

## 一、DSGE 模型构建

本文借鉴 Carattini et al. (2021)，构建包括家庭、银行、厂商（包括最终产品厂商、绿色产品厂商、棕色产品厂商和资本品厂商）、政府（包括监管部门）四类主体在内的动态随机一般均衡模型。各经济主体逻辑关系如图 1 所示。其中，家庭向银行提供存款，向绿色产品厂商、棕色产品厂商提供劳动。资本品厂商生产资本品，将其出售给绿色产品厂商、棕色产品厂商。绿色产品厂商和棕色产品厂商用银行贷款购买的资本和家庭提供的劳动生产中间产品。最终产品厂商利用中间产品组织生产。政府向棕色产品厂商征收碳税并对银行绿色资产和棕色资产实施差别监管。此外，DSGE 建模中还重点考虑两方面问题。一是刻画两种经济低效率情形。假设棕色厂商未将其生产导致污染、影响产出的情况纳入生产决策，以此刻画环境负外部性；同时，假设银行道德风险会限制信贷总量，以此刻画金融摩擦。二是有针对性地引入两种工具。一种是碳税，旨在将环境外部性内部化，另一种是监管工具，目的是规范金融行为、减少金融摩擦。

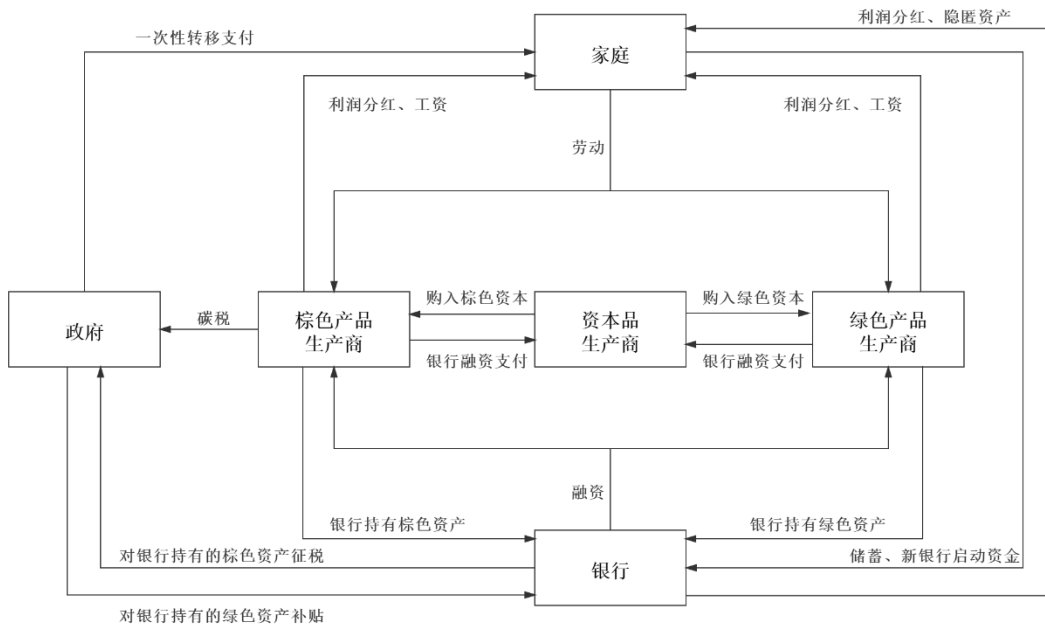


图 1 DSGE 模型逻辑图

### （一）家庭

参考 Gertler and Karadi (2011)，假设代表型家庭均匀分布在 $[0,1]$ 连续统上，满足理性假定，其效用来源于消费和闲暇。家庭成员中比例 $t$ 为银行家，比例 $(1-t)$ 为工人。其中，银行家管理银行，从银行获得利润分红，但同时有隐匿银行资产的动机；工人供职于厂商，通过提供劳动获得收入。家庭通过储

蓄实现跨期资源配置，并在预算约束下选择最优消费、劳动和储蓄以实现跨期效用最大化。

家庭最大化自身的目标效用函数为：

$$E_0 \left\{ \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \frac{1}{1-\eta} \left( C_t - \varpi \frac{\left[ (L_t^b)^{1+\rho_L} + (L_t^g)^{1+\rho_L} \right]^{\frac{1+\xi}{1+\rho_L}}}{1+\xi} \right)^{1-\eta} \right\} \quad (1)$$

其中， $\rho_L$  是劳动时间在绿色和棕色部门间的替代弹性。当  $\rho_L = 0$  时，劳动在绿色、棕色产品部门间具有完全替代性；当  $\rho_L > 0$  时，劳动在绿色、棕色部门间具有不完全替代性。家庭面临的预算约束为：

$$C_t + D_t = \omega_t^b L_t^b + \omega_t^g L_t^g + R_{t-1} D_{t-1} + \Xi_t + \Pi_t + T_t \quad (2)$$

其中， $C_t$ 、 $D_t$ 、 $L_t^g$  和  $L_t^b$  分别表示家庭消费、储蓄以及对绿色和棕色厂商的劳动供给。 $\omega_t^g$  和  $\omega_t^b$  分别表示绿色、棕色厂商的劳动工资， $R_{t-1}$  表示存款利率， $\Xi_t$  表示家庭从银行获得的利润分红<sup>1</sup>， $\Pi_t$  表示从厂商获得的利润分红， $T_t$  表示政府对家庭的转移支付。参数  $\beta \in (0,1)$  为主观贴现因子， $\varpi > 0$  为劳动相对效用权重， $\eta > 0$  为风险厌恶系数， $\xi$  为 Frisch 劳动供给弹性的倒数。

求解家庭最优化问题，可得家庭选择消费、储蓄和劳动的一阶条件：

$$M_{t,t+1} \equiv \beta \left( C_{t+1} - \varpi \frac{L_{t+1}^{1+\xi}}{1+\xi} \right)^{-\eta} \bigg/ \left( C_t - \varpi \frac{L_t^{1+\xi}}{1+\xi} \right)^{-\eta} \quad (3)$$

$$E_t (M_{t,t+1} R_t) = 1 \quad (4)$$

$$\varpi L_t^{\xi-\rho_L} (L_t^i)^{\rho_L} = \omega_t^i, \text{ 其中 } i = \{g, b\} \quad (5)$$

其中， $M_{t,t+1} \equiv \beta \frac{U_{c,t+1}}{U_{c,t}}$  表示家庭随机贴现因子， $L_t$  表示  $t$  时期家庭提供的总劳动。

## (二) 银行

从银行面临约束条件和最优化目标函数两方面介绍银行行为。

### 1. 银行面临的约束

(1) 流动性约束。银行持有一定净资产，并通过吸收家庭存款、向绿色和棕色厂商发放贷款，获得对厂商的资本权益。同时，银行绿色、棕色资产会受到监管部门监管，监管工具包括绿色资产支持、棕色资产惩罚两种<sup>2</sup>。银行流动性约束方程表示如下：

$$(1+\tau_t^b) Q_t^b S_{j,t}^b + (1+\tau_t^g) Q_t^g S_{j,t}^g + \Psi(Q_t^g S_{j,t}^g, W_{j,t}) = D_{j,t} + N_{j,t} \quad (6)$$

<sup>1</sup> 剔除了为新银行提供启动资金后的净值。

<sup>2</sup> 本文选择绿色资产支持、棕色资产惩罚作为监管工具。主要想法是，监管部门采取支持、惩罚工具将影响银行持有的绿色、棕色资产价格，进而间接影响银行持有的绿色、棕色资产规模，这与监管本质是一致的。Gertler et al. (2010) 也认为，对银行资产的支持/惩罚计划带有逆周期资本要求的性质，会增加或减少资产稳态水平，因此，这两类工具可看作一种资本监管要求。

其中,  $N_{j,t}$ 、 $D_{j,t}$ 、 $S_{j,t}^i, i=\{g,b\}$  分别表示银行净资产、存款和资本权益持有量,  $\tau_t^i, i=\{b,g\}$  表示监管部门对棕色资产惩罚和绿色资产支持权重。 $\Psi(Q_t^g S_{j,t}^g, W_{j,t}) = \psi/2 \times (Q_t^g S_{j,t}^g / W_{j,t} - \bar{s}^g)^2 W_{j,t}$  是二次成本函数, 这是 DSGE 建模中常用的一种技术, 主要目的是确保模型有一个确定性的稳态解。其中  $W_{j,t} \equiv Q_t^b S_{j,t}^b + Q_t^g S_{j,t}^g$  表示银行总资产,  $\bar{s}^g$  表示绿色资产在银行资产组合中的比重,  $\psi > 0$  表示银行资产管理成本系数。 $Q_t^b$  和  $Q_t^g$  分别表示银行向棕色、绿色生产部门发放贷款的价格。

**(2) 资产净值约束。** 银行通过吸收存款、发放贷款获得一定收益。令  $R_{k,t}^b$  和  $R_{k,t}^g$  分别表示银行棕色、绿色资产收益率, 银行资产净值约束方程为:

$$N_{j,t+1} = R_{k,t+1}^b Q_t^b S_{j,t}^b + R_{k,t+1}^g Q_t^g S_{j,t}^g - R_t D_{j,t} \quad (7)$$

**(3) 激励约束 (Incentive Constraint)。** 参考 Gertler and Karadi (2011), 假设银行家有动机将比例为  $\kappa$  的银行资产挪作私用, 并可能导致其管理银行因无法满足家庭取现需求而倒闭。家庭仅在确信银行能够长期诚信经营的情况下, 才愿意存款。因此, 银行将面临如下激励约束:

$$V_{j,t} \geq \kappa \underbrace{(Q_t^b S_{j,t}^b + Q_t^g S_{j,t}^g)}_{W_{j,t}} \quad (8)$$

其中,  $V_{j,t}$  表示  $t$  时刻银行长期经营获得收益的现值<sup>3</sup>,  $\kappa$  为银行隐匿资产比例。上式说明, 只有当银行长期经营价值大于隐匿资产时, 银行家才不会挪用资产, 家庭才愿意在银行存款。

## 2. 银行最大化目标函数及一阶条件

银行最大化长期经营价值目标函数为:

$$V_{j,t} = E_t \left\{ \sum_{\tau=t+1}^{\infty} (1-\gamma) \gamma^{\tau-t-1} M_{t,\tau} N_{j,\tau} \right\} \quad (9)$$

其中,  $M_{t,\tau} \equiv \beta^{\tau-t} \times U'_{c,\tau} / U'_{c,t}$  表示随机贴现因子,  $1-\gamma$  为银行家退出概率<sup>4</sup>。在约束条件 (6) (7) (8) 下, 银行选择存款、棕色资产和绿色资产数量, 以最大化期望价值函数 (9)。经代数运算可得银行选择存款、棕色资产和绿色资产的一阶条件为:

$$\chi_t^b = E_t \left[ \Omega_{t+1} (R_{k,t+1}^b - (1 + \tau_t^b) R_t) \right] \quad (10)$$

$$\chi_t^g = E_t \left[ \Omega_{t+1} ((R_{k,t+1}^g - R_{k,t+1}^b) - (\tau_t^g - \tau_t^b) R_t) \right] \quad (11)$$

$$\nu_t = E_t [\Omega_{t+1} R_t] \quad (12)$$

$$\Omega_{t+1} = M_{t,t+1} (1 - \gamma + \gamma \varphi_{t+1}) \quad (13)$$

<sup>3</sup>  $V_{j,t}$  也被称为特许权价值或持续经营价值 (Franchise/Continuation Value)。

<sup>4</sup> 为避免银行无限期地不支付分红, 参照 Gertler and Karadi (2011) 的标准设定, 每期内银行家有  $1-\gamma$  的概率退出, 转为工人身份, 并将银行利润以分红的形式转移给家庭; 未退出的银行家将利用银行净资产继续开展投资活动。

$$\Upsilon_t = \chi_t^b + \chi_t^s s_t^s - \nu_t \varphi (s_t^s - \bar{s}^s)^2 / 2 \quad (14)$$

$$\varphi_t = \kappa \nu_t / \kappa - \Upsilon_t \quad (15)$$

$$W_t = \nu_t N_t / \kappa - \Upsilon_{t,t} = \frac{\varphi_t}{\kappa} N_t \quad (16)$$

$$s_t^s = \frac{E \left\{ \Omega_{t+1} \left[ (R_{k,t+1}^s - R_{k,t+1}^b) - (\tau_t^s - \tau_t^b) R_t \right] \right\}}{\psi E_t [\Omega_{t+1} R_t]} + \bar{s}^s = \chi_t^s / \nu_t \psi + \bar{s}^s \quad (17)$$

式(10) - (17)中,  $\chi_t^b$ 、 $\chi_t^s$ 、 $\nu_t$ 、 $\Omega_t$ 等均是代数运算中指代变量, 主要目的是简化求解过程, 经济含义并不明显, 因此不对其加以注解说明。不过, 式(16)和(17)具有一定实际意义。式(16)反映了金融体系内低效率和负加速器效应问题。一方面, 当银行受到资金约束时, 经济资金需求  $W_t = Q_t^b S_t^b + Q_t^s S_t^s$  会受到银行净资产规模  $N_t$  的限制, 无法全部得到满足; 另一方面, 因银行未将净资产波动对经济的影响内部化, 净资产波动传导至实体经济后会进一步放大(放大比例为  $\varphi_t / \kappa$ ), 造成经济波动。式(17)决定了银行绿色资产在资产组合中的比重  $s_t^s = Q_t^s S_{j,t}^s / W_{j,t}$ 。式(17)表明, 通过设置更高的  $\tau_t^b$  或更低的  $\tau_t^s$ , 会增加银行资产组合中绿色资产的比例。因此, 监管部门可以运用棕色资产惩罚或绿色资产支持两项监管工具, 来影响银行资产组合中棕色、绿色资产比重。

### (三) 厂商

#### 1. 最终产品厂商

最终产品厂商在完全竞争市场上利用棕色产品  $Y_t^b$  和绿色产品  $Y_t^s$  生产最终产品  $Y_t$ , 生产技术为:

$$Y_t = \left[ (\pi^b)^{\frac{1}{\rho_Y}} (Y_t^b)^{\frac{\rho_Y-1}{\rho_Y}} + (1-\pi^b)^{\frac{1}{\rho_Y}} (Y_t^s)^{\frac{\rho_Y-1}{\rho_Y}} \right]^{\frac{\rho_Y}{\rho_Y-1}} \quad (18)$$

其中,  $\rho_Y > 0$  为绿色、棕色产品之间的替代弹性,  $\pi^b$  为棕色产品比重。求解最终产品厂商利润最大化问题, 可得其对绿色产品和棕色产品需求函数为:

$$Y_t^s = (1-\pi^b) \frac{Y_t}{(p_t^s)^{\rho_Y}}, Y_t^b = \pi^b \frac{Y_t}{(p_t^b)^{\rho_Y}} \quad (19)$$

这里, 最终产品价格水平稳态值设定为 1, 相应地,  $p_t^s$  和  $p_t^b$  分别表示绿色、棕色产品的相对价格。

#### 2. 棕色产品厂商

棕色产品厂商使用劳动  $L_t^b$  和资本  $K_t^b$  生产棕色产品  $Y_t^b$ , 生产函数为柯布道格拉斯形式:

$$Y_t^b = [1-d(X_t)] A_t (K_{t-1}^b)^{\alpha^b} (L_t^b)^{1-\alpha^b}, 0 < \alpha^b < 1 \quad (20)$$

其中,  $A_t$  表示技术水平,  $X_t$  表示大气中二氧化碳存量,  $d(\cdot) \in (0,1)$  为边际递增的损减函数。式(20)说明, 棕色厂商生产能力会受到碳排放存量的负面影响。

棕色厂商在生产中会产生碳排放，导致大气中碳存量  $X_t$  按如下方程演变： $X_t = \delta_X X_{t-1} + e_t + e_t^{row5}$ 。其中， $e_t^{row}$  为国外碳排放量， $e_t$  为国内棕色厂商碳排放量。 $e_t$  由棕色产品产量和减排系数共同决定： $e_t = (1 - \mu_t) h(Y_t^b)$ 。其中， $h(Y_t^b)$  表示棕色产品生产导致的碳排放，参考 Nordhaus (2008) 和 Heutel (2012)，设定  $h(Y_t^b) = (Y_t^b)^\varepsilon$ ， $\varepsilon$  为棕色企业碳排放对产出的弹性系数； $\mu_t$  为减排系数，取值在 0 至 1 之间，提高  $\mu_t$ ，将抑制棕色厂商碳排放。不过，棕色厂商会谨慎选择  $\mu_t$ ，因为减排是有成本的。参考 Nordhaus (2008) 和 Heutel (2012)，设定减排成本函数为  $f(\mu_t) = \theta_1 \mu_t^{\theta_2}$ ，因此，棕色厂商的减排成本为  $Z_t = f(\mu_t) Y_t^b$ 。

为从资本品厂商购入新资本，棕色厂商需要向银行寻求外部融资。参考 Gertler and Karadi (2011)， $t$  时期末，棕色厂商若以定价  $Q_t^b$  从资本品厂商购入资本  $K_t^b$ ，就需要向银行出售价格为  $Q_t^b$  的证券权益  $S_t^b$ ，实现  $Q_t^b K_t^b = Q_t^b S_t^b$ ；在  $t+1$  时期，厂商将未折旧资本  $(1 - \delta^b) K_t^b$  以价格  $Q_{t+1}^b$  在市场中出售。

此外，棕色厂商还需向政府缴纳碳税，税率为  $\tau_t^e$ <sup>6</sup>。

综合以上，棕色厂商利润为：

$$\Pi_t^b = p_t^b Y_t^b - \tau_t^e e_t - Z_t - \omega_t^b L_t^b - R_{k,t}^b Q_{t-1}^b K_{t-1}^b + (1 - \delta^b) Q_t^b K_{t-1}^b \quad (21)$$

求解棕色厂商利润最大化问题，经代数运算可得棕色厂商选择劳动  $L_t^b$ 、污染减排系数  $\mu_t$  和资本  $K_{t-1}^b$  的最优条件。

### 3. 绿色产品厂商

绿色产品厂商使用劳动  $L_t^g$  和资本  $K_t^g$  生产绿色产品  $Y_t^g$ ，生产函数为柯布道格拉斯形式：

$$Y_t^g = [1 - d(X_t)] A_t (K_{t-1}^g)^{\alpha^g} (L_t^g)^{1-\alpha^g}, 0 < \alpha^g < 1 \quad (22)$$

与棕色产品厂商类似，绿色厂商从银行贷款筹集资金，以工资  $\omega_t^g$  从家庭雇佣劳动  $L_t^g$ ，以价格  $Q_t^g$  从资本厂商购买资本品  $K_t^g$ ，并且生产能力也会受到二氧化碳等温室气体存量的负面影响。与棕色厂商不同的是，绿色厂商生产过程中没有碳排放，不需要向政府缴纳碳税。

<sup>5</sup> 碳存量演变方程表明，国内和国外碳排放量对于国内生产效率的边际影响是相同的，外审专家认为，这一设定不是很符合常识，一般而言，国内的碳排放量应该对国内企业的生产效率的影响更加直接。根据评审意见，课题组进一步研究了碳排放量对国内外影响的差异性问题，赞同专家提出的建议，即碳排放以及低碳转型对国内外生产影响是有差异的。但是，根据我们目前掌握的文献，鲜有研究深入探讨不同国家大气碳存量演变方程及对生产的边际影响，解决这一问题需要经济学、社会学、气候科学等方面研究作为支撑。有鉴于此，目前在研究中还难以提出具有可靠研究支撑的边际差异，未来将把其作为深化研究方向。

<sup>6</sup> 本文选择从生产端征收碳税，主要是基于以下两点考虑。一是生产端收税有利于实现减排目标。建模阶段，我们对比了从生产端和消费端征收碳税效果差异，研究发现，从生产端征税有助于实现减排目标，而消费端征收碳税虽然可以削减碳排放，但却无法实现碳中和。一个可能的解释是，生产端征税属于源头控制，可直接影响企业成本收益，促进企业减排，而消费端征税，可能无法改变一些富裕消费者对高碳产品的偏好，实现零碳目标可能会遇到瓶颈。二是生产端收税成本更低。Metcalf (2009) 认为，在生产流程最前端征税行政成本较低，理由是上游能源生产商数量远少于下游能源消费者，上游征税具有行政上的规模经济性。苏明等 (2009) 对比在生产环节征收和消费环节征税两种方案，认为生产环节征税更有利于税收管理和源头控制。综合以上两点，我们选择从生产端征收碳税。作为未来研究方向，后续我们将研究消费端征税对转型风险的影响及监管应对。

综合以上，绿色厂商利润为：

$$\Pi_t^g = p_t^g Y_t^g - \omega_t^g L_t^g - R_{k,t}^g Q_{t-1}^g K_{t-1}^g + (1 - \delta^g) Q_t^g K_{t-1}^g \quad (23)$$

求解绿色厂商利润最大化问题，经代数运算可得绿色厂商选择劳动  $L_t^g$  和资本  $K_{t-1}^g$  的最优条件。

#### 4. 资本品厂商

资本品厂商在生产资本品时，需要支付一定成本。参考 Christiano et al.

(2005)，资本品厂商为提供  $I_t^i, i = \{g, b\}$  的资本品，需要  $\left(1 + \frac{\phi^i}{2} \left(\frac{I_t^i}{I_{t-1}^i} - 1\right)^2\right) I_t^i$  单

位的部门产品，其中， $\phi^i > 0$  为投资调整成本系数。综合考虑成本因素，资本品厂商的目标函数为：

$$\max_{\{I_t^i\}_{i=\{g,b\}}} E_0 \sum_{t=0}^{\infty} M_{0,t} \sum_{i=\{g,b\}} \left[ Q_t^i I_t^i - \left(1 + \frac{\phi^i}{2} \left(\frac{I_t^i}{I_{t-1}^i} - 1\right)^2\right) I_t^i \right] \quad (24)$$

其中， $Q_t^i, i = \{g, b\}$  表示绿色和棕色资本品价格。资本品厂商最优化上述目标函数，得到其选择  $I_t^i, i = \{g, b\}$  的一阶最优条件。此外，绿色、棕色厂商资本运动方程为：

$$K_t^i = (1 - \delta^i) K_{t-1}^i + I_t^i, i = \{g, b\} \quad (25)$$

其中， $\delta^i$  表示资本折旧率。

#### (四) 政府及监管部门

政府执行预算平衡，将征收的碳税，以及监管部门对银行资产惩罚或补贴的净收入，一次性转移支付给家庭：

$$T_t = \tau_t^e e_t + \tau_t^b Q_t^b S_t^b + \tau_t^g Q_t^g S_t^g \quad (26)$$

#### (五) 市场出清

为使模型达到均衡，需要对各市场出清，即在给定的政策序列  $(\tau_t^e, \tau_t^b, \tau_t^g)$  和初始条件下，与各市场有关的 37 个内生变量满足 37 个均衡条件<sup>7</sup>。

## 二、参数校准和政策设置

### (一) 参数校准

本文使用两种方法校准参数。一种方法是参考经典文献。偏重从我国经济实证研究中选取模型参数，对于一些国内没有的参数校准值，选择国外经典文献中的参数进行校准。另一种方法是依据我国经济变量数据匹配标靶稳态变量，然后依据标靶稳态变量校准参数。模型中需要校准的参数共包括家庭和厂商部门参数、环境参数和银行部门参数三类（表 1 归纳了各部门参数校准值和取值依据）。

<sup>7</sup> 考虑到模型比较复杂，我们在 Dynare 中对模型进行求解。我们已将 37 个内生变量及 37 个均衡条件相关程序代码置于网址：<http://gaolei786.github.io/YoungResearch/model/>，供有兴趣读者下载参考。

### 1. 家庭和厂商参数校准

家庭方面参数<sup>8</sup>。参考王立勇和纪尧（2019）、陈小亮和马啸（2016），校准主观贴现因子  $\beta$  为 0.99。参考陆磊和刘学（2020）、马勇和陈雨露（2014），设定风险厌恶系数  $\eta$  为 2。参考彭俞超和方意（2016），校准 Frisch 劳动供给弹性的倒数  $\xi$  为 1。参考 Carattini et al.（2021），令劳动时间替代弹性  $\rho_L$  取值为 1。设定劳动时间为 1/3（即采用 8 小时工作制），据此标靶值校准劳动负效用权重  $\varpi$  为 7.7863。

厂商方面参数。陆磊和刘学（2020）将资本弹性取值为 0.35，我们考虑相对于绿色产业，棕色产业中资本份额可能较高，因此以 0.35 为基准，微调两个百分点得到绿色、棕色资本产出弹性。其中，绿色资本产出弹性  $\alpha^g$  设定为 0.33，棕色资本产出弹性  $\alpha^b$  设定为 0.37。参考彭俞超和方意（2016），校准绿色、棕色两类资本折旧率  $\delta^b$  和  $\delta^g$  均为 0.025。参考陆磊和刘学（2020），令绿色、棕色两类投资调整成本系数  $\phi^b$  和  $\phi^g$  均为 10。参考卞志村等（2019），将技术冲击自回归系数  $\rho_A$  设定为 0.8。参考黄贇琳和朱保华（2015），校准技术冲击标准差  $\sigma_A$  为 0.0246。

表 1 DSGE 模型参数校准及取值依据/标靶

---

<sup>8</sup> 家庭方面有一项参数是银行家的比例，通过分析发现该参数未进入家庭或银行部门的一阶条件，所以这里没有对其进行校准。

参数名	符号	参数设定	取值依据/标靶
家庭和厂商参数			
主观贴现因子	$\beta$	0.99	王立勇和纪尧（2019） 陈小亮和马啸（2016）
风险厌恶系数	$\eta$	2	陆磊和刘学（2020） 彭俞超和方意（2016） 马勇和陈雨露（2014）
Frisch 劳动供给弹性的倒数	$\xi$	1	陆磊和刘学（2020） 彭俞超和方意（2016） 马勇和陈雨露（2014）
劳动时间替代弹性	$\rho_L$	1	Carattini et al.（2021）
劳动负效用权重	$\varpi$	7.7863	劳动时长 8 小时
绿色资本产出弹性	$\alpha^g$	0.33	略低于 0.35（陆磊和刘学，2020）
棕色资本产出弹性	$\alpha^b$	0.37	略高于 0.35（陆磊和刘学，2020）
资本折旧率	$\delta^b, \delta^g$	0.025	陈小亮和马啸（2016） 彭俞超和方意（2016） 马勇和陈雨露（2014）
投资调整成本系数	$\phi^b, \phi^g$	10	陆磊和刘学（2020）
技术冲击自回归系数	$\rho_A$	0.8	卞志村等（2019） 卞志村和杨源源（2016）
技术冲击标准差	$\sigma_A$	0.0246	黄贇琳和朱保华（2015）
环境参数			
减排成本函数参数	$\theta_1$	0.0326	Nordhaus（2018） Carattini et al.（2021）
	$\theta_2$	2.6	Nordhaus（2018）
	$d_0$	-0.0076	
损减函数参数	$d_1$	$6.1765 \times 10^{-5}$	依据 Gibson and Heutel（2020）并 进行调整得到
	$d_2$	$6.1053 \times 10^{-7}$	
二氧化碳半衰期系数	$\delta_X$	0.9917	程郁泰（2017）
碳排放弹性系数	$\epsilon$	0.843754	盛仲麟（2016）
当期国外污染排放量	$e^{row}$	1.6232	2019 年中国碳排放量约占全球的 28%
绿色、棕色产品间替代弹性	$\rho_Y$	2	Carattini et al.（2021）
总产出中棕色产品比重	$\pi^b$	0.3020	绿色资产在资产投资组合中的比重为 60%
银行部门参数			
隐匿资产比例	$\kappa$	0.4828	银行杠杆率为 4.43
银行存活概率	$\gamma$	0.972	Carattini et al.（2021）
新加入银行获得资产的比例	$\zeta$	0.0007	2021 年 6 月 11 日，LPR 基准利率与 国债的利差为 142BP
资产投资组合管理成本	$\psi$	0.0001	Carattini et al.（2021）
绿色资产在资产投资组合中的 比重	$\bar{s}^g$ $s$	0.6	作者根据天津市实际计算得出

## 2. 环境参数校准

校准减排成本函数  $f(\mu_t) = \theta_1 \mu_t^{\theta_2}$  中的参数  $\theta_1$  和  $\theta_2$ 。校准  $\theta_1$  时考虑两点。一是随着技术进步， $\theta_1$  应递减，即减排成本降低，但这会大大增加模型复杂度，简便起见，本文拟参考 Nordhaus（2018）将其设定为一个固定值 0.015。二是 Nordhaus（2018）假定所有厂商都承担减排成本，而本文仅假定棕色厂商承担



减排成本，因此需要根据棕色产出占比调整 Nordhaus（2018）的取值<sup>9</sup>，调整得到  $\theta_1$  为 0.0326。另外，参考 Nordhaus（2018），将  $\theta_2$  设定为 2.6。

校准损减函数  $d(X_t) = d_0 + d_1 X_t + d_2 X_t^2$  中的参数  $d_0$ 、 $d_1$  和  $d_2$ 。Gibson & Heutel（2020）设定  $d_0$  为 -0.0076， $d_1$  为  $8.1 \times 10^{-6}$ ， $d_2$  为  $1.05 \times 10^{-8}$ ，然而，Gibson and Heutel（2020）损减函数中碳存量  $X$  单位为亿吨，而本文模型中  $X$  单位是抽象的，因此需要根据实际碳存量<sup>10</sup>和模型碳存量稳态值对 Gibson & Heutel（2020）的取值进行调整<sup>11</sup>，最终设定  $d_0$ 、 $d_1$  和  $d_2$  分别为 -0.0076、 $6.1765 \times 10^{-5}$  和  $6.1053 \times 10^{-7}$ 。

校准其他环境参数。根据英国石油公司（BP）发布的《2020 年世界能源统计》，2019 年中国碳排放量约占全球的 28.8%，故设定国外污染排放量  $e^{row}$  是国内污染排放量  $e_t$  稳态值的 2.47 倍，因此  $e^{row}$  取值 1.6232。参考程郁泰（2017），校准二氧化碳半衰期系数  $\delta_x$  为 0.9917。参考盛仲麟（2016），校准碳排放弹性系数  $\epsilon$  为 0.8438。参考 Carattini et al.（2021），令绿色、棕色产品间替代弹性  $\rho_Y$  为 2。设定总产出中棕色产品比重  $\pi^b$  为 0.3020，以使绿色资产在资产投资组合中的比重稳态值为 60%。

### 3. 银行参数校准

司登奎等（2019）设定银行杠杆率取值 4.43，本文据此标靶值校准隐匿资产比例  $\kappa$  为 0.4828。2021 年 6 月 11 日，LPR 基准利率与国债的利差为 142BP，据此标靶值校准新加入银行获得资产的比例  $\zeta$  为 0.0007。银行贷款中低碳行业贷款约占比六成<sup>12</sup>，据此标靶值校准绿色资产在资产投资组合中的比重  $\bar{s}^g$  为 0.6<sup>13</sup>。参考 Carattini et al.（2021），校准银行存活概率  $\gamma$  为 0.972，校准资产投资组合管理成本  $\psi$  为 0.0001。

<sup>9</sup> 调整方法为  $0.015 \times Y_{ss}^b / Y_{ss}$ ，其中， $Y_{ss}^b$  为棕色产出稳态值， $Y_{ss}$  为产出稳态值。

<sup>10</sup> 本文根据大气质量和二氧化碳浓度的乘积计算得到大气中的二氧化碳存量。大气质量参照物理公式计算，约为 5 千万亿吨，二氧化碳浓度参考美国国家海洋和大气管理局（NOAA）公布数据（2021 年 5 月为 419ppm，即二氧化碳存量占大气重量的 0.0419%），因此二氧化碳存量为  $5000 \times 10^4$  亿吨  $\times 0.0419\% = 20950$  亿吨 = 2095GtC。

<sup>11</sup> 调整方法为：首先计算  $d_{scale} = X_{ss} / 2095Gtc$ ，然后按照  $d_1 = d_1 / d_{scale}$  和  $d_2 = d_2 / d_{scale}^2$  调整。

<sup>12</sup> 由于无法得到全国银行业机构分行业贷款数据，本文仅以天津市分行业中长期贷款数据为例进行了分析，结果显示，截至 2021 年第一季度末，天津市中资主要金融机构对全市 97 个国民经济行业中长期贷款余额中，低碳行业占比约六成。低碳行业的划分方法是，根据中国碳排放数据库（CEADs）公布的天津市各行业碳排放量，将碳排放量低于 20 万吨的 64 个行业分类为低碳行业，高于 20 万吨的 33 个行业分类为中、高碳行业。这里，20 万吨的选择具有一定主观性，但从划分结果看，我们关于工业行业碳排放的划分与平新乔等（2020）基本一致。

<sup>13</sup> 目前，关于绿色资产和棕色资产，还没有明确的界定标准，因此绿色资产比重参数难以计算。如果采用目前全国绿色信贷数据计算，范围过窄，且取值明显偏低。我们在文中校准该参数为 60%，并进行了敏感性分析，结果显示，校准参数值为 40% 或者 20%，DSGE 模拟结果变化不大，不影响课题研究结论。

## （二）政策设置

国内文献基于 DSGE 模型多开展脉冲响应模拟<sup>14</sup>。然而，脉冲效应模拟不太适合关于气候相关政策分析<sup>15</sup>。原因是，随着我国做出“双碳”承诺，气候相关政策有长期确定预期（例如建立全国性的碳排放权交易市场），不会出台后就消失。为分析这类政策效果，应基于 DSGE 模型开展确定性模拟。为此，本文将明确碳税和监管政策设置，为确定性模拟做准备<sup>16</sup>。

### 1. 碳税政策设置

参考国内外碳税或碳市场经验设定碳税，可能更简便，我们未采取这种方法有两点考虑。一是国情不同，直接参考可能并不合适。IMF（2019）指出，对于一些国家（如印度和俄罗斯）来说，25 美元/吨碳税足够他们实现《巴黎协定》承诺，而对其他国家（如澳大利亚和加拿大）而言，即使每吨 75 美元的碳税也不算高，这反映出各国国情不同、碳定价不一，不能直接照搬别国经验。二是现实碳价水平波动较大，难以从中得到碳税稳健估计。World Bank（2021）统计的 28 个国家中<sup>17</sup>，碳税最高的是瑞典（137 美元/吨），几乎是日本（3 美元/吨）的 45 倍；2020 年国内 8 个试点碳市场中，碳配额成交均价最高的北京（91.81 元/吨）是成交均价最低的福建（17.34 元/吨）的 5 倍还多<sup>18</sup>。

有鉴于此，本文在 DSGE 模型框架下求解最优碳税，并以此设置碳税<sup>19</sup>。通过求解拉姆齐最优政策得到碳税税率，即基于决策者社会福利函数最大化求解碳税税率：

$$\max_{\tau_t^c} E_0 \left\{ \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \frac{1}{1-\eta} \left( C_t - \varpi \frac{\left[ (L_t^b)^{1+\rho_L} + (L_t^g)^{1+\rho_L} \right]^{\frac{1+\xi}{1+\rho_L}}}{1+\xi} \right)^{1-\eta} \right\} \quad (27)$$

拉姆齐最优问题方程数量多，内生变量多，解析求解较为复杂。本文利用三阶扰动算法，数值求解拉姆齐最优问题，求得最优碳税税率为 0.0399。通过粗略估算，将其单位转化为“元/吨”。转化方法：将 DSGE 模型稳态产出、碳排放和碳税与我国实际产出、碳排放和碳税水平相对应，然后通过解方程

<sup>14</sup> DSGE 政策模拟一般有脉冲响应模拟和确定性模拟两种方法。脉冲响应模拟是指，当某一外生冲击在某一期发生，而后所有期该冲击都消失时各变量的变化路径；确定性模拟则是指，通过外生冲击的确定性变化过程来考察经济系统变化，如在某一期或几期施加一个外生冲击，考察各内生变量在外生冲击后的变化路径和趋势（李向阳，2018）。

<sup>15</sup> 姚昕和刘希颖（2010）持类似观点，他们认为，国内研究在做碳税模拟的时候，对碳税的设计过于随机，没有分析量化符合中国国情的碳税。

<sup>16</sup> 本文利用 Matlab 和 Dynare 计算碳税和监管工具取值。我们已将程序代码置于网址：<http://gaolei786.github.io/YoungResearch/zhengceshezhi/>，供有兴趣读者下载参考。

<sup>17</sup> 其中既有法国、日本、瑞典等发达国家，也有南非、墨西哥、智利等新兴市场国家。

<sup>18</sup> 2020 年八个试点地区平均碳价情况是，深圳 19.99 元/吨，上海 39.96 元/吨，北京 91.91 元/吨，广东 25.52 元/吨，天津 25.88 元/吨，湖北 27.70 元/吨，重庆 21.46 元/吨，福建 17.34 元/吨。（数据来源于中央财经大学绿色金融国际研究院的报告《中国碳市场 2020 年度总结和发展建议》）。

<sup>19</sup> 已有一些文献基于模型求解碳税税率。曹静（2009）、姚昕和刘希颖（2010）利用 CGE 模型计算了最优碳税；Nordhaus（2017）基于 DICE 模型计算了碳排放社会成本，可近似为碳税；程郁泰（2018）、Carattini et al.（2021）基于 DSGE 模型计算了最优碳税。

$\tau_{ss}^e \times e_{ss} / Y_{ss} = X \times E / Y$  粗略估算碳税税率  $X$ 。式中，产出稳态水平  $Y_{ss}=1.3207$ ，碳排放稳态水平  $e_{ss}=0.6572$ ，碳税税率  $\tau_{ss}^e=0.0399$ ；我国 2019 年产出现价 986515 亿元，碳排放水平  $E$  为 98 亿吨（《2020 年世界能源统计》）。求解得到税率为 199.8 元/吨，折合约 31 美元/吨。

与其他渠道碳价或碳税相比<sup>20</sup>，本文测算税率似乎偏高。但我们认为 199.8 元/吨税率具有一定合理性。**一方面**，测算税率接近碳减排成本。碳税应反映碳边际减排成本，中国碳排放网公布数据显示，2018 年中国碳减排成本在 300 元/吨左右，本文测算税率为其三分之二，目前全国碳市场均价为其六分之一<sup>21</sup>，本文测算税率与碳减排成本差距较小。**另一方面**，测算税率接近实现《巴黎协定》目标的建议碳价。斯特恩和斯蒂格利茨共同主持的碳定价委员会 2017 年发布报告指出，为实现《巴黎协定》温控目标，全球 2020 年的碳价应在 40-80 美元/吨之间，2030 年应在 50-100 美元/吨之间；IMF 研究人员 Parry et al.（2021）认为，为达成《巴黎协定》温控目标，类似中国这样的高收入新兴经济体碳价格下限为 50 美元/吨。可见，本文测算碳税税率与国际组织建议在相同数量级。

## 2. 监管政策设置

关于监管中棕色资产惩罚  $\tau^b$  和绿色资产支持  $\tau^g$  的设置，已有一些文献进行研究。Diluiso et al.（2021）将棕色资产惩罚  $\tau^b$  设置为 0.0025，并利用棕色资产惩罚收入对绿色资产进行补贴，由此得到  $\tau^g$  取值。不过，Diluiso et al.（2021）并未给出  $\tau^b$  为 0.0025 的依据。Carattini et al.（2021）分析了  $\tau^b$  和  $\tau^g$  取值逻辑，他们从  $\tau^b$  和  $\tau^g$  旨在调整银行棕色资产和绿色资产结构的目的出发，计算了能够将商业银行棕色资产比例由 40% 调低至 32%、绿色资产比例由 60% 调高至 68% 的  $\tau^b$  和  $\tau^g$ ，得到  $\tau^b=0.006$  和  $\tau^g=-0.00316$ 。

本文参考 Carattini et al.（2021）设置监管政策，但与其有两点不同。一是监管目标不同。本文设置的监管目标为将棕色资产比例调低至 30%，绿色资产比例调高至 70%。二是同时考虑三种方案。本文考虑单独使用棕色资产惩罚  $\tau^b$ 、单独使用绿色资产支持  $\tau^g$  以及综合使用棕色资产惩罚  $\tau^b$  和绿色资产支持  $\tau^g$ ，为对比分析三种监管工具的政策模拟做准备。通过求解模型均衡条件，可得各种政策方案下  $\tau^b$  和  $\tau^g$  的取值，见表 2。表 2 显示，通过单独使用棕色资产惩罚、绿色资产支持或综合使用两种工具，均可以达到调整银行资产结构的目标。

表 2 监管政策设置

政策方案	监管政策内容		监管政策目标	
	棕色资产惩罚 $\tau^b$	绿色资产支持 $\tau^g$	棕色资产比例 $s^b$	绿色资产比例 $s^g$
无监管政策	0	0	40%	60%
单独使用棕色资产惩罚	0.0138	0	30%	70%

<sup>20</sup> 例如，2020 年全国碳配额成交均价为 27.48 元/吨（4.3 美元/吨），姚昕和刘希颖（2010）测算 2020 年碳税税率为 57.61 元/吨，盛仲麟（2016）测算最优碳税税率为 75.5 元/吨。

<sup>21</sup> 碳价低的可能原因是，政府往往高估了配额需求，甚至免费发放配额，且允许未使用配额跨年度累积，导致配额过剩，压低交易价格（人民银行国际司课题组，2021）。

政策方案	监管政策内容		监管政策目标	
	棕色资产惩罚 $\tau^b$	绿色资产支持 $\tau^g$	棕色资产比例 $s^b$	绿色资产比例 $s^g$
单独使用绿色资产支持	0	-0.0100	30%	70%
综合使用棕色资产惩罚 和绿色资产支持	0.0094	-0.0046	30%	70%