

# 碳排放总量控制、配置效率与产出收益

杨 豪， 潘颖豪， 才国伟

**[摘要]** 高效统筹经济增长和“双碳”目标、实现绿色可持续的高质量发展，是各界普遍关注的重要话题。理论研究发现，通过提高企业间二氧化碳排放的配置效率，可以在不改变碳排放总量的前提下提高经济总产出，降低碳排放强度。具体而言，本文在资源错配与产出损失测算框架下，将二氧化碳作为一种投入要素，考虑不同要素之间的替代弹性，量化企业在碳排放相关的能源市场和规制政策扭曲下面临的碳排放影子价格、碳排放错配程度及其宏观经济影响。使用2008—2012年中国税务调查数据中的制造业企业数据测算，结果表明不同行业的碳排放影子价格扭曲程度存在差异，总体变化呈倒U型趋势。反事实分析发现，如果完全消除碳排放影子价格扭曲，总产出可以提高50%左右，且不同行业的产出收益及其变化幅度存在差异。扭曲的影响因素分析表明，现阶段碳减排应重点关注中小企业、高龄企业、中西部地区企业、国有和外资企业，以及重点能耗行业内的企业。基于优化碳排放配置效率的视角，本文的研究结果为实现经济增长与“双碳”目标的动态平衡和加快构建适应中国式现代化的绿色发展机制提供了有益的政策启示。

**[关键词]** 碳排放； 能源市场； 环境规制； 要素错配

**[中图分类号]** F120 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-480X(2023)07-0046-20

## 一、引言

党的二十大报告提出，完善能源消耗总量和强度调控，重点控制化石能源消费，逐步转向碳排放总量和强度“双控”制度。从全球主要经济体碳排放强度看，1990—2019年中国碳排放强度大约下降70%左右（如图1所示），但仍明显高于全球主要经济体的碳排放强度。在第七十五届联合国大会上，习近平主席正式向世界做出承诺，中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。具体看，在碳市场建设方面，中国经历了从地方试点到全国市场的培育过程，建成了全球规模最大的碳排放权交易市场（史丹和李少林，2020）；在能源结构转型方面，通过扩大清洁能源比重、提高能源利用效率等方

**[收稿日期]** 2023-01-27

**[基金项目]** 国家自然科学基金面上项目“中国外部资产的宏观经济效应与货币政策优化调整”（批准号72073147）；教育部人文社会科学研究青年基金项目“信贷融资寻租与资本要素错配：作用机理和宏观经济效应研究”（批准号21YJC790143）。

**[作者简介]** 杨豪，四川大学商学院副研究员，经济学博士；潘颖豪，中国人民大学国家发展与战略研究院讲师，经济学博士；才国伟，中山大学岭南学院教授，博士生导师，经济学博士。通讯作者：潘颖豪，电子邮箱：panyinghao@ruc.edu.cn。感谢匿名评审专家和编辑部的宝贵意见，文责自负。

式,实现碳排放总量控制(林伯强和邹楚沅,2014);在产业政策引导方面,实施绿色产业政策,鼓励企业采用低碳技术和清洁生产方式,降低企业碳排放(涂正革,2012);在国际合作方面,积极参与全球气候治理,支持多边主义,分享应对气候变化的经验做法,为全球碳减排贡献中国智慧、中国力量(Auffhammer et al.,2015)。

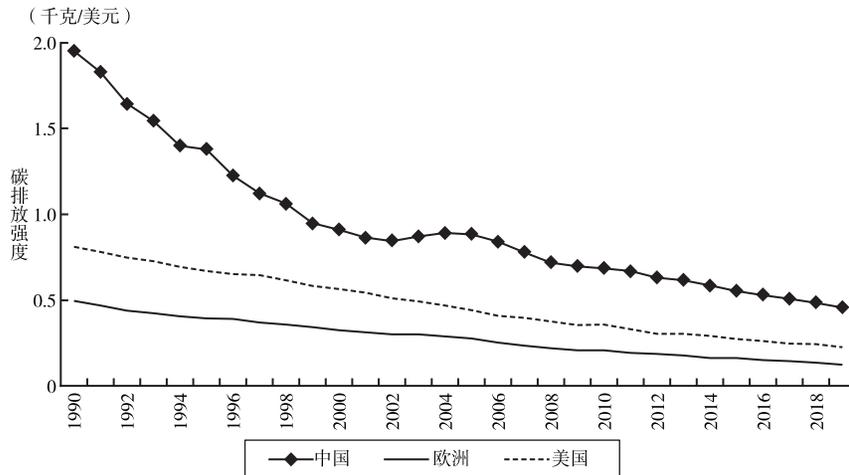


图1 1990—2019年全球主要国家和地区碳排放强度

资料来源:世界银行《世界发展指标》(World Development Indicators)。

与此同时,新时代中国经济高质量发展面临的国内国际环境正在发生深刻转变。经济外循环中,全球经济发展的底层逻辑正经历深刻改变,全球化向区域化转向的趋势不断增强,全球经济预计步入低增长、高通胀和高利率时代。经济内循环中,需求收缩、供给冲击和预期转弱的三重压力仍较大,宏观经济政策的主要导向依然是稳字当头、稳中求进,稳增长始终贯穿当前经济工作的主线(中国式现代化研究课题组,2022)。从政策实践看,平衡经济增长和碳减排尚无可参照的全球适用路径,是发展中国家普遍面临的政策挑战。因此,在外部发展环境恶化和国内经济增速下滑的双重冲击下,如何高效统筹经济增长和“双碳”目标,是新时代经济高质量发展的核心议题。

从能源经济学视角看,提高能源使用效率是实现“双碳”目标的必由之路。现有研究认为推动绿色技术革命和技术创新应成为提高能源使用效率的首选政策。然而,一个明显的特征事实是,虽然中国部分领军企业在能源技术的创新上处于领跑地位,但整体能源效率水平依然较低(魏楚和郑新业,2017)。同时,技术进步的边际速度将逐步趋缓,短期内难以依靠技术进步获得能源效率的极大提高。因此,未来能源效率的提升需要寻找新的政策路径和理论支撑。基于近年来兴起的要素配置理论(Restuccia and Rogerson,2008;Hsieh and Klenow,2009),在能源使用总量保持不变的情况下,如果将更多的能源配置给能源使用效率更高的企业,经济总产出将会增加,能源消费强度随之下降。现实中,能源配置扭曲导致1998—2013年中国全要素生产率下降42%左右(陈诗一和陈登科,2017)。可见,通过优化能源配置提高能源使用效率存在巨大的政策潜力。二氧化碳作为生产过程中能源投入的一种非合意产出,其本身也可被视为一种投入要素(陈诗一,2009;Rozenberg et al.,2018)。在此基础上,本文将二氧化碳作为企业的投入要素,与传统的资本和劳动一起纳入生产函数,测算制造业企业二氧化碳排放错配程度及其造成的产出损失。

本文首先采用标准的资源错配与产出损失测算框架,将其企业生产技术设定为常替代弹性形式,以考虑要素之间的替代弹性。现有研究表明,要素之间的替代弹性是影响能源强度的重要因素(林伯强和杜克锐,2013;张宁,2022)。因此,使用常替代弹性生产技术测算企业间二氧化碳错配和产出损失是必要的。其次,本文将二氧化碳作为投入要素引入企业生产决策过程,在考虑与二氧化碳相关的能源市场和规制政策扭曲下测算二氧化碳影子价格。最后,使用2008—2012年中国税务调查数据,核算企业二氧化碳投入量,估计模型相关参数,测算二氧化碳影子价格扭曲程度及其造成的产出损失。结果发现,制造业行业内不同企业的二氧化碳影子价格存在差异,与二氧化碳投入相关的能源市场和规制政策存在扭曲。二氧化碳影子价格扭曲造成的平均产出损失为51%,总体变化趋势呈倒U型,即先升后降。同时,不同行业的产出损失及其变化存在较大差异,重点能耗行业的产出损失显著高于其他行业。<sup>①</sup>上述结果在不同的稳健性检验中均成立。此外,本文发现企业规模、年龄、所属区位和所有制形式是导致不同企业二氧化碳影子价格差异的潜在可能因素。

相较于现有文献,本文的边际贡献包括:①在资源错配与产出损失测算框架下,使用中国工业企业微观数据测算了企业层面的碳排放影子价格并考察了企业间碳排放错配程度。相较于现有研究主要在地区、行业层面测算碳排放影子价格和探讨碳排放强度的影响因素,本文以具体的宏观实证测算模型为基础,揭示了企业层面的碳排放影子价格和企业间碳排放扭曲程度,为企业层面碳排放影子价格的进一步研究提供了新的数据基础和特征事实。②在测算企业层面碳排放影子价格的基础上,本文考察了宏观碳排放错配程度及其在行业层面的异质性和时间变化趋势等特征,并基于测算模型构建反事实分析,量化了通过改善碳排放配置效率进一步降低碳排放强度和提升经济增长的政策潜力。本文为通过优化企业间二氧化碳配置效率来降低碳排放强度这一理论推断提供了更加准确和可量化的经验证据支持。③通过对不同企业二氧化碳影子价格差异主要来源的探讨,本文为从要素配置效率视角协调中国经济增长和减排政策的设计提供了新的政策启示。

余文结构安排如下:第二部分介绍政策背景和相关文献;第三部分是本文的测算模型框架;第四部分介绍测算模型参数和数据来源;第五部分报告基准实证结果和稳健性检验;第六部分初步探讨潜在的影响因素;最后是结论和政策启示。

## 二、政策背景与文献评述

本部分首先介绍与二氧化碳投入相关的市场扭曲现象,接着评述二氧化碳排放的影响因素和资源错配与产出损失框架等研究文献。

### 1. 政策背景

自20世纪90年代以来,国家层面应对气候变化的制度安排、机构建设和法律保障不断加强,取得了一定的治理成效。从政策实践看,环境规制政策的实施早于温室气体治理。环境规制政策不仅控制了主要污染物排放,也有助于减少碳排放。1998年中国签署《联合国气候变化框架公约》,但在初期并未对碳排放设立明确的限制和目标,碳排放政策相对较为松散。随着全球气候变化议题日益重要,社会各界开始关心碳排放对环境的影响,政府逐步制定了一系列相关政策。2006年以来,国家“十一五”规划首次将单位GDP能耗和主要污染物减排目标确立为约束性指标,环境规

<sup>①</sup> 制造业中的重点能耗行业包括:纺织业,造纸和纸制品业,石油加工、炼焦和核燃料加工业,化学原料和化学制品业,非金属矿物制品业,黑色金属冶炼和压延加工业,有色金属冶炼和压延加工业。

制从“软约束”过渡到“硬约束”,节能减排成为各级政府部门的常规性工作。2007年,发布《国家应对气候变化规划纲要》,明确了温室气体减排目标,并提出了实现“节能减排”的措施。在减排温室气体方面,2009年中国首次提出二氧化碳减排承诺,并在“十二五”规划中提出逐步建立碳市场和以市场机制实现碳减排的工作路径。2011年,国务院发布《中国应对气候变化的政策与行动(2011)》,明确将二氧化碳排放强度作为重要指标,并提出到2015年,单位国内生产总值二氧化碳排放比2010年下降17%,单位国内生产总值能耗比2010年下降16%。随后,北京、天津、上海、重庆、深圳、广东和湖北被确立为首批碳排放权交易试点,碳市场具有显著的减排效应(吴茵茵等,2021)。在试点基础上进一步推进“双碳”目标,2021年全国统一碳排放权交易市场在发电行业率先启动,标志着中国已建成全球最大的碳交易市场体系。

化石能源是碳排放的主要来源,能源市场扭曲最终体现在二氧化碳排放的投入成本中(冷艳丽和杜思正,2016;Lin and Jia,2019)。中国能源市场的市场化改革长期滞后于其他产品市场和要素市场,能源市场扭曲等问题备受诟病(王芃和武英涛,2014)。具体看,为了促进经济增长、降低企业成本,电力和煤炭等能源要素价格通常受到政府管制,企业支付的使用价格往往低于市场供求关系决定的均衡价格,导致能源市场出现价格扭曲,进而损害能源要素和二氧化碳排放的配置效率。同时,如前文所述,环境规制的资源配置效应也会对二氧化碳排放的配置产生直接影响(张伟等,2013;钟茂初等,2015;Yu and Zhang,2021)。基于污染强度标准的环境规制政策会在企业间产生明显的非对称影响,而在要素市场均衡中,非对称的规制作用会形成一个引致资源错配的价格楔子(韩超等,2017)。以“十一五”期间推出的千家企业节能行动为例,Chen et al.(2021)发现对大型制造业企业的用能管制导致生产要素向集团内的低生产率企业转移,造成产出损失。因此,环境规制政策在引致生产资源错配的同时,也可能会扭曲二氧化碳配置。基于此,本文主要测度与能源市场扭曲和环境规制政策相关的二氧化碳价格扭曲及其造成的产出损失。

## 2. 二氧化碳排放的影响因素

关于二氧化碳排放影响因素的现有研究主要采用宏观、省份或行业层面的二氧化碳排放数据,鲜有研究使用企业层面的二氧化碳排放数据揭示其微观机制并提供针对性的政策建议。具体看,二氧化碳排放和影响因素的研究始于环境库兹涅茨曲线的分析框架(Grossman and Krueger,1995)。已有文献首先关注到人均收入 and 经济发展阶段与二氧化碳排放的关系。作为全球增长最快的转型经济体,中国为考察二者关系提供了场景。大量研究验证了中国情境下二氧化碳排放的库兹涅茨曲线(陈诗一,2009;林伯强和邹楚沅,2014)。随着微观数据的可获得性增强,二氧化碳排放影响因素的研究视角不断拓展,例如,以Kaya恒等式为基础进行的碳排放因素分解(郭朝先,2010;邵帅等,2017)、生产效率与技术进步(张伟等,2013;张宁,2022)、贸易开放与外商直接投资(李小平和卢现祥,2010)、经济和环境规制政策等(余壮雄等,2020)。可见,碳排放影响因素的研究已经取得较大进展,但鲜有文献从碳排放错配视角讨论其配置效率。与本文思路较为接近的重要文献有:一是陈诗一和陈登科(2017)基于行业能耗数据测算了能源要素错配造成的全要素生产率损失,但其未考虑能源与资本和劳动要素之间可能存在的替代关系,以及不同企业能源投入价格的异质性。二是陈钊和陈乔伊(2019)测算了不同企业煤炭能源的使用效率差异,但未考虑差异背后的市场结构因素及由此导致的产出损失。上述文献从能源再配置视角考察能源使用效率,是本领域研究的重要进展。本文以此为基础,将碳排放作为一种投入要素,考察制造业各行业二氧化碳价格扭曲程度及其造成的产出损失。

在实证方法上,现有文献将污染排放纳入分析框架主要存在两种观点。一类文献认为污染排放会直接影响产出,把污染排放作为一种投入要素,与资本和劳动一起引入生产函数(Mohtadi,1996;陈

诗一,2009;Rozenberg et al.,2018)。另一类文献认为污染排放是生产过程中的一种非期望产出,将其与期望产出纳入生产过程,并使用方向性距离函数等统计方法对其效率进行分析(Färe et al.,1993;王群伟等,2010;张伟等,2013)。本文将二氧化碳排放作为投入要素处理,主要基于以下两方面原因:①从要素配置效率视角探讨降低二氧化碳排放强度的潜在路径,客观上需要模型化二氧化碳投入与产出的关系。纳入碳排放的生产技术可以满足这一要求,而基于非参数特征的方向性距离函数则将碳排放视为产出,忽略了潜在的市场结构和经济机制,难以直接刻画要素配置效率与产出损失的关系。②在“十一五”和“十二五”期间,环境规制政策逐步收紧、各级政府的能耗目标得以明确,以及碳排放权交易试点等规制政策的实施均会对企业碳排放产生隐性成本,影响其排放决策。本文将碳排放引入生产函数,把企业排放决策过程中面临的隐性成本显性化,并基于现实数据测算规制成本的大小和影响。

### 3. 资源错配与产出损失

假定企业生产技术和严格增和凸性的,最优的要素配置是使得不同生产率企业间要素的边际收益产出相等(Hsieh and Klenow,2009)。反之,要素错配就是偏离了最优的要素配置情形,不同生产率的企业要素边际产出在截面上存在差异。由于生产要素没有按照企业生产效率进行配置,低生产率企业存在生产要素冗余,而高生产率企业存在生产要素不足,导致加总后的总产出与生产要素最优配置时的总产出存在缺口,要素错配造成产出损失。<sup>①</sup>使用企业、地区和部门数据,现有文献测算了中国资本和劳动要素错配(Hsieh and Klenow,2009;尹恒和李世刚,2019)、金融要素错配(Whited and Zhao,2021)和能源要素错配(陈诗一和陈登科,2017)。现有研究表明,改善中国要素配置效率可以提高全要素生产率和总产出。这些研究为中国构建更加完善的要素市场配置体制提供了有益的政策启示。

本文注意到全球范围内越来越多的政府机构、投资者和环保组织把注意力聚焦于温室气体减排。碳排放权交易是各国市场化减排策略的首选,如欧盟碳排放交易系统、中国碳排放权交易市场等。市场化减排策略将二氧化碳作为一种要素或商品,由此建立的碳市场决定了二氧化碳在不同生产主体间的配置。现有研究尚未探讨基于市场制度建立的碳排放市场能够为减排提供多大的空间,本文将二氧化碳作为一种投入要素,将其纳入资源错配与产出损失框架,尝试探讨通过优化企业间二氧化碳配置可以在多大程度上促进减排。同时,本文采用的方法与现有资源错配与产出损失框架存在以下区别:①将二氧化碳作为投入要素,采用一般性的常数替代弹性生产技术将其与资本和劳动一并纳入生产函数。与传统框架使用柯布道格拉斯生产技术相比,常替代弹性生产技术更具一般性,考虑了不同要素之间的替代弹性,这会直接影响碳排放强度(林伯强和杜克锐,2013;张宁,2022)。②现有的资源错配与产出损失测算未考虑结果的统计显著性,本文使用Bootstrap方法计算测算结果的标准误差进行统计推断,从而增强了该框架下测算结果的可信度。

## 三、测算模型框架与求解

本文的测算模型建立在Hsieh and Klenow(2009)基础上,在企业生产决策过程中引入碳排放进而测算其错配程度和产出损失。

### 1. 经济环境与技术设定

考虑一个封闭的经济体生产环境,经济结构包括宏观、中观和微观三个层次。宏观层面,经济

<sup>①</sup> 一个简约的资源错配和产出损失分析框架参见《中国工业经济》网站(<http://ciejournal.ajcass.org>)附件。

体的总产出为  $Y$ , 包括  $S$  个中观行业, 要素投入为行业层面产出  $Y_s$ , 使用的生产技术为柯布一道格拉斯形式。宏观层面的生产过程表述为:

$$Y = \prod_{s=1}^S Y_s^{\theta_s}, \quad \sum_{s=1}^S \theta_s = 1 \quad (1)$$

其中,  $\theta_s$  为行业  $s$  的产出占比。最终品市场为完全竞争市场, 行业产品价格为  $P_s$ 。根据成本最小化原则, 总体价格  $P$  与行业产品价格  $P_s$  的关系为:

$$P = \prod_{s=1}^S \left( \frac{P_s}{\theta_s} \right)^{\theta_s} \quad (2)$$

考察中观行业, 其总产出为  $Y_s$ , 包括  $M_s$  家在位企业, 要素投入为企业生产的异质性产品  $Y_{si}$ , 生产技术为常替代弹性技术形式:

$$Y_s = \left( \sum_{i=1}^{M_s} Y_{si}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad (3)$$

其中,  $\sigma > 1$ , 表示企业产品间的替代弹性。行业层面的产品市场也为完全竞争市场, 企业产品价格为  $P_{si}$ 。根据成本最小化原则, 行业产品价格  $P_s$  与企业产品价格  $P_{si}$  的关系为:

$$P_{si} = \left( \frac{Y_s}{Y_{si}} \right)^{\frac{1}{\sigma}} P_s \quad (4)$$

微观企业使用资本、劳动和二氧化碳作为投入要素, 采用常替代弹性技术进行生产:

$$Y_{si} = A_{si} \left[ b_s \left( \varphi_s L_{si}^{-\alpha} + (1 - \varphi_s) K_{si}^{-\alpha} \right)^{\frac{\beta}{\alpha}} + (1 - b_s) C_{si}^{-\beta} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (5)$$

其中,  $A_{si}$  为企业生产效率。  $b_s, \varphi_s \in (0, 1)$  为要素份额参数, 反映各要素在生产过程中的重要程度。  $\alpha, \beta \in (-1, \infty)$  为替代弹性参数, 刻画生产过程中不同要素可以被替代的程度。以  $\alpha$  为例, 其特征资本和劳动之间的替代弹性为  $\sigma_1 (\sigma_1 = 1/(1 + \alpha))$ 。需要说明的是: ①不同于经典文献使用柯布一道格拉斯形式的企业生产技术, 本文选择更具一般性的常替代弹性生产技术, 以准确识别不同要素再配置对总产出的影响。②参考现有研究的处理方法, 本文将企业碳排放  $C_{si}$  作为投入要素, 与劳动  $L_{si}$  和资本  $K_{si}$  一起纳入企业生产函数。③关于劳动、资本和二氧化碳在生产技术中的嵌套结构安排存在三种二级嵌套形式, 本文在基准结果中使用常见的嵌套结构, 其一级嵌套为资本—劳动嵌套, 二级嵌套为资本—劳动与碳排放嵌套。同时, 在稳健性检验中考察其他两种形式的测算结果。

## 2. 扭曲环境下的要素配置

在产品市场上, 不同企业生产差异化产品, 产品市场为垄断竞争市场, 企业选择产品价格  $P_{si}$ 。在要素市场上, 假设资本和劳动市场不完美, 不同企业的资本和劳动使用价格存在扭曲。本文分别使用价格楔子  $\tau_{L_{si}}$  和  $\tau_{K_{si}}$  表示劳动和资本要素市场不完美对企业要素使用成本的扭曲程度。同时, 虽然样本期间的二氧化碳排放没有显性价格, 但存在由能源市场扭曲和环境规制政策导致的隐性成本。为此, 本文将二氧化碳作为投入要素, 将其隐性成本显性化, 设定二氧化碳影子价格楔子为  $\tau_{C_{si}}$ 。①这里的二氧化碳影子价格楔子相当于能源市场和环境规制政策扭曲的一个充分统计量, 为简化分析, 本文在测算模型中未进一步分析扭曲产生的具体原因。

给定企业面临的产品市场和要素市场环境, 其最优化问题是决定产品价格 ( $P_{si}$ ) 和要素需求

① 由于企业关心扭曲楔子加成后的实际要素支付成本, 生产要素再配置带来的产出改善不取决于生产要素价格的绝对值。因此, 本文将生产要素价格和价格楔子合并。

$(L_{si}, K_{si}$  和  $C_{si})$ , 以使得经济利润  $\pi_{si}$  最大化:

$$\pi_{si} = P_{si} Y_{si} - (1 + \tau_{Lsi}) L_{si} - (1 + \tau_{Ksi}) K_{si} - (1 + \tau_{Csi}) C_{si} \quad (6)$$

企业最优化问题的求解可以分两步进行。首先,在给定产量的情况下,选择劳动、资本和二氧化碳以最小化生产成本:  $(1 + \tau_{Lsi}) L_{si} + (1 + \tau_{Ksi}) K_{si} + (1 + \tau_{Csi}) C_{si}$ 。其次,在产品市场需求(4)式和企业生产技术(5)式的约束下,选择产品价格以最大化经济利润。基于上述求解过程可得:

$$P_{si} = \frac{\sigma}{\sigma - 1} \frac{1}{A_{si}} \frac{1 + \tau_{Csi}}{1 - b_s} \left[ b_s J_{si}^{-\beta} (\varphi_s Z_{si}^\alpha + 1 - \varphi_s)^\beta + (1 - b_s) \right]^{\frac{1}{\beta+1}} \quad (7)$$

其中,最优价格等于企业垄断加成与边际生产成本的乘积。 $Z_{si}$  和  $J_{si}$  分别表示资本—劳动比率和资本—碳排放比率:

$$Z_{si} = \frac{K_{si}}{L_{si}} = \left[ \frac{(1 + \tau_{Lsi})(1 - \varphi_s)}{(1 + \tau_{Ksi}) \varphi_s} \right]^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (8)$$

$$J_{si} = \frac{K_{si}}{C_{si}} = \left[ \frac{b_s (1 - \varphi_s) (1 + \tau_{Csi}) (\varphi_s Z_{si}^\alpha + 1 - \varphi_s)^{\frac{\beta}{\alpha-1}}}{(1 - b_s) (1 + \tau_{Ksi})} \right]^{\frac{1}{1+\beta}} \quad (9)$$

进一步,企业最优的劳动、资本和二氧化碳需求为:

$$L_{si} = b_s \varphi_s \frac{\sigma - 1}{\sigma} \frac{P_{si} Y_{si}}{1 + \tau_{Lsi}} \frac{(\varphi_s + (1 - \varphi_s) Z_{si}^{-\alpha})^{\frac{\beta}{\alpha-1}}}{b_s (\varphi_s + (1 - \varphi_s) Z_{si}^{-\alpha})^\beta + (1 - b_s) \frac{J_{si}^\beta}{Z_{si}^\beta}} \quad (10)$$

$$K_{si} = b_s (1 - \varphi_s) \frac{\sigma - 1}{\sigma} \frac{P_{si} Y_{si}}{1 + \tau_{Ksi}} \frac{(\varphi_s Z_{si}^\alpha + 1 - \varphi_s)^{\frac{\beta}{\alpha-1}}}{b_s (\varphi_s Z_{si}^\alpha + 1 - \varphi_s)^\beta + (1 - b_s) J_{si}^\beta} \quad (11)$$

$$C_{si} = (1 - b_s) \frac{\sigma - 1}{\sigma} \frac{P_{si} Y_{si}}{1 + \tau_{Csi}} \frac{1}{b_s J_{si}^{-\beta} (\varphi_s Z_{si}^\alpha + 1 - \varphi_s)^\beta + 1 - b_s} \quad (12)$$

与现有文献不同的是,由于企业生产技术使用了一般性的常替代弹性形式,要素价格楔子  $\tau_{Lsi}$ 、 $\tau_{Ksi}$  和  $\tau_{Csi}$  没有直观的显示解。为此,本文将使用非线性求解方法计算不同企业面临的要素价格楔子,然后测算其面临的实际要素使用成本,并进行相应的反事实分析。<sup>①</sup>

#### 四、参数选择与数据说明

前述测算模型定义了资本、劳动和二氧化碳价格扭曲楔子的计算方法,以及反事实情况下最优要素配置带来的总产出收益。然而,使用模型量化要素错配造成的产出损失,仍需合理地估计和设定相关参数。这里主要介绍模型参数的选择依据和相关企业数据的描述性统计结果。

##### 1. 参数选择

本文主要考虑如下几类参数的取值:①产品替代弹性。参考 Hsieh and Klenow (2009),行业生产技术中的产品替代弹性设为3,稳健性检验时考察其他取值情况。企业生产技术中的替代弹性

① 最优要素配置情形的讨论参见《中国工业经济》网站 (<http://ciejournal.ajcass.org>) 附件。

参数 $\alpha$ 和 $\beta$ ,借鉴Kmenta(1967)的方法进行估计。<sup>①</sup>结果显示, $\alpha$ 取值为-0.2712, $\beta$ 取值为-0.0771,且在常规显著性水平显著。同时,资本与劳动的替代弹性为1.3721,与陈登科和陈诗一(2018)的估计结果较为接近。资本和劳动嵌套与二氧化碳的替代弹性为1.0835,略大于1,与吕振东等(2009)得到的估计结果较为接近。<sup>②</sup>生产技术中的要素份额参数 $b_s$ 和 $\varphi_s$ 的取值。使用估计的要素替代弹性和各行业要素投入总量,以及不存在扭曲下社会计划者的最优化问题计算行业要素份额。<sup>③</sup>资本和劳动要素份额的平均水平为0.6645,最小值为0.4534,对应行业是石油加工、炼焦及核燃料加工业,最大值为0.7999,对应行业为通信设备及其他电子设备制造业。要素份额参数 $\varphi_s$ 的行业均值为0.2482,最小值为0.1422,对应行业为化学纤维制造业,最大值为0.4302,对应行业为纺织业,属于重点能耗行业。

## 2. 数据来源与变量度量

本文使用由财政部和国家税务总局收集的《中国税务调查数据》(2008—2012年)。数据采用分层随机抽样的调查方法对全国企业基本情况、税收、财务和能源消费等信息进行采集。与中国工业企业数据相比,中国税务调查数据对企业的代表性更好,其中包括大量的中小企业(高培勇和毛捷,2013)。本文使用2008—2012年制造业企业子样本数据<sup>④</sup>,清洗数据的步骤如下:①删除关键变量缺失或存在错误的样本;②删除电力、煤炭和石油消费等数据缺失的样本;③烟草制品业和废弃资源综合利用业的企业数量较少,删除这些行业;④删除就业人数少于8人的企业;⑤为了避免极端值对测算结果的影响,连续变量在1%和99%的水平进行缩尾处理。<sup>⑤</sup>最终得到362072家企业,724827个观测值。

本文需要度量的企业关键变量包括总产出、资本存量、劳动和二氧化碳。由于生产函数中包括资本、劳动和二氧化碳,总产出选择企业报告的总产值刻画(陈诗一和陈登科,2017),并在稳健性检验中使用企业增加值。基于企业报告的固定资产净值,使用永续盘存法计算资本存量。<sup>⑤</sup>考虑不同企业的人力资本差异,使用工资及奖金总额表征企业的劳动投入。为了平减价格波动的影响,分别使用各省份消费价格指数对企业总产值和劳动投入进行平减,同时使用固定资产投资价格指数估算资本存量。

对于企业二氧化碳排放量,目前公开可得的二氧化碳排放数据主要集中在国家和行业层面,鲜有研究核算企业层面的碳排放量。国家和行业层面的二氧化碳排放核算依据是联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的《2006年IPCC国家温室气体清单指南》。该指南报告了二氧化碳排放的主要来源和不同能源的二氧化碳排放因子。以煤和石油为例,排放系数分别为1.83千克二氧化碳/千克和3.07千克二氧化碳/千克。Auffhammer and Gong(2015)指出目前直接测算碳排放量较为困难,现有研究主要根据化石燃料的消耗量间接计算。本文参考指南的核算方法计算企业二氧化碳投入量,具体使用碳排放源乘以其对应的排放因子。企业能耗数据使用税收调查报告的年度

① 具体结果参见《中国工业经济》网站(<http://ciejournal.ajcass.org>)附件。

② 具体结果参见《中国工业经济》网站(<http://ciejournal.ajcass.org>)附件。

③ 当前能够获得的数据年份到2016年,但2012年之后的数据未报告企业成立日期等信息,无法计算资本存量,因此,本文仅使用2008—2012年的制造业企业数据。

④ 样本期间行业分类标准发生变化,本文将国民经济行业分类GB/T4754—2011标准统一归并为GB/T4754—2002标准。

⑤ 具体过程参见《中国工业经济》网站(<http://ciejournal.ajcass.org>)附件。

电力、煤炭和石油化石燃料消费量。<sup>①</sup> 煤炭和石油的碳排放因子参照 IPCC 指南, 电力碳排放因子来自中国生态环境部的相关测算依据, 取值范围为 0.7972—1.2783 吨二氧化碳/兆瓦时。<sup>②</sup>

各行业所有变量均进行对数处理。表 1 报告了主要变量的描述性统计结果, 以二氧化碳为例, 制造业各行业二氧化碳投入的均值为 6.8461, 约 940 吨/年, 标准差为 2.3159。其最大值为 9.3062, 对应行业为石油加工、炼焦及核燃料加工业, 最小值为 5.9898, 对应行业为木材加工制品业。

表 1 主要变量描述性统计

行业代码	观测值	ln(总产值, 千元)		ln(资本, 千元)		ln(劳动, 千元)		ln(二氧化碳排放, 吨)	
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
总体水平	724827	9.7557	1.8702	8.0540	2.2173	7.2993	1.5970	6.8461	2.3159
13	23105	9.8795	1.8983	8.1691	2.0834	6.8063	1.5607	6.9838	2.2134
14	14251	9.7594	1.9672	8.5233	2.1114	7.2847	1.6460	7.2484	2.2381
15	9022	9.5878	2.3222	9.1044	2.2454	7.2564	1.8011	7.2981	2.4939
17	49552	9.8910	1.5857	8.2546	2.0987	7.4503	1.4439	7.2583	2.1926
18	36206	9.4249	1.5426	7.3144	1.8963	7.6812	1.3979	6.0414	1.8452
19	14504	9.6419	1.5861	7.0095	2.2130	7.2418	1.5897	6.0842	1.9618
20	15815	8.8774	1.5541	6.8605	2.1592	6.4584	1.3372	5.9898	2.2089
21	7139	9.6093	1.7002	7.7492	2.0628	7.4751	1.5815	6.4263	1.8759
22	16742	9.5799	1.8871	8.1380	2.2632	7.0120	1.5737	7.2341	2.5277
23	12344	9.0251	1.7891	8.1117	2.0819	6.8173	1.5846	6.0191	2.0922
24	6005	9.4600	1.6270	7.6174	2.0115	7.5578	1.5092	6.2104	1.9755
25	4450	11.3928	2.2469	9.8099	2.5781	7.8756	1.8736	9.3062	3.2933
26	50400	10.0065	1.9536	8.3546	2.2847	7.1663	1.5900	7.3699	2.5742
27	13821	10.1681	1.8293	9.2844	1.9033	7.7847	1.5311	7.3463	2.1599
28	3310	11.0846	1.9852	9.6464	2.2939	7.9153	1.5242	8.8555	2.3384
29	11489	9.4539	1.8431	7.8689	2.1411	7.1350	1.6408	6.9718	2.1679
30	35472	9.4340	1.6953	7.7344	1.9997	6.9758	1.5220	6.8528	1.9878
31	53318	9.6811	1.7480	8.4887	2.0831	7.1320	1.4421	7.9064	2.4471
32	15230	10.7788	2.1407	8.9278	2.3798	7.5399	1.6898	8.8117	2.5910
33	11898	10.3807	2.0538	8.2924	2.3551	7.0994	1.6504	7.9033	2.4765
34	39745	9.5157	1.8374	7.6982	2.0655	6.9901	1.5193	6.6713	2.1994
35	43191	9.2014	1.8401	7.5395	2.1334	6.8389	1.5717	6.2851	2.1293
36	77576	9.7835	1.7972	8.0285	2.0942	7.3991	1.5297	6.3779	2.0601
37	42066	10.0398	1.9989	8.3443	2.3846	7.6798	1.6842	6.7049	2.1817
39	30001	10.0081	1.8752	8.0122	2.1787	7.4855	1.6129	6.3873	2.0931
40	36356	10.3953	1.9489	8.5358	2.3087	8.1783	1.6260	6.9126	2.2047
41	9524	9.8037	1.9252	7.8220	2.3013	7.6335	1.6760	6.0771	2.1431
42	42295	9.4718	1.7857	7.4970	2.1664	7.2455	1.5631	6.1580	2.1263

注: 13—农副食品加工业, 14—食品制造业, 15—饮料制造业, 17—纺织业, 18—纺织服装、鞋帽制造业, 19—皮革等及其制品业, 20—木材加工制品业, 21—家具制造业, 22—造纸和纸制品业, 23—印刷和记录媒介复制业, 24—文教体育用品制造业, 25—石油加工、炼焦及核燃料加工业, 26—化学制品制造业, 27—医药制造业, 28—化学纤维制造业, 29—橡胶制品业, 30—塑料制品业, 31—非金属矿物制品业, 32—黑色金属冶炼及压延加工业, 33—有色金属冶炼及压延加工业, 34—金属制品业, 35—通用设备制造业, 36—专用设备制造业, 37—交通运输设备制造业, 39—电气机械及器材制造业, 40—通信设备及其他电子设备制造业, 41—仪器仪表等制造业, 42—工艺品及其他制造业。

① 这里的石油化石燃料消费具体指的是企业的油料消费量, 包括汽油、煤油、柴油等, 而非原油。

② 具体取值参见《中国工业经济》网站(<http://ciejournal.ajcass.org>)附件。

## 五、测算结果分析

在计算参数的基础上,本部分将使用第二部分的测算模型量化二氧化碳价格扭曲及其造成的产出损失。

### 1. 二氧化碳影子价格扭曲

如果要素市场不存在任何形式的价格扭曲,对于同一要素,均衡时不同的使用主体的边际使用成本应相等。反之,要素市场存在价格扭曲,不同的使用主体面临的要素边际价格存在差异。以二氧化碳为例,如果与其相关的能源市场和规制政策不存在任何形式的扭曲,那么不同企业的二氧化碳边际价格应相等。如果不同企业的二氧化碳影子价格存在差异,意味着与二氧化碳相关的能源市场和规制政策存在扭曲。为此,本文首先基于模型测算企业层面的二氧化碳影子价格,再使用其离散程度表征其价格扭曲程度。

图2展示了各年份二氧化碳影子价格的核密度分布。<sup>①</sup>总体看,不同企业的二氧化碳影子价格在不同年份均存在较大差异。随着时间推移,二氧化碳影子价格的整体分布向右移动,说明企业的二氧化碳使用效率在逐步提高。分行业看,图3报告了部分典型行业的二氧化碳影子价格的核密度分布。典型行业中,化学纤维制造业的二氧化碳影子价格的分布较为紧凑,不同企业的价格差异较小。重点能耗行业中,纺织业和有色金属冶炼及压延加工业的核密度分布较为接近。同时,与化学纤维制造业相比,这两个行业的核密度分布较为分散,不同企业的二氧化碳影子价格差异较大。石油加工和核燃料加工业内,企业的二氧化碳影子价格的核密度分布则更为分散,企业间二氧化碳影子价格差异也更明显。

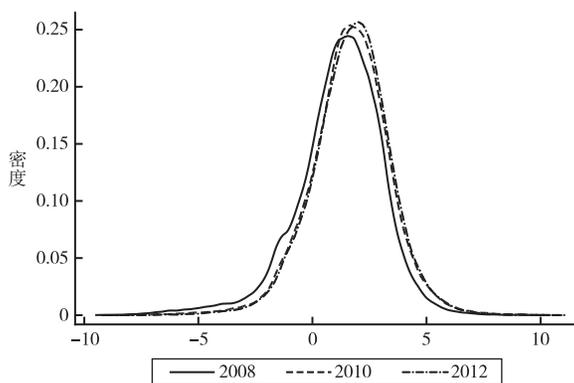


图2 二氧化碳影子价格的离散程度

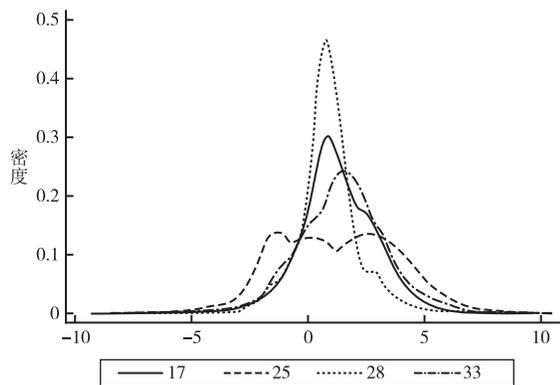


图3 部分典型行业二氧化碳影子价格的离散程度

注:17表示纺织业,25表示石油加工和核燃料加工业,28表示化学纤维制造业,33表示有色金属冶炼及压延加工业。

表2报告了各行业企业的二氧化碳影子价格的标准差、75—25分位数和90—10分位数离差。结果显示,各行业企业的二氧化碳影子价格存在较大差异。平均看,位于75%分位数企业的二氧化碳影子价格大约是位于25%分位数的8倍,位于90%分位数企业的二氧化碳影子价格大约是位于10%分位

<sup>①</sup> 便于分析,后文统一使用二氧化碳影子价格的对数值。

数的59倍。分行业看,与图3的发现相一致,二氧化碳影子价格的标准差取值最大的是石油加工、炼焦及核燃料加工业,标准差为2.4825,75—25分位数的离差为3.9368,90—10分位数的离差为6.3068,远高于行业平均水平。二氧化碳影子价格的标准差取值最小的是化学纤维制造业,为1.2618。其位于75%分位数企业的二氧化碳影子价格大约是位于25%分位数的3倍,位于90%分位数企业的二氧化碳影子价格大约是位于10%分位数的22倍。基于100次随机抽样Bootstrap方法计算的测算结果的标准误<sup>①</sup>表明,标准误差的数值较小,估计结果较为精确。同时,除了纺织业,大部分重点能耗行业内企业的二氧化碳影子价格的离散度均明显高于行业平均水平。这说明重点能耗行业内企业的二氧化碳影子价格差异较大,与二氧化碳相关的能源市场和规制政策扭曲更为严重。

综上,制造业各行业内企业的二氧化碳影子价格均存在明显差异,与二氧化碳相关的能源市场和规制政策存在扭曲。同时,不同行业存在较为明显的差异,重点能耗行业内企业的二氧化碳影子价格的离散程度明显高于其他行业,不同企业间二氧化碳配置的扭曲现象更为严重。

表2 各行业二氧化碳影子价格的扭曲程度

行业代码	行业名称	标准差	75—25分位数	90—10分位数
13	农副食品加工业	1.7063	1.9983	4.1361
14	食品制造业	1.7078	1.9615	4.0831
15	饮料制造业	1.6482	1.9061	4.0674
17	纺织业	1.5845	1.9393	3.9628
18	纺织服装、鞋帽制造业	1.4797	1.7257	3.4953
19	皮革等及其制品业	1.5422	1.7339	3.7302
20	木材加工制品业	1.7177	2.1158	4.2418
21	家具制造业	1.4979	1.6273	3.6082
22	造纸和纸制品业	1.7081	2.4168	4.1958
23	印刷和记录媒介复制业	1.4926	1.4466	3.3702
24	文教体育用品制造业	1.4180	1.6484	3.4475
25	石油加工、炼焦及核燃料加工业	2.4825	3.9368	6.3068
26	化学制品制造业	1.8658	2.4270	4.7616
27	医药制造业	1.7211	2.0847	4.1953
28	化学纤维制造业	1.2618	1.1870	3.0991
29	橡胶制品业	1.5228	1.7036	3.7149
30	塑料制品业	1.4269	1.4823	3.4582
31	非金属矿物制品业	1.8521	2.7110	4.6570
32	黑色金属冶炼及压延加工业	1.7863	2.2983	4.4053
33	有色金属冶炼及压延加工业	1.8212	2.3245	4.5615
34	金属制品业	1.6906	2.0418	4.1930
35	通用设备制造业	1.7235	2.1238	4.1804
36	专用设备制造业	1.6915	2.0721	4.1590
37	交通运输设备制造业	1.5997	1.8782	3.8708
39	电气机械及器材制造业	1.6007	1.8808	3.8755
40	通信设备及其他电子设备制造业	1.6179	1.9740	3.9073
41	仪器仪表等制造业	1.7455	2.1391	4.2089
42	工艺品及其他制造业	1.7598	2.1430	4.3501

## 2. 产出损失测算

为了进一步测算由二氧化碳影子价格扭曲导致的产出损失,这里首先计算要素最优配置情形

<sup>①</sup> 具体结果参见《中国工业经济》网站(<http://ciejournal.ajcass.org>)附件。

下资本、劳动和二氧化碳的配置情况,然后再使用企业、行业和总产出的生产技术计算要素最优配置情形下的总产出( $\hat{Y}$ )。同时,在保持资本和劳动要素最优配置情形不变的情况下,使用现实中二氧化碳的配置情况计算此时的总产出( $Y$ )。最后,通过比较两种情形的总产出,得到二氧化碳价格扭曲造成的产出损失:

$$\Delta = \frac{Y}{\hat{Y}} - 1 \quad (13)$$

表3报告了不同年份中各行业由二氧化碳影子价格扭曲造成的产出损失。总体看,二氧化碳影子价格扭曲导致制造业总产出损失约为51%。具体看,各行业的二氧化碳影子价格的离散程度存在明显差异,由此导致的产出损失也不尽相同。产出损失结果的排序与影子价格离散程度的大小顺序保持一致,石油加工、炼焦及核燃料加工业内扭曲导致的产出损失是各行业中最高的,平均损失约为94%。重点能耗行业中由扭曲造成的产出损失明显高于行业平均水平和非重点能耗行

表3 二氧化碳影子价格扭曲造成的产出损失

行业代码	行业名称	2008	2009	2010	2011	2012
平均水平		-0.4832	-0.5667	-0.5831	-0.4716	-0.4522
13	农副食品加工业	-0.6672	-0.6826	-0.6920	-0.6703	-0.6438
14	食品制造业	-0.6196	-0.6276	-0.6223	-0.5951	-0.5762
15	饮料制造业	-0.3936	-0.4365	-0.4578	-0.4223	-0.4388
17	纺织业	-0.5524	-0.6544	-0.6791	-0.6822	-0.6879
18	纺织服装、鞋帽制造业	-0.3996	-0.5651	-0.6188	-0.5704	-0.5589
19	皮革等及其制品业	-0.5925	-0.6198	-0.6636	-0.6587	-0.5944
20	木材加工制品业	-0.7225	-0.8663	-0.8437	-0.8464	-0.8241
21	家具制造业	-0.4665	-0.5207	-0.5410	-0.5236	-0.4965
22	造纸和纸制品业	-0.6578	-0.6879	-0.7286	-0.7294	-0.6952
23	印刷和记录媒介复制业	-0.2744	-0.4401	-0.4556	-0.3733	-0.3945
24	文教体育用品制造业	-0.3590	-0.4557	-0.5288	-0.4805	-0.4278
25	石油加工、炼焦及核燃料加工业	-0.9328	-0.9397	-0.9442	-0.9483	-0.9353
26	化学制品制造业	-0.7450	-0.7806	-0.7867	-0.7833	-0.7622
27	医药制造业	-0.4471	-0.5034	-0.5341	-0.5061	-0.5161
28	化学纤维制造业	-0.4321	-0.3859	-0.4632	-0.4506	-0.4773
29	橡胶制品业	-0.4457	-0.5000	-0.5676	-0.5327	-0.4975
30	塑料制品业	-0.4130	-0.5108	-0.5221	-0.5300	-0.4751
31	非金属矿物制品业	-0.8122	-0.8423	-0.8542	-0.8452	-0.8335
32	黑色金属冶炼及压延加工业	-0.8165	-0.7820	-0.8374	-0.7850	-0.7844
33	有色金属冶炼及压延加工业	-0.8177	-0.8324	-0.8213	-0.8318	-0.8466
34	金属制品业	-0.5851	-0.6888	-0.6809	-0.7048	-0.6923
35	通用设备制造业	-0.3198	-0.5258	-0.5518	-0.5431	-0.5084
36	专用设备制造业	-0.4980	-0.5452	-0.5312	-0.2814	-0.3000
37	交通运输设备制造业	-0.3445	-0.3740	-0.3807	-0.3693	-0.3617
39	电气机械及器材制造业	-0.2966	-0.4068	-0.3825	-0.5077	-0.4778
40	通信设备及其他电子设备制造业	-0.2946	-0.3574	-0.3622	-0.3423	-0.3135
41	仪器仪表等制造业	-0.3671	-0.4057	-0.4638	-0.3936	-0.3592
42	工艺品及其他制造业	-0.5877	-0.6613	-0.6606	-0.5267	-0.5402

业。非重点能耗行业中,木材加工制品业的产出损失最大,均值约为82%,仅次于黑色金属冶炼和压延加工业。行业中产出损失最小的是通信设备及其他电子设备制造业,约为33%,约占石油加工、炼焦及核燃料加工业产出损失的1/3。

从趋势变化看,二氧化碳价格扭曲造成的平均产出损失呈倒U型,先升后降,于2010年达到峰值约58%。可能的解释是,“十二五”期间制定了明确的单位GDP碳排放目标。而“十一五”期间提出的节能计划则主要针对单位GDP能耗进行规制,未明确单位GDP的碳排放目标。Auffhammer and Gong(2015)发现中国在“十一五”期间单位GDP能耗虽大幅下降,但能源的碳强度则呈现明显的上升趋势,这与本文的发现相一致。“十二五”时期更明确的碳排放强度目标带来的规制效应,导致企业间二氧化碳价格扭曲造成的产出损失呈现下降趋势,单位产出的碳排放强度也随之下降。另外,样本期间二氧化碳影子价格扭曲造成的产出损失约下降3.5%,不同行业的产出损失变化幅度呈现较大差异。产出损失下降幅度最大的是专用设备制造业,2008年约为50%,2012年约下降30%,降幅约为40%。与之形成对照的是电气机械及器材制造业,样本期间的产出损失上升幅度最大,约为60%。2008年该行业的产出损失约为30%,2012年则约上升48%。重点能耗行业中产出损失变化幅度最大的是纺织业,从2008年的55%左右上升到2012年的69%左右,约增加25%。下降幅度最大的是黑色金属冶炼及压延加工业,产出损失总体呈下降趋势,约降低4%。而其他重点能耗行业的产出损失变化幅度较小。标准误差说明,测算结果的标准误差较小,常规统计显著性水平下结果较为精确。<sup>①</sup> 综上,二氧化碳影子价格扭曲造成总产出损失51%,不同行业的产出损失和变化幅度存在较大差异。

### 3. 不同投入要素的比较

接下来,本文测算资本和劳动价格扭曲及其造成的产出损失,以比较不同要素市场的扭曲程度和进一步检验测算方法的稳健性。首先,使用式(10)和式(11)分别计算资本和劳动价格楔子。<sup>②</sup> 与二氧化碳影子价格的分布类似,不同企业面临的资本和劳动影子价格存在明显差异,要素市场存在扭曲。同时,对于资本和劳动要素,2008年的影子价格分布相较于其他年份较为扁平,离散程度更大。这与现有发现一致,国际金融危机加重了资本和劳动市场的扭曲程度(尹恒和李世刚,2019)。

资本和劳动影子价格的离散程度表明,资本和劳动也存在与二氧化碳相类似的扭曲现象。接着,本文比较三种要素影子价格扭曲造成的产出损失,结果如表4所示。平均看,资本影子价格扭曲造成总产出约下降54%,略高于二氧化碳影子价格扭曲导致的产出损失,劳动影子价格扭曲造成的产出损失最小,约为12%。<sup>③</sup> 样本期间,资本影子价格扭曲造成的产出损失明显下降,最大值约为68%,最小值约为44%,降幅约为35%。劳动影子价格扭曲造成的产出损失的变化趋势与资本类似,最大值约为16%,最小值约为9%,降幅约为50%。与资本和劳动相比,二氧化碳影子价格扭曲造成的产出损失降幅最小。这可能说明,样本期间能源市场扭曲的改善幅度小于资本和劳动市场,与王芃和武英涛(2014)发现中国能源产业的市场化改革相对滞后的结论相一致。

### 4. 稳健性检验

基准结果中,由于生产函数包括资本、劳动和二氧化碳,使用总产值表征企业产出。进一步考察特定产出指标是否会影响测算结果,使用企业增加值刻画产出。表5第2行报告了使用增加值作

<sup>①</sup> 具体结果参见《中国工业经济》网站(<http://ciejournal.ajcass.org>)附件。

<sup>②</sup> 具体结果参见《中国工业经济》网站(<http://ciejournal.ajcass.org>)附件。

<sup>③</sup> 资本、劳动和二氧化碳造成的产出损失之和超过100%,是因为这里的比较标准是要素实现最优配置情形下的反事实产出。

表4 不同投入要素影子价格扭曲造成的产出损失

年份	资本	劳动	二氧化碳
2008	-0.6808 (0.0054)	-0.1573 (0.0038)	-0.4832 (0.0087)
2009	-0.5540 (0.0066)	-0.1174 (0.0029)	-0.5667 (0.0053)
2010	-0.5609 (0.0053)	-0.1262 (0.0026)	-0.5831 (0.0037)
2011	-0.4409 (0.0192)	-0.0874 (0.0083)	-0.4716 (0.0109)
2012	-0.4637 (0.0161)	-0.0950 (0.0048)	-0.4522 (0.0125)

注:括号内为基于100次随机抽样 Bootstrap 方法计算的标准误。下表同。

为产出测算的二氧化碳影子价格扭曲造成的产出损失。总体看,使用增加值的测算结果与基准结果较为接近,平均产出损失约为55%,其变化趋势依然呈倒U型。同时,基于 Bootstrap 方法计算的标准误差较小,常规统计显著性水平下测算结果较为精确。因此,不同的产出指标不会影响本文主要的测算结果。

在产品替代弹性参数的选择方面,现有研究发现不同的产品替代弹性会影响测算结果。其理论机制如下:假设初始状态时企业的生产率存在差异,但规模相同,生产要素在企业间存在错配。接着,考虑要素再配置的情形,将二氧化碳更多地配置给高生产率企业,其规模和产出随之增加。在垄断竞争市场,越大的产品替代弹性意味着由产出增加导致的价格变化越小。要素再配置则会进一步增加高生产率企业的规模,实现二氧化碳的最优配置。因此,较高的产品替代弹性意味着要素再配置能够实现更高的最优产出,这间接说明二氧化碳影子价格扭曲造成的产出损失也越大。具体看,首先考虑文献中常用的产品替代弹性上限值5。结果如表5第4行所示,与理论预期一致。相较于基准结果,各年份二氧化碳影子价格扭曲造成的产出损失明显增加,平均产出损失上升为58%,产出损失的变化趋势与基准结果保持一致。此外,考虑产品替代弹性的下限值。Broda and Weinstein(2006)测算了美国细分行业的进口产品替代弹性,最小值为1.77,将其取整作为产品替代弹性的下限( $\sigma = 2$ )。结果如表5第3行所示,二氧化碳影子价格扭曲造成的产出损失均值为40%,各年份的测算结果均小于基准结果和使用产品替代弹性上限值测算的结果,符合理论预期。同时,所有测算结果的标准误差较小,常规统计显著性水平下测算结果较为精确。

表5 稳健性检验结果

	2008	2009	2010	2011	2012
基准结果	-0.4832 (0.0087)	-0.5667 (0.0053)	-0.5831 (0.0037)	-0.4716 (0.0109)	-0.4522 (0.0125)
增加值	-0.5209 (0.0072)	-0.5958 (0.0045)	-0.6068 (0.0045)	-0.5080 (0.0098)	-0.4933 (0.0104)
产品替代弹性=2	-0.4243 (0.0065)	-0.4598 (0.0045)	-0.4616 (0.0036)	-0.3463 (0.0146)	-0.3225 (0.0159)
产品替代弹性=5	-0.4881 (0.0113)	-0.6543 (0.0060)	-0.6634 (0.0061)	-0.5587 (0.0096)	-0.5366 (0.0111)

此外,企业生产过程中可能并不是所有的煤炭和化石能源都作为燃料使用,特别是在化工行业,还有相当部分被企业作为原料使用。囿于数据限制,本文无法识别企业生产过程中煤炭和化石能源的具体用途。为了探讨上述问题对测算结果的影响,将化学制品制造业和化学纤维制造业等化工行业从样本中删除,重新测算结果。剔除化工行业后的测算结果表明,二氧化碳影子价格扭曲造成的产出损失约为49%,与基准结果较为接近。因此,考虑企业生产过程中煤炭和化石能源的不同使用用途对基准结果的影响可能较为有限。

最后,本文还考虑了直接碳排放和间接碳排放的测算方法以及不同的生产技术形式对测算结果的影响。<sup>①</sup>企业的电力消耗不直接产生碳排放,将直接碳排放和间接碳排放合计会产生重复计算问题。本文进一步使用不包含电力的碳排放进行稳健性检验。结果显示,二氧化碳影子价格扭曲导致总产出约损失37%,低于基准结果,符合预期。同时,使用柯布一道格拉斯生产技术的测算结果表明,二氧化碳影子价格扭曲导致总产出减少约57%,高于基准结果。这主要是由于,随着要素替代弹性增加,企业更容易使用其他要素替代扭曲程度更高的要素,要素市场扭曲造成的生产效率损失反而会下降。柯布一道格拉斯生产技术形式下,要素的替代弹性为1,而基准结果中估计的要素替代弹性大于1。柯布一道格拉斯生产技术形式下的估计结果可能存在高估。

## 六、二氧化碳价格的影响因素

测算模型分析表明,不同企业的二氧化碳影子价格差异是导致碳排放错配的主要原因。那么,哪些因素决定了企业间二氧化碳影子价格的差异?参考陈钊和陈乔伊(2019),本文设计如下实证模型进行分析:

$$\ln(1 + \tau_{Cs,i,t}) = \beta_0 + \beta_1 Asset_{s,i,t} + \beta_2 Age_{s,i,t} + \beta_3 Region_{s,i,t} + \beta_4 Ownership_{s,i,t} + \sum Industry + \sum year + \varepsilon_{s,i,t} \quad (14)$$

其中,*Asset*为企业资产总额,*Age*为企业年龄,*Region*为地区虚拟变量,按照地区经济发展水平划分为东部(*East*)、中部(*Middle*)、西部(*West*)和东北(*Northeast*),东部地区作为参照组。*Ownership*为企业所有制性质,包括国有企业(*SOE*)、外资企业(*FOE*)和私营企业(*POE*)。 $\sum Industry$ 和 $\sum year$ 分别表示四位码行业和年份固定效应。<sup>②</sup>

表6前三列报告了依次加入不同影响因素的回归结果。大部分影响因素的回归系数均在1%的水平上显著,说明测量误差对基准结果的影响较小。<sup>③</sup>此外,模型中测算的二氧化碳影子价格与单位二氧化碳的产出效率成正比,后文将二者等价。根据表6第(3)列的回归结果,企业资产的回归系数为0.0744,且在1%的水平上显著。这说明企业规模每增加1%,二氧化碳影子价格提高7.44%。单位二氧化碳的产出效率与企业规模呈正相关关系,用能效率存在明显的规模优势。因此,扭曲大规模企业的用能政策会造成产出损失。这与现有发现一致,Chen et al.(2021)发现中国对大型制造业企业的用能管制造成了较大的产出损失。矫正与规模相关的二氧化碳错配应尽可能地将能源要素向大规模企业配置。

① 具体结果参见《中国工业经济》网站(<http://ciejournal.ajcass.org>)附件。

② 企业区位和所有制性质会被企业固定效应吸收,本文仅控制了四位码行业固定效应。

③ 如果二氧化碳价格的测算结果包括大量的测量误差,那么大部分回归系数都应趋于零且不显著。而这与事实恰好相反。

表6 二氧化碳影子价格的影响因素分析

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Asset</i>	0.0784*** (0.0015)	0.0851*** (0.0015)	0.0744*** (0.0016)	0.0742*** (0.0016)
<i>Age</i>		-0.0109*** (0.0005)	-0.0097*** (0.0005)	-0.0097*** (0.0005)
<i>Middle</i>			-0.1187*** (0.0069)	-0.1160*** (0.0069)
<i>West</i>			-0.5130*** (0.0094)	-0.5084*** (0.0094)
<i>Northeast</i>			-0.4416*** (0.0095)	-0.4381*** (0.0095)
<i>FOE</i>			-0.0068 (0.0144)	-0.0038 (0.0144)
<i>POE</i>			0.0508*** (0.0124)	0.0508*** (0.0124)
行业	是	是	是	是
年份	是	是	是	是
行业×年份	否	否	否	是
观测值	723063	723063	723063	722987
R <sup>2</sup>	0.1208	0.1217	0.1310	0.1396

注：\*、\*\*和\*\*\*分别表示10%、5%和1%的显著性水平。括号内报告的是四位码行业层面聚类稳健的标准误。

企业年龄的回归系数显著为负,年龄增加1岁,二氧化碳影子价格降低1%。随着企业年龄增加,二氧化碳的使用效率逐渐降低。可能与两方面的原因有关:一方面,初创企业面临激烈的市场竞争环境,要素使用成本压力大,更有可能通过节约能耗提高使用效率。另一方面,初创企业更有可能使用新技术设备,其通常是能源节约型的。而对于年龄较大的成熟企业,更新设备面临较大的调整成本,这抑制了能源效率的提高(Yu et al., 2021)。

不同经济区域的发展阶段不同,二氧化碳影子价格存在较大差异。相比于东部地区,中部地区的二氧化碳影子价格低12%,东北地区低44%,西部地区则仅相当于其1/2的水平。因此,东部地区的二氧化碳产出效率是最高的,其次是中部、东北和西部地区。一方面,高碳能源主要分布在西部地区,然而其经济发展水平相对较差,容易形成“资源诅咒”。二氧化碳使用效率低的企业更有可能在西部选址,以获得较低的使用成本(潘雄锋等,2017)。另一方面,东部地区的能源市场较为成熟,要素市场的扭曲程度较低,生产技术也更前沿,这些因素均能提高二氧化碳的产出效率(林伯强和杜克锐,2013)。

不同所有制企业的二氧化碳成本存在差异。以国有企业为参照,私营企业的二氧化碳影子价格比国有企业高5%。通常,国有企业存在多重目标和预算软约束等问题,难以采用成本最小化的经营策略,而且更有可能获得低价格的能源要素以帮助其实现多重目标,这都导致国有企业的能源使用效率相对较差(陈钊和陈乔伊,2019)。外资企业与国有企业的二氧化碳影子价格不存在显著差异,这在一定程度上支持了外资选址的“污染天堂”假说。

最后,行业层面随时间变化的遗漏变量可能会影响回归结果。为了排除遗漏变量的影响,表6第(4)列控制了四位码行业与年份的交乘固定效应。结果在系数大小、符号和显著性水平上均与第(3)列保持一致。

## 七、结论与政策启示

如何实现经济增长和碳减排的动态平衡、推进中国式绿色现代化建设,是新时代中国经济高质量发展的核心议题。本文揭示了企业间碳排放配置效率与碳排放强度的理论关系,研究发现通过改善企业间碳排放配置效率,可以在不增加碳排放总量的前提下提高经济总产出,降低碳排放强度。具体来看,在标准的资源错配与产出损失测算框架下,纳入二氧化碳投入要素,考虑其与资本和劳动的替代弹性,模型化二氧化碳价格楔子和潜在最优产出的解析解。接着,使用2008—2012年中国税务调查数据,核算资本、劳动、二氧化碳和产出等关键变量,并对测算模型参数进行实证估计。然后,测算和比较分析各行业二氧化碳影子价格扭曲及其造成的产出损失程度。最后,实证探讨影响二氧化碳影子价格的基本因素。

本文的主要研究结论如下:①各行业内企业的二氧化碳影子价格存在明显差异,与二氧化碳相关的能源市场和规制政策存在扭曲。同时,重点能耗行业内二氧化碳影子价格的离散程度明显高于其他行业。②二氧化碳影子价格扭曲造成的产出损失约为51%,变化趋势呈倒U型。使用Bootstrap方法进行的统计推断表明基准结果的标准误差较小,在常规统计显著性水平下结果显著。此外,不同行业的产出损失和变化幅度存在较大差异。③与资本和劳动相比,二氧化碳影子价格扭曲造成的产出损失仅次于资本。上述结果在使用增加值和不同的替代弹性参数等稳健性测试后均成立。④企业规模、年龄、地区、所有制性质和行业属性对二氧化碳影子价格均存在显著影响。

基于上述结论,本文对落实新发展理念、构建全国统一能源市场、高质量实现“双碳”目标有重要的政策启示:①积极推进能源统一大市场建设,还原能源的商品属性,调整能源交易规则和定价机制,破除能源市场的区域分割和行业分割等问题,形成能源要素的高质量双循环流通。本文研究发现,矫正与二氧化碳相关的能源市场和规制政策扭曲,可以在不增加总量碳排放的前提下提高产出,降低碳排放强度,实现经济增长和“双碳”目标的动态平衡。政府部门应加强宏观调控,消除扭曲全国统一能源大市场和破坏能源市场化配置的阻碍和藩篱,逐步形成在不同地区不同行业间公平竞争的能源市场环境,建立起以市场形成价格为主的能源产品和服务价格定价机制。②建立全行业全口径清洁低碳能源生产和使用情况数据信息,加快推进重点能耗行业内企业做好碳资产管理和优化,尽快将其纳入全国碳排放权交易市场的覆盖范围。本文发现,二氧化碳影子价格扭曲及其造成的产出损失主要集中在重点能耗行业。尽快掌握其碳资产情况、将其纳入碳排放权交易市场,将有助于优化重点能耗行业的二氧化碳配置效率,减少其对总产出和碳排放强度造成的负面影响。政府部门可以通过采集全行业全口径清洁低碳能源生产和使用情况信息数据,对各行各业的能源资源使用情况进行全面监测和分析,实现全要素、全行业、全链条、全周期的碳排放管理和监控。这不仅有助于促进企业,尤其是重点能耗行业内的企业,提高碳排放管理的能力和意识,也有助于为相关能耗管制政策制定和实施评估提供现实依据。③在推进“双碳”目标的过程中,应为中小企业提供资金和技术支持,以及更加公平透明的碳排放权交易平台,降低其参与碳排放权交易市场的门槛。本文认为,与二氧化碳相关的减排政策应逐步聚焦如

何提高中小企业的碳排放效率,政府部门可以加强对中小企业减排的技术指导和培训,确保中小企业能够参与并受益于碳排放权交易市场。同时实施分类减排政策,针对不同类型企业和地区的特点,制定差异化的减排政策。具体来看,相比于低龄企业、东部地区企业、私营企业和非重点能耗行业内的企业,减排的着力点应聚焦于高龄企业、中西部地区企业、国有和外资企业以及重点能耗行业内的企业。对于这些类型的企业,政府部门应采取更有针对性的政策措施,鼓励和引导其实现更大幅度的减排目标。

值得注意的是,本文仅揭示了行业内企业间二氧化碳价格扭曲及其造成的产出损失,没有内生行业之间的要素配置,并进一步探讨行业之间的二氧化碳配置效率。同时,本文在资源错配与产出损失评估框架下用碳排放替换能源消费,尚未实质性拓展该分析框架。未来的研究可以进一步拓展本文的测算框架,引入行业投入产出网络、内生行业间碳排放需求。

#### 〔参考文献〕

- 〔1〕陈登科,陈诗一.资本劳动相对价格、替代弹性与劳动收入份额[J].世界经济,2018,(12):73-97.
- 〔2〕陈诗一.能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展[J].经济研究,2009,(4):41-55.
- 〔3〕陈诗一,陈登科.中国资源配置效率动态演化——纳入能源要素的新视角[J].中国社会科学,2017,(4):67-83.
- 〔4〕陈钊,陈乔伊.中国企业能源利用效率:异质性、影响因素及政策含义[J].中国工业经济,2019,(12):78-95.
- 〔5〕高培勇,毛捷.间接税税收优惠的规模、结构和效益:来自全国税收调查的经验证据[J].中国工业经济,2013,(12):143-155.
- 〔6〕郭朝先.中国二氧化碳排放增长因素分析——基于SDA分解技术[J].中国工业经济,2010,(12):47-56.
- 〔7〕韩超,张伟广,冯展斌.环境规制如何“去”资源错配——基于中国首次约束性污染控制的分析[J].中国工业经济,2017,(4):115-134.
- 〔8〕冷艳丽,杜思正.能源价格扭曲与雾霾污染——中国的经验证据[J].产业经济研究,2016,(1):71-79.
- 〔9〕李小平,卢现祥.国际贸易、污染产业转移和中国工业CO<sub>2</sub>排放[J].经济研究,2010,(1):15-26.
- 〔10〕林伯强,杜克锐.要素市场扭曲对能源效率的影响[J].经济研究,2013,(9):125-136.
- 〔11〕林伯强,邹楚沅.发展阶段变迁与中国环境政策选择[J].中国社会科学,2014,(5):81-95.
- 〔12〕吕振东,郭菊娥,席西民.中国能源CES生产函数的计量估算及选择[J].中国人口·资源与环境,2009,(4):156-160.
- 〔13〕潘雄锋,彭晓雪,李斌.市场扭曲、技术进步与能源效率:基于省际异质性的政策选择[J].世界经济,2017,(1):91-115.
- 〔14〕邵帅,张曦,赵兴荣.中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径——广义迪氏指数分解和动态情景分析[J].中国工业经济,2017,(3):44-63.
- 〔15〕史丹,李少林.排污权交易制度与能源利用效率——对地级及以上城市的测度与实证[J].中国工业经济,2020,(9):5-23.
- 〔16〕涂正革.中国的碳减排路径与战略选择——基于八大行业部门碳排放量的指数分解分析[J].中国社会科学,2012,(3):78-94.
- 〔17〕王芑,武英涛.能源产业市场扭曲与全要素生产率[J].经济研究,2014,(6):142-155.
- 〔18〕王群伟,周鹏,周德群.我国二氧化碳排放绩效的动态变化、区域差异及影响因素[J].中国工业经济,2010,(1):45-54.
- 〔19〕魏楚,郑新业.能源效率提升的新视角——基于市场分割的检验[J].中国社会科学,2017,(10):90-111.
- 〔20〕吴茵茵,齐杰,鲜琴,陈建东.中国碳市场的碳减排效应研究——基于市场机制与行政干预的协同作用视角[J].

- 中国工业经济, 2021, (8): 114-132.
- [21]尹恒, 李世刚. 资源配置效率改善的空间有多大? ——基于中国制造业的结构估计[J]. 管理世界, 2019, (12): 28-44.
- [22]余壮雄, 陈婕, 董洁妙. 通往低碳经济之路:产业规划的视角[J]. 经济研究, 2020, (5): 116-132.
- [23]张宁. 碳全要素生产率、低碳技术创新和节能减排效率追赶——来自中国火力发电企业的证据[J]. 经济研究, 2022, (2): 158-174.
- [24]张伟, 朱启贵, 李汉文. 能源使用、碳排放与我国全要素碳减排效率[J]. 经济研究, 2013, (10): 138-150.
- [25]中国式现代化研究课题组. 中国式现代化的理论认识、经济前景与战略任务[J]. 经济研究, 2022, (8): 26-39.
- [26]钟茂初, 李梦洁, 杜威剑. 环境规制能否倒逼产业结构调整——基于中国省际面板数据的实证检验[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, (8): 107-115.
- [27] Auffhammer, M., and Y. Gong. China's Carbon Emissions from Fossil Fuels and Market-based Opportunities for Control[J]. *Annual Review of Resource Economics*, 2015, 7(1): 11-34.
- [28] Broda, C., and D. E. Weinstein. Globalization and the Gains from Variety[J]. *Quarterly Journal of Economics*, 2006, 121(2): 541-585.
- [29] Chen, Q., Z. Chen, Z. Liu, J. C. Suárez Serrato, and D. Y. Xu. Industrial Energy Regulation: The Role of Business Conglomerates in China[J]. *AEA Papers and Proceedings*, 2021, 111: 396-400.
- [30] Färe, R., S. Grosskopf, C. K. Lovell, and S. Yaisawarng. Derivation of Shadow Prices for Undesirable Outputs: A Distance Function Approach[J]. *Review of Economics and Statistics*, 1993, 75(2): 374-380.
- [31] Grossman, G. M., and A. B. Krueger. Economic Growth and the Environment[J]. *Quarterly Journal of Economics*, 1995, 110(2): 353-377.
- [32] Hsieh, C. T., and P. J. Klenow. Misallocation and Manufacturing TFP in China and India[J]. *Quarterly Journal of Economics*, 2009, 124(4): 1403-1448.
- [33] Kmenta, J. On Estimation of the CES Production Function[J]. *International Economic Review*, 1967, 8(2): 180-189.
- [34] Lin, B., and Z. Jia. How Does Tax System on Energy Industries Affect Energy Demand, CO<sub>2</sub> Emissions, and Economy in China[J]. *Energy Economics*, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104496>, 2019.
- [35] Mohtadi, H. Environment, Growth, and Optimal Policy Design[J]. *Journal of Public Economics*, 1996, 63(1): 119-140.
- [36] Restuccia, D., and R. Rogerson. Policy Distortions and Aggregate Productivity with Heterogeneous Establishments[J]. *Review of Economic Dynamics*, 2008, 11(4): 707-720.
- [37] Rozenberg, J., A. Vogt-Schilb, and S. Hallegatte. Instrument Choice and Stranded Assets in the Transition to Clean Capital[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2018.10.005>, 2018.
- [38] Whited, T. M., and J. Zhao. The Misallocation of Finance[J]. *Journal of Finance*, 2021, 76(5): 2359-2407.
- [39] Yu, J., X. Shi, D. Guo, and L. Yang. Economic Policy Uncertainty (EPU) and Firm Carbon Emissions: Evidence Using a China Provincial EPU Index[J]. *Energy Economics*, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.105071>, 2020.
- [40] Yu, Y., and N. Zhang. Low-carbon City Pilot and Carbon Emission Efficiency: Quasi-experimental Evidence from China[J]. *Energy Economics*, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105125>, 2021.

## Carbon Emission Regulation, Allocation Efficiency and Output Benefits

YANG Hao<sup>1</sup>, PAN Ying-hao<sup>2</sup>, CAI Guo-wei<sup>3</sup>

(1. Business School, Sichuan University;

2. National Academy of Development and Strategy, Renmin University of China;

3. Lingnan College, Sun Yat-sen University)

**Abstract:** Striking a balance between economic growth and carbon emissions reduction remains a global challenge for developing countries. Consequently, under the dual impacts of deteriorating external development environment and domestic economic slowdown, coordinating economic growth and the “dual carbon” goals becomes a core issue for high-quality economic development in China.

This article finds that by improving the allocation efficiency of carbon emissions among enterprises, it is possible to increase total output and reduce carbon intensity without altering total carbon emissions. Specifically, within the framework of resource misallocation and output loss estimation, carbon dioxide is regarded as an input factor, and the substitution elasticity among different factors is considered. This allows for the quantification of carbon emissions shadow prices, the degree of carbon emissions misallocation, and their macroeconomic impacts on enterprises under distortions caused by energy market conditions and regulatory policies related to carbon emissions. Using data from the China Tax Survey of manufacturing enterprises for the period 2008—2012, this article finds that the distortion levels of carbon emissions shadow prices vary across different industries and generally follow an inverted U-shaped trend. Counterfactual analysis reveals that eliminating the distortion in carbon emissions shadow prices can lead to an increase of around 50% in total output. The distortions in carbon emission shadow prices are relatively severe among senior-aged firms, firms in the central and western regions, state-owned and foreign-funded firms, as well as firms in key energy-consuming industries. Statistical inference using a Bootstrap method supports the significance of the results at conventional levels of statistical significance and the findings are robust across different specifications.

The research findings indicate the following policy implications. Firstly, it is crucial to actively promote the construction of a unified energy market, restore the commodity attributes of energy, adjust energy trading rules and pricing mechanisms, and break down regional and sectoral segmentation in the energy market to establish a high-quality dual circulation of energy. Secondly, it is necessary to accelerate the implementation of carbon asset management and optimization for enterprises within key energy-consuming industries and promptly include them in the national carbon emissions trading market. Thirdly, support should be provided to small and medium-sized enterprises, offering them financial and technological assistance, as well as a more equitable and transparent platform for carbon emissions trading, thereby reducing their entry barriers to participate in the carbon emissions trading market. The research findings provide essential policy insights for applying the new development philosophy and achieving the “dual carbon” goals.

**Keywords:** carbon emissions; energy market; environmental regulation; resource misallocation

**JEL Classification:** D24 Q54 Q58

[责任编辑:李鹏]