与工程是国家重点学科。

致谢

本文作者在此感谢来自睿博能源智库（Regulatory Assistance Project）高驰的研究协助，以及下列审稿人为本报告所提供的指导、评阅和帮助：Fredrich Kahrl（加州中国气候研究院研究员）、Bob Weisenmiller（加州中国气候研究院研究员）、林江（劳伦斯伯克利国家实验室中国能源政策Nat Simons Presidential Chair及加州大学伯克利分校兼职教授）、张鸿宇（清华大学博士后研究员）、朱日新（加州中国气候研究院甲烷政策研究员）及戴凡（加州中国气候研究院院长）。

政策制定摘要

当前，中国已经宣布了雄心勃勃的气候目标，即2030年前实现碳达峰，2060年前实现碳中和¹。实现这一计划的一大关键在于对国内目前最大的碳排放源——电力行业进行脱碳，并在此基础上促进交通运输、工业和建筑等其他行业的电气化。同时，整个脱碳过程对大规模建设低碳可再生能源以及包括储能系统和输电网络在内的配套基础设施，提出了进一步的要求。

虽然这些长期目标是明确的，能源转型所驱动的结构性的改变、可再生能源的部署速度要求以及不同地区、不同人群所受的影响，仍然存在许多不确定性。为解决这个问题，我们开发了一种具有高空间和时间分辨率的新模型。基于一定的模型模拟和数据分析，我们以2020年到2060年间每十年为一片段，提出了可行且高效的可再生能源、储能系统和输电线路部署路径²。从政策制定的角度来看，充分理解各种低碳路径可以为中央和地方政府理解这次前所未有的转型中所可能出现的各种瓶颈，提供充分的支持性信息。我们的分析将进一步支持中国政府实现更加切实、有效且公平的清洁能源转型。

能源转型：结构和速度

为达成2060年实现碳中和的目标，中国政府需要确保风电和光伏系统的年均新增装机容量从第一个十年（2020–2030年）的约70吉瓦/年（GW）增加到碳中和目标年前最后一个十年（2050–2060年）的210–300吉瓦/年。同时，总装机容量需要在2040年达到2100–3200吉瓦，在2050年达到3300–4800吉瓦，并最终在2060年达到5200–5300吉瓦。为了将这些可再生能源接入电网，我们需要依靠储能系统和输电线路来解决地区间的电力供需不平衡和时间波动性问题。根据模拟结果，储能系统的年均新增装机容量需从第一个十年的105–173吉瓦时/年（GWh）增加到最后一个十年的每年180–260吉瓦时/年，而输电网络的增长速度需依次达到13–16吉瓦/年（2020–2030年）、13–18吉瓦/年（2030–2040年）、18–24吉瓦/年（2040–2050年）和5–35吉瓦/年（2050–2060年）。基于中国当前清洁能源设备的制造能力来看，我们预计上述装机需求能够得到基本满足。

¹ United Nations, 2020

² Zhang et al., 2023

地理分布

在SPM表1中，我们展示了每十年间不同可再生能源和配套设施的重点部署区域。我们的模拟结果显示，在可行和有效的路径下，集中式和分布式光伏系统将从高容量因子³的北方和西部地区开始部署，然后在下一个十年（2030-2040年）向主要的电力负荷中心延伸。这一转变主要由可再生能源成本的不断下降和较高的电力传输成本所驱动。值得注意的是，随着沿海地区部署成本趋近于西部地区，分布式光伏将逐步在该区域内占领主要市场份额。此外，陆上风电将在中国北方和沿海地区广泛部署，而持续的成本下降将继续促进沿海省份离岸风电的发展。当前较高的跨省输电成本为中国东部等资源质量相对较低的地区提供了一定的部署空间，而未来几十年低成本的储能技术将使得中国北方等相对资源条件较佳的区域更利于可再生能源的部署。这一结果表明，对省级层面进行部署区域优先分级和可再生能源目标制定，将有助于指导地方政府维持当前的可再生能源发展势头。

SPM 表 1: 跨越十年的部署重点						
	集中式光伏	分布式光伏	陆上风电	离岸风电	储能系统	输电网络
2020–2030	在北方和西部等条件较为适宜的地区进行部署		在北方和沿海地区进行部署	在成本不占优势的情况下，仍需确保部署工作足以推动成本下降	在可再生能源供给波动幅度大的地区部署储能系统，以应对昼夜供给差异	扩容三个区域的输电通道建设（西北、南方和北方地区）
2030–2040	在可再生能源成本持续下降的推动下，扩展到主要的负荷中心				在蓄水储能资源有限的地区优先考虑电池存储，同时促进电池成本进一步下降	加强贯穿中部和东部地区的南北主要输电通道
2040–2050	大力开发主要负荷中心附近的可用土地。随着土地使用条件的约束和煤炭发电容量的逐步减少，需要在北方和西部地区扩张	受益于输电和并网成本的降低，优先考虑靠近负荷中心的沿海地区	优先考虑北方的富煤地区，配合煤电的逐步停产	成本迅速下降的同时在沿海地区加快部署		扩大省际和国家长途输电网络，以解决可再生能源并网和消纳的问题
2050–2060						

³ 容量因子（Capacity Factors）：发电厂的平均发电量除以额定容量

土地使用、经济影响和电力市场的挑战

由于东部和其他沿海省份具有一定的可再生能源装机潜能且对输电距离要求较高，到2060年，光伏发电系统将占用中国东部省份大部分（51-82%）适宜部署的土地，而风电项目的开发也将对沿海省份的土地利用产生显著影响（14-48%）。因此，我们建议中央政府提供有关可再生能源部署选址和审批等系统性准则的指导。在此基础上，地方政府需建立多场景融合开发的项目路径，并提供区域性的土地使用标准，以减少项目开发的不确定性并减轻可再生能源部署对土地利用的影响。此外，随着“超级电网”的进一步形成和强化，我们预计至2060年全国总输电量会增加三倍。因此，高效的区域内和跨区域交易机制对于整合可再生能源和降低电力系统成本而言极其关键。

政策建议

中央和地方政府在实现中国清洁能源转型的过程中扮演着至关重要的角色。为了应对巨大的挑战和不确定性，并确保逐步实现既定目标，我们明确了近期和远期的优先事宜以支持政策的设计和实施。相关建议见下文SPM表2。

SPM 表 2：政策建议		
	中央政府	省级政府
近期目标 (2020-2035)	- 在未来五年可再生能源发展规划中，纳入并执行明确的部署目标或可再生能源消纳权重 - 将储能系统和输电网络纳入可再生能源规划过程，并设定具体的部署目标 - 制定区域电力市场标准以实现更高效的电力交易和供需平衡	- 推动电力零售和批发市场改革（如分时电价、现货市场交易）以提升可再生能源项目经济效益 - 制定推进煤电退出和减轻当地经济和社会影响的相关策略
远期目标 (2035-2060)	- 提供关于可再生能源项目选址和审批程序的系统性指导 - 开发电力系统灵活性资源的补偿机制，通过可再生能源拍卖等交易形式确保成本的持续下降	- 持续关注全球风电和光伏发电设备市场动向，以确保供给可以达成部署目标 - 建立关于农业、可再生能源等多场景融合的项目发展路径和区域标准 - 推动可行的补偿机制，从而保证以分布式能源的低成本部署