

DOI: 10.19666/j.rlfed.202212165

基于动态随机一般均衡模型的碳定价政策对电力行业的影响效应研究

王喜平, 冯 远

(华北电力大学经济管理学系, 河北 保定 071003)

[摘要] 碳定价政策的实施将会对电力行业的低碳转型产生重要影响。构建了一个包含碳定价政策的电力动态随机一般均衡(DSGE)模型,并在此基础上系统考察了“双碳”目标下碳交易和碳税2种不同碳定价政策对电力行业减排的不同影响。结果表明:碳交易政策的整体影响大于碳税政策,且碳交易政策对减排的影响在碳达峰情景下是通过抑制火电产出实现的,而在碳中和情景下则是通过对绿电产出的激励实现的;碳交易和碳税2种碳定价政策不同的机制设计在“双碳”目标下对电力行业减排会产生不同的影响。碳交易政策中,特别是碳达峰情景下,通过市场机制实现减排存在着一定的上限,超过这个上限时反而会形成一种“倒逼”机制。碳税政策中,返还机制会达到减排目的且返还比例的扩大会加强对电力减排的影响。基于上述结论提出了相关政策建议。

[关键词] “双碳”目标;碳定价政策;电力行业;DSGE模型

[引用本文格式] 王喜平,冯远.基于动态随机一般均衡模型的碳定价政策对电力行业的影响效应研究[J].热力发电,2023,52(4):43-53. WANG Xiping, FENG Yuan. Research on the effect of carbon pricing policy on power industry| based on dynamic stochastic general equilibrium model[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(4): 43-53.

Research on the effect of carbon pricing policy on power industry based on dynamic stochastic general equilibrium model

WANG Xiping, FENG Yuan

(Department of Economics and Management, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The implementation of carbon pricing policy will have an important impact on the low-carbon transformation of power industry. This paper constructs a power dynamic stochastic general equilibrium (DSGE) model with carbon pricing policy, and systematically investigates the different impacts of carbon trading and carbon tax on emission reduction of the power industry under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality. The results show that, the overall impact of carbon trading policy is greater than that of carbon tax policy, and the impact of carbon trading policy on emission reduction is achieved by inhibiting thermal power output under the carbon peak scenario, while it is achieved by encouraging green power output under the carbon neutral scenario. Different mechanism designs of carbon pricing policies, such as carbon trading and carbon tax, will have different impacts on emission reduction in the power industry under the dual carbon target. In the carbon trading policy, especially in the carbon peak scenario, there is a certain upper limit to achieve emission reduction through the market mechanism, and when the upper limit is exceeded, a “back-forcing” mechanism will be formed. In the carbon tax policy, the rebate mechanism will achieve the goal of emission reduction and the expansion of the rebate proportion will strengthen the impact on electricity emission reduction. Based on the above conclusions, relevant policy recommendations are put forward.

Key words: dual carbon target; carbon pricing policy; power industry; DSGE model

修回日期: 2022-12-21

基金项目: 河北省社会科学基金项目(HB19YJ011)

Supported by: Social Science Foundation of Hebei Province (HB19YJ011)

第一作者简介: 王喜平(1969),女,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为能源经济与可持续发展,hdwpx@126.com。

通信作者简介: 冯远(1996),男,硕士研究生,主要研究方向为能源经济,fy1678728273@163.com。

化石能源的燃烧是碳排放的主要来源。根据《电力行业碳达峰碳中和发展路径研究》可知,目前我国CO₂排放总量中化石能源燃烧占88%,而火力发电则离不开化石能源的燃烧,这使得电力行业的碳排放占碳排放总量的41%^[1]。电力行业作为碳排放大户,其低碳减排是我国实现“双碳”目标的关键。为此,全国碳排放权交易在区域试点市场的基础上于2021年7月16日正式在发电行业率先启动。不仅如此,碳税政策也有望付诸实践。2021年国务院印发的《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》(以下简称《意见》)特别提到要完善财税价格政策和推进市场化机制建设,这释放了积极的信号。基于此背景,如果能剥离出“双碳”目标实现过程中碳定价政策对电力行业的不同影响,将非常有益于具体政策的执行。

碳定价政策从机制上主要有碳交易(carbon trade)与碳税(carbon tax)2种方式。碳交易本质上属于一种数量型政策工具,即碳排放权的数量是外生的;而碳税则属于一种价格型政策工具,即碳税税率是外生的。Weitzman^[2]最早通过社会福利损失比较了数量型和价格型政策工具的优劣。随着对能源与环境问题的日益重视,学者们开始关注2种类型的碳定价政策对宏观经济的影响。Fischer等人^[3]在分析碳排放上限政策时将碳价格与产出挂钩,分析碳税政策时将税率作为一个外生变量,发现二者均可实现减排但后者对社会经济产生波动性更大。我国学者也做了类似研究,如徐文成^[4]、吴力波^[5]等均发现目前数量型政策对我国来说更适用。因此已有文献大多针对碳交易政策的影响展开研究。段茂盛等^[6]从碳交易政策的理论和实践出发,发现我国企业层面的碳排放数据较差,难以通过恰当的配额数量来触发市场调节,而选择碳价水平作为触发条件实施难度较小。Lin等人^[7]则发现我国碳交易价格过低,减排效果甚微,应维持在10美元/t左右才能充分发挥碳交易市场体系的作用。而碳税政策多考虑与其他政策相结合的情形,如Chan^[8]将碳税同财政政策和货币政策结合起来,发现三者都可以控制碳排放,且碳税可以作为货币政策的一种补充手段。

还有学者分析了碳定价政策对不同行业和生产部门的影响。Zhang等人^[9]在生产环节把能源部门独立出来,发现碳税政策对经济和环境的影响更大。而丁冠群等^[10]从行业异质性的角度研究了碳定

价政策的影响,发现碳交易政策下行业技术冲击有明显的结构性效应,碳税政策下则不明显。电力行业作为碳减排的重要领域,有些学者分析了碳定价政策对该行业的影响,主要通过估值模型^[11]、将碳交易政策作为“准自然实验”^[12-13]和利用可计算一般均衡模型^[14-15]等发现碳交易市场机制可以有效地促进电力行业的节能减排。然而上述研究大多没有考虑“双碳”目标的约束,并且不能反映碳定价政策的动态影响。

具体而言,目前的探究具有以下的局限:1)“双碳”目标作为影响我国社会经济发展的一个重要约束条件,对碳定价政策的实施效果将会产生极大影响,这是已有文献大多未曾涉及到的;2)现有的研究多集中于部门的异质性和部门间的相互替代,而电力部门的产出同时是最终生产过程中一种重要的生产要素,所以若从部门异质性的角度出发将电力部门与其他部门并列显然不合理,应当将电力部门视为一个中间生产部门进而作用于最终的社会生产。考虑到动态随机一般均衡(DSGE)模型可以将宏观经济中的多种行为主体联系起来,且每个行为主体都可做出跨期的最优决策;此外,还可以通过外生冲击的形式来动态分析宏观经济政策的实施效果,是对碳定价政策进行动态分析的重要工具。因此,本文构建了一个电力DSGE模型来分析碳定价政策对电力行业的动态效应和传导机制。本文的边际贡献如下:1)考虑到电力作为重要的生产要素对社会经济的发展起着至关重要的作用,本文将电力部门作为中间生产环节纳入模型,并将电力部门区分为火电厂商和绿电厂商,从而在模型中引入电力部门各变量。同时在电力生产环节引入了碳定价政策,使得电力厂商需要对生产过程中的碳排放进行支付,从而可以通过模型分析碳排放价格、电力碳排放、电力产出和发电机组投资之间的关系。2)在“双碳”目标约束下评估不同碳定价政策对电力行业的影响。“双碳”目标是一个影响电力行业发展的重要约束条件,其实现离不开新能源和碳捕集、利用与封存(CCUS)等技术的快速发展,这些很大程度上会影响电力行业的碳排放水平,从而对碳定价政策的实施效果产生影响。所以本文将“双碳”目标作为一个重要的前提条件,能够比较全面地分析碳定价政策对电力行业的影响效应。3)细致分析了碳交易和碳税2种不同碳定价政策的机制设计对电力碳减排的不同影响,剖析了碳交

易政策中碳配额的“倒逼”机制和碳税的“双重红利”效应。

1 模型构建与情景设定

首先构建了一个包含碳定价政策的电力 DSGE 模型。模型基本结构为：家庭通过劳动和资本投入获得收入，用来购买消费品和进一步投资；最终生产部门利用资本、劳动力和电力要素进行生产，并支付相应的要素报酬；电力生产部门则分为使用火电机组发电的火电厂商和使用水电、风电、核电、生物质发电和太阳能发电等绿电机组发电的绿电厂商，火电厂商和绿电厂商的生产均需投入劳动、电源投资和其他资本投入，此外前者还需投入化石能源用于生产，所以火电生产会产生碳排放，火电厂商需要在碳交易市场中购买配额或缴纳碳税，而绿电厂商中的生物质电厂商所需的生物质原料则通过光合作用吸收掉一定的碳排放，且随着生物质掺烧和生物质碳捕集技术 (CBCECS/BECCS) 等的快速发展，生物质电厂商将会对电力行业“双碳”目标的实现做出重要贡献；政府部门对居民征税和对火电厂商征收碳税。

1.1 家庭部门

假定家庭向厂商提供资本和劳动，进而获取资本租金与劳动工资，并对消费和闲暇做出选择从而实现跨期效用最大化。因此效用函数形式如下：

$$U = E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left(\frac{C_t^{1-\gamma}}{1-\gamma} - \frac{L_t^{1+\eta}}{1+\eta} \right) \quad (1)$$

式中： E_0 为数学预期； C 为消费； L 为劳动时间； γ 为消费的跨期替代弹性； η 为劳动对于实际工资替代弹性的倒数； β 为贴现因子。

家庭面临的预算约束方程为：

$$C_t + I_t = W_t L_t + R_t K_t - \tau_t \quad (2)$$

式中： W_t 为 t 期工资； R_t 为 t 期的利率； K_t 为 t 期的资本； L_t 为 t 期的劳动供给； τ_t 为居民上缴税收。

资本存量的变化方程为：

$$I_t = K_{t+1} - (1 - \delta) K_t \quad (3)$$

式中： δ 为资本折旧率。

此外，劳动投入和资本投入均分为 3 部分，一部分用于最终产品的生产，另 2 部分用于电力行业中火电厂商和绿电厂商的生产：

$$L_t = (L_G)_t + (L_F)_t + (L_R)_t \quad (4)$$

$$K_t = (K_G)_t + (K_F)_t + (K_R)_t \quad (5)$$

1.2 最终产品部门

在完全竞争市场下，厂商有同样的生产技术，且借助于雇佣劳动、使用资本和使用电力进行生产。因此采用 C-D 生产函数为企业的生产函数，并假设生产规模报酬不变。企业的生产函数如下：

$$Y_t = Z_t (K_G)_t^\alpha (L_G)_t^\xi E_t^{1-\alpha-\xi} \quad (6)$$

式中： Y 代表产出； $\alpha > 0$ ，表示资本的产出弹性； ξ 为电力的产出弹性； K_G 为企业资本投入； L_G 为企业劳动投入； E 为电力投入； Z 为全要素生产率。

厂商在 t 期需要支付工人的工资、资本租金及电力支出，所以厂商的利润为：

$$\Pi_t = Y_t - W_t (L_G)_t - R_t (K_G)_t - (P_E)_t E_t \quad (7)$$

1.3 电力生产部门

电力生产部门的生产函数与最终生产部门的生产函数类似，具体为：

$$(E_F)_t = (A_F)_t (K_F)_t^\theta (L_F)_t^{\theta_3} (G_F)_t^{\theta_1} (C_F)_t^{\theta_2} \quad (8)$$

$$(E_R)_t = (A_R)_t (K_R)_t^{\theta_4} (L_R)_t^{\theta_6} (G_R)_t^{\theta_5} \quad (9)$$

式中： E_F 和 E_R 分别为火电厂商和绿电厂商的产出； A_F 和 A_R 分别为二者的生产效率参数； K_F 、 K_R 和 L_F 、 L_R 分别为生产过程中的资本和劳动投入； θ 、 θ_4 和 θ_3 、 θ_6 分别为 2 类厂商资本和劳动的产出弹性； G_F 和 G_R 分别为火电厂商对火电机组的电源投资和绿电厂商对清洁能源机组的电源投资； θ_1 和 θ_5 分别为 2 种电源投资的产出弹性；火电生产的过程中需要投入中间污染品 C_E ， θ_2 为其产出弹性。由于 2 类厂商规模报酬不变，所以还需满足 $\theta + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 1$ 和 $\theta_4 + \theta_5 + \theta_6 = 1$ 。电力生产过程中的碳排放主要由火电厂商产生，可由碳排放强度 φ 计算出，且与环保技术水平 T 成负向关系。

$$(C_E)_t = \frac{\varphi (E_F)_t}{T_t} \quad (10)$$

火电厂商的利润函数分为 2 种：

1) 碳交易政策下，火电厂商需要支付资本、劳动和化石能源的要素报酬；此外若电力厂商的碳排放若超过了上限，则需在碳交易市场中以价格 P_C 购买碳排放许可 C_P 。

$$(C_P)_t = (C_E)_t - \overline{(C_E)_t} \quad (11)$$

$$(\Pi_F)_t = (P_F)_t (E_F)_t - W_t (L_F)_t - R_t (K_F)_t - (P_{CE})_t (C_E)_t - (P_C)_t (C_P)_t \quad (12)$$

2) 碳税政策下，对厂商则以税率 ν 征收碳排放税。

$$(\Pi_R)_t = (P_R)_t (E_R)_t - W_t (L_R)_t - R_t (K_R)_t - (P_{CE})_t (C_E)_t - \nu_t (C_U)_t \quad (13)$$

绿电厂商的利润函数分为 3 种:

1) 碳达峰情景下, 绿电厂商仅需要支付资本和劳动的要素报酬, 其利润函数为:

$$(\Pi_R)_t = (P_R)_t(E_R)_t - W_t(L_R)_t - R_t(K_R)_t \quad (14)$$

2) 碳中和情景下, 绿电厂商中的生物质电厂商对碳排放的吸收能力明显提升, 其吸收能力参数为 θ_R , 当期可吸收 $\theta_R * E_R$ 的碳排放。因为绿电厂商不产生碳排放, 因此可以将吸收的碳排放通过碳交易市场出售, 获取收益, 此时的利润函数为:

$$(\Pi_R)_t = (P_R)_t(E_R)_t - W_t(L_R)_t - R_t(K_R)_t + (P_C)_t \theta_R (E_R)_t \quad (15)$$

3) 若存在碳税返还机制时, 绿电厂商会得到部分返还的碳税作为激励, 以碳达峰情景为例, 此时的利润函数为:

$$(\Pi_R)_t = (P_R)_t(E_R)_t - W_t(L_R)_t - R_t(K_R)_t + \theta_T v_t (C_v)_t \quad (16)$$

式中: θ_T 为返还的比例。

$$(E_P)_t = (E_F)_t^\kappa (E_R)_t^{1-\kappa} \quad (17)$$

$$E_t(P_E)_t = (E_P)_t(P_P)_t \quad (18)$$

火电产出 E_F 和绿电产出 E_R 通过 C-D 函数形成电力总产出 E_P , κ 为火电产出的份额参数, P_P 为相应的价格。

1.4 政府部门

假定 G_C 为政府收缴的碳税, 其表达式为:

$$(G_C)_t = v_t (C_v)_t \quad (19)$$

G_F 和 G_R 组成新增电源投资 E_G , α_1 为电源投资中火电机组的占比。

$$(G_F)_t = \alpha_1 (E_G)_t \quad (20)$$

此外政府以一次性税收形式向居民征税 τ , 并且用于政府支出。政府预算的表达式为:

$$\tau_t + (G_C)_t = (E_G)_t + G_t \quad (21)$$

1.5 市场出清

当市场达到出清状态时, 有:

$$Y_t = C_t + I_t + G_t \quad (22)$$

1.6 外生冲击

将火电生产技术、绿电生产技术、环保技术、碳排放上限和碳税税率设定为外生冲击且符合一阶自回归过程。以火电力生产技术为例, 表达式为:

$$\ln\left(\frac{(A_F)_t}{(A_F)_t}\right) = \rho_F \ln\left(\frac{(A_F)_{t-1}}{(A_F)_t}\right) + (\varepsilon_F)_t, (\varepsilon_F)_t \sim N(0, \sigma_F^2) \quad (23)$$

1.7 情景设定

根据 2021 年发布的《意见》, 考虑设置碳达峰

情景和碳中和情景 2 种情景。

1) 碳达峰情景 到 2030 年, 电力行业实现碳达峰, 其峰值约 $4.4 \times 10^9 \text{ t CO}_2$ 。参考程娜等^[16]研究, 取此时火电厂商的碳排放强度 φ 为 0.301 5。此时非化石能源装机占比和发电比重出现明显增长, 参考舒印彪等^[17]研究, 取火电占比 κ 为 48%, 电源投资中火电机组占比 α_1 为 36%。

2) 碳中和情景 我国实现“零碳”, 电力行业进一步提高非化石能源的发展速度, 并将产生的碳排放和绿氢结合制取化工原料等, 实现电力行业的零碳发展。但随着电力低碳的加快尤其是负碳技术的快速发展, 电力行业的碳中和很有可能提前实现。参考程娜等^[16]研究取此时火电厂商的碳排放强度 φ 为 0.153, 参考舒印彪等^[17]研究取火电占比 κ 为 8%, 电源投资中火电机组占比 α_1 为 11%。另外, 据舒印彪等^[17]分析, “零碳”时火电厂商除 CCUS 的碳排放为 $3.4 \times 10^8 \text{ t CO}_2$ 都将由生物质电厂商解决。若电力行业实现“负碳”, 则电力行业的碳排放可能为 $-6 \times 10^8 \text{ t CO}_2$ 。假定火电厂商和绿电厂商各贡献一半, 即满足 $\varphi * E_F$ 为 $0.4 \times 10^8 \text{ t}$, $\theta_R * E_R$ 为 $-6.4 \times 10^8 \text{ t CO}_2$, 进一步可求得 θ_R 为 $-0.212 9$ 。

2 参数校准与方差分解

2.1 参数校准

本文中年度贴现率 β 采用常见的 0.96, 消费的跨期替代弹性 γ 取 2, 劳动的负效用参数 η 取 1, ω 取 1, 年度资本折旧水平 δ 取 0.15。部分参数参考 Xiao 等人^[18]取最终厂商的资本产出弹性 α 为 0.533, 电力的产出弹性 ζ 为 0.117, 火电厂商、绿电厂商和 CCUS 厂商资本产出弹性 θ_1 、 θ_3 和 θ_5 分别为 0.53、0.55 和 0.60, 火电厂商所用中间污染品的产出弹性 θ_2 为 0.09。电源投资的弹性 θ_1 和 θ_4 参考刘斌^[19]取 0.05。外生冲击的持续性参数和标准差参数参考 Smets 等人^[20]的结果。另外还有一些稳态的比例值如 \bar{G}/\bar{Y} 等根据历年的《中国统计年鉴》等进行估计。

2.2 方差分解

在现实生活中, 经济变量往往受到各种外生冲击联合作用的影响, 通过方差分解方法可以剥离出这些外生冲击对经济变量的贡献程度。方差分解是将某时期受到多因素联合冲击后, 相关变量产生偏离稳态响应的综合方差, 根据其不同冲击因素进行分解; 得到每个冲击因素对综合方差的贡献份额, 从而确定各因素对变量影响力的大小^[21]。图 1 和图 2

给出了碳交易和碳税 2 种碳定价政策在“双碳”目标下，1 个单位火电技术冲击、绿电技术冲击、环保技术冲击和碳定价政策冲击（碳交易政策的外生冲击为碳排放上限冲击，碳税政策的外生冲击为碳税税率冲击）对各主要经济变量贡献程度。图 1、

图 2 中：A1—A8 分别代表最终产出、火电产出、绿电产出、碳交易价格、火电碳交易许可需求、火电机组投资、绿电机组投资和电力碳排放；灰色、浅蓝色、深蓝色、浅黄色分别表示火电技术冲击、绿电技术冲击、环保技术冲击、碳定价政策冲击。

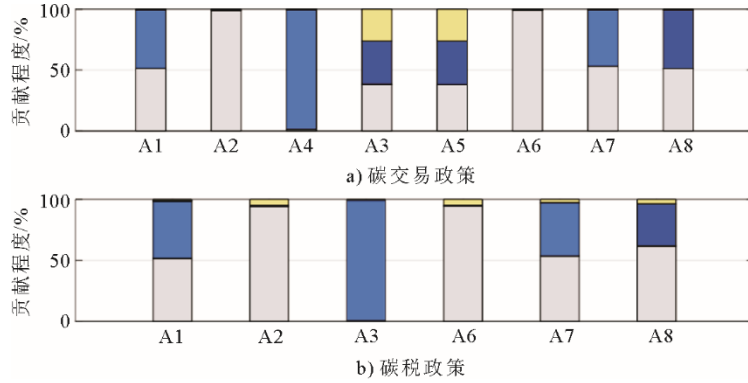


图 1 碳达峰情景下各变量对外生冲击的方差分解结果

Fig.1 Variance decomposition results of exogenous shocks of all variables in carbon peak scenario

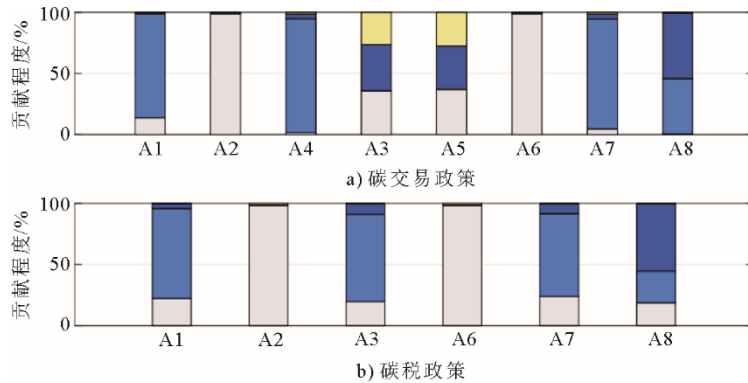


图 2 碳中和情景下各变量对外生冲击的方差分解结果

Fig.2 Variance decomposition results of exogenous shocks of all variables in carbon neutral scenario

图 1 表明：火电技术冲击对大部分变量的贡献程度均最大，且在 2 种碳定价政策下的贡献程度没有明显差异；绿电技术冲击对各变量的贡献程度同样差异不明显，而环保技术冲击和碳定价政策冲击则呈现一定的差异性。图 2 表明，与碳达峰情景下相似，火电技术冲击仍是引起大部分变量变动的主要原因，但是绿电技术冲击对各变量的贡献程度与碳达峰情景相比出现了明显差异，对最终产出和电力碳排放的贡献程度有了明显提升。其原因可能在于：1) 2060 年非化石能源发电占比将达 90% 以上，这将使得绿电技术冲击成为引起社会经济波动的重要因素；2) 绿电厂商中的生物质电厂对碳排放的吸收能力大大提升，碳中和时期这部分厂商比例的扩大将对电力行业的碳减排做出巨大贡献。

3 动态效应分析

3.1 不同碳定价政策对电力行业的影响

由前文方差分解可知，火电技术冲击是引起电力碳排放增加的主要因素，因此通过脉冲响应分析模拟火电技术冲击增大 1% 对各变量的动态影响来分析碳交易政策和碳税政策在“双碳”目标约束下的差异化影响。具体设置了 3 种情形，分别为碳交易政策 (a)、碳税政策 (b) 以及无政策 (c)。

图 3 为碳达峰情景下各变量对火电技术冲击的动态响应。根据图 3，碳达峰情景下，暂时性火电技术冲击发生后，初期导致火电产出上升，火电机组投资增加，电力碳排放会相应上升；最终产出也随之出现正向调整，最终产出增加带来的收入效应

导致社会对电力需求的进一步增加；单纯依靠火电产出的增加无法满足社会生产对电力的需求，导致绿电产出也出现上升。随着火电技术冲击水平的衰退，各变量受到的影响也逐渐消失，渐渐回到稳态。绿电产出出现“延迟效应”，即其最高峰并没有在期初出现而是滞后了几期，这是因为风电、光伏等绿电投资从规划立项到项目投产需要一定的周期。此外，当存在碳交易政策时，火电产出的增加导致厂商对碳配额的需求也增加，从而带动碳交易价格上升。

由于碳交易价格和火电对碳排放许可的需求仅在碳交易政策时存在，所以在比较不同政策的差异时不考虑这 2 个变量。通过比较碳交易政策、碳

税政策和无政策时火电技术冲击的经济波动效应可以发现：与无政策时相比，存在碳定价政策时火电产出和电力碳排放增幅的下降较显著，其他变量增幅也有所下降，这说明碳定价政策的施行会使得厂商的碳排放成本增加，产出水平下降，导致火电技术冲击下各变量增幅的下降。而碳交易政策使大部分变量增幅的下降明显大于碳税政策的情形，也就是说碳交易政策的影响更大。这与大多数已有研究的结论相同，也佐证了我国首先实施碳交易政策的事实。而碳税政策施行时为避免给企业带来较大的经济负担，税率通常较低，所以碳税政策的影响会小于碳交易政策的影响。

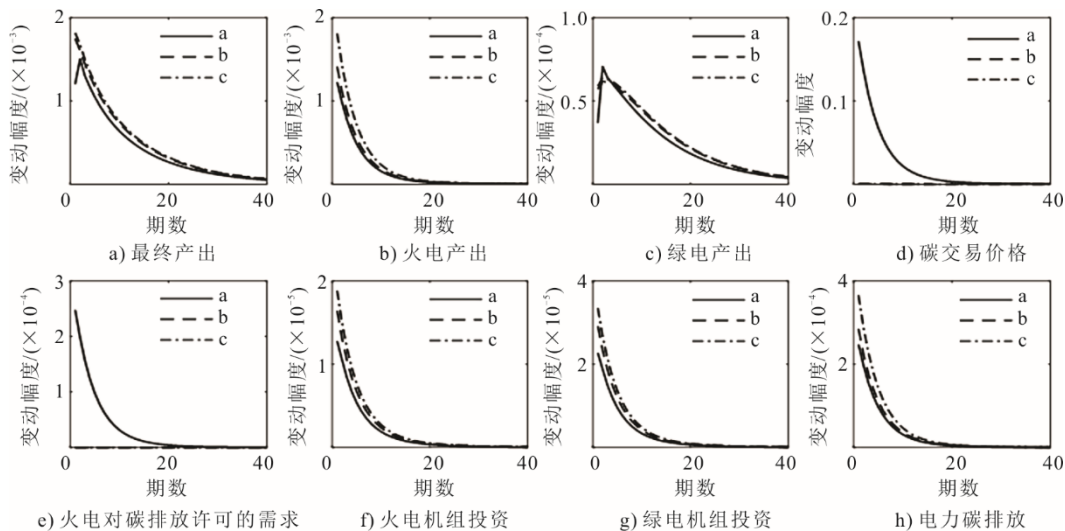


图 3 碳达峰情景下各变量对火电技术冲击的动态响应

Fig.3 Dynamic response of various variables to thermal power technology impact in carbon peak scenario

图 4 为碳中和情景下各变量对火电技术冲击的动态响应。根据图 4，碳中和情景下初期的最终产出、火电产出和火电机组投资的增幅有所下降，而绿电产出和绿电机组投资的增幅则有所提升，这或许与我国发电量和装机结构的转变有关。据周原冰等^[22]估计，到 2060 年我国电源总装机将达到 8×10^9 kW，其中非化石能源装机将达到 7.68×10^9 kW，而发电量的近 96% 以上也将由非化石能源提供。

通过比较碳交易政策、碳税政策和无政策时火电技术冲击的经济波动效应可以发现：3 种情形下的火电产出增幅基本没有差异。在无政策和碳税政策下，绿电产出、火电机组投资和绿电机组投资的增幅基本一致，而碳交易政策下的增幅明显大于前二者。电力碳排放无政策和碳税政策时的增幅基本一致，但碳交易政策下电力碳排放对火电技术冲击的响应由正转负。碳中和情景下电力低碳转型使

得火电占比迅速下降，电力碳排放水平也相应下降，这使得碳定价政策对厂商成本的影响也迅速下降，导致 3 种情形下的火电产出增幅差异不大。碳中和情景下另一个显著的特点就是绿电厂商中的生物质电厂商对碳排放的吸收能力大大提升，在存在碳交易政策时，这部分厂商可以将吸收的碳排放放在碳市场出售，从而获取收益，所以碳交易政策下生物质电厂商的产出明显会大于另外 2 种情形，绿电产出也相应增加，从而影响到其他变量。

3.2 碳定价政策的机制设计对电力行业的影响

3.2.1 不同碳排放上限对碳交易政策的影响

前文对碳交易政策分析的一个重要前提是火电厂商碳排放上限是既定的，本部分假设碳排放上限不确定，分别假定为：碳排放上限增加 50% (a1)、碳排放上限不变 (a2)、碳排放上限下降 50% (a3)，

分析并比较 3 种情形下火电技术冲击增加 1% 时对电力行业的影响。

图 5 为碳达峰情景不同碳排放上限下各变量对火电技术冲击的动态响应。

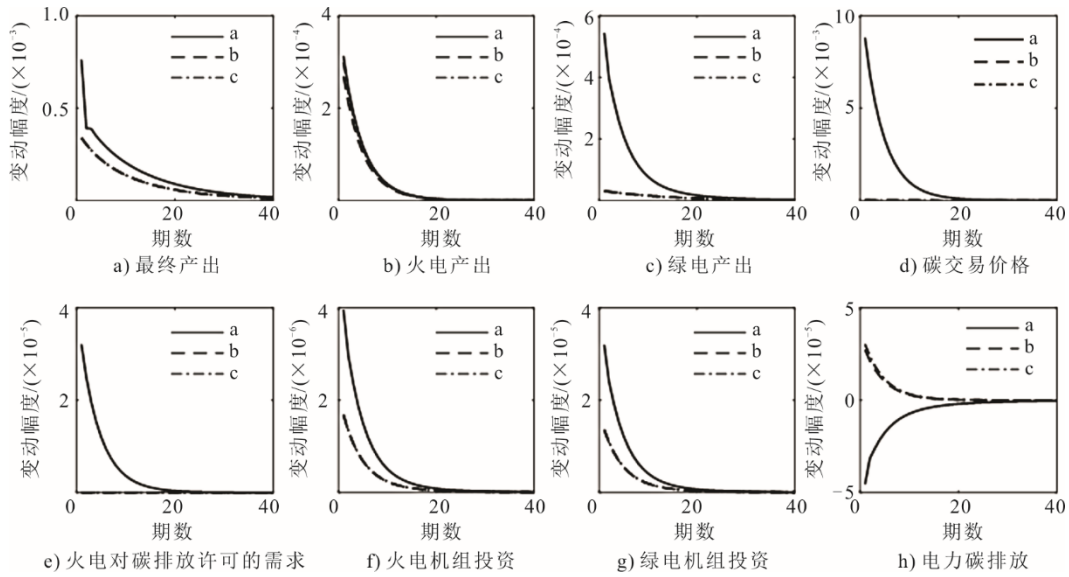


图 4 碳中和情景下各变量对火电技术冲击的动态响应

Fig.4 Dynamic response of various variables to thermal power technology shocks in carbon neutral scenario

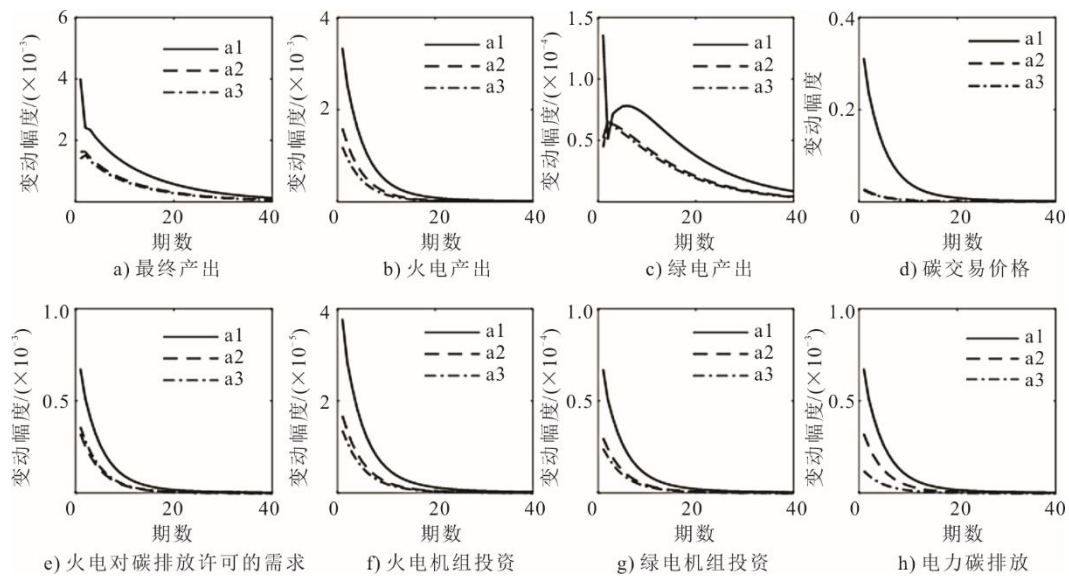


图 5 碳达峰情景不同碳排放上限下各变量对火电技术冲击的动态响应

Fig.5 Dynamic response of various variables to thermal power technology shocks under different carbon emission caps in carbon peak scenario

通过图 5 可以发现，碳达峰情景下碳排放上限由 a1 到 a2 时，正向的火电技术冲击对各变量的影响在减弱。这是因为火电厂商碳排放上限下降使得火电厂商不得不购买更多的碳排放许可，从而带动碳交易价格走高。这直接推高了碳排放成本，使得火电技术冲击对火电产出的影响减弱，使火电产出下降，这进一步降低了对碳排放的需求，碳交易价格相应下调。其他变量同样受到火电产出下降的影

响，对正向的火电技术冲击的响应出现不同程度的减弱。当碳排放上限在既定水平继续下降，比如下降到 a3 时，火电技术冲击对电力碳排放的增幅仍有较明显的下降，而其他变量增幅的下降并不明显。这表明当碳排放上限较低时，火电厂商本身就需要购买大量的碳排放许可，碳排放成本很高，此时若继续降低碳排放上限带来的碳排放成本是火电厂商难以承受的，因此火电厂商会通过更换节能设

备、改变生产技术等措施降低自身的碳排放水平,减少碳配额的购买,使得在碳交易市场中的支出维持在原先的水平。因此,碳达峰情景下碳排放上限的下降会抑制火电产出从而达到电力行业减排的目的,这是通过调整碳排放上限使火电厂商参与碳交易来控制厂商碳排放支出实现的,但存在着一定的上限,超过这个上限时这种作用机制就会失效。此时调整碳排放上限仍能实现减排的目的,通过“倒逼”机制,即通过高额碳排放支出迫使火电厂商加快节能技术的应用和节碳设备的更换。

图 6 为碳中和情景不同碳排放上限下各变量对火电技术冲击的动态响应。通过图 6 可以发现,碳中和情景下随着碳排放上限的下降,正向火电技术冲击下的火电产出增幅并没有明显变动,而绿电产出增幅却在不断下降,电力碳排放的降幅也有所减少。这是因为碳中和情景下电力碳排放整体水平较

低,所以即使碳排放上限的下降提高了火电厂商对碳排放许可的需求,但火电厂商的碳排放成本增加却较少,火电产出受到的影响也不大。而碳中和情景下绿电厂商中的生物质电厂商对碳排放的吸收能力大大提升,且可以将吸收的碳排放出售获取收益,这使得生物质电厂商将成为碳交易市场中重要的一部分。碳排放上限下降会导致碳交易价格的下降,所以生物质电厂商在碳交易市场的收益减少,产出规模下降,进而导致了绿电产出、绿电机组投资和最初产出增幅的下降,而电力碳排放原本为负,所以表现为降幅的减少。因此,碳中和情景下碳排放上限的下降不会对火电产出有明显的抑制作用,但仍会导致碳交易价格的下降,此时绿电厂商中生物质电厂商对碳交易市场的响应比较强烈,因而产出规模会下降,所以碳交易政策对电力碳排放的抑制作用减弱。

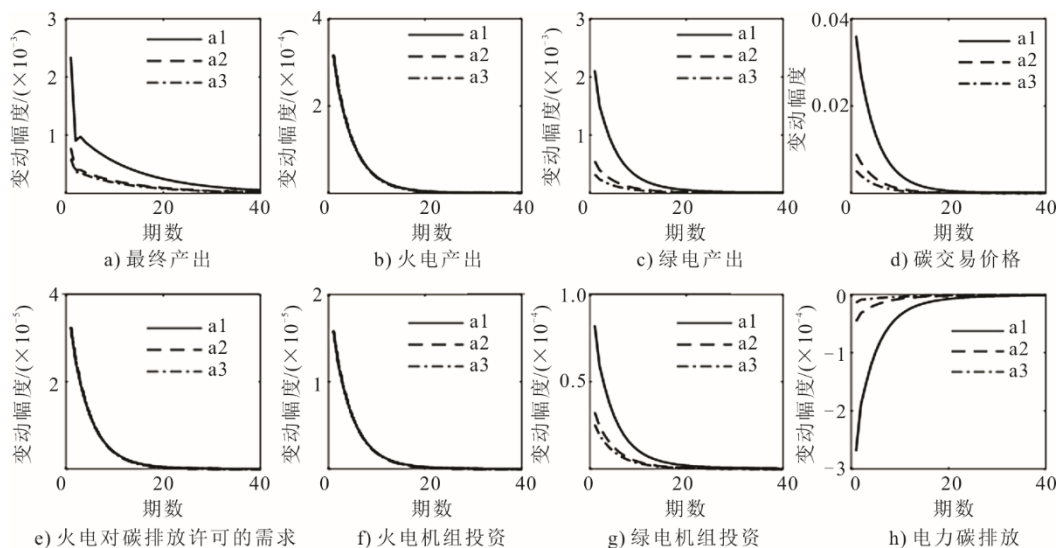


图 6 碳中和情景不同碳排放上限下各变量对火电技术冲击的动态响应

Fig.6 Dynamic response of various variables to thermal power technology shocks under different carbon emission caps in carbon neutralization scenario

3.2.2 返还机制对碳税政策的影响

碳税实施的初期,各国通常制定较低的税率,然后分阶段逐步提高税率,以保证减排效果,而碳税政策对社会经济的负面影响也会因此不断扩大^[23-25]。因此许多学者探讨了碳税的“双重红利”,即在抑制碳排放、保护环境的同时,通过政府的转移支付使得最终的社会福利水平增加。对电力行业来说,这种“双重红利”可以通过对绿电厂商进行补贴的碳税返还机制来实现^[26]。这样一方面对火电厂商征收碳税抑制火电产出、减少碳排放,另一方面通过对

绿电厂商的补贴以扩大绿电产出,从而使得电力供给总体上满足社会生产对电力的需求。所以本部分设定为 3 种返还比例,分别为无返还 (b1)、返还 50% (b2)、全部返还 (b3),分析并比较 3 种情形下火电技术冲击增加 1% 时对电力行业的影响,结果如图 7、图 8 所示。

通过图 7 可以发现,碳达峰情景下随着返还比例的增加,正向的火电技术冲击对绿电产出的影响得到了提升,绿电机组投资相应扩大。由于社会对电力的需求是有限的,部分火电产出被挤出,使得

火电对碳排放许可的需求出现下降，碳交易市场供过于求，碳交易价格下降，电力碳排放同样出现下降。由于对绿电厂商的补贴激励较强，此时虽然部分火电被挤出，但电力行业总体的电力供给增加，使得最终产出表现为略有增加。

图8表明，碳中和情景下随着返还比例增加，正向的火电技术冲击对绿电产出的提升变得很小。

这是因为此时火电厂商的碳排放整体水平很低，政府征收的碳税也有限，不同的返还比例对绿电产生的激励差异并不明显，绿电产出的差异也不显著，因而对火电产出的挤出效应很弱，火电产出基本没有变动。但因为此时绿电厂商中的生物质电厂商对碳排放的吸收能力大大提升，所以仍导致电力碳排放有所下降。

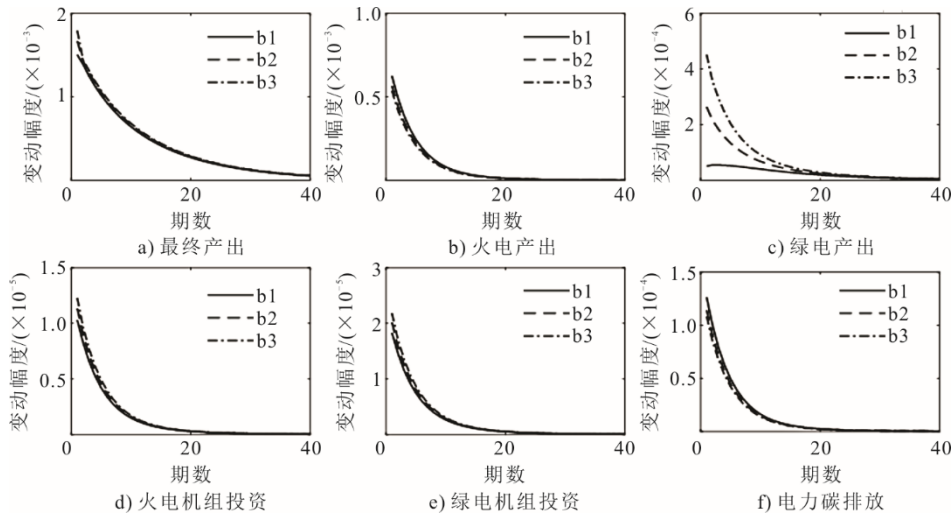


图7 碳达峰情景返还比例不同时各变量对火电技术冲击的动态响应

Fig.7 Dynamic response of various variables to thermal power technology impact with different return ratios of carbon peak scenario

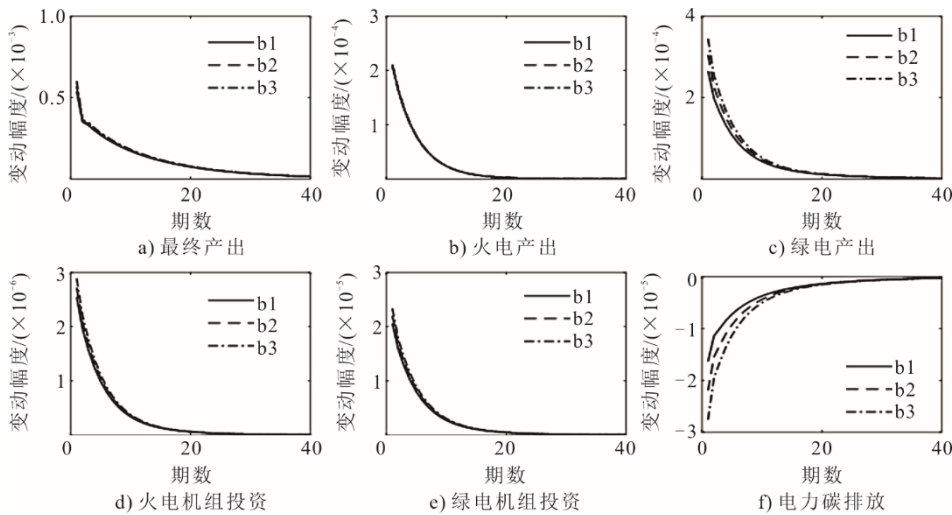


图8 碳中和情景返还比例不同时各变量对火电技术冲击的动态响应

Fig.8 Dynamic response of various variables to thermal power technology impact with different return ratios of carbon neutral scenario

由上可见，碳税返还会达到减排的目的。这种影响在碳达峰情景下是通过鼓励绿电厂商产出扩大从而挤出火电产出实现的，而在碳中和情景下由于生物质电厂商对碳排放的吸收能的显著加强使得此时仅是通过鼓励绿电厂商扩大产出实现的，且在2种情景下返还比例的扩大均会加强对电力行业

减排的影响。

4 结论与建议

通过构建包含碳交易和碳税2种碳定价政策的电力DSGE模型，就2种碳定价政策对电力行业减排的影响效应进行了动态模拟分析。研究发现：

1) 2 种碳定价政策在实现减排的同时对电力行业均有明显的负面影响,且碳交易政策的整体影响大于碳税政策。但“双碳”目标下二者减排的作用机制却有所差异:碳达峰情景下碳交易政策可以有效抑制火电产出实现减排,而碳中和情景下绿电厂厂商中生物质电厂厂商的“负碳能力”提升明显,且可以在碳市场出售碳排放权获取收益,这种激励使得碳交易政策对绿电厂厂商的激励成为减排的关键。

2) 2 种碳定价政策不同的机制设计在“双碳”目标下对电力行业的减排会产生不同的影响。碳交易政策中,碳达峰情景下通过调整碳排放上限使火电厂厂商参与碳交易,进而控制厂商碳排放支出实现减排。但这种市场机制存在着一定的上限,超过这个上限时反而会形成一种“倒逼”机制,即通过高额碳排放支出迫使火电厂厂商加快节能技术的应用和低碳设备的更换。碳中和情景碳排放上限的下降不会对火电产出有明显的抑制作用,反而会因为对绿电产出的抑制出现减排效果变差。碳税政策中,返还机制会达到减排的目的,这种影响在碳达峰情景下是通过鼓励绿电厂厂商产出扩大从而挤出火电产出实现的,而在碳中和情景下是仅通过鼓励绿电厂厂商产出扩大实现的,且在 2 种情景下返还比例的扩大均会加强对减排的影响。

根据以上结论,给出以下 3 方面建议:

1) 目前电力行业已成为我国全国碳市场中的交易主体,但运行时间不长和价格调整机制不完善等问题也制约着碳交易机制作用的充分发挥,所以应当进一步完善相关政策,同时也应当建立电价和碳交易价格的联动机制。新一轮电力体制改革中的电价市场化会减少碳成本传递的阻力,提高碳交易政策的实施效率。

2) 现阶段可以对碳税相关法律法规进行讨论,并在适当时机推出,而且随着社会对碳税这一税种的逐渐接受,碳税将在碳中和时期对电力行业的减排发挥重要作用。碳税政策也应该体现税收中性的原则以减少收入分配的扭曲,因此可考虑碳税的返还机制,具体为减税和补贴 2 种形式,如减免电力厂商的生产间接税、补贴 CCUS 技术或非化石能源发电等。

3) 电力行业的低碳转型是实现减排的根本途径。煤电问题的处理是我国电力低碳转型的重中之重,应当科学谋划煤电退出路径,防止煤电大规模过快退出而影响电力安全稳定供应。新能源、水电、

核电等非化石能源将逐步演变为主体电源,宜坚持集中式与分布式开发并举,分阶段优化布局。此外生物质电可通过 BECCS 等技术实现负碳排放,还可通过出售碳排放权获益。不过目前生物质发电的成本较高,若要对电力行业的减排做出贡献在短期内是比较困难的;但随着技术的发展,到碳中和时期的生物质发电的成本将会明显下降,市场竞争力得到提升,其生产规模的扩大将使其成为电力行业减排的主力。

当然,本文的研究还存在一定的不足。如未在新凯恩斯的框架内来构建模型,未融入财政政策和货币政策规则,也未包括金融部门等。这些不足有待后续的研究来加以完善。

[参 考 文 献]

- [1] 中国电力企业联合会. 电力行业碳达峰碳中和发展路径研究[R/OL]. (2021-12-27)[2022-07-21]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-305486>. China Electricity Council. Research on the development path of peak carbon neutralization in electric power industry[R/OL]. (2021-12-27) [2022-07-21]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-305486>.
- [2] WEITZMAN M. Optimal rewards for economic regulation[J]. American Economic Review, 1978, 68(4): 683-691.
- [3] FISCHER C, SPRINGBORN M. Emissions targets and the real business cycle: Intensity targets versus caps or taxes[J]. Journal of Environmental Economics & Management, 2011, 62(3): 352-366.
- [4] 徐文成, 薛建宏, 毛彦军. 宏观经济动态性视角下的环境政策选择——基于新凯恩斯 DSGE 模型的分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(4): 101-109. XU Wencheng, XUE Jianhong, MAO Yanjun. Environmental policy choice under the perspective of macroeconomic dynamics: based on the analysis of the new keynesian DSGE model[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(4): 101-109.
- [5] 吴力波, 钱浩祺, 汤维祺. 基于动态边际减排成本模拟的碳排放权交易与碳税选择机制[J]. 经济研究, 2014, 49(9): 48-61. WU Libo, QIAN Haoqi, TANG Weiqi. Selection mechanism between emission trading and carbon tax based on simulation of dynamic marginal abatement cost[J]. Economic Research Journal, 2014, 49(9): 48-61.
- [6] 段茂盛, 邓哲, 张海军. 碳排放权交易体系中市场调节的理论与实践[J]. 社会科学辑刊, 2018(1): 92-100. DUAN Maosheng, DENG Zhe, ZHANG Haijun. Theory and practice of market regulation in carbon emission trading system[J]. Social Science Journal, 2018(1): 92-100.
- [7] LIN B Q, JIA Z J. Impacts of carbon price level in carbon emission trading market[J]. Applied Energy, 2019, 239: 157-170.
- [8] CHAN Y T. Are macroeconomic policies better in curbing air pollution than environmental policies? A DSGE approach with carbon-dependent fiscal and monetary policies[J]. Energy Policy, 2020, 141: 111454.

- [9] ZHANG J K, ZHANG Y. Examining the economic and environmental effects of emissions policies in China: a Bayesian DSGE model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 266: 122026.
- [10] 丁冠群, 王铮, 孙翊. 基于多行业 DSGE 模型的中国碳定价政策效应[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(1): 19-30.
DING Guanqun, WANG Zheng, SUN Yi. Effects of China's carbon emission reduction policies based on the multi-sector DSGE model[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(1): 19-30.
- [11] 许骞, 操群, 王立彦. 碳市场、碳减排与企业价值——基于估值模型和电力试点企业数据的分析[J]. *福建论坛(人文社会科学版)*, 2020(5): 151-162.
XU Qian, CAO Qun, WANG Liyan. Carbon market, carbon emission reduction and enterprise value: a analysis based on the valuation model and the data of electric power pilot enterprises[J]. *Fujian Tribune*, 2020(5): 151-162.
- [12] 文洁, 覃云. 碳排放交易制度对中国电力企业经营效率的影响——基于双重差分模型的实证研究[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2021, 35(5): 185-195.
WEN Jie, QIN Yun. The impact of the carbon trading system on the operating efficiency China's power companies: empirical research based on the double differential model[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2021, 35(5): 185-195.
- [13] 陈景东, 赵沛. 碳交易试点政策与电力行业碳减排[J]. *中国电力*, 2021, 54(12): 156-161.
CHEN Jingdong, ZHAO Pei. Carbon emissions trading pilot policy and power industry emissions reductions[J]. *Electric Power*, 2021, 54(12): 156-161.
- [14] 马忠玉, 冶伟峰, 蔡松峰, 等. 基于 SICGE 模型的中国碳市场与电力市场协调发展研究[J]. *宏观经济研究*, 2019(5): 145-153.
MA Zhongyu, YE Weifeng, CAI Songfeng, et al. A study on coordinated development of China's carbon market and power market based on SICGE model[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2019(5): 145-153.
- [15] 张宁, 庞军, 冯相昭. 全国碳市场引入配额拍卖机制的经济影响——基于 CGE 模型的分析[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(4): 1901-1911.
ZHANG Ning, PANG Jun, FENG Xiangzhao. The economic impacts of the introduction of the quota auction into carb allowance allocation mechanism and the implementation of carbon tax a complementary measure in the national carbon market[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(4): 1901-1911.
- [16] 程娜, 陈成. 海洋碳汇、碳税、绿色技术: 实现“双碳”目标的组合策略研究[J]. *山东大学学报(哲学社会科学版)*, 2021(6): 150-161.
CHENG Na, CHEN Cheng. Marine carbon sink, carbon tax, and green technology: a research combination strategy to achieve “double carbon”[J]. *Journal of Shandong University (Philosophy and Social Sciences)*, 2021(6): 150-161.
- [17] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 1-14.
SHU Yinbiao, ZHANG Liying, ZHANG Yunzhou, et al. China electric power carbon peak and carbon neutral path research[J]. *Engineering Science*, 2021, 23(6): 1-14.
- [18] XIAO B W, FAN Y, GUO X D. Dynamic interactive effect and co-design of SO₂ emission tax and CO₂ emission trading scheme[J]. *Energy Policy*, 2021, 152: 112212.
- [19] 刘斌. 系统性解剖与构建 DSGE 框架[M]. 北京: 中国金融出版社, 2018: 1.
LIU Bin. Systematic anatomy and construction of DSGE framework[M]. Beijing: China Finance Press, 2018: 1.
- [20] SMETS F, WOUNTERS R. Shocks and frictions in US business cycles: a Bayesian DSGE approach[J]. *CEPR Discussion Papers*, 2004, 97(3): 586-606.
- [21] 肖红叶, 程郁泰. E-DSGE 模型构建及我国碳减排政策效应测度[J]. *商业经济与管理*, 2017(7): 73-86.
XIAO Hongye, CHENG Yutai. E-DSGE model building and effect measure carbon reduction policy in China[J]. *Journal of Business Economics and Management*, 2017(7): 73-86.
- [22] 周原冰, 杨方, 余潇潇, 等. 中国能源电力碳中和实现路径及实施关键问题[J]. *中国电力*, 2022, 55(5): 1-11
ZHOU Yuanbing, YANG Fang, YU Xiaoxiao, et al. Realization pathways and key problems of carbon neutrality in China's energy and power system[J]. *Electric Power*, 2022, 55(5): 1-11.
- [23] 刘磊, 张永强. 基于碳排放权交易市场的碳税制度研究[J]. *税务研究*, 2019(2): 46-52.
LIU Lei, ZHANG Yongqiang. Based on the carbon tax system of carbon emissions trading market research[J]. *Journal of Tax Research*, 2019(2): 46-52.
- [24] World Bank. State and trends of carbon pricing 2020[R]. Washington: World Bank, 2020: 1.
- [25] 张烈辉, 张安安, 陈怡男, 等. 钻完井电气化“电代油”技术助力油气行业实现“双碳”目标[J]. *油气藏评价与开发*, 2022, 12(5): 703-710.
ZHANG Liehui, ZHANG An'an, CHEN Yi'nan, et al. Electricity substitution technology of drilling and completion electrification promote petroleum and gas industry to achieve “carbon peak and neutrality” targets[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(5): 703-710.
- [26] 鲁书伶, 白彦锋. 碳税国际实践及其对我国 2030 年前实现“碳达峰”目标的启示[J]. *国际税收*, 2021(12): 21-28.
LU Shuling, BAI Yanfeng. The international practice of carbon tax and its Enlightenment to the goal of realizing “peak carbon” by 2030[J]. *International Tax*, 2021(12): 21-28.

(责任编辑 刘永强)