

## “双碳”目标下中国电力市场的 无谓损失与价格机制<sup>\*</sup>

刘自敏 李兴

**摘要:**降低电力市场无谓损失是实现“双碳”目标的有效手段之一。本文在对中国城市层面电力市场无谓损失及其比率进行理论推导与实际测算的基础上,基于2006—2019年中国工业与居民用电量价与城市面板合并数据,使用份额移动(shift-share)法构建电力市场无谓损失的工具变量,量化研究了以无谓损失率为测度指标的电力市场无谓损失与碳排放之间的因果关系,并通过场景模拟对“双碳”目标下电力市场中工业与居民电价进行了优化设计。研究表明:(1)电力价格扭曲导致电力市场无谓损失增高,而随着电力市场化改革的启动,2019年电力市场无谓损失率相对2015年下降约34%;(2)电力市场无谓损失的上升会显著推动碳排放量的增加,并且在东部地区、非碳市场试点地区以及人口规模较大地区的作用强度更大;(3)场景模拟表明,为实现2030年“碳达峰”目标,电力市场中工业电价下降至0.64元/度的同时,居民电价至少需要上升至0.55元/度。本文从电力市场的视角出发,对“怎么‘立’”“如何‘破’”等碳达峰行动中的关键问题尝试进行了回答。

**关键词:**电力市场 碳排放 无谓损失 份额移动法 场景模拟

### 一、引言

党的二十大报告明确指出,要“积极稳妥推进碳达峰碳中和,立足我国能源资源禀赋,坚持先立后破,有计划分步骤实施碳达峰行动”。<sup>①</sup>中国不仅是煤炭为主要能源消耗的国家,还是处于工业化进程之中的发展中国家(张希良等,2021),经济增长、能源电力消费需求增长以及碳排放增长三者之间的关系依然十分密切(林伯强,2022)。在以往粗放的发展模式下,经济的快速增长伴随着二氧化碳的大量排放,并不利于绿色、协调以及可持续发展(Penn & Deutsch, 2022; Williams et al, 2022)。随着经济发展进入新时代、新常态,中国经济由高速增长向高质量发展的转变,以及2030年碳达峰和2060年碳中和目标(简称“双碳”目标)的提出,如何在维持社会经济正常发展的过程中实现碳减排、在碳达峰行动逐步实施的过程中“怎么‘立’”“如何‘破’”等也成为政策界、学术界所共同关注的重点问题。

降低电力行业碳排放是国际社会在推进碳减排进程中所普遍面临的重大挑战。<sup>②</sup>国际能源署

<sup>\*</sup> 刘自敏、李兴(通讯作者),西南大学经济管理学院,邮政编码:400715,电子邮箱:ziminliu@126.com, xingli277@126.com。基金项目:国家社会科学基金一般项目“碳达峰碳中和目标下的电碳关联市场设计与资源配置机制创新研究”(21BJL080)。感谢匿名审稿专家的宝贵意见,文责自负。

<sup>①</sup> 习近平:《高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告》,《人民日报》2022年10月26日。

<sup>②</sup> 如德国将拟定的“在2035年前实现电力生产温室气体零排放”提案修改为了“一旦完成煤炭的淘汰,实现电力供应中的温室气体中和,可再生能源的进一步扩大将由市场驱动”等内容,并将在国家层面实现碳中和的时间定在2045年。

发布的《全球能源回顾：2021 碳排放》报告指出，受经济增长、煤炭以及天然气价格变动等多方面因素的影响，全球发电厂的碳排放量达到了有史以来的最高水平。为了改变全球电力市场高碳排放的现状，2021 年 11 月，《格拉斯哥气候公约》增加了对煤电领域温室气体排放的关注，并强调使用市场化的手段实现碳减排。与其他国家相比，中国电力市场的碳排放问题更为严重：一方面，2020 年中国电力供应结构中，火电的发电量占有所有发电量的 68%。<sup>①</sup>特殊的资源禀赋以及经济发展过程中工业与居民部门对电力能源巨大的需求量，使得中国电力市场的碳排放量巨大。另一方面，中国电力市场中因价格扭曲所产生的巨大的交叉补贴导致了无谓损失，降低了电力市场运行效率，并加剧了碳排放（刘自敏等，2020）。为了使得工业与居民用电价格能够反映成本，降低电力市场交叉补贴与无谓损失，助力“双碳”目标的顺利完成，中国政府于 2015 年颁布《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》，正式启动了电力市场的市场化改革进程，并随后在各年的《政府工作报告》中强调了电力市场化改革的方向及重要性。2021 年，国家发展改革委发布了《关于“十四五”时期深化价格机制改革行动方案的通知》，提出要围绕“双碳”目标深化“十四五”时期重点领域价格机制改革，并针对电力市场强调了“持续深化电价改革”“不断完善绿色电价政策”的目标。生态环境部编制并印发的《2019—2020 年全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案（发电行业）》则进一步彰显了在电力行业实现碳减排的紧迫性、重要性。

为了研究中国电力市场价格扭曲所导致的无谓损失与碳排放之间的因果关系，并探讨通过电力价格机制的优化实现 2030 年碳达峰的可行性，本文以无谓损失率作为无谓损失的具体测度指标，首先通过理论模型推导以及现实数据搜集，计算了中国 100 个地级市电力市场无谓损失的平均变化趋势及区域差异。其次，本文将计算得到的电力市场无谓损失数据与城市层面宏观经济数据、卫星栅格碳排放数据进行匹配，通过份额移动法构造工具变量，实证研究了电力市场无谓损失与碳排放之间的因果关系。最后，本文通过场景模拟，对 2030 年“碳达峰”目标下工业与居民的用电价格进行了优化设计。研究发现，电力价格扭曲导致电力市场无谓损失增高，而随着电力市场化改革的启动，2019 年电力市场无谓损失率相对 2015 年下降约 34%。实证分析表明无谓损失的提高会显著推动碳排放量的上升，并且在东部地区、非碳市场试点地区以及人口规模较大地区的作用强度更大。场景模拟表明，为实现 2030 年“碳达峰”目标，电力市场中工业电价下降至 0.64 元/度的同时，居民电价至少需要上升至 0.55 元/度。

本文的边际贡献主要集中于以下三个方面：（1）受中国电力市场中用电成本信息的限制，现有文献难以对电力市场无谓损失进行准确评估。本文在理论模型推导的基础上，通过现实数据的搜集，系统测度了 2006—2019 年中国 100 个城市的电力市场无谓损失率，不仅完善了交叉补贴无谓损失评估的思路与框架体系，也为深入分析中国电力市场提供了新的研究证据。（2）现有文献更多从理论层面分析电力市场的碳排放情况，或根据既定碳目标对电力市场的碳排放进行预测，缺乏对电力市场无谓损失与碳排放之间因果关系的严谨、细致的实证研究。本文对中国电力市场无谓损失与碳排放之间的因果关系进行了深入而细致的实证研究，阐释了中国电力市场“怎么‘立’”的问题，不仅为中国电力市场的市场化改革提供了经验借鉴，也为电碳市场进一步关联以及电力市场碳减排奠定了研究基础。（3）在实证分析的基础上，本文根据中国 2030 年“碳达峰”目标，通过场景模拟，对工业与居民部门用电价格进行了优化设计，重点回答了中国电力市场在逐步实施碳达峰行动过程中“如何‘破’”的问题。本研究不仅有助于矫正错配的电力价格机制，为政府规制机构提供有益的理论支持和政策借鉴，同时也能够对其他能源与资源类产品的价格机制设计提供有益参考。

## 二、文献综述与理论逻辑

### （一）交叉补贴与无谓损失

交叉补贴本质上是一种价格扭曲，由交叉补贴所形成的价格与其实际的成本不相匹配，从而违

<sup>①</sup>数据来源于 2021 年《中国统计年鉴》。

背了市场竞争定价下的原则(Fjell,2001)。目前识别交叉补贴的方法主要包括价差法(Lin & Jiang, 2011)、国际比较法、拉姆齐方法(Baumol & Bradford,1970)以及下限估计法(Hahn & Metcalfe, 2021)。交叉补贴以及价格扭曲的现象在世界各地广泛存在(Chattopadhyay,2004),并且普遍分布在电信、邮政电力等社会公共领域(Heald,1997),本文所研究的主要是中国电力市场内部工业与居民电价之间的交叉补贴。

无谓损失则是市场由于偏离竞争均衡而处于非最优运行状态时所引起的社会成本,通常表现为社会福利的下降(李昊楠,2021),主要由税收、补贴等形式所导致的价格扭曲而形成(Harberger, 1962;徐现祥、王海港,2008;毛捷等,2015)。由于中国电力市场中电力价格的制定是以政府行政机制为主导的(刘希颖、林伯强,2013),并且政府部门在确定居民部门用电价格的过程中主要考虑了电力价格的历史水平、提升居民电价对社会稳定的影响以及居民对电力价格承受能力等因素(林伯强, 2004),因此,中国居民部门的用电价格低于供电成本,并通过设定更高的工业电价来弥补居民电力用户的差价,使得工业用电与居民用电的价格错位,并导致中国电力市场形成了用高工业电价补贴低居民电价的“交叉补贴”现象(杨娟、刘树杰,2017),总的来说,与竞争市场中居民电价是工业电价1.7 倍的水平相比(李兴等,2022),中国工业电价比平均水平高30%,而居民电价比平均水平低50%(杨娟、刘树杰,2017)。由价格扭曲导致的交叉补贴使得价格信号不能正确的反映成本,从而造成企业生产动力不足、资源配置效率下降甚至资源错配、电力市场运行效率下降、破坏公平负担原则、造成资源浪费等情况,最终导致电力市场无谓损失的加剧(唐要家、杨健,2014)。基于中国的现实,林伯强等(2009)分析了当前中国交叉补贴机制的效率,发现当前的交叉补贴机制是缺乏效率的。

### (二)电力系统转型与碳排放

中国电力市场的碳排放量已经超过全国总碳排放量的40%(Wang et al,2017;Lin et al,2019),电力市场的碳减排问题亟待解决。中国政府也相继出台了一系列政策措施,来缓解电力市场严重的碳排放问题。然而,与碳排放权交易市场政策(Cullen & Mansur,2017;邵帅、李兴,2022)、绿证政策(Schusser & Jaraité,2018;Feng et al,2018)等致力于减少电力市场碳排放的政策相比,如何减缓电力市场严重的交叉补贴与无谓损失,深化电力市场的市场化改革才是从根本上解决电力市场过度碳排放问题的关键所在(李兴等,2022)。

当前中国电力系统中居民用电部门的低电价既不效率也不公平(唐要家、杨健,2014),并且通过提高工业电价来补贴居民电价会产生一些与初始目标相反的结果,如给消费者传递错误的价格信号,促使过度且低效率的消费(Bhattacharyya,2019),以及增加碳排放量等。根据供求理论,能源价格如果无法正确反映供需关系,将导致资源配置失当。因此,能源的政府定价和交叉补贴,不仅降低了能源生产,同时还抑制了消费效率(林伯强,2018)。于立和王建林(2008)、Cui & Wei(2017)均指出中国煤、电行业的不平衡发展以及价格之间的冲突将在长期造成配置与生产低效。针对中国电力市场中存在的问题,中国政府于2002 年开始了第一轮电力体制改革,为后续电力体制改革的深化留下了宝贵的经验。然而,由于第一轮电力体制改革过程中,以市场化为导向的改革并不深入(于良春、张伟,2003;Wang & Chen,2012),从而导致了电力市场改革中运行效率提升、减少碳排放以及可持续发展等目标并未实现(刘希颖、林伯强,2013)。Ma(2011)基于对中国上网电价的重要改革历程的回顾,针对建立更有效的电力定价机制给出了相关的政策建议。随着2015 年第二轮电力市场化改革的实施,中国电力市场中严重的价格扭曲得以缓解,电力价格也逐渐能够反映出供电成本,资源配置逐渐合理(Zhao & Hu,2020),并使得电力市场效率在短期内得到较大改善(Cicala,2022),最终使得中国电力市场的碳排放量得到了有效抑制。Zhuo et al(2022)利用电力系统规划模型全面评估了中国电力系统的转型成本,发现碳中和目标下电力系统的转型成本将增加19 万亿元,占GDP 的6.2%。

### (三)中国电力市场无谓损失与碳排放

以煤炭为主的资源禀赋(林伯强、吴微,2018;Cui et al,2021)、快速增长的用电需求(谢伦裕等, 2021)以及较高的碳排放系数(夏德建等,2010;姜春海等,2017)促使中国电力市场碳排放量巨大,而

中国电力市场中的无谓损失则进一步加剧了碳排放(唐要家、杨健,2014)。刘自敏等(2022)测算了中国电力行业潜在的节能减排贡献,发现中国电力市场长期存在的交叉补贴与无谓损失使得工业部门与居民部门的用电效率均非有效,而对工业与居民用电价格的调整能够对碳排放产生较大的影响,通过计算后发现,电力行业最多可以贡献 10.58% 的碳减排比例。

中国电力市场无谓损失与碳排放量之间的关系可以从微观以及宏观两个层面进行分析。从微观层面来讲,中国电力市场无谓损失影响碳排放的本质仍然是工业与居民电力价格的扭曲。对于电力市场中的工业部门来说,一方面由于经济增长以及企业营利的需要,高工业电价并没有有效抑制工业部门的用电需求;另一方面,畸高的工业电价不仅挤出了工业企业研发投入等,使得工业企业缺乏技术创新的动力,还抑制了清洁能源、可再生能源等对煤炭的替代(林伯强,2018)。在经济增长与煤炭资源的使用、碳排放并未完全脱钩的情况下,巨大的增长需求使得工业部门产生了大量的碳排放。对于电力市场中的居民部门来说,由于电能是最主要的能源消费品种,政府指导下的居民电价仅仅是为了提供更为普遍的电力服务,既没有考虑到价格激励对消费者的促进作用(林伯强,2018),也没有将节能减排纳入电力价格的制定中来。中国电力市场中较低的居民电价使得居民家庭中电力消费的迅速增长,从而导致家庭年碳排放量剧增(陈晶、张真,2015)。总体来说,中国电力市场中工业电价与居民电价的错位共同导致了大量的碳排放,而电力市场中对电力消费需求量的增加,也对这种无谓损失形成的碳排放附加了“乘数效应”。因此,对于电力行业无谓损失造成的碳排放需要在一个统一的框架下综合考虑工业与居民用电量、价关系,仅考虑其中某个单独因素可能会导致适得其反的结果,如单纯降低工商业电价可能导致工商业用电数量增加,进而导致电力行业碳排放的增加,最终形成“降电价”与“碳减排”的两难困境(刘自敏等,2020)。

从宏观层面来讲,价格扭曲导致的无谓损失的增加,降低了资源配置的效率,错误的价格信号甚至会造成资源错配,从而导致电力市场运行效率的下降,并导致严重的碳排放。针对中国电力市场因价格扭曲、无谓损失所导致的严重的碳排放情况,唐松林和任玉珑(2008)提出要将环境保护纳入统一的监管框架中来,认为中国电力市场中电价的制定不仅要反映电力的生产成本,还要基于“污染者付费”的原则,将电力生产以及使用所造成的环境成本以及碳排放成本体现在电价之中。刘自敏等(2017)认为将中国的碳市场与电力市场进行关联耦合,可以促进电力行业运行效率的提高,推动电力行业的低碳发展。李兴等(2022)进一步研究了电、碳市场耦合过程中碳成本对电力价格的影响,发现碳成本对居民电价较高的传导率,能够在一定程度上缓解工业与居民之间的交叉补贴及无谓损失,并从直接和间接两个层面实现中国电力市场碳排放的减少。图 1 展示了中国电力市场无谓损失与碳排放之间的逻辑关系。

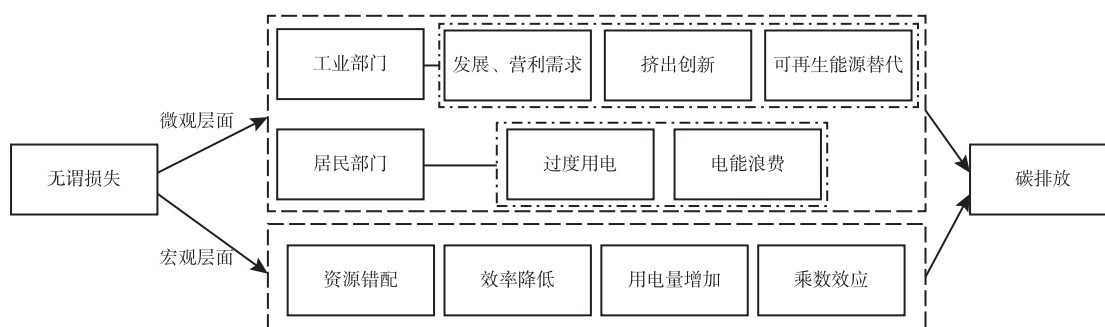


图 1 中国电力市场无谓损失与碳排放间的逻辑关系

### 三、实证设计

#### (一) 电力市场无谓损失模型推导

本文通过图 2 对中国电力市场中居民部门与工业部门用电量、价情况进行了简化分析,并进

一步对无谓损失进行推导。其中,左侧表示居民部门( $h$ )用电的量、价情况,右侧表示工业部门( $i$ )用电的量、价情况。纵坐标表示电价  $P$ ,横坐标表示电量  $Q$ ,向右下方倾斜的线段分别表示居民与工业用电的需求曲线  $D_h$ 、 $D_i$ 。 $P_h'$ 和  $P_i'$ 分别表示居民与工业的用电成本,通常情况下  $P_h' > P_i'$ (李兴等, 2022); $P_h$ 和  $P_i$ 分别表示居民与工业的实际用电价格,可以发现,中国电力市场中政府定价的方式使得居民部门的用电价格远低于成本,而工业部门的用电价格高于成本,相当于通过工业部门的高电价来弥补居民部门低电价所造成的损失。中国电力市场中居民与工业的用电价格错位,造成了严重的交叉补贴,并引致了无谓损失。

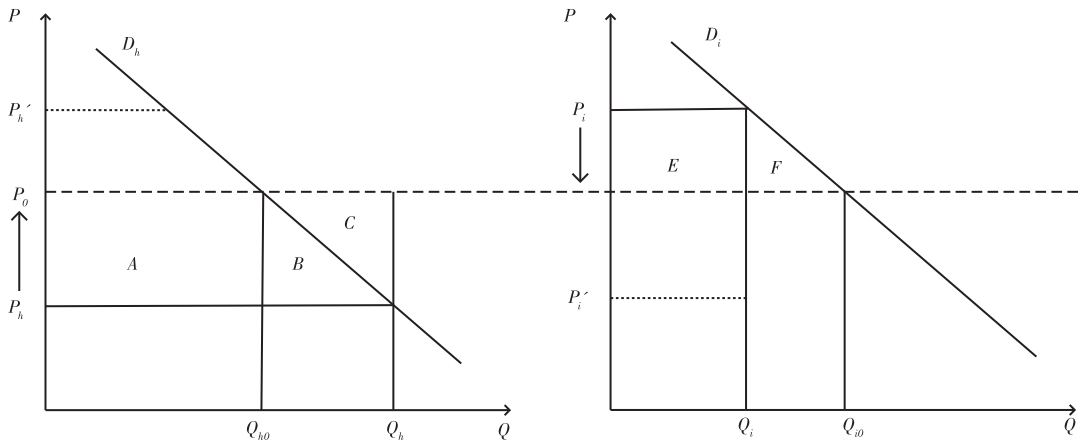


图2 居民与工业用电交叉补贴的无谓损失量

需要强调的是,文献通常使用无谓损失的绝对量,即无谓损失额来研究无谓损失。然而,考虑到使用无谓损失额衡量的无谓损失容易受到经济体量等因素的影响,从而难以在不同单元(如不同国家、不同省份)间进行直接比较,因此,为便于在时间序列、不同地域间的直接比较,本文在无谓损失额的基础上,进一步推导了无量纲的无谓损失率(deadweight loss rate,  $DWLR$ ),并以无谓损失率作为具体的测度指标,来更加细致的分析中国电力市场无谓损失的特征及其与碳排放之间的关系:

$$DWLR = - \left[ \frac{\epsilon_h \cdot \frac{(P_0 - P_h)^2}{P_h} \cdot Q_0 + \epsilon_{hi} \cdot \frac{(P_i - P_0)^2}{P_i} \cdot Q_0 + \epsilon_i \cdot \frac{(P_i - P_0)^2}{P_i} \cdot Q + \epsilon_{ih} \cdot \frac{(P_0 - P_h)^2}{P_h} \cdot Q}{(P_0 - P_h) \cdot Q_0 + (P_i - P_0) \cdot Q} \right] \quad (1)$$

其中, $DWLR$ 表示电力市场无谓损失率。 $P$ 、 $Q$ 分别表示电价以及电量。下标  $h$ 、 $i$ 分别表示居民部门以及工业部门, $\epsilon_h$ 、 $\epsilon_i$ 分别表示居民与工业部门的自价格弹性, $\epsilon_{hi}$ 、 $\epsilon_{ih}$ 表示居民与工业部门之间的交叉价格弹性。<sup>①</sup>

### (二) 计量模型构建

本文通过如下形式的计量模型考察了电力市场无谓损失对碳排放的影响:

$$Carbon_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 DWLR_{it} + \alpha_2 Control_{it} + \alpha_3 \delta_i + \alpha_4 \gamma_t + \alpha_5 \varphi_{it} + \epsilon_{it} \quad (2)$$

其中,下标  $i$ 表示城市,下标  $t$ 表示年份。 $Carbon_{it}$ 表示城市  $i$ 在第  $t$ 年的碳排放水平, $DWLR_{it}$ 表示城市  $i$ 中的电力市场在第  $t$ 年的无谓损失率, $Control_{it}$ 表示一系列城市层面的控制变量,包括人均地区生产总值、面积等宏观经济变量,气温、湿度等天气变量,以及工业企业数、第二产业产值占比等产业变量。当然,为进一步控制城市层面宏观因素等的干扰,本文还在公式(2)中加入了城市固定效应  $\delta_i$ ,年份固定效应  $\gamma_t$ ,城市固定效应与年份固定效应的交互项  $\varphi_{it}$ 。 $\epsilon_{it}$ 表示随机误差项。

<sup>①</sup>理论模型推导以及价格弹性计算的主体部分请参见刘自敏等(2020)。

### (三) 指标与数据

1. 碳排放(Carbon)。本文所使用到的碳排放量数据来源于全球环境研究中心(Center for Global Environmental Research, CGER)<sup>①</sup>提供的卫星栅格数据。本文将卫星栅格数据在城市层面以及年度层面上进行加总后取对数,并与中国城市层面的经济数据进行合并,最终得到 2006—2019 年中国 100 个城市总计 1400 个样本值。

2. 电力市场无谓损失(DWLR)。由于与电力相关的成本信息非常匮乏,因此文献无法对中国电力市场的无谓损失或运行效率进行准确度量。通过模型(1),本文最终得到了样本期间中国 100 个城市的电力市场无谓损失率。需要说明的是,本文在使用工业与居民用电量价数据进行电力市场无谓损失率测算的过程中,所用到的工业与居民用电量数据来自历年《中国统计年鉴》,而工业与居民用电价格数据来源于国家发展改革委员会价格监测中心授权的信息发布平台——中国价格信息网,由监测中心在全国各省、自治区、直辖市选取 100 个城市作为采价城市,并在采价城市中通过采价点分月度监测普通工业与居民用电的价格。<sup>②</sup> 总体上,这些城市分布较为均衡,每个省、自治区、直辖市(西藏除外)均包含 2~3 个城市,且一直作为固定观测点,形成了珍贵且具有很强代表性电价面板数据,数据期为 2006—2019 年,是当前我国在城市层面上最为权威和完整的电价数据库。

3. 控制变量。本文借鉴冯永晟(2014)、Bhattacharyya & Ganguly(2017)等国内外能源消费与价格研究中的变量选择,对产业、天气以及宏观经济等三个方面的控制变量进行了控制。其中,产业变量包括第二产业从业人员占比(Sec\_Employee)、第二产业产值占比(Sec\_Output)、工业企业数(Enterprises)、工业总产值(Output)、工业用水量(Water)、工业煤气用量(Gas)、工业石油气用量(Petroleum)。天气变量主要包含平均气温(Temperature)以及平均湿度(Humidity)。宏观经济层面的控制变量包括城市面积(Area),根据城市的行政区域面积进行赋值;人均地区生产总值(Per\_GDP),用各个城市的地区生产总值除以总人口表示。其中,产业变量与宏观经济变量均来源于历年《中国城市统计年鉴》,天气数据来源于中国气象数据网。对于部分缺失数据,本文使用插值法补齐。本文主要变量的描述性统计见表 1。

表 1 描述性统计

变量符号	定义	单位	观测值	平均值	标准差	最小值	最大值
Carbon	碳排放	百万吨	928	12.5127	12.0633	0.9300	76.3425
DWLR	无谓损失率		928	0.2209	0.2653	0.0132	0.5999
Sec_Employee	第二产业从业人员占比	%	928	46.900	13.018	9.4100	84.400
Sec_Output	第二产业产值占比	%	928	49.294	10.020	18.570	85.640
Enterprises	工业企业数	个	928	1969.0	2467.8	19	18792
Output	工业总产值	亿元	928	4664.3	5881.8	20.176	32445
Water	工业用水量	万吨	928	20062	30503	281	256236
Gas	工业煤气用量	亿立方米	928	5.2901	17.179	0	195.99
Petroleum	工业石油气用量	万吨	928	3.1877	7.6097	0	75.300
Temperature	平均气温	摄氏度	928	14.672	4.8322	4.2	25.4
Humidity	平均湿度	%	928	65.247	10.008	41	85
Area	城市面积	平方公里	928	16032	20223	845	193974
Per_GDP	人均地区生产总值	万元/人	928	42686	34595	1.7486	15.2391

## 四、实证结果分析

### (一) 电力市场无谓损失变化趋势

图 3 展示了计算得到的样本期间中国电力市场无谓损失率的平均变化趋势。其中,横坐标表示年份,纵坐标表示无谓损失,水平虚线表示样本期间平均的电力市场无谓损失。可以看出,中国电力

<sup>①</sup>网址: <https://www.cger.nies.go.jp/en/>。

<sup>②</sup>我们将月度层面的工业与居民电价数据分别进行了年度层面的平均。

市场无谓损失呈现出“先升后降”的变化趋势。2006—2010年间,随着工业与居民部门对于电量消费需求增加,中国电力市场无谓损失加剧,并且2010—2014年间围绕在高位波动。随着2015年中国电力市场化改革的正式启动,各项改革措施使得电力价格越来越能够反映用电成本信息,中国电力市场无谓损失持续下降。2016年首次下降至平均水平以下,2019年电力市场无谓损失率相对2015年下降约34%。进一步地,为了考察样本期间中国电力市场因价格扭曲而造成的无谓损失的程度,本文以居民部门为例,将样本中每度电所造成的平均无谓损失额与总的用电量相乘,再除以总的GDP,即可得到总无谓损失额占GDP的比重。通过对样本的估算发现,平均来说,样本期间中国电力市场因价格扭曲而造成的无谓损失额大约占GDP的0.57%。



图3 样本期间电力市场无谓损失变化

图4在图3的基础上,进一步对比分析了东部地区、中部地区以及西部地区电力市场的无谓损失及其变化趋势。横、纵坐标分别表示年份和无谓损失率。总体来说,在样本初期(2006—2008年),东部地区电力市场无谓损失占全国电力市场总无谓损失的比重最高,2006年占比40%,中部地区无谓损失相对较小。然而,与东部地区较为平稳的电力市场无谓损失变化趋势相比,西部地区电力市场无谓损失增长迅速,从2009年开始超过东部地区,成为电力市场无谓损失最严重的区域,并且在样本末期(2017—2019年)无谓损失不降反升,2018年西部地区电力市场无谓损失占全国总无谓损失的比重超过50%。

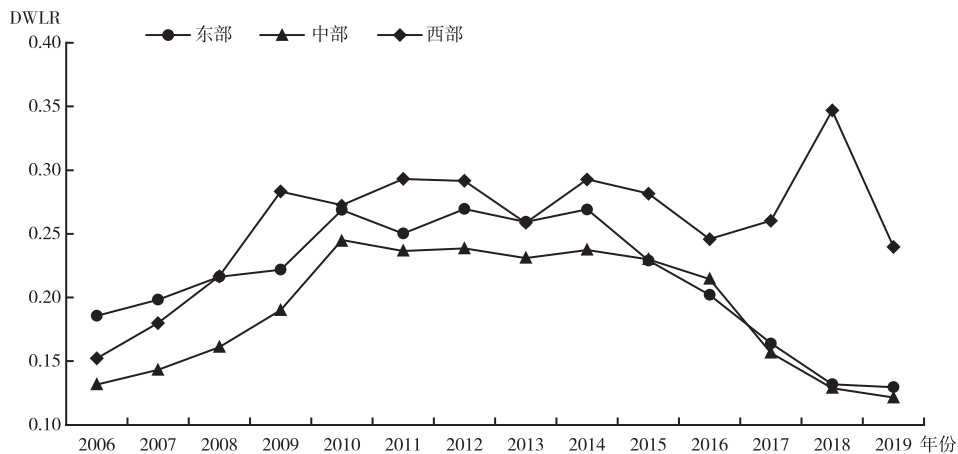


图4 东部、中部、西部地区电力市场无谓损失

## (二) 基准回归结果分析

表2汇报了使用公式(2)估计的电力市场无谓损失对碳排放的影响效应。其中,第(1)列仅控制了城

市固定效应与年份固定效应；第(2)列在第(1)列的基础上进一步控制了产业变量与天气变量；第(3)列在第(2)列的基础上增加了对宏观经济变量的控制；第(4)列同时控制产业变量、天气变量、宏观经济变量、城市固定效应、年份固定效应以及城市与年份固定效应的交互项。从表2报告的结果可以看出，无谓损失的增长对二氧化碳排放的影响效应显著为正，也就是说，中国电力市场无谓损失的增加会促进二氧化碳排放量的增长。

需要强调的是，虽然本文增加了与产业、天气、宏观经济相关的控制变量，控制了城市固定效应、年份固定效应以及二者的交乘项，并将稳健标准误聚类到城市层面，能够极大缓解因遗漏变量所带来的内生性问题，同时能够在一定程度上克服因反向因果所带来的内生性问题。但是，利用公式(2)估计电力市场无谓损失影响碳排放的过程仍然会受到反向因果这一内生性问题的干扰，并最终导致表2第(4)列低估了电力市场无谓损失对碳排放的影响效应。

表2 基准回归结果

变量	Carbon			
	(1)	(2)	(3)	(4)
DWLR	0.0006*** (0.0001)	0.1272*** (0.0239)	0.0830*** (0.0269)	0.0783*** (0.0215)
Sec_Employee		-0.0094 (0.0596)	-0.0485 (0.0549)	0.0198 (0.0636)
Sec_Output		0.0072*** (0.0020)	0.0047** (0.0020)	0.0084*** (0.0018)
Enterprises		-0.0041 (0.0233)	-0.0009 (0.0211)	0.0147 (0.0151)
Output		0.0001* (0.0000)	0.0001 (0.0001)	0.0001** (0.0000)
Water		0.0001 (0.0001)	0.0001 (0.0001)	0.0001 (0.0001)
Gas		-0.0084 (0.0051)	-0.0078 (0.0048)	-0.0045 (0.0051)
Petroleum		-0.0006 (0.0014)	-0.0010 (0.0013)	-0.0004 (0.0010)
Temperature		-0.0017*** (0.0006)	-0.0014*** (0.0005)	-0.0023*** (0.0007)
Humidity		-0.0032*** (0.0010)	-0.0029*** (0.0010)	-0.0031*** (0.0011)
Area			0.0001** (0.0000)	0.0001* (0.0000)
Per_GDP			0.0138*** (0.0013)	0.0089*** (0.0011)
城市固定效应	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制
城市×年份固定效应	未控制	未控制	未控制	控制
常数项	0.1388*** (0.0001)	-0.8652*** (0.0620)	-0.9538*** (0.0603)	-1.8377*** (0.0712)
调整后的 R <sup>2</sup>	0.9949	0.9912	0.9925	0.9961
观测值	928	928	928	928

注：括号内为城市层面的聚类稳健标准误；\*\*\*、\*\*、\*表示在1%、5%、10%的水平上显著。下同。

### (三)内生性问题的处理

由于本文控制了多个方面的控制变量以及固定效应，因此本文在利用公式(2)估计电力市场无



谓损失对碳排放影响的过程中,能够很大程度上缓解因遗漏变量所造成的内生性问题。然而,基准回归结果的估计仍然存在很大的内生性问题,这种内生性问题主要由反向因果导致。具体来说,电力市场无谓损失主要受工业与居民用电量数据的影响。同时,根据“价差法”的计算思想,在现行工业与居民用电价格不变的情况下,工业与居民的用电量越多,所引致的交叉补贴及无谓损失也就越大。随着“双碳”政策目标的设定,致力于减少碳排放的政府政策可能会通过影响工业与居民用电量进而影响电力市场无谓损失。如中国政府从2013年开始在7个地区启动了碳市场试点政策,碳市场试点政策对控排企业碳排放量的控制,可能会影响到控排企业的生产模式,进而影响到控排企业的用电量及电力市场的无谓损失;又比如中国政府为实现低碳经济而实施的低碳试点城市政策,该政策的政策目标之一是使市民“以低碳生活为理念和行为特征”,如节约用电,从而影响了电力市场中居民部门的用电量及其引致的电力市场无谓损失。总体来说,城市碳排放量增加可能会导致电力市场无谓损失的上升,使得公式(2)存在一定的由反向因果造成的内生性问题,所以表2中所呈现的基准回归结果具有一定局限性,需要进一步剔除内生性问题,得到更加准确、无偏的估计结果。

为了克服因反向因果造成的内生性问题,本文采用份额移动法方法构造电力市场无谓损失的工具变量并进行估计:

$$DWLR\_IV_{it} = DWLR_{it_0} \cdot \left( 1 + \frac{\sum_{i=1}^k (DWLR_{it} - DWLR_{it_0})}{\sum_{i=1}^k DWLR_{it_0}} \right) \quad (3)$$

其中,下标*i*表示城市,下标*t*表示年份;*t*<sub>0</sub>表示样本初始年份,*k*表示样本中城市的数量。*DWLR*<sub>*IV*</sub>是本文利用份额移动方法构造的工具变量,即各个城市*i*在初始年份*t*<sub>0</sub>的无谓损失占全国无谓损失

的比重(*DWLR*<sub>*it*<sub>0</sub></sub>)与历年全国电力市场总体的无谓损失增长率  $\left[ 1 + \frac{\sum_{i=1}^k (DWLR_{it} - DWLR_{it_0})}{\sum_{i=1}^k DWLR_{it_0}} \right]$  交乘

得到。从相关性的角度来说,本文所构建的工具变量是基于城市自身电力市场初始的无谓损失占全国总无谓损失的比重计算而来,而与历年全国层面电力市场无谓损失的增长率交乘,可以看作是对城市*i*在第*t*年电力市场无谓损失的估算,因此,本文构造的工具变量与内生变量具有非常强的相关性。从排他性的角度来讲,本文使用的历年全国层面电力市场无谓损失的增长率,反映了电力市场无谓损失在国家层面上的变动情况,受具体城市*i*的特征影响非常小,甚至是不受影响的。因此,本文对于工具变量的构造也满足排他性要求,即工具变量仅通过内生变量这一渠道影响被解释变量。

表3 工具变量估计结果

变量	Carbon		
	(1)	(2)	(3)
<i>DWLR</i> <sub><i>IV</i></sub>	0.0113** (0.0046)	0.7854** (0.3798)	0.4994*** (0.1913)
控制变量	未控制	控制	控制
城市固定效应	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制
城市×年份固定效应	未控制	未控制	控制
常数项	0.0139*** (0.0001)	0.0138*** (0.0001)	0.0136*** (0.0001)
观测值	928	928	928
KP-LM	12.2300	23.0240	20.2510

续表 3

	Carbon		
	(1)	(2)	(3)
KP-F	1611.6381	924.7842	1763.1366
AR	6.1022	4.5783	7.1283
P 值	0.0135	0.0324	0.0076

注：控制变量包括基准回归中的产业变量、天气变量以及宏观经济变量。表中报告了工具变量的识别不足 KP-LM (Kleibergen-Paap rk LM statistic)、弱识别 KP-F (Kleibergen-Paap rk Wald F statistic) 以及弱稳健性推断 AR (Anderson-Rubin Wald test) 的统计量, 检验结果表明工具变量是有效的。下同。

表 3 汇报了使用份额移动法工具变量进行系数估计后的结果。其中, 第(1)列仅控制了城市固定效应与年份固定效应, 第(2)列在第(1)列的基础上加入了产业、天气以及宏观经济层面的控制变量, 第(3)列进一步控制了城市固定效应与年份固定效应的交乘项。从表 3 报告的结果可以看出, 总体来说, 与基准回归结果相比, 使用工具变量法估计的电力市场无谓损失对碳排放的影响效应无论在估计系数的数值上还是在显著性水平上均有所提高表明电力市场无谓损失的增加能够推动二氧化碳排放量的上升。

可能的解释是, 中国电力市场无谓损失增加的本质是工业与居民电力价格扭曲程度的加剧, 由工业与居民用电量价等因素共同导致。分部门的视角来看, 由于经济发展以及盈利的需要, 工业部门过高的电力价格并未对工业用电量起到有效的抑制作用, 而较低的居民电价并不能为居民电力用户树立节约用电、低碳生活的导向, 居民电力用户过度用电、浪费电量的情况严重, 从而加剧了碳排放。更重要的是, 随着经济社会的快速发展, 无论工业部门还是居民部门对于电力的需求量大幅提升, 从而对电力市场中工业与居民电价的扭曲形成了“乘数效应”, 加剧了因价格扭曲而导致的无谓损失, 并进一步造成碳排放量的增加。从电力市场整体视角来看, 价格扭曲导致的无谓损失的增加, 降低了资源配置的效率, 错误的价格信号甚至会造成资源错配, 从而导致电力市场运行效率下降, 并导致严重的碳排放。

#### (四) 稳健性检验

1. 排除政府政策干扰。首先, 如前文所述, 考虑到在“高质量发展”“双碳”等政策目标导向下, 政府部门会通过产业政策或者环境治理政策的实施, 以控制当地的碳排放量。这些低碳政策的实施会降低当地的碳排放量, 从而对本文中电力市场无谓损失影响碳排放的结果造成低估。为了排除政府低碳政策对本文估计结果所造成的偏误, 本文在表 4 第(1)列中剔除了样本中的低碳城市试点地区, 以剔除针对居民等部门碳排放的低碳城市政策的影响。从表 4 第(1)列报告的结果可以看出, 总体来说, 在剔除政府低碳政策的影响后, 本文所估计的电力市场无谓损失影响碳排放的系数有所增加, 但是二者之间的因果关系并没有改变, 即电力市场无谓损失的增加会导致二氧化碳排放的增加。

其次, 考虑到由于特殊的资源禀赋条件, 中国在长期发展过程中形成了以煤炭为主的能源消费结构(林伯强, 2022), 并且煤炭的大量燃烧不仅会排放出大量的温室气体, 还伴随着细颗粒物、二氧化硫等空气污染物的排放, 二氧化碳与空气污染物具有同根同源性以及造成污染的同步性。因此, 随着“美丽中国”“生态文明建设”等政策目标的确定, 致力于减少空气污染、改善生态环境的环境治理政策(如大气十条等)可能会在一定程度上同步减少碳排放, 从而使得本文电力市场无谓损失对碳排放的影响被低估。为了排除政府环境规制对本文估计结果造成的偏误, 更加准确的估计电力市场无谓损失对碳排放的影响效应, 本文剔除了空气污染最严重、环境规制实施最严格的“2+26”城市。从表 4 第(2)列汇报的结果可以看出, 在排除环境规制的影响之后, 电力市场无谓损失仍然能够在 5% 的水平上显著推动碳排放量的增加。

最后, 本文也排除了四个直辖市以及所有的省会城市。考虑到省会城市是一个省份的政治中心, 集中了大量的政治资源, 并且一般情况下代表了一个省的整体形象。所以在诸如低碳政策等各

表4 稳健性检验(排除政府政策的干扰)

变量	排除低碳试点城市	排除“2+26”重污染区域	排除省会城市
	(1)	(2)	(3)
DWLR_IV	0.6312*** (0.1984)	0.4988** (0.2541)	0.5266** (0.2107)
控制变量	控制	控制	控制
城市固定效应	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制
城市×年份固定效应	控制	控制	控制
常数项	0.0144*** (0.0002)	0.0136*** (0.0001)	0.0137*** (0.0001)
观测值	554	820	576
KP-LM	20.1900	15.7970	21.0020
KP-F	1646.6468	1840.5031	1696.0083
AR	10.5923	3.9837	6.5552
P值	0.0011	0.0459	0.0105

种政策实施的过程中,部分地方政府无论出于做好领头羊的目的或是对政策效果的保障,都会集中利用更多资源,优先保障政策在省会城市的顺利实施,以及政策效果在省会城市率先实现。因此,鉴于部分省会城市的碳减排政策可能会得到政府部门的更大力度的支持,而这种行为同样会对本文的研究结论造成低估。本文在表4第(3)列中剔除了省会城市和直辖市,以排除部门政府或官员行为对本文研究结论的影响。可以看出,电力市场无谓损失仍然能够显著推动碳排放量的增加。以上的结果表明,在排除多种政府政策或行为的干扰后,本文基准回归的结果依然是稳健的,即电力市场无谓损失的提高会导致二氧化碳排放的增加。

2. 替换被解释变量。考虑到由于不同统计口径、不同计算路径等得到的城市一年度层面的碳排放具有较强的主观性,从而导致碳排放数据具有较大的异质性,为了进一步验证本文基准回归结果中电力市场无谓损失与碳排放之间因果关系的稳健性,本文将因变量替换为Chen et al(2020)利用卫星数据测算的碳排放量。从表5第(1)列报告的结果可以看出,在将因变量替换为不同来源的碳排放数据之后,电力市场无谓损失仍然能够显著推动碳排放量的增加,说明基准回归的结果是稳健的。

表5 稳健性检验(替换碳排放变量)

变量	碳排放量	碳排放强度	人均碳排放	细颗粒物
	(1)	(2)	(3)	(4)
DWLR_IV	0.2467*** (0.0588)	0.1244*** (0.0338)	0.0519** (0.0229)	0.0320 (0.0958)
控制变量	控制	控制	控制	控制
城市固定效应	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制
城市×年份固定效应	控制	控制	控制	控制
常数项	-0.0301*** (0.0024)	0.0010*** (0.0001)	0.0010*** (0.0001)	0.0004*** (0.0001)
观测值	928	928	928	928
KP-LM	20.2510	20.2510	20.2510	20.2510
KP-F	1708.0975	1766.8052	1766.8052	1766.8052
AR	19.1089	13.7007	5.2969	0.1116
P值	0.0001	0.0002	0.0214	0.7383

另外,本文还在表 5 第(2)(3)列中分别将碳排放量替换为碳排放强度以及人均碳排放,以进一步剔除经济增长以及人口对碳排放影响。考虑到二氧化碳等温室气体与空气污染物的同根、同源以及同步性,本文还在第(4)列中将碳排放变量替换为空气中细颗粒物浓度数据,以间接反映电力市场无谓损失与碳排放之间的关系。总体来说,无论将碳排放变量替换为何种形式,电力市场无谓损失仍然能够显著推动碳排放量的增加,说明了本文基准回归结果是非常稳健的。

3. 替换模型。为了证明本文中对于工具变量的设置是合理的,本文在表 6 第(1)列中增加了电力市场初始无谓损失与年份固定效应的交乘项,以对份额移动法工具变量识别假设进行证伪检验(Tabellini,2020)。具体来说,一方面,城市  $i$  中电力市场初始的无谓损失决定了该城市的电力市场无谓损失的大小,另一方面,初始无谓损失高的城市,可能存在一些不可观测的因素,如电力市场政策、运行效率等,这些不可观测的因素可能存在影响碳排放的独立路径,此时基准回归结果可能很大程度上由这些混杂因素导致。因此,本文在表 6 第(1)列中增加了电力市场初始无谓损失与年份固定效应的交乘项,以控制电力市场初始无谓损失及其他不可观测因素对碳排放的影响。可以发现,在增加电力市场初始无谓损失与年份固定效应的交乘项后,电力市场无谓损失仍然能够显著推动碳排放量的增加,证明了基准回归结果的稳健性。

为了控制城市所在省份层面的宏观因素的干扰,本文在表 6 第(2)列中加入了省份固定效应与年份固定效应的交乘项,结果显示电力市场无谓损失仍然能够推动碳排放量的增加。为了进一步消除反向因果带来的内生性问题,本文在表 6 第(3)列中对电力市场无谓损失进行了滞后一期的处理,发现基准回归结果依然是稳健的。

表 6 稳健性检验(替换模型)

变量	初始无谓损失× 年份固定效应	省份×年份固定效应	滞后期	双重差分
	(1)	(2)	(3)	(4)
DWLR	0.4994*** (0.1913)	0.4888 (0.3098)	0.3015** (0.1358)	-0.1071*** (0.0096)
EFF×年份固定效应	控制			
省份×年份固定效应		控制		
控制变量	控制	控制	控制	控制
城市固定效应	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制
城市×年份固定效应	控制	控制	控制	控制
常数项	0.0136*** (0.0001)	0.0135*** (0.0001)	0.5026** (0.1983)	-132.1595*** (21.2673)
观测值	928	928	928	851
KP-LM	20.2510	43.9130	20.2510	
KP-F	1766.8052	1280.2164	1766.8056	
AR	7.1283	2.5581	5.1232	
P 值	0.0076	0.1097	0.0236	

考虑到中共中央、国务院在 2015 年联合发布《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》,标志着中国电力市场新一轮市场化改革正式启动<sup>①</sup>。电力市场的市场化改革极大提高了中国电力市场的运行效率,降低了无谓损失。鉴于此,本文以 2015 年电力市场的市场化改革的实施为准自然实验,借助 Qian(2008)的思路,以 2015 年前后电力市场化改革政策实施与否作为一重差分,以工业电

<sup>①</sup>中国对电力市场的市场化改革起始于 2002 年颁布的《电力体制改革方案》,但是政策效果并没有达到市场化改革的预期。

价是否高于平均值作为另一重差分,并使用双重差分模型检验了电力市场化改革对应的无谓损失与碳排放之间的关系。从表6第(4)列报告的结果可以看出,估计系数显著为负。这是因为电力市场的市场化改革对应了电力市场无谓损失的下降,同时电力市场的市场化改革也抑制了碳排放,从而证明了基准回归结果仍然是稳健的。

### 五、异质性分析

通过前文的理论分析以及实证检验可知,在样本期间内,中国电力市场无谓损失的增加会推动碳排放量的增加。在此基础上,本文进一步对影响的异质性进行探讨,并从区域异质性、是否属于碳市场试点地区以及人口规模异质性三个方面进行对比分析。

#### (一)区域异质性

中国东部、中部和西部地区无论在经济发展水平、基础设施建设还是工业化程度上均具有较大的异质性。如东部地区经济水平相对较为发达,基础设施建设较为完善,同时工业化程度较高,中部地区次之,而西部地区相对较为落后。在此特征事实上,本文探讨了在东部、中部和西部地区不同城市中电力市场无谓损失对碳排放影响的异质性,回归结果见表7。回归结果表明,总体来说,无论在哪个区域,电力市场无谓损失都能够显著推动碳排放量的增加。而通过对比分析可知,与中部、西部地区相比,东部地区电力市场无谓损失对碳排放的作用强度在估计系数以及显著性上更高。事实上,东部地区发达的经济水平以及较高的工业化程度,意味着对煤炭等化石能源以及电能的大量消耗,工业与居民的用电量处于相对较高的位置。样本期间内经济增长与碳排放尚未完全脱钩,同时电力市场的市场化改革进程刚刚起步。在工业电价与居民电价与用电成本尚有一定差距的情况下,用电量的提升加剧了东部地区电力市场的无谓损失,而东部地区电力市场无谓损失的增加也进一步导致了碳排放的增加,最终导致东部地区电力市场无谓损失对碳排放具有更高的作用强度。

表7 异质性分析(区域差异)

变量	东部地区	中部地区	西部地区
	(1)	(2)	(3)
DWLR_IV	0.9262*** (0.3317)	0.3963** (0.1723)	0.4224** (0.1988)
控制变量	控制	控制	控制
城市固定效应	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制
城市×年份固定效应	控制	控制	控制
常数项	0.0138*** (0.0002)	0.0141*** (0.0004)	0.0149*** (0.0003)
观测值	320	235	373
KP-LM	5.3320	38.7000	16.1810
KP-F	559.6084	1237.4678	1930.4938
AR	8.9744	5.1933	4.5037
P值	0.0027	0.0227	0.0338

#### (二)是否属于碳市场试点地区

本文还将样本按照是否属于碳市场试点地区进行划分,并对比分析了碳市场试点地区与非碳市场试点地区中电力市场无谓损失对碳排放的影响效应,表8报告了估计结果。可以看出,与碳市场试点地区相比,非碳市场试点地区中电力市场的无谓损失能够更加显著的推动碳排放量的增加。可能的原因是,在碳市场试点地区中,政府部门对于控排企业碳排放的规制,相当于增加了控排企业生产过程中的环境成本,也可以视为将电价附加了碳成本(李兴等,2022)。附加碳成本的电力价格,一方面可以使得电力价格更加接近用电的总成本,从而减少交叉补贴,降低电力市场的无谓损失;另一

方面,附加碳成本的电力价格也能够降低电力用户过度用电、浪费用电的行为,从而在降低电力市场无谓损失的同时,减少电力市场相关的碳排放。

表 8 异质性分析(是否属于碳市场试点地区)

变量	非碳市场试点地区		碳市场试点地区	
	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>DWLR_IV</i>	0.0136*** (0.0050)	0.4979*** (0.1866)	-1.4770 (3.0968)	4.0613 (2.7727)
控制变量	未控制	控制	未控制	控制
城市固定效应	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制
城市×年份固定效应	控制	控制	控制	控制
常数项	0.0137*** (0.0001)	0.0137*** (0.0001)	0.0177*** (0.0001)	0.0171*** (0.0004)
观测值	928	807	165	121
KP-LM	1.9780	20.0970	20.7600	21.7200
KP-F	2219.4100	1722.5310	18.7197	593.5101
AR	7.2751	7.4322	0.2469	2.1306
P 值	0.0070	0.0064	0.6193	0.1444

### (三)人口规模异质性

最后,本文按照人口规模的中位数将样本城市划分为人口规模大的样本以及人口规模小的样本,并对比分析二者之间电力市场无谓损失对碳排放影响的差异。从表 9 报告的结果来看,人口规模大的样本中电力市场无谓损失对碳排放的影响更加显著,而在人口规模小的样本中,电力市场无谓损失对碳排放的影响并不显著。可能的解释为,人口规模大的城市对于电能及最终产品的需求量较大,而工业部门为了满足居民部门对最终产品的需求,会进行更多的生产活动,从而同样需要消耗大量的电力能源。因此,人口规模较大城市中对于电力能源的大量消耗以及电能运输等成本的增加,使得电力市场无谓损失对碳排放具有更大的边际效应。

表 9 异质性分析(人口规模差异)

变量	大规模城市		小规模城市	
	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>DWLR_IV</i>	0.0124** (0.0048)	0.5291** (0.2224)	0.2398 (0.2900)	4.0613 (2.7727)
控制变量	未控制	控制	未控制	控制
城市固定效应	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制
城市×年份固定效应	控制	控制	控制	控制
常数项	0.0137*** (0.0001)	0.0136*** (0.0001)	0.0177*** (0.0001)	0.0171*** (0.0004)
观测值	470	470	458	458
KP-LM	2.0240	15.6790	12.2320	5.4710
KP-F	1963.7823	1846.5144	18.1371	593.5101
AR	6.5933	5.7770	0.7332	2.1306
P 值	0.0102	0.0162	0.3918	0.1444

## 六、“双碳”目标下电价体系的优化设计

上文的实证分析细致地刻画了电力市场无谓损失与碳排放之间的因果关系,对“怎么‘立’”的问题进行了描述与阐释。本部分在上文实证研究的基础上,通过场景模拟分析,重点回答了为达到2030年碳达峰目标,中国电力市场该“如何‘破’”的问题。

中国经济向高质量发展的转型,对能源提出了较高的要求:一是需要保障能源的供给,确保能源安全;二是能源的使用要低碳、清洁和环保,确保能源的绿色化;三是能源的价格要合理,能够支撑经济社会的正常发展与运行。然而,能源不可能三角(郑新业,2016)理论认为,在短期内,中国能够同时兼顾三者的可能性较低。因此,在能源不可能三角理论下,需要通过价格的调整来进行平衡。对于电力市场来说,对工业与居民用电价格的调整迫在眉睫。一方面,政府或外界对居民电价的补贴,以及工业电价对居民电价的交叉补贴更多给了用电量尤其是过度用电以及浪费电量的富裕家庭,而贫穷家庭由于用电量较小,因而所享受到的补贴也少,所以目前的电力价格机制违背了公平原则。另一方面,电力价格扭曲所导致的资源错配、无谓损失以及碳排放等,也违背了效率原则。

本部分在上文的基础上,对2030年“碳达峰”目标下中国电力市场中工业以及居民的电力价格进行优化设计,以实现在既定碳减排目标和电力市场改革目标下生成更有效的电力价格形成机制。在预测2030年“碳达峰”目标下碳排放总量方面,Song et al(2018)使用一个综合投入产出模拟模型,对不同情境下中国的碳排放量进行了模拟,发现模拟得到的2030年碳排放量在105亿吨至140亿吨之间;邵帅等(2022)基于蒙特卡洛模拟对碳排放的潜在演变趋势进行了动态情景分析,发现在政策导向情景以及技术突破情景下,中国2030年碳排放量在105.456亿吨至119.737亿吨之间。本文采用投入产出方法的分析思路,并综合以上文献的方法与结论,设定中国2030年碳排放总量的范围在105亿吨至130亿吨之间。另一方面,我们有理由相信,随着2030年“碳达峰”即将到来之际,中国以煤炭为主的能源消耗情况、电力市场中发电企业的发电装备与发电效率、工业与居民部门对于用电的需求等在短期内不会发生本质变化。因此,本文结合研究得到的电力市场无谓损失与碳排放之间的关系,通过设置不同的分析场景,对既定碳排放目标下中国电力市场中工业与居民电价进行了优化设计,如表10所示。

表10 “碳达峰”目标下工业与居民电价优化设计(元/度)

场景	105亿吨		130亿吨		能否实现
	工业	居民	工业	居民	
基准场景	0.75	0.53	0.75	0.53	不能实现
单独调整场景A	0.75	0.79	0.75	0.74	较难实现
单独调整场景B	0.58	0.53	0.62	0.53	较难实现
协同调整场景A	0.68	0.61	0.68	0.57	可以实现
协同调整场景B	0.64	0.57	0.64	0.55	可以实现

其中,“基准场景”即维持现行的电价水平。“单独调整场景”即仅调整工业或居民电价其中的一方,而维持另一方的价格不变(场景A表示维持工业电价不变而调整居民电价;场景B表示维持居民电价不变而调整工业电价)。“协同调整场景”即共同调整工业电价与居民电价(场景A表示工业电价下降10%时居民电价如何调整;场景B表示工业电价下降14.5%时居民电价如何调整)<sup>①</sup>。

从表10报告的结果可以看出,在基准场景中,现行的工业与居民用电价格并不能帮助实现2030

<sup>①</sup>对于工业电价下降幅度的设定主要参考了2019年和2020年的《政府工作报告》。其中,2019年《政府工作报告》要求降低工商业电价平均水平的10%;2020年《政府工作报告》要求继续降低工商业电价水平的5%。

年“碳达峰”政策目标下的碳排放量。在“单独调整场景 A”中,在保持工业电价不变的情况下,105 亿吨的碳排放目标需要居民电价达到 0.79 元/度,涨价幅度接近 50%,居民电价超过了工业用电价格;而在 130 亿吨的碳排放目标下,居民电价也需要涨价至 0.74 元/度,涨幅约 40%。同理,在“单独调整场景 B”中,在保持居民电价不变的情况下,工业电价的降幅在 105 亿吨、130 亿吨碳排放目标下分别为 21.33%、17.33%。总的来说,“单独调整场景”中,无论调整工业电价还是居民电价,所需要的调整幅度都相对较大,较难实现 2030 年的碳排放目标。对于工业部门来说,工业电价下降空间有限,单独降低工业电价的改革乏力(李兴等,2022);对于居民部门来说,居民电价涨幅过高容易引致较大的社会阻力(林伯强,2010)。因此,电力市场改革并不能单一的降低工业电价或提高居民电价,而是要将工业电价与居民电价的调整相结合。

在“协同调整场景”中,在其他条件不变、工业电价下降 10%以及 2030 年预期排放 105 亿吨二氧化碳的情况下,居民电价为 0.61 元/度,与基准场景相比涨幅约为 15%;而在 130 亿吨二氧化碳的排放预期下,居民电价为 0.57 元/度,涨幅为 7.5%。同理,在其他条件不变、工业电价下降 14.5%的情况下,2030 年预期排放 105 亿吨、130 亿吨二氧化碳情况下居民电价涨幅分别为 9.43%、3.77%。总体来说,“协同调整场景”下的价格调整策略既能够实现中国电力市场无谓损失的降低,助力中国“双碳”目标的实现,并且对于工业与居民部门来说也是可行的、易于被接受的。

## 七、结论与启示

“先立后破”是党的二十大对于有计划分步骤实施碳达峰行动的战略导向,而优化中国电力市场中的价格机制,在维持能源安全、经济增长的同时助力“双碳”目标的实现,也是中国经济高质量发展,以及高效实现“双碳”目标所需要重点关注的命题。本文在理论模型推导以及描述中国电力市场无谓损失现状的基础上,使用份额移动法工具变量,研究了电力市场无谓损失与碳排放之间的因果关系。进一步,本文通过场景模拟分析,对既定碳排放目标下电力市场中工业与居民电价进行了优化设计。研究表明,电力价格扭曲导致电力市场无谓损失增高,而随着电力市场化改革的启动,2019 年电力市场无谓损失率相对 2015 年下降约 34%。实证分析表明,电力市场无谓损失的增加能够显著推动碳排放量的上升,并且在东部地区、非碳市场试点地区以及人口规模较大地区的作用更加显著。通过场景模拟,本文发现为实现 2030 年“碳达峰”的碳排放目标,电力市场中工业电价下降至 0.64 元/度的同时,居民电价至少需要上升至 0.55 元/度。基于以上的研究结论,本文得到如下的政策启示。

第一,切实推进电力市场的市场化改革,还原电力商品属性。降低中国电力市场无谓损失,提高电力市场运行效率,需要对电力价格的生成机制进行改革,切实提高电力价格对用电成本的反映。本文通过理论模型推导以及描述性分析发现,工业部门用电价格与居民部门用电价格的扭曲,使得电力市场中的价格机制无法体现成本信息,并且导致了严重的交叉补贴与无谓损失,降低了电力市场的运行效率,而 2015 年电力市场化改革进程的启动,降低了中国电力市场因价格扭曲而导致的无谓损失。因此,需要充分认识电力市场化改革对中国电力市场的引领与支撑作用,全面理解价格形成机制的理论基础与现实意义,在现有的定价机制上逐步引入市场化机制,形成政府主导与市场机制有机结合的价格形成机制,减少电力市场无谓损失,提高电力市场运行效率。

第二,重点关注电力市场无谓损失与碳排放之间的关系,助力“双碳”目标的顺利实现。立足新时代,在经济高质量发展的过程中高效实现碳减排目标,离不开电力市场中价格对成本的体现以及交叉补贴、无谓损失的降低。本文的实证结果表明,中国电力市场无谓损失的增加显著推动了碳排放量的增加。中国电力市场的碳排放量巨大,而电力市场中工业电价与居民电价错位所导致的无谓损失也为碳排放附加了“乘数效应”。因此,政府对于“双碳”目标的实现不应只关注于政府部门的碳减排政策以及碳市场等市场机制,还要关注到电力市场中电力价格错位及其所引致的无谓损失对碳排放的影响。通过逐步将工业与居民用电价格回归成本信息降低无谓损失,提高电力市场效率,助



力中国“双碳”目标的顺利实现。另外,政府部门还可以通过颁布相关的政策文件以及配套措施等,使得全国碳市场能够在电力行业更好的实施,从而促进中国电力市场与碳市场更好地融合,加快“双碳”目标的实现。

第三,因地制宜的降低电力市场无谓损失与碳排放,防止政策“一刀切”。由于不同地区在经济发达程度、人口规模、发展模式、资源禀赋等方面存在明显的差异,因此各个地区电力价格错位所形成的无谓损失的严重程度、形成机制,以及无谓损失对碳排放的影响程度也各不相同。本文通过异质性分析发现,东部地区、非碳市场试点地区以及人口规模较大地区的电力市场无谓损失对碳排放具有更加显著的作用强度。一方面,地方政府要因地制宜,通过相关政府政策的制定,最大程度上减小东部地区、非碳市场试点地区以及人口规模较大地区电力市场无谓损失,从而更加高效地实现碳减排。另一方面,中央政府也要更加关注中西部地区、碳市场试点地区以及人口规模较小地区的无谓损失以及碳减排。中央政府与相关地方政府应制定合理的政策,逐步减少电力市场无谓损失及其所引致的碳排放。

第四,协同调整工业与居民电力价格。目前中国电力市场的市场化改革主要依靠降低工业电价。然而,单纯降低工业电价一方面会引致工业用电量的增加,并最终导致电力市场碳排放的增加,从而形成“降电价”与“碳减排”的两难困境(刘自敏等,2020);另一方面,电力市场中工业电价下降空间已经逐渐缩减,并且后续改革乏力。本文通过场景模拟分析发现,在既定碳减排以及电力市场无谓损失目标下,无论单纯降低工业电价还是单纯提高居民电价在现实改革中都不具有可行性。既定碳减排目标下最优无谓损失的实现需要工业电价与居民电价的协同调整。因此,政府部门在现行降低工业电价的情况下,需要通过多种形式加入对居民电价的调整,如峰谷分时电价、递增阶梯电价等方式。

囿于数据,本文基于2006—2019年中国城市层面的经济社会与工业、居民用电量价合并数据,研究了电力市场无谓损失与碳排放之间的因果关系,并在有限信息下对2030年碳达峰目标下工业与居民用电价格进行了优化设计。需要说明的是,本文在既定碳排放目标下对中国电力市场中工业与居民用电价格的优化设计仅为估计值,在估计的过程中并没有考虑电力市场中清洁能源对煤炭资源的替代,以及电力用户用电需求的增长等情况。后续的研究将致力于更加细致的电力市场数据的搜集,并对中国电力市场无谓损失及其对碳排放的影响效应进行更加精确的计算。

#### 参考文献:

- 陈晶 张真,2015:《居民生活用电特征与影响机理》,《统计研究》第5期。
- 冯永晟,2014:《非线性定价组合与电力需求——基于中国居民微观数据的实证研究》,《中国工业经济》第2期。
- 姜春海 宋志永 冯泽,2017:《雾霾治理及其经济社会效应:基于“禁煤区”政策的可计算一般均衡分析》,《中国工业经济》第9期。
- 李昊楠,2021:《减税效率的提升路径——来自结构性减税时期小微企业应税收入弹性的证据》,《管理世界》第11期。
- 李兴 刘自敏 杨丹 王道平,2022:《电力市场效率评估与碳市场价格设计——基于电碳市场关联视角下的传导率估计》,《中国工业经济》第1期。
- 林伯强,2004:《电力短缺、短期措施与长期战略》,《经济研究》第3期。
- 林伯强,2018:《能源革命促进中国清洁低碳发展的“攻关期”和“窗口期”》,《中国工业经济》第6期。
- 林伯强 吴微,2018:《中国现阶段经济发展中的煤炭需求》,《中国社会科学》第2期。
- 林伯强,2022:《碳中和进程中的中国经济高质量增长》,《经济研究》第1期。
- 林伯强,2010:《低碳经济转型的电力发展战略调整》,《中国电力企业管理》第1期。
- 林伯强 刘畅,2016:《中国能源补贴改革与有效能源补贴》,《中国社会科学》第10期。
- 林伯强 蒋竺均 林静,2009:《有目标的电价补贴有助于能源公平和效率》,《金融研究》第11期。
- 刘希颖 林伯强,2013:《改革能源定价机制以保障可持续发展——以煤电联动政策为例》,《金融研究》第4期。
- 刘自敏 杨丹 冯永晟,2017:《递增阶梯定价政策评价与优化设计——基于充分统计量方法》,《经济研究》第3期。
- 刘自敏 朱朋虎 杨丹 冯永晟,2020:《交叉补贴、工业电力降费与碳价格机制设计》,《经济学(季刊)》第2期。
- 刘自敏 邓明艳 朱朋虎 崔志伟,2022:《个人碳交易机制可以改善家庭能源贫困吗?——兼论我国个人碳交易市场的

- 核心参数设计》，《统计研究》第3期。
- 毛捷 吕冰洋 马光荣，2015：《转移支付与政府扩张：基于“价格效应”的研究》，《管理世界》第7期。
- 邵帅 范美婷 黄辉，2022：《中国城市化进程与碳排放达峰路径：1995~2035》，《中国经济学》第1期。
- 邵帅 李兴，2022：《市场导向型低碳政策能否推动经济高质量发展？——来自碳排放权交易试点的证据》，《广东社会科学》第2期。
- 唐要家 杨健，2014：《销售电价隐性补贴及改革的经济影响研究》，《中国工业经济》第12期。
- 唐松林 任玉珑，2008：《协调监管：电力监管体制与理论创新》，《管理世界》第7期。
- 夏德建 任玉珑 史乐峰，2010：《中国煤电能源链的生命周期碳排放系数计量》，《统计研究》第8期。
- 谢伦裕 王宇澄 晋晶，2021：《晋升激励、竞争驱动与产能扩张：来自中国电改的证据》，《世界经济》第8期。
- 徐现祥 王海港，2008：《我国初次分配中的两极分化及成因》，《经济研究》第2期。
- 杨娟 刘树杰，2017：《我国输配电价格改革研究》，《经济纵横》第9期。
- 于立 王建林，2008：《纵向价格双轨制：“电荒”的经济分析与出路》，《中国工业经济》第10期。
- 于良春 张伟，2003：《强自然垄断定价理论与中国电价规制制度分析》，《经济研究》第9期。
- 张希良 张达 余润心，2021：《中国特色全国碳市场设计理论与实践》，《管理世界》第8期。
- 郑新业，2016：《突破“不可能三角”：中国能源革命的缘起、目标与实现路径》，科学出版社。
- Baumol, W. J. & D. F. Bradford (1970), “Optimal departures from marginal cost pricing”, *American Economic Review* 60(3):265–283.
- Bhattacharyya, S. C. (2019), *Energy Economics: Concepts, Issues, Markets and Governance*, Springer Nature.
- Bhattacharyya, R. & A. Ganguly (2017), “Cross subsidy removal in electricity pricing in India”, *Energy Policy* 100:181–190.
- Chattopadhyay, P. (2004), “Cross-subsidy in electricity tariffs: Evidence from India”, *Energy Policy* 32(5):673–684.
- Chen, J. et al (2020), “County-level CO<sub>2</sub> emissions and sequestration in China during 1997–2017”, *Scientific Data* 7(1):1–12.
- Cicala, S. (2022), “Imperfect markets versus imperfect regulation in US electricity generation”, *American Economic Review* 112(2):409–441.
- Cui, H. & P. Wei (2017), “Analysis of thermal coal pricing and the coal price distortion in China from the perspective of market forces”, *Energy Policy* 106:148–154.
- Cui, R. Y. et al (2021), “A plant-by-plant strategy for high-ambition coal power phaseout in China”, *Nature Communications* 12(1):1–10.
- Cullen, J. A. & E. T. Mansur (2017), “Inferring carbon abatement costs in electricity markets: A revealed preference approach using the shale revolution”, *American Economic Journal: Economic Policy* 9(3):106–133.
- Feng, T. et al (2018), “What will happen to the power supply structure and CO<sub>2</sub> emissions reduction when TGC meets CET in the electricity market in China?”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 92:121–132.
- Fjell, K. (2001), “A cross-subsidy classification framework”, *Journal of Public Policy* 21(3):265–282.
- Hahn, R. W. & R. D. Metcalfe (2021), “Efficiency and equity impacts of energy subsidies”, *American Economic Review* 111(5):1658–1688.
- Harberger, A. C. (1962), “The incidence of the corporation income tax”, *Journal of Political Economy* 70(3):215–240.
- Heald, D. A. (1997), “Public policy towards cross subsidy”, *Annals of Public and Cooperative Economics* 68(4):591–623.
- Lin, B. & Z. Jiang (2011), “Estimates of energy subsidies in China and impact of energy subsidy reform”, *Energy Economics* 33(2):273–283.
- Lin, J. et al (2019), “Economic and carbon emission impacts of electricity market transition in China: A case study of Guangdong Province”, *Applied Energy* 238:1093–1107.
- Ma, J. (2011), “On-grid electricity tariffs in China: Development, reform and prospects”, *Energy Policy* 39(5):2633–2645.
- Penn, J. L. & C. Deutsch (2022), “Avoiding ocean mass extinction from climate warming”, *Science* 376(6592):524–526.
- Qian, N. (2008), “Missing women and the price of tea in China: The effect of sex-specific earnings on sex imbalance”, *Quarterly Journal of Economics* 123(3):1251–1285.

- Schusser, S. & J. Jaraité(2018), “Explaining the interplay of three markets: Green certificates, carbon emissions and electricity”, *Energy Economics* 71:1–13.
- Song, J. et al(2018), “Exploring potential pathways towards fossil energy-related GHG emission peak prior to 2030 for China: An integrated input-output simulation model”, *Journal of Cleaner Production* 178:688–702.
- Tabellini, M. (2020), “Gifts of the immigrants, woes of the natives: Lessons from the Age of Mass Migration”, *Review of Economic Studies* 87(1):454–486.
- Wang, Q. & X. Chen(2012), “China’s electricity market-oriented reform: From an absolute to a relative monopoly”, *Energy Policy* 51:143–148.
- Wang, Q. et al(2017), “Comparative decoupling analysis of energy-related carbon emission from electric output of electricity sector in Shandong Province, China”, *Energy* 127:78–88.
- Williams, A. P. et al(2022), “Rapid intensification of the emerging southwestern North American megadrought in 2020–2021”, *Nature Climate Change* 12(3):232–234.
- Zhao, X. & S. Hu(2020), “Does market-based electricity price affect China’s energy efficiency?”, *Energy Economics* 91:1–11.
- Zhuo, Z. et al(2022), “Cost increase in the electricity supply to achieve carbon neutrality in China”, *Nature Communications* 13(1):1–13.

### The Deadweight Loss and Price Mechanism of China’s Power Market under the “Dual-Carbon” Target

LIU Zimin LI Xing

(Southwest University, Chongqing, China)

**Abstract:** Reducing the deadweight loss of the power market is one of the effective means for the Chinese government to achieve the “dual carbon” goal. On the basis of theoretical derivation and actual measurement of the deadweight loss of China’s power market, based on the combined data of China’s industrial and residential power prices and city panels from 2006 to 2019, this paper uses the shift-share method to construct the instrumental variable for the deadweight loss rate of the power market, and studies the causal relationship between the deadweight loss of the power market and carbon emissions. Through scenario simulations, the industrial and residential power prices in the power market under the “dual carbon” target are optimized. The results show that: (1) The distortion of power prices leads to the increase of the deadweight loss in the power market. With the start of the power market reform, the deadweight loss rate in the power market in 2019 decreased by about 34% compared with that in 2015; (2) The increase of the deadweight loss in the power market significantly promoted the increase of carbon emissions, and played a greater role in the eastern region, non-carbon market pilot areas and populous areas; (3) The scenario simulation shows that, in order to achieve the goal of “carbon peaking” in 2030, the industrial power price in the power market needs to be reduced to 0.64 yuan/kWh, while the residential power price needs to be increased to at least 0.55 yuan/kWh. This paper attempts to answer the key questions in the carbon peaking action such as “how to establish” and “how to break” from the perspective of the power market.

**Keywords:** Power Market; Carbon Emissions; Deadweight Loss; Shift-Share IV; Scenario Simulation

(责任编辑:刘洪愧)

(校对:何伟)