

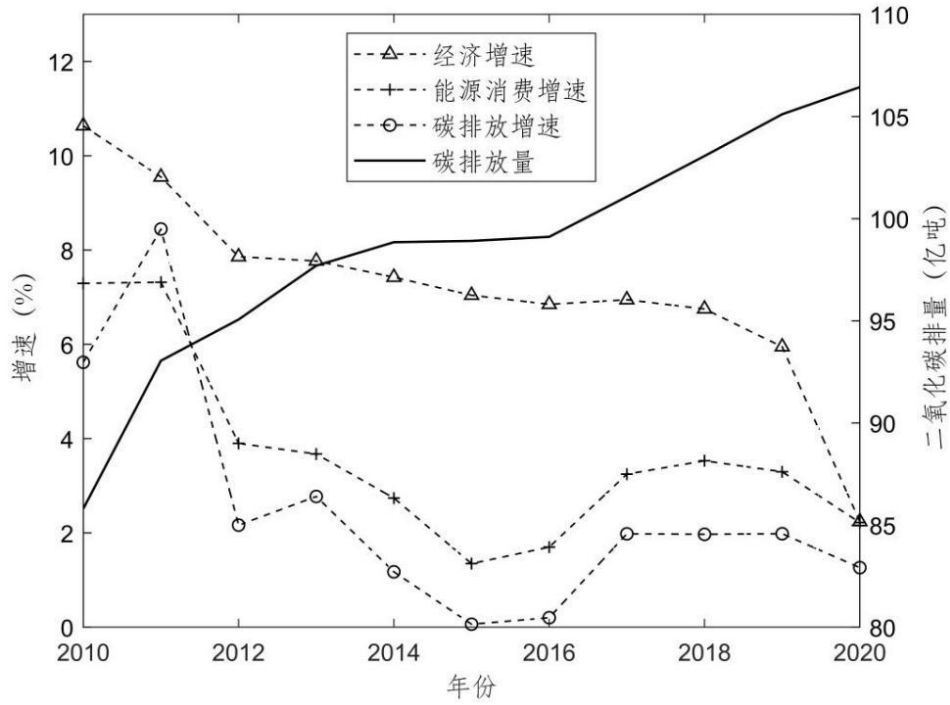
# 双碳目标下能源与产业双重结构转型

## ——附录

江深哲 杜浩锋 徐铭喆

### 一、附录 A：正文未展示的相关细节

#### （一）过去十年中国的碳排放和能源消费



附图 1 过去十年中国的碳排放和能源消费

资料来源：国家统计局，《中国统计年鉴》，中国统计出版社，2022。

#### （二）能源需求结构参数估计的细节

根据厂商的一阶条件，我们可以得到：

$$\log\left(\frac{E_{ij,1,t}}{E_{ij,1,t-1}}\right) - \log\left(\frac{E_{ij,2,t}}{E_{ij,2,t-1}}\right) = \alpha_1 + \frac{1}{\xi_j - 1} \times [\log\left(\frac{p_{1,t}}{p_{1,t-1}}\right) - \log\left(\frac{p_{2,t}}{p_{2,t-1}}\right)] + \mu_{i,t} \quad (A1)$$

$$\log\left(\frac{E_{ij,dirty,t}}{E_{ij,dirty,t-1}}\right) - \log\left(\frac{E_{ij,clean,t}}{E_{ij,clean,t-1}}\right) = \alpha_2 + \frac{1}{\rho_j - 1} \times [\log\left(\frac{p_{dirty,t}}{p_{dirty,t-1}}\right) - \log\left(\frac{p_{clean,t}}{p_{clean,t-1}}\right)] + \varepsilon_{i,t} \quad (A2)$$

其中 $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 表示两个截距项， $\mu_{i,t}$ 和 $\varepsilon_{i,t}$ 表示两个残差项，式（A1）和式（A2）的两个回归系数的绝对值正好等于石油、煤炭之间的替代弹性和化石能源、清洁能源的需求替代弹性。附表 1 展示了不同产业能源间需求替代弹性的估计结果，我们用（2）~（4）和（6）~（8）列替代弹性的估计结果校准三大产业的能源需求弹性。

附表 1

能源间替代弹性估计

| 变量            | 化石能源与清洁能源的替代弹性      |                  |                     |                  | 煤炭与石油的替代弹性          |                    |                     |                     |
|---------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
|               | (1)                 | (2)              | (3)                 | (4)              | (5)                 | (6)                | (7)                 | (8)                 |
|               | 全样本                 | 第一产业             | 第二产业                | 第三产业             | 全样本                 | 第一产业               | 第二产业                | 第三产业                |
| $\sigma_{ij}$ | 0.149***<br>(0.032) | 0.011<br>(0.429) | 0.155***<br>(0.033) | 0.119<br>(0.228) | 1.012***<br>(0.045) | 1.284**<br>(0.660) | 1.031***<br>(0.047) | 0.653***<br>(0.211) |
| 固定效应          | 是                   | 是                | 是                   | 是                | 是                   | 是                  | 是                   | 是                   |
| 样本量           | 86937               | 733              | 82073               | 4131             | 153864              | 1589               | 141476              | 10799               |

注：\*、\*\*、\*\*\*分别表示在 10%、5%、1%的水平上显著，括号内为标准误。

### (三) 使用 $\kappa_{j,i,t}^r$ 捕捉政策导向的微观基础

在这一小节中我们展示了：通过加入一项能源使用倾向的变化  $\kappa_{j,i,t}^r$  捕捉政策导向的作用与一些传统的政策干预建模方式相比，在企业能源结构的选择问题上等价。以化石能源的选择为例，在我们的模型中，企业购买油气和煤炭能源时的支出最小化问题可以写为：

$$\begin{aligned} \min & [(\kappa_1 + \kappa_1^r)E_1^\xi + (1 - \kappa_1 - \kappa_1^r)E_2^\xi]^{1/\xi}, \\ \text{s.t. } & p_1E_1 + p_2E_2 \leq \text{expenditure}. \end{aligned}$$

一阶条件可以写为：

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\kappa_1 + \kappa_1^r}{1 - \kappa_1 - \kappa_1^r} \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{\xi-1}.$$

假设政府希望企业更多的使用石油，并考虑三类政策，我们证明这些政策对于厂商能源结构的影响等价于在石油能源前施加一个相应的正楔子  $\kappa_1^r > 0$ ：

#### 1. 直接限制煤炭使用量

企业购买油气和煤炭能源时的支出最小化问题变为：

$$\begin{aligned} \min & [\kappa_1E_1^\xi + (1 - \kappa_1)E_2^\xi]^{1/\xi}, \\ \text{s.t. } & p_1E_1 + p_2E_2 \leq \text{expenditure}, \\ & E_2 \leq \bar{E}. \end{aligned}$$

当企业的被限购约束后，将其能源选择结果记为：

$$e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\text{expenditure} - p_2\bar{E}}{p_1\bar{E}},$$

这一结果等价于选择：

$$\kappa_1^r = \frac{\frac{p_1}{p_2}e^{1-\xi}(1 - \kappa_1) - \kappa_1}{\frac{p_1}{p_2}e^{1-\xi} + 1} > 0.$$

#### 2. 对煤炭的使用进行征税

企业购买油气和煤炭能源时的支出最小化问题变为：

$$\begin{aligned} \min & [\kappa_1E_1^\xi + (1 - \kappa_1)E_2^\xi]^{1/\xi}, \\ \text{s.t. } & p_1E_1 + p_2(1 + \tau)E_2 \leq \text{expenditure}. \end{aligned}$$

一阶条件可以写为：

$$\frac{p_1}{p_2(1 + \tau)} = \frac{\kappa_1}{1 - \kappa_1} \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{\xi-1},$$

这一结果等价于选择：

$$\kappa_1^{\tau} = \frac{1}{\frac{1 - \kappa_1}{(1 + \tau)\kappa_1} + 1} - \kappa_1 > 0。$$

3. 通过补贴研发提高企业对于油气的利用率

企业购买油气和煤炭能源时的支出最小化问题变为：

$$\begin{aligned} \min \quad & [\kappa_1(AE_1)^{\xi} + (1 - \kappa_1)E_2^{\xi}]^{1/\xi}, \\ \text{s.t.} \quad & p_1E_1 + p_2E_2 \leq \text{expenditure}。 \end{aligned}$$

一阶条件可以写为：

$$\frac{p_1}{Ap_2} = \frac{\kappa_1}{1 - \kappa_1} \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{\xi-1},$$

这一结果等价于选择：

$$\kappa_1^{\tau} = \frac{1}{\frac{1 - \kappa_1}{A\kappa_1} + 1} - \kappa_1 > 0。$$

### （三）部分外生参数校准过程

#### 1. 居民消费端能源替代弹性

在居民消费端，由于没有家户层面的消费数据，我们借鉴一些代表性的文献结果进行参数校准。目前居民能源消费端的研究主要集中于对电力需求的估计：Sun（2016）利用 2013 年中国居民能源消费调查数据估计发现电力消费的需求价格弹性为-0.3874；Sun 和 Lin（2013）使用 2000~2007 年分地区的面板数据估计得到电力消费的需求价格弹性为-0.12；Zhou 和 Teng（2013）使用 2007~2009 年四川省的居民调查数据得到的弹性为-0.5 到-0.35 之间。本文取上述几个代表性研究的均值，将电力和化石能源之间的替代弹性校准为 0.311。有部分研究估计了居民汽油消费的需求价格弹性：Sun（2016）估计的结果为-0.9601；Lin 和 Liu（2013）利用 1995~2011 年国家统计局的数据估计得到的结果为-0.72。考虑到本文设定绿色能源与化石能源存在替代性，而石油和煤炭之间也存在替代性，结合上述结果，我们将石油和煤炭之间的替代性校准为 0.529。

#### 2. 分产业劳动份额

白重恩和钱震杰（2009）利用省级数据测算的农业部门劳动份额约为 0.85、工业为 0.4、服务业为 0.5；罗长远和张军（2009）测算的第一产业劳动收入占比为 0.86，第二、三产业为 0.4 左右；范从来和张中锦（2012）利用收入法和资金流量表核算得到三大产业劳动收入份额分别为 0.85、0.35 和 0.45。潘珊等（2016）则把我国非农部门的劳动收入份额校准为 0.6、农业部门校准为 0.8。本文取上述研究的平均值，校准 $\alpha_4=0.1432$ ， $\alpha_5=0.5355$ ， $\alpha_6=0.4597$ 。

#### 3. 三大产业间替代弹性

对于农业与非农业产品之间的替代弹性，徐朝阳和王韡（2021）估算的结果为 1.63、卓玛草（2022）估算的结果为 1.3444、Cheremukhin 等（2017）认为取 1 即可；对于制造业产品与服务业产品之间的替代弹性，徐朝阳和王韡（2021）的估算结果为 0.84、卓玛草（2022）的估算结果为 0.3237；对于三种产品之间的替代弹性，不同学者测算结果的差异很大，郭凯明等（2017）的校准结果为 0.751，但 Herrendorf（2013）认为应该接近 0。综上所述，我们取这些研究的平均值，校准 $\varepsilon=0.4$ ， $\gamma=-1.5$ 。

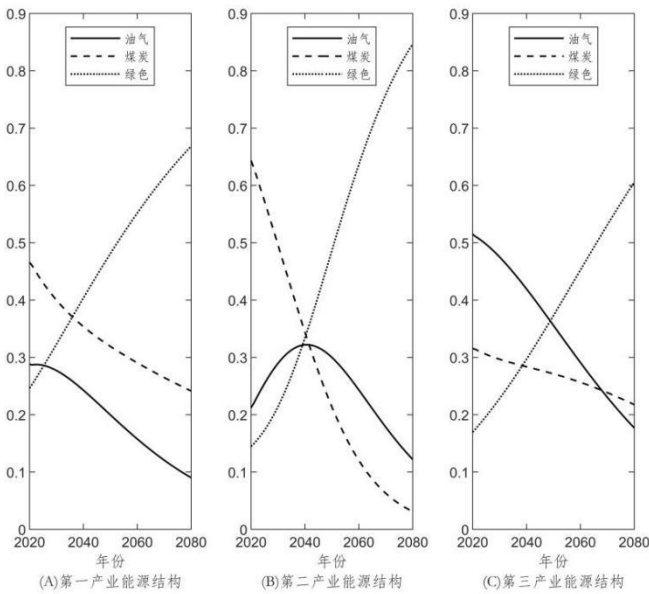
4. 能源排放强度

附表 2 能源排放强度代表性取值 (单位: 万吨碳/万吨标准煤)

| 变量: 碳排放系数 | 取值来源            |                             |            | 平均值   |
|-----------|-----------------|-----------------------------|------------|-------|
|           | 国家发展和改革委员会能源研究所 | 政府间气候变化专门委员会温室气体排放清单 (IPCC) | 陈诗一 (2009) |       |
|           |                 |                             |            |       |
| 煤炭        | 0.776           | 0.756                       | 0.754      | 0.765 |
| 石油        | 0.583           | 0.586                       | 0.585      | 0.584 |
| 天然气       | 0.444           | 0.448                       | 0.448      | 0.446 |
| 绿色能源      | 0               | 0                           | 0          | 0     |

(四) 分产业的能源结构预测

附图 2 展示了三大产业 2020~2080 年的能源结构发展趋势。总的来说, 产业内部的能源结构有类似的发展趋势, 都呈现出绿色能源逐渐代替化石能源的趋势。但是, 各个产业的路径并不完全相同, 在化石能源内部, 第二产业中油气能源的占比显现出倒 U 型的发展趋势, 而在第一、三产业中, 油气能源的则不明显。其中主要的原因是: 目前我国第二产业呈现出使用低排放化石能源代替煤炭的趋势, 但长期趋势仍是绿色能源代替化石能源, 因此对于油气等低排放化石能源的使用在这一过程中会呈现出倒 U 型趋势。



附图 2 分产业的能源结构预测

(五) 包含碳税的模型均衡条件

模型的均衡条件在如下四个方面需要进行调整, 记碳税税率为 $\tau(t)$ :

1. 三个能源部门的利润最大化问题写为:

油气部门:  $\max p_{1,t}E_{1,t} - p_{import}E_{1,t} - \tau(t)*\eta_1E_{1,t}$   
煤炭部门:  $\max p_{2,t}E_{2,t} - W_t l_{2,t} - \tau(t)*\eta_2E_{2,t}$

绿色部门：
$$\max p_{3,t}E_{2,t} - W_t l_{3,t}$$

2. 政府部门的预算平衡：

$$T_t = \tau(t) * (\eta_1 E_{1,t} + \eta_2 E_{2,t})$$

3. 家庭的预算约束：

$$C_t + I_t = W_t L_t + r_t K_t + T_t$$

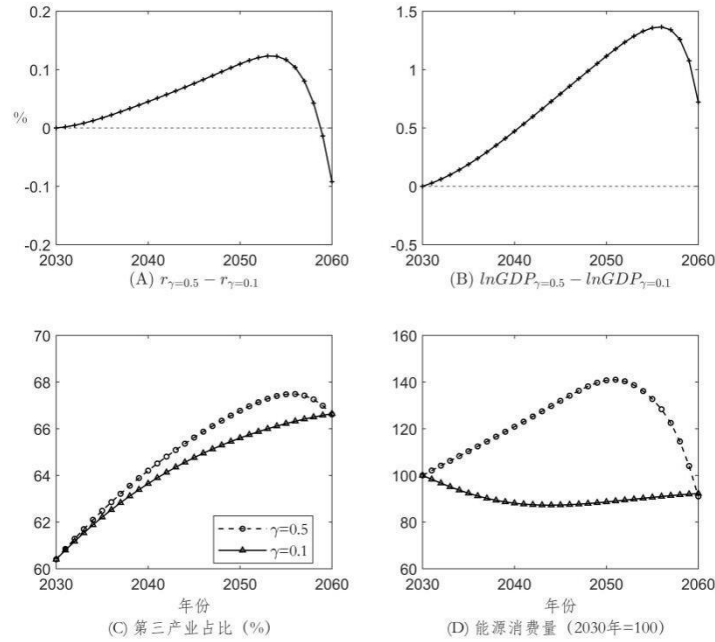
4. 最终品的出清条件：

$$Y_t = W_t L_t + r_t K_t + p^* E_{1,t} + T_t$$

其他均衡条件不变。

#### (六) 不同碳税政策的比较

最优碳税税率的变化速度为何呈现出如此强的发展阶段依赖性？为了具体分析这一问题，我们比较了两种碳中和背景下的可行碳税安排，其中一个具有较高的时间累进性（ $\gamma = 0.5$ ），另一个具有相对较低的时间累进性（ $\gamma = 0.1$ ），并将它们的表现绘制在附图 3 中。



附图 3 不同碳税政策的比较

第一，一个较低的税率可以让经济体在发展早期维持较高的资本回报率，加快资本积累和经济增长速度。模型显示，在一个时间累进性较强的碳税政策下，经济体的储蓄率在 2030~2050 年间平均上升 0.34 个百分点。在对这两项政策的定量模拟中，采用一个时间累进性更高的政策可以使经济体在 2030~2050 年间的平均经济增速上升 0.05 个百分点（相较于时间累进性更低的政策安排）。到 2050 年，经济体的资本存量上升了 1.30 个百分点，经济体的总增加值上升了 1.12 个百分点。第二，更快地资本积累也进一步加速了经济结构的转型。在实现碳中和的时间路径上，实行一个时间累进性更强的碳税政策在经济增速加快的同时也使得更多的资本进入服务业，显著加快了第三产业的发展，促进了经济结构的优化。第三，早期的碳税水平更低、一揽子能源的价格水平也更低，这使得经济体在早期的能源的投

入更多，整体的产出也更高。从实现碳中和的成本来看，使用一个时间累进性更高的碳税政策意味着在前期尽可能多地利用剩余的碳排放空间和能源使用空间，尽可能最大化地维持经济的高速增长。

## （七）经济发展的内生动态性质与最优碳税的时间累进性

### 1. 多部门索洛模型

记家户的储蓄率为  $s$ ，外生给定。在我们的模型中，内生的储蓄率来源于家户的跨期最优决策，而在外生储蓄率的设定下，模型整体动态将退化为索洛模型。在模型均衡中，家户不再需要求解效用最大化问题，因此只需将家户的欧拉方程、横截条件（TVC）替换为：

$$I_t = s * (W_t L_t + r_t K_t + T_t)。$$

征收碳税情形下的均衡定义可以很容易地参照附录 A 的第（五）部分给出。在校准的环节中我们用储蓄率  $s$  匹配了 2009~2020 年间我国的平均储蓄率。

### 2. 代表性单部门拉姆齐模型

我们将原有的三个生产部门（ $j=4\sim6$ ）和最终品部门合并为一个代表性部门，记为部门  $r$ 。则模型中的生产端由三个能源部门和这一个代表性部门构成。部门  $r$  的生产函数为：

$$Y_{r,t} = A_{r,t} k_{r,t}^{\alpha_r} l_{r,t}^{1-\alpha_r} \mathcal{F}_{r,t}(E_{r,1,t}, E_{r,2,t}, E_{r,3,t})^{\nu_r}。$$

将部门  $r$  的产品价格标准化为 1，则其利润最大化问题可以写为：

$$\max Y_{r,t} - W_t l_{r,t} - r_t k_{r,t} - p_{1,t} E_{r,1,t} - p_{2,t} E_{r,2,t} - p_{3,t} E_{r,3,t}。 \quad (A3)$$

能源部门和家户端的设定保持不变。下面我们给出不征收碳税时模型均衡的定义：

**均衡定义** 给定外生参数，模型的均衡是一列分配  $\{C_t, K_t\}$ 、 $\{k_{r,t}, l_{2,t}, l_{3,t}, l_{r,t}\}$ ，和一系列价格  $\{p_{1,t}, p_{2,t}, p_{3,t}\}$ ，使得：

1. 各部门的利润最大化：能源部门 1 满足式（1）；能源部门 2 和 3 满足式（2）；部门  $r$  满足式（A3）；
2. 家户求解式（5）中的效用最大化问题；
3. 中间品市场、劳动力市场、资本市场和最终品市场出清。

征收碳税情形下的均衡定义可以很容易地参照附录 A 的第（五）部分给出。根据模型设定，我们不再区分第一、二、三产业，因此在校准的环节中我们不再匹配产业结构以及分产业的能源结构，而只匹配整体的能源结构。

## （八）模型拓展

### 1. 随时间变化的能源间替代弹性

在本文基准模型和大部分相关文献中，都假设不同能源之间的替代弹性是一个常数。从估计结果来看，中国绿色能源与化石能源之间的替代弹性是较低的。但随着近年来中国大力推动低碳设备和技术的发展，使用绿色能源代替化石能源的难度逐渐降低，例如新能源汽车的发展就使中国对石油的消费可以更加容易地转变为对电力的消费。可见这一类技术进步提高了两种能源间的替代弹性，这是中国在特定发展阶段呈现出的特点。为了捕捉这一现象，我们假设绿色和化石能源之间的替代弹性随着中国的低碳发展进程不断上升，并在长期达到

全球层面的稳态水平 0.95（Stern, 2012; Golosov 等, 2014）：

$$\rho_j(t) = \rho_j + \frac{\bar{\rho} - \rho_j}{100} \cdot (t - 2020), \quad \text{如果 } 2020 \leq t < 2120,$$

$$\rho_j(t) = \bar{\rho}, \quad \text{如果 } t \geq 2120。$$

其中  $\bar{\rho} = -0.05$  对应绿色和化石能源之间替代弹性的稳态。我们也测试了在 50 年或 150 年后达到稳态的情形，模拟结果差异不大。基于这一假设重新计算模型后发现，绿色和化石能源之间逐渐增大的替代弹性显著加快了中国能源结构的绿色化转型，因此也加快了中国的碳减排进程。与此同时，所有定性结果保持稳健。

## 2. 能源生产方式的变化

在基准模型中，我们参考 Golosov 等（2014）的做法，假设煤炭和绿色能源可以通过投入劳动力进行挖掘或者研发的方式生产。在这一部分，我们允许资本进入能源的生产环节，因此两个能源部门的生产函数变为（ $i=2, 3$ ）：

$$E_{i,t} = A_{i,t} k_{i,t}^{\alpha_i} l_{i,t}^{1-\alpha_i}。$$

重新校准后的结果显示，所有定性结果仍成立，定量结果的差异也很小。这一方面是因为能源部门在整个经济体中的比重较低，另一方面是因为能源部门之间的资本密集度在数据中差异并不大，因此资本积累导致的租金价格变化对于能源结构转型的影响不大。

## 3. 产业内部的结构转型

本文的研究强调了产业结构变迁对碳减排和能源结构优化的重要作用，其中一个重要因素在于制造业比重近十年间大幅的下降显著降低了中国的能源强度和煤炭能源需求。受到中国目前的发展阶段、外部环境的变化等多重因素的影响，“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要强调“保持制造业比重基本稳定”，那么一个自然的问题是：在这样的背景下，产业结构变迁对于碳减排和能源结构优化的作用是否依然值得关注呢？

我们的答案是肯定的。本文的创新之一在于刻画生产结构的变化从需求侧对要素投入结构产生的影响，生产结构对于碳排放和能源结构的影响机制具有普遍意义，并不局限于制造业比重下降时的情景。受到目前各国大类产业划分的统计体系的限制，与国内外产业结构变迁的绝大多数文献一样，本文将产业结构变迁定义为农业、工业和服务业占比的变化，但这并不意味着产业结构变迁这一宏观现象仅局限于三大产业之间。事实上，在各大产业内部的不同行业之间也呈现出明显的结构转型过程。王勇、陈诗一和朱欢（2022）将工业内部的行业分为清洁型产业和污染密集型产业，并发现在 1990~2017 年间中国工业结构发生了深刻的变化，污染密集型产业的占比呈现下降趋势，而清洁型产业的占比呈现显著上升趋势，工业内部结构呈现出绿色发展的趋势。

“保持制造业比重基本稳定”的一个重要要求就是制造业内部细分行业结构不断优化升级（蔡昉, 2021）。下面，我们给出一个简化的模型，目的在于呈现绿色产业结构转型从经济学直觉上如何影响我国的碳排放和能源结构。经济体存在农业、工业、服务业三大产业（ $i=1,2,3$ ），每个产业内部存在一个传统部门和一个新兴部门（ $j=1,2$ ）。产业  $i$  中部门  $j$  的生产都需要消耗能源  $E_{i,j,t}$ ，其能源强度  $\theta_{i,j}$  外生给定，定义为每产生一单位增加值需要消耗的能量：

$$E_{i,j,t} = \theta_{i,j,t} * VA_{i,j,t}。$$

经济体中有两类能源，高碳能源和低碳能源（ $k=1,2$ ），其碳排放强度为 $\eta_k$ ，满足：

$$\eta_1 > \eta_2。$$

记  $E_{i,j,k,t}$  为产业  $i$  部门  $j$  使用能源  $k$  的量，记每个部门的能源结构为：

$$e_{i,j,k,t} = \frac{E_{i,j,k,t}}{E_{i,j,t}}。$$

则有如下推论：

**推论** ① 假设传统部门比新兴部门更依赖高碳能源，则产业内的新兴部门比重上升会导致高碳能源占总能源消费的比例下降。

② 假设传统部门能源强度高于新兴部门，则产业内新兴部门比重上升会降低总碳排放。

证明见附录 B。这意味着，即使三大产业的结构保持稳定，只要产业内部结构转向能源强度更低、能源结构更清洁的行业，这一结构调整过程都会对碳减排和能源结构优化起到推动作用。因此，传统制造业产业应该更多向能源需求更小、能源结构更加绿色低碳的战略性新兴产业进行转型升级。从长期来看，这样的发展模式在实现“制造业比重稳定”的同时，有助于中国进一步实现碳减排和能源结构优化，也有助于提高高附加值制造活动的比重，实现制造业向全球价值链高端升级。

#### （九）模型稳健性

第一，考虑经济增速可能放缓，我们将所有能源和产业部门的生产率增速设置为基准模型中的三分之二。在这一设定下，2030 年的经济增速从 4.97% 下滑到 3.72%，2060 年的经济增速 3.21% 下滑到 2.54%。模拟结果显示，所有结构指标的变化都很小，但由于经济增速放缓导致能源需求下降，部分总量指标有一些定量上的改变：碳达峰的时间并没有发生显著变化、峰值略有下降，同时最优碳税的绝对水平也略有下降。同时，所有定性结论仍稳健。

第二，考虑人口趋势变化。在基准模型中，我们假设未来的人口增长率保持过去十年的平均水平。而目前中国面临阶段性的人口老龄化问题，因此未来劳动力的增长速度可能会放缓。出于这一考虑，我们尝试了其他的劳动力供给序列：第一，假设中国人口不再增长，并长期维持稳定；第二，参考《2019 世界人口展望》，假设中国人口于 2030 年达峰（14.6 亿），之后线性下降到 2060 年的 13.3 亿，并维持稳定。模拟结果显示，两种情形下除了部分总量指标有轻微的差距外，其他的定量结果几乎没有发生变化，所有定性结论也依然成立。

第三，考虑能源生产技术变化。绿色能源生产技术的进步是能源结构绿色转型的重要推动力之一，因此我们尝试将绿色能源部门的技术进步率设置为基准模型的三分之二。在这一设定下，能源结构的绿色化转型放缓，2030 年绿色能源的占比从 23.02% 降低到 21.95%，2050 年从 46.78% 降低到 42.17%，相应的碳排放略微上升、最优碳税的绝对水平增大。这些定量结果都处于合理区间内，且所有的定性结论保持稳健。

第四，考虑国际石油进口价格变化。在基准模型中，我们根据 1979~2020 年的迪拜原油价格校准了油气进口价格的年均增速为 3.51%。Golosov 等（2014）认为石油的全球储量是决定了其长期的价格增速，因此我们分别考虑两种其他情形：第一，未来发现新的油田导致石油价格增速放缓，以 2.50% 为例；第二，受国际贸易争端等因素的影响，中国进口石油价



格上升，以 4.50% 为例。模拟结果显示，上述两种参数变动只会影响短期石油能源的份额：当石油价格增速放缓时，其在能源结构中的占比略有上升，反之则占比略有下降，两种情形下与基准结果在各年的差距都在 3% 以内。但长期来看，能源结构中石油天然气的占比都会呈现倒 U 型演化，逐渐被绿色能源所替代。

第四，考虑不同的碳中和目标。关于 2060 年的碳排放目标，本文参考了丁仲礼（2021）的预测，将其设置为 30 亿吨。我们也测试了其他不同的目标，包括 25 亿吨和 35 亿吨。与此同时，考虑到现实中中国碳中和的时间可能存在一定程度的提前或者滞后，我们也测试了在 2055 年和 2065 年实现碳中和的情形。定量结果显示，最优碳税的绝对水平会因为碳排放约束的改变而发生一定变化，但各种情形下的税率安排都具有非常显著的发展阶段依赖性。

## 二、附录 B：正文未展示的数学证明

**引理 1 证明** 在模型均衡中，根据厂商的利润最大化条件，可以得到：

$$E_{j,t} = \frac{VA_{j,t} * \frac{v_j}{1-v_j}}{p_{-e_{j,t}}}, j = 4,5,6; E_{j,t} = \frac{\left(\sum_{k=4}^6 VA_{k,t} * \frac{1}{1-v_k}\right) * \frac{v_j}{1-v_j}}{p_{-e_{j,t}}}, j = 7。$$

代入  $E_t = \sum_{j=4}^7 E_{j,t}$ ，得到：

$$\begin{aligned} \frac{E_{j,t}}{E_t} &= \frac{\frac{VA_{j,t}}{TVA_t} * \frac{v_j}{1-v_j}}{\frac{p_{-e_{j,t}}}{\sum_{k=4}^6 \frac{VA_{k,t}}{TVA_t} * \frac{v_k}{1-v_k} + \frac{\left(\sum_{k=4}^6 \frac{VA_{k,t}}{TVA_t} * \frac{1}{1-v_k}\right) * \frac{v_7}{1-v_7}}{p_{-e_{7,t}}}}}, j = 4,5,6; \\ \frac{E_{j,t}}{E_t} &= \frac{\frac{\left(\sum_{k=4}^6 \frac{VA_{k,t}}{TVA_t} * \frac{1}{1-v_k}\right) * \frac{v_7}{1-v_7}}{p_{-e_{7,t}}}}{\frac{VA_{k,t}}{TVA_t} * \frac{v_k}{1-v_k} + \frac{\left(\sum_{k=4}^6 \frac{VA_{k,t}}{TVA_t} * \frac{1}{1-v_k}\right) * \frac{v_7}{1-v_7}}{p_{-e_{7,t}}}}, j = 7。 \end{aligned}$$

上述关系记作：

$$\frac{E_{j,t}}{E_t} = \varepsilon_j \left( \frac{VA_{4,t}}{TVA_t}, \frac{VA_{5,t}}{TVA_t}, \frac{VA_{6,t}}{TVA_t}, p_{-e_{4,t}}, p_{-e_{5,t}}, p_{-e_{6,t}}, p_{-e_{7,t}} \right)。$$

再根据厂商购买能源时的成本最小化问题，可以得到：

$$\frac{p_{1,t}}{p_{2,t}} = \frac{\kappa_{j,1,t}}{1 - \kappa_{j,1,t}} \left( \frac{E_{j,1,t}}{E_{j,2,t}} \right)^{\xi_j - 1}, \quad \frac{p_{d,t}}{p_{3,t}} = \frac{\kappa_{j,d,t}}{1 - \kappa_{j,d,t}} \left( \frac{E_{j,d,t}}{E_{j,3,t}} \right)^{\rho_j - 1};$$

$$E_{j,d,t} = [\kappa_{j,1,t} E_{j,1,t}^{\xi_j} + (1 - \kappa_{j,1,t}) E_{j,2,t}^{\xi_j}]^{1/\xi_j};$$

$$p_{d,t} = [\kappa_{j,1,t}^{\frac{1}{1-\xi_j}} p_{1,t}^{\frac{\xi_j}{\xi_j-1}} + (1 - \kappa_{j,1,t})^{\frac{1}{1-\xi_j}} p_{2,t}^{\frac{\xi_j}{\xi_j-1}}]^{\frac{\xi_j-1}{\xi_j}};$$

$$E_{j,t} = \sum_{i=1}^3 E_{j,i,t}。$$

将上式中的  $(p_{1,t}, p_{2,t}, p_{3,t}, \kappa_{j,d,t}^n, \kappa_{j,1,t}^n, \kappa_{j,d,t}^r, \kappa_{j,1,t}^r)$  作为参数，利用上述的 5 个式子可以求解

出 $(\frac{E_{j,1,t}}{E_{j,t}}, \frac{E_{j,2,t}}{E_{j,t}}, \frac{E_{j,3,t}}{E_{j,t}}, \frac{E_{j,d,t}}{E_{j,t}}, p_{d,t})$ 共 5 个变量，其中我们将前 3 个变量的解记作：

$$\frac{E_{j,i,t}}{E_{j,t}} = \mathcal{J}_{j,i}(p_{1,t}, p_{2,t}, p_{3,t}, \kappa_{j,d,t}^n, \kappa_{j,1,t}^n, \kappa_{j,d,t}^\tau, \kappa_{j,1,t}^\tau)。$$

对 $\mathcal{E}_j$ 和 $\mathcal{J}_{j,i}$ 进行一阶近似，我们得到：

$$\begin{aligned} \Delta \frac{E_{i,t}}{E_t} &\approx \sum_{j=4}^7 \Delta \frac{E_{j,t}}{E_t} * \frac{E_{j,i,t}}{E_{j,t}} + \sum_{j=4}^7 \Delta \frac{E_{j,i,t}}{E_{j,t}} * \frac{E_{j,t}}{E_t} \\ &\approx \sum_{j=4}^7 \sum_{k=4}^6 \Delta \frac{VA_{k,t}}{TVA_t} * \frac{\partial \mathcal{E}_j}{\partial \frac{VA_{k,t}}{TVA_t}} * \frac{E_{j,i,t}}{E_{j,t}} \quad (\text{产业结构变迁效应}) \\ &\quad + \sum_{j=4}^7 \sum_{k=4}^7 \Delta p_{-e_{k,t}} * \frac{\partial \mathcal{E}_j}{\partial p_{-e_{k,t}}} * \frac{E_{j,i,t}}{E_{j,t}} \quad (\text{能源价格的广延边际效应}) \\ &\quad + \sum_{j=4}^7 \sum_{i=1}^3 \Delta p_{i,t} * \frac{\partial \mathcal{J}_{j,i}}{\partial p_{i,t}} * \frac{E_{j,t}}{E_t} \quad (\text{能源价格的集约边际效应}) \\ &\quad + \sum_{j=4}^7 (\Delta \kappa_{j,1,t}^n * \frac{\partial \mathcal{J}_{j,i}}{\partial \kappa_{j,1,t}^n} + \Delta \kappa_{j,d,t}^n * \frac{\partial \mathcal{J}_{j,i}}{\partial \kappa_{j,d,t}^n}) * \frac{E_{j,t}}{E_t} \quad (\text{能源利用效率效应}) \\ &\quad + \sum_{j=4}^7 (\Delta \kappa_{j,1,t}^\tau * \frac{\partial \mathcal{J}_{j,i}}{\partial \kappa_{j,1,t}^\tau} + \Delta \kappa_{j,d,t}^\tau * \frac{\partial \mathcal{J}_{j,i}}{\partial \kappa_{j,d,t}^\tau}) * \frac{E_{j,t}}{E_t}。 \quad (\text{政策干预效应}) \end{aligned}$$

证毕。

**引理 2 证明** 根据最终品厂商的利润最大化问题的一阶条件，可以得到：

$$\frac{\omega_5}{1 - \omega_5} = (\frac{p_{5,t}}{p_{6,t}})^\gamma (\frac{1}{1 - v_5} \frac{VA_{5,t}}{VA_{6,t}})^{1-\gamma}。$$

对上式进行对数线性化：

$$\frac{\widehat{VA_{5,t}}}{\widehat{VA_{6,t}}} \approx \frac{\gamma}{\gamma - 1} * \frac{\widehat{p_{6,t}}}{\widehat{p_{5,t}}}。$$

求解厂商的成本最小化问题，我们得到：

$$p_j = \frac{r^{\alpha_j} W^{(1-\alpha_j-v_j)} p_{j,e}^{v_j}}{A_j \alpha_j^{\alpha_j} (1 - \alpha_j - v_j)^{(1-\alpha_j-v_j)} v_j^{v_j}}。$$

对数线性化后得到：

$$\begin{aligned} \frac{\widehat{p_{6,t}}}{\widehat{p_{5,t}}} &\approx (\alpha_5 + v_5 - \alpha_6 - v_6) * \widehat{W_t} \quad (\text{劳动力价格效应}) \\ &\quad + (\alpha_6 - \alpha_5) * \widehat{r_t} \quad (\text{资本价格效应}) \\ &\quad + (v_6 * \widehat{p_{-e_{6,t}}} - v_5 * \widehat{p_{-e_{5,t}}}) \quad (\text{能源价格效应}) \\ &\quad + (\widehat{A_{5,t}} - \widehat{A_{6,t}})。 \quad (\text{生产率效应}) \end{aligned}$$

根据定义：

$$p_{-e_{j,t}} = \sum_{i=1}^3 p_{i,t} * \frac{E_{j,i,t}}{E_{j,t}},$$

一阶近似后得到：

$$\Delta p_{-e_{j,t}} \approx \sum_{i=1}^3 \Delta p_{i,t} * \frac{E_{j,i,t}}{E_{j,t}} \quad (\text{不同能源价格变化导致产业能源成本变化})$$

$$+ \sum_{i=1}^3 \Delta \frac{E_{j,i,t}}{E_{j,t}} * p_{i,t} \quad \circ \quad (\text{产业能源结构变化导致产业能源成本变化})$$

因此，能源价格效应可以被进一步分解为能源结构效应和能源品价格效应：

$$\begin{aligned} v_6 * \widehat{p_{-e_{6,t}}} - v_5 * \widehat{p_{-e_{5,t}}} &\approx \left( \frac{v_6}{p_{-e_{6,t}}} \sum_{i=1}^3 \Delta \frac{E_{6,i,t}}{E_{6,t}} * p_{i,t} - \frac{v_5}{p_{-e_{5,t}}} \sum_{i=1}^3 \Delta \frac{E_{5,i,t}}{E_{5,t}} * p_{i,t} \right) \\ &\quad (\text{能源价格效应}) \qquad (\text{能源结构效应}) \\ &\quad + \sum_{i=1}^3 \Delta p_{i,t} * \left( \frac{v_6}{p_{-e_{6,t}}} * \frac{E_{6,i,t}}{E_{6,t}} - \frac{v_5}{p_{-e_{5,t}}} * \frac{E_{5,i,t}}{E_{5,t}} \right) \circ \\ &\qquad (\text{能源品价格效应}) \end{aligned}$$

证毕。

**引理 3 证明** ① 根据碳排放的核算式：

$$Carbon_t = \sum_i \frac{E_{i,t}}{E_t} * E_t * \eta_i \circ$$

对上式进行一阶近似，得到：

$$\begin{aligned} \Delta Carbon_t &\approx \Delta E_t * \sum_{i=1}^3 \frac{E_{i,t}}{E_t} * \eta_i + \sum_{i=1}^3 \Delta \frac{E_{i,t}}{E_t} * \eta_i * E_t \circ \\ &\quad (\text{能源消费增长效应}) \qquad (\text{能源结构变迁效应}) \end{aligned}$$

② 在模型均衡中，根据厂商的利润最大化条件，可以得到：

$$E_t = TVA_t * \left[ \sum_{k=4}^6 \frac{\frac{VA_{k,t}}{TVA_t} * \frac{v_k}{1-v_k}}{p_{-e_{k,t}}} + \frac{\left( \sum_{k=4}^6 \frac{VA_{k,t}}{TVA_t} * \frac{1}{1-v_k} \right) * \frac{v_7}{1-v_7}}{p_{-e_{7,t}}} \right] \circ$$

上述关系记作：

$$E_t = e(TVA_t, \frac{VA_{4,t}}{TVA_t}, \frac{VA_{5,t}}{TVA_t}, \frac{VA_{6,t}}{TVA_t}, p_{-e_{4,t}}, p_{-e_{5,t}}, p_{-e_{6,t}}, p_{-e_{7,t}}) \circ$$

因此，产业结构变迁通过影响总能源消费而对碳排放产生的影响可以通过对 $e_j$ 进行一阶近似得到：

$$\left( \sum_{k=4}^6 \Delta \frac{VA_{k,t}}{TVA_t} * \frac{\partial e}{\partial \frac{VA_{k,t}}{TVA_t}} \right) * \sum_{i=1}^3 \frac{E_{i,t}}{E_t} * \eta_i \circ$$

(产业结构变迁的能源消费效应)

同时，产业结构变迁也可以通过影响能源结构对碳排放产生影响，结合引理 1 的结果，我们容易得到：

$$\sum_{i=1}^3 \left( \sum_{j=4}^7 \sum_{k=4}^6 \Delta \frac{VA_{k,t}}{TVA_t} * \frac{\partial \varepsilon_j}{\partial \frac{VA_{k,t}}{TVA_t}} * \frac{E_{j,i,t}}{E_{j,t}} \right) * \eta_i * E_t \circ$$

(产业结构变迁的能源结构效应)

证毕。

附录 A 推论证明 ① 高碳能源占总能源消费的比重可以写为：

$$\frac{E_{1,t}}{E_t} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 e_{i,j,1,t} * \frac{E_{i,j,t}}{E_{i,t}} * \frac{E_{i,t}}{E_t} \quad (\text{B1})$$

其中  $E_{i,t}$  表示产业  $i$  消耗的能量， $E_t$  表示经济体消耗的总能量。同时，产业内新兴部门比重的变化对产业内能源分配产生的影响可以写为：

$$\Delta \frac{E_{i,2,t}}{E_{i,t}} = \theta_{i,2,t} * \Delta \frac{VA_{i,2,t}}{VA_{i,t}} \quad (\text{B2})$$

根据定义：

$$\Delta \frac{E_{i,1,t}}{E_{i,t}} + \Delta \frac{E_{i,2,t}}{E_{i,t}} = 0, \quad (\text{B3})$$

将式 (B2) 和式 (B3) 代入式 (B1) 的一阶展开式，我们得到产业内的新兴部门比重上升对高碳能源占总能源消费比重的影响：

$$\sum_{i=1}^3 \frac{E_{i,t}}{E_t} * \theta_{i,2,t} * (e_{i,2,1,t} - e_{i,1,1,t}) * \Delta \frac{VA_{i,2,t}}{VA_{i,t}} \quad (\text{B4})$$

根据假设：

$$\sum_{i=1}^3 \frac{E_{i,t}}{E_t} * \theta_{i,2,t} * (e_{i,2,1,t} - e_{i,1,1,t}) * \Delta \frac{VA_{i,2,t}}{VA_{i,t}} < 0.$$

② 根据碳排放的核算式：

$$Carbon_t = \sum_k \frac{E_{k,t}}{E_t} * E_t * \eta_k,$$

对上式进行一阶近似，得到：

$$\Delta Carbon_t \approx \Delta E_t * \sum_{k=1}^2 \frac{E_{k,t}}{E_t} * \eta_k + \sum_{k=1}^2 \Delta \frac{E_{k,t}}{E_t} * \eta_k * E_t \quad (\text{B5})$$

(能源消费增长效应) (能源结构变迁效应)

根据定义，总能源消费可以表示为：

$$E_t = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 \theta_{i,j,t} * \frac{VA_{i,j,t}}{VA_{i,t}} * VA_{i,t}.$$

其中  $VA_{i,t}$  表示产业  $i$  的增加值，根据定义：

$$\Delta \frac{VA_{i,1,t}}{VA_{i,t}} + \Delta \frac{VA_{i,2,t}}{VA_{i,t}} = 0, \quad (\text{B6})$$

将式 (B6) 代入式 (B5) 的一阶展开式，得到产业内的新兴部门比重上升通过影响能源消费而对碳排放产生的影响：

$$\left[ \sum_{i=1}^3 \Delta \frac{VA_{i,2,t}}{VA_{i,t}} * (\theta_{i,2,t} - \theta_{i,1,t}) * VA_{i,t} \right] * \sum_{k=1}^2 \frac{E_{k,t}}{E_t} * \eta_k \quad (\text{B7})$$

根据定义：

$$\Delta \frac{E_{1,t}}{E_t} + \Delta \frac{E_{2,t}}{E_t} = 0,$$

再根据 (B4) 式，我们得到产业内的新兴部门比重上升通过影响能源结构而对碳排放产生的影响可以写为：

$$\sum_{i=1}^3 E_{i,t} * \theta_{i,2,t} * (\eta_1 - \eta_2) * (e_{i,2,1,t} - e_{i,1,1,t}) * \Delta \frac{VA_{i,2,t}}{VA_{i,t}} \quad (\text{B8})$$

根据假设：

$$\sum_{i=1}^3 E_{i,t} * \theta_{i,2,t} * (\eta_1 - \eta_2) * (e_{i,2,1,t} - e_{i,1,1,t}) * \Delta \frac{VA_{i,2,t}}{VA_{i,t}} < 0,$$

结合（B5）、（B7）和（B8）式，证毕。

#### 参考文献

- [1] 白重恩,钱震杰.国民收入的要素分配:统计数据背后的故事[J].经济研究,2009,(3):27~41.
- [2] 蔡昉.生产率、新动能与制造业——中国经济如何提高资源重新配置效率[J].中国工业经济,2021,(5):5~18.
- [3] 丁仲礼.中国碳中和框架路线图研究[J].中国工业和信息化,2021(8):54~61.
- [4] 范从来,张中锦.提升总体劳动收入份额过程中的结构优化问题研究——基于产业与部门的视角[J].中国工业经济,2012,(1):5~15.
- [5] 郭凯明,杭静,颜色.中国改革开放以来产业结构转型的影响因素[J].经济研究,2017,52(3):32~46.
- [6] 罗长远,张军.经济发展中的劳动收入占比:基于中国产业数据的实证研究[J].中国社会科学,2009(4):65~79+206.
- [7] 潘珊,龚六堂,李尚骞.中国经济的“双重”结构转型与非平衡增长[J].经济学(季刊),2017,(1):97~120.
- [8] 王勇,陈诗一,朱欢.新结构经济学视角下产业结构的绿色转型:事实、逻辑与展望[J].经济评论,2022(4):59~75.
- [9] 徐朝阳,王韡.部门异质性替代弹性与产业结构变迁[J].经济研究,2021,(4):77~92.
- [10] 卓玛草.异质性要素替代弹性与中国产业结构变迁——兼论新发展格局稳增长的来源[J].经济科学,2022(6):22~38.
- [11] Cheremukhin A., Golosov M., Guriev S., Aleh T., 2017, *The industrialization and economic development of Russia through the lens of a neoclassical growth model*[J], *The Review of Economic Studies*, 84(2),613~649.
- [12] Herrendorf B., Rogerson R., Valentinyi A., 2013, *Two perspectives on preferences and structural transformation*[J], *American Economic Review*, 103(7),2752~2789.
- [13] Lin B., Liu X., 2013, *Reform of refined oil product pricing mechanism and energy rebound effect for passenger transportation in China*[J], *Energy Policy*, 57,329~337.
- [14] Sun C., Lin B., 2013, *Reforming residential electricity tariff in China: Block tariffs pricing approach*[J], *Energy Policy*, 60,741~752.
- [15] Sun C., Ouyang X., 2016, *Price and expenditure elasticities of residential energy demand during urbanization: an empirical analysis based on the household-level survey data in China*[J], *Energy Policy*, 8,56~63.
- [16] Zhou S., Teng F., 2013, *Estimation of urban residential electricity demand in China using household survey data*[J], *Energy Policy*, 61,394~402.