

## DSGE 模型构建、参数校准与政策设置

### 1. DSGE 模型构建

构建包括家庭（区分对绿色和棕色产品厂商的劳动供给）、银行、厂商（区分最终产品厂商、绿色产品厂商、棕色产品厂商和资本品厂商）、政府（引入宏观审慎监管部门）四类主体在内的动态随机一般均衡模型。下面简要介绍各经济主体面临的约束条件以及目标函数。约束条件下经济主体最优化目标函数所得一阶条件，限于篇幅不再列出<sup>1</sup>。

（1）家庭。代表型家庭均匀分布在 $[0, 1]$ 连续统上，满足理性假定。家庭成员中比例 $l$ 为银行家，比例 $(1-l)$ 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：

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

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， $\Pi_t$  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。

<sup>1</sup> 课题组通过 Dynare 编程对模型进行求解，并将模型 37 个内生变量及 37 个均衡条件程序代码置于网址：<http://gaolci786.github.io/YoungResearch/model/>，供有兴趣读者下载参考。

(2) 银行。银行面临的三种约束。

一是流动性约束。银行绿色、棕色资产会受到宏观审慎部门监管，宏观审慎政策包括绿色资产支持、棕色资产惩罚两种，分别会增加或减少资产稳态水平，因此，这两类工具可看作一种差异化资本要求。

银行流动性约束方程表示如下：

$$(1+\tau_t^b)Q_t^b S_{j,t}^b + (1+\tau_t^g)Q_t^g S_{j,t}^g + \Psi(Q_t^g S_{j,t}^g, W_{j,t}) = D_{j,t} + N_{j,t} \quad (3)$$

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， $\tau_t^i, i=\{b,g\}$  表示宏观审慎部门对棕色资产惩罚和绿色资产支持权重。 $\Psi(Q_t^g S_{j,t}^g, W_{j,t}) = \psi/2 \left( Q_t^g S_{j,t}^g / W_{j,t} - \bar{s}^g \right)^2 W_{j,t}$  是二次成本函数，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。

二是资产净值约束。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：

$$N_{j,t+1} = R_{k,t+1}^b Q_t^b S_{j,t}^b + R_{k,t+1}^g Q_t^g S_{j,t}^g - R_t D_{j,t} \quad (4)$$

三是激励约束 (Incentive Constraint)。家庭仅在确信银行能够长期经营的情况下，才愿意存款。因此，银行将面临如下激励约束：

$$V_{j,t} \geq \kappa \underbrace{\left( Q_t^b S_{j,t}^b + Q_t^g S_{j,t}^g \right)}_{W_{j,t}} \quad (5)$$

其中， $V_{j,t}$  表示银行长期经营获得收益的现值， $\kappa$  为银行隐匿资产比例。

以上三种约束下，银行长期经营价值目标函数为：

$$V_{j,t} = E_t \left\{ \sum_{\tilde{\tau}=t+1}^{\infty} (1-\gamma) \gamma^{\tilde{\tau}-t-1} M_{t,\tilde{\tau}} N_{j,\tilde{\tau}} \right\} \quad (6)$$

其中， $M_{t,\tilde{\tau}} \equiv \beta^{\tilde{\tau}-t} \times U'_{c,\tilde{\tau}} / U'_{c,t}$  表示随机贴现因子， $1-\gamma$  为银行家退出概率。

(3) 厂商。一是最终产品厂商。最终产品厂商利用棕色产品  $Y_t^b$  和绿色产品  $Y_t^g$  生产最终产品  $Y_t$ ，生产函数为：

$$Y_t = \left[ \left( \pi^b \right)^{\frac{1}{\rho_Y}} \left( Y_t^b \right)^{\frac{\rho_Y-1}{\rho_Y}} + \left( 1 - \pi^b \right)^{\frac{1}{\rho_Y}} \left( Y_t^g \right)^{\frac{\rho_Y-1}{\rho_Y}} \right]^{\frac{\rho_Y}{\rho_Y-1}} \quad (7)$$

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：

$$Y_t^g = (1 - \pi^b) \frac{Y_t}{(p_t^g)^{\rho_Y}}, Y_t^b = \pi^b \frac{Y_t}{(p_t^b)^{\rho_Y}} \quad (8)$$

二是棕色产品厂商。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：

$$Y_t^b = [1 - d(X_t)] A_t (K_{t-1}^b)^{\alpha^b} (L_t^b)^{1-\alpha^b}, 0 < \alpha^b < 1 \quad (9)$$

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 (9) 说明，棕色厂商生产能力会受到碳排放负面影响。

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： $X_t = \delta_X X_{t-1} + e_t + e_t^{row}$ 。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  $h(Y_t^b) = (Y_t^b)^\epsilon$ ； $\mu_t$  为减排系数，取值在 0 至 1 之间。减排是有成本的，参考 Nordhaus (2008) 和 Heutel (2012)，设定减排成本函数为  $f(\mu_t) = \theta_1 \mu_t^{\theta_2}$ ，减排总成本  $Z_t = f(\mu_t) Y_t^b$ 。

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 & Karadi (2011),  $t$  时期末, 棕色厂商以定价  $Q_t^b$  从资本品厂商购入资本  $K_t^b$ , 同时向银行出售价格为  $Q_t^b$  的证券权益  $S_t^b$ , 实现  $Q_t^b K_t^b = Q_t^b S_t^b$ 。

此外, 棕色厂商还需向政府缴纳碳税, 税率为  $\tau_t^e$ 。

综合以上, 棕色厂商利润函数为:

$$\Pi_t^b = p_t^b Y_t^b - \tau_t^e e_t - Z_t - \omega_t^b L_t^b - R_{k,t}^b Q_{t-1}^b K_{t-1}^b + (1 - \delta^b) Q_t^b K_{t-1}^b \quad (10)$$

三是绿色产品厂商。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:

$$Y_t^g = [1 - d(X_t)] A_t (K_{t-1}^g)^{\alpha^g} (L_t^g)^{1-\alpha^g}, 0 < \alpha^g < 1 \quad (11)$$

与棕色产品厂商类似, 绿色厂商从银行获得贷款筹集资金, 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温室气体存量的负面影响。与棕色厂商不同的是, 绿色厂商没有碳排放, 不缴纳碳税。

综合以上, 绿色厂商利润为:

$$\Pi_t^g = p_t^g Y_t^g - \omega_t^g L_t^g - R_{k,t}^g Q_{t-1}^g K_{t-1}^g + (1 - \delta^g) Q_t^g K_{t-1}^g \quad (12)$$

四是资本品厂商。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:

$$\max_{\{I_t^i\}_{i=\{g,b\}}} E_0 \sum_{t=0}^{\infty} M_{0,t} \sum_{i=\{g,b\}} \left[ Q_t^i I_t^i - \left(1 + \frac{\phi^i}{2} \left(\frac{I_t^i}{I_{t-1}^i} - 1\right)^2\right) I_t^i \right] \quad (13)$$

其中,  $Q_t^i, i = \{g, b\}$  表示绿色和棕色资本品价格。

(4) 政府及监管部门。政府执行预算平衡, 将碳税收入一次性转移支付给家庭:

$$T_t = \tau_t^e e_t + \tau_t^b Q_t^b S_t^b + \tau_t^g Q_t^g S_t^g \quad (14)$$

(5) 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 $(\tau_t^e, \tau_t^b, \tau_t^s)$ 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。

## 2. 参数校准

使用两种方法校准参数。一种方法是参考经典文献，主要从我国相关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（见附表 1）。

## 3. 政策设置

国内文献多基于 DSGE 模型开展脉冲响应模拟，然而，脉冲响应模拟不太适合气候相关政策分析。原因是，随着我国提出碳达峰、碳中和目标，气候相关政策具有长期性、稳定性。为分析这类政策效果，应基于 DSGE 模型开展确定性模拟。为此，本文将明确碳税和宏观审慎政策设置，为确定性模拟做准备。

(1) 碳税政策设置。基于 DSGE 模型和决策者社会福利函数（式 15）最大化求解碳税税率为 0.0399。

$$\max_{\tau_t^e} E_0 \left\{ \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \frac{1}{1-\eta} \left( C_t - \varpi \frac{\left[ (L_t^b)^{1+\rho_L} + (L_t^s)^{1+\rho_L} \right]^{\frac{1+\xi}{1+\rho_L}}}{1+\xi} \right)^{1-\eta} \right\} \quad (15)$$

(2) 宏观审慎政策设置。本文根据棕色、绿色资产结构调整目标，设置棕色资产惩罚因子和绿色资产支持因子，调整目标为将棕色资产比例调低 10%，绿色资产比例调高 10%。本文同时考虑三种方案：单独使用棕色资产惩罚因子 $\tau^b$ 、单独使用绿色资产支持因子 $\tau^s$ 以及综合使用棕色资产惩罚因子 $\tau^b$ 和绿色资产支持因子 $\tau^s$ 。通过求解模型均衡条件，可得各种政策方案下 $\tau^b$ 和 $\tau^s$ 的取值（见附表 2）。

附表 1 DSGE 模型参数校准及取值依据/标靶

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）
风险厌恶系数	$\eta$	2	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）
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	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）
	$\theta_2$	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）

附表 2 DSGE 政策模拟宏观审慎政策设置

政策方案	宏观审慎政策内容		政策目标	
	棕色资产惩罚 $\tau^b$	绿色资产支持 $\tau^g$	调低棕色资产比例 $s^b$	调高绿色资产比例 $s^g$
无宏观审慎政策	0	0	0%	0%
单独使用棕色资产惩罚	0.0138	0	-10%	+10%
单独使用绿色资产支持	0	-0.0100	-10%	+10%
综合使用棕色资产惩罚和绿色资产支持	0.0094	-0.0046	-10%	+10%

