DOI: 10. 20180/j. qjem. 2024. 03. 06

生产网络视角下的碳税制度

陈诗源 任 菲 虞吉海*

摘 要：本文从生产网络视角，探究对能源消费部门征收碳税如何通过生产网络联动影响各部门生产投入、产出及碳排放。由于生产网络的存在，征收碳税不仅会通过减少征税部门产出降低经济体总碳排放，还会通过生产网络上下游关联引发间接影响。因此，基于部门在生产网络中所处位置有针对性地征收碳税才能实现最大的减排效果。本文构建生产网络视角下的碳税模型，结合2020年中国投入产出表与估算的42部门、153部门碳排放数据，模拟分析征收小额碳税对征税部门劳动投入、产量、碳排放以及经济体总碳排放的影响。结果表明，对各部门征收碳税引发的减排效果与部门直接排放量的排序并非一一对应；对42部门中“石油、炼焦产品和核燃料加工品”“电力、热力的生产和供应”“金属冶炼和压延加工品”征税带来的减碳效果最明显，尤其是“石油、炼焦产品和核燃料加工品”部门，其碳税减排效应和碳减排效率均位于42部门中的首位，因此在制定碳税政策时可予以重点考虑。

关键词：碳中和；生产网络；碳税；隐含碳流动

中图分类号：F812. 42

JEL 分类号：H23；L50；Q48

一、引 言

2020年9月22日，在第七十五届联合国大会上，我国提出了碳达峰碳中和目标，即力争2030年前实现碳达峰，努力争取2060年前实现碳中和。为推动“双碳”目标实现，我国提出了相关发展规划与部署。2021年10月24日，中共中央、国务院印发了《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》。两天后（10月26日），国务院发布了《2030年前碳达峰行动方案》。这两份文件共同构成了“双碳”领域政策体系的纲领性文件。此后，国务院、各部委、地方政府围绕着两份纲领性文件相继出台了配套落实方案，碳中和相关政策逐渐丰满起来。2022年

* 陈诗源，北京大学光华管理学院，E-mail: chenshiyuan@stu. pku. edu. cn；任菲，北京大学光华管理学院，E-mail: fren@gsm. pku. edu. cn；虞吉海（通信作者），北京大学光华管理学院，E-mail: jihai. yu@gsm. pku. edu. cn。作者感谢国家自然科学基金面上项目（72371002）、国家自然科学基金杰出青年项目（71925006）、国家自然科学基金重点项目（72333001）和能源基金会对本文研究的资助。作者感谢匿名审稿人和编辑部的宝贵意见，当然文责自负。

1 月国务院印发的《“十四五”节能减排综合工作方案》提出，到 2025 年，全国单位国内生产总值能源消耗比 2020 年下降 13.5%，能源消费总量得到合理控制。同月，国家发展改革委和国家能源局发布《“十四五”现代能源体系规划》，明确提出了对风电、太阳能发电、光伏发电的支持政策。2022 年 6 月，国家住建部提出《城乡建设领域碳达峰实施方案》，对隐含碳排放最大的建筑业部门提出了建筑节能要求。

我国开展节能减排工作已有 40 余年历史，其间，节能减排政策体系不断改革完善，为降低碳排放积累了丰富的经验。1980 年，《关于加强节约能源工作的报告》指出能源问题已成为国民经济发展中的一个突出矛盾。20 世纪 80 年代至 90 年代中期，我国处于计划经济向市场经济转型阶段，政府主要采取计划用电包干、超定额耗用燃料加价收费、许可证制度等行政指令推行节能减排（沈霁华，2014），市场化手段运用相对较少。1997 年，全国人大将节约资源确定为我国基本国策，我国进入节能减排政策体系的第二阶段。此后 10 年时间里，节能减排的政策工具在保留行政手段运用的同时，如加大淘汰落后产能力度、加强重点耗能单位节能管理、落实节能减排目标责任，也通过加强排污费征收等方式逐步向市场化迈进。2008 年，我国修订《中华人民共和国节约能源法》，完善节能制度，标志着我国节能减排政策体系进入深化改革阶段。在此期间，我国节能政策从行政指令为主过渡到重视市场化的经济激励政策。“十一五”期间，我国加大节能和环保财政投入，扩大节能项目税收优惠范围和力度，深入实施差别电价，增强绿色信贷支持以激励企业节能。2016 年，我国正式加入《巴黎协定》，承诺与全球近 200 个国家共同应对气候变化的挑战，控制全球升温 2 摄氏度以内。2020 年后，“双碳”目标成为我国重大战略决策，优化能源结构、发展低碳技术成为重中之重。政府采用更加严格的监管措施和能耗标准约束高耗能、高排放行业盲目扩张，并积极优化财税价格政策，推动绿色金融体系建设。同时，碳排放权交易（简称“碳交易”）作为核心的市场调节机制，成为重要的市场化降碳政策手段。

碳交易，是碳定价[1] 的一种方式，是指将碳排放作为一种商品，允许企业在一定排放总量的前提下，购入或卖出相应的配额，通过优化配置碳排放资源，为排放实体提供经济激励，推动产业优化升级，实现碳减排。2011 年，我国在北京、天津、上海等 7 个省市启动碳排放权交易试点。2013 年起，这些地区的碳市场相继开启了线上交易。2021 年 7 月，全国碳交易市场正式开市，一经上线即成为全球覆盖温室气体排放量规模最大的碳交易市场，覆盖排放量超过 40 亿吨。当年，全国碳排放配额（CEA）总成交量为 1.79 亿吨，履约完成率高达 99.5%；2022 年全国碳市场量跌价升，碳排放配额成交量降至 5 089 万吨，收盘价和年内成交均价分别为 55 元/

1 碳定价是指对温室气体排放以吨二氧化碳当量为单位给予明确定价的机制，主要包括碳税与碳交易两种方式，是各国和地区应对气候问题所采用的重要政策选项。

吨和 55.3 元/吨，成交总额为 28 亿元；2023 年全国碳市场量价齐升，全年碳排放配额成交量和成交额分别增至 2.12 亿吨和 144.44 亿元，每日综合价格收盘价在 41.46～81.67 元/吨。在我国推进碳减排过程中，碳交易起到了重要作用，但目前作用有限。

碳税，是碳交易之外的另一种碳定价机制，是引导经济主体主动优化能源结构，降低温室气体排放，推动经济社会发展绿色转型的另一个重要市场激励型政策工具，并且被认为是各类减排措施中最划算的方式（Baranzini et al.，2000）。许多国家和地区成功实现了碳税与碳交易的协同发展。芬兰于 1990 年开征碳税，此后，挪威、瑞典、丹麦等其他北欧国家也相继实施碳税。目前，碳税已在全球 30 多个国家和地区推广运行，并取得了积极的成效。中国开征碳税的可行性一直是研究的热门话题。碳税主要有两种征收方式：一是生产性碳税，是指由能源生产企业作为纳税人，以能源生产部门的产量作为税基，根据能源产品的品种以确定不同税率进行征收的税收形式；二是消费性碳税，由能源消费主体（企业及家庭）承担，采用按排放量或按化石燃料使用量征税两种方式。前者需要建立一整套有关 CO_2 排放量的测量、报告和审核制度（MRV），其监测技术、数据监管都对纳税遵从提出了很高的要求，征管成本大；后者通过燃料使用量估算 CO_2 排放量，实践中一般直接按燃料的销售数量征税，征管成本小。大部分国家采用对消费者责任方征收碳税的方式，纳税人主要是处在能源使用链条中的企业或居民。而加拿大和日本两国，实行对生产者责任方征收碳税的方式，通过提高产品价格将碳税税负转嫁给消费者，其纳税人主要是能源开采、进口和生产企业。在本文的模型设定中，采用第二种方式，对能源消费企业的直接碳排放量征收渐进碳税[2]。

目前，中国碳税制度的研究主要集中在开征碳税的可行性分析，以及利用“可计算一般均衡”（CGE）等大型宏观模型模拟碳税对经济和减排两个方面的影响。申嫦娥等（2014）、朴英爱和杨志宇（2016）、刘磊和张永强（2019）、王茹（2021）等结合国内外研究文献和国外碳税政策的实践经验对碳税的制度设计（包括征税对象、计税依据、税率与税收优惠、税收收入使用等）以及碳税与碳交易的比较和协同发展展开分析。贺菊煌等（2002）是最早对我国征收碳税进行定量分析的研究之一，他们基于 CGE 模型模拟分析了征收碳税对我国经济的影响，发现碳税会使各部

2　碳税是为单位排放量设定固定的价格，使排放成本内部化。碳交易通常是针对一个或多个部门或企业设定排放总量上限，监管者发放不超过总量水平的可用于交易的配额，配额在碳交易覆盖的实体间可以相互交易，由此形成配额的市场价格。可见，碳交易的排放水平固定，价格非固定；而碳税价格固定，排放水平非固定。因此，将碳交易和碳税放在一个模型中考虑比较复杂。另外，在实施方面，相较碳税，碳交易的实施更为复杂，既需要建立配额交易的二级市场，又对监管部门和受管控实体都提出了更高要求，不太便于全行业大面积铺开，而碳税的实施可以依靠现有税收体系，更容易在广泛的部门实施。因此，本文着重考虑生产网络视角下，碳税政策对经济体总碳排放的影响，为今后开展大范围减排方案提供思路。

门的能源消耗下降，但对 GDP 影响不大。魏涛远和格罗姆斯洛德（2002）、王灿等（2005）、Liang et al.（2007）、姚昕和刘希颖（2010）、朱永彬等（2010）、胡宗义等（2011）、石敏俊等（2013）分别构建 CGE 模型，模拟不同税率或不同税收返还机制下碳税对中国宏观经济、各产业部门和减排的影响。基于 CGE 模型的研究大多发现，征收碳税长期内对 GDP 影响不大，但能够有效降低单位 GDP 能耗与碳排放。此外，刘洁和李文（2011）结合国际实践经验与中国实际设定三种不同情景的碳税税率，基于考虑能源因素和税收结构的道格拉斯生产函数，构建面板数据模型，分析征收碳税对中国能源使用和经济增长的影响。杨超等（2011）采用动态碳税调整机制，构建以“总产出下降幅度”与“CPI 上涨幅度”为约束的最优碳税投入产出模型，模拟实现 CO_2减排量最大化及政府消费净额最大化时的最优碳税税率。Liu et al.（2022）基于 QUAIDS（Quadratic Almost Ideal Demand System）模型，分析了能源商品碳税对中国居民福利的影响。

回顾文献发现，2013 年启用碳排放权交易试点后，国内对碳税制度的研究更加集中在讨论碳税与碳交易协同发展，定量分析的研究有所停滞。而早期对于碳税制度定量研究所依赖的 CGE 模型，往往涉及多部门、多地区、多模块（生产模块、价格模块、收入模块、支出模块、投资模块、外贸模块、能源与环境模块等）以及众多变量（生产要素价格与数量、商品价格与数量、宏观变量、政策变量等）和数百个待校准参数（生产/消费的替代弹性、收入支出份额、贸易参数），模型复杂，计算成本高，且难以厘清变量间的关系与政策传导机制。因此，本文旨在根据我国当前经济运行和碳排放现状，采用一个简化的一般均衡模型，探讨征收碳税对我国环境与经济的影响，作为碳税定量研究的延续和补充。

对能源消费企业征收碳税将改变被征税部门的生产成本，引发各部门生产投入与产出变化，进而改变经济体总碳排放。整个经济体是一个复杂网络，在这个网络中，生产者购买原材料，将其转化为新的产品出售给消费者或其他生产者。生产网络中蕴含着产业结构和行业间相互交互的重要信息。因此，对特定部门的冲击将会通过生产网络之间的关联放大或抵消，形成对经济体的最终影响。Acemoglu et al.（2012）研究发现，生产网络是部门个体微小冲击向宏观冲击转化的重要渠道。该文通过建立生产网络视角下的多部门均衡模型，理论上证明了对一个部门生产率的冲击不仅直接影响该部门及其下游部门，还会通过生产网络对其他各部门产生间接影响，对于经济加总影响的波动率取决于生产网络结构。当生产网络上下游结构显著不对称时，这种加总影响是明显的。因此，在制定政策或评估政策效果时，单单从直接影响出发是不够全面的，有必要考虑生产网络引发的加总效应。目前已有研究证实经济部门间的相互联系的确是个体冲击的潜在传播机制，如 Baqaee（2016）发现对某些特定部门的财政政策倾斜将带来最大的产出和就业率；Liu（2019）发现交易成本等摩擦引发的市场不完善所带来的扭曲效应会通过生产网络累积，政策倾向

体量最大或增加值最高的部门未必带来最高的政策效率。市场扭曲往往集中在上游部门，因此，政策补贴应该向上游部门倾斜。

生产网络对个体冲击的汇聚效应同样适用于产业部门碳税的影响机制分析。对某一或某些部门征收碳税会改变被征税部门的生产成本，使其调整生产投入与产出，通过生产网络进一步带动上下游各部门的投入与产出变化，从而影响经济体总碳排放。具体来说，首先，被征税部门会减少高碳排放中间品的使用转而使用更清洁的产品，高碳排放中间品需求下降，使得其上游厂商产出与碳排放下降；其次，被征税部门生产成本上升导致其产品价格上涨，于是，下游厂商生产过程中会减少对该部门中间品的购买，从而下游部门的产出和碳排放也会降低；最后，碳税收入返还消费者，会刺激其对各部门产品的最终需求，需求增长又会反过来拉动各部门的生产和排放。可见，生产网络中蕴含的直接与间接关联会对整个经济体的产出和碳排放带来复杂的影响，若错误施加征税部门，甚至可能引起总碳排放量的增加。因此，仅基于各部门直接碳排放征收碳税对于降低整个经济体碳排放的效率不是最高的，还要考虑碳税通过生产网络关联引发的间接效果。比如，建筑部门的直接碳排放量近年来增速不断放缓，进入平台期，但是建材生产、建造过程以及建筑运行过程中电力热力间接排放所引发的建筑行业的总碳排放却仍在快速增长，若忽视生产网络间的关联，可能会低估建筑业的碳税减排效果。King et al.（2019）通过构建生产网络视角下的碳税模型，发现部门碳税具有复杂的一般均衡影响。该文将征收碳税对经济体总碳排放的影响分解为税收返还效应、自身扭曲效应以及上下游关联影响。通过对美国和巴基斯坦的实证研究发现，结合部门直接碳排放和其所处生产网络的位置制定税收政策比单单基于直接碳排放征税的减排效果好。

综上，鉴于目前国内缺乏基于最新的经济和环境数据的碳税定量研究，尤其缺乏生产网络视角下碳税政策的影响机制分析，本文根据我国最新投入产出表与估算的部门碳排放数据，基于投入产出关联下的碳税模型，模拟碳税在生产网络中的传导，识别各部门的碳税减排效应，为“双碳”目标下的碳税制度设计提供一个新视角。

余文结构安排如下：第二部分，概述生产网络视角下的碳税模型与碳税减排效应的概念；第三部分，分别估算 2020 年 42 部门与 153 部门碳排放以及生产网络中隐含的碳流动矩阵，计算各部门碳税减排效应，并模拟征收 50 元/吨小额碳税对各部门劳动投入、产量、碳排放以及经济体总碳排放的影响，识别碳税意义下关键的减碳部门；第四部分，总结全文并提出未来可能的研究方向。

二、碳税模型

本文运用 King et al.（2019）构建的生产网络视角下的碳税模型，探究我国开征碳税对征税部门产量、碳排放以及经济体总碳排放的影响。该模型主要结构如下：

（一）零碳税下的均衡

1. 生产端

假设每个部门 i 生产一种竞争性产品，产出 Y_i 满足柯布 – 道格拉斯生产函数：

$$Y_i = l_i^{1-\alpha_i} \prod_{j=1}^{n} x_{ij}^{\alpha_i w_{ij}} \tag{1}$$

其中，l_i 代表部门 i 使用的劳动力，x_{ij} 代表部门 i 使用的部门 j 的中间产品，α_i 代表各种生产要素投入中来自中间产品的投入比例，w_{ij} 代表部门 i 生产过程使用的全部中间品中来自部门 j 的份额，对每个部门 i，$\sum_{j=1}^{n} w_{ij} = 1$，满足规模报酬不变。

本文考虑消费性碳税，即对能源消费部门生产产生的直接碳排放征税。生产过程中的碳排放源于对生产原料的加工使用，主要是化石燃料的燃烧。因此，消耗来自煤炭、石油、化工等部门的中间品越多，造成的碳排放就会越多。记 E_i 为部门 i 的碳排放量，假设其为一个随中间投入递增的规模报酬不变的函数 $E_i = E_i(x_{i1}, \cdots, x_{in})$。对于行业 i 中的一个代表性企业，其利润函数可以表示为：

$$\pi_i = p_i Y_i - \sum_{j=1}^{n} p_j x_{ij} - \omega l_i - \lambda_i t \omega E_i \tag{2}$$

其中，p_i 为部门 i 生产的产品价格；假设劳动力市场自由流动，ω 为唯一的竞争性工资率；λ_i 是一个 0/1 变量，表示是否对行业 i 征税；t 是碳税的税率，与工资率 ω 锚定之后成为每单位碳排放的征税额度。

2. 消费端

假设经济体中一个代表性家庭无弹性地供给 1 单位劳动，消费者效用只来自消费，不取决于碳排放，满足柯布 – 道格拉斯效用函数：

$$U(C_1, \cdots, C_n) = \prod_{i=1}^{n} C_i^{\gamma_i} \tag{3}$$

其中，γ_i 代表消费者对部门 i 产品的消费份额，$\sum_{i=1}^{n} \gamma_i = 1$。进一步假设政府将碳税收入全部返还给消费者，因此消费者的预算约束为：

$$\sum_{i=1}^{n} p_i C_i \leqslant \omega l + T = \omega + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i t \omega E_i \tag{4}$$

在本文模型中，政府出于外生的减排动机对各生产部门征收碳税，并将税收所得全部返还给消费者，因此，碳税以生产端的摩擦形式存在，而非外部性。这意味

着，碳税的征收只会影响各部门的投入、产出与碳排放，不会造成实际产出与社会总效用的损失[3]。

3. 零碳税下的均衡

在一般均衡条件（生产者最大化利润、消费者最大化效用）下，市场同时满足商品和劳动力出清，即：

$$Y_i = C_i + \sum_{j=1}^{n} x_{ji} \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^{n} l_i = l = 1 \tag{6}$$

在无碳税，即碳税税率为 0 时，根据 Acemoglu et al.（2012）可求得模型唯一均衡解：

$$p_i^* = \exp\left(- \sum_{j=1}^{n} v_{ji}\,\vartheta_j - \sum_{j=1}^{n} v_{ji}\,\alpha_j \sum_{h=1}^{n} w_{jh} \ln w_{jh} + \sum_{j=1}^{n} v_{ji}(1-\alpha_j)\ln\omega \right) \tag{7}$$

$$C_i^* = \frac{\gamma_i \omega}{p_i^*} \tag{8}$$

$$s_i^* = \omega \beta_i \tag{9}$$

$$x_{ij}^* = \frac{s_i^*\,\alpha_i w_{ij}}{p_j^*} \tag{10}$$

$$l_i^* = \frac{s_i^*\,(1-\alpha_i)}{\omega} \tag{11}$$

其中，$\vartheta_i = (1-\alpha_i)\ln(1-\alpha_i) + \alpha_i \ln\alpha_i$。记 $A = \mathrm{diag}(\alpha_1, \cdots, \alpha_n)$ 为对角矩阵，$[v_{ij}] = V = (I - AW')^{-1}$ 为列昂惕夫逆矩阵，由于 $V = (I-AW')^{-1} = I + AW' + (AW')^2 + \cdots$，因此 v_{ik} 反映生产网络结构关联下，部门 k 对部门 i 产品的完全消耗。$s_i = p_i Y_i$ 为部门 i 的销售收入。定义 $\beta = V\gamma$，其中 $\beta = (\beta_1, \cdots, \beta_n)$，$\gamma = (\gamma_1, \cdots, \gamma_n)$，$\beta_i$ 反映各部门对部门 i 产品的平均完全依赖。在碳税税率为 0 时，部门 i 的均衡碳排放为 $E_i^* = E_i(x_{i1}^*, \cdots, x_{in}^*)$，经济体总碳排放为 $E^* = \sum_{i=1}^{n} E_i^*$。

3　贺菊煌等（2002）、魏涛远和格罗姆斯洛德（2002）、姚昕和刘希颖（2010）等众多基于 CGE 模型模拟碳税影响的研究发现，征收碳税长期内对 GDP 影响不大，一定程度上说明了本文假设碳税作为生产端摩擦，不影响实际 GDP 的合理性。同时，欧盟国家的实践经验也表明，碳税的开征在一定程度上减少了 CO_2 的排放，且对本国经济发展的影响不大。另外，本文着重分析边际碳税影响在生产网络中的传递。在本文模型设定下，经济实际总产出不变，因此无法探讨最优碳税。非边际最优碳税的讨论往往需要通过将碳排放造成的环境损害引入效用函数，求解减排目标和经济增长约束下福利最大化的动态一般均衡模型。

（二）征收碳税的边际影响

接下来，在零碳税均衡模型基础上，讨论施加边际碳税对各部门产量及碳排放的影响。在碳税税率为0 时，部门 i 碳排放 $E_i = E_i(x_{i1}, \cdots, x_{in})$ 对来自部门 j 的中间投入的弹性为：

$$\epsilon_{ij} = \frac{x_{ij}^*}{E_i^*} \frac{\partial E_i}{\partial x_{ij}}\bigg|_{t=0} \tag{12}$$

记 $\varepsilon = [\epsilon_{ij}]$ 为碳排放弹性矩阵，表示生产部门碳排放对来自各部门中间投入的依赖程度，进而可反映施加部门碳税后，因各部门对原材料使用方式改变引发的碳排放变化。类比 King et al.（2019）中的 Proposition 2，可得到在异质性的生产函数与消费偏好下，开征碳税 $\lambda \in \{0, 1\}^n$ 对各部门产品相对价格、中间产品投入、劳动力投入、产量、碳排放及消费的边际影响。

$$\frac{\partial \ln p_i}{\partial t}\bigg|_{t=0} = \sum_{h=1}^{n} \lambda_h E_h^* \frac{v_{hi}}{\beta_h} \tag{13}$$

$$\frac{\partial \ln x_{ij}}{\partial t}\bigg|_{t=0} = \sum_{h=1}^{n} \lambda_h E_h^* \left(1 - \frac{\varphi_{ih}}{\beta_i} - \frac{v_{hj}}{\beta_h}\right) - \lambda_i \frac{E_i^*}{\beta_i} \frac{\epsilon_{ij}}{\alpha_i w_{ij}} \tag{14}$$

$$\frac{\partial \ln l_i}{\partial t}\bigg|_{t=0} = \sum_{h=1}^{n} \lambda_h E_h^* \left(1 - \frac{\varphi_{ih}}{\beta_i}\right) \tag{15}$$

$$\frac{\partial \ln Y_i}{\partial t}\bigg|_{t=0} = (1 - \alpha_i) \frac{\partial \ln l_i}{\partial t}\bigg|_{t=0} + \alpha_i \sum_{j=1}^{n} w_{ij} \frac{\partial \ln x_{ij}}{\partial t}\bigg|_{t=0} \tag{16}$$

$$\frac{\partial \ln E_i}{\partial t}\bigg|_{t=0} = \sum_{j=1}^{n} \epsilon_{ij} \frac{\partial \ln x_{ij}}{\partial t}\bigg|_{t=0} \tag{17}$$

$$\frac{\partial \ln C_i}{\partial t}\bigg|_{t=0} = \sum_{h=1}^{n} \lambda_h E_h^* \left(1 - \frac{v_{hi}}{\beta_h}\right) \tag{18}$$

式（13）表明，若只对部门 k 征收碳税，那么征税只会影响部门 k 下游部门产品的相对价格，不会影响上游产品的相对价格。关于式（14）征税对中间品投入的影响，为了便于理解，我们假设只对部门 $k(k \neq i)$ 征税，于是部门 i 生产过程中使用部门 j 中间品的边际变化为：

$$\frac{\partial \ln x_{ij}}{\partial t}\bigg|_{t=0} = E_k^* \left(1 - \frac{\varphi_{ik}}{\beta_i} - \frac{v_{kj}}{\beta_k}\right) \tag{19}$$

其中，第一项为税收返还效应，表示税收返还消费者会提高对各部门产品的最

终需求，全面增加中间品投入；第二项表示对 k 征税引起的相对上游影响，对 k 征税，其生产需要的来自上游部门 i 的中间品减少，进一步带动部门 i 生产所需的上游部门 j 产品也相应减少，并且部门 i 的产量越高，该串联影响越小，因此该项由β_i加权；第三项表示对 k 征税引起的相对下游影响，对 k 征税，k 的价格上涨带动其下游部门 j 产品价格上涨，进一步压低部门 i 对部门 j 产品的需求，k 的产量越高，征税对其价格影响越小，进而对下游部门 j 的影响也越小，因此该项由β_k加权。当 $k=i$ 时，式（14）最后一项为征税引发的自身扭曲效应。

式（15）反映征收碳税对各部门劳动投入的边际影响。假设只对部门 k 征税，则部门 i 的劳动投入边际变化为：

$$\left.\frac{\partial \ln l_i}{\partial t}\right|_{t=0}=E_k^*\left(1-\frac{\varphi_{ik}}{\beta_i}\right) \tag{20}$$

第一项为税收返还效应；第二项为 i 作为征税部门 k 的相对上游部门，征税后对其需求下降引发的劳动投入减少。

（三）碳税减排效应

征收碳税将改变征税部门的生产函数，随后通过生产网络的上下游关联，各部门调整自身生产投入，进而改变各部门产出、碳排放与经济体加总碳排放。定义部门 i 的碳税减排效应 γ_i 为零碳税基准下对部门 i 征收碳税对经济体总碳排放的边际影响，可以推导出：

$$\gamma_i=\left.\frac{\partial \ln E}{\partial t}\right|_{\lambda=e_i,t=0}=E_i^*-\sum_{j=1}^{n}\frac{E_i^*E_j^*}{E^*}\left(\frac{\varphi_{ji}}{\beta_j}+\frac{\varphi_{ij}}{\beta_i}\right)-\frac{(E_i^*)^2}{E^*}\left(\sum_{j=1}^{n}\frac{\epsilon_{ij}^2}{\alpha_i w_{ij}\beta_i}\right) \tag{21}$$

其中，e_i 表示第 i 个元素为 1 的标准基向量，$\Phi=[\varphi_{ij}]=V\varepsilon'$，$\varphi_{ik}$表示在考虑生产网络的直接、间接作用后，对部门 k 征收碳税将引发的对部门 i 需求的总影响。把式（21）右侧拆分来看：第一项是税收返还效应，部门自身排放量越大，对其征税将获得的税收收入越多，消费者得到税收返还后，便可将更多钱用于消费，进而促进各部门生产和碳排放；第二项是部门之间由于生产网络关联引起的部门间排放影响，是相对上游与相对下游的部门排放影响的加权总和；第三项来自部门征税后做出反应所导致的自我扭曲。若错误施加征税部门，可能通过税收返还效应削弱减排效果。因此，识别各部门的碳税减排效应至关重要。

进一步，对多个部门同时征收碳税 $\lambda\in\{0,1\}^n$的总减排效应为：

$$\gamma(e)=\left.\frac{\partial \ln E}{\partial t}\right|_{\lambda=e,t=0}=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\left.\frac{\partial \ln E}{\partial t}\right|_{\lambda=e_i,t=0} \tag{22}$$

这意味着，对多个部门征收碳税所引起的经济体总碳排放变化是对各单一部门征税的减排效应的线性加总。因此，本文在数值模拟中，着重考察对单一部门征收边际碳税的影响。

三、数据与实证结果

根据第二部分构建的碳税模型，为模拟征收碳税在生产网络中的传导效果，找到重要征税部门，关键在于计算各部门的碳税减排效应。根据式（21），碳税减排效应依赖经济体的投入产出结构、各部门消费占比、零碳税均衡下各部门直接碳排放以及各部门碳排放对中间投入的弹性。接下来，本文将逐一讨论数据来源与实证结果。

（一）投入产出表

早在 20 世纪 30 年代，美国经济学家华西里·列昂惕夫（Wassily Leontief）便创立了投入产出技术，用于描述国民经济各部门在一定时期内的生产投入来源和产出使用去向，揭示各部门之间相互依存与制约的数量关系，并凭借该成果获得诺贝尔经济学奖。投入产出关系反映生产网络，而经济产出是生产网络的结果，各经济部门相互购买商品，将它们转换成新的商品，并将产出卖给家庭或其他厂商。在进行经济理论、经济现象与政策影响研究中，生产网络是重要的分析工具。

按照是否在中间使用中区分本国产品和进口产品，投入产出表分为竞争型和非竞争型投入产出表。不进行区分的称为竞争型投入产出表，加以区分的称为非竞争型投入产出表。按照我国投入产出核算制度规定，逢 2、逢 7 年份开展投入产出调查，编制投入产出基准表，逢 0、逢 5 年份编制投入产出延长表。目前可获取的最新数据为 2020 年 153 部门投入产出表与 42 部门非竞争型投入产出表，本文的分析便基于此。

中国 2020 年投入产出表由三部分组成（见表 1）。第Ⅰ象限是投入产出表的核心，由中间投入和中间使用交叉部分组成，反映各产品部门之间相互提供产品供生产和消耗的过程。其中，行反映某产品部门生产的货物或服务提供给各产品部门使用的价值量，称为中间使用；列反映某产品部门生产中消耗各部门货物或服务的价值量，称为中间投入。第Ⅱ象限是第Ⅰ象限在水平方向的延伸，行反映某部门的产品用于各种最终使用的价值量，列反映各项最终使用的规模及构成。第Ⅰ、Ⅱ象限组成的横表反映各产品部门的中间使用与最终使用。第Ⅲ象限是第Ⅰ象限在垂直方向的延伸，反映各产品部门的各项增加值。第Ⅰ、Ⅲ象限组成的竖表反映各产品部门各种投入来源及产品价值构成。

表 1　中国 2020 年投入产出表

投入		产出									
		中间使用					最终使用				总产出
		部门 1	部门 2	…	部门 n	合计	消费	资本形成	进出口	合计	
中间投入	部门 1	第Ⅰ象限					第Ⅱ象限				
	部门 2										
	…										
	部门 n										
	中间投入合计										
增加值	劳动者报酬	第Ⅲ象限									
	生产税净额										
	固定资产折旧										
	营业盈余										
	增加值合计										
总投入											

注：资料来源于《中国 2020 年投入产出表和供给使用表概述》（赵同录，2020）。

（二）分部门碳排放

关于中国碳排放总量数据，国际能源署（IEA）、世界资源研究所（WRI）、英国石油公司（BP）、全球碳预算数据库（GCB）等多个组织和机构均有估算，不尽相同。碳排放数据存在差异的原因主要源于核算边界、排放因子、核算方法，以及能源数据来源、部门划分、燃料分类和热值（折标系数）等。对于更为详尽的部门碳排放数据的测算比较有限。国际能源署提供能源、工业、交通等大类碳排放数据；中国多尺度排放清单模型（MEIC）提供 1990—2020 年电力、工业、民用、交通、农业五部门及 22 个细分部门的碳排放数据；中国碳核算数据库（CEADs）提供 1997—2021 年 47 部门的分部门碳排放数据。然而，目前各组织机构公开的分部门碳排放数据无法与 2020 年 42 部门和 153 部门投入产出表的部门对应，不能直接用于生产网络视角下的碳税影响模拟分析。因此，本文首先根据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）自下而上的部门方法估算 2020 年分部门能源活动碳排放[4]。具体计算方法为：

4　根据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》，人为碳排放主要来自能源活动、工业生产过程、土地利用变化以及废弃物处置，其中能源活动碳排放占我国碳排放的 90% 左右。由于工业生产过程数据占比相对较小也难以归类到部门碳排放，土地利用变化的数据不确定性很大，因此本文只考虑能源活动引起的碳排放。

$$CE_{ij} = AD_{ij} \cdot EF_{ij}$$
$$EF_{ij} = NCV_i \cdot CC_i \cdot O_{ij}$$

其中，CE_{ij}为部门 j 燃烧化石燃料 i 产生的 CO_2 排放量；AD_{ij}表示相应部门与燃料类型的能源消耗量，数据来自《中国能源统计年鉴 2021》公布的分行业能源消耗数据（包括煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气共八类化石燃料）；EF_{ij}为部门 j 燃烧化石燃料 i 的排放因子，由三部分构成：NCV_i为化石燃料 i 的平均低位发热值，CC_i为化石燃料 i 的含碳量，O_{ij}为部门 j 燃烧化石燃料 i 的碳氧化率（排放因子数据来自《中国能源统计年鉴 2021》《2005 中国温室气体清单研究》《省级温室气体清单编制指南（试行）》以及计军平（2020）的整理）[5]。

（三）参数校准

在数值模拟中，本文考虑异质性的生产函数与消费偏好。部门 i 碳税减排效应式（21）中的$\{\alpha_i\}$、$\{w_{ij}\}$、$\{\beta_i\}$可以直接通过投入产出表估计[6]。具体来说，α 表示各部门劳动力投入占比，利用 1 减去各部门中间投入占总产出的比值估计；中间品投入$\{w_{ij}\}$由投入产出表的第Ⅰ象限列标准化得到；β 根据列昂惕夫逆矩阵和各部门消费占比估计。名义 GDP（即名义工资 ω）由 $\omega = \sum_{i=1}^{n} s_i^* / \sum_{i=1}^{n} \beta_i$ 计算，进而税率 t 基于名义 GDP 标准化。

对于碳排放弹性矩阵 $\varepsilon = [\epsilon_{ij}]$，$\epsilon_{ij}$定义为部门 i 碳排放对中间投入 x_{ij}的弹性。假设碳排放是中间投入的线性函数，$E_i = \sum_{i=1}^{n} \eta_{ij} x_{ij}$，其中 η_{ij}为部门 i 使用部门 j 中间品的排放强度，进而可以得到 $\epsilon_{ij} = \eta_{ij} x_{ij}^* / E_i^* = C(j,i) / \sum_{j=1}^{n} C(j,i)$，其中 $C(j, i)$表示部门 i 购买的部门 j 中间品中隐含的碳排放。King et al.（2019）采用 Global Trade Analysis Project（GTAP 8）中 2007 年的数据，包括五种化石能源（煤、石油、天然气、石油及煤制品、天然气制造与输送）在内的共计 57 个部门之间的投入产出表，以及 57 个部门使用五种化石能源产生的碳排放，计算得到 ϵ_{ij}。由于最新 GTAP 数据只更新到 2017 年，并且 GTAP 部门分类与中国投入产出表难以对应，导致我们难以采用

5 由于数据来源不同，《中国能源统计年鉴 2021》中的能源消费部门划分与 2020 年投入产出表的部门划分存在一定差异，本文以 2020 年投入产出表的行业划分为基准，依据《国民经济行业分类与代码 GB/T 4754—2017》对能源消耗数据表中相关部门进行合并与拆分（拆分依据子行业相对能源部门的投入比例与能源消耗比例一致的原则），分别估算 42 部门与 153 部门的分部门碳排放量。

6 本文模拟依据当前可得的最新的 2020 年投入产出数据进行参数校准。虽然 CGE 模型基于已有数据校准参数可能存在预测效果不佳的问题，但是在短期内经济结构变化不大时，该模拟结果会对生产网络视角下的征税效果带来一些启示。若今后经济结构发生重大转变，届时可基于新的投入产出结构更新结果。

King et al.（2019）中的方法来校准中国碳排放弹性矩阵。为此，本文依据 Chen and Chen（2013）和 Sun et al.（2016）等文献中讨论的中间投入隐含碳流动矩阵 E 估计碳排放弹性矩阵 ε。各部门生产过程直接产生碳排放，而部门之间的投入产出隐含着部门之间的碳流动。图 1 从能量守恒角度刻画了生产部门 i 的碳流动全过程。

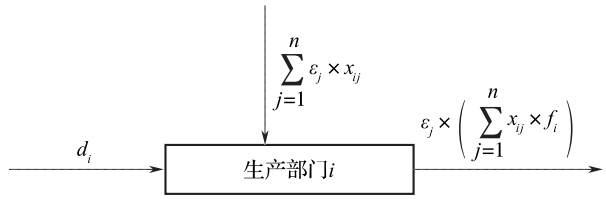


图 1　能源投入产出守恒原则

注：图中 d_i 与 $\sum_{j=1}^{n}\varepsilon_j \times x_{ij}$ 表示碳流入，$\varepsilon_i \times \left(\sum_{j=1}^{n} x_{ji} + f_i\right)$ 表示碳流出。

式（23）描述了生产部门 i 的碳流动方程：

$$d_i + \sum_{j=1}^{n}\varepsilon_j \times x_{ij} = \varepsilon_i \times \left(\sum_{j=1}^{n} x_{ji} + f_i\right)(i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, n) \quad (23)$$

其中，左侧表示碳流入，右侧表示碳流出，能量守恒使得等式成立。d_i 为部门 i 的直接碳排放，即从自然界流入的碳，可以看作直接能源需求。ε_j 记为部门 j 的间接碳排放强度，从而 $\sum_{j=1}^{n}\varepsilon_j \times x_{ij}$ 反映部门 i 使用各部门中间投入品中隐含的碳排放，即由生产网络流入的碳，反映间接能源需求。f_i 表示部门 i 产品的最终使用。因此，等式右侧表示部门 i 产品输出的全部碳排放，一部分为流向最终使用的碳排放 $\varepsilon_i \times f_i$，可以看作直接能源供给；另一部分为向其他部门提供中间品中隐含的间接能源输出 $\varepsilon_i \times \sum_{j=1}^{n} x_{ji}$。根据式（23）与投入产出表和上文估计的各部门直接碳排放可求解出各部门间接排放强度 $\{\varepsilon_i\}$，进而得到中间投入的隐含碳流动矩阵 E：

$$E = \begin{bmatrix} e_{11} & \cdots & e_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{n1} & \cdots & e_{nn} \end{bmatrix}, \text{ 其中} e_{ij} = \varepsilon_i \times x_{ij} \quad (24)$$

进一步，根据隐含碳流动矩阵 E 估算碳排放弹性矩阵 ε，具体为 $\epsilon_{ij} = e_{ji} / \sum_{j=1}^{n} e_{ji}$。

计算发现，根据中间投入的隐含碳流动矩阵 E 估计的碳排放弹性矩阵 ε，“电力、热力的生产和供应”“化学产品”“石油、炼焦产品和核燃料加工品”部门对应的列的数值显著高于其他部门，也就是说，各部门碳排放对来自化石能源部门中间品的弹性大。这个结果符合预期，在一定程度上说明了本文根据隐含碳流动矩阵 E

校准碳排放弹性矩阵 ε 的合理性。

（四）2020 年 42 部门与 153 部门的碳税减排效应

基于本文估算的分部门碳排放数据及参数校准方法，可根据式（21）计算 42 部门与 153 部门的碳税减排效应 Y_i，即对单一部门征税将引发的经济体总碳排放变化。图 2 展示了 2020 年 42 部门直接碳排放与各部门碳税减排效应，可以看出，由于生产网络隐含的间接影响，对各部门征税带来的经济体总减排效果与各部门直接碳排放排序并非一一对应。例如，“电力、热力的生产和供应”部门的直接碳排放高于“石油、炼焦产品和核燃料加工品”部门，但后者的碳税减排效应更大。类似地，“化学产品”部门的直接碳排放量高，但是征税引起经济体总碳排放量的降低不及对“非金属矿物制品”“煤炭采选产品”和“交通运输、仓储和邮政”部门征税产生的影响。图 3 展示了 2020 年 153 部门的直接碳排放与各部门碳税减排效应。可以发现，细分部门后，三个主要排碳部门“电力、热力生产和供应”“精炼石油和核燃料加工品”以及“钢压延产品”的直接碳排放与碳税减排效应的高低排序是一致的。但对“管道运输”部门征税对于降低经济体总碳排放的效果会大于其直接碳排放的影响，因此制定碳税时应对该部门予以重点考虑。

（五）征收碳税对部门产量和碳排放影响的模拟结果

根据国内碳交易市场现状，国内碳价格在 40 ~ 80 元/吨。2022 年碳排放配额收盘价和年内成交均价分别为 55 元/吨和 55. 3 元/吨，2023 年分别提升至 79. 42 元/吨和 68. 15 元/吨。本文以每吨 50 元碳税为基准，模拟分析对单个部门征收碳税引起该部门产量、碳排放以及经济体总碳排放的变化。为估计征收小额碳税对经济和环境的实际影响[7]，本文采用线性近似的方法，假设税率为 t，税收对象为 $\lambda \in \{0,1\}^n$，征税后经济体总碳排放为：

$$E(t,\lambda) = E^* \exp\left\{ t \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \left. \frac{\partial \ln(E)}{\partial t} \right|_{\lambda = e_i, t=0} \right\} \tag{25}$$

于是，征税后总碳排放变化百分比为：

$$\left(\frac{E(t,\lambda)}{E^*} - 1 \right) \times 100 \tag{26}$$

7 一方面，本文理论模型要求征收小额碳税，否则该框架下的均衡是高度非线性的，难以计算征税影响。在小额碳税前提下，征税不会造成经济体总产出的剧烈变化。另一方面，在实践中，征收大额碳税可能会造成某一行业产出大规模下降，通过生产网络的放大作用波及整个经济体。比如，若对煤炭开采、石油化工或电力热力等能源供应相关行业征收高碳税，会造成煤电行业产出大幅下降，极端情况下可能采取停工停产或拉闸限电的方式，而且短时间内无法由新能源发电完全补充，该影响会通过上下游传导至整个经济体，严重时会引起经济萎缩。因此，本文着重考虑征收小额碳税。

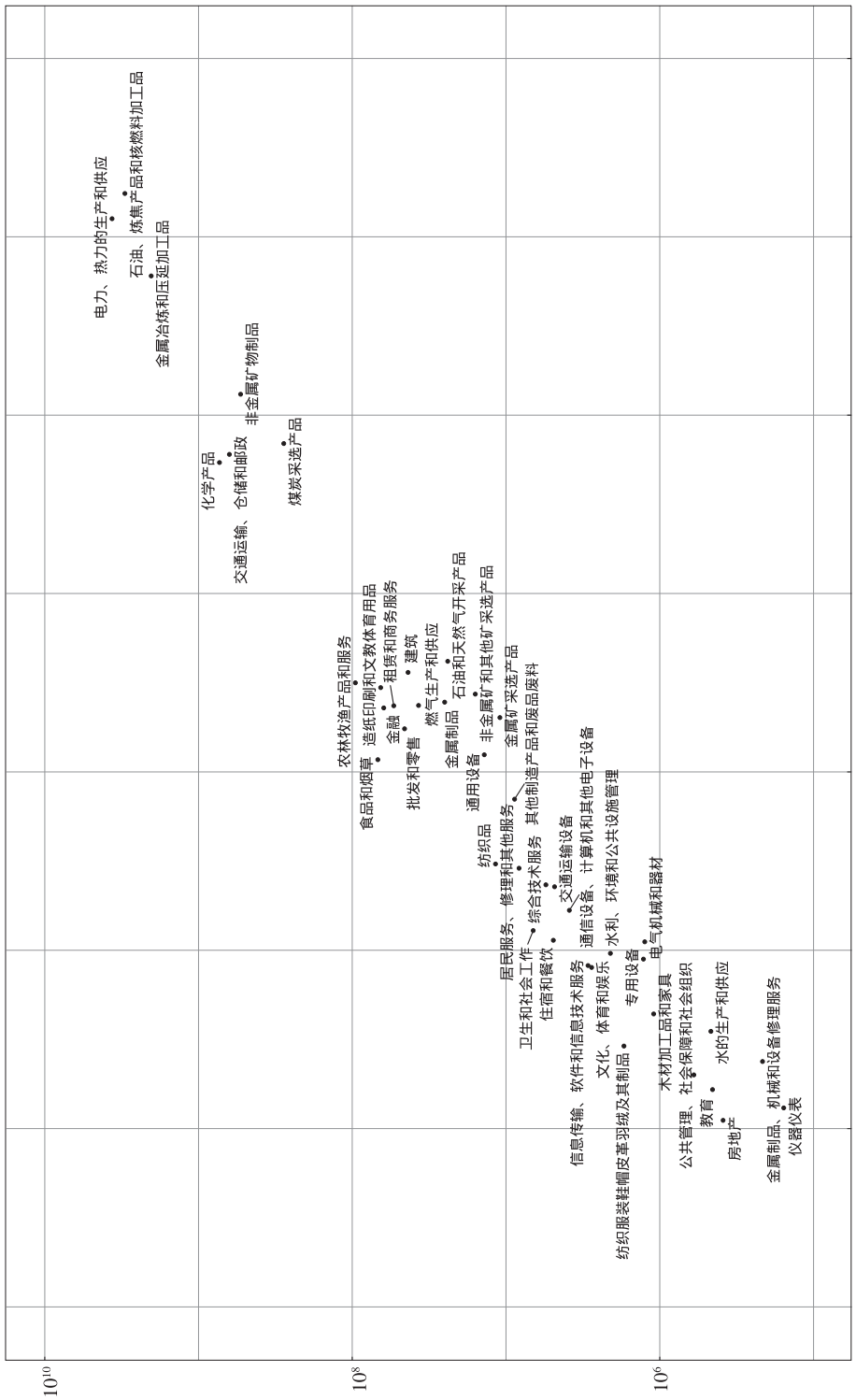


图2　碳税减排效应与直接碳排放（42部门）

注：横轴为根据式（21）计算的各部门碳税减排效应，纵轴为本文估算的2020年42部门直接碳排放（吨）。“研究和试验发展”部门的直接碳排放为0，因此未显示在图中。

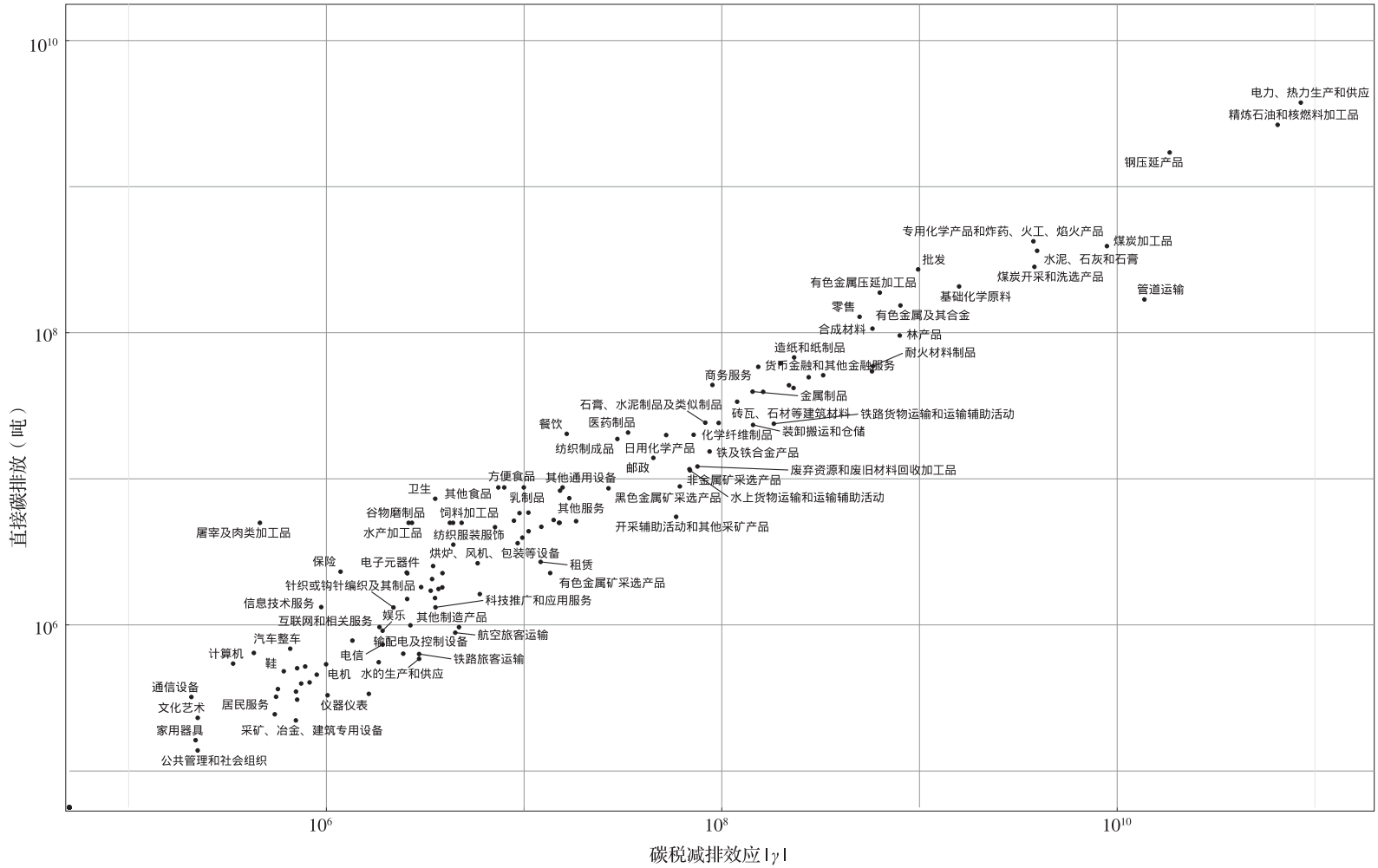


图3　碳税减排效应与直接碳排放（153部门）

注：横轴为根据式（21）计算的各部门碳税减排效应，纵轴为本文估算的2020年153部门直接碳排放（吨）。为便于观察，本图只呈现了横纵坐标均大于10^5的部门，为123个；同时，由于空间所限，123个部门只有一部分的部门名称呈现在图中。

值得注意的是，上述线性近似适用于边际碳税的影响分析。

1. 征收碳税对各部门劳动投入的影响

图 4 展示了对 42 部门中某一部门征收 50 元/吨碳税后，该部门劳动投入变化的百分比。结果显示，对某一工业部门征收小额碳税，会造成该部门劳动投入减少，产出萎缩，其中，对“电力、热力的生产和供应（24）”“金属冶炼和压延加工品（14）”“石油、炼焦产品和核燃料加工品（11）”部门征税，劳动投入下降最明显。然而，对“批发和零售（28）”“卫生和社会工作（40）”“住宿和餐饮（30）”“居民服务、修理和其他服务（38）”“公共管理、社会保障和社会组织（42）”“教育（39）”“房地产（33）”七个服务业部门征税后，通过生产网络作用，这些部门的劳动投入反而略微上升。根据式（15），当 $\phi_{ii}<\beta_i$ 时，$\left.\frac{\partial \ln l_i}{\partial t}\right|_{t=0}>0$，其中 $\beta=V\gamma$，$\Phi=V\gamma'$，γ 表示消费份额，ε 反映排放弹性，也就是说，对于最终消费占比较高且排放弹性较小的部门，更可能出现征税后劳动力投入不降反升的现象，这符合服务部门特征。

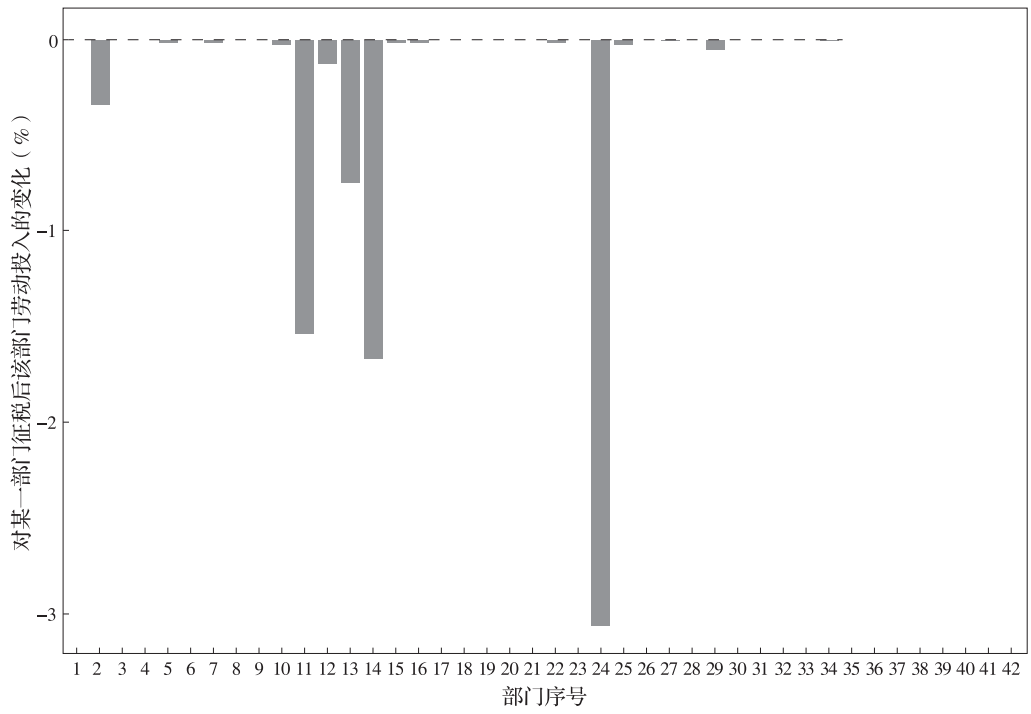


图 4　对某一部门征收 50 元/吨碳税后该部门劳动投入的变化（42 部门）

注：部门序号见附录表 A1。

接下来，考虑对 42 部门中碳税减排效应最大的“石油、炼焦产品和核燃料加工品”部门征收 50 元/吨碳税所引发的各部门劳动投入变化。图 5 显示，对“石

油、炼焦产品和核燃料加工品（11）”部门征收 50 元/吨碳税后，该部门和其上游部门“煤炭采选产品（2）”“石油和天然气开采产品（3）”“非金属矿和其他矿采选产品（5）”的劳动投入影响最大，分别下降 1.53%、1.39%、3.30%、1.68%，而大多数“服务部门”劳动投入有所提高。

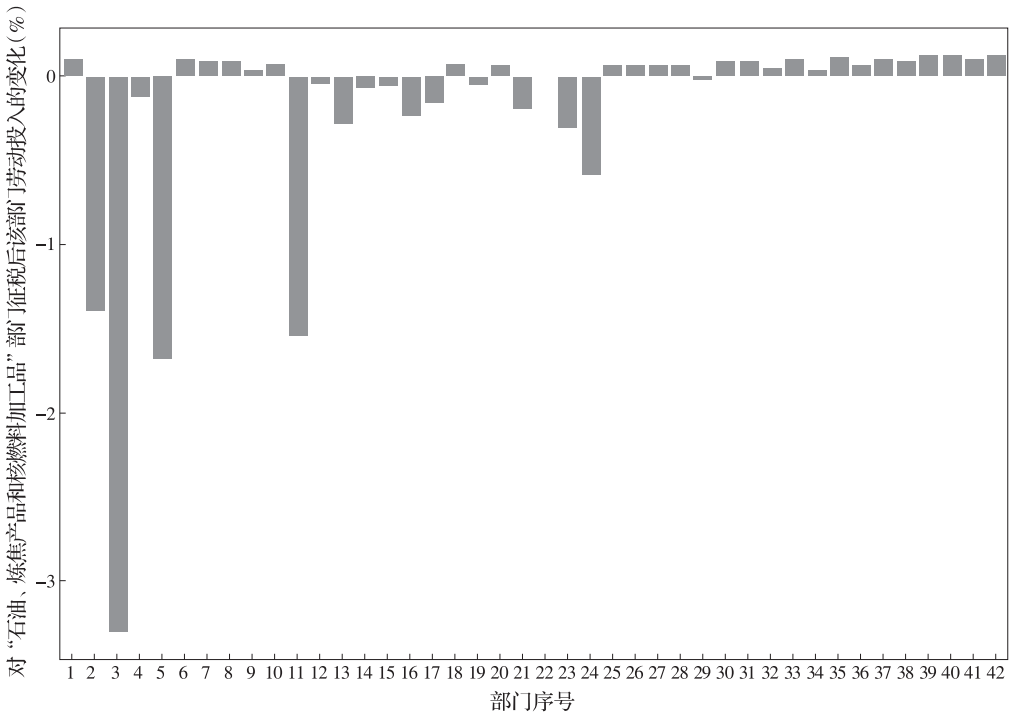


图 5 对“石油、炼焦产品和核燃料加工品”部门征收 50 元/吨碳税后该部门劳动投入的变化（42 部门）

注：部门序号见附录表 A1。

2. 征税部门碳排放及经济体总碳排放的变化

图 6 展示了 42 部门的直接碳排放，以及分别对各部门征收每吨 50 元碳税后，该部门及经济体总碳排放下降比例（部门序号见附录表 *A*1）。图 2 反映的碳税减排效应与直接碳排放的关系在图 6 中得以直观体现。可以发现，直接碳排放量高并不意味着对其征税将引起本部门和经济体碳排放下降幅度大。例如，“电力、热力的生产和供应（24）”部门的直接碳排放量最高（约 36 亿吨），对其征收 50 元/吨碳税将使得该部门碳排放下降 12.05%，经济体总碳排放下降 4.75%；而“石油、炼焦产品和核燃料加工品（11）”部门的直接碳排放量（约 30 亿吨）虽然不及“电力、热力的生产和供应（24）”部门，但是由于上下游关联引发的间接排放影响更大，对其征收 50 元/吨碳税会导致该部门碳排放下降 20.38%，经济体总碳排放下降 6.52%。因此，“石油、炼焦产品和核燃料加工品”相比于“电力、热力的生产和供应”部门为更有效的征税部门。

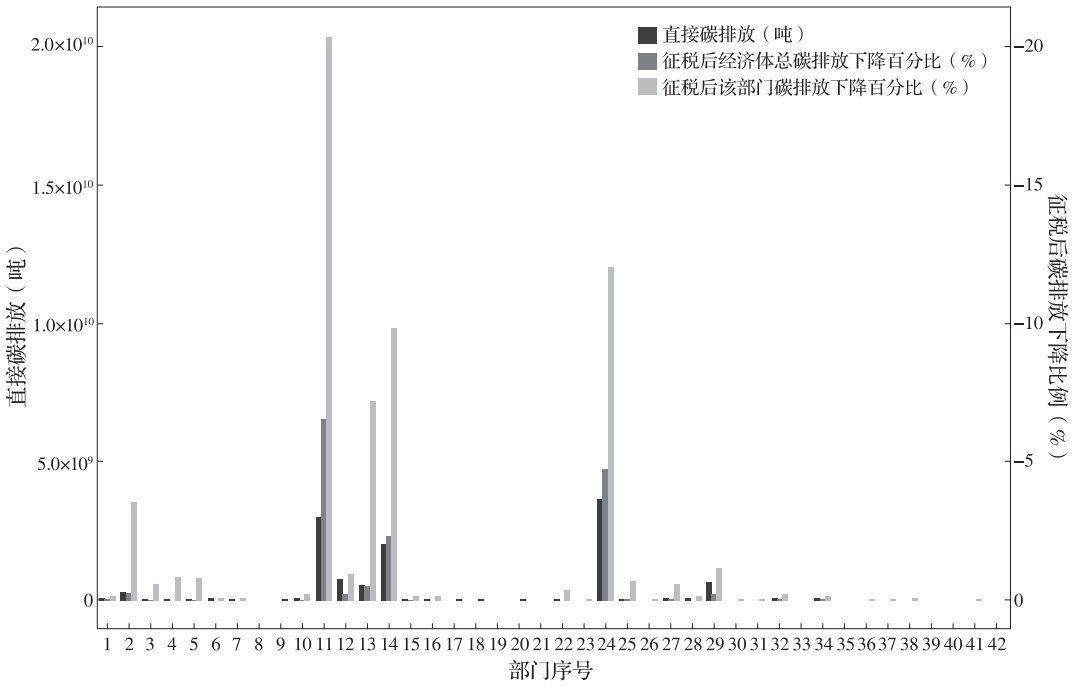


图 6　直接碳排放与征收 50 元/吨碳税的减排效果（42 部门）

注：左轴为本文估算的 2020 年 42 部门直接碳排放（吨），右轴为对相应部门征收 50 元/吨碳税后经济体以及该部门碳排放下降百分比。11 号部门为“石油、炼焦产品和核燃料加工品”，24 号部门为“电力、热力的生产和供应”，其余各部门序号见附录表 A1。

图 7 展示了 42 部门中碳税减排效应最大，即征税对降低总碳排放效果最明显的前 20 个部门。可以看出，对“石油、炼焦产品和核燃料加工品（11）”“电力、热力的生产和供应（24）”“金属冶炼和压延加工品（14）”部门征税可带来明显的降碳效果，具体来说，分别对其征收 50 元/吨碳税，经济体总碳排放大约可以降低 6.52%、4.75%、2.30%。这是因为，这些行业是生产网络中主要的原料供应行业和能源使用行业，征收碳税可以促使它们改革技术、优化能源结构，进而通过其上下游关联影响，实现碳税减排效果的有效汇聚，降低经济体总碳排放。此外，可以看出，对“非金属矿物制品（13）”“煤炭采选产品（2）”“交通运输、仓储和邮政（29）”“化学产品（12）”四个部门征税，会使得经济体总碳排放下降约 0.2%～0.5%。而对减排效应排序在“石油和天然气开采产品（3）”之后的部门而言，征税的减排效果基本为 0。因此，在边际碳税意义下，应重点考虑对 42 部门中减排效应前 7 的部门征税，对其他部门征税可能只会扰动各部门生产投入与产出，不能实现有效的碳减排。

对于细分的 153 部门，图 8 呈现了碳税减排效应最大的 30 个部门的直接碳排放与征收 50 元/吨碳税后该部门与经济体碳排放下降百分比（部门序号见附录表 A2）。

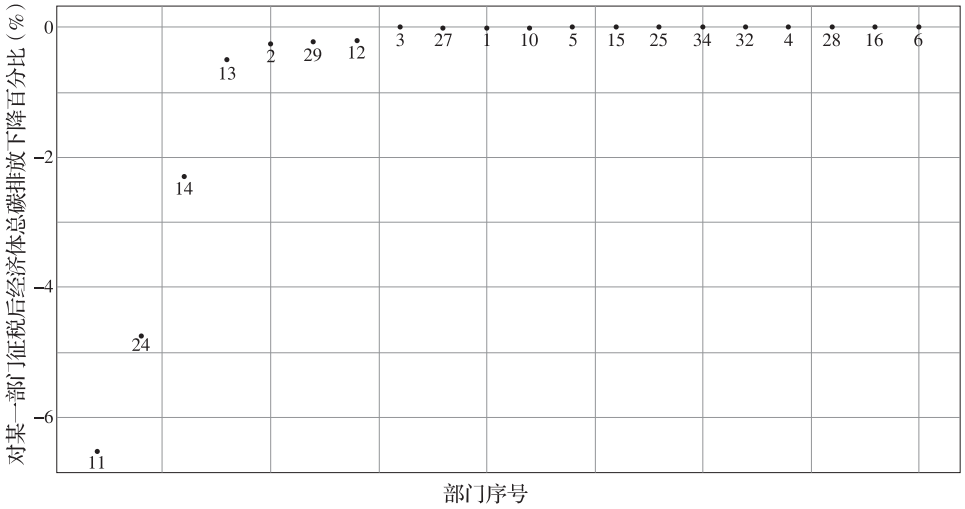


图 7　对碳税减排效应最大的 20 个部门征收 50 元/吨碳税的减排效果（42 部门）

注：部门序号见附录表 A1。

图 9展示了 153 部门中碳税减排效应最大的前 20 个部门的征税效果。可以看出，对“电力、热力生产和供应（100）”和“精炼石油和核燃料加工品（41）”部门征税可以有效降低经济体总碳排放。具体来说，对“电力、热力生产和供应”部门征收 50 元/吨碳税，经济体总碳排放大约降低 4. 15%；对“精炼石油和核燃料加工品”部门征收每吨 50 元碳税，经济体总碳排放大约下降 3. 19%。而对碳税减排效应低于“钢压延产品（62）”的部门征税，减碳效果不足 1%；对减排效应位列“批发（109）”之后的部门征收碳税基本不会降低经济体总碳排放。另外注意到，对“管道运输（119）”部门征税会使得该部门碳排放大幅减少近 30%，说明该部门的碳税减排效应主要来自征税后该部门生产调整所导致的自我扭曲。

3. 碳减排效率

在本文模型设定下，征收碳税将改变各部门生产过程中中间品与劳动力的投入以及部门产量，但不改变相对价格调整后经济体的实际总产出。虽然征收小额碳税不影响实际 GDP，但是征税对各部门产量影响越小，对经济结构的冲击越小，因此我们认为制定碳税政策时，也要兼顾对部门产量的影响[8]。为此，本文定义部门 i 的碳减排效率为对部门 i 征税引起该部门碳排放下降与该部门产量下降的百分比。与碳排放影响式（25）类似，可通过线性近似得到对单一部门征收小额碳税后该部门的产量：

8　由于各部门产品性质不同，产量无法直接相加，因此，本文没有讨论征收碳税对经济体总产量的影响，而是着眼于征税部门产量的变化。

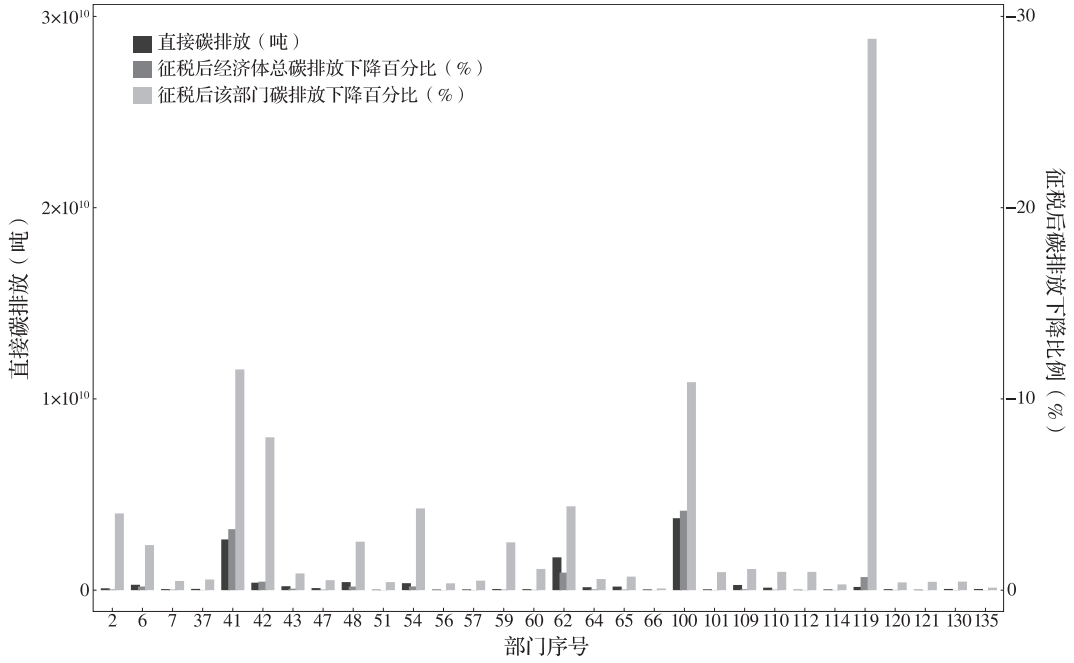


图 8　直接碳排放与征收 50 元/吨碳税的减排效果（153 部门）

注：左轴为 153 部门中碳税减排效应最大的 30 个部门的直接碳排放（吨），右轴为对相应部门征收 50 元/吨碳税后经济体总碳排放下降百分比。41 号为“精炼石油和核燃料加工品”部门，100 号为“电力、热力生产和供应”部门，119 号为“管道运输”部门，完整部门序号见附录表 A2。

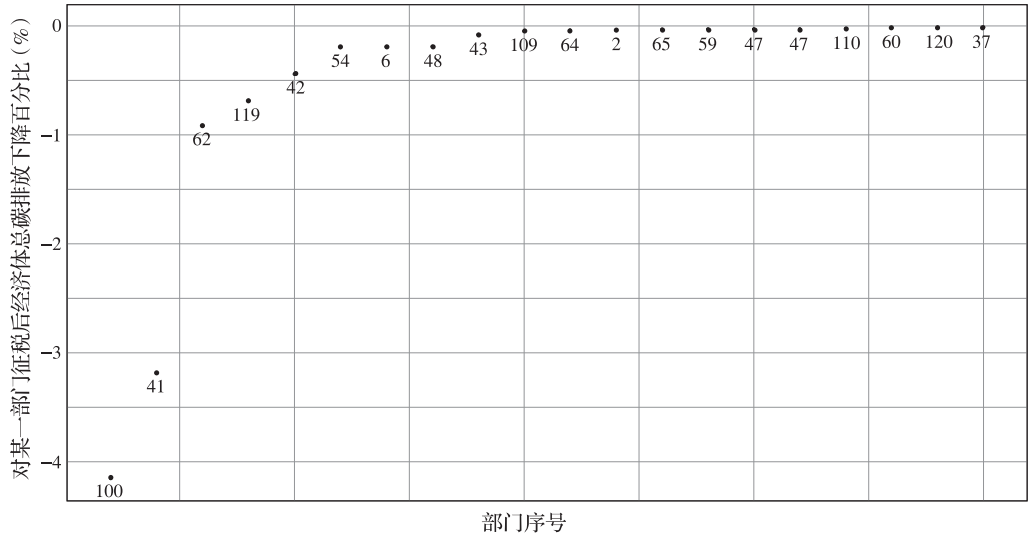


图 9　对碳税减排效应最大的 20 个部门征收 50 元/吨碳税的减排效果（153 部门）

注：部门序号见附录表 A2。

$$Y_i(t,\lambda)\mid_{\lambda=e_i,t=0}=Y_i^*\exp\left\{t\left.\frac{\partial\ln(Y_i)}{\partial t}\right|_{\lambda=e_i,t=0}\right\} \tag{27}$$

进而，该部门产量变化的百分比为：

$$\left(\frac{Y_i(t,\lambda)}{Y_i^*}-1\right)\times 100 \tag{28}$$

图 10 展示了对 42 部门中某一部门征税后该部门产量与碳排放下降百分比。定义“有效征税部门”为征收 50 元/吨碳税会使得经济体总碳排放量下降 0.1% 以上的部门。表 2 总结了 42 部门中有效征税部门的碳减排效率。可以看出，在 7 个有效征税部门中，“石油、炼焦产品和核燃料加工品（11）”的减排效应最大，减排效率最高。换言之，对“石油、炼焦产品和核燃料加工品”部门征税，能在小幅降低该部门产量的同时，大幅减少其自身和经济体总碳排放。因此，在该意义下，“石油、炼焦产品和核燃料加工品”是最有效的征税部门。此外，“交通运输、仓储和邮政（29）”和“煤炭采选产品（2）”部门的碳减排效率也比较高。

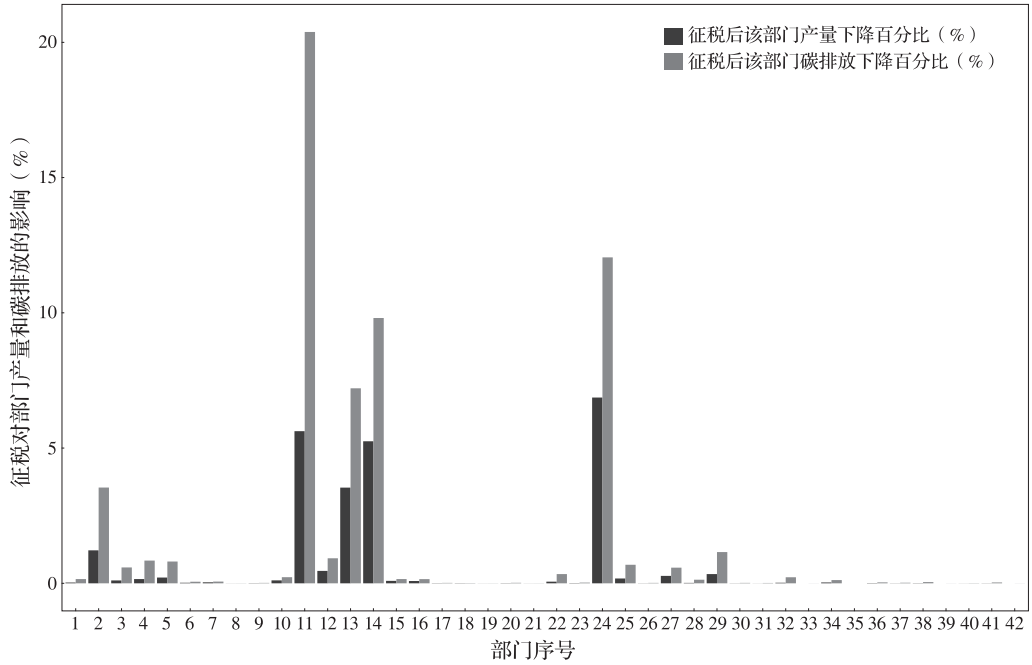


图 10　对某一部门征收 50 元/吨碳税后该部门产量与碳排放变化（42 部门）

注：黑色表示对 42 部门中某一部门征收 50 元/吨碳税后该部门产量下降百分比，灰色表示对 42 部门中某一部门征收 50 元/吨碳税后该部门碳排放下降百分比。11 号为“石油、炼焦产品和核燃料加工品”部门，24 号为“电力、热力的生产和供应”部门，其余各部门序号见附录表 A1。

表 2　有效征税部门的碳减排效率（42 部门）

部门	经济体总碳排放下降比例	碳减排效率
石油、炼焦产品和核燃料加工品	6. 52%	3. 625
电力、热力的生产和供应	4. 75%	1. 754
金属冶炼和压延加工品	2. 30%	1. 868
非金属矿物制品	0. 50%	2. 038
煤炭采选产品	0. 27%	2. 907
交通运输、仓储和邮政	0. 23%	3. 382
化学产品	0. 21%	2. 016

注：有效征税部门定义为征收 50 元/吨碳税使得经济体总碳排放量下降 0. 1% 以上的部门。碳减排效率为对部门 i 征税引起该部门碳排放下降与产量下降的比例。

同样地，对于细分的 153 部门，图 11 呈现了对碳税减排效应最大的 30 个部门征收 50 元/吨碳税后该部门产量与碳排放下降百分比。表 3 汇总了 153 部门中有效征税部门的碳减排效率。可以看出，对于 153 部门而言，在 8 个有效征税部门中，“管道运输（119）”“煤炭开采和洗选产品（6）”“水泥、石灰和石膏（54）”“精炼石油和核燃料加工（41）”的碳减排效率较高，尤其是“管道运输”部门，对其征收 50 元/吨碳税，会使得该部门产量降低 6. 83%，碳排放大幅减少 28. 83%。

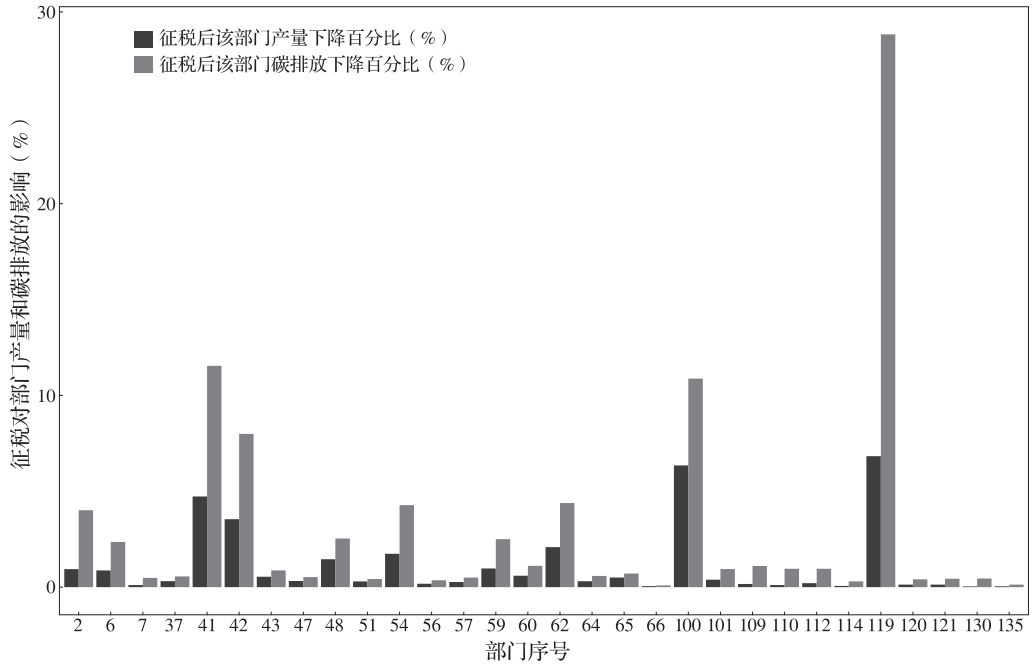


图 11　对某一部门征收 50 元/吨碳税后该部门产量与碳排放变化（153 部门）

注：本图中展示的是 153 部门中碳税减排效应最大的 30 个部门的产量与碳排放变化。黑色表示对某一部门征收 50 元/吨碳税后该部门产量下降百分比。灰色表示对某一部门征收 50 元/吨碳税后该部门碳排放下降百分比。

表 3 有效征税部门的碳减排效率（153 部门）

部门	经济体总碳排放下降比例	碳减排效率
电力、热力生产和供应	4. 15%	1. 713
精炼石油和核燃料加工	3. 19%	2. 442
钢压延产品	0. 92%	2. 101
管道运输	0. 68%	4. 220
煤炭加工品	0. 44%	2. 256
水泥、石灰和石膏	0. 20%	2. 459
煤炭开采和洗选产品	0. 19%	2. 705
专用化学产品和炸药、火工、焰火产品	0. 19%	1. 741

注：有效征税部门定义为征收 50 元/吨碳税使得经济体总碳排放量下降 0. 1% 以上的部门。碳减排效率为对部门 i 征税引起该部门碳排放下降与产量下降的比例。

四、结论与展望

本文从生产网络视角切入，根据 King et al.（2019）提出的部门间投入产出关联下的碳税模型，模拟探究中国征收消费性碳税对经济和环境的影响。首先，根据 IPCC 指南的碳排放核算方法，基于各部门能源消费与中国化的碳排放因子，估算 2020 年 42 部门以及 153 部门的分部门碳排放；其次，利用中间投入隐含碳流动矩阵估计各部门碳排放对中间投入的弹性；最后，计算各部门的碳税减排效应，并模拟分析对某一部门征收 50 元/吨小额碳税对征税部门劳动投入、产量、碳排放及经济体总碳排放的影响。

本文主要发现如下：第一，基于生产网络结构的碳税政策比只考虑直接碳排放的碳税政策更有效。例如，42 部门中“电力、热力的生产和供应”部门的直接碳排放量高于“石油、炼焦产品和核燃料加工品”部门，但通过生产网络作用引发的经济体总减排效果却不及后者。第二，对 42 部门中“石油、炼焦产品和核燃料加工品”“电力、热力的生产和供应”“金属冶炼和压延加工品”或对 153 部门中“电力、热力生产和供应”“精炼石油和核燃料加工品”“钢压延产品”等部门征税减排效果最明显。这些部门作为生产网络中主要的原料供应商和排碳大户，征税将促使它们改革生产技术、优化能源结构，减排效果进一步通过生产网络汇聚，进而实现经济体总碳排放的有效下降。第三，在边际碳税意义下，征税有效的减排部门不多，若盲目对所有行业征税，可能仅仅会导致经济结构大幅度调整，并不会有效降低经济体总碳排放。第四，在制定碳税政策时，也要从征税效率角度考虑对部门产量的影响，避免对生产网络结构冲击过大引发过多的转型成本。本文发现，在碳税减排效应和碳减排效率双重意义下，“石油、炼焦产品和核燃料加工品”均位于 42 部门的首位，因此，在制定碳税政策时可以重点考虑该部门。

最后，对于碳税研究，本文认为有以下颇具挑战但有现实意义的研究方向。第一，考虑对各部门最终需求征收碳税。生产源于需求，因此，可以通过对需求端征收碳税引发需求下降，进而传递到生产端，从而实现碳减排。对此，需要首先计算各部门最终需求所隐含的碳排放，其不仅是中间投入的函数，而是依赖整个生产网络结构，此时碳税通过生产网络的传导将更加复杂。第二，修正模型以探讨生产网络视角下碳排放权交易制度对经济和环境的加总影响，为制定碳市场和碳税协同发展政策提供参考。

附　录

表 A1　42 部门序号对照表

序号	部门	序号	部门
1	农林牧渔产品和服务	22	其他制造产品和废品废料
2	煤炭采选产品	23	金属制品、机械和设备修理服务
3	石油和天然气开采产品	24	电力、热力的生产和供应
4	金属矿采选产品	25	燃气生产和供应
5	非金属矿和其他矿采选产品	26	水的生产和供应
6	食品和烟草	27	建筑
7	纺织品	28	批发和零售
8	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	29	交通运输、仓储和邮政
9	木材加工品和家具	30	住宿和餐饮
10	造纸印刷和文教体育用品	31	信息传输、软件和信息技术服务
11	石油、炼焦产品和核燃料加工品	32	金融
12	化学产品	33	房地产
13	非金属矿物制品	34	租赁和商务服务
14	金属冶炼和压延加工品	35	研究和试验发展
15	金属制品	36	综合技术服务
16	通用设备	37	水利、环境和公共设施管理
17	专用设备	38	居民服务、修理和其他服务
18	交通运输设备	39	教育
19	电气机械和器材	40	卫生和社会工作
20	通信设备、计算机和其他电子设备	41	文化、体育和娱乐
21	仪器仪表	42	公共管理、社会保障和社会组织

注：部门序号来自国家统计局 2020 年投入产出表（非竞争型投入产出表）。

表 A2　153 部门序号对照表

序号	部门	序号	部门
1	农产品	5	农、林、牧、渔服务产品
2	林产品	6	煤炭开采和洗选产品
3	畜牧产品	7	石油和天然气开采产品
4	渔产品	8	黑色金属矿采选产品

（续）

序号	部门	序号	部门
9	有色金属矿采选产品	46	涂料、油墨、颜料及类似产品
10	非金属矿采选产品	47	合成材料
11	开采辅助活动和其他采矿产品	48	专用化学产品和炸药、火工、焰火产品
12	谷物磨制品	49	日用化学产品
13	饲料加工品	50	医药制品
14	植物油加工品	51	化学纤维制品
15	糖及糖制品	52	橡胶制品
16	屠宰及肉类加工品	53	塑料制品
17	水产加工品	54	水泥、石灰和石膏
18	蔬菜、水果、坚果和其他农副食品加工品	55	石膏、水泥制品及类似制品
19	方便食品	56	砖瓦、石材等建筑材料
20	乳制品	57	玻璃和玻璃制品
21	调味品、发酵制品	58	陶瓷制品
22	其他食品	59	耐火材料制品
23	酒精和酒	60	石墨及其他非金属矿物制品
24	饮料	61	钢
25	精制茶	62	钢压延产品
26	烟草制品	63	铁及铁合金产品
27	棉、化纤纺织及印染精加工品	64	有色金属及其合金
28	毛纺织及染整精加工品	65	有色金属压延加工品
29	麻、丝绢纺织及加工品	66	金属制品
30	针织或钩针编织及其制品	67	锅炉及原动设备
31	纺织制成品	68	金属加工机械
32	纺织服装服饰	69	物料搬运设备
33	皮革、毛皮、羽毛及其制品	70	泵、阀门、压缩机及类似机械
34	鞋	71	烘炉、风机、包装等设备
35	木材加工和木、竹、藤、棕、草制品	72	文化、办公用机械
36	家具	73	其他通用设备
37	造纸和纸制品	74	采矿、冶金、建筑专用设备
38	印刷和记录媒介复制品	75	化工、木材、非金属加工专用设备
39	工艺美术品	76	农、林、牧、渔专用机械
40	文教、体育和娱乐用品	77	医疗仪器设备及器械
41	精炼石油和核燃料加工品	78	其他专用设备
42	煤炭加工品	79	汽车整车
43	基础化学原料	80	汽车零部件及配件
44	肥料	81	铁路运输和城市轨道交通设备
45	农药	82	船舶及相关装置

（续）

序号	部门	序号	部门
83	其他交通运输设备	119	管道运输
84	电机	120	多式联运和运输代理
85	输配电及控制设备	121	装卸搬运和仓储
86	电线、电缆、光缆及电工器材	122	邮政
87	电池	123	住宿
88	家用器具	124	餐饮
89	其他电气机械和器材	125	电信
90	计算机	126	广播电视及卫星传输服务
91	通信设备	127	互联网和相关服务
92	广播电视设备和雷达及配套设备	128	软件服务
93	视听设备	129	信息技术服务
94	电子元器件	130	货币金融和其他金融服务
95	其他电子设备	131	资本市场服务
96	仪器仪表	132	保险
97	其他制造产品	133	房地产
98	废弃资源和废旧材料回收加工品	134	租赁
99	金属制品、机械和设备修理服务	135	商务服务
100	电力、热力生产和供应	136	研究和试验发展
101	燃气生产和供应	137	专业技术服务
102	水的生产和供应	138	科技推广和应用服务
103	住宅房屋建筑	139	水利管理
104	体育场馆和其他房屋建筑	140	生态保护和环境治理
105	铁路、道路、隧道和桥梁工程建筑	141	公共设施及土地管理
106	其他土木工程建筑	142	居民服务
107	建筑安装	143	其他服务
108	建筑装饰、装修和其他建筑服务	144	教育
109	批发	145	卫生
110	零售	146	社会工作
111	铁路旅客运输	147	新闻和出版
112	铁路货物运输和运输辅助活动	148	广播、电视、电影和影视录音制作
113	城市公共交通及公路客运	149	文化艺术
114	道路货物运输和运输辅助活动	150	体育
115	水上旅客运输	151	娱乐
116	水上货物运输和运输辅助活动	152	社会保障
117	航空旅客运输	153	公共管理和社会组织
118	航空货物运输和运输辅助活动		

注：部门序号来自国家统计局 2020 年投入产出表（竞争型投入产出表）。

参考文献

[1] 贺菊煌，沈可挺，徐嵩龄，2002. 碳税与二氧化碳减排的 CGE 模型[J]. 数量经济技术经济研究，(10)：39-47.

[2] 胡宗义，刘静，刘亦文，2011. 不同税收返还机制下碳税征收的一般均衡分析[J]. 中国软科学，(9)：55-64.

[3] 计军平，2020. 中国碳排放投入产出分析：原理、扩展及应用[M]. 北京：北京大学出版社.

[4] 刘洁，李文，2011. 征收碳税对中国经济影响的实证[J]. 中国人口·资源与环境，21(9)：99-104.

[5] 刘磊，张永强，2019. 基于碳排放权交易市场的碳税制度研究[J]. 税务研究，(2)：46-52.

[6] 朴英爱，杨志宇，2016. 碳交易与碳税：有效的温室气体减排政策组合[J]. 东北师大学报(哲学社会科学版)，(4)：117-122.

[7] 申嫦娥，田洲，田悦，2014. 碳税、碳交易的机制比较与联合应用方案设计[J]. 财政研究，(11)：42-46.

[8] 沈霁华，2014. 我国节能减排政策的演变历程与发展趋势研究[D]. 青岛：中国石油大学(华东).

[9] 石敏俊，袁永娜，周晟吕，李娜，2013. 碳减排政策：碳税、碳交易还是两者兼之？[J]. 管理科学学报，16(9)：9-19.

[10] 王灿，陈吉宁，邹骥，2005. 基于 CGE 模型的 CO_2 减排对中国经济的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版)，(12)：1621-1624.

[11] 王茹，2021. 碳税与碳交易政策有效协同研究——基于要素嵌入修正的多源流理论分析[J]. 财政研究，(7)：25-37.

[12] 魏涛远，格罗姆斯洛德，2002. 征收碳税对中国经济与温室气体排放的影响[J]. 世界经济与政治，(8)：47-49.

[13] 杨超，王锋，门明，2011. 征收碳税对二氧化碳减排及宏观经济的影响分析[J]. 统计研究，28(7)：45-54.

[14] 姚昕，刘希颖，2010. 基于增长视角的中国最优碳税研究[J]. 经济研究，45(11)：48-58.

[15] 赵同录，2020. 中国投入产出表[M]. 北京：中国统计出版社.

[16] 朱永彬，刘晓，王铮，2010. 碳税政策的减排效果及其对我国经济的影响分析[J]. 中国软科学，(4)：1-9+87.

[17] ACEMOGLU D, CARVALHO V M, OZDAGLAR A, TAHBAZ-SALEHI A,2012. The network origins of aggregate fluctuations[J]. Econometrica, 80(5): 1977-2016.

[18] BAQAEE D, 2016. Targeted fiscal policy[R]. Working Paper.

[19] BARANZINI A, GOLDEMBERG J, SPECK S, 2000. A future for carbon taxes[J]. Ecological Economics, 32(3): 395-412.

[20] CHEN Z M, CHEN G Q, 2013. Demand-driven energy requirement of world economy 2007: a multi-region input-output network simulation[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 18(7): 1757-1774.

[21] KING M, TARBUSH B, TEYTELBOYM A, 2019. Targeted carbon tax reforms[J]. European Economic Review, 119: 526-547.

[22] LIANG Q M, FAN Y, WEI Y M, 2007. Carbon taxation policy in China: how to protect energy-and trade-intensive sectors?[J]. Journal of Policy Modeling, 29(2): 311-333.

[23] LIU E, 2019. Industrial policies in production networks[J]. Quarterly Journal of Economics, 134(4): 1883-1948.

[24] LIU J, GONG N, QIN J, 2022. How would the carbon tax on energy commodities affect consumer welfare? evidence from China's household energy consumption system[J]. Journal of Environmental Management, 317. DOI: 10. 1016/j. jenvman. 2022. 115466.

[25] SUN X, AN H, GAO X, JIA X, LIU X, 2016. Indirect energy flow between industrial sectors in China: a complex network approach[J]. Energy, 94: 195-205.

Carbon Tax in China: A Production Network Perspective

Shiyuan Chen　Fei Ren　Jihai Yu*

（Guanghua School of Management, Peking University）

Summary: On September 22, 2020, President Xi Jinping announced at the 75th Session of the United Nations General Assembly that China would strive to peak CO_2 emissions before 2030, and achieve carbon neutrality before 2060. China is taking pragmatic actions towards these goals. As a responsible country, China is committed to building a global climate governance system that is fair, rational, cooperative and beneficial to all, and makes its due contribution to tackling climate change using its greatest strengths and most effective solutions.

China's energy conservation and emission reduction policy system originated in the 1980s. With transition from a planned economy to a market economy, China's energy-saving and emission reduction policies have gradually transitioned from administrative directives to market-oriented economic incentives, accumulating rich experience in reducing carbon emissionsduring the past 40 years. The establishment of the dualcarbon goals in 2020 provides clearer goals and greater challenges for China's emission reduction undertakings.

Carbon pricing mechanism is an important market-based policy option adopted by many countries and regions to address climate issues, and it mainly includes two methods: carbon tax and carbon emissions trading. Carbon emissions trading is currently the core market regulation mechanism in China. China proceeded carbon emissions trading pilots in seven provinces and cities in 2013, and the carbon trading market was officially launched in July 2021. It covered more than 4 billion tons of emissions, becoming the world's largest carbon trading market once the market went online. Carbon trading is playing an important role in the process of China's emission reduction, but its effect is limited.

Carbon tax, another representative market incentive policy tool, is frequently advocated as a cost-effective instrumentin reducing emissions, so it might be necessary to be introduced to China in due time to make up for the shortcomings of current carbon trading policies. Many countries or regions have successfully achieved the synergistic development of carbon tax and carbon trading. Therefore, the feasibility of levying a carbon tax in China and how to realize the coordinated development of carbon tax and carbon market are hot topics of research.

Studies on China's carbon tax system mainly focus on the feasibility analysis of introducing a carbon tax and using large-scale macro models such as "Computable General Equilibrium" (CGE) to simulate the impact of carbon tax on emission reduction and economics. Especially after the launch of the carbon emissions trading pilot in 2013, domestic research on the carbon tax has been

* Corresponding Author: Jihai Yu, Guanghua School of Management, Peking University, E-mail: jihai. yu@gsm. pku. edu. cn

concerned more about the design of the carbon tax mechanism, and the coordinated development of carbon tax and carbon trading, while research on quantitative analysis has stagnated. Earlier quantitative research on China's carbon tax system based on CGE models are complicated, with high computational costs, and it is difficult to clarify the policy transmission mechanism.

Imposing carbon tax would have macroeconomic and environmental impacts. The economy acts as a complex network that closely connects the production sector with the consumption sector. The production network contains rich information about the structure and interactions of industries. Acemoglu et al. (2012) find that the production network is an important channel for the propagation of sectoral individualshocks into macroshocks. Microeconomic idiosyncratic shocks may lead to aggregate fluctuationsin the presence of intersectoral input-output linkages. Therefore, when formulating or evaluating policies, it is not comprehensive enough to consider the direct impact alone, but necessary to take the aggregate effects caused by the production network into account. The propagation mechanism proposed by Acemoglu et al. (2012) also applies to the carbon tax. King et al. (2019) found that sector-specific carbon tax changes can have complex general equilibrium effects in the presence of intersectoral linkages. They provide an analytical characterization of how incremental taxes on emissions of any set of sectors impact aggregate emissions, thereby offering a novel perspective for the analysis of carbon taxes.

In this paper, we focus on theeffects of carbon tax in China from the perspective of production networks. We first calculate sectoral carbon emissions generated from energy consumption in 2020 and estimate the embodied carbon flow matrix based on Chinese 42-sector and 153-sector input-output tables. Then we simulate how an incremental sector-specific carbon tax influences the economy's total carbon emission through the intersectoral production network linkage as well as the impact on the labor input, output and carbon emission of the taxed sector drawing on the model constructed by King et al. (2019). We find that, due to the existence of production networks, the imposition of a carbon tax will not only reduce the total carbon emissions of the economy by decreasing the output of the taxed sector, but also trigger indirect effects through the upstream and downstream linkages. Therefore, targeting sectors based on their position within the production network can achieve a greater reduction in aggregate emissions than taxing sectors solely based on their direct emissions.

The simulation results show that the sectoral ranking of the carbon reduction effect and direct emissions does not correspond one-to-one. Taxing "Petroleum, Coking Products and Processed Nuclear Fuel Products", "Production and Supply of Electricity and Heat", and "Metal Smelting and Rolling Processed Products" among the 42 sectorsor taxing "Production and Supply of Electricity and Heat", "Refined Petroleum and Processed Nuclear Fuel Products" and "Rolled Steel Products" among the 153 sectors will bring the most significantcarbon reduction effect. As the above sectors are the main suppliers of raw materials and major carbon emitters in the production network, imposing carbon tax will prompt them to reform their production technologies and optimize their energy structures, thereby achieving an effective reduction in the total carbon emissions of the economy through their upstream and downstream influences. In addition, taxing on "Petroleum, Coking Products and Processed Nuclear Fuel Products" can bring the biggest decrease in total carbon emissions with a smaller drop of its own production.

Keywords: Carbon Neutrality; Production Network; Carbon Tax; Embodied Energy Flow

JEL Classification: H23; L50; Q48