

## 交叉补贴、工业电力降费与碳价格机制设计

刘自敏 朱朋虎 杨 丹 冯永晟\*

**摘 要** 理顺电价和碳价之间的关系,是协调推进电力体制改革和建设全国统一碳市场的关键问题。本文利用 2006—2015 年中国 100 个城市的电力消费价量数据,分析了电价结构中交叉补贴引致的无谓损失,在此基础上对碳价格机制进行了设计。研究发现:(1)现阶段电力降费和碳排放目标存在一定的冲突;(2)工业与居民电价需要共同调整以减少交叉补贴;(3)碳价与电价具有联动效应;(4)碳试点省市需要适度或大幅上调碳价格以提供合理的价格参考。

**关键词** 交叉补贴,工业电力降费,碳价格

**DOI:** 10.13821/j.cnki.ceq.2020.01.15

### 一、引 言

2015 年 3 月,新一轮电力体制改革将合理形成电力价格与减少交叉补贴作为改革的重点内容。2018 年政府工作报告提出,将一般工商业电价降低 10%,2019 年提出在 2018 年的基础上再降 10%,工商业用能成本下降将促进工商业用户减负,推动中国经济转型。但同时,降电价将引致用电数量增加,在能源结构未能显著改善时,可能导致同期的碳排放目标难以实现,形成“降电价”与“碳上升”的两难困境。因此,为同时实现降低工业用能成本与碳排放等多重目标,从电力价格与碳价格联动的角度,对工业电力降费与碳价格机制进行设计,是当前学术界和政策机构急切关心的重要问题。

当前电力生产碳排放占中国碳排放总量的 40%左右,基于“中国要积极参与全球环境治理,落实减排承诺”的政策背景,以及要实现 2020 年碳强度比 2005 年下降 40%—45%、2030 年比 2005 年下降 60%—65%的约束性目标,国家发展和改革委员会(简称国家发改委)于 2017 年年底印发了《全国碳排放权交易市场建设方案(发电行业)》。全国统一碳市场的建立将对电力发展产生碳约束,进而倒逼电力结构优化,扭转电力价格长期扭曲的现象,

\* 刘自敏、朱朋虎、杨丹,西南大学经济管理学院;冯永晟,中国社会科学院财经战略研究院。通信作者及地址:刘自敏,重庆市北碚区天生路 2 号西南大学经济管理学院,400715;电话:(023) 68251299;E-mail: ziminliu@126.com。本文受到国家自然科学基金青年项目(71603218、71403288)、重庆市人文社科重点研究基地重点项目(16SKB057)资助。作者感谢匿名审稿人的宝贵意见,文责自负。限于篇幅,最终版本未包含附录,如有兴趣,可向作者索取。

有利于同时实现电力合理消费与节能减排的双重目标。

但目前我国大部分地区的电力价格还不是完全由市场决定,现行的碳价也不能反映电价。林伯强(2018)指出,目前能源领域的市场化程度相对较低,非市场化定价和交叉补贴不仅降低了能源生产和效率,对能源安全也具有负面影响。郑新业和吴施美(2018)指出,当前我国的电力体制改革与以碳市场为代表的节能减排政策没有很好地融合,引致碳价格偏离。因此,基于中国电价改革与碳定价制度协调推进的现实,本文将从电力降费目标与碳排放总量约束的双重视角,分析并设计全国统一碳市场下的合理碳价格机制。

当前对电力市场与碳市场价格机制的研究主要围绕电力市场交叉补贴、电力市场与碳市场互动关系、碳市场价格机制三方面展开。

国内外市场在公用事业部门中存在大量的交叉补贴现象。Laffont and Tirole (1993)、Fjell (2001)、Heald (1997)对交叉补贴的定义、分类与规模进行了研究;Komive (2004)、Sawkins and Reid (2007)、齐放等(2009)对俄罗斯、印度和中国等国家的电信、电力、自来水等不同行业交叉补贴的规模进行了估计。同时, Freund and Wallich (1997)、Bhattacharyya (2011)、林伯强等(2009)指出,微观层面上,补贴通常产生一些与初始目标相反的结果,包括给消费者传递错误的价格信号,促使过度且低效率的消费等;Abouleinein *et al.* (2009)、Breisinger *et al.* (2011)、Lin and Ouyang (2014)则指出,宏观层面上能源补贴对GDP有负面影响,并影响一国的贫困与不平等状况。在研究方法上,传统的基于最优价格的价差法与合理成本分摊法对最优价格的确定以及企业内部运营的成本数据要求较高(Heald, 1996),因此Curien (1991)从不同服务间的交叉补贴应为零的假设出发进行分析。Faulhaber (2005)、Sawkins and Reid (2007)则指出要考虑不同产品间交叉弹性不为零的情况,分析两类或多类产品间的互补或替代关系。

国内外对电力市场与碳市场的联动机制研究存在较大差距。国外发达国家具有较长的碳交易历史,两者之间的关系研究较为深入。研究主题包括碳价与电价之间的非线性关系(Ahamada and Kirat, 2018; O'Gorman and Jotzo, 2014)、不同竞争结构下碳成本的转移归属(cost pass-through)(Sijm *et al.*, 2006; Liliya and Gulli, 2007)、碳价格对工业与家庭能源强度的影响及其机制等(Cao and Karplus, 2014; Golder, 2011)。随着我国气候变化与环境污染问题的加剧,电力市场与碳市场之间的关系逐步引起关注。周亚敏和冯永晟(2017)利用36个城市的数据,分析了电价改革与碳排放的关系,指出单纯解决电价交叉补贴问题不能有效应对气候变化的压力,必须引入碳成本以实现电价与碳价间的联动机制。乔晓楠(2018)在开放经济条件下,基于两阶段动态博弈分析了碳峰值约束视角下的电力交叉补贴定价问题。蔡

松锋等(2017)则基于5种场景假设,分析了不同电价管制方式和碳价收入返还方式下碳价的经济影响和减排效果。

碳定价问题则一直是国内外碳市场设计中的焦点问题。Coady *et al.* (2018)指出研究有效能源定价时必须包含对碳定价的正确设定。Weitzman (2017)、Boyce (2018)从效率与公平的双重角度分析了碳定价问题,并提出有效率的碳定价必须将价格与数量目标捆绑起来。Böhringer *et al.* (2014)、Amundsen *et al.* (2018)指出解决不同的气候难题需要组合使用碳排放交易系统、对绿色能源补贴以及对化石能源征税等政策工具。同时,大量研究分析了不同碳价格水平引致的社会经济效果(Floros and Vlachou, 2005)。国内对碳税或碳交易的影响研究主要采用CGE模型模拟分析(田立新等, 2017),结果表明征收碳税导致火电与低碳电力价格均有上升,但火电价格增幅较大;张晓龙等(2015)分析了碳价对电力市场均衡的影响;刘思东和朱帮助(2015)给出了碳排放与电价风险的优化调度模型。罗来军等(2018)推导了碳税乘数,刻画了低碳总需求曲线中价格水平变动对总产出的作用强度与传导机制。魏立佳等(2018)则基于实验经济学方法对碳市场的稳定机制进行了分析。

综上所述可以发现,当前尚无国内外文献基于交叉补贴理论,从电价与碳价联动的视角对碳价格进行研究。在我国降低工业电价及建设统一碳市场的双重背景下,通过识别交叉补贴机制设计合理的碳价格以匹配碳减排目标,是我国理论研究界和政策机构关注的焦点问题,本文即是对这一问题的有益尝试。此外,大量文献从碳价格水平、碳配额初始值等角度进行了理论模型、实证分析与市场设计研究。但在不同的初始设定和模型假设下,所得结论差异巨大,不同国家或区域的碳市场参数难以供中国直接参考,这为本文针对中国统一碳市场的研究提供了空间。

本文可能的贡献在于:①以价格为纽带,从能源生产到消费排放,在统一框架下将电力生产与碳交易两个重要的上下游市场关联起来,厘清了两个市场价格参数之间的互动关系,这对电力市场化改革与减排目标实现均具有理论参考价值。②基于减少交叉补贴的背景,结合电力降费与碳减排目标设定了不同的政策目标场景,并设计了电价与碳价的联动机制,为电力市场化改革下的电力价格调整及全国统一碳市场的碳价格参数设计提供了量化参考。

本文的余下结构安排如下:第二部分对电价和碳价的互动关系进行理论分析;第三部分是本文使用的100个城市数据说明;第四部分是价格弹性的估计与电价调整机制设计;第五部分是基于不同碳控制情景的碳价格参数设计结果;最后是本文的结论与建议。

## 二、理论分析

本部分首先对现实情况下电价目标与碳目标的两难冲突进行分析,之后识别电价结构中的交叉补贴并测算其引致的无谓损失率,最后对碳价格参数进行机制设计。

### (一) 电价目标与碳排放目标的两难冲突

传统的能源管理体制下,政府设定的能源产品价格往往难以反映生产成本和消费者偏好,使得价格结构扭曲,形成某类用户支付的能源价格高于(或低于)能源供应成本,而由其他用户分担成本的现象,即为交叉补贴。中国长期以来实行工商业电价补贴居民电价的交叉补贴政策。自2015年以来,降低交叉补贴以完善电价形成机制逐渐成为新一轮电力体制改革的核心内容。

降低交叉补贴的本质是让电力价格反映真实电力成本,主要调整方向就是降低工业电价,提高居民电价。但目前为止,国家政策过多地侧重于降低工业终端用户的价格。如果只考虑降电价,工业用户的用电需求将增加。由于以燃煤发电为主的电力行业是我国碳排放的主要来源,电力供求又必须保持实时平衡,电力需求变化就会进一步引致电力生产侧的碳排放变化。因此,在电力行业与碳交易市场割裂的情况下,降电价政策有可能破坏宏观减排目标,造成政府在提升电力资源配置效率与追求低碳发展目标之间的两难选择。

如图1所示,为便于分析,假设需求曲线是线性的, $D_h$ 、 $D_i$ 分别是居民与工业用户的电力需求曲线, $p_h$ 、 $p'_h$ 与 $p_i$ 、 $p'_i$ 分别是电价调整前后的居民与工业电价, $q_h$ 、 $q'_h$ 与 $q_i$ 、 $q'_i$ 分别是电价调整前后的居民与工业用电量。在中国的电力消费结构中,居民用电仅占13%左右,而工业用电约占71%。差别较大的份额占比意味着在不考虑其他碳排放控制政策时,尤其是短期内居民电价难以大幅提高的现实情况下,工业电价持续下降很可能导致碳排放总量大幅增加。

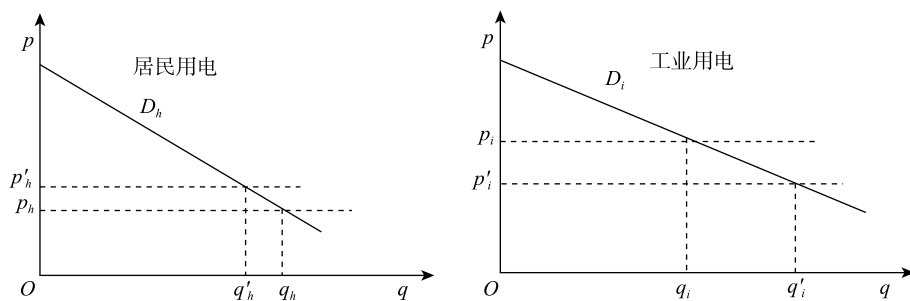


图1 电价调整分析图

此外，在电力行业实行碳交易机制，碳定价会给电力行业带来额外成本，随着电力市场化改革的推进，这部分成本将部分甚至全部转移给电力用户，进而可能影响降低工商业用能成本的初衷。因此，基于多目标约束的现实，将电力价格与碳价格进行联合分析是反映电力生产真实成本的必然路径。

仅降低工业电价不能完全消除价格扭曲，随着外部环境成本日益严格的内部化要求，提高居民电价将在所难免。因此，在对电价与碳价联合分析的过程中，我们首先需要识别我国的交叉补贴结构，从而进一步分析二者的联动机制。

## （二）电价目标实现：电力交叉补贴的识别与无谓损失测度

识别与测算交叉补贴时，首先要确定无交叉补贴时的最优价格（或理想价格）。公用事业部门的最优价格确定可以采用 Ramsey 定价法<sup>1</sup>，但现实中由于难以获取成本数据、成本真实性难以证实等原因，规制者在分析补贴和交叉补贴时往往不能获得准确的最优价格，进而限制了交叉补贴的测算。鉴于此，本文借鉴 Palmer（1991，1992）对交叉补贴中独立成本（stand-alone cost）的上限估计思路，对我国电力结构中交叉补贴规模的下限进行估计。与传统方法比较，该思路无须使用或估计成本信息，尤其是边际成本信息，在本文中具有较高的适用性。<sup>2</sup>

如图2，采用价差法（Price-Gap Approach）计算工业用户与居民用户之间的交叉补贴。<sup>3</sup>假设工业与居民共同的理想价格为  $p_0^4$ ， $p_h$  与  $p_i$  分别是现行居民与工业电价， $q_{h1}$  与  $q_{i1}$  分别是当前居民与工业用电量。对居民用户而言，单位电量所受补贴为  $p_0$  与  $p_h$  的价差，其与居民用电量的乘积即为所受补贴总额（图2中的 A+B+E 部分）；类似地，工业用户付出的补贴总额为图2中的 F 部分。由于本文仅估计工业与居民间的交叉补贴，此时存在着“居民所得的受补贴额等于工业用户提供的补贴额”这一简单关系。<sup>5</sup>即：

<sup>1</sup> Ramsey（1927）指出，受管制垄断企业最有效率的定价应遵循逆弹性差别定价原则，即对某一类消费者的收费价格与需求价格弹性成反比。

<sup>2</sup> 在污染税等环境规制工具的分析中，也可借鉴本文的分析思路，估计出最优污染税征收水平，并进一步识别出最优环境监管工具及其组合。

<sup>3</sup> 价差法的基本思想是通过计算无补贴情景下的参考价格与能源产品终端消费价格之差可以衡量能源补贴的规模及效果，其基本公式为： $Cross\_Sub = GP \times C = (CP - RP) \times C$ 。其中  $Cross\_Sub$  表示补贴总额， $CP$  与  $RP$  分别表示存在与不存在补贴时的消费价格， $C$  表示终端电力消费量。林伯强和刘畅（2016）指出，价差法可能是当前估计能源补贴唯一可行的办法。

<sup>4</sup> 假设不存在交叉补贴时居民最优电价与工业最优电价分别为  $p_{0h}$  与  $p_{0i}$ 。由电力工业生产技术特征可知，最优电价满足  $p_{0i} < p_{0h}$ 。最优电价与实际电价的差额即为单位交叉补贴额，如果假设无交叉补贴时居民与工业用电的价格均为  $p_0$ ，必然存在着  $p_{0h} > p_0 > p_{0i}$  的关系，此时所求的交叉补贴估计值正是真实值的下限。

<sup>5</sup> 在一个两两间或多个用户间的交叉补贴分析中，所有用户得到的交叉补贴总额一定等于所有用户提供的交叉补贴总额（Curien，1991）。对电力企业来说，本文关注的交叉补贴是一种企业内部的预算平衡机制。

$$(p_0 - p_h) \times q_{h1} = (p_i - p_0) \times q_{i1}. \quad (1)$$

由此, 可得不存在交叉补贴时的价格  $p_0$  为:

$$p_0 = \frac{p_h \times q_{h1} + p_i \times q_{i1}}{q_{h1} + q_{i1}}. \quad (2)$$

求解  $p_0$  之后, 根据价差法的计算原则, 就可以计算出中国电力结构中工业对居民用电的交叉补贴。

$$Cross\_Sub = |\Delta p \times q| = (p_i - p_0) \times q_{i1} = (p_0 - p_h) \times q_{h1}, \quad (3)$$

其中,  $Cross\_Sub$  表示交叉补贴总额,  $\Delta p$  表示新场景下工业 (居民) 电价与现行工业 (居民) 电价之差,  $q$  表示现行电价下工业 (居民) 终端电力消费量。

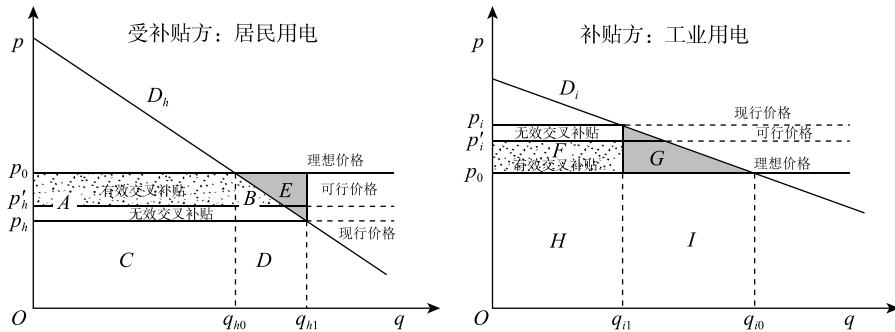


图 2 居民与工业用电交叉补贴福利分析

交叉补贴造成了效率损失, 但直接取消工业与居民间的交叉补贴并不具备实际操作性 (林伯强等, 2009; Bhattacharyya and Ganguly, 2017)。因此, 本文借鉴林伯强和刘畅 (2016) 提出的“有效能源补贴”概念, 定义工业与居民电价间的“有效交叉补贴”<sup>6</sup>。如图 2,  $p'_h$  与  $p'_i$  分别为居民与工业电价的可行价格, 有效交叉补贴由可行价格偏离理想价格所致, 而无效交叉补贴则由现行价格偏离可行价格所致。基于交叉补贴的政策目标, 有效交叉补贴即当交叉补贴无谓损失率最小时, 电价水平最有效 (即图 2 中的可行价格), 此时仍然存在的交叉补贴即为有效交叉补贴。

图 2 中, 当由无交叉补贴情形转化为存在交叉补贴情形时, 社会总福利的变化为  $\Delta SW = \Delta SW_h + \Delta SW_i = (\Delta CS_h + \Delta PS_h) + (\Delta CS_i + \Delta PS_i)$ , 其中  $\Delta SW$ 、 $\Delta SW_h$  及  $\Delta SW_i$  分别是社会总福利、居民以及工业用户总福利的变化量,  $\Delta CS_h$ 、 $\Delta CS_i$  分别是居民和工业用户的消费者剩余变化量,  $\Delta PS_i$  与  $\Delta PS_h$  分别表示居民与工业用户的生产者剩余变化量。借鉴 Coady *et al.*

<sup>6</sup> 交叉补贴虽然造成了效率损失, 但却可能是有效的 (Hubert, 2002), 其重要作用包括收入转移和再分配以及实施普遍服务等。

(2015)、刘自敏等(2017),假设电力提供者收入中性,即居民侧的生产者剩余损失通过工业部门的提价来完全补偿,此时社会总福利变化简化为:

$$\begin{aligned}\Delta SW &= \Delta SW_h + \Delta SW_i = (\Delta CS_h + \Delta PS_h) + (\Delta CS_i + \Delta PS_i) \\ &= \Delta CS_h + \Delta CS_i = (A+B) - (F+G).\end{aligned}\quad (4)$$

对于电力提供者,居民电费收入的减少额等于工业电费收入的增加额,即  $A+B+E=F$ 。因此,最终由交叉补贴导致的社会总福利无谓损失为:  $DWL = \Delta SW = -(E+G)$ ,即图2中的阴影部分。进一步地,借鉴公共经济学中对价格扭曲系数以及公共资金影子成本的测算方法(Atkinson and Halvorsen, 1980, 1984),交叉补贴无谓损失率( $\theta$ )可以表示为:

$$\theta = \frac{DWL}{Cross\_Sub} = \frac{E+G}{A+B+E} = \frac{E+G}{F}.\quad (5)$$

由公式(5)可知,当我们使用现行价格与理想价格进行计算时,得到的无谓损失率即为当前定价下的交叉补贴无谓损失率。在新的 $\theta$ 目标约束下,我们可以调整现行价格至可行价格以提高交叉补贴利用效率。此时,虽然可行价格与理想价格仍有差异,交叉补贴仍然存在,但本文定义的无效交叉补贴已经消除。<sup>7</sup>

最后,利用价格弹性及真实居民与工业价格对式(5)进行表达,在仅考虑自价格弹性、同时考虑交叉价格弹性两种情形下,交叉补贴无谓损失率表达式如下。详细分析过程因篇幅所限未列示,留存备案。

$$\theta_1 = \frac{\sum (DWL_i + DWL_h)}{Cross\_Sub} = - \frac{\epsilon_h \frac{(\Delta p_h)^2}{p_h} q_{h1} + \epsilon_i \frac{(\Delta p_i)^2}{p_i} q_{i1}}{\Delta p_h q_{h1} + \Delta p_i q_{i1}},\quad (6)$$

$$\begin{aligned}\theta_2 &= \frac{\sum (DWL_i + DWL_h)}{Cross\_Sub} \\ &= - \left[ \frac{\epsilon_h \frac{(\Delta p_h)^2}{p_h} q_{h1} + \epsilon_{hi} \frac{(\Delta p_i)^2}{p_i} q_{h1} + \epsilon_i \frac{(\Delta p_i)^2}{p_i} q_{i1} + \epsilon_{ih} \frac{(\Delta p_h)^2}{p_h} q_{i1}}{\Delta p_h q_{h1} + \Delta p_i q_{i1}} \right],\end{aligned}\quad (7)$$

其中,  $DWL_i$ 、 $DWL_h$  分别是工业侧与居民侧造成的无谓损失,  $\epsilon_h$ 、 $\epsilon_i$  表示居民与工业用户的自价格弹性,  $\epsilon_{ih}$ 、 $\epsilon_{hi}$  为两类用户间的交叉价格弹性。<sup>8</sup>

### (三) 碳排放目标实现：碳价格的设计

碳价格是碳交易机制的核心参数之一。如果碳价格过高,企业成本负担

<sup>7</sup> 当然,随着社会经济目标实现效率的提高,新的  $q_h$  目标约束将使得有效交叉补贴部分逐步缩小。其理想状态是  $q'_h$ ,交叉补贴全部消失。

<sup>8</sup> 需要指出,常弹性下需采用积分的方式求解计算福利,而本文计算无谓损失率时已采用积分形式。因此,即使是非线性的需求函数,公式(6)、(7)仍然适用。

较大,参与碳交易的积极性降低;反之,碳价格过低则影响企业的自主减排动力,直接造成碳市场的低效。因此,在统一碳市场建设首先以发电行业作为试点的现实背景下,我们对电力目标和碳目标进行联合分析,探讨碳价格的合理形成机制。

假设碳成本可以完全转嫁至电价结构上,那么此时的碳成本附加在电力价格上,将会影响电力用户的电力需求,从而减少碳排放。<sup>9</sup>此时,附加碳成本就对应着实现既定碳目标的碳价格。具体地,与前文设定一致, $p_h$ 、 $p'_h$ 与 $p_i$ 、 $p'_i$ 分别是电价调整前后的居民与工业电价, $p_c$ 为碳价,那么工业与居民用户各自的含碳总电价为:

$$\begin{cases} p_{hc} = p_h + \Delta p'_h + p_c = p'_h + p_c \\ p_{ic} = p_i - \Delta p'_i + p_c = p'_i + p_c \end{cases} \quad (8)$$

需要指出,对电力厂商而言,电力生产过程中并不区分工业用电和居民用电,也就意味着碳成本的分摊也不区分工业用户和居民用户,工业电价和居民电价中都应包含大小相等的碳成本。式(8)的关系如图3所示。

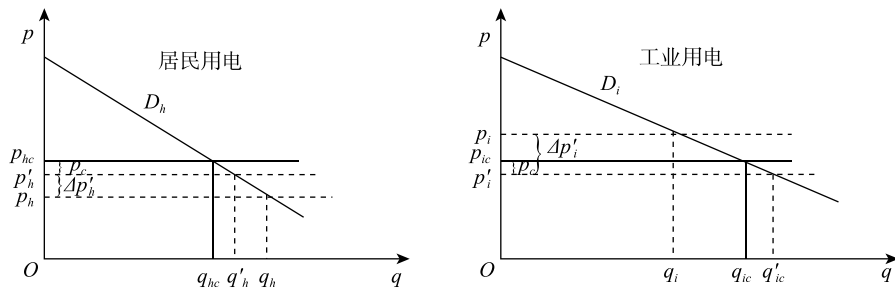


图3 交叉补贴视角下碳价格分析

图3中,不同电价改革目标对应的电价调整方案是不同的,并且在不同的经济发展阶段,国家的总体碳控制程度也具有阶段性差异。因此,根据现实情况中不同的电价调整方案和不同约束程度的碳目标,通过求解不同电价调整策略所对应的合理碳价格,可以为规制者提供一系列同时实现双重目标的政策方案。

### 三、数据说明

本文所使用的电价数据来自中国价格信息网<sup>10</sup>,该网站采集了中国(不含

<sup>9</sup> 虽然当前我国电价仍然由政府管制,但随着电力市场化改革的持续推进,电力价格将逐渐放开,最终将形成反映市场供需和电力商品真实价值的电价结构。

<sup>10</sup> 我们也尝试搜集了省市层面价格管理部门的调价文件,对比发现绝大多数调价政策在本文数据中均有体现,初步证明了本数据的可靠。但由于不能保证所有城市的价格数据没有遗漏,我们最终选择使用中国价格信息网的电价数据。



港澳台) 31个省市、自治区的100个典型城市2006—2015年的居民与工业用电月度价格,且分布较为均衡,东中西三部分区域分别包含36、30、34个城市。

100个城市(仅含市辖区)的工业与居民能源与资源(含电力、燃气、用水等各项)消费量、GDP等变量来自历年《中国城市统计年鉴》,气候数据来源于中国气象数据网,CO<sub>2</sub>排放量由用电量、电源结构和历年《中国区域电网基准线排放因子》计算得出。由于所有控制变量均在年份层面,因此将月度电价数据加总平均到年度层面,形成本文的完整数据库。各变量的描述性统计如表1所示。

表1 变量描述性统计

	变量	观察值	平均值	标准误	最小值	最大值
电量	工业用电(亿千瓦时)	927	92.660	121.800	0.220	805.800
	居民用电(亿千瓦时)	925	19.520	29.150	0.118	205.110
碳排放	工业碳排放(万吨)	927	917.055	1150.411	2.336	6948.454
	居民碳排放(万吨)	925	192.196	276.753	1.213	1820.286
	排放因子(吨/千千瓦时)	1000	1.017	0.121	0.797	1.302
电价	工业电价(元)	1000	0.734	0.116	0.444	0.980
	居民电价(元)	1000	0.524	0.057	0.380	0.760
工业变量	工业总产值(亿元)	947	2787.233	4656.126	7.856	32014.020
	工业企业数(家)	947	1026.000	1881.000	12.000	18474
	第二产业从业人员(万人)	935	29.080	39.110	0.070	297.600
	第二产业生产总值(亿元)	946	883.600	1280.400	4.111	8080.010
	液化石油气工业用量(万吨)	927	3.475	9.016	0	77.169
	煤气工业用量(亿立方米)	894	5.256	17.460	0	195.960
	区域面积(平方公里)	942	2605.000	3327.000	115.000	34505.000
居民变量	工资总额(亿元)	935	310.800	726.200	4.967	8225.300
	总人口(万人)	945	231.100	271.900	18.640	2129.310
	地区生产总值(亿元)	947	1980.000	3285.000	25.160	24838.320
	居民储蓄(亿元)	928	1690.280	3132.100	33.890	23914.190
	家用电器(台)	880	4.751	1.061	3.162	8.027
	煤气家庭用量(亿立方米)	894	1.207	3.0377	1.000	62.149
	液化石油气家庭用量(万吨)	928	3.246	6.008	0	46.850

(续表)

	变量	观察值	平均值	标准误	最小值	最大值
气候变量	平均气温 (0.1 度)	954	146.700	49.260	42.000	254.000
	最低气温 (0.1 度)	980	107.099	57.777	-7.000	220.000
	最高气温 (0.1 度)	980	199.967	43.394	98.000	282.000
	平均湿度 (%)	954	64.980	10.380	31.000	85.000

数据来源：中国价格信息网、《中国区域电网基准线排放因子》(2007—2015)、《中国城市统计年鉴》(2007—2016)、中国气象数据网。

从表 1 中可以发现，中国的城市工业电价比居民电价平均高 0.21 元/千瓦时，约占工业电价的 28.6%。此外，我们从时间维度分析了样本期内居民与工业电价的变化趋势，发现 2006—2015 年间工业电价逐年递增，而居民电价水平相对平稳。基于工业用电的生产成本低于居民用电的现实，可以判断当前中国存在严重的交叉补贴现象。

#### 四、实证分析

本部分首先估计工业与居民用电的价格弹性，在此基础上测算交叉补贴无谓损失率，之后对电价结构进行机制设计，最后分析电价调整引致的碳排放量的变化情况。

##### (一) 价格弹性的估计

本文借鉴 IEA (1999) 采用不变弹性的需求函数形式来估计价格弹性。<sup>11</sup> 但其估计公式存在缺少必要控制变量、未考虑相关产品（替代或互补品）价格的影响等方面的不足。在本文研究中，某些不可观测因素可能同时对工业与居民用电量造成影响，两个方程残差项可能相关。鉴于此，本文采用似不相关回归 (SUR) 方法同时估计居民与工业的自价格弹性与交叉价格弹性，估计方程如式 (9) 所示。<sup>12</sup>

$$\begin{cases} \ln q_{ht} = \alpha_1 + \beta_1 \ln p_{ht} + \gamma_1 \ln p_{it} + \varphi_1 Z_{ht} + \mu_h + v_{1t} + \varepsilon_{ht} \\ \ln q_{it} = \alpha_2 + \beta_2 \ln p_{it} + \gamma_2 \ln p_{ht} + \varphi_2 Z_{it} + \mu_i + v_{2t} + \varepsilon_{it} \end{cases}, \quad (9)$$

<sup>11</sup> 在公用事业价格理论分析中使用双对数模型，即以常弹性假设估计价格弹性较为常见。Vásquez Lavín *et al.* (2017) 对比了六种弹性估计形式，发现双对数与对数—平方形式的弹性估计拟合程度最高。

<sup>12</sup> 需要说明，SUR 回归中的价格相对外生。正如 Taylor (1975)、郑新业等 (2012)、周亚敏和冯永晟 (2017) 所述，中国集中式的资源与能源管理决策机制使得短期内基层（如市级层面）电价不随电力供求变化，因而成为相对外生的变量。本文中电力价格的决策权主要是在国家层面（如国家发改委等），更高层面制定的电力指导价格较之城市层面的电力使用量具有较强的外生性。

其中,  $q_{ht}$  与  $q_{it}$  为居民与工业的用电量,  $p_{ht}$  与  $p_{it}$  为居民与工业用电价格,  $Z_{ht}$  与  $Z_{it}$  则为表 2 中的控制变量。  $\beta_1$  与  $\beta_2$  为所估计的自价格弹性系数,  $\gamma_1$  与  $\gamma_2$  为所估计的交叉价格弹性系数,  $\mu_h$  与  $\mu_i$  表示城市固定效应,  $\nu_{1t}$  与  $\nu_{2t}$  表示时间固定效应。估计结果如表 2 所示。

表 2 工业与居民用电价格弹性估计表

变量	OLS				SUR			
	ln ( $q_i$ )	ln ( $q_h$ )	ln ( $q_i$ )	ln ( $q_h$ )	ln ( $q_i$ )	ln ( $q_h$ )	ln ( $q_i$ )	ln ( $q_h$ )
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
ln ( $p_i$ )	-1.210*** (0.208)		-1.296*** (0.218)	-0.246** (0.112)	-1.232*** (0.245)		-1.192*** (0.264)	-0.271** (0.134)
ln ( $p_h$ )		-0.626*** (0.156)	-0.269 (0.342)	-0.572*** (0.171)		-0.668*** (0.156)	-0.152* (0.081)	-0.537*** (0.169)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
常数项	1.180 (1.121)	-1.847*** (0.363)	0.213 (1.042)	-2.048*** (0.347)	1.132 (1.160)	-1.777*** (0.368)	0.538 (1.098)	-1.907*** (0.372)
观察值	717	717	717	717	717	717	717	717
城市数	86	86	86	86	86	86	86	86
R 平方	0.760	0.940	0.756	0.940	0.761	0.941	0.760	0.941
B-P 检验	/	/	/	/	6.903***		6.837***	

注:\*\*\*、\*\*、\* 分别表示在 1%、5%、10% 的水平下显著, 括号内为标准误。

表 2 中, 首先利用普通最小二乘法 (OLS) 对两个方程分别独立估计, 进一步考虑工业与居民用电方程的内在关联, 采用 SUR 方法对二者进行联合估计。结果显示, 无论是 OLS 还是 SUR 估计, 交叉价格弹性均显著, 二者结果中的系数差异正是由两个方程残差项的相关性所致。表中最后一行 B-P 独立性检验结果拒绝了各方程扰动项的相互独立假设, 说明使用 SUR 回归的估计效率更高。

最后两列估计结果显示, 工业用电价格弹性大于居民用电价格弹性, 该结论与 Lin and Jiang (2011)、周亚敏和冯永晟 (2017) 等人的结果一致。这是因为工业用电大户往往具有更强的市场谈判力, 可以更灵活地对电价和电力供需做出实时反应。此外, 交叉价格弹性显著为负是因为工业电价上升时,

收入效应与替代效应对居民用电量有不同的影响作用,但由于收入效应的作用更大,最终引致居民用电量下降。<sup>13</sup>居民电价对工业用电量的影响分析类似,不再赘述。

本文进一步结合《中国城市统计年鉴》中的人口数据,在个体人均层面上对工业与居民用电方程进行了估计。估计结果显示上述结果较为稳健。限于篇幅,此部分估计结果留存备索。

## (二) 电价调整过程

根据式(7)计算出全国层面2006—2015年的无谓损失率,如图4所示。

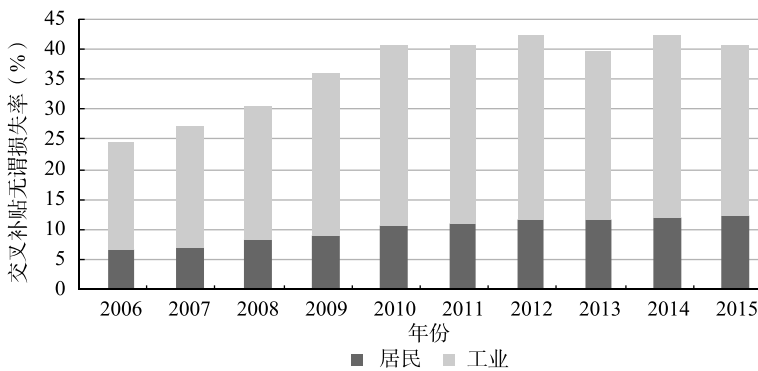


图4 2006—2015年交叉补贴无谓损失率

图4中,10年间中国的电力行业的交叉补贴无谓损失率从24.32%提高到40.35%,整体呈上升态势,且工业电价扭曲导致了大部分无谓损失。在求解交叉补贴无谓损失率的基础上,我们可以对电价结构进行机制设计。

理想状态下,最优电力价格机制即为最小化交叉补贴无谓损失率 $\theta$ 的电价机制。前文已经指出,当前背景下,很难直接将无谓损失率降低至零。因此,本文分析当交叉补贴无谓损失率 $\theta$ 达到一定标准下的价格调整机制,即消除无效交叉补贴。居民与工业用电价格优化前后的交叉补贴与无谓损失变化如图5所示。

<sup>13</sup> 当前我国电力供需市场仍存在一定程度的市场分割,当地工业生产往往以本地消纳为首要目标(魏楚和郑新业,2017; Qin *et al.*, 2020)。当工业电价上升时,电价成本会传导使得最终产品价格上升,由于消费者购买的大多数产品是生活基本支出,占用总收入的较大比例。在总收入与居民电价不变的情况下,收入效应将使得居民用电量减少。同时,虽然替代效应会使居民用电量增加,但电力作为中间能源产品,替代效应通常较小。因此,在收入效应与替代效应的共同作用下,工业电价上升使得居民用电量减少。

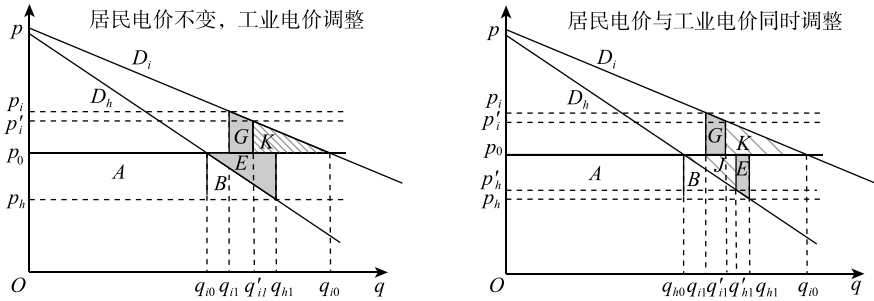


图 5 居民与工业用电价格优化设计

以图 5 左侧为例，居民的无谓损失为三角形 E，交叉补贴得到额则为  $(p_0 - p_h) q_{h1}$ ；当工业电价由  $p_i$  调整为  $p'_i$  时，无谓损失由三角形  $(G + K)$  变化为三角形 K，交叉补贴支出额由  $(p_i - p_0) q_{i1}$  变化为  $(p'_i - p_0) q_{i1}$ 。在考虑自价格与交叉价格弹性时，电力价格调整机制为<sup>14</sup>：

$$\begin{aligned}
 & \theta_2 (p'_i, p'_h = p_h) \\
 &= \frac{\sum (DWL_i + DWL_h)}{Cross\_Sub} \\
 &= - \left[ \frac{\epsilon_h \frac{(\Delta p'_h)^2}{p'_h} q_{h1} + \epsilon_{hi} \frac{(\Delta p'_i)^2}{p'_i} q_{h1} + \epsilon_i \frac{(\Delta p'_i)^2}{p'_i} q_{i1} + \epsilon_{ih} \frac{(\Delta p'_h)^2}{p'_h} q_{i1}}{\Delta p'_h q_{h1} + \Delta p'_i q_{i1}} \right] \\
 &= - \left[ \frac{\epsilon_h \frac{(p'_h - p_0)^2}{p'_h} q_{h1} + \epsilon_{hi} \frac{(p'_i - p_0)^2}{p'_i} q_{h1} + \epsilon_i \frac{(p'_i - p_0)^2}{p'_i} q_{i1} + \epsilon_{ih} \frac{(p'_h - p_0)^2}{p'_h} q_{i1}}{(p'_h - p_0) q_{h1} + (p'_i - p_0) q_{i1}} \right] \\
 &= \bar{\theta}_2, \tag{10}
 \end{aligned}$$

其中， $\Delta p'_h = p_0 - p'_h = 0$ ， $\Delta p'_i = p'_i - p_0$ 。借鉴现有对税收边际成本的研究作为有效交叉补贴无谓损失率的参考。根据刘明（2009）的测算，电气水的生产与供应业的公共资金边际成本为 1.222 元，由此我们设定政策目标： $\bar{\theta}_2 = 0.222$ 。基于现阶段的价格调整情况，分析可能的价格调整机制包括以下四类：

- (1) 居民电价不变，仅调整工业电价，即  $\bar{\theta}_2 = \theta_2 (p'_i, p'_h = p_h)$ 。
- (2) 工业电价下降 4.3% 时的居民电价调整，即  $\bar{\theta}_2 = \theta_2 (p'_i = p_i (1 -$

<sup>14</sup> 在前文讨论现行价格时，我们假设电价交叉补贴的预算是平衡的，即公式 (1) 在现行价格下成立，但求解可行价格时不再满足预算平衡约束。原因在于采用价差法计算交叉补贴规模时，交叉补贴额 = 现行价格下的能源消费量 × (现行价格 - 可行价格)；而传统的补贴规模测算公式为：交叉补贴额 = 可行价格下的能源消费量 × (现行价格 - 可行价格)，此时电力提供者满足预算平衡约束。因此，在采用价差法时，我们需要放弃现行价格调整至可行价格时的预算约束平衡条件，Koplow (2009)、Vagliasindi (2012)、刘伟和李虹 (2014)、蒋竺均和邵帅 (2013) 等均作了类似处理。当然，此时交叉补贴存在一定缺口。从我国电力行业运行经验来看，我们假定该缺口由电网公司承担。电价调整后，电网公司的利润将被部分挤占或获得超额利润。

4.3%)， $p'_h$ )。工商业电价降低10%的目标提出后，第一批降价措施包括临时性降低输配电价等，涉及降价金额为430亿元左右，可使一般工商业电价每千瓦时降低约4.3分，降幅达4.3%。

(3) 工业电价下降7%时的居民电价调整，即 $\bar{\theta}_2 = \theta_2 (p'_i = p_i (1-7\%), p'_h)$ 。2018年5月，国家发改委提出将电力行业增值税税率调整等腾出的电价空间全部用于降电价，涉及金额约216亿元，可使一般工商业电价每千瓦时降低约2.16分，至此累计降幅约7%。

(4) 工业电价下降10%时的居民电价调整，即 $\bar{\theta}_2 = \theta_2 (p'_i = p_i (1-10\%), p'_h)$ 。据2018年《政府工作报告》显示，2018年一般工商业电价每千瓦时平均降低8分钱以上，超额完成10%的任务目标。对应四类价格调整机制，工业与居民电力价格机制设计如表3所示。<sup>15</sup>

表3 居民与工业电价的优化设计

场景	工业电价 (元/千瓦时)	居民电价 (元/千瓦时)	工业降价 比例 (%)	居民提价 比例 (%)
theta=0.404	0.795	0.527	/	/
仅调整工业电价，居民电价不变	0.734	/	7.69	/
theta=0.222				
工业电价降低4.3%，居民电价调整	0.761	0.546	4.30	3.67
工业电价降低7.0%，居民电价调整	0.739	0.531	7.00	0.74
工业电价降低10.0%，居民电价调整	0.715	无须提价	10.00	/

从表3可以发现，当工业电价降低7.69%时，交叉补贴无谓损失率可以降至0.222，居民电价不需调整。在现阶段工业电价分别下降4.3%、7%的情况下，居民电价则分别需要提高3.67%、0.74%。当工业电价下降10%时，居民电价无须再提高，但随着我国电力市场化改革的推进，电力行业公共资金边际成本将下降，此时居民电价将需要部分提升。

### (三) 电价调整后的碳排放量变化

在上述四种电价调整方案的基础上，我们可以测算电力行业碳排放量的变化。由于现实情况下我国的电价调整并不涉及居民电价，因此我们也测算仅工业电价调整所导致的碳排放变化量，以提供现实参考。

从表4可以看出，现实场景中，仅降低工业电价时，工业用户和居民用户都会增加用电量，相应的碳排放量也会增加，且随着工业电价降价幅度的

<sup>15</sup> 需要说明，从2015年电力体制改革以来，政府出台了降低工业电价的政策，至2017年年底，电力价格已经有所下降。但囿于数据可得性，当前测算的价格基础是2015年的数据，因此计算出的电价下降额是所需下降额的下限值。

加大，碳排放进一步增加。而基于调整场景，当工业电价与居民电价同时调整时，由于居民电价提高将会部分抵消工业电价下降所导致的碳排放增加量，此时的碳排放净增加量小于现实场景，但总体碳排放增加量仍然增加。

表 4 电价调整引致的用电量（碳排放量）变化

场景		工业：增加 比例（%）	居民：增加 比例（%）	总增加比例 （%）
现实场景	工业电价降低 4.30%	5.13	1.17	4.36
	工业电价降低 7.00%	8.34	1.90	7.10
	工业电价降低 10.0%	11.92	2.71	10.14
调整场景	工业电价降低 8.13%	9.16	2.08	7.79
	工业电价降低 4.30%，居民电价提高 4.17	4.57	-0.81	3.53
	工业电价降低 7.00%，居民电价提高 1.23	8.23	1.50	6.93
	工业电价降低 10.0%	11.92	2.71	10.14

## 五、基于政策目标的电价与碳价联动机制设计

初始配额和碳价格是碳交易机制中的关键参数。初始配额反映了碳规制目标，而碳价格则决定了市场效率。此部分参考我国碳试点省市经验，首先将碳强度目标转化为碳排放量绝对目标以确定配额总量，进而设计相应的碳价格机制。

### （一）碳排放政策目标下的碳价设计

2017年6月，国家发改委印发的《“十三五”控制温室气体排放工作方案》中提出，2020年单位国内生产总值二氧化碳排放比2015年下降18%，并且对不同地区提出了差异化要求。因此，考虑到总体碳目标实现的阶段性以及各地区碳减排的差异性，借鉴戴彦德等（2017）的分析，我们设定以下三类不同规制强度的碳规制情景，进而求解对应的碳价格。

（1）宽松情景：碳强度不变。碳强度不变意味着允许碳排放量与GDP同步增长，我们将其设定为基准对照组。前文电价调整方案是基于2015年的数据计算，所以此时的碳排放增幅和2016年GDP增速一致，即6.7%。

（2）正常情景：碳强度下降3.6%。基于2020年碳强度比2015年下降18%的目标，5年内碳强度需年均下降3.6%。同时基于“十三五规划”中提出的“十三五”时期GDP年均增长6.5%，可知碳排放绝对量年均增幅不能高于2.7%。

（3）强化情景：碳强度下降6.6%。据《中国应对气候变化的政策与行动

2017年度报告》披露,我国2016年碳强度比2015年下降6.6%。同时,由于2017年碳强度比2005年下降约46%,已经完成“十三五”碳约束指标。因此,我们将6.6%作为相对严格的碳强度目标,此时对应GDP年均6.5%的增长速度,碳排放量是下降的。

基于式(8),在碳约束可知、弹性已求解的情况下,求得碳价格如表5所示。

表5 基于电价调整和碳目标的碳价格机制设计

场景	碳强度不变		碳强度下降3.60%		碳强度下降6.60%	
	需增碳成本	碳价格	需增碳成本	碳价格	需增碳成本	碳价格
工业电价降低8.13%	0.006	6.721	0.030	31.506	0.077	80.523
工业电价降低4.3%,居民电价提高4.17%	/	/	0.005	5.278	0.052	54.295
工业电价降低7.0%,居民电价提高1.23%	0.001	1.401	0.025	26.186	0.072	75.203
工业电价降低10.0%	0.020	21.143	0.044	45.928	0.091	94.944
平均	0.007	9.755	0.026	27.225	0.073	76.241

注:单位电力需增碳成本单位为元/千瓦时,碳价格单位为元/吨。

总的来说,表5中的碳价格略高于我国碳试点省市的价格水平。从宽松情景到强化情景,平均碳价格从9.76元/吨上升到76.24元/吨。而且,基于特定的电价调整场景,随着碳强度下降比例的增加,碳价格迅速提高;碳强度目标不变时,工业电价的持续下降也使得碳价格进一步增高。因此,随着碳约束程度的增加以及工业电价的持续下降,只有较高的碳价格才能对企业产生真正的减排压力。<sup>16</sup>

## (二) 试点省市的碳价调整方向

2013年以来,北京、天津等碳交易市场已陆续运行近7年,如果以其现行的碳价格作为参考,将会对其碳目标的实现有何影响?我们基于7大试点省市的历史价格数据,同样在上述碳成本完全转嫁至电力价格的假设下,反过来测算其对电力行业碳排放量的影响,以期为试点省市向统一碳市场过渡提供明确的价格调控参考。

首先,从表6中各试点省市的碳强度变化可以发现,如果以现行的碳价格作为参考价格,场景一中的碳强度平均增加0.87%,这和碳强度下降目标

<sup>16</sup> 由于工业电价实际下降比例大于文中设定场景,所以为实现特定的碳控制目标,实际所需附加的碳成本也更高,即我们求解的碳价格也仅是实际碳价格的下限。此外,这里的碳价格与企业真实减排成本还有很大差距。据《2017年我国碳市场预测与展望》预测,碳价高于240元/吨时才会真正发挥减排作用,而建设初期的碳价格年均水平在30—40元/吨。



是相悖的，说明现行碳价格较低，对电力企业的碳约束程度不够。场景二中，工业电价和居民电价同时反向调整，所有试点地区均可以实现碳控制强化情景。场景三中上海、湖北和广东处于碳强度正常下降的情景中，基本可以实现碳强度下降目标。场景四中，只有北京市相对较高的碳价格使得碳强度下降处于强化情景，天津、重庆和深圳只具备正常完成碳强度目标的可能，而上海、湖北和广东均不能达到正常实现碳强度的目标。

表6 现行碳价格约束下碳排放量的变化

	北京	天津	上海	湖北	广东	重庆	深圳	平均
碳价格	50.190	23.610	25.000	22.400	30.470	22.770	44.510	29.073
附加碳成本	0.052	0.025	0.020	0.021	0.027	0.022	0.040	0.028
碳减少量	430.171	264.675	236.856	29.719	132.586	229.232	317.952	234.456
碳净增加量								
场景一	393.885	1203.430	946.678	71.347	205.879	554.532	196.095	595.974
场景二	-519.359	-240.349	-110.352	-3.714	-51.665	-110.285	-179.078	-180.903
场景三	-355.650	-2.174	162.464	28.347	58.792	89.460	8.409	-7.081
场景四	-185.626	255.249	459.215	62.831	179.087	307.351	216.727	186.055
净增加比例								
场景一	7.91%	18.06%	12.00%	7.62%	6.27%	9.58%	3.29%	9.25%
场景二	-10.44%	-3.61%	-1.40%	-0.40%	-1.57%	-1.90%	-3.20%	-3.22%
场景三	-7.15%	-0.03%	2.06%	3.03%	1.79%	1.54%	0.19%	0.20%
场景四	-3.73%	3.83%	5.82%	6.71%	5.45%	5.31%	3.75%	3.88%
碳强度变化								
场景一	1.04%	8.22%	4.77%	-0.44%	-1.15%	-1.02%	-5.24%	0.87%
场景二	-16.14%	-11.65%	-7.76%	-7.86%	-8.44%	-11.39%	-11.19%	-10.63%
场景三	-13.06%	-8.37%	-4.53%	-4.69%	-5.31%	-8.27%	-8.08%	-7.47%
场景四	-9.86%	-4.83%	-1.01%	-1.28%	-1.91%	-4.87%	-4.82%	-4.08%
碳价格调整策略 /	保持平稳	适度上调	大幅上调	大幅上调	大幅上调	适度上调	适度上调	适度上调

注：各试点碳价格数据期自试点开始至2016年年底，来源于《2017年我国碳市场预测与展望》；场景一、二、三、四依次对应第四部分第（二）节中四类价格调整场景。碳价格单位为元/吨，附加碳成本单位为元/千瓦时，碳减少量单位为万吨。

据中国碳排放交易网显示，2019年5月以来，北京试点碳价格超过75元/吨，但重庆、广东、天津等地价格低于25元/吨。因此，在统一碳市场的建设背景下，除北京外，其他所有试点省市均需收紧配额以适度上调或大幅上调交易价格。如果各试点地区碳价格持续低迷，将会给统一碳市场的价格参数设定释放错误信号。

## 六、结论与建议

本文从电力降费和碳排放约束的双重视角出发,通过识别测算电价结构中的有效交叉补贴对全国统一碳市场的合理碳价格机制进行了设计。主要研究结论和政策建议如下。

首先,现阶段中国的电力降费目标和碳排放目标存在一定的冲突,政府应在降低工业电价的同时兼顾碳减排目标。研究发现,当工业电价下降10%时,总体碳排放量将增加10.14%,单纯地理顺电价关系会导致同期碳减排目标难以实现。

其次,交叉补贴视角下的碳价格机制设计可以同时实现电价改革目标和碳排放控制目标,政府规制部门需要统筹设计电力体制改革与碳交易市场参数。工业电价降低4.3%和7%时,居民电价需要分别提高1.9分和0.4分才能达到无谓损失率目标。因此,政府应适时提高居民电价以妥善处理政策性交叉补贴。此外,碳目标的确定也要考虑地区与时期间的差异,为碳价格参数预留一定的调整空间。

再次,随着碳约束程度以及工业电价下降幅度的增加,统一碳市场的价格逐渐升高。统一碳市场价格参数的设定可以参考碳试点省市历史经验,但要考虑统一碳市场背景下电价调整和碳价格的内在联系。工业电价降低10%时,基于三种碳强度目标情景,碳价格从21元/吨逐渐提高至95元/吨,现行碳试点省市平均29元/吨的碳价格仅能实现碳强度保持不变的情景。

最后,为使得试点省市碳市场向全国统一碳市场平稳过渡,不同试点省市二级交易市场中的价格参数应做相应的调整和引导,以提供合理参考。北京需要在保持价格不变的基础上维持碳价格稳定;深圳和广东碳市场应适度上调价格;天津、上海、湖北和重庆碳市场则需要大幅上调交易价格。具体措施包括提高拍卖比例并设定最低拍卖价、投放和回购配额以及直接设定价格限制等。

随着统一碳市场的逐步建立,中国电力体制改革目标和碳控制目标的衔接问题得到了较多关注,交叉补贴视角下电价和碳价的关系值得进一步探索。当然,随着售电侧价格的逐步放开,减排成本将向消费侧转移,行业碳配额分配方法将面临挑战。本文所计算出的碳价格究竟是附加给发电企业还是电力用户,需要考虑碳成本转嫁问题。这将是本文后续研究中的一个重要方向。

## 参考文献

- [1] Abouleinein, S., H. El Laithy, and H. K. Al-Din, *The Impact of Phasing Out Subsidies of Petroleum Energy Products in Egypt*. Egypt: Egyptian Center for Economic Studies, 2009.

- [2] Ahamada, I., and D. Kirat, "Non-linear Pass-Through of the CO<sub>2</sub> Emission-Allowance Price onto Wholesale Electricity Prices", *Environmental Modeling & Assessment*, 2018, 23 (5), 497-510.
- [3] Amundsen, E. S., P. A. Andersen, and J. B. Mortensen, "Addressing the Climate Problem: Choice between Allowances, Feed-in Tariffs and Taxes", CESifo Working Paper No. 6926, 2018.
- [4] Atkinson, S. E., and R. Halvorsen, "A Test of Relative and Absolute Price Efficiency in Regulated Utilities", *The Review of Economics and Statistics*, 1980, 81-88.
- [5] Atkinson, S. E., and R. Halvorsen, "Parametric Efficiency Tests, Economies of Scale, and Input Demand in US Electric Power Generation", *International Economic Review*, 1984, 25 (3), 647-662.
- [6] Bhattacharyya, R., and A. Ganguly, "Cross Subsidy Removal in Electricity Pricing in India", *Energy policy*, 2017, 100, 181-190.
- [7] Bhattacharyya, S. C., *Energy Economics: Concepts, Issues, Markets and Governance*. Berlin: Springer Science & Business Media, 2011.
- [8] Böhringer, C., C. Fischer, and K. E. Rosendahl, "Cost-Effective Unilateral Climate Policy Design: Size Matters", *Journal of Environmental Economics and Management*, 2014, 67 (3), 318-339.
- [9] Boyce, J. K., "Carbon Pricing: Effectiveness and Equity", *Ecological Economics*, 2018, 150, 52-61.
- [10] Breisinger, C., W. Engelke, and O. Ecker, "Petroleum Subsidies in Yemen: Leveraging Reform for Development", The World Bank, 2011.
- [11] 蔡松峰、李继峰、张亚雄, "全国统一碳市场的政策选择与经济影响分析", 《统计与决策》, 2017年第16期, 第45—48页。
- [12] Cao, J., and V. J. Karplus, "Firm-Level Determinants of Energy and Carbon Intensity in China", *Energy Policy*, 2014, 75, 167-178.
- [13] Coady, D., I. W. Parry, and B. Shang, "Energy Price Reform: Lessons for Policymakers", *Review of Environmental Economics and Policy*, 2018, 12 (2), 197-219.
- [14] Coady, D., I. W. Parry, L. Sears, and B. Shang, *How Large Are Global Energy Subsidies*. Washington: International Monetary Fund, 2015.
- [15] Curien, N., "The Theory and Measure of Cross-Subsidies: An Application to the Telecommunications Industry", *International Journal of Industrial Organization*, 1991, 9 (1), 73-108.
- [16] 戴彦德、康艳兵、熊小平等, 《2050中国能源和碳排放情景暨能源转型与低碳发展路线图》。北京: 中国环境出版社, 2017年。
- [17] Faulhaber, G. R., "Cross-Subsidy Analysis with More than Two Services", *Journal of Competition Law and Economics*, 2005, 1 (3), 441-448.
- [18] Fjell, K., "A Cross-Subsidy Classification Framework", *Journal of Public Policy*, 2001, 21 (3), 265-282.
- [19] Floros, N., and A. Vlachou, "Energy Demand and Energy-Related CO<sub>2</sub> Emissions in Greek Manufacturing: Assessing the Impact of a Carbon Tax", *Energy Economics*, 2005, 27 (3), 387-413.
- [20] Freund, C., and C. Wallich, "Public-Sector Price Reforms in Transition Economies: Who Gains? Who Loses? The Case of Household Energy Prices in Poland", *Economic Development and Cultural Change*, 1997, 46 (1), 35-59.
- [21] Golder, B., "Energy Intensity of Indian Manufacturing Firms: Effect of Energy Prices, Technology and Firm Characteristics", *Science, Technology and Society*, 2011, 16 (3), 351-372.
- [22] Heald, D. A., "Contrasting Approaches to the 'Problem' of Cross Subsidy", *Management Accounting Research*, 1996, 7 (1), 53-72.

- [23] Heald, D. A., "Public Policy Towards Cross Subsidy", *Annals of Public and Cooperative Economics*, 1997, 68 (4), 591-623.
- [24] Hubert, F., "Cross Subsidies in Russian Electric Power Tariffs: Not as Bad as Their Reputation", Humboldt University Berlin Discussion Paper, 2002.
- [25] IEA, *Looking at Energy Subsidies: Getting the Prices Right*, Paris: OECD, 1999.
- [26] 蒋竺均、邵帅, "取消化石能源补贴对我国居民收入分配的影响——基于投入产出价格模型的模拟分析", 《财经研究》, 2013年第39卷第8期, 第17—27页。
- [27] Komive, K., L. Prokopy, and D. Lauria, "Pricing Water to Subsidize the Poor: Testing the Potential of Increasing Block Tariffs", Unpublished Paper, 2004.
- [28] Koplow, D., "Measuring Energy Subsidies Using the Price-Gap Approach: What Does It Leave Out?", Working Paper, 2009.
- [29] Laffont, J. J., and J. Tirole, *A Theory of Incentives in Procurement and Regulation*. Boston: MIT Press, 1993.
- [30] Liliya, C., and F. Gulli, "Interaction of Carbon and Electricity Prices under Imperfect Competition", MPRA Working Paper No. 5866, 2007.
- [31] Lin, B., and Z. Jiang, "Estimates of Energy Subsidies in China and Impact of Energy Subsidy Reform", *Energy Economics*, 2011, 33 (2), 273-283.
- [32] Lin, B., and X. Ouyang, "A Revisit of Fossil-Fuel Subsidies in China: Challenges and Opportunities for Energy Price Reform", *Energy Conversion and Management*, 2014, 82, 124-134.
- [33] 林伯强, "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》, 2018年第6期, 第15—23页。
- [34] 林伯强、刘畅, "中国能源补贴改革与有效能源补贴", 《中国社会科学》, 2016年第10期, 第52—71+202—203页。
- [35] 林伯强、蒋竺均、林静, "有目标的电价补贴有助于能源公平和效率", 《金融研究》, 2009年第11期, 第1—18页。
- [36] 刘明, "中国公共资金边际成本估量与分析", 《财经论丛》, 2009年第6期, 第31—38页。
- [37] 刘思东、朱帮助, "考虑碳排放权交易和电价风险的发电商优化调度", 《系统工程理论与实践》, 2015年第8期, 第2054—2063页。
- [38] 刘伟、李虹, "中国煤炭补贴改革与二氧化碳减排效应研究", 《经济研究》, 2014年第8期, 第146—157页。
- [39] 刘自敏、杨丹、冯永晟, "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》, 2017年第3期, 第181—194页。
- [40] 罗来军、刘凯、傅帅雄, "低碳总需求曲线利率效应、财富效应、汇率效应与税收效应的比较研究", 《经济学》(季刊), 2018年第17卷第1期, 第1—26页。
- [41] O'Gorman, M., and F. Jotzo, "Impact of the Carbon Price on Australia's Electricity Demand, Supply and Emissions", Crawford School of Public Policy, The Australian National University CCEP Working Paper No. 1411, 2014.
- [42] Palmer, K., "A Test for Cross Subsidies in Local Telephone Rates: Do Business Customers Subsidize Residential Customers", *The RAND Journal of Economics*, 1992, 23 (3), 415-431.
- [43] Palmer, K., "Using an Upper Bound on Stand-Alone Cost in Tests of Cross Subsidy", *Economics Letters*, 1991, 35 (4), 457-460.
- [44] 齐放、魏玢、张粒子、刘伟、李远卓, "我国销售电价交叉补贴问题研究", 《电力需求侧管理》, 2009年第11卷第6期, 第16—19页。
- [45] Qin, Q., Y. Jiao, and X. Gan, "Environmental Efficiency and Market Segmentation: An Empirical

- Analysis of China's Thermal Power Industry", *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242, Article No. 118560.
- [46] 乔晓楠, “碳峰值约束与碳配置策略: 一个电力交叉补贴定价模型”, 《城市与环境研究》, 2018年第1期, 第21—37页。
- [47] Ramsey, F. P., “A Contribution to the Theory of Taxation”, *The Economic Journal*, 1927, 37 (145), 7-61.
- [48] Sawkins, J. W., and S. Reid, “The Measurement and Regulation of Cross Subsidy. The Case of the Scottish Water Industry”, *Utilities Policy*, 2007, 15 (1), 36-48.
- [49] Sijm, J., K. Neuhoff, and Y. Chen, “CO2 Cost Pass-Through and Windfall Profits in the Power Sector”, *Climate Policy*, 2006, 6 (1), 49-72.
- [50] 田立新等, 《能源价格系统分析》。北京: 科学出版社, 2017年。
- [51] Taylor, L. D., “The Demand for Electricity: A Survey”, *The Bell Journal of Economics*, 1975, 74-110.
- [52] Vagliasindi, M., “Implementing Energy Subsidy Reforms: An Overview of the Key Issues”, Working Paper, 2012.
- [53] Vásquez Lavín, F. A., J. I. Hernandez, and R. D. Ponce, “Functional Forms and Price Elasticities in a Discrete Continuous Choice Model of the Residential Water Demand”, *Water Resources Research*, 2017, 53 (7), 6296-6311.
- [54] 魏楚、郑新业, “能源效率提升的新视角——基于市场分割的检验”, 《中国社会科学》, 2017年第10期, 第90—111+206页。
- [55] 魏立佳、彭妍、刘潇, “碳市场的稳定机制: 一项实验经济学研究”, 《中国工业经济》, 2018年第4期, 第174—192页。
- [56] Weitzman, M. L., “Voting on Prices vs. Voting on Quantities in a World Climate Assembly”, *Research in Economics*, 2017, 71 (2), 199-211.
- [57] 张晓龙、杜松怀、苏娟、范婷婷, “考虑碳排放价格的电力市场均衡分析”, 《智能电网》, 2015年第3卷第9期, 第818—822页。
- [58] 郑新业、李芳华、李夕璐、郭璇, “水价提升是有效的政策工具吗?”, 《管理世界》, 2012年第4期, 第47—59+69+187页。
- [59] 郑新业、吴施美, “电改中的监管能力建设: 必要性和举措”, 《价格理论与实践》, 2018年第1期, 第10—14页。
- [60] 周亚敏、冯永晟, “中国的电价改革与二氧化碳排放——来自市级层面的实证研究与政策启示”, 《城市与环境研究》, 2017年第1期, 第85—99页。

## Cross-Subsidy, Industrial Electricity Price Reduction and Carbon Price Mechanism Design

ZIMIN LIU\* PENGHU ZHU DAN YANG

*(Southwest University)*

YONGSHENG FENG

*(Chinese Academy of Social Sciences)*

**Abstract** It is a key issue to make clear the relationship between electricity and carbon prices. We try to analyze the deadweight loss caused by cross-subsidy of electricity during 2006-2015 in 100 Chinese cities, and design the price mechanism of China's carbon market. We find that: (1) There is a certain conflict between China's electricity price reduction and carbon emission targets; (2) Industrial and residential electricity prices need to be adjusted together to reduce cross-subsidy; (3) There is a linkage effect between carbon and electricity prices; (4) The carbon prices of pilot regions need to be moderately or substantially increased to provide a reference.

**Key Words** cross-subsidy, industrial electricity price reduction, carbon price

**JEL Classification** L94, Q51, Q58

---

\* Corresponding Author: Zimin Liu, College of Economics and Management, Southwest University, Beibei, Chongqing, 400715, China; Tel: 86-23-68251299; E-mail: ziminliu@126.com.