

王宗保,钟 鸣,马晓风. 基于多区域 CGE 的能源排放与运输融合政策研究[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(5): 194-203.  
WANG Zong-bao, ZHONG Ming, MA Xiao-feng. Analysis of combined emission and transportation policies using a multi-regional CGE model [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(5): 194-203.

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2024.05.016

# 基于多区域 CGE 的能源排放与运输融合政策研究

王宗保<sup>1,2</sup>, 钟 鸣<sup>1,2</sup>, 马晓风<sup>1,2</sup>

(1. 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063; 2. 武汉理工大学  
国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063)

**摘 要:** 碳税政策和“输煤转输电”政策是减少能源受端地区碳排放和推进以电代煤的重要手段, 但是现有研究较少对这 2 种政策的综合影响进行对比分析。为了定量分析上述融合政策综合影响, 基于多区域可计算一般均衡建模方法, 构建区域能源排放与运输融合政策分析模型。该模型通过模拟相关政策对地区碳排放和区域贸易的多边影响, 为地区碳排放控制和能源输送策略提供参考。并以长三角地区为研究对象, 深入分析该地区的排放与运输政策对经济发展、二氧化碳排放、能源需求结构以及区域间能源调入的影响。研究结果表明: “输煤转输电”政策和碳税政策均有利于推动长三角地区电力消费的增长和抑制二氧化碳排放; “输煤转输电”政策制定需要考虑地区的能源需求结构, 在“输煤转输电”转变比例为 0.15 时, 该政策不仅带动 GDP 增长和电力消费提升, 还能有效减少地区的二氧化碳排放; 碳税政策也可抑制二氧化碳排放, 但对地区 GDP 产生不利影响; 考虑到碳税政策对电力需求的刺激作用, 在实施碳税政策的同时, 适度提升“输煤转输电”的转换比, 更有利于能源受端地区的经济发展和电力调入量; 当地区碳税价格为 120 元/t 时, 为了优化 GDP 表现, 建议将转换比例调至约 0.12; 对于能源低碳转型的重点地区, 需要综合运用排放与运输政策, 提升地区低碳发展水平。

**关键词:** 交通工程; 能源与运输政策; 可计算一般均衡; 能源运输; 碳税

**中图分类号:** U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8879(2024)05-0194-10

## Analysis of combined emission and transportation policies using a multi-regional CGE model

WANG Zong-bao<sup>1,2</sup>, ZHONG Ming<sup>1,2</sup>, MA Xiao-feng<sup>1,2</sup>

(1. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 2. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China)

**Abstract:** Implementing the carbon tax and shifting energy inputs from coal to electricity are vital for mitigating carbon emissions in the energy-recipient region. However, limited studies have thoroughly examined the combined impacts of these two policies. An analysis model for combined

收稿日期: 2024-06-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2601300)

作者简介: 王宗保(1995-), 男, 湖北武汉人, 工学博士研究生, E-mail: baoyell@whut.edu.cn.

通讯作者: 马晓风(1981-), 女, 山东威海人, 副研究员, 工学博士, E-mail: maxiaofeng@whut.edu.cn.

energy emission and transportation policy was developed based on the multi-regional computable general equilibrium (CGE) modeling approach to quantitatively analyze the comprehensive impact of the above policies. The proposed model evaluated the multifaceted effects of different policy portfolios, providing a reference for regional carbon emission control and energy transportation strategies. Taking the Yangtze River Delta (YRD) region as the case study, the impacts of emission and transportation policies on economic development, carbon dioxide emissions, energy demand structure, and inter-regional energy imports were analyzed. The results show that both the coal-to-electricity transformation and regional carbon tax policies are beneficial in promoting electricity consumption and curbing carbon dioxide emissions in the YRD region. The formulation of the coal-to-electricity policy needs to take into account the region's energy demand structure. At a transformation ratio of 0.15, this policy stimulates GDP growth and increases electricity consumption, and effectively reduces the region's carbon dioxide emissions. In comparison, while the carbon tax policy also effectively reduces regional carbon dioxide emissions, it hurts regional GDP. Given the stimulating effects of the carbon tax policy on electricity demand, its concurrent implementation with a well-formulated energy transformation policy can not only foster economic development in the energy-recipient region, but also stimulate power imports from energy-production regions. In the scenario where the regional carbon tax price is 120 RMB/ton, adjusting the transformation ratio to approximately 0.12 is recommended to optimize GDP performance. Therefore, for the key regions in the transition to low-carbon economies, it is essential to implement the combined emission and transportation policies to enhance the region's low-carbon development level. 9 figs, 25 refs.

**Key words:** traffic engineering; energy and transportation policy; computable general equilibrium; energy transport; carbon tax

## 0 引言

煤炭作为中国最重要的一次能源,长期占据着较高的能源消费比重<sup>[1]</sup>。由于中国煤炭资源分布不均衡,大量煤炭需要从“三西”等煤炭主产区长途调运至长三角等消费地区。这种“北煤南运”“西煤东运”的能源输送格局不仅增加了运输和物流成本,还可能加剧能源受端地区的生态和环境压力<sup>[2]</sup>。随着特高压输电技术和跨区输电通道的不断发展,中国输电能力和效率得到了显著提升,形成了输煤输电并举的能源运输新格局。在中国能源运输体系持续优化和中国综合立体交通网络逐步完善的背景下,电力输送网络与综合交通基础设施网的高质量融合发展显得尤为重要<sup>[3]</sup>。《交通强国建设纲要》和《国家综合立体交通网规划纲要》指出,要推进交通基础设施网与能源网融合发展,推进绿色低碳发展<sup>[4]</sup>。为推进能源结构低碳化转型,国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》强调了以电力、天然气等清洁能源替代煤炭的重要性。作为推进煤炭消费替代的重要

政策手段,“输煤转输电”政策和区域碳税政策通过抑制重点地区的煤炭消费,正发挥着重要作用。因此,在能源结构低碳化转型背景下,系统性地评估能源供需政策的影响,对于促进区域经济发展和绿色转型至关重要。

“输煤转输电”政策主要从能源供给端调整能源输送结构,减少向重点地区的煤炭供应并增加电力输送比例。赵长红等比较了浩吉铁路沿线地区的输煤和输电方案的技术经济特征,认为长距离范围特高压输电方案更具优势<sup>[5]</sup>。西北地区可通过增加“输煤转输电”比重,实现中国煤电布局的“东退西进”。然而上述研究仅考虑了能源生产和运输成本,没有考虑不同地区的能源消纳能力,这可能导致弃电风险的增加<sup>[6]</sup>。邓铭江等分析了新疆能源基地弃电率较高的问题,提出推进“多能互补”的能源输送机制,缓解因电力装机规模扩大而引发的弃电问题<sup>[7]</sup>。针对区域能源调运问题,已在煤炭运输和电力输送领域分别开展了相应研究。张政构建了一个动态定价下的煤炭调运模型,并分析了煤炭价格和煤运通道建设对区域多式联运网络的影响<sup>[8]</sup>。翟俊

义考虑到风力发电的不稳定性,通过优化跨区域电力输送策略,促进了风电消纳效率提升<sup>[9]</sup>。但是,这些研究多聚焦于单一能源运输系统的独立分析,鲜有全面审视“多能互补”框架下能源输送机制的构建及其对区域社会经济活动的影响。

为了促进能源结构的低碳转型,碳税作为一种重要的政策手段,受到了越来越多的关注。社会经济活动是地区碳排放的主体<sup>[10]</sup>,因此相关学者根据投入产出关系,分析了碳排放政策对地区经济活动的影响。Wen 等根据 2010 年区域间投入产出表中得出的乘数因子,分析了二氧化碳排放在中国产业链中的流动关系和区域碳排放的联系<sup>[11]</sup>。Bachmann 等指出了生产成本变化对市场需求和企业生产的影响,这些宏观经济反馈会降低投入产出分析中的乘数效应<sup>[12]</sup>。为了纳入碳税政策对地区能源消费和经济活动的影响,相关研究广泛采用可计算一般均衡(computable general equilibrium, CGE)模型进行政策分析。Li 等基于 2015 年的投入产出数据,使用 CGE 模型分析了碳税政策对中国能源消费的影响,并认为碳税政策对煤炭消费需求产生了显著调控效果<sup>[13]</sup>。但是碳税实施过程中,不同产业部门和不同居民群体受到的影响存在差异<sup>[14]</sup>。Jia 等构建了多部门多家庭动态 CGE 模型,并分析了相关影响,认为碳税政策在减少煤炭等一次能源需求的同时,增加了地区电力和成品油等二次能源进口<sup>[15]</sup>。安康欣等分析了相关碳排放控制策略下安徽省能源消费影响,发现相关政策会抑制煤炭需求并带动地区的电力消费和可再生能源的生产<sup>[16]</sup>。当前,针对碳税政策的研究多聚焦于单一经济体内部的经济、环境和能源需求的影响。该政策在空间维度上,特别是对跨区域能源运输格局及经济活动影响尚缺乏深入的分析。

由于区域经济发展和能源消费同时也受区域间贸易活动的影响。相关研究在 CGE 模型的基础上,通过增加区域间贸易活动,构建了多区域 CGE 模型以分析这些影响<sup>[17]</sup>。Ramadhani 等使用多区域 CGE 模型分析了印尼碳税和边境碳关税对印尼与不同国家之间货物贸易和碳排放的影响,结果显示贸易伙伴国实施的边境碳关税政策会对印尼经济产生负面影响<sup>[18]</sup>。李娜等构建了中国多区域 CGE 模型,并分析了长江经济带内部地区间产业转移和运输成本下降带来的就业和贸易影响<sup>[19]</sup>。具体到输煤与输电政策分析的研究中,姜春海等通过构建多区域 CGE 模型,分析了不同比例的“输煤转输电”政

策对地区经济和污染物排放的影响,并据此设计了一系列的利益补偿机制<sup>[20]</sup>。从以上研究可以看出,尽管相关研究通过构建多区域 CGE 模型,分别探讨了碳税政策和“输煤转输电”政策对地区经济发展的潜在影响,但 2 种政策相互作用关系尚未得到充分探讨。碳税政策通过影响能源需求,也会对“输煤转输电”政策的实施效果产生重要影响。因此,在当前能源转型的大背景下,如何有效结合 2 种政策,以实现经济发展与碳排放降低的双重目标,值得深入研究。

鉴于此,本文在多区域 CGE 模型的基础上,构建能源排放与运输融合政策分析框架,并以长三角地区为例,针对不同政策的短期影响进行评估。和以往研究相比,本文考虑到“三西地区”的能源输送结构和长三角地区能源消纳能力,对“输煤转输电”政策和碳税政策进行对比,分析不同煤电转换比例和碳税定价对长三角地区经济、环境和能源需求的影响;讨论能源排放与运输融合政策的综合影响,通过调整政策组合,实现经济发展、环境保护与满足用能需求之间的平衡,从而在宏观层面上为区域能源排放与运输政策的制定提供参考。

## 1 模型构建

本文构建的能源排放与运输融合政策分析框架参考多区域 CGE 模型的基本结构<sup>[13]</sup>,并在此基础上增加了碳排放模块和区域经济联系方面的拓展,模型框架如图 1 所示。该模型共涉及生产模块、贸易模块、均衡模块、收支模块、碳排放模块。其中,生产模块、均衡模块、收支模块为 CGE 模型的基础模块,贸易模块和碳排放模块为本文主要的拓展模块。鉴于动态 CGE 模型在预测经济系统长期变化时,需要对要素供给、人口变动以及要素生产率等关键参数进行预先设定,不当的参数选择可能会削弱研究结果的可靠性和参考价值。因此,为了模拟能源与运输政策的短期效应,本文选用静态多区域 CGE 模型,重点关注政策变动对经济、环境和能源需求的短期影响。

### 1.1 基础模块

模型中,生产模块使用多层级嵌套结构描述资本、劳动力、能源、中间投入与部门产出之间的关系。本文使用的生产模块结构基于 Li 等的研究进行构建<sup>[21]</sup>,该模块的框架结构如图 2 所示。在生产模块的顶层,部门产出源自于非能源部门的中间投入以及劳动力、资本与能源的复合投入,这些要素通

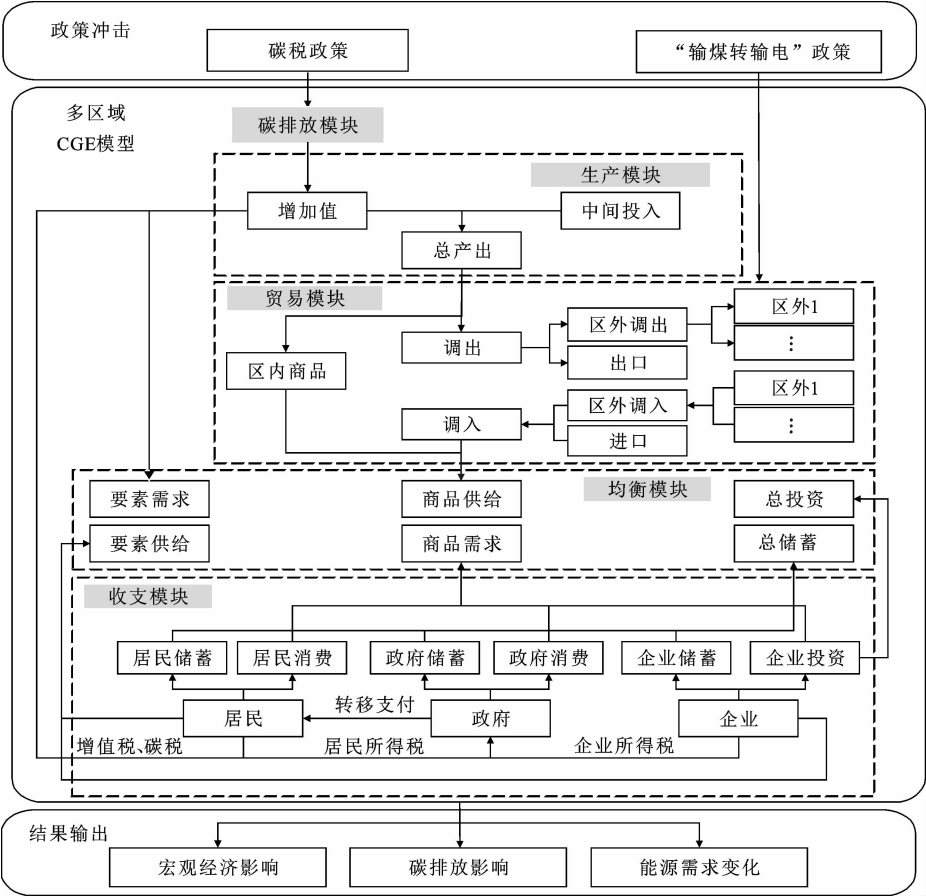


图 1 能源排放与运输融合政策分析框架

Fig. 1 Analyzing framework for combined energy emission and transportation policy

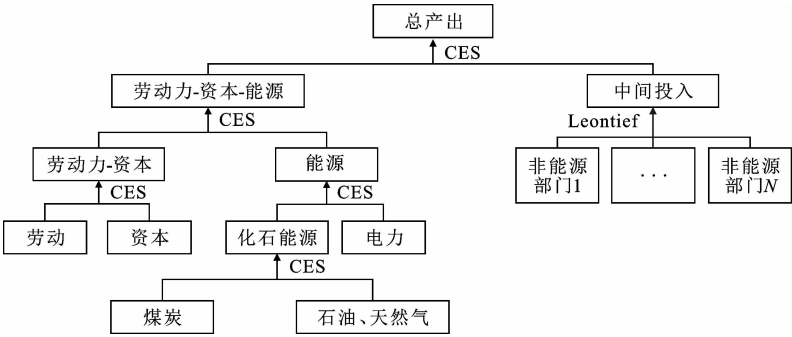


图 2 生产模块结构

Fig. 2 Production module structure

过常数替代弹性 (constant elasticity of substitution, CES) 函数计算最终产出。其中,非能源部门的中间投入的组合被建模为 Leontief 函数;劳动力-资本-能源复合投入通过多层 CES 函数嵌套得到。在生产模块中,假设每个生产者都追求生产成本最小化,因此在每层 CES 嵌套结构中,投入商品数量和价格之间存在一定的约束关系。以第 1 层嵌套结构为例,总产出根据中间投入和劳动力-资本-能源复合得到,参考 Lofgran 等的通用变量标记<sup>[22]</sup>,相

应的 CES 约束条件如下

$$P_{0,a}Q_{0,a} = P_{1,a}Q_{1,a} + P_{2,a}Q_{2,a} \quad (1)$$
$$Q_{0,a} = \alpha_a (\delta_a Q_{1,a}^{\rho_a} + (1 - \delta_a) Q_{2,a}^{\rho_a})^{1/\rho_a} \quad (2)$$
$$\frac{P_{1,a}}{P_{2,a}} = \frac{\delta_a}{1 - \delta_a} \left( \frac{Q_{2,a}}{Q_{1,a}} \right)^{1 - \rho_a} \quad (3)$$

式中: $P_{0,a}$ 和 $Q_{0,a}$ 分别为部门 $a$ 产出的商品价格和数量; $P_{1,a}$ 和 $Q_{1,a}$ 分别为每种部门劳动力-资本-能源复合品的价格和数量; $P_{2,a}$ 和 $Q_{2,a}$ 分别为每种部门中间投入品的价格和数量; $\alpha_a$ 、 $\delta_a$ 和 $\rho_a$ 分别为每种

部门的规模系数、比例系数和替代系数。

式(1)表示价值量约束,式(2)表示 CES 生产函数,式(3)表示生产成本的最小化条件。

收支模块描述了资金在居民、政府和企业 3 个主体之间的流动和循环。本文采用柯布-道格拉斯函数(Cobb-Douglas function)描述居民在缴纳所得税收入后的可支配收入分配。企业收入来自于资本要素分配,这些收入在缴纳所得税后,对利润进行分配。政府通过各种税收用于政府各类支出。在区域内商品市场和要素市场处于完全竞争状态下,均衡模块利用价格机制来调节市场供需,确保要素和商品的供需达到平衡。本文中,要素市场主要考虑劳动力和资本,并使用新古典闭合条件,假设短期劳动力和资本供给量与初始要素禀赋相等<sup>[13]</sup>。

## 1.2 拓展模块

为了模拟碳税政策和输煤转输电政策带来的冲击,本文分别对碳排放模块和贸易模块进行了拓展。碳排放模块主要用于生产活动中二氧化碳排放和碳税计算。本文中,二氧化碳排放主要来自生产部门对化石能源的消耗。碳税政策旨在对煤炭、石油天然气等化石能源产生的二氧化碳征收排放税,以降低温室气体排放。本文根据化石能源商品产值及其产生碳排放量来确定相应能源商品的从价税率,进而建立碳排放模块和生产模块之间的联系。本文借鉴 Zhai 等的方法<sup>[23]</sup>,首先计算每种化石能源  $\gamma$  消耗产生的碳税总量  $\xi_\gamma$ ,然后根据相应能源产业产值计算对应能源的从价税率  $\tau_\gamma$ 。能源商品的从价税率计算过程如下

$$\xi_\gamma = \kappa \zeta_\gamma e_\gamma \quad (4)$$

$$\tau_\gamma = \frac{\xi_\gamma}{\beta_\gamma \sigma_\gamma} \quad (5)$$

式中: $\kappa$ 为碳税价格; $\zeta_\gamma$ 为能源  $\gamma$  的使用数量; $e_\gamma$ 为能源  $\gamma$  的二氧化碳排放系数; $\beta_\gamma$ 为能源  $\gamma$  的价格。

根据能源  $\gamma$  的价格  $\beta_\gamma$  和数量  $\sigma_\gamma$  得到的相应产值,将碳税转化为能源消费过程的从价税率  $\tau_\gamma$ 。当碳税政策实施时,能源消费价格将变成  $(1 + \tau_\gamma)\beta_\gamma$ 。

在贸易模块中,传统 CGE 模型使用恒定弹性变换(constant elasticity of transformation, CET)函数<sup>[23]</sup>,将每个产业部门的产出分配到区内和区外 2 个市场中。然后通过区内销售的商品和区外调入向本地市场供应商品,以获得最大利润。本文在贸易模块中,增加了不同区域间调入和调出之间的联系。参考文献[24]中对不同区域间货运需

求建模方法的比较,本文使用 CES 函数描述不同地区商品的调入和调出。该函数假定不同地区的商品不完全替代,在多区域 CGE 模型中被广泛采用<sup>[25]</sup>。以商品的调入为例,假设区域数量为  $n$ 。本文将来自不同地区  $r$  的部门  $a$  产量  $R_{a,r}$  通过 CES 函数  $f(\cdot)$  计算区外调入商品的数量  $T_a$ ,然后和进口商品  $I_a$  按照式(7)共同组成了调入商品数量  $M_a$ 。式(6)、式(7)可表示为

$$T_a = f(R_{a,r_1}, R_{a,r_2}, \dots, R_{a,r_n}) \quad (6)$$

$$M_a = \alpha_{1,a} (\delta_{1,a} I_a^{\rho_{1,a}} + (1 - \delta_{1,a}) T_a^{\rho_{1,a}})^{1/\rho_{1,a}} \quad (7)$$

式中: $\alpha_{1,a}$ ,  $\delta_{1,a}$ ,  $\rho_{1,a}$  分别为对应的规模系数、比例系数和替代系数。

## 2 案例分析

### 2.1 政策设定

本文以长三角地区作为主要案例,该地区主要包括上海、江苏、浙江、安徽。根据《“十四五”现代能源体系规划》,长三角地区属于能源低碳转型引领区,需要加快调整能源结构,控制煤炭消费,提升能源低碳发展水平。随着“三西地区”-长三角特高压输电线路于 2017 年投入使用,相关电力输送通道的开通为“输煤转输电”政策的实施奠定了基础。以 2020 年为例,根据《中国能源统计年鉴》的数据,该地区的煤炭外省调入量较 2017 年下降了 1.87%;与此同时,电力调入量却比 2017 年大幅增长了 38.72%。这一显著的变化表明,该地区的能源输入结构正在经历重大转变。

参考已有研究政策,本文重点分析“输煤转输电”政策和碳税政策 2 种政策工具的影响,并设计了不同场景进行模拟。其中,“输煤转输电”政策在确保能源输送总量不变的前提下,调整“三西地区”对长三角地区的能源供应结构,按比例改变煤炭与电力的调入量  $R_{a,r}$ 。由于这一转换过程中需综合考虑煤炭热值、发电过程中损耗以及输电和储能损失。为简单起见,本文假设煤炭与电力按照等价值进行转换。碳税政策主要考虑针对长三角地区征收不同价格的碳税  $\kappa$ ,提高化石能源产品的使用成本。考虑到煤炭产地分布,本文将外部地区划分为长江中上游地区(江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南和贵州)、三西地区(山西、陕西、内蒙古西部)、中国其他地区以及国外,并对数据进行收集和整理。

### 2.2 研究数据

本文基础模块使用的数据包括社会核算矩阵

(social accounting matrix, SAM)数据、弹性系数等。本文中地区 SAM 的投入产出数据来自 2017 年该地区投入产出表,并将国民经济部门划分为农业、金属矿采选业、非金属矿采选业、轻工业、原料加工与化工业、设备制造业、建筑业、服务业、煤炭、石油天然气、电力在内的 11 个部门,其中煤炭、石油天然气、电力为本文重点分析的能源部门。本文模型中的弹性系数均参考 Zhai 等研究推荐的弹性系数进行设置<sup>[23]</sup>。相关比例系数和规模系数根据 SAM 数据校正得到。

拓展模块使用的数据包括能源碳排放系数和区域间商品交换量数据。模型中,化石能源商品消耗产生的碳排放系数来自政府间气候变化专门委员会(IPCC)温室气体排放清单,区域能源商品消费量参考 2017 年中国能源统计年鉴进行设置。为了反映地区间的能源贸易情况,本文使用 2017 年中国区域间投入产出表设置不同地区间的能源商品贸易量,该数据来自中国碳核算数据库。

由于长三角地区是主要能源消耗地区,本文根据地区投入产出表和区域间投入产出表数据,对该地区煤炭、石油天然气和电力的调入量数据进行整理,长三角地区能源调入结构如图 3 所示。从图 3 可以看出,长三角地区的煤炭主要来自于“三西地区”,同时也有一定比例的煤炭调入来自国外进口。对于区域内石油天然气和电力,这些能源的调入主要依赖于中国其他地区,其中电力调入不涉及国外进口。

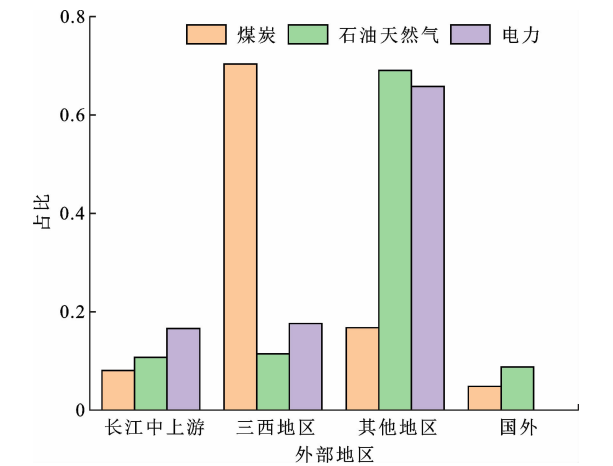


图 3 长三角地区能源调入结构  
Fig. 3 Energy inflow structure in Yangtze River Delta

3 结果讨论

3.1 “输煤转输电”政策影响分析

图 4 为不同转换比例下的“输煤转输电”政策

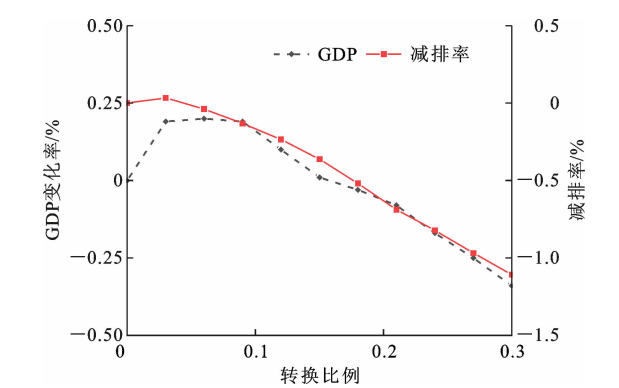


图 4 “输煤转输电”政策宏观影响  
Fig. 4 Macro impact of “coal-to-electricity” transformation policy

对地区 GDP 和二氧化碳排放减排率的影响。从总体趋势来看,实施“输煤转输电”政策能够有效降低长三角地区的碳排放量,当转换比例为 0.3 时,区域二氧化碳排放率可减少 1.11%。然而,这一政策也会对地区 GDP 产生一定的影响。随着“输煤转输电”力度的增加,长三角地区的 GDP 变化率在经历小幅上升 0.2% 后,快速下降至 -0.34%。这主要是由于在较低的煤电转换比例下,增加的电力投入能够对煤炭投入产生替代效应,并带动更多生产要素投入,从而在一定程度上弥补了煤炭投入减少对 GDP 的负面影响。“三西地区”是长三角地区重要的煤炭供应地区,随着“输煤转输电”转换比例的增加,区域内煤炭供应逐渐减少。当转换比例超过 0.15 后,地区产业部门的产出会因煤炭供应短缺而受影响,导致该政策对 GDP 的负面效应逐渐凸显。

“输煤转输电”政策的实施不仅会对宏观经济指标产生影响,也会对地区能源消费结构产生影响。图 5 为不同转换比例下长三角地区煤炭、石油天然气、电力消费量变化。“输煤转输电”政策导致“三西地区”煤炭供应量减少,因此在该政策下,长三角地区的煤炭消费量逐渐降低。由于不同能源之间的替代效应,煤炭供应减少会刺激该地区对石油天然气和电力消费需求的增长。随着转换比例的提高,地区电力的供给会逐步增加,石油天然气的消费量变化率在小幅增加至 0.05% 后,逐步下降至 -1.27%。此外,长三角地区内电力消费量比例在煤电转换比例低于 0.15 时,会随着转换比例的提升而逐步增加至最高(0.83%)。然而,随着政策对地区 GDP 负面影响的逐步显现,区域能源需求的减少也会引起电力消费量的下降。当转换比例达到 0.3 时,电力需求比例的降幅达到 -2.23%。因此,不合理的能源输



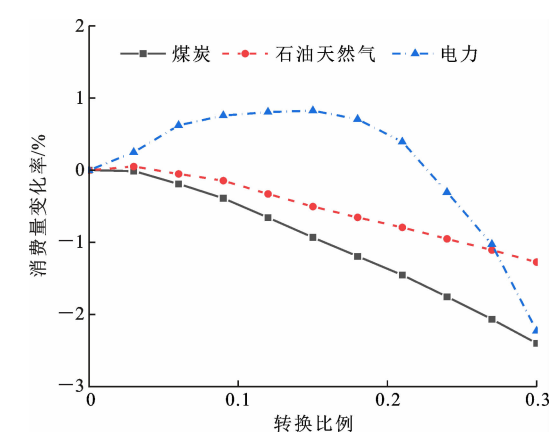


图5 “输煤转输电”政策对能源消费影响

Fig. 5 Energy consumption impact of “coal-to-electricity” transformation policy

送政策不仅会影响能源受端地区的经济发展,也会减少其能源需求。在制定和实施“输煤转输电”政策时,必须充分考虑地区的能源消纳能力、经济发展水平和环境保护需求,以实现能源结构优化和经济可持续发展。

3.2 碳税政策影响分析

图6展示了不同价格下的碳税政策对长三角地区GDP和二氧化碳减排率的潜在影响。随着碳税价格的逐步提高,化石燃料的使用成本随之增加,推高了企业的生产成本,从而对地区GDP造成了直接的负面冲击。尽管碳税价格的提高对地区GDP增长构成压力,但其在促进地区二氧化碳减排方面的效果较为显著,相关政策最高可取得-10.35%的减排效果。因此,在制定碳税政策时,需要平衡地区经济发展和减排目标。

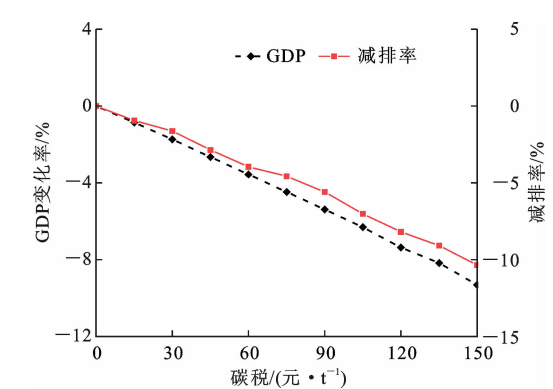


图6 碳税政策宏观影响

Fig. 6 Macro impact of carbon tax policy

碳税政策的实施不仅会对宏观经济指标产生影响,也会对地区能源消费和能源结构产生影响。由于不同能源的二氧化碳排放系数不同,碳税政策对不同能源需求的影响程度也不同。长三角地区能源

需求随碳税价格的变化如图7所示。结果表明,对化石燃料实施碳税政策将导致长三角地区对煤炭、石油天然气的需求下降。在这些能源中,煤炭需求受碳税政策的冲击最为显著,最高变化达-21.32%。此外,该政策也对石油天然气的需求产生抑制效果,但相较于煤炭,石油天然气的需求减少幅度较为有限,最高降幅-3.8%。由于能源商品之间的替代效应,在碳税政策下,长三角地区对电力的需求将进一步增加,最高增加到1.52%。但当碳税价格超过90元/t后,碳税对地区产业活动的负面影响逐渐增强,进而会抑制地区的能源需求,对电力消费的需求也进一步放缓。因此,适当定价的碳税政策有助于提升地区电力消纳能力,促进二氧化碳减排。

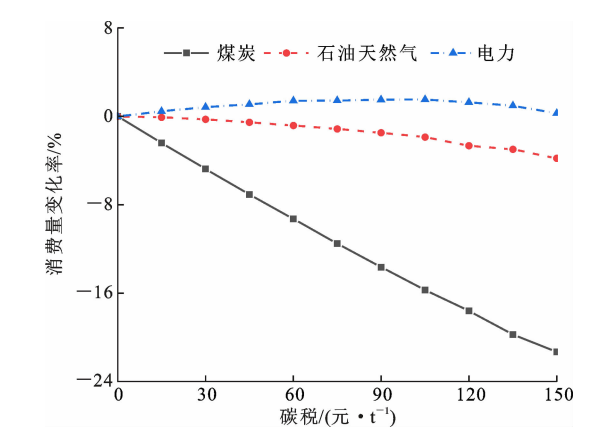


图7 碳税政策对能源消费影响

Fig. 7 Energy consumption impact of carbon tax policy

3.3 能源排放与运输融合政策影响分析

从上述研究可以看出,“输煤转输电”政策和碳税政策均有利于推动长三角地区电力消费的增长和二氧化碳排放的减少,但2种政策的作用机理不同。“输煤转输电”政策主要从供给侧减少煤炭供应并增加电力供应,而碳税政策主要从需求侧增加化石能源商品的价格,促进电力使用。长三角地区作为能源低碳转型引领区,应当综合运用多种政策手段,以提升能源结构的低碳发展水平。本节将综合评估能源排放与运输融合政策,并对其影响进行分析。其中,碳税价格设置为[0元/t,150元/t],“输煤转输电”政策转换比例设置为[0,0.3]。

从经济影响的角度,能源排放与运输融合政策对长三角地区GDP的影响如图8所示。分析表明,相比“输煤转输电”政策,区域碳税政策对GDP的影响更加显著。若以GDP最大化为目标,在不征收碳税(即碳税价格为0元/t)的场景下,理想的能源转

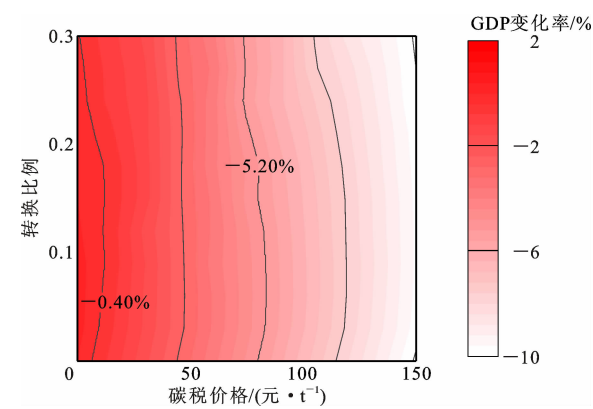


图 8 融合政策 GDP 影响

Fig. 8 Impact of combined policies on GDP

换比例不超过 0.06。相对地,在碳税价格为 120 元/t 的场景下,为了优化 GDP 表现,推荐的能源转换比例应调整至约 0.12。随着碳税政策的实施,该地区对电力的需求将有所增长,适度提高能源转换比例,提高电力供给水平,更能够有效促进长三角地区的经济发展。

此外,不同碳税政策和能源输送结构对于“三西地区”的能源产业也十分重要。图 9 为在融合政策情景下,长三角地区从“三西地区”电力调入量变化结果。从图 9 可以看出,增加“三西地区”煤电转换比例和提高长三角地区碳税定价均有利于提高“三西地区”电力调入量。鉴于碳税政策可以增加地区电力消纳量,配合“输煤转输电”政策可以有效地带动“三西地区”实际电力调入量。在综合能源政策中,当“输煤转输电”的转换比例为[0.1,0.15],碳税价格为 25~75 元/t 时,这些政策组合对“三西地区”电力调入量的增长最为有利,相关政策组合预计将使“三西地区”的电力调入量增加约 1.2 倍。因此,在制定综合能源与运输政策时,必须全面考虑其对地区经济及能源需求的综合影响。

4 结 语

(1)长三角地区作为能源低碳转型引领区,在合理“输煤转输电”政策框架下提升地区电力供给,不仅能够贡献大约 0.2% 的 GDP 增长和 0.83% 的地区电力消费增长,而且可以控制地区二氧化碳排放,对于当地经济发展与环境保护具有积极作用。

(2)适当碳税政策能够刺激地区电力消费需求增长,并抑制煤炭等化石能源的需求。当碳税价格小于 90 元/t 时,地区电力消费需求最高增长 1.52%,并能带动约 5.59% 的二氧化碳减排量。然而,这种政策可能对地区 GDP 的增长产生不利影

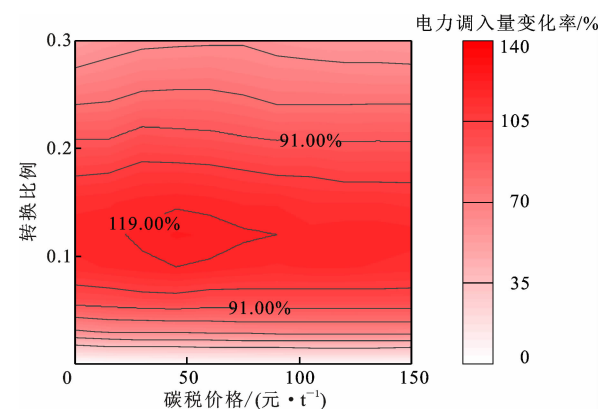


图 9 “三西地区”电力调入量变化

Fig. 9 Changes in electricity inflow from Sanxi Region

响。因此,在推行碳税政策时,必须权衡地区经济发展与环境保护之间的关系,以实现两者的协调与平衡。

(3)在制定综合能源与运输政策的过程中,考虑到碳税政策对地区电力消纳需求的促进作用,适度提高“输煤转输电”的转换比例不仅可以有效地带动地区的电力调入量,而且有助于推动能源受端地区的经济发展。因此,对于能源低碳转型的重点地区,应当综合运用多种政策手段,提升能源结构的低碳发展水平。

(4)本文在 CGE 模型的基础上,通过模拟地区碳排放和区域贸易的多边影响,构建了一种能源排放与运输融合政策分析框架。该方法拓展分析了能源排放与运输融合政策的综合效应,为地区碳排放控制和能源输送策略提供参考。在交通基础设施网与能源网融合发展的背景下,未来研究可以从当前的价值量分析扩展到更具体的货运量和用电量,以评估能源排放与运输政策对综合交通网和电网的影响。考虑到能源技术进步和新能源产业的快速发展,未来研究可在准确设定模型外生变量未来变化的基础上,进一步探讨政策的长期动态效应。

参考文献:

References:

[ 1 ] LI N,CHEN W Y. Modeling China’s interprovincial coal transportation under low carbon transition[J]. Applied Energy,2018,222:267-279.

[ 2 ] 张楷唯,尹 璐,刘清芳.“双碳”背景下铁路煤炭运输发展浅析[J]. 铁道货运,2023,41(9):15-20.

ZHANG Kai-wei, YIN Lu, LIU Qing-fang. Analysis of development of railway coal transportation under the background of carbon peak and carbon neutrality



[J]. *Railway Freight Transport*, 2023, 41(9): 15-20.

[ 3 ] 曾学福. 综合交通基础设施建设与国家能源运输网融合发展的研究[J]. *公路*, 2022, 67(2): 172-180.

ZENG Xue-fu. Research on the integrated development of comprehensive transportation infrastructure and national energy network[J]. *Highway*, 2022, 67(2): 172-180.

[ 4 ] 叶建红, 李兴华, 杨超, 等. 交通强国背景下综合交通一体化融合发展的理论框架[J]. *交通运输研究*, 2023, 9(3): 30-38, 47.

YE Jian-hong, LI Xing-hua, YANG Chao, et al. Theoretical framework of integrative development for comprehensive transport under building a country with strong transportation network [J]. *Transport Research*, 2023, 9(3): 30-38, 47.

[ 5 ] 赵长红, 邱燕妮, 袁家海. 输煤输电经济性比较: 以浩吉铁路为例[J]. *煤炭经济研究*, 2020, 40(10): 14-18.

ZHAO Chang-hong, QIU Yan-ni, YUAN Jia-hai. Economic comparison of coal transportation and power transmission—Taking Haoji Railway as an example [J]. *Coal Economic Research*, 2020, 40(10): 14-18.

[ 6 ] 蒋金荷, 袁全红. “双碳”目标下我国三北地区能源外送新途径研究[J]. *价格理论与实践*, 2023(7): 30-34.

JIANG Jin-he, YUAN Quan-hong. Research on new methods of energy export in the Three North Regions of China under the “dual carbon” goal[J]. *Price: Theory & Practice*, 2023(7): 30-34.

[ 7 ] 邓铭江, 明波, 李研, 等. “双碳”目标下新疆能源系统绿色转型路径[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1107-1122.

DENG Ming-jiang, MING Bo, LI Yan, et al. Pathways towards a cleaner energy system for Xinjiang under carbon peak and carbon neutrality goals[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1107-1122.

[ 8 ] 张政. 多式联运下我国煤炭调运问题的实证研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.

ZHANG Zheng. An empirical study on coal transportation in China under multimodal transport[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

[ 9 ] 翟俊义. 促进大规模风电消纳的电力系统协调调度模型与方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.

ZHAI Jun-yi. Research on coordinated dispatching model and method of power system to promote large-scale wind power consumption [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.

[10] EWING B R, HAWKINS T R, WIEDMANN T O, et al. Integrating ecological and water footprint accounting in a multi-regional input-output framework [J]. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 1-8.

[11] WEN W, WANG Q. Identification of key sectors and key provinces at the view of CO<sub>2</sub> reduction and economic growth in China: Linkage analyses based on the MRIO model [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 1-15.

[12] BACHMANN C, KENNEDY C, ROORDA M J. Applications of random-utility-based multi-region input-output models of transport and the spatial economy [J]. *Transport Reviews*, 2014, 34(4): 418-440.

[13] LI S J, JIA N, CHEN Z N, et al. Multi-objective optimization of environmental tax for mitigating air pollution and greenhouse gas [J]. *Journal of Management Science and Engineering*, 2022, 7(3): 473-488.

[14] 贾智杰. 中国低碳政策的对比研究——以碳税、碳交易和资源税为例[D]. 厦门: 厦门大学, 2021.

JIA Zhi-jie. A comparative study of China's low carbon policies: A case study of carbon tax, carbon trading and resource tax[D]. Xiamen: Xiamen University, 2021.

[15] JIA Z J, LIN B Q, LIU X Y. Rethinking the equity and efficiency of carbon tax: A novel perspective[J]. *Applied Energy*, 2023, 346: 121347.

[16] 安康欣, 刘米可, 范淑婷, 等. 能耗双控转向碳双控的政策影响评估——基于安徽省动态 CGE 模型[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(4): 1795-1804.

AN Kang-xin, LIU Mi-ke, FAN Shu-ting, et al. Impact of the shift from “dual control” of energy to carbon: A CGE-based case study of Anhui[J]. *Chinese Environmental Science*, 2024, 44(4): 1795-1804.

[17] SUN Z, ZHANG R, GAO Y, et al. Hub ports in economic shocks of the melting Arctic[J]. *Maritime Policy & Management*, 2021, 48(7): 917-940.

[18] RAMADHANI D P, KOO Y. Comparative analysis of carbon border tax adjustment and domestic carbon tax under general equilibrium model: Focusing on the Indonesian economy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 377: 134288.

[19] 李娜, 石敏俊, 张卓颖, 等. 基于多区域 CGE 模型的长江经济带一体化政策效果分析[J]. *中国管理科学*,

2020,28(12):67-76.

LI Na,SHI Min-jun,ZHANG Zhuo-ying,et al. Analysis on policy effects of integration of Yangtze River Economic Belt based on a multi-regional CGE model [J]. Chinese Journal of Management Science,2020,28 (12):67-76.

[20] 姜春海,王 敏,李亚静. 能源输送转型困境的症结解析与破解路径——基于多区域 CGE 模型的“三西”地区—京津冀地区“输煤转输电”研究[J]. 系统工程理论与实践,2024,44(8):2434-2455.

JIANG Chun-hai,WANG Min,LI Ya-jing. Analysis of the dilemma and resolution path of energy transmission transformation;A study on “structure adjustment of coal electric energy transport” from the “Sanxi Region” to the Beijing-Tianjin-Hebei Region based on a multi-Regional CGE model[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2024, 44 ( 8 ): 2434-2455.

[21] LI N,ZHANG X L,SHI M J,et al. Does China’s air pollution abatement policy matter? An assessment of the Beijing-Tianjin-Hebei Region based on a multi-regional CGE model [J]. Energy Policy, 2019, 127: 213-227.

[22] LOFGREN H,HARRIS R L,ROBINSON S. A standard computable general equilibrium (CGE) model in GAMS[R]. Washington DC: International Food Policy Research Institute,2002.

[23] ZHAI M Y,HUANG G H,LIU L R,et al. Segmented carbon tax may significantly affect the regional and national economy and environment — A CGE-based analysis for Guangdong Province[J]. Energy, 2021,231:120958.

[24] IVANOVA O. Modelling inter-regional freight demand with input-output,gravity and SCGE methodologies[M]. Amsterdam:Elsevier,2014.

[25] SHAHRIARI S,ROBSON E N,WANG J,et al. Integrating a computable general equilibrium model with the four-step framework [J]. Transportation, 2023,50(4):1213-1260.