



双碳目标下能源与产业双重结构转型

江深哲 杜浩锋 徐铭喆^①

摘要：本文构建并校准了一个包含内生能源与产业结构的多部门动态一般均衡模型，研究了中国能源与产业结构的升级过程以及其与碳排放之间的关系。研究发现，能源生产技术的进步通过改变各产业的生产成本推动了产业结构转型，而产业结构转型从能源需求侧减少了高排放化石能源的使用。定量结果显示，2009~2020年间，宏观产业结构转型推动了能源结构的转变并显著降低了碳排放量，其累计减少的碳排放量相当于2020年中国年排放量的10%。同时，本文求解了双碳目标下最大化居民福利的碳税安排，发现内生税率随经济增长而快速上升，具有显著的发展阶段依赖性。在发展阶段早期实行较低的碳税税率可以维持更高的资本回报率，有利于资本积累、产业升级和经济增长。

关键词：双碳目标 能源结构 产业结构 碳税 发展阶段

致谢信息：

江深哲感谢国家自然科学基金青年项目（72003005）；徐铭喆感谢国家自然科学基金优秀青年科学基金项目（72322007）和国家自然科学基金青年项目（72003003）；杜浩锋感谢第一届中国宏观经济学论坛与会专家的有益讨论。

本工作论文系列是新结构经济学最新的尚未在学术期刊发表的研究成果，目的在于学术讨论与评论，并不代表北京大学新结构经济学研究院的官方意见。

^①江深哲，杜浩锋，徐铭喆，北京大学新结构经济学研究院。

双碳目标下能源与产业双重结构转型

江深哲 杜浩锋 徐铭誌*

一、引言

化石能源带来的二氧化碳排放是全球变暖的主要原因之一。中国是全球最大的能源消费和碳排放国家^①，中国政府在第 75 届联合国大会中承诺将力争于 2030 年前实现碳达峰，并努力于 2060 年前实现碳中和（简称“双碳目标”），党的二十大报告则进一步提出要“积极稳妥推进碳达峰碳中和”。碳排放是能源消费的产物^②，而能源是生产活动的必要投入，如何统筹经济和能源系统协同发展，在实现双碳目标的同时保持经济高质量发展是一个亟待回答的问题。

近年来，中国产业结构向低碳和环保的方向持续转型升级，风能、光伏等各类绿色能源也逐渐普及，出现了经济增速高于能源消费增速，而能源消费增速又高于碳排放增速的现象，详见附图 1。由于不同的产业包含不同的生产特性，这决定了对能源的异质性需求，因此产业结构会内生决定对不同能源产品的需求，而能源结构决定了不同的能源产品供给方式，两者共同决定了一国的碳排放水平。在 2009~2020 年间，中国第二产业占增加值的比重从 46% 下降到了 37%、第三产业从 44% 上升到 54%，经济发展的能源强度下降、能源增速显著低于经济增速。与此同时，中国的一次能源结构也快速转型。在 2009~2020 年间，各个产业使用的能源中绿色能源^③的占比显著上升（见图 1），其占总能源消费的比例从 2009 年的 8.7% 上升到 2020 年的 16%，接近翻倍。在化石能源内部，煤炭能源所占的比例也从 77.5% 下降到 67.4%。在产业和能源双重结构转型的背景下，中国以 2.51% 的年均碳排放增速支撑了高达 7.14% 的年均经济增速。

① 数据来源：国际能源署（International Energy Agency, IEA）。

② 联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）制定的国家温室气体清单指南指出，二氧化碳排放总量可以根据各种能源消费导致的二氧化碳排放估算量加和得到。

③ 包括水能、风能、核能、地热能等不产生碳排放的一次能源。

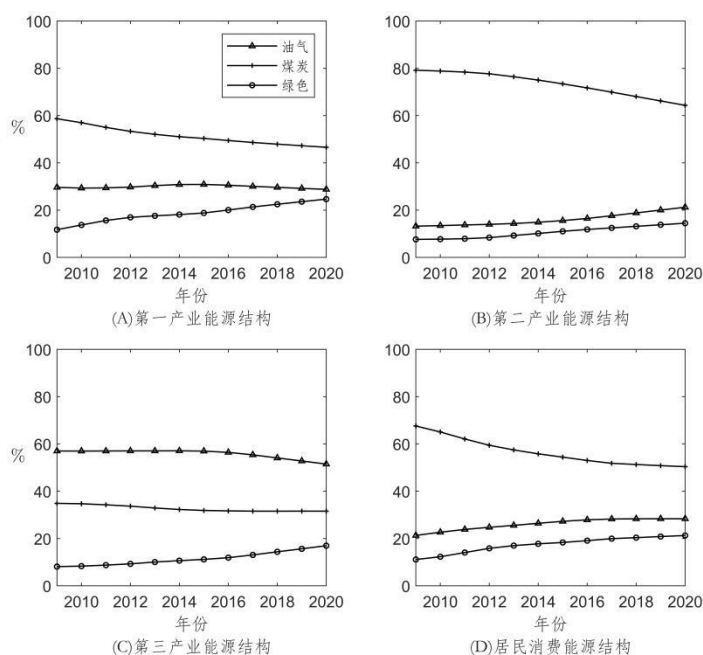


图1 中国分产业能源结构

注：表示每消耗一单位能量中来自不同一次能源的比例。

资料来源：国家统计局能源统计司编，《中国能源统计年鉴》，中国统计出版社，2022。

产业结构会决定能源需求，进而影响各能源部门的发展；反过来，能源部门的发展本身又会通过影响能源价格从而影响产业的发展。因此，产业结构转型与能源结构转型是一个相互依赖，相互推进的过程。本文通过考虑能源经济系统之间的投入产出关系，将上述双重结构转型的特征事实纳入了一个多部门动态一般均衡模型，刻画了经济发展过程中产业和能源结构的内生互动过程。在我们的理论中，能源结构的低碳化既是产业结构调整的动力，也是产业结构变迁的结果：绿色能源的技术进步改变了不同产业的生产成本，加快了资源节约型和低碳型的产业结构升级；伴随着产业结构的变化，生产活动从工业转向服务业，能源需求也随之转移到更清洁的行业，加快了能源结构低碳化转型的速度。在经济增长的过程中，能源和产业结构在不同的发展阶段内生演化、动态循环，共同推进了中国的绿色低碳发展。根据对中国碳排放量变化的定量分解，2009~2020年间宏观产业结构的转型显著降低了碳排放量，累计实现碳减排约10亿吨，相当于2020年中国年排放量的约10%。同时，本文求解了双碳目标下最大化居民福利的碳税安排，发现内生税率随经济增长而快速上升，具有显著的发展阶段依赖性，即应该在发展阶段早期实行较低的碳税水平。这是因为，在较低的碳税税率下资本回报率更高，有利于长期资本积累、产业升级和经济增长。

现有文献对中国宏观经济、能源和碳排放之间的关系以及双碳目标下的低碳转型路径进行了一些有益的探讨。比较有代表性的研究例如：林伯强等(2010)、姚昕和刘希颖(2010)、中国经济增长前沿课题组(2022)研究了中国在碳排放约束下的增长路径；莫建雷等(2018)、张希良等(2022)、邵帅等(2022)模拟了双碳目标下各种政策组合的效果；靳玮等(2022)使用一个新古典增长模型刻画了中国碳排放强度下降的过程等。这些文献和大量实证研究(张友国, 2010; 张伟等, 2016; 余壮雄等, 2020; 蒋为等, 2022)都指出产业和能源结构

转型对降低碳排放具有重要作用,但现有文献尚未对能源和产业结构之间的互动关系进行充分讨论,而正如前文所述,产业结构转型与能源结构转型是一个相互依赖、相互推动的过程,因此亟需构建一个动态一般均衡框架中对产业和能源结构在经济发展中的内生动态循环过程进行研究,本文的工作填补了这一空白。

本文对现有文献有三个方面的贡献和创新。第一,现有文献通常未考虑能源和产业结构之间的相互关系;本文将能源结构内生,并通过投入产出关系将其与产业结构进行连接,可以更加全面地理解中国的能源和产业结构转型过程,以及其对碳排放路径的影响。第二,部分基于一般均衡模型的研究主要考察了在给定经济发展情景下的能源和产业结构变迁过程;而本文中经济发展过程是内生的,由产业和能源部门共同推动,可以更全面地捕捉各种政策因素对中国产业能源系统和经济发展的影响。第三,部分文献探讨最优碳定价和碳规制强度时,往往假设一些经济变量,例如储蓄率、产业结构、经济增长,是外生给定的或整个系统处于平衡路径,而本文求解了一个转移路径上的一般动态均衡模型,刻画了碳税政策在不同发展阶段起到的不同作用。

本文的主要发现有:第一,能源与产业结构在经济发展过程相互依赖,相互推进,能源生产技术的进步通过改变各产业的生产成本推动了产业结构转型,而产业结构转型从能源需求侧减少了高排放化石能源的使用。第二,2009~2020年间的产业结构转型推动了能源结构的转变并显著降低了碳排放量,其累计减少的碳排放量相当于2020年中国年排放量的10%。第三,在一个内生产业和能源结构的动态框架下,最大化居民福利的碳税税率随着经济增长而快速上升,具有显著的发展阶段依赖性。

后文的安排如下:第二部分对中国的产业和能源结构及其转型的特征事实进行介绍;第三部分构建一个具有内生能源和产业结构双重结构转型的动态一般均衡模型;第四部分介绍模型参数的估计和校准;第五部分分析产业结构、能源结构和碳排放之间的关系,并预测未来的能源结构、碳排放量,最后讨论双碳目标下的碳税设计;第六部分总结。

二、中国能源与产业双重结构转型事实

(一) 数据来源

本文使用的产业结构相关数据从《中国统计年鉴》中获得,一次能源结构和各产业的能源消费数据从《中国能源统计年鉴》中获得。目前中国未公布分行业的一次能源结构,仅公布了各个行业生产过程中能源品的使用量,但由于部分行业中存在一次能源向二次能源的转换(例如使用煤发电),因此各行业的实际能源消费量并不等于使用量。我们从历年《中国能源平衡表》中获得了一次能源向二次能源转换的信息,包括各种能源在转换过程中的投入、产出和损耗量,再根据如下方法计算各行业的一次能源结构:

$$\begin{aligned} \text{产业 } i \text{ 中一次能源 } j \text{ 的消费量} &= \text{一次能源 } j \text{ 的记载使用量} \\ &\quad - \text{用于加工转换的一次能源 } j \text{ 的使用量} \\ &\quad + \text{加工转化过程中损失的一次能源 } j \text{ 的量} \\ &\quad + \text{来自一次能源 } j \text{ 的各种二次能源的使用量。} \end{aligned}$$

(二) 特征事实

中国煤炭资源丰富,而石油、天然气资源储量相对不足,主要依赖进口。根据中国的能源禀赋情况,可以将一次能源分为三类:第一,煤炭类能源,属于高排放能源;第二,石油

和天然气等烷烃类能源，其排放强度低于煤炭类能源；第三，水能、太阳能、核能等绿色能源。其中，前两类能源也被称为化石能源。在获取相同能源量的条件下，煤炭类能源产生最多的碳排放，烷烃类能源次之，绿色能源不产生碳排放。图 2 展示了 2009 年以来中国的一次能源结构及其变化。

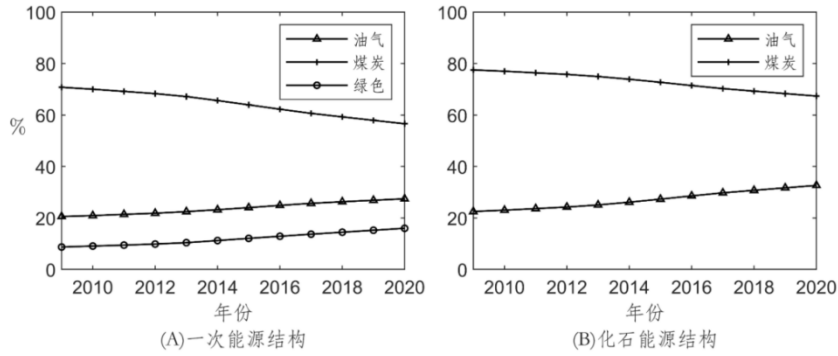


图 2 中国的能源结构

资料来源：同图 1。

中国能源结构转型有两个趋势：第一，化石能源逐渐转向绿色能源，化石能源占比从 2009 年的 91.3% 下降到 2020 年的 84%；第二，化石能源内部对煤炭的消费逐渐转向石油、天然气，煤炭在一次能源中的占比已经从 70.8% 下降到 56.6%。值得一提的是，虽然中国目前正处于绿色转型期，但对煤炭的依赖仍远高于国际水平。中国一次能源中煤炭的占比达 60% 以上，而全球平均水平约为 34%，美国、欧盟等发达国家和地区仅约为 14%。

生产活动是能源需求的主体，图 3 展示了中国的产业结构与能源消费结构。其中，第三产业消耗了 15% 左右的能源，但贡献了 50% 以上的生产总值；而第二产业在占据 40% 左右的增加值的同时，却消耗了 70% 左右的能源。制造业的高碳排放特点是导致中国早期高碳排放的重要因素之一，随着高排放的工业制造业向更高附加值、更低碳的第三产业转型，有助于减少碳排放并实现可持续发展。

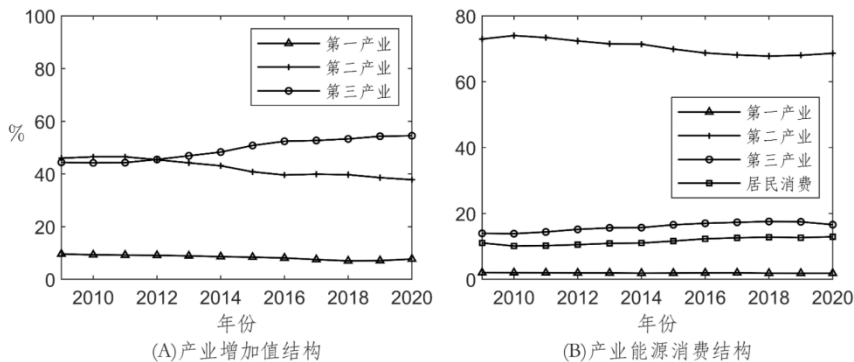


图 3 中国的产业结构与能源消费结构

资料来源：国家统计局，《中国统计年鉴》，中国统计出版社，2022。

同时，不同产业内部的能源结构也具有显著差异（见图 1）。例如，第二产业在 2009 年

占据 70%左右能源消费的同时，其煤炭能源的占比在 80%左右，而第三产业在占据 15%的能源消费同时，煤炭能源的占比只有 35%左右，这意味着同样的能源消费在第三产业中将产生更少的碳排放。从动态的角度来看，不同产业的能源结构都呈现出绿色能源逐渐替代化石能源的趋势，但替代的过程存在差异。其中，第二产业和居民消费呈现出绿色和油气能源替代煤炭能源的趋势，而第一、三产业则呈现出绿色能源替代其他化石能源的趋势。

综上所述：第一，不同产业对能源消费的依赖程度存在显著差异；第二，不同产业的能源结构和能源结构转型过程存在显著差异；第三，产业与能源结构的转型之间存在联系。

三、理论模型

本章构建了一个包含内生能源与产业结构的多部门动态一般均衡模型，包含能源部门、生产部门（三大产业）和最终品部门。在模型中，能源部门生产的各类能源品可以作为中间品投入生产，也可以直接用作最终消费。同时，各生产部门对能源的需求量和需求结构具有异质性。

（一）模型设定

1. 能源部门

能源部门由油气、煤炭、绿色能源三个部门构成。考虑到中国的石油、天然气主要依赖进口，因此我们将油气部门建模为一个进口部门，假设其以给定的价格进口石油和天然气。部门厂商的利润最大化问题可以写为：

$$\max p_{1,t}E_{1,t} - p_{import}E_{1,t} \quad (1)$$

其中， $p_{1,t}$ 表示油气能源在 t 时期的国内价格， p_{import} 表示油气能源在 t 时期的世界价格； $E_{1,t}$ 表示油气能源在 t 时期的进口量，单位为能源标准量。参考 Golosov 等（2014）的设定，假设煤炭通过投入劳动力进行开采，清洁能源也通过投入劳动力进行研发生产，因此这两个部门有如下的生产函数：

$$E_{i,t} = A_{i,t}l_{i,t} \circ$$

其中， $i=2$ 和 3 分别表示煤炭和绿色部门； $l_{i,t}$ 表示部门 i 在 t 时期雇佣的劳动力； $E_{i,t}$ 表示部门 i 在 t 时期的产出，单位为能源标准量； $A_{i,t}$ 表示部门 i 在 t 时期的生产技术，假设其按照外生增长率 $g_{i,t}$ 增长。用 $p_{i,t}$ 表示煤炭和绿色能源在 t 时期的国内价格，则部门厂商的利润最大化问题可以写为：

$$\max p_{i,t}E_{i,t} - W_t l_{i,t} \quad (2)$$

2. 生产部门

按照标准的结构转型文献，设置第一产业、第二产业（除能源生产部门外）和第三产业三个部门，依次用 $j=4\sim 6$ 进行表示。生产需要投入劳动力、资本和能源，有生产函数^①：

$$Y_{j,t} = A_{j,t}k_{j,t}^{\alpha_j}l_{j,t}^{1-\alpha_j-\nu_j}\mathcal{F}_{j,t}(E_{j,1,t}, E_{j,2,t}, E_{j,3,t})^{\nu_j} \circ$$

其中， α_j 表示部门 j 的资本产出弹性， ν_j 表示部门 j 的能源产出弹性； $A_{j,t}$ 表示部门 j 在 t 时期的生产效率，假设其按照外生增长率 $g_{j,t}$ 增长； $k_{j,t}$ 表示部门 j 在 t 时期租借的资本量， $l_{j,t}$ 表示部门 j 在 t 时期雇佣的劳动力； $\mathcal{F}_{j,t}$ 表示部门 j 投入的一个能源组合，是其使用

^① Golosov 等（2014）指出长期来看，包括能源在内的各投入要素的份额基本稳定，因此使用柯布道格拉斯生产函数，国内文献也常使用这一设定（段玉婉等，2023；余典范等，2023）。

的各种能源的一次齐次加总，其具体形式将在模型校准部分讨论， $E_{j,1,t} \sim E_{j,3,t}$ 分别表示部门 j 在 t 时期投入的油气能源、煤炭能源和绿色能源。用 W_t 和 r_t 分别表示 t 时期的工资和租金水平， $p_{j,t}$ 表示部门 j 生产的产品在 t 时期的价格，则部门 j 厂商的利润最大化问题可以写为：

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

3. 最终品部门

居民消费部门产品和能源品两类商品，包括三种产品和三种能源品。为了便于讨论，本文借鉴文献中的常用方法（Acemoglu 等，2008；Liu，2019；郭凯明等，2020），引入一个最终品加总部门对这些商品进行一次齐次加总，并将其价格标准化为 1^①：

$$Y_t = [\mathcal{G}(Y_{4,t}, Y_{5,t}, Y_{6,t})]^{1-\nu_7} [\mathcal{F}_{7,t}(E_{7,1,t}, E_{7,2,t}, E_{7,3,t})]^{\nu_7}$$

其中， \mathcal{G} 表示对三大产业产品的加总，其具体形式将在模型校准部分讨论， $Y_{j,t}$ 表示来自部门 j 的产品数量； $\mathcal{F}_{7,t}$ 表示居民消费的一个能源组合。最终品部门的利润最大化问题为：

$$\max Y_t - \sum_{j=4}^6 p_{j,t}Y_{j,t} - \sum_{i=1}^3 p_{i,t}E_{7,i,t} \quad (4)$$

4. 家户

家户购买最终品用于消费或投资，进行标准的储蓄决策以最大化折现总效用：

$$\max \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \frac{C_t^{1-\theta}}{1-\theta}, \quad (5)$$

$$\text{s.t. } C_t + I_t \leq W_t L_t + r_t K_t,$$

$$K_{t+1} = I_t + (1 - \delta)K_t.$$

其中， K_t 和 L_t 分别表示家户在 t 时期拥有的资本和劳动力， C_t 和 I_t 分别表示家户在 t 时期的消费和投资， δ 表示资本的折旧率。

（二）模型均衡

下面我们定义模型均衡。给定外生参数，模型的均衡是一列分配 $\{C_t, K_t\}$ 、 $\{k_{4,t}, k_{5,t}, k_{6,t}, l_{2,t}, l_{3,t}, l_{4,t}, l_{5,t}, l_{6,t}\}$ ，和一系列价格 $\{p_{1,t}, p_{2,t}, p_{3,t}, p_{4,t}, p_{5,t}, p_{6,t}\}$ ，使得：第一，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）；生产部门 4~6 满足式（3）；最终品部门满足式（4）。第二，家户求解式（5）中的优化问题；第三，中间品市场、劳动力市场、资本市场和最终品市场出清。

（三）经济核算

1. 增加值

总增加值由四个部分构成，能源生产（包括能源部门 2 和 3）和三个产品部门（ $j=4\sim 6$ ）的生产。在国民经济核算中能源生产创造的产值属于第二产业，因此：

$$VA_{a,t} = VA_{4,t}, \quad VA_{m,t} = VA_{2,t} + VA_{3,t} + VA_{5,t}, \quad VA_{s,t} = VA_{6,t}.$$

其中， $VA_{a,t}$ 、 $VA_{m,t}$ 、 $VA_{s,t}$ 分别表示第一、二、三产业的增加值。

2. 二氧化碳排放

参考目前学界和业界的做法（陈诗一，2009；Golosov 等，2014；莫建雷等，2018），

^① 投入产出表数据显示，能源购买在居民消费支出中的比例保持稳定，因此与 Golosov 等（2014）一致，我们将能源品与三大产品进行柯布道格拉斯加总。

利用如下公式对二氧化碳总排放量进行估算：

$$Carbon_t = \sum_i \frac{E_{i,t}}{E_t} \times E_t \times \eta_i。$$

其中， η_i 表示能源 i 的碳排放强度^①。

四、模型校准

（一）能源需求结构参数

我们搜集了 2007~2016 年不同类别能源品的价格数据和企业层面的能源品消费量数据，对不同产业能源间的需求替代弹性进行估计。企业层面能源品消费量数据来自《全国企业税收调查数据》。参照现有文献的做法（康继军等，2021；Sun 等，2019），使用迪拜原油年度价格作为代表性石油价格，数据来源于世界银行；使用秦皇岛港动力煤年度价格作为中国代表性煤炭价格，数据来源于秦皇岛煤炭网。最后，使用分省份的年度平均销售电价作为代表性电力价格，数据来源于国家能源局。文献表明，中国不同能源间的替代弹性水平较低，并且电力和化石能源之间的替代性关系和化石能源内部的替代关系有显著差异。因此，本文对能源采用非对称 CES 加总，先将煤炭和石油加总为化石能源，再将其和绿色能源加总：

$$\mathcal{F}_{j,t}(E_{j,1,t}, E_{j,2,t}, E_{j,3,t}) = \left\{ \kappa_{j,d,t} \left[\kappa_{j,1,t}^{\rho_j} E_{j,1,t}^{\xi_j} + (1 - \kappa_{j,1,t}) E_{j,2,t}^{\xi_j} \right]^{\rho_j / \xi_j} + (1 - \kappa_{j,d,t}) E_{j,3,t}^{\rho_j} \right\}。$$

其中， $i=1\sim 3$ 依次表示油气、煤炭和绿色能源， $j=4\sim 7$ 依次表示三大产业和最终消费。我们考虑了产业中能源使用偏好的相对变化，由 $\kappa_{j,d,t}$ 和 $\kappa_{j,1,t}$ 共两个权重参数表示^②。第一，这种偏好的变化体现了不同能源利用效率的有偏变化，即厂商对某种能源的利用效率相对上升（Acemoglu 等，2012；孙巍和夏海利，2023），用 $\kappa_{j,i,t}^n$ 表示。第二，数据显示在 2013 年后这种能源使用偏好发生了更加明显的变化，我们认为这可能是 2013 年后的一系列调控措施导致的。随着“绿色发展理念”的提出，中国实施了一系列对各类能源使用存在倾向性的政策，对煤炭的限制尤为明显^③。我们将政策因素导致的能源使用偏好的变化记为 $\kappa_{j,i,t}^t$ ，则：

$$\kappa_{j,i,t} = \kappa_{j,i,t}^n, \text{ 如果 } 2009 \leq t \leq 2013; \kappa_{j,i,t} = \kappa_{j,i,t}^n + \kappa_{j,i,t}^t, \text{ 如果 } t \geq 2014。$$

假设 $\kappa_{j,i,t}$ 的变化规律满足^④：

$$\frac{\kappa_{j,i,t+1}}{1 - \kappa_{j,i,t+1}} = (1 + g_i^n) \times \frac{\kappa_{j,i,t}}{1 - \kappa_{j,i,t}}, \text{ 如果 } 2009 \leq t \leq 2013;$$

$$\frac{\kappa_{j,i,t+1}}{1 - \kappa_{j,i,t+1}} = (1 + g_i^n + g_i^t) \times \frac{\kappa_{j,i,t}}{1 - \kappa_{j,i,t}}, \text{ 如果 } t \geq 2014。$$

我们使用 $\kappa_{j,i,2009}$ 匹配了 2009 年的能源结构，使用 g_i^n 和 g_i^t 匹配了 2009~2013 和 2014~2020 年间的能源结构的变化趋势。可见， g_i^t 捕捉了 2013 年后由于政府的一系列相关调控措施带来的能源结构变化。这一做法相当于将政策干预建模为企业能源选择问题中的一项“楔子”，

① 消费来自能源品类 i 的一单位能源所释放的二氧化碳量。

② 这一函数形式参考了有偏技术进步相关文献（Acemoglu，2002）。

③ “绿色发展理念”最早提出于 2013 年中央城镇化工作会议，之后这一理念进入“十三五”规划。之后，中国对煤炭产能、钢铁产能等高排放产能进行了限制，相关项目需由国家发改委进行审批，在这一背景下，山西和河北这类煤炭、钢铁大省在 2013 年后的经济都受到了较大的冲击、相关产能也迅速下降。

④ 这一分段的函数形式参考了 Jiang 等（2022），即由于政策原因导致模型参数变化趋势发生改变。

附录中展示了这一设定的微观基础。

下面利用厂商的一阶条件估计出石油、煤炭之间的需求替代弹性和化石能源、清洁能源之间的需求替代弹性^①，完整的估计过程见附录。结果显示，第一、二、三产业化石能源与清洁能源的替代弹性分别为 0.011、0.155、0.119，而煤炭与石油的替代弹性分别为 1.284、1.031、0.653。在居民消费端，我们借鉴了一些代表性文献的结果，将清洁能源和化石能源之间的替代弹性校准为 0.311、将石油和煤炭之间的替代性校准为 0.529，具体过程见附录。

（二）其他参数校准

1. 生产端参数

第一，用“煤炭开采和洗选业”和“炼焦业”代表煤炭部门，用“石油和天然气开采业”和“石油、核燃料加工业”代表油气部门，用“电力、热力的生产和供应业”代表电力部门，并将上述部门合并为能源部门。利用 2010~2020 年间的《全国投入产出表》，计算各产业总投入中来自能源部门中间品的比例，校准 $v_4=0.0168$ ， $v_5=0.0945$ ， $v_6=0.0236$ ， $v_7=0.0079$ 。第二，根据代表性文献测算的分产业劳动份额校准 $\alpha_4=0.1432$ ， $\alpha_5=0.5355$ ， $\alpha_6=0.4597$ ，具体过程见附录。第三，参考徐朝阳和王韡（2021），最终品厂商采用非对称 CES 加总，先将第二、三产业产品加总为非农产品，再将其和农产品加总^②：

$$\mathcal{G}(Y_{4,t}, Y_{5,t}, Y_{6,t}) = \left\{ \omega_a Y_{4,t}^\varepsilon + (1 - \omega_a) [\omega_5 Y_{5,t}^\gamma + (1 - \omega_5) Y_{6,t}^\gamma]^\varepsilon / \gamma \right\}^{1/\varepsilon}。$$

我们选取了一些代表性文献估算结果的平均值，校准 $\varepsilon=0.4$ ， $\gamma=-1.5$ ，具体过程见附录。

2. 禀赋参数

第一，根据陈昌兵（2014）校准 2009 年资本产出比为 2.85，并取折旧率 $\delta=0.06$ 。第二，将 2009 年的劳动力标准化为 100，根据《中国统计年鉴》的全国总人口数量得到 $\{L_t\}$ 。第三，根据 1979~2020 年的迪拜原油价格校准油气进口价格的年均增速为 3.51%，而价格的绝对值用来匹配能源消费量。第四，Acemoglu 等（2006）指出发展中国家在距离技术前沿较远的发展初期可以通过引进和学习的方式实现较高的进步速度，而后逐渐放缓。因此允许各部门技术进步速度随时间衰减：

$$A_{i,t+1} = A_{i,t} \times (1 + g_{i,t})， \quad g_{i,t} = g_{\psi_i,2009} \times e^{-\psi_i(t-2009)}。$$

每个部门的技术水平序列由初期水平 $A_{i,2009}$ 、初期增速 $g_{i,2009}$ 、变化趋势 ψ_i 共三个参数决定。对于煤炭或绿色部门，使用这三个参数匹配两种能源 2009 年的价格和其在 2009~2015 年、2015~2020 年价格的变化共三个矩条件；对于三大产业部门，使用这三个参数匹配各个产业 2009 年的增加值和其在 2009~2015 年、2015~2020 年增加值的变化共三个矩条件。校准结果显示，样本期内煤炭和绿色能源的年均技术进步率分别为 1.1%和 12.0%，三大产业的年均劳动生产率增速分别为 0.3%、5.7%和 1.5%，与文献一致^③。

① 由于中国的绿色能源最终都需要转化为电力形式进入生产和消费环节（核电、水电、太阳能等），因此绿色能源与化石能源的需求替代弹性等价于电力与化石能源的需求替代弹性。

② 这里我们选择使用相对价格效应生成模型中的结构转型，Ngai 和 Pissarides（2007）、Acemoglu 和 Guerrieri（2008）、Ju 等（2015）等是这一支文献的开创性代表。国内利用这一效应对中国结构转型特征进行刻画的代表性文献有郭凯明等（2017）、徐朝阳和王韡（2021）等。特别的，徐朝阳和王韡（2021）指出农业和非农业之间是替代关系，而制造业和服务业之间是互补关系，因此模型中可以同时生成“农业和服务业的相对价格都在上升”而“农业比重下降、服务业比重上升”的特征事实。

③ 在能源部门中，煤炭的生产率增速较低而绿色部门生产率增速较高；在产业部门中，工业部门生产率增速最快，服务业和农业则增速较低（Golosov 等，2014；徐朝阳和王韡，2021；中国经济增长前沿课题组，2022）。

3. 动态参数

代表性家户的欧拉方程为：

$$\chi_t C_t^{-\theta} = \beta(r_{t+1} + 1 - \delta)C_{t+1}^{-\theta}.$$

根据文献的做法，我们引入一项动态投资楔 $\{\chi_t\}$ 来解释数据和跨期欧拉方程之间存在的缺口，用来匹配中国的储蓄率。这一做法被广泛应用于新古典增长模型的量化研究，例如 Cole 等（2002）、Cheremukhin 等（2017）、García 等（2021）分别用这一方法研究了新古典增长模型在英美、俄罗斯和整个世界范围内的解释力。本文取 $\beta=0.99$ ， $\theta=1$ ，然后校准 $\{\chi_t\}$ 。结果显示，投资楔在 1 上下浮动，2009~2019 年均值为 1.01>1，与文献相符，认为这是中国在发展阶段早期金融市场不完备的体现。

4. 碳排放参数

附表 2 展示了国家发展和改革委员会能源研究所、IPCC 和陈诗一（2009）公布的能源排放强度，之间的差距较小。本文将其取平均得到煤炭、石油、天然气、绿色能源的排放强度分别为 0.765、0.584、0.446、0 万吨碳/万吨标准煤，再按照二氧化碳的分子量 44 和碳原子的分子量 12 进行调整，得到各类能源的二氧化碳排放系数。

（三）校准结果

表 1 展示了主要结构变量的校准结果。第一，模型匹配了中国 2009~2020 年第一、二产业增加值占比下降、第三产业增加值占比上升的特征事实。特别地，模型较好地拟合了能源部门增加值从 2009~2020 年间从 5%下降到 3.5%的趋势。第二，模型匹配了中国 2009~2020 年间不同产业的能源消费量。其中，第二产业能源消费占总能源消费的 70%左右，这一比例从 2010 年的 74%左右下降到 2020 年的 68%左右，与其增加值占比的下降是同步的。第三，模型匹配了中国一次能源结构的变化。值得一提的是，在较短的十年时间内，中国绿色能源在能源消费中的占比迅速从 8.4%左右上升到 15.9%左右。另外，模型也匹配了中国 2009~2020 年间 7.16%的年均经济增速、3.62%的年均能源消费增速和 44.85%的年均储蓄率。

表 1 宏观结构变量校准结果 (单位：%)

变量	2010 年		2020 年		
	数据	模型	数据	模型	
产业结构	第一产业	9.300	9.374	7.700	6.873
	第二产业	46.500	46.213	37.800	38.158
	第三产业	44.200	44.414	54.500	54.970
能源消费结构	能源产业	5.011	4.805	3.545	3.187
	第一产业	2.015	1.998	1.859	1.854
	第二产业	74.009	73.395	68.621	68.438
能源结构	第三产业	13.864	13.751	16.601	16.556
	居民消费	10.112	10.856	12.920	13.151
	煤炭	70.873	70.820	56.756	56.739
	油气	20.740	20.760	27.304	27.306
	绿色	8.387	8.419	15.940	15.955

注：产业结构使用各产业增加值占比衡量，能源消费结构使用各产业能源消费量占比衡量，能源结构使用各产业能源消费量占比衡量。

图 4 展示了模型对中国 2009~2020 年二氧化碳排放量的拟合结果。按照本文的测算，截至 2020 年中国的二氧化碳排放量达到 106 亿吨。本文的测算沿用了陈诗一（2009）和莫建雷等（2018）的方法，即利用一次能源消耗量进行推测。我们发现这一结果与其他方法的测算结果基本一致，例如：《中国碳核算数据库》估算中国 2020 年的二氧化碳排放量在 99~100 亿吨左右，欧盟《EDGAR 数据库》记载中国 2020 年的碳排放量为 116.8 亿吨，而世界银行编制的《世界发展指标》测算中国 2019 年的碳排放量为 107 亿吨。

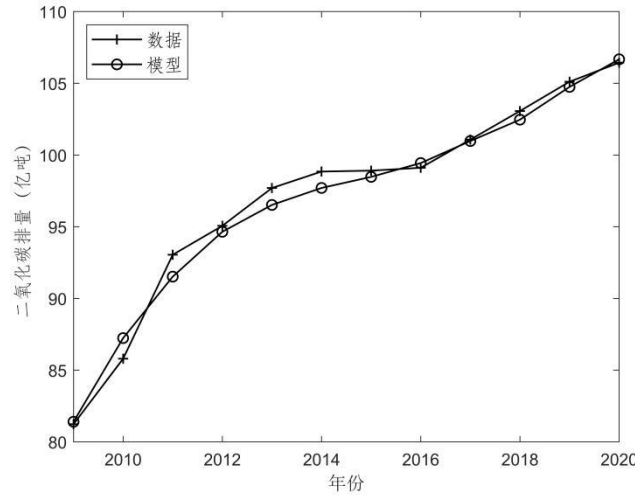


图 4 二氧化碳排放量：模型拟合结果

五、双重结构转型机制与最优碳税设计

这一章节展示了基于校准模型开展的一系列分析。第一，我们通过构建核算框架，拆解了中国能源与产业结构转型的动力机制。第二，我们分析了双重结构转型对碳排放的影响。第三，我们模拟了未来中国一次能源结构转型过程和碳排放演变趋势，并讨论了双碳目标下的碳税设计。第四，我们提供了模型拓展和稳健性分析。

（一）双重结构转型机制分解

1. 能源结构转型机制分解

能源 i 占总能源消费的比例可以写为：

$$\frac{E_{i,t}}{E_t} = \frac{\sum_{j=4}^7 E_{j,i,t}}{E_t} = \sum_{j=4}^7 \frac{E_{j,t}}{E_t} \times \frac{E_{j,i,t}}{E_{j,t}}$$

其中， $i=1\sim3$ 依次表示油气、煤炭和绿色能源，而 $j=4\sim7$ 依次表示三大产业和最终消费。可见，某种能源占总能源消费的份额一方面取决于产业间的能源配置，另一方面取决于各个产业内对不同能源品的使用。用 $\Delta X_t = X_t - X_{t-1}$ 表示 X_t 的绝对变化量，得到^①：

$$\Delta \frac{E_{i,t}}{E_t} \approx \sum_{j=4}^7 \Delta \frac{E_{j,t}}{E_t} \times \frac{E_{j,i,t}}{E_{j,t}} \quad (\text{能源结构变迁的广延边际})$$

^① 这一分解方法在各类宏观核算中被广泛应用（Jiang 等，2022；García 等，2021；郭凯明和王钰冰，2022；刘维林，2022；郭凯明等，2017）。我们按照文献中的标准做法（Liu，2019；Jiang 等，2022；段玉婉等，2023），仅保留一阶效应，使用约等号（ \approx ），后文相关的表达也出于同样的原因使用约等号。

在 2009~2020 年间，能源结构的整体变化趋势是油气和绿色能源逐渐代替煤炭能源，其中煤炭在能源消费中的占比下降了 14.57%，而油气和绿色能源则分别上升了 6.76%和 7.80%。平均来看，“能源结构变迁的广延边际”大约解释了 10%左右的能源结构转型，而“能源结构变迁的集约边际”解释了约 90%。在“能源结构变迁的广延边际”中，产业结构效应占据了主导，而在“能源结构变迁的集约边际”中，能源价格的集约边际效应和能源利用效率效应占据了主导。

在能源结构转型的研究中引入产业结构变迁效应是本文的主要创新点之一，而我们的定量分析显示这一效应具有很强的经济显著性，对能源结构转型的贡献达到约 12%。从三类能源各自的转型过程来看，产业结构变迁效应对煤炭、油气和绿色能源转型过程的贡献分别达到了 11%、23%和 1%。可见产业结构转型主要推动了煤炭能源向油气能源的转移，其中的主要原因在于：第二产业向第三产业的转型升级是中国过去十几年间的主要结构转型趋势，而由于第二产业大量依赖煤炭、第三产业大量依赖油气，因此这一产业转型过程减少了生产端能源对煤炭的需求而增加了油气的需求。

表 2 能源结构转型机制分解

能源种类	占比变化	能源结构变迁的广延边际		能源结构变迁的集约边际		
		产业结构变迁效应	能源价格的广延边际效应	能源价格的集约边际效应	能源利用效率效应	政策干预效应
煤炭	-0.146 (100%)	-0.016 (11%)	+0.002 (-1%)	-0.062 (43%)	-0.054 (37%)	-0.019 (13%)
油气	+0.068 (100%)	+0.015 (23%)	-0.001 (-2%)	+0.020 (30%)	+0.026 (39%)	+0.008 (11%)
绿色	+0.078 (100%)	+0.001 (1%)	-0.000 (-0%)	+0.038 (48%)	+0.032 (42%)	+0.008 (10%)
平均贡献度	100%	12%	-1%	40%	39%	12%

注：每个单元格的上方展示了该效应带来的能源占比变化，下方括号中展示的是该效应的贡献度(%)，即每一个单位的占比变化中有百分之多少是该效应导致的；平均贡献度指的是该效应对三种能源占比变化贡献度的平均值。

2. 产业结构转型机制分解

在 2009~2020 年间，中国产业结构变迁的最显著特征是第二向第三产业的转移，第二产业的占比从 46.50%下降到 37.80%，而第三产业的占比从 44.20%上升到 54.50%。由于中国第一产业的占比基本稳定在 7%~9%左右，因此为了更清晰地展现产业结构的转型机制，我们将第二、三产业的相对比重作为主要分析对象。

在我们的研究框架中，产业结构的变化来自其产品相对价格变化带来的替代效应。这一效应最早由 Ngai 和 Pissarides (2007) 提出，并将其解释为不同产业生产率带来的差异，之

后 Acemoglu 和 Guerrieri (2008) 则提出不同产业的资本密集度不同, 因此资本的积累也会内生地改变不同产业的生产成本。本文在这些研究的基础上进一步加入了能源这一要素投入, 并引入了产业异质的能源密集度和能源结构, 因此产业能源结构的变化和能源品价格的变化都会通过影响生产成本, 进而带来相对价格的变化。上述因素共同驱动了经济体的产业结构转型, 下面的引理 2 分解了上述因素对中国产业结构变迁的贡献:

引理 2 定义 $\hat{X}_t = \Delta X_t / X_t$ 为 X_t 的相对变化量。在均衡中, 第二产业 (除能源部门) 向第三产业的转型可以被分解为三种机制: Ngai 和 Pissarides (2007) 提出的生产率效应、Acemoglu 和 Guerrieri (2008) 提出的资本深化效应、本文引入的能源价格效应:

$$\frac{\widehat{VA}_{5,t}}{\widehat{VA}_{6,t}} \approx \frac{\gamma}{\gamma-1} \times \left\{ \begin{array}{l} [(\hat{A}_{5,t} - \hat{A}_{6,t})] \quad (\text{Ngai 和 Pissarides, 2007}) \\ + [(\alpha_5 + \nu_5 - \alpha_6 - \nu_6) \times \widehat{W}_t + (\alpha_6 - \alpha_5) \times \hat{r}_t] \quad (\text{Acemoglu 和 Guerrieri, 2008}) \\ + [(v_6 \times \widehat{p}_{e_{6,t}} - v_5 \times \widehat{p}_{e_{5,t}})] \quad (\text{能源价格效应}) \end{array} \right.$$

产业面对的能源平均价格由其能源结构和各类能源品的价格决定, 因此能源价格效应可以进一步分解为能源结构效应和能源品价格效应:

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

证明见附录。根据引理 2 核算得到:

$$\begin{array}{rclcl} 100\% & \approx & 77.12\% & (\text{Ngai 和 Pissarides, 2007}) \\ (\text{第二、三产业占比相对变动}) & + & 17.62\% & (\text{Acemoglu 和 Guerrieri, 2008}) \\ & + & 3.93\% & (\text{能源价格效应}); \\ 3.93\% & \approx & 1.34\% & + & 2.59\% & 。 \\ (\text{能源价格效应}) & & (\text{能源结构效应}) & & (\text{能源品价格效应}) \end{array}$$

可见, Ngai 和 Pissarides (2007) 提出的生产率效应仍是在定量上最主要的结构转型因素, 即由于第二产业的技术进步更快而导致其价格下降, 解释了约 77% 第二产业占比的相对下降。从要素投入的角度来看, Acemoglu 和 Guerrieri (2008) 提出的资本深化效应和本文引入的能源价格效应分别解释了约 17% 和 4%。从定量的角度来看, 能源价格效应小于资本深化效应, 其中主要的原因在于各个产业中的能源份额较小, 在第二产业中约为 9%、第三产业中则仅约 2%, 因此能源价格的变化对于产品成本的影响相对也较小。总的来说, 本文在产业生产过程中引入了能源投入, 解释了约 4% 的第二产业向第三产业的转型过程, 并进一步区分了不同产业的能源结构, 发现其对这一过程的贡献达到约三分之一, 可见这一影响渠道具有显著的经济意义。

3. 小结: 双重结构转型之间的联系

能源结构的低碳化既是产业结构调整的动力, 也是产业结构变迁的结果。能源生产技术的进步改变了各类能源品的价格, 进而改变了各产业的生产成本, 这通过替代效应, 促进了产业结构的转型升级。与此同时, 产业结构的变迁改变了能源在不同产业间的配置, 提高了

能源在更加清洁的第三产业中的比重,这通过收入效应,加快了能源结构低碳化转型的速度,特别是促进了化石能源内部煤炭资源向油气资源的转型。在经济增长的过程中,能源和产业结构在不同的发展阶段内生演化、动态循环,共同推进了中国的绿色低碳发展。

(二) 双重结构转型与总量碳排放

能源和产业结构转型过程如何影响中国总量碳排放的发展趋势?根据碳排放的核算恒等式,能源结构直接决定了经济体在给定能源消费量下的碳排放。而产业结构对于碳排放的影响则更复杂:一方面,产业结构的变迁可以改变总能源需求,另一方面,产业结构的变迁可以影响能源结构。引理 3 基于上述思路给出了核算方法:

引理 3 ① 根据碳排放的核算式,其变化可以分解为:

$$\Delta Carbon_t \approx \Delta E_t \times \sum_{i=1}^3 \frac{E_{i,t}}{E_t} \times \eta_i + \sum_{i=1}^3 \Delta \frac{E_{i,t}}{E_t} \times \eta_i \times E_t \quad .$$

(能源消费增长效应) (能源结构变迁效应)

② 在均衡中,总能源消费由经济体总增加值、产业结构和一揽子能源价格决定:

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

因此,产业结构变迁可以通过影响总能源消费和能源结构两个渠道影响碳排放,其对总量碳排放的影响可以写为:

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

(产业结构变迁的能源消费效应) (产业结构变迁的能源结构效应)

证明见附录。根据引理 3 的第一条结论,总碳排放的变化可以分解为总能源消费的变化带来的增长效应和能源结构的变化带来的结构变迁效应:

$$25.27 \text{ 亿吨} \quad \approx \quad 37.73 \text{ 亿吨} \quad + \quad -11.38 \text{ 亿吨} \quad .$$

(二氧化碳排放量变化) (能源消费增长效应) (能源结构变迁效应)

核算结果显示,2009~2020 年间中国的碳排放共上升了 25.27 亿吨,其中能源消费的增长贡献了 37.73 亿吨,这主要是因为经济总量的上升;而能源结构的变化贡献了-11.38 亿吨,这是中国能源结构低碳化转型的减排成果。可见,在不限经济对能源的需求的前提下,能源结构的低碳转型是降低总量碳排放的最重要抓手。

根据引理 3 的第二条结论,我们可以直观地看到产业结构的变迁可以从两方面影响碳排放。第一,由于不同产业对于能源投入的依赖程度不同,因此产业结构的变迁可以影响能源的总需求。第二,由于不同产业内部的能源结构不同,产业结构的变迁也可以通过收入效应改变能源结构。核算发现:

$$-9.86 \text{ 亿吨} \quad \approx \quad -9.37 \text{ 亿吨} \quad + \quad -0.49 \text{ 亿吨} \quad .$$

(产业结构变迁间接减排) (通过影响能源消费) (通过影响能源结构)

可见,2009~2020 年间的结构转型过程总共实现了 9.86 亿吨的碳减排,其中通过减少能源消费实现减排 9.37 亿吨、通过影响能源结构实现减排 0.49 亿吨。在这一过程中,第二产业向第三产业的转型过程扮演了较为重要的作用。一方面,第二产业的能源强度为远高于第三产业,因此增加值从第二向第三产业的转移显著降低了中国单位 GDP 的能源消耗强度。

另一方面，第二产业的能源消费中煤炭占据的比例高达 80%左右，而这一比例在第三产业中仅为 35%左右，因此这一转型过程通过影响能源结构，在消耗同等能源的前提下释放更少的二氧化碳。

(三) 双碳目标下的碳税设计

1. 模型预测

图 5 展示了模型预测的 2009~2080 年间中国的产业结构与一次能源结构^①。第一，未来中国第二产业占比下降的速度显著减缓，并逐渐保持稳定^②。目前，中国第二产业占总增加值的比例约为 38%；在 2021~2030 年间，这一比例平均约为 36%，在 2031~2040 年间平均约为 34%；而在长期则基本稳定在 30%左右。第二，中国一次能源结构中石油天然气的占比存在倒 U 型演化：第一阶段主要表现为石油天然气对煤炭资源的替代；第二阶段表现为绿色能源对石油天然气资源的替代。根据模型预测，石油和天然气等资源在中国能源结构中的占比大约在 2038 年达到最高，约占 35%。这一特征是由中国的能源禀赋特点决定的，由于缺乏石油、天然气能源，中国不会形成欧美等国以石油为主的能源结构，相反地，石油天然气的稀缺性导致的价格上涨反而会促进中国的长期能源结构向核能、水能、风能等绿色能源转型，推动能源系统的安全发展和绿色转型。在转型期内，煤炭占比会逐渐下降，而绿色能源占比逐渐上升。到 2030 年，煤炭占比下降到 44%，而 2060 年这一比例仅为 15%左右；与此同时，绿色能源占比在 2030 年达到 23%，到 2060 年接近 60%。

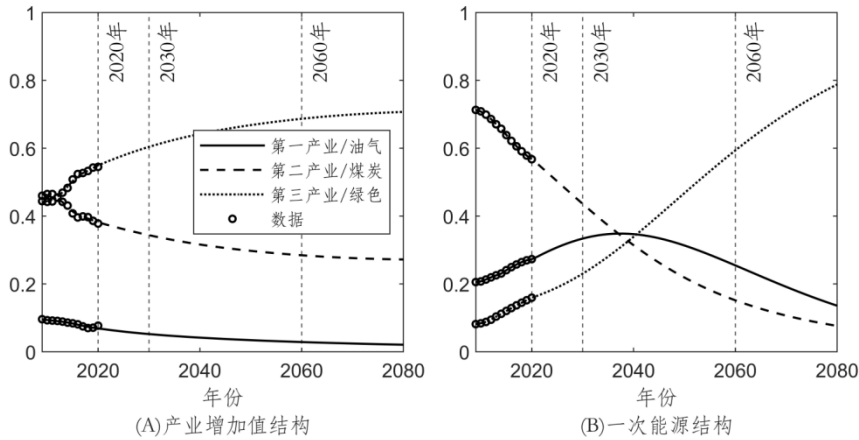


图 5 产业结构与能源结构预测

下面，我们讨论碳排放趋势。我们模拟了四种情形：① $\kappa_{j,i,t}^c=0$ 并且不加碳税，记为“零碳税”情形；②不加碳税，记为“现有碳税”情形；③ $\kappa_{j,i,t}^c=0$ 并且施加碳税 $\tau^{org}(t)$ ，使得碳排放路径与②相同，也为“现有碳税”情形；④施加碳税 $\tau^{opt}(t)$ ，使得在实现双碳目标的同时最大化居民福利，记为“最优碳税”情形。“碳税”是一种以碳排放量作为税基的税种^③，在我们的模型中，碳排放是能源消费产生的，因此我们假设政府可以在每一期对所有的能源

① 出于篇幅限制，分产业的能源结构预测见附图 2。

② 这与“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要提出的“制造业比重保持基本稳定”的要求一致。

③ 当前中国的碳税仍处于研究制定阶段，但提出“双碳”战略以来，已有多份文件中提及推动碳税制度落地。例如，2022 年国家发改委等七部门联合印发的《促进绿色消费实施方案》，提到“更好发挥税收对市场主体绿色低碳发展的促进作用”，明确了通过财税工具促进绿色低碳发展的工作思路。

厂商征收的税率为 $\tau(t)$ 的碳税，并将税收以一次性总付的形式返还给消费者^①。情形②给出了对于碳排放路径的预测，而情形④给出了碳排放的最优路径。我们额外设计了情形①和③，是希望回答：第一，已有政策实现了多少碳减排？第二，与未来可能征收的碳税相比，这些政策干预的力度如何？情形④的计算我们放在下一节中详细讨论。

图 6 中的带十字标记的实线展示了在不施加额外干预下，经济体未来的碳排放路径。预测结果显示，中国的碳排放量将于 2029~2031 年之间达峰，峰值约为 121 亿吨。可见中国按时实现“2030 年前碳达峰”是比较乐观的，在实现达峰前，中国还有大约 10 亿吨的排放空间。然而，2060 年中国的碳排放量仍有约 78 亿吨，因此实现“2060 年前碳中和”仍然是一个较为艰巨的任务。同时，根据计算，我们发现等价的碳税安排 $\tau^{org}(t)$ 为：2014 年的碳税约为 16 元/吨碳排放，之后线性上升，到 2020 年达到 116 元/吨碳排放。

图 6 中的带圆圈标记的虚线展示了政府不进行任何干预时，经济体的碳排放路径。根据模拟结果，2020 年不施加干预下的碳排放将达到约 119 亿吨，比现实情形高出约 13 亿吨。值得注意的是，在不施加干预的情形下，中国约在 2035 年左右碳达峰，峰值约为 150 亿吨。因此，现有的干预措施将达峰时间提前了五年，峰值降低了约 30 亿吨，可见当前的减碳政策是卓有成效的。

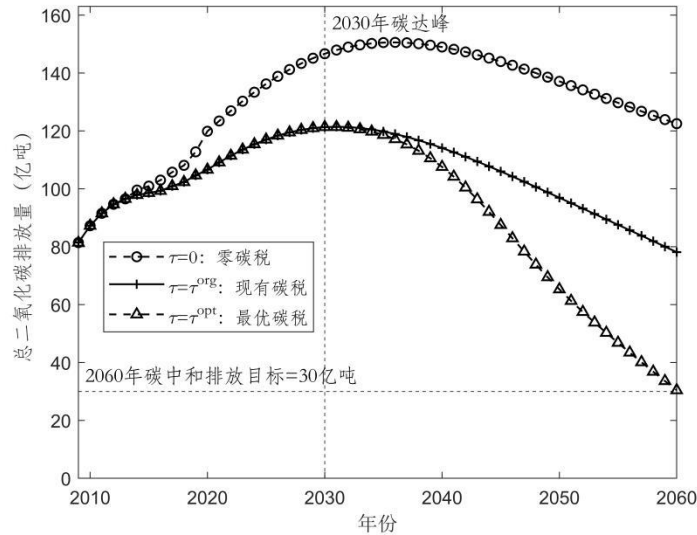


图 6 中国的碳排放路径

2. 居民福利最大化的碳税安排

由于按照目前的发展趋势，碳达峰将按时实现，但碳中和无法于 2060 年前实现，因此下面我们关注的核心问题是：如何设计一组碳税安排，使得在实现双碳目标的前提下最大化经济体中居民的永久折现福利，我们定义其为本文范畴下的“最优碳税”。碳中和指的是经济体的净碳排放为零，丁仲礼（2021）估算指出，中国 2060 年的碳排放量大约需要降低到约 30 亿吨以达到“净零排放”^②。根据模拟，碳达峰在 2030 年按时实现，因此我们假设政府为了实现“2060 年前碳中和”，从 2030 年开始征收碳税。由于未来的碳税安排是一个无

^① 在基准模型中碳税为零，我们将对包含碳税的完整模型描述放在了附录中。

^② 丁仲礼（2021）总结的碳中和框架路线指出：排放量=海洋吸收量+生态系统固碳量+人为固碳量+其他地表过程固碳量。

穷维的向量，无法使用标准的优化算法，因此我们使用一种参数化方法：

$$\tau^{opt}(t) = \underline{\tau} \cdot [1 - e^{-30\gamma}(e^{\gamma(t-2030)} - 1)] + \bar{\tau} \cdot e^{-30\gamma}(e^{\gamma(t-2030)} - 1), \text{ 如果 } 2030 \leq t \leq 2060,$$

$$\tau^{opt}(t) = \tau^{opt}(2060), \text{ 如果 } t > 2060.$$

这一函数形式的设定参考了 Itskhoki 和 Moll (2019)，整个时间路径上的税率由三个参数决定： $\underline{\tau}$ 和 $\bar{\tau}$ 分别衡量了初期和末期的税率水平， γ 衡量了税率的变化趋势。由于在 2060 年后整体的碳排放仍会逐渐下降，因此我们假设 2060 年后的碳税水平维持 2060 年的水平。

图 6 中的带三角标记的虚线展示了在最大化居民福利的碳税安排下，中国未来实现碳中和的碳排放路径：在 2040 年碳排放量下降到约 107 亿吨，在 2050 年下降到约 65 亿吨。表 3 展示了征收最优碳税的主要宏观经济影响。第一，经济增速轻微下滑。根据模拟，2040、2050、2060 年的经济增速将由于碳税的征收分别下降 0.03、0.09 和 0.04 个百分点。但在最优碳税的安排下，中国在 2060 年仍可以实现高达 3.17% 的经济增速。第二，能源结构转型速度加快。到 2050 年，征收最优碳税情形下煤炭的占比会下降 12.7%，而油气的占比会上升 5.3%。同时，在 2040、2050 和 2060 年，绿色能源在一次能源中的占比在征收最优碳税情形下较基准模型分别上升了 1.5%、7.4%和 11.0%。

表 3 最优碳税的宏观经济影响

变量	2040 年		2050 年	
	现有干预水平	征收最优碳税	现有干预水平	征收最优碳税
碳税税率（元/吨二氧化碳）	261	309	333	1232
碳排放量（亿吨）	114	107	97	65
经济增速（%）	4.068	4.039	3.531	3.442
煤炭占比（%）	31.422	28.058	21.884	9.086
油气占比（%）	34.675	36.516	31.337	36.691
绿色占比（%）	33.903	35.426	46.780	54.223

图 7 中的实线展示了最优碳税税率随着经济增长的变化。本文在一个动态框架下得到的最优碳税有一个显著的特点：早期的碳税税率上升速度较慢，后期随着经济水平的上升而快速上涨，呈现出比现有文献中更强的发展阶段依赖性^①。为何需要在早期维持较低的碳税税率？第一，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。第二，资本积累使得更多资本进入服务业，加快了第三产业的发展。第三，早期的碳税水平更低使得经济体的能源投入更多，尽可能多地利用了剩余的碳排放空间和能源使用空间，维持经济高速增长^②。当然，如果早期的碳税税率过低，会导致后期碳排放量更大，因此需要在后期施加更高的碳税税率以实现相同的碳排放水平。最优的碳税税率安排取决于跨期经济福利的权衡取舍，而在一个动态的框架下，经济体出于经济增长的考虑，最优的碳税税率在早期上升较慢。

^① 例如，张希良等（2022）使用 CGE 框架计算了碳中和背景下中国的碳价。本文的最优碳税在早期上涨更慢、后期上涨更快：在 2030-2045 年间，本文碳税税率平均每年上涨 7%，在 2045-2060 年间平均每年上涨 21%；而张希良等（2022）的结果在 2030-2060 年间上升速度较为均匀，为 10%。

^② 我们在附录中使用一个数值例子解释了上述观点，见附图 3。

上述分析表明考虑经济发展的动态性是理解这一结论的关键。本文使用的模型框架本质上是一个多部门拉姆齐模型，内生的储蓄决策和产业结构变迁过程是内生经济发展动态的核心特征。为了进一步分析这两个因素对结论的影响，我们构建如下两个模型：第一，储蓄率外生给定的多部门索洛模型；第二，生产部门仅存在一个代表性厂商的单部门拉姆齐模型。出于篇幅限制，模型细节见附录。重新校准模型后，我们计算了最优的碳税税率路径，绘制了随着经济增长最优碳税税率的变化趋势，见图 7。可见，两种情形下最优碳税税率的发展阶段依赖性变弱。这是由于：第一，在一般均衡的框架下，一个较高的税率会导致居民的储蓄率下降；但在外生储蓄率的情形下，早期较低的税率并不会使得储蓄率上升，反而会导致后期的碳排放水平更高，需要征收一个更高的碳税。第二，在动态内生的产业结构情形下，经济发展过程中的资本积累会促使经济结构更多转向第三产业，而在单部门模型的设定下资本积累的福利效应变小，政府维持高速资本积累的动机变弱。

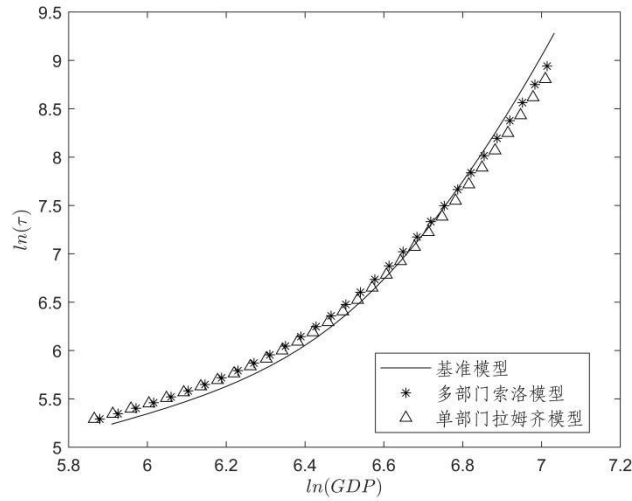


图 7 优碳税政策的发展阶段依赖性

（四）模型拓展与稳健性分析

限于篇幅，我们将这个部分展示在附录中。第一，我们讨论了模型的拓展，包括引入随时间变化的能源间替代弹性、不同的能源生产方式、以及产业内部的结构转型^①等。第二，我们展示了模型主要结论对于外生参数的稳健性，包括技术进步速度、人口变化趋势、国际市场的能源价格、碳中和目标的设定等。

六、总结与政策建议

通过构建一个包含内生能源与产业结构的多部门动态一般均衡模型，并将其定量校准到中国数据，本文研究了中国能源与产业结构的升级过程以及其与碳排放之间的关系。在我们的理论中，能源结构的低碳化既是产业结构调整的动力，也是产业结构变迁的结果，两者在经济发展过程中动态循环：能源生产技术的进步通过改变各产业的生产成本推动了产业结构转型，而产业结构转型从能源需求侧减少了高排放化石能源的使用。我们的定量评估结果显示，在 2009~2020 年间，宏观产业结构转型推动了能源结构的转变并显著降低了碳排放量，

^① 王勇、陈诗一和朱欢（2022）发现在 1990-2017 年间中国工业内部结构呈现出绿色发展的趋势。

其累计减少的碳排放量相当于 2020 年中国年排放量的 10%。进一步，我们研究了双碳目标下的碳税政策设计，结果表明：最大化居民福利的碳税税率随着经济增长而快速上升，具有显著的发展阶段依赖性，这意味着发展中国家在减排过程中应该在经济发展早期实行较低的碳税税率。这是因为，在较低的碳税税率下资本回报率会更高，有利于长期的资本积累、产业升级和经济增长。本文的研究结论为双碳目标下中国能源经济系统的协同发展和绿色转型提供了一定参考，并由此提出以下三方面政策建议：

第一，促进产业结构转型升级，积极发展低耗能和低碳产业，从能源需求侧推动双碳目标的实现。目前，中国经济正处于从高速增长向高质量发展的转型期，新的发展阶段强调绿色为优先、可持续发展为根本。生产活动是能源需求的主体，因此，需要系统地推进清洁生产，将绿色发展理念融入生产的各个环节，使生产活动转向能源强度更低、能源结构更清洁的行业，从而降低经济发展对于碳排放的依赖。对于一些传统行业，应该积极消除和淘汰一些落后的高耗能、高排放产能，同时大力推动技术创新、模式创新、标准创新，降低生产活动对化石能源的依赖，提升传统产业的绿色化水平。这一过程中，政府可以采取激励措施，通过提供补贴或税收减免等方式鼓励企业使用清洁能源，并完善引导绿色能源消费的相关制度和政策，推动传统行业的生产方式向更加低碳的方向转变。与此同时，应该加快发展新能源、新材料、高端装备制造等新兴的绿色低碳产业，形成节约资源和环保的产业结构，引领能源结构的低碳化。

第二，加快供给侧的绿色能源技术革新，以此带动绿色生产，实现产业和能源结构的协同转型。绿色能源技术是新一轮科技发展的关键领域，也是推动生产方式变革的重要动力。随着绿色能源的普及，相关产业如绿色建筑、可再生能源设备制造、新能源汽车制造等也将迅速发展，加快了资源节约型和低碳型的产业结构升级，有助于实现绿色能源技术链和产业链的深度融合。因此，应积极推动风电、光伏、储能等前沿绿色低碳技术的研发，坚持节能优先的能源发展战略，并完善能源科技创新体制机制。同时，应该建立健全有利于能源转型的市场体系，例如加快建设全国统一电力市场体系，充分发挥市场的筛选机制，在能源市场中淘汰传统的高排放高污染化石能源，引导低成本绿色能源的普及，推动经济社会发展方式的绿色转型，以实现产业和能源结构的协同转型升级，加速绿色发展进程。

第三，设计合适的政策工具，在碳减排过程中平衡经济增长，实现高质量发展。实现绿色低碳发展既是气候环境问题，也是经济发展问题。在当前阶段，推动经济高质量发展是首要的任务，这要求中国在保证碳减排的同时维持较高的经济增速。一方面，要积极抓住双碳目标带来的绿色发展机遇，以创造新的经济增长点。政府可以通过产业政策和金融支持，支持新兴绿色产业的壮大，包括激励绿色技术创新、投资环保基础设施和推动可再生能源产业的发展等等。另一方面，双碳目标对碳排放的限制可能对传统制造业的发展形成了一定约束，特别是一些重化工、钢铁材料等较为依赖能源投入的行业会受到一定的影响。当前，中国面临潜在增速下行、转换增长动力、经济结构调整与国际经济形势紧张等多重压力，政策的制定需要平衡经济发展、结构转型和碳减排等多重目标。双碳目标的实现是一个循序渐进的过程，涉及经济社会发展的方方面面，因此相关政策的实施应该重视统筹协调和动态调整，逐步推进碳减排工作。为了维持一个较高的经济增速和一个合理的经济结构调整速度，可以在早期实行相对较低的碳排放管制水平，随着中国经济增长进入新的阶段后，再逐步增强政策

力度，以期在完成碳减排目标的同时实现中国经济的高质量发展。

参考文献

- [1] 陈诗一.能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展[J].经济研究,2009,(4):41~55.
- [2] 陈昌兵.可变折旧率估计及资本存量测算[J].经济研究,2014,(12):72~85.
- [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] 段玉婉,蔡龙飞,陈一文.全球化背景下中国碳市场的减排和福利效应[J].经济研究,2023,(7):121~138.
- [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] 郭凯明,王钰冰.供需结构优化、分配结构演化与 2035 年共同富裕目标展望[J].中国工业经济,2022(1):54~73.
- [7] 蒋为,张明月,吉萍.中国工业污染排放的企业动态分解:技术进步、资源配置与选择效应[J].数量经济技术经济研究,2022,(12):153~172.
- [8] 靳玮,王弟海,张林.碳中和背景下的中国经济低碳转型:特征事实与机制分析[J].经济研究,2022,(12):87~103.
- [9] 康继军,郑丝月.仅用原油价格能否有效衡量能源市场冲击[J].世界经济,2021,(7):181~206.
- [10] 林伯强,姚昕,刘希颖.节能和碳排放约束下的中国能源结构战略调整[J].中国社会科学,2010,(1):58~71+222.
- [11] 刘维林.新发展格局下全球生产网络与劳动报酬份额变动[J].经济研究,2022,(10):86~102.
- [12] 莫建雷,段宏波,范英,汪寿阳.《巴黎协定》中中国能源和气候政策目标:综合评估与政策选择[J].经济研究,2018,(9):168~181.
- [13] 邵帅,范美婷,黄辉.中国城市化进程与碳排放达峰路径:1995~2035[J].中国经济学,2022(1):83~117+372~374.
- [14] 孙巍,夏海利.收入分布、环境政策与清洁技术转型[J].数量经济技术经济研究,2023,(10):115~136.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 姚昕,刘希颖.基于增长视角的中国最优碳税研究[J].经济研究,2010,(11):48~58.
- [18] 余典范,蒋耀辉,张昭文.中国碳排放权交易试点政策的创新溢出效应——基于生产网络的视角[J].数量经济技术经济研究,2023,(3):28~49.
- [19] 余壮雄,陈婕,董洁妙.通往低碳经济之路:产业规划的视角[J].经济研究,2020,(5):116~132.
- [20] 张伟,朱启贵,高辉.产业结构升级、能源结构优化与产业体系低碳化发展[J].经济研究,2016,(12):62~75.
- [21] 张友国.经济发展方式变化对中国碳排放强度的影响[J].经济研究,2010,(4):120~133.
- [22] 张希良,黄晓丹,张达等.碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J].管理世界,2022,(1):35~66.
- [23] 中国经济增长前沿课题组,张鹏,张平,张自然,薛村,刘霞辉.绿色优先战略下的增长路径探索与治理实践[J].经济研究,2022,(9):27~45.
- [24] Acemoglu D., 2002, *Directed technical change*[J], *The Review of Economic Studies*, 69(4),781~809.
- [25] Acemoglu D., Aghion P., Zilibotti F., 2006, *Distance to frontier, selection, and economic growth*[J], *Journal of the European Economic Association*, 4(1),37~74.
- [26] Acemoglu D., Guerrieri V., 2008, *Capital deepening and nonbalanced economic growth*[J], *Journal of*

Political Economy, 116(3),467~498.

[27]Acemoglu D., Aghion P., Bursztyjn L., Hemous D., 2012, *The environment and directed technical change*[J], American Economic Review, 102(1),131~66.

[28]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.

[29]Cole H., Ohanian L., 2002, *The US and UK Great Depressions through the lens of neoclassical growth theory*[J], American Economic Review, 92(2),28~32.

[30]García M., Pijoan J., Villacorta L., 2021, *Investment demand and structural change*[J], Econometrica, 2021,89(6),2751~2785.

[31]Golosov M., Hassler J., Krusell P., Aleh T., 2014, *Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium*[J], Econometrica, 82(1),41~88.

[32]Itskhoki O., Moll B., 2019, *Optimal development policies with financial frictions*[J], Econometrica, 87(1),139~173.

[33]Jiang S.Z., Miao J.J., and Zhang Y.Z., 2022, *China's housing bubble, infrastructure investment, and economic growth*[J], International Economic Review, 63(3),1189~1237.

[34]Ju J., Lin J. Y., Wang Y., 2015, *Endowment structures, industrial dynamics, and economic growth*[J], Journal of Monetary Economics, 76,244~263.

[35]Liu E., 2019, *Industrial policies in production networks*[J], The Quarterly Journal of Economics, 134(4),1883~1948.

[36]Nordhaus D., Yang Z., 1996, *A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate change strategies*[J], The American Economic Review, 741~765.

[37]Ngai R., Pissarides A., 2007, *Structural change in a multisector model of growth*[J], American Economic Review, 97(1),429~443.

[38]Sun C. W., Ding D., Fang X. M., et al., 2019, *How do Fossil Energy Prices Affect the Stock Prices of New Energy Companies? Evidence from Divisia Energy Price Index in China's Market*[J], Energy, 169,637~645.

Dual Transition of Energy and Industrial Structure under the Carbon Peaking and Neutrality Goals

JIANG Shenzhe DU Haofeng XU Mingzhi
(Institute of New Structural Economics, Peking University)

Summary: In the past decade, China's industrial structure has been transitioning towards an environmental-friendly direction. Meanwhile, various forms of green energy, such as wind and solar power, have been widely adopted. As a result, China's GDP growth rate has exceeded the growth rate of energy consumption, which in turn has exceeded the growth rate of CO₂ emission. By constructing a multi-sector dynamic general equilibrium model with endogenous energy and industrial structure and calibrating it to Chinese data, this paper investigates the interaction between energy and industrial upgrading and their relations with CO₂ emission.

In our theory, the transition of the energy structure is both a driver and an outcome of

industrial structural transformation. Technology progress in the green energy sector changes the production costs across different industries, accelerating the upgrade towards a low-carbon industry. Along with changes in industrial structure, economic activities shift the energy demand from manufacturing to the service sector, speeding up the transition to a low-carbon energy structure. Throughout the process of economic growth, energy and industrial structures evolve endogenously and dynamically at different stages, jointly contributing to China's economic growth.

We calibrate the model to match various important moments of the Chinese economy between 2009 and 2020, including GDP growth rate, saving rate, energy structure, industrial structure, input-output linkage, etc. We derive a first-order approximation to decompose the driving force of industrial structure transformation, energy structure transformation, and the growing CO₂ emissions trend. Our work comes to three findings. First, the transition of industrial structure contributes about 11% of the transition of energy structure. The contribution to each component, which includes coal, oil, and green energy, has reached 11%, 23%, and 1% respectively. Second, the changing price of energy inputs explains about 4% of the transformation process from manufacturing to service sector. Third, between 2009 and 2020, industrial structural transformation drove changes in energy structure and significantly reduced CO₂ emissions. During this period, the cumulative reduction in CO₂ emissions due to industrial structural transformation is approximately 1 billion tons, which is equivalent to 10% of China's annual CO₂ emissions in 2020.

Then, we use the calibrated model to predict China's industrial and energy structure from 2020 to 2080. First, the declining rate in the share of China's manufacturing sector will slow down and we predict a long-run share of the manufacturing sector around 30%. Second, the share of petroleum and natural gas in China's energy structure exhibits an inverted U-shaped evolution: the first stage mainly involves the substitution of petroleum and natural gas for coal resources, while the second stage features green energy replacing petroleum and natural gas resources.

Especially, we try to predict whether China will achieve the "carbon peaking and neutrality goals", which is committed by the Chinese government to strive for carbon peaking by 2030 and make efforts to achieve carbon neutrality by 2060. Our simulation results show that China's CO₂ emissions will peak between 2029~2031, with a peaking value of approximately 12.1 billion tons. However, by 2060, China's CO₂ emissions will still be around 7.8 billion tons, making it a challenging task to achieve "carbon neutrality by 2060".

To achieve carbon neutrality by 2060, we assume that the government can start imposing carbon taxes from the year 2030. Then, we used the calibrated model to solve for the carbon taxation plan that maximizes residents' lifetime welfare under the carbon neutrality goal. We find that the optimal tax rate rises rapidly with economic growth and exhibits significant stage dependency, which implies that a lower carbon tax rate should be implemented in the early stages of development. This is because lower carbon tax rates result in higher capital returns, which are conducive to long-term capital accumulation, industrial upgrading, and economic growth.

To conclude, this paper sheds light on the interactions between industrial and energy structures by developing a quantitative dynamic general equilibrium framework with endogenous energy and industrial structure. The conclusions of this paper provide direct

suggestions for the co-development of China's energy-economic system under the carbon peaking and neutrality goals.

Keywords: Carbon peaking and neutrality goals; Energy structure; Industrial structure; Carbon tax; Development stage

JEL Classification: E61; O41; Q43

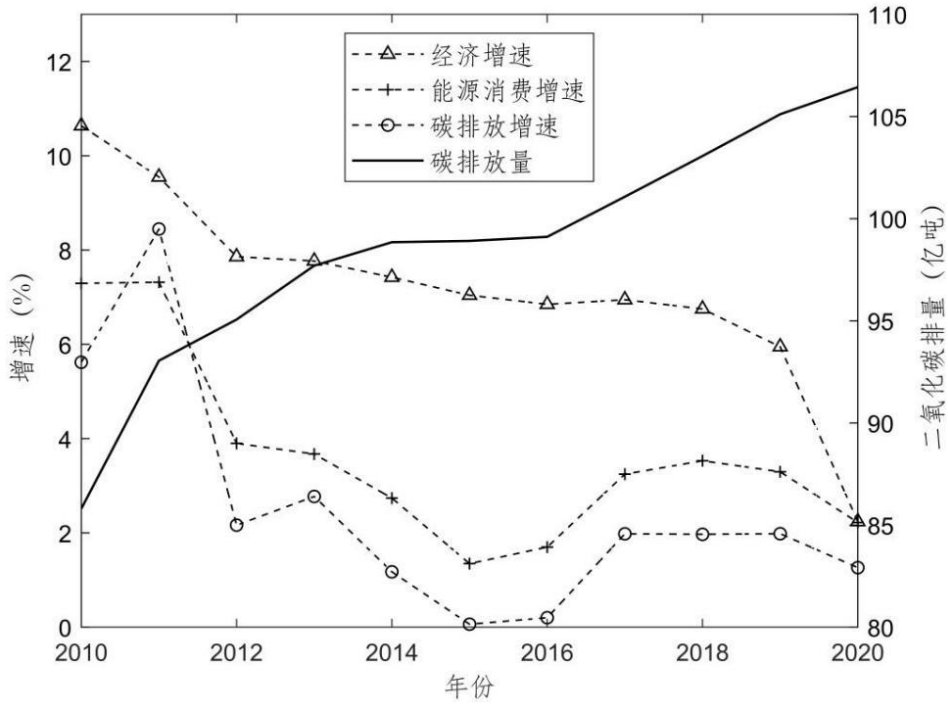
双碳目标下能源与产业双重结构转型

——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：

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

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

其中 α_1 和 α_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
$\sigma_{i,j}$	0.149*** (0.032)	0.011 (0.429)	0.155*** (0.033)	0.119 (0.228)	1.012*** (0.045)	1.284** (0.660)	1.031*** (0.047)	0.653*** (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 $\kappa_{j,i,t}^{\tau}$ 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 $\kappa_{j,i,t}^{\tau}$ 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是等价的。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：

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

一阶条件可以写为：

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

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 $\kappa_1^{\tau} > 0$ ：

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：

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

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：

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

一阶条件可以写为：

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

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 $\varepsilon=0.4$ ， $\gamma=-1.5$ 。

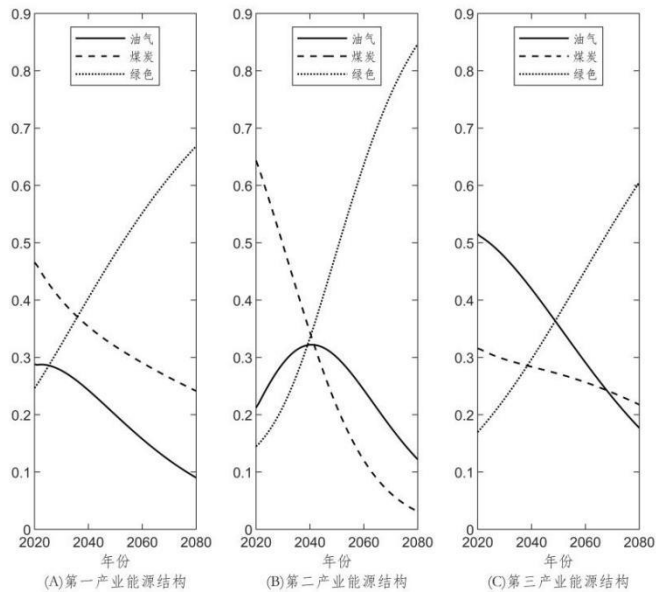
4. 能源排放强度

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		陈诗一 (2009)	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)		
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:

$$\text{油气部门: } \max p_{1,t}E_{1,t} - p_{\text{import}}E_{1,t} - \tau(t) * \eta_1 E_{1,t}$$

$$\text{煤炭部门: } \max p_{2,t}E_{2,t} - W_t l_{2,t} - \tau(t) * \eta_2 E_{2,t}$$

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：

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

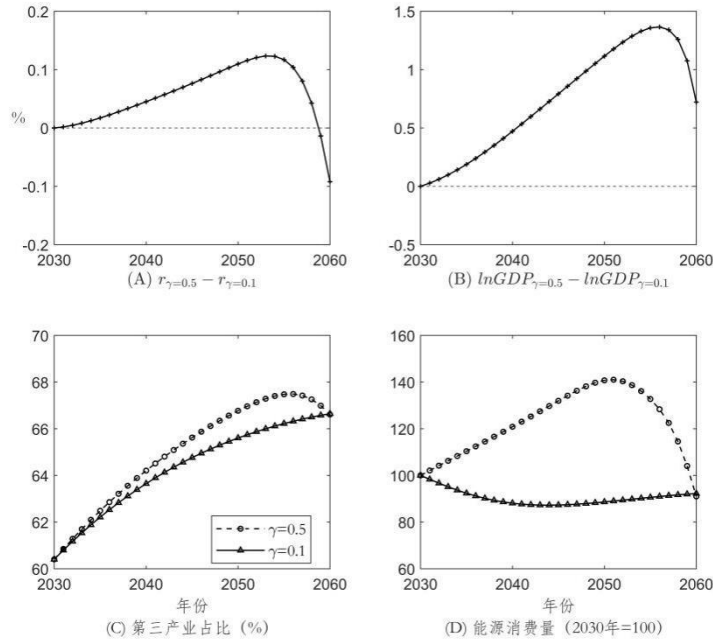
4. 最终品的出清条件：

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

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（ $j=4\sim 6$ ）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：

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

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我国能源结构的绿色化转型，因此也加快了我国的碳减排进程。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我国的能源强度和煤炭能源需求。受到我国目前的发展阶段、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 η_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：

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

代入 $E_t = \sum_{j=4}^7 E_{j,t}$ ，得到：

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

$$\frac{E_{j,t}}{E_t} = \frac{\frac{\left(\sum_{k=4}^6 \frac{VA_{k,t} * \frac{1}{1-v_k}\right) * \frac{v_7}{1-v_7}}{p_{-e_{7,t}}}}{\sum_{k=4}^6 \frac{VA_{k,t} * \frac{v_k}{1-v_k}}{p_{-e_{k,t}}} + \frac{\left(\sum_{k=4}^6 \frac{VA_{k,t} * \frac{1}{1-v_k}\right) * \frac{v_7}{1-v_7}}{p_{-e_{7,t}}}}, \quad j = 7.$$

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 $(p_{1,t}, p_{2,t}, p_{3,t}, \kappa_{j,d,t}^n, \kappa_{j,1,t}^n, \kappa_{j,d,t}^T, \kappa_{j,1,t}^T)$ 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：

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

对 ε_j 和 $J_{j,i}$ 进行一阶近似，我们得到：

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

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：

$$\frac{\omega_5}{1 - \omega_5} = \left(\frac{p_{5,t}}{p_{6,t}} \right)^\gamma \left(\frac{\frac{1}{1 - v_5} VA_{5,t}}{\frac{1}{1 - v_6} VA_{6,t}} \right)^{1 - \gamma}。$$

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：

$$\begin{aligned} \frac{\widehat{P}_{6,t}}{\widehat{P}_{5,t}} &\approx (\alpha_5 + v_5 - \alpha_6 - v_6) * \widehat{W}_t && \text{(劳动力价格效应)} \\ &+ (\alpha_6 - \alpha_5) * \widehat{r}_t && \text{(资本价格效应)} \\ &+ (v_6 * \widehat{p}_{-e_{6,t}} - v_5 * \widehat{p}_{-e_{5,t}}) && \text{(能源价格效应)} \\ &+ (\widehat{A}_{5,t} - \widehat{A}_{6,t})。 && \text{(生产率效应)} \end{aligned}$$

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：

$$\begin{aligned} \Delta p_{-e_{j,t}} &\approx \sum_{i=1}^3 \Delta p_{i,t} * \frac{E_{j,i,t}}{E_{j,t}} && \text{(不同能源价格变化导致产业能源成本变化)} \\ &+ \sum_{i=1}^3 \Delta \frac{E_{j,i,t}}{E_{j,t}} * p_{i,t}。 && \text{(产业能源结构变化导致产业能源成本变化)} \end{aligned}$$

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：

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

证毕。

引理 3 证明 ① 根据碳排放的核算式：

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

对上式进行一阶近似，得到：

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

② 在模型均衡中，根据厂商的利润最大化条件，可以得到：

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

上述关系记作：

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

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：

$$\begin{aligned}
&\left(\sum_{k=4}^6 \Delta \frac{VA_{k,t}}{TVA_t} * \frac{\partial e}{\partial \frac{VA_{k,t}}{TVA_t}} \right) * \sum_{i=1}^3 \frac{E_{i,t}}{E_t} * \eta_i。 \\
&\quad \text{(产业结构变迁的能源消费效应)}
\end{aligned}$$

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：

$$\begin{aligned}
&\sum_{i=1}^3 \left(\sum_{j=4}^7 \sum_{k=4}^6 \Delta \frac{VA_{k,t}}{TVA_t} * \frac{\partial \varepsilon_j}{\partial \frac{VA_{k,t}}{TVA_t}} * \frac{E_{j,i,t}}{E_{j,t}} \right) * \eta_i * E_t。 \\
&\quad \text{(产业结构变迁的能源结构效应)}
\end{aligned}$$

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：

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

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：

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

根据定义：

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

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：

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

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：

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

(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：

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

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：

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

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：

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

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,李尚鹭.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.