



# 面向双碳的能源产业和金融政策体系设计思考

吴力波 马戎

Dual Carbon Oriented Energy Industry and Financial Policy System Design

WU Libo MA Rong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2022.1563>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 新能源产业政策的量化分析及其环保效应

Quantitative Analysis of New Energy Industry Policy and Its Environmental Protection Effect

北京理工大学学报(社会科学版). 2021, 23(4): 30 <https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2021.4301>

#### 中国新能源汽车产业的政策协同研究——评估与演化

Policy Coordination of New Energy Vehicles in China—Evaluation and Evolution

北京理工大学学报(社会科学版). 2020, 22(3): 26 <https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2020.2439>

#### 多主体互动博弈下建筑企业低碳转型的演化机理

Evolutionary Mechanism of Low-carbon Transformation of Construction Enterprises under Multi-agent Interaction Games

北京理工大学学报(社会科学版). 2019(1): 17 <https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2019.0625>

#### 城市“生态治理”政策流动的一种新设计——以“宜昌试验政策”为例

A New Design of Urban Policy Mobilities on “Ecological Governance” –A Case Study of “Yichang Experiment”

北京理工大学学报(社会科学版). 2018(3): 45 <https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2018.1534>

#### 基于低碳转型的宏观经济情景模拟与减排策略

Macroeconomic Scenario Simulation and Carbon Reduction Strategies based on Low-carbon Transition

北京理工大学学报(社会科学版). 2017(2): 1 <https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2017.0201>

#### 碳中和目标下中国能源高质量发展路径研究

Research on the High-quality Development Path of China's Energy Industry under the Target of Carbon Neutralization

北京理工大学学报(社会科学版). 2021, 23(3): 1 <https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2021.7522>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2022.1563

# 面向双碳的能源产业和金融政策体系设计思考

吴力波, 马 戎

(复旦大学 经济学院, 上海 200433)

**摘 要:** 全球能源低碳转型持续深化, 技术创新和技术竞争不断升温, 双碳转型对中国而言既是承担大国责任、实现技术和产业升级、实现国家能源安全自主的历史性机遇, 也会给以化石能源为主的传统能源系统带来巨大挑战。能源转型过程在较长时期内面临绿色、经济、安全的多目标权衡——“不可能三角”问题, 为此有必要构建“1+N”双碳政策体系, 以克服单个减排政策的局限性。而构建完善双碳“1+N”政策体系需要把握其内在特征: 多政策交互、主体微观特征丰富、转型风险复杂, 把握内在特征是构建政策体系的关键问题。综述关键问题领域的研究进展, 按照政策实证评估和政策仿真两条方法论主线, 提出只有通过事后评估与事前仿真、传统研究方法和大数据等新型研究方法相结合才能更好地构建、完善双碳“1+N”政策体系, 推动平稳实现中国社会经济在双碳转型过程中面临的巨大变革。

**关键词:** 双碳转型; 能源政策; 金融政策; 政策交互; 微观行为; 转型风险

中图分类号: F206

文献标志码: A

文章编号: 1009-3370(2022)04-0081-12

全球能源产业处于快速变革之中。能源低碳转型持续深化, 清洁能源贡献未来能源供给的主要增量。可再生能源和天然气将提供未来 20 年全球能源主要增量, 但化石能源仍将长期占据主导, 能效提升对减排作用不容忽视。世界能源技术创新进入活跃期, 发达经济体和大型跨国企业仍是创新主力。新能源开发利用、传统能源能效技术飞速提升, 大规模应用带动产生规模效应。2010—2019 年低碳能源领域 PCT 专利申请数量前三名为丰田、三菱、松下, 前十名均为日本、美国、德国、韩国的企业。不能忽视的是, 当前能源技术竞争全面升级, 逆全球化威胁产业链稳健安全, 新能源技术成为影响全球能源格局的战略性因素, 全球能源技术竞争近年来持续升级, 成为大国博弈的重要抓手。美国对华科技封锁政策从 2018 年以来不断加码, 重点领域包括 5G、能源科技、人工智能、电子信息、高端芯片等。

双碳转型对中国而言既是历史性机遇, 同时也会带来一系列挑战。双碳转型不仅是大国担当, 也是经济与产业发展机遇, 更是实现国家安全自主的可行路径。全球化背景下外部冲击传导频繁、深度加大。其一在于供应安全, 油气受制于人成为战略软肋, 必须强化危机意识、底线思维。其二在于产业链安全, 煤炭、铜、锂等大宗商品及芯片等价格暴涨。中国能源产业链中上游进口依赖大, 给电力运行、新能源装备制造等环节造成压力。其三在于技术安全, 可再生能源关键技术、组件、装备面临“卡脖子”, 潜在风险随着应用规模的扩大而膨胀。但与此同时, 双碳目标下能源系统深度脱碳衍生能源安全风险。中国双碳目标在收入水平、产业结构、发展水平等方面与发达经济体存在明显差异, 中国减排压力更大, 任务更紧。发达经济体除美国外, 1960 年以来人均二氧化碳排放基本保持稳定, 经济增长对碳排放依赖度小, 而中国 2018 年人均 GDP 接近 1 万美元大关, 相比 1960 年飞跃式提高, 人均二氧化碳排放量与人均 GDP 仍然处于正比增长阶段<sup>①</sup>。2020 年, 中国化石能源占比 75%, 以化石能源为主的能源系统面临双碳目标的巨大挑战<sup>[1]</sup>。

碳中和能源系统转型的阶段性演进与关键障碍有哪些? 首先, 零碳电力系统要求高比例可再生能源接入。障碍在于能源生产、储运、消费体系尚不具备应对以可再生能源为主导的能源体系的安全调控要

收稿日期: 2022-07-12

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目“能源环境经济与政策分析”(71925010)

作者简介: 吴力波(1974—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: wulibo@fudan.edu.cn; 马戎(1994—), 男, 博士研究生, E-mail: rma19@fudan.edu.cn

① 作者根据 WDI 数据库分析得到。

求,需要一定比例火电保障安全,但“火力发电+CCUS”规模化利用尚不具备经济性。其次,零碳能源系统要求工业、建筑、交通、人居部门大规模电气化,不可电气化环节使用绿色替代能源,直接的化石燃料使用全部使用碳捕获和资源化技术。障碍在于工业生产流程、交通物流体系、建筑系统再造的调整成本高、传统产业融资约束大,替代能源的综合风险不明晰,难以电气化的部门如航空、航海的碳中和技术、资源和成本不确定。最后,从全社会层面来看,零碳社会经济系统要求全社会人类活动产生的碳排放完全中和。障碍在于海洋陆地生态系统的碳汇演化机制、增汇成本尚无法精确测度;不同区域、不同行业的增长路径差异明显、不确定性高;碳减排与其他非二氧化碳气体减排的协同性、环境污染物与健康效益协同性尚待更丰富研究。

在上述思考基础上,本文进一步从能源转型“不可能三角”问题和单个减排政策工具的局限性角度讨论中国构建“1+N”双碳政策体系的必要性,总结当前政策研究的角度和不足之处,并提炼双碳转型对管理科学提出的挑战和关键问题。本文提出的关键问题包括多政策交互的效应评估与仿真、微观特征识别与表征、转型风险应对的政策创新与仿真,并综述了相关问题领域的研究进展,以期丰富对双碳政策研究总体演进脉络的理解。政策实证评估和政策仿真是理解双碳政策研究的两条方法论主线,在应用中两类方法各有优势,而只有通过事后评估与事前仿真、传统研究方法和大数据等新型研究方法相结合才能更好理解、完善多政策交互、主体微观特征丰富、转型风险复杂的双碳“1+N”政策体系。

本文总结了构建双碳政策体系的必要性和转型对管理学科带来的研究命题;分析了三个关键问题并对现有研究进行综述。

## 一、构建双碳政策体系的必要性和科学挑战

### (一)构建双碳“1+N”政策体系的必要性

国际经验表明,双碳转型在各国并没有固定模式,最优转型路径取决于国家资源禀赋、产业水平、民众认识等诸多因素。

1.美国经验是开拓非常规资源,例如通过政府扶持和技术创新方式推动页岩气革命,多能协同发展。2017年、2019年美国成为LNG和能源净出口国,实现能源自主。美国通过页岩气大规模替代煤电以实现低成本转型<sup>①</sup>。

2.欧盟经验在于大力推广可再生能源终端应用,优先大幅提高电力部门可再生能源比例。欧盟新能源政策设定较激进的占比目标,并以法令形式严格推进落实,各国新能源占比均较高,应用技术也相对成熟高效。但欧盟模式也产生电价高企、成本安全矛盾难解的一系列问题。可再生能源过高比例接入冲击电网稳定性,火电调峰需求激增。储备调峰能力带来额外成本,2020年西欧电价水平在美国电价两倍以上。

3.日本经验在于“技术立国”,垄断核心技术提升国际竞争力。日本在多个能源科技领域领先全球,蓄电池方面,根据日本Patent Result公司数据,日本企业蓄电池专利优势明显,丰田汽车遥遥领先。氢能方面,根据Astamuse公司2019年数据,日本在氢能相关技术海外专利申请数量位居第一,专利数量超过800件,是第二名德国的两倍以上。新能源装备方面,日本在10兆瓦以上风机整机设计组装、大型叶片等关键零部件、陆上大型风机主轴承、光伏电池逆变器关键组件方面有技术优势。日本实现技术发展主要依靠政府主导、产学研结合,推动重大科技领域研发创新;同时利用海外市场验证技术、降低成本,反哺国内。实际表现来看,日本新能源发电成本迅速下降,占比快速提升,正在递补福岛事故后核电留出的发展空缺。

对比欧美发达国家经验可以发现,中国能源产业转型模式选择需要解决能源“不可能三角”,即实现安全稳健、绿色低碳、经济高效多目标之间的短期协调权衡和长期协同优化。化石能源主导模式下,需要推动清洁能源的大规模替代并实现多能协同。考虑不同能源品种对成本和安全性的影响是建立面向零碳韧性能源系统的前提。技术优势可化解资源劣势,能源产业加速转型的持续动力来自技术创新。激进

<sup>①</sup>作者根据EIA数据库分析得到。

的可再生能源占比目标会激化经济性和安全性的矛盾,需结合资源、技术情况,提供金融稳定工具,为能源产业加速转型创造有利条件。

解决双碳转型中的“不可能三角”问题,须构建双碳“1+N”政策体系。根据世界银行2022年5月份最新报告<sup>[2]</sup>,目前运行的直接碳定价机制共计68种,其中36种为碳税,32种为碳排放交易体系(ETS)。2021年全球碳定价收入约达840亿美元,比2020年增长了近60%,首次超过碳税成为最大的碳定价机制。中国碳排放交易市场在2021年一经建立,就取代EU-ETS成为覆盖排放规模最大的碳排放交易体系,但交易价格、市场流动性等方面仍与EU-ETS存在较大差距。截至2022年4月1日,全球碳市场配额价格从1美元到100美元不等,覆盖排放范围从9%到80%不等。其中,欧盟碳市场(EU-ETS)配额价格从2021年中以来不断攀升,在2021年底一度超过100欧元/吨。常见减排工具分类如表1所示。

表1 常见减排工具分类

类别	减排工具
经济性工具	碳税、碳排放权交易机制、化石能源税、清洁能源税收减免、赠款、可再生能源补贴、化石能源补贴削减、抵消机制、研发投入、贷款担保
规制性工具	能效标准、可再生能源发电占比、零排放机动车占比、燃料排放标准、禁止使用SF <sub>6</sub> 、生物燃料含量要求、甲烷规制、土地使用控制
其他工具	信息披露、自愿协议、基础设施、政府技术采购政策、企业碳报告、金融审计

理论和实践经验已让各方认识到,单一碳定价政策无法激励能源系统的颠覆性技术创新,根据IPCC AR6报告评估<sup>[3]</sup>:

第一,碳定价经济性手段存在客观局限。碳定价能够有效促进低成本减排的实施。尽管碳排放交易和碳税的覆盖范围已升至全球二氧化碳排放量的20%以上,但覆盖范围和价格都低于大幅减排所需的水平。碳定价对采用成本较高的减缓方案影响有限,能源效率、城市规划和基础设施等对价格激励措施不敏感。补贴政策在提高能源效率,鼓励采用可再生能源和其他特定行业的减排选择方面是有效的辅助手段。

第二,规制性政策在实现部门减缓方面发挥着重要作用。规制在特定的应用中是有效的,通常得到更大的政治支持,但往往比价格工具在经济上代价更高。规制性政策工具的范围从规定合规的绩效标准到更严格的特定技术标准,大量证据表明规制性政策在部门应用中可实现有效减排。结合交易的绩效标准政策具有更高灵活性,在提高包括可再生能源占比、车辆能效、燃料效率、建筑和工业能源效率等方面很有效。技术标准近年来更多应用于针对化石能源、工业生产和产品的限制性淘汰政策。短期有效性相对明显,但是有可能会带来低效技术的锁定、阻碍低成本技术进步。基础设施的投资决策对减缓气候变化具有重要意义,因为它们会在很长一段时期内锁定排放轨迹。

第三,多样性工具和工具箱需要获得更多认识。信息和自愿项目可以促进减排效果。能效标签、能源审计、智能电表、碳标签、金融审计标准、公司信息披露可以弥补市场失灵和信息不对称,刺激自愿性减排行动和行为模式改变。减缓政策之间具有重叠和相互作用,针对性政策设计可增强其有效性。化石能源补贴政策70%集中在消费侧,到2030年,取消化石燃料补贴可以减少1%~10%的排放。电力领域存在大量交叉补贴,取消补贴政策可同时改善公共收入、调整收入分配、改善宏观经济。全面性、平衡性和一致性是政策组合的重要标准。中等水平的碳价政策辅以促进颠覆性技术创新和针对煤电的规制性政策能够更加有效促进面向零碳的长期转型。供给侧的技术创新促进政策与需求侧的消费行为调整相平衡能够产生更好的政策效果。政策目标一致性是政策组合的难点,政策的交互作用可能产生此消彼长的“水床(waterbed)”效应。

总体而言,政策工具对特定国家、部门和技术的减缓产生明显影响,在全球范围内避免几十亿吨规模排放。经济性政策工具和规制性政策工具具有不同但互补的作用。受减缓政策约束的全球温室气体排放份额迅速增加,但政策覆盖范围仍存在差距,许多政策的严格程度还不足以产生强有力的减缓成果。

## (二)双碳政策体系对管理科学的新挑战

构建面向双碳目标的多维政策体系,对管理科学研究提出新挑战。挑战在于如何在多重约束下面向多元目标进行动态优化,以形成长期可持续的转型动力机制。可以在政策的环境有效性、经济效率性、

收入分配效应、协同或负面效应、制度供给、长期转型潜力等不同维度理解政策研究问题。目前政策视野中存在研究缺失,由单一政策转为政策组合的基本背景来看,缺失表现为缺乏针对组合性政策混合使用所产生的综合效应和交互机制的事前模拟研究和事后评估。从双碳政策与其他社会经济政策关系来看,当前研究缺乏针对经济刺激、发展政策(涉及经济效率、收入分配、协同效应等多方面问题)与碳中和政策体系关系的研究。从全球化视角来看,缺乏针对国内政策体系与国际政策体系的交互机制、传导渠道与应对策略的系统性研究。从改革转型的渐进式发展来说,缺乏针对不受监管或监管不足的排放源(包括工业和非二氧化碳排放)的政策和一揽子计划。具体政策研究问题如表2所示。

表2 政策研究问题

问题	内涵
政策的环境有效性	时间和空间尺度上的减排效果
政策的经济效率性	减排的社会成本和收益的权衡
政策的收入分配效应	不同行业、区域、人群的福利效应的差异性
政策的协同效应或负面作用	对其他可持续发展目标的强化或削弱
政策的制度供给	政策执行的监管体系、政策效果的评估体系等
政策的长期转型潜力	带来长期可持续的转型

本文将科学领域需解决诸多关键问题提炼为以下三个方面:

1.多政策交互的效应识别与仿真,重点在于瞄准政策交互机制识别、多维政策仿真系统构建、政策异质性特征表征等开展深入研究,在安全、公平、经济零碳等多元视角下,面向多维度协同政策供给和差异化目标下的政策选择,提供可借鉴的事后评估与事前仿真。

2.微观特征识别与表征,重点在于突破宏观转型路径仿真与微观政策机制识别的不对称性,挖掘市场主体微观行为的动态关联与交互,研究微观特征在宏观层面的复杂性涌现。

3.转型风险应对的政策创新与仿真,重点在于挖掘碳中和转型过程中的整个经济系统的转型动态风险及其应对政策工具,刻画产业经济和金融市场对转型政策反馈作用。

## 二、构建双碳政策体系的关键科学问题

### (一)关键问题:多政策交互的效应评估与仿真

双碳政策研究的复杂性要求研究者充分运用事后评估与事前仿真两类方法论并相互补充增强。政策效应评估是对既有的政府政策或干预措施所产生的效果进行可靠评估。典型政策效应评估方法包括匹配法、差分法、断点回归法等。政策效应仿真是建立行为式及均衡关系描述经济变量之间的依存关系量化未来政策影响。典型的仿真方法包括可计算一般均衡(CGE)模型、动态随机一般均衡(DSGE)模型、基于主体的模型(ABM)等。政策效应评估与仿真分析对比如表3所示。

表3 政策效应评估与仿真分析的对比

方面	政策效应评估	政策效应仿真
研究目标	事后分析:定量评估政策好坏	事前分析:模拟情景进行预测
政策类型	关注微观政策居多	关注宏观政策居多
数据特点	微观数据	宏观数据
基本思想	利用处理组和控制组进行反事实模拟	约束条件下的最优化问题
理论框架	潜在结果框架;结构因果模型框架	新古典经济理论;凯恩斯主义宏观经济理论
主流模型	匹配法(直接匹配法/倾向得分匹配法) 双重差分法;断点回归法;合成控制法	可计算一般均衡模型;动态随机一般均衡模型 基于主体的计算宏观经济模型

#### 1. 政策效果评估

政策效果评估不仅是分析政策有效性的重要工具,更是优化仿真模型设定、提升模拟精度的重要手段。气候治理的多维政策交互特征,使得政策后验评估面临诸多困难。由于双碳政策体系涉及多处理变

量处理,给政策的事后评估带来较大难度:观察到的结果可能是由于多种政策同时作用得到,如为达到某项经济目标,政府往往制定“一揽子”政策措施,在多项政策同时实施的情况下评估政策影响,需要将各政策效应有效分离。若忽略同期实施的其他重要政策而单一评估目标政策,结果将存在偏误。常用的政策评估方法基于因果关系推断构建,包括双重差分(Difference-in-Differences, DID)、断点回归设计(Regression Discontinuity Design)等计量方法。Lin和Zhu<sup>[4]</sup>利用中国144个国家的城市面板数据,使用DID方法探究了减排政策对于城市的可持续发展,研究表明减排政策可以使得城市生态效率得到改善,但政策效果通常在实施三年后才会显现;Yu和Zhang<sup>[5]</sup>通过匹配后的双重差分模型发现中国的产业转移政策带来了470~490万吨的碳排放降低。断点回归在空间区域性政策评估中应用广泛,He等<sup>[6]</sup>采用中国水质监测系统中隐含的断点回归,监测站设置会鼓励地方政府对监测站上游而非下游的企业实施更严格的环境法规。目前改进思路和待拓展问题体现在以下四个方面:

第一,基于差分法思想的相关方法,例如三重差分法。例如Chabé-Ferret和Subervie<sup>[7]</sup>考察了法国多项农业环境政策——多样性种植补贴、转种有机作物补贴等对农作物种植的影响。该方法的限制与局限性在于仅能针对两种政策的效果进行评估,难以用于在两种以上的政策情景。部分研究在分离两政策的处理效应时选择了不同的控制组和处理组,让处理效应估计实际上并不具有可比性。

第二,基于合成思想的相关方法。Fujiki和Hsiao<sup>[8]</sup>基于一种分离双重处理效应的面板数据方法,针对个体先后受到两类不同处理影响的情况,用以将两种处理的影响分离开来,分离了大地震和经济结构变化对兵库县经济的影响,发现是经济结构而非地震导致了兵库县经济的持久衰退。该方法的限制与局限性在于要求两种处理的影响时长是不一样的,因此无法解决两种处理自始至终同步影响时处理效应的分离。同时,该方法的前提假设是处理组和控制组的基线潜在结果的关系式保持不变,而这个假设无法验证,且当时间较长时该假设的合理性值得商榷。

第三,基于匹配思想的相关方法。Imai和Van Dyk<sup>[9]</sup>提出的 $P$ -函数可适用于多维处理变量的平均处理效应的识别和估计,而多维处理变量实际上对应着多项政策同时实施时的情况。该方法的限制与局限性在于上述方法中对于处理效应的各部分构成同等对待,计算效应时未设置权重仅简单相加。且基于 $P$ -函数的分层法以及基于所定义距离函数的多种匹配算法,均无法突破多处理变量情况下采用针对高维协变量的分层法及匹配法的诸多缺陷。

第四,基于大数据与机器学习的相关方法。近年来,随着大数据分析方法的快速成熟,基于大数据和机器学习的因果推断有望成为传统计量方法的有益补充。Zhu等<sup>[10]</sup>从产业结构和能源结构调整的角度出发,提出了一种基于混合核函数的最小二乘支持向量机,并采用马尔可夫链模型和情景分析法对产业结构和能源结构进行预测,同时使用情景分析法对GDP进行了预测;陈诗一和陈登科<sup>[11]</sup>使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发布的ERA-INTERIM栅格气象数据,结合大气数量模型构建了刻画空气流动性的空气流动系数变量作为雾霾污染的工具变量。从传统实证计量的内生性问题角度看,大数据为计量研究提供更多的工具变量和信息维度,使得在进行因果推断从而更灵活地进行因果推断和解决内生性问题中更加灵活。

## 2. 政策仿真

另一方面,理解多政策交互作用离不开仿真分析。其中,可计算一般均衡模型(CG E)是特别重要且潜力巨大的分析工具。CG E建立在投入产出关系基础上,有助于分析双碳政策对不同产业部门的结构性影响。CG E模型的主要优点在于通过建模捕获政策干预的完整机制,在没有历史数据的情况下亦可以构造反事实情景时进行情景模拟,并进行福利分析。但也要注意,CG E模型的新古典瓦尔拉斯一般均衡假设受到现代经济学的诸多挑战。模型关键性参数弹性设定的鲁棒性尚待检验,模型所需社会核算矩阵数据的时间和空间尺度难以进一步拓展,且与基于统计推断的实证证据联系不紧密。对CG E模型的假设和结论进行检验和推断是一项艰巨的挑战。CG E模型通常用于评估几乎没有或根本没有历史记录可用于直接实证检验的预期政策。大多数CG E应用探索国家或全球范围内政策干预的影响。在这种情况下,很难将政策干预的影响与经济中的其他背景事件隔离开来。CG E模型不像因果推断那样可以清楚地划分处理组和控制组。

CGE模型的改进思路和待拓展问题体现在模型的不确定性上,而模型改进促使CGE模型与ABM等其他仿真建模思路相链接。

第一是参数不确定性。模型抽象化和参数化设定能否准确刻画经济社会运行现实,存在不确定性。这种不确定性因CGE模型的“反事实”模拟特征而难以有效验证。张希良等<sup>[12]</sup>利用中国—全球能源模型(C-GEM),研究了碳中和愿景下中国能源经济转型的路径,并用概率分布法对转型路径的关键特征指标进行了不确定性分析。Montenegro等<sup>[13]</sup>在一个宏观经济耦合能源系统的模型中,研究了能源系统转型对地区收入分配的影响,并利用蒙特卡罗模拟验证了能源供需不确定性对模型结果的影响。相关改进有助于揭示模型模拟结果的稳健性,但无法指导模型优化,对于敏感性分析自身的可靠性也无法验证。参数较多且分布特征不明时,应用受限。待拓展方向是借助大数据分析、机器学习识别复杂系统中的逻辑关联,用以验证模型结果,并优化参数设定。

第二是情景路径不确定性。经济增长、技术演进、政策变化以及气候变化的影响等存在不确定性,不仅影响模型模拟结果,更会影响微观主体行为,改变系统运行逻辑。学界已经针对不确定性的不同来源进行大量探索研究。在政策不确定性方面,研究以预期收益作为低碳投资的驱动因素<sup>[14]</sup>;对于技术不确定性,研究重点是从经济风险最小化的出发,分析低碳政策的制定逻辑<sup>[15]</sup>。上述思路内生刻画不确定性对主体行为的影响,优化模型运行逻辑,拓宽模型维度。但对于微观主体行为的设定往往是静态的、统一的,缺乏微观基础。待拓展方向是引入异质性微观主体,差异化设定行为模式及其动态演变过程,分析碳价对不同家庭收入的影响和反馈,例如将Melitz异质性企业引入CGE模型,分析国际贸易与碳流动<sup>[16]</sup>。

第三是微观行为不确定性。微观主体异质性和不完全信息条件下,行为具有非理性、传导性、交互性,导致气候政策影响的宏观涌现具有不确定性。复杂系统仿真研究是目前气候政策评估和研究的重要方向,其中IAM是主流工具。但如前所述,现有主要基于新古典经济理论和代表性主体行为构建的模型体系,对于微观主体有限理性、异质性行为,以及不确定性的刻画都存在天然的短板。拓展思路是将“自上而下”的CGE与“自下而上”的ABM耦合链接。基于主体的建模技术模型(Agent-Based Modeling, ABM)刻画在给定环境下具有代表性的个体之间错综复杂的交互行为,允许解决异质性和社会互动问题,用一个自下而上的方式刻画系统,用于解释基于微观主体行为的集体涌现现象<sup>[17]</sup>。ABM模型对主体异质性、不确定性和主体的有限理性学习过程的刻画,对气候政策研究的IAM可以形成有效的补充。在碳中和政策仿真时,忽略主体异质性将难以描述实现“双碳”目标过程中可能出现的非均衡和突变现象,对政策效果形成有偏的解读。将ABM纳入气候政策仿真研究的需求由此而生。对于气候变化的ABM建模,主要包括家庭、企业两类主题,部分也分析金融机构和政府与企业、家庭的交互行为。家庭的异质性表现为对低碳商品的偏好和对气候变化的认知。Niamir等<sup>[18]</sup>分析了家庭的社会经济性质,通过心理学建模家庭对绿色投资的选择过程,直接影响到间接效用函数。Lamperti等<sup>[19]</sup>在凯恩斯—熊彼特创新模型的基础上,分析不同公司市场竞争地位的差异,及其对绿色技术创新潜在收益的影响,刻画绿色技术转型中的公司行为,其核心是讨论微观主体不完全信息下非理性决策和交互对低碳政策效果的影响。Wang等<sup>[20]</sup>研究了家庭对环境效益的认知差异对光伏系统选择的影响,结果显示这种认知效应对推广光伏的影响比光伏技术本身的环境效益更为重要。另一种常见的主体异质性是对公司进行建模。Kraan等<sup>[21]</sup>研究了发电资产配置、可再生能源技术的学习率等对异质性投资者回报率的影响。主体行为的建模方式也存在很大异质性。这类异质性来源于主体的有限理性,有限理性可以来自不完全信息,也可以来自决策过程的不完全优化。对于不完全优化的决策,一般是基于非凸优化的规则,例如阈值、惯性、模仿他人等规则<sup>[22]</sup>。

上述拓展思路为宏观模型构建了坚实的微观基础,能够有效捕捉到宏观政策渐进传导的过程。但微观主体行为设定高度参数化,难以验证。进一步发展方向是结合田野调查、大数据等多元化数据基础,优化行为特征识别,并引入ABM-CGE耦合模型提升模拟精度。目前已开展了一些CGE与ABM链接方法的研究,通过对异质性行为的精准刻画,实现了更好的模拟效果。

## (二) 关键问题:微观特征识别与表征

大数据发展对气候变化领域研究的微观特征识别表征给予更大的自由度和灵活性。由于大数据传达

更多有关环境、能源、气候与个体、社会互动的特征,因而基于大数据统计特征的理论建模具备更好的现实基础。文献研究表明,近年来能源环境领域更加关注政策实施的时空特征、个体特征和政策本身机制的差异性。无论是自上而下(Top-Down Model)、还是自下而上(Bottom-Up Model)以及综合评估模型(Integrated Assessment Model, IAM),这些先验模型(Ex-ante)的情景研究与基于经济学理论的后验性(Ex-post)理论和计量实证研究结果之间存在亟需弥合的鸿沟。政策评估模型基于最优化理论和一般均衡、局部均衡假设,近年来开始逐步考虑主体博弈、产业组织结构等的影响,但是尚有巨大发展空间。基于经济理论的数理模型对于市场行为、技术细节、政策机制等大量简化,由于数据的不可得性更多集中于对不同政策效果的比较研究,对实际政策实施过程的还原度仍然较低。大数据分析的优势能够与政策仿真模型形成互补,细化模拟颗粒度、增加数据维度、提升模拟精度,进一步推动理论体系继续深化,适应复杂政策体系和市场运行机制下的政策体系系统性模拟的需要。随着大数据的蓬勃发展,有越来越多的学者开始将其应用在气候变化的研究中。大数据对传统能源环境气候政策研究的创新主要有以下几点:

第一,拓宽数据来源,大数据由于其数据量大以及自动化采集等特点,能更准确、客观地反映真实经济情况。尤其是将非结构化数据转化为结构化数据,为传统环境经济研究提供更多的指代变量和研究方向。钱浩祺<sup>[23]</sup>将环境大数据分为宏观环境统计数据、微观环境数据、环境监测数据、卫星数据和异构数据五类,发现新形式的环境数据相比传统数据在时间频度和数据颗粒度上得到巨大提升,但仍存在信息种类较少、质量参差不齐的问题,有较大提升潜力。在不同大数据类型中,异构数据形式最多样、发展潜力最巨大。例如位置数据、文本数据、声音数据、图像或视频数据等不同的形式,往往以非结构化的形式存在,需要经过数据结构化处理过程才能用于研究。事实上卫星数据也属于异构数据的其中一类。邵帅等<sup>[24]</sup>使用空间计量方法考察了影响雾霾污染的因素,考虑到外界对中国国民经济统计数据真实性的质疑,其使用卫星监测的夜间灯光数据作为经济增长的代理变量。除了通过卫星数据识别经济发展情况、二氧化碳排放情况等应用外,利用当前互联网积累的海量信息挖掘认知信息是重要应用方向,因为气候转型的成功推进建立在社会共识基础上。Jang和Hart<sup>[25]</sup>使用Twitter数据分析了英国、加拿大、澳大利亚和美国各州对“气候变化”和“全球变暖”两个话题的关注程度差异,由此形成对个体政策认知和情绪的刻画。此外各大媒体平台发布的新闻标题、内容等新闻信息也可用于构造指标,例如用新闻内容衡量政策不确定性<sup>[26]</sup>。

第二,丰富对于微观主体特征的认识,重点在于行为主体交互机制。在个体行为层面,大数据分析可用于挖掘、影响个体及家庭碳足迹,例如通过电子账单、消费记录、出行记录等形成碳足迹数据,例如Andersson<sup>[27]</sup>创新性地采用财务交易数据计算个体碳足迹,Zhou<sup>[28]</sup>采用有限混合模型将商业楼宇用电分解到不同电器层面,更精确地反映空调、电梯等设备使用行为。进一步,可以对消费行为进行无监督聚类建模分析,结合人口统计、消费心理等外源数据对消费者进行画像<sup>[29]</sup>,并以APP消息等方式对消费者提供信息干预,引导绿色消费行为。Büchs<sup>[30]</sup>研究指出,尽管大量研究认为信息对个人减排行为不存在显著影响,但实证研究表明信息干预的确提高了参与者对于降低碳足迹的潜在方式的认知,基础设施、社会和心理障碍阻碍了认知转化为积极行动,但仍然证明如果政府、企业加强行动,个人减排行为具有较大潜力。

在社会治理层面,大数据分析有助于挖掘个体认知通过社交网络传播形成的社群行为规律。对于公众观点与态度认知,现有研究主要从政策态度、新技术接纳、能源选择、绿色金融市场情绪等几个视角,衡量社会公众的意向、反应和偏好。对于社交网络中人群行为与观点的相互影响,现有研究重点分析情绪、态度和观点沿社交网络的传播与扩散过程,偏重于对同伴效应(Peer Effect)的探讨。Loureiro和Alló<sup>[31]</sup>从Twitter消息中挖掘英国和西班牙民众对能源气候政策的感受和情绪。Reboredo和Ugolini<sup>[32]</sup>融合了NLP与VAR模型对Twitter情绪和Twitter情绪分歧进行建模,研究其对可再生能源股票回报、波动性和交易量的影响。在社会影响因果性层面,Wolske等<sup>[33]</sup>综述了同伴效应对能源投资、消费行为的影响,提出一个社会因素对能源决策产生影响的概念框架,用于理解分析社会因素效应何时会产生影响、何时面临局限。该领域待拓展的问题在于,对于气候、能源与环境的特征认知大多局限于现象的描述,

即利用大数据算法在特征提取与挖掘上进行优化改进,而缺乏对产生此类行为、现象的背后理论与机制的讨论,未来研究需要进一步建立其中的因果联系,例如规范性社会影响是否可作为同伴效应背后的机制,如何通过社交网络情感扩散进行行为干预的理论等。

### (三) 关键问题: 转型风险应对的政策创新与仿真

关键问题一和问题二更多关注研究方法论,关键问题三更多关注能源产业实际特征,重点在于如何进行能源市场工具创新,以识别、降低、应对双碳转型政策落地过程中的潜在风险。

第一,转型存在动力不足的风险,关键在于理顺激励机制,有效体现可再生能源的清洁性稀缺机制。代表性研究主要从固定上网电价(Feed-in-Tariff)、可再生能源发电补贴、可再生能源配额及交易机制、可再生能源绿证、碳排放抵消机制等体现对可再生能源清洁特性的定价。Meckling等<sup>[34]</sup>总结了可再生能源发展的政策演进规律(Policy Sequencing),欧美经历了从(1)产业初期培育政策,(2)FIT,(3)ETS、RP等政策工具组合三个阶段的演变。中国目前正从FIT向ETS、RP政策工具组合转变的过程之中,当务之急在于尽快建立新体系,应对现有多种减排技术路径产生的不确定性。FIT和RPS的直接影响包括提高可再生能源收益预期,扩大投资规模,鼓励技术创新<sup>[35-36]</sup>。该领域关键难点在于如何一方面充分发挥政策的直接积极作用(可再生能源发展),另一方面减低潜在不利影响(能源安全)。Newbery等<sup>[37]</sup>总结可再生能源激励政策对电力市场存在间接影响,降低电力批发市场价格(“优序效应”),冲击灵活性电源经营,降低火电企业技术创新和能效投资积极性。另一方面,伴随可再生能源技术成本下降,应考虑补贴退坡以及之后的电价政策衔接,例如对FIT或CfD进行拍卖<sup>[38-39]</sup>,或者通过RPS绿证交易,从而发现合理补贴水平。同时针对补贴拍卖价格可能过低以及补贴退坡之后投资激励下降的问题,英国等国家的新趋势是对无补贴海上风电设置长期购电协议(PPA),以稳定企业投资预期<sup>[40]</sup>。该领域突破方向在于解决中国目前从FIT向RPS转型过程中面临的挑战,厘清清洁电力使用价值和清洁价值的定价机制,探索电力市场、ETS和RPS的交互关系,以现货电力市场对实时使用价值定价,以绿证市场、碳抵消等对正外部性定价,同时研究长期购电协议、EU-ETS碳市场MSR机制等措施对市场预期的稳定作用。

第二,转型过程中的能源供应安全风险。重点在于两方面,其一是如何有效体现化石能源托底保供的稀缺价值,其二是如何实现化石能源补贴有效退坡。

关于体现化石能源保供稀缺价值,当前研究主要从“消失的钱”(Missing Money)、“消失的市场”(Missing Market)等角度强调化石能源在新型电力系统条件下的容量价值,突出对于发电容量和系统灵活性资源的定价与补偿。Mills等<sup>[41]</sup>总结了可再生能源发电的优序效应——低边际成本会压低市场价格,影响火电收益能力。Newbery<sup>[42]</sup>指出,优序效应、电价上限政策乃至市场设计对调节性资源补偿不足(即“消失的市场”问题)都会导致“消失的钱”(Missing Money)问题,导致火电企业收益降低以致破产关停,影响供电可靠性。该领域关键难点其一在于,容量定价机制在理论上尚未完全取得共识。一些批评认为容量定价是变相的化石能源补贴。其二,容量价值和灵活性资源价值取决于一系列市场前提条件,包括跨区域联网情况、碳定价机制发展情况、辅助服务市场建设情况等,而且发电企业在电力价格方面具有较高市场垄断势力,相应地让容量定价问题复杂化。设计者难以事前充分预期发电企业的市场盈利能力和策略,导致容量价格政策面临较强的不确定性,存在对化石能源的过度补贴风险。其三,发电企业在容量市场也存在市场垄断势力,损害容量市场发现真实容量价值的能力。下一阶段待拓展的研究问题可以从博弈视角出发,聚焦于设计更加激励相容的容量定价机制,推进理论探索,探索容量定价和碳定价机制、辅助服务定价机制的交互关系,通过多种政策工具解决、应对能源不可能三角问题。

关于实现化石能源补贴有效退坡,目前研究主要在化石能源补贴的规模测算、环境效应、经济效应和社会影响等方面展开,目前国际上对中国化石能源补贴的研究相对较少,关于电价改革是否将减少化石能源补贴值得进一步探索。根据IEA 2018年的测算,全球化石能源补贴是可再生能源补贴规模的两倍。Rentschler和Bazilian<sup>[43]</sup>综述了化石能源补贴在环境、经济和社会等方面的不利影响。而根据Coady等<sup>[44-45]</sup>研究,在化石能源补贴造成的扭曲中,超过75%是国内影响,因此减少化石能源补贴对于国内有利。该领域关键难点在于,其一,如何准确度量化石能源补贴水平并进行分类优化,类型包括直接补贴

和间接补贴、生产侧补贴和消费侧补贴等。在生产侧, Shapiro<sup>[46]</sup> 测算发现贸易补贴中隐含的化石能源补贴达到 5 500~8 000 亿美元/年, 甚至超过直接化石能源补贴规模 5 000 亿美元/年。值得一提的是, 笔者发现中国对外贸易中没有显著地隐含化石能源补贴。在消费侧, Coady 等<sup>[47]</sup> 指出发展中国家的化石能源补贴对高收入群体更有利。但由于取消化石能源补贴会普遍提高能源价格, 因此采取差异化的补贴措施(例如阶梯电价等交叉补贴政策)有助于保护低收入群体<sup>[48-49]</sup>。第二, 如何一方面取消不合理的补贴以促进可再生能源发展, 另一方面如何建立反映能源安全保供价值的市场机制, 重点考虑转变化石能源的收益模式, 比如对于火电更多通过容量价格而非电量价格来实现投资成本回收。下一阶段待拓展的研究问题可以在生产侧、消费侧两方面展开, 对于生产侧补贴, 重点分析其他领域补贴政策中隐含的间接补贴, 例如历史上针对特定用户的电价优惠政策; 消费侧补贴方面, 应考虑设计保护低收入群体的结构性价格政策, 在补贴退坡的同时兼顾民生目标。此外还应研究火电在市场化下的竞争效应和能效改进、发电容量价格机制等问题。

第三, 双碳政策工具箱中, 市场型工具是重要组成部分, 目前中国正在推进电力市场和全国碳市场建设。市场型工具有助于降低双碳转型成本, 但具有更高自由度, 会衍生出更加复杂的市场交互关系, 若市场机制运行不畅乃至失灵也可能造成更大成本, 因此研究重点是分析多市场之间的交互关系。代表性研究主要从电力市场对碳市场建设的重要意义、碳价向电力行业传导、电力市场与碳市场协同设计等角度, 分析电力市场与碳市场的互补互动关系。张希良等<sup>[50]</sup> 基于中国全国碳市场设计, 分析为什么电力市场改革对碳市场建设至关重要。Ellerman 等<sup>[51]</sup> 将碳配额价格向下游的高比例传导概括为电力部门的“意外利润”(Windfall Profits)。Fabra 和 Reguant<sup>[52]</sup> 发现电力行业出现碳价高比例传导的根源在于电力需求缺乏价格弹性。关键难点在于发电企业有较高碳价传导能力(Pass-Through), 或损害碳定价对发电能效进步的直接激励作用。该领域难点在于电力需求缺乏价格弹性而电力部门市场份额较为集中。对于发展中国家而言, 电价则具有一定政策敏感性, 或成为碳市场约束收紧的阻力来源。Burgess 等<sup>[53]</sup> 指出, 发展中国家将使用电力视为民众的基本权利, 电价与民生问题高度相关, 导致政府倾向于出台扭曲性的低电价政策。此研究对于中国碳市场收紧约束具有启示意义, 短期内收紧免费配额或引起电价上涨压力。未来待拓展问题包括研究碳市场对发电行业的实际减排效果和影响渠道(产量降低、能效提升、燃料替代等), 探索基于绩效标准的 Rate-Based 碳市场模式与中国全国统一电力市场的结合与互动规律, 以及探索能源转型政治经济学分析, 将转型目标和民生目标、官员激励纳入分析框架。

第四, 长期转型要求金融部门加以配合, 重点在于如何解决气候投融资的风险管理问题。传统的能源投资和资产组合在很大程度上忽略考虑气候变化的影响, 尤其是物理风险和转型风险。一方面, 资产组合忽视气候变化引起的自然灾害冲击; 另一方面, 投资被分配到与气候目标转型不一致的经济活动中, 因此传统模型通常低估气候变化应对的资产风险, 需要发展气候变化应对的能源金融风险评估模型。研究进展包括气候变化的物理风险冲击<sup>[54]</sup>、气候风险的损失函数<sup>[55-56]</sup>、能源和碳密集型行业的企业资产搁浅风险<sup>[57-59]</sup>、不同资产类别的气候风险敞口指标<sup>[60-61]</sup>、气候变化风险对金融体系稳定的影响<sup>[62]</sup>。关键难点在于气候变化风险及其影响具有非线性、非正态分布特征, 在中长期层面存在较大不确定性, 例如可能出现尾部事件、引爆点和多米诺效应等问题。下一阶段待拓展研究问题是增强气候变化金融风险的前向长期预测, 完善复杂性建模研究, 尤其是气候变化应对中的不完全信息和有限理性决策问题, 充分结合微观数据和大数据方法, 从关注投资需求总量到关注投资的结构和生命周期。

### 三、结论

总结构建双碳转型政策的必要性和科学挑战, 本文提出管理科学在政策体系设计中面临的三方面关键问题: (1) 多政策交互的效应评估与仿真, (2) 微观特征识别与表征, (3) 转型风险应对的政策创新与仿真。对于多政策交互的政策效应评估和仿真, 首先应完善实证评估方法, 因为理论需要通过实证加以检验, 而实证评估结果也对仿真分析形成支撑。未来一方面可以对差分、合成、匹配方法在多维处理变量层面进行拓展, 另一方面应利用机器学习技术在分析高维问题和新型数据方面的优势, 对传统因果推断方法形成补充。其次是完善事前仿真分析工具, 应对 CGE 等模型方法在参数、情景路径、微观行

为特征方面面临的不确定性,考虑将CGE与基于复杂性建模思想的ABM等模型进行链接,将微观主体异质性、不完全信息等因素纳入传统宏观模型。对于微观特征识别与表征,重点是借助大数据应用发展,拓宽数据来源,其中额外重要的是非结构化的新型数据。当前能源气候领域大数据仍存在质量参差不齐、信息类型不足等诸多问题,需要更多跨学科领域的交叉研究。利用数据优势,未来应丰富对微观主体特征的认识,研究视角包括个体行为层面和人群及社会治理两个层面。转型风险应对的政策创新与仿真,重点是解决能源产业与金融政策中面临的具体风险,其一是转型动力不足的风险,体现在可再生能源激励机制以及补贴退坡(平价上网)后的投资激励手段;其二是转型过程中能源供应安全风险,问题体现为有效体现化石能源托底保供稀缺价值以及实现化石能源补贴有效退坡;其三是市场型转型激励工具的复杂交互关系,体现为电力市场与碳市场之间、碳市场与规制性工具之间的交互作用;其四是气候投融资的风险,体现在将物理风险和转型造成资产搁浅的风险定量纳入资产定价和投资组合决策中,构建合理测度指标辅助投资决策,提高金融体系在双碳转型中的稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 国际能源署可持续发展、技术与展望司能源技术政策处. 中国能源体系碳中和路线图[R]. 巴黎: 国际能源署, 2021.
- [2] World Bank. State and trends of carbon pricing 2022[R]. Washington, DC: World Bank, 2022.
- [3] IPCC. Climate change 2022: mitigation of climate change. contribution of working group III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Geneva: IPCC, 2022.
- [4] LIN B, ZHU J. Impact of energy saving and emission reduction policy on urban sustainable development: empirical evidence from China[J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 12–22.
- [5] YU Y, ZHANG N. Does industrial transfer policy mitigate carbon emissions? evidence from a quasi-natural experiment in China [J/OL]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 307: 114526. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479722000998>.
- [6] HE G, WANG S, ZHANG B. Watering down environmental regulation in China[J]. *Quarterly Journal of Economics*, 2020, 135 (4): 2135–2185.
- [7] CHABE-FERRET S, SUBERVIE J. How much green for the buck? estimating additional and windfall effects of French agro-environmental schemes by DID-matching[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2013, 65 (1): 12–27.
- [8] FUJIKI H, HSIAO C. Disentangling the effects of multiple treatments: measuring the net economic impact of the 1995 great Hanshin-Awaji earthquake[J]. *Journal of Econometrics*, 2015, 186 (1): 66–73.
- [9] IMAI K, VAN DYK D A. Causal inference with general treatment regimes: generalizing the propensity score[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 2004, 99 (467): 854–866.
- [10] ZHU B, YE S, JIANG M, et al. Achieving the carbon intensity target of China: a least squares support vector machine with mixture kernel function approach[J]. *Applied Energy*, 2019, 233: 196–207.
- [11] 陈诗一, 陈登科. 雾霾污染, 政府治理与中国经济高质量发展[J]. *经济研究*, 2018 (2): 20–34.
- [12] 张希良, 黄晓丹, 张达, 等. 碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J]. *管理世界*, 2022, 38 (1): 35–66.
- [13] MONTENEGRO R C, FRAGKOS P, DOBBINS A H, et al. Beyond the energy system: modeling frameworks depicting distributional impacts for interdisciplinary policy analysis[J/OL]. *Energy Technology*, 2021. [https://www.researchgate.net/publication/345943596\\_Beyond\\_the\\_Energy\\_System\\_Modeling\\_Frameworks\\_Depicting\\_Distributional\\_Impacts\\_for\\_Interdisciplinary\\_Policy\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/345943596_Beyond_the_Energy_System_Modeling_Frameworks_Depicting_Distributional_Impacts_for_Interdisciplinary_Policy_Analysis).
- [14] LIU L, CREUTZIG F, YAO Y, et al. Environmental and economic impacts of trade barriers: the example of China–US trade friction[J/OL]. *Resource and Energy Economics*, 2020, 59: 101144. <https://ideas.repec.org/a/eee/resene/v59y2020ics0928765519301745.html>.
- [15] DUAN H, MO J, FAN Y, et al. Achieving China's energy and climate policy targets in 2030 under multiple uncertainties[J]. *Energy Economics*, 2018, 70: 45–60.
- [16] BEKKERS E, FRANCOIS J. A parsimonious approach to incorporate firm heterogeneity in CGE-models[J]. *Journal of Global Economic Analysis*, 2018, 3 (2): 1–68.
- [17] CASTRO J, DREWS S, EXADAKTYLOS F, et al. A review of agent - based modeling of climate - energy policy[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2020, 11 (4): 647.
- [18] NIAMIR L, IVANOVA O, FILATOVA T. Economy-wide impacts of behavioral climate change mitigation: linking agent-based and computable general equilibrium models[J/OL]. *Environmental Modelling & Software*, 2020, 134: 104839. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815220308963>.
- [19] LAMPERTI F, DOSI G, NAPOLETANO M, et al. Climate change and green transitions in an agent-based integrated assessment

- model[J/OL]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 153: 119806. [https://econpapers.repec.org/article/eeetefoso/v\\_3a153\\_3ay\\_3a2020\\_3ai\\_3ac\\_3as0040162518312460.htm](https://econpapers.repec.org/article/eeetefoso/v_3a153_3ay_3a2020_3ai_3ac_3as0040162518312460.htm).
- [20] WANG G, ZHANG Q, LI Y, et al. Policy simulation for promoting residential PV considering anecdotal information exchanges based on social network modelling[J]. *Applied Energy*, 2018, 223: 1–10.
- [21] KRAAN O, KRAMER G J, NIKOLIC I. Investment in the future electricity system: an agent-based modelling approach[J]. *Energy*, 2018, 151: 569–580.
- [22] LAMPERTI F, DOSI G, NAPOLETANO M, et al. Climate change and green transitions in an agent-based integrated assessment model[J/OL]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 153: 119806. [https://econpapers.repec.org/article/eeetefoso/v\\_3a153\\_3ay\\_3a2020\\_3ai\\_3ac\\_3as0040162518312460.htm](https://econpapers.repec.org/article/eeetefoso/v_3a153_3ay_3a2020_3ai_3ac_3as0040162518312460.htm).
- [23] 钱浩祺. 环境大数据应用的最新进展与趋势[J]. *环境经济研究*, 2020, 5(4): 152–180.
- [24] 邵帅, 李欣, 曹建华, 等. 中国雾霾污染治理的经济政策选择: 基于空间溢出效应的视角[J]. *经济研究*, 2016, 51(9): 73–88.
- [25] JANG S, HART P S. Polarized frames on “climate change” and “global warming” across countries and states: evidence from twitter big data[J]. *Global environmental change*, 2015, 32: 11–17.
- [26] BAKER S R, BLOOM N, DAVIS S J. Measuring economic policy uncertainty[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 2016, 131(4): 1593–1636.
- [27] ANDERSSON D. A novel approach to calculate individuals’ carbon footprints using financial transaction data: app development and design[J/OL]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120396. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620304431>.
- [28] ZHOU Y, SHI Z, SHI Z, et al. Disaggregating power consumption of commercial buildings based on the finite mixture model[J]. *Applied Energy*, 2019, 243: 35–46.
- [29] SAGAWA A, FUNK B, NIEMEYER P. Modeling the intention to use carbon footprint apps[M/OL]//*Information Technology in Environmental Engineering*. [https://ideas.repec.org/h/spr/prbchp/978-3-319-25153-0\\_12.html](https://ideas.repec.org/h/spr/prbchp/978-3-319-25153-0_12.html).
- [30] BUCHS M, BAHAJ A B S, BLUNDEN L, et al. Promoting low carbon behaviours through personalised information? long-term evaluation of a carbon calculator interview[J]. *Energy Policy*, 2018, 120: 284–293.
- [31] LOUREIRO M L, ALLO M. Sensing climate change and energy issues: Sentiment and emotion analysis with social media in the UK and Spain[J/OL]. *Energy Policy*, 2020, 143: 111490. <https://ideas.repec.org/a/eee/enepol/v143y2020ics0301421520302366.html>.
- [32] REBOREDO J C, UGOLINI A. The impact of twitter sentiment on renewable energy stocks[J]. *Energy Economics*, 2018, 76: 153–169.
- [33] WOLSKE K S, GILLINGHAM K T, SCHULTZ P. Peer influence on household energy behaviours[J]. *Nature Energy*, 2020, 5(3): 202–212.
- [34] MECKLING J, STERNER T, WAGNER G. Policy sequencing toward decarbonization[J]. *Nature Energy*, 2017, 2(12): 918–922.
- [35] COUTURE T, GAGNON Y. An analysis of feed-in tariff remuneration models: implications for renewable energy investment[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(2): 955–965.
- [36] SCHMALENSEE R. Evaluating policies to increase electricity generation from renewable energy[J/OL]. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2020. <https://ideas.repec.org/p/mee/wpaper/1108.html>.
- [37] NEWBERY D, POLLITT M G, RITZ R A, et al. Market design for a high-renewables European electricity system[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 91: 695–707.
- [38] EBERHARD A, KABERGER T. Renewable energy auctions in South Africa outshine feed-in tariffs[J]. *Energy Science & Engineering*, 2016, 4(3): 190–193.
- [39] MARTIN H, CORONAS S, ALONSO À, et al. Renewable energy auction prices: near subsidy-free?[J]. *Energies*, 2020, 13(13): 3383.
- [40] JANSEN M, STAFFELL I, KITZING L, et al. Offshore wind competitiveness in mature markets without subsidy[J]. *Nature Energy*, 2020, 5(8): 614–622.
- [41] MILLS A D, LEVIN T, WISER R, et al. Impacts of variable renewable energy on wholesale markets and generating assets in the United States: a review of expectations and evidence[J/OL]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 120: 109670. <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v120y2020ics1364032119308755.html>.
- [42] NEWBERY D. Missing money and missing markets: reliability, capacity auctions and interconnectors[J]. *Energy Policy*, 2016, 94: 401–410.
- [43] RENTSCHLER J, BAZILIAN M. Reforming fossil fuel subsidies: drivers, barriers and the state of progress[J]. *Climate Policy*, 2017, 17(7): 891–914.
- [44] COADY M D, PARRY I, SEARS L, et al. How large are global fossil fuel subsidies?[J]. *World Development*, 2017, 91: 11–27.
- [45] COADY M D, PARRY I, LE N P, et al. Global fossil fuel subsidies remain large: an update based on country-level estimates[M]//Washington: International Monetary Fund, 2019.

- [46] SHAPIRO J S. The environmental bias of trade policy[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 2021, 136 ( 2 ) : 831–886.
- [47] COADY M D, FLAMINI V, SEARS L. The unequal benefits of fuel subsidies revisited: evidence for developing countries[M]// Washington:International Monetary Fund, 2015.
- [48] DENNIS A. Household welfare implications of fossil fuel subsidy reforms in developing countries[J]. *Energy Policy*, 2016, 96: 597–606.
- [49] SCHAFFITZEL F, JAKOB M, SORIA R, et al. Can government transfers make energy subsidy reform socially acceptable? a case study on ecuador[J/OL]. *Energy Policy*, 2020, 137: 111120. <https://ideas.repec.org/p/adb/brikps/9674.html>.
- [50] 张希良, 张达, 余润心. 中国特色全国碳市场设计理论与实践 [J]. *管理世界*, 2021, 37 ( 8 ) : 80–95.
- [51] ELLERMAN A D, MARCANTONINI C, ZAKLAN A. The European Union emissions trading system: ten years and counting[J/OL]. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2020.[https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=be4a28bd3c80adee9898dcdedb616cf&sitexueshu\\_se](https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=be4a28bd3c80adee9898dcdedb616cf&sitexueshu_se).
- [52] FABRA N, REGUANT M. Pass-through of emissions costs in electricity markets[J]. *American Economic Review*, 2014, 104 ( 9 ) : 2872–2899.
- [53] BURGESS R, GREENSTONE M, RYAN N, et al. The consequences of treating electricity as a right[J]. *Journal of Economic Perspectives*, 2020, 34 ( 1 ) : 145–169.
- [54] BURKE K D, WILLIAMS J W, CHANDLER M A, et al. Pliocene and eocene provide best analogs for near-future climates[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115 ( 52 ) : 13288–13293.
- [55] ADDOUM J M, NG D T, ORTIZ-BOBEA. Temperature shocks and industry earnings news[J/OL]. Available at SSRN 3480695, 2021. [https://www.researchgate.net/publication/337537897\\_Temperature\\_Shocks\\_and\\_Industry\\_Earnings\\_News](https://www.researchgate.net/publication/337537897_Temperature_Shocks_and_Industry_Earnings_News).
- [56] CORONESE M, LAMPERTI F, KELLER K, et al. Evidence for sharp increase in the economic damages of extreme natural disasters[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116 ( 43 ) : 21450–21455.
- [57] HONG H, LI F, XU J. Climate risks and market efficiency[J]. *Journal of Econometrics*, 2019, 208 ( 1 ) : 265–281.
- [58] BANSAL R, KIKU D, OCHOA M. Price of long-run temperature shifts in capital markets[R/OL]. 2016. [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2827447](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2827447).
- [59] BOLTON P, KACPERCZYK M T. Do investors care about carbon risk?[J/OL]. 2020. <https://ideas.repec.org/p/nbr/nberwo/26968.html>.
- [60] DIETZ S, BOWEN A, DIXON C, et al. “Climate value at risk” of global financial assets[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6 ( 7 ) : 676–679.
- [61] BATTISTON S, MANDEL A, MONASTEROLO I, et al. A climate stress-test of the financial system[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7 ( 4 ) : 283–288.
- [62] BATTISTON S, DAFERMOS Y, MONASTEROLO I. Climate risks and financial stability[J/OL]. *Journal of Financial Stability*, 2021, 54: 100867. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1572308921000267>.

## Dual Carbon Oriented Energy Industry and Financial Policy System Design

WU Libo, MA Rong

( School of Economics, Fudan University, Shanghai 200433, China )

**Abstract:** The low-carbon transformation of global energy sector continues to deepen, and technological innovation and technological competition continue to heat up. The dual carbon transformation is not only a historic opportunity for China to fulfill the responsibility of a big country, realize technological and industrial upgrading, and realize control over national energy security, but also a huge challenge to the traditional energy system dominated by fossil energy. The energy transformation process faces the “Impossible Triangle” problem of multi-objective trade-offs of greenness, economic efficiency and security requirement for a long time. Therefore, it is necessary to build a “1+N” dual carbon policy system to overcome the limitations of a single emission reduction policy. The construction and improvement of the “1+N” policy system needs to grasp its internal characteristics: multi policy interaction, rich micro characteristics of the participants, and complex transformation risks. Grasping the internal characteristics is the key to the construction of the policy system. This paper summarizes the research progress in key problem areas. According to the two main methodological lines of policy empirical evaluation and policy simulation, it is proposed that only through the combination of ex post evaluation and ex ante simulation, and the combination of traditional methods and the new approaches such as big data, can we better build and improve the dual carbon “1+N” policy system, and promote the smooth realization of the huge changes faced by China's social economy in the process of dual carbon transformation.

**Keywords:** dual carbon transformation; energy policy; financial policy; policy interaction; micro behavior; transformation risk

[ 责任编辑: 孟青 ]