

# 能源效率内生性、回弹效应非对称性与减排潜力估算

## ——基于中国城市电力数据的实证分析

刘自敏<sup>1</sup> 朱朋虎<sup>2</sup> 邓明艳<sup>1</sup> 杨丹<sup>1</sup>

(1. 西南大学 经济管理学院 重庆 400715; 2. 厦门大学 中国能源政策研究院 福建 厦门 361000)

**摘要:** 能源回弹效应是能源与环境政策目标的重要威胁。通过构建附加回弹效应的能源需求随机前沿模型,利用2006—2017年中国100个城市电力消费数据,分别测算了工业及居民用电的能源效率与回弹效应,并分析了电价调整政策的影响及电力行业潜在的节能减排贡献。研究发现,中国工业与居民用电的能源效率均为非有效,均存在较程度的部分回弹效应。居民用电的回弹效应存在价格非对称性,而工业用电的回弹效应对称的。工业电价下降10%时会使其回弹效应增加15.55%,电力消费增加9.47%;实施居民阶梯电价会使其回弹效应降低20.15%,电力消费下降1.15%。电力行业通过提高用电效率可实现23.77%的节能减排量,但回弹效应会抵消13.19%的贡献。政府对工业与居民用户应使用差异化、精准化的能源价格与环境规制手段,从而更有效地实现能源效率和减排目标。

**关键词:** 能源效率; 回弹效应; 内生随机前沿模型; 非对称性; 减排潜力

中图分类号: F426; F062.9 文献标志码: A 文章编号: 1672-6049(2022)01-0064-11

### 一、引言

中国是全球第一大能源消费国和温室气体排放国。据BP统计数据显示,2019年中国一次能源消费量占全球的比例为24.3%,二氧化碳排放量的全球占比为28.8%。2020年9月,中国提出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。在全球应对气候变化的时代,中国承受着因经济高速发展带来的巨大能源供给、自身能源消费的结构性缺陷和国际温室气体减排的多重压力。面对日益严峻的能源与气候约束,提升能源开发或能源利用效率成为节能减排的关键手段之一。

提升能源效率的初衷是通过降低单位产品的能源消耗量以节约能源,从而减少温室气体排放。但大量的证据表明,由于能源回弹效应的存在,单纯地提高能效并不能完全实现理想的能源节约与减排效果<sup>[1-8]</sup>。所谓回弹效应,是指能源效率提高在降低单位产品能耗的同时也会降低产品的单位成本与价格,从而通过替代效应、收入效应以及产出效应等机制导致潜在的节能减排量被部分甚至全部抵

收稿日期: 2021-09-15; 修回日期: 2021-12-27

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); 重庆市社会科学规划重大项目“重大突发公共卫生事件下的重庆粮食能源安全研究”(2020ZDJJ02); 2021年重庆社会科学规划英才计划项目“中国家庭能源贫困问题研究: 监测、机制与治理”(2021YC016)

作者简介: 刘自敏(1981—),男,四川德阳人,经济学博士,西南大学经济管理学院教授,博士生导师,研究方向为能源经济、规制与竞争; 朱朋虎(1995—),男,安徽阜阳人,厦门大学中国能源政策研究院博士研究生,研究方向为能源经济、非线性定价; 邓明艳(1995—),女,四川冕宁人,西南大学经济管理学院博士研究生,研究方向为能源经济与政策、农村资源与环境; 杨丹(1981—),女,湖北宜昌人,通讯作者,管理学博士,西南大学经济管理学院教授,博士生导师,研究方向为能源经济与政策、农村资源与环境。

消的现象<sup>[9-40]</sup>。

自回弹效应的概念提出以来,相关文献采用了多种方法如直接测算法、价格弹性法、生命周期法、经济增长法、可计算一般均衡(CGE)模型等,对交通运输、电力消费、家庭采暖等领域的直接回弹、间接回弹以及宏观回弹效应进行了估计<sup>[11-13]</sup>。但由于研究对象的差异,现有研究并没有在研究方法上达成共识。从理论上讲,回弹效应的大小取决于能源服务需求对能源效率的弹性<sup>[14-15]</sup>。由于现实中能源服务与能源效率的可得性较差,而价格与消费数据相对较易获得,以往研究多使用能源需求价格弹性测算回弹效应。然而此替代方法存在两方面局限:一是对称假定,即假设消费者对能源效率提高和能源价格下降的反应是一样的;二是外生假定,即假设能源效率不受能源价格的影响<sup>[1,16-18]</sup>。Greening and Sanstad<sup>[19]</sup>指出家庭能源消费占比较小,尤其是当家庭耗能基本上达到饱和时,能源需求缺乏弹性,此时对称假定很难成立。而在大量的工业生产活动中,能源价格较高时,工业厂商有动机提高能源效率进而降低成本,此时外生假定不再满足。总结来说,如何更加精确地测算回弹效应一直是此研究问题的主要关注点之一。

剥离能源效率与能源价格、能源需求的相互影响是其中的重要拓展方向。Small and Dender<sup>[20]</sup>在定义回弹效应时考虑了能源效率内生性,即回弹效应与能源效率或者与能源服务的需求之间存在相互影响的关系。Hymel *et al.*<sup>[21]</sup>在考虑能源效率内生性的基础上,采用三阶段最小二乘法系统估计了美国各州燃油消费的回弹效应并进行了测算。Filippini and Hunt<sup>[22]</sup>指出传统的能源效率分析方法均未考虑能源效率对能源消费的直接影响。Orea *et al.*<sup>[16]</sup>首次将能源效率与回弹效应直接关联起来,剥离了能源效率与能源价格、能源需求等的相互影响,得出了最为接近回弹效应本质定义的结果。Llorca and Jamasb<sup>[23]</sup>、Amjadi *et al.*<sup>[24]</sup>、Zhang and Lin<sup>[25]</sup>、Du *et al.*<sup>[26]</sup>运用 Orea *et al.*<sup>[16]</sup>的方法对欧洲的公路货运、瑞典四大行业的燃料与电力、中国的交通运输系统、中国城市居民能源消费等方面的能源效率与回弹效应进行了估计。

价格上升与下降时的非对称回弹效应同样值得关注。传统的新古典经济学框架一般认为,增加或降低能源价格对需求的影响是对称的,且能源价格与效率之间无关联<sup>[27]</sup>。但这一观点受到了实证结果的挑战。Gately and Huntington<sup>[28]</sup>通过将能源价格分解为上升部分和下降部分,估计了非对称能源价格下的回弹效应,发现降低能源价格的回弹效应一般较大。Frondel and Vance<sup>[27]</sup>指出,企业对能源价格上升的反应比下降要强烈,当能源价格上升时,企业会采取提高能源效率的措施,而当能源价格回落时,这些能效措施可能也会保留。Bentzen<sup>[29]</sup>、Lin and Li<sup>[30]</sup>则指出,如果不考虑非对称价格效应,估计的回弹效应可能是有偏的。Hunt and Ryan<sup>[31]</sup>则给出了回弹效应对于价格上升与下降是非对称反应的三点可能解释,包括技术水平采用非对称、沉没投资使用非对称、规制方式非对称等。

从以上研究可以看出:首先,现有研究基于不同假设、不同方法所测算的回弹效应具有较大差异,突破现有方法的局限从而准确测算回弹效应是学界的主要关注点。其次,我国能源消费领域的回弹效应研究相比国外仍然较少,当前有关我国电力消费领域回弹效应的大多研究主要以某一类用户为主体,在同一框架下测算同一行业的不同用户的回弹效应还较为少见。最后,已有研究多聚焦于测算某一主体的回弹效应数值,而对其回弹效应的影响因素研究较为缺乏,其中的一个重要原因就是采用价格弹性法等替代方法测算回弹效应时,无法再进一步考察价格等因素对回弹效应的影响。

因此,本文尝试结合中国工业与居民电力价格变化的非对称特征,基于附加回弹效应的能源需求随机前沿模型,在同一框架下对中国城市层面工业与居民电力消费的能源效率与回弹效应进行测度。可能的贡献在于:(1)区别于以往大多研究中能源效率外生的假设,本文采用的随机前沿模型剥离了能源效率与能源价格等因素的相互影响,考察了两类用户回弹效应的影响因素;(2)本文结合工业电价下降的现实场景与居民电价提高的反事实场景,分析了电价调整对回弹效应及电力消费的影响,并从能源效率改进的视角测算了各地区潜在的节能减排贡献,为电力消费领域节能减排的政策思路设

计提供了重要参考。

## 二、模型构建

### (一) 能源效率内生性下的随机前沿分析模型

本文采用 Orea *et al.*<sup>[16]</sup> 提出的能源需求前沿改进模型。该模型在 Filippini and Hunt<sup>[32-33]</sup> 提出的标准能源需求前沿模型的基础上附加回弹效应参数作为调整因子, 通过估计此模型区分能源价格和能源效率对能源消费的影响, 从而同时测量更为精确的能源效率和回弹效应。改进后的模型为:

$$\ln q = \ln f(Y, P, X, \beta) + v + (1 - R)u \quad (1)$$

其中  $q$  是能源需求量,  $Y$  是实际收入,  $P$  是能源价格,  $X$  是其他影响能源需求的控制变量,  $\beta$  为待估参数向量,  $f(Y, P, X, \beta)$  表示效率前沿面。此时, 式(1)中能源需求不再与能源效率成比例变化, 消除了回弹效应恒为 0 的局限, 但同时也不能再通过能源效率弹性计算回弹效应  $R$ 。为此, Orea *et al.*<sup>[16]</sup> 将  $R$  定义为能源需求的一组影响因素, 并将其纳入能源需求前沿模型中, 如下所示<sup>①</sup>:

$$\ln q = \ln f(Y, P, X, \beta) + v + (1 - R(\gamma'z))u \quad (2)$$

式(2)中, 向量  $z$  表示一系列影响回弹效应的因素, 包括能源价格等变量,  $\gamma'$  为待估参数向量。可以看出, 此方法实现了能源效率和回弹效应的同时估计, 并且可以考察不同因素对回弹效应的影响, 所估计的能源回弹效应也最接近回弹效应的本质定义。进一步地, 我们需要指定回弹效应的函数形式, Orea *et al.*<sup>[16]</sup> 指出 SFA 框架下回弹效应可尝试采用如下函数形式进行计算:

$$R(\gamma'z) = \frac{\exp(\gamma'z)}{\exp(\gamma'z) + 1} \quad (3)$$

$$R(\gamma'z) = \frac{\exp(\gamma'z) - 1}{\exp(\gamma'z)} \quad (4)$$

其中, 式(3)只包含了部分回弹效应, 即  $0 < R < 1$ , 式(4)包含了超级节能情景, 即  $R < 1$ 。

### (二) 回弹效应的非对称性

我们进一步分析由于能源效率的不同所引致能源使用量的非对称变化, 进而导致能源回弹效应对于不同用户, 甚至同一用户在价格上升或下降时的回弹效应的差异。具体地, 我们通过图 1 中不同能源效率下能源消费量的变化进行分析。

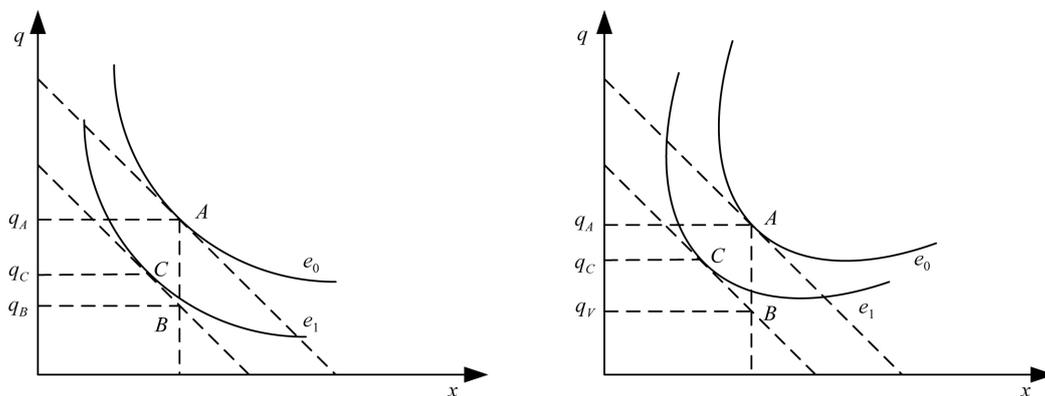


图 1 非对称能源回弹效应

图 1 中  $(x, q)$  为消费者的消费组合。其中  $x$  为其他非能源产品, 并一般化为计价物,  $q$  为能源产品。两条斜线为不同的等价格曲线, 两条曲线代表不同的能源生产(技术)效率水平。在初始能源效率水平  $e_0$  下, 消费者的最优决策点在点 A 处, 此时的能源使用量为  $q_A$ 。理想状态下由于能源效率提高到  $e_1$ , 能源使用量调整为  $q_B$ , 此时潜在的能源节约量(Potential Savings PS)为  $q_A - q_B$ 。但由于能源效率提

<sup>①</sup>需要指出, 式(2)中, 只有  $1 - R(\gamma'z)$  的值为正才能将整个误差项分解为无效率项和随机干扰项, 即  $R(\gamma'z) < 1$ 。这意味着式(2)不能识别完全回弹( $R = 1$ )以及逆反效应( $R > 1$ )。

高,引致能源价格下降,在替代作用的影响下,最优决策点由点  $B$  移动到点  $C$ ,实际的能源节约量 (Actual Savings  $AS$ ) 为  $q_A - q_C$ 。由此定义直接回弹效应为:

$$R = \frac{PS - AS}{PS} = \frac{(q_A - q_B) - (q_A - q_C)}{q_A - q_B} = \frac{q_C - q_B}{q_A - q_B} = f(e) \quad (5)$$

也就是说,回弹效应受到能源效率的影响,是能源效率的函数  $R = f(e)$ 。因此,左右两图中的能源生产效率不同,因此最终引致左右图中的回弹效应值存在非对称性。

一般化地,我们可以从理性消费者效用最大化角度刻画非对称回弹效应。能源服务量  $s$  由能源效率  $e$  及能源消费量  $q$  决定,三者之间的关系为:

$$s = e \times q \quad (6)$$

设定消费者  $i$  的效用函数为  $U_i(x, s)$ , 消费者的预算约束为  $w$ 。此时消费者的理性决策为:

$$\max_{x, s} U_j(x, s) \quad (7)$$

$$s. t. s_j = e_j \times q_j; x + p_j \times q_j \leq w; j = i, h \quad (8)$$

对于工业能源用户  $i$  与居民能源用户  $h$  来说,能源效率  $e_j$  存在差异,此时式(7)中的最优实际能源服务量  $s_j$  就会存在差异,那么由式(6)可知,能源消费量存在差异;进一步由式(5)可知,不同类型用户的回弹效应有差异,即存在非对称回弹效应。

此外,本文进一步分解能源价格以考察消费者的非对称价格反应。借鉴 Gately and Huntington<sup>[28]</sup>、Lin and Li<sup>[30]</sup> 的做法,原始能源价格可分解为最高历史价格、价格累计上升和价格累计下降三部分,其对数化表达式为:

$$\ln p_t = \max(\ln p_t) + inc(\ln p_t) + dec(\ln p_t) \quad (9)$$

其中  $\ln p_t$  表示消费者在第  $t$  期所面临的实际能源价格的对数,  $\max(\ln p_t)$ 、 $inc(\ln p_t)$ 、 $dec(\ln p_t)$  分别表示从第  $t$  期实际能源价格里分解出来的最高历史价格、价格累计上升幅度、价格累计下降幅度,三部分具体分解公式为:

$$\begin{cases} \max(\ln p_t) = \max(\ln p_1, \ln p_2, \dots, \ln p_t) \\ inc(\ln p_t) = \sum_{i=2}^t (0, (\max(\ln p_{t-1}) - \ln p_{t-1}) - (\max(\ln p_t) - \ln p_t)) \\ dec(\ln p_t) = \sum_{i=2}^t (0, (\max(\ln p_{t-1}) - \ln p_{t-1}) - (\max(\ln p_t) - \ln p_t)) \end{cases} \quad (10)$$

### 三、数据说明

本研究所使用的电价数据来自各省、市发改委网站和中国价格信息网,具体包括我国大陆地区 31 个省(市、自治区)的 100 个典型城市在 2006 年至 2017 年的居民与工业用电月度价格,且分布较为均衡,各省(市、自治区)平均包含 2 至 3 个城市(西藏除外)。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、工资额、人口数、企业数、家用电器等均来自历年《中国城市统计年鉴》,气候变量数据来源于中国气象数据网,碳排放量由用电量、电源结构和历年《中国区域电网基准线排放因子》计算得出。因为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,得到年度电价并和其他变量进行匹配,形成本文分析的完整数据库。各主要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)	1107	92.860	123.800	0.220	855.620
	居民用电(亿千瓦时)	1105	19.580	30.450	0.118	208.110
碳排放	工业碳排放(万吨)	1107	918.055	1156.411	2.336	6998.550
	居民碳排放(万吨)	1105	193.196	278.763	1.213	1868.306
	排放因子(吨/千千瓦时)	1200	1.013	0.132	0.797	1.302

表 1(续)

变量		观察值	平均值	标准误	最小值	最大值
电价	工业电价(元)	1 070	0.734	0.116	0.444	0.980
	居民电价(元)	1 198	0.524	0.057	0.380	0.760
工业变量	工业企业数(家)	1 136	1 026.433	1 881.367	12	18474
	第二产业从业人员(万人)	1 120	30.157	39.110	0.070	299.802
	第二产业生产总值(亿元)	1 144	885.700	1 280.400	4.111	8 102.010
	资本存量(亿元)	1 140	327.220	475.277	55.784	36 400.050
	石油气工业用量(吨)	1 107	34 648	90 155	0	778 670
	工资总额(亿元)	1 122	312.620	726.200	4.967	8 365.300
居民变量	总人口(万人)	1 134	232.008	271.900	18.640	2 140.350
	地区生产总值(亿元)	1 135	2 002.501	3285	25.160	25 136.420
	居民储蓄(亿元)	1 113	1 759.280	3 132.100	33.890	24 214.460
	石油气居民用量(吨)	1 102	31 565.570	60 080.410	4	468 499
气候变量	平均气温(0.1度)	1 112	146.730	49.260	42	254
	最低气温(0.1度)	1 094	108.099	57.777	-7	220
	最高气温(0.1度)	1 094	199.907	43.394	98	282
	平均湿度(%)	1 112	64.582	10.380	31	85

注:数据来源于中国价格信息网、《中国区域电网基准线排放因子》(2007—2017)、《中国城市统计年鉴》(2007—2018)、中国气象数据网。

#### 四、回弹效应估计

##### (一) 回弹效应非对称性的估计与检验

工业用户与居民用户的电力消费用途具有较大差别,工业用电主要作为生产过程中的能源投入,而居民用电则主要用于满足其基本生活需要,同时,两类用户电力消费的影响因素差别较大。具体地,工业用电主要受电力价格、产量目标以及能源替代品价格等因素的影响,而居民用电则主要受电力价格、家庭收入、家庭人口规模等影响。式(11)分别对两类用户构建能源需求前沿模型:

$$\begin{cases} \ln q_{it} = \alpha_1 + \beta_1 \ln p_{it} + \phi_1 X_{it} + (1 - R(\gamma_1' z_{it})) \mu_{it} + v_{it} \\ \ln q_{ht} = \alpha_2 + \beta_2 \ln p_{ht} + \phi_2 X_{ht} + (1 - R(\gamma_2' z_{ht})) \mu_{ht} + v_{ht} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中  $q_{it}$ 、 $q_{ht}$  分别为工业与居民用户的用电量,  $p_{it}$ 、 $p_{ht}$  分别为工业与居民用电价格;  $X_{it}$  为其他影响工业用电的控制变量,包括第二产业产值( $gdpi_{it}$ )、企业数量( $amount_{it}$ )以及气候变量;  $X_{ht}$  为其他影响居民用电的控制变量,包括工资总额( $income_{ht}$ )、城市总人口( $popu_{ht}$ );  $\mu_{it}$ 、 $\mu_{ht}$  分别为工业与居民用电过程中的无效率项,  $v_{it}$ 、 $v_{ht}$  分别为其估计方程中的随机干扰项。 $z_{it}$ 、 $z_{ht}$  分别表示工业与居民用电过程中回弹效应的影响因素,其具体表达式为<sup>①</sup>:

$$\begin{cases} \gamma_1' z_{it} = \gamma_{0i} + \gamma_{1i} \ln p_{it} + \gamma_{2i} \ln gdpi_{it} + \gamma_{3i} \ln scale_{it} \\ \gamma_2' z_{ht} = \gamma_{0h} + \gamma_{1h} \ln p_{ht} + \gamma_{2h} \ln gdph_{ht} + \gamma_{3h} \ln peo_{ht} \end{cases} \quad (12)$$

其中,影响工业用电回弹效应的因素包括工业电价、第二产业产值以及企业规模( $scale_{it}$ );影响居民用电回弹效应的因素包括居民电价、人均GDP( $gdph_{ht}$ )、家庭人口规模( $size_{ht}$ )。此外,结合式(9),分别将工业电价与居民电价的价格分解项代替式(12)中的原始价格,以进一步检验两类用户电力消费过程中是否存在价格变化引致的非对称回弹效应。所有模型的估计结果如表2所示。

表2中,模型(1)和模型(4)分别为工业与居民用电的标准能源需求随机前沿模型,模型(2)和模型(5)在模型(1)和模型(4)的基础上增加了回弹效应函数,模型(3)和模型(6)又进一步将回弹效应函数中的原始价格进行了分解<sup>②</sup>。从能源需求前沿函数估计结果来看,电力价格对两类用户的电力需

①需要说明的是,式(12)中的截距项不能直接进行估计。

②在模型(3)和模型(6)中,采用式(9)中的最大历史价格分解项  $\ln(\max p)$  替代  $\ln p$ 。

求均具有显著的负向影响。对于工业用电,工业企业数量与第二产业产值均与用电量成正相关关系。对于居民用户,工资总额与人口数量的系数均显著为正,表明随着人口数量、家庭收入水平等的提高,居民电力需求也会增加。

在回弹效应的影响因素结果中,电力价格对两类用户的回弹效应具有显著的负向影响,这是因为电力价格的上涨意味着能源成本的增加,导致电力需求降低<sup>[23, 25]</sup>。但将价格分解后,只有居民用电存在非对称的价格效应,即价格下降导致回弹效应增大。可能的原因是当前我国居民电价长期处于较低水平,随着居民收入水平的提高,其电力支出所占份额逐渐降低,居民对价格上涨的反应不如价格下降时期明显。而工业用电对价格波动无差异的原因可能来自以下两个方面:一是,当前我国的电价仍没有完全实现市场化定价,电力价格波动不能体现市场供求关系的变化,这就导致能源效率的改进往往不能顺利传导至电力价格;二是,由于电力资源作为工业生产活动中的重要投入,长期较高的工业电价使得工业企业对电价的波动比较敏感,企业根据价格波动及时调整生产规模或进行能源替代等,进而工业用电不存在非对称的价格反应。

表2 能源需求随机前沿模型估计结果

	工业用电			居民用电				
	变量	(1)	(2)	(3)	变量	(4)	(5)	(6)
能源需求	lnp	-1.060*** (0.191)	-0.873*** (0.227)	-0.876*** (0.227)	lnp	-0.499*** (0.130)	-0.495*** (0.089)	-0.493*** (0.086)
	lngdpi	0.629*** (0.035)	0.532*** (0.037)	0.458*** (0.039)	lnincom	0.553*** (0.019)	0.540*** (0.022)	0.541*** (0.021)
	lnamout	0.204*** (0.037)	0.317*** (0.039)	0.383*** (0.041)	lnpopu	0.494*** (0.029)	0.523*** (0.032)	0.525*** (0.032)
	time	0.001 (0.007)	0.014* (0.007)	0.015* (0.008)	time	-0.010** (0.004)	-0.006 (0.005)	-0.007 (0.005)
	气候变量	YES	YES	YES	气候变量	YES	YES	YES
	区域固定	YES	YES	YES	区域固定	YES	YES	YES
	常数项	-2.057 (14.861)	-27.665* (15.018)	-30.033* (15.417)	常数项	20.437** (8.354)	11.589 (9.168)	13.635 (9.074)
回弹效应	lnp		-2.800*** (1.020)	-2.849*** (1.036)	lnp		-16.260*** (3.682)	-17.798*** (3.949)
	lndecp			-1.277 (5.342)	lndecp			8.967** (3.788)
	lngdpi		3.308*** (0.409)	3.303*** (0.410)	lngdph		-0.014 (0.056)	-0.006 (0.052)
	lnscale		-0.891*** (0.246)	-0.900*** (0.260)	lnsize		-3.200** (1.264)	-3.238** (1.269)
	常数项		10.787*** (3.717)	1.119*** (0.420)	常数项		3.494*** (0.536)	3.706*** (0.572)
	logu <sup>2</sup>	-11.304 (737.725)			logu <sup>2</sup>	-13.227 (775.980)		
	logv <sup>2</sup>	-0.850*** (0.043)	-0.918*** (0.044)	-1.034*** (0.049)	logv <sup>2</sup>	-1.968*** (0.043)	-2.037*** (0.046)	-2.045*** (0.046)
LL	-1087.177	-1064.882	-1050.278	LL	-472.694	-445.887	-444.103	
观察值	1094	1091	1091	观察值	1087	1051	1051	

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

(二) 区域能源效率与回弹效应结果  
基于表2模型(2)与模型(6)的估计结果,利用式(3),计算各城市样本期间的能源效率与回弹效应值<sup>①</sup>,如表3所示。表3中,样本期内我国城市层面工业与居民用电的平均效率分别为0.68和0.91,居民用电效率远高于工业用电,且接近能源有效( $e=1$ ),工业用电则存在较大的效率提升空间。回弹效应方面,工业与居民用电的平均回弹效应值分别为43.73%和55.71%,这意味着用电效率提高所带来的大部分潜在节约被抵消。

表3 八大经济区工业与居民用电的能源效率与回弹效应

综合经济区	工业用电		居民用电	
	能源效率	回弹效应(%)	能源效率	回弹效应(%)
东北	0.724	39.48	0.961	76.43
北部沿海	0.695	41.44	0.941	53.26
东部沿海	0.816	63.09	0.934	50.52
南部沿海	0.853	50.16	0.769	34.78
黄河中游	0.437	41.03	0.946	72.17
长江中游	0.718	33.00	0.848	20.61
大西南	0.751	45.01	0.935	69.30
大西北	0.347	48.45	0.964	83.88
平均	0.681	43.73	0.910	55.71

注:限于篇幅,各省份的具体结果留存备案。

分区域来看,工业用电的能源效率以及回弹效应具有一定的地区差异,其中东部区域能源效率以及回弹效应较高,西部相对较低。可能的原因是我国东部地区经济发展水平较高,其能源利用效率也相对更高,能源效率提高所引致的能源价格下降导致较大的能源需求以扩大再生产。而对于居民用户,各大经济区的能源利用效率不存在明显差异,大部分区域的能源效率超过0.90,最低也接近0.80,但西部地区的回弹效应相对东部、中部地区较高。这很可能与我国普遍较低的居民用电价格及居民收入水平提高有关,随着收入水平的逐年提高,电力需求逐渐饱和,回弹效应随之下降。

## 五、电价调整评估与减排潜力估算

### (一) 电价调整对电力消费的影响

我国电力领域长期存在着严重的交叉补贴现象,即电价较高的工商业用户补贴电价较低的居民用户。降低交叉补贴以优化电价形成机制是当前电力体制改革的核心内容,接下来进一步分析电价调整对回弹效应及电力消费的具体影响。

需要指出的是,是否考虑电价变化对回弹效应的影响,最终的电力消费变化是不同的。以工业降价为例, $q_0$ 为当前工业电力消费量,在不考虑价格对回弹效应的影响时,在常弹性假设下,工业用电的变化可直接根据价格弹性降价比例计算得到。但电价下降还会使回弹效应增大,即相同比例的价格下降将会导致更多的电力消费增加量。因此,区别于刘自敏等<sup>[34]</sup>的研究,本文在考虑回弹效应的基础上进一步考察电价调整的影响。

我们根据现实情景中的工业电价变化,模拟分析工业电价连续两次降低10%对电力消费及其碳排放的影响(分别为情景一、情景二);在此基础上,根据反事实情景下的居民电价上涨,考察居民电价如若连续两次提高2.25%对电力消费及其碳排放的影响(分别为情景三、情景四)。四种情景下的模拟分析结果如表4所示。

表4显示,在考虑价格下降对回弹效应的影响时,在全国层面上工业电价降低10%,工业回弹效应将增加15.55%,工业电力消费及其碳排放量增加9.47%;若工业电价再降低10%,则回弹效应将再增19.91%,工业电力消费及其碳排放量将增长19.82%。对居民用户而言,居民电价上涨2.25%后,居民回弹效应将降低20.05%,居民电力消费及其碳排放量将下降1.15%;居民电价再涨2.25%后,回弹效应将再降12.71%,此时居民电力消费的节能减排量达2.25%。在区域层面上,相同幅度的电价调整策略对不同地区的影响不存在显著差异。

<sup>①</sup>限于篇幅,此处的结果为使用调整后的 $\gamma_0$ 的估计结果,不包含截距项,不调整截距项的估计结果留存备案。

表4 电价调整对回弹效应及节能减排的影响

			东北	北部沿海	东部沿海	南部沿海	黄河中游	长江中游	大西南	大西北	平均
工业用电	回弹效应变化	2017	56.95	56.03	68.13	49.48	58.38	49.55	45.11	48.40	55.54
		情景一	72.89	71.72	87.21	63.33	74.73	63.43	57.74	61.95	71.09
		情景二	93.30	91.80	111.63	81.07	95.65	81.19	73.91	79.30	91.00
	节能减排变化	情景一	9.47	8.62	9.63	9.62	9.59	9.63	9.62	9.63	9.47
		情景二	19.82	17.97	20.18	20.16	20.09	20.17	20.16	20.18	19.82
		2017	80.49	56.36	50.96	34.75	70.49	20.25	59.95	86.29	54.80
居民用电	回弹效应变化	情景三	51.04	35.74	32.31	22.04	44.70	12.84	38.02	54.72	34.75
		情景四	32.37	22.67	20.49	13.97	28.35	8.14	24.11	34.70	22.04
		情景三	-1.38	-1.47	-1.73	-0.94	-0.20	-1.00	-1.50	-1.13	-1.15
	节能减排变化	情景四	-2.73	-2.91	-3.43	-1.84	-2.64	-1.92	-2.97	-2.22	-2.25

注:表中数据均为百分比,各省份的具体结果留存备案。

## (二) 电力行业碳减排贡献估算

前文结果表明回弹效应抵消了大部分能源效率改善所带来的节能与减排效果,但不可否认,提高能源效率仍是能源发展规划中最基础的节能减排手段。因此,本文还从能源效率改善的视角探讨电力行业潜在的节能减排贡献,以期为电力行业碳达峰的路径设计提供必要的量化参考。具体地,我们模拟分析当工业与居民用电效率均提高至能源有效时( $e=1$ ),各地区潜在的、回弹效应抵消的以及实际的节能减排比例,结果如表5所示。

表5 效率改进的潜在节能减排贡献

	东北	北部沿海	东部沿海	南部沿海	黄河中游	长江中游	大西南	大西北	平均
工业效率提升空间	0.375	0.320	0.188	0.149	0.486	0.189	0.170	0.515	0.276
居民效率提升空间	0.037	0.057	0.063	0.199	0.053	0.159	0.089	0.035	0.092
潜在节能减排比例	31.45	26.04	16.64	16.24	41.13	18.00	15.39	45.79	23.77
其中:工业	30.79	24.75	15.55	10.92	40.22	13.22	13.61	45.37	21.86
其中:居民	0.66	1.29	1.09	5.31	0.91	4.78	1.77	0.42	1.91
回弹效应抵消比例	18.07	14.60	11.15	7.25	24.12	7.52	7.20	22.32	13.19
其中:工业	17.53	13.87	10.60	5.40	23.48	6.55	6.14	21.96	12.14
其中:居民	0.53	0.73	0.55	1.85	0.64	0.97	1.06	0.36	1.05
实际节能减排比例	13.38	11.44	5.49	8.99	17.01	10.48	8.19	23.47	10.58
其中:工业	13.26	10.88	4.95	5.52	16.74	6.67	7.47	23.41	9.72
其中:居民	0.13	0.56	0.54	3.46	0.27	3.81	0.71	0.06	0.86

注:表中节能减排比例数据为百分比。

表5中,由于居民用电量占全部用电量的比例以及居民用电效率的提升空间均较小,工业用电贡献了绝大部分节能减排量。当消除所有的工业与居民用电无效率后,潜在的节能减排比例约为23.77%,但回弹效应会抵消13.19%的节能减排比例,从而实际节能减排比例为10.58%。也就是说,仅通过提高能源效率这一措施,电力行业最多可贡献10.58%的减排比例。因此,不能因回弹效应的存在而放弃改进能源效率,提高用电效率,尤其是工业用电效率仍应是能源体制改革的重要方向。

## 六、结论与政策建议

本文通过构建附加回弹效应的能源需求随机前沿模型,考察了我国100个典型城市在2006—2017年的工业与居民电力消费的能源效率与回弹效应及其影响因素,模拟分析了电价调整策略对回弹效应及电力消费的影响,并测算了电力行业潜在的节能减排贡献。本文的研究结论和政策建议主要包括以下几个方面。

首先,我国工业与居民的用电效率均非有效,且均存在不同程度的部分回弹效应,并且工业回弹效应呈现逐渐上升趋势,居民回弹效应呈缓慢下降趋势。这意味着能源效率改进所带来的大部分节能减排效果会被抵消,政府可采用能源补贴与征收碳税并施等政策组合方式限制回弹效应。同时,应在考虑区域性差异的基础上制定不同的能源发展规划,如对能源效率与回弹效应较低的地区,应优先提升其能源效率,而对能源效率较低但回弹效应较高的地区,应在提高能源效率的同时更加注重对回弹效应的限制。

其次,工业电价的非对称变化不会导致非对称回弹效应,而居民用电存在非对称回弹效应,并且价格等因素对两类用户的回弹效应具有重要影响。鉴于工业用电量以及碳排放量占比较大,应充分利用价格、征税等规制手段,并考虑结合扩大企业规模等措施限制工业回弹效应。而对居民用户来讲,虽然当前我国居民电价处于较低水平,但鉴于居民对电价调整的可接受性较差,因此限制其回弹效应的思路除了价格手段外,还应包括节约理念的推广等非价格手段以改变居民的消费观念与消费行为,引导其形成节能低碳的生活方式。

最后,当前电价调整策略会对回弹效应以及电力消费及其碳排放产生较大影响。从能源效率的视角看,提升各地区能源效率仍存在较大节能减排空间。在推进电力体制改革的进程中,政府不能只关注调整电力价格以降低交叉补贴,还应考虑施以合理的政策组合如征收能源税、环境税等措施降低回弹效应。如果征税对象是电力生产企业,还要辅以政策保证成本顺利传导至消费者,才能消除其对能源效率改善的不利影响。此外,电力管制与能效改进所引致的价格变化具有根本性差异,在对回弹效应进行限制的基础上,政府仍应该将提高能源效率作为能源发展战略中的重要方向。

## 参考文献:

- [1]SORRELL S, DIMITROPOULOS J, SOMMERVILLE M. Empirical estimates of the direct rebound effect: a review [J]. Energy policy, 2009, 37(4): 1356-1371.
- [2]LI J, LIN B. Rebound effect by incorporating endogenous energy efficiency: a comparison between heavy industry and light industry [J]. Applied energy, 2017, 200(C): 347-357.
- [3]YAN Z, OUYANG X, DU K. Economy-wide estimates of energy rebound effect: evidence from China's provinces [J]. Energy economics, 2019, 83: 389-401.
- [4]国涓,郭崇慧,凌煜.中国工业部门能源反弹效应研究[J].数量经济技术经济研究,2010(11):114-126.
- [5]邵帅,杨莉莉,黄涛.能源回弹效应的理论模型与中国经验[J].经济研究,2013(2):96-109.
- [6]胡秋阳.回弹效应与能源效率政策的重点产业选择[J].经济研究,2014(2):128-140.
- [7]冯烽.能效改善与能源节约:助力还是阻力——基于中国20个行业能源回弹效应的分析[J].数量经济技术经济研究,2018(2):82-98.
- [8]胡东兰,申颀,刘自敏.中国城市能源回弹效应的时空演变与形成机制研究[J].中国软科学,2019(11):96-108.
- [9]GREENING L A, GREENE D L, DIFIGLIO C. Energy efficiency and consumption—the rebound effect—a survey [J]. Energy policy, 2000, 28(6-7): 389-401.
- [10]BERKHOUT P H G, MUSKENS J C, VELTHUIJSEN J W. Defining the rebound effect [J]. Energy policy, 2000, 28(6-7): 425-432.

- [11] 查冬兰, 周德群. 为什么提高能源效率没有减少能源消费——能源效率回弹效应研究评述[J]. 管理评论, 2012(1): 45-51.
- [12] GILLINGHAM K, RAPSON D, WAGNER G. The rebound effect and energy efficiency policy[J]. Review of environmental economics and policy, 2016, 10(1): 68-88.
- [13] 杨莉莎, 朱俊鹏, 贾智杰. 中国碳减排实现的影响因素和当前挑战——基于技术进步的视角[J]. 经济研究, 2019(11): 118-132.
- [14] SORRELL S, DIMITROPOULOS J. The rebound effect: microeconomic definitions, limitations and extensions[J]. Ecological economics, 2008, 65(3): 636-649.
- [15] SAUNDERS H D. Fuel conserving (and using) production functions[J]. Energy economics, 2008, 30(5): 2184-2235.
- [16] OREA L, LLORCA M, FILIPPINI M. A new approach to measuring the rebound effect associated to energy efficiency improvements: an application to the US residential energy demand[J]. Energy economics, 2015, 49: 599-609.
- [17] 李金铠, 刘宗项, 张瑾, 等. 能源回弹效应研究述评[J]. 管理学报, 2018(1): 9-21.
- [18] 杨莉莉, 邵帅. 能源回弹效应的理论演进与经验证据: 一个文献述评[J]. 财经研究, 2015(8): 19-38.
- [19] GREENING L S, SANSTAD A H. Empirical and theoretical implications of the rebound effect at the microlevel[R]. Berkeley, Lawrence Berkeley National Laboratory, 1995.
- [20] SMALL K A, DENDER K V. Fuel efficiency and motor vehicle travel: the declining rebound effect[J]. The energy journal, 2007, 28(1): 25-51.
- [21] HYMEL K M, SMALL K A, DENDER K V. Induced demand and rebound effects in road transport[J]. Transportation research part b: methodological, 2010, 44(10): 1220-1241.
- [22] FILIPPINI M, HUNT L C. Measurement of energy efficiency based on economic foundations[J]. Energy economics, 2015, 52(S1): 5-16.
- [23] LLORCA M, JAMASB T. Energy efficiency and rebound effect in European road freight transport[J]. Transportation research part a: policy and practice, 2017, 101(C): 98-110.
- [24] AMJADI G, LUNDGREN T, PERSSON L. The rebound effect in Swedish heavy industry[J]. Energy economics, 2018, 71(C): 140-148.
- [25] ZHANG S, LIN B. Investigating the rebound effect in road transport system: empirical evidence from China[J]. Energy policy, 2018, 112(1): 129-140.
- [26] DU K, SHAO S, YAN Z. Urban residential energy demand and rebound effect in China: a stochastic energy demand frontier approach[J]. Energy journal, 2020, 42(2): 175-194.
- [27] FRONDEL M, VANCE C. Re-identifying the rebound: what about asymmetry? [J]. The energy journal, 2013: 42-54.
- [28] GATELY D, HUNTINGTON H G. The asymmetric effects of changes in price and income on energy and oil demand[J]. Energy journal, 2002: 19-55.
- [29] BENTZEN J. Estimating the rebound effect in US manufacturing energy consumption[J]. Energy economics, 2004, 26(1): 123-134.
- [30] LIN B, LI J. The rebound effect for heavy industry: empirical evidence from China[J]. Energy policy, 2014, 74: 589-599.
- [31] HUNT L C, RYAN D L. Catching on the rebound: why price elasticities are generally inappropriate measures of rebound effects[R]. Surrey Energy Economics Centre, 2014.
- [32] FILIPPINI M, HUNT L C. Energy demand and energy efficiency in the OECD countries: a stochastic demand frontier approach[J]. Energy journal, 2011: 59-80.
- [33] FILIPPINI M, HUNT L C. US residential energy demand and energy efficiency: a stochastic demand frontier approach

[J]. *Energy economics*, 2012, 34(5): 1484-1491.

[34] 刘自敏 朱朋虎 杨丹 等. 交叉补贴、工业电力降费与碳价格机制设计[J]. *经济学(季刊)* 2020(2): 709-730.

(责任编辑: 刘淑浩; 英文校对: 葛秋颖)

## Endogenous Energy Efficiency , Rebound Effect Asymmetry , and Emission Reduction Potential Estimation:

### An Empirical Analysis Based on City Power Data in China

LIU Zimin<sup>1</sup> , ZHU Penghu<sup>2</sup> , DENG Mingyan<sup>1</sup> , YANG Dan<sup>1</sup>

( 1. School of Economics and Management , Southwest University , Chongqing 400715 , China;

2. China Institute for Studies in Energy Policy , Xiamen University , Xiamen 361000 , China)

**Abstract:** The energy rebound effect is a key threat to energy and environmental policy objectives. By constructing a stochastic frontier approach with additional rebound effect and using 100 cities electricity consumption data from 2006 to 2017 in China , this paper , measures energy efficiency and rebound effect of industrial and residential electricity consumption respectively , and analyzes the impact of the electricity adjustment policies and potential contributions of energy conservation and emission reduction in the electricity industry. The results show that the energy efficiency of both industrial and residential electricity consumption in China is non-effective , and both have a high degree of a partial rebound effect. The rebound effect for residential electricity has price asymmetry , while that for industrial electricity is symmetric. A 10% decrease in industrial electricity prices increases the rebound effect by 15.55% , and increases electricity consumption by 9.47% , while the implementation of residential block electricity prices decreases the rebound effect by 20.15% and decreases electricity consumption by 1.15% . The electricity industry can achieve 23.77% of energy conservation and emission reduction by improving efficiency , but the rebound effect will offset 13.19% of the contribution. The government should use differentiated and precise energy pricing and environmental regulation instruments for industrial and residential customers to more effectively achieve energy efficiency and emission reduction targets.

**Key words:** energy efficiency; rebound effect; endogenous stochastic frontier model; asymmetric; emission reduction potential