

异质性技术冲击对减污降碳协同增效的动态影响与福利分析

甘天琦 周宗钰 张康宁 谌仁俊*

摘要:加速推进减污降碳协同增效是落实新发展阶段生态文明建设的根本要求,是促进环境保护和经济发展协同共进、提高资源利用效率、推动经济转型升级的重要抓手。本文构建了一个包含五部门的封闭经济一般均衡模型,模拟在总量控制、碳税、目标强度三种不同环境政策情景下,中国宏观经济和生态环境质量对生产技术、政策强度、减排创新技术冲击的动态效应,并构建社会福利函数,对比了不同冲击下,减污降碳政策对中国居民福利损失的差异。研究结果表明:在中国增加适当强度的环境政策可以达到协同增效的目的,表现为经济增长、大气污染物下降和碳储量持续降低,同时“降碳”效应优于“减污”效应。总量控制情景下经济产出应对外生冲击的表现更好,碳税政策情景下减污降碳的协同效应更为显著。在总量控制情景下,最终品生产技术冲击对能源消费市场产生结构效应,而在碳税和目标强度两种政策情景下的结构效应并不明显。通过社会福利函数考察居民在三种政策情景下的社会福利水平,三种政策情景社会福利由高到低依次为:总量控制、目标强度、碳税政策。基于研究结论,本文建议现有环境治理体系应从“分而治之”向“合而治之”转变,环境治理政策应从“强约束”向“软激励”转变,环境治理手段应从“末端治理”向“源头管控”转变。

关键词:减污降碳;协同增效;DSGE模型;政策模拟;福利分析

*甘天琦,中南民族大学经济学院,邮政编码:430074,电子信箱:gantq826@126.com;周宗钰,贵州大学经济学院,邮政编码:550025,电子信箱:zhouzy850205@163.com;张康宁(通讯作者),中南民族大学经济学院,邮政编码:430074,电子邮箱:zkn5221619@163.com;谌仁俊,华中师范大学经济与工商管理学院,邮政编码:430079,电子信箱:shenrenjun@yeah.net。

本文系国家社会科学基金重大项目“环境政策减污降碳协同治理效应测度及提升路径研究”(24&ZD104)国家自然科学基金面上项目“环境规制、绿色创新方向与工业污染防治:基于中国企业数据的研究”(72073049)、教育部人文社会科学青年项目“全过程视角下企业数字化转型的减污降碳协同效应研究”(24YJC790042)和中央高校基金项目“投资者偏好视角下绿色金融的减碳效应研究”(CSQ24025)的资助。感谢匿名审稿人提出的宝贵意见,文责自负。

一、引言

过去几十年,温室气体排放逐渐增加,与应对气候变化、生态文明建设和生物多样性的冲突日益严重,给人类可持续发展带来了巨大的威胁,努力应对全球气候变化和减少温室气体排放已经成为世界共识和全球大势(甘天琦,2023)。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告显示,2011—2020年,全球平均气温上升约1.09℃,其中由人类活动造成的约为1.07℃,极端气候事件的爆发将在未来更加频繁(Wang et al., 2023)。作为最大的发展中国家,2023年中国的碳排放量累计126亿吨,约占全球碳排放量的33.70%,排名世界第一^①。为积极应对气候变化,习近平总书记于2020年9月在联合国大会上承诺“中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”^②,这一重要宣示为我国积极应对气候变化和实现绿色低碳发展提供了方向指引,同时为全球碳减排事业作出了大国表率。

与此同时,日益严重的环境污染已经成为制约我国经济社会可持续发展的重要因素。在2022年全球环境绩效指数(EPI)评估中,中国在180个国家中排名第160位。全国373个地级及以上城市中,仅74.6%的城市PM_{2.5}平均浓度达标^③,环境污染给中国每年带来的经济损失约占当年GDP总量的8%~15%(杨冕等,2020),由环境污染引发的健康损失也成为社会各界关注的焦点(Gehrsitz, 2017),环境污染防治与实现“双碳”目标的双重挑战对探索建立协同防治体系和推动减污降碳协同增效提出了更高的要求。

“十四五”时期,中国生态文明建设进入以降碳为重点战略方向、推动减污降碳协同增效、促进经济社会发展全面绿色转型、实现生态环境质量改善由量变到质变的关键时期。党的二十届三中全会指出,中国式现代化是人与自然和谐共生的现代化。必须完善生态文明制度体系,协同推进降碳、减污、扩绿、增长,积极应对气候变化,要完善生态文明基础体制,健全生态环境治理体系,健全绿色低碳发展机制。为减少减污降碳的政策实施成本,达到经济增长、污染减少与碳排放量降低的“三赢”局面,全局考量减污降碳协同效应、规避单个减排政策失效的风险,生态环境部、国家发展和改革委员会等七部委于2022年6月印发《减污降碳协同增效实施方案》,明确了重点推进大气污染物排放及碳排放协同控制、开展全域减污降碳协同创新的工作目标。为此,本文构建了一个包含家庭部门、能源生产部门、最终品厂商部门、政府部门和环境部门的封闭经济模型,系统地分析了减污降碳协同效应的动态路径、模拟不同政策对“减污”“降碳”和“增效”的协同效应,为我国经济增长、环境治理及实现“双碳”目标提供参考。

①资料来源:《国际能源署(IEA)报告》, <https://epi.yale.edu/epi-results/2022/component/epi>。

②人民日报:《力争2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和——打赢低碳转型硬仗》,2021年4月2日。

③资料来源:《国务院关于2022年度环境状况和环境保护目标完成情况的报告》, https://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnws/202305/t20230506_1029130.shtml。

二、文献综述

1994年由联合国主导、150多个国家和地区共同签署并正式生效的《联合国气候变化框架公约》奠定了气候治理的核心机制和权威性规范载体的基础。2005年《京都议定书》生效后,对主要工业发达国家的温室气体排放做出了强制性的约束;2015年通过的《巴黎协定》对2020年后全球气候变化行动作出了统一安排,目前共有194个缔约国,应对气候变化由“自上而下”的全球减排机制向“自下而上”的国家自主贡献国际减排规则转型。自此,污染治理与碳排放的双重控制已经成为诸多国家治理环境问题的主流,并逐渐形成减污降碳“合而治之”的治理理念(易兰等,2022)。

目前学术界对于单边的减污效应和降碳效应的研究成果颇为丰厚,现有的环境法规和碳减排政策也更加侧重单一的目标(李江龙、韩蓉,2022),但鉴于二氧化碳和大气污染物具有排放同根、同源、同过程的特征(郭朝先,2021),较为类似的减排机制为由“单向”减排向减污降碳协同治理的转变带来了可能(李世冉等,2023)。就碳与污染物的排放源而言,IPCC温室气体排放清单指南的相关信息显示,碳排放主要来源于能源活动与工业生产,而这也是空气污染物的主要贡献者,证实了两类排放源的共生特征(Ambec & Coria, 2021; Gao et al., 2022)。就治理效果而言,现有的文献已经证实了气候治理政策可以达到协同改善空气质量和减少碳排放的目标(Shi et al., 2022),同时空气污染防治的政策也带有显著的碳减排效果(Zheng et al., 2022)。此外,污染与碳排放也具有较为类似的共同因素,现有的研究表明经济发展水平、技术差异等都会导致不同的污染与碳排放水平,同时人口增长(王正、樊杰,2022)、能源强度(邓吉祥等,2014)、工业化程度(韩玉军、陆旸,2008)、资源禀赋(王慧等,2022)和监管政策差异(曾炳昕等,2022)等都会造成污染与碳排放的集聚。

大量基于污染与碳排放的关系的研究提供了二者可实现协同减排的证据。Jiang等(2021)通过分析深圳的碳排放和空气污染案例证明了污染与碳排放共治的显著效果;Wei等(2020)强调,通过气候变化与大气污染治理政策的结合,中国可以实现温室气体和大气污染物排放的协同减排。但协同效应能否实现取决于环境政策能否改变现有能源消费结构(Lu et al., 2019)、技术创新水平(Zhang et al., 2017)、资源配置(韩超等, 2021; Zimmermann et al., 2020)等关键性因素。如清洁能源的使用能有效降低能耗强度进而减少空气污染(汤韵、梁若冰, 2018),技术创新能有效促进化石能源转化以缓解气候变化(郭扬、李金叶, 2019),资源的合理配置能改善经济活动中的效率损失从而达到节约能源的目标(唐根年等, 2009)。

《减污降碳协同增效实施方案》给出了“减污降碳协同增效”的具体内涵,即减污降碳协同增效作为促进经济社会发展绿色全面转型的总抓手,应实现环境效益、气候效益和经济效益

的多赢。因此,减污降碳的协同效应还应兼顾经济增长(胡萌等,2023)。减污降碳协同增效的研究由来已久,在环境经济学领域中,环境税与减排补贴(Bovenberg & Mooij, 1994)、碳税与碳补贴(Acemoglu et al., 2012)、中央环保督察制度(邓辉等,2021)等“自上而下”的命令控制型环境规制政策与经济增长的关系早已成为研究热点。然而国外学者对减污降碳政策的研究无法完全应用于中国,因中国经济发展水平并未达到稳态,尚未处于Ramsey模型的“鞍点路径”上(范庆泉、张同斌,2018),严苛的环境税政策可能造成企业产出增长乏力,导致经济停滞(丁冠群等,2022),而减排补贴政策则会对环境税的环境保护产生挤出效应(蔡栋梁等,2019),因此利用外源性减排压力迫使企业实现“自愿式减排”成为发达国家的普遍做法(Acemoglu et al., 2012)。在我国“双碳”目标的压力下,排污权、用能权、碳排放权交易市场的相继建立,大大增加了“棕色企业”的自主减排动机,迫使企业加大治污力度、调整能源消费结构、促进减排技术创新,有效缓解“环境-增长”问题的相容性(董直庆、王辉,2021),也为我国减污降碳协同增效“自下而上”的有效推进提供了坚实的理论基础。

现有的研究成果为达成减污降碳协同增效的“三重目标”提供了经验性的证据,但仍存在以下可拓展的空间。第一,在研究视角上,现有文献大多仅讨论减污和降碳政策对单一变量的影响效应,鲜有学者同时探究减污降碳政策对宏观经济和环境质量的影响效果和内在逻辑。第二,在研究内容上,现有文献均从单一的环境政策出发,测度其对二氧化碳和大气污染物的协同治理的内在机理,缺乏多种减污降碳政策对中国经济各个系统影响的全面比较。第三,在研究方法上,现有的统计推断方法和实际数据无法规避对尚未实施的环境政策或未知的外生冲击进行反事实推演造成的统计偏差,也无法全面测度政策对中国宏观社会面的动态响应过程。基于此,本文构建了包含环境变量的动态随机一般均衡模型(DSGE),并将碳税、总量控制及目标强度三种政策情景纳入同一理论框架,以量化不同政策对经济与环境的动态效应,拓展了传统DSGE模型的研究维度。同时,揭示了总量控制情景下环境政策强度冲击的经济产出表现优越性,以及碳税政策情景下减污降碳协同增效的显著性,强调了政策工具对外生冲击的异质性反应机制。并且,通过构建条件福利值函数与消费补偿变化模型,定量评估了三种政策情景对居民社会福利的影响,得出总量控制情景在社会福利保护方面的最优性结论,为政策设计提供量化依据。

三、模型构建

本文构建的DSGE模型采用封闭经济规则,其中主要包括代表性家庭、能源生产部门、最终品生产部门、环境部门及政府部门。如图1所示,在模型中,代表性家庭向能源生产部门和最终品生产部门分别提供劳动、资本以获取劳动报酬和投资收益;能源生产部门以代表性家庭的部分劳动和资本为生产要素,产出的化石能源供最终品生产部门作为生产要素投入生

产;最终品生产部门因消耗化石能源而排放的碳排放及大气污染物则受到政府部门出台的减污降碳政策的管制,政府的环保治理支出会对生态环境质量起到一定的治理效果,DSGE模型构建具体^①如图1所示:

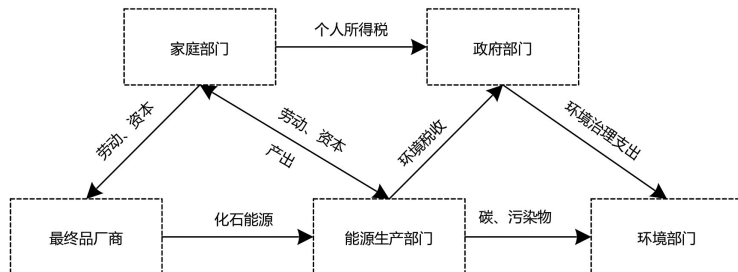


图1 DSGE模型构建

图1中,家庭部门为政府部门提供个人所得税,并向生产部门(能源生产部门和最终品厂商)提供劳动和资本,能源生产部门产出化石能源,最终品厂商则使用劳动、资本和化石能源进行生产,产出用于家庭部门消费,同时最终品厂商在生产过程中向环境部门排放碳和污染物,向政府部门缴纳对应的环境税收,政府部门则对环境部门进行环境治理。

(一)家庭部门

本文参考相关研究(占华,2018;Gan et al.,2024),假设经济系统中具有同质的无限期生存的家庭并均匀分布在 $[0,1]$ 的连续统上,其目的是一生的效用最大化,其效用由消费、劳动及污染存量决定,则代表性家庭的最大化效用如式(1)所示:

$$\max E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t (\ln C_t - \psi \frac{L_t^{1+\varphi}}{1+\varphi} - \gamma \ln Z_t) \quad (1)$$

式(1)中, E_0 是期望算子, β^t 是主观贴现因子, C_t 为代表性家庭在 t 期的消费, L_t 为 t 时期代表性家庭提供的劳动, Z_t 为 t 时期大气中的二氧化碳存量及大气污染存量总和,会对代表性家庭产生负效用, φ 表示Frisch劳动供给弹性系数的倒数, ψ 和 γ 分别表示劳动和环境质量相对于消费影响代表性家庭效用水平的系数,代表性家庭的资源约束条件见式(2):

$$C_t + I_t = (1 - \mu)W_t L_t + R_t^k K_{t-1} + \Gamma_t^E + \Gamma_t^F \quad (2)$$

式(2)中, I_t 表示 t 时期代表性家庭的投资支出, W_t 为工资收入水平, L_t 为总劳动供给, μ 表示政府对代表性家庭征收的个人税的税率, R_t^k 为资本收益率, Γ_t^E 为能源生产部门的生产利润, Γ_t^F 为最终品生产部门的生产利润, K_t 为资本存量,由前一期的资本和当期的投资共同决

^①由于本文并未引入通货膨胀和交易摩擦等设定,故为简化模型,同时参考相关研究(魏震昊等,2024;丁冠群等,2022;杨翱,2022),在模型中并未引入金融部门,仅保留与本文主题密切相关的部门。

定。资本存量的动态演化方程见式(3):

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

式(3)中, σ_k 表示为资本折旧率, 根据以上所述, 本文使用拉格朗日乘数法, 构建最大化家庭消费效用函数, 可以得到代表性家庭关于消费、劳动、资本存量的一阶条件如式(4)和式(5)所示:

$$\psi L_t^\varphi = (1 - \mu)C_t^{-1}W_t \quad (4)$$

$$\lambda_t = \beta E_t \lambda_{t+1} [R_{t+1}^k + (1 - \sigma_k)] \quad (5)$$

式(5)中, λ_t 为家庭部门的边际消费效用, 表示每增加一单位财富带来的效用收益。

(二)能源生产部门

为探究能源消费对我国减污降碳政策实现协同增效的动态路径, 本文参照周县华和范庆泉(2016)的做法, 将能源生产部门作为 DSGE 模型的中间品厂商部门, 以代表性家庭拥有的资本及劳动为生产要素, 生产出的能源供最终品生产部门作为生产要素进行最终商品生产。本文的能源生产函数设置如下:

$$E_t(i) = B_t K_t^E(i)^\alpha L_t^E(i)^{(1-\alpha)} \quad (6)$$

式(6)中, $K_t^E(i)$ 为 t 期能源生产企业 i 的资本投入, α 为能源生产部门的资本产出弹性, $L_t^E(i)$ 为能源生产企业 i 在 t 期的劳动要素投入, $E_t(i)$ 为能源生产企业 i 在 t 期的能源产出, B_t 为能源生产部门的生产技术, 其服从 AR(1)过程, 见式(7):

$$\ln B_t = \rho_B \ln B_{t-1} + \varepsilon_t^B \quad (7)$$

式(7)中, ρ_B 为一阶自回归系数, ε_t^B 为能源生产率外生冲击, 服从正态分布即 $\varepsilon_t^B \sim N(0, \delta^2)$ 。

在完全竞争市场下, 在能源生产函数的设定下, 能源生产企业 i 追求利润最大化, 如式(8)和(9)所示:

$$\max \Gamma_t^E(i) = P_t^E E_t(i) - R_t^k K_{t-1}^E(i) - W_t L_t^E(i) \quad (8)$$

$$\text{s.t. } E_t(i) = B_t K_t^E(i)^\alpha L_t^E(i)^{(1-\alpha)} \quad (9)$$

式(8)中, P_t^E 为能源价格。所得一阶条件加总后的能源生产部门资本及劳动的需求方程如式(10)和(11)所示:

$$K_{t-1}^E = \alpha P_t^E E_t / R_t^k \quad (10)$$

$$L_t^E = (1 - \alpha) P_t^E E_t / W_t \quad (11)$$

(三)最终品厂商

最终品厂商的生产要素来自上述能源生产部门生产的能源、家庭提供的劳动及资本作为生产要素, 故本文在郑丽琳和朱启贵(2012)研究的基础上将最终品厂商的生产函数设置见式(12):

$$Y_t(i) = A_t K_t^F(i)^\theta L_t^F(i)^\omega E_t(i)^{1-\theta-\omega} \quad (12)$$

式(12)中, $Y_t(i)$ 表示最终品厂商的经济产出, θ 和 ω 分别表示最终品厂商资本和劳动的产出弹性, $E_t(i)$ 为企业 i 在 t 时期消耗的化石能源。 A_t 表示最终品厂商的生产技术关于碳储量 X_t 的二次损减函数, 参照Sneerionger(2009)的设定, 具体表现见式(13):

$$A_t = [1 - d_3(d_0 + d_1 X_t + d_2 + X_t^2)] \alpha_t \quad (13)$$

式(13)中, d_0 、 d_1 、 d_2 、 d_3 均为二次损减函数的系数, α_t 表示为企业的生产技术, 服从 AR(1) 过程, 见式(14):

$$\ln(\alpha_t) = (1 - \rho_\alpha) \ln(\alpha_{ss}) + \rho_\alpha \ln(\alpha_{t-1}) + \varepsilon_t^\alpha \quad (14)$$

式(14)中, ρ_α 为生产技术冲击的一阶自回归系数, α_{ss} 为最终品厂商生产技术的稳态值, 且 $\varepsilon_t^\alpha \sim N(0, \sigma_m^2)$, 表示最终品生产技术冲击。

最终品厂商在进行实际生产活动时, 排放二氧化碳 $e_t^{\text{co}_2}(i)$ 和大气污染物 $e_t^P(i)$, 该类企业的排放物除与产出线性相关之外, 还受到政府部门实施的减污降碳政策 η_t 及企业自身的减排技术创新水平 A_t^x 的影响, 具体表现见式(15)和式(16):

$$e_t^{\text{co}_2}(i) = (1 - \eta_t) \omega_1 Y_t(i) / A_t^x \quad (15)$$

$$e_t^P(i) = (1 - \eta_t) \omega_2 Y_t(i) / A_t^x \quad (16)$$

式(15)和式(16)中, ω_1 和 ω_2 分别表示企业未进行任何减排行为后消耗单位化石能源所产生的碳排放折算系数及大气污染物折算系数, η_t 表示政府实施的减污降碳政策强度, A_t^x 为企业自身的减排技术创新水平, η_t 和 A_t^x 均服从 AR(1) 过程, 见式(17)和式(18):

$$\ln(\eta_t) = (1 - \rho_\eta) \ln(\eta_{ss}) + \rho_\eta \ln(\eta_{t-1}) + \varepsilon_t^\eta \quad (17)$$

$$\ln(A_t^x) = \rho_A \ln(A_{t-1}^x) + \varepsilon_t^A \quad (18)$$

式(17)和式(18)中, ρ_η 和 ρ_A 分别表示政府的减污降碳政策强度冲击一阶自回归系数和控排企业的减排创新技术冲击的一阶自回归系数, η_{ss} 表示减污降碳政策强度的稳态值, ε_t^η 为政府减排政策强度外生冲击, ε_t^A 为企业减排技术创新水平外生冲击, 均服从正态分布 $\varepsilon_t \sim N(0, \delta^2)$ 。

同能源生产部门类似, 最终品厂商企业 i 可以自主选择生产要素劳动投入、资本投入以及化石能源投入。根据“污染者付费”原则, 企业需向政府缴纳一定的排放税 $\tau_t e_t^{\text{co}_2}$ 。在经济发展初期阶段, 我国由于政策执行力度的灵活性而长期实行排污收费制度。然而该制度存在征收标准低和缺乏减污约束等问题, 我国已于2018年按照“税负平移”原则将排污收费制度改为征收环境税。实证中, 也有学者发现目前的环境税收机制对减污和降碳具有显著的协同效力(张瑜等, 2022), 故为了简化模型, 本文提出以下假设: 最终品厂商需缴纳税率为 τ_t 的排放税, 不需重复支付环境税; 因货币政策并非本文研究重点, 故企业不需支付因通胀而调整价

格的调整成本;国内厂商生产排放的二氧化碳和大气污染物不流入国外。该类厂商追求其自身的生产利润最大化如式(19)–(20)所示:

$$\max \Gamma_t^F(i) = Y_t(i) - W_t L_t^F(i) - R_{t-1}^K(i) K_{t-1}^F(i) - P_t^E E_t(i) - \tau_t e_t^{co_2}(i) \quad (19)$$

$$Y_t(i) = A_t K_{t-1}^F(i)^a L_t^F(i)^\theta E_t(i)^{1-a-\theta} \quad (20)$$

$$e_t^{co_2}(i) = (1 - \eta_t) \omega_1 Y_t(i) / A_t^x \quad (21)$$

则有最优劳动投入、资本投入、化石能源投入的需求方程加总后如式(22)–(24)所示:

$$L_t^F = \omega [Y_t - \tau_t e_t^{co_2}] / W_t \quad (22)$$

$$K_{t-1}^F = \theta [Y_t - \tau_t e_t^{co_2}] / R_t^K \quad (23)$$

$$E_t = (1 - \theta - \omega) [Y_t - \tau_t e_t^{co_2}] / P_t^E \quad (24)$$

(四)环境部门

为探究我国环境政策对减污降碳是否可以达到协同增效的效果,本文在蔡栋梁等(2019)的基础上将影响环境质量的单一指标拓展为碳储量 X_t 和污染存量 Q_t ,具体见式(25)和式(26):

$$X_t = (1 - \sigma_x) X_{t-1} + \int_0^1 e_t^{co_2}(i) d(i) \quad (25)$$

$$Q_t = (1 - \sigma_Q) Q_{t-1} + \int_0^1 e_t^{PM}(i) d(i) - \zeta \rho G_t(i) \quad (26)$$

式(25)和式(26)中, G_t 表示政府的财政收入,在系统均衡时财政收入等于财政支出, σ_x 和 σ_Q 分别为生态环境本身对碳储量和大气污染存量的自然降解率, ρ 为政府的环境治理支出与政府财政支出的比例, ζ 为环境治理所减少大气污染存量的系数。

(五)政府部门

本文并未在DSGE模型中引入金融部门、货币、粘性价格等设定,金融和价格因素并非本文研究重点,因此政府部门并未设置货币政策。假设政府对经济体系及生态环境的宏观调控分为减污降碳政策、财政政策。在减排行政政策层次,为减少减污降碳的政策实施成本、全局考量减污降碳协同效应,参照 Annicchiarico 和 Dio (2015) 及丁冠群等(2022)的做法,将减污降碳政策分为4个情景:

1. 无政策情景

政府不向控排企业征收排放税及设置总量控制的排放上限,此时碳排放成本为0,企业不承担额外的成本,即 $\tau_t e_t^{co_2}(i) = 0$ 。

2. 总量控制情景

政府向纳入碳交易市场的控排企业设置排放上限 e_t^{lim} ,使得 $e^{co_2} = e^{lim}$ 。此时 τ_t 表示政府向企业出售排放许可证的价格,是内生决定的。排放上限 e_t^{lim} 服从AR(1)过程,如下式:

$$\ln e_t^{lim} = (1 - \rho_{elim}) \ln(e_{ss}^{lim}) + \rho_{elim} \ln e_{t-1}^{lim} - \varepsilon_t^{elim} \quad (27)$$

式(27)中, e_{ss}^{lim} 为政府为企业排放设置的初始上限值, ρ_{elim} 为企业排放上限的一阶自回归系数, ε_t^{elim} 为排放上限外生冲击, 服从正态分布 $\varepsilon_t^{elim} \sim N(0, \delta^2)$ 。

3. 碳税政策情景

鉴于中国经济的发展与环境之间的关系, 碳补贴可能对政府的环保治理支出起到挤出效应, 弱化减污降碳政策的实际效果, 故暂不考虑碳补贴情景。当前情景下, 政府向纳入碳交易市场的控排企业征收税率为 τ_t 的税收, 该税收的目的在于倒逼企业将经济效益与环境效益挂钩, 从而降低碳排放, τ_t 服从AR(1)过程, 见式(28):

$$\ln \tau_t = (1 - \rho_\tau) \ln(\tau_{ss}) + \rho_\tau \ln \tau_{t-1} - \varepsilon_t^\tau \quad (28)$$

式(28)中, ρ_τ 为碳税冲击的一阶自回归系数, τ_{ss} 为碳税税率的稳态值, ε_t^τ 为碳税外生冲击, 服从正态分布 $\varepsilon_t^\tau \sim N(0, \sigma^2)$ 。

4. 目标强度政策情景

当前情景下, 政府部门规定了控排企业的碳排放强度, 同时对企业发放排放许可证以限制企业的碳排放。政府对控排企业设定单位产出的碳排放强度为 v , 则有式(29):

$$e_t^{co_2}(i) = v \times Y(i) \quad (29)$$

同时以 τ 的价格向企业出售排放许可证。

此外, 为简化模型设定, 在财政政策中, 政府的收入来自家庭部门的劳动报酬和企业部门的排污税, 具体见式(30):

$$G_t = \mu W_t L_t + \tau_t \int_0^1 e_t^{co_2}(i) di \quad (30)$$

(六) 市场出清和均衡

在市场均衡时, 系统中的所有市场均同时达到出清状态, 即劳动力市场、资本市场、商品市场出清, 出清条件分别见式(31)、式(32)、式(33):

$$L_t = L_t^E + L_t^F \quad (31)$$

$$K_t = K_t^E + K_t^F \quad (32)$$

$$Y_t = C_t + I_t + G_t \quad (33)$$

四、参数的校准与估计

(一) 参数的校准

为使DSGE模型的模拟结果能更真实反映现实我国环境政策的政策效应, 本文参照已有文献以及中国实际宏观数据校准模型中的静态参数。本文模型将资本存量拆分为能源生产部门及最终品厂商部门, 依据能源工业固定资产投资份额与中国社会总固定资产投资份额的

比重分别对两类部门资本产出弹性系数校准为 $\alpha=0.41$ 、 $\theta=0.49$;参考孙宁华和江学迪(2012)的设定,将劳动产出弹性系数 ω 校准为 0.349;参考郑丽琳和朱启贵(2012),将二次耗损函数的系数 d_0 、 d_1 、 d_2 、 d_3 分别校准为 $1.3950\text{e-}3$ 、 $-6.6722\text{e-}6$ 、 $1.4647\text{e-}8$ 和 1;参考 Corsello 和 Landi (2019)将劳动供给弹性系数 φ 校准为 0.5,同时根据(4)式劳动供给方程将劳动对家庭效用的影响系数 ψ 反推,结果为 $\psi=4.5125$;参考朱军(2015),将碳储量对家庭效用的影响系数校准为 0.7;参考 Anelí 等(2020)、范庆泉和张同斌(2018)、丁冠群等(2022)、周县华和范庆泉(2016)的做法,分别将消耗单位化石能源的碳排放系数 ω_1 、消耗单位化石能源的大气污染物排放系数 ω_2 、环境对二氧化碳的自然降解系数 σ_x 及环境对大气污染物的自然降解系数 σ_Q 校准为 1、0.7、0.0021、0.1;参考蔡栋梁等(2019)的做法分别将政府环境治理支出占政府总支出的比重 ρ 、政府环境治理所减少大气污染存量的系数 ζ 校准为 0.03、1.16。各静态参数校准结果如下表 1:

表 1		参数校准结果			
参数	含义	参数值	参数	含义	参数值
β	贴现率	0.975	φ	劳动供给弹性系数	0.5
δ_k	折旧率	0.025	ψ	劳动对家庭效用的影响系数	4.5125
α	能源生产部门资本产出弹性	0.41	X_t	碳储量对家庭效用的影响系数	0.7
θ	最终品厂商资本产出弹性	0.49	ω_1	消耗单位化石能源的碳排放系数	1
ω	劳动产出弹性系数	0.349	ω_2	消耗单位化石能源的大气污染物排放系数	0.7
d_0	二次损减函数常数项	1.3950e-3	σ_x	环境对二氧化碳的自然降解系数	0.0021
d_1	二次损减函数一次项	-6.6722e-6	σ_Q	环境对大气污染物的自然降解系数	0.1
d_2	二次损减函数二次项	1.4647e-8	ρ	政府环境治理支出占政府总支出的比重	0.03
d_3	二次损减函数系数	1	ζ	政府环境治理所减少大气污染存量的系数	1.16

(二)贝叶斯估计

本文通过校准将模型中的静态参数赋值,但仍然存在许多一阶自回归系数需要使用实际统计或观测数据对参数进行估计,从而获取较为精准的估计值。鉴于此,本文选取《中国统计年鉴》1992年第1季度至2017年第4季度中国名义GDP和社会消费品零售总额作为模型的观测变量,利用GDP平减指数得到数据的实际值,使用HP滤波消除数据中的趋势项并进行季节调整。设定各外生变量的一阶自回归系数服从Beta分布,随机冲击的标准差服从Gamma分布。表2展示了三种政策情景模型参数贝叶斯估计的结果。

表 2 三种政策情景模型参数贝叶斯估计结果

参数	先验均值	总量控制情景			碳税情景			目标强度情景		
		后验均值	90%置信区间		后验均值	90%置信区间		后验均值	90%置信区间	
ρ_B	0.9	0.8879	0.8387	0.9241	0.9266	0.8933	0.964	0.9226	0.9117	0.9318
ρ_a	0.9	0.9349	0.9255	0.9472	0.8924	0.8747	0.9173	0.8853	0.8602	0.9064
ρ_η	0.9	0.8754	0.8646	0.904	0.9195	0.9041	0.9416	0.9274	0.9155	0.9332
ρ_{A^*}	0.9	0.9733	0.9577	0.9864	0.9054	0.8624	0.9516	0.9081	0.8715	0.9441
ρ_{eco_2}	0.9	0.8557	0.8444	0.8719	—	—	—	—	—	—
ρ_τ	0.9	—	—	—	0.9028	0.8828	0.9195	—	—	—
ε_B	0.01	0.0047	0.0014	0.0082	0.0071	0.0012	0.0151	0.0058	0.0014	0.0088
ε_a	0.01	0.0127	0.0041	0.0216	0.0398	0.0301	0.0471	0.0428	0.0398	0.0461
ε_{A^*}	0.01	0.0218	0.0174	0.0276	0.0076	0.0015	0.0154	0.0095	0.003	0.0232
ε_η	0.01	0.0049	0.0026	0.0072	0.009	0.001	0.0179	0.0046	0.0025	0.0075
ε_{eco_2}	0.01	0.0062	0.0023	0.0106	—	—	—	—	—	—
ε_τ	0.01	—	—	—	0.0196	0.0011	0.0737	—	—	—

五、模拟结果分析

首先,本文通过构建包含环境质量的DSGE模型模拟中国宏观经济、生态环境质量在总量控制、碳税、目标强度三种不同环境政策情景下,对于能源生产技术、最终品生产技术、环境政策强度、减排创新技术四种外生冲击的脉冲响应。其次,通过方差分解分析不同政策情景下各相关变量对不同外生冲击的分解特征。最后,通过构建社会福利函数分析对比不同外生冲击下,政府选择的减污降碳政策对中国居民福利损失的差异。为体现出模型对比三种政策情景对减污降碳协同增效差异的精确性,将三种政策情景的稳态值设为相同值。

(一)脉冲响应分析

图2—5表示为在总量控制、碳税、目标强度三种不同情景下产出、消费、投资等各变量对一单位标准差外生冲击的动态响应过程。其中,横轴表示以季度为单位的模拟期数;纵轴为变量偏离稳态的百分比。

1.生产技术冲击

图2和图3结果显示,中国宏观经济和生态环境质量在受到一单位正向的能源及最终品生产技术冲击在总体上呈现相似的响应趋势。在碳税和目标强度情景下,随着生产技术的提升,能源生产部门的产量上升,最终品产厂商对能源要素需求增加,据能源工业固定资产投资份额数据,能源生产部门及最终品产商为资本密集型企业,厂商对资本的需求大于对劳动的需求,随着资本的不断投入,资本与劳动的边际替代率逐渐提高,因此劳动在短期内迅速上升后逐渐趋于稳态;由于经济产出及劳动的迅速上升,居民的可支配收入提升,居民可以通过增加

消费、投资和储蓄来提升自身的效用;在总量控制情景中,个体行为的消费、投资、劳动和持有的资本均在短期内呈现负向响应。这是由于在总量控制情景下,减污降碳政策强度及减排技术创新水平为固定值,因此碳排放、大气污染物排放均由最终品厂商的产出决定。观察最终品产出方程可知,技术的进步导致传统要素需求的减少,所以市场均衡时呈现出劳动、投资下降的结果;总量控制情景中的能源产出在能源生产技术进步时呈现正向响应。在总量控制情景下,最终品厂商的产出无法扩大,但能源生产技术的进步导致能源产出的增长和能源价格的降低,最终品厂商将调整生产要素投入结构,扩大能源投入以降低生产成本;最终品厂商生产技术进步时,能源产出呈现负向响应,这是因为总量控制情景下最终品厂商生产技术的进步同样降低了能源需求,能源产出随之降低。在生态环境方面,当期的碳排放及大气污染物排放因产出的增加而迅速增加,碳储量居高不下,而大气污染存量则因政府环境治理呈现“驼峰状”趋势且慢慢趋于平稳。

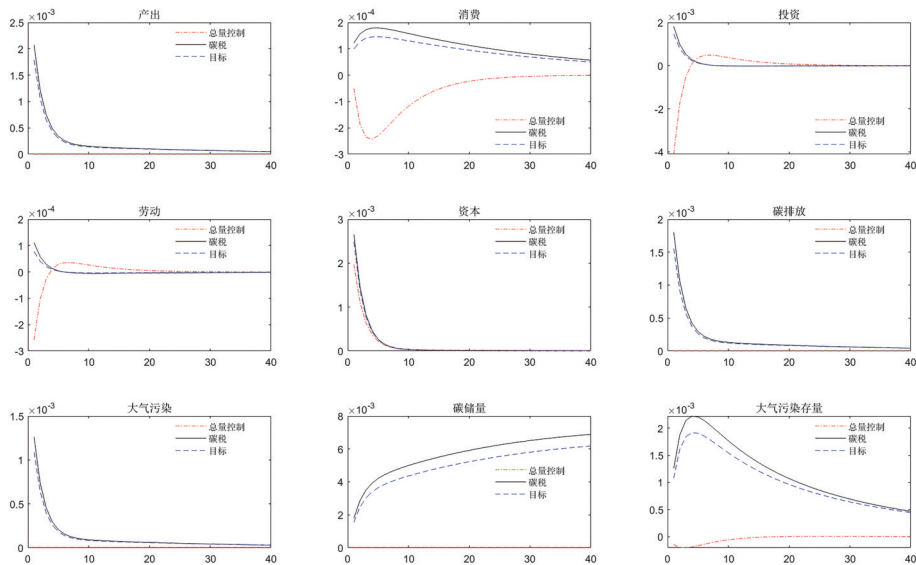


图2 能源生产技术冲击

2.环境政策强度冲击

据模拟结果图4所示,较已有文献的结论有所不同,政府构建的减污降碳政策、行政法规体系在经济和环境质量并非“对立面”。总体而言,在一单位标准差正向政策强度冲击下,我国环境质量显著提升,且经济并未出现“预期”的下降。在三种政策情景下,我国经济和环境质量均出现不同程度的“协同效应”,但总量控制情景显著不同于碳税情景及目标强度情景。具体而言,在总量控制情景下,政策强制固定了企业的排放,控排企业不需配置额外控排成本,可以加大融资力度获取更多资本及劳动的投入扩大生产,实现“自愿式减排”,从产业结构的角度分析,代表性家庭在通过投入大量劳动和资本获得丰厚的经济回报后,往往倾向于通

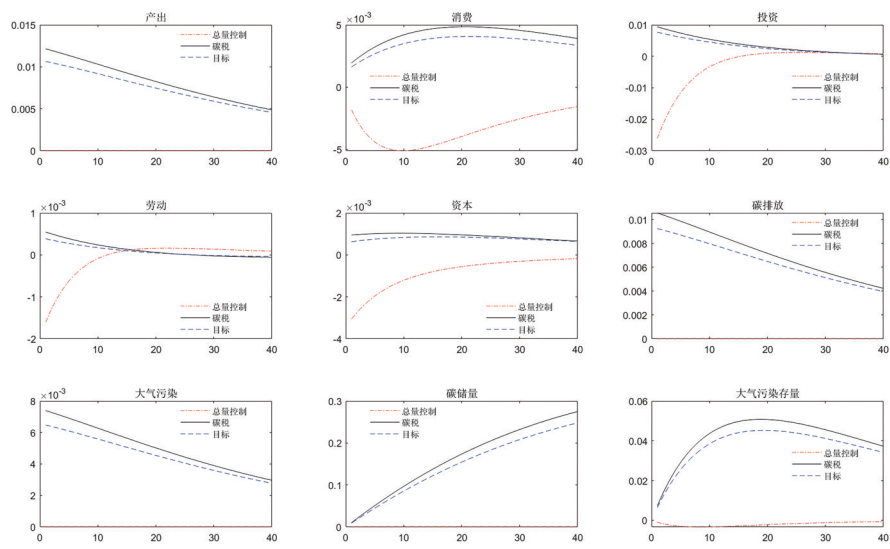


图3 最终品生产技术冲击

过消费来实现自身效用的最大化,劳动和投资在短期内上升后会迅速下降,消费则呈现出“驼峰状”的变化趋势,并最终趋于稳定。这表明,代表性家庭的决策行为对于总量控制情景并没有显著的影响。在碳税和目标强度情景下,控排企业迅速响应政府的减污降碳政策,环境质量因企业排放的严格限制而显著提升,企业排放的降低意味着向政府缴纳的碳税或排放许可证成本降低,短期内实现经济的增长。

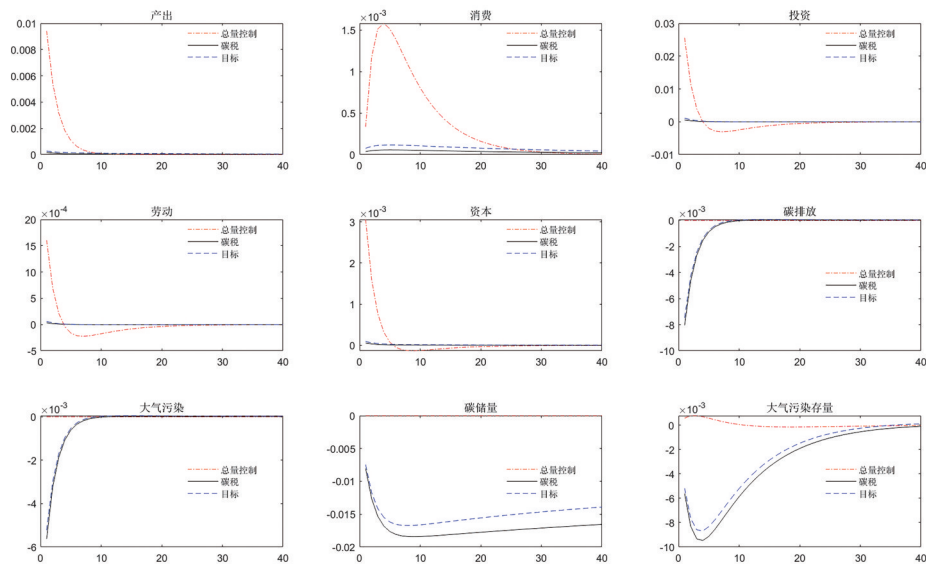


图4 环境政策强度冲击

3.减排创新技术冲击

中国经济和环境质量对一单位标准差正向减排技术冲击下的动态响应如图5所示。总

体而言,相比政府层面提升环境政策强度的命令控制型环境规制对减污降碳产生短期的协同效应,控排企业自身减排创新技术的提升对于减污降碳协同增效的影响更为长远,即减排技术创新有效降低当期的碳排放、大气污染物排放,使碳储量和大气污染存量呈现负向增长。同上述3种冲击类似,总量控制情景下的经济对于外生冲击的脉冲响应更为显著,而碳税情景和目标强度情景在改善环境质量方面更为突出且前者的改善程度稍微优于后者。具体而言,在总量控制情景下,减排技术创新冲击对经济有着非常显著且长远的正向促进作用,企业因自身减排技术创新的提升,短期内对代表性家庭的劳动、投资需求陡然上升,在第10期之后,控排企业完成产业升级,由劳动密集型的“粗放式”生产模式转型为资本密集型“精细加工”的生产模式;在减排技术创新的推动下,碳税情景中环境质量的改善显得尤为理想。碳排放量的减少致使企业所需缴纳的碳税相应降低,使得企业能够将更多资源投入经济产出中,从而改善财务状况。同时,政府通过环境专项治理获得了更多的税收,能够投入更多资金用于环境治理,为减污降碳的协同治理提供了坚实的财政支持。因此,减排技术创新不仅促进了环境质量的提升,还通过降低碳税、增加经济产出和提高环境治理支出,为实现环境与经济的双赢提供有力保障。在目标强度情景下,宏观经济变量和家庭决策变量与碳税路径相似,但从长期的环境质量来看,目标强度情景的治理效果介于总量控制和碳税之间。

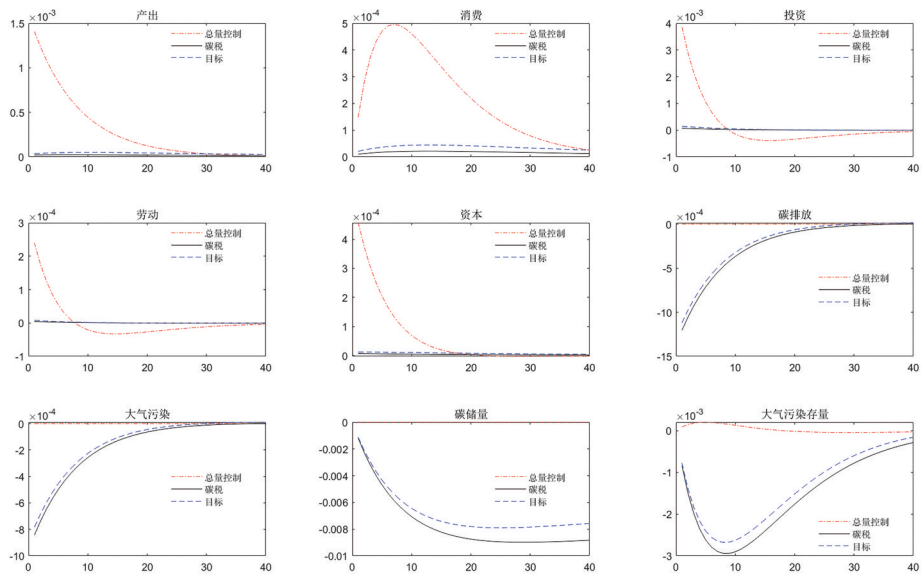


图5 减排技术创新冲击

(二)方差分解

方差分解(Variance Decomposition)考察了模拟期数内不同外生冲击对相关变量偏离稳态波动的贡献程度,从中可以确定各种外生冲击对研究变量影响力的权重。表3为三种不同的

政策情景下各类外生冲击对于中国经济和环境质量的方差分解。

表 3 三种政策情景下各类外生冲击对各变量的方差分解

情景	变量	能源生产技术冲击	最终品生产技术冲击	环境政策强度冲击	减排技术创新冲击	排放上限政策冲击	碳税政策税率冲击
总量控制	产出	1.33e-20	6.46e-18	98.419	0.025	1.555	—
	消费	0.013	8.360	91.064	0.010	0.554	—
	投资	0.059	20.157	76.173	0.053	3.557	—
	资本	0.018	10.237	88.919	0.014	0.812	—
	劳动	0.067	21.778	74.058	0.060	4.037	—
	碳排放	8.56e-19	4.15e-16	8.66e-15	9.50e-19	100	—
	污染排放	8.56e-19	4.15e-16	8.66e-15	9.50e-19	100	—
	碳储量	1.06e-18	1.42e-16	8.71e-15	1.67e-18	100	—
	污染存量	0.015	8.465	13.274	0.003	78.243	—
碳税	产出	1.813	97.964	0.012	0.000	—	0.211
	消费	0.459	98.471	0.044	0.003	—	1.023
	投资	2.302	94.045	0.197	0.005	—	3.452
	资本	0.890	97.162	0.081	0.005	—	1.863
	劳动	2.574	93.387	0.219	0.005	—	3.814
	碳排放	1.304	70.490	27.191	0.863	—	0.152
	污染排放	1.304	70.490	27.191	0.863	—	0.152
	碳储量	0.579	86.331	12.142	0.820	—	0.128
	污染存量	0.646	84.671	13.669	0.852	—	0.162
目标强度	产出	0.076	99.906	0.019	0.000	—	—
	消费	0.089	99.838	0.072	0.001	—	—
	投资	0.061	99.887	0.052	0.000	—	—
	资本	0.086	99.845	0.069	0.001	—	—
	劳动	0.055	99.895	0.049	0.000	—	—
	碳排放	0.074	98.157	1.757	0.011	—	—
	污染排放	0.074	98.157	1.757	0.011	—	—
	碳储量	0.097	99.178	0.719	0.006	—	—
	污染存量	0.085	98.535	1.370	0.010	—	—

据上表,在总量控制情景下,环境政策强度冲击对产出、消费、投资、劳动、资本的影响显著大于其他冲击,排放上限冲击对碳排放、污染排放和碳储量的影响程度更大,而两种生产技术和减排技术创新冲击对产出、碳排放等变量影响效果甚微,这也解释了总量控制情景下这几个变量脉冲响应图的波动幅度过小的特征;在碳税政策情景下,最终品生产技术冲击是影响各变量动态响应的最主要因素,对产出、消费、投资、劳动和资本的冲击贡献均超过90%,影响相对较小的是环境政策强度冲击和减排技术创新冲击,经济产出对减排技术创新冲击的方差分解为0;在目标强度政策情景下,最终品生产技术冲击对各个变量的影响作用最为显著,其余三类外生冲击影响相对较小。

综上所述,总量控制情景下,环境政策强度对经济产出的冲击影响远远高于对环境质量的影响,生态环境质量对政府设定的排放上限阈值极为敏感。在碳税政策情景和目标强度政策情景下,各相关变量对最终品生产技术冲击的分解特征显著。

(三)社会福利分析

本文为全面考察三种不同政策情景下,短期内实施的减污降碳政策对于社会面的居民效用影响,使用CV消费补偿变化(Compensating Variation)比较三种政策情景的社会福利差异,定义代表性家庭的最大化效用函数为社会福利函数,由于效用函数加性可分,社会福利函数可拆分为三部分,见式(34):

$$Wel_{i,t} = E_t \sum_{t=0}^{\infty} \beta^{t+1} (\ln C_{i,t+l} - \psi \frac{L_{i,t+l}^{1+\varphi}}{1+\varphi} - \gamma \ln Z_{i,t+l}) = Wel_{i,t}^C + Wel_{i,t}^L + Wel_{i,t}^Z \quad (34)$$

式(34)中关于消费、劳动、污染存量效用函数的 Bellman 方程可分别写为:

$$Wel_{i,t}^C = \ln C_{i,t} + Wel_{i,t+l}^C \quad (35)$$

$$Wel_{i,t}^L = -\psi \frac{L_{i,t+l}^{1+\varphi}}{1+\varphi} + Wel_{i,t+l}^L \quad (36)$$

$$Wel_{i,t}^Z = -\gamma \ln Z_{i,t+l} + Wel_{i,t+l}^Z \quad (37)$$

以总量控制情景为基准情景1,则三种政策情景的CV消费补偿变化 λ^C ,可定义为式(38):

$$Wel_{i,t}^* = E_t \sum_{t=0}^{\infty} \beta^{t+1} (1 + \lambda^C) \ln C_{i,t+l} - E_t \sum_{t=0}^{\infty} \beta^{t+1} \psi \frac{L_{i,t+l}^{1+\varphi}}{1+\varphi} - E_t \sum_{t=0}^{\infty} \beta^{t+1} \gamma \ln Z_{i,t+l} \quad (38)$$

$$\text{则有: } \lambda^C = \exp(Wel_{i,t} - Wel_{i,t}^*) (1 - \beta) - 1 \quad (39)$$

将上述值函数使用二阶近似求解后,基准情景与碳税情景、基准情景与目标强度、碳税政策与目标强度的CV消费补偿变化分别为6.0768e-04、6.0268e-04、-5.0000e-06,则有居民社会福利由高到低依次为总量控制情景、目标强度情景、碳税情景。这可能是由于总量控制情景下污染存量可以得到更加有效地控制。此外,该政策可能使得主要经济变量的波动相对平滑,减小不确定性给居民福利造成的损失。可以认为,基于社会福利分析,最优的政策应当是总量控制。

六、结论与政策建议

本文通过构建包含环境部门的DSGE模型,从居民社会福利、控排企业生产活动和政府宏观调控三个维度出发,模拟和对比在总量控制、碳税、目标强度三种政策情景下,中国宏观经济及生态环境对能源生产技术和最终品生产技术、环境政策强度、减排技术创新四种外生冲击的动态响应,得到结论如下。

第一,模拟结果显示,在环境政策强度冲击下,短期内中国宏观经济实现增长、大气污染存量呈“驼峰状”下降趋势,然后趋于稳态。与此同时,碳储量则在模拟期数内一直表现为“发散”式降低,表明减污降碳政策具有明显的动态变化趋势,减污降碳政策的“降碳”效应优于“减污”效应,同时也印证了中国增加适当强度的环境政策可以实现减污降碳的协同增效。第

二,从偏离稳态的响应程度来看,总量控制情景下的经济产出应对正向外生冲击表现更好,环境质量对各类外生冲击的分解特征较小;总体上目标强度政策情景与碳税政策情景的各相关变量的响应趋势类似。然而,在碳税政策情景下,受到正向环境政策强度冲击和减排技术创新冲击后,减污降碳的协同效应较其他两种政策情景更为显著。第三,在总量控制情景下,最终品生产技术冲击对能源消费市场产生明显的结构效应,正向的最终品生产技术对能源产出产生抑制效应,总产出无明显变化,在其他两种政策情景下结构效应并不明显。第四,正向减排技术创新冲击在三种政策情景下均能实证减污降碳协同增效,其对宏观经济和环境质量均产生长期的正向调节作用,进一步验证了“波特假说”,即减排技术创新可以实现经济与环境质量的双赢。第五,通过条件福利水平值函数及消费补偿水平考察社会面居民在三种政策情景下的社会福利水平,发现总量控制情景的社会福利水平损失最小、目标强度情景其次、碳税情景福利损失最大。

基于上述研究结论,本文提出如下政策建议:第一,为推进中国减污降碳协同增效,政府应建立完善的减污降碳协同控制的行政法规体系、整合改进“分而治之”的单边减污降碳政策,严格控制立法成本、提高减污降碳“合而治之”的协同防控效率。此外,政府应推行由“强约束”逐步向“软激励”过渡的命令控制型环境政策,制定合理的激励、补贴政策,避免和预防控排企业产生“运动式减排”行为,促导企业实现自主减排,兼顾经济增长与环境治理。第二,在落实“双碳”目标和经济增长的双重压力下,单一的政策情景无法兼顾宏观经济增长和环境质量改善,我国应采取总量控制、碳税与目标强度并行的组合政策来实现减污降碳的协同效应。第三,调整产业结构,逐步淘汰高耗能、低产出的陈旧生产设备,抑制新建高耗能、高排放的工程项目,大力发展新能源,代替煤炭、石油等化石能源成为能源消费增量的主体,通过调整产业结构和优化能源消费市场来实现二氧化碳和大气污染的协同治理,推动环境治理由“末端治理”向“源头管控”的有效转变。第四,在外源性减排压力下,我国应激励控排企业完成自身技术创新升级,并给予适当力度的技术补贴,降低排放缴纳税率,推广减排技术的应用场景,加大发展和突破减排技术创新力度,培养能源环境领域的科技人才。

参考文献:

- [1] 蔡栋梁,闫懿,程树磊.碳排放补贴、碳税对环境质量的影响研究[J]. 中国人口·资源与环境,2019,29(11):59-70。
- [2] 邓辉,甘天琦,涂正革. 大气环境治理的中国道路——基于中央环保督察制度的探索[J]. 经济学(季刊),2021,21(05):1591-1614。
- [3] 邓吉祥,刘晓,王铮. 中国碳排放的区域差异及演变特征分析与因素分解[J]. 自然资源学报,2014,29(2):189-200。
- [4] 丁冠群,王铮,孙翊. 基于多行业 DSGE 模型的中国碳减排政策效应[J]. 中国人口·资源与环境,2022,

32(1):19-30.

[5] 董直庆,王辉. 市场型环境规制政策有效性检验——来自碳排放权交易政策视角的经验证据[J]. 统计研究,2021,38(10):48-61.

[6] 范庆泉,张同斌. 中国经济增长路径上的环境规制政策与污染治理机制研究[J]. 世界经济,2018,41(8):171-192.

[7] 甘天琦. 数字经济的减碳效应研究——基于要素配置的视角[J]. 华中师范大学学报(人文社会科学版),2023,62(6):60-73.

[8] 李江龙,韩蓉. 中国省际最优碳配额及减排成本研究——基于效率视角下的碳总量控制情景[J]. 环境经济研究,2022,7(3):1-24.

[9] 李世冉,邓宏兵,张欢,等. 环境协同治理的经济增长效应——以“长三角区域大气污染防治协作机制”政策为例[J]. 环境经济研究,2023,8(4):163-190.

[10] 郭朝先. 2060年碳中和引致中国经济系统根本性变革[J]. 北京工业大学学报(社会科学版),2021,21(5):64-77.

[11] 郭扬,李金叶. “社会人”假说下中国新能源替代化石能源的驱动机制研究[J]. 中国人口·资源与环境,2019,29(11):30-40.

[12] 韩超,王震,田蕾. 环境规制驱动减排的机制:污染处理行为与资源再配置效应[J]. 世界经济,2021,44(8):82-105.

[13] 韩玉军,陆旸. 门槛效应、经济增长与环境质量[J]. 统计研究,2008(9):24-31.

[14] 胡萌,伍雅思,常娇娇. 降碳减污协同效应:区域差异与协调路径[J]. 环境经济研究,2023,8(4):191-208.

[15] 孙宁华,江学迪. 能源价格与中国宏观经济:动态模型与校准分析[J]. 南开经济研究,2012(2):20-32.

[16] 唐根年,管志伟,秦辉. 过度集聚、效率损失与生产要素合理配置研究[J]. 经济学家,2009(11):52-59.

[17] 汤韵,梁若冰. 能源替代政策能否改善空气质量——兼论能源定价机制的影响[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(6):80-92.

[18] 王慧,孙慧,肖涵月,等. 碳达峰约束下减污降碳的协同增效及其路径[J]. 中国人口·资源与环境,2022,32(11):96-108.

[19] 王正,樊杰. 能源消费碳排放的影响因素特征及研究展望[J]. 地理研究,2022,41(10):2587-2599.

[20] 魏震昊,孙国茂,姚中杰. 自愿减排机制下海洋碳汇交易的双重效益与影响因素[J]. 中国人口·资源与环境,2024,34(4):48-59.

[21] 杨翱. 不同碳配额分配方式的中国经济波动效应研究[J]. 数量经济技术经济研究,2022,39(6):81-99.

[22] 杨冕,晏兴红,李强谊. 环境规制对中国工业污染治理效率的影响研究[J]. 中国人口·资源与环境,2020,30(9):54-61.

[23] 易兰,杨田恬,杜兴,等. 减污降碳协同路径研究:典型国家驱动机制及对中国的启示[J]. 中国人口·资源与环境,2022,32(9):53-65.

[24] 曾炳昕,丁庆国,朱磊. 碳市场中市场势力对减排技术采用的影响[J]. 中国管理科学,2022,30(2):38-47.

[25] 张瑜,孙倩,薛进军,等. 减污降碳的协同效应分析及其路径探究[J]. 中国人口·资源与环境,2022,32(5):1-13.

[26] 占华. 收入差距对环境污染的影响研究——兼对“EKC”假说的再检验[J]. 经济评论,2018(6):100-112.

[27] 郑丽琳,朱启贵. 技术冲击、二氧化碳排放与中国经济波动——基于DSGE模型的数值模拟[J]. 财经研究,2012,38(7):37-48+100.

[28] 周县华,范庆泉. 碳强度减排目标的实现机制与行业减排路径的优化设计[J]. 世界经济,2016,39(7):168-192.

- [29] 朱军. 基于DSGE模型的“污染治理政策”比较与选择——针对不同公共政策的动态分析[J]. 财经研究, 2015, 41(2): 41–53.
- [30] Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn, et al. The Environment and Directed Technical Change[J]. American Economic Review, 2012, 102(1): 131–166.
- [31] Ambec, S., J. Coria. The Informational Value of Environmental Taxes[J]. Journal of Public Economics, 2021, 199: 10499.
- [32] Anelí, B., G. Trinidad, L. T. Jose. Teaching dynamic General Equilibrium Macroeconomics to Undergraduates Using a Spreadsheet[J]. International Review of Economics Education, 2020, 35: 100197.
- [33] Annicchiarico, B., F. Di Dio. Environmental Policy and Macroeconomic Dynamics in a New Keynesian Model[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2015, 69: 1–21.
- [34] Bovenberg, A. L., R. A. D. Mooij. Environmental Tax Reform and Endogenous Growth[J]. Journal of Public Economics, 1994, 63(2): 207–237.
- [35] Corsello, F., V. N. Landi. Labor Market and Financial Shocks: A Time Varying Analysis[J]. Social Science Electronic Publishing, 2019, 52(4): 777–801.
- [36] Gan, T., Z. Zhou, S. Li, et al. Carbon Emission Trading, Technological Progress, Synergetic Control of Environmental Pollution and Carbon Emissions in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 442: 141059.
- [37] Gao, L., T. W. Pei, J. R. Zhang, et al. The “Pollution Halo” Effect of FDI: Evidence From the Chinese Sichuan–Chongqing Urban Agglomeration[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(19): 11903.
- [38] Gehrsitz, M. The Effect of Low Emission Zones on Air Pollution and Infant Health[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2017, 83: 121–144.
- [39] Wang, H., K. Gu, H. Sun, et al. Reconfirmation of the Symbiosis on Carbon Emissions and Air Pollution: A Spatial Spillover Perspective[J]. Science of the Total Environment, 2023, 858: 159906.
- [40] Jiang, J., B. Ye, S. Shao, et al. Two-tier Synergic Governance of Greenhouse Gas Emissions and Air Pollution in China’s Megacity, Shenzhen: Impact Evaluation and Policy Implication[J]. Environmental Science Technology, 2021, 55(11): 7225–7236.
- [41] Lu, Z., L. Huang, J. Liu, et al. Carbon Dioxide Mitigation Co-benefit Analysis of Energy-related Measures in the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in the Jing–Jin–Ji Region of China[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2019, 1: 100006.
- [42] Sneerionger, S. A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies[J]. Global Environmental Politics, 2009, 9(1): 146–147.
- [43] Shi, C. C., N. L. Guo, L. L. Zeng, et al. How Climate Change is Going to Affect Urban Livability in China[J]. Climate Services, 2022, 26: 100284.
- [44] Wei, X., Q. Tong, I. Magill, et al. Evaluation of Potential Co-benefits of Air Pollution Control and Climate Mitigation Policies for China’s Electricity Sector[J]. Energy Economics, 2020, 92: 104917.
- [45] Zhang, Y. J., Y. L. Peng, C. Q. Ma, et al. Can Environmental Innovation Facilitate Carbon Emissions Reduction? Evidence from China[J]. Energy Policy, 2017, 100: 12–28.
- [46] Zheng, Y. X., T. Xue, Q. Zhang, et al. Air Quality Improvements and Health Benefits from China’s Clean Air Action since 2013[J]. Environmental Research Letters, 2022, 12(11): 114020.
- [47] Zimmermann, A. W., J. Wunderlich, M. Leonard, et al. Techno-Economic Assessment Guidelines for CO₂ Utilization[J]. Frontiers in Energy Research, 2020, 8(5): 00005.

Dynamic Impact and Welfare Analysis of Heterogeneous Technology Shocks on Pollution and Carbon Reduction Synergies

Gan Tianqi^a, Zhou Zongyu^b, Zhang Kangning^a, Shen Renjun^c

(a: School of Economics, South-Central Minzu University; b: School of Economics, Guizhou University;
c: Institute of Economics and Business Management Central China Normal University)

Abstract: Accelerating the synergy of pollution reduction and carbon reduction is a fundamental requirement for implementing the construction of ecological civilization in the new development stage, and it is an important tool for promoting the synergy of environmental protection and economic development, improving the efficiency of resource utilization, and promoting economic transformation and upgrading. This paper constructs a closed economy general equilibrium model with five sectors to simulate the dynamic effects of China's macroeconomic and ecological environment quality on the shocks of production technology, policy intensity, and emission reduction innovation technology under three different environmental policy scenarios: total control, carbon tax, and target intensity, and constructs a social welfare function to compare the differences in the welfare loss of Chinese residents under different shocks of the policy of pollution reduction and carbon reduction. The results of the study show that: increasing the appropriate intensity of environmental policies in China can achieve synergistic efficiency, which is manifested in economic growth, declining air pollutants and decreasing carbon stocks, and the “carbon reduction” effect is better than the “pollution reduction” effect. The effect of “carbon reduction” is better than the effect of “pollution reduction”. Under the aggregate control scenario, economic output responds better to exogenous shocks, and the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction is more significant under the carbon tax policy scenario. In the aggregate control scenario, final goods production technology shocks have a structural effect on the energy consumption market, while the structural effect is not obvious in the carbon tax and target intensity policy scenarios. The social welfare function examines the level of social welfare of residents under the three policy scenarios, and the social welfare of the three policy scenarios, in descending order, is as follows: total control, target intensity, and carbon tax policy. Based on the conclusions of the study, this paper suggests that the existing environmental governance system should be changed from “divide and rule” to “combine and rule”, and the environmental governance policy should be changed from “hard constraints” to “soft incentives”, and the environmental governance policy should be changed from “hard constraints” to “soft incentives”. Environmental governance policies should be changed from “hard constraints” to “soft incentives”, and environmental governance means should be changed from “end-of-pipe” to “source control”.

Keywords: Carbon Reduction and Pollution Reduction; Synergistic Efficiency Enhancement; DSGE Model; Policy Simulation; Benefits Analysis

JEL Classification: Q40, Q50

(责任编辑:卢 玲)