

化石能源回弹效应与碳排放权交易政策的 调节作用*

——基于生产网络内生调整视角

陈占明 陈子豪 马健洪

内容提要:能源回弹效应是影响能效提升实际节能效果的核心因素,本文从生产网络内生调整视角研究化石能源回弹效应和全国碳排放权交易市场的潜在影响。通过构建引入碳排放权交易政策与能源效率的生产网络一般均衡结构模型刻画理论传导机制,并结合中国投入产出数据校准模型进行量化分析,研究发现:(1)部门能效提升在生产网络中产生超出部门本身的宏观影响,通过结构效应和规模效应引起回弹现象,价格传导与经济结构内生调整在过程中发挥核心作用;(2)碳排放权交易政策通过扩大成本冲击和改变网络结构特征系统影响能效冲击传导并改变回弹效应;(3)生产网络结构和低替代弹性特征使得中国化石能源回弹效应表现出明显的“超级节能”现象,碳排放权交易政策提高回弹效应从而弱化了节能效果,各部门结构特征差异导致明显的异质性结果。本文研究表明,在推动重点领域化石能源利用效率提升并充分利用回弹“溢出”效应的同时,通过配套政策调控碳排放权交易政策的潜在影响,对于中国加速完善绿色转型政策体系、稳妥推进“双碳”目标落实具有战略意义。

关键词:回弹效应 碳排放权交易 化石能源 生产网络

一、引言

提升能源利用效率是应对气候变化的重要举措。对中国而言,尽管可再生能源发展迅速,但以煤炭为代表的传统化石能源占总能源消耗的80%以上,^①且在未来一段时期内仍将是主体能源(林伯强,2022;张贇懿等,2025)。高比例的化石能源在保障中国能源安全与稳定供应的同时,贡献了90%以上的表观碳排放(Ma et al., 2024)。因此,提升化石能源利用效率是当前阶段推动经济社会发展全面绿色转型、加速实现“双碳”目标的重要举措(张希良等,2022)。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》明确指出要强化化石能源清洁高效利用,深入实施节能降碳改造,加快经济社会发展全面绿色转型。此前,中国从技术创新和政策调控等多个维度协同推进化石能源效率提升(邵帅等,2022),通过推广清洁高效燃煤技术等高效技术设备加速重点行业节能改造。随着数字技术的蓬勃发展,能源管理体系加速数字化转型为提升化石能源利用效率注入新动能。然而,由于存在回弹效应(Rebound Effect),能源效率提升的实际节能效果可能受到更广泛的经济增

* 陈占明、陈子豪(通讯作者)、马健洪,中国人民大学应用经济学院,邮政编码:100872,电子信箱:chenzhanming@ruc.edu.cn,chenzh@ruc.edu.cn,majianhong@ruc.edu.cn。本文研究得到国家自然科学基金面上项目(72274206)的资助。作者感谢匿名审稿专家的宝贵建议。当然,文责自负。

① 数据来源:中华人民共和国国务院新闻办公室2025年11月发布的《碳达峰碳中和的中国行动》白皮书。

长、能源价格变动等因素的影响而偏离预期水平(Jevons, 1865;杨冕等,2022)。

与此同时,中国积极完善绿色转型政策体系,依托全国碳排放权交易市场建立健全市场化减排机制。碳排放权交易作为应对气候问题的核心政策工具,其重要性和价值正逐渐在全球各国的气候治理实践中得到体现。2011年开始,中国先后在深圳、上海、北京、广东、天津、湖北、重庆以及福建八省市启动碳排放权交易试点工作,并于2021年7月正式启动全国碳排放权交易市场,通过总量调控、市场配置加速减排目标落实,优化环境资源配置。作为全球温室气体覆盖规模最大的碳市场机制,全国碳排放权交易市场是中国积极参与全球气候治理、履行大国责任担当的重要体现。党的二十大报告和《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》等相关重要文件多次强调建设全国碳排放权交易市场的重要意义。2025年3月,钢铁、水泥和铝冶炼行业正式纳入碳排放权交易市场管理,全国碳排放权交易市场实现首次扩围。《中共中央办公厅、国务院办公厅关于推进绿色低碳转型加强全国碳市场建设的意见》明确提出要加快建设全国统一的碳市场,有计划分步骤扩大实施范围、扩展参与主体,到2027年实现全国碳排放权交易市场基本覆盖工业领域主要排放行业的目标。

全国碳排放权交易市场是推动绿色低碳发展的重大制度创新,其建设发展势必对经济社会产生深远影响(林鹏昇和李硕,2024)。已有研究系统探讨了碳排放权交易政策在降低碳排放(段玉婉等,2023)、促进产业结构转型(孙传旺等,2025)、缓解能源贫困(何可等,2023)等方面的可能影响。特别地,波特假说指出环境规制可能激励企业技术创新和提升效率(Poter & Linde, 1995;刘金科和肖翊阳,2022)。对中国碳市场建设的相关研究表明碳排放权交易试点政策增加企业研发资本与人员投入(曹翔和苏馨儿,2023)、提升企业绿色生产投入和技术创新产出(胡珺等,2023)、激励企业绿色创新(温慧愉等,2024),并可能通过生产网络产生创新溢出效应(余典范等,2023;屠西伟和张平淡,2025)。这些研究表明碳排放权交易政策对提升能源利用效率具有重要的意义(王欢欢和吴骁骏,2025)。然而,相关研究尚未充分考虑碳排放权交易政策对能效提升核心目标——能源节约的潜在影响。通过施加排放成本改变经济主体对化石能源效率提升的反应和能效冲击的传导过程,碳排放权交易政策可能干预能源回弹效应而对能效提升的实际节能效果产生潜在影响。

提升化石能源利用效率与建设全国碳排放权交易市场是推动中国经济社会全面绿色低碳转型的关键举措,在“双碳”目标背景下深入理解中国化石能源效率提升的回弹现象及其与碳排放权交易政策的交互机制,对于科学评估减排政策效果、完善绿色转型政策体系建设具有重要的理论与现实意义。为此,本文构建了包含碳排放权交易政策、能源效率和部门间生产网络的一般均衡结构模型,基于内生生产网络思想深入探究部门外生能效提升引起回弹效应的传导机制和碳排放权交易政策对能效冲击传导过程的调节作用。同时,基于中国经济数据校准模型,从理论与实证两个方面深化对中国化石能源回弹现象及其结构性来源的理解,厘清全国碳排放权交易市场对能效提升过程的外部性影响。

对回弹效应的关注起源于“杰文斯悖论”(Jevons Paradox),即技术进步带来的资源利用效率提升可能引起资源需求上升而非下降。回弹效应一般定义为能源效率提升预期节能量与实际节能量之差占预期节能量的比例(Sorrell & Dimitropoulos, 2008),其大小衡量预期节能效果被引起回弹的各种因素所抵消的程度,综合反映能源利用效率提升引起的经济系统主体行为变动。回弹效应因其重要的理论和政策价值成为学界持续关注重点议题。大量研究集中于对回弹效应的测度、形成机制分析与经济影响评估(Huntington, 2024)。就研究方法而言,依托计量方法估计回弹效应的研究大多以能源服务的效率弹性及其替代指

标识回弹效应(Sorrell & Dimitropoulos, 2008),但这种识别依赖于严格的假设且难以刻画回弹现象的传导机制(李海鹏等,2022)。作为测度回弹效应最常用的多部门分析模型,可计算一般均衡模型(CGE)提供了关于回弹效应整体幅度与不同渠道相对贡献的重要见解(Lutz et al., 2022)。然而由于模型求解过程的“黑匣子”特性(倪红福,2022),通常难以对回弹效应的实际传导机制进行深入探讨。为更好理解回弹效应的发生机制以有效调控其影响,一些研究通过构建宏观模型对回弹效应的传导机制进行探究(Böhringer & Rivers, 2021)。Lemoine(2020)构建了包含多种消费品和能源部门的一般均衡模型,并基于模型解析对能效提升的回弹效应进行清晰解释。然而,上述宏观模型对生产过程的刻画忽略了经济的生产网络结构,从而系统性低估了微观冲击的行业间溢出效应与宏观影响。

部门生产过程依赖初始投入要素和各种中间品投入。随着现代化经济体系的发展,部门间通过中间品投入产出关联形成的生产网络联系日益复杂(黄益平等,2024)。生产网络使得单一部门冲击不仅作用于部门自身,更会通过网络联系传导、扩散至其他部门,引起经济系统性变动并产生显著的宏观效应(Acemoglu et al., 2016)。Acemoglu et al.(2012)在Long Jr & Plosser(1983)等在早期研究基础上提出生产网络一般均衡分析框架以探讨微观冲击的宏观影响,通过系统引入中间品投入与多部门结构以真实刻画现代经济各部门间错综复杂的投入产出关联。生产网络一般均衡分析框架已逐渐发展为研究经济波动(黄益平等,2024)、产业政策(Liu, 2019;傅春杨等,2025)、财政政策(齐鹰飞和Li Yuanfei,2020)等诸多经典问题,以及供应链中断(Acemoglu & Tahbaz-Salehi, 2024)、服务业增长(程大中等,2024)、贸易关税(Baqae & Farhi, 2024)等热点问题的重要分析工具,成为当前宏观经济学领域的重要研究方向之一。相关研究揭示了生产网络联系在微观冲击传导扩散过程中的重要作用。得益于其在结构视角方面的独特优势,生产网络分析正日益成为理解中国经济转型的重要框架(刘维林,2022;聂海峰等,2025)。回弹效应本质上反映部门能源效率提升所引起的宏观经济总能耗降低对部门自身局部节能量的偏离,与生产网络分析关注微观冲击的宏观影响高度一致。本研究将生产网络分析方法应用于中国化石能源效率提升问题的探讨,为理解经济转型时期的中国化石能源回弹问题与绿色转型政策潜在影响提供新的见解。

本文拓展Blackburn & Moreno-Cruz(2021)的分析框架,将碳排放权交易政策引入模型,从内生生产网络视角理解化石能源回弹效应及碳排放权交易政策对回弹过程的影响。生产网络内生性是生产网络分析方法的纵深发展方向之一,相关研究从供应链搜寻匹配、投入技术选择等视角探究生产网络联系的内生形成机制与动态调整(Acemoglu & Tahbaz-Salehi, 2024)。在内生生产网络视角下,部门间网络结构随政策和经济主体行为的变化而调整,从而更加有效地刻画经济主体的行为决策,以及外生冲击或政策变动对经济主体最优选择与经济结构的影响(Acemoglu & Azar, 2020;王贤彬和郑希恬,2024)。本文将内生生产网络思想拓展至化石能源回弹效应分析,以深化对能效冲击传导过程的理解并准确刻画回弹效应传导机制。此外,本文进一步探讨碳排放权交易政策对化石能源回弹效应的系统性影响及其作用机制。

通过创新性地刻画价格网络和产出网络,本文进一步明确价格传导机制在能效冲击传导过程中的基础性作用,丰富了关于价格是生产网络冲击传导核心机制的认识(Acemoglu & Azar, 2020;余典范等,2023)。具体而言,本文将部门化石能源效率提升的回弹机制分解为结构回弹与规模回弹,并系统分析碳排放权交易政策对回弹过程的影响。研究表明,碳排放权交易政策施加的排放成本会干预化石能源效率提升时生产侧与消费侧的最优选择调整过程,通过扩大成本冲击与改变网络结构特征影响结构回弹和规模回弹过程,

并最终改变化石能源回弹效应。在生产网络内生调整视角下,化石能源回弹效应与碳排放权交易政策的调节效果内生于部门间价格、产出的相互关联与经济系统的结构调整过程,由经济系统的网络结构与替代弹性特征共同决定。

最后,本文结合中国经济数据校准模型,首次在反事实框架下识别量化了中国各部门化石能源效率提升的回弹效应与机制贡献,揭示了碳排放权交易政策对回弹效应的系统性影响及其所带来的隐性减排成本。量化结果表明,各部门化石能源回弹效应表现出“超级节能”特征,经济结构调整在回弹过程中发挥核心作用。碳排放权交易市场建设通过降低规模回弹、提高结构回弹,最终引起各部门化石能源回弹效应的普遍提高,进而削弱节能效果。其中,能源部门承担绝大部分节能损失。

本文的边际贡献主要有:(1)将碳排放权交易政策引入生产网络一般均衡分析框架,从生产网络内生调整视角,系统探讨化石能源效率提升的回弹效应与该过程中碳排放权交易政策的调节作用,进一步拓展了关于回弹效应的研究,同时丰富了理解环境规制政策外部性影响的研究思路,为多部门情境下探究政策冲击、技术进步的传导机制与交互影响提供基本的分析框架;(2)创新性地刻画生产网络结构中的价格网络和产出网络,进一步明晰生产网络中的冲击传导过程,丰富对内生生产网络和投入产出分析思想的理解;(3)基于投入产出数据与结构计量方法校准模型,提供关于中国化石能源回弹效应、传导机制及碳排放权交易政策外部性影响的实证量化结果,厘清其传导机制贡献与结构性来源。这不仅有效推进了生产网络分析方法与中国经济实践的结合与应用,而且加深了对中国经济回弹现象的认识,为针对性地设计与调控节能减排政策提供参考。

本文余下内容安排如下:第二部分构建结构模型并分析竞争均衡结果;第三部分从理论层面揭示部门化石能源效率提升的回弹效应机制与碳排放权交易政策的潜在影响;第四部分基于中国经济数据校准模型进行量化分析;第五部分为结论与政策建议。

二、模型构建

本研究通过引入碳排放权交易政策与能源效率拓展了经典的生产网络一般均衡结构模型(Acemoglu et al., 2016; Baqaee, 2018)。模型中存在代表性家庭、各部门代表性生产厂商以及政府三类经济主体。家庭提供包含劳动和资本等生产要素的初始投入要素以获取要素收入,并消费各部门产品获得效用(黄益平等, 2024)。本文关注外生能源利用效率提升的短期影响,假设初始投入要素总量恒定。^①代表性厂商使用中间品和初始投入要素进行生产。政府对初始投入要素征收固定税率的生产税并实施碳排放权交易政策,同时以一次总付形式将生产税收收入转移给家庭并保持收支平衡。本文假设厂商和家庭均为价格接受者,且初始投入要素自由流动(Acemoglu et al. 2016; 程大中等, 2024; 傅春杨等, 2025)。

(一)生产侧

假设经济中包含 N 个异质性产品部门($e, 2, \dots, N$),其中部门 e 代表化石能源产品部门,各部门生产活动由本部门代表性厂商进行。^②部门 i 使用初始投入要素 v_i 和中间投入品 x_{ji} ($j = e, 2, \dots, N$) 进行生产。各部门以利润最大化为目标进行生产,其生产函数为常数

^① 本文聚焦于短期的回弹效应传导机制分析与碳排放权交易政策的潜在影响,在短期内假设要素总量恒定相对合理。然而在长期,要素总量增长是回弹效应的重要成因之一(Böhringer & Rivers, 2021),同时资本设备等投入要素属性变动可能内生影响能源效率与回弹效应,将模型拓展至长期以纳入要素动态是后续重要的研究方向。

^② 为简化表述,后文统一使用“部门 i ”指代部门 i 代表性厂商的生产活动。

替代弹性(CES)形式,即:

$$y_i = \left[\eta_i \frac{1}{\sigma_i} v_i^{\frac{\sigma_i-1}{\sigma_i}} + \omega_{ei}^{\frac{1}{\sigma_i}} (\phi_{ei} x_{ei})^{\frac{\sigma_i-1}{\sigma_i}} + \sum_{j=2}^N \omega_{ji}^{\frac{1}{\sigma_i}} x_{ji}^{\frac{\sigma_i-1}{\sigma_i}} \right]^{\frac{\sigma_i}{\sigma_i-1}} \quad (1)$$

其中, σ_i 为部门 i 生产投入要素间的替代弹性, 参数 η_i 为部门 i 的初始投入要素密集度。参数 ω_{ji} 为部门 i 的中间品投入技术系数, 衡量部门 i 生产活动对部门 j 中间品的直接需求强度。各部门技术系数 ω_{ji} 描述经济系统中部门间通过中间品形成的直接联系, 构成基准经济系统的生产网络结构 (Acemoglu et al., 2016), 以 N 维方阵 Ω 表示 (矩阵第 j 行第 i 列元素为 ω_{ji})。特别地, 参数 ω_{ei} 衡量部门 i 对化石能源服务的直接需求强度。化石能源服务 $x_{ei} = \phi_{ei} x_{ei}$, 其中 ϕ_{ei} 为部门 i 生产过程中的化石能源利用效率。部门 i 化石能源利用效率提升体现为 ϕ_{ei} 的提高。对于给定的化石能源服务投入量, 能效提升使得部门化石能源实物投入需求降低, 从而实现节能。为刻画能效提升对各部门实物化石能源投入 x_{ei} 的影响, 构建基于实物化石能源投入的生产网络 Ω^* (Blackburn & Moreno-Cruz, 2021), 其元素 ω_{ji}^* 满足 $\omega_{ji}^* = \begin{cases} \phi_{ei}^{\sigma_i-1} \omega_{ei}, & j = e \\ \omega_{ji}, & j \neq e \end{cases}$ 。其中化石能源所在行各元素 ω_{ei}^* 反映部门 i 的实物化石能源投入系数, 而对于非化石能源中间投入品 ($j \neq e$) 所在行, 矩阵 Ω^* 与 Ω 元素相同。

考虑到我国初始投入要素市场存在的配置扭曲, 本文参考 Fu & Wang (2024) 和郭凯明 (2025), 在生产侧引入与初始投入要素相关的生产税。任意部门 i 使用初始投入要素 v_i 需向政府额外缴纳税金 $\tau_i w v_i$, 其中 τ_i 为外生给定的部门生产税税率, 当 $\tau_i < 0$ 时体现为初始投入的成本补贴; w 为内生决定的要素市场价格。除生产税之外, 要素市场不存在其他摩擦。由于初始投入要素在不同部门间自由流动, 因此不同部门间将形成统一的要素市场价格 w 。然而由于生产税税率的差异, 各部门使用初始投入要素的实际成本不尽相同。

目前, 全国碳排放权交易市场处于建设初期, 主要覆盖电力、水泥、钢铁等碳排放密集部门, 且配额分配以免费发放为主。碳排放权交易市场建设初期的免费配额发放有助于缓解企业短期压力, 帮助其更好适应碳排放约束制度。同时, 随着全国碳排放权交易市场的不断完善, 更多行业将逐步被纳入覆盖范围。为刻画碳排放权交易政策特征并更加有效贴合中国碳排放权交易政策实践,^① 假设任意部门 i 持有给定数量的免费配额 \bar{A}_i , 同时政府持有部分有偿配额 \bar{A}_c 。配额短缺企业购买配额实现清缴, 盈余企业在碳市场出售配额, 与政府共同构成配额供给方。在本文模型框架中, 初始免费配额的分配不影响企业边际决策 (Coase, 2013), 为此不失一般性地假设部门间免费配额配置由政策外生决定, 这种处理简化了对免费配额分配的细节探讨, 以聚焦于探讨碳排放权交易政策冲击对回弹效应的影响。结合国务院《碳排放权交易管理暂行条例》, 本文假设企业和政府将配额收益用于碳市场配套制度建设与运营维护支出。^②

① 《中共中央办公厅、国务院办公厅关于推进绿色低碳转型加强全国碳市场建设的意见》指出, 有序扩大全国碳排放权交易市场覆盖行业范围, 到 2027 年基本覆盖工业领域主要排放行业, 到 2030 年基本建成以配额总量控制为基础、免费和有偿分配相结合的全国碳排放权交易市场。

② 2024 年 2 月 4 日, 国务院公布《碳排放权交易管理暂行条例》。根据政策导向, 政府支出重点聚焦于碳市场的制度建设与运维管理, 具体涵盖交易全流程监管、登记结算等市场基础设施服务, 重点单位年度排放核查, 市场价格调控, 以及相关技术服务机构培育, 等等。企业支出则主要体现为遵从市场规制而产生的履约合规成本, 包括温室气体排放监测与核算的成本投入与委托服务支出, 参与配额登记与交易的费用支出以及企业内部碳资产管理的运营成本, 等等。这种处理简化对收益再分配的具体路径探讨, 同时确保了模型的宏观闭合, 使研究得以聚焦于碳价格信号的核心传导机制。

各部门代表性厂商根据其边际减排成本与市场碳价格内生决定其碳排放水平,并购买或出售其碳排放量与所持有的免费配额间的差额,这使得各部门厂商面临额外的碳排放成本或收益。此时,各部门代表性厂商的生产总成本为:

$$cost_i = wv_i + \sum_{j=e}^N p_j x_{ji} + \tau_i wv_i + p_A (E_i - \bar{A}_i) \quad (2)$$

其中 p_j 为各部门产品市场价格, $wv_i + \sum_{j=e}^N p_j x_{ji}$ 为初始投入要素与中间品的使用成本, $\tau_i wv_i$ 为相应的生产税成本。 E_i 为部门 i 代表性厂商的碳排放总量,其排放源于生产过程的化石能源使用 x_{ei} ,^①即 $E_i = \theta_{ei} x_{ei}$,其中 θ_{ei} 为部门 i 化石能源投入的直接排放系数,各部门化石能源使用方式的差异意味着直接排放系数存在部门差异,且这种差异体现相同碳价格下各部门化石能源投入面临的异质性额外成本。 $(E_i - \bar{A}_i)$ 为部门 i 超出免费配额以外的配额需求量, p_A 为市场碳价格,从而 $p_A (E_i - \bar{A}_i)$ 反映部门 i 碳排放量超出免费配额的额外成本(马广程等,2024)。当厂商实际碳排放水平低于持有的免费配额总量时,表现为配额盈余。由于一般均衡模型中价格均为相对价格,设定碳价格以化石能源价格 p_e 作为计价单位(King et al., 2019;王欢欢和吴晓骏,2025),即 $p_A = \zeta p_e$ 。本文通过外生参数 ζ 变化探究碳排放权交易政策对化石能源回弹效应的潜在影响(段玉婉等,2023),此时,代表性厂商在碳价格信号下内生调整其生产与排放活动,政府调整其设定的配额总量限制以实现对应碳价格水平上的配额市场出清。^②

(二)消费侧

经济中的消费行为由代表性家庭进行,假设家庭固定提供 \bar{V} 单位初始投入要素供应厂商生产活动使用并获得要素收入 $C = w\bar{V}$,均衡要素价格 w 由要素市场决定。除要素收入外,家庭获得来自政府的一次总付形式的生产税相关转移收入 $T = \sum_{i=e}^N \tau_i wv_i$ 。家庭在预算约束下消费各部门产品以最大化其效用。假设效用函数为常数替代弹性(CES)形式,即:

$$U(c_e, c_2, \dots, c_N) = \left(\sum_{i=e}^N \beta_i^\sigma c_i^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad (3)$$

其中, σ 为不同消费品间的替代弹性, β_i 为家庭对部门 i 产品的消费偏好参数。 c_i 为部门 i 产品的消费量。家庭预算约束为: $\sum_{i=e}^N p_i c_i = C + T$ 。

(三)竞争均衡

经济的竞争均衡由 $\mathbb{E} = \{\mathbf{p}, w, \mathbf{y}, \mathbf{V}, \mathbf{X}, \mathbf{c}\}$ 刻画,其中 N 维列向量 \mathbf{p} 为各部门产品均衡价格向量, w 为初始投入要素的均衡价格。对于一般均衡的价格体系,不失一般性地标准化 $w = 1$ (Acemoglu et al., 2016)。 \mathbf{y} 为各部门产出向量,对应各部门均衡初始投入要素向量 \mathbf{V} 与中间投入矩阵 \mathbf{X} 。代表性消费者在总收入约束下选择最优消费组合 \mathbf{c} 以最大化效用,各部门代表性厂商在生产技术约束下选择最优投入结构以最大化利润。产品市场、要素市场和配额市场均达到出清状态,即: $y_i = \sum_{j=e}^N x_{ji} + c_i (i = e, 2, \dots, N)$, $\bar{V} = \sum_{i=e}^N v_i$, 以及 $\sum_{i=e}^N E_i = \sum_{i=e}^N \bar{A}_i + \bar{A}_G$ 。政府的转移支付保持预算平衡,即: $T = \sum_{i=e}^N \tau_i wv_i$ 。

① 忽略水泥、电石等部门产品生产时的过程排放。根据 Ma et al.(2024)的数据,2020年中国表观碳排放中过程排放占比约8.27%。

② 这一处理基于 Weitzman(1974)的经典分析,即在完全信息和确定性模型框架下,价格目标和总量目标的环境规制政策具有内在一致性。这使得本研究有效聚焦于碳市场价格信号对经济系统的影响及其传导机制。

(四)均衡结果

本文余下部分参考 Baqaee(2018)和 Blackburn & Moreno-Cruz(2021)等研究,假设各部门具有一致替代弹性($\sigma_i = \sigma$),^①通过解析解系统揭示碳排放权交易政策对回弹效应的潜在影响及其传导机制。

1. 均衡价格

各部门产品均衡价格满足:^②

$$p_i = \left(\eta_i w_i^{1-\sigma} + \sum_{j=e}^N \omega_{ji}^* p_j^{1-\sigma} \right)^{\frac{1}{1-\sigma}}, \quad i = e, 2, \dots, N \quad (4)$$

其中 $w_i = (1 + \tau_i)$ 为部门 i 使用初始投入要素的实际成本价格。中间投入的成本价格 $p_{ji} = \begin{cases} (1 + \zeta\theta_{ei}) p_e, & j = e \\ p_j, & j \neq e \end{cases}$ 。各部门使用非化石能源投入 ($j \neq e$) 的实际成本价格为产品均衡市场价格,化石能源投入的使用面临碳成本 ($\zeta\theta_{ei} p_e$)。式(4)表明生产网络中各部门产品均衡价格为所有投入实际成本价格的加权平均值,不仅取决于初始投入要素密集度及其成本价格,还取决于部门自身与各部门的中间品关联及各中间品实际成本价格。

均衡产品价格的矩阵形式为: $\mathbf{p}^{1-\sigma} = \mathbf{\Gamma} + \mathbf{\Omega}_p^* \mathbf{p}^{1-\sigma}$, 其中 $\mathbf{p}^{1-\sigma}$ 代表对向量 \mathbf{p} 各元素进行 $(1 - \sigma)$ 维指数运算,向量 $\mathbf{\Gamma}$ 各元素为 $\eta_i w_i^{1-\sigma}$, 反映部门产品市场价格构成中的初始投入要素成本。定义 $\mathbf{\Omega}_p^*$ 为价格网络矩阵,刻画各部门产品价格的直接关联,其化石能源投入所在行各元素为 $\omega_{1-\sigma,ei}^* = (1 + \zeta\theta_{ei})^{1-\sigma} \omega_{ei}^*$ 。其他投入所在行的元素与生产网络矩阵 $\mathbf{\Omega}^*$ 相同。除直接联系外,部门产品价格还通过价格网络形成间接联系。为全面刻画生产网络中部门价格的完全联系,引入逆矩阵 $\mathbf{M}_p = (\mathbf{I} - \mathbf{\Omega}_p^*)^{-1}$, 其元素 $m_{1-\sigma,ij}$ 反映部门 i 与部门 j 通过价格网络形成的完全联系。此时各部门产品的均衡价格满足: $\mathbf{p}^{1-\sigma} = \mathbf{M}_p^* \mathbf{\Gamma}$ 。^③

2. 均衡产出

各部门均衡产出满足:

$$y_j = \sum_{i=e}^N (\omega_{-\sigma,ji}^* p_j^{-\sigma} p_i^\sigma y_i) + \beta_j p_j^{-\sigma} \frac{C + T}{p_h^{1-\sigma}}, \quad j = e, 2, \dots, N \quad (5)$$

其中, $\omega_{-\sigma,ji}^*$ 为局部产出网络矩阵 $\mathbf{\Omega}_y^*$ 的元素,^④其化石能源投入所在行各元素为 $\omega_{-\sigma,ei}^* = (1 + \zeta\theta_{ei})^{-\sigma} \omega_{ei}^*$, 其他行的元素与矩阵 $\mathbf{\Omega}^*$ 相同。 $p_h = \left(\sum_{j=e}^N \beta_j p_j^{1-\sigma} \right)^{\frac{1}{1-\sigma}}$ 为消费价格指数, $C + T$ 为家庭名义总收入。式(5)表明部门产出间的实际直接联系由 $\mathbf{\Omega}_y^*$ 和价格体系共同决定,化石能源效率提升等外生冲击不仅通过直接改变网络矩阵 $\mathbf{\Omega}_y^*$ 影响部门间产出联系,同时通过改变相对

① 该设定确保模型存在解析解,以充分刻画外生能效冲击与政策冲击在生产网络中的传导机制及其结构性影响因素(Liu & Tsyvinski, 2024)。此外,受限于弹性估计方法与数据,分部门的替代弹性估计存在较大困难(倪红福, 2022),生产网络相关的多部门研究普遍采用各部门一致替代弹性的模型设定(Blackburn & Moreno-Cruz, 2021; 程大中等, 2024)。这种简化并不实质性地影响机制分析,并能够更加清晰地刻画冲击传导机制及其影响因素。

② 模型相关推导详见本刊网站登载的附录。

③ 因篇幅所限,对均衡价格的进一步分析详见本刊网站登载的附录。

④ 将 $\mathbf{\Omega}_y^*$ 定义为局部产出网络,原因在于 $\mathbf{\Omega}_y^*$ 对部门产出关联的刻画并未纳入价格变动的影响,因此其仅提供了对产出关联的局部描述。在后文理论分析部分,我们定义了产出网络 $\bar{\mathbf{\Omega}}$, 描述考虑一般均衡价格时的部门产出关联,并进一步分析了二者间的差异。

价格体系对产出联系产生间接影响。进一步,部门均衡产出向量 \mathbf{y} 满足: $\mathbf{p}^\sigma \odot \mathbf{y} = \mathbf{M}_y \boldsymbol{\beta} (C + T) p_h^{\sigma-1}$ 。其中, \odot 为矩阵的哈达玛积(Hadamard Product),代表矩阵对应位置元素相乘;逆矩阵 $\mathbf{M}_y = (\mathbf{I} - \boldsymbol{\Omega}_y^*)^{-1}$,其元素 $m_{-\sigma,ij}$ 反映部门 i 与部门 j 通过局部产出网络形成的完全联系。^①

三、理论分析

在存在投入产出关联的经济体系中,部门层面的微观冲击将沿生产网络传导扩散,产生超出冲击部门本身的宏观影响(Acemoglu et al., 2016)。本研究重点考察不同部门外生化石能源效率提升冲击对经济整体化石能源消耗的影响,以此识别能效提升过程中的回弹效应。^② 本文将提升化石能源效率(ϕ_{ei})的部门称为源部门(Source Sector)。源部门 ϕ_{ei} 的提高直接降低其生产过程对实物化石能源的需求,并进一步通过网络关联传导扩散至各部门,改变经济整体化石能源需求并引起回弹效应。理论分析重点关注两方面内容:一是部门化石能源效率提升所实现的实际节能效果与回弹效应机制;二是在能效提升冲击下碳排放权交易政策对回弹效应的调节作用。

经济系统的均衡状态与冲击传导路径取决于经济的网络结构。为此,本部分首先对经济的网络结构特征进行刻画,并分析源部门能效提升对经济系统网络结构特征的影响。然后,进一步分析生产网络视角下能效提升的实际节能与回弹效应机制。最后,基于回弹效应机制分析,探究碳排放权交易政策如何影响能效提升冲击的传导过程及其对回弹效应的调节作用。

(一)网络特征刻画

均衡结果表明,在生产网络视角下各部门产品均衡价格由生产过程中隐含的初始投入要素价值所决定。隐含要素需求综合反映生产网络经济中部门的要素需求特征,本研究参考 Blackburn & Moreno-Cruz (2021) 对网络中心性的定义,并结合 Liu (2019) 对补贴和市场缺陷的处理,定义需求中心性(Demand Centrality): $\mathbf{D} = \mathbf{M}_p' \boldsymbol{\Gamma}$ 。向量 \mathbf{D} 中各元素反映部门作为要素需求方对初始投入要素的依赖程度,较大的需求中心性表明部门生产活动通过生产网络结构对初始投入要素的依赖程度较高。在生产网络经济中,任意部门 i 的需求中心性(D_i) 由其对初始投入要素的直接需求以及通过中间品投入产生的间接要素需求共同决定,如图 1(a) 所示。其投入产出含义为部门单位产出中所隐含的对初始投入的完全需求,即 $D_i = \eta_i w_i^{1-\sigma} + \sum_{j=e}^N \omega_{1-\sigma,ji}^* D_j$ 。

化石能源利用效率和碳价格等因素内嵌于矩阵 $\boldsymbol{\Omega}_p$ 而对各部门需求中心性产生潜在影响。改变某一部门初始投入要素需求的外生冲击在生产网络中传导扩散至经济整体,改变各部门投入结构并引起需求中心性变动。任意部门需求中心性的下降反映其生产过程对初始投入要素的依赖程度减弱,在生产网络视角下这种变化综合反映经济系统整体的投入结构变动。对于标准化的要素价格,均衡价格满足 $\mathbf{p}^{1-\sigma} = \mathbf{D}$,需求中心性的变动引起部门产品均衡价格水平的变化。

^① 因篇幅所限,对均衡产出结果的解读详见本刊网站登载的附录。

^② 尽管本文在分析中聚焦于化石能源的回弹效应,但是通过调整能源投入直接排放系数 θ_{ei} 的参数设置,相关分析能够有效推广至非化石能源($\theta_{ei} = 0$)或者总能源(θ_{ei} 为化石能源与非化石能源直接排放系数的加权平均值)的回弹效应分析。

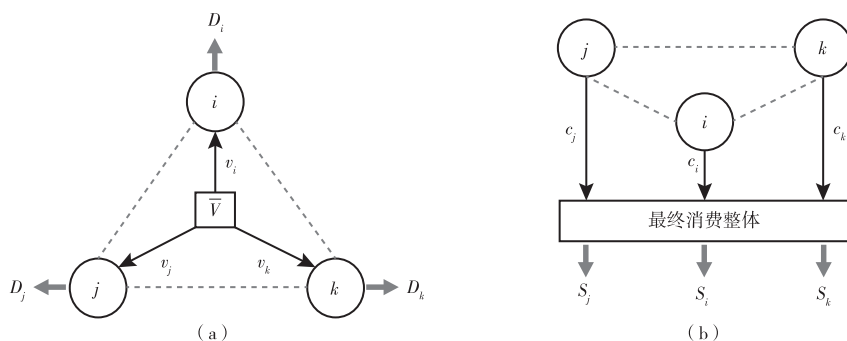


图1 需求中心性和供给中心性示意

注:为便于理解与图示,示意图中假设经济仅包含*i*、*j*、*k*三个生产部门,虚线连接代表部门间的投入产出关联。图1(a)中,从初始投入要素(\bar{V})指向各部门的实线反映生产部门对初始投入要素的直接需求。图1(b)中,从各部门指向最终消费整体的实线反映代表性家庭对各部门产品的直接消费需求。

给定经济的最终消费规模,各部门均衡产出水平由最终消费中所隐含的对该部门产品的完全需求所决定。定义供给中心性(Supply Centrality): $S = M_j \beta$ 。这一网络特征刻画最终消费整体通过局部产出网络对各部门产品的完全需求程度,反映各部门产品对于保障经济整体消费的重要性。由于部门间通过中间品相互联系,任意部门*i*供应最终消费的重要性不仅取决于其作为最终产品对代表性家庭消费活动的直接供给,还取决于家庭对其他部门产品的消费所引致的生产活动所隐含的间接供给。在该生产过程中部门*i*产品作为中间品使用,如图1(b)所示。供给中心性的投入产出含义为单位最终消费整体所隐含的对部门产品的完全需求,即 $S_i = \beta_i + \sum_{j=e}^N \omega_{-i,j}^* S_j$ 。在不存在能源效率冲击与碳排放权交易政策冲击的基准情境下,供给中心性与多玛权重(Domar Weight)等价。任意部门*i*的多玛权重 λ_i 为部门*i*销售额与经济总GDP的比值,衡量部门*i*在经济体系中的重要程度(Hulten, 1978; 程大中等, 2024),较高的多玛权重意味着对部门的冲击将对经济整体产生更强的影响。

源部门*i*化石能源效率提升会降低其实物能源投入系数 ω_{ei}^* ,直接改变部门*i*的需求中心性和部门*e*的供给中心性,并通过生产网络的传导扩散引起各部门生产网络中心性特征的完全变动。当 $\sigma < 1$ 时,^①源部门能效提升会降低各部门的需求中心性和供给中心性。前者表明各部门生产过程对初始投入要素的依赖相对降低而更多依赖于整体效率提升的中间品投入,后者意味着经济整体对部门产品的完全需求强度下降。网络特征的变化反映了源部门能效提升对生产网络结构的直接冲击在传导扩散后对经济系统产生的整体影响。

(二)化石能源回弹效应传导机制分析

为刻画能源效率提升过程中的回弹现象,定义回弹效应为能源效率提升的预期节能量与实际节能量的差异占预期节能量的比例(Sorrell & Dimitropoulos, 2008),即:

$$RE = 1 - \frac{Save_{actual}}{Save_{expected}} \quad (6)$$

其中 $Save_{actual}$ 和 $Save_{expected}$ 分别为能效提升的实际节能量与预期节能量。回弹效应(RE)的大小直接反映预期节能效果被回弹现象所抵消的程度。从取值范围来看, $RE \in (0, 1)$ 意味着回弹效应的存在部分抵消了预期的能源节约,但能效提升仍然降低了经济整体的能源消耗; $RE < 0$ 表明存在“超级节能”(Super Conservation)现象,即能源效率提升引起的实

^① 因篇幅所限,能效提升影响各部门网络特征的详细分析见本刊网站登载的附录。此外,基于本文替代弹性的估计结果,若无特殊说明,下文分析均默认设定 $\sigma < 1$ 。

际节能量超过预期节能量; $RE > 1$ 时表明存在“回火”(Backfire)现象,此时能效提升反而引起能源需求增加。

源部门 i 外生化石能源利用效率提升的预期节能量为源部门保持化石能源服务 ($x_{si} = \phi_{ei} x_{ei}$) 投入量不变时的实物化石能源投入的减少量,满足:

$$Save_{i, expected} = \left(-\frac{\partial x_{ei}}{\partial \phi_{ei}} \Big|_{x_{si}} \right) \Delta \phi_{ei} = x_{ei} \frac{\Delta \phi_{ei}}{\phi_{ei}} \quad (7)$$

其中, $\Delta \phi_{ei}$ 为源部门化石能源利用效率的边际提升。该结果表明,源部门能效提升的预期节能量与能效提升幅度成正比,这一预期节能效果又称为工程估计(Engineering Estimate)节能量(Lemoine, 2020)。在生产网络视角下,源部门化石能源效率提升通过部门关联引起经济整体的系统性变化,最终改变化石能源消耗总量与实际节能效果,其实际节能量满足: $Save_{i, actual} = -\frac{\partial y_e}{\partial \phi_{ei}} \Delta \phi_{ei}$ ①

本研究表明,源部门外生的化石能源效率提升一方面直接降低部门本身的化石能源需求强度并改变局部产出网络 (Ω_y^*),另一方面以成本冲击形式通过价格网络 (Ω_p^*) 的传导扩散改变均衡价格体系,引起更广泛的厂商投入和家庭消费行为调整,内生改变经济的产出网络结构与消费结构,最终对经济整体化石能源隐含需求强度产生系统性影响。此外,能效提升冲击作为技术进步引起初始投入要素的跨部门流动与重新配置,这一过程改变家庭实际总收入水平和最终消费规模,与结构变动引起的能源需求强度变化共同解释了经济整体化石能源消耗水平的变化。在冲击传导过程中,外生冲击引起的价格变动与传导是生产网络结构和消费结构内生调整的核心机制(Acemoglu & Azar, 2020; 余典范等, 2023),本文基于内生生产网络思想对化石能源回弹效应机制进行详细刻画。

将刻画均衡产出的式(5)重写为:

$$y_j = \sum_{i=e}^N \left[\omega_{-\sigma, ji}^* \left(\frac{p_j}{p_i} \right)^{-\sigma} y_i \right] + \beta_j \left(\frac{p_j}{p_h} \right)^{-\sigma} \frac{C + T}{p_h}, j = e, 2, \dots, N \quad (8)$$

源部门 i 外生的化石能源利用效率提升降低 $\omega_{-\sigma, ei}^*$, 引起源部门化石能源需求强度和局部产出网络 Ω_y^* 的直接变动。局部冲击通过生产网络得以强化,最终反映为逆矩阵 \mathbf{M}_y 所刻画的完全联系变动。这一过程降低经济整体对化石能源产品的完全需求强度,推动均衡化石能耗下降。

此外,源部门化石能源需求强度的局部下降降低其生产成本,这种成本冲击通过价格网络传导扩散引起一般均衡价格体系变动,并最终导致各经济主体的最优选择和经济结构的内生调整。部门 j 产品均衡价格变动满足如下条件:

$$\frac{\partial \ln(p_j)}{\partial \ln(\phi_{ei})} = -\frac{D_e}{D_j} \omega_{1-\sigma, ei}^* m_{1-\sigma, ij} \quad (9)$$

直观来看,源部门 i 化石能源需求强度的下降在局部均衡范围内降低其边际成本,由于部门产品价格与边际成本相等,该过程将推动源部门产品价格降低(体现为 $D_e \omega_{1-\sigma, ei}^*$)。由于部门间通过中间品相互关联,部门 i 产品价格的下降将作为成本冲击传导至下游部门,降低其边际成本和产品价格,并进一步向下游部门的需求部门传导扩散。成本冲击的

① 由于市场出清,经济主体对部门产品的总需求等于各部门均衡产出,因此,源部门能效提升所引起的化石能源部门总产出降低即为生产网络视角下的实际节能量。

传导扩散过程最终收敛于价格网络的逆矩阵 \mathbf{M}_p 所刻画的完全影响,即对于任意部门 j 而言,源部门 i 能效提升成本冲击对其边际成本和产品均衡价格的冲击幅度由 $D_c \omega_{1-\sigma,ei}^* m_{1-\sigma,ij}$ 描述。这一过程引起各部门产品均衡价格的非对称下降,改变经济的均衡价格体系。价格是生产网络中冲击传导的核心机制(Acemoglu & Azar, 2020; 余典范等, 2023), 均衡价格体系的变动内生改变厂商和家庭的最优选择, 并引起产出网络与消费结构的内生调整。

基于式(8)右侧第一项,均衡价格体系的变动将激励厂商调整其对不同中间品的需求,引起部门间产出网络关联的内生调整。定义产出网络 $\bar{\Omega}$, 其元素 $\bar{\omega}_{ji}$ 反映部门 i 与部门 j 产出间的直接联系, 满足: $\bar{\omega}_{ji} = \omega_{-\sigma,ji}^* (p_j/p_i)^{-\sigma}$ 。不同于局部产出网络 Ω_y^* , 产出网络 $\bar{\Omega}$ 在一般均衡视角下刻画部门产出间的直接联系, 冲击引起的均衡价格变动不改变部门局部产出关联, 然而部门间的实际产出联系由于价格传导和厂商生产投入内生调整而随之改变。^①源部门 i 化石能源利用效率提升通过价格传导机制引起广泛的产出关联内生调整, 反映为相对价格对任意部门间产出关联 $\bar{\omega}_{ji}$ 的影响。能效提升对部门间产出关联的总冲击由矩阵 $\bar{\Omega}$ 的系统性调整所体现。

对于消费侧, 式(8)右侧第二项表明源部门能效提升通过价格传导改变家庭最优消费选择结构与实际购买能力, 并通过技术进步效应和对转移支付的影响改变家庭总收入规模。家庭消费结构随价格冲击的内生调整由向量 $\bar{\beta}$ 的变动所反映, 其元素 $\beta_i (p_j/p_h)^{-\sigma}$ 显示家庭将更偏向于消费价格相对降低的最终产品。 $\bar{C} = (C + T)/p_h$ 为通过消费价格指数调整后的家庭实际总收入, 反映家庭对消费品的实际购买能力。源部门外生能效提升作为技术进步提高家庭要素收入水平(Fu & Wang, 2024), 同时, 与生产税相关的转移收入由于厂商投入结构的调整而随之变动, 进一步影响家庭总收入水平。

内生生产网络视角下考虑外生能效提升冲击与经济结构调整的均衡产出满足: $\mathbf{y} = \bar{\mathbf{M}} \bar{\beta} \bar{C}$, 其中逆矩阵 $\bar{\mathbf{M}} = (\mathbf{I} - \bar{\Omega})^{-1}$ 。该式刻画了各部门实际产出、生产网络结构和家庭最终消费之间的系统关联。源部门化石能源利用效率提升的直接冲击和价格传导机制改变经济主体最优选择, 最终导致产出网络结构($\bar{\Omega}$)和消费结构($\bar{\beta}$)的系统性调整, 反映出最终消费整体对各部门产品完全需求强度的结构性变动。这种结构调整与能效提升引起的实际总收入(\bar{C})变动, 共同解释了化石能源效率提升时经济整体的实际节能量及其与预期节能量的差异。

基于上述分析, 本研究将回弹效应分解为由结构调整引起的结构回弹效应以及由总量规模变动引起的规模回弹效应, 并将结构回弹进一步分解为由局部产出网络调整驱动的直接结构回弹, 以及由经济结构内生调整引起的内生结构回弹,^②即:

① 特别地, 对于传统投入产出分析中完全互补的列昂惕夫假设($\sigma = 0$), 矩阵 $\bar{\Omega}$ 与矩阵 Ω_y^* 等价, 即价格变动引起的产出关联变动被完全忽略。由价格变动引起的产出网络内生调整是生产网络一般均衡模型区别于传统投入产出分析的核心特征之一。

② Blackburn & Moreno-Cruz(2021)将回弹效应分解为价格效应、乘数效应和规模效应, 本文在该研究基础上进一步完善对回弹效应的机制分解和理解。从总机制来看, 本文引入政府财税行为和环境规制政策扩展了对回弹效应的分析框架。从分解方式来看, Blackburn & Moreno-Cruz(2021)基于偏微分方法对实际节能量和回弹效应进行分解, 然而这种形式上的分解与回弹效应传导机制的经济学含义并不对应甚至存在冲突。最核心的问题在于价格作为生产网络中冲击传导的核心机制, 其变化无法从其他回弹机制中独立分离, 因此, 其分解出来的乘数效应和规模效应本身仍包含部分价格变动的影响。本文关注回弹现象背后的真实传导过程, 在内生生产网络视角下明确回弹效应的发生机制并据此进行结构化分解。特别地, 本文认为在回弹效应发生过程中价格机制是能效冲击传导扩散引起经济结构内生调整的底层传导机制, 无法独立于结构调整和总量规模变动。

$$RE_i = 1 + \underbrace{(\sigma - 1)m_{-\sigma,ee}}_{\text{直接结构回弹}} + \underbrace{\sigma(1 + \zeta\theta_{ei})m_{1-\sigma,ie}}_{\text{内生结构回弹}} \frac{S_e}{S_i} + \frac{(1 - \sigma)S_e \sum_{j=e}^N \left[\eta_j(1 + \tau_j)^{-\sigma} m_{-\sigma,je} \right]}{\sum_{j=e}^N \left[\eta_j(1 + \tau_j)^{-\sigma} S_j \right]} \quad (10)$$

结构回弹 Str_{re}
规模回弹 Sca_{re}

该式给出了源部门*i*化石能源回弹效应及结构回弹和规模回弹机制的解析解,^①明确揭示了能效冲击的传导路径及回弹效应的结构性影响因素,为深入探究碳排放权交易政策对回弹效应的潜在影响以及后文的量化分析提供了基础。

(三)碳排放权交易政策对回弹效应的影响机制分析

碳排放权交易政策通过排放成本内生部门生产过程的排放外部性,这种成本结构的变化干预能效提升时经济整体结构的内生调整过程与总收入变动,最终改变能效提升的实际节能量和回弹效应。本部分重点揭示基准情境下碳排放权交易政策通过扩大成本冲击和改变网络结构特征对回弹效应传导机制的系统性影响。

1. 对结构回弹的影响

直接结构回弹本质上源于经济整体通过局部产出网络对化石能源依赖程度(S_e)的下降,其最终影响由替代弹性与化石能源部门的完全自需求系数($m_{-\sigma,ee}$)所刻画。碳排放权交易政策降低化石能源部门通过生产网络联系对自身产品的完全需求强度,削弱直接结构回弹的影响,即: $\left. \frac{\partial m_{-\sigma,ee}}{\partial \zeta} \right|_{\zeta=0} = -\sigma m_{ee} \sum_{j=e}^N \theta_{ej} \omega_{ej}^* m_{je}$ 。其中, m_{je} 代表逆矩阵 $\mathbf{M}=(\mathbf{I}-\mathbf{\Omega}^*)^{-1}$ 的第*j*行第*e*列元素。当 $\sigma < 1$ 时,直接结构回弹为负,此时碳排放权交易政策引起的直接结构调整降低实际节能量并提高回弹效应。其提高幅度取决于基准情境下的化石能源完全自需求系数 m_{ee} 和参数 $\delta_m = \sum_{j=e}^N \theta_{ej} \omega_{ej}^* m_{je}$ 。前者表明,化石能源部门对自身产品的完全需求强度越高,碳排放权交易政策对其的削减幅度越大。随着碳排放权交易市场建设的持续推进和 m_{ee} 的下降,其通过减小 $m_{-\sigma,ee}$ 而提高回弹效应的效果将逐渐减弱。对于后者,经济特征参数 δ_m 反映碳排放权交易政策通过作用于各部门化石能源使用相关的直接排放 ($\theta_{ej} \omega_{ej}^*$) 而与化石能源部门产生的完全关联,综合反映碳排放权交易政策下化石能源部门在生产网络结构中所面临的实际排放成本压力。

碳排放权交易政策对内生结构回弹的影响满足如下结果:

$$\left. \frac{\partial \sigma(1 + \zeta\theta_{ei})m_{1-\sigma,ie} \frac{S_e}{S_i}}{\partial \zeta} \right|_{\zeta=0} = \sigma \frac{\lambda_e}{\lambda_i} m_{ie} \left[\theta_{ei} + (1 - \sigma)\delta_m - \sigma\delta_s \left(\frac{m_{ee}}{\lambda_e} - \frac{m_{ie}}{\lambda_i} \right) \right] \quad (11)$$

其中, λ_i 为基准情境下部门*i*的多玛权重,参数 $\delta_s = \sum_{j=e}^N \theta_{ej} \omega_{ej}^* \lambda_j$ 为碳排放权交易政策对各部门化石能源相关排放 ($\theta_{ej} \omega_{ej}^*$) 的直接影响通过多玛权重的加权结果,反映碳排放权交易政策对经济整体的冲击幅度。经济结构内生调整的核心激励源于各部门产品价格的差异化变动。一方面,碳排放权交易政策施加的排放成本扩大源部门能效提升的直接成本冲击幅度并强化价格联系 $m_{1-\sigma,ie}$,通过价格网络提升化石能源价格的下降幅度,并进一步提高内生结构回弹。直接排放系数 θ_{ei} 刻画了碳排放权交易政策扩大源部门成本冲击的

^① 因篇幅所限,对该式及结构回弹和规模回弹机制的详细解析见本刊网站登载的附录。

最终影响。另一方面,碳排放权交易政策引起各部门供给中心性的非对称下降,给定对经济整体的冲击幅度(δ_s),与化石能源部门相对联系(m_{je}/λ_j)较强的部门供给中心性下降更为明显。当化石能源部门供给中心性降幅高于源部门时,内生结构调整引起的实际节能量较预期节能量提高,从而降低内生结构回弹。

2. 对规模回弹的影响

碳排放权交易政策通过碳排放成本改变能效提升时要素配置结构的调整过程和转移支付,对规模回弹的影响满足如下结果:

$$\left. \frac{\partial \ln(Scare_i)}{\partial \zeta} \right|_{\zeta=0} = \sigma \delta_s \left\{ \frac{\sum_{j=e}^N \left[\eta_j (1 + \tau_j)^{-\sigma} m_{je} \right]}{\sum_{j=e}^N \left[\eta_j (1 + \tau_j)^{-\sigma} \lambda_j \right]} - \frac{m_{ee}}{\lambda_e} \right\} - \sigma \delta_m \quad (12)$$

能效提升时各部门供给中心性的下降幅度决定了要素再配置结构及家庭实际收入水平的提升幅度。式(12)右侧第一项反映碳排放权交易政策对各部门供给中心性的直接冲击。碳排放权交易政策提高各部门化石能源投入的使用成本并通过网络关联传导引起中间品普遍的价格上涨,降低厂商生产过程对中间品的依赖程度。这一过程降低各部门供给中心性,引起实际总收入更大幅度提高,进一步增强规模回弹效应。由于化石能源部门供给中心性决定规模回弹的整体大小,其供给中心性的下降将削弱规模回弹的整体幅度, $\sigma \delta_s m_{ee}/\lambda_e$ 刻画了这一额外影响。

源部门能效提升时各部门供给中心性的下降幅度取决于部门与化石能源部门的完全产出关联($m_{-e,je}$)程度。碳排放权交易政策的实施弱化各部门与化石能源部门的产出联系,间接削弱各部门在面临源部门能效提升冲击时供给中心性的下降幅度。这种间接影响降低家庭实际总收入的提升幅度与相应的规模回弹,如式(12)右侧第二项所示。对各部门供给中心性的总间接影响由 $\sigma \delta_m$ 所刻画,即规模回弹下降的幅度取决于替代弹性与化石能源部门在生产网络结构中所面临的实际排放成本压力。

碳排放权交易政策对回弹效应的部门异质性影响最终体现在对内生结构调整过程的差异化影响。源部门*i*化石能源投入直接排放系数(θ_{ei})越大,碳排放权交易政策对回弹效应的提升越显著,这表明部门化石能源清洁化利用水平的提高有助于缓解碳排放权交易政策引起的回弹提升,确保能效提升的预期节能效果有效达成。

四、模型校准与量化分析结果

本节首先使用中国经济数据校准模型,随后基于校准后的模型量化分析部门外生化石能源效率提升的回弹效应传导机制以及碳排放权交易政策的调节作用。在量化分析过程中,本文将无外生能效冲击($\phi_{ei} = 1$)且未建立碳排放权交易市场($\zeta = 0$)的经济设定为基准情境,在反事实分析框架下评估源部门化石能源效率提升如何引致经济对基准情境的系统性偏离,以及全国碳排放权交易市场建设对该过程的潜在影响。

(一)模型校准

1. 结构参数校准

在生产网络一般均衡分析框架中,经济中各部门代表性厂商的技术系数与家庭消费偏好等参数刻画经济的结构特征,同时也是决定外生冲击发生时经济主体行为响应的关键参数。投入产出表蕴含丰富的经济结构信息,本文参考 Baqaee(2018)、Blackburn &

Moreno-Cruz(2021)以及Fu & Wang(2024)基于2020年中国投入产出表校准模型结构参数 ω_{ij} 、 η_i 、 τ_i 、 β_i ,同时结合中国分部门碳排放清单(Ma et al., 2024)校准部门排放参数 θ_{ei} 。^①

2. 替代弹性估计

替代弹性的大小决定经济主体在外生冲击下的行为响应及由此引发的经济结构调整,同时也是本文量化化石能源效率提升的回弹效应和碳排放权交易政策调节作用的核心参数。本文参照傅春杨等(2025)采用结构计量估计方法,结合中国各部门中间品—产品成本份额数据估计替代弹性,^②以确保参数更加真实、准确反映中国经济独特的要素替代特征。根据回归结果,本文后续分析中设定替代弹性 $\sigma = 0.129$ 。

(二)中国经济化石能源回弹效应

本部分识别并量化能效冲击的传导机制,揭示经济结构调整在冲击传导中的关键作用以及各部门化石能源回弹效应的异质性特征。

1. 回弹特征与结构性来源

基准情境下,中国经济各部门边际化石能源效率提升的回弹效应如图2所示。结果显示各部门化石能源回弹效应均显著低于零,表现出明显的“超级节能”特征。以部门化石能源消耗占比为权重计算得到经济生产侧平均化石能源回弹效应约为-0.32,即生产侧化石能源利用效率每提升1%,实际节能约为生产侧总化石能耗的1.32%。上述量化结果表明,对于中国经济而言,化石能源效率提升的实际节能效果超出预期,各部门化石能效提升在降低部门本身化石能源投入需求的同时存在明显的正向节能溢出效应,相关能效投资政策设计与效果评估中应充分考虑这一回弹特征。

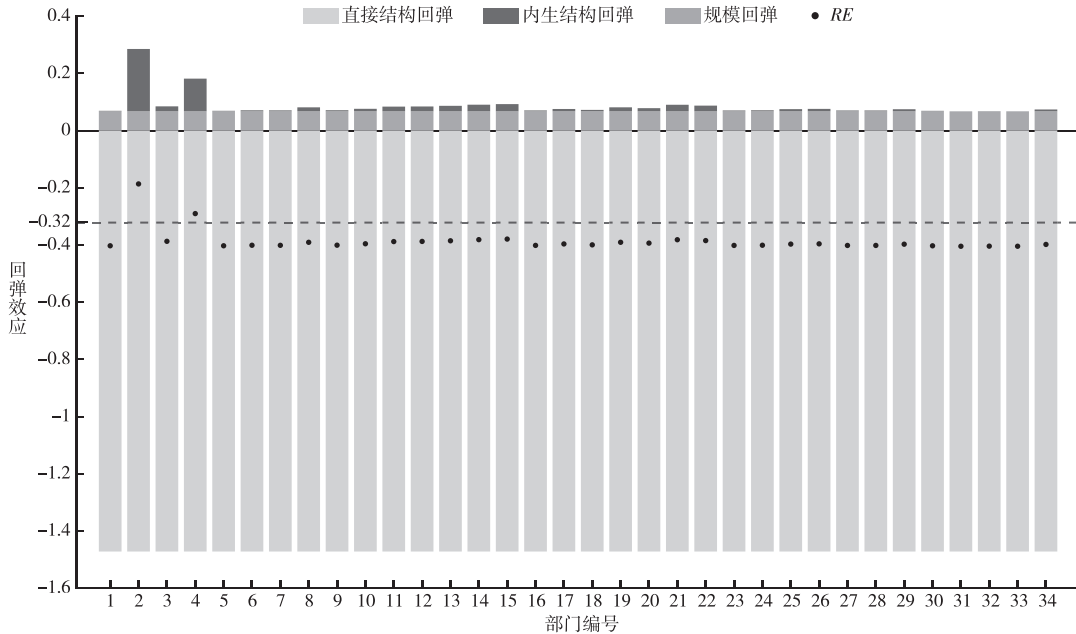


图2 基准情境下各部门边际化石能源效率提升的回弹效应及回弹机制分解

机制分解结果表明,化石能源效率提升的“超级节能”特征主要源于直接结构回弹的主导影响。如图2所示,直接结构回弹约为-1.47,其影响显著强于规模回弹(约为0.07)与内生结构回弹(均值约为0.02)。生产网络结构强化源部门能效提升的直接冲击,最终通过

^{①②} 因篇幅所限,相关内容详见本刊网站登载的附录。

直接结构回弹显著降低经济整体对化石能源的需求。直接结构回弹幅度由化石能源部门的完全自需求系数($m_{-\sigma, ee}$)刻画,后者综合反映生产侧对化石能源投入的依赖程度。对中国经济而言,由于化石能源的能源主体地位,经济整体对化石能源投入的依赖程度较高,基准情境下 $m_{-\sigma, ee}$ 约等于1.69,从而直接结构变动通过网络效应所引起的负回弹趋势显著强于其他回弹机制。与之相比,规模回弹为正但其影响远低于直接结构回弹。此外,由于较低的替代弹性限制了厂商和家庭对价格变动的响应和经济结构内生调整,绝大多数部门能效提升的内生结构回弹效应明显弱于规模回弹和直接结构回弹。

2. 经济结构调整与部门异质性特征

为进一步刻画经济结构调整在回弹过程中所发挥的核心作用,本文引入弗罗贝尼乌斯范数(Frobenius Norm)(下文简称“F-范数”)度量能效冲击引起的经济结构变动幅度。^①

理论分析表明,源部门能效提升通过直接影响和价格传导引起经济结构调整。直接影响体现为局部产出网络 Ω_y^* 的变动。假设化石能源部门本身(部门 e)化石能源利用效率提升15%,^②其直接引起 $\omega_{-\sigma, ee}^*$ 系数下降约11.5%,而对其他部门化石能源投入系数不产生任何影响。这种局部影响通过生产网络得以扩散和强化,表现为逆矩阵 \mathbf{M}_y 较基准情境的系统性变动。以F-范数衡量的 \mathbf{M}_y 直接变动约为 Ω_y^* 直接变动的3.01倍,表明生产网络显著放大直接结构冲击,这一过程强化能效提升的直接结构回弹效应。

源部门能效提升通过价格传导机制引起更广泛的产出网络变动与家庭消费结构调整。与直接影响仅限于源部门不同,能效冲击通过价格网络的传导扩散改变均衡价格体系,并引致各部门投入结构的内生调整。这一过程进一步引起部门间产出网络的普遍变动(体现为矩阵 $\bar{\Omega}$ 相对于 Ω_y^* 的系统性变化)。量化结果显示,^③价格传导机制使得各部门间的产出关联程度均受到不同程度的影响。特别地,由于化石能源产品的相对价格下降,各部门与化石能源投入的直接关联程度出现明显提高(平均涨幅约为0.96%),同时化石能源部门对其他部门中间品的投入系数显著下降(平均幅度约为-0.92%)。

尽管如此,较低的替代弹性使得经济主体对价格变动的响应较弱,基准替代弹性($\sigma = 0.129$)情境下价格传导机制所引起的产出网络结构内生调整幅度仅为直接结构变动的5.22%。对于较高的替代弹性($\sigma = 0.5$),量化结果显示内生结构调整的整体幅度显著强于基准替代弹性情境,各部门间产出网络关联内生调整的平均变动幅度约为基准替代弹性情境下的3.74倍,消费结构调整幅度约为基准替代弹性情境下的4.09倍。此时,价格传导机制引起的内生结构调整对产出网络系统性变动的贡献显著增强,达到直接结构变动的36.07%。

不同替代弹性下化石能源回弹效应特征如表1所示。随着替代弹性的提高,各部门能效提升的整体回弹效应显著上升。其中,由产出网络直接变动所引起的直接结构回弹幅度随替代弹性提高出现明显下降。当 $\sigma = 0.9$ 时,其影响降低至基准弹性情境的11.56%,同时伴随内生结构回弹效应的大幅提升。因此,尽管规模回弹随替代弹性的提高有所下

① 对于任意矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times m}$,其F-范数 $\|\mathbf{A}\|_F$ 定义为 $\|\mathbf{A}\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |a_{ij}|^2}$;其中 a_{ij} 为矩阵 \mathbf{A} 元素。F-范数衡量矩阵的整体大小;对于能效冲击前后的网络结构矩阵之差,其F-范数反映冲击引起的网络结构变动幅度。

② 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》明确指出“十四五”时期单位国内生产总值能源消耗以降低13.5%为目标,折算为以单位能耗GDP代表的能源效率提升约为15.6%。

③ 因篇幅所限,相关内容详见本刊网站登载的附录。

降,但整体回弹效应仍呈上升趋势。从结构调整视角,能效提升引起的产出网络直接变动幅度随替代弹性提高而下降。由于厂商和家庭对相对价格变动的反应增强,此时产出网络内生调整幅度显著提升并最终超过直接结构变动的影响,这一特征同时反映在消费结构内生调整幅度的大幅提升上。

表 1 不同替代弹性下的化石能源回弹效应特征

| 替代弹性 | | $\sigma = 0.1$ | $\sigma = 0.129$ | $\sigma = 0.3$ | $\sigma = 0.5$ | $\sigma = 0.7$ | $\sigma = 0.9$ | |
|--------|---------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|
| 回弹效应特征 | 整体回弹效应 | -0.39 | -0.32 | 0.06 | 0.51 | 0.97 | 1.42 | |
| | 不同源部门 能效提升 | 最小值 | -0.45 | -0.40 | -0.13 | 0.19 | 0.52 | 0.84 |
| | | 最大值 | -0.28 | -0.19 | 0.38 | 1.04 | 1.70 | 2.36 |
| | | 标准差 | 0.03 | 0.04 | 0.09 | 0.16 | 0.22 | 0.28 |
| 回弹效应机制 | 直接结构回弹 | -1.52 | -1.47 | -1.18 | -0.84 | -0.51 | -0.17 | |
| | 内生结构回弹 | 均值 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.07 | 0.10 | 0.13 |
| | | 标准差 | 0.03 | 0.04 | 0.09 | 0.16 | 0.22 | 0.28 |
| | 规模回弹 | 0.07 | 0.07 | 0.05 | 0.04 | 0.02 | 0.01 | |
| 结构调整 | 直接结构变动 | 1.03 | 1.00 | 0.81 | 0.59 | 0.36 | 0.12 | |
| | 内生网络调整 | | | | | | | |
| | 直接结构变动 | 0.03 | 0.04 | 0.13 | 0.30 | 0.69 | 2.68 | |
| | 消费结构内生调整 | 0.77 | 1.00 | 2.35 | 3.98 | 5.64 | 7.36 | |

注:整体回弹效应为各部门能效提升回弹效应以部门化石能源中间消耗占比加权得到的均值结果,反映经济整体能效提升时的回弹效应。冲击引起的结构调整幅度通过F-范数进行衡量,此外结构调整的直接结构变动和消费结构内生调整幅度均以基准替代弹性($\sigma = 0.129$)下的调整幅度进行标准化,以直观反映弹性变动的影响。

以上分析表明,尽管价格传导机制对部门间产出关联产生了更加广泛的影响,但对于较低的替代弹性,产出网络和消费结构的内生调整幅度有限,从而导致其对回弹效应的整体提升效果较弱。与之相反,能效冲击所引起的产出网络直接变动在低弹性经济中通过生产网络结构得以放大,并发挥主导作用降低化石能源需求和回弹效应。这一定程度上能够解释为什么中国经济存在较低的化石能源回弹效应。

内生结构回弹的差异解释了化石能源回弹效应的部门异质性特征。特别地,化石能源部门的内生结构回弹显著高于其他部门,这一结果源于其较高的完全价格关联($m_{1-\sigma,ie}$)。事实上,化石能源部门自身的化石能效提升直接降低其产品价格,而其他部门的能效提升首先引起本部门产品价格下降,随后经由价格网络传导至化石能源部门而间接降低其产品价格。这一结果给出了以往研究中能源部门回弹效应较高的本质原因(Lemoine, 2020)。

(三)碳排放权交易政策对化石能源回弹效应的影响

本部分首先基于校准后的模型量化碳排放权交易政策对化石能源回弹效应的影响及其作用机制,随后探究不同碳价格情境下回弹效应的变动及其实际节能影响。

1. 影响机制量化

基准情境下碳排放权交易政策对回弹效应各机制的边际影响如图3所示。结果显示,碳排放权交易政策降低规模回弹而提高结构回弹,其净影响表现为各部门化石能源回弹效应的普遍提高。碳排放权交易市场建设在加速降碳减排的同时,通过增强回弹效应而削弱生产侧化石能源效率提升的节能效果,这构成碳排放权交易政策的隐性减排成本。

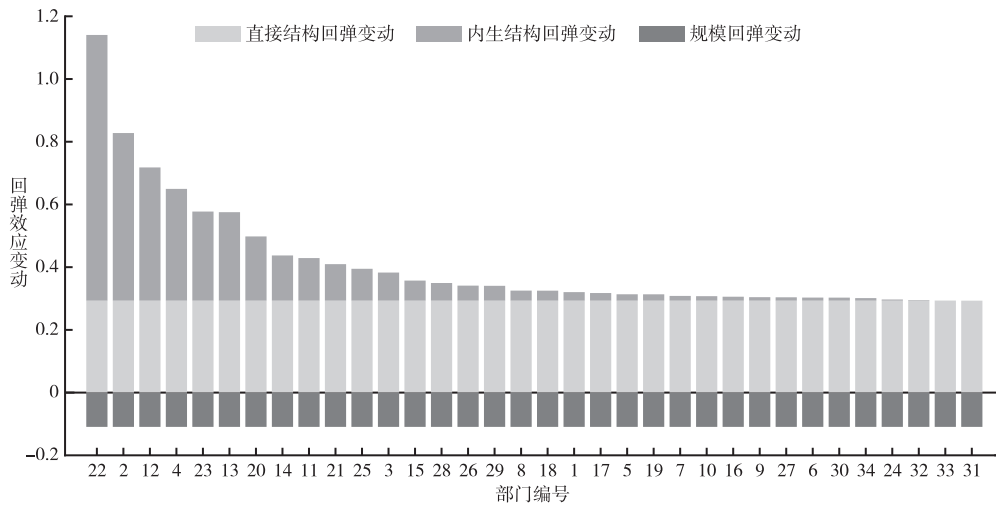


图3 碳排放权交易政策对部门化石能源回弹效应各机制的边际影响

量化结果表明,碳排放权交易政策对家庭总收入增长的间接影响超过直接影响,最终抑制能效提升时家庭总收入的增长并降低规模回弹效应。通过削弱各部门对化石能源投入的依赖,碳排放权交易政策提高直接结构回弹而强化能效提升的回弹效应。直接结构回弹的提升幅度约为规模回弹下降幅度的三倍,这解释了为何各部门回弹效应会普遍提高。此外,碳排放权交易政策增强内生结构回弹,且对不同部门的影响存在显著差异,这解释了其对回弹效应的部门异质性影响。图3显示受碳排放权交易政策影响较大的部门主要集中在工业领域,以电力热力部门(No.22)、化石能源部门(No.2)、金属加工部门(No.12)与非金属矿采选部门(No.4)等上游部门为代表。而文化教育卫生部门(No.32)、公共管理部门(No.33)和研究和试验部门(No.31)等服务业部门所受影响较为微弱。原因在于,这些工业部门的化石能源直接排放系数(θ_{e_i})较高,同时作为核心上游部门与化石能源部门联系紧密。因此,碳排放权交易政策会显著扩大其能效提升的成本冲击以及由此导致的化石能源价格下降,最终导致内生结构回弹更大幅度提高。

2. 反事实经济结构调整与实际节能效果

对于受碳排放权交易政策影响较大的工业部门,内生结构回弹的变动幅度超过直接结构回弹变动幅度,表明碳排放权交易政策显著增强了价格传导机制所引起的经济内生结构调整。表2展示了不同碳价格情境下,化石能源部门15%的能效提升通过直接冲击和价格传导所引起的经济结构调整。

表2 不同碳价格情境下的经济结构调整

| 碳价格情境 | 产出网络变动 | | 内生网络调整 | 消费结构内生调整 |
|--------|--------|--------|--------|----------|
| | 直接结构变动 | 内生网络调整 | 直接结构变动 | |
| 无 | 1.00 | 1.00 | 0.05 | 1.00 |
| 100元/吨 | 1.03 | 1.73 | 0.09 | 1.03 |
| 200元/吨 | 1.06 | 2.74 | 0.13 | 1.74 |
| 500元/吨 | 1.18 | 5.57 | 0.25 | 4.23 |

注:结构调整幅度通过F-范数衡量,产出网络变动和消费结构内生调整幅度均以基准情境调整幅度进行标准化。

量化结果显示,经济结构调整幅度随碳价格上升而显著提高。由于碳排放权交易政策强化能效冲击,源部门能效提升所引起的产出网络直接结构变动幅度随碳价提高而增强。当碳价提升至500元/吨时,直接结构变动幅度较基准情境提高约18%。碳排放权交易政策显著强化了经济结构的内生调整,500元/吨碳价情境下产出网络和消费结构内生调整幅度分别为基准情境的5.57倍和4.23倍。此外,由内生调整引起的产出网络变动幅度达直接结构变动效果的25%,显著高于基准情境的5%。这表明随着碳价格提高,价格传导机制和经济结构内生调整在回弹过程中的重要性将随之增强,这将进一步增强能效提升的回弹效应。^①

为进一步量化碳排放权交易政策通过调节回弹效应对实际节能量的影响,考虑基准情境下的反事实节能量。^②各部门化石能源效率分别提升15%,在碳价格为500元/吨的反事实情境下碳排放权交易政策对各部门实际节能效果的影响如图4所示。柱高反映基准情境的实际节能比例,其中浅色区域对应各部门反事实节能量 ΔE_i^c ,深色区域为碳排放权交易政策导致的实际节能量损失 $\Delta E_i^b - \Delta E_i^c$ 。根据图4(a),回弹效应强化各部门能效提升的节能效果,碳排放权交易政策提高回弹效应而削弱各部门能效提升的实际节能效果。

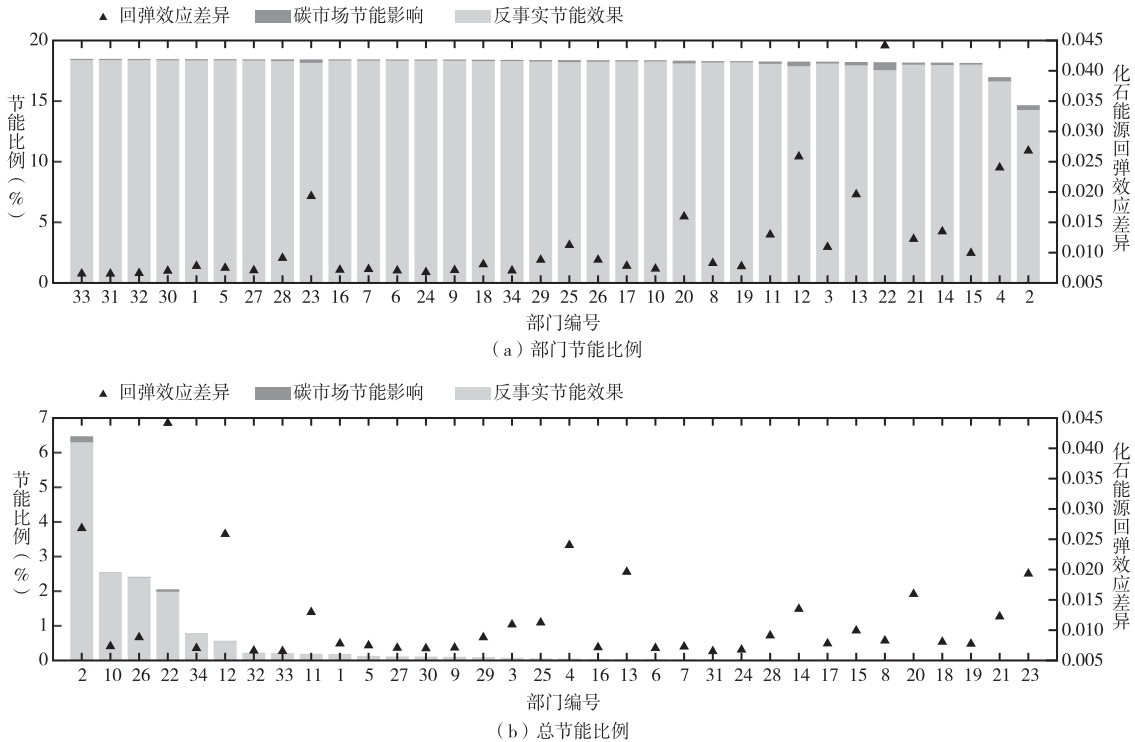


图4 碳排放权交易政策对各部门节能量影响的反事实结果

注:图4(a)中的节能比例为各部门化石能源利用效率提升15%所引起的实际节能量占部门自身化石能耗的比重;图4(b)中的节能比例为相同情境下实际节能量占生产侧总化石能耗的比重,反映部门绝对节能水平和节能贡献。

① 因篇幅所限,不同碳价情境下各部门化石能源效率提升的回弹效应详见本刊网站登载的附录。

② 对于给定的化石能源效率提升幅度,源部门能效提升的实际节能量 ΔE_i^b 由部门实际能耗和部门回弹效应决定,即 $\Delta E_i^b = x_{ei}^b (1 - RE_i^b) \Delta \phi_{ei} / \phi_{ei}$,其中, x_{ei}^b 代表基准情境下部门*i*的化石能源消耗量, RE_i^b 衡量能效提升前后状态变化过程中的平均回弹效应。为分析碳排放权交易政策所引起的节能量变动,基于存在碳排放权交易政策情境的反事实回弹效应 RE_i^c 计算各部门能效提升的反事实节能量,即 $\Delta E_i^c = x_{ei}^b (1 - RE_i^c) \Delta \phi_{ei} / \phi_{ei}$ 。

从总节能比例来看,图4(b)显示,基准情境下生产侧各部门化石能源效率提升15%的累计节能量约为生产侧总化石能耗的16.71%,碳价为500元/吨的反事实情境下累计节能比例约16.40%,即碳排放权交易政策削减约0.32个百分点的实际节能效果。这一节能损失超过文化教育卫生部门(No.32)的基准节能量,约为金属加工部门(No.12)基准节能量的56%。

对于相同比例的能效提升,图4(b)显示,化石能源部门(No.2)、化学产品部门(No.10)、交通运输部门(No.26)、电力热力部门(No.22)以及金属加工部门(No.12)等能源密集型部门的节能贡献较大,但同时因碳排放权交易政策引起的回弹效应上升而承担更多的节能损失。从节能损失量来看,部门2与部门22由于本身能耗较高,且部门回弹效应提高幅度较大,其节能量下降最为显著。而部门4与部门13尽管回弹效应提升幅度较高,但由于其本身能耗较低,节能损失仍较为微弱。以上结果表明,碳排放权交易政策主要通过提升化石能源和电力热力能源部门的回弹效应削弱生产侧能效提升的实际节能效果。在碳排放权交易市场建设过程中,以化石能源和电力热力为代表的能源部门面临较强的潜在负面影响,其部门能效投资节能收益显著下降,从而承担绝大部分由碳排放权交易政策引起的隐性减排成本。

为有效落实节能降碳目标,中国着力推动石油化工、钢铁、有色金属、化学产品以及交通、建材等重点工业部门能源利用效率提升,^①这些重点部门本身能效提升幅度将高于服务业等其他部门。量化结果表明,这些部门回弹效应受碳排放权交易政策影响较大,且作为化石能源密集型部门能耗水平较高,因此,其较高的能效提升幅度将放大碳排放权交易市场建设对经济整体节能量的负面冲击。针对性地调整碳排放权交易政策对重点行业的排放规制力度,有助于提升重点部门的能效投资激励与实际节能效果,加速节能降碳目标实现。

五、结论与政策建议

在“双碳”目标战略背景下,提升化石能源利用效率与建设全国碳排放权交易市场已成为推动中国经济社会全面绿色低碳转型和高质量发展的重要着力点。在高度互联的现代化经济体系中,部门化石能源效率提升通过级联效应引起经济全局性调整,导致超出部门自身的宏观化石能源需求变动并引起回弹效应。碳排放权交易政策通过价格信号干预经济主体行为调整而对回弹过程产生系统性影响,重塑能效提升回弹路径与最终节能表现。深入理解中国化石能源效率提升的回弹现象及其与全国碳排放权交易市场的交互机制,对于科学评估减排政策效果、提升政策协同效率、完善绿色转型政策体系具有重要的理论与现实意义。本文聚焦全国碳排放权交易市场建设背景下的化石能源回弹效应,从生产网络内生调整视角对这一问题进行探讨。

本文构建了包含碳排放权交易政策、能源效率和部门间生产网络的一般均衡结构模型,基于内生生产网络思想,从理论与实证上深入探究部门外生能效提升引起回弹效应的传导机制及碳排放权交易政策对能效冲击传导过程的调节作用。理论分析结果表明:(1)部门

^① 《2024—2025年节能降碳行动方案》(国发〔2024〕12号)强调要着力推进钢铁、石化化工行业、有色金属、建材、建筑、交通等重点领域和行业节能降碳改造。此外,《中共中央、国务院关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》指出要“大力推动钢铁、有色、石化、化工、建材、造纸、印染等行业绿色低碳转型,推广节能低碳和清洁生产技术装备”。

化石能源效率提升在生产网络中产生超出部门本身的宏观影响,通过结构回弹与规模回弹引起回弹效应,该过程中价格传导机制通过引起产出网络与最终消费结构的内生调整发挥重要作用。(2)碳排放权交易政策通过扩大成本冲击并改变网络结构特征,系统性影响生产侧与消费侧的最优决策调整过程并最终改变化石能源回弹效应。在生产网络视角下,化石能源回弹效应与碳排放权交易政策的调节效果内生于部门间价格、产出的相互关联与经济结构的系统调整过程,其大小由经济的网络结构与替代弹性等核心特征共同决定。

在理论模型基础上,本文进一步结合中国经济数据校准模型,在反事实框架下识别并量化了中国各部门化石能源效率提升的回弹效应机制,以及碳排放权交易政策对其的系统性影响与隐性成本。结果表明,中国经济各部门化石能源回弹效应由直接结构回弹所主导,表现出显著的“超级节能”特征,整体回弹效应约为-0.32,这一特征源于经济生产网络对化石能源的高依赖程度以及生产投入的强互补性。化石能源部门的回弹效应因独特的网络结构特征而显著高于其他部门。碳排放权交易政策通过降低规模回弹、提高结构回弹引起各部门化石能源回弹效应的普遍提高。其中,上游工业部门的提高幅度显著大于其他部门。回弹效应的提高削弱生产侧化石能源效率提升的实际节能效果,且以化石能源和电力热力为代表的能源部门承担绝大部分节能损失与碳排放权交易政策隐性成本。作为节能降碳重点部门,能源部门化石能源效率提升所带来的收益的下降或削弱其绿色转型激励。

《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》明确了“加快经济社会发展全面绿色转型”的战略导向,并将加强化石能源清洁高效利用、扩大全国碳排放权交易市场覆盖范围作为推动重点领域绿色低碳转型的关键抓手。本研究通过揭示中国经济化石能源回弹现象的结构性特征及碳排放权交易政策的调节作用,为调控政策实施中的潜在影响提供了学理依据。基于此,在当前加快推进经济社会发展全面绿色转型、积极稳妥推进碳达峰碳中和背景下,本文提出以下政策建议。

第一,坚持“先立后破”原则,积极推动各部门化石能源利用效率提升。当前我国能源结构转型持续推进,但在相当长一段时期内化石能源仍是保障我国能源安全与稳定供应的“压舱石”。提升生产部门化石能源利用效率是贯彻节约资源与保护环境基本国策的政策支点与关键路径。本文研究表明,化石能源利用效率的提升通过网络联系得以扩散强化,在降低部门本身化石能源需求的同时,引起经济整体化石能源需求下降,从而产生系统性节能减排效应。因此,立足我国资源禀赋与经济能源结构实际,提升化石能源利用效率是加快绿色低碳转型的重要路径选择。一是深入实施重点行业节能降碳改造工程。紧扣国家“大规模设备更新”的政策窗口期,以能效水平为基准,重点支持石油化工、钢铁、有色金属、建材等上游高耗能行业开展系统性节能改造。依托绿色财税政策与绿色金融工具,为企业先进节能降碳技术与装备应用提供财政贴息或税收抵免,对标行业能效标杆严控新建项目,同时推动存量设施节能技术改造,从源头降低生产网络的能源消耗强度。二是建立健全“能效领跑者”激励机制。在煤炭开采、火力发电等关键能源保供部门,遴选能效水平领先的标杆企业,实施正向激励。在用能权指标核定、新增产能置换比例、绿色信贷评级上给予“领跑者”企业倾斜,通过树立行业标杆,引导落后产能加快技术升级或有序退出,利用生产网络的乘数效应放大节能收益。三是推动能源管理体系的数字化、智能化升级。贯彻落实国家数字经济发展战略,依托智能传感、云计算、大数据、物联网等数字技

术,支持重点用能单位建设能耗在线监测系统,推动工业互联网和能效管理的深度融合,为在保障能源安全的前提下最大化挖掘节能潜力提供技术支撑。

第二,科学稳妥推进全国碳排放权交易市场建设,着力强化政策协同与制度保障。加快建设全国碳排放权交易市场,是我国深入贯彻落实碳达峰碳中和战略目标、积极参与全球气候治理、提升国家绿色发展话语权的重要举措。作为中国全面绿色转型政策体系的重大制度创新,全国碳市场建设在激励企业绿色创新、提升能源利用效率和降碳减排的同时,也可能引起阶段性政策摩擦和结构性转型成本。本文研究表明,碳排放权交易政策通过系统影响经济主体行为调整与能效冲击传导过程,加剧各部门化石能源回弹效应,削弱微观主体的能效提升激励与实际节能效果。因此,必须坚持系统观念,通过精细化的制度设计对冲潜在转型阵痛,确保市场机制平稳运行。一是建立碳费返还与精准补偿机制。针对碳排放权交易政策可能带来的隐性成本,同步配套实施差异化的配额抵扣、碳费返还以及能效补贴政策。通过对重点领域的定向支持,确保其化石能源利用效率稳步提升。二是加强市场运行监测与动态评估。随着经济社会绿色低碳转型的推进和对化石能源依赖程度的降低,碳排放权交易市场运行中的制度摩擦和隐性成本将相应减少。因此,应建立长效的市场运行监测和动态评估机制。根据不同阶段的回弹效应特征,统筹推进制度调整与过渡安排,确保碳排放权交易市场平稳运行、长期有效,切实在推动经济高质量发展中发挥更大制度优势。

第三,加速构建企业碳排放和产品碳足迹核算与管理体系,夯实“双碳”政策实施数据基础。碳排放统计核算是落实“双碳”目标相关政策的重要支撑,是推动全国碳排放权交易市场平稳运行、科学制定能效政策、强化减排责任落实的基础性工作,为此应加快补齐数据基础设施短板。一是加速推动碳足迹核算标准化进程。坚持系统谋划与分类施策并重,加快构建覆盖全产业链、全过程、全主体的碳排放和碳足迹核算管理体系。坚持“急用先行,稳妥推进”原则,优先推进钢铁、石油化工等高能耗、重点工业产品碳足迹核算标准制定与推广应用,推动相关标准纳入国家标准体系和行业管理规范。二是推进产品碳足迹在减排管理与绿色消费中的深度应用,积极探索构建基于碳足迹的政策管理体系。一方面,依托碳足迹核算科学设定经济主体减排责任,引导企业识别产业链关键减排环节,明确减排重点路径与技术改造方向。另一方面,依托产品碳足迹信息建立健全产品碳标识认证制度,强化市场低碳导向,激励企业提升化石能源效率与节能降碳改造,同时对重点行业加强绿色产品识别认证,鼓励政府及企业提高对低碳产品的采购力度,引导全社会形成绿色消费理念与偏好,进一步提升企业能效提升的市场收益预期和转型积极性。三是规范企业产品碳足迹信息披露与建立动态管理机制。通过碳足迹披露推进减排效果评估科学化、透明化,提高政策运行的公众信任度和企业参与度,同时为金融机构识别绿色项目、投放绿色信贷提供坚实的数据基础。

第四,深化生产网络视角下的政策制定与评估思维,对网络节点实施差异化精准调控。日益复杂的网络结构是现代化经济体系的重要特征之一,单一节点冲击通过网络结构传导扩散至其他经济主体并引起宏观经济系统性变动(Acemoglu et al., 2012;程大中, 2024),这正是化石能源回弹效应的重要成因与碳排放权交易政策调控冲击扩散的关键路径。因此,政策调控应提升对经济系统结构性影响的关注程度。一是构建基于生产网络的政策制定与评估体系。政策制定应注重识别网络结构中的关键节点。在制定碳排放权交易市场扩围或能效标准提升等政策时,需精准把握政策冲击在网络中的传导路径

及其系统影响,提前预判部门政策冲击可能引发的经济系统性偏离,提升政策工具的系统调控能力。二是优化价格传导配套政策,提升能效投资节能收益。本文研究表明,部门能效冲击通过价格传导机制引起经济结构内生调整从而削弱节能效果。因此准确识别价格传导机制的关键节点,通过配套价格调控与能效投资优惠政策干预成本传导链条,有助于削弱回弹效应的不利影响,从而在激励化石能源效率提升的同时,充分发挥能效投资节能的效果。三是实施基于部门网络特征异质性的差异化监管与精准调控。鉴于不同部门在网络地位及上下游联系强度上的显著差异,应避免“一刀切”式的管理模式。对于碳排放权交易政策及相关配套政策,应重点关注化石能源与电力等受碳排放权交易政策影响较大、处于网络关键位置的能源部门。针对其作为“能源供给保障支柱”与“生产网络核心上游”的双重属性,采取双向策略:一方面,通过配套政策减缓碳排放权交易政策带来的成本冲击,避免部门波动过大影响供应链安全;另一方面,强化节能改造的正向激励,推进其低碳高效转型升级,依托生产网络溢出效应带动经济社会整体绿色低碳转型。

参考文献

- 曹翔、苏馨儿, 2023:《碳排放权交易试点政策是否促进了碳中和技术创新?》,《中国人口·资源与环境》第7期。
- 程大中、唐雨桐、邵心怡, 2024:《生产网络视角下的服务业增长与经济波动》,《经济研究》第8期。
- 段玉婉、蔡龙飞、陈一文, 2023:《全球化背景下中国碳市场的减排和福利效应》,《经济研究》第7期。
- 傅春杨、于也雯、龚六堂, 2025:《以能源节约集约利用促进高质量发展——基于生产网络模型的重点节能增产行业选择》,《管理世界》第2期。
- 郭凯明, 2025:《从生产网络变迁看中国产业结构转型》,《中国社会科学》第4期。
- 何可、朱信凯、李凡略, 2023:《聚“碳”成“能”:碳交易政策如何缓解农村能源贫困?》,《管理世界》第12期。
- 胡珺、方祺、龙文滨, 2023:《碳排放规制、企业减排激励与全要素生产率——基于中国碳排放权交易机制的自然实验》,《经济研究》第4期。
- 黄益平、徐诗语、余昌华、杜浩锋、伍晓鹰, 2024:《生产网络视角下的中国经济周期》,《经济研究》第9期。
- 李海鹏、李卓、张俊飏, 2022:《中国农业能源回弹效应的形成机制、时空演变及影响因素》,《中国人口·资源与环境》第10期。
- 林伯强, 2022:《碳中和进程中的中国经济高质量增长》,《经济研究》第1期。
- 林鹏昇、李硕, 2024:《行政手段与市场机制:中国气候政策碳减排效果的比较》,《世界经济》第6期。
- 刘金科、肖翊阳, 2022:《中国环境保护税与绿色创新:杠杆效应还是挤出效应?》,《经济研究》第1期。
- 刘维林, 2022:《新发展格局下全球生产网络与劳动报酬份额变动》,《经济研究》第10期。
- 马广程、曹建华、丁徐轶, 2024:《非位似偏好、碳市场与异质性政策协调的减排效应》,《中国工业经济》第2期。
- 倪红福, 2022:《中国间接税的效率损失——基于中国生产网络结构一般均衡模型方法》,《管理世界》第5期。
- 聂海峰、杨玉萍、陈晓光, 2025:《增值税改革与行业间资源配置效率演变:1997—2020》,《经济研究》第1期。
- 齐鹰飞、LI Yuanfei, 2020:《财政支出的部门配置与中国产业结构升级——基于生产网络模型的分析》,《经济研究》第4期。
- 邵帅、范美婷、杨莉莉, 2022:《经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察》,《管理世界》第2期。
- 孙传旺、陈智龙、孙博文, 2025:《碳排放权交易制度、产业绿色转型及其外部性》,《经济研究》第6期。
- 屠西伟、张平淡, 2025:《节能目标约束与供应链碳减排》,《经济研究》第7期。
- 王欢欢、吴骁骏, 2025:《碳关税、碳减排及其福利影响的定量研究:基于内生碳价的一般均衡模型》,《经济研究》第5期。
- 王贤彬、郑希恬, 2024:《内生产网络的理论发展与中国应用展望》,《中国工业经济》第12期。
- 温慧愉、杜佳月、高昊宇、李欣明, 2024:《碳市场激励下的企业ESG表现——来自中国碳排放权交易试点的经验证据》,《金融研究》第10期。

- 杨冕、徐江川、杨福霞, 2022:《能源价格、资本能效与中国工业部门碳达峰路径》,《经济研究》第12期。
- 余典范、蒋耀辉、张昭文, 2023:《中国碳排放权交易试点政策的创新溢出效应——基于生产网络的视角》,《数量经济技术经济研究》第3期。
- 张希良、黄晓丹、张达、耿涌、田立新、范英、陈文颖, 2022:《碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究》,《管理世界》第1期。
- 张赟懿、苏彤、王思泉、林伯强, 2025:《行稳方能致远:中国煤炭市场运行特征与价格政策评估》,《管理世界》第2期。
- Acemoglu, D., U. Akcigit, and W. Kerr, 2016, “Networks and the Macroeconomy: An Empirical Exploration”, *NBER Macroeconomics Annual*, 30(1), 273—335.
- Acemoglu, D., and P. D. Azar, 2020, “Endogenous Production Networks”, *Econometrica*, 88(1), 33—82.
- Acemoglu, D., V. M. Carvalho, A. Ozdaglar, and A. Tahbaz-Salehi, 2012, “The Network Origins of Aggregate Fluctuations”, *Econometrica*, 80(5), 1977—2016.
- Acemoglu, D., and A. Tahbaz-Salehi, 2024, “The Macroeconomics of Supply Chain Disruptions”, *Review of Economic Studies*, 92(2), 656—695.
- Baqae, D. R., 2018, “Cascading Failures in Production Networks”, *Econometrica*, 86(5), 1819—1838.
- Baqae, D. R., and E. Farhi, 2024, “Networks, Barriers, and Trade”, *Econometrica*, 92(2), 505—541.
- Blackburn, C. J., and J. Moreno-Cruz, 2021, “Energy Efficiency in General Equilibrium with Input-Output Linkages”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 110, 102524.
- Böhringer, C., and N. Rivers, 2021, “The Energy Efficiency Rebound Effect in General Equilibrium”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 109, 102508.
- Coase, R. H., 2013, “The Problem of Social Cost”, *Journal of Law and Economics*, 56(4), 837—877.
- Fu, C., and B. Wang, 2024, “Income Tax Reductions in Production Networks”, *Macroeconomic Dynamics*, 28(6), 1394—1421.
- Hulten, C. R., 1978, “Growth Accounting with Intermediate Inputs”, *Review of Economic Studies*, 45(3), 511—518.
- Huntington, H. G., 2024, “Us Gasoline Response to Vehicle Fuel Efficiency: A Contribution to the Direct Rebound Effect”, *Energy Economics*, 136, 107655.
- Jevons, W. S., 1865, *The Coal Question: An Inquiry Concerning the Progress of the National and the Probable Exhaustion of Our Coal-Mines*, Macmillan.
- King, M., B. Tarbush, and A. Teytelboym, 2019, “Targeted Carbon Tax Reforms”, *European Economic Review*, 119, 526—547.
- Lemoine, D., 2020, “General Equilibrium Rebound from Energy Efficiency Innovation”, *European Economic Review*, 125, 103431.
- Liu, E., 2019, “Industrial Policies in Production Networks”, *Quarterly Journal of Economics*, 134(4), 1883—1948.
- Liu, E., and A. Tsyvinski, 2024, “A Dynamic Model of Input-Output Networks”, *Review of Economic Studies*, 91(6), 3608—3644.
- Long Jr, J. B., and C. I. Plosser, 1983, “Real Business Cycles”, *Journal of Political Economy*, 91(1), 39—69.
- Lutz, C., M. Banning, L. Ahmann, and M. Flaute, 2022, “Energy Efficiency and Rebound Effects in German Industry - Evidence from Macroeconometric Modeling”, *Economic Systems Research*, 34(3), 253—272.
- Ma, J., N. Wang, Z. Chen, L. Wang, Q. Xiong, P. Chen, H. Zhang, Y. Zheng, and Z.-M. Chen, 2024, “Accounting and Decomposition of China’s CO₂ Emissions 1981—2021”, *Applied Energy*, 375, 124104.
- Porter, M. E., and C. van der Linde, 1995, “Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship”, *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), 97—118.
- Sorrell, S., and J. Dimitropoulos, 2008, “The Rebound Effect: Microeconomic Definitions, Limitations and Extensions”, *Ecological Economics*, 65(3), 636—649.
- Weitzman, M. L., 1974, “Prices Vs. Quantities”, *Review of Economic Studies*, 41(4), 477—491.

Fossil Energy Rebound Effects and the Regulation of Carbon Emissions Trading Policy: From the Perspective of Endogenous Adjustments of Production Networks

CHEN Zhanming, CHEN Zihao and MA Jianhong
(School of Applied Economics, Renmin University of China)

Summary: To address climate change, China will strive to peak carbon emissions by 2030 and achieve carbon neutrality by 2060. In this context, enhancing the efficiency of fossil energy and establishing the national carbon emissions trading system (ETS) are key strategies for advancing the green transition. In an interconnected economy, sectoral fossil energy efficiency improvements trigger economy-wide adjustments through cascading effects, which alter fossil energy demand beyond the source sector and generate rebound effects. By imposing emission costs, the ETS reshapes economic agents' responses to efficiency shocks, influencing rebound effects and final energy-saving outcomes. Understanding fossil energy rebound effects and their interactions with the ETS is crucial for policy evaluation and policy coordination.

This study examines fossil energy rebound effects under China's national ETS. We analyze the transmission mechanisms of sectoral energy efficiency shocks and the regulatory role of the ETS from the perspective of endogenous adjustments of production networks. By developing a structural general equilibrium model incorporating ETS regulation, energy efficiency, and production networks, we theoretically and empirically investigate the transmission mechanisms of rebound effects induced by exogenous sectoral fossil energy efficiency improvements, and the regulatory role of the ETS in the transmission process of energy efficiency shocks.

Theoretically, sectoral fossil energy efficiency improvements trigger adjustments in the output network and the final consumption structure via direct and endogenous price channels. These adjustments alter overall fossil energy demand intensity and cause structural rebounds. Meanwhile, as factor-biased technological progress, efficiency improvements reallocate primary inputs across sectors and raise household income, inducing scale rebounds. The ETS regulations, by imposing emission costs, intervene in production and consumption adjustments when fossil energy efficiency improves. This systematically influences structural and scale rebounds by amplifying cost shocks and altering network structures.

Empirically, we estimate elasticities of factor substitution using structural econometrics and calibrate the model with China's 2020 input-output data. We quantify rebound mechanisms and identify the ETS impacts within a counterfactual framework. Results show that China's fossil energy rebound effects are primarily driven by direct structural rebounds, exhibiting a significant "super conservation" pattern with an overall value of -0.32 . Sectoral heterogeneity mainly arises from differences in endogenous structural rebounds. The fossil energy sector exhibits notably higher rebound effects due to its unique position in the production network. The national ETS raises rebound effects by suppressing scale rebounds while amplifying structural rebounds, especially in upstream sectors. This weakens energy-saving outcomes of efficiency improvements, with fossil energy sector as well as electricity and heat production sector bearing the majority of energy-saving losses and the ETS's implicit costs.

The findings offer several policy implications. First, the principle of "establishing the new before abolishing the old" should be upheld to promote fossil energy efficiency improvements. Second, it is crucial to scientifically and steadily advance the construction of the national ETS, and focus on strengthening policy coordination and institutional safeguards. Third, the establishment of accounting and management systems for enterprise carbon emissions and product carbon footprints should be accelerated to solidify the data foundation for implementing "dual carbon" policies. Fourth, efforts should be made to deepen policy formulation and evaluation from a production network perspective, and implement differentiated and precise regulations for key network nodes.

The contributions are as follows. First, the paper integrates ETS regulations into a general equilibrium model of production networks, enriching the literature on rebound effects and the externalities of environmental regulations. It provides a foundational framework for analyzing the transmission and interaction of policy shocks and technological change in a multi-sector setting. Second, it distinguishes the price network and output network, clarifying shock propagation processes in endogenous production networks. Third, by calibrating the model with input-output data and structural econometric methods, it provides the first empirical quantification of fossil energy rebound mechanisms and the external effects of ETS regulations in China. These results deepen the understanding of rebound phenomena in China and offer practical insights for targeted energy-saving and emission-reduction policies.

Keywords: Rebound Effects; Carbon Emissions Trading System; Fossil Energy; Production Networks

JEL Classification: D57, Q43, Q58

(责任编辑:王星媛)(校对:曹 帅)