

## 能源价格波动、高能效资本动态累积与资本 - 能源替代关系

杨 冕<sup>1,2</sup>, 徐江川<sup>2</sup>, 杨福霞<sup>3</sup>

(1. 武汉大学 经济发展研究中心, 武汉 430072; 2. 武汉大学 经济与管理学院, 武汉 430072;  
3. 华中农业大学 经济与管理学院, 武汉 430070)

**摘 要** 资本与能源之间的替代关系是节能减排政策制定过程中的重要参考因素. 本文在数理演绎能源价格波动影响高能效资本动态累积内在机理的基础上, 通过构建动态要素需求模型, 探究资本与能源之间关系由短期互补向长期替代的转变机制. 随后, 基于 1995–2018 年中国 30 个省份面板数据进行实证研究, 结果表明: 1) 在样本期内, 我国资本存量的能源效率得以持续提升, 年均增长率达 9.25%. 2) 能源价格波动所产生的诱致性技术进步对新增资本能源效率的提升具有重要促进作用, 其在样本期内的平均贡献为 42.86%. 3) 外生技术进步率的年均值为 6.2%, 其对新增资本能源效率提升的贡献高达 57.14%. 4) 资本与能源在短期内呈现互补关系, 而长期内则转变为替代关系; 能源价格波动所诱发的资本存量能效的提升在短期内减弱了资本与能源的互补关系, 而在长期内增强了两者的替代关系.

**关键词** 能源价格波动; 诱致性技术进步; 资本能效; 替代弹性

## Energy price fluctuations, dynamic accumulation of energy-efficient capital and energy-capital substitutability

YANG Mian<sup>1,2</sup>, XU Jiangchuan<sup>2</sup>, YANG Fuxia<sup>3</sup>

(1. Center of Economic Development Research, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Economics and Management School, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. College of Economics and Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract** Based on an in-depth analysis of the internal mechanism of energy price fluctuations impacting the dynamic accumulation of energy-efficient capital, this paper investigates the transformation process from the complementary relationship between capital and energy in the short-run to the substitutional relationship in the long-run by constructing a dynamic factor demand model. Then some empirical studies are conducted based on the panel data of 30 administrative provinces in China during 1995–2018, and the results indicate that: 1) The energy efficiency of the capital stock increases continuously with its average annual growth rate at 9.25% over the whole study period. 2) The energy price-induced technological change plays an important role in improving the energy efficiency of new capital; specifically, energy efficiency of new capital increases by 1.143% when energy price rise by 1%. 3) The annual average rate of exogenous technological progress is 6.2%, and its contribution to the improvement of energy efficiency of new capital is as high as 57.14% over the study period. 4) Capital and energy are complementary in the short-run but substitutional in the long-run; moreover, the improvement of energy efficiency of capital caused by

收稿日期: 2020-10-19

**作者简介:** 杨冕 (1983–), 男, 汉, 江苏连云港人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 能源与环境经济学, E-mail: yangmian909@163.com; 徐江川, 男, 汉, 湖北武汉人, 博士研究生, 研究方向: 能源经济学, E-mail: shadowfaxjc@163.com; 通信作者: 杨福霞, 女, 汉, 河南濮阳人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 资源与环境经济学, E-mail: yangfx@mail.hzau.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目“高能效资本累积视角下能源价格合理调控区间: 微观机制与模拟分析”(72073105); “能源价格扭曲纠正视角下中国工业全要素生产率提升潜力与实现路径研究”(71774122); “环境税内生假定下合理税率及其动态优化研究”(71874064)

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (72073105, 71774122, 71874064)

**中文引用格式:** 杨冕, 徐江川, 杨福霞. 能源价格波动、高能效资本动态累积与资本 - 能源替代关系 [J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(9): 2284–2299.

**英文引用格式:** Yang M, Xu J C, Yang F X. Energy price fluctuations, dynamic accumulation of energy-efficient capital and energy-capital substitutability[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2021, 41(9): 2284–2299.

energy price fluctuations weakens the complementarity between capital and energy in the short-run, while it strengthens the substitutional relationship between capital and energy in the long-run.

**Keywords** energy price fluctuations; induced technological progress; energy efficiency of capital; substitution elasticity

## 1 引言

20 世纪 70 年代所爆发的两次“石油危机”对发达国家经济增长造成了巨大冲击。在此背景下, 能源价格波动对社会经济的影响评估逐步引起学术界的广泛关注, 进而催生了能源经济学这一新兴经济学分支。为积极应对我国当前所面临的能源短缺逐步凸显、环境污染日益加剧和气候灾害频繁发生等一系列资源与环境问题, 国务院适时制定并实施了诸如差别电价、碳排放权交易、环境税等基于市场型的环境规制政策<sup>[1,2]</sup>。就其本质来看, 此类环境政策工具的根本目的在于通过提高企业的能源使用成本(或污染物排放成本), 来激励企业自发地提升其能效水平进而降低能源消耗<sup>[3]</sup>。在实践中, 随着能源价格不断升高, 企业通常会选择淘汰低能效资本设备并安装节能型资本设备来提升其能效水平, 最终表现为以增加资本投资的方式来节约能源使用, 即利用资本替代能源<sup>[4-6]</sup>。由此产生如下两个问题: 1) 经济系统中资本与能源的替代关系呈现何种特征和演变规律? 2) 能源使用成本的提升又将通过何种途径对上述替代关系产生影响?

资本 - 能源替代弹性是表征这两种重要生产要素之间替代关系的直观形式。截止目前, 关于资本 - 能源替代弹性的估算已成为国内外学者们关注的焦点问题之一<sup>[7-11]</sup>。早期, 学者们基于不同国家或地区的数据, 运用成本函数模型对资本与能源之间的替代弹性进行估算。以 Berndt 和 Wood<sup>[12]</sup> 和 Magnus<sup>[13]</sup> 等为代表的研究采用单个国家的行业或地区层面时间序列数据, 先后发现资本与能源之间呈现互补关系。然而, Griffin 和 Gregory<sup>[14]</sup> 和 Pindyck<sup>[15]</sup> 等使用跨国的截面数据却得出了相反的结论, 认为资本和能源呈现替代关系。针对这一分歧产生的原因, 学者们分别从数据类型<sup>[16-18]</sup>、模型设定和估算方法<sup>[7,19]</sup>、研究样本<sup>[20,21]</sup> 等方面对其进行了深入探讨。其中, 较为主流的观点认为, 基于时间序列数据的研究判定的是资本与能源的短期关系<sup>[14,22,23]</sup>, 即短期内资本与能源呈现互补关系; 而采用截面数据的研究结果则识别二者之间的长期关系, 即长期内资本与能源之间表现出相互替代关系<sup>[24]</sup>。为在同一框架内考察两种要素在短期与长期的替代互补关系, 部分学者构建了动态要素需求模型, 并采用面板数据来测算资本与能源之间的短期与长期替代弹性<sup>[25,26]</sup>, 结果发现两要素间的短期与长期替代弹性均为负值, 即均呈现互补关系。究其原因发现, 上述研究的模型设定均暗含“putty-putty”(即“弹性 - 弹性”)假设, 认为资本是同质的, 且资本与其它生产要素的替代弹性在其投资完成前后一致<sup>[27]</sup>。

通过对现有关于资本 - 能源替代弹性估算的研究脉络进行系统梳理发现, 绝大多数文献基于 CES 生产函数<sup>[8,28]</sup>、超越对数生产函数<sup>[29,30]</sup> 或超越对数成本函数<sup>[7,9]</sup> 来考察两种要素间的替代或互补关系; 此类研究通常假定在整个样本期内资本的特性(如附着在资本上的能效)保持固定不变, 而未考虑资本体现式技术进步的作用<sup>1</sup>。从短期来看, 这一假定具有较强的合理性; 但从长期来看则难以成立。其主要原因在于, 随着能源价格波动上行以及多种环境政策工具实施, 能源使用(或污染物排放)成本的增加必然导致要素间相对价格发生变化, 进而诱发节能型技术进步; 在实际生产中具体表现为新型高效率资本投入增加和能源节约<sup>[31-35]</sup>。由于高效率资本设备的购买安装需要支付调整成本<sup>[36,37]</sup>, 这类设备资本一旦投入运行其性能随要素相对价格变动而进行即时调整的可能性相对较小, 即短期内单位资本能效水平通常是固定不变的<sup>[38]</sup>, 该时期内资本与能源呈现互补关系。但从长期来看, 能源价格上涨所诱致的技术进步会使得高效率资本投资不断积累和低能效资本设备持续折旧直至退出, 从而实现资本存量整体能效水平持续提升(如图 1)<sup>[39]</sup>, 最终表现为资本对能源的替代。

然而, 鲜有文献对能源价格波动背景下资本的能效水平动态调整进而影响资本 - 能源替代关系的演变规律(从短期内互补转变为长期内替代)及其具体作用机制进行科学刻画和探索。为弥补这一空白, 本文在系统演绎能源价格波动影响高效率资本动态累积的内在机理的基础上, 通过构建动态要素需求模型, 探究资本与能源之间关系由短期互补到长期替代的转变机制。随后, 基于 1995-2018 年中国省际层面面板数据, 对上

1. 资本体现式技术进步是指耦合于设备投资品内, 通过资本设备的更新换代和技术升级所实现的技术进步。

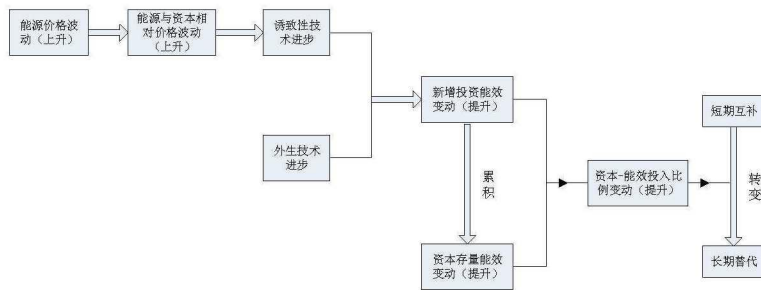


图 1 能源价格波动对资本 - 能源长短期替代弹性的影响机制

述影响机制进行实证分析。与现有研究相比, 本文的学术贡献主要体现在如下两个方面: 首先, 与传统分析框架假定资本设备的相关特性 (如技术工艺水平、自动化程度、能源效率等) 在整个研究期内恒定不变不同, 本文将能源价格变动诱致的节能型技术进步内生于新增资本存量能效表达式中, 从理论上刻画出资本存量能效的动态演进过程。其次, 基于上述理论分析框架, 探究“能源价格上升——资本存量的能效提升——经济系统中资本对能源的投入比升高”这一传导路径, 进而考察能源价格波动在促进我国资本 - 能源之间关系由短期互补向长期替代转变过程中所发挥的作用。

文章剩余部分结构安排如下: 第二部分数理演绎要素价格波动影响资本的要素投入效率的内在机理; 第三部分通过构建动态要素需求模型来刻画资本存量能效变动促进资本 - 能源替代关系由短期互补向长期替代转变的作用机制; 第四部分以中国省际层面为样本进行实证分析, 第五部分总结全文。

## 2 要素价格波动与资本的要素投入效率

由于在不同历史时点上企业新购置资本设备的要素投入效率具有差异性, 且新增资本设备一旦投入使用其生产性能 (如技术工艺水平、自动化程度、能源效率等) 在整个生命周期内将保持不变<sup>[40]</sup>, 因此每年度资本存量的要素投入效率呈现动态变化特征, 且与之前各年度新增资本的要素投入效率相联系<sup>[39]</sup>, 为准确刻画能源价格波动对资本存量能效的内在影响机制, 本文先借助要素增强型生产技术形式对资本的能源效率指数进行界定, 随后演绎出能源价格提升通过高能效新增资本的累积进而作用于资本存量能效水平的具体过程。

### 2.1 资本的要素投入效率指数的构建

依据 Acemoglu<sup>[41]</sup>, 一种多投入单产出的生产技术可表示为如下形式:

$$y_{i,q} = f(A_i^k x_{i,q}^k, A_i^l x_{i,q}^l, A_i^e x_{i,q}^e), \quad (1)$$

其中,  $y_{i,q}$  表示生产单元  $i$  在第  $q$  年的经济产出;  $x_{i,q}^k$ 、 $x_{i,q}^l$ 、 $x_{i,q}^e$  分别表示该生产者在相应年度的资本、劳动力和能源实际投入量;  $A_i^j$  ( $j = k, l, e$ ) 为某生产要素的投入效率; 因此,  $A_i^j x_{i,q}^j$  表示该要素的有效投入量, 记为  $\tilde{x}_{i,q}^j$ , 在产出水平  $y_{i,q}$  不变的情况下,  $A_i^j$  越大表示该生产单元对要素  $j$  的使用效率越高, 则其相应所需  $j$  要素的实际投入量  $x_{i,q}^j$  也就越少。

由于此处需要界定资本关于某种要素的投入效率, 因此, 令 (1) 式中资本的投入效率  $A_i^k = 1$ , 则此时  $A_i^l$ 、 $A_i^e$  的实际涵义分别转变为劳动力、能源相对于资本而言的投入效率, 即以资本的投入效率为基准来衡量的劳动力、能源的投入效率。进一步对  $A_i^l$ 、 $A_i^e$  进行取倒数变换, (1) 式可变换为:

$$y_{i,q} = f\left(x_{i,q}^k, \frac{1}{\gamma_i^l} x_{i,q}^l, \frac{1}{\gamma_i^e} x_{i,q}^e\right), \quad (2)$$

其中,  $\gamma_i^j = \frac{A_i^k}{A_i^j} > 0$  ( $j = l, e$ ), 表示以  $j$  要素的投入效率为基准来衡量的资本的投入效率, 此处将其定义为资本关于第  $j$  种生产要素的投入效率指数<sup>2</sup>。

另外, 根据前文假设,  $\gamma_i^j$  还可以表示为:  $\gamma_i^j = x_{i,q}^j / \tilde{x}_{i,q}^j$ 。通常, 资本的某要素投入效率的提升依赖于新型资本设备的购置。考虑到当期购置的新设备性能的充分发挥存在一定的滞后性, 此处假设经济主体的投资决策和新资本的实际投入运行存在一年的滞后期, 即在第  $q-1$  年投资的新型技术资本在第  $q$  年才能真正投入运行, 则第  $q-1$  年资本的要素投入效率指数可用第  $q$  年  $j$  要素的实际投入与其有效投入之比来表示:

2. 显然, 资本关于其自身的投入效率指数  $\gamma^k = \frac{A^k}{A^k} = 1$ 。

$$\gamma_{i,q-1}^j = \frac{x_{i,q}^j}{\tilde{x}_{i,q}^j} \tag{3}$$

(3) 式中,  $\gamma_{i,q-1}^j$  增加意味着在保持产出水平不变的条件下, 单位资本所对应的第  $j$  种要素的实际消耗量将增加. 由此可见,  $\gamma_{i,q-1}^j$  越小则表明资本关于该要素的投入效率越高.

为进一步建立  $\gamma_{i,q-1}^j$  与要素投入比之间的关系, 此处将 (3) 式左右两边同时除以  $\gamma_{i,q-1}^k$  (等于 1), 可得:

$$\gamma_{i,q-1}^j = \frac{x_{i,q}^j / x_{i,q}^k}{\tilde{x}_{i,q}^j / \tilde{x}_{i,q}^k} = \frac{x_{i,q}^j}{x_{i,q}^k} / \frac{\tilde{x}_{i,q}^j}{\tilde{x}_{i,q}^k} \tag{4}$$

(4) 式表明, 在单位有效资本所对应的  $j$  要素投入量 ( $\frac{\tilde{x}_{i,q}^j}{\tilde{x}_{i,q}^k}$ ) 一定时, 资本关于该要素的投入效率指数  $\gamma_{i,q-1}^j$  取决于要素  $j$  与资本的实际投入量之比 ( $\frac{x_{i,q}^j}{x_{i,q}^k}$ ). 也就是说: 单位资本的  $j$  要素实际投入量越少, 资本关于该要素的投入效率指数越高.

相应地, 根据对偶理论 [42], 资本关于某要素投入效率指数  $\gamma_{i,q-1}^j$  还可表示为该要素有效价格与实际价格之比的形式:

$$\gamma_{i,q-1}^j = \frac{\tilde{w}_{i,q}^j}{w_{i,q}^j} \tag{5}$$

同理, (5) 式表明在  $j$  要素的有效价格  $\tilde{w}_{i,q}^j$  恒定时,  $j$  要素的实际价格越高, 资本关于  $j$  要素的效率指数  $\gamma_{i,q-1}^j$  则越低; 此时, 资本的  $j$  要素投入效率也就越高.

### 2.2 要素价格波动对资本存量的要素投入效率的影响机制

在实际生产中, 企业购置新型资本设备通常源自于对老旧设备更新和要素成本节约两方面的考虑. 因此, 为考察生产要素  $j$  的价格波动对新增投资关于  $j$  要素投入效率的影响, 此处假定对某一生产者而言, 其资本关于  $j$  要素的投入效率受  $j$  要素价格及外生技术进步两种因素共同作用. 参考 Steinbuks 和 Neuhoff<sup>[39]</sup> 的研究, 设定在企业新增投资过程中, 资本关于  $j$  要素的投入效率指数  $\gamma_{i,q}^{*j}$ :

$$\gamma_{i,q}^{*j} = (1 - \zeta)^q \cdot (-\phi^j) \left( \frac{w_{i,q}^j}{\bar{w}^j} \right)^{\phi^j} \tag{6}$$

(6) 式中,  $\bar{w}^j = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T w_{i,t}^j}{nT}$  为  $j$  要素价格的均值;  $\phi^j < 0$  表征资本的  $j$  要素投入效率指数关于其自身价格的弹性, 即第  $j$  种要素价格升高百分之一所导致的资本关于  $j$  要素投入效率提升的幅度. 由此可知, 资本关于  $j$  要素投入效率指数受外生技术进步率  $\zeta$  和要素价格  $w_{i,q}^j$  的共同影响. 其中, 外生技术进步率  $\zeta$  与  $\gamma_{i,q}^j$  呈现负向关系, 即外生技术进步率越高, 资本关于  $j$  要素的投入效率指数越低, 即  $j$  要素的相对使用效率越高. 同样, 要素价格  $w_{i,q}^j$  与  $\gamma_{i,q}^j$  之间亦呈现负向关系, 要素  $j$  价格的上升会使  $\gamma_{i,q}^j$  减小, 即要素  $j$  价格升高会诱使资本关于其利用效率的提升.

在此基础上, 下面将着重考察技术进步如何通过新增资本要素投入效率的动态累积, 进而作用于资本存量的要素投入效率. 实现这一目标的总体思路为: 将生产者第  $t$  期的总资本存量按数量及其关于  $j$  要素投入效率水平两个维度进行年度分解, 然后通过将各年份的新增资本关于  $j$  要素投入效率指数进行加权平均, 得到第  $t$  期的总资本存量关于  $j$  要素的投入效率指数, 其权重为各年份新增投资经折旧后的余值占整个资本存量的比重 (见图 2, 此处以资本的能源投入效率为例).

具体而言, 假设生产者  $i$  投入生产过程中的资本  $x_{i,q}^k$  按照年度折旧率  $\delta_i$  均匀地折<sup>[43,44]</sup>, 则由新增投资的积累而形成资本存量的过程可表示为  $x_{i,q}^k = I_{i,q} + (1 - \delta_i)x_{i,q-1}^k$ , 那么, 第  $q$  年的新增投资  $I_{i,q}$  可表示为:

$$I_{i,q} = x_{i,q}^k - (1 - \delta_i)x_{i,q-1}^k \tag{7}$$

依据 (7) 式, 第  $q$  期新增投资在第  $t$  年的余值为  $I_{i,q}(1 - \delta_i)^{t-q}$ . 通过将总资本存量中各年度资本关于  $j$  要素投入效率进行加权平均, 可估算出第  $t$  期资本存量的要素投入效率指数  $\gamma_{i,t}^j$ :

$$\gamma_{i,t}^j = (1 - \delta_i)^t \frac{x_{i,0}^k}{x_{i,t}^k} \left( \frac{w_{i,0}^j}{\bar{w}^j} \right)^{-\phi^j} + \sum_{q=1}^t (1 - \zeta)^{(-\phi^j)q} \left( \frac{w_{i,q}^j}{\bar{w}^j} \right)^{-\phi^j} \frac{I_{i,q}(1 - \delta_i)^{t-q}}{x_{i,t}^k} \tag{8}$$

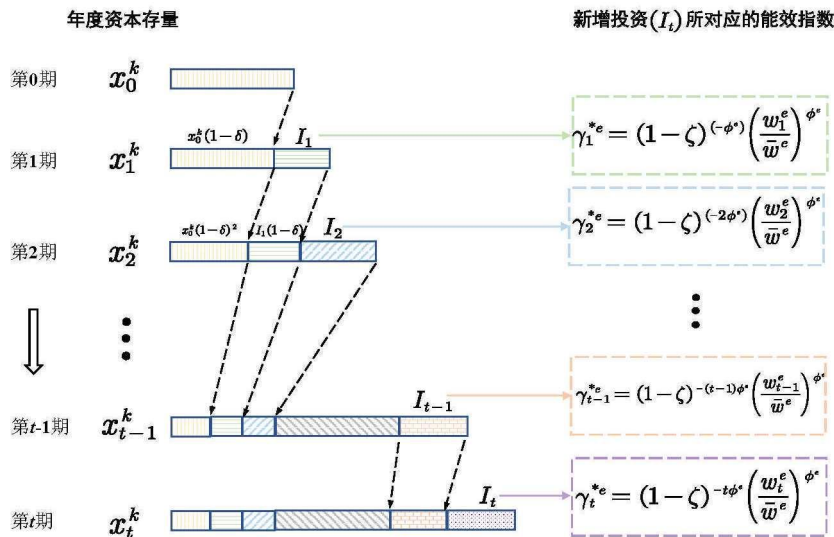


图 2 资本存量能效的动态累积过程示意图

等式右边第一项为基期（即第零期）资本存量在第  $t$  期仍发挥作用的部分关于  $j$  要素的投入效率指数，即为  $\gamma_{i,0}^j$ ；在后文计算中，假设该值等于样本期第一年度资本存量的要素投入效率指数。第二项为除基期以外的各年度新增资本关于  $j$  要素投入效率指数的加权值，权重为其在第  $t$  期仍发挥作用部分的占比。

### 3 资本 - 能源短期互补向长期替代的转变机制

要素相对价格波动诱致的技术进步会通过对新投资的要素投入效率影响的逐年累积，进而影响整体资本存量的要素投入效率水平。具体到资本与能源两种生产要素，由于能源相对价格变动影响资本的能源效率进而影响两要素的投入比这一传导路径与 Morishima<sup>[45]</sup> 对资本和能源间替代弹性的定义不谋而合<sup>3</sup>，为此，本文将上述资本存量的要素投入效率指数嵌入到 Pindyck 和 Rotemberg<sup>[26]</sup> 的动态要素需求模型中，采用 Morishima 替代弹性的概念测算资本 - 能源的长短期替代弹性（简称  $M$  替代弹性），以刻画能源价格波动通过影响资本能效进而作用于资本 - 能源替代关系的动态过程。

#### 3.1 资本 - 能源短期与长期替代弹性估算

首先，假设在第  $t$  年度生产者  $i$  在给定资本投入  $(x_{i,t}^k)$  条件下，为生产固定的产出  $(y_{i,t})$ ，其两种可变投入要素——劳动力  $(x_{i,t}^l)$  与能源  $(x_{i,t}^e)$  消耗所对应的最小成本为  $C(\tilde{w}_{i,t}^l, \tilde{w}_{i,t}^e, x_{i,t}^k, y_{i,t}, t)$ 。该函数关于投入要素价格呈现单调递增性，但关于资本投入呈现单调递减性。在此基础上，假设生产单元  $i$  的目标是最小化预期总成本的现值，则通过求解以下动态最优化问题可得到其各期的有效要素需求：

$$\min \mathbb{E} \sum_{t=\tau}^T R_t [C(\tilde{w}_{i,t}^l, \tilde{w}_{i,t}^e, x_{i,t}^k, y_{i,t}, t) + w_{i,t}^k x_{i,t}^k + A(I_t)], \quad (9)$$

(9) 式中， $R_t$  为折现因子， $A(I_t)$  为资本的调整成本，它是关于新增投资  $(I_t)$  的增函数。根据谢泼德引理，可求得生产要素的有效投入量：

$$\frac{\partial C_{i,t}}{\partial \tilde{w}_{i,t}^j} = \tilde{x}_{i,t}^j, \quad j = l, e. \quad (10)$$

此外，通过求解 (9) 式关于资本  $(x_{i,t}^k)$  的一阶偏导条件，可得：

$$\frac{\partial C_{i,t}}{\partial x_{i,t}^k} + w_{i,t}^k + \frac{\partial A(x_{i,t}^k - (1-\delta_i)x_{i,t-1}^k)}{\partial x_{i,t}^k} + \mathbb{E} \left[ R_t \frac{\partial A(x_{i,t+1}^k - (1-\delta_i)x_{i,t}^k)}{\partial x_{i,t}^k} \right] = 0. \quad (11)$$

(11) 式即为欧拉方程，表示在第  $t$  年资本存量多增加一单位所导致边际预期总成本的现值为零。为对上述隐函数进行动态最优化求解，此处借鉴 Pindyck 和 Rotemberg<sup>[26]</sup> 的做法，分别将  $C(\tilde{w}_{i,t}^l, \tilde{w}_{i,t}^e, x_{i,t}^k, y_{i,t}, t)$  和  $A(I_t)$  的函数形式具体设定为：

3. 且 Morishima 替代弹性具有更接近于传统意义上 Hicks 替代弹性的定义，能更准确地反映出要素之间的替代互补关系 Blackorby 和 Russell<sup>[46]</sup> 等优势。

$$\begin{aligned} \ln C_{i,t} = & \theta_0 + \sum_j \theta_j \ln \tilde{w}_{i,t}^j + \theta_k \ln x_{i,t}^k + \theta_y \ln y_{i,t} + \theta_t t + \\ & \frac{1}{2} \sum_j \sum_n \mu_{jn} \ln \tilde{w}_{i,t}^j \ln \tilde{w}_{i,t}^n + \sum_j \mu_{jk} \ln \tilde{w}_{i,t}^j \ln x_{i,t}^k + \sum_j \mu_{jy} \ln \tilde{w}_{i,t}^j \ln y_{i,t} + \sum_j \mu_{jt} \ln \tilde{w}_{i,t}^j + (12) \\ & \frac{1}{2} \mu_{kk} (\ln x_{i,t}^k)^2 + \mu_{ky} \ln x_{i,t}^k \ln y_{i,t} + \mu_{kt} \ln x_{i,t}^k + \frac{1}{2} \mu_{yy} (\ln y_{i,t})^2 + \mu_{yt} \ln y_{i,t} + \frac{1}{2} \mu_{tt} t^2, \\ A(I_t) = & \frac{1}{2} \lambda (I_t)^2. \end{aligned} \tag{13}$$

(12) 式即为超越对数形式的成本函数, 其中, 时间趋势项  $t$  以及  $t$  与其它各项的交乘项用来捕捉非体现式的中性和偏向性技术进步. (13) 式代表凸性的调整成本函数. 在此基础上, 将 (10) 式两边同乘以  $\frac{\tilde{w}_{i,t}^j}{C_{i,t}}$ , 可以得到可变投入要素成本份额的表达式:

$$S_{i,t}^j = \frac{\tilde{x}_{i,t}^j \tilde{w}_{i,t}^j}{C_{i,t}} = \frac{\partial \ln C_{i,t}}{\partial \ln \tilde{w}_{i,t}^j} = \theta_j + \mu_{jk} \ln x_{i,t}^k + \mu_{jy} \ln y_{i,t} + \mu_{jt} t + \sum_p \mu_{jp} \ln \tilde{w}_{i,t}^p. \tag{14}$$

此外, (11) 式也可具体表示为:

$$\frac{C_{i,t}}{x_{i,t}^k} S_{i,t}^k + w_{i,t}^k + \lambda (x_{i,t}^k - (1 - \delta) x_{i,t-1}^k) - \mathbb{E} \{ R_t (1 - \delta_i) \lambda (x_{i,t+1}^k - (1 - \delta) x_{i,t}^k) \} = 0. \tag{15}$$

其中, 设定  $S_{i,t}^k = \frac{\partial \ln C_{i,t}}{\partial \ln x_{i,t}^k} = \theta_k + \mu_{kk} \ln x_{i,t}^k + \mu_{ky} \ln y_{i,t} + \mu_{kt} t + \sum_j \mu_{kj} \ln \tilde{w}_{i,t}^j$ . 则在短期内资本存量不能进行充分调整的条件下, 能源的自价格弹性 ( $\eta_{ee}^S$ ) 以及能源与资本的交叉价格弹性 ( $\eta_{ke}^S$ ) 可分别表示为:

$$\eta_{ee}^S = \frac{\partial \ln x_{i,t}^e}{\partial \ln w_{i,t}^e} = \frac{\mu_{ee}}{S_{i,t}^e} + S_{i,t}^e - 1, \tag{16}$$

$$\eta_{ke}^S = \frac{\partial \ln x_{i,t}^k}{\partial \ln w_{i,t}^e} = \frac{\partial \ln x_{i,t}^k}{\partial \ln C_{i,t}} \cdot \frac{\partial \ln C_{i,t}}{\partial \ln w_{i,t}^e} = \frac{S_{i,t}^e}{S_{i,t}^k}. \tag{17}$$

从长期来看, 当资本投入可以进行充分调整时, 生产者的预期调整成本为零<sup>[26]</sup>, 即存在

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbb{E} \left\{ R_t \left[ \frac{\partial A(x_{i,t+1}^k - (1 - \delta_i) x_{i,t}^k)}{\partial x_{i,t}^k} \right] \right\} = 0.$$

相应地, (11) 式的前三项将满足如下极限条件:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbb{E} \left\{ R_t \left[ \frac{\partial C_{i,t}}{\partial x_{i,t}^k} + w_{i,t}^k + \frac{\partial A(x_{i,t}^k - (1 - \delta_i) x_{i,t-1}^k)}{\partial x_{i,t}^k} \right] \right\} = 0.$$

表示其资本投入的边际预期成本的折现值为零, 也就意味着当前资本投入达到最优水平. 基于这一极限条件可推演出:  $-\frac{\partial C_{i,t}}{\partial x_{i,t}^k} = w_{i,t}^k$ , 该式即为长期状态下关于最优资本存量的包络条件. 在此基础上, 能源的长期自价格弹性 ( $\eta_{ee}^L$ ) 为:

$$\begin{aligned} \eta_{ee}^L &= \frac{w_{i,t}^e}{x_{i,t}^e} \left( \frac{\partial x_{i,t}^e}{\partial w_{i,t}^e} \Big|_{x_{i,t}^k \text{ fixed}} + \frac{\partial x_{i,t}^e}{\partial x_{i,t}^k} \cdot \frac{\partial x_{i,t}^k}{\partial w_{i,t}^e} \right) \\ &= \eta_{ee}^S + \left( S_{i,t}^k + \frac{\mu_{ke}}{S_{i,t}^e} \right) \cdot \left( s_{it}^e + \frac{\mu_{ke}}{S_{i,t}^k} \right). \end{aligned} \tag{18}$$

资本与能源长期的交叉价格弹性 ( $\eta_{ke}^L$ ) 为:

$$\eta_{ke}^L = \frac{\partial \ln x_{i,t}^k}{\partial \ln w_{i,t}^e} = \frac{\partial \ln C_{i,t}}{\partial \ln w_{i,t}^e} + \frac{\partial \ln S_{i,t}^k}{\partial \ln w_{i,t}^e} = S_{i,t}^e + \frac{\mu_{ke}}{S_{i,t}^k}. \tag{19}$$

综上, 根据能源自价格弹性以及能源与资本的交叉价格弹性, 可分别计算出资本 - 能源的长短期替代弹性. 其中, 短期替代弹性  $M_{ke}^S$  为:

$$M_{ke}^S = \frac{\partial \ln (x_{i,t}^k / x_{i,t}^e)}{\partial \ln w_{i,t}^e} = \eta_{ke}^S - \eta_{ee}^S. \tag{20}$$

长期替代弹性  $M_{ke}^L$  为:

$$M_{ke}^L = \frac{\partial \ln (x_{i,t}^k / x_{i,t}^e)}{\partial \ln w_{i,t}^e} = \eta_{ke}^L - \eta_{ee}^L. \tag{21}$$

若  $M_{ke}^S(M_{ke}^L) > 0$ , 则表明两要素间存在替代关系, 反之则为互补关系。

### 3.2 能源价格波动对资本 - 能源长短期替代弹性影响程度测算

如前所述, 由于能源相对价格波动会通过促进资本能效的变动进而导致两要素间替代弹性发生变化; 因此, 能源价格变动对两要素间替代弹性的影响程度可以通过对 Morishima 替代弹性计算式 (即 (20) 和 (21) 式) 中与  $\gamma_{i,q-1}^e$  相关的部分进行计算得到。根据公式 (20), 能源价格波动对资本 - 能源短期替代弹性的净影响 ( $M_{ke}^S-\gamma$ ) 可表示为 (具体推导过程请参见附录 A1):

$$M_{ke}^S-\gamma = \underbrace{-\frac{ir_{-ee} \cdot \mu_{ke} \ln \gamma_{i,t-1}^e}{(ir_{-ke})^2} + \frac{\mu_{ee} \ln \gamma_{i,t-1}^e}{ir_{-ke} + \mu_{ke} \ln \gamma_{i,t-1}^e}}_{\eta_{ke}^S-\gamma} - \underbrace{\mu_{ee} \ln \gamma_{i,t-1}^e \left(1 - \frac{\mu_{ee}}{(ir_{-ee})^2}\right)}_{\eta_{ee}^S-\gamma}. \quad (22)$$

同理, 能源价格波动对资本 - 能源长期替代弹性的净影响 ( $M_{ke}^L-\gamma$ ) 可表示为 (具体推导过程请参见附录 A2):

$$M_{ke}^L-\gamma = \underbrace{\mu_{ee} \ln \gamma_{i,t-1}^e - \frac{\mu_{ke}^2}{(ir_{-ke})^2} \ln \gamma_{i,t-1}^e - \mu_{ee} \ln \gamma_{i,t-1}^e \left(1 - \frac{\mu_{ee}}{(ir_{-ee})^2}\right) + \mu_{ee} \mu_{ke} (\ln \gamma_{i,t-1}^e)^2}_{\eta_{ke}^L-\gamma} + \underbrace{\mu_{ee} \ln \gamma_{i,t-1}^e \cdot ir_{-ke} + \mu_{ke} \ln \gamma_{i,t-1}^e \cdot ir_{-ee} - \frac{\mu_{ke}^2 (\mu_{ee} \mu_{ke} (\ln \gamma_{i,t-1}^e)^2 + \mu_{ee} \ln \gamma_{i,t-1}^e \cdot ir_{-ke} + \mu_{ke} \ln \gamma_{i,t-1}^e \cdot ir_{-ee})}{(ir_{-ee})^2 \cdot (ir_{-ke})^2}}_{\eta_{ee}^L-\gamma}. \quad (23)$$

## 4 数据来源及实证结果

基于上述理论模型, 本章采用 1995-2018 年中国省际层面的面板数据估算各年度新增资本的能效, 并进一步剖析其增长诱因的时空分异规律; 随后, 考察由新增资本能效累积而形成的资本存量能效的时序演进特征; 最后, 在识别资本与能源的长短期替代互补关系的基础上, 测算由能源价格波动所引致的资本能效变动对二者之间长短期替代弹性的影响。

### 4.1 变量说明及数据来源

囿于数据的可获得性, 本文的研究样本为 1995-2018 年期间中国除台湾、香港、澳门和西藏以外的 30 个省、直辖市、自治区 (下文简称各省)。实证过程中所涉及的变量及其相应的数据来源说明如下:

**投入与产出变量:** 本研究考虑一种三投入单产出的生产技术; 其中, 投入变量包括劳动力、资本、能源三种。劳动力投入以各省区就业总人数来衡量, 1995 年至 2004 年的数据取自《中国国内生产总值核算历史资料 1952-2004》, 2006 年数据来源于《新中国 60 年统计资料汇编》, 部分缺失数据由各省区相应年度的统计年鉴进行补充, 其余年份数据取自各省份的统计年鉴。能源投入以分地区能源消耗总量来测度 (以标准煤计), 数据采集于历年的《中国能源统计年鉴》。各省份的资本投入采用基于永续盘存法计算而得的实际资本存量表示; 计算过程中所涉及的各省区资本折旧率采用张建华<sup>[43]</sup> 的估算结果。产出变量以经各省区 GDP 平减指数折算后的实际 GDP 来表征, 相关基础数据来源于历年的《中国统计年鉴》。需要说明的是, 1995 和 1996 年重庆市缺失的数据按 1997 年后其占四川省的比例进行填补。

**生产要素价格变量:** 劳动力价格以各省劳动力的人均报酬衡量, 具体的测算方法分为两步: 首先计算经 CPI 折算后的各省区劳动总报酬; 然后用折算后的各省劳动总报酬除以对应的就业总人数, 得到劳动力的人均报酬。资本价格的测算参考 Pindyck 和 Rubinfeld<sup>[47]</sup>, 以折旧率和利率两部分之和来表示<sup>4</sup>。其中, 利率以三年期贷款利率表示, 基础数据来源于中国人民银行网站; 能源价格的测算参考杨冕等<sup>[48]</sup> 的做法, 通过以下三个步骤展开: 首先, 根据各省份 1995 年每种能源的终端消耗量及其对应价格, 计算出各省份 1995 年能源投入的总成本; 然后, 根据各省份 1995 年能源总成本及其综合能源消耗量 (以标准煤计), 估算出其实际能源价格 (单位: 元/吨标准煤); 最后, 依据各省区历年的燃料动力类价格指数序列, 递推各省份历年的实际能源价格。由于基期能源价格以及后续递推所采用的价格指数序列在地区之间均具有显著差异, 因此采用该方

4. 本文也构建了考虑通货膨胀因素后的资本价格序列, 发现更换为该资本价格序列对基本结果无显著影响。

法测算的综合能源价格同时保证了时间与空间维度的异质性,能较为充分地反映全部能源价格的变化。上述数据中,各省份每种能源消耗量以及综合能耗总量来自于历年的《中国能源统计年鉴》,每种能源1995年的价格数据来自于《1995年第三次全国工业普查资料汇编》,各省区燃料动力类价格指数取自历年各省区的统计年鉴,少数缺失年份以当年的全国指数进行填补。

#### 4.2 参数估计结果

随着年度新增资本的不断积累,(8)式的具体表达式会随时间推移而发生动态调整;在此背景下,传统的系统估计方法(如非线性迭代似不相关估计,INLSUR)会因自由度的急剧下降而失效。因此,本文采用全信息最大似然估计法(FIML)对由(5)、(8)、(14)、(15)四式所组成的方程组进行系统估计。系统估计的具体步骤如下:首先,采用随机搜索法估算资本的 $j$ 要素投入效率关于 $j$ 要素价格的弹性 $\phi^j$ 和外生技术进步率 $\zeta$ 的值;为增加搜索效率,参考现有研究结论并结合我国的实际生产情况,此处将 $\phi^j$ 的搜索范围限定在 $0\sim 2$ 之间, $\zeta$ 的搜索范围限定在 $0\sim 0.2$ 之间<sup>5</sup>。经过10000次的迭代计算,最终的搜索结果显示,当 $\phi^e = -1.143$ 、 $\phi^l = -1.724$ 、 $\zeta = 0.062$ 时,整个方程系统的似然值达到最大。上述关键参数的经济含义分别为:长期来看,能源价格每上涨1%,将诱导资本的能源投入效率提升1.143%;劳动力要素的价格每上升1%,会导致资本的劳动投入效率提升1.724%;样本期内,外生技术进步率的年均值为6.2%。

随后,运用上述搜索结果,并使用迭代似不相关回归法对(5)、(8)、(14)、(15)所组成的系统方程组进行回归估计,其参数估计结果如表1所示。结果显示:除能源份额方程中的 $\mu_{el}$ 参数外(其在10%水平上显著),其余所有参数的估计结果均在1%的水平上显著,表明上述系统模型较好地拟合了实际生产情况。需要特别说明的是:出于投资变量计量单位原因,欧拉方程中参数 $\lambda$ 的估计结果较小(为 $1.26 \times 10^{-6}$ ),但其仍在1%的水平上显著,意味着短期内资本投入的变动确实需要支付相应的调整成本;根据 $\lambda$ 的估计值,并结合相应年度的资本投资额,可计算新增投资的边际调整成本 $\frac{\partial A(I_t)}{\partial I_t} = \lambda I_t$ (即参数 $\lambda$ 的经济含义)。计算结果显示,每新增10000元的资本投资,平均需要额外支付约600元的调整成本(以1995年不变价格计算)。

表1 参数估计结果

变量	能源份额方程		欧拉方程	
	参数	估计值	参数	估计值
adj			$\lambda$	$1.26 \times 10^{-6***}$ ( $4.55 \times 10^{-7}$ )
$\ln x_{it}^k$	$\mu_{ek}$	0.045*** (-0.013)	$\mu_{kk}$	-0.572*** (-0.031)
$\ln y_{it}$	$\mu_{ey}$	-0.091*** (-0.011)	$\mu_{ky}$	0.478*** (-0.026)
$t$	$\mu_{et}$	0.015*** (-0.001)	$\mu_{kt}$	0.045*** (-0.002)
$\ln \tilde{w}_{it}^l$	$\mu_{el}$	-0.014* (-0.008)	$\mu_{kl}$	0.255*** (-0.019)
$\ln \tilde{w}_{it}^e$	$\mu_{ee}$	0.182*** (-0.010)	$\mu_{ke}$	0.250*** (-0.025)
Constant	$\theta_e$	0.830*** (-0.050)	$\theta_k$	0.554*** (-0.130)
Observations		690		690
R-squared		0.538		0.662

注: \* $p < 0.1$ 、\*\* $p < 0.05$ 、\*\*\* $p < 0.01$ ; 括号内为标准误。

#### 4.3 新增资本的能效变动及其诱因分析

前文理论分析表明,要素间相对价格波动诱致的技术进步会通过对于新增投资的要素投入效率影响的逐年累积,进而作用于资本存量的要素投入效率水平。基于上述参数估计结果,并结合(6)式,可逐一计算出样本期内各年度新增投资的能效指数,如图3所示。计算结果表明,除2009和2015年呈现轻微下滑外, $\gamma_{i,q}^e$ 值

5. 经检验,调整或扩大初始的搜索范围均不会改变关键参数的搜索结果及后续似不相关回归结果。



从 1995 年的 2.277 持续下降到 2018 年的 0.126, 意味着近二十四年来我国新增资本的能效水平呈现逐年上升趋势 ( $\gamma^*_{i,q}$  越大, 表明资本关于能源的效率越低). 为深入考察该时期内能源价格波动的动态影响及其区域分布特征, 此处分别绘制了图 4 与图 5.

从时序维度上来看 (图 4), 对于样本期内新增资本的能效改进而言, 能源价格波动诱致的技术进步 (PITC) 平均贡献率为 42.86%, 而外生技术进步 (ETC) 的贡献率则为 57.14%. 由此说明, 能源价格波动对近 20 年来我国新增资本能效改进的贡献约为四成. 其演变趋势与能源价格 (以折算后标准煤的价格度量, 单位: 元/吨标准煤) 的波动趋势具有高度的一致性. 具体来看, 大致可分为三个阶段: 1) 1996–2002 年, 这一时期我国能源价格整体水平较低, 但存在一定的起伏, 导致相应年份 PITC 的贡献率也出现显著波动, 外生技术进步是致使这一时期新增资本能效得以提升的主导驱动力. 2) 2003–2011 年, 随着“十一五”发展规划中“节能降耗”外部约束的提出以及能源市场化改革进程的深化, 能源价格从过去价格缺位下的低廉价格向市场价格的过渡<sup>6</sup>, PITC 的作用也逐步突显, 在部分年份 (如 2004–2006、2008、2010 和 2011 年) 其贡献率甚至超过外生技术进步的贡献, 成为促进新增资本能效提升的首要因素. 3) 2012–2018 年, 与前两个阶段不同, 能源价格在 2012 年先迅速下降, 而后逐步回升; 相应地, PITC 则是先在一定程度上阻碍了新增资本能效的提升 (在 2015 年, 其负向作用甚至完全抵消了外生技术进步的贡献, 导致新增资本的能效下降), 而后随着能源价格的走势发生反转, 其诱导作用再次突显.

从地区分布来看 (见图 5), 能源价格波动对新增资本能效改进的诱导作用呈现出一定的空间异质性. 就各省份的平均水平而言, 北京、福建、河南、黑龙江、贵州、新疆等省份能源价格波动的诱导作用较强, 其对资本能效提升的贡献均在 40% 之上. 究其原因不难发现, 在样本期内上述省份的能源价格上涨幅度普遍较大. 以能源价格诱导效应最为明显的新疆为例, 其能源价格波动对资本能效提升的贡献达到 56.04%, 而恰好所有样本省份中, 新疆的能源价格上涨幅度也最大. 根据本文的计算方法, 相较于 1995 年 411.76 元/吨标煤的能源均价, 新疆 2018 年能源均价上升至 2670.16 元/吨标煤 (以 1995 年不变价格计算), 涨幅高达 548.47%.

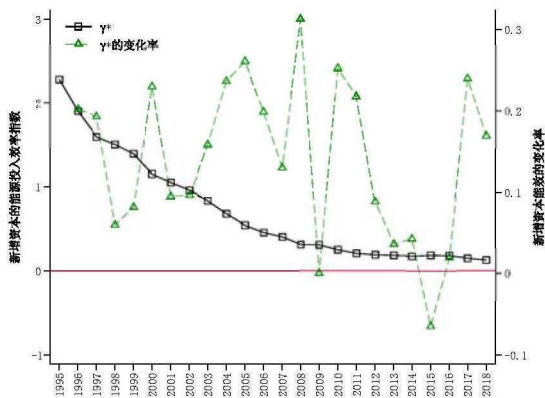


图 3 新增资本的能源投入效率指数及能效增长率 (1995–2018)

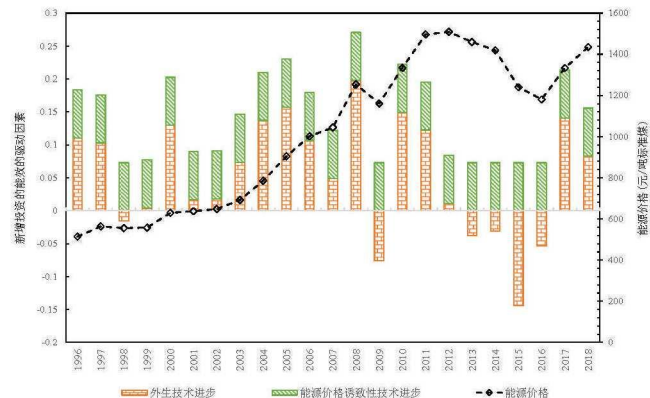


图 4 能源价格诱致性技术进步对新增投资能效改进的贡献 (1996–2018)

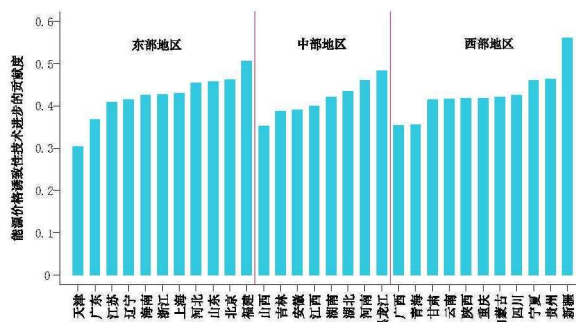


图 5 各省区能源价格诱致性技术进步对新增投资能效改进的贡献度

6. 2003 年 – 2012 年之间的十年也被称为煤炭的“黄金十年”, 这一时期我国煤炭价格经历了持续上涨.

与之相反, 天津、山西、广西等省份能源价格的诱导效应则较弱, 均不超过 40%; 与之相对应, 其能源价格在整个研究年限内也仅翻了一番左右. 此外, 分地区来看, 东部、中部和西部地区能源价格对资本能效提升的平均贡献均在 40% 左右, 表明能源价格波动对新增资本能效水平提升作用在大区域尺度上的差异性不甚明显.

#### 4.4 资本存量能效改进的时空分异特征

根据 (8) 式计算出样本期内各省历年资本存量的能源效率指数, 连同其增长率一起绘制于图 6 中. 与新增资本的能源效率指数变化趋势相同, 资本存量的能源效率指数在整个研究期内也呈现持续下降趋势, 其数值从 1995 年的 2.277 下降到 2018 年的 0.271, 表明过去二十四年间我国资本存量的能效水平逐年提升, 年均增幅达 9.25%. 但具体到各年度来看, 资本存量的能源效率指数的变化率则表现出一定的波动性特征. 1996 年至 2007 年期间, 该指数变化率的相反数从 1996 年的 1.80% 增加到 2007 年的 13.73%, 表明资本存量的能效改进速率有较大幅度的提升. 究其原因发现, 这一时期内各年度新增投资的能效均得以较快提升, 且其变化率在大多数年份也保持增长, 则由其加权而得的资本存量的能效得以持续提升, 且其提升速率越来越快. 随后, 该指数变化率的相反数在经历 2008 年微弱下调之后继续提升, 并在 2011 年达到样本期的最大值 (14.07%). 最后随着新增投资量及其能效的变化率的“双降”, 自 2011 年开始, 资本存量能效的变化率也持续下降, 并在 2018 年其数值 (10.15%) 下降到接近 2004 年的水平 (11.45%). 这一结果表明, 整个样本期内我国资本存量的能效水平提升速率呈现逐步提升的总体趋势, 尽管在样本期的后半段, 受宏观经济形势的影响, 该速率在“十二五”期间呈现一定幅度的下降, 但平均速率仍达到 10% 以上. 具体到各省份的资本能效指数, 尤其是能源消耗大省, 如山东、广东、江苏、河北等, 其各自的变化趋势与全国平均趋势较为一致<sup>7</sup>.

从区域分布来看, 资本存量的能效水平也存在较为显著的空间差异 (如图 7 所示). 平均而言, 三大区域资本存量的能效指数值 ( $\gamma_{i,q}^e$ ) 从小到大依次为: 东部、西部、中部. 从各省区对比来看, 海南省的平均数值最小, 仅为 0.680, 其次是福建省 (0.800)、广东省 (0.837) 等省份, 表明这些地区资本的用能效率较高. 同时, 这些地区的能源价格也相对较高, 都在 1000 元/吨标准煤以上, 其中, 福建省的平均能源价格位于全国之首, 达到 1759.72 元/吨标准煤. 与这些省份相反, 山西省的平均数值最大, 高达 2.066, 其次为贵州、辽宁、吉林、安徽、湖南等省区, 这些地区资本的用能效率较低, 其能源价格也相对较低, 均在 1000 元/吨标准煤以下. 综合来看, 各省份资本存量的能效指数与其平均的能源价格呈现较为明显的负相关关系, 这在较大程度上印证了能源价格对于促进资本能效提升的重要作用.

#### 4.5 资本 - 能源短期与长期替代弹性估算

根据 (16)、(17) 和 (20) 式可分别计算出短期的能源自价格弹性、资本 - 能源交叉价格弹性以及资本 - 能源 Morishima 替代弹性, 其时序结果如图 8 所示. 在整个样本期内, 30 个省区平均的能源自价格弹性 ( $\eta_{ee}^S$ ) 呈现 U 型变动趋势, 1995 至 2005 年间, 其表现为较高位的正值, 但随着时间的推移有所降低, 意味着该时期内, 政府对能源价格的行政控制与市场机制的不完善, 阻碍了能源价格在市场体系下调节功能的发挥<sup>[49]</sup>, 但该阻碍效应在这一时期的后半段逐渐减弱; 随后, 在 2005-2012 年间,  $\eta_{ee}^S$  由先前的正值转为负值, 且保持相对平稳, 说明这一时期能源需求对于自身价格波动的敏感度出现明显改善, 但整体来看能源需求对于自身价

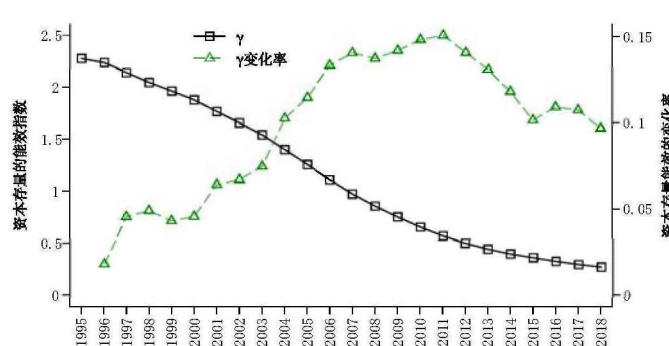


图 6 资本存量的能源投入效率指数及能效增长率 (1995-2018)

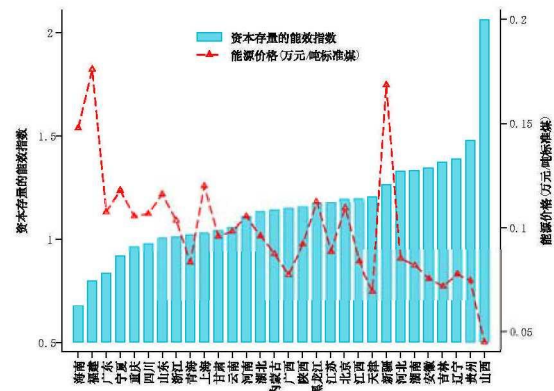


图 7 资本存量的能效指数的空间分布状况

7. 此处限于篇幅, 各省份资本能效的变动情况未予以汇报, 留存备索.

格依然缺乏弹性;自 2013 年开始,  $\eta_{ee}^S$  的变动趋势出现反转,再次转变为正值,这从侧面反映了近年来能源市场的价格扭曲虽然有所缓解但仍未消除,且存在反弹的趋势。

短期的资本 - 能源交叉价格弹性 ( $\eta_{ke}^S$ ) 在整个研究期内始终为负,其均值为  $-0.331$ ,即能源价格每升高 1% 会使资本需求量下降 0.331%,表明短期内能源与资本之间存在互补关系。这一结果也侧面反映出:在短期内能源价格的升高促进生产单元对低能效资本设备进行技术升级的空间有限;企业更倾向于选择放缓产能扩张速度来对冲能源价格上涨所导致的生产成本增加。就其变动趋势来看,资本与能源之间的互补关系在 1995-2008 年期间持续增强,而在 2008 年之后开始逐步减弱。综合上述结果,短期内资本与能源之间的 Morishima 替代弹性 ( $M_{ke}^S$ ) 在整个样本期也均为负值,变动范围为  $-0.390$  至  $-0.595$ ,总体趋于减小。这一结果表明,短期内能源与资本呈现互补关系,即能源相对价格的升高会使得资本与能源的投入比例下降,但二者投入比的变动对能源价格波动的敏感度逐步减弱。

类似地,根据 (18)、(19) 和 (21) 式,可分别计算出长期的能源自价格弹性、资本 - 能源交叉价格弹性和资本 - 能源 Morishima 替代弹性,结果如图 9 所示。与短期自价格弹性类似,能源的长期自价格弹性 ( $\eta_{ee}^L$ ) 也经历了由正到负的转变,且变动趋势也与其短期情形较为一致,但从长期来看,能源需求对其自身价格的敏感性比短期情形有一定程度的提升。与之相反,能源与资本的交叉价格弹性 ( $\eta_{ke}^L$ ) 则持续为正,取值范围为  $0.107\sim 0.209$ ,表明长期内能源与资本始终表现为替代关系。综合上述结果,资本和能源的长期 Morishima 替代弹性 ( $M_{ke}^L$ ) 在大多数年份都为正,意味着能源相对价格上涨将导致资本与能源投入比例上升,且二者在大多数年份呈现替代关系;其在 1995-2003 年间为负值的原因在于,能源的自价格弹性在 2004 年以前为正值,并且要高于资本 - 能源的交叉价格弹性,在此期间能源价格提高反而会使得能源投入增加,同时降低其他要素投入比例,原本理论上的替代关系实际上却是一种异常的互补现象 [49]。

进一步将本文所计算的三个长期弹性结果与已有研究结果进行对比,发现与本文测算结果较为接近的是 Ma 等 [50,51];且除了于立宏和贺媛 [9] 之外,绝大部分研究结论均证实资本与能源在长期内存在替代关系。

4.6 能源价格波动对资本 - 能源长短期替代弹性的影响

本部分进一步从资本 - 能源 Morishima 替代弹性和资本 - 能源交叉价格弹性两个维度,分别考察能源价格波动通过影响资本存量的能效水平变化进而对资本 - 能源长短期替代弹性的影响程度,结果如表 3 所示。

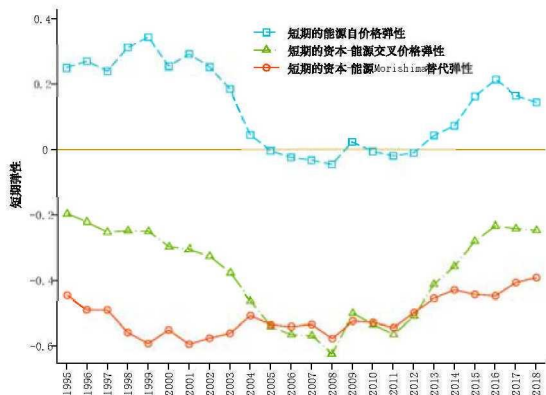


图 8 能源的短期自价格、资本 - 能源的交叉价格与 M 替代弹性 (1995-2018)

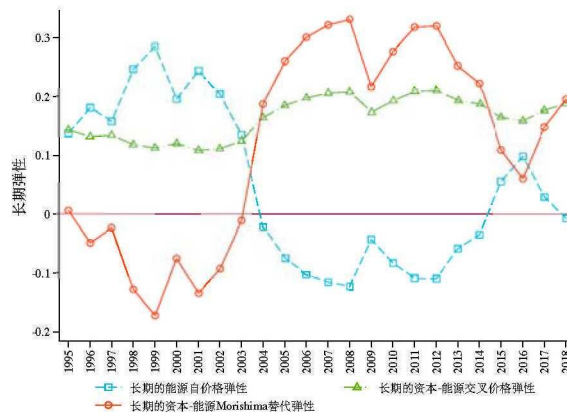


图 9 长期内能源的自价格、资本 - 能源交叉价格弹性与资本 - 能源 M 弹性

表 2 长期弹性的结果对比

	数据类型	样本年限	模型	$\eta_{ee}^L$	$\eta_{ke}^L$	$M_{ke}^L$
Ma 等 [50,51]	省际	1995-2004	Trans-log cost	-0.47	0.22	0.69
于立宏和贺媛 [9]	省际	2000-2010	Trans-log cost	-0.04	-0.23	-0.19
Ma 和 Stern [7]	省际	1995-2004	Trans-log cost	-0.7	0.13	0.83
Yang 等 [52]	行业	1995-2012	Trans-log cost	-0.75	0.23	0.98

表 3 能源价格波动对资本 - 能源的长短期替代弹性的影响度

		短期		长期	
M 替代弹性	考虑资本的能效变动	$M_{ke}^S$	-0.342*** (0.041)	$M_{ke}^L$	0.245*** (0.053)
	其中与资本能效有关的部分	$M_{ke-\gamma}^S$	0.006*** (0.003)	$M_{ke-\gamma}^L$	0.032*** (0.008)
	不考虑资本的能效变动	$M_{ke}^S - M_{ke-\gamma}^S$	-0.349*** (0.038)	$M_{ke}^L - M_{ke-\gamma}^L$	0.213*** (0.063)
交叉价格弹性	考虑资本的能效变动	$\eta_{ke}^S$	-0.331*** (0.003)	$\eta_{ke}^L$	0.169*** (0.018)
	其中与资本能效有关的部分	$\eta_{ke-\gamma}^S$	0.042*** (0.002)	$\eta_{ke-\gamma}^L$	0.027*** (0.004)
	不考虑资本的能效变动	$\eta_{ke}^S - \eta_{ke-\gamma}^S$	-0.373*** (0.003)	$\eta_{ke}^L - \eta_{ke-\gamma}^L$	0.142*** (0.019)

注: \*\*\* 表示在 1% 水平下显著; 括号内为标准误。

首先来看资本 - 能源 Morishima 替代弹性的情况, 根据公式 (20) 和 (22), 短期内考虑能源价格波动所引起的资本能效变动情景下的 Morishima 替代弹性 ( $M_{ke}^S = -0.116$ ) 可以分解为能够由能源价格波动所引起的资本能效变动来解释的部分 ( $M_{ke-\gamma}^S = 0.006$ ) 和余下部分 —— 即不考虑能源价格波动所引起的资本能效变动情景下的 Morishima 替代弹性 ( $M_{ke}^S - M_{ke-\gamma}^S = -0.349$ ) 两部分之和。由此可见: 在短期内, 能源价格波动所引起的资本能效变动促进资本与能源之间的互补关系减弱。类似地, 根据公式 (21) 和 (23), 长期内考虑能源价格波动所引起的资本能效变动情景下的 Morishima 替代弹性 ( $M_{ke}^L$ ) 为 0.245, 而不考虑这一因素的 Morishima 替代弹性 ( $M_{ke}^L - M_{ke-\gamma}^L$ ) 则降低至 0.213; 说明在长期内, 能源价格波动所引起的资本能效变动促进了资本与能源之间的替代关系增强。

究其原因不难发现: 在样本期内的绝大多数年份, 我国能源价格都呈现出上升的趋势, 而能源价格的上涨诱致了资本体现式技术进步的持续发生 (如图 2 所示), 其与外生技术进步共同推动着新增投资的能效的提升。随着原有低能效资本的持续折旧与新增高能效资本的不断累积, 整个资本存量的能效也随之得以提升, 最终表现为经济系统中资本 - 能源投入比的上升<sup>8</sup>。结合资本 - 能源 Morishima 替代弹性的具体表达式 ( $M_{ke} = \frac{\partial \ln(x_{i,t}^k/x_{i,t}^e)}{\partial \ln w_{i,t}^e}$ ) 可知, 能源价格 (上升) 与资本 - 能源投入比 (升高) 呈现同方向变化; 因此, 该传导路径对资本 - 能源 Morishima 替代弹性的贡献为正。鉴于这一原因, 当短期内资本与能源呈现互补关系 (即资本 - 能源 Morishima 替代弹性表现为负) 时, 由能源价格波动所引起的资本能效变动会促进二者之间互补程度的减弱; 反之, 当长期内资本与能源呈现出替代关系 (即资本 - 能源 Morishima 替代弹性表现为正) 时, 由能源价格波动所引起的资本能效变动会促进二者之间替代关系的增强。

与资本 - 能源 Morishima 替代弹性的情况相类似, 分析资本 - 能源交叉价格弹性也可得出一致的结果。表 3 显示:  $\eta_{ke}^S$  和  $\eta_{ke-\gamma}^S$  的结果分别为 -0.331 和 0.042, 则可推知, 在不考虑能源价格波动所引起的资本能效变动时, 资本 - 能源交叉价格弹性会上升至 -0.373; 表明能源价格波动所引起的资本能效变动在短期内会促进资本 - 能源互补程度的减弱。而在长期内, 能源价格波动所引起的资本能效变动使得资本 - 能源的交叉价格弹性由 0.142 提升至 0.169, 即促进了二者之间替代关系的增强。

综上所述: 无论是从资本 - 能源 Morishima 替代弹性还是从资本 - 能源交叉价格弹性来看, 能源价格波动所引起的资本能效变动在短期均会促进资本与能源之间互补关系的减弱, 而在长期则会促进资本与能源之间替代关系的增强, 即促进资本 - 能源之间关系由短期互补向长期替代转变。

## 5 研究结论

减轻经济增长对能源资源的依赖程度, 是促进我国节能减排工作目标顺利实现的关键环节, 也是推动产业转型升级乃至经济发展方式转变的重要举措。为有效减轻经济增长对能源资源的依赖, 政府部门需采取适当的环境政策工具来提高企业的能源使用成本, 以此激励企业增加高能效的资本设备投资并逐步淘汰高能耗的机器设备来实现能源节约, 即促进资本替代能源。在此背景下, 资本 - 能源之间的替代关系逐步成为学术界关注的焦点问题。本文在深入剖析能源价格波动影响资本的能源效率内在机理的基础上, 通过构建动态要素需求模型, 探究资本与能源之间关系由短期互补向长期替代的转变机制。

基于中国 1995-2018 年省际面板数据, 对我国近二十四年来新增资本的能效水平变动及其诱因、资本存

8. 详见公式 (4) 的推导。

量的能源效率的动态演变趋势,以及能源价格波动通过资本能效水平变动进而影响资本-能源替代关系的作用过程进行实证分析.其主要研究结论可归纳如下:1) 样本期内我国新增资本投资的能效水平呈现逐年上升趋势;且随着高效率新增资本的不断积累,近二十四年来我国资本存量的能源投入效率水平也逐年提升,年均增幅为 9.25%.从空间维度上看,东部地区的资本存量的能效水平最高,其次为西部地区,而中部地区最低.2) 能源价格波动所产生的诱致性技术进步对资本能效的提升具有重要促进作用,其在样本期内的累计贡献为 42.86%;具体来看,能源价格每上升 1%,资本的能源投入效率上升 1.143%.从地理分布来看,能源价格提升幅度越大的地区,其诱导资本能效提升的作用也越强.3) 短期内,资本与能源之间呈现互补关系,而长期内两者之间表现为替代关系.4) 能源价格波动所诱发的资本能效提升在短期内减弱了资本与能源的互补强度,而在长期内增强了两两者之间的替代关系.

本文的政策涵义在于:当前,能源价格调整在促进资本替代能源,进而减轻我国经济增长对能源资源严重依赖方面的作用依然不够突出,且近几年甚至还呈现下降趋势.因此,一方面,应继续加快推进能源价格的市场化改革,逐渐放开对煤炭、石油、天然气等能源品种的价格管制,助力打破能源产业的一体化垄断,建立能反映外部性因素的、透明的且具有竞争性的能源市场定价机制及价格体系.并且,由于不同能源产品之间会发生相互替代和转换,还应考虑细分能源品种价格的一致性与协调性,避免出现“市场煤”与“计划电”的矛盾以及成品油价格倒挂现象.另一方面,本文的实证结果发现,能源价格的上升虽然在短期内会抑制产能扩张,但其在长期则会通过促进高效率资本累积的方式实现资本对能源的替代.这表明,能源价格的调控政策应更多着眼于中长期布局,不为短期变化所左右,保持战略定力,统筹短期调整与中长期规划.

此外,为实现全国经济平衡稳定发展,有必要依据不同地区的资源禀赋特征和发展状况采取差别化的能源价格调控政策.具体而言,东部地区因经济发展水平与对外开放程度较高而拥有较强应对能源价格冲击的能力,为此可以通过全面建设用能权交易市场、碳排放权交易市场或直接调控等措施适当提高能源的使用价格,以引导企业加快更新高效率资本,进而逐步减少对能源,特别是化石能源的依赖.中部地区(如山西、河南等省份)的煤炭资源较为丰裕,但其经济发展也面临着资本用能效率不高的制约,同时由于这些地区能源结构中煤炭占比较高,其能源价格也位居全国最低水平,因此应更加注重提高煤炭资源的实际价格以倒逼煤炭终端使用效率的提升,或鼓励优质高效能源进行替代.西部地区的能源调控政策则应更加谨慎,可以侧重于疏通能源价格对能源需求的影响路径,通过给予更多的投资政策扶持的方式,增加企业进行资本更新的融资机会与渠道,促使能源价格对高效率资本的诱致性作用得以更加顺畅的发挥.

## 参考文献

- [1] Yang M, Yuan Y, Sun C. The economic impacts of China's differential electricity pricing policy: Evidence from energy-intensive firms in Hunan province[J]. *Energy Economics*, 2021, 94: 105088.
- [2] Yang M, Hou Y, Ji Q, et al. Assessment and optimization of provincial CO<sub>2</sub> emission reduction scheme in China: An improved ZSG-DEA approach[J]. *Energy Economics*, 2020, 91: 104931.
- [3] 陈真玲, 赵伟刚, 李金铠. 中国制造业能源拥挤效应研究: 基于 RAM-DEA 模型的分析 [J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(7): 1831-1844.  
Chen Z L, Zhao W G, Li J K. Research on energy congestion effects in China's manufacturing sector: An analysis based on RAM-DEA[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2019, 39(7): 1831-1844.
- [4] Gamtessa S, Olani A B. Energy price, energy efficiency, and capital productivity: Empirical investigations and policy implications[J]. *Energy Economics*, 2018, 72: 650-666.
- [5] 周远祺, 杨金强, 刘洋. 高能耗企业绿色转型技术的实物期权选择路线 [J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(1): 19-35.  
Zhou Y Q, Yang J Q, Liu Y. Selecting route of green transformation technologies of energy intensive enterprise with real options[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2019, 39(1): 19-35.
- [6] 周鹏, 安超, 孙杰, 等. 非参数环境生产技术建模及应用研究综述 [J]. *系统工程理论与实践*, 2020, 40(8): 2065-2075.  
Zhou P, An C, Sun J, et al. Models and applications of nonparametric environmental production technology: A survey[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2020, 40(8): 2065-2075.
- [7] Ma C, Stern D I. Long-run estimates of interfuel and interfactor elasticities[J]. *Resource and Energy Economics*, 2016, 46: 114-130.
- [8] Henningsen A, Henningsen G, van der Werf E. Capital-labour-energy substitution in a nested CES framework: A replication and update of Kemfert (1998)[J]. *Energy Economics*, 2019, 82: 16-25.

- [9] 于立宏, 贺媛. 能源替代弹性与中国经济结构调整 [J]. 中国工业经济, 2013(4): 30-42.  
Yu L H, He Y. The elasticity of energy substitution and restructuring of China's economy[J]. China Industrial Economics, 2013(4): 30-42.
- [10] 姚毓春, 袁礼, 王林辉. 中国工业部门要素收入分配格局——基于技术进步偏向性视角的分析 [J]. 中国工业经济, 2014(8): 44-56.  
Yao Y C, Yuan L, Wang L H. Factor shares in China's industrial sector — Analysis from the view of directed technical change[J]. China Industrial Economics, 2014(8): 44-56.
- [11] 孔宪丽, 米美玲, 高铁梅. 技术进步适宜性与创新驱动工业结构调整——基于技术进步偏向性视角的实证研究 [J]. 中国工业经济, 2015(11): 62-77.  
Kong X L, Mi M L, Gao T M. The suitable degree of technology progress and innovation driven industrial structure adjustment — An empirical analysis based on biased technology progress[J]. China Industrial Economics, 2015(11): 62-77.
- [12] Berndt E R, Wood D O. Technology, prices, and the derived demand for energy[J]. The review of Economics and Statistics, 1975: 259-268.
- [13] Magnus J R. Substitution between energy and non-energy inputs in the Netherlands 1950-1976[J]. International Economic Review, 1979, 20(2): 465-484.
- [14] Griffin J M, Gregory P R. An intercountry translog model of energy substitution responses[J]. The American Economic Review, 1976, 66(5): 845-857.
- [15] Pindyck R S. Interfuel substitution and the industrial demand for energy: An international comparison[J]. The Review of Economics and Statistics, 1979, 61(2): 169-179.
- [16] Arnberg S, Bjørner T B. Substitution between energy, capital and labour within industrial companies: A micro panel data analysis[J]. Resource and Energy Economics, 2007, 29(2): 122-136.
- [17] Nguyen S V, Streitwieser M L. Capital-energy substitution revisited: New evidence from micro data[J]. Journal of Economic and Social Measurement, 2008, 33(2-3): 129-153.
- [18] Haller S A, Hyland M. Capital-energy substitution: Evidence from a panel of Irish manufacturing firms[J]. Energy Economics, 2014, 45: 501-510.
- [19] Berndt E R, Wood D O. Engineering and econometric interpretations of energy-capital complementarity[J]. The American Economic Review, 1979, 69(3): 342-354.
- [20] Koetse M J, De Groot H L, Florax R J. Capital-energy substitution and shifts in factor demand: A meta-analysis[J]. Energy Economics, 2008, 30(5): 2236-2251.
- [21] Labandeira X, Labeaga J M, López-Otero X. A meta-analysis on the price elasticity of energy demand[J]. Energy Policy, 2017, 102: 549-568.
- [22] Fuss M A. The demand for energy in Canadian manufacturing: An example of the estimation of production structures with many inputs[J]. Journal of Econometrics, 1977, 5(1): 89-116.
- [23] Apostolakis B E. Interfuel and energy-capital complementarity in manufacturing industries[J]. Applied Energy, 1990, 35(2): 83-107.
- [24] 王班班, 齐绍洲. 有偏技术进步、要素替代与中国工业能源强度 [J]. 经济研究, 2014, 49(2): 115-127.  
Wang B B, Qi S Z. Biased technological progress, factor substitution and China's industrial energy intensity[J]. Economic Research Journal, 2014, 49(2): 115-127.
- [25] Morrison C J, Berndt E R. Short-run labor productivity in a dynamic model[J]. Journal of Econometrics, 1981, 16(3): 339-365.
- [26] Pindyck R S, Rotemberg J J. Dynamic factor demands and the effects of energy price shocks[J]. American Economic Review, 1983, 73(5): 1066-1079.
- [27] Atkeson A, Kehoe P J. Models of energy use: Putty-putty versus putty-clay[J]. American Economic Review, 1999, 89(4): 1028-1043.
- [28] Zha D, Kavuri A S, Si S. Energy biased technology change: Focused on Chinese energy-intensive industries[J]. Applied energy, 2017, 190: 1081-1089.
- [29] Lin B, Liu W. Estimation of energy substitution effect in China's machinery industry — Based on the corrected formula for elasticity of substitution[J]. Energy, 2017, 129: 246-254.
- [30] Ouyang X, Zhuang W, Du G. Output elasticities and inter-factor substitution: Empirical evidence from the transportation sector of Shanghai[J]. Journal of cleaner production, 2018, 202: 969-979.
- [31] Newell R G, Jaffe A B, Stavins R N. The induced innovation hypothesis and energy-saving technological change[J]. The Quarterly Journal of Economics, 1999, 114(3): 941-975.
- [32] Newell R G, Jaffe A B, Stavins R N. The effects of economic and policy incentives on carbon mitigation technologies[J]. Energy Economics, 2006, 28(5-6): 563-578.
- [33] Popp D C. The effect of new technology on energy consumption[J]. Resource and Energy Economics, 2001, 23(3): 215-239.

- [34] Wing I S. Explaining the declining energy intensity of the US economy[J]. Resource and Energy Economics, 2008, 30(1): 21–49.
- [35] Linn J. Energy prices and the adoption of energy-saving technology[J]. The Economic Journal, 2008, 118(533): 1986–2012.
- [36] Midrigan V, Xu D Y. Finance and misallocation: Evidence from plant-level data[J]. The American Economic Review, 2014, 104(2): 422–458.
- [37] 刘盛宇, 尹恒. 资本调整成本及其对资本错配的影响: 基于生产率波动的分析 [J]. 中国工业经济, 2018(3): 24–43.  
Liu S Y, Yin H. Capital adjustment cost and its impact on capital misallocation: Based on an analysis of productivity volatility[J]. China Industrial Economics, 2018(3): 24–43.
- [38] Struckmeyer C S. The impact of energy price shocks on capital formation and economic growth in a putty-clay technology[J]. Southern Economic Journal, 1986, 53(1): 127–140.
- [39] Steinbuks J, Neuhooff K. Assessing energy price induced improvements in efficiency of capital in OECD manufacturing industries[J]. Journal of Environmental Economics & Management, 2014, 68(2): 340–356.
- [40] Jovanovic B, Yatsenko Y. Investment in vintage capital[J]. Journal of Economic Theory, 2012, 147(2): 551–569.
- [41] Acemoglu D. Labor-and capital-augmenting technical change[J]. Journal of the European Economic Association, 2003, 1(1): 1–37.
- [42] Kumbhakar S C. Estimation of factor augmenting technical change: The case of US agriculture[J]. Indian Economic Review, 2004, 39(1): 31–53.
- [43] 张健华, 王鹏. 中国全要素生产率: 基于分省份资本折旧率的再估计 [J]. 管理世界, 2012(10): 18–30.  
Zhang J H, Wang P. China's growth in total factor productivity: A re-estimation based on provincial capital depreciation rate[J]. Management World, 2012(10): 18–30.
- [44] 李小胜, 安庆贤, 申真. “十二五”时期中国能源全要素生产率研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(6): 1489–1498.  
Li X S, An Q X, Shen Z. The energy total-factor efficiency during the “Twelfth Five-Year Plan” of China[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2017, 37(6): 1489–1498.
- [45] Morishima M. A few suggestions on the theory of elasticity[J]. Keizai Hyoron (Economic Review), 1967, 16: 144–150.
- [46] Blackorby C, Russell R R. Will the real elasticity of substitution please stand up? (A comparison of the Allen/Uzawa and Morishima elasticities)[J]. The American Economic Review, 1989, 79(4): 882–888.
- [47] Pindyck R S, Rubinfeld D L. Microeconomics[M]. 8th ed. New Jersey: Pearson Education Inc, 2013..
- [48] 杨晔, 卢昕, 段宏波. 中国高耗能行业碳排放因素分解与达峰路径研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(10): 2501–2511.  
Yang M, Lu X, Duan H B. Analysis on the determinants and peaking paths of CO<sub>2</sub> emissions in China's high energy-consuming industries[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2018, 38(10): 2501–2511.
- [49] 陶小马, 邢建武, 黄鑫, 等. 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.  
Tao X M, Xing J W, Huang X, et al. The measurement of energy price distortions and factor substitution in Chinese Industry[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2009, 26(11): 3–16.
- [50] Ma H, Oxley L, Gibson J, Kim B. China's energy economy: Technical change, factor demand and interfactor/interfuel substitution[J]. Energy Economics, 2008, 30(5): 2167–2183.
- [51] Ma H, Oxley L, Gibson J. Substitution possibilities and determinants of energy intensity for China[J]. Energy Policy, 2009, 37(5): 1793–1804.
- [52] Yang M, Yang F, Sun C. Factor market distortion correction, resource reallocation and potential productivity gains: An empirical study on China's heavy industry sector[J]. Energy Economics, 2018, 69: 270–279.

## 附录 A

### A1 能源价格波动对资本 - 能源短期替代弹性的影响度推导

为计算能源价格波动所引发的资本存量的能效变动对资本 - 能源替代弹性的净影响, 首先记  $S_{it}^e$  中与  $\gamma_{i,t-1}^e$  无关的部分为  $ir_{-ee} = \theta_e + \mu_{ek} \ln x_{i,t}^k + \mu_{ey} \ln y_{i,t} + \mu_{et} + \mu_{ee} \ln w_{i,t}^e + \mu_{el} \ln(\gamma_{i,t-1}^l w_{i,t}^l)$ , 即可将能源份额的表达式分解为  $S_{it}^e = \mu_{ee} \ln \gamma_{i,t-1}^e + ir_{-ee}$ , 再对短期能源自价格弹性的表达式进行上述类似变换可得资本存量的能效的净影响 ( $\eta_{ee}^S - \gamma$ ) 为:

$$\begin{aligned} \eta_{ee}^S &= \frac{\partial \ln x_{i,t}^e}{\partial \ln w_{i,t}^e} = \frac{\mu_{ee}}{S_{it}^e} + S_{it}^e - 1 = \frac{\mu_{ee}}{ir_{-ee} + \mu_{ee} \ln \gamma_{i,t-1}^e} + \mu_{ee} \ln \gamma_{i,t-1}^e + ir_{-ee} - 1 \\ &\approx \underbrace{\mu_{ee} \ln \gamma_{i,t-1}^e \left( 1 - \frac{\mu_{ee}}{(ir_{-ee})^2} \right)}_{\eta_{ee}^S - \gamma} + \frac{\mu_{ee}}{ir_{-ee}} + ir_{-ee} - 1. \end{aligned} \quad (24)$$

(24) 式倒数第二步, 为分离出分母中  $\gamma_{i,t-1}^e$  的净影响, 在  $\ln \gamma_{i,t-1}^e = 0$  处对其使用泰勒二阶展开来近似表示, 下述计算同理. 则最后一步中大括号里的表达式即为  $\eta_{ee-\gamma}^S$ .

为计算资本存量的能效对资本 - 能源替代弹性的影响, 可记  $S_{it}^k$  中与  $\gamma_{i,t-1}^e$  无关的部分为:  $ir\_ke = \theta_k + \mu_{kk} \ln x_{i,t}^k + \mu_{ky} \ln y_{i,t} + \mu_{kt} t + \mu_{ke} \ln w_{i,t}^e + \mu_{kl} \ln (\gamma_{i,t-1}^l w_{i,t}^l)$ .

对短期资本 - 能源交叉价格弹性的表达式进行变换可得资本存量能效的净影响 ( $\eta_{ke-\gamma}^S$ ):

$$\begin{aligned} \eta_{ke}^S &= \frac{\partial \ln x_{i,t}^k}{\partial \ln w_{i,t}^e} = \frac{\partial \ln x_{i,t}^k}{\partial \ln C_{i,t}} \cdot \frac{\partial \ln C_{i,t}}{\partial \ln w_{i,t}^e} = \frac{S_{i,t}^e}{S_{i,t}^k} \\ &= \frac{ir\_ee + \mu_{ee} \ln \gamma_{i,t-1}^e}{ir\_ke + \mu_{ke} \ln \gamma_{i,t-1}^e} \approx \underbrace{-\frac{ir\_ee \cdot \mu_{ke} \ln \gamma_{i,t-1}^e}{(ir\_ke)^2} + \frac{\mu_{ee} \ln \gamma_{i,t-1}^e}{ir\_ke + \mu_{ke} \ln \gamma_{i,t-1}^e}}_{\eta_{ke-\gamma}^S} + \frac{ir\_ee}{ir\_ke}. \end{aligned} \quad (25)$$

(25) 式最后一步的大括号中的表达式即为  $\eta_{ke-\gamma}^S$ . 最后, 根据 Morishima 替代弹性的表达式, 资本与能源的短期 Morishima 替代弹性中, 资本存量的能效的净影响 ( $\eta_{ke-\gamma}^S$ ) 为:  $M_{ke-\gamma}^S = \eta_{ke-\gamma}^S - \eta_{ee-\gamma}^S$ .

### A2 能源价格波动对资本 - 能源长期替代弹性的影响度推导

在长期内, 资本要素可视为可变生产要素, 并且最终其数量达到相对稳定. 对长期能源自价格弹性的表达式进行如下变换可得资本存量的能效的净影响 ( $\eta_{ee-\gamma}^L$ ) 为:

$$\begin{aligned} \eta_{ee}^L &= \frac{w_{i,t}^e}{x_{i,t}^e} \left( \frac{\partial x_{i,t}^e}{\partial w_{i,t}^e} \Big|_{x_{i,t}^k \text{ fixed}} + \frac{\partial x_{i,t}^e}{\partial x_{i,t}^k} \cdot \frac{\partial x_{i,t}^k}{\partial w_{i,t}^e} \right) = \eta_{ee}^S + \left( S_{i,t}^k + \frac{\mu_{ke}}{S_{i,t}^e} \right) \cdot \left( S_{i,t}^e + \frac{\mu_{ke}}{S_{i,t}^k} \right) \\ &= \frac{\mu_{ee}}{ir\_ee + \mu_{ee} \ln \gamma_{i,t-1}^e} + \mu_{ee} \ln \gamma_{i,t-1}^e + ir\_ee - 1 + \left( S_{i,t}^k S_{i,t}^e + \frac{\mu_{ke}^2}{S_{i,t}^k S_{i,t}^e} + 2\mu_{ke} \right) \\ &\approx \underbrace{\mu_{ee} \ln \gamma_{i,t-1}^e \left( 1 - \frac{\mu_{ee}}{(ir\_ee)^2} \right) + \mu_{ee} \mu_{ke} (\ln \gamma_{i,t-1}^e)^2 + \mu_{ee} \ln \gamma_{i,t-1}^e \cdot ir\_ke + \mu_{ke} \ln \gamma_{i,t-1}^e \cdot ir\_ee - \frac{\mu_{ke}^2 (\mu_{ee} \mu_{ke} (\ln \gamma_{i,t-1}^e)^2 + \mu_{ee} \ln \gamma_{i,t-1}^e \cdot ir\_ke + \mu_{ke} \ln \gamma_{i,t-1}^e \cdot ir\_ee)}{(ir\_ee)^2 \cdot (ir\_ke)^2}}_{\eta_{ee-\gamma}^L} + \\ &\quad \frac{\mu_{ee}}{ir\_ee} + ir\_ee - 1 + ir\_ee \cdot ir\_ke + \frac{\mu_{ke}^2}{ir\_ee \cdot ir\_ke}. \end{aligned} \quad (26)$$

对长期资本与能源交叉价格弹性的表达式进行变换可得资本存量的能效的净影响 ( $\eta_{ke-\gamma}^L$ ):

$$\begin{aligned} \eta_{ke}^L &= \frac{\partial \ln x_{i,t}^k}{\partial \ln w_{i,t}^e} = \frac{\partial \ln C_{i,t}}{\partial \ln w_{i,t}^e} + \frac{\partial \ln S_{i,t}^k}{\partial \ln w_{i,t}^e} = S_{i,t}^e + \frac{\mu_{ke}}{S_{i,t}^k} \\ &\approx \underbrace{\mu_{ee} \ln \gamma_{i,t-1}^e - \frac{\mu_{ke}^2}{(ir\_ke)^2} \ln \gamma_{i,t-1}^e + ir\_ee + \frac{\mu_{ke}}{ir\_ke}}_{\eta_{ke-\gamma}^L}. \end{aligned} \quad (27)$$

在长期内, 资本存量的能效对资本与能源的  $M$  替代弹性的净影响 ( $\eta_{ke-\gamma}^L$ ) 为  $M_{ke-\gamma}^L = \eta_{ke-\gamma}^L - \eta_{ee-\gamma}^L$ .