

# “双碳”目标下的 宏观经济稳定与减排措施研究

肖祖沔 彭红枫 尹智超 王文浩\*

**摘要:** 本文在动态随机一般均衡框架中刻画了大气碳存量积累的动态过程以及碳排放对企业生产和家庭效用产生的负外部性,并通过对宏观变量动态和经济福利的分析探讨了碳减排措施的选择。模型稳态的比较静态分析显示,主要宏观经济变量稳态值在实施碳减排措施后产生了负向偏离。福利分析结果表明,碳减排所减少的环境负外部性能够提高整体经济福利水平,且碳排放权交易能够比碳排放税带来更大的福利增益。同时,脉冲响应结果显示,相较于征收碳排放税,实施碳排放权交易时,相同的外生冲击造成的宏观经济波动更小。因此,我国推进“双碳”战略,需要重视碳排放权交易机制建设与优化,实现短期中碳减排引致经济发展承压与长期中经济福利提升的平衡。

**关键词:** 碳排放税;碳排放权交易;经济福利;动态随机一般均衡

**中图分类号:** F205;X24

## 一、引言

气候变化引发的气候灾害和极端天气事件对社会、经济乃至人类生存发展带来严峻挑战。2015年12月,《巴黎协定》提出将本世纪全球气温升幅限制在 $2^{\circ}\text{C}$ 以内,同时寻求将气温升幅进一步限制在 $1.5^{\circ}\text{C}$ 以内的措施。2018年,政府间气候变化专门委员会(IPCC)的报告指出,为了实现将全球变暖控制在 $1.5^{\circ}\text{C}$ 以内的目标,全球需要在2030年前削减一半碳排放总量,在2050年左右实现净零碳排放。2020年是全球气候治理的关键节点。根据《巴黎协定》,各缔约方应在2020年提交更具雄心的国家自主决定贡献方案。在智利发起的“气候雄心联盟”(Climate Ambition Alliance)的召集下,当前全球已经有120多个国家陆续宣布了在2050年实现碳中和目标。

2020年9月22日,国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话指出,中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于

\*肖祖沔,山东财经大学金融学院,邮政编码:250002,电子信箱:xiaozumian@sdufe.edu.cn;彭红枫,山东财经大学金融学院,邮政编码:250002,电子信箱:fhpeng@whu.edu.cn;尹智超,山东财经大学金融学院,邮政编码:250002,电子信箱:yzczy210@126.com;王文浩,山东财经大学金融学院,邮政编码:250002,电子信箱:andrew\_wang9007@sdufe.edu.cn。

本文得到山东省社会科学基金青年项目“‘双循环’背景下山东产业链稳定性及竞争力提升研究”(批准号:21DJJJ02)的支持。感谢匿名审稿专家的宝贵意见,文责自负。

2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和。“碳中和”意味着人类活动引起的净二氧化碳排放为零,这就需要国家层面的有力支持。“碳中和”意味着人类活动引起的净二氧化碳排放为零,这就需要国家层面的有力支持。目前,我国已成功搭建起全国碳排放权交易市场。但是否开征碳排放税,在世界范围内仍然存在争议。一方面,碳排放税规则简单,容易实施,往往被认为是有效的碳减排措施;另一方面,税收造成市场扭曲,相较于碳排放权交易可能给宏观经济带来更大的影响。因此,对碳排放税和碳排放权交易这两种直接碳减排措施的经济后果展开深入研究显得尤为必要。

在评价这两种措施时,学者们主要关注它们在碳减排效果、成本效益、公平性和可行性等方面的表现。关于这两种措施哪种更优的问题目前尚无定论。在执行层面,碳排放税具有价格稳定性和可预测性,有助于引导企业进行长期投资和创新(Goulder et al., 2010);碳排放权交易则更具灵活性,可以在市场参与者之间实现碳减排成本的最小化(Hepburn et al., 2013)。在规则设计层面,碳排放税的政策框架更为简单明了,易于监管和执行(Williams et al., 2015);碳排放权交易允许企业根据自身需求调节碳排放规模,从而可实现更高的效益(Fankhauser et al., 2010)。此外,还有部分学者认为碳排放税效果不明显或甚至在一定条件下有反效果(Vera and Sauma, 2015; Acemoglu et al., 2016)。

西方发达国家在这两类措施的实践层面上也没有为发展中国家提供一个权威的实施路径参考。在 2021 年 7 月我国全国碳排放权交易市场正式启动后,一个问题被越来越广泛地探讨:是否要进一步开征碳排放税以促进“双碳”目标的实现?为了回答这一问题,本文在一个开放经济动态随机一般均衡模型(Open Economy DSGE)中,引入全球大气碳存量动态及企业碳减排成本函数,建立了一个碳减排相关的理论分析框架,以对人类生产活动碳排放、自然碳吸收与大气碳存量之间的动态关系以及其中的作用机制进行刻画与分析。随后,通过理论模型求解与福利分析,本文探讨了不同碳减排措施经济效应的差异性及实施效果,为我国双碳战略目标的实现提供理论支撑与政策建议。

本文主要有如下三个边际贡献:(1)在开放经济动态随机一般均衡框架中刻画了碳排放放在家庭效用和企业生产两个维度上产生的负外部性,厘清了碳排放和碳减排措施作用于动态经济系统的理论机制;(2)模型中刻画了开放经济中生产活动造成的碳排放积累及其对全球大气碳存量动态变化的影响,并且将大气的碳均衡与宏观经济均衡统一至“环境-经济”动态系统之中;(3)利用脉冲响应分析和福利分析的手段,详细探讨了碳排放税与碳排放权交易两类措施实施下宏观经济的波动状态与福利损失情况以及二者的减排政策效果,这能够为我国实现双碳目标提供政策建议。

后文安排如下:第二部分对前期相关文献进行梳理以及评述;第三部分构建理论模型并求解一阶条件;第四部分在模型参数校准基础上展开理论分析;最后第五部分提出全文结论。

## 二、文献综述

气候变化问题是未来很长一段时间内人类需要共同面临的重大挑战,而温室气体浓度的增加被认为是其主要原因(MacDowell et al., 2010; Rahman et al., 2017; Liu et al., 2019)。人类活动造成大气中二氧化碳浓度增加进而导致气候变化已是世界各国公认的事实。为了应对这一严峻挑战,世界各国都在付诸努力。1972 年 6 月举行了联合国人类环境会议,这是世界各国政府共同讨论当代环境问题、探讨保护全球环境战略的第一次国际会

议,会议通过了《联合国人类环境会议宣言》。1997年《京都议定书》的签订则被视为一个重要的里程碑。在随后的时间里,全球多数国家基于自主决定贡献的原则,开始制定碳减排路线图以及相关政策措施。

Waltho等(2019)总结了四类运用最为广泛的碳减排措施,包括碳抵消、碳限额、碳排放税和碳排放权交易。碳抵消从本质上而言是依赖于技术进步的碳捕获、利用及存储等措施;碳限额与碳排放权交易往往被碳减排国家联合实施,构成碳排放限额下碳排放权交易系统;碳排放税则是欧洲发达经济体最早提出并实施的碳减排措施。其中,碳排放税和碳排放权交易两项措施得到学者们最为广泛的关注。Acemoglu等(2016)发现碳排放税和政府补贴措施能够显著促进清洁技术的研发。

碳排放税对碳减排的促进效应被很多研究所证实。首先,碳排放税能够提高能源效率进而有效减少碳排放(Nordhaus and Yang, 1996; Guo et al., 2014; Yang et al., 2014)。其次,碳排放税可以促进清洁能源的应用,改善能源结构,从而达到碳减排目的(Clough, 2016; Niu et al., 2018)。因此,如果政府政策目标中经济福利受到重视,则碳排放税政策将更受青睐(Dissou and Karnizova, 2016)。此外,碳排放税除了能够有效减排之外,还有助于在繁荣时期冷却经济,在衰退时期刺激经济(Benmir et al., 2021; 赵昕东、沈承放, 2021)。当然,也存在着不同的观点。Vera和Sauma(2015)基于智利数据的实证研究发现,碳排放税仅能使2014—2024年期间二氧化碳排放量较估计基线减少1%,碳减排效果有限。Acemoglu等(2016)也表明单纯依赖碳排放税措施会造成显著的福利损失。

碳排放权交易作为碳排放税之外使用最为广泛的政策工具也受到学者们的广泛关注。沈洪涛和黄楠(2019)的事件研究结果表明,碳排放权交易虽然能够提高企业短期价值,但并未影响企业长期价值,因此在样本期内该政策没有提供经济红利。Xiao等(2020)则表明碳排放权交易可以带来环境改善,但将制约国家的经济发展水平。同时,单一碳市场的效率低于联合碳市场。联合碳市场可以自动重新分配国家减排任务,从而实现最大限度地降低碳减排成本。也有研究认为应将碳排放权交易与碳排放税相结合,以降低碳定价的不确定性(Zhao et al., 2020)。张成等(2017)基于中国区域碳排放权交易的模拟分析结果发现,引入省际交易能够有力推进碳减排。

碳减排措施的具体实施方面,Fischer和Springborn(2011)发现在没有不确定性的情况下,碳排放上限和碳排放税两类措施对宏观经济变量的稳态水平有相同的影响;处于碳排放措施的过渡期时,设定碳排放上限会造成更大的福利损失,实施碳排放税优于碳排放上限。Angelopoulos等(2010)将不确定性划分为经济不确定性和环境不确定性。如果环境不确定性相对较高,则首选碳排放限额目标,建立碳排放权交易机制;如果经济不确定性相对较高,施行碳排放税是最优的。吴力波等(2014)基于边际减排成本的模拟分析指出,碳排放权交易机制更适用于现阶段中国实际,但随着未来减排力度增强,则要进一步考虑碳税政策。

此外,还有部分研究讨论了宏观审慎政策和货币政策等辅助性措施的运用问题。研究表明,宏观审慎政策可以降低遵循主要气候政策的衰退风险(Carattini et al., 2021),且更有助于传统技术向清洁技术的过渡(Benmir and Roman, 2020)。Benmir和Roman(2020)还发现,在宏观审慎政策实施的背景下,央行实施绿色量化宽松(Green QE)的动机更强。对于央行而言,绿色和非绿色量化宽松(Green/Dirty QE)是展开非常规货币政策的两个方向,央行选择流动性投向隐含着对经济增长与缩减碳排放两个政策目标的权衡抉择。但Punzi

(2018)认为量化宽松只会为短期产出带来利好,长期中清洁企业会遭受损失。郭晔和房芳(2021)的实证研究则发现,绿色信贷资产纳入我国央行合格担保品范围具有绿色效应,可综合运用央行担保品框架和借贷便利类货币政策工具,加强我国新型货币政策的定向调控功能。

通过对现有文献梳理可以发现,碳减排措施的效果和实施路径的研究尚存在一些未尽之处。首先,一些研究者从定性和静态比较的角度来评价碳减排措施,缺乏对其作用机理的深入讨论。其次,碳排放引起的经济负外部性同时取决于大气碳存量、国内外生产函数以及碳减排措施。许多文献所使用的研究方法并不能准确刻画“环境-经济”系统的动态变化。最后,缺乏以经济福利为量化标准的碳减排措施的对比分析。针对上述不足,本文做了以下三个方面工作:(1)基于动态随机一般均衡分析框架,从碳排放的负外部性出发,对碳减排措施作用于宏观经济系统的机理展开探讨;(2)将生产活动碳排放、大气碳存量动态积累方程以及碳减排措施引入模型之中,对嵌入环境因子后经济系统的一般均衡进行求解;(3)进行经济福利分析,对比不同碳减排措施的福利效应。

三、理论模型

一个国家面临的气候变化取决于全球大气碳存量,而全球大气碳存量不仅受该国碳排放规模的影响,还受其他国家生产活动的影响(Jiang et al., 2019)。此外,包括中国、英国及绝大多数欧盟成员国在内的一大批国家已经开始积极实施碳减排措施。这些碳减排措施同样会改变全球大气碳存量。因此,有必要从开放经济的视角来展开相关研究。

本文在经典的两国动态随机一般均衡模型(Two-Country DSGE)中刻画全球大气碳存量的动态积累。两国厂商生产过程会排放二氧化碳,两国政府采取的碳减排措施则会对厂商形成碳减排激励,二者共同决定大气碳存量的变动。碳排放会产生环境负外部性,直接影响企业生产效率。与此同时,碳减排成本作为一种生产成本进入厂商决策过程。此外,碳排放负外部性还会影响家庭的效用水平。于是,碳排放这一核心内生变量的变化会直接改变家庭和厂商的动态最优决策。为简便起见,DSGE模型设定中我们仅给出本国方程,两国是完全对称的。若无特殊说明,方程中不带星号的变量为本国变量,带星号的变量则为外国变量。

(一)碳排放与减排措施

全球气候变化程度取决于全球大气二氧化碳存量的增长。因此,本文沿用 Heutel (2012)的设定,将  $t$  时期全球大气二氧化碳存量定义为:

$$X_t = \rho_X X_{t-1} + E_t + E_t^* \tag{1}$$

(1)式中: $\rho_X$ 代表全球大气碳存量的衰减系数, $E_t$ 和 $E_t^*$ 分别为本国和外国生产活动产生的碳排放。

碳排放增加导致的经济损失函数,我们参照 Golosov 等(2014)的方式设定为:

$$\Omega_t = e^{-\kappa(X_t - \bar{X})} \tag{2}$$

(2)式中: $\bar{X}$ 为工业化之前全球大气二氧化碳存量, $-\kappa(X_t - \bar{X})$ 为碳排放引致的环境负外部性。

在《京都议定书》《巴黎协定》以及后续一系列国际气候协定基础上,全球绝大部分国家对于碳减排已达成了共识。因此,在模型中我们假设本国与外国选择的目标排放水平分别



为  $\bar{E}$  和  $\bar{E}^*$ 。于是,限额下的碳排放权交易机制可以被定义为:

$$E_t + E_t^* = \bar{E} + \bar{E}^* \quad (3)$$

(3)式中:碳排放权许可证初始投放来自政府拍卖等形式,将本国与外国单位碳排放权许可证价格分别记作  $\Xi_t$  和  $\Xi_t^*$ ,则相关收益通过转移支付直接成为代表性家庭收入,即  $\Xi_t E_t = TR_t$  和  $\Xi_t^* E_t^* = TR_t^*$ 。

碳排放税可以看作厂商需要为每一单位碳排放许可证向政府缴纳固定额度的费用,也即一国排放限额下的每一单位碳排放以固定价格获得了排放许可。本国及外国政府每一期获得固定规模的碳税收入,并转移支付给家庭:

$$\Xi \bar{E}_t = TR_t, \Xi^* \bar{E}_t^* = TR_t^* \quad (4)$$

(4)式中: $TR_t$  和  $TR_t^*$  为政府对家庭的转移支付。

## (二)家庭

本文模型假设代表性家庭无限期存续,消费能为家庭带来正的效用,劳动则会减少效用水平。目前大多数针对碳排放的一般均衡模型往往设定其负外部性仅影响生产部门,但事实上,气候变化带来的各种极端天气及其经济后果也会直接影响家庭部门的效用水平。近期文献中,Benmir 等(2021)指出应使用包含碳排放负外部性的效用函数。因此,本文选择在家庭部门效用函数中纳入碳排放负外部性,于是家庭终身效用最大化问题可以表述为:

$$\begin{aligned} \text{Max } U_0 = E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t & \left( \frac{C_t^{1-\sigma}}{1-\sigma} - \nu \frac{L_t^{1+\varphi}}{1+\varphi} - \kappa (X_t - \bar{X}) \right) \\ \text{s.t. } P_t C_t + P_t I_t + [1/(1+r_t)] B_t + [(1/(1+r_t^*)) S_t F_t^*] &= w_t L_t + r_{K,t} K_t + B_{t-1} + S_t F_{t-1}^* - P_t \Delta_t^K + P_t TR_t + P_t D_t \\ K_{t+1} &= I_t + (1-\delta) K_t \end{aligned} \quad (5)$$

(5)式中: $\beta \in (0,1)$ 为主观贴现因子, $\sigma$ 为风险厌恶系数, $\nu$ 为效用函数中劳动权重参数, $\varphi$ 为劳动力供给弗里希弹性的倒数。家庭拥有资本  $K_t$ ,并将其提供给中间品厂商,这里资本存量为从  $t-1$  期结转的实物资本。用  $I_t$  表示投资,则资本调整成本函数可被定义为  $\Delta_t^K = (\gamma_t/2)(I_t/K_t - \delta)^2 K_t$ ,其中  $\gamma_t$  为中间品厂商投资调整成本参数, $\delta \in (0,1)$ 为资本的折旧率。 $L_t$  为劳动供给, $C_t$  为最终商品消费,对应价格水平为  $P_t$ ,无风险利率为  $r_t$ 。国内居民可以交易本币计价无风险债券  $B_t$ ,价格为  $1/(1+r_t)$ ,并在下一期获得支付  $B_t$ ;或者以  $[(1/(1+r_t^*)) S_t]$  的价格交易以外币计价的无风险债券  $F_t^*$ ,其中  $S_t$  为名义汇率。家庭每期从中间品生产企业获得股息  $D_t$ ,以及名义资本租金  $r_{K,t} K_t$  和名义工资  $w_t L_t$ ,这里  $w_t$  为工资率, $r_{K,t}$  为资本租金率。

类似 Benmir 等(2021),我们将  $t$  期的消费边际效用记作  $\lambda_t$ ,资本的影子价值记作  $q_t$ ,并且将变量的实际值用对应小写字母表示。求解(5)式得到如下—阶条件:

$$C_t^{-\sigma} = \lambda_t \quad (6)$$

$$\lambda_t w_t = \nu L_t^\varphi \quad (7)$$

$$q_t = \gamma_t (I_t/K_t - \delta) + 1 \quad (8)$$

$$q_t = \beta E_t \{ \Lambda_t^{t+1} [r_{K,t+1} + (\Delta_t^K)' I_{t+1}/K_{t+1} - \Delta_t^K] \} + \beta(1 - \delta) E_t \{ \Lambda_t^{t+1} q_{t+1} \} \quad (9)$$

$$1/(1 + r_t) = \beta E_t \Lambda_t^{t+1} \Pi_{t+1} \quad (10)$$

$$1/(1 + r_t^*) = \beta E_t \Lambda_t^{t+1} S_{t+1}/(\Pi_{t+1} S_t) \quad (11)$$

(6) — (11) 式中:  $\Lambda_t^{t+1} = \lambda_{t+1}/\lambda_t$  为随机贴现因子,  $\Pi_t = P_t/P_{t-1}$  为通胀率。

### (三) 中间品厂商

我们假设垄断竞争中间品厂商生产同质化产品, 无穷多厂商可以用  $[0, 1]$  中实数标号。中间品厂商利用资本和劳动来生产产品, 其全要素生产率在每一期会因随机出现的技术创新而发生变化。近期多项研究发现气温上升与总产出之间存在系统性的负相关, 并且生产效率的下降是其中蕴含的重要机制 (Dell et al., 2012; Burke et al., 2015; Somanathan et al., 2021)。于是, 我们将 Golosov 损失函数引入 Cobb-Douglas 生产函数中以刻画碳排放对企业产出造成的影响:

$$Y_{j,t}^h = A_t \Omega_t K_{j,t}^\alpha L_{j,t}^{1-\alpha} \quad (12)$$

(12) 式中:  $\alpha$  为生产函数中的资本份额。对于中间品厂商  $j$  而言, 其面临的需求函数为  $Y_{j,t}^h = (P_{j,t}^h/P_t^h)^{-\varepsilon} Y_t^h$ , 其中  $Y_t^h$  为本国对中间品总需求,  $P_t^h$  为对应价格指数,  $\varepsilon$  是中间品替代弹性参数。  $A_t$  是全要素生产率, 满足如下 AR(1) 形式  $\ln A_t = \rho_A \ln A_{t-1} + v_t, v_t \sim N(0, \sigma_A^2)$ , 其中  $\rho_A$  为本国或外国技术冲击持续性参数。

中间品厂商生产过程中会排放二氧化碳, 其排放量与生产规模成正比。我们沿用 Heutel (2012)、Benmire 等 (2021) 的做法, 将碳排放定义为:

$$E_{j,t} = (1 - \mu_{j,t}) \varphi_1 (Y_{j,t}^h)^{1-\varphi_2} \quad (13)$$

(13) 式中:  $\mu_{j,t}$  是中间品厂商  $j$  的碳减排比率, 代表其碳减排努力程度。  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  是两个碳排放强度参数, 分别代表碳排放-产出比率和碳排放产出弹性。

由于面临政府实施的碳减排措施, 中间品厂商需要决定其碳减排力度。求解最优碳减排力度需要与最优租金率、工资率以及产品最优价格同时确定。

首先, 需要考虑在给定碳减排比率  $\mu_{j,t}$  条件下, 中间品厂商面临的碳减排成本。该成本函数我们沿用 Nordhaus (2008)、Benmire 等 (2021) 的设定形式:

$$\mathbb{C}_{j,t} = \theta_1 \mu_{j,t}^{\theta_2} Y_{j,t}^h \quad (14)$$

(14) 式中: 参数  $\theta_1$  为边际碳减排成本率;  $\theta_2$  则为边际碳减排成本膨胀系数, 代表随着碳减排比率的上升, 碳减排成本会以指数形式上升。

其次, 中间品厂商还要考虑改变其碳减排比率  $\mu_{j,t}$  时所面临的调整成本。我们采用 Annicchiarico 和 Diluiso (2019) 的调整成本函数:

$$\Delta_t^\mu = \gamma_\mu [d_1(\mu_t) + d_2(\mu_t) - 1] / \psi_\mu^2 \quad (15)$$

(15) 式中:  $d_1(\mu_t) = \exp(-\psi_\mu(\mu_t/\mu_{t-1} - 1))$ ,  $d_2(\mu_t) = \psi_\mu(\mu_t/\mu_{t-1} - 1)$ ,  $\gamma_\mu$  为中间品厂商碳减排比率的调整成本参数,  $\psi_\mu$  为中间品厂商碳减排比率调整成本的非对称度参数。

最后, 我们沿用彭红枫等 (2018) 采用 Rotemberg 形式的二次价格调整成本函数来刻画产品价格黏性。实际价格调整成本函数为:

$$\Delta_t^p = \frac{\gamma_p}{2} (P_{j,t}^h/P_{j,t-1}^h - 1)^2 Y_t^h \quad (16)$$

(16) 式中:  $\gamma_p$  为中间品厂商价格调整成本参数。

此时, 我们可以求解中间品厂商成本最小化问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & w_t L_{j,t} + r_{K,t} K_t + \Xi_t E_t + P_{j,t}^h \mathbb{C}_{j,t} + P_t^h \Delta_t^p + P_t^\mu \Delta_t^\mu \\ \text{s.t.} \quad & Y_{j,t}^h = A_t \Omega_t K_{j,t}^\alpha L_{j,t}^{1-\alpha} \end{aligned} \quad (17)$$

求解得到一阶条件:

$$r_{K,t} = \alpha mc_t Y_t^h / K_t \quad (18)$$

$$w_t = (1 - \alpha) mc_t Y_t^h / L_t \quad (19)$$

$$\Xi_t (Y_t^h)^{(1-\varphi_2)} / P_t = \theta_2 \theta_1 \mu_t^{\theta_2-1} p_t^h Y_t^h - \gamma_\mu p_t^h (d_1 - 1) / \mu_{t-1} \psi_\mu + \beta E_t \Lambda_t^{t+1} \mu_{t+1} \gamma_\mu p_{t+1}^h (d_1 - 1) / \mu_t^2 \psi_\mu \quad (20)$$

(18) — (20) 式中:  $mc_t = \alpha^{-\alpha} (1 - \alpha)^{\alpha-1} w_t^{1-\alpha} r_{K,t}^\alpha / \Omega_t A_t$  为中间品厂商面临的实际边际成本,  $w_t$  为工资率,  $r_{K,t}$  为资本租金率, 产品实际价格为  $p_t^h = P_t^h / P_t$ 。这里对应的商品出厂价格指数  $P_t^h = \left( \int_0^1 (P_{j,t}^h)^{(1-\varepsilon)} dj \right)^{1/(1-\varepsilon)}$ 。

随后, 中间品厂商在需求约束下最大化其利润贴现值来设定最优价格水平  $P_{j,t}^h$ 。最优化问题为:

$$\text{Max } E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \Lambda_0^t (p_{j,t}^h Y_{j,t}^h - w_t L_{j,t} - r_{K,t} K_{j,t} - \Xi_t E_t / P_t - p_{j,t}^h C_{j,t} - p_t^h \Delta_t^P - p_t^h \Delta_t^\mu) \quad (21)$$

$$s.t. Y_{j,t}^h = (P_{j,t}^h / P_t^h)^{-\varepsilon} Y_t^h$$

求解并结合中间品厂商成本最小化问题一阶条件, 化简后可得:

$$(1 - \theta_1 \mu_t^{\theta_2}) (1 - \varepsilon) + \varepsilon [\Xi_t (1 - \gamma) (1 - \mu_t) \varepsilon (Y_t^h)^{-\varphi_2} / P_t + mc_t] / p_t^h - \gamma_p (\Pi_t^p - 1) \Pi_t^p + \beta E_t [\Lambda_t^{t+1} \gamma_p Y_{t+1}^h (\Pi_{t+1}^p - 1) (\Pi_{t+1}^p)^2] / \Pi_{t+1} Y_t^h = 0 \quad (22)$$

(22) 式中:  $\Pi_t^p = P_t^p / P_{t-1}^p$ 。

#### (四) 最终产品厂商

最终产品厂商采用 CES 加总的方式利用本国中间品和进口外国中间品来生产最终产品。本国生产的中间品可以分解为自用和出口两部分, 将自用中间品记作  $Y_t^n$ , 出口中间品记作  $EX_t$ 。将进口中间品记作  $IM_t$ 。最终产品生产函数为:

$$Y_t = \left( \omega^{\frac{1}{\eta}} (Y_t^n)^{\frac{\eta-1}{\eta}} + (1-\omega)^{\frac{1}{\eta}} (IM_t)^{\frac{\eta-1}{\eta}} \right)^{\frac{\eta}{\eta-1}} \quad (23)$$

(23) 式中:  $\omega$  为生产函数中本国中间品权重,  $\eta$  为国内外中间品替代弹性。

#### (五) 政府

两国货币当局使用泰勒规则来制定货币政策:

$$\frac{1 + r_t}{1 + \bar{r}} = \left( \frac{\Pi_t}{\bar{\Pi}} \right)^{\phi_\pi} \left( \frac{Y_t}{\bar{Y}} \right)^{\phi_Y} e^{\xi_t} \quad (24)$$

(24) 式中:  $\phi_\pi$  和  $\phi_Y$  分别为通胀缺口和产出缺口反应系数。  $\xi_t$  为货币政策冲击项。

碳排放税措施下, 经常账户关系为:

$$S_t F_t^* = (1 + r_t^*) (S_t F_{t-1}^* + P_t^h EX_t - S_t P_t^h IM_t) \quad (25)$$

碳排放权交易措施下, 经常账户关系为:

$$S_t F_t^* = (1 + r_t^*) [S_t F_{t-1}^* + P_t^h EX_t - S_t P_t^h IM_t - \Xi_t (E_t - \bar{E})] \quad (26)$$

#### (六) 市场出清

本国和外国中间品都可以分解为自用和出口两部分:

$$Y_t^h = Y_t^n + EX_t \quad (27)$$

同时,两国之间进出口满足关系:

$$IM_t = EX_t^*, EX_t = IM_t^* \tag{28}$$

资源约束方程为:

$$P_t^h X_t^h = P_t C_t + P_t I_t - S_t P_t^{h*} IM_t + P_t^h EX_t + P_t^h \int_0^1 \mathcal{C}_{j,t} dj + P_t^h \Delta_t^\mu + P_t^h \Delta_t^p \tag{29}$$

四、理论分析

(一) 参数校准

本文模型参数值的确定采用校准方法,基于实际数据和前期经典文献给相应参数赋值。表 1 中列出了模型参数校准结果及相关的校准依据。

表 1 模型参数校准结果

参数	说明	取值	校准依据
$\alpha$	生产函数中资本份额	1/3	Gertler 和 Karadi(2011)
$\beta$	主观贴现因子	0.99	林琳等(2016)
$\nu$	效用函数中劳动权重参数	3.8226	计算得到
$\varphi$	劳动力供给弗里希弹性的倒数	1	金中夏和洪浩(2015)
$\sigma$	风险厌恶系数	1.2	House 和 Shapiro(2006)等文献取均值
$\varepsilon$	同一国家中间品替代弹性	6	马骏等(2016)、陈国进等(2018)
$\delta$	资本折旧率	2.5%	黄志刚和郭桂霞(2016)
$\gamma_i$	中间品厂商投资调整成本参数	3	Smets 和 Wouters(2007)
$\gamma_p$	中间品厂商价格调整成本参数	58.25	计算得到
$\gamma_\mu$	中间品厂商碳减排比率调整成本参数	1.5	Annicchiarico 和 Diluiso(2019)
$\psi_\mu$	中间品厂商碳减排比率调整成本的非对称度参数	10	Annicchiarico 和 Diluiso(2019)
$\omega$	最终产品生产函数中本国中间品权重	0.61	肖祖沔等(2020)
$\eta$	本国与外国中间品替代弹性	2	胡小文和章上峰(2015)
$\rho_A$	本国或外国技术冲击持续性参数	0.61(本国) 0.95(外国)	肖祖沔等(2020)
$\phi_\pi$	货币政策规则通胀缺口反应系数	1.5	Gertler 和 Karadi(2011)
$\phi_Y$	货币政策规则产出缺口反应系数	0.125	Gertler 和 Karadi(2011)
$\rho_X$	大气碳存量的衰减系数	0.9979	Heutel(2012)
$\varphi_2$	碳排放的产出弹性	0.3040	Heutel(2012)
$\varphi_1$	碳排放-产出比率	0.3829	计算得到
$\theta_1$	边际碳减排成本率	1	标准化
$\theta_2$	边际碳减排成本膨胀系数	2.8	Nordhaus(2008)

参照林琳等(2016)的参数校准值,本文将主观贴现因子( $\beta$ )设定为 0.99。生产函数中资本份额( $\alpha$ )则沿用 Gertler 和 Karadi(2011)设定为 1/3。效用函数中劳动权重参数( $\nu$ )根据稳态计算为 3.8226,劳动力供给弗里希弹性的倒数( $\varphi$ )参考金中夏和洪浩(2015)设定为 1。风险厌恶系数( $\sigma$ )是跨期替代弹性的倒数,其测算在开放宏观经济领域还未能够达成一致,因此,本文选取多篇经典文献对跨期替代弹性的校准或估计数值取平均值后再取倒数<sup>①</sup>来表示风险厌恶系数,最终风险厌恶系数设定为 1.2。同一国家的中间品替代弹性( $\varepsilon$ )参照

<sup>①</sup>这些文献包括:House 和 Shapiro(2006)、Piazzesi 等(2007)、Smets 和 Wouters(2007)、Barro(2009)、Trabandt 和 Uhlig(2011)、Colacito 和 Croce(2011)、Jin(2012)以及 Rudebusch 和 Swanson(2012)。



马骏等(2016)、陈国进等(2018)校准为 6。资本折旧率( $\delta$ )则沿用黄志刚和郭桂霞(2016)的取值为 2.5%。中间品厂商投资调整成本参数( $\gamma_I$ )设定为 3, 价格调整成本参数( $\gamma_p$ )校准为 58.25 以对应 Calvo 定价机制下厂商每季度修改出场价格概率为 0.25 这一被广泛使用的数值。对于跨国贸易相关参数, 本文参考肖祖沔等(2020)将本国中间品权重( $\omega$ )设定为 0.61。沿用胡小文和章上峰(2015)将本国与外国中间品替代弹性( $\eta$ )校准为 2。本国和外国技术冲击持续性参数分别设定为 0.61 和 0.95。沿用 Gertler 和 Karadi(2011)对货币政策规则系数的取值, 设定  $\phi_\pi$  和  $\phi_Y$  分别为 1.5 和 0.125。

碳排放相关参数中, 大气二氧化碳存量的衰减系数( $\rho_x$ )可以通过二氧化碳在大气中的半衰期计算出来, 这里沿用 Heutel(2012)的结果将其取值为 0.9979, 对应 83 年的半衰期。同样参照 Heutel(2012), 我们将碳排放的产出弹性( $\varphi_2$ )校准为 0.304。确定此参数后, 我们可以根据(13)式稳态值计算得到碳排放-产出比率( $\varphi_1$ )的取值为 0.3829。针对减排成本相关参数, 边际碳减排成本率( $\theta_1$ )被单位化为 1, 边际碳减排成本膨胀系数( $\theta_2$ )则参考 Nordhaus(2008)校准为 2.8。中间品厂商碳减排比率调整成本参数( $\gamma_\mu$ )及其非对称度参数( $\psi_\mu$ )根据 Annicchiarico 和 Diluiso(2019)分别校准为 1.5 和 10。

## (二) 稳态分析

求解前述 DSGE 模型可以得到经济稳态方程。图 1 展示了碳减排措施实施前后, 主要经济变量稳态值的变化。图 1 中, 纵轴表示稳态偏离水平, 横轴“0”点为碳减排政策实施节点, “0”点左右两侧分别为政策实施前和政策实施后经济稳态水平。稳态时, 碳排放权交易措施下的碳排放权价格维持其均衡水平固定不变, 且在数值上与经济均衡时碳排放税税率相等, 因此两种碳减排措施的实施对经济稳态的影响是相同的。不难发现, 碳减排措施实施后, 多数经济变量都将永久性偏离当前稳态值。

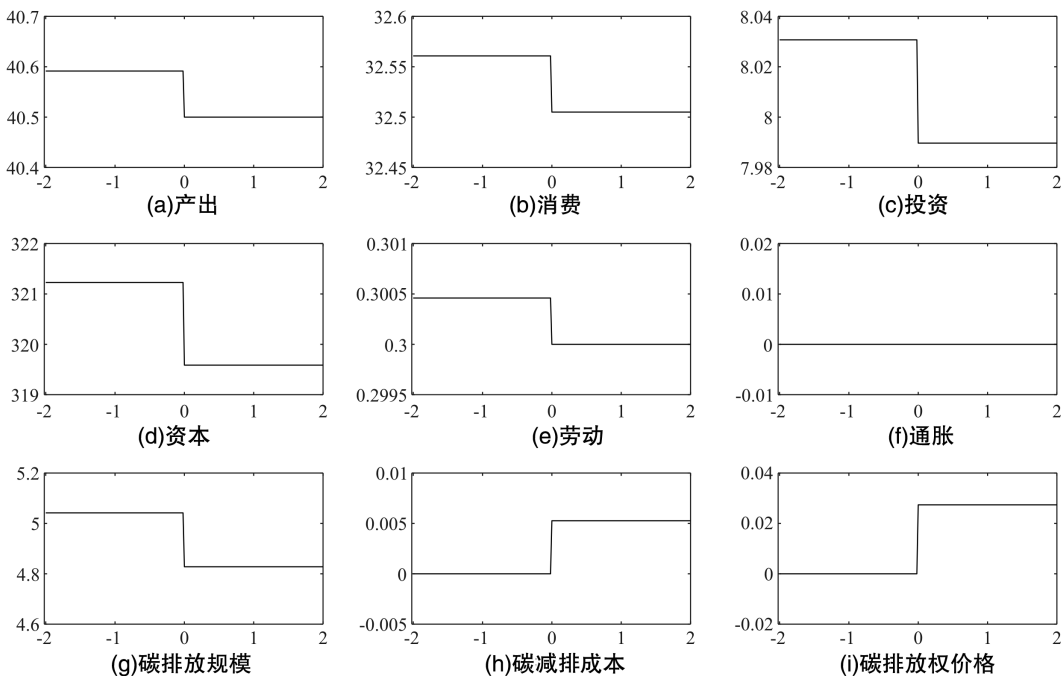


图 1 碳减排措施实施前后主要经济变量的稳态值

首先,碳减排措施的实施将通过提升碳减排成本限制经济生产过程中的碳排放规模,因此,在稳态上表现为碳减排成本永久性向上偏离,以及碳排放规模永久性向下偏离。其次,碳减排成本会传导至生产环节,引起经济产出的下降,在稳态上表现为产出水平永久性向下偏离。最后,经济产出的下降向资本要素和劳动力要素两个方向传导。一方面是产出的下降减少了资本需求,进而引致投资的下降,在稳态上表现为资本和投资永久性向下偏离;另一方面,经济产出的下降造成劳动时间的减少和收入水平的下滑,在稳态上表现为劳动时间和消费永久性向下偏离。由于经济产出、消费等指标同步下降,通胀仍保持原稳态水平。伴随着碳减排成本从零永久性地上升为正,碳排放权价格也随之发生变化,体现了碳排放税和碳排放权交易措施都能够赋予碳排放一个均衡价格水平。

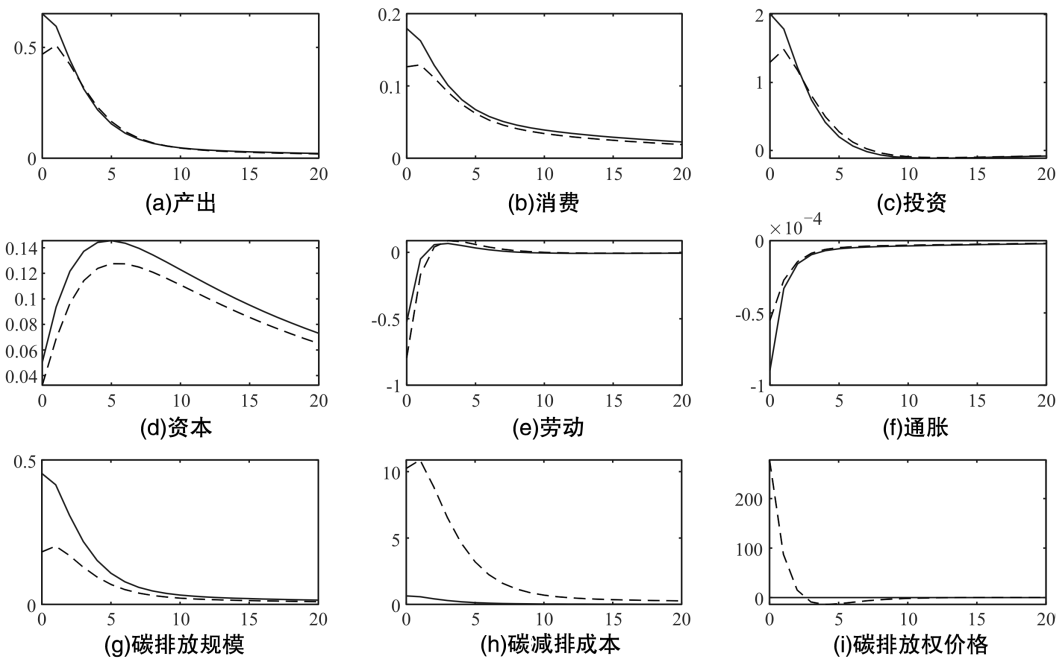
总体来看,无论是碳排放税还是碳排放权交易都会给主要宏观经济变量的稳态产生负向冲击,这表明实施碳减排措施就必须付出一定的经济成本。

(三) 脉冲响应分析

在稳态分析基础上,本文进一步考察在碳排放税和碳排放权交易措施实施后,不同的外生冲击会给经济系统带来怎样的影响。本文选择了技术冲击和货币政策冲击两个冲击项,分别对两种碳减排措施实施下的宏观经济波动状态进行模拟分析。

1. 本国技术冲击下的本国经济波动

本国技术冲击下的本国主要经济变量的脉冲响应如图 2 所示。



注:横轴为时间(季度),纵轴为变量相对于其稳态水平偏离的百分比。实线表示碳排放税措施下各经济变量的波动情况,虚线表示碳排放权交易措施下各经济变量的波动情况。图 3—图 5 同。

图 2 本国技术冲击下的本国经济变量脉冲响应图

在碳排放税措施下,一单位技术正向冲击将使碳排放规模和碳减排成本上升。这主要由两个原因引起:一是生产过程中引入更为先进的技术,会带来产出的相应提升,进而引发碳排放规模的增加,并且抵消了碳排放税应有的减排效果;二是碳减排成本需由企业承担,

因此相较于没有碳排放税情形下碳减排成本会上升。

在碳排放权交易措施下,一单位技术正向冲击依然会引起碳排放规模的上升。相较于征收碳排放税情形,碳减排成本也有非常明显的上升。这是因为,在碳排放权交易措施下,企业可以通过市场化机制购买碳排放权。这对于亟需使用新技术开展更大规模生产的企业来说,只要碳排放权交易成本小于边际收益,企业就有动力去购买碳排放权。因此,碳排放规模并未受碳排放权交易措施的影响而下降,反而出现上升。总体来看,通过碳排放权交易进行排放权的市场化分配会更为高效,碳排放规模小于实施碳排放税的情形。

在技术冲击下对比两种碳减排措施效果不难发现,二者对产出、消费、投资、资本、劳动和通胀的影响并无太大差异,最大差异体现在碳排放规模和碳减排成本上。具体表现为:碳排放税措施下,技术冲击对碳排放规模的影响比碳排放权交易情形更大;碳排放权交易措施下,技术冲击对减排成本的影响较碳排放税情形更大。

### 2. 本国技术冲击下的外国经济波动

开放经济条件下,本国经济受到的外生冲击也会对外国经济产生溢出效应。图3展示了一个标准差的本国技术正向冲击下外国经济变量的脉冲响应图。

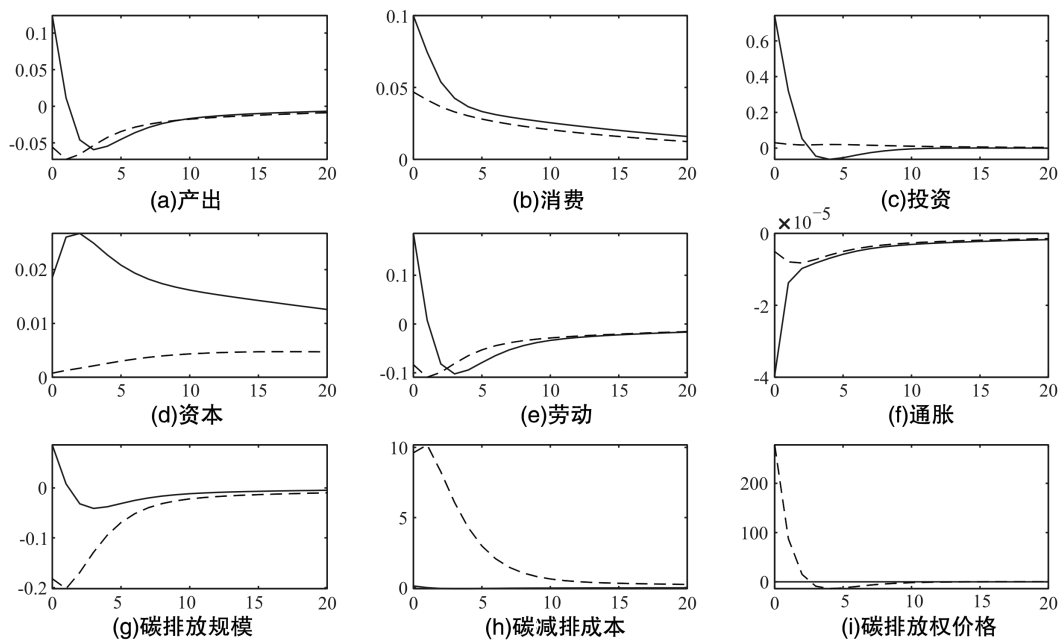


图3 本国技术冲击下的外国经济变量脉冲响应图

在碳排放税措施下,外国碳排放规模对本国技术冲击呈现出滞后的负向响应,碳减排成本上升不甚明显。而在碳排放权交易措施下,外国碳排放规模对本国技术冲击呈现出较为明显的负向响应,碳减排成本也有明显上升。这可能是因为,本国技术进步产生了资本与投资的虹吸效应,进而通过本国投资、汇率、利率等经济变量传导至外国,对外国经济产生冲击,引起外国碳减排成本的上升和碳排放规模的下降。

本国和外国碳排放的脉冲响应结果表明,技术冲击下,本国碳排放规模上升,而外国碳排放规模下降,说明本国技术进步并未对外国产生明显的技术溢出,反而是不同的碳减排措

施下,本国经济波动对外国经济产生了差异化的溢出效应。

3. 本国货币政策冲击下的本国经济波动

图 4 展示了本国利率一单位正向冲击下相关经济变量的波动情况。一般而言,利率提高会引起投资水平和消费水平的下降,进而波及生产资本与实际产出,通胀水平亦会呈现下降趋势。在不同的碳减排措施下,上述经济变量的波动方向差异不大,且波动趋势较为一致。

但是对于碳排放规模和碳减排成本来说,不同碳减排措施效果在货币政策冲击下表现出较大的差异。在碳排放税措施下,由于经济生产本身受到利率影响而下降,因此双重政策叠加下的碳排放规模迅速衰减。而在碳排放权交易措施下,碳排放权将通过市场化机制转移给那些保持产能的企业,碳排放规模的下降程度相对碳排放税的情形有所收敛。与此同时,市场化机制下,碳排放权的转移也使碳减排成本明显下降,与碳排放税情形下的碳减排成本变化形成鲜明对比。

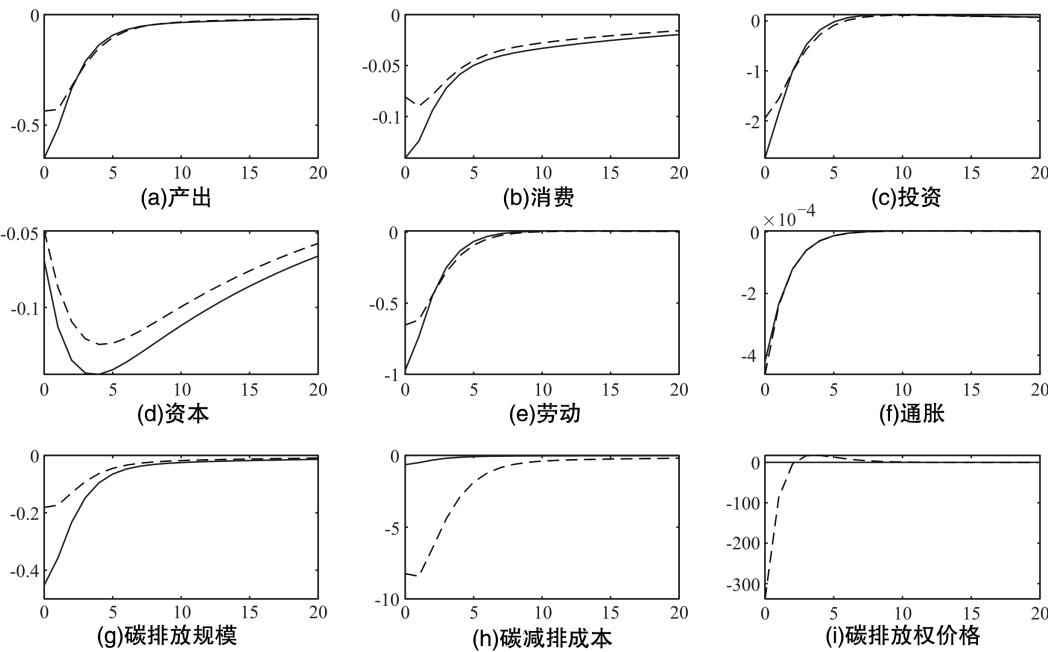


图 4 本国货币政策冲击下的本国经济变量脉冲响应图

通过对比技术冲击和货币政策冲击下的本国产出、消费、投资、资本、劳动和通胀水平的表现不难发现,无论实施碳排放税还是碳排放权交易措施并不会显著改变这些宏观变量的脉冲响应结果,只会导致碳排放规模和碳减排成本的脉冲响应结果存在较大差异。

4. 本国货币政策冲击下的外国经济波动

图 5 展示了本国利率一单位正向冲击下外国主要经济变量的波动情况。不难发现,碳排放税和碳排放权交易措施下脉冲响应结果出现明显差异。碳排放税措施下,外国经济产出下滑且通胀水平上升,消费、投资、劳动和资本纷纷呈现出负向波动的变化趋势,宏观经济呈现“滞涨”状态。在碳排放权交易措施下,外国经济受本国货币政策冲击的影响减弱,宏观变量波动幅度较小,表现为产出水平、投资、资本和劳动的小幅正向变动。

从外国碳排放规模和碳减排成本来看,碳排放权交易措施下,它们会受到本国货币政策冲击更为显著的影响。考虑到产出等宏观经济变量的脉冲响应结果,在开放经济条件下,碳排放权交易的制度安排可能是一个较优的选择。

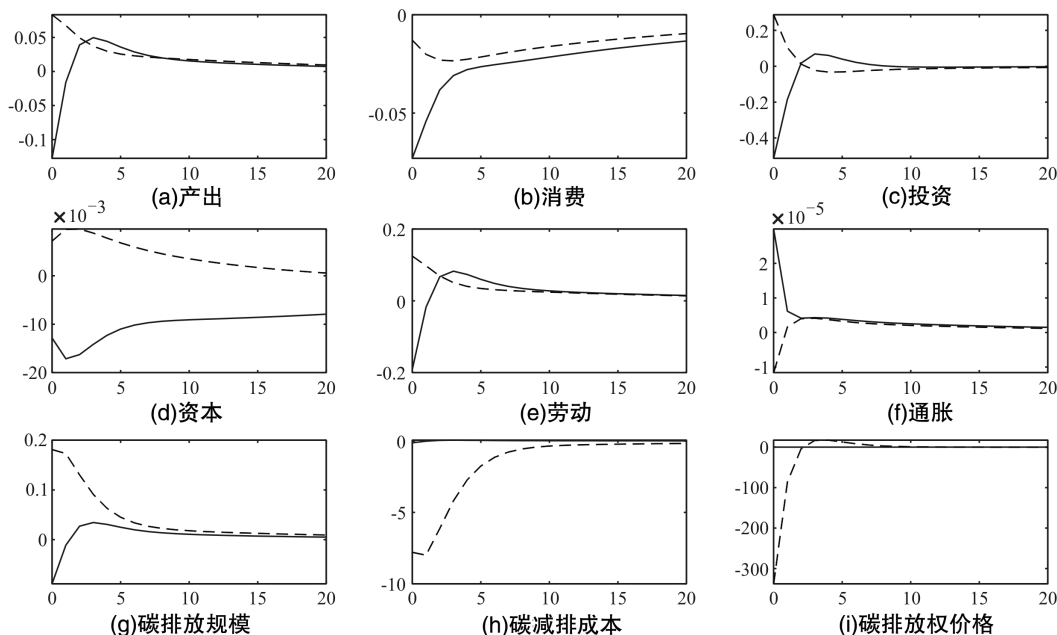


图5 本国货币政策冲击下的外国经济变量脉冲响应图

总体来看,无论是技术冲击还是货币政策冲击,碳排放权交易措施下的宏观经济变量波动幅度整体上要小于实施碳排放税的情形,且碳减排成本和碳排放权价格的波动幅度要显著大于实施碳排放税情形。也即是说,碳排放权交易的实施能够使得市场机制发挥作用,通过市场价格的变化实现对外生冲击的缓冲与吸收,一定程度上抑制了外生冲击引发的宏观经济波动。

#### (四) 经济福利分析

为了更为客观地对两种碳减排措施进行比较,我们使用福利分析的方法,以不实施碳减排措施的基准模型为基准,计算不同碳减排措施下的经济福利增益。沿用张勇等(2014)的做法,本文以代表性家庭的终生效用贴现值作为经济福利的度量指标。测算福利水平变化,首先需要计算没有采取任何碳减排措施时的福利水平,如下式:

$$W_0 = E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left( \frac{C_t^{1-\sigma}}{1-\sigma} - \nu \frac{L_t^{1+\varphi}}{1+\varphi} - \kappa(X_t - \bar{X}) \right) \quad (30)$$

同时,我们采用同样的福利度量方式来计算采取了碳减排措施的福利水平,记作  $W_{\text{carbon}}$ 。于是,碳减排措施带来的福利增益可以定义为该措施下的经济福利水平相对于基准状态偏离的百分比:

$$W\text{Gain} = 100 \times (\ln W_{\text{carbon}} - \ln W_0) \quad (31)$$

福利增益测算结果如表2所示。本文的效用函数包含了碳排放的负外部性(碳减排的正外部性),因此不难发现,实施碳减排措施后,包括本国、外国和世界在内的经济福利水平



整体提高。

表 2	不同碳减排政策下福利水平的相对变化( %)		
福利增益	本国	外国	世界
碳排放税	0.003773988	0.006130143	0.004948777
碳排放权交易	0.005591452	0.007048833	0.006318109

实施碳排放税措施后本国福利水平提升约 0.0038%,外国福利水平提升约 0.0061%,世界整体福利水平提升约 0.0049%;实施碳排放权交易措施后本国福利水平提升约 0.0056%,外国福利水平提升约 0.0070%,世界整体福利水平提升约 0.0063%。在碳排放权交易措施实施后,本国福利增益是碳排放税措施下的 1.48 倍。从比例的绝对数值来看,两类碳减排措施实现的福利增益是微小的。其根本原因在于,碳减排措施的实施能够规避未来可能出现的全球显著变暖所带来的巨大经济福利损失。若以全球显著变暖的灾难性后果为基准,即使碳减排措施实施会产生一定程度的经济福利损失,其净福利增益依然为正。本文研究的重点在于碳排放税和碳排放权交易两种措施之间的相对福利增益,并希望以此为标准进行对比分析。

从福利分析结果可以发现,碳排放权交易措施是较优选择。并且从世界范围内各国政府的选择来看,碳排放权交易亦更受青睐。其原因主要在于,碳排放税可以视作固定价格的碳排放权交易,难以发挥市场的资源调配作用。碳排放权交易措施则可利用价格机制来缓解碳排放限额对高排放企业的硬性约束,有助于碳排放权在高排放企业与低排放企业之间形成最优配置,进而实现整体经济福利水平的提升。

五、结论

本文利用动态随机一般均衡模型进行稳态分析,发现实施碳减排措施会导致经济成本的增加,一些关键经济变量的稳态值也出现了负向偏离。然而,我们也注意到,碳减排带来的环境负外部性的下降亦可实现社会总体福利水平的提升。尤其在开放经济中,碳减排措施的价值显得尤为突出,不仅本国,全球经济都会因此获得福利增益。因此,我们在推动“碳达峰”和“碳中和”战略时,需要不断优化碳减排措施,以实现在短期碳减排的经济成本上升与长期社会总体福利水平提升之间的平衡。

通过对模型脉冲响应结果的分析,我们发现,在外生冲击下,碳排放权交易措施能更好地维护宏观经济的稳定,相比碳排放税,其在抑制宏观经济过度波动方面表现得更加有效。这主要得益于市场机制的作用,碳排放权价格的波动能够缓冲与吸收外部冲击。而且,根据福利分析的结果,相比碳排放税,碳排放权交易措施可带来更大的福利增益。

根据上述结论,我们提出以下政策建议:

(1)不断完善和优化碳排放权交易市场。应继续深化和扩大全国碳排放权交易市场的覆盖范围和深度,吸引更多的参与者加入。同时,为了提高市场的公平性和有效性,需要在制度设计、市场监管、信息透明度等方面持续优化。

(2)充分发挥碳排放权交易市场的价格发现功能。为了能够真实反映碳排放的社会成本,我们需要进一步强化碳排放权交易的价格发现功能,提升市场效率,优化碳排放权在企

业间的配置。

(3)开发碳减排相关的金融衍生品。基于碳排放权交易,我们可以设计和开发碳期货、碳期权等多种金融衍生品。这些产品可以帮助企业锁定减排成本、进行碳风险管理,同时也能够吸引更多的市场参与者,进一步提高碳排放权交易市场的流动性和深度。

(4)强化环境风险管理。在碳排放权交易的基础上,我们应该进一步加强环境风险管理,提高企业和社会对环境风险的认识,促使企业将环境因素纳入决策过程。

本文的不足之处在于理论建模中还未能有效地刻画出发达国家与发展中国家在经济结构以及碳减排措施效果方面的差异,导致理论分析无法更为深入揭示最优的政策路径。

### 参考文献:

- 1.陈国进、杨翱、赵向琴,2018:《不同资本账户开放程度下的中国财政货币政策效果分析》,《数量经济技术经济研究》第3期。
- 2.郭晔、房芳,2021:《新型货币政策担保品框架的绿色效应》,《金融研究》第1期。
- 3.胡小文、章上峰,2015:《利率市场化、汇率制度改革与资本账户开放顺序安排——基于NOEM-DSGE模型的模拟》,《国际金融研究》第11期。
- 4.黄志刚、郭桂霞,2016:《资本账户开放与利率市场化次序对宏观经济稳定性的影响》,《世界经济》第9期。
- 5.金中夏、洪浩,2015:《国际货币环境下利率政策与汇率政策的协调》,《经济研究》第5期。
- 6.林琳、曹勇、肖寒,2016:《中国式影子银行下的金融系统脆弱性》,《经济学(季刊)》第15卷第3期。
- 7.马骏、施康、王红林、王立升,2016:《利率传导机制的动态研究》,《金融研究》第1期。
- 8.彭红枫、肖祖沔、祝小全,2018:《汇率市场化与资本账户开放的路径选择》,《世界经济》第8期。
- 9.沈洪涛、黄楠,2019:《碳排放权交易机制能提高企业价值吗》,《财贸经济》第1期。
- 10.吴力波、钱浩祺、汤维祺,2014:《基于动态边际减排成本模拟的碳排放权交易》,《经济研究》第9期。
- 11.肖祖沔、彭红枫、向丽锦,2020:《贸易摩擦、宏观经济波动与经济开放程度的选择》,《金融研究》第10期。
- 12.张成、史丹、李鹏飞,2017:《中国实施省际碳排放权交易的潜在成效》,《财贸经济》第2期。
- 13.张勇、李政军、龚六堂,2014:《利率双轨制、金融改革与最优货币政策》,《经济研究》第10期。
- 14.赵昕东、沈承放,2021:《碳排放与经济增长关系的实证研究——基于福建省的经验数据》,《江南大学学报(人文社会科学版)》第4期。
- 15.Acemoglu, D., U. Akcigit, D. Hanley, and W. Kerr. 2016. "Transition to Clean Technology." *Journal of Political Economy* 124(1): 52-104.
- 16.Angelopoulou, K., G. Economides, and A. Philippopoulos. 2010. "What Is the Best Environmental Policy? Taxes, Permits and Rules under Economic and Environmental Uncertainty." CESifo Working Paper Series, No.2980.
- 17.Annicchiarico, B., and F. Diluiso. 2019. "International Transmission of the Business Cycle and Environmental Policy." *Resource and Energy Economics* 58(Nov.): 101112.
- 18.Barro, R.J. 2009. "Rare Disasters, Asset Prices, and Welfare Costs." *American Economic Review* 99(1): 243-264.
- 19.Benmir, G., I. Jaccard, and G. Vermandel. 2021. "Green Asset Pricing." European Central Bank Working Paper, No. 2477.
- 20.Benmir, G., and J. Roman. 2020. "Policy Interactions and the Transition to Clean Technology." Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment Working Paper, No. 337.
- 21.Burke, M., S.M. Hsiang, and E. Miguel. 2015. "Global Non-linear Effect of Temperature on Economic Production." *Nature* 527(7577): 235-239.
- 22.Carattini, S., G. Heutel, and G. Melkadze. 2021. "Climate Policy, Financial Frictions, and Transition Risk." NBER Working Paper 28525.
- 23.Clough, S. 2016. "Achieving CO<sub>2</sub> Reductions in Colombia: Effects of Carbon Taxes and Abatement Targets." *Energy Economics* 56(May): 575-586.

- 24.Colacito, R., and M. Croce. 2011. “Risks for the Long Run and the Real Exchange Rate.” *Journal of Political Economy* 119(1): 153–181.
- 25.Dell, M., B.F. Jones, and B.A. Olken. 2012. “Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century.” *American Economic Journal: Macroeconomics* 4(3): 66–95.
- 26.Dissou, Y., and L. Karnizova. 2016. “Emissions Cap or Emissions Tax? A Multi – sector Business Cycle Analysis.” *Journal of Environmental Economics and Management* 79(9): 169–188.
- 27.Fankhauser, S., C. Hepburn, and J. Park. 2010. “Combining Multiple Climate Policy Instruments: How Not to Do It.” *Climate Change Economics* 1(3): 209–225.
- 28.Fischer, C., and M. Springborn. 2011. “Emissions Targets and the Real Business Cycle: Intensity Targets versus Caps or Taxes.” *Journal of Environmental Economics and Management* 62(3): 352–366.
- 29.Gertler, M., and P. Karadi. 2011. “A Model of Unconventional Monetary Policy.” *Journal of Monetary Economics* 58(1): 17–34.
- 30.Golosov, M., J. Hassler, P. Krusell, and A. Tsyvinski. 2014. “Optimal Taxes on Fossil Fuel in General Equilibrium.” *Econometrica* 82(1): 41–88.
- 31.Goulder, L. H., M. A. C. Hafstead, and M. Dworsky. 2010. “Impacts of Alternative Emissions Allowance Allocation Methods under a Federal Cap – and – trade Program.” *Journal of Environmental Economics and Management* 60(3): 161–181.
- 32.Guo, Z., X. Zhang, Y. Zheng, and R. Rao. 2014. “Exploring the Impacts of a Carbon Tax on the Chinese Economy Using a CGE Model with a Detailed Disaggregation of Energy Sectors.” *Energy Economics* 45(September): 455–462.
- 33.Hepburn, C., J. K.Quah, and R. A. Ritz. 2013. “Emissions Trading with Profit–neutral Permit Allocations.” *Journal of Public Economics* 98(February): 85–99.
- 34.Heutel, G. 2012. “How Should Environmental Policy Respond to Business Cycles? Optimal Policy under Persistent Productivity Shocks.” *Review of Economic Dynamics* 15(2): 244–264.
- 35.House, C.L., and M.D. Shapiro. 2006. “Phased–In Tax Cuts and Economic Activity.” *American Economic Review* 96(5): 1835–1849.
- 36.Jiang, M., H. An, X. Gao, S. Liu, and X. Xian. 2019. “Factors Driving Global Carbon Emissions: A Complex Network Perspective.” *Resources, Conservation and Recycling* 146(July): 431–440.
- 37.Jin, K. 2012. “Industrial Structure and Capital Flows.” *American Economic Review* 102(5): 2111–2146.
- 38.Liu, D., X. Guo, and B. Xiao. 2019. “What Causes Growth of Global Greenhouse Gas Emissions? Evidence from 40 Countries.” *Science of The Total Environment* 661(15): 750–766.
- 39.Macdowell, N., N. Florin, A. Buchard, et al. 2010. “An Overview of CO<sub>2</sub> Capture Technologies.” *Energy & Environmental Science* 3(11): 1645–1669.
- 40.Niu, T., X. Yao, S. Shao, D. Li, and W. Wang. 2018. “Environmental Tax Shocks and Carbon Emissions: An Estimated DSGE Model.” *Structural Change and Economic Dynamics* 47(December): 9–17.
- 41.Nordhaus, W. D., and Z. Yang. 1996. “A Regional Dynamic General – Equilibrium Model of Alternative Climate – Change Strategies.” *American Economic Review* 86(4): 741–765.
- 42.Nordhaus, W.D. 2008. *A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies*. New Haven: Yale University Press.
- 43.Piazzesi, M., M. Schneider, and S. Tuzel. 2007. “Housing, Consumption and Asset Pricing.” *Journal of Financial Economics* 83(3): 531–569.
- 44.Punzi, M. T. 2018. “Role of Bank Lending in Financing Green Projects: A Dynamic Stochastic General Equilibrium Approach.” ADB Working Paper, No.12938.
- 45.Rahman, F.A., M.M.A. Aziz, R. Saidur, et al. 2017. “Pollution to Solution: Capture and Sequestration of Carbon Dioxide(CO<sub>2</sub>) and Its Utilization as a Renewable Energy Source for a Sustainable Future.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 71(May): 112–126.
- 46.Rudebusch, G.D., and E.T. Swanson.2012. “The Bond Premium in a DSGE Model with Long–Run Real and Nominal Risks.” *American Economic Journal: Macroeconomics* 4(1): 105–143.
- 47.Smets, F., and R. Wouters. 2007. “Shocks and Frictions in US Business Cycles: A Bayesian DSGE

- Approach.” *American Economic Review* 97(3): 586–606.
- 48.Somanathan, E., R. Somanathan, A. Sudarshan, and M. Tewari. 2021. “The Impact of Temperature on Productivity and Labor Supply: Evidence from Indian Manufacturing.” *Journal of Political Economy* 129(6): 1797–1827.
- 49.Trabandt, M., and H. Uhlig. 2011. “The Laffer Curve Revisited.” *Journal of Monetary Economics* 58(4):305–327.
- 50.Vera, S., and E. Sauma. 2015. “Does a Carbon Tax Make Sense in Countries with Still a High Potential for Energy Efficiency? Comparison between the Reducing-emissions Effects of Carbon Tax and Energy Efficiency Measures in the Chilean Case.” *Energy* 88(August): 478–488.
- 51.Waltho, C., S. Elhedhli, and F. Gzara. 2019. “Green Supply Chain Network Design: A Review Focused on Policy Adoption and Emission Quantification.” *International Journal of Production Economics* 208(Febuary): 305–318.
- 52.Williams, R. C., H. Gordon, D. Burtraw, J. C. Carbone, and R.D. Morgenstern. 2015. “The Initial Incidence of a Carbon Tax across U.S. States.” *National Tax Journal* 68(1): 195–214.
- 53.Xiao, B., X. Guo, Y. Fan, S. Voigt, and L. Cui. 2020. “Climate Policies under Dynamic International Economic Cycles: A Heterogeneous Countries DSGE Model.” ZEW Discussion Papers, No.20–011.
- 54.Yang, M., Y. Fan, F. Yang, and H. Hu. 2014. “Regional Disparities in Carbon Dioxide Reduction from China’s Uniform Carbon Tax: A Perspective on Interfactor/Interfuel Substitution.” *Energy* 74(September): 131–139.
- 55.Zhao, L., C. Yang, B. Su, and S. Zeng. 2020. “Research on a Single Policy or Policy Mix in Carbon Emissions Reduction.” *Journal of Cleaner Production* 267(September), 122030.

## Macroeconomic Stability and Emission Abatement Measures under the Objectives of “Carbon Peaking” and “Carbon Neutrality”

Xiao Zumian, Peng Hongfeng, Yin Zhichao and Wang Wenhao

(School of Finance, Shandong University of Finance and Economics)

**Abstract:** This article delineates the dynamics of atmospheric carbon stock accumulation within a dynamic stochastic general equilibrium framework. It also examines the negative externalities carbon emissions impose on firm production and household utility. By analyzing the dynamics of macroeconomic variables and economic welfare, this study investigates the choices in emission reduction measures. Comparative static analysis of the model’s steady state reveals that the primary macroeconomic variables’ steady-state values deviate negatively after implementing emission reduction measures. Welfare analysis indicates that the reduction of environmental negative externalities due to carbon mitigation enhances the overall economic welfare level. Moreover, carbon emissions trading offers a more substantial welfare gain than the imposition of a carbon tax. Additionally, impulse response results show that the macroeconomic fluctuations resulting from the same exogenous shocks are smaller under carbon emissions trading compared to the carbon tax. Therefore, as China advances its “dual carbon” strategy, it is imperative to emphasize the construction and optimization of the carbon emissions trading mechanism, striking a balance between the short-term economic pressures caused by carbon reduction and the long-term enhancement of economic welfare.

**Keywords:** Carbon Emissions Tax, Carbon Emissions Permit Trading, Economic Welfare, Dynamic Stochastic General Equilibrium

**JEL Classification:** F205, X24

(责任编辑:陈永清)