

# 能源价格、技术进步与 能源强度

——基于中国城市数据的动态时空演化

冯永晟 张 娅 刘自敏

**摘 要** 深入考察能源价格与技术进步对能源强度的具体影响是深入推进节能降耗、实现中国绿色经济转型的关键问题。作者基于2004—2018年285个城市的面板数据，采用动态空间自回归模型和动态门槛模型分地区考察能源价格与技术进步对能源强度的空间溢出效应。结果表明：（1）能源强度具有显著的溢出效应，能源价格与技术进步是节能降耗的有效机制；（2）能源价格与技术进步对能源强度的影响存在着明显的时空异质性，能源价格影响程度表现为东北最大，西部与中部次之，东部最小；技术进步影响程度表现为西部最大，中部与东北次之，东部最小；金融危机的冲击使能源价格机制信号紊乱；（3）产业结构优化与能源消费结构转型是发挥能源价格的杠杆作用进而缓解我国目前高能源强度困境的重要举措；（4）中国能源价格与技术进步对能源强度的影响呈现阶梯式跃进，且以双结构为标准的城市分类具有显著的地域集聚特征，省会城市与直辖市在经济能源发展方面具有良好的示范效应。

**关键词** 能源强度 驱动因素 能源价格 技术进步 空间计量

【中图分类号】F206；F123.9 【文献标识码】A 【文章编号】2095-851X  
(2020)-03-0069-24

【基金项目】中国社会科学院基础研究者资助项目“提高要素资源配置效率的市场机制、国有企业与政府监管”（批准号：XJ2020007）；国家社会科学基金重大项目“面向国家能源安全的智慧能源创新模式与政策协同机制研究”（批准号：19ZDA081）；国家自然科学基金青年科学基金项目“递增阶梯定价的政策评估与优化设计研究”（批准号：71603218）；重庆市社会科学规划项目“重大突发公共卫生事件下的重庆粮食能源安全研究”（批准号：2020ZDJJ02）；重庆市发展改革委研究课题“重庆市能源生产和消费革命战略研究”（批准号：FGWXSX2020-1-9）。

【作者简介】冯永晟（1981-）中国社会科学院财经战略研究院副研究员，邮政编码：100006；张娅（1997-），西南大学经济管理学院硕士研究生，邮政编码：400715；刘自敏（1981-），西南大学经济管理学院经济研究中心教授、博士生导师，本文通讯作者，邮政编码：400715。

致谢：感谢审稿专家匿名评审，当然文责自负。

## 一、研究问题及背景

中国经济正由高速增长转向高质量发展，需要清洁低碳、安全高效的现代能源体系支撑。能源强度（Energy Intensity, EI）作为反映经济结构和能源利用效率变化的重要指标，可反映能源转型的最终成果。中国政府自党的十八大以来，提出了“能源革命”的战略思想，在《能源生产和消费革命战略（2016—2030）》中提到，2020年能源强度要比2015年下降15%，2030年要达到世界平均水平。但根据图1，中国经济产出同比增长率以2011年为节点开始总体处于下行态势，而能源消费增长率却总体持续走高，能源强度下降程度总体降低，削弱了经济产出的优势。由此，要想在“2030年前达到碳排放峰值，2060年前实现碳中和”的约束下实现我国经济的长期性与绿色性增长，就必须走“中国模式”的能源转型道路，通过动力变革、加快科技创新等方式优化能源结构，实现高碳向低碳转变、低密度向高密度发展，以及新能源与传统能源的有机多元结合，进而实现经济发展的质量变革与效率变革。

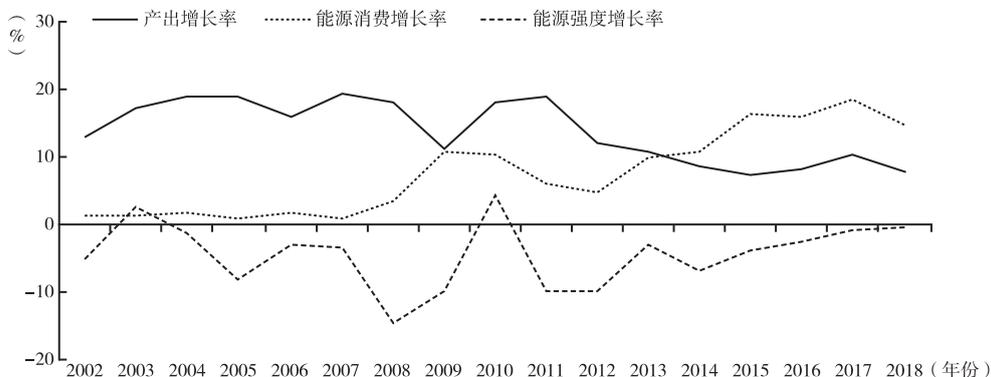


图1 中国产出、能源消费与能源强度增长率

资料来源：作者根据2003—2019年《中国统计年鉴》中实际GDP、能源消费量等数据计算得出。

通过价格机制与技术进步实现能源精细化、绿色化消费，是实现节能降耗进而推进经济社会可持续发展的重要手段。《BP世界能源统计年鉴2019》显示，2018年中国能源消费增长3.1%，连续17年成为全球能源消费增量最大的国家。从供给侧来看，根据国家统计局2019年数据，2018年能源生产结构中，化石能源占比81.2%，水电、核电、风电等清洁能源占比18.8%。从需求侧来看，中国经济的持续、高速发展产生了大量的能源需求，能源消费总量46.4亿吨标准煤，比上年增长3.3%。为改变中国目前的能源供需现状，即使能源结构正逐渐由“煤炭为主向多元化协同”转变，形成多种能源相互补充的能源供给体系，可通过价格机制与节能技术进步等形成能源均衡优化配置进而有效地降低能源强度。因此，本文在准确测度各地区的技术

进步基础上，考察能源价格与技术进步对能源强度的具体影响，对充分利用价格机制优化能源结构、促进能源转型，应对节能减排、气候变化和实现经济社会可持续发展等方面具有重要的理论和现实意义。

随着对可持续发展问题的日益重视，加快推进能源转型与实现节能降耗已成为世界各国普遍共识和一致行动，国内外学者围绕节能降耗与能源转型展开了广泛的讨论。

能源强度变化分解与影响因素分析是能源强度研究的重要内容。能源强度变化分解主要采用指数法和结构分解法对能源强度变化进行分解（吴滨、李为人，2007；齐志新、陈文颖，2006；Wei et al.，2019），孙丽文等（2019）从分区域角度对能源强度变化进行了分解，郑若娟和王班班（2011）认为其具有区域异质性，韩松等（2016）认为技术进步是能源强度降低的主要原因，傅晓霞和吴利学（2010）认为中国能源效率受到技术进步、工业化程度、重工业比重和能源价格等因素的影响。马晓微等（2017）通过构建能源强度影响模型分析各因素对能源强度变动的的影响，其中结构因素角度主要包括交通结构、产业结构（杨恺钧、杨甜甜，2018）与能源消费结构（成金华、李世祥，2010；Ma and Yu，2017；Cai and Menegaki，2019）。就制度因素角度而言，国外制度因素主要是FDI和进出口贸易（Elliott et al.，2013；林伯强、刘泓汛，2015），国内制度因素包括信息化、环境规制与市场扭曲等因素（Ma，2015；吕琦等，2019）。此外，全要素生产率（武运波、高志刚，2019）、消费者价格指数和财税政策（李香菊、祝丹枫，2020）等都是能源强度的重要影响因素。

能源价格研究主要包括能源价格行为和影响研究。一方面，能源价格行为研究主要在于分析能源价格自身的波动行为及变化趋势预测（Zhu et al.，2018），能源价格主要包括化石能源价格（石油、煤炭、天然气等的价格）、电价及新能源价格等。另一方面，能源价格的影响研究主要包括对宏观经济（林伯强、王锋，2009；Mann and Sephton，2019）、碳排放或能源强度（杭雷鸣、屠梅曾，2006；杨瑾、曹梦楠，2017；Murad et al.，2019）及金融市场的影响。Fisher-Vanden等（2004）、Cornillie和Fankhauser（2004）基于微观的层面研究发现，能源价格的提高是引起我国能耗强度削减的重要原因，能源价格提高对能耗强度下降的贡献度达到了0.544。揭水晶和何凌云（2014）研究发现，能源价格可通过调节经济规模、结构和效率等指标来调节能耗水平。此外，Wing（2006）认为要素替代是提高能源利用效率的重要途径，这种要素间的替代互补关系，可通过能源相对价格变化改变要素投入比例，进而影响能源强度（陈晓玲等，2015），能源内部要素间的替代互补效应可体现为可再生能源和非可再生能源之间的内部替代弹性（Kumar et al.，2015）。但这种通过替代弹性影响能源强度的方法，本质上仍然是发挥能源成本价格的信号引导作用。

技术进步作为影响能源强度的重要途径，也是促进能源转型的重要保障。技术进步一般可进一步细分为自主研发和技术引进（王腾等，2016），或分为中性技术进步和有偏技术进步（钱娟、李金叶，2018；Li et al.，2019）。众多学者肯定了技术进步

是改善能源效率的主要推动力 (Li and Lin, 2018; 廖进球、徐加涛, 2019; 王班班、齐绍洲, 2014; 姜彩楼等, 2015), 苏宏伟 (2016) 认为技术进步是能源强度变动的重要影响因素, 甚至是能源强度降低的主要原因 (韩松等, 2016)。但也有部分学者认为能源效率改善具有回弹效应 (邵帅等, 2013; 胡东兰等, 2019), 即技术进步能提高能源效率进而降低能源消费, 但能源效率提高意味着减少能源投入仍可以获得等量产出。此时其他投入要素 (如资本、劳动力) 可能会被能源代替, 技术进步未必能减少能源消耗, 价格、能源税等调控手段则成为提高能效的必要补充, 因此“回弹效应”在一定程度上可以作为检验技术进步与其他能效调控手段配合效果的指标。

通过梳理能源价格、技术进步和能源强度的现有研究发现: 第一, 相关实证研究主要集中在部分发达地区和全国省市层面, 缺乏城市数据分析维度的研究结果。第二, 对于能源价格而言, 在分析能源价格对能源强度的影响时, 大多忽略了价格作为杠杆的调节作用, 并且很少细化分析能源价格的影响。第三, 现存研究鲜少考虑要素空间效应的影响, 结合动态空间计量方法研究能源强度问题, 空间角度下能够充分考虑研究要素间的潜在经济地理效应, 使估计结果更加准确。

本文在测算技术进步效率基础上, 通过空间计量模型考察能源价格与技术进步对能源强度的具体影响及异质性, 并通过动态门槛模型进一步探析这种影响是否发生了结构性变化, 并借助以上实证结果提出相应的政策建议。本文的贡献和可能存在的创新点主要有以下三点: 第一, 利用城市层面数据分区域分析各因素对能源强度的动态影响, 结果切实完整, 且在时空异质性基础上进行了分区域考察, 结果更具有针对性; 第二, 联合分析了能源价格和技术进步对能源强度的影响, 并充分考虑影响能源强度的直接因素与间接因素, 估计结果更准确; 第三, 从空间视角考察能源价格与技术进步对能源强度的影响, 考虑了各要素的空间效应, 使分析结果更加透彻。

本文剩余内容安排如下: 第二节为理论模型分析, 从理论角度对价格机制与技术进步如何降低能源强度与驱动能源转型角度进行分析; 第三节研究模型构建、变量及数据处理, 首先基于理论模型推导构建相对应的计量模型, 其次对所选指标及应用数据进行说明和描述性统计; 第四节为实证结果及分析, 在测算各地区能源强度、技术进步及能源价格空间关联的基础上, 考察能源价格与技术进步对能源强度的具体影响, 进一步探析这种影响是否发生了结构性变化, 并进行区域异质性分析; 第五节基于研究结论提出相应政策建议。

## 二、理论模型分析

能源转型一般表示能源结构或能源类型的变化 (吴文文、张焱, 2019), 能源强度作为反映经济结构和能源利用效率变化的重要指标, 是能源转型成果与经济结构发展的直观体现。能源价格与技术进步作为影响能源强度的重要因素, 是实现节能降耗与能源转型的微观机制与基础, 本文从能源价格微观机制与技术进步两个角度展开理

论分析。

### (一) 理论分析

人类社会已经经历了“薪柴—煤炭—油气”的两次能源转型。Fouquet (2010) 等学者在分析能源转型历史规律的基础上预测未来的能源转型方向，高比例的可再生能源替代是国内外学者主要讨论的第三次能源转型方案（马丽梅等，2018；马丽梅等，2020）。中国目前的能源消费结构仍是以煤为主，在终端能源消费环节直接实现可再生能源对非再生能源的替代具有较大难度。电能作为连接一次能源与终端能源的桥梁（舒印彪等，2018），可将化石能源发电作为转型过渡时期的暂时选择，通过化石能源发电对化石能源的替代、清洁电对化石能源发电及化石能源的替代逐步实现节能降耗与能源转型。

要素市场替代理论表明要素价格是促进要素替代的直接驱动力，化石能源和可再生能源在市场经济中随着价格变动存在此消彼长的关联。相应地，在终端能源消费环节，当能源消费总量既定时，电能与化石能源的要素属性决定其消费量在要素市场供求机制作用下受到对方价格的直接约束。本文将能源价格细分为化石能源价格、化石能源发电价格与清洁电价格三类以准确分析能源价格波动对实现能源转型、降低能源强度的微观影响机理，并假定能源消费市场呈现不饱和特征，且化石能源与清洁电、化石能源发电（正常品）相比为劣等品，化石能源发电与清洁电（正常品）相比为劣等品。以化石能源与清洁电/化石能源发电为例，在当前市场均衡情况下，根据斯勒茨基方程（Slutsky Equation），在化石能源价格与清洁电价格/化石能源发电价格发生变化时，最终体现为清洁电/化石能源发电对化石能源的替代，即电能可在能源消费结构中所占的比例上涨。在这一由价格驱动能源类型转变的过程中，能源消费量相对减少，能源强度随之降低，具体如表 1 所示。

表 1 能源价格波动对能源消耗的影响

类别	价格波动		替代效应与收入效应		消费量	
	化石能源	清洁电/化石能源发电	化石能源	清洁电/化石能源发电	化石能源	清洁电/化石能源发电
①	$P_F \uparrow$	$P_C/P_T -$	替代/收入效应与价格呈反/同向变动，替代效应 > 收入效应	替代/收入效应与价格呈反/同方向变动，替代效应 < 收入效应	减少	减少
②	$P_F -$	$P_C/P_T \downarrow$	与价格同向变动	与价格反向变动	减少	增加
③	$P_F \uparrow$	$P_C/P_T \downarrow$	①②叠加	①②叠加	减少	增加

注： $P_C$  为清洁电价格； $P_T$  为化石能源电力价格； $P_F$  为化石能源价格。

资料来源：作者根据相关文献资料整理所得。

在投入要素不变的情况下，技术进步主要通过增加产出与减少能源投入两条途径影响能源强度，通过技术效率的提高增加产出；或通过提高能源效率进而降低能源消

费,能源效率提高意味着减少能源投入仍可以获得等量产出。技术进步是支撑价格波动影响能源强度这一过程的基础与间接驱动力,而要素投入比例的改变将刺激技术的改进和更新,使得要素使用效率提高与要素投入成本降低。在技术进步发生后,清洁电与化石能源发电对化石能源的替代速度将进一步提高,能源产业结构逐步优化,传统高耗能产业将失去优势进而被市场所淘汰,最终达到能源消耗量减少和能源强度降低的效果。需要注意的是,技术进步对能源强度存在回弹效应,此时技术进步受到其他因素制约,对降低能源强度的促进作用不明显甚至会反向提高能源强度。

产业结构是能源价格发挥价格杠杆作用进而调节能源强度的重要渠道(揭水晶、何凌云,2014)。在要素市场供求机制中,化石能源价格上升不仅会促使企业为降低生产成本而减少化石能源类的生产项目,而且会促使社会群体减少对化石能源类产品的消费。在这一作用下,将带动产业结构从化石能源类高能耗与低技术密集型产业向清洁电/化石能源发电类低能耗与高技术密集型产业转变,有效地实现了产业结构优化升级并增加了产业链各环节的附加值,以低能耗实现高经济产出进而实现节能降耗。

能源消费结构是能源价格与技术进步调节影响能源强度的另一重要渠道。现行经济生产过程中,在能耗硬性约束与降低生产成本以追逐更高利益的双重约束下,企业将增大技术革新尤其是清洁能源使用技术革新,以清洁能源的使用替代化石能源的使用,这一行为将会有效地促进能源消费结构优化。总体而言,产业结构与能源消费结构逐步优化对能源价格杠杆与技术进步影响能源强度产生了重要的调节作用(见图2)。

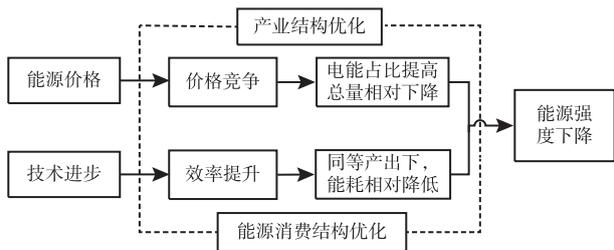


图2 理论分析框架

资料来源:作者根据相关文献资料整理所得。

## (二) 理论模型推导

本文借鉴 Fisher-Vanden 等(2004)及杭雷鸣和屠梅曾(2006)的研究方法,设定一个地区经济社会成本函数(C-D成本函数):

$$C(P_K, P_L, P_E, P_M, Y) = A^{-1} P_K^{\alpha_K} P_L^{\alpha_L} P_E^{\alpha_E} P_M^{\alpha_M} Y \quad (1)$$

其中,  $A$  为全要素生产率,  $P_K$ 、 $P_L$ 、 $P_E$ 、 $P_M$  分别为四种投入要素(资本、劳动、能源与中间产品)的价格,  $\alpha_K$ 、 $\alpha_L$ 、 $\alpha_E$ 、 $\alpha_M$  为对应要素的弹性。根据谢泼德引

理 (Shephard's Lemma), 能源投入要素的需求函数为成本函数关于能源投入价格的偏导, 即:

$$E = \partial C / \partial P_E = \alpha_E A^{-1} P_K^{\alpha_K} P_L^{\alpha_L} P_E^{\alpha_E - 1} P_M^{\alpha_M} Y \quad (2)$$

为进一步简化模型, 令产出价格  $P_Y = P_K^{\alpha_K} P_L^{\alpha_L} P_E^{\alpha_E} P_M^{\alpha_M}$ , 且  $\alpha_K + \alpha_L + \alpha_E + \alpha_M = 1$ , 则能源强度 ( $EI$ ) 表达式如式 (3) 所示, 全要素生产率、能源价格与产出价格直接影响能源强度变化。

$$EI = E/Y = \alpha_E A^{-1} P_E^{-1} P_Y \quad (3)$$

鉴于本文所采用的函数设定, 采用成本效率衡量技术变化, 成本效率  $CE$  进一步可分解为技术进步变化 ( $TE_{it}$ )、纯技术效率变化 ( $PE_{it}$ ) 与规模效率变化 ( $SE_{it}$ ), 式 (3) 可进一步转化为:

$$EI = \alpha_E CE^{-1} P_E^{-1} P_Y = \alpha_E PE^{-1} TE^{-1} SE^{-1} P_E^{-1} P_Y \quad (4)$$

### 三、模型构建、变量及数据处理

#### (一) 模型构建

鉴于能源消费显著的习惯性特征会产生滞后性影响, 在理论模型推导的基础上设定如下动态面板模型。进一步地, 由于普通动态回归分析中并未考虑要素的空间效应及要素间的空间关联, 往往会导致估计结果产生偏误, 未充分考虑地理空间效应和时间因素所带来的影响。而空间分析必须度量区域之间的空间距离, 能源强度受到地理特征与社会经济特征的共同影响, 本文借鉴杜江等 (2017) 的方法分别构建空间地理距离权重矩阵 (权重 1) 和空间经济地理权重矩阵 (权重 2) 来度量空间距离, 设定空间面板模型如下:

$$\begin{aligned} \ln EI_{it} = & \alpha_{it} + \rho \sum_{j=1}^N W_{ij} \ln EI_{it} + \tau \sum_{j=1}^N W_{ij} \ln EI_{it-1} + \sum_{\omega=1}^N \beta_{\omega} Z_{\omega it} + \theta_{\omega} \sum_{\omega=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} Z_{\omega it} + \\ & \sum_{\omega=1}^N \beta_{\omega} X_{\omega it} + \theta_{\omega} \sum_{\omega=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} X_{\omega it} + \mu_i + \psi_t + \pi_{it}, \pi_{it} = \lambda W_{ij} \pi_{it} + \varepsilon_{it}, \varepsilon_{it} \sim N(0, \rho^2 I_n) \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $EI_{it-1}$  为能源强度滞后一期; 解释变量  $X_{it}$  包括能源价格 ( $P_{E_{it}}$ ) 和技术进步效率 ( $TE_{it}$ ), 可细分为化石能源价格 ( $P_F$ )、清洁电价格 ( $P_C$ ) 与化石能源发电价格 ( $P_T$ ); 控制变量  $Z_{it}$  包括纯技术效率变化 ( $PE_{it}$ )、规模效率变化 ( $SE_{it}$ )、产出价格 ( $P_{Y_{it}}$ )、产业结构 ( $IS_{it}$ ) 和能源消费结构 ( $ECS_{it}$ );  $W_{ij}$  为空间权重矩阵;  $i$  代表地区;  $t$  代表年份;  $\theta$  为空间相关系数;  $\lambda$  为空间误差系数;  $\varepsilon_{it}$  和随机误差向量  $\pi_{it}$  服从正态分布;  $\mu_i$  和  $\psi_t$  为个体与时间固定效应;  $\tau$  和  $\rho$  为能源强度滞后一期及其空间滞后项系数。且根据 LM 检验结果显示, 全样本与分区域样本下的结果均拒绝不存

在空间残差相关的原假设,本文采用 SAR 模型进行后续估计。

此外,由理论分析可知能源价格与技术进步对能源强度的影响途径是多元的,能源价格与技术进步可通过产业结构与能源消费结构等影响能源强度,故将能源价格与技术进步和产业结构与能源消费结构的交乘项放入式(5),以估计能源消费结构与产业结构在能源价格与技术进步影响能源强度这一过程中所产生的作用。

能源消费结构与产业结构作为能源价格波动与技术变化的外部环境。首先仅当化石能源价格上涨后高于综合能源价格水平时才会引致化石能源消费量的减少,且技术进步受到能源回弹效应的限制对能源强度的影响是未知的。其次能源消费结构与产业结构发展到一定程度时将更多偏向于清洁能源的使用与高新技术产业的发展。为进一步探析产业结构与能源消费结构在能源价格与技术进步影响能源强度这一过程中的影响是否产生了结构性变化,本文采用 Seo 和 Shin (2016)、Seo 等 (2019) 在 Hansen (1999, 2000)、Caner 和 Hansen (2004) 等人的研究基础上构建的动态面板门槛模型,以产业结构(蔡文伯等, 2020)与能源消费结构(徐盈之、王秋彤, 2018)分别作为门槛变量建立动态门槛效应模型。模型具体形式如下:

$$\ln EI_{it} = \alpha_{it} + \delta \ln EI_{it-1} + \zeta_1 Z_{it} I(IS_{it} \leq \gamma_1) + \zeta_2 Z_{it} I(\gamma_1 < IS_{it} \leq \gamma_2) + \zeta_3 Z_{it} I(IS_{it} > \gamma_2) + \beta_{\omega} X_{\omega it} + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

$$\ln EI_{it} = \alpha_{it} + \delta \ln EI_{it-1} + \zeta_1 Z_{it} I(ECS_{it} \leq \gamma_1) + \zeta_2 Z_{it} I(\gamma_1 < ECS_{it} \leq \gamma_2) + \zeta_3 Z_{it} I(ECS_{it} > \gamma_2) + \beta_{\omega} X_{\omega it} + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

式中  $I(\cdot)$  为示性函数,  $I(\cdot)$  取决于门槛值与门槛变量,括号为表达式成立时  $I(\cdot) = 1$ , 反之为 0,  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  为待估门槛。

## (二) 变量及数据处理

本文所选取的指标数据主要来源于各年度《中国城市统计年鉴》和少数省份统计年鉴,部分价格数据来自于中国价格信息网以及各省区市发改委公布的上网标杆电价<sup>①</sup>。在指标的计算过程中,采用组内均值替代与缩尾等数据处理方法对异常值与缺失值进行处理,对于指标有较大缺失的城市进行剔除。本文的实证分析最终选取中国 2004—2018 年 285 个主要城市作为样本数据,各个省份平均包含 10 个左右主要城市,共计 4275 个样本。香港、澳门、台湾及西藏地区缺少主要变量数据,不在样本范围内。由于样本总量较大,从空间上将 285 个样本城市划分为四大经济区<sup>②</sup>,东部、中部、西部及东北分别包括 86 个、80 个、84 个与 35 个城市;时间维度上分别

① 根据 2004 年 4 月 16 日国家发改委发布的《关于进一步疏导电价矛盾规范电价管理的通知》(发改价格[2004] 610 号),对同一地区新投产的同类机组(按水电、火电、核电、风电等分类)原则上按同一价格水平核定上网电价的规定,使用上网标杆电价衡量价格是合理的。

② 四大经济区,东部经济区:北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南,10 个省/市,共计 86 个城市;西部经济区:内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆,11 个省/市/自治区,共计 84 个城市;中部经济区:山西、安徽、江西、河南、湖北、湖南,6 个省份,共计 80 个城市;东北经济区:吉林、辽宁、黑龙江,3 个省份,共计 35 个城市。

以 2008 年（金融危机）与 2013 年（能源发展“十二五”规划）为节点分为三个时间段，以便进行异质性分析。

（1）能源强度为被解释变量。能源强度是反映能源消费水平和节能降耗的主要指标，用于考察经济结构和能源利用效率的变化，本文采用单位 GDP 能耗，即全年能源消耗总量与实际 GDP 的比值来衡量能源强度（徐阳、何永秀，2016）。本文能源消耗总量主要包括煤炭、石油、电力和天然气四大能源能耗，煤炭、电力及液化石油气供应及利用情况数据来源于《中国城市统计年鉴》，按照能源折合标准煤参考系数进行能源折算，计算得到能源消耗总量。

（2）能源价格为解释变量。本文将能源价格细分为化石能源价格、清洁电价格与化石能源发电价格，为方便比较分析不同能源价格波动，统一采用价格指数衡量能源价格变化。其中，化石能源价格采用化石能源燃料类价格指数衡量（江洪、陈振环，2016；李旭辉等，2016），清洁电价格为水电、风电、光伏等主要能源的综合能源价格，由水电、风电、光伏等清洁能源的加权平均计算得出，再以 2003 年清洁电价格为基期计算各年度的清洁电价格指数（何凌云等，2016），化石能源发电价格以燃煤机组上网电价转化得到的价格指数度量（揭水晶、何凌云，2014），并且统一以 2003 年作为基期进行平减，得到对应的能源相对价格指数。

（3）技术进步为解释变量。本文借鉴于正松等（2020）的方法以技术进步效率作为技术进步的衡量指标。假设决策主体均采用成本最小化进行生产，此时最优化的最优成本为  $C^*$ 。在 DEA 框架下，非效率成本  $W$  为最优成本  $C^*$  与实际成本  $C$  的差值，则  $W = C - C^* = C(1 - C^*/C) = C(1 - CE)$ ，成本效率（ $CE = C^*/C$ ）取值范围为  $(0, 1]$ 。通过定义  $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$  为一组具体的要素价格变量， $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$  为一组要素投入变量，决策主体成本效率可进行如下变换为： $CE = C^*/C = pq^*/pq = \frac{\sum_{i=1}^n p_i q_i^*}{\sum_{i=1}^n p_i q_i}$ ，构建前沿成本函数为： $C^* = f(p, Y, T, S) \exp(u) + V$ 。其中， $\exp$  表示指数函数， $\exp(u)$  为成本非效率指数， $V$  为随机扰动项， $C^*$  为前沿成本，可进一步转化为： $C = (C^* - V) \exp(-u)$ ，或  $\ln C^* = \ln C + \varepsilon$ 。其中  $\varepsilon = u + V = \ln C_u + \ln C_v$ ， $\ln C_u = \ln C_t + \ln C_a$ ， $\ln C_t$ 、 $\ln C_a$  与  $\ln C_v$  分别表示对数形式下的技术非效率成本、配置非效率成本和外生干扰因素下的成本。

本文尽可能完整地考虑投入产出要素以使得估计结果更加准确，其中投入要素包括研发投入、劳动力、资本与能源，分别采用研发资金、劳动力数量、固定资产和能源消费量等指标进行衡量；产出要素则主要为所获得的产出以实际 GDP 度量，相关数据主要来源于《中国统计年鉴》。在考虑上述投入产出要素下，本文在 Zieschang（1983）等所提出的方法与运算法则基础上根据规模效应不变设定，运用 DEA-Malmquist 生产率指数法估计样本城市各年份的成本效率变化并将其分解为技术进步变化（TE）、纯技术效率变化（PE）和规模效率变化（SE）。具体的估计结果如表 2 所示，由于估计结果较多，表 2 仅为样本城市各年度的平均成本效率及分解结果。

表2 2004—2018年成本效率估计及分解结果

年份	$PE$	$TE$	$SE$	$CE$
2004	0.8413	0.8876	0.9489	0.7128
2005	0.8392	0.8898	0.9428	0.7093
2006	0.8361	0.8765	0.9532	0.7047
2007	0.7670	0.8567	0.8932	0.6005
2008	0.8489	0.8977	0.9460	0.7256
2009	0.7657	0.8567	0.8926	0.5966
2010	0.7758	0.8692	0.8916	0.6129
2011	0.7776	0.8675	0.8954	0.6146
2012	0.7797	0.8725	0.8930	0.6175
2013	0.7083	0.8654	0.8168	0.5135
2014	0.7721	0.8734	0.8835	0.6052
2015	0.7685	0.8718	0.8810	0.5995
2016	0.8993	0.9201	0.9778	0.8110
2017	0.8909	0.9116	0.9776	0.7960
2018	0.7442	0.8696	0.8550	0.5635

资料来源：作者根据成本效率估计结果整理所得。

(4) 控制变量。中国的产业结构中，第二产业的能源消耗最大，故产业结构采用第二产业增加值占GDP的比重进行衡量；能源消费结构采用电能占比度量，即电能在终端能源消费的比重（谢里、梁思美，2017）；产出价格以消费者价格指数进行衡量（周五七，2016）；技术效率和规模效率分别采用成本效率分解中的纯技术效率变化、规模效率变化来度量（于正松等，2020）。

有关各项指标的描述性统计如表3所示。

表3 数据描述性统计分析

变量符号	变量名称	原变量单位	均值	标准差	最大值	最小值
$EI$	能源强度	万吨标准煤/亿元	1.740	0.189	2.249	1.231
$P_C$	清洁电价格	价格指数	102.412	10.883	241.773	41.347
$P_T$	化石能源发电价格	价格指数	101.393	10.337	114.206	88.058
$P_F$	化石能源价格	价格指数	100.083	1.556	130.191	75.944
$IS$	产业结构	%	44.850	14.284	54.950	34.750
$TE$	技术进步变化	—	0.682	0.105	0.756	0.607
$ECS$	能源消费结构	%	24.800	0.233	55.733	17.667
$P_Y$	产出价格	价格指数	174.359	60.055	540.007	68.471
$PE$	综合能源价格	价格指数	100.685	3.336	123.841	82.187

资料来源：作者根据原始数据结果整理所得。

从表3的描述性统计可以看出,2004—2018年285个城市的能源强度均值为1.740,最大值为2.249。这表明我国的能源强度仍处于一个较高水平,深化节能降耗、促进能源强度降低仍是当前急需解决的问题之一。技术进步变化均值为0.682,技术水平与发达国家相比还存在较大的差距,特别是在能源方面,我国能源利用效率约为36.3%,比发达国家低10%左右。总的来看,各组变量的极差较大,标准差却相对较小,这是由于北京、天津等直辖市的综合发展水平与普通地级市相比有着较大的差距,但随着时间的推移,各地区的综合发展水平均在不断提高并逐步缩小差距。

## 四、实证结果及分析

### (一) 空间计量估计结果与分析

本文所选取的数据是2004—2018年的城市面板数据,面板数据分析所得出的结果相对全面与准确。为确保空间计量模型使用的准确性与必要性,本文首先以全局Moran's I指数对能源强度、能源价格与技术进步进行了空间相关性检验,具体如表4所示。能源强度绝大部分通过了1%的显著性检验,少部分通过了5%的显著性检验;能源价格均通过了1%的显著性检验;技术进步绝大部分通过了1%的显著性检验,少部分通过了5%的显著性检验。这表明能源强度、能源价格与技术进步均具有空间相关性,适宜采用空间计量方法进行分析。

表4 2004—2018年能源强度、能源价格与技术进步的莫兰指数

年份	能源强度		能源价格		技术进步	
	Moran's I	P-Value	Moran's I	P-Value	Moran's I	P-Value
2004	0.093	0.001	0.194	0.000	0.050	0.074
2005	0.049	0.078	0.170	0.000	0.128	0.000
2006	0.064	0.023	0.269	0.000	0.150	0.000
2007	0.058	0.039	0.220	0.000	0.204	0.000
2008	0.042	0.013	0.117	0.000	0.090	0.002
2009	0.078	0.006	0.235	0.000	0.220	0.000
2010	0.093	0.001	0.191	0.000	0.222	0.000
2011	0.090	0.002	0.164	0.000	0.234	0.000
2012	0.095	0.001	0.192	0.000	0.238	0.000
2013	0.073	0.011	0.239	0.000	0.273	0.000
2014	0.102	0.000	0.219	0.000	0.235	0.000
2015	0.278	0.000	0.210	0.000	0.231	0.000
2016	0.033	0.381	0.231	0.000	0.063	0.027
2017	-0.011	0.958	0.202	0.000	0.039	0.157
2018	0.096	0.044	0.192	0.000	0.231	0.000

资料来源:作者根据莫兰指数估计结果整理所得。

## 1. 全样本分析

本文先利用全样本分析能源价格与技术进步对能源强度的影响,在根据式(6)进行空间动态杜宾模型估计之外,还进行了动态面板系统GMM估计与OLS估计,以更准确且全面地了解能源价格与技术进步对能源强度的影响,同时也可增加估计结果的稳健性。根据表5的回归结果,AR(2)及Sargan检验的P值大于0.1,表明模型解释变量是联合显著的且GMM估计结果的扰动项不存在二阶或更高阶的自相关,滞后一期工具变量有效。通过对比动态面板系统GMM分析结果和SAR分析结果可以看出,动态面板系统GMM结果在一定程度上高估了能源价格与技术进步对能源强度的影响。

估计结果显示能源强度滞后一期的系数均为正且通过了1%的显著性水平检验,各地区的能源强度变化存在明显的动态持续变化特征,再次证实了能源强度存在时间滞后效应与使用动态面板模型的准确性。这一结果说明当期改善能源强度所作出的努力将对后续能源强度的降低产生持续性的积极影响,反之亦然。这可能是由于在长期经济发展过程中所形成的产业结构与能源消费结构在短时间内无法进行突破性变革并形成了能源消耗惯性所导致的。在两种空间权重设定下,能源强度的空间自相关系数均为正且在1%的水平下显著,能源强度空间关联程度在考虑经济收入条件下较仅考虑地理距离因素下有所降低。但总的来说,能源强度存在空间溢出效应。这表明能源强度较高的城市周围也集聚着同类型城市,一定程度上是由我国自然能源分布与产业规模集聚导致的,高能耗型产业多依赖良好的基础设施与丰富的自然资源。

空间经济地理权重(权重2)与空间地理距离权重(权重1)相比考虑了经济发展的影响,估计结果也更具有说服力,故本文主要分析空间经济地理权重的估计结果。化石能源价格、化石能源发电电价对能源强度的影响系数分别为-1.38与-1.004,均在1%的水平下显著为负,化石能源价格上涨将会导致企业减少对化石能源及化石能源发电的使用,转而使用相对价格更低的清洁能源。这与欧阳星等(2017)的研究结果即化石能源价格下跌不利于《可再生能源规划》目标的实现相符合,估计结果是有效且可信的。清洁能源发电电价系数在1%的水平下显著为正,在能源转型高目标约束下,政府要求企业使用清洁能源与清洁能源电价上涨的叠加作用下,企业为降低成本将自主进行技术革新与开发以提高能源使用效率,最终达到降低能源强度的目的。技术进步对能源强度的影响在1%的显著性水平下为负,技术进步将直接促进能源使用效率的提升。技术进步效率对能源强度的影响在1%的显著性水平下为负,技术进步将直接促进能源使用效率的提升。虽然技术进步对降低能源强度的边际作用远大于能源价格,但通过能源发电技术的提高可显著降低发电成本,进而通过电价价格机制驱动可进一步降低能源强度。因此,能源价格机制与技术进步并举是降低能源强度与实现能源转型最为明确的方向。

表 5 能源价格、技术进步对能源强度影响的全样本估计结果

变量	OLS	系统 GMM	SAR(权重 1)	SAR(权重 2)
L. lnEI	—	0.598 *** [0.023]	0.307 *** [0.019]	0.392 *** [0.013]
lnP <sub>F</sub>	-4.869 *** [0.302]	-1.663 *** [0.138]	-0.943 *** [0.110]	-1.380 *** [0.089]
lnP <sub>T</sub>	-1.912 *** [0.358]	-2.878 *** [0.192]	-0.874 *** [0.148]	-1.004 *** [0.176]
lnP <sub>C</sub>	0.294 [0.192]	0.089 [0.059]	-0.047 [0.048]	0.107 *** [0.035]
lnTE	-5.422 *** [0.289]	-3.130 *** [0.311]	-2.041 *** [0.377]	-4.544 *** [0.199]
控制变量是否控制	YES	YES	YES	YES
时间、地区双固定	—	YES	YES	YES
AR(2)/Spatial rho	—	0.446	1.614 ***	0.418 ***
F/Log-L	154.480	212.420	-3047.440	-3327.536
Sargan/R <sup>2</sup>	0.386	1	0.419	0.515
样本数 N	3990	3990	3990	3990

注：中括号中为稳健标准误，\*\*\*表示1%的显著性水平；L.表示滞后一期；AR(2)及Sargan检验对应的数据均为P值。

资料来源：作者根据全局空间自相关估计结果整理所得。

为进一步探析能源价格与技术进步是否对能源强度存在空间溢出效应，在SAR(空间经济地理权重)回归基础上进行空间效应分解，具体估计结果如表6所示。表中所有估计结果均通过了1%的显著性检验，这表明能源价格与技术进步对能源强度的影响存在着显著的空间溢出效应。

通过对比能源价格、技术进步对能源强度影响的直接效应与间接效应、长期效应与短期效应后发现，短期内能源价格与技术进步的直接效应的绝对值小于间接效应的绝对值，而在长期内能源价格与技术进步的直接效应的绝对值大于间接效应的绝对值。这可能是由于能源价格与技术进步在短期内来不及发酵以产生更深远的影响，且周边地区的边际溢出效应随着时间逐步减小造成的。这表明若想要从根本上真正实现节能降耗，不能仅依赖于相邻地区所产生的正外部效应，还应采取措施促进本地区形成有效的价格供求机制与技术革新，治标与治本并举。这也表明要形成能源价格机制与技术革新的长久性战略，并形成政策性导向，实现节能降耗与能源转型是一场持久战，并非一蹴而就。

表6 能源价格、技术进步对能源强度影响的空间效应分解

变量	短期间接效应	短期直接效应	短期总效应	长期间接效应	长期直接效应	长期总效应
$\ln P_F$	-1.412*** [0.088]	-0.955*** [0.097]	-2.367*** [0.160]	-2.458*** [0.151]	-4.871*** [0.875]	-7.330*** [0.941]
$\ln P_T$	-2.073*** [0.170]	-1.400*** [0.145]	-3.472*** [0.279]	-3.607*** [0.289]	-7.130*** [1.239]	-10.74*** [1.357]
$\ln P_C$	0.110*** [0.035]	0.0744*** [0.025]	0.184*** [0.059]	0.191*** [0.061]	0.380*** [0.140]	0.571*** [0.195]
$\ln TE$	-4.654*** [0.202]	-3.152*** [0.334]	-7.806*** [0.479]	-8.102*** [0.372]	-16.100*** [3.063]	-24.200*** [3.291]

注：中括号中为稳健标准误，\*\*\*表示1%的显著性水平；模型检验统计量与样本量与表5中结果一致。  
资料来源：作者根据空间效应分解估计结果整理所得。

## 2. 时空异质性分析

由于我国的经济地理位置和改革开放以来所实行的经济发展战略，区域经济发展之间存在很大差异，为了检验区域异质性，本文将进一步对分区域样本进行回归，具体回归结果如表7所示。根据估计结果，东部、中部、西部及东北经济区能源强度滞后一期系数与空间自相关系数均在1%的水平下显著为正，这表明各个地区的能源消耗均存在消费惯性，且都具有显著的空间集聚效应。

除东部地区化石能源价格外，各地区的化石能源价格与化石能源发电价格均在1%的水平下显著为负，化石能源价格的上涨将促使企业生产使用清洁能源或激励企业提高能源使用效率以降低生产成本，两种途径下能源消耗都将相对减少。东部地区化石能源价格对能源强度不显著的原因可能在于东部地区能源资源匮乏，多是中西部地区通过能源输送支撑东部地区的能源需要，如“西气东输”“西电东送”等，东部地区化石能源使用占比较低。需要特别注意的是，东北地区清洁能源发电价格对能源强度的影响在10%的水平下显著为负，一定程度上是由于东北经济区作为老型重工业基地，需要化石能源发电作为过渡对化石能源予以阶段性替代，清洁能源的优越性并未得到充分显示，且该地区能源价格的上涨可有效约束能源消费量的增加。

总的来讲，能源价格对能源强度的影响程度存在着明显的区域差异，东北地区最大，西部地区与中部地区次之，东部地区最小。东北地区作为长期性重工业基地，有较强的能源资源依赖性，对化石能源与化石能源发电电价变动更为敏感。东部地区的能源使用绝大程度依赖于中西部的能源转移，且经济发展水平与产业结构水平均处于相对较高的层次，对化石能源等价格变动的敏感程度相对较弱。技术进步对能源强度的影响程度存在着明显的区域差异，西部地区最大，中部地区与东北地区次之，东部地区最小。西部地区作为我国经济发展的大后方，是我国能源资源富集区与重要的能源战略接替区，技术进步对西部地区能源生产与使用会产生更大的正外部性，可借助

技术进步加速高能耗工业企业产品升级换代，并强化大容量输送能力以形成东部地区经济发展的能源资源容纳库。东部地区的经济与科学技术已经发展到一定高度，技术进步所带来的作用边际效应递减，对降低能耗的作用相对较小。

表 7 能源价格、技术进步对能源强度影响的分区域样本估计结果（空间经济地理权重）

变量	东部经济区	中部经济区	西部经济区	东北经济区
$L \cdot \ln EI$	0.381 *** [0.018]	0.386 *** [0.021]	0.370 *** [0.016]	0.368 *** [0.040]
$\ln P_F$	-0.193 [0.191]	-0.728 *** [0.136]	-0.972 *** [0.196]	-1.565 *** [0.375]
$\ln P_T$	-1.790 *** [0.292]	-1.431 *** [0.208]	-1.680 *** [0.284]	-4.399 *** [0.926]
$\ln P_C$	0.357 *** [0.054]	0.0175 [0.054]	-0.0855 [0.089]	-0.0612 * [0.037]
$\ln TE$	-2.747 *** [0.279]	-3.610 *** [0.417]	-4.238 *** [0.371]	-3.979 *** [0.703]
控制变量是否控制	YES	YES	YES	YES
时间、地区双固定	YES	YES	YES	YES
Spatial rho	0.451 *** [0.034]	0.406 *** [0.033]	0.314 *** [0.036]	0.330 *** [0.052]
sigma2_e	0.233 *** [0.009]	0.201 *** [0.008]	0.258 *** [0.010]	0.447 *** [0.027]
Log-L	-820.254	-842.085	-475.563	-669.265
Adj-R <sup>2</sup>	0.641	0.681	0.406	0.676
样本数 $N$	1218	1120	1176	476

注：中括号中为稳健标准误，\*\*\*、\* 分别表示 1%、10% 的显著性水平。

资料来源：作者根据估计结果整理所得。

对于在 SAR 基础上所进行的空间效应分解一定程度上可作为 SAR 估计结果的稳健性检验以判断分析结果的准确性。能源价格与技术进步对能源强度影响的分区域空间效应分解结果与全样本估计结果相比没有性质上的差别<sup>①</sup>，且仍是长期效应大于总效应。总体而言，能源价格与技术进步对能源强度的影响以及空间溢出效应都存在着明显差异，有着地域上的异质性特征。

对于时间维度，分别以 2008 年（金融危机）与 2013 年（能源发展“十二五”规划）为节点将研究期间分为三个时间段，以考察 2008 年金融危机与进一步推动能源转型前后的结果是否存在明显差异。根据表 8 中的估计结果，对比发现 2009—

① 能源价格与技术进步对能源强度影响的分区域空间效应分解结果较大，由于篇幅限制，未进行报告。

2013年的估计结果与2004—2008年和2014—2018年的估计结果存在着性质上的差别。一方面,能源强度在全国及各地区均存在正向空间溢出效应,前段、后段与该结果相符合,但是2009—2013年的估计结果却存在不显著的负向空间溢出效应,表明我国经济发展受到了金融危机的冲击。另一方面,化石能源发电电价系数在1%的显著性水平下为正,金融危机的冲击导致市场价格机制紊乱,能源价格无法发挥信号作用。

表8 时间维度上能源价格、技术进步对能源强度影响的分段估计结果

变量	前段(2004—2008年)	中段(2009—2013年)	后段(2014—2018年)
$L \ln EI$	0.501 *** [0.025]	-0.0188 [0.027]	0.322 *** [0.019]
$\ln P_F$	-1.849 *** [0.195]	-0.993 *** [0.150]	-2.956 *** [0.206]
$\ln P_T$	-4.592 *** [0.546]	1.449 *** [0.417]	-1.768 *** [0.245]
$\ln P_C$	0.300 *** [0.046]	0.176 *** [0.060]	0.099 [0.081]
$\ln TE$	-5.266 *** [0.339]	-5.171 *** [1.315]	-5.304 *** [0.334]
控制变量是否控制	YES	YES	YES
时间、地区双固定	YES	YES	YES
Spatial rho	0.499 *** [0.039]	-0.009 [0.043]	0.075 * [0.043]
Log-L	-1027.140	-1047.434	-1100.226
$R^2$	0.511	0.431	0.543
样本数 $N$	1140	855	1425

注:中括号中为稳健标准误,\*\*\*、\*分别表示1%、10%的显著性水平。

资料来源:作者根据估计结果整理所得。

### 3. 进一步讨论分析

在理论分析部分提到了能源消费结构与产业结构在能源价格与技术进步影响能源强度过程中的作用,本文借鉴韩长根和张力(2019)的方法,采用交互项方法来探讨产业结构与能源消费结构在这一过程中的具体作用,具体估计结果如表9所示。

根据估计结果,增加产业结构、能源消费结构与核心变量交乘项的估计结果与未增加交乘项的结果相比并没有发生实质性的改变。从产业结构升级的角度,化石能源价格与产业结构交乘项的系数在5%的水平下显著为正,产业结构会抑制化石能源价格对降低能源强度的作用;化石能源发电价格及清洁电电价与产业结构交乘项的系数分别为-0.183与-0.018,且均满足1%的显著性检验,表明产业结构具有增大电价

及降低能源强度的作用。技术进步变化与产业结构交乘项的系数为 0.121，但不显著。这说明虽然技术进步在产业结构优化升级过程中提高了能源使用效率，但高速增长能源使用量部分抵消了技术进步所带来的优势。

表 9 调节作用下能源价格、技术进步对能源强度影响的空间效应估计结果

变量	产业结构		能源消费结构	
	系数	稳健标准误差值	系数	稳健标准误差值
$L \ln EI$	0.389 ***	[0.013]	0.399 ***	[0.013]
$\ln P_F$	-2.367 ***	[0.419]	-2.932 ***	[0.372]
$\ln P_T$	-0.689	[0.483]	-0.368	[0.452]
$\ln P_C$	0.274 ***	[0.062]	0.297 ***	[0.058]
$\ln TE$	-5.490 ***	[0.990]	-8.950 ***	[0.648]
$\ln IS$	-0.432 ***	[0.072]	-0.109 ***	[0.019]
$\ln ECS$	-1.684 ***	[0.114]	-2.052 ***	[0.623]
$\ln P_F \cdot \ln IS$	0.137 **	[0.057]	—	—
$\ln P_T \cdot \ln IS$	-0.183 ***	[0.058]	—	—
$\ln P_C \cdot \ln IS$	-0.018 ***	[0.006]	—	—
$\ln TE \cdot \ln IS$	0.121	[0.137]	—	—
$\ln P_F \cdot \ln ECS$	—	—	-2.760 ***	[0.649]
$\ln P_T \cdot \ln ECS$	—	—	2.641 ***	[0.653]
$\ln P_C \cdot \ln ECS$	—	—	0.253 ***	[0.063]
$\ln TE \cdot \ln ECS$	—	—	-7.184 ***	[1.012]
sigma2_e	0.318 ***	[0.007]	0.315 ***	[0.007]
Spatial rho	0.414 ***	[0.021]	0.431 ***	[0.021]
控制变量是否控制	YES		YES	
时间、地区双固定	YES		YES	
Log-L	-3306.601		-3290.594	
R <sup>2</sup>	0.520		0.529	
样本数 N	3990		3990	

注：中括号中为稳健标准误差值，\*\*\*、\*\* 分别表示 1%、5% 的显著性水平。

资料来源：作者根据估计结果整理所得。

从能源消费结构的角度，化石能源价格、化石能源发电价格及清洁电电价与能源消费结构交乘项的系数分别为 -2.760、2.641、0.253，且通过了显著性水平为 1% 的检验。结果表明能源消费结构的清洁化升级将会促进化石能源价格上涨对降低能源强度的作用，抑制化石能源发电电价与清洁电电价对降低能源强度的作用。从总体上看，能源消费结构的优化升级仍是有利于价格发挥杠杆作用的。技术进步变化与能源消费结构交乘项的系数为 -7.184，且通过了 1% 的显著性水平检验，这说明能源消费结构优化升级可显著促进技术进步并降低能源强度。随着能源消费结构的转型升级

级,清洁能源成为市场生产与消费的首要选择。化石能源价格的上涨将促使生产者与消费者为降低成本而减少对化石能源的消费,并采用清洁能源予以替代,达成了能源转型与节能降耗的双重目标。

实际上,能源消费结构的转型升级需要产业结构优化的支撑,只有真正从经济社会发展中挖掘高附加值与低能耗并存的优势,产业才能从根本上实现能源消费结构的转型升级。综合以上机制分析结果,能源价格与技术进步可通过优化产业结构与能源消费结构来间接作用于节能降耗,产业结构与能源消费结构升级是实现节能降耗的重要战略点。

## (二) 动态面板门槛回归估计结果与分析

本文通过系统 GMM 模型进行动态面板门槛估计,检验过程中设定 300 次迭代,依次搜寻 400 个样本点,并借鉴 Arellano 和 Bover (1995) 的方法将被解释变量,即能源强度滞后一期作为工具变量以避免因工具变量拟合而出现的结果偏误问题。门槛检验结果显示,产业结构与能源消费结构均通过了 10% 的单门槛显著性水平检验,门槛值对应的产业结构与能源消费结构水平分别为 39.46% 与 29.16%。为考察门槛前后能源价格与技术进步对能源强度的影响是否存在显著变化,本文进行了门槛模型检验,但由于能源价格与技术进步对能源强度的影响呈现阶梯式递进,但并未发生符号上的显著变化,故未呈现相应的估计结果。

在此基础上,为进一步探析研究样本基于门槛是否存在分布规律,本文以 2018 年的数据将 285 个城市分别以产业结构与能源消费结构为标准分为四大区域类型,分别以产业结构门槛值与能源消费结构门槛值将样本划分为低度产业结构区间与高度产业结构区间,清洁型能源消费结构区间与非清洁型能源消费结构区间。其中清洁型城市占比明显少于非清洁型城市,这也再次印证了我国能源消费结构仍急需改善的现实问题。

根据各区域具体城市分布,非清洁型城市主要集中分布于东北经济区、华中经济区、华东偏中部地区,以及四川省与甘肃省。其中少部分城市处于非清洁型低产业结构阶段,需在注重产业发展的同时严格约束能源使用。大部分城市处于非清洁型高产业结构阶段,由于本文产业结构指标为第二产业增加值占国民生产总值的比重,这说明这一阶段的城市处于第二产业迅猛发展阶段且以非清洁能源维持生产结构运行,需要通过能源转型与借助科技与价格机制等促进产业结构以第二产业为主逐渐向第三产业转变。在清洁型能源消费结构城市中,低产业结构区中多是直辖市、省会城市与旅游业发达的城市,高产业结构区占据较大比例,多集中于中东部地区。这表明应注重产业结构转变,特别是第三产业的发展,以实现经济发展水平更高层次突破。

## 五、研究结论与政策建议

本文基于 2004—2018 年中国 285 个主要城市的面板数据,在测度能源强度、能

源价格与技术进步空间相关性的基础上，通过动态空间自回归模型分析能源价格与技术进步对能源强度的空间溢出及区域异质性，进一步地通过动态面板门槛模型探析能源价格与技术进步对能源强度的影响是否存在结构性变化，继而为加快我国节能降耗与能源转型提出相关政策建议。

本文的研究结论和政策建议主要包括以下四个部分。

首先，从整体来看，能源强度具有显著的溢出效应，能源价格机制与技术进步是节能降耗的有效机制。这表明应该灵活并最大限度地利用市场供求中的能源价格机制与技术进步，加大技术革新与开发力度，努力构建以市场为主导的能源价格定价机制并逐步形成区域统一市场直至构建全国统一的能源市场。估计结果显示，化石能源价格与化石能源发电电价的上涨均有利于刺激企业以通过提高能源使用效率或转而使用清洁能源等方式降低能源强度。但考虑到我国目前化石能源占比高达85.7%的现状，在终端能源消费环节实现清洁能源对化石能源的直接替代具有较高难度，需要化石能源发电作为过渡的桥梁以最终实现能源转型。这要求化石能源发电价格要低于化石能源的价格，但这并不与因化石能源发电价格上涨而产生的清洁电替代现象相矛盾。由于技术进步对节能降耗的边际作用远大于能源价格，从而通过能源发电技术的提高降低发电成本进一步实现电能对化石能源的替代也是实现节能降耗的重要途径。

其次，机制方面，能源价格与技术进步不仅能直接影响能源强度，还能通过产业结构优化与能源消费结构转型升级缓解我国的高能源强度困境。从总体上看，能源消费结构与产业结构的优化有利于能源价格机制充分发挥杠杆作用。清洁能源随着结构的转型升级成为市场生产与消费的首要选择，同时化石能源价格的上涨将促使生产者与消费者为降低成本而减少对化石能源的消费，并采用清洁能源予以替代，达成了能源转型与节能降耗的双重目标。除此之外，能源消费结构的转型升级需要产业结构优化的支撑，只有真正从经济社会发展中挖掘高附加值与低能耗并存的优势产业才能从根本上实现能源消费结构的转型升级。因此，必须推动能源消费结构转型与产业结构优化协同并进，创新经济发展方式，加快我国经济发展向创新驱动和技术节能转变，促进技术偏向型与清洁能源偏向型企业的发展，为更大发挥能源价格机制与技术进步节能降耗作用创造有利条件。

再次，对于时空异质性角度，能源价格与技术进步对能源强度的影响及其空间溢出效应在时间上与区域上都存在着明显差异，金融危机的冲击使能源价格机制信号紊乱。政府部门在经济政策和能源发展战略制定中需要全面分析和全盘考虑，注重各地发展条件的差异性，将“一地一策”贯彻落实到底。应加大高能源强度地区的能源改革与制度体系建设，推动经济发展高水平地区的能源技术创新，注重能源转型优势地区的市场规模培育和创新引领作用，充分发挥模范地区建设的示范效应。结合上文的估计结果与地区发展实际情况，东部地区资源能源自我供给与需求存在极大缺口，基于中西部能源转移的资本能源要素再配置在一定程度上缓和了东部的能源缺口和中西部的资本需求。为实现各地区经济社会的长足发展，东部地区应在提高能源利用效

率之余利用能源开发的技术便利和基础设施便利扩大能源自我供给,特别是东部沿海能源资源的勘探与开发。中西部地区则应在强化大容量输送能力以形成东部地区经济发展能源资源容纳库的同时,利用能源资源集中优势与“一带一路”倡议在中西部形成新的“增长极”。

最后,能源价格与技术进步对能源强度的影响存在单门槛效应,这种影响随着产业结构与能源消费结构达到门槛值时呈现阶梯式递进。双结构升级同时也是构建高质量现代化经济体系与解决污染问题的重点,政府部门应在经济政策和能源发展战略制定中充分重视产业结构与能源消费结构的作用,培育壮大节能环保、清洁生产与清洁能源产业,实现绿色发展。结合估计结果,技术进步革新更多偏向于清洁能源而非化石能源,且清洁能源技术进步所带来的经济环境效益更大。因此,政府应极力促进传统工业或经济发展方式向新兴工业或绿色低碳的经济发展方式转变,从源头上消除高能源消耗的使用。同时,能源价格机制与技术进步对节能降耗的作用随着产业结构与能源消费结构的优化升级将出现结构性变化,以清洁能源替代化石能源是发挥价格杠杆与技术支撑作用的重要渠道。受经济发展、能源现状与技术水平等因素的限制,我国目前的能源消费结构主要以化石能源为主,电能结构中则以火电为主。因此“电能替代”与“清洁替代”仍是能源消费结构升级过程中需长期贯彻落实的政策,实现能源结构逐渐由“煤炭为主向多元化协同”转变,以形成多种能源相互补充的能源供给体系。

## 参考文献

蔡文伯、黄晋生、袁雪(2020):《教育人力资本对绿色经济发展的贡献有多大?——基于产业结构变迁的门槛特征分析》,《华东师范大学学报(教育科学版)》第10期,第34~47页。

陈晓玲、徐舒、连玉君(2015):《要素替代弹性、有偏技术进步对我国工业能源强度的影响》,《数量经济技术经济研究》第3期,第58~76页。

成金华、李世祥(2010):《结构变动、技术进步以及价格对能源效率的影响》,《中国人口·资源与环境》第4期,第35~42页。

杜江、张伟科、范锦玲(2017):《农村金融发展对农民收入影响的双重特征分析——基于面板门槛模型和空间计量模型的实证研究》,《华中农业大学学报(社会科学版)》第6期,第35~43页。

傅晓霞、吴利学(2010):《中国能源效率及其决定机制的变化——基于变系数模型的影响因素分析》,《管理世界》第9期,第45~54页。

韩长根、张力(2019):《互联网是否改善了中国的资源错配——基于动态空间杜宾模型与门槛模型的检验》,《经济问题探索》第12期,第43~55页。

韩松、张宝生、唐旭等(2016):《中国能源强度变化的驱动因素分析——基于对数平均迪氏指数方法》,《当代经济科学》第5期,第89~98页。

杭雷鸣、屠梅曾(2006):《能源价格对能源强度的影响——以国内制造业为例》,《数量经济技术经济研究》第12期,第93~100页。

何凌云、杨雪杰、尹芳等（2016）：《综合性能源价格指数对中国省域碳强度的调节作用及其比较——来自30个省份面板数据的实证分析》，《长江流域资源与环境》第6期，第877~888页。

胡东兰、申颖、刘自敏（2019）：《中国城市能源回弹效应的时空演变与形成机制研究》，《中国软科学》第11期，第96~108页。

姜彩楼、朱琴、马林（2015）：《中国工业行业能源效率变动及影响因素研究》，《中国科技论坛》第4期，第51~56页。

江洪、陈振环（2016）：《能源价格指数对能源效率调节效应的研究》，《价格理论与实践》第9期，第104~106页。

揭水晶、何凌云（2014）：《内部能源价格相对指数对能耗的调节效应——基于技术效率变动视角的研究》，《资源科学》第3期，第520~529页。

李香菊、祝丹枫（2020）：《创新能力、财税政策与能源强度——基于我国省级面板数据的实证检验》，《经济理论与经济管理》第2期，第58~72页。

李旭辉、荆壮壮、郑丽琳（2016）《商品燃料综合价格指数波动对我国粮食价格影响的传导效应检验》，《统计与决策》第13期，第86~89页。

廖进球、徐加涛（2019）：《企业创新与能源强度》，《当代财经》第1期，第108~118页。

林伯强、刘泓汛（2015）：《对外贸易是否有利于提高能源环境效率——以中国工业行业为例》，《经济研究》第9期，第127~141页。

林伯强、王锋（2009）：《能源价格上涨对中国一般价格水平的影响》，《经济研究》第12期，第66~79页。

吕琦、张竞娴、梁松（2019）：《城镇化对能源强度的影响及区域差异分析——基于空间滞后模型研究》，《生态经济》第3期，第87~94页。

马丽梅、史丹、高志远（2020）：《国家能源转型的价格机制：兼论新冠疫情下的可再生能源发展》，《人文杂志》第7期，第104~116页。

马丽梅、史丹、裴庆冰（2018）：《中国能源低碳转型（2015—2050）：可再生能源发展与可行路径》，《中国人口·资源与环境》第2期，第8~18页。

马晓微、石秀庆、王颖慧等（2017）：《中国产业结构变化对能源强度的影响》，《资源科学》第12期，第2299~2309页。

欧阳星、梁志民、肖文海（2017）：《化石能源价格下跌对能源转型的挑战与应对政策》，《价格月刊》第8期，第1~5页。

齐志新、陈文颖（2006）：《结构调整还是技术进步？——改革开放后我国能源效率提高的因素分析》，《上海经济研究》第6期，第8~16页。

钱娟、李金叶（2018）：《中国工业能源节约偏向型技术进步判别及其节能减排效应》，《经济问题探索》第8期，第148~159页。

邵帅、杨莉莉、黄涛（2013）：《能源回弹效应的理论模型与中国经验》，《经济研究》第2期，第96~109页。

舒印彪、薛禹胜、蔡斌等（2018）：《关于能源转型分析的评述（二）不确定性及其应对》，《电力系统自动化》第10期，第1~12页。

苏宏伟（2016）：《中国能源强度分解与替代弹性分析基于我国省际面板数据的实证分析》，《资源开发与市场》第8期，第930~937页。

孙丽文、王丹滢、杜娟等 (2019):《基于 LMDI 的中国工业能源碳足迹生态压力因素分解研究》,《生态经济》第 1 期,第 13~18 页。

王班班、齐绍洲 (2014):《有偏技术进步、要素替代与中国工业能源强度》,《经济研究》第 2 期,第 116~127 页。

王腾、严良、易明 (2016):《外商直接投资、区域自主创新能力影响能源强度的实证研究》,《科技管理研究》第 1 期,第 67~72 期。

吴滨、李为人 (2007):《中国能源强度变化因素争论与剖析》,《中国社会科学院研究生院学报》第 2 期,第 121~128 页。

吴文文、张烨 (2019):《能源转型与经济增长:文献综述》,《经济研究导刊》第 28 期,第 3~4 页。

武运波、高志刚 (2019):《能源价格、全要素生产率与工业能源强度关系的实证检验》,《统计与决策》第 16 期,第 125~128 页。

谢里、梁思美 (2017):《电能替代与生态环境效率:来自中国省级层面的经验证据》,《中南大学学报(社会科学版)》第 1 期,第 91~100 页。

徐阳、何永秀 (2016):《基于非对称误差修正模型的中国能源-经济-环境关系》,《中国电力》第 9 期,第 114~118 页。

徐盈之、王秋彤 (2018):《能源消费对新型城镇化影响的研究——基于门槛效应的检验》,《华东经济管理》第 5 期,第 5~13 页。

杨恺钧、杨甜甜 (2018):《老龄化、产业结构与碳排放——基于独立作用与联动作用的双重视角》,《工业技术经济》第 12 期,第 115~123 页。

杨瑾、曹梦楠 (2017):《能源价格、全要素生产率变动对我国工业能源强度影响的实证研究》,《科技管理研究》第 2 期,第 255~260 页。

于正松、李小建、杨玉莹 (2020):《中国乡镇企业生产效率及技术进步时空分异》,《地域研究与开发》第 4 期,第 12~17 页。

郑若娟、王班班 (2011):《中国制造业真实能源强度变化的主导因素——基于 LMDI 分解法的分析》,《经济管理》第 10 期,第 23~32 页。

周五七 (2016):《能源价格、效率增进及技术进步对工业行业能源强度的异质性影响》,《数量经济技术经济研究》第 2 期,第 130~143 页。

Arellano, M. and O. Bover (1995), "Another Look at the Instrumental Variable Estimation of Error-components Model", *Journal of Econometrics*, 68 (1), pp. 29 - 51.

Cai, Y. and A. Menegaki (2019), "Convergence of Clean Energy Consumption—Panel Unit Root Test with Sharp and Smooth Breaks", *Environmental Science and Pollution Research*, 26 (18), pp. 18790 - 18803.

Caner, M. and B. E. Hansen (2004), "Instrumental Variable Estimation of a Threshold Model", *Econometric Theory*, 20 (5), pp. 813 - 843.

Cornillie, J. and S. Fankhauser (2004), "The Energy Intensity of Transition Countries", *Energy Economics*, 26 (3), pp. 283 - 295.

Elliott, R., P. Sun and S. Chen (2013), "Energy Intensity and Foreign Direct Investment: A Chinese City-level Study", *Energy Economics*, 40 (2), pp. 484 - 494.

- Fisher-Vanden, K. , G. H. Jefferson and H. Liu, et al. (2004), “What Is Driving China’s Decline in Energy Intensity?”, *Resource & Energy Economics*, 26 (1), pp. 77 – 97.
- Fouquet, R. (2010), “The Slow Search for Solutions: Lessons from Historical Energy Transitions by Sector and Service”, *Energy Policy*, 38 (11), pp. 6586 – 6596.
- Hansen, B. E. (1999), “Threshold Effects in Non-dynamic Panels: Estimation, Testing, and Inference”, *Journal of Econometrics*, 93 (2), pp. 345 – 368.
- Hansen, B. E. (2000), “Sample Splitting and Threshold Estimation”, *Econometrica*, 68 (3), pp. 575 – 603.
- Kumar, S. , H. Fujii and S. Managi (2015), “Substitute or Complement? Assessing Renewable and Nonrenewable Energy in OECD Countries”, *Applied Economics*, 47 (14), pp. 1438 – 1459.
- Li, J. , K. F. See and J. Chi (2019), “Water Resources and Water Pollution Emissions in China’s Industrial Sector: A Green-biased Technological Progress Analysis”, *Journal of Cleaner Production*, 229, pp. 1412 – 1426.
- Li, K. and B. Lin (2018), “How to Promote Energy Efficiency through Technological Progress in China?”, *Energy*, 143, pp. 812 – 821.
- Ma, B. (2015), “Does Urbanization Affect Energy Intensities across Provinces in China? Long-run Elasticities Estimation Using Dynamic Panels with Heterogeneous Slopes”, *Energy Economics*, 49, pp. 390 – 401.
- Ma, B. and Y. Yu (2017), “Industrial Structure, Energy-saving Regulations and Energy Intensity: Evidence from Chinese Cities”, *Journal of Cleaner Production*, 141, pp. 1539 – 1547.
- Mann, J. and P. A. Sephton (2019), “A (Negative) Replication of ‘The Relationship between Energy Consumption, Energy Prices, and Economic Growth: Time Series Evidence from Asian Developing Countries’”, *Energy Economics*, 82, pp. 78 – 84.
- Murad, Md. W. , Md. M. Alam and A. H. Md. Noman, et al. (2019), “Dynamics of Technological Innovation, Energy Consumption, Energy Price and Economic Growth in Denmark”, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38, pp. 22 – 29.
- Seo, M. H. , S. Kim and Y. J. Kim (2019), “Estimation of Dynamic Panel Threshold Model Using Stata”, *The Stata Journal*, 19 (3), pp. 685 – 697.
- Seo, M. H. and Y. Shin (2016), “Dynamic Panels with Threshold Effect and Endogeneity”, *Journal of Econometrics*, 195 (2), pp. 169 – 186.
- Wei, Z. , B. Han and L. Han, et al. (2019), “Factor Substitution, Diversified Sources on Biased Technological Progress and Decomposition of Energy Intensity in China’s High-tech Industry”, *Journal of Cleaner Production*, 231, pp. 87 – 97.
- Wing, S. (2006), “Representing Induced Technological Change in Models for Climate Policy Analysis”, *Energy Economics*, 28, pp. 539 – 562.
- Zhu, B. , Y. Liu and Z. Liu, et al. (2018), “A Study on Primary Energy and Secondary Energy Price in Distributed Energy Projects”, *Energy Procedia*, 152, pp. 57 – 63.
- Zieschang, K. D. (1983), “A Note on the Decomposition of Cost Efficiency into Technical and Allocative Components”, *Journal of Econometrics*, 23 (3), pp. 401 – 405.

# Energy Prices, Technological Progress and Energy Intensity —Dynamic Spatiotemporal Evolution Based on Chinese Urban Data

FENG Yong-sheng<sup>1</sup> ZHANG Ya<sup>2</sup> LIU Zi-min<sup>2</sup>

(1. National Academy of Economic Strategy, CASS, Beijing 100006, China;

2. School of Economics and Management, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** An in-depth study of the specific impact of energy prices and technological progress on energy intensity is a key issue for deepening energy conservation and consumption reduction and realizing China's green economic transformation. Based on the panel data of 285 cities from 2004 to 2018, this paper uses dynamic spatial autoregressive models and dynamic threshold models to investigate the spatial spillover effects of energy prices and technological progress on energy intensity by region. The results show that: (1) Energy intensity has a significant spillover effect, and energy prices and technological progress are effective mechanisms for energy saving and consumption reduction; (2) The impact of energy prices and technological progress on energy intensity has obvious temporal and spatial heterogeneity. The impact of price is the largest in the Northeast, followed by the western and central regions, and the smallest in the eastern region; the impact of technological progress is the largest in the western region, followed by the central and northeastern regions, and the smallest in the eastern region; the impact of the financial crisis has disrupted the energy price mechanism. (3) Industrial structure optimization and energy consumption structure transformation are important measures to leverage energy prices to alleviate my country's current high energy intensity dilemma; (4) China's energy prices and technological progress have shown a stepwise leap in the impact of energy intensity, and The city classification based on the dual structure has significant regional agglomeration characteristics, and provincial capital cities and municipalities have good demonstration effects in economic and energy development.

**Key Words:** energy intensity; driving factor; energy price; technological progress; spatial measurement

责任编辑: 周枕戈