

内生生产网络、产业结构升级与碳排放*

杨光 孙浩宁 董丰

摘要：本文认为环境保护政策不仅可以降低碳排放，还可以重塑一国的产业分工与投入产出关系，是优化国家经济结构的重要手段。为了量化环境保护政策对于产业结构和碳排放的影响，本文构建了包含能源使用、碳排放以及内生生产网络的多部门一般均衡模型，分析了碳价（能源税）以及排放强度上限的变动对生产网络的重塑以及碳排放的影响，结果发现提升碳价和收紧排放强度上限均会导致高能源使用和高排放部门在投入产出关系中的重要性下降，实现产业结构的清洁化；在政策强度相似的情况下，提升碳价对产业结构和投入产出关系的影响更为显著，能带来更强的减排效果。具体而言，当各部门碳价均上升 10%时，通过价格效应降低碳排放为 9.09%，通过生产网络重构降低碳排放为 4.39%，共 13.48%；当各部门碳排放强度均收紧 10%时，通过排放强度效应降低碳排放为 9.90%，通过价格效应降低碳排放为 0.11%，通过生产网络效应降低碳排放为 0.27%，共 10.28%。通过考虑部分部门提高碳价或者收紧排放上限，以及引入其他冲击和资源错配，证明了本文的结果较为稳健。本文的研究不仅评估了环保政策的排放效果，还分析了其对于一国投入产出关系的重塑效果，为制定相应的政策制定提供了决策咨询。

关键词：内生投入产出网络 碳排放 碳价限制 碳排放强度限制 产业结构升级

JEL: E16, E17, Q41, Q58

一、引言

党的二十大报告指出，要“构建新一代信息技术、人工智能、生物技术、新能源、新材料、高端装备、绿色环保等一批新的增长引擎”。作为“增长引擎”，绿色产业不仅应实现自身的增长，还应通过生产网络影响整个宏观经济和产业结构。传统的经济理论认为，一国的产业结构或产业分工取决于技术水平、资源禀赋以及产业政策等，但是从生产实践上看，环境保护政策也是影响生产网络的重要因素。以发展中国家大量出现的“污染避难所”现象为例，高污染企业会从环保政策严厉的国家或者地区迁移到环保政策较为宽松的国家或者地区，还会进一步引起上下游产业的变化，从而改变国家的生产结构。因此，环保政策对于产业结构存在巨大的外溢影响。本文希望讨论环境保护政策是如何影响生产网络，并进而影响产业结构和碳排放的，以此评估环境保护的政策效果。

与外生的生产网络不同，内生生产网络不仅可以将各种冲击或政策影响分解到各个部分，还可以深入讨论生产网络的形成以及决定因素。Acemoglu & Azar(2020)指出由于利润最大化的动机，各参与主体会调整投入产出关系，进而产生内生的生产网络。对于影响生产网络的原因，Kopytov et al.(2021)将不确定性看作影响内生网络形成的重要因素，Baqae & Farhi(2020)以及 Caliendo et al.(2022)都将摩擦与资源错配视为形成内生生产网络的最重要的原因。对于绿色生产部门来说，对其降税或者补贴都会引发资源在各个部门之间的重新配置，所以必须使用内生性的生产网络方法来进行研究。因此，评估环保政策的效果不仅需要考虑部门间通过生产网络的相互影响，还需要考虑该政策对于生产网络形成的影响，即内生性的生产网络。

相比于影响生产网络的其他因素，环境保护政策确定性较强，还具有相当的紧迫性，因

*杨光，南开大学经济学院，邮政编码：300191，电子信箱：yangg@nankai.edu.cn；孙浩宁（通讯作者），清华大学经济管理学院，邮政编码：100084，电子信箱：sunhn22@mails.tsinghua.edu.cn；董丰，清华大学经济管理学院，邮政编码：100084，电子信箱：dongfeng@sem.tsinghua.edu.cn。

此值得重点研究。环境保护具有目标明确、可塑性强、路径较为固定等特点。与技术进步相比，环境保护政策具有明确的政策目标。在 2020 年 9 月，我国正式提出 2030 年“碳达峰”和 2060 年“碳中和”的目标，虽然我国在科技进步方面也制定了具体的战略规划，但是由于科学技术的进步具有不确定性，很难预先设定一个明确的目标。与资源禀赋相比，环境保护可塑性较大。Acemoglu et.al (2016) 认为，面向清洁生产与面向污染生产的发展趋势同时存在，足够大的碳税和清洁能源研发补贴将使得国家走上清洁生产的发展道路。而资源禀赋在正常情况下难以改变，例如一国的自然资源或人力资源在短期内几乎都无法改变。另外与其他政策相比，环境保护政策在中长期内可能是最为稳定的政策，货币政策与财政政策可以跟随经济周期调整，贸易政策与产业政策也可以根据经济形势与发展需要进行变动，而环境保护政策的政策路径是完全确定的。

既有研究关于环境保护政策对宏观经济影响的研究主要分为两种技术路线：一是以环境 DSGE (E-DSGE) 模型为主要研究方法，这类研究大多讨论经济在稳态周边波动的情况下的最优环境相关政策，但是这种方式很难描述我国碳减排对应的经济转型过程，同时也无法将冲击或者环境保护的效果分解到各个部门，因为它忽略了各个部门之间的投入产出关系，没有考虑生产网络；二是以可计算一般均衡 (CGE) 模型分析环保政策的影响，但这些模型普遍基于外生给定的生产网络，并未考虑环境政策变动情况下产业结构的内生变动。当生产网络随着经济条件的变化进行重构时，既有的社会核算矩阵 (SAM) 也会随之发生变化，如果不考虑这种变化将会得到有偏的评估结果。宏观经济学中著名的“卢卡斯批判”就描述过这种现象，因此内生的生产网络应该成为该领域的主要研究范式。

因此本文将部门间内生生产网络引入带有能源使用和碳排放的经济模型中，讨论碳价（能源价格）变动以及排放强度控制对部门间生产网络以及经济总排放量的影响。在模型中，部门间交易摩擦以及相对生产成本决定了内生投入产出网络的形式，而政策的变动通过影响部门生产成本改变部门间关系和经济产业结构。通过将模型中的内生生产网络与投入产出表相对应，本文实现了对模型对应的高维静态经济系统的求解。从环保政策具体实现方式上看，实现对碳排放量的控制目前主要有价格调控和强度调控等方面。在市场化价格调控方面，我国于 2017 年启动碳排放权交易，于 2021 年 7 月 16 日启动全国碳排放交易市场，同时世界各国也使用征收碳税或能源税等方式对能源的使用予以调控。在强度调控方面，党的十八届五中全会提出实行能源消耗总量和强度“双控”行动，2023 年 7 月 11 日的中央全面深化改革委员会第二次会议上又审议通过了《关于推动能耗双控逐步转向碳排放双控的意见》，进一步推进对碳排放总量以及强度的控制。所以本文的模型中将这两种环境保护手段都进行了研究和政策模拟。

本文通过理论分析发现，提高碳价和收紧排放强度上限均可以导致高排放（高能源投入）的部门在经济中的相对重要性下降，引导经济结构向低排放行业转移。在定量分析部分，通过将模型与 2015 年的 42 部门投入产出表相对应，本文研究了在我国碳价提升 10% 和排放强度上限收紧 10% 的政策效果。模拟发现碳价提升对部门间投入产出关系与产业结构有较大影响，而排放上限收紧虽然也会降低高排放部门在生产网络中的重要性，但程度相对较小。总体提升碳价 10% 会导致高排放部门在生产网络中的重要性（其他行业使用该部门中间品比例的平均值）下降 2.3%，而总体提升排放强度上限 10% 只会导致高排放部门在生产网络中的重要性下降 0.16%。在同样的政策强度（即都收紧 10%）的情况下，提高碳价的减排效果更加明显：总体碳价上升 10% 会导致整体碳排放下降 13.48%，其中 9.09% 是由于碳价上升带来的减排，另外 4.39% 来自碳价变动带来的生产网络重构；整体排放强度上限收紧 10% 会导致整体碳排放下降 10.28%，其中碳排放强度上限收紧的减排效果为 9.90%，排放强度上限变动导致生产成本变动的减排为 0.11%，产业结构重构带来的减排为 0.27%。对于每种政策，本文分别分析了对所有行业施加约束以及只对高排放行业施加约束的影响，结果表明

只对高排放行业施加环境政策约束更有利于实现产业结构的绿色化转型,但减排效果相对有限。在基准模型之外,本文考虑了两方面的扩展:一方面,本文将部门内企业异质性和部门内错配引入基准模型,讨论了排放强度上限收紧对部门内资源错配的影响。模拟发现排放强度收紧 10%会导致不同部门的 TFP 下降 0.05%-0.45%,其中高排放部门的 TFP 下降更大,从而放大了强度上限收紧的减排效果。另一方面,本文引入政策冲击外的外生生产率冲击,讨论环境政策与外生生产率冲击的相互作用。本文发现排放强度上限的存在可以作为“缓冲器”,降低技术冲击带来的产业结构变化和排放量增加。在不存在排放强度上限时,高排放行业的 TFP 提升 5%会导致 24.37%的碳排放提升;而存在排放强度上限限制的情况下,高排放部门的 TFP 提升 5%只会带来 16.36%的碳排放提升。

本文的主要贡献包括:理论上,本文创新性地将在内生生产网络引入包含碳排放的宏观模型中,求解了环境政策发生变化时经济内生投入产出关系和产业结构的变动,为分析环境政策对我国经济的影响提供了新的视角;定量上,本文基于 2015 年投入产出表进行了政策模拟,定量分析了各类环境政策对经济结构和碳排放的影响以及环境政策与外生冲击之间的相互作用,为全面评估不同环境政策提供了定量框架以及相关结论。在具体结论上,基于本文的理论模型和政策模拟,可以将单个政策的减排效果区分为政策本身的效应、部门价格变动的效应以及生产网络重构的效应,从定性和定量两个角度讨论了分析环境政策效果时内生生产网络和产业结构变动的重要意义,为讨论环保政策效果提供了新的视角补充。总体来说,相比于收紧减排强度,提高碳价产生的网络效应更加明显,这些结论可能为制定相关的环境保护政策提供决策依据。

本文后续的结构安排大致如下:第二部分进行文献综述,第三部分介绍理论模型以及理论结果,第四部分展示参数校准与政策模拟,第五部分讨论模型扩展,第六部分进行总结。

二、文献综述

本文主要讨论包含内生生产网络的情况下碳排放强度上限等政策对于经济投入产出结构以及总排放量的影响,与两方面文献相关:绿色经济以及生产网络对宏观经济的影响。

随着污染和全球变暖等问题的日益严重,大量经济学家开始探讨如何在传统的经济模型中考虑环境污染与排放因素,并以此讨论最优的环境监管政策。将能源、排放和污染引入传统模型的生产中主要有两类方法:第一类是将排放作为某种生产要素引入生产函数中,对应现实中对化石能源等的使用;另一种方法是将排放作为非期望的产出,与期望产出(如 GDP)一起引入生产过程,即生产结构不变,而排放是总产出的函数,排放造成的污染可能影响全要素生产率。这两种方法普遍将产业结构外生给定,难以分析政策带来的内生结构变动。

一些研究直接将资源或环境作为要素引入生产函数,污染对应着对某种能源要素或者环境要素的消耗。Mohtadi (1996)、陈诗一(2009)将环境作为一种生产要素,并认为资本的积累会消耗环境(污染)。姜国刚(2012)认为碳减排需要付出社会成本,并以此将碳减排纳入了资本积累方程。近年来,更多研究着眼于分析能源作为某种投入品情况下的最优政策应对,讨论了能源税等财政政策(Golosov et al., 2014; Barrage, 2020)以及针对污染的货币政策(Economides & Xepapadeas, 2018; Diluio et al., 2021)如何影响经济运行, Fischer & Springborn (2011)以及 Dissou & Karnizova (2016)讨论了不同环境政策的效果以及协同关系。Copeland and Taylor (1994)证明,在一定条件下,污染排放作为产出的副产品等价于经济中的另一种生产要素,从而将污染引入了生产函数当中。基于此结论, Tombe & Winter (2015)将污染引入生产函数,研究了排放强度上限对于经济中资源错配的影响。一些文章利用可计算一般均衡模型(CGE)来分析碳减排政策等对经济的影响(Goto, 1995; Floros et al., 2005; Guo et al., 2014; 贺菊煌等, 2002; 刘宇等, 2015; 张晓娣和刘学悦, 2015)。在这些文章中,能源作为某种投入品加入生产函数,而碳减排政策如碳税体现为对

能源要素的价格的扭曲。

另外一些研究将排放和污染作为非期望的产出（undesirable output），和期望产出（desirable output）一起被生产出来，从而引入生产和污染的权衡取舍。Chung et al.（1997）、Färe et al.（2007）和涂正革（2008）等认为生产同时会产出物质产出和污染，而减少污染面临社会成本，进而可以通过产出距离函数的方法分析最优的产出-污染组合。近年来有更多研究将污染引入传统的DSGE模型，构建环境DSGE（E-DSGE）模型，讨论各类环境相关的财政、货币、金融等政策对经济的影响。Heutel（2012）为这类模型提供了一个基础框架，即生产带来排放，排放提高污染，污染影响生产率。此后，大量文章讨论了常规财政货币政策（Annicchiarico & Di Dio, 2015, 2017; Chan, 2020; Rishanty et al., 2021）、非常规政策（Dafermos et al., 2018; Ferrari & Landi, 2023）以及绿色金融和信贷（Punzi, 2018; 王遥等, 2019）如何影响产出、污染等。周基航等（2023）在绿色部门引入资产泡沫，发现泡沫的存在有助于绿色部门扩张，可能提高经济增速。这类模型的好处在于可以方便地将排放因素嵌入传统的DSGE模型框架，从而研究环境相关的政策影响，但其缺陷在于，DSGE模型的研究基于稳态周边的泰勒展开，无法讨论经济结构的转型变动。如果希望研究环境政策对产业结构的影响，则需要讨论部门之内生的投入产出关系。

本文与生产网络的研究密切相关。由于经济中不同部门之间存在投入产出关系，对单个部门的政策会通过生产网络影响到经济中所有其他部门的生产以及排放。近些年来，有更多学者将生产网络结构引入传统模型中，讨论存在生产网络的情况下经济的动态以及政策的影响。Long & Plosser（1983）构建了N部门的一般均衡模型，为分析投入产出与宏观经济的关系提供了一般框架。基于此框架，国内外学者讨论了内外部冲击沿生产网络的传导（Horvath, 1998, 2000; Acemoglu et al., 2012; Baqaee, 2018; Baqaee & Farhi, 2018, 2019），带有生产网络的模型中财政货币政策的效应（Dong & Wen, 2019; 倪红福, 2021, 2022; Devereux et al., 2023）等问题。近年来，一些研究关注生产网络的内生形成，即投入产出关系可能由利润最大化或波动最小化内生产生（Acemoglu & Azar, 2020; Kopytov et al., 2021; Caliendo et al., 2022），并分析部门间摩擦对投入产出结构以及宏观经济的影响。

讨论带有污染和能源使用的生产网络研究相对较少，一些学者扩展传统的投入产出表，构建了包含能源与污染的投入产出模型，并利用静态的投入产出模型分析了不同政策的减排效果（Bullard & Herendeen, 1975; 廖明球, 2011; 严春晓等, 2018），这些研究大多基于静态的投入产出模型，并未考虑到政策变动导致的生产网络结构变动。

从以上文献梳理可以看出，现有的对绿色经济的研究往往忽视了生产结构的变动和部门之间的联系，最新的E-DSGE模型也大多只考虑绿色和非绿色两个部门，并且部门之间并不存在投入产出关系；而现有包含生产网络的研究大多未纳入环境因素和环境政策，有关带有环境的投入产出研究也大多基于外生静态的投入产出表，并未考虑监管政策下投入产出关系的内生变动。本文通过将能源使用和排放引入包含内生生产网络的模型当中，讨论碳价变动（能源税）和排放强度限制等政策对部门间生产网络关系的影响，并进一步分析碳价和排放强度限制如何影响产业结构、部门产出以及排放量。

三、理论模型

（一）含有能源使用和碳排放量的生产函数

参考Tombe & Winter（2015），给出包含碳排放的生产函数：

$$Y = AL^{\alpha\beta} M^{\alpha(1-\beta)} E^{1-\alpha},$$

其中 L 为劳动要素， M 代表生产过程中使用的其他部门中间品， E 代表生产过程中的排放量。可以将 E 理解为对化石能源要素的使用，因为化石能源的使用与碳排放具有高度相关性。

进一步地，本文讨论存在排放限制时生产函数的变化。考虑存在排放强度限制的情况，

即 $\frac{E}{Y} \leq s$ 。当存在排放强度限制时，有 $\frac{E}{Y} = s$ ，对应的资源分配满足：

$$\frac{E}{L^\beta M^{1-\beta}} = \min \left\{ (As)^{\frac{1}{\alpha}}, \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{c_0}{P^E} \right\},$$

其中 $c_0 = \left(\frac{w}{\beta}\right)^\beta \left(\frac{P}{1-\beta}\right)^{1-\beta}$ ， P 为中间品组合 M 的价格。显然，当部门生产率足够高时，排放限制不会影响生产函数，而生产率较低时，排放强度限制是紧约束，此时的生产函数为：

$$Y = A^{\frac{1}{\alpha}} s^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} L^\beta M^{1-\beta},$$

从而可以将排放上限理解为某种价格扭曲：

$$\frac{E}{L^\beta M^{1-\beta}} = \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{c_0}{P^E} \tau^e,$$

其中 $\tau^e = (As)^{-1/\alpha} \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{c_0}{P^E}$ 当且仅当 $A < \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{c_0}{P^E}\right)^\alpha \frac{1}{s}$ ，即 $s < \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{c_0}{P^E}\right)^\alpha \frac{1}{A}$ 。但要注意的是，这里的扭曲与传统的能源税不同。如果经济只存在能源税 τ^e ，则生产的边际成本为：

$$c = \frac{wL + PM + P^E E}{Y} = \frac{1}{A} \left(\frac{w}{\alpha\beta}\right)^{\alpha\beta} \left(\frac{P}{\alpha(1-\beta)}\right)^{\alpha(1-\beta)} \left(\frac{\tau^e P^E}{1-\alpha}\right)^{1-\alpha},$$

即能源税是对能源价格 P^E 的扭曲。而在存在排放上限时，经济的成本可以表示为：

$$\begin{aligned} c &= \frac{wL + PM + P^E E}{Y} = A^{\frac{1}{\alpha}} s^{\frac{\alpha-1}{\alpha}} \left(\frac{w}{\beta}\right)^\beta \left(\frac{P}{1-\beta}\right)^{1-\beta} + sP^E \\ &= \frac{1}{A} \left(\frac{w}{\alpha\beta}\right)^{\alpha\beta} \left(\frac{P}{\alpha(1-\beta)}\right)^{\alpha(1-\beta)} \left(\frac{\tau^e P^E}{1-\alpha}\right)^{1-\alpha} \left(\alpha + \frac{1-\alpha}{\tau^e}\right), \end{aligned}$$

除了价格扭曲外，排放强度上限的存在还带来了一项产出上的扭曲 $\alpha + \frac{1-\alpha}{\tau^e} < 1$ 。这是因为排放上限虽然像能源税一样改变了资源分配，但并不改变能源的实际价格。

在存在排放强度上限时，可以考察排放强度上限对边际成本的影响：

$$\frac{\partial c}{\partial s} = \frac{\alpha-1}{\alpha} A^{-\frac{1}{\alpha}} s^{-\frac{1}{\alpha}} \left(\frac{w}{\beta}\right)^\beta \left(\frac{P}{1-\beta}\right)^{1-\beta} + A^{\frac{1}{\alpha}} s^{\frac{\alpha-1}{\alpha}} \left(\frac{w}{\beta}\right)^\beta \left(\frac{P}{1-\beta}\right)^{-\beta} \frac{\partial P}{\partial s} + P^E.$$

不考虑排放上限对中间品价格的影响，有当 $s < \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{c_0}{P^E}\right)^\alpha \frac{1}{A}$ 时 $\frac{\partial c}{\partial s} < 0$ ，即排放上限的放松会导致排放的上升和企业生产边际成本的下降，如图 1 所示。相对应地，边际成本下降会导致其他部门更愿意使用本部门产品，本部门产量上升。

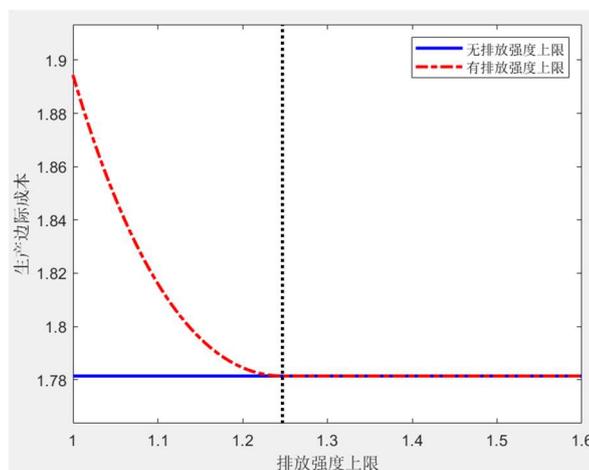


图 1：生产边际成本随排放强度上限增加而递减

注意在模型中，决定排放强度约束是否是紧约束的临界值 $s^* = \frac{1}{A} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{c_0}{P^E} \right)^\alpha$ 是内生的。但在一定条件下，可以用一个外生的临界值来代替这个内生的临界值。

定理 1： 假设 $\frac{\partial P}{\partial s} \leq 0$ ，即放松排放强度上限不会使得价格上升。令 P^* 为所有部门均不存在排放强度上限约束时的部门价格， $c_0^* = \left(\frac{w}{\beta} \right)^\beta \left(\frac{P^*}{1-\beta} \right)^{1-\beta}$ ，则

$$s^* = \frac{1}{A} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{c_0^*}{P^E} \right)^\alpha.$$

证明： 只需证明， $s > s^*$ 时排放强度上限约束并非紧约束， $s < s^*$ 是排放上限约束是紧约束。显然，当 $s = s^*$ 时，排放上限约束恰为紧约束。那么，首先考虑 $s < s^*$ 时的情况。此时假设排放上限约束严格紧，从而 $c_0 \geq c_0^*$ ，即 $\frac{1}{A} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{c_0}{P^E} \right)^\alpha \geq \frac{1}{A} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{c_0^*}{P^E} \right)^\alpha$ ，因此显然有 $s < \frac{1}{A} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{c_0}{P^E} \right)^\alpha$ ，即排放强度上限约束确实为紧约束。之后考虑 $s > s^*$ 的情况，假设此时排放上限约束为松约束，此时有 $c_0 = c_0^*$ ，即 $\frac{1}{A} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{c_0}{P^E} \right)^\alpha = \frac{1}{A} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{c_0^*}{P^E} \right)^\alpha$ ，因此显然有 $s > \frac{1}{A} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{c_0}{P^E} \right)^\alpha$ ，排放强度上限约束确实为松约束，证毕。

(二) 内生生产网络的推导与模型均衡

在本部分，本文参考 Caliendo et al. (2022)，将内生的投入产出关系引入模型。本部分中只考虑封闭经济的情况，开放经济结果类似，见第四部分。

假设经济中存在多个部门 $j \in \{1, 2, \dots, J\}$ ，部门 j 的生产函数为：

$$Q_j = A_j L_j^{\alpha_j \beta_j} M_j^{\alpha_j (1-\beta_j)} E_j^{1-\alpha_j},$$

部门中间品 M_j 是经济中所有部门产品的 CES 加总：

$$M_j = \left(\sum_k l_{jk} Q_{jk}^{\frac{\theta}{1+\theta}} \right)^{\frac{1+\theta}{\theta}},$$

其中 Q_{jk} 是 j 部门在生产中使用的 k 部门产品的量， l_{jk} 为加总权重。

根据生产函数的 Cobb-Douglas 形式，容易得到部门生产的平均成本为：

$$c_j = \frac{1}{A_j} \left(\frac{w}{\alpha_j \beta_j} \right)^{\alpha_j \beta_j} \left(\frac{P_j}{\alpha_j (1-\beta_j)} \right)^{\alpha_j (1-\beta_j)} \left(\frac{P_j^E}{1-\alpha_j} \right)^{1-\alpha_j},$$

其中 P_j 为部门 j 所面对的中间品总价格，可以证明， P_j 也是部门 j 产品的价格指数（见附录 1）。 P_j^E 为部门 j 的“碳价”。如果部门 j 要购买部门 k 的产品作为中间品（部门间资源流动），则存在冰山成本 κ_{jk} ，即单位中间品的成本为 $\kappa_{jk} c_k$ 。我们考虑封闭经济的情况，经济中总劳动力恒定，并且假设劳动力在部门间自由流动，因此 $\sum_j L_j = 1$ ，并且不同部门间工资恒定。这里我们认为工资为基准价格，并且将不同部门的工资标准化为 1，即 $w = 1$ 。

经济中代表性家庭无弹性地供给 1 单位劳动，获得工资、政府财政收入、部门利润以及对能源的投入。他们消费所有部门的产品，并且最大化其效用 $U(C)$ ，其中：

$$C = \prod_{j=1}^J C_j^{\chi_j}, \quad \sum_j \chi_j = 1.$$

注意这里 $U(C)$ 的形式并不重要，只需要满足 $U'(C) > 0$ 。

定义消耗系数：

$$\omega_{jk} = \frac{X_{jk}}{\sum_{h=1}^J X_{jh}}$$

为部门 j 生产中所消耗的 k 部门中间品金额占总中间品成本的比重。用 P_j 表示部门 j 生产的产品价格，对部门 j 生产最优化可以得到：

$$\max P_j Q_j - P_j^E E_j - w L_j - \sum_{k=1}^J \kappa_{jk} c_k Q_{jk}.$$

对 L_j 的一阶条件为：

$$\alpha_j \beta_j P_j Q_j = w L_j.$$

对 Q_{jk} 的一阶条件为：

$$\alpha_j (1 - \beta_j) P_j \frac{Q_j}{M_j} \iota_{jk} Q_{jk}^{-\frac{1}{1+\theta}} \left(\sum_h \iota_{jh} Q_{jh}^{\frac{\theta}{1+\theta}} \right)^{\frac{1}{\theta}} = \kappa_{jk} c_k.$$

将 Q_{jk} 和 Q_{jl} 的一阶条件作比可以得到：

$$\frac{\iota_{jk} Q_{jk}^{-\frac{1}{1+\theta}}}{\iota_{jl} Q_{jl}^{-\frac{1}{1+\theta}}} = \frac{\kappa_{jk} c_k}{\kappa_{jl} c_l},$$

从而有：

$$\left(\frac{X_{jk}}{X_{jl}} \right)^{\frac{1}{1+\theta}} = \frac{\iota_{jk} (\kappa_{jk} c_k)^{-\frac{\theta}{1+\theta}}}{\iota_{jl} (\kappa_{jl} c_l)^{-\frac{\theta}{1+\theta}}}.$$

因此得到直接消耗量的关系为：

$$\frac{X_{jk}}{X_{jl}} = \frac{(\tau_{jk} c_k)^{-\theta}}{(\tau_{jl} c_l)^{-\theta}},$$

其中 $\tau_{jk} = \kappa_{jk} (\iota_{jk})^{-(1+\theta)/\theta}$ ，因此可以得到消耗系数为：

$$\omega_{jk} = \frac{(\tau_{jk} c_k)^{-\theta}}{\sum_{l=1}^J (\tau_{jl} c_l)^{-\theta}},$$

带入 c_k 的表达式得到：

$$\omega_{jk} = \frac{\tau_{jk}^{-\theta} A_k^\theta \psi_k^\theta w^{-\theta \alpha_k \beta_k} (P_k^E)^{-\theta(1-\alpha_k)} P_k^{-\theta \alpha_k (1-\beta_k)}}{P_j^{-\theta}},$$

其中

$$\psi_j = (\alpha_j \beta_j)^{\alpha_j \beta_j} (\alpha_j (1 - \beta_j))^{\alpha_j (1 - \beta_j)} (1 - \alpha_j)^{1 - \alpha_j},$$

$$P_j = \left[\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} \psi_l^\theta A_l^\theta w^{-\theta \alpha_l \beta_l} (P_l^E)^{-\theta(1-\alpha_l)} P_l^{-\theta \alpha_l (1-\beta_l)} \right]^{\frac{1}{\theta}}.$$

为了方便分析，定义 $\gamma_j = \alpha_j \beta_j$ ， $\varphi_j = \alpha_j(1 - \beta_j)$ ，并假设 $\alpha_k = \alpha$ ， $\beta_k = \beta$ ，则：

$$\omega_{jk} = \frac{\tau_{jk}^{-\theta} A_k^\theta (P_k^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)} P_k^{-\theta\varphi}}{\left(P_j/(w\Psi_k)\right)^{-\theta}}.$$

同时，在消费者端也可以定义消费比例：

$$b_j = \frac{P_j C_j}{\sum_{k=1}^J P_k C_k} = \chi_j,$$

其中 P 为经济中总价格指数，满足：

$$P = \prod_{j=1}^I \left(\frac{P_j}{\chi_j}\right)^{\chi_j}.$$

对于碳排放，政府可以设定碳价 P_l^E ，由市场决定总排放量 $\bar{E} = \sum_j E_j$ ；也可以设定总排放量 \bar{E} ，由碳市场出清条件确定最终碳价。根据以上表达式，可以讨论在部门产品价格不变的情况下碳价变动的的影响。假设某一部门碳价变动，可以计算生产网络 ω_{jk} 的变化

定理 2： 假设 $\frac{\partial P_k}{\partial P_h^E} \geq 0$ ，即碳价的上升不会导致部门产品价格下降。那么当 $\frac{1}{P_h} \frac{\partial P_h}{\partial P_k^E} / \frac{1}{P_k} \frac{\partial P_k}{\partial P_k^E} < 1$ ，即本部门碳价变动对本部门价格影响比其他部门价格影响大时， $\frac{\partial \log \omega_{jk}}{\partial P_k^E} < 0$ ；同时，在价格效应满足额外条件的情况下（具体形式见附录），其他部门碳价变动对生产网络的影响满足 $\frac{\partial \log \omega_{jk}}{\partial P_h^E} > 0$ ，即某部门的碳价上升会导致其他部门更少使用该部门的商品，而更多使用其他部门的商品。

定理 2 证明见附录 2 (A)。

下面考虑存在碳排放强度约束的情况，为了方便分析，假设所有部门的排放强度上限都是紧约束，从而部门生产函数可以表示为：

$$Q_j = A_j^{\frac{1}{\alpha_j}} s_j^{\frac{1-\alpha_j}{\alpha_j}} L_j^{\beta_j} M_j^{1-\beta_j},$$

此时的部门生产成本为：

$$c_j = \frac{1}{A_j^{1/\alpha_j} s_j^{(1-\alpha_j)/\alpha_j}} \left(\frac{w}{\beta_j}\right)^{\beta_j} \left(\frac{P_j}{1-\beta_j}\right)^{1-\beta_j} + s_j P_j^E.$$

按照和之前一样的过程，可以求得对应的生产网络为：

$$\omega_{jk} = \frac{\tau_{jk}^{-\theta} \left(\mu_k A_k^{-1/\alpha_k} s_k^{-(1-\alpha_k)/\alpha_k} w^{\beta_k} P_k^{(1-\beta_k)} + s_k P_k^E\right)^{-\theta}}{P_j^{-\theta}},$$

其中

$$\mu_k = \beta_k^{\beta_k} (1 - \beta_k)^{1-\beta_k},$$

$$P_j = \left[\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} \left(\mu_l^{-1} A_l^{-1/\alpha_l} s_l^{-(1-\alpha_l)/\alpha_l} w^{\beta_l} P_l^{(1-\beta_l)} + s_l P_l^E\right)^{-\theta} \right]^{\frac{1}{\theta}}.$$

类似地，为了方便分析，假设 $\alpha_i = \alpha$ ， $\beta_i = \beta$ 。基于生产网络表达式，可以给出改变排放强度限制对生产网络结构的影响，具体形式见附录 2 (B)。

定理 3： 假设 $\frac{\partial P_k}{\partial s_h} \leq 0$ ，在价格效应满足 $\frac{1}{P_h} \frac{\partial P_h}{\partial s_k} / \frac{1}{P_k} \frac{\partial P_k}{\partial s_k} < 1$ 的情况下，有 $\frac{\partial \log \omega_{jk}}{\partial s_k} \geq 0$ ，即部

部门碳排放强度限制的放松会导致其他部门对本部门产品的利用占比上升;在价格效应满足另外的附加条件的情况下(具体形式见附录),有 $\frac{\partial \log \omega_{jk}}{\partial s_h} \leq 0$,即部门碳排放强度限制的放松会导致对另外的部门产品的利用占比下降。

定理 3 证明见附录 2 (B)。

接下来讨论只有部分部门采取排放强度限制时的情况。为了方便分析,假设 $j \in \{1, 2, \dots, I\}$ 的行业存在排放强度限制 s_j ,而 $j \in \{I+1, I+2, \dots, J\}$ 的行业不存在排放强度限制。那么企业的生产成本可以表示为:

$$c_j = \begin{cases} \frac{1}{A_j^{1/\alpha_j} s_j^{(1-\alpha_j)/\alpha_j}} \left(\frac{w}{\beta_j}\right)^{\beta_j} \left(\frac{P_j}{1-\beta_j}\right)^{1-\beta_j} + s_j P_j^E, & \text{if } j \in \{1, 2, \dots, I\} \\ \frac{1}{A_j} \left(\frac{w}{\alpha_j \beta_j}\right)^{\alpha_j \beta_j} \left(\frac{P_j}{\alpha_j(1-\beta_j)}\right)^{\alpha_j(1-\beta_j)} \left(\frac{P_j^E}{1-\alpha_j}\right)^{1-\alpha_j} & \text{if } j \in \{I+1, I+2, \dots, J\} \end{cases}$$

此时生产网络可以写作

$$\omega_{jk} = \frac{(\tau_{jk} c_k)^{-\theta}}{\sum_{h=1}^J (\tau_{jh} c_h)^{-\theta}}$$

当 $\alpha_j = \alpha$, $\beta_j = \beta$ 时,可以对上式进行化简。当 $k \in \{1, 2, \dots, I\}$ 时,

$$\omega_{jk} = \frac{\tau_{jk}^{-\theta} \left(\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha_k} s_k^{-(1-\alpha_k)/\alpha_k} w^{\beta_k} P_k^{(1-\beta_k)} + s_k P_k^E \right)^{-\theta}}{P_j^{-\theta}}$$

当 $k \in \{I+1, I+2, \dots, J\}$ 时,

$$\omega_{jk} = \frac{\tau_{jk}^{-\theta} \psi_k^\theta A_k^\theta w^{-\theta \alpha \beta} P_k^{-\theta \alpha(1-\beta)} (P_k^E)^{-\theta(1-\alpha)}}{P_j^{-\theta}}$$

其中:

$$\psi_j = (\alpha_j \beta_j)^{\alpha_j \beta_j} (\alpha_j(1-\beta_j))^{\alpha_j(1-\beta_j)} (1-\alpha_j)^{1-\alpha_j},$$

$$\mu_k = \beta_k^{\beta_k} (1-\beta_k)^{1-\beta_k},$$

$$P_j = \left[\sum_{k=1}^I \tau_{jk}^{-\theta} \left(\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} s_k^{-(1-\alpha)/\alpha} w^\beta P_k^{(1-\beta)} + s_k P_k^E \right)^{-\theta} + \sum_{k=I+1}^J \tau_{jk}^{-\theta} \psi_k^\theta A_k^\theta w^{-\theta \alpha \beta} P_k^{-\theta \alpha(1-\beta)} (P_k^E)^{-\theta(1-\alpha)} \right]^{-\frac{1}{\theta}}$$

当存在生产网络时,排放强度约束的临界值 s_j^* 同样是内生的,和部门价格 P_j 以及部门生产成本 c_j 相关。与单部门情况类似,可以用一个外生的临界值代替这个内生的临界值。

定理 4: 假设 $\frac{\partial P_i}{\partial c_j} \geq 0$,即任意部门的生产边际成本提高都不会使得任意部门的价格下降。

令 P_j^* 为所有部门均不存在排放强度上限约束时的部门价格, $c_j^* = \left(\frac{w}{\beta}\right)^\beta \left(\frac{P_j^*}{1-\beta}\right)^{1-\beta}$,则

$$s_j^* = \frac{1}{A} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{c_j^*}{P_j^E} \right)^\alpha$$

定理 4 证明逻辑与单部门情况的定理 1 完全一致，这里不再赘述。

为了使模型完整，还需要引入商品市场出清条件：

$$Q_j = C_j + \sum_{k=1}^J Q_{kj},$$

以及劳动力市场出清条件：

$$\sum_j L_j = 1.$$

注意在商品市场出清条件中，本文假设了部门中间品并不会应用于能源生产。

(三) 从生产网络到总产出

下面讨论如何求解整个均衡，本文中工资 w 作为价格基准，因此 $w = 1$ ，计算得到的所有价格均是关于工资的相对价格。

给定工资 w 的情况下，首先求解均衡价格和均衡分配，碳价 P_k^E 和排放强度上限 s_j 由政府指定，作为政策变量。为了判断排放强度上限是否为紧约束，首先求解无约束情况下的价格：

$$P_j = \left[\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} \psi_l^\theta A_l^\theta w^{-\theta \alpha_l \beta_l} (P_l^E)^{-\theta(1-\alpha_l)} P_l^{-\theta \alpha_l (1-\beta_l)} \right]^{-\frac{1}{\theta}},$$

并根据无约束情况下的价格计算排放强度上限临界值：

$$s_j^* = \frac{1}{A_j} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{c_j^*}{P_j^E} \right)^\alpha,$$

根据临界值，可以判断哪些部门的排放强度上限约束是紧约束。

接下来求解价格和生产网络，由部门价格指数方程：

$$P_j = \left[\sum_{k=1}^I \tau_{jk}^{-\theta} \left(\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} s_k^{-(1-\alpha)/\alpha} w^\beta P_k^{(1-\beta)} + s_k P_k^E \right)^{-\theta} + \sum_{k=I+1}^J \tau_{jk}^{-\theta} \psi_k^\theta A_k^\theta w^{-\theta \alpha \beta} P_k^{-\theta \alpha (1-\beta)} (P_k^E)^{-\theta(1-\alpha)} \right]^{-\frac{1}{\theta}},$$

可以方便地求出部门价格指数 P_j ，进而可以求得生产网络 ω_{jk} 。为了求解均衡进一步需要求解各部门的产量 Q_j 。注意到无论是否存在排放上限，都有：

$$\frac{w L_i}{P_i M_i} = \frac{\beta}{1-\beta},$$

即 $L_j = \frac{\beta}{1-\beta} \frac{P_j M_j}{w}$ 。为了减少求解变量个数，定义 $\tilde{X}_j = \sum_k X_{jk}$ 为部门 j 在购买其他部门中间品上花费的所有资源，从而在给定生产网络的情况下立刻得到 $X_{jk} = \omega_{jk} \tilde{X}_j$ ，进而给定 P_j 可以计算 $M_j = \frac{\tilde{X}_j}{P_j}$ 。给定 L_j ，各部门产出取决于该部门排放强度约束是否为紧约束：

若该部门排放强度上限 s_j 为紧约束，则总产出为：

$$Q_j = A_j^{\frac{1}{\alpha}} s_j^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} L_j^{\beta} M_j^{1-\beta},$$

若该部门排放强度上限为松约束，则资源分配满足：

$$\frac{E_j}{L_j^{\beta} M_j^{1-\beta}} = \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{c_j^*}{P_j^E},$$

进而可计算

$$Q_j = A_j L_j^{\alpha_j \beta_j} M_j^{\alpha_j (1 - \beta_j)} E_j^{1 - \alpha_j}.$$

由部门产出得到 $C_j = Q_j - \sum_{k=1}^J Q_{kj}$ ，其中 $Q_{kj} = \frac{X_{kj}}{\kappa_{jk} c_k}$ ，进而通过消费者端消费比例 $\frac{P_j C_j}{\sum_{k=1}^J P_k C_k} = \chi_j$ 可以求解整个均衡。在本文中，为了减少待估参数个数，根据文献中常用的做法，我们认为 $\kappa_{jk} c_k = P_k$ ，即中间品价格恰好等于最终品价格，从而有：

$$C_j = Q_j - \frac{\sum_{k=1}^J X_{kj}}{P_j},$$

因此与生产网络相关的参数只有 $\{\tau_{jk}\}$ 在求解均衡中被用到。

注意这里只有 $J - 1$ 个方程，为了求解整个均衡需要增加劳动市场出清的方程：

$$\sum_j L_j = 1.$$

从而我们有 J 个方程，求解 J 个未知数 \tilde{X}_j 。注意这里模型假设碳价是政策变量，因此可以将求解生产网络的过程和求解宏观变量的过程分离。如果碳排放总量而非碳价是政策变量，则需要同时求解部门价格 P_j 和宏观变量 \tilde{X}_j ，则是 $2J$ 个方程求解 $2J$ 个未知数。

当经济中存在多个部门时，直接求解 J 个方程 J 个未知数的方程组存在困难。为了简化分析，可以利用给定价格和消耗系数下的投入产出表进行求解。首先我们由计算出的投入产出网络 ω_{jk} 反推出直接消耗系数，直接消耗系数满足：

$$a_{jk} = \frac{X_{kj}}{P_k Q_k} = \frac{X_{kj}}{P_k M_k} \frac{P_k M_k}{P_k Q_k} = \omega_{kj} \frac{P_k M_k}{P_k Q_k}.$$

当部门排放强度上限为松约束时，有：

$$a_{jk} = \omega_{kj} (1 - \beta_k) \alpha_k,$$

当部门排放强度上限为紧约束时， $\frac{P_k^E E_k}{P_k Q_k} = \frac{P_k^E}{P_k} s_k$ ，从而有：

$$a_{jk} = \omega_{kj} (1 - \beta_k) \left(1 - \frac{P_k^E}{P_k} s_k \right).$$

类似地也可以计算不同部门的增加值率向量 A_V 以及碳排放率向量 A_E ，当部门排放强度上限为松约束时：

$$a_{Vj} = \frac{wL_j}{P_j Q_j} = \alpha_j \beta_j, \quad a_{Ej} = \frac{P_j^E E_j}{P_j Q_j} = 1 - \alpha_j,$$

当部门排放强度上限为紧约束时：

$$a_{Vj} = \frac{wL_j}{P_j Q_j} = \beta_j \left(1 - \frac{P_j^E}{P_j} s_j \right), \quad a_{Ej} = \frac{P_j^E}{P_j} s_j.$$

总结以上分析，可以将本模型对应的投入产出表结构反映如表 1：

表 1：模型对应的投入产出表

	中间使用	最终使用	
中间投入	中间品投入产出 X_{ji}	最终使用向量 C_j	部门总产出 $P_i Q_i$
能源投入	能源要素投入 $P_j^E E_j$		
增加值	劳动收入（增加值） wL_j		
	部门总产出 $P_j Q_j$		

由投入产出表的行平衡关系有：

$$AQ + C = Q \Rightarrow Q = (I - A)^{-1} C.$$

根据以上分析，可以计算增加一单位部门最终使用所需要增加的各部门碳排放量（碳排放的消费弹性）：

$$A_E^C = \hat{A}_E(I - A)^{-1},$$

即增加 j 部门的一单位消费带来的碳排放量增加为 a_{Ej}^C ，其中 \hat{A}_E 是包含 a_{Ej} 的对角阵。类似地也可以计算碳排放的 GDP 弹性，即增加一单位某部门的 GDP 所需要增加的碳排放量：

$$A_E^V = \hat{A}_E(I - A)^{-1}/\hat{A}_V(I - A)^{-1},$$

这里的除号表示对应元素各自相除。特别地，如果假设最终使用的结构 χ_j 保持不变，同时假设最终使用的收入来源只包括劳动收入 $\sum_j wL_j$ 以及能源收入 $\sum_j P_j^E E_j$ ，可以利用投入产出表关系简单地计算出排放量。由投入产出表的列平衡关系我们得到：

$$(P^E E)^T = \hat{A}_E(I - A)^{-1}\chi\left(w + \sum_j P_j^E E_j\right),$$

从而在给定投入产出网络、工资、碳价以及最终使用比例的情况下可以计算碳排放向量。同时，给定 $C = \chi(w + \sum_j P_j^E E_j)$ ，也可以通过 $Q = (I - A)^{-1}C$ 计算部门总产值。给定投入产出表的直接消耗系数矩阵 A 和最终使用比例向量 χ ，可以计算多玛权重（Domar weight）向量：

$$\lambda = (I - A)^{-1}\chi = \Psi\chi,$$

其中 $\Psi = (I - A)^{-1}$ 为 Leontief 逆矩阵， $\lambda_j = \frac{P_j Q_j}{GDP}$ ，通常来说， $\sum_j \lambda_j > 1$ 。

进一步地，我们可以基于模型讨论环境政策的福利效应。假设家庭用于消费的资源包括劳动收入和能源要素收入，则给定消费者面临的价格指数 $P = \prod_{j=1}^I \left(\frac{P_j}{\chi_j}\right)^{\chi_j}$ ，我们可以计算家庭的实际消费额为 $C = \frac{w + \sum_j P_j^E E_j}{P}$ ，并进而通过计算消费的变动来讨论政策的福利效应。特别地，由于能源收入受到能源价格 P^E 的影响，我们同时计算实际劳动收入 $C = \frac{w}{P}$ ，作为另一种分析政策福利效应的指标。

四、参数校准与模拟

（一）参数校准

本文采用 2015 年的 42 部门投入产出表来校准模型。为了方便分析，将不同部门的生产率以及工资标准化为 1，对于部门中间品加总函数中的参数 θ ，本文采用文献中常用的值，设定 $\theta = 4$ 。对于生产网络结构而言，主要包含两类参数：针对部门生产和消费的参数 $\{\alpha_j, \beta_j, \chi_j\}$ ，以及部门间的摩擦 $\{\tau_{jk}, \nu_{jk}, \kappa_{jk}\}$ 。由于我们假设了 $\kappa_{jk} c_k = P_k$ ， κ_{jk} 由价格体系内生给定， ν_{jk} 可以由 M_j 的表达式推出，只需要根据现实数据校准 τ_{jk} 。除此之外，模型还包含外生给定的参数 $\{w, A_j\}$ 以及政策参数 $\{P_j^E, s_j\}$ 。本文利用竞争型投入产出表结构对以上参数进行校准，特别地，本文做出三个假设：全国的劳动力是自由流动的大市场，全国有一个统一的碳市场且 $P_j^E = 1$ ，在校准的时刻全国各部门均不存在排放强度上限。

考虑部门生产中劳动的比例 β_j 以及能源排放的比例 α_j 。根据投入产出表与《中国能源统计年鉴》，我国与排放相关的能源部门包括：煤炭采选产品，石油和天然气开采产品，石油、炼焦产品和核燃料加工品，电力、热力的生产和供应以及燃气生产和供应，对这些部门的消耗构成了模型中 E 的主要部分，除去这些部门后，经济中生产部门总数为 $J = 37$ 。同时，为了方便计算，根据文献中常见做法，模型中的消费 C 代表投入产出表中的“最终使用”部分（即包含了消费、资本形成和净出口），进而可以用对某个部门的最终使用占总最终使用的比例来代表 b_j 。对于部门生产函数中的参数 α_j 和 β_j ，注意在不存在紧的排放强度约束时有：

$$\frac{wL_j}{P_i M_i} = \frac{\beta_j}{1 - \beta_j}$$

$$\frac{wL_j}{P_j^E E_j} = \frac{\alpha_j \beta_j}{1 - \alpha_j}$$

在模型中， wL_j 代表劳动份额，应当与投入产出表中的“劳动者报酬”一项对应。但本模型是静态模型，并未考虑实际生产中的生产税、资本折旧、营业盈余等因素，因此本文参考 Caliendo et al. (2022)，用增加值总额作为 wL_j 在现实中的对应。同时，由于 E 对应着对能源部门的资源使用，因此 M 对应除去能源部门后的中间投入总和。给定以上对应后，利用投入产出表的列平衡关系，可以方便地计算各部门的 β_j 和 α_j 。

最后考虑对网络参数 $\{\tau_{jk}, l_{jk}, \kappa_{jk}\}$ 的校准，根据定义 $\tau_{jk} = \kappa_{jk} (l_{jk})^{-(1+\theta)/\theta}$ 以及假设 $\kappa_{jk} c_k = P_k$ ，只需要校准 τ_{jk} 。在不存在排放上限的情况下，容易得到：

$$\frac{\omega_{jk}}{\omega_{kk}} = \left(\frac{\tau_{jk}}{\tau_{kk}} \right)^{-\theta} \left(\frac{P_j}{P_k} \right)^\theta,$$

从而有 $\tau_{jk} = \left(\frac{P_j}{P_k} \right) \left(\frac{\omega_{kk}}{\omega_{jk}} \right)^{\frac{1}{\theta}}$ 。带入部门价格的表达式得到：

$$\tilde{\tau}_{jk} \equiv \tau_{jk} \left(\frac{\frac{1}{\psi_j^{1-\alpha_j(1-\beta_j)}}}{\frac{1}{\psi_k^{1-\alpha_k(1-\beta_k)}}} \right) \left(\frac{\frac{1}{A_j^{1-\alpha_j(1-\beta_j)}}}{\frac{1}{A_k^{1-\alpha_k(1-\beta_k)}}} \right) \left(\frac{(P_j^E)^{\frac{1-\alpha_j}{1-\alpha_j(1-\beta_j)}}}{(P_k^E)^{\frac{1-\alpha_k}{1-\alpha_k(1-\beta_k)}}} \right) w^{\frac{\alpha_k \beta_k}{1-\alpha_k(1-\beta_k)} - \frac{\alpha_j \beta_j}{1-\alpha_j(1-\beta_j)}}$$

$$= \left(\frac{\frac{1}{\omega_{jj}^{1-\alpha_j(1-\beta_j)}}}{\frac{1}{\omega_{kk}^{1-\alpha_k(1-\beta_k)}}} \right)^{\frac{1}{\theta}} \left(\frac{\omega_{kk}}{\omega_{jk}} \right)^{\frac{1}{\theta}}.$$

在假设 $A_j = A_k$ ，以及统一的劳动力市场和碳市场的情况下可以求出 τ_{jk} 。所有模型参数的校准方法如表 2 所示：

表 2：参数校准方法

参数符号	含义	校准方法
A_j	部门生产率	标准化 $A_j = 1$
w	工资	标准化 $w = 1$
P_j^E	碳价	外生给定 $P_j^E = 1$
θ	部门中间品加总弹性	Caliendo et al. (2022)
β_j	劳动收入占比	部门增加值与中间投入之比
α_j	能源使用占比	部门增加值与能源投入之比
χ_j	消费比例	部门最终使用比例
τ_{ij}	部门间交易摩擦	中间品消耗系数
κ_{ij}	部门间交易摩擦	$P_j = \kappa_{ij} C_j$
l_{ij}	中间品加总系数	$\tau_{jk} = \kappa_{jk} (l_{jk})^{-(1+\theta)/\theta}$

对能源投入比例 $1 - \alpha_j$ 的参数校准结果如图 2 所示，横轴代表行业名称，纵轴表示能源投入占部门总产出的比例 $1 - \alpha_j$ 。从图中可以看出，大部分部门对能源产品的使用的比例在 5% 以下，但有少数工业部门对能源的使用强度较高。金属矿采选产品（行业编号 04），非金属矿和其他矿采选产品（行业编号 05），化工产品（行业编号 12），非金属矿物制品（行

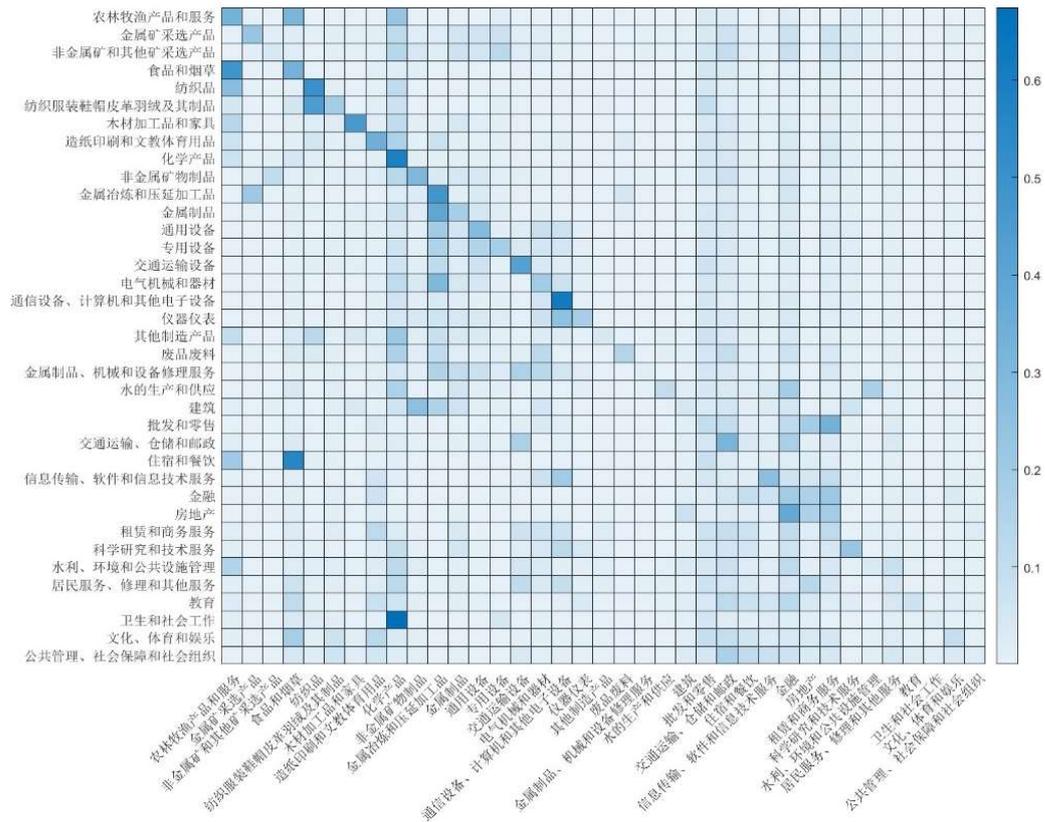


图 3：中间品消耗矩阵

基于本文校准的生产网络可以反推投入产出表消耗系数可以计算模型中各部门的产值比例，结果如图 4 所示。可以看出，模型校准较好地对应了现实中各部门的产量比例关系。

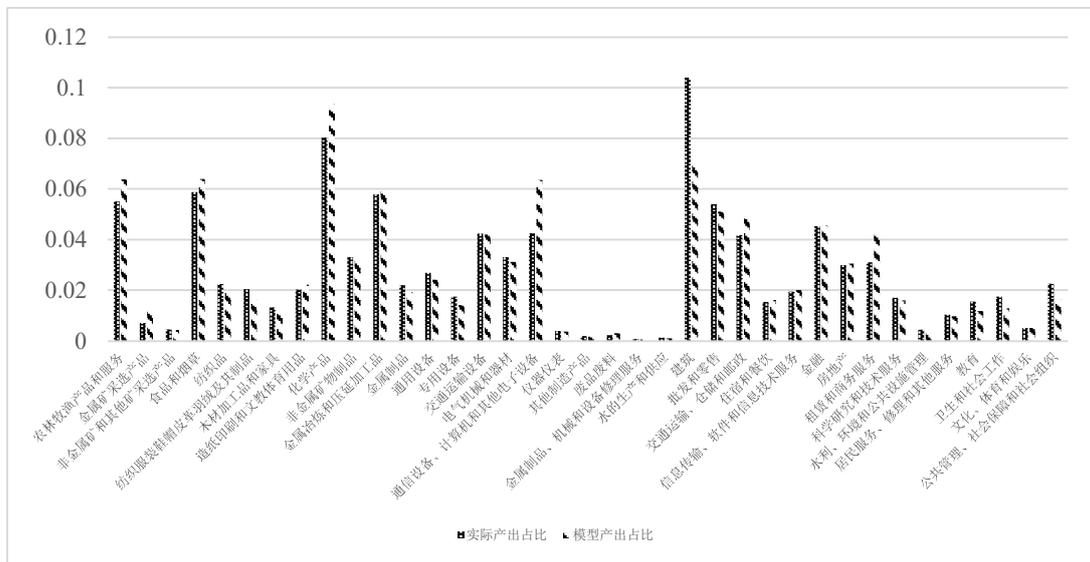


图 4：模型与实际数据中各部门产值占比

（二）政策模拟：碳价变动的影响

碳税和碳市场是实现碳达峰和碳中和的重要政策手段。2021 年我国全国碳排放权交易市场启动线上交易，主要涵盖电力行业；而在全球范围内碳税也被广泛使用以控制碳排放量。通过碳市场上的价格手段以及征收碳排放税等方式，政府可以外生改变某个部门或者全部部门面临的碳价（即本模型中的能源价格），从而改变部门产品价格以及投入产出关系。

1. 总体碳价提高的影响

首先分析总体碳价提高的影响，即维持全国是一个统一碳市场的设定，假设政府通过征收碳税或通过碳市场操作将所有部门的碳价提升 10%，其他条件不变。可以计算政策变动带来的生产网络相对变动，结果如图 5 所示：

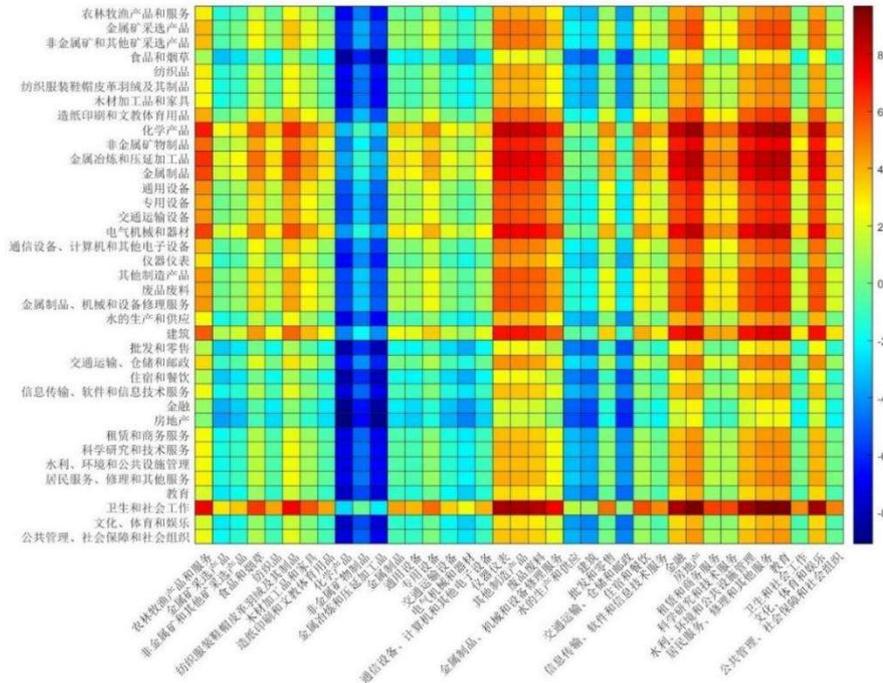


图 5：总体碳价变动带来的生产网络变化

图 5 展示了碳价提升 10%后各部门投入产出比例相对初始值的百分比变化，每个单元格代表变化的百分比数值，红色代表占比提升，蓝色代表占比下降，颜色越深代表上升或下降的比例越高。从图中可以清晰地看出，提升所有部门的碳价会导致各部门对高排放行业的需求下降，其逻辑在于高排放行业的价格受碳价上升影响较大，因而导致碳价上升时这些部门的产品价格有较大提升，其他部门对这些部门的产品消耗量减小。

特别地，针对每个部门 k ，可以计算 ω_{jk} 对所有部门 j 的平均值 $\frac{1}{j} \sum_{j=1}^j \omega_{jk}$ ，代表该部门产品在经济中作为中间产品的平均重要程度。基于投入产出网络的变化可以计算各部门平均重要程度的百分比变化，结果如图 6 所示。可以看出，碳价上升 10%后，前文定义的“高排放行业”在经济中的平均重要程度下降了 3%-6%，而仪器仪表（行业编号 22）、水利、环境和公共设施管理（行业编号 37）和居民服务（行业编号 38）等部门在经济中的平均重要程度提升了 4%以上。平均而言，碳价提升后，传统工业在经济中的平均重要程度保持不变或有所下降，而服务业在经济中的平均重要程度普遍提升，说明通过碳价限制碳排放量有助于实现经济由传统工业向现代工业以及服务业的结构转型。

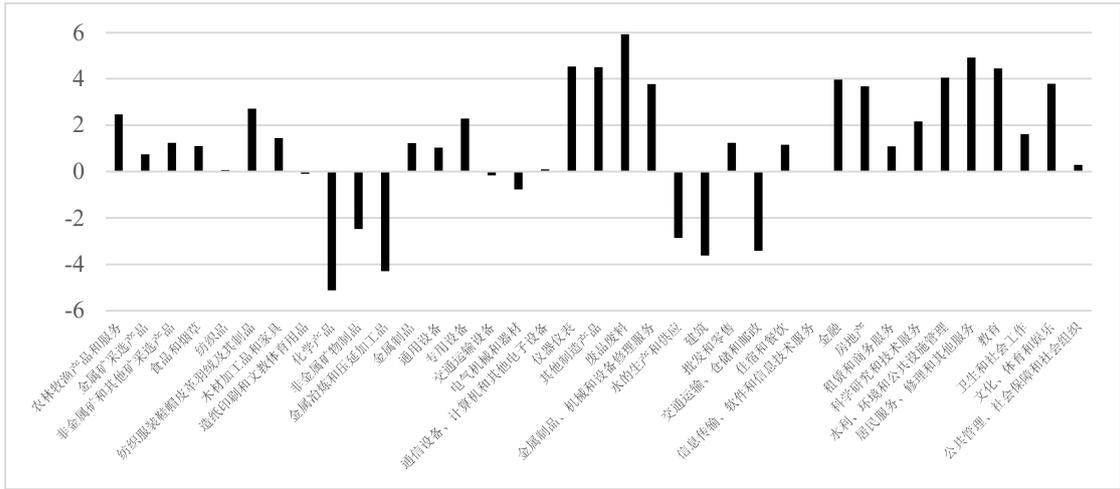


图 6: 整体碳价提升带来的部门平均重要程度变动

基于投入产出分析的逻辑，政府可以通过增加政府消费从而改变最终消费，进而影响部门的碳排放量。基于改变碳价前后的投入产出表，可以计算政府增加一单位总量政府支出（结构和原始最终使用保持一致）的情况下，各部门排放的增量 $\Delta E_j = A_E^C \cdot \chi$ ，结果如图 7 所示。从图中容易看出，提升碳价后，单位政府支出带来的各部门碳排放均有所下降，相比而言，高排放部门的碳排放弹性下降更多，这是因为碳价提升后投入产出结构变动，高排放部门作为中间品的重要性下降，因此单位政府支出带来的部门产出和碳排放均有所下降。

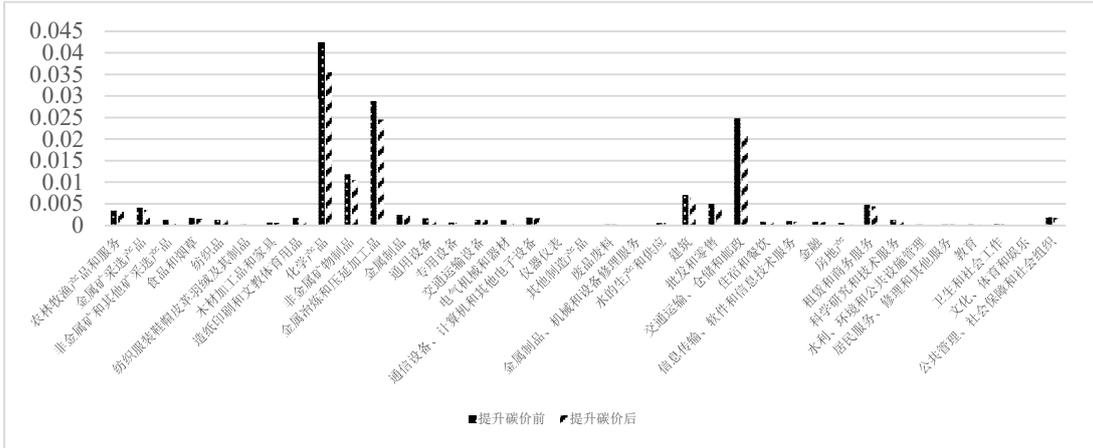


图 7: 碳排放的政府支出弹性

根据投入产出表结构，可以计算不同部门的碳排放量变动（百分比减少），结果如图 8 所示。在本文的模型下，通过提高 10% 的整体碳价可以导致碳排放总量下降约 13.5%。分部门来看，高排放的重工业碳排放下降较多，化学产品、金属冶炼和压延加工品等行业的碳排放量下降了约 16%，而原本能源投入比例较小的行业，如仪器仪表等行业，碳排放量下降较少，只下降了约 7%。根据生产函数，在排放强度上限为松约束时总产出与能源投入正相关，因此整体碳价上升会导致各部门的产量和碳排放都有所下降。

考虑福利效应，模型模拟发现，对所有部门提高碳价 10% 后，按照劳动收入定义的福利损失为 1.60%，即实际工资 w/P 下降了 1.6%；按照总收入定义的福利损失为 2.35%，即实际总收入下降了 2.35%。在碳价上升 10% 后，总体碳排放下降了超过 10%，因此导致名义能源收入 $\sum P_j^E E_j$ 有所下降，从而使得按照总收入计算的福利损失大于按照劳动收入计算的结果。

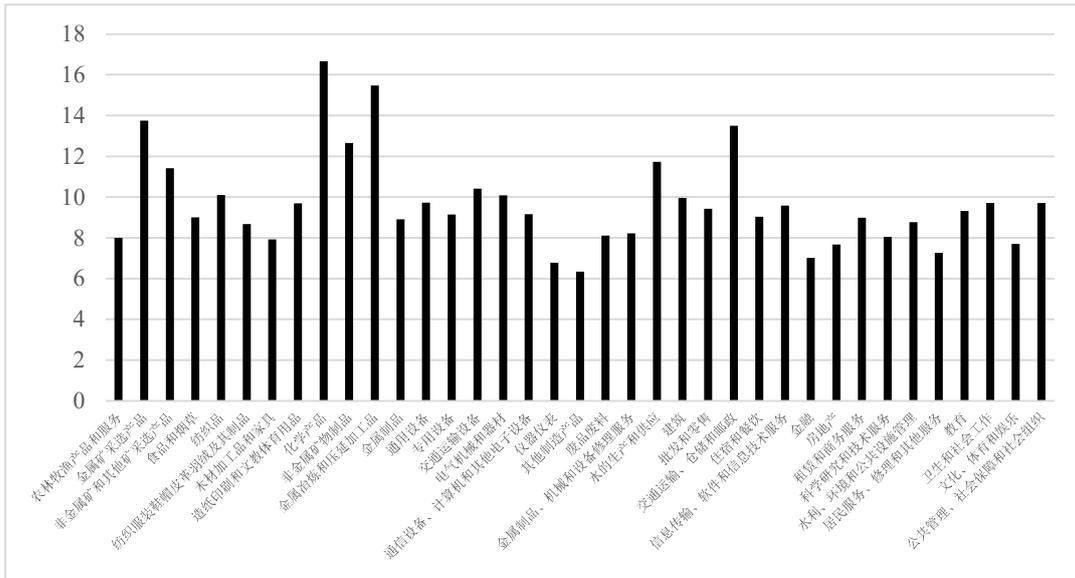


图 8：提升碳价带来的排放量变化

2. 部分部门碳价提高的影响

事实上，并不是所有部门都会进入全国性质的碳市场当中，因此不同部门的碳价可能不同。对于高排放和高能源投入的行业，政府可以较为方便地监管其能源使用行为，并将其纳入碳市场或碳税的试点当中。因此，考虑只对之前定义的“高排放行业”提高 10%碳价的影响。在保持其他条件不变的情况下，对高排放行业提高碳价后对投入产出关系的相对影响如图 9 所示。只对高排放部门提升碳价后，对投入产出关系的影响与整体碳价提高时类似，对应高排放部门的中间消耗系数有所下降，而对应低排放部门的中间消耗系数上升。为了直观地比较整体碳价提升和部分部门碳价提升的影响差异，按照之前的思路，计算不同部门在投入产出关系中的平均重要性的百分比变化，结果如图 10 所示。

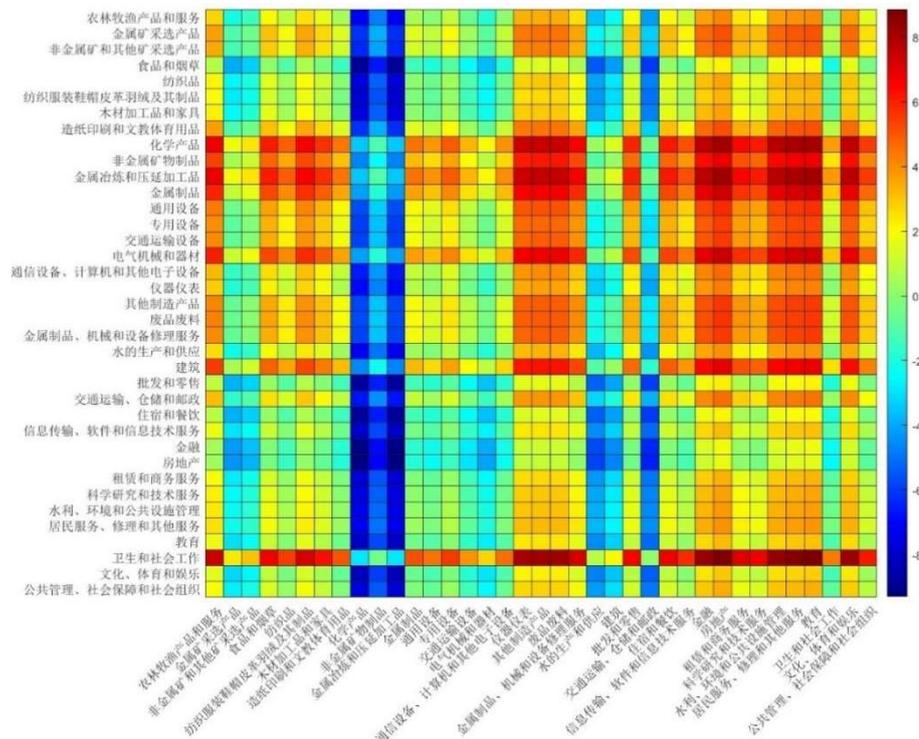


图 9：高排放部门碳价变动带来的生产网络变化

从图 10 中可以看出，当只有高排放部门碳价上升时，高排放部门在生产中的相对重要

性下降更多，而以服务业为代表的低排放行业的相对重要性有更大的上升。这说明通过对高排放行业定点提高碳价更有利于改变生产结构，降低高排放行业在产业链当中的重要性，实现绿色转型。另一种衡量产业结构的指标是部门的多玛权重，在总体提升碳价和部分提升碳价的情况下，我们分别计算各部门的多玛权重变化，结果如图 11 所示。从图 11 中容易看出，无论是总体提升碳价，还是对高排放部门定点提升碳价，都会导致高排放部门的多玛权重下降，而以服务业为代表的低排放行业多玛权重上升，代表收紧环境政策可以降低高排放部门在经济中的重要性，实现产业的绿色化转型。相比之下，对高排放部门定向提升碳价时高排放部门的多玛权重下降更多，说明定向的环境政策更有助于实现产业转型。

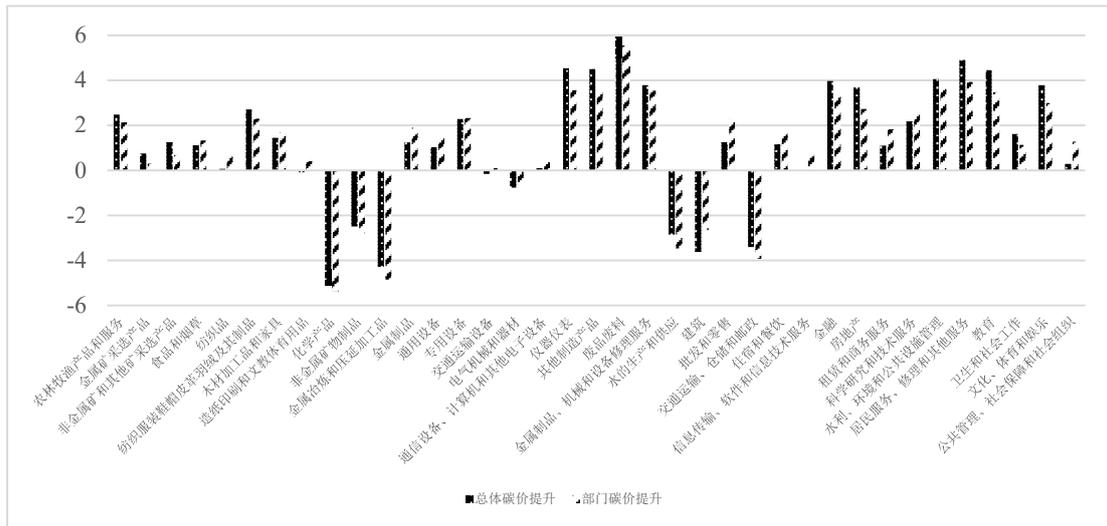


图 10：高排放部门碳价变动带来的部门平均重要程度变动

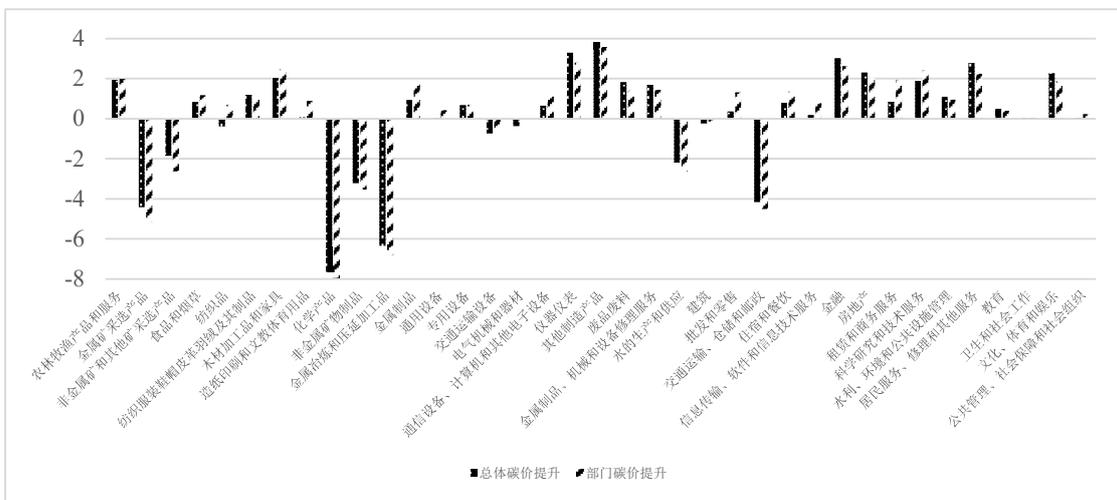


图 11：部门碳价变动带来的部门多玛权重变动

通过模型模拟发现，对高排放行业定点提高 10% 的碳价可以降低总排放量约 11.2%，相比整体提升碳价，对高排放部门定点提升碳价影响的部门总数较少，而减排效果接近。同时注意到，当对高排放部门定点提升碳价时，其他碳价不变的低排放部门的部门碳排放有所上升，这意味着这些部门的产出提高，如图 12 所示。

考虑福利效应，模型模拟发现，对高排放部门提高碳价 10% 后，按照劳动收入定义的福利损失为 1.27%，即实际工资 w/P 下降了 1.27%；按照总收入定义的福利损失为 2.04%，即实际总收入下降了 2.04%。

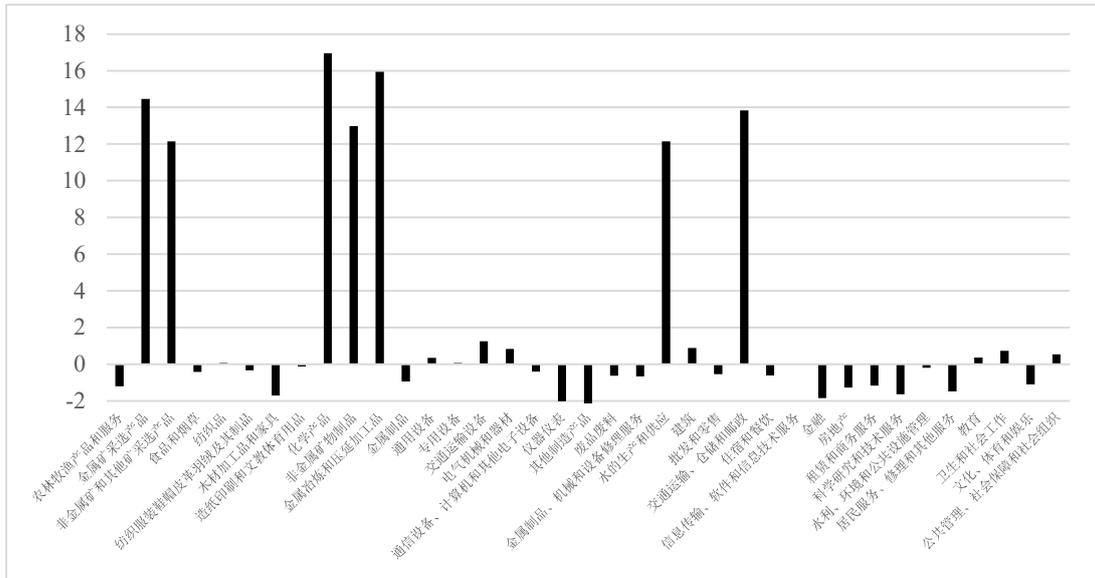


图 12：高排放部门碳价变动带来的部门排放变化

特别地，可以将碳价变动（不存在排放强度上限的情况下）时带来的减排效果分解为两部分：价格效应和网络效应，分解结果如表 3 所示。价格效应指不考虑部门间投入产出关系 ω_{jk} 变动的情况下，仅仅由于碳价提升带来的部门减排总量，当所有部门碳价同时上升 10% 时，这部分带来的减排量恰为 $1 - 1/1.1 = 9.09\%$ ；而网络效应则在价格效应基础上考虑了碳价提升对部门间投入产出网络的影响。当碳价上升时，高排放行业的生产成本提升更高，因此相对价格提升，这会导致其他部门更少地采购这些部门的中间品，进一步导致这些部门的产出下降、排放缩减。从分解结果可以看出，碳价上升时对碳排放的影响主要是通过价格效应实现的，相对而言总体碳价提升时的价格效应更强，这是因为总体碳价的提升带来的部门生产成本提升更大。相对而言，对高排放部门定点提升碳价带来的网络效应更强，这是因为只有部分部门提升碳价是这些部门的相对价格会变得更高，从而使得这些部门在投入产出网络中的相对重要性下降更多。特别地，表 3 中最后一列“结构变动”表示政策变动后高排放部门网络重要性变动的平均值，即其他部门使用这些部门中间品比例的平均值变动。

表 3：提升碳价带来的减排效应分解

	价格效应	网络效应	总减排	结构变动
总体碳价提升	9.09%	4.39%	13.48%	2.31%
部分碳价提升	6.63%	4.55%	11.18%	2.79%

（三）政策模拟：碳排放强度上限变动的影响

本部分讨论排放强度上限变化的影响。假设经济原始处于不存在排放强度上限的情况，即部门的排放强度为 s_j^0 ，假设政府希望控制单位产出对应的排放量，将排放强度上限限制为 $s_j = 0.9s_j^0$ 。在产出不变的情况下，对排放强度上限的限制会导致碳排放恰好下降 10%，而在本文的模型中则同时需要考虑碳排放强度上限变动对价格以及投入产出关系的影响。

首先计算碳排放强度上限收紧对生产网络的影响，与之前的分析类似，同样计算不同部门在生产网络中平均重要性的百分比变动，结果如图 13。

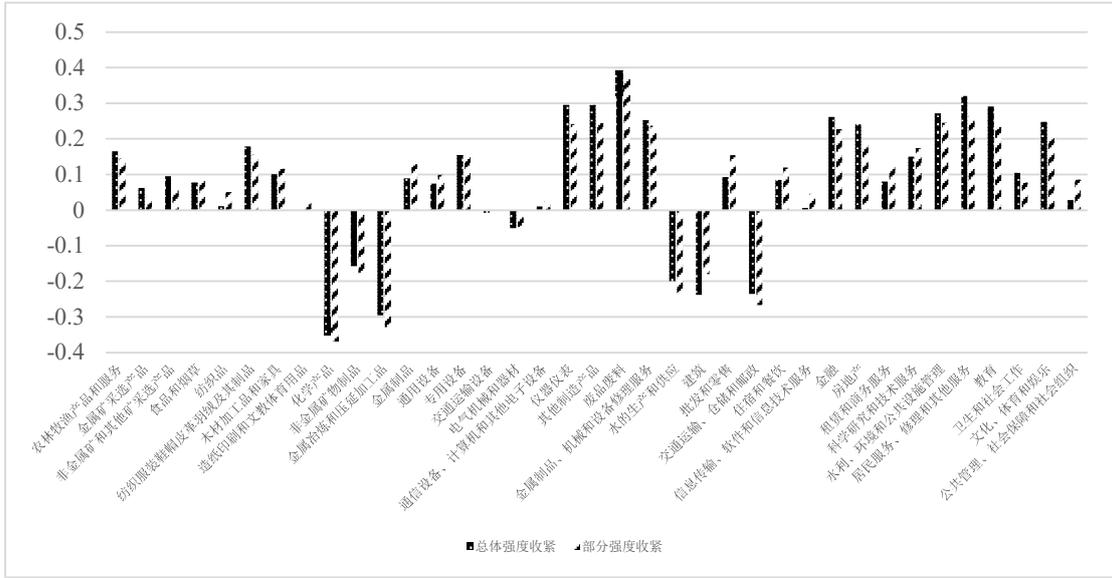


图 13：收紧排放强度上限对部门平均重要程度的影响

从图中可以看出，收紧排放强度上限对部门生产网络的影响与提升碳价类似，都会导致高排放行业在生产网络中的重要性下降，而以服务业为代表的低排放行业在生产网络中的重要性上升，带来经济结构的转变。相对而言，对高排放部门排放强度收紧的情况下高排放部门的重要性下降相对更多，更有利于降低高排放行业在经济中的重要性。与提升碳价相比，收紧排放强度上限对部门间生产网络的影响显著更小，这是因为排放强度上限的变动导致的边际成本改变较小。注意存在排放上限时有：

$$\frac{\partial c}{\partial s} = \frac{\alpha - 1}{\alpha} A^{-\frac{1}{\alpha} s^{-\frac{1}{\alpha}}} \left(\frac{w}{\beta}\right)^{\beta} \left(\frac{P}{1 - \beta}\right)^{1 - \beta} + (1 - \beta) A^{-\frac{1}{\alpha} s^{-\frac{1}{\alpha}}} \left(\frac{w}{\beta}\right)^{\beta} \left(\frac{P}{1 - \beta}\right)^{-\beta} \frac{\partial P}{\partial s} + P^E,$$

$$\frac{\partial c}{\partial P^E} = (1 - \beta) A^{-\frac{1}{\alpha} s^{-\frac{1}{\alpha}}} \left(\frac{w}{\beta}\right)^{\beta} \left(\frac{P}{1 - \beta}\right)^{-\beta} \frac{\partial P}{\partial P^E} + s.$$

不考虑价格效应的情况下，假设 P^E 和 s 各自相对其初始值下降 δ 比例，则改变排放上限时边际成本变化为：

$$\Delta c = \frac{\partial c}{\partial s} \delta s = \delta \frac{\alpha - 1}{\alpha} A^{-\frac{1}{\alpha} s^{1 - \frac{1}{\alpha}}} \left(\frac{w}{\beta}\right)^{\beta} \left(\frac{P}{1 - \beta}\right)^{1 - \beta} + \delta s P^E,$$

而改变碳价时的边际成本变化为：

$$\Delta c = \frac{\partial c}{\partial P^E} \delta P^E = \delta s P^E.$$

由于 $\alpha < 1$ ，排放强度上限提升时带来的边际成本上升较小，因此相对边际成本变动也较小，对生产网络的影响有限。这是因为当存在排放强度上限时，企业相当于受到了一个产出上的补贴 $\alpha + \frac{1 - \alpha}{\tau^e}$ ，排放强度上限越收紧，这个产出上的补贴就越大，会减小排放强度上限收紧带来的企业边际成本上升，同时原有排放强度越大，这个补贴的效应就越强，使得排放强度上限收紧时部门间相对价格的变动相比碳价上升时更小。

类似地，我们也可以计算排放强度上限收紧时部门多玛权重的变化，结果如图 14 所示。从图中可以看出，与碳价变动的不同影响，排放强度上限导致不同部门的多玛权重均有所上升而非下降。这是与直接消耗系数矩阵 A 的决定相关的。当不存在排放强度上限约束时，直接消耗系数矩阵 A 只由部门间生产网络 Ω 决定，因此环境政策收紧导致高排放部门在网络中重要性下降自然会导致对应的多玛权重下降。但是当存在排放强度上限时，直接消耗系数矩阵 A 同时取决于生产网络 Ω 和部门排放强度上限向量 s_k ：环境政策收紧导致高排放部门在生

产网络中重要性下降，对应多玛权重下降；而排放强度上限收紧导致企业被迫降低能源投入增加中间品投入，部门多玛权重上升。根据我们之前的模拟和分析，排放强度上限收紧带来的价格效应和网络效应是很小的，因此 s 下降导致中间品投入提升的效应占主导，部门的多玛权重反而提升，提升的幅度取决于部门参数 β_k 、 s_k 以及价格 P_k 、 P_k^E 。

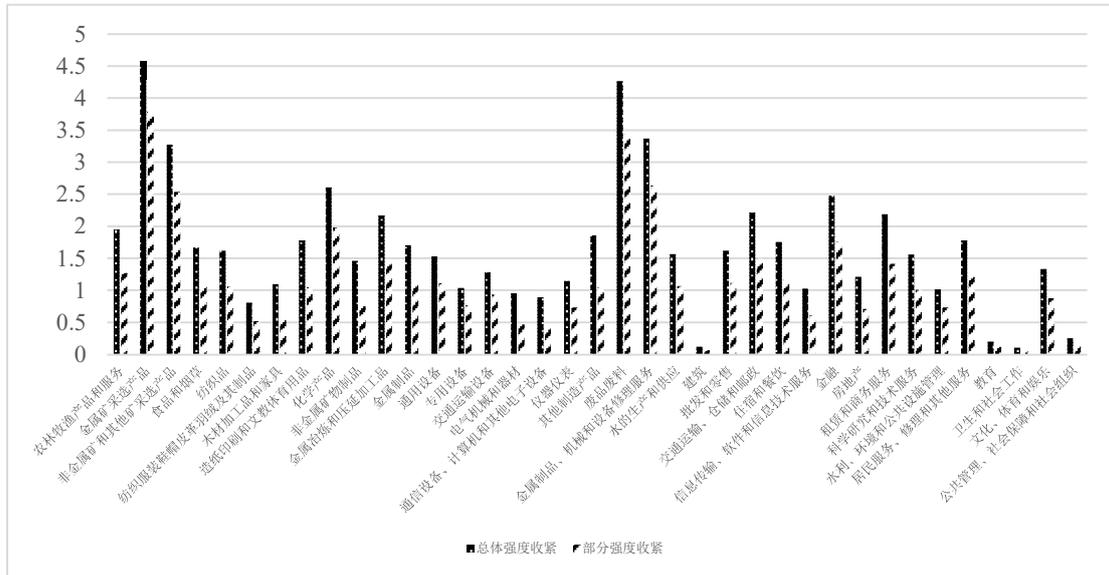


图 14：收紧排放强度上限对部门多玛权重的影响

与前文政策模拟一致，同样可以计算排放强度收紧时的部门排放量相对变化，结果如图 15 所示。当总体排放强度上限收紧时，所有部门的碳排放都会下降；而缩紧高排放部门排放强度上限时，只有高排放部门的碳排放有较为显著的下降，其他部门的减排效果不明显，少数在生产网络中重要性有所提升的部门(如金属制品、机械和设备修理服务以及金融部门)由于产出增加碳排放有所上升。从总排放量上来看，总体排放强度收紧 10%会导致总排放量下降约 10.3%，而高排放部门的排放强度收紧 10%会导致总排放量下降约 6.7%。

同样考虑福利效应，模型模拟发现，总体收紧排放强度上限 10%后，按照劳动收入定义的福利损失为 0.11%，按照总收入定义的福利损失为 2.20%；对高排放行业定点收紧排放强度上限 10%后，按照劳动收入定义的福利损失为 0.09%，按照总收入定义的福利损失为 1.45%。由于排放强度上限收紧对价格的影响较小，其福利效应主要来源于能源收入的下降。

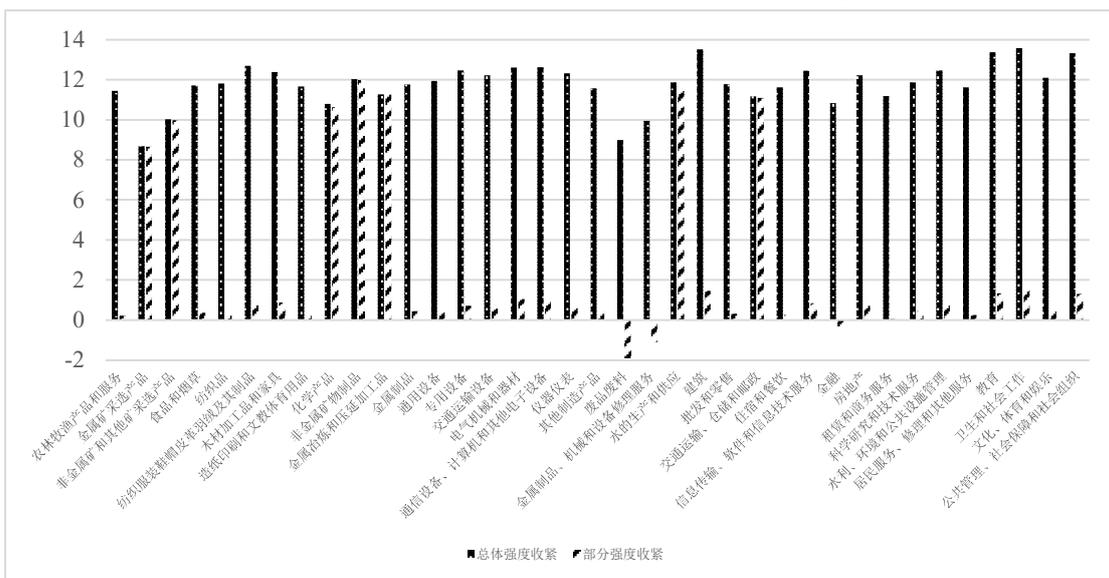


图 15：排放强度上限缩紧带来的部门减排

当排放强度上限收紧时，碳排放的变动由三个效应驱动：排放强度效应、价格效应以及网络效应。排放强度效应指在部门价格以及部门间生产网络 ω_{jk} 不变的情况下，排放强度上限 s_j 的收紧所带来的排放量变化（注意这里虽然 ω_{jk} 不变，但 s_j 的变化会影响碳排放强度向量 A_E ）；价格效应则是在排放效应的基础上，考虑了排放强度上限变动带来的部门间价格变化导致的碳减排，排放强度收紧时高排放部门相比低排放部门部门价格上升，从而导致这些部门的生产成本提高，产量和排放下降；而网络效应则是在之前两个效应的基础上考虑了部门相对价格变动带来的部门间投入产出关系 ω_{jk} 的变动后的结果，高排放部门的生产成本和价格提升会导致其他部门更少消费这些部门的产品，进一步导致这些部门的产量下降、排放量减小。对于以上两种政策情形带来减排效果的分解结果如表 4 所示。从表 4 中可以看出，无论是总体排放强度收紧还是部分部门的排放强度收紧，其带来的减排效果主要是由排放强度效应导致的。从数值上来看，总体强度收紧的价格效应稍高，网络效应稍低，但两者的价格效应和网络效应差距不显著，这是因为无论是总体收紧排放强度上限，还是收紧部分部门的排放强度上限，对部门价格的绝对影响和相对影响都较小，因此价格效应和网络效应不明显。

表 4：收紧排放强度上限带来的减排效应分解

	强度效应	价格效应	网络效应	总减排	结构变动
总体强度收紧	9.90%	0.11%	0.27%	10.28%	0.16%
部分强度收紧	6.31%	0.09%	0.28%	6.68%	0.18%

特别地，我国目前实行的是总量和强度的双控体系，即同时控制总排放量和排放强度。在本文的模型中，通过模拟发现，如果政府希望对高排放行业的统一调控使得其总排放量下降 10%，则高排放行业的排放强度上限需要收紧约 10.2%；如果政府希望通过对高排放行业的统一调控使得总排放量下降 10%，则高排放行业排放强度上限需要收紧 15.5%。

（四）小结

本部分基于模型校准进行了政策模拟，讨论了提升碳价 10%以及收紧排放强度上限 10%的效果，对于每种政策，本文分别讨论了总体干预以及仅对高排放行业进行干预的结果。对模型的模拟发现，提升碳价和收紧排放强度上限均会导致部门间投入产出关系发生变动，原本高排放的行业在投入产出关系中的相对重要性下降，而以服务业为代表的低排放行业在投入产出关系中的相对重要性上升，相对而言提升碳价带来的部门间相对价格变化更大，因此对投入产出关系的影响更大。基于投入产出表结构以及最终使用比例不变的假设，本文讨论了不同政策对于部门减排和总体减排的影响。

模拟发现，对所有部门提升碳价 10%会降低 13.5%的碳排放，其中 9.1%是由于碳价的提升导致的减排，4.4%是由于碳价变动带来的部门间生产网络的变动导致；对高排放部门定点提升 10%的碳价会降低 11.2%的碳排放，其中 6.6%是由于碳价的提升导致，另外 4.6%是提升碳价带来的网络效应。分部门来看，总体碳价提升时各个部门的碳排放都有所下降，高排放部门的下降更多，而对高排放部门定点提升碳价只对高排放部门有较大影响，其他部门的碳排放量变动较小，对这些部门的生产影响较小。

对所有部门收紧 10%的排放强度上限会降低 10.3%的碳排放，其中 9.9%是由于排放强度上限收紧导致的减排，另外有 0.11%是由于部门价格变动带来的生产成本上升，0.27%是相对价格变动导致的生产网络变化的结果；对高排放部门定点收紧 10%的排放强度上限会降低 6.7%的总体碳排放，其中排放强度本身的效果占据 6.31%，而部门生产成本上升占比 0.09%，生产网络的变动占比 0.3%。分部门来看，总体收紧排放强度上限会导致各个部门的碳排放都下降 10%左右，而对高排放部门定点收紧排放强度只会影响高排放部门的碳排放，对其他低排放部门的排放和生产影响较小。

特别地，可以将不同政策的减排效果以及福利损失总结如表 5：

表 5：政策模拟的减排效应与福利效应

	总减排	福利损失（总收入）	福利损失（劳动收入）
总体碳价提升	13.48%	2.35%	1.60%
部分碳价提升	11.18%	2.04%	1.27%
总体强度收紧	10.28%	2.20%	0.11%
部分强度收紧	6.68%	1.45%	0.09%

比较两种政策的效果，可以发现提升碳价对生产网络和经济结构的影响较大，较大程度上降低了高排放行业在经济当中的重要性，在获得更好的减排效果的同时对更好地实现了经济结构和生产关系的转变；收紧排放强度上限对部门生产成本和相对价格的扭曲较小，减排效果主要通过排放强度上限的约束实现，减排规模相对有限，对经济结构的影响较小。但相对应地，提升碳价对经济中价格水平的影响较大，从而导致劳动者的实际劳动收入有较大幅度的下降。在模型模拟中，我们假设了家庭收入包括劳动收入和能源收入，但实际上能源收入（或能源税收入）往往是政府所有，因此当采用碳价提升进行减排时，要依赖政府的能源收入进行补贴，否则会带来相比排放强度收紧更大的福利损失。

五、模型扩展与讨论

在之前的分析中，本文讨论了基准模型的理论性质和定量表现，本部分将对基准模型进行扩展，引入部门内资源错配，并讨论扩展模型的性质；同时，本部分将引入生产率冲击，讨论环境政策与生产率冲击之间的相互作用。

（一）引入部门内资源错配

在之前的分析中，本文假设了一个部门内的企业之间不存在异质性，本节引入部门内企业间全要素生产率的异质性，从而讨论部门内部的排放强度限制对资源错配和部门 TFP 的影响。假设部门内部存在一系列异质性的企业，其生产率为 φ ，单个企业的生产函数为：

$$y_i(\varphi) = \varphi L_i(\varphi)^{\alpha_i \beta_i} M_i(\varphi)^{\alpha_i(1-\beta_i)} E_i(\varphi)^{1-\alpha_i}$$

部门内部企业的产量加总为：

$$Y_i = \left(\int y_i(\varphi)^{(\sigma-1)/\sigma} g_i(\varphi) d\varphi \right)^{\sigma/(\sigma-1)}$$

其中 $g_i(\varphi)$ 是部门内企业生产率的分布密度函数。假设 $p_i(\varphi)$ 为生产率为 φ 的企业的产品价格，从而容易得到部门价格指数为：

$$P_i = \left[\int p_i(\varphi)^{1-\sigma} g_i(\varphi) d\varphi \right]^{1/(1-\sigma)}$$

假设部门内部是垄断竞争市场结构，单个企业会选择自己的价格以最大化其利润。容易得到企业的定价规则为 $p_i(\varphi) = mc_i(\varphi)$ ，其中 $m = \frac{\sigma}{\sigma-1}$ ， $c_i(\varphi)$ 为生产边际成本，满足：

$$c_i(\varphi) = \begin{cases} \frac{1}{\varphi} \left(\frac{w}{\alpha_i \beta_i} \right)^{\alpha_i \beta_i} \left(\frac{P_i}{\alpha_i(1-\beta_i)} \right)^{\alpha_i(1-\beta_i)} \left(\frac{P_i^E}{1-\alpha_i} \right)^{1-\alpha_i}, & \text{无约束} \\ \frac{1}{\varphi^{1/\alpha_i} s_i^{(1-\alpha_i)/\alpha_i}} \left(\frac{w}{\beta_i} \right)^{\beta_i} \left(\frac{P_i}{1-\beta_i} \right)^{1-\beta_i} + s_i P_i^E, & \text{有约束} \end{cases}$$

给定部门加总方式，可以方便地求得部门的总体 TFP。定义部门消耗的总资源 $L_i = \int L_i(\varphi) g_i(\varphi) d\varphi$ ， $M_i = \int M_i(\varphi) g_i(\varphi) d\varphi$ ， $E_i = \int E_i(\varphi) g_i(\varphi) d\varphi$ ，进而定义部门生产率为 $A_i = \frac{Y_i}{L_i^{\alpha_i \beta_i} M_i^{\alpha_i(1-\beta_i)} E_i^{1-\alpha_i}}$ ，从而得到部门 TFP 的表达式：

$$A_i = \left(\int [\varphi l_i(\varphi)^{\alpha_i \beta_i} m_i(\varphi)^{\alpha_i(1-\beta_i)} e_i(\varphi)^{1-\alpha_i}]^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} g_i(\varphi) d\varphi \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}},$$

其中 $l_i(\varphi) = \frac{L_i(\varphi)}{L_i}$, $m_i(\varphi) = \frac{M_i(\varphi)}{M_i}$, $e_i(\varphi) = \frac{E_i(\varphi)}{E_i}$ 。求得 A_i 后, 之后对于生产网络和总产出的分析与基准模型完全一致。在存在排放限制的情况下, 排放限制可能通过影响部门实际生产率从而影响部门间的生产网络结构。对于部门内资源分配, 有以下结论:

定理 5: 部门内最优资源分配满足

$$l_i(\varphi) = m_i(\varphi) = e_i(\varphi) = \frac{\varphi^{\sigma-1}}{\int \varphi^{\sigma-1} g_i(\varphi) d\varphi},$$

当不存在排放强度上限时, 部门内资源分配可以达到最优; 当存在排放强度上限时, 部门内资源分配达不到最优, 即排放上限的存在会带来部门内资源错配。

定理 5 的证明见附录 2 (C)。由定理 5 得到, 对应的最优部门 TFP 满足:

$$A^* = \left(\int \varphi^{\sigma-1} g_i(\varphi) d\varphi \right)^{\frac{1}{\sigma-1}}.$$

对于单个企业而言, 根据其需求函数, 其均衡时的产量是价格的函数 $y_i(\varphi) \propto p_i(\varphi)^{-\sigma}$, 从而部门内资源分配达到最优当且仅当 $p_i(\varphi) \propto \varphi^{-1}$ 。由于 $p_i(\varphi) = mc_i(\varphi)$, 根据之前的表达式容易得出结论: 不存在排放强度上限时, 政府可以通过调节碳价使得部门内资源分配达到最优; 存在排放强度上限时, 部门资源分配无法达到最优, 部门内资源分配受到扭曲, 部门总体 TFP 下降, 会进一步导致部门产出的下降, 影响经济。为了具体计算错配程度, 首先求解存在排放强度上限约束 s 时的部门内资源分配情况。注意到对任意企业有 $p_i(\varphi)y_i(\varphi) \propto c_i(\varphi)^{1-\sigma}$, 而 $c_i(\varphi) \propto \frac{1}{\varphi} (\tau_i^e(\varphi))^{1-\alpha_i} \tau_i^y(\varphi)$, 其中 $\tau_i^e(\varphi) = (\varphi s)^{-1/\alpha_i} \frac{1-\alpha_i}{\alpha_i} \frac{c_{i0}}{p_i^E}$, $\tau_i^y(\varphi) = \alpha_i + \frac{1-\alpha_i}{\tau_i^e(\varphi)}$ 。

因此可以得到部门中企业产值分布为:

$$p_i(\varphi)y_i(\varphi) \propto \left(\frac{\varphi}{\tau_i^e(\varphi)^{1-\alpha_i} \tau_i^y(\varphi)} \right)^{\sigma-1} \equiv r_i(\varphi),$$

进而得到部门内部资源分配满足:

$$l_i(\varphi) = m_i(\varphi) = \frac{r_i(\varphi)/\tau_i^y(\varphi)}{\int r_i(\varphi)/\tau_i^y(\varphi) g_i(\varphi) d\varphi},$$

$$e_i(\varphi) = \frac{r_i(\varphi)/\tau_i^e(\varphi) \tau_i^y(\varphi)}{\int r_i(\varphi)/\tau_i^e(\varphi) \tau_i^y(\varphi) g_i(\varphi) d\varphi}.$$

从而可以定义排放强度上限 s 对应的部门 TFP 损失 L 为:

$$\frac{1}{A^*} \left\{ \int \left[\varphi \left(\frac{r_i(\varphi)/\tau_i^y(\varphi)}{\int r_i(\varphi)/\tau_i^y(\varphi) g_i(\varphi) d\varphi} \right)^{\alpha_i} \left(\frac{r_i(\varphi)/\tau_i^e(\varphi) \tau_i^y(\varphi)}{\int r_i(\varphi)/\tau_i^e(\varphi) \tau_i^y(\varphi) g_i(\varphi) d\varphi} \right)^{1-\alpha_i} \right]^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} g_i(\varphi) d\varphi \right\}^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}.$$

给定部门中企业生产率分布 $g_i(\varphi)$ 和部门的排放强度上限 s_i , 根据以上过程可以计算排放强度上限带来的资源错配情况。为了方便分析, 假设企业生产率 φ 满足参数为 $\eta = 2.5$ 的帕累托分布, 并且假定部门内部企业加总函数的参数满足 $\sigma = 2$ 。在标准化 $E(\varphi) = 1$ 的情况下立刻得到 $A^* = 1$, 与基准模型中的参数取值一致, 同时 $g_i(\varphi) = \eta \frac{x_m^\eta}{x^{\eta+1}}$, 其中 $x_m = \frac{\eta-1}{\eta}$ 。与之前的分析类似, 假设原本经济当中各部门不存在排放强度上限, 并允许部门内存在资源错配, 可以求解排放强度上限收紧 10% 带来的部门 TFP 损失, 结果如图 16 所示:

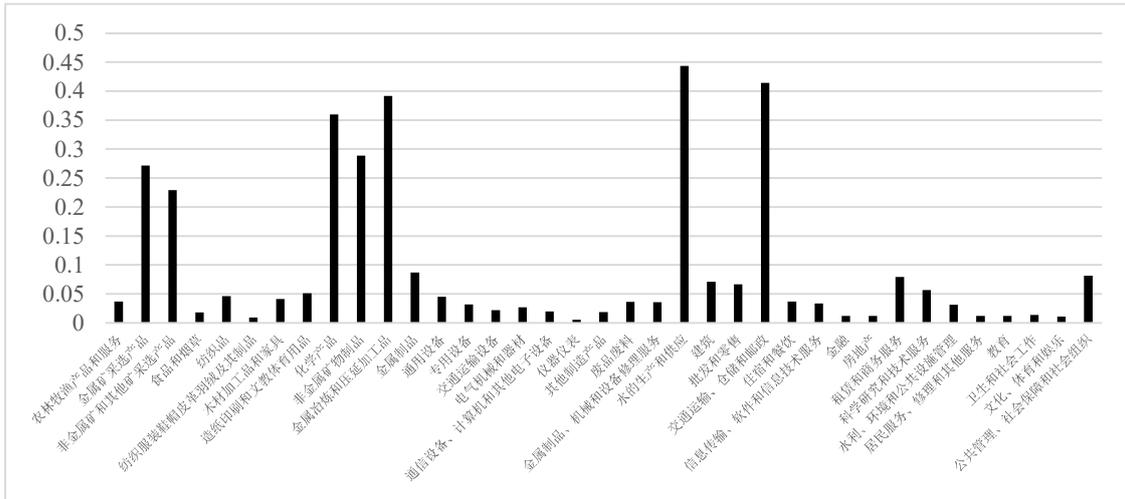


图 16: 排放上限带来的部门 TFP 损失

排放强度上限的存在导致部门内出现资源错配，从而导致部门 TFP 出现损失。相比之下，原本高排放的部门由于排放强度上限收紧带来的 TFP 损失更大，从而放大了经济中的减排效应。总体排放强度上限收紧 10% 会导致高排放部门的 TFP 下降 0.25%-0.45%，而其他部门的 TFP 下降大多在 0.1% 以下。因此，在存在部门内资源错配的情况下，排放强度上限收紧会导致高排放部门 TFP 下降更多，生产成本提升，因而在生产网络中的重要性进一步下降，碳排放进一步降低。模拟显示，存在部门内错配时，对所有部门收紧 10% 的排放强度上限会带来 11.97% 的减排，高于不考虑部门内资源错配的情况，对应的总收入损失为 3.01%。

(二) 环境政策与外部冲击

本部分分析存在环境政策时外部冲击的影响，特别地，我们分析存在和不存在排放上限的情况下外部生产率冲击的影响。假设高排放部门生产率提升 5%，那么理论上这会导致高排放部门生产成本下降，在生产网络中重要性提高，进而带来更高的碳排放。本部分讨论两种情况：所有部门均不存在排放强度上限约束，以及所有部门的排放强度上限约束维持在临界值 s^* 的 50%¹，并比较这两种情况下，高排放部门生产率提升带来的排放量提升以及产业结构变动。在两种政策环境下，生产率冲击带来的部门重要性变动如图 17 所示：

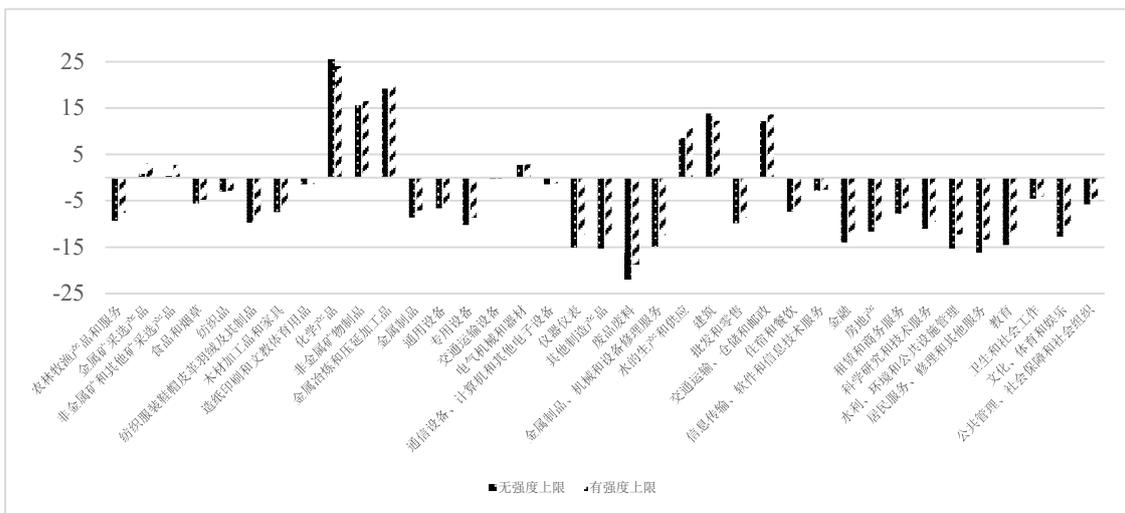


图 17: 生产率变动带来的产业结构变动

¹ 即 $s_j = 0.5s_j^*$ 。注意这里 A_j 增加后 s_j^* 会减小，因此 s_j 也会减小。如果假设 s_j 数值不变，生产率提升会导致排放强度上限相对放松，进一步增加碳减排，干扰结果。

由图 17 可以看出, 相比无排放强度上限的情况, 有排放强度上限约束时, 高排放部门的技术冲击带来的产业结构变化相对更小。从排放提升来看, 在无排放强度上限时, 高排放部门生产率提升 5% 会带来 24.37% 的总排放量提升; 而在存在排放强度上限时, 这只会带来约 16.36% 的总排放量提升。注意当部门存在排放强度上限约束时, 其“全要素生产率”的对应值为 $A_j^{1/\alpha_j} s_j^{(1-\alpha_j)/\alpha_j}$, 受到部门排放强度上限的影响, 不能完全体现在边际成本和产业结构变动上; 同时, 此时正向生产率带来的能源投入增加在一定程度上被排放强度上限所约束, 因此总排放量的增加更为有限。在这种情况下, 排放强度上限政策充当了外部生产率冲击的“缓冲器”角色, 能保证产业结构以及排放量更少地受到外部冲击影响。

六、总结

本文构建了包含能源使用、碳排放以及内生生产网络的多部门一般均衡模型, 并基于模型分析了碳价(能源税)以及排放强度上限的变动对部门间生产网络以及总体碳排放的影响。在模型中, 部门间摩擦以及生产成本的相对值决定了内生的部门间投入产出关系, 提升碳价和收紧排放强度上限都会导致高排放部门的生产成本相比低排放部门提升更多, 使得其他部门更少地使用高排放部门生产的产品作为中间品, 带来产业结构和投入产出关系的变化。在定量分析部分, 本文基于 2015 年的投入产出表校准了部门间摩擦系数以及能源投入占比等参数, 并分析了提升碳价和收紧排放强度上限的政策影响。本文发现, 提升碳价和收紧排放强度上限均会导致高能源使用和高排放部门在投入产出关系中的重要性下降, 实现产业结构的清洁化, 相比之下提升碳价对产业结构和投入产出关系的影响更为显著。此外, 本文还分析了提升碳价和收紧排放强度上限对总排放量的影响。政策模拟发现, 提升 10% 的碳价能够降低 11.2%-13.5% 的总排放量, 其中由于相对价格变动带来的生产网络变动能解释约 4.5% 的减排; 收紧 10% 的排放强度上限能够降低 6.7%-10.3% 的碳排放量, 其中价格变动以及生产网络的变动能解释约 0.5%。对于每种政策, 本文分析了整体干预和对高排放行业定点干预的效果, 发现对高排放行业定点干预能够精准地降低高排放行业的碳排放量, 而对其他部门的碳排放量影响相对较小, 部分能源投入占比低的行业生产甚至会得到促进, 碳排放有少量提高。在政策强度相似的情况下, 模拟发现提升碳价能更好地改变部门间投入产出结构, 促进产业结构向服务业等能源投入较少的部门倾斜; 但另一方面, 当经济面临外部冲击时, 排放上限的存在可以起到“缓冲器”的作用, 在一定程度上减小外部冲击对经济结构与排放量的影响。本文同时讨论了碳减排对家庭实际收入的影响, 发现提升碳价 10% 会导致居民实际总收入下降 2%-2.3%, 实际劳动收入下降 1.3%-1.6%; 而收紧排放强度上限 10% 会导致居民实际总收入下降 1.5%-2.2%, 对实际劳动收入影响不显著。

在基准模型外, 本文讨论了两方面的模型扩展。一方面, 可以在基准模型的基础上引入部门内部的资源分配。部门内不同企业生产率不同, 因此部门内部的资源错配可能导致部门总体的 TFP 下降。理论分析发现, 当不存在排放强度上限时, 政府可以通过调节碳价实现最优资源分配, 达到最高的部门生产率; 而存在排放强度上限时, 部门内部资源出现错配, 导致部门的生产率下滑。在给定文献常用的参数情况下, 本文基于基准模型的参数进行了模拟, 发现收紧排放上限 10% 会带来 0.5%-4.5% 的部门 TFP 损失, 高排放部门的 TFP 损失更大, 从而放大收紧排放上限的减排效应。另一方面, 本文考虑了开放经济的情况, 在存在开放经济时, 不同经济的劳动力市场存在分割, 因此工资不同。理论分析表明, 如果某个国家私自放松了排放强度限制或降低了本国碳价(能源税), 则会导致本国在全球投入产出结构中重要性上升, 产出增加; 但这一方面会降低其他国家的网络重要性从而导致其产出下降, 另一方面放松环境政策带来的排放成本需要全球所有国家承担。

本文在内生投入产出网络的框架下讨论了碳价以及排放强度上限等政策变动对碳排放

以及产业生产网络结构的影响，为更好地制定环境政策以实现“碳达峰”以及“碳中和”的目标提供了一定的政策参考。但要注意的是，为了方便分析和讨论，本文做出了一些假设，例如部门间生产率的标准化，以及中间产品价格与最终产品相等等，因此本文的结论只能作为在一定条件下政策的可能效果参考，并不能直接作为政策效果预测。特别地，本文考虑的是静态模型下生产网络的形成以及政策的影响，并未考虑企业和家庭的动态决策，如果要具体比较不同减排方式的成本以及收益，则需要引入家庭的劳动供给决策、储蓄决策以及部门资本积累决策，在动态的框架下讨论不同政策的影响。

参考文献

- 陈诗一, 2009: 《能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展》, 《经济研究》第4期。
- 贺菊煌、沈可挺、徐嵩龄, 2002: 《碳税与二氧化碳减排的CGE模型》, 《数量经济技术经济研究》第10期。
- 姜国刚, 2012: 《碳减排的社会经济福利分析》, 《管理世界》第10期。
- 廖明球, 2011: 《基于“节能减排”的投入产出模型研究》, 《中国工业经济》第7期。
- 刘宇、肖宏伟、吕郢康, 2015: 《多种税收返还模式下碳税对中国的经济影响——基于动态CGE模型》, 《财经研究》第1期。
- 倪红福, 2021: 《生产网络结构、减税降费与福利效应》, 《世界经济》第1期。
- 倪红福, 2022: 《中国间接税的效率损失——基于中国生产网络结构一般均衡模型方法》, 《管理世界》第5期。
- 涂正革, 2008: 《环境、资源与工业增长的协调性》, 《经济研究》第2期。
- 王遥、潘东阳、彭俞超、梁希, 2019: 《基于DSGE模型的绿色信贷激励政策研究》, 《金融研究》第11期。
- 严春晓、宋辉、张润清, 2018: 《新常态下能源-环境治理投入产出模型的构建与应用探索》, 《管理评论》第5期。
- 袁富华, 2010: 《低碳经济约束下的中国潜在经济增长》, 《经济研究》第8期。
- 张晓娣、刘学悦, 2015: 《征收碳税和发展可再生能源研究——基于OLG-CGE模型的增长及福利效应分析》, 《中国工业经济》第3期。
- 周基航、董丰、贾坤, 2023: 《绿色经济、资产泡沫与最优政策: 基于带有多部门资产泡沫的动态一般均衡视角》, 《经济学报》第1期。
- Acemoglu, D., Akcigit, U., Hanley, D., and Kerr, W., 2016, “Transition to Clean Technology”, *Journal of political economy*, 124(1), 52-104.
- Acemoglu, D., and Azar, P. D., 2020, “Endogenous Production Networks”, *Econometrica*, 88(1), 33-82.
- Acemoglu, D., Carvalho, V. M., Ozdaglar, A., and Tahbaz - Salehi, A., 2012, “The Network Origins of Aggregate Fluctuations”, *Econometrica*, 80(5), 1977-2016.
- Annicchiarico, B., and Di Dio, F., 2015, “Environmental Policy and Macroeconomic Dynamics in a New Keynesian Model”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 69, 1-21.
- Annicchiarico, B., and Di Dio, F., 2017, “GHG Emissions Control and Monetary Policy”, *Environmental and Resource Economics*, 67, 823-851.
- Baqae, D. R., 2018, “Cascading Failures in Production Networks”, *Econometrica*, 86(5), 1819-1838.
- Baqae, D. R., and Farhi, E., 2018, “Macroeconomics with Heterogeneous Agents and Input-Output Networks”, NBER working paper.
- Baqae, D. R., and Farhi, E., 2019, “The Macroeconomic Impact of Microeconomic Shocks: Beyond Hulten's Theorem”, *Econometrica*, 87(4), 1155-1203.
- Baqae, D. R., and Farhi, E., 2020, “Productivity and misallocation in general equilibrium”, *The Quarterly Journal of Economics*, 135(1), 105-163.
- Barrage, L., 2020, “Optimal Dynamic Carbon Taxes in a Climate-Economy Model with Distortionary Fiscal Policy”, *The Review of Economic Studies*, 87(1), 1-39.
- Bullard III, C. W., and Herendeen, R. A., 1975, “The Energy Cost of Goods and Services”, *Energy policy*, 3(4), 268-278.
- Caliendo, L., Parro, F., and Tsyvinski, A., 2022, “Distortions and the Structure of the World Economy”, *American Economic Journal: Macroeconomics*, 14(4), 274-308.
- Chan, Y. T., 2020, “Are Macroeconomic Policies Better in Curbing Air Pollution than Environmental Policies? A DSGE Approach with Carbon-Dependent Fiscal and Monetary Policies”, *Energy Policy*, 141, 111454.
- Chung, Y. H., Färe, R., and Grosskopf, S., 1997, “Productivity and Undesirable Outputs: a Directional Distance Function Approach.” *Journal of Environmental Management*, 51(3), 229-240.
- Copeland, B. R., and Taylor, M. S., 1994, “North-South Trade and the Environment”, *The Quarterly Journal of Economics*, 109(3), 755-787.
- Dafermos, Y., Nikolaidi, M., and Galanis, G., 2018, “Climate Change, Financial Stability and Monetary Policy”, *Ecological*

Economics, 152, 219-234.

Devereux, M. B., Gente, K., and Yu, C., 2023, "Production Networks and International Fiscal Spillovers", *The Economic Journal*, uead014.

Diluiso, F., Annicchiarico, B., Kalkuhl, M., and Minx, J. C., 2021, "Climate Actions and Macro-Financial Stability: The Role of Central Banks", *Journal of Environmental Economics and Management*, 110, 102548.

Dissou, Y., and Karnizova, L., 2016, "Emissions Cap or Emissions Tax? A Multi-Sector Business Cycle Analysis", *Journal of Environmental Economics and Management*, 79, 169-188.

Dong, F., and Wen, Y., 2019, "Long and Plosser Meet Bewley and Lucas", *Journal of Monetary Economics*, 102, 70-92.

Economides, G., and Xepapadeas, A., 2018, "Monetary Policy under Climate Change".

Färe, R., Grosskopf, S., and Pasurka Jr, C. A., 2007, "Environmental Production Functions and Environmental Directional Distance Functions", *Energy*, 32(7), 1055-1066.

Ferrari, A., and Landi, V. N., 2023, "Whatever it Takes to Save the Planet? Central Banks and Unconventional Green Policy", *Macroeconomic Dynamics*, 1-26.

Fischer, C., and Springborn, M., 2011, "Emissions Targets and the Real Business Cycle: Intensity Targets Versus Caps or Taxes", *Journal of Environmental Economics and Management*, 62(3), 352-366.

Floros, N., and Vlachou, A., 2005, "Energy Demand and Energy-Related CO2 Emissions in Greek Manufacturing: Assessing the Impact of a Carbon Tax", *Energy economics*, 27(3), 387-413.

Golosov, M., Hassler, J., Krusell, P., and Tsyvinski, A., 2014, "Optimal Taxes on Fossil Fuel in General Equilibrium", *Econometrica*, 82(1), 41-88.

Goto, N., 1995, "Macroeconomic and Sectoral Impacts of Carbon Taxation: A Case for the Japanese economy", *Energy Economics*, 17(4), 277-292.

Guo, Z., Zhang, X., Zheng, Y., and Rao, R., 2014, "Exploring the Impacts of a Carbon Tax on the Chinese Economy Using a CGE Model with a Detailed Disaggregation of Energy Sectors", *Energy Economics*, 45, 455-462.

Heutel, G., 2012, "How should Environmental Policy Respond to Business Cycles? Optimal Policy under Persistent Productivity Shocks", *Review of Economic Dynamics*, 15(2), 244-264.

Horvath, M., 1998, "Cyclicality and Sectoral Linkages: Aggregate Fluctuations from Independent Sectoral Shocks", *Review of Economic Dynamics*, 1(4), 781-808.

Horvath, M., 2000, "Sectoral Shocks and Aggregate Fluctuations", *Journal of Monetary Economics*, 45(1), 69-106.

Kopytov, A., Mishra, B., Nimark, K., and Taschereau-Dumouchel, M., 2021, "Endogenous Production Networks under Supply Chain Uncertainty", Available at SSRN 3936969.

Long Jr, J. B., and Plosser, C. I., 1983, "Real Business Cycles", *Journal of Political Economy*, 91(1), 39-69.

Mohtadi, H., 1996, "Environment, Growth, and Optimal Policy Design", *Journal of Public economics*, 63(1), 119-140.

Punzi, M. T., 2018, "Role of Bank Lending in Financing Green Projects: A Dynamic Stochastic General Equilibrium Approach", ADBI working paper.

Rishanty, A., Setiastuti, S. U., and Purwanto, N. M. A., 2021, "The Growth Agenda And Financing Green Projects: An Environmental DSGE Approach", working paper.

Stokey, N. L., 1998, "Are there Limits to Growth?", *International Economic Review*, 1-31.

Tombe, T., and Winter, J., 2015, "Environmental Policy and Misallocation: The Productivity Effect of Intensity Standards", *Journal of Environmental Economics and Management*, 72, 137-163.

附录

附录 1：证明中间品价格指数等于部门价格

考虑中间品购买的成本最小化问题：

$$\min \sum_k \kappa_{jk} c_k Q_{jk}$$

使得

$$M_j = \left(\sum_k \iota_{jk} Q_{jk}^{\frac{\theta}{1+\theta}} \right)^{\frac{1+\theta}{\theta}} = \bar{M}_j$$

对 Q_{jk} 和 Q_{jh} 的一阶条件相除可以得到：

$$\frac{\kappa_{jk} c_k}{\kappa_{jh} c_h} = \frac{\iota_{jk} Q_{jk}^{-\frac{1}{1+\theta}}}{\iota_{jh} Q_{jh}^{-\frac{1}{1+\theta}}}$$

从而得到

$$\frac{\iota_{jk} Q_{jk}^{\frac{\theta}{1+\theta}}}{\iota_{jh} Q_{jh}^{\frac{\theta}{1+\theta}}} = \left(\frac{\kappa_{jk} c_k}{\kappa_{jh} c_h} \right)^{-\theta} \left(\frac{\iota_{jh}}{\iota_{jk}} \right)^{-(1+\theta)} = \frac{(\tau_{jk} c_k)^{-\theta}}{(\tau_{jh} c_h)^{-\theta}}$$

即

$$\iota_{jk} Q_{jk}^{\frac{\theta}{1+\theta}} = \frac{(\tau_{jk} c_k)^{-\theta}}{\sum_h (\tau_{jh} c_h)^{-\theta}} \bar{M}_j^{\frac{\theta}{1+\theta}}$$

因此 j 部门的中间品组合价格可以表示为：

$$P_j^m = \frac{\sum_k \kappa_{jk} c_k Q_{jk}}{\bar{M}_j} = \frac{\sum_k (\tau_{jk} c_k)^{-(1+\theta)} \frac{1+\theta}{\theta} \kappa_{jk} c_k}{\left(\sum_h (\tau_{jh} c_h)^{-\theta} \right)^{\frac{1+\theta}{\theta}}} = \frac{\sum_k (\tau_{jk} c_k)^{-\theta}}{\left(\sum_h (\tau_{jh} c_h)^{-\theta} \right)^{\frac{1+\theta}{\theta}}} = \left(\sum_h (\tau_{jh} c_h)^{-\theta} \right)^{-\frac{1}{\theta}}$$

从而显然有 $P_j^m = P_j$ 。

附录 2：对文中定理的证明

(A) 对定理 2 的证明

由部门间生产网络 ω_{jk} 的表达式容易得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial \log \omega_{jk}}{\partial P_h^E} &= -\theta \varphi \frac{1}{P_k} \frac{\partial P_k}{\partial P_h^E} + \theta(1-\gamma-\varphi) \frac{\tau_{jh}^{-\theta} A_h^\theta P_h^{-\theta\varphi} (P_h^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)-1}}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} A_l^\theta (P_l^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)} P_l^{-\theta\varphi}} \\ &\quad + \theta \varphi \sum_{m=1}^J \frac{\tau_{jm}^{-\theta} A_m^\theta W^{-\theta\gamma} P_m^{-\theta\varphi-1} (P_m^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)}}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} A_l^\theta W^{-\theta\gamma} (P_l^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)} P_l^{-\theta\varphi}} \frac{\partial P_m}{\partial P_h^E} \end{aligned}$$

当价格效应满足 $\frac{\partial P_m}{\partial P_h^E} \geq 0$ ，即部门碳价提升不会导致任何部门的价格下降，以及

$\sum_{m=1}^J \frac{\tau_{jm}^{-\theta} A_m^\theta W^{-\theta\gamma} P_m^{-\theta\varphi} (P_m^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)}}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} A_l^\theta W^{-\theta\gamma} (P_l^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)} P_l^{-\theta\varphi}} \frac{1}{P_m} \frac{\partial P_m}{\partial P_h^E} - \frac{1}{P_k} \frac{\partial P_k}{\partial P_h^E} \geq 0$ 时，立刻得到 $\frac{\partial \log \omega_{jk}}{\partial P_h^E} \geq 0$ ，即其他部门

碳价提升会导致其他部门更多地使用本部门的产品作为中间品。

将 $\log \omega_{jk}$ 对 P_k^E 求导得到:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \log \omega_{jk}}{\partial P_k^E} &= -\theta(1-\gamma-\varphi) \frac{1}{P_k^E} - \theta\varphi \frac{1}{P_k} \frac{\partial P_k}{\partial P_k^E} \\
&+ \theta(1-\gamma-\varphi) \frac{\tau_{jk}^{-\theta} A_k^\theta W^{-\theta} P_k^{-\theta\varphi} (P_k^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)-1}}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} A_l^\theta W^{-\theta\gamma} (P_l^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)} P_l^{-\theta\varphi}} \\
&+ \theta\varphi \sum_{h=1}^J \frac{\tau_{jh}^{-\theta} A_h^\theta W^{-\theta\gamma} P_h^{-\theta\varphi-1} (P_h^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)}}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} A_l^\theta W^{-\theta\gamma} (P_l^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)} P_l^{-\theta\varphi}} \frac{\partial P_h}{\partial P_k^E} \\
&= \theta(1-\gamma-\varphi) \frac{1}{P_k^E} \left[\frac{\tau_{jk}^{-\theta} A_k^\theta W^{-\theta\gamma} P_k^{-\theta\varphi} (P_k^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)}}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} A_l^\theta W^{-\theta\gamma} (P_l^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)} P_l^{-\theta\varphi}} - 1 \right] \\
&+ \theta\varphi \frac{1}{P_k} \frac{\partial P_k}{\partial P_k^E} \left[\sum_{h=1}^J \frac{\tau_{jh}^{-\theta} A_h^\theta W^{-\theta\gamma} P_h^{-\theta\varphi} (P_h^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)}}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} A_l^\theta W^{-\theta\gamma} (P_l^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)} P_l^{-\theta\varphi}} \frac{1}{P_h} \frac{\partial P_h}{\partial P_k^E} / \frac{1}{P_k} \frac{\partial P_k}{\partial P_k^E} - 1 \right] \\
\text{当 } \frac{1}{P_h} \frac{\partial P_h}{\partial P_k^E} / \frac{1}{P_k} \frac{\partial P_k}{\partial P_k^E} &< 1 \text{ 时我们有 } \frac{\tau_{jk}^{-\theta} A_k^\theta W^{-\theta\gamma} P_k^{-\theta\varphi} (P_k^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)}}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} A_l^\theta W^{-\theta\gamma} (P_l^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)} P_l^{-\theta\varphi}} < 1 \text{ 以及} \\
\sum_{h=1}^J \frac{\tau_{jh}^{-\theta} A_h^\theta W^{-\theta\gamma} P_h^{-\theta\varphi} (P_h^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)}}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} A_l^\theta W^{-\theta\gamma} (P_l^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)} P_l^{-\theta\varphi}} \frac{1}{P_h} \frac{\partial P_h}{\partial P_k^E} / \frac{1}{P_k} \frac{\partial P_k}{\partial P_k^E} \\
&< \sum_{h=1}^J \frac{\tau_{jh}^{-\theta} A_h^\theta W^{-\theta\gamma} P_h^{-\theta\varphi} (P_h^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)}}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} A_l^\theta W^{-\theta\gamma} (P_l^E)^{-\theta(1-\gamma-\varphi)} P_l^{-\theta\varphi}} = 1
\end{aligned}$$

从而有 $\frac{\partial \log \omega_{jk}}{\partial P_k^E} \leq 0$, 即本部门碳价提升会导致其他部门更少地使用本部门作为中间品。

(B) 对定理 3 的证明

由存在排放强度上限时生产网络的表达式容易得到

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \log \omega_{jk}}{\partial s_h} \\
&= -\theta(1-\beta) \frac{1}{P_k} \frac{\partial P_k}{\partial s_h} \frac{\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} S_k^{(\alpha-1)/\alpha} W^{-\beta} P_k^{-(1-\beta)}}{\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} S_k^{(\alpha-1)/\alpha} W^\beta P_k^{(1-\beta)} + s_k P_k^E} \\
&- \frac{\theta(1-\alpha)}{\alpha} \frac{1}{s_h} \frac{\tau_{jh}^{-\theta} \left(\mu_h^{-1} A_h^{-1/\alpha} S_h^{-(1-\alpha)/\alpha} W^\beta P_h^{(1-\beta)} + s_h P_h^E \right)^{-\theta-1} \mu_h^{-1} A_h^{-1/\alpha} S_h^{-(1-\alpha)/\alpha} W^\beta P_h^{(1-\beta)}}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} \left(\mu_l^{-1} A_l^{-1/\alpha} S_l^{-(1-\alpha)/\alpha} W^\beta P_l^{(1-\beta)} + s_l P_l^E \right)^{-\theta}} \\
&+ \theta \frac{\tau_{jh}^{-\theta} \left(\mu_h^{-1} A_h^{-1/\alpha} S_h^{-(1-\alpha)/\alpha} W^\beta P_h^{(1-\beta)} + s_h P_h^E \right)^{-\theta-1} P_h^E}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} \left(\mu_l^{-1} A_l^{-1/\alpha} S_l^{-(1-\alpha)/\alpha} W^\beta P_l^{(1-\beta)} + s_l P_l^E \right)^{-\theta}} \\
&+ \theta(1-\beta) \sum_{m=1}^J \frac{\tau_{jm}^{-\theta} \left(\mu_m^{-1} A_m^{-1/\alpha} S_m^{-(1-\alpha)/\alpha} W^\beta P_m^{(1-\beta)} + s_m P_m^E \right)^{-\theta-1} \mu_m^{-1} A_m^{-1/\alpha} S_m^{-(1-\alpha)/\alpha} W^\beta P_m^{(1-\beta)-1} \frac{\partial P_m}{\partial s_h}}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} \left(\mu_l^{-1} A_l^{-1/\alpha} S_l^{-(1-\alpha)/\alpha} W^\beta P_l^{(1-\beta)} + s_l P_l^E \right)^{-\theta}}
\end{aligned}$$

由于排放上限是紧约束时 $\frac{E}{L^\beta M^{1-\beta}} = (As)^\alpha < \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{c_k^0}{P_k^E}$, 其中 $c_k^0 = \left(\frac{w}{\beta}\right)^\beta \left(\frac{P_k}{1-\beta}\right)^{1-\beta}$, 因此得到

$$\frac{(1-\alpha) \mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} S_k^{(\alpha-1)/\alpha} W^\beta P_k^{(1-\beta)}}{\alpha S_k} - P_k^E > 0, \text{ 即}$$

$$\frac{\theta(1-\alpha) \frac{1}{S_h} \tau_{jh}^{-\theta} \left(\mu_h^{-1} A_h^{-1/\alpha} S_h^{-(1-\alpha)/\alpha} W^\beta P_h^{(1-\beta)} + S_h P_h^E \right)^{-\theta-1} \mu_h^{-1} A_h^{-1/\alpha} S_h^{-(1-\alpha)/\alpha} W^\beta P_h^{(1-\beta)}}{\alpha \sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} \left(\mu_l^{-1} A_l^{-1/\alpha} S_l^{-(1-\alpha)/\alpha} W^\beta P_l^{(1-\beta)} + S_l P_l^E \right)^{-\theta}} + \theta \frac{\tau_{jh}^{-\theta} \left(\mu_h^{-1} A_h^{-1/\alpha} S_h^{-(1-\alpha)/\alpha} W^\beta P_h^{(1-\beta)} + S_h P_h^E \right)^{-\theta-1} P_h^E}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} \left(\mu_l^{-1} A_l^{-1/\alpha} S_l^{-(1-\alpha)/\alpha} W^\beta P_l^{(1-\beta)} + S_l P_l^E \right)^{-\theta}} < 0$$

进一步假设价格效应满足：

$$\sum_{m=1}^J \frac{\tau_{jm}^{-\theta} \left(\mu_m^{-1} A_m^{-1/\alpha} S_m^{-(1-\alpha)/\alpha} W^\beta P_m^{(1-\beta)} + S_m P_m^E \right)^{-\theta-1} \mu_m^{-1} A_m^{-1/\alpha} S_m^{-(1-\alpha)/\alpha} W^\beta P_m^{(1-\beta)}}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} \left(\mu_l^{-1} A_l^{-1/\alpha} S_l^{-(1-\alpha)/\alpha} W^\beta P_l^{(1-\beta)} + S_l P_l^E \right)^{-\theta}} \frac{1}{P_m} \frac{\partial P_m}{\partial S_h} - \frac{\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} S_k^{(\alpha-1)/\alpha} W^\beta P_k^{-(1-\beta)}}{\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} S_k^{(\alpha-1)/\alpha} W^\beta P_k^{(1-\beta)} + S_k P_k^E} \frac{1}{P_k} \frac{\partial P_k}{\partial S_h} \leq 0$$

从而我们容易得到，当 $\frac{\partial P_m}{\partial S_h} \leq 0$ 时有 $\frac{\partial \log \omega_{jk}}{\partial S_h} \leq 0$ 。同时我们有：

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \log \omega_{jk}}{\partial s_k} \\
&= \frac{\theta(1-\alpha)}{\alpha} \frac{1}{s_k} \frac{\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} s_k^{(\alpha-1)/\alpha} w^\beta P_k^{(1-\beta)}}{\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} s_k^{(\alpha-1)/\alpha} w^\beta P_k^{(1-\beta)} + s_k P_k^E} - \theta \frac{P_k^E}{\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} s_k^{(\alpha-1)/\alpha} w^\beta P_k^{(1-\beta)} + s_k P_k^E} \\
&- \theta(1-\beta) \frac{1}{P_k} \frac{\partial P_k}{\partial s_k} \frac{\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} s_k^{(\alpha-1)/\alpha} w^{-\beta} P_k^{-(1-\beta)}}{\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} s_k^{(\alpha-1)/\alpha} w^\beta P_k^{(1-\beta)} + s_k P_k^E} \\
&- \frac{\theta(1-\alpha)}{\alpha} \frac{1}{s_k} \frac{\tau_{jk}^{-\theta} \left(\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} s_k^{-(1-\alpha)/\alpha} w^\beta P_k^{(1-\beta)} + s_k P_k^E \right)^{-\theta-1} \mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} s_k^{-(1-\alpha)/\alpha} w^\beta P_k^{(1-\beta)}}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} \left(\mu_l^{-1} A_l^{-1/\alpha} s_l^{-(1-\alpha_l)/\alpha_l} w^{\beta_l} P_l^{(1-\beta_l)} + s_l P_l^E \right)^{-\theta}} \\
&+ \theta \frac{\tau_{jk}^{-\theta} \left(\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} s_k^{-(1-\alpha)/\alpha} w^\beta P_k^{(1-\beta)} + s_k P_k^E \right)^{-\theta-1} P_k^E}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} \left(\mu_l^{-1} A_l^{-1/\alpha} s_l^{-(1-\alpha_l)/\alpha_l} w^{\beta_l} P_l^{(1-\beta_l)} + s_l P_l^E \right)^{-\theta}} \\
&+ \theta(1-\beta) \sum_{h=1}^J \frac{\tau_{jh}^{-\theta} \left(\mu_h^{-1} A_h^{-1/\alpha} s_h^{-(1-\alpha)/\alpha} w^\beta P_h^{(1-\beta)} + s_h P_h^E \right)^{-\theta-1} \mu_h^{-1} A_h^{-1/\alpha} s_h^{-(1-\alpha)/\alpha} w^\beta P_h^{(1-\beta)-1}}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} \left(\mu_l^{-1} A_l^{-1/\alpha} s_l^{-(1-\alpha_l)/\alpha_l} w^{\beta_l} P_l^{(1-\beta_l)} + s_l P_l^E \right)^{-\theta}} \frac{\partial P_h}{\partial s_k} \\
&= \left[\frac{\theta(1-\alpha)}{\alpha} \frac{\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} s_k^{(\alpha-1)/\alpha} w^\beta P_k^{(1-\beta)}}{s_k} - \theta P_k^E \right] \frac{1}{\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} s_k^{(\alpha-1)/\alpha} w^\beta P_k^{(1-\beta)} + s_k P_k^E} \left[1 \right. \\
&- \left. \frac{\tau_{jk}^{-\theta} \left(\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} s_k^{-(1-\alpha)/\alpha} w^\beta P_k^{(1-\beta)} + s_k P_k^E \right)^{-\theta}}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} \left(\mu_l^{-1} A_l^{-1/\alpha} s_l^{-(1-\alpha_l)/\alpha_l} w^{\beta_l} P_l^{(1-\beta_l)} + s_l P_l^E \right)^{-\theta}} \right] \\
&- \theta(1-\beta) \frac{1}{P_k} \frac{\partial P_k}{\partial s_k} \frac{\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} s_k^{(\alpha-1)/\alpha} w^{-\beta} P_k^{-(1-\beta)}}{\mu_k^{-1} A_k^{-1/\alpha} s_k^{(\alpha-1)/\alpha} w^\beta P_k^{(1-\beta)} + s_k P_k^E} \left[1 \right. \\
&- \left. \sum_{h=1}^J \frac{\tau_{jh}^{-\theta} \left(\mu_h^{-1} A_h^{-1/\alpha} s_h^{-(1-\alpha)/\alpha} w^\beta P_h^{(1-\beta)} + s_h P_h^E \right)^{-\theta} \frac{1}{P_h} \frac{\partial P_h}{\partial s_k}}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} \left(\mu_l^{-1} A_l^{-1/\alpha} s_l^{-(1-\alpha_l)/\alpha_l} w^{\beta_l} P_l^{(1-\beta_l)} + s_l P_l^E \right)^{-\theta} \frac{1}{P_k} \frac{\partial P_k}{\partial s_k}} \right] \\
&\text{在 } \frac{\frac{1}{P_k} \frac{\partial P_h}{\partial s_k}}{\frac{1}{P_k} \frac{\partial P_k}{\partial s_k}} < 1 \text{ 的情况下我们立刻得到}
\end{aligned}$$

$$\sum_{h=1}^J \frac{\tau_{jh}^{-\theta} \left(\mu_h^{-1} A_h^{-1/\alpha} s_h^{-(1-\alpha)/\alpha} w^\beta P_h^{(1-\beta)} + s_h P_h^E \right)^{-\theta} \frac{1}{P_h} \frac{\partial P_h}{\partial s_k}}{\sum_{l=1}^J \tau_{jl}^{-\theta} \left(\mu_l^{-1} A_l^{-1/\alpha} s_l^{-(1-\alpha_l)/\alpha_l} w^{\beta_l} P_l^{(1-\beta_l)} + s_l P_l^E \right)^{-\theta} \frac{1}{P_k} \frac{\partial P_k}{\partial s_k}} < 1$$

从而有 $\frac{\partial \log \omega_{jk}}{\partial s_k} \geq 0$ 。

(C) 对定理 5 的证明

注意到部门 TFP 的表达式为：

$$A_i = \left(\int [\varphi l_i(\varphi)^{\alpha_i \beta_i} m_i(\varphi)^{\alpha_i(1-\beta_i)} e_i(\varphi)^{1-\alpha_i}]^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} g_i(\varphi) d\varphi \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

下面求解最优的部门内部资源分配，最大化生产率问题为：

$$\max \left(\int [\varphi l_i(\varphi)^{\alpha_i \beta_i} m_i(\varphi)^{\alpha_i(1-\beta_i)} e_i(\varphi)^{1-\alpha_i}]^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} g_i(\varphi) d\varphi \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

$$s. t. \int l_i(\varphi) g_i(\varphi) d\varphi = 1, \int m_i(\varphi) g_i(\varphi) d\varphi = 1, \int e_i(\varphi) g_i(\varphi) d\varphi = 1$$

一阶条件为：

$$\begin{aligned} \frac{\sigma}{\sigma-1} A_i^{\frac{1}{\sigma}} \frac{\sigma-1}{\sigma} y_i(\varphi)^{-\frac{1}{\sigma}} g_i(\varphi) \alpha_i \beta_i \frac{y_i(\varphi)}{l_i(\varphi)} &= \lambda g_i(\varphi) \\ \frac{\sigma}{\sigma-1} A_i^{\frac{1}{\sigma}} \frac{\sigma-1}{\sigma} y_i(\varphi)^{-\frac{1}{\sigma}} g_i(\varphi) \alpha_i (1-\beta_i) \frac{y_i(\varphi)}{m_i(\varphi)} &= \mu g_i(\varphi) \\ \frac{\sigma}{\sigma-1} A_i^{\frac{1}{\sigma}} \frac{\sigma-1}{\sigma} y_i(\varphi)^{-\frac{1}{\sigma}} g_i(\varphi) (1-\alpha_i) \frac{y_i(\varphi)}{e_i(\varphi)} &= \psi g_i(\varphi) \end{aligned}$$

其中 $y_i(\varphi) = \varphi l_i(\varphi)^{\alpha_i \beta_i} m_i(\varphi)^{\alpha_i(1-\beta_i)} e_i(\varphi)^{1-\alpha_i}$ 。从而得到：

$$\begin{aligned} \alpha_i \beta_i A_i \frac{y_i(\varphi)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}}{\int y_i(\varphi)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} g_i(\varphi) d\varphi} &= \lambda l_i(\varphi) \\ \alpha_i (1-\beta_i) A_i \frac{y_i(\varphi)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}}{\int y_i(\varphi)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} g_i(\varphi) d\varphi} &= \mu m_i(\varphi) \\ (1-\alpha_i) A_i \frac{y_i(\varphi)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}}{\int y_i(\varphi)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} g_i(\varphi) d\varphi} &= \psi e_i(\varphi) \end{aligned}$$

将以上三式在部门内做积分得到 $\alpha_i \beta_i A_i = \lambda$, $\alpha_i (1-\beta_i) A_i = \mu$, $(1-\alpha_i) A_i = \psi$, 进而得到最优资源分配满足：

$$l_i(\varphi) = m_i(\varphi) = e_i(\varphi) = \frac{y_i(\varphi)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}}{\int y_i(\varphi)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} g_i(\varphi) d\varphi}$$

从而又有 $y_i(\varphi) \propto \varphi l_i(\varphi) \propto \varphi m_i(\varphi) \propto \varphi e_i(\varphi)$, 回代得到 $l_i(\varphi) \propto \varphi^{\sigma-1}$, 进而有最优分配为：

$$l_i(\varphi) = m_i(\varphi) = e_i(\varphi) = \frac{\varphi^{\sigma-1}}{\int \varphi^{\sigma-1} g_i(\varphi) d\varphi}$$