

能源价格对生态效率的影响

——基于 OECD 国家数据分析

罗能生 邓明扬

(湖南大学经济与贸易学院, 湖南省长沙市, 410006)

摘要: “碳中和”的强力约束及国内国际双循环新发展格局构建的目标下, 探究能源使用、经济增长与环境保护三者之间关系愈加重要。本文将可再生能源纳入研究范畴, 尝试性梳理能源价格变化对生态效率水平的影响机理, 基于 1995-2017 年 28 个 OECD 国家的面板数据, 通过系统广义矩估计 (SYS-GMM) 方法处理模型内生性问题, 实证分析能源价格对生态效率的动态非线性影响, 并进行稳健性检验以保障结果的有效性。在此基础上, 进一步探究异质性条件下, 能源价格变化对生态效率的影响差异。结果发现, 在控制了其它影响生态效率的国家层面因素、时间变化因素, 能源价格变化会显著影响一国的生态效率水平, 且与生态效率呈现出显著的“U 型”曲线关系, 即随着价格向上的逐步累积, 其对经济环境的延迟效应逐渐减弱, 最终随着能源价格的波动上升对生态效率水平的影响效应由负向转为更为显著的正向; 不同能源类型、不同时期以及不同的经济发展水平国家, 能源价格波动对生态效率的具有差异性影响。本研究为我国科学把握能源利用、经济增长与生态保护关系提供研究基础, 对于实现转变能源使用方式, 走低碳清洁发展的道路, 促进能源生产与消费革命, 助力经济社会发展全面绿色转型提供理论依据。

关键词: 能源价格; OECD 国家; 生态效率

中图分类号: F062.9 **文献标识码:** A

一、引言

能源是现代经济的重要引擎, 攸关国计民生与国家安全。伴随经济稳定增长, 全球能源消费量呈现出不断上升趋势。2020 年 6 月英国石油公司 (British Petroleum) 发布《世界能源统计年鉴》中, 石油为主的化石燃料占全球一次能源消费总量的 84%, 煤炭仍是全球最大发电来源, 占据全球发电量的 36%。可再生能源虽有快速增长势头, 但传统化石能源为主的能源消费结构短期之内难以改变, 这对于经济可持续发展与全球实现零碳排目标仍是巨大挑战。

我国是全球最大的能源消费国、二氧化碳排放国, 目前经济的增长仍保持对传统能源较强依赖性。能源问题在过去较长时期粗放的发展模式积累下渐渐凸显, 伴随着日益严峻的环境恶化、能源成本上升以及价格上涨, 能源与环境约束显然成为我国经济进一步可持续发展的阻碍。要推动经济社会的全面绿色转型, 能源问题是当前必须面对、亟待解决的关键。在此背景下, 本文从市场机制的核心——能源价格视角切入, 在已有研究基础上, 梳理出能源“消费效应”和“替代效应”作用机制, 研究分析能源价格对资源环境双重约束下的区域投入产出效率——区域生态效率的影响效应 (Zhang et al.2008^[1]; Huang et al.2014^[2]), 在此基础上就不同类别能源、不同发展阶段以及不同经济水平能源价格发挥的异质性作用深入探究。

现有文献中, 相关学者围绕能源价格主要对其经济效应或环境影响两方面展开分析。一方面, 能源价格能够作用于能源消耗产生一定的经济效应。能源消耗强度表示单位 GDP 的能源消耗量, 是学者考察能源在经济生产中使用情况时关注的指标。在能源价格对能耗强度的影响效应上, 目前结论基本达成一致: 能源价格上涨对能耗强度具有一定抑制作用, 在异

质条件下影响效应存在差异。跨国面板样本, Antonietti R, Fontini F. (2019) 分析了石油价格和能源强度之间关系^[3]。王俊杰、史丹等(2014)认为能源价格提高对能源效率提升的促进作用在发展中国家中更为显著^[4]。而基于工业部门层面数据, 樊茂清等(2012)得出能源价格上涨有效降低了我国大部分部门的能耗强度^[5]。周五七(2016)研究认为, 不同能耗水平的行业, 能源价格上涨降低能耗强度的作用具有显著的差异性^[6]。经济发展的需要, 使得学者愈加关注到能源价格变动对替代性的可再生能源使用的影响。Akinshinwa Sharimakin (2019) 使用 1995-2007 年欧洲工业数据集, 指出能源价格带来的替代与产出效应^[7]。张晓娣和刘学悦(2015)利用动态 OLG-CGE 模型研究发现, 长期来看, 将通过助推节能技术发展及资本流入, 促进经济增长^[8]。陈丛波, 叶阿忠(2021)使用省际月度数据发现, 油价上涨抑制传统能源发电油价提高而增加, 对可再生能源电力生产具有促进作用^[9]。因此, 认为当面临传统能源价格提升, 可再生能源电力具有替补效应, 但目前规模不足限制了替代效应作用的发挥。

另一方面, 能源价格波动对环境产生的影响, 价格触动传统能源消耗降低带来的环境改善作用并不明显。何凌云等(2016)测量了 2001-2013 年中国的能源价格减排效应, 认为能源价格通过影响经济发展产生有效的碳抑制效应, 但总体作用不高^[10]。董锋, 高新起(2016)选择碳排放为目标变量, 分别研究能源价格波动的短期、长期影响。结果表明了经济中结构性变量的传导会有显著的延迟效应^[11]。林伯强, 李江龙(2014)认为可再生能源利用具有初始成本高而可变成本低的特点, 长期来看能够一定程度规避传统能源价格波动风险, 且符合二氧化碳减排需求^[12]。齐绍洲, 李杨(2017)研究表明 1990-2014 年间欧盟国家可再生能源对经济增长存在消极挤出效应, 但有利于二氧化碳排放的减少^[13]。

通过梳理并归纳国内外关于能源价格对生态效率影响的研究, 以下几点值得特别关注: 第一, 能源价格衡量指标的合理性。研究已有针对中国现实背景文献发现, 由于数据获取方面的制约, 不少研究在能源价格指标选取上都面临衡量方法的不统一, 以及采用较为单一的综合指标分析。第二, 能源价格视角下生态效率的驱动机制。国内已有大量文献致力能源利用与生态效率的关系研究, 但值得注意的, 当前我国面临的众多能源矛盾仍基本集中并体现于能源价格问题, 而价格视角的分析下是相对缺乏的。其次, 能源消费所带来的经济效应、环境效应尽管得到众学者肯定, 但对于消费背后的驱动力、能源消耗在何种情况发生何种变化, 由此产生哪些差异性经济环境效应等问题的剖析还需要进一步深入。因此, 本文从能源市场的核心——价格机制出发, 探究其对区域生态效率的非线性复杂影响效应, 并进一步就如何影响不同种类的能源消费量及分阶段对经济环境综合效应进行区分。内容结构如下: 第二部分为能源价格影响生态效率的机理分析, 第三部分为生态效率的测算及分析, 第四章为能源价格对生态效率影响效应的实证研究, 第五章为结论。

二、机理分析

从经济学经典需求定理出发, 其他条件不变, 商品价格上升, 其需求量会随之减少, 这种反向变动关系在现实生活的市场经济运行中得以窥见。而能源作为经济生产生活中举足轻重的物质投入要素, 在现实生活中, 当能源价格水平发生波动上涨, 意味着能源的使用成本增加, 将产生两方面的影响: 其一, 当前产量水平下有损经济利润, 阻碍经济增长; 其二, 较高的价格抑制能源需求量增长, 有利于降低能源使用过程中污染物的排放, 内化能源对生态环境的负外部性。由此可见, 能源价格的变动具有双重且相反的影响效应, 最终呈现出的是对区域经济环境综合性的影响。因此, 本文引入生态效率为目标变量, 综合考虑经济增长、

资源利用与环境污染程度，以期科学合理把握能源的发展规律。

围绕能源价格，学界关于其宏观经济影响的研究文献已较为丰富(林伯强, 牟敦国(2008)^[14]; 王云清(2014)^[15]; 杭雷鸣等(2006)^[16])。但过去较长时期积累下来较为突出的能源和环境问题, 人民对于生活环境改善的需求和全球共同应对温室效应等都对我国作为最大碳排放国提出了新的挑战和要求, 对能源价格的讨论已不能单纯停留在经济层面, 必须结合环境效应来综合分析。需要关注的是, 目前可再生能源作为传统能源的良好替代, 因其可再生及环境友好的属性受到多方重视。但学界关于可再生能源能否减少二氧化碳排放仍没有定论, 而开再生能源对于经济发展的作用积极与否也存在不同观点。但这不能否认发展可再生能源对我国面临的发展与环境的困境的意义。当传统能源价格变动, 可再生能源是否会作为替代品而呈现消费量同方向变动, 从而影响经济与环境? 基于此, 本文将可再生能源列入研究范畴进行讨论。基于对已有研究的梳理, 本文基于以下理论框架对能源价格影响生态效率的机制进行分析, 并提出相应假设以待检验。

2.1 能源消费效应

能源市场价格上涨, 对应的能源商品需求量将减少进而消费量降低, 进而作用于区域的生态效率水平即能源的消费效应。具体来看, 消费效应对生态效率水平的影响将存在阶段性差异。首先, 对比资本、劳动等其他投入要素, 能源的自价格弹性明显较低(陶小马等, 2009)^[17]。这可能是能源投入在生产生活中重要意义而可替代性低, 加之消费者转向可替代要素具有高搜寻成本与转换成本等原因导致。假设能源价格出现波动上涨趋势, 由于自价格弹性低, 在短期内消费者通常难以较大幅度减少能源使用量, 因而生产成本的增加降低了经济收益, 而消费量的维持无法产生环境的改善作用。故此阶段, 生态效率水平将会降低。而随时间推移, 价格上涨趋势逐渐明显, 需求厂商经历了价格观望阶段, 出于维持利润水平的考虑开始不得不减少能源消费量, 将导致此阶段的产量明显缩减, 污染状况将随能源消耗降低逐渐好转, 生态效率下降幅度减弱。

另外, 相关研究发现, 能源价格上涨到较高水平将倒逼相关技术研发(R&D), 有助于传统能源消耗量的减少(Leng Wong, Chia&Chang, 2013)^[18], 此时得益于节能等新技术的利用, 产出水平维持不变或增加, 对环境的污染逐步降低, 从而生态效率有所改善。然而, Berkhout et al.(2000)基于Khazzoom-Brookes假说阐释了能源效率回弹的效应: 相关技术改进一方面提高能源利用效率, 有利于减少能源的使用量; 而另一面也带动能源产品的生产成本的降低, 由此带来价格的下调会相应扩张需求与消费, 进而抵消先前节约的能源消费量^[19]。上述研究表明, 能源价格变动促使绿色节能技术创新, 通过消费效应路径有助于生态效率改善, 但回弹效应对于改善作用存在一定程度地抵消(李凯杰等, 2020)^[20]。

2.2 能源替代效应

生产要素相对价格发生变化, 会引发要素间相互替代以维持产量。全球可持续发展与各国保护能源安全的背景下, 传统能源价格的上涨趋势将促使消费者转向传统能源中较为清洁的能源、可再生能源消费时, 替代发生, 从而对经济、环境产生影响即为传统能源价格引发的能源替代效应。

而规模经济规律下, 能源在替代使用过程中的环境改善作用将受制于经济成本, 从而对区域生态效率的影响存在阶段性差异: 生产要素的投入规模影响着经济产出及环境质量。反映一定技术水平的生产要素配比下, 要素投入量以相同比例调整对产量的调整即规模报酬效应。面临能源价格上涨趋势, 生产不得不减少传统能源投入, 为保持竞争优势、维持甚至扩大生产规模, 一方面, 厂商会寻找能源要素的替代, 另一方面, 提高自身生产技术水平, 开

发利用绿色节能技术,保证利润同时促进生态效率改善。然而,使用可再生能源替代或节能的相关技术开发需要厂房建设、购置先进生产设备、人才引入和研发支出等大量成本投入,而原有能源要素的使用成本上升使得既有产量难以为继,此时,生产成本的明显增加引致经济产出大幅调整型下降,能源替代与节能技术对传统能源的使用影响微弱,因而对环境改善的积极作用难以发挥,生态效率呈现下降的阶段性调整。

但随着相关技术的成熟,可再生能源替代规模随即增加,逐渐分担了较高的初始成本,加之可再生能源边际成本较小且不断下降(齐绍洲,李扬,2017)^[13],其使用成本将实现与传统能源持平,甚至低于传统能源使用成本的转变过程。生产中,不同种类能源要素重新达到合理的要素替代比时,成本进一步降低,新一轮规模经济逐渐发挥作用,将促进经济产出增加。与此同时,可再生能源的有效替代,传统能源使用明显下降和节能技术愈加成熟,污染物排放减少,有利于环境改善,生态效率水平将呈现逐步改善的良好态势。因此,随着技术革新,可再生能源的替代率将逐渐提高,替代规模达到足以抵消初始成本后,可再生能源替代效应将促使生态效率不断改善。基于上述理论分析,本文提出理论假设:能源价格变化影响能源使用情况,对区域生态效率的影响呈现出阶段性、非线性特征。

三、生态效率的测度与分析

3.1 生态效率的概念界定与测算模型

关于测算生态效率的方法随着研究的丰富在发展中不断完善,其中,数据包络分析(DEA)因避免了主观设定生产函数形式以及在包含多投入、产出指标测算过程中不受指标量纲影响的优势,受到愈多学者的重视,已逐渐形成一系列的测度模型。其中值得注意的,Tone于2002年提出非径向非角度超效率SBM模型,有效改善投入和产出的松弛性引致精度低问题,克服了多项效率值为1时,无法对DMU进一步精准识别于排序的问题^[21]。基于此,本文构建含非期望产出的超效率SBM(Super-SBM)模型,其线性表达式如下:将国家作为一个生产决策单元(DMU),假设每个决策单元均包括3个投入产出要素向量:投入 x 、期望产出 y^d 以及非期望产出 y^u ,有 $x \in R^m$, $y^d \in R^{r_1}$, $y^u \in R^{r_2}$,其中上标 m, r_1, r_2 分别表示投入、期望产出与非期望产出的数目。再分别定义矩阵 X, Y^d, Y^u : $X = [x_1, \dots, x_n] \in R^{m \times n}$, $Y^d = [y_1^d, \dots, y_n^d] \in R^{r_1 \times n}$, $Y^u = [y_1^u, \dots, y_n^u] \in R^{r_2 \times n}$ 。假设决策单元 DMU_k 是有效的,则包含非期望产出的超效率SBM模型线性表达式如下所示,式中 w 代表投入产出的松弛变量; λ 为对应的权重向量; i, s, q 分别表示第 i 种投入、第 s 种期望产出与第 q 种非期望产出。当且仅当效率值 $\rho = 1$ 时, DMU_k 是有效的。

$$\min \varphi = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{x}_{ik}}{1 + \frac{1}{r_1 + r_2} \left(\sum_{s=1}^{r_1} \frac{y^d_{sk}}{y^d_{sk}} + \sum_{q=1}^{r_2} \frac{y^u_{qk}}{y^u_{qk}} \right)}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, \neq k}^n x_{ij} \lambda_j, i = 1, \dots, m \\ y^d \leq \sum_{j=1, \neq k}^n y^d_{sj} \lambda_j, s = 1, \dots, r_1 \\ y^u \geq \sum_{j=1, \neq k}^n y^u_{qj} \lambda_j, q = 1, \dots, r_2 \\ \bar{x} \geq x_k, y^d \leq y_k^d, y^u \geq y_k^u, \lambda \geq 0 \end{cases}$$

(3.1)

使用超效率 SBM 模型对 OECD 样本国家 23 年间生态效率评价价值 (EE), $EE_{kt} = \varphi_{kt}$ $k=1,2,\dots,28$ $t=1995,\dots,2017$, EE_{kt} 表示 k 国家在 t 年份的生态效率水平。本文沿用 Super-SBM 模型依托 MAXDEA Pro 软件实现 1995-2017 年 28 个 OECD 国家的生态效率值 (EE) 的测算。

基于数据可得性, 本文测算包含非期望产出要素的生态效率。其中, 投入要素使用年末就业人数衡量劳动投入、年度能源终端消费总量 (不包括能源转化与能源生产产业自用的部分) 衡量能源投入以及固定资本存量衡量资本投入。期望产出指标为各国的 GDP, 非期望产出为温室气体排放总量, 以二氧化碳当量表示, 涵盖一国领土内排放的对气候变化有直接影响、被认为是造成全球变暖的主要原因的六种温室气体排放总量综合计算。该六种温室气体分别为二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄)、一氧化二氮 (N₂O), 氟氯烃 (CFCs)、氢氟碳化合物 (HFCs)、全氟化合物 (PFCs) 和六氟化硫 (SF₆)。其中 GDP 与固定资本存量以 2011 年不变价美元的计价单位。本小节数据由 OECD 数据库官方网站 (oecd.stata)、OECD Environment Statistics (database)、来自宾夕法尼亚大学世界表 (Penn World Table) 9.1 版本及世界银行数据库 (The World Bank) 整理得来。

3.2 生态效率的测算结果分析

1995-2017 年 28 个 OECD 国家, 基于规模报酬可变的假设前提计算得出生态效率值。如前文所述, 非合意产出的超效率 SBM 模型中, 决策单元测度的效率值大于等于 1 被认为有效率, 否则为相对无效率。参考罗能生, 王玉泽等 (2018), 本文将 DMU 效率值 1 界定为中等生态效率, 低于此中点的则认为该决策单元呈现低效率水平^[22]。

从 OECD 国家整体来看, 1995—2017 年各国的生态效率水平较高, 总体呈现逐步上升态势, 但总体提升幅度较小, 效率值由 1995 年的 0.82 升至 2017 年的 0.85。在 644 个样本中, 98 个样本的效率值不足 0.5, 占比 15%。

由于 OECD 发展过程的历史渊源, 欧洲国家相较其他地区占比大, 因此从空间层面对区域内部各国家之间潜在的差异性进行有效把握。利用 Pixel Map Generator 从微观层次, 将各国家的生态效率值排序后顺次划分为 4 个档次, 绿色、紫色、蓝色和黄色分别表示生

态效率高、次高、次低、效率低，绘制本文研究期间内 1995 年和 2017 年各国生态效率水平的空间截面图(下图 3.1、图 3.2 所示)。

样本考察期内的 23 年间，OECD 各国生态效率水平差异明显。生态效率低、生态效率高的国家(黄色和绿色)数量未有明显变化。由分布图可知，居于评价值两端的这两类国家居少数，占样本整体的 32%左右，但其效率值的差距较为明显且逐渐扩大，1995 年、2017 年最低和最高的评价值差由 1.13 扩大到 1.21。这一定程度说明了样本国家间存在着生态效率的两极分化，不利于区域的协调发展以及全球绿色发展战略推进。其中，最末位的捷克共和国 23 年间形势一直未发生扭转，评价值维持在 0.35 左右，与其他成员国差距明显。本文分析认为，这与捷克曾原为奥匈帝国的工业区，70%的工业集中于此，二战后坚持重点发展钢铁、重型机械工业等历史发展路径有较强关联。目前，捷克共和国是全球最集中的汽车产业制造与设计中心之一，工程产业是其经济支柱，主要优势产业仍集中在汽车、航空和工程产业等重工业。更进一步，根据捷克共和国的投入产出数据可知，工业重器制造需要大额资本注入，而温室气体的排放未得以改善，使得生态效率水平持续在低水平。

除此之外，处于次低水平的国家小幅减少 1 个，次高水平的国家增加了 2 个，相对增幅大，说明大多数国家对于资源环境的重视程度在与日俱增，致力于生态效率的优化。

以 2017 年为例，美国、爱尔兰、瑞士、波兰、斯洛伐克共和国、新西兰、法国、挪威等十三个国家的生态效率水平较高，效率值均不同程度高于 1，其中相对水平最低的德国达到了 1.02 水平值。与此鲜明对比的捷克共和国、葡萄牙、比利时、希腊与奥地利为生态效率水平排名靠后的五个国家，其中相对水平最低的捷克共和国当年效率值为 0.38，相对最高的奥地利效率值 0.47，不足 0.5，表明这些国家 2017 年呈现生态效率相对低效的水平。

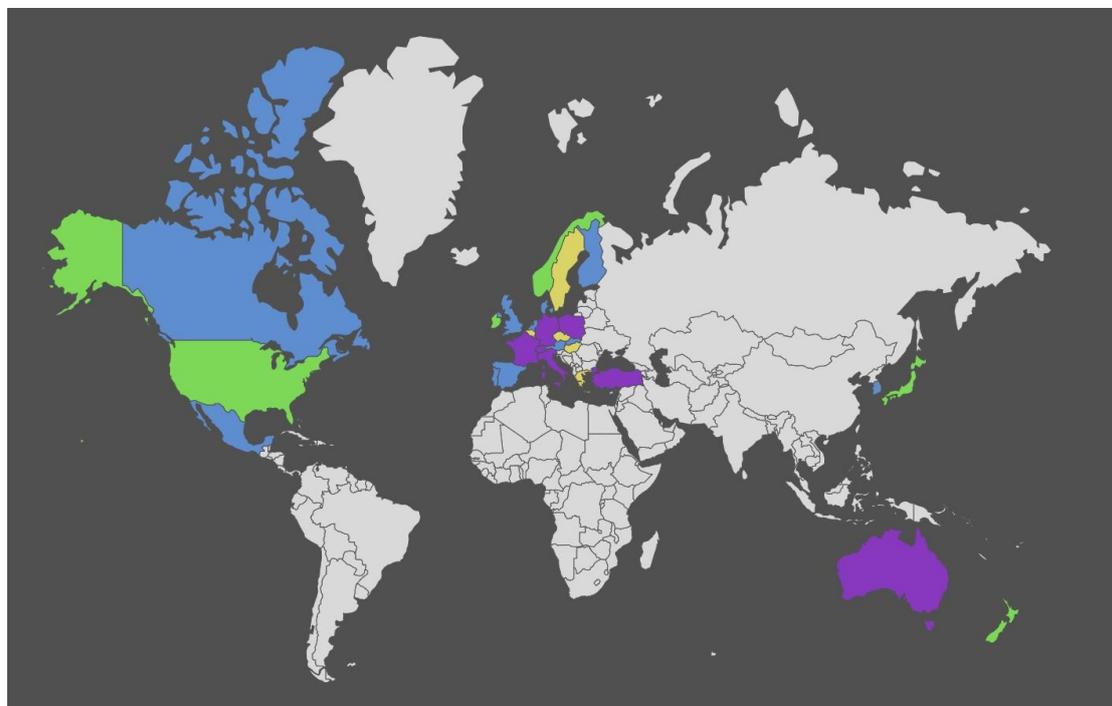


图 3.1 1995 年生态效率空间分布图

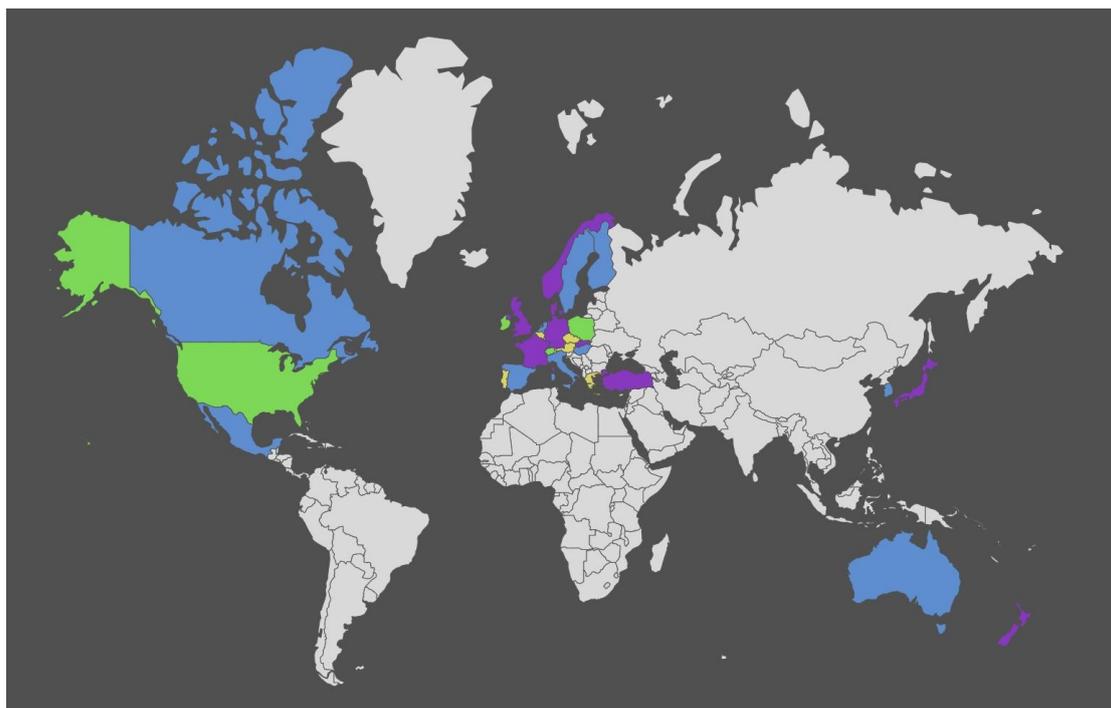


图 3.2 2017 年生态效率空间分布图

四、能源价格对生态效率的实证研究

4.1 基准模型构建

基于前文的理论分析部分，本节构建实证模型探讨能源价格与生态效率之间潜在关系。考虑到一国或地区的生态效率具有时间惯性，本文参考罗能生等（2019）研究结果，加入该国滞后一期的生态效率构成动态面板模型^[23]。为检验理论分析部分提出可能存在的非线性关系，将能源价格及其二次项同时纳入模型。基准模型 4.1 设定如下：

$$EE_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 EE_{it-1} + \alpha_2 EP_{it} + \alpha_3 EP_{it}^2 + \sum_{j=1}^n \beta_j X_{jit} + \varepsilon_{it} \quad (4.1)$$

其中，被解释变量 EE_{it} 是 i 国 t 年的生态效率值，核心解释变量 EP_{it} 为 i 国在 t 年的能源价格水平，其系数表示 i 国在 t 年能源价格对其生态效率的影响，是本文关注的核心。 EE_{it-1} 为 EE_{it} 滞后 1 期， EP_{it}^2 为 EP_{it} 的平方项， n 为模型中控制变量数目， X_{jit} 为控制变量向量，表示其他影响生态效率的因素， ε_{it} 代表随机误差项。

本文选取经合组织 (OECD) 中数据相对完整的 28 个国家作为研究对象，按照其官方的地区分类，包括亚洲大洋洲地区国家 4 个、欧洲地区 21 个和美洲地区国家 3 个，时间跨度为 1995-2017 年。经合组织占全球人口的 17%，GDP 的 44%，能源生产的 30%，同时是全球主要的能源消费国，2000 年占全球能源消耗的一半以上 (51.8%)，2017 年仍占 38% (IEA, 2017)。而该组织成员国多数为高收入国家与中高收入国家，具有发达的市场经济体系与金融体系，在过去的几十年中，是新能源开发、可再生能源利用与环境保护的先行者。此外，这些国家在经济发展和政治体制方面相对同质，一定程度降低了普遍困扰跨国调查的遗漏变量偏差 (Madsen et al. 2018)。本文选取 OECD 国家为研究样本进行探讨能源价格与生态

效率的关系,对于我国深入实施可持续发展战略,推动能源市场体系改革,加快经济社会发展全面绿色转型提供重要的借鉴意义。

4.2 变量说明

(1) 核心解释变量

考虑到价格的绝对值可能不具备研究意义和统计意义上的可比性问题,参考 Misato Sato, et al. (2019), 能源价格指数选取使用 IEA 官方发布的工业终端能源使用价格数据库 (Energy End-Use Prices database), 以能源消费结构为权重计算不同类别能源实际价格的加权平均值, 便于价格跨国比较, IEA 向 OECD 等国家提供标准问卷, 由其国家统计局等官方机构填写进行各国能源的年均价格等数据的搜集, 相关缺失数据则由国家官方统计渠道补充^[25]。

根据 IEA 的定义,工业部门能源终端使用价格是工业部门在一段时间内购买既定产品所支付的平均单价,即购买既定产品所花费的总金额与该产品的总销售量之比。既定的一揽子能源产品包括:石油产品、煤炭、天然气以及电力。用各国生产者价格指数 (PPI) 对名义货币计价的能源产品平减,2010 年为固定基期,从而得到该国家的能源终端实际价格指数,反映了能源价格的变化趋势。

(2) 控制变量

参考 Huang, Xia (2016) 使用与生态效率密切相关的,涉及不同层面的因素,控制变量主要包括 (1) 人口密度 (PD): 以年中人口除以一国土面积 (平方公里) 表示。(2) 技术进步 (TEC): 用各国向欧洲专利局 (European Patent Office) 专利申请授权数的对数表示。(3) 产业结构 (IS): 以工业 (包括建筑业) 增加值占一国 GDP 的比重来刻画。(4) 投资开放度 (FDI): 以各国实际外商直接投资额占 GDP 的百分比衡量。(5) 环境规制 (ER): 选用环境相关税收占 GDP 的比重刻画。各指标数据主要来自 OECD 数据库官方网站

(oecd.stata)、能源终端价格数据库、OECD Environment Statistics (database)、来自宾夕法尼亚大学世界表 (Penn World Table) 9.1 版本、世界银行数据库 (The World Bank) 及国际能源署 (IEA) 整理得来。针对原始数据的缺失问题使用线性插值与线性外推法进行平滑处理。下表 4.1 报告主要变量的描述性统计结果。

表 4.1 主要变量的统计特征

变量	均值	标准差	最小值	最大值	观测数
EE	0.847	0.304	0.305	1.558	644
EP	0.883	0.173	0.421	1.303	644
IS	26.023	5.038	13.682	40.295	644
FDI	4.754	8.806	-15.839	86.589	644
ER	2.366	0.853	-1.530	5.372	644
TEC	6.805	1.973	1.535	10.604	644
PD	4.369	1.315	0.855	6.267	644

4.3 全样本实证结果分析

模型引入滞后项,方便考察研究个体的动态行为,同时带来了内生性问题,使用 OLS 或者固定效应模型估计得到的结果是有偏的。本文采用发展较为成熟的处理方法系统广义矩估计 (SYS-GMM) 对模型进行估计。系统 GMM 模型允许使用内生自变量与滞后期因变量作为工具变量,相较同系列的差分 GMM,能够有效改善解释变量的内生性问题、降低测量

误差以及非时变的遗漏变量问题从而显著提升估计效率 (Caselli et al., 1996), 后文将差分 GMM 方法列入稳健性检验中予以对比。

本研究使用 xtabond2 命令在 stata16 实现模型的估计, 使用 collapse 选项限制最多使用 q 阶滞后变量作为工具变量, 来保证 Hansen 统计量检验精度, 处理工具变量的过度识别问题, 避免出现 p 值为 1 的不可信结果。其次, 加入 robust 选项获取纠偏后的稳健性标准误对回归系数进行修正。最后, 使用 twostep 选项进行系统 GMM 的两阶段估计。

表 4.2 中给出了模型(1)的回归结果, Hansen 检验的 P 值介于 0.1—1 取值范围之间意味着样本不存在过度识别, 该模型设定与工具变量的选择是合理的, AR (2) 检验误差项不存在二阶自相关。本文重点关注能源价格变化对生态效率水平的影响: 能源价格一次项系数显著为负, 其二次项系数于 5% 显著性水平上为正, 即能源价格变化与生态效率水平之间存在显著“U 型”曲线效应, 其拐点出现在能源价格为 0.957, 这表明, 控制了其它影响生态效率的国家层面因素、时间变化因素条件下, 能源价格显著影响一国的生态效率水平, 能源价格的上涨对生态效率水平具有非线性影响。

“U”型关系意味随着能源价格向上的逐步累积, 以及时间推移, 其对经济环境的延迟效应渐渐减弱, 最终能源价格的波动调整对生态效率水平由负向转为更为显著的正向的影响。滞后一期的生态效率水平的回归符号显著为正, 验证了一国生态效率评价具有时间累积性。

控制变量本文样本期数据的估计结果显示, 一国一般性科技水平的发展与生态效率水平在 5% 显著性水平上正相关, 说明科技进步能够显著促进生态效率水平的改善。人口密度与生态效率存在显著负相关关系, 当人口在一国之内快速聚集, 经济产出增长在享受规模效益带来的福利背后是逐渐沉重的环境承载压力, 一国人口密度在国土范围内不断提高, 就会对其在经济发展中的治理环境污染、生态恶化能力提出更为严峻的考验, 如不及时采取相关的改善环境的措施, 势必造成生态效率的恶化。本文重点关注能源价格变化对生态效率水平的影响, 其他控制变量效应如产业结构 (IS) 等不具有统计上显著性, 不再赘述。

表 4.2 能源价格对生态效率影响的回归结果

自变量	基准回归	稳健性检验	
		方法 1	方法 2
L.EE	0.6539*** [0.18639]	0.16146*** [0.03433]	0.21411* [0.12005]
EP	-0.9781* [0.50028]	-0.79182*** [0.10611]	-0.68054** [0.27598]
EP ²	0.5109** [0.25107]	0.46310*** [0.05696]	0.35147** [0.14058]
IS	0.0037 [0.00686]	-0.01185*** [0.00125]	-0.00207 [0.00204]
TEC	0.0734** [0.03622]	-0.00609 [0.00919]	0.07058* [0.04252]
PD	-0.2086* [0.12303]	-0.07973*** [0.02754]	-0.27131 [0.24728]
FDI	0.0016* [0.00091]	0.00134*** [0.00029]	0.00022 [0.00037]
ER	0.0236 [0.03699]	-0.00667 [0.00835]	-0.02530 [0.03504]
N	616	616	588
AR (2) 检验 P 值	0.285	0.361	0.257

Hansen 检验 P 值	0.585	0.396	0.845
---------------	-------	-------	-------

注：*、**、***分别表示在 10%、5%、1%的显著性水平下双尾检验通过，括号内是 z 统计值。

4.3.1 稳健性检验

为检验基准模型的样本回归结果，保证后续进一步实证分析的展开，本文两方面进行稳健性检验：（1）替换因变量。使用基于规模报酬不变假设的生态效率测算结果替换原有因变量，使用前述方法重新检验。（2）替换模型估计方法。使用差分 GMM 方法对模型 4.1 重新检验。上述两种稳健性检验（见表 4.2 中稳健性检验列）得到的模型各项系数大小和符号都保持稳定，且均能通过 Hansen 和 AR（2）检验。结果显示，能源价格、以及滞后一期生态水平的符号与基准回归结果、显著性基本保持稳定，说明能源价格对生态效率的影响效应在统计上显著稳健。

4.4 异质性分析

前述基准回归结果中，能源价格的波动会显著影响一国的生态效率水平，且结论具有稳健性。然而，现实经济生活中，能源价格机制是在更为复杂，具有差异性的环境下发生作用，那么，有必要考虑以下几种典型情景：不同种类的能源产品的价格引发的经济环境效应是否有所差异？在不同时期、不同福利水平国家中，能源价格对生态效率的影响是否会发生变化？基于上述问题，做出进一步探索。

4.4.1 分能源类别价格的差异性分析

能源价格变动对生态效率的作用效应的差异，本小节基于生产生活使用广泛的石油产品与天然气两类能源价格数据，建立模型 4.2、4.3 进行异质性分析，结果见表 4.3。

$$EE_{oit} = \varphi_0 + \varphi_1 EE_{oit-1} + \varphi_2 Oil_{it} + \varphi_3 Oil_{it}^2 + \sum_{j=1}^n \lambda_j X_{jit} + \varepsilon_{it} \quad (4.2)$$

$$EE_{Nit} = \gamma_0 + \gamma_1 EE_{Nit-1} + \gamma_2 NG_{it} + \gamma_3 NG_{it}^2 + \sum_{j=1}^n \eta_j X_{jit} + \varepsilon_{it} \quad (4.3)$$

模型 4.2 和 4.3 中， Oil_{it} 、 NG_{it} 分别表示 i 国在 t 年的石油产品、天然气价格指数，其系数分别表示该国当年的石油产品价格、天然气价格变动对生态效率水平的影响效应。 EE_{oit} 与 EE_{Nit} 分别对应该国家在 t 年石油和天然气的生态效率水平，模型余下的因变量滞后 1 期项、价格的平方项、控制变量和随机误差项与模型 4.1 中一致。

表 4.3 结果显示，不同类型能源价格对生态效率影响效应不同。石油产品价格对生态效率的影响效应呈现先降低后改善的“U”型结果，于全样本基准回归一致，而天然气的生态效率效应则与此相反，呈现倒“U”型结果。

本文分析认为，当石油产品价格上涨，由于现实经济生产中石油需求巨大，价格弹性较低，价格上涨的初期对消费规模降低的影响并不明显，由此带来环境改善作用微弱，相对比，价格上涨带来实际生产使用成本上升效应更为突出，因此在价格上涨初期会导致生态效率整体呈现下降态势。但随着油价走高趋势愈演愈烈，能源替代效应将逐渐发挥作用，由此将带来生态效率改善。

而天然气相对比石油产品，在化石能源中可属于清洁能源的范畴，使用天然气代替其他高污染化石能源可有效降低污染。由于能源使用缺乏价格弹性，当天然气价格上涨初期，购买成本仍处于相对低位，不会迅速逆转使用天然气带来的生态效率水平的改善；随着价格上

涨趋势愈加明晰,将会一定程度挫伤天然气消费能力。为了保证产能利用,能源需求者转而寻求替代能源。此时,减少天然气使用量的行为不利于环境改善的保持,更不利的,需求者如果选择发展成价格相对低廉的传统能源替代,则会加重生产中对环境的污染。而环境恶化程度高于经济成本增加时,生态效率水平会显现出暂时提高。而随着天然气价格持续上涨,对天然气相关产业将是较为严重的打击,此时经济成本上涨效应远超环境效应,生态效率水平也随之下降。综合上述分析可知,当政府出台能源价格相关调节政策时,应根据不同类型能源使用情况,制定差异性的政策,才能实现能源、经济和环境效益的协调。

表 4.3 分类别能源回归结果

解释变量	模型 4.1	模型 4.2
L.EE	0.7303*** [0.20469]	0.3242** [0.12870]
Oil	-0.7371* [0.40002]	
Oil ²	0.3698* [0.20679]	
NG		0.1971** [0.08917]
NG ²		-0.1445*** [0.04478]
IS	0.0034 [0.00370]	0.0024 [0.00322]
TEC	0.0749** [0.03573]	0.0604*** [0.01165]
PD	-0.1248 [0.10464]	-0.2197*** [0.04866]
FDI	0.0012 [0.00118]	0.0008 [0.00051]
ER	0.0137 [0.04577]	0.0066 [0.01982]
N	616	616
AR (2) 检验 P 值	0.281	0.274
Hansen 检验 P 值	0.343	0.469

注: *、**、***分别表示在 10%、5%、1%的显著性水平下双尾检验通过,括号内是 z 统计值。

4.4.2 分时间段的差异性分析

美国次贷危机引发了波及全球的金融危机,对世界各国的发展具有持续性显著影响,经济低迷、生产锐减、出口受困、失业率激增等几乎成为困扰每个国家的棘手问题。为更清晰地分析不同经济环境下能源价格对生态效率的影响效应,本小节将样本划分 1995-2007 年和 2008-2017 年两个阶段,通过差异化时段分析,对把握能源价格对生态效率的影响效应在受到金融危机等外部重大冲击时的变化,使得本文相关结论更为科学、全面(结果见表 4.4)。

可以看出,分时段检验使全样本回归被部分相互抵消的影响更为清晰地展现。1995-2007 年能源价格对生态效率的影响呈现出正“U”型。其中核心解释变量能源价格一次项系数的绝对值是其二次项系数近两倍,说明在此时期能源价格对生态效率的负向影响更为明显,而 2008-2017 年能源价格对生态效率影响为倒“U”型,能源价格一次项系数为正,且明显高于二次项系数绝对值,说明 2008-2017 阶段能源价格发挥促进生态效率改善效应更为明显。

这与前文理论分析部分相吻合，该结果是由多种机制共同影响：第一，能源价格提高，由于价格弹性低等原因并不能立即对能源消费总量及传统能源的使用造成显著影响，因而无法促使污染物排放减少，最终生态效率改善。在该阶段，能源价格上升带来经济产出成本的增加明显超出价格上升，消费量减少的减排作用，也就形成了能源价格上升初期，生态效率水平降低的现象。第二，能源替代效应将随经济发展水平的提高、科技进步的深入推进愈加明显。金融危机的波及使得 2007 年后各样本国的经济增长率呈现大幅度地下降¹，能源强度有所降低，此时可再生能源替代产生的经济成本较低，呈现出正向的替代效应。第三，规模经济效应显现。2008 年后，可再生能源规模随着经济的波动调整进一步扩大，这为相关绿色技术学习与扩散、人才培养以及长期平均成本的降低提供了规模基础。而环境效应表现为污染物排放减少，有利于生态效率的逐步改善。

上述结果表明，2008 年金融危机过后传统能源耗用量有所回落，此时可再生能源具有将为明显的正向替代效应。各 OECD 国家应抓住机遇窗口期，实现能源替代促进经济生产的低碳转型，以培育壮大低碳经济为各国家经济增长的新引擎。

表 4.4 分时段回归结果

解释变量	1995-2007 年	2008-2017 年
L.EE	0.50569* [0.30291]	0.38163* [0.20610]
EP	-0.81125** [0.38164]	2.04803* [1.15283]
EP ²	0.45271** [0.21675]	-0.99559* [0.56026]
IS	-0.00170 [0.00438]	-0.00122 [0.00430]
TEC	0.03417* [0.02073]	-0.00792 [0.02357]
PD	-0.11961 [0.09480]	0.00094 [0.00097]
FDI	-0.00027 [0.00089]	0.03662* [0.02138]
ER	-0.02098 [0.02726]	-0.07029*** [0.02535]
N	336	252
AR(2)检验 P 值	0.430	0.253
Hansen 检验 P 值	0.949	0.866

注：*、**、***分别表示在 10%、5%、1%的显著性水平下双尾检验通过，括号内是 z 统计值。

4.4.3 分经济发展水平的差异化分析

以经济发展水平的高低排序将 OECD 样本国家划分为两个样本分别回归，检验不同福利水平的国家能源价格的生态效率效应是否存在明显差异。其中，经济发展水平以人均 GDP 指标衡量，得出以下结论（见表 4.5）：在人均 GDP 高的国家，能源价格滞后效应得到改善；但对生态效率的提升作用，相比于发展水平低的国家缺较为微弱。本文分析，发展程度高的样本国家在技术、产业结构以及金融市场体系发展成熟，具有明显比较优势。再加之对生态保护的重视等原因，表现为一方面能源的利用效率高，另一方面，传统能源在能源结构中占比逐渐降低。因此，能源价格的上涨对国内传统能源消费影响较小，从而对生态效率的改善作用较低。而发展水平低的国家仍存在明显的能源结构改良空间，加之生产中对传统能源的

¹ 1990~2007 年与 2008~2014 年样本中 OECD 国家实际 GDP 年均增速分别为 3.37% 与 1.42%。

依赖使得价格的提升作用较为明显。以上结论表明，对于严重依赖传统能源生产、发展水平较低的国家，能源市场价格可以作为改善能源结构、提高能源效率和转变经济发展方式的有力工具。

表 4.5 分经济发展水平的回归结果

解释变量	发展水平较高	发展水平较低
L.EE	0.7716*** [0.24476]	0.9068*** [0.15683]
EP	-0.3419** [0.14586]	-1.1543* [0.63506]
EP ²	0.1761** [0.07134]	0.6367* [0.35936]
IS	-0.0012 [0.00293]	0.0039 [0.00373]
TEC	0.0190 [0.01935]	0.0342 [0.02829]
PD	-0.0025 [0.01694]	-0.0666 [0.05537]
FDI	0.0005 [0.00049]	0.0004** [0.00020]
ER	-0.0301 [0.03683]	0.0177 [0.01839]
N	307	280
AR(2)检验 P 值	0.947	0.303
Hansen 检验 P 值	0.995	0.972

注：*、**、***分别表示在 10%、5%、1%的显著性水平下双尾检验通过，括号内是 z 统计值。

六、结论

价格是市场机制的核心，能源价格作为能源消耗的内在驱动力，能否发挥出杠杆调节作用从而协调经济发展、环境保护与能源利用关系，释放新一轮能源经济潜力？从以上问题出发，本文遵循选题背景——机理分析——指标测算——实证分析——结论的逻辑结构，对能源市场价格波动是否影响区域生态效率展开深入研究。考虑到我国能源价格市场化发展阶段，采用市场体系成熟同时积极倡导绿色经济发展的 OECD 国家 1995-2017 年的面板数据，重点探究价格对区域生态效率水平是否具有显著影响、是怎样的影响以及如何影响等问题。

结论表明，随着能源价格上涨，对生态效率的改善具有延迟效应，二者之间呈现“U”型曲线关系。进一步探讨发现，当分能源类别、差异化经济发展水平以及不同研究时期下，价格波动影响经济环境综合效益同样存在差异，为了验证结论的有效性进行不同形式的稳健性检验。结论如下：

理论分析部分，结合已有相关研究梳理总结出两条本质性的传统路径——能源消费效应与替代效应。对于消费效应，价格因能源自价格弹性低的特点，延迟冲击消费量从而区域生态效率水平受能源消耗影响表现出持续降低后上升的变化趋势；而当价格波动到一定高度倒逼节能技术进步，一方面将促使能源效率提升，生态效率逐渐改善；但另一方面技术进步拉动新一轮能源消费而不利于污染状况的改善。对于替代效应，传统能源价格上涨激发可再生能源的替代，初期由于投入成本高等原因，抑制了对生态效率改善作用的发挥。而随着规模效应逐渐加持，替代效应将逐渐释放出新动力，积极带动经济低碳向好发展，在此基础上提

出假设以待检验。

实证分析部分,本文使用国际能源署发布由多种能源实际价格加权计算的能源终端消费价格指数,就能源价格波动与区域生态效率关系展开实证研究。基准回归结果显示,在控制了其它影响生态效率的国家层面因素、时间变化因素,能源价格变化会显著影响一国的生态效率水平,且与生态效率呈现出显著的“U型”曲线关系,随着价格向上的逐步累积,其对经济环境的延迟效应渐渐减弱,最终能源价格的波动调整对生态效率水平由负向转为更为显著的正向影响,理论假设得以证实。除此之外,本部分依照能源类别、发展时期以及不同的经济发展程度等,对能源价格波动与生态效率关系深入探讨,值得注意的,天然气价格的上升确可促进生态效率改善,但过犹而不及,天然气具有清洁低碳属性,面对过高的天然气价格将显著影响相关产业发展,从而显著阻碍生态效率的改善。

参考文献

- [1]Zhang B, Bi J, Fan Z, Yuan Z, Ge J. Eco-efficiency analysis of industrial system in China: A data envelopment analysis approach [J]. Ecological Economics. 2008,68: 306-316.
- [2]Huang J, Yang X, Cheng G, Wang S. A Comprehensive Eco-efficiency Model and Dynamics of Regional Eco-efficiency in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 67(3): 228-238
- [3]Antonietti R,Fontini F . Does energy price affect energy efficiency? Cross-country panel evidence[J]. Energy Policy, 2019, 129:896-906.
- [4]王俊杰,史丹,张成.能源价格对能源效率的影响——基于全球数据的实证分析[J].经济管理,2014,36(12):13-23.
- [5]樊茂清,郑海涛,孙琳琳,任若恩.能源价格、技术变化和信息化投资对部门能源强度的影响[J].世界经济,2012,35(05):22-45
- [6]周五七.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[J].数量经济技术经济研究,2016,33(02):130-143.
- [7]Sharimakin A . Measuring the energy input substitution and output effects of energy price changes and the implications for the environment[J]. Energy Policy, 2019, 133(Oct.):110919.1-110919.13.
- [8]张晓娣,刘学悦.征收碳税和发展可再生能源研究——基于 OLG-CGE 模型的增长及福利效应分析[J].中国工业经济,2015(03):18-30.
- [9]陈丛波,叶阿忠.传统能源、可再生能源电力生产与经济增长——基于半参数结构全局向量自回归模型的实证分析[J].华南理工大学学报(社会科学版),2021,23(01):60-72.
- [10]何凌云,程怡,金里程,钟章奇.国内外能源价格对我国能源消耗的综合调节作用比较研究[J].自然资源学报,2016,31(01):1-16.
- [11]董锋,高新起.能源价格对碳排放强度的影响研究——基于独立变量与交叉变量影响的分析[J].价格理论与实践,2016(09):97-100.
- [12]林伯强,李江龙.环境治理约束下的中国能源结构转变——基于煤炭和二氧化碳峰值的分析[J].中国社会科学,2015(09):84-107+205.
- [13]齐绍洲,李杨.可再生能源消费影响经济增长吗?——基于欧盟的实证研究[J].世界经济研究,2017(04):106-119+136.
- [14]林伯强,牟敦国.能源价格对宏观经济的影响——基于可计算一般均衡(CGE)的分析[J].经济研究,2008,43(11):88-101.
- [15]王云清.能源价格冲击与中国的宏观经济:理论模型、数值分析及政策模拟[J].经济学动态,2014(02):44-57.

- [16] 杭雷鸣, 屠梅曾. 能源价格对能源强度的影响——以国内制造业为例[J]. 数量经济技术经济研究, 2006(12):93-100.
- [17] 陶小马, 邢建武, 黄鑫, 周雯. 中国工业部门的能源价格扭曲与要素替代研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2009, 26(11):3-16.
- [18] Wong S L, Chang Y, Chia W M. Energy consumption, energy R&D and real GDP in OECD countries with and without oil reserves[J]. Energy Economics, 2013, 40(C):51-60.
- [19] Berkhout, Peter, H. G, et al. Defining the rebound effect. [J]. Energy Policy, 2000.
- [20] 李凯杰, 董丹丹, 韩亚峰. 绿色创新的环境绩效研究——基于空间溢出和回弹效应的检验[J]. 中国软科学, 2020(07):112-121.
- [21] TONEK. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J] European Journal of Operational Research, 2001, 130(3) : 498 — 509
- [22] 罗能生, 王玉泽, 彭郁, 等. 长江中游城市群生态效率的空间关系及其协同提升机制研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 027(007):1444-1453.
- [23] 王玉泽, 罗能生. 对外直接投资对母国收入差距的影响效应——基于跨国面板数据的研究[J]. 中国管理科学, 2019, 27(04):1-12.
- [24] 余燕团. 中国城市生态效率的空间溢出及其驱动机制研究[D]. 湖南大学, 2018
- [25] A, Misato Sato, et al. "International and sectoral variation in industrial energy prices 1995 - 2015 - ScienceDirect." Energy Economics 78(2019):235-258.

The influence of Energy Prices on Eco-efficiency: Analysis based on the data of OECD Countries

Luo Nengsheng and Deng Mingyang

(School of Economics and Trade, Hunan University, Changsha, Hunan Province, 410006)

Abstract: Under the strong constraints of goals such as "carbon neutrality" and the requirement to establish a domestic and international dual-cycle economic development pattern have made it increasingly important to explore the relationship between energy use, economic growth and environmental protection. In this paper, renewable energy is included in the research category, trying to sort out the impact mechanism of energy price changes on the level of eco-efficiency, using panel data from 28 OECD countries from 1995 to 2017, uses the system generalized moment estimation (SYS-GMM) method to deal with the endogenous problem of the model, and conduct empirical tests on the dynamic nonlinear impact of energy prices on ecological efficiency. On this basis, we will further explore the differences in the impact of energy price changes on ecological efficiency under the conditions of heterogeneity, and verify that there may be two impact paths to construct a mediation effect model, and finally draw the following conclusions: (1) On the whole, in control In addition to other national-level factors and time-varying factors that affect eco-efficiency, changes in energy prices will significantly affect a country's eco-efficiency level, and show a significant "U-shaped" curve relationship with eco-efficiency, that is, as the price increases gradually, its delay effect on the economic environment gradually weakened, and finally the fluctuation adjustment of energy prices has turned from a negative to a more significant positive impact on the level of eco-efficiency. (2) In countries with different energy types, different periods and different levels of economic development, fluctuations in energy prices have differential impacts on eco-efficiency. (3) The intermediary effect model verifies that

energy prices promote the occurrence of energy "substitution effects" through the "consumption effect" acting on energy, and ultimately affect the level of regional ecological efficiency. This research provides a research foundation for my country to further scientifically handle the relationship between energy use, economic growth and ecological protection. It has theoretical significance for realizing the transformation of energy use, taking the path of low-carbon and clean development, deepening the reform of the energy price market, and promoting the overall green transformation of economic and social development.

Keywords:Energy Prices; OECD Countries; Eco-Efficiency