

能源节约型技术进步、边际效用弹性与中国能源消耗

张 华, 魏晓平, 吕 涛

摘 要: 能源节约型技术进步遵循 Hicks 的“引致创新”思想, 意味着技术进步偏向于节约“能源”要素。本文从技术外生和技术内生两个层面以及“自主式”效应、“干中学”效应和“巨人肩膀”效应三个维度勾勒能源节约型技术进步, 并在一般均衡框架下系统剖析能源节约型技术进步对能源消耗的作用机理。在此基础上, 以边际效用弹性为切入点, 利用 2002—2012 年的中国省级面板数据验证理论模型结论。研究揭示: 能源节约型技术进步与能源消耗呈显著的倒 U 型曲线关系, 即随着能源节约型技术进步的提高, 能源消耗先增加后降低, 蕴含主导力量由“回弹效应”演变为“节能效应”; 边际效用弹性放大了能源回弹效应, 意味着边际效用弹性推迟倒 U 型曲线拐点的来临。因此, 本文的政策含义是, 除了着力推动能源节约型技术进步和理顺能源价格机制之外, 还需要合理引导社会消费观念, 使得边际效用弹性维持在合理区间, 从而有效限制能源回弹效应。

关键词: 能源节约型技术进步; 能源消耗; 边际效用弹性; 能源回弹效应

中图分类号: F206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2015)02-0011-12

DOI: 10.16493/j.cnki.42-1627/c.2015.02.002

一、引 言

能源的稀缺性和外部性受到广泛关注。前者始于 1970 年代爆发的石油危机, 焦点集中于如何在能源稀缺性的约束性下实现持续的经济增长; 后者自 1987 年世界环境与发展委员会 (WCED) 发表报告《我们共同的未来》后成为能源与环境经济学的主要议题。近年来, 能源价格快速高企和极端天气频发迫使人们尝试解决或缓解能源两种属性带来的经济环境发展约束。一般意义上, 旨在提高能源效率的能源节约型技术进步 (Energy-saving Technical Change) 成为最切实可行的解决手段。基本的经济理论认为, 如果相对于其他要素, 能源要素的价格上涨, 那么经济体的能源强度将会下降。Popp^[1]证实了上述观点。他使用 1970—1994 年的美国专利数据表明, 能源价格显著地促进了能源效率的创新。因此可以说, 能源节约型技术进步源于能源价格的上涨。那么, 能源节约型技术进步是否有效“节约”了能源消费呢? 理论上, 技术进步是一把“双刃剑”, 对能源消费存在正向的节约作用与负向的加剧作用, 后者被称作为能源回弹效应 (Energy Rebound Effect), 即能源效率提高所节约的能源, 可能会通过替代效应、收入效应和产出效应等机制所产生的新的能源需求而被部分甚至完全抵消^[2]。那么, 能源节约型技术进步如何影响能源消耗? 是正向的节约作用抑或负向的加剧作用? 以及两两关系是否受其他变量影响? 廓清上述问题, 对于充分发挥能源节约型技术进步的节能效应具有重要的理论价值和现实意义。

基金项目: 国家社科基金重大项目“我国矿产资源跨期优化配置机制研究”(11&ZD163); 国家自然科学基金项目“突发性能源短缺应急响应的组织体系及‘情景—应对’策略研究”(71173218); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目“环境规制缓解能源稀缺性和外部性的作用机理及实证研究”(KYZZ_0379); 中央高校基本科研基金项目(2013XK01)

作者简介: 张华, 中国矿业大学管理学院博士研究生 (江苏 徐州 221116); 魏晓平, 中国矿业大学管理学院教授、博士生导师

本文可能的边际贡献在于：(1) 就我们可得文献，本文尚属国内学界首次对“能源节约型技术进步”议题的关注，同时本文并不拘泥于简单验证能源节约型技术进步与能源消耗的关系，而是试图揭示能源节约型技术进步影响能源消耗的作用机制，中间桥梁是边际效用弹性，从而丰富和拓展了现有研究。(2) 多层次、多视角构建能源节约型技术进步，旨在探求不同类型的能源节约型技术进步对能源消耗的作用机理是否存在差异，并拓展了 Hu 等^[3]开创的“全要素能源效率”的概念，融入要素替代的元素，充分体现“能源节约型技术进步”的定义。(3) 度量了省际层面的边际效用弹性。边际效用弹性衡量的是人们对代际间不公平的厌恶程度^[4]，是一种“主观意愿”，罕有文献对此进行测量。本文基于 Keynes-Ramsey 法则进行测度，发现边际效用弹性具有调节能源回弹效应的作用，具体而言，中国当前的边际效用弹性推迟倒 U 型曲线拐点的来临。

二、概念界定与文献综述

(一) “能源节约型技术进步”的定义

Newell 等^[5]提出了“能源节约型技术进步”的概念，将其定义为：偏向于节约“能源”要素的技术进步，是一种要素偏向型技术，并认为其来源于能源价格的上涨。实际上，要素价格上涨引致节约该要素的创新最早可追溯至 Hicks 的“引致创新”假设。Hicks 将技术进步分为三类：资本节约型、劳动节约型和中性技术进步。对于这几类技术进步的关系，Hassler 等^[6]发现，20 世纪 70 年代的石油危机有力地解释了此后频现的能源节约型技术进步，并且揭示了资本劳动节约型技术进步与能源节约型技术进步存在负向的协同运动。

然而，要素偏向型技术习惯性地被学者所忽略，更为熟知的是拓展的 Hicks 中性 (Extended Hicks Neutral) 技术进步，生产函数可以分为一个技术进步函数和一个要素投入函数，即 $F(x, A) = AgF(x)$ ，其中 x 为生产投入要素。相形之下，要素偏向型技术直到 Acemoglu^[7]才给出明确的定义，意为技术进步可以改变某种要素的边际生产率。在资本 (K)、劳动力 (L)、能源 (E) 和中间品 (M) 四种投入要素的 KLEM 框架下，发生能源节约型技术进步 (也称能源增强型技术进步，Energy Augmenting Technical Change) 时生产函数可以写为如下形式： $F(x_K, x_L, Ax_E, x_M)$ 。在此基础上，王班班等^[8]认为，如果能源与其他要素互为替代，当技术进步提高能源的相对边际生产率时产生能源节约型技术进步，原因在于均衡时能源的相对价格被提高，进一步导致能源的相对投入也将降低。

鉴于此，本文遵循 Newell^[5]等的思想，并同时纳入 Acemoglu^[7]的分析思路，认为能源节约型技术是一种节约“能源”要素的技术进步，包含两种途径：一是能源效率的提升；二是能源要素和其他投入要素之间的替代关系。

(二) 相关文献研究

相比于资本和劳动，能源在生产投入要素中扮演的角色逊色不少。即使最早可从以斯密、马尔萨斯、李嘉图和穆勒为代表的古典经济学家的作品中挖掘能源的踪迹，只不过是“土地资源”来代指能源，但是标准的 Solow 模型、Ramsey 模型和 Diamond 模型并不重视能源的影响。直至石油危机的爆发，以 Dasgupta 等^[9]、Solow^[10]以及 Stiglitz^[11]为代表的经济学家使人们重新审视能源在经济投入要素中的地位，在此基础上发展的 DHSS 模型就是基于能源约束的新古典增长理论的标准分析框架。但是，基于新古典增长理论模型的研究将长期人均产出不下降归因于“天降神粮”式的技术进步，限制了模型对决定技术进步的经济因素的解释。随着内生增长理论的发展，学者们通过内生生化技术进步分析能源和环境问题，包括 Grimaud 等^[12]、Bretschger 等^[13]。这些模型处理的主要议题包括：经济增长和环境质量的权衡问题；可行的和可持续的发展路径条件；环境政策工具如何影响福利的问题。

上述文献在考虑技术进步因素时，不论是采用外生假定还是内生假定，都隐含技术进步是中性的论断，即同比例提高资本、劳动和能源的边际产出。Acemoglu^[14]关于定向技术进步 (Directed Technical Change) 的研究，打破中性技术进步论断的垄断格局。然而大部分研究都针对资本和劳动偏向

型技术进步, 对能源节约型技术进步研究较少。van Zon 等^[15]在 Romer 模型的基础上, 内生能源节约型技术进步, 将能源纳入中间产品部门, 允许资本和能源存在替代关系, 假定总能源供应是外生的, 而能源价格以给定的外生比率增长。文章发现增长率正向地取决于技术进步率, 连续上升的真实能源价格趋向抑制增长和减缓新中间产品的引入步伐。这可能被认为是令人惊讶的结果, 因为通常认为能源的稀缺性刺激了能源节约型技术进步。但是, 实际上能源税负向地影响 R&D 力度。然而, 作者引入能源税直接补贴 R&D, 从而促进长期经济增长。Yetkiner 等^[16]进一步扩展 2003 年的模型, 增加不可再生资源部门, 并内生能源价格的增长率。与 2003 年模型的关键区别在于, 能源价格并不能引起节能型 R&D 活动。模型表明, 产出增长率与内生技术进步呈同向变化关系、与真实能源价格增长率负相关, 不断上涨的真实能源价格会导致产出增长率的下降。

从上述文献可以看出, 技术进步从外生到内生, 再演化到定向技术进步, 前两者偏重于假定中性技术进步, 而定向技术进步主要关注于能源节约型技术进步对长期经济增长的影响。然而, 无论技术进步是外生还是内生, 还是演化到定向技术进步, 均缺乏对能源消耗的作用机理的深入分析和必要的实证证据。鉴于此, 本文尝试弥补上述不足, 并提供了翔实的理论和实证证据。

三、理论模型

(一) 技术外生

将技术进步视为外生变量是处理技术进步最简单的方式, 最普遍的办法是将其设定为时间的函数, 最早出现在 Solow-Swan 的新古典增长模型中。以 g 表示技术进步随时间变化的比率, 那么 $g > 0$ 意味着发生技术进步, $g = 0$ 则没有技术进步。此后有学者将这种思想植入到能源领域, “自主式能源效率提高 (Autonomous Energy-Efficiency Improvement, AEEI)” 参数应运而生, 以反映能源节约方向的生产力提高——整个经济或个别部门每年以一个外生的数量增加经济体的能源效率。此后, Nordhaus^[17]将 AEEI 参数运用到气候变化经济学。本文借鉴这种技术外生的思想, 以 A 表示能源节约型技术进步, 假设 A 以 u_1 的恒定比率随时间增长, 那么 $A(t) = e^{u_1 t}$, 并称之为“自主式”效应。

1. 最终产品部门。追随于 Solow^[10], 任何时间 $t \in [0, +\infty)$, 最终产品的生产需要物质资本 K 、劳动力 L 和能源 E 三种必要的投入要素。设最终产品部门的生产函数为 Cobb-Dauglas 型:

$$Y = K^{\alpha_1} L^{\alpha_2} (AE)^{\alpha_3} \quad (1)$$

其中, α_1 、 α_2 、 α_3 分别是物质资本、劳动力和能源的产出弹性。假设最终产品部门具有不变的规模报酬, 即 $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ 。

实际产出的一部分提供家户消费, 另一部分用于资本投资, 同时考虑资本折旧, 那么资本的积累方程为:

$$\dot{K} = Y - C - \delta K, 0 < \delta < 1 \quad (2)$$

其中, \dot{K} 表示资本增量, C 为家户消费, δ 是资本折旧率。值得说明的是, 符号 \dot{x} 表示变量 x 的时间导数, 即 $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ 。

2. 能源生产部门。 $S_0 > 0$ 表示能源的初始存量, 在每个时点上能源生产部门开采并出售给最终产品部门的能源为 E 。假设不计开采成本, 那么 t 时能源的存量方程为: $S_t = S_0 - \int_0^t E(v) dv$, 对其两边关于时间 t 求导, 得到能源存量的运动方程: $\dot{S} = -E$ 。显然, 每期能源开采的总和不能超过能源的初始禀赋 S_0 , 这意味着可行路径必须满足约束条件: $\int_0^{\infty} E(t) dt \leq S(0)$ 。

3. 效用函数。代表性家庭的效用仅仅取决于消费, 那么将跨期效用函数设定为不变替代弹性的形式:

$$U(C) = \int_0^{\infty} \frac{C^{1-\theta} - 1}{1-\theta} e^{-\rho t} dt, \theta > 0 \quad (3)$$

其中, θ 为边际效用弹性, 是跨期替代弹性的倒数; $\rho > 0$ 代表消费者的纯时间偏好率。

4. 社会计划者问题。社会计划者努力最大化代表性家户在无限时域上的效用。根据以上设定的基本模型, 动态最优化问题为:

$$\begin{aligned} \max \int_0^{\infty} \frac{C^{1-\theta} - 1}{1-\theta} e^{-\rho t} dt \\ s. t. \quad Y = K^{\alpha_1} L^{\alpha_2} (AE)^{\alpha_3} \\ A(t) = e^{u_1 t} \\ \dot{K} = Y - C - \delta K \\ \dot{S} = -E \end{aligned} \quad (4)$$

根据动态最优化理论, 建立现值 Hamilton 函数:

$$H = \frac{C^{1-\theta} - 1}{1-\theta} + \lambda_1 (Y - C - \delta K) - \lambda_2 E \quad (5)$$

其中, 共积变量 λ_1 和 λ_2 是存量变量的动态乘数, 也解释为 K 和 S 的影子价格。

以 g_x 代表变量 x 在均衡增长路径上的增长率, 即 $g_x = \frac{\dot{x}}{x}$, 根据最优化的一阶条件和欧拉方程可得:

$$g_E = \frac{\alpha_3 (u_1 - \rho) (1 - \theta) - \rho (\alpha_2 + \alpha_3 \theta)}{\alpha_2 + \alpha_3 \theta} \quad (6)$$

这里, 用到一个重要的引理: 沿着均衡增长路径, 能源消耗的增长率一定小于零, 即 $g_E < 0$ 。证明如下。由能源存量的运动方程 $\dot{S} = -E$ 可知, $g_S = -\frac{E}{S}$, 对该式的两边同时对时间求导得: $\dot{g}_S = (g_E - g_S) \frac{E}{S} = 0$, 所以 $g_E = g_S$ 。对于任何不变的 g_E , 满足条件 $\int_0^{\infty} E(t) dt = \int_0^{\infty} E(0) e^{g_E t} dt$ 。如果 $g_E \geq 0$, 则违背约束条件 $\int_0^{\infty} E(t) dt \leq S(0)$, 因此 $g_E < 0$, 暗示 g_E 的值越小, 但绝对值越大, 从而开采速度越快, 基于此, 下文对 g_E 的相反数进行分析。

接着计算 $-g_E$ 对 u_1 的一阶偏导, 可得: $\frac{\partial (-g_E)}{\partial u_1} = \frac{\alpha_3 (\theta - 1)}{\alpha_2 + \alpha_3 \theta}$ 。当 $\theta > 1$ 时, $\frac{\partial (-g_E)}{\partial u_1} > 0$; 当 $0 < \theta < 1$ 时, $\frac{\partial (-g_E)}{\partial u_1} < 0$ 。

(二) 技术内生

一般来说, 内生化技术进步有三种途径: 直接价格诱导 (Direct Price-induced)、学习诱导 (Learning-induced) 和研发诱导 (R&D-induced)^[18]。直接价格诱导型技术进步意味着相对价格的变化可以刺激创新, 从而减少更昂贵投入的使用。学习诱导型技术进步允许特定技术的单位成本是该技术经验的减函数。研发诱导型技术进步允许 R&D 投资影响技术进步的速度和方向, 经常涉及明确的知识资本存量。由于直接价格诱导型技术进步常常包含 R&D 投资, 并且使用 AEEI 参数或“干中学”方法描述技术变革。因此, 下文通过学习诱导型 (“干中学”效应) 和研发诱导型 (“巨人肩膀”效应) 来内生化技术进步。

1. “干中学”效应。Arrow 提出的“干中学” (Learning by Doing) 思想认为, 投资和生产过程的本身会积累经验, 提高生产技术, 加上知识的溢出效应就能够起到提高资本效用的作用, 这种资本效率的提高可以抵消通常的资本报酬递减。在 Arrow 的模型中, 假设知识是非竞争性的, 那么每个人的发现都会很快外溢到整个经济中, 瞬间的知识扩散过程在理论上可行。“干中学”效应的存在, 使得技术知识的增量成为资本增量的增函数。借鉴资本为知识积累载体的“干中学”思想, 同样可以

认为能源节约型技术和经验的获得来源于生产中的能源使用过程。微观企业在使用能源的过程中, 可以逐渐从中获得提高能源利用效率的经验, 从经验中获取改进能效的知识, 推动能源管理与生产方式的优化^[4]。此外, 知识的溢出效应使得先进的能效经验和知识在全社会范围内扩散, 最终提升能源节约型技术。于是, 类似于“干中学”模型中技术与资本关系的通常设定形式, 假定能源节约型技术进步与能源消耗量存在如下关系:

$$A = GE^{u_2} \quad (7)$$

其中, u_2 为能源节约型技术对能源消耗量的弹性, 反映了能源使用对能源节约型技术提高的有效程度; $G > 0$ 为干中学过程节约能源的效率参数。

根据以上设定, “干中学”效应下的动态最优化问题为:

$$\begin{aligned} \max \int_0^{\infty} \frac{C^{1-\theta} - 1}{1-\theta} e^{-\rho t} dt \\ s. t. \quad Y = K^{\alpha_1} L^{\alpha_2} (AE)^{\alpha_3} \\ A = GE^{u_2} \\ \dot{K} = Y - C - \delta K \\ \dot{S} = -E \end{aligned} \quad (8)$$

根据动态最优化理论, 建立现值 Hamilton 函数:

$$H = \frac{C^{1-\theta} - 1}{1-\theta} + \lambda_2 (Y - C - \delta K) - \lambda_3 E \quad (9)$$

根据最优化的一阶条件和欧拉方程可得:

$$g_E = \frac{\rho(1-\alpha_1)}{\alpha_3(1-u_2)(1-\theta) - 1 + \alpha_1} \quad (10)$$

计算 $-g_E$ 对 u_2 的一阶偏导, 可得: $\frac{\partial (-g_E)}{\partial u_2} = \frac{\alpha_3 \rho (\theta - 1) (1 - \alpha_1)}{[\alpha_3 (1 - u_2) (1 - \theta) - 1 + \alpha_1]^2}$ 。当 $\theta > 1$ 时, $\frac{\partial (-g_E)}{\partial u_2} > 0$; 当 $0 < \theta < 1$ 时, $\frac{\partial (-g_E)}{\partial u_2} < 0$ 。

2. “巨人肩膀”效应。根据 Acemoglu^[14]的框架, “巨人肩膀” (Building on the Shoulders of Giants) 效应意味着创新可能性前沿 (Innovation Possibilities Frontier) 的状态依赖性, 换言之, 当前的技术可能性取决于过去的活动。这种思想秉承经典内生增长文献的规范, 即假设知识水平随时间演变线性地取决于知识获取的人力资本投入和当前的知识存量。为了构建“巨人肩膀”效应, 必须在已有的两部门模型基础上, 再添设 R&D 部门。根据定义, R&D 部门用于提高能源节约型技术, 其运动方程设定为:

$$\dot{A} = BL_A A \quad (11)$$

其中, $B > 0$ 表示 R&D 部门的生产率参数; L_A 是投入 R&D 部门的劳动力; $\frac{\dot{A}}{A} > 0$ 体现“巨人肩膀”效应, 表示知识存量越大, 人们越有经验, 可以参考的 R&D 资料也越多, 从而提高能源节约型 R&D 活动的生产率。

此外, 同样设定最终产品部门的生产函数为 Cobb-Dauglas 型:

$$Y = K^{\alpha_1} L_Y^{\alpha_2} (A^u E)^{\alpha_3} \quad (12)$$

其中, α_1 、 α_2 、 α_3 分别是物质资本、劳动力和能源的产出弹性, u_3 反映能源节约型技术进步的效率。假设最终产品部门具有不变的规模报酬, 即 $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ 。不失一般性, 将劳动力 L 标准化为 1, 即 $L_A + L_Y = 1$ 。

根据以上设定, “巨人肩膀”效应下的动态最优化问题为:

$$\begin{aligned} & \max \int_0^{\infty} \frac{C^{1-\theta} - 1}{1-\theta} e^{-\rho t} dt \\ & s. t. \quad Y = K^{\alpha_1} L_Y^{\alpha_2} (A^{\alpha_3} E)^{\alpha_3} \\ & \dot{A} = B(1 - L_Y)A \\ & \dot{K} = Y - C - \delta K \\ & \dot{S} = -E \end{aligned} \quad (13)$$

根据动态最优化理论, 建立现值 Hamilton 函数:

$$H = \frac{C^{1-\theta} - 1}{1-\theta} + \lambda_1 (Y - C - \delta K) - \lambda_2 E - \lambda_3 B(1 - L_Y)A \quad (14)$$

其中, 共积变量 λ_3 是存量变量 A 的动态乘数, 也解释为 A 的影子价格。同时, 根据最大化原理可以推导出:

$$g_E = \frac{(1-\theta)(\alpha_3 u_3 B - \alpha_2 \rho - \alpha_3 \rho) - \rho \theta (\alpha_2 + \alpha_3)}{\theta (\alpha_2 + \alpha_3)} \quad (15)$$

计算 $-g_E$ 对 u_3 的一阶偏导, 可得: $\frac{\partial (-g_E)}{\partial u_3} = \frac{(\theta-1)\alpha_3 B}{\theta(\alpha_2 + \alpha_3)}$ 。当 $\theta > 1$ 时, $\frac{\partial (-g_E)}{\partial u_3} > 0$; 当 $0 < \theta < 1$ 时, $\frac{\partial (-g_E)}{\partial u_3} < 0$ 。

(三) 小结

上文从技术外生和技术内生两个层面以及“自主式”效应、“干中学”效应和“巨人肩膀”效应三个维度刻画能源节约型技术进步, 并在一般均衡框架下系统阐释了能源节约型技术进步对能源消耗的作用机理。理论模型的结果如表 1 所示。可知, 能源节约型技术进步无论是外生的, 还是内生的, 对能源消耗的影响总是取决于 θ 的大小。边际效用弹性 θ 衡量的是边际效用对单位消费变动的弹性, 反映

表 1 能源节约型技术进步对能源消耗的边际影响

技术外生	技术内生	
“自主式”效应	“干中学”效应	“巨人肩膀”效应
$\frac{\partial (-g_E)}{\partial u_1}$	$\frac{\partial (-g_E)}{\partial u_2}$	$\frac{\partial (-g_E)}{\partial u_3}$
>0 , 若 $\theta > 1$; <0 , 若 $0 < \theta < 1$ 。	>0 , 若 $\theta > 1$; <0 , 若 $0 < \theta < 1$ 。	>0 , 若 $\theta > 1$; <0 , 若 $0 < \theta < 1$ 。

人们对代际间不公平的厌恶程度 (即相对风险厌恶系数)。考虑到未来人们会变得更加富有, 单位收入带来的消费以及边际效用递减, 那么其他条件不变, θ 值越大意味着越有利于当代人消费^[4]。因此, 高的 θ 值表明消费者缺乏耐心, 偏好当前消费, 那么能源节约型技术水平的提升促进能源消耗。另一方面, 在相反的偏好下, 消费者富有耐心, 蕴含其没有平滑效用的欲望, 从而放弃当前消费以享受未来更高的消费水平, 那么能源节约型技术进步减少能源消耗。

由于 θ 的取值具有波动性, 既可能落在 $(0, 1)$ 取值区间内, 也有可能落在 $(1, +\infty)$ 取值区间内, 因此能源节约型技术进步对能源消耗的影响并非简单的线性关系, 而是具有非线性的特性, 与客观存在的能源回弹效应不谋而合。某种意义上, 边际效用弹性具有调节能源回弹效应的作用。具体来说, 当 $\theta > 1$ 时, 边际效用弹性放大能源回弹效应; 反之, 则抑制能源回弹效应。基于以上分析, 提出如下命题。

命题 1: 能源节约型技术进步对能源消耗的影响为非线性, 受到边际效用弹性的影响。当 $\theta > 1$ 时, 能源节约型技术进步驱动能源消耗, 此时边际效用弹性放大了能源回弹效应; 反之则反是。

四、研究设计

(一) 计量模型设定

本文从两部分验证命题 1: 一是, 能源节约型技术进步对能源消耗的影响为非线性; 二是, 能源

其中, $GTCH$ 即本文构建的能源节约型技术进步指标, 值大于 1, 表示从 t 期到 $t+1$ 期, 能源节约型技术进步, 反之则反是。

至于投入产出指标, 本文选取资本存量、劳动力和能源消费作为投入, 实际 GDP 作为期望产出, SO_2 、化学需氧量 (COD) 和 CO_2 作为非期望产出。值得一提的是, 本文参考杜立民^[21], 计算得到历年 CO_2 排放数据。表 2 报告了 2002—2012 年中国平均全要素能源效率及其分解指数, 第三列即为本文所需的“能源节约型技术进步”指标。容易看出, 全要素能源效率的提高主要是因为能源节约型技术进步的贡献。

2. 边际效用弹性。对 θ 的估计有两种方法: 基于最优消费决策条件

(Keynes-Ramsey 法则) 模型和基于风险投资决策 (Arrow-Pratt 风险测量) 模型^[22]。为了与前文模型保持一致性, 本文采用第一种方法估计 θ 值。由经典的 Ramsey 法则可知: $\theta = \frac{r - \rho}{\dot{c}/c}$, 其中, r 为资本报酬率, ρ 为纯时间偏好率, \dot{c}/c 为人均消费增长率。测算资本报酬率有两种方法: 一种是 $r = f'(k) - \delta - \tau$, 其中 $f'(k)$ 表示资本的边际产出, δ 为全社会资本平均折旧率, τ 为每单位有效资本所缴纳的税金; 一种是 $r = \frac{\Delta pergd p - \Delta pery}{\Delta perk}$, $\Delta pergd p$ 表示人均 GDP 增量, $\Delta pery$ 表示人均收入增量, $\Delta perk$ 表示人均资本存量增量。关于这两种方法的优缺点, 已有文献^[22] 阐明第一种方法得到的结果经过生产函数平滑而波动较小, 而后者所需的数据均可在统计年鉴中获得, 但本质上这两种方法得到的资本报酬率的变化趋势基本相同。鉴于数据的可获得性, 本文采用第二种方法。 $\Delta pergd p$ 以 2000 年的人均实际 GDP 测算。 $\Delta pery$ 以城镇人口和农村人口的收入加权平均的增量表示, 具体来说, 用“城镇居民家庭人均可支配收入”乘以城镇人口比重, 加上“农民家庭人均纯收入”乘以农村人口比重, 再逐年相减。测算 $\Delta perk$ 所需的资本存量与上文一致。关于纯时间偏好率 ρ 的取值, 根据 Bovenberg 等^[23] 对美国经济的研究, 美国居民的该参数取值为 0.03, 但中国居民出于对不确定性的防范和受“重储蓄”传统思想的影响, 对未来消费的重视程度更高, 参考既有文献^{[22][24]}, 这里取 $\rho = 0.02$ 。 \dot{c}/c 以按 GDP 支出法计算的人均最终消费进行估计, 并用居民消费价格指数消除通货膨胀因素。2002—2012 年平均边际效用弹性如表 2 所示。容易看出, 2007、2008 和 2012 年 θ 值小于 1; 2008 年 θ 值最小, 此时正值美国金融海啸爆发, 公众受其影响, 提高储蓄率, 因此边际效用弹性较小。2008 年之后, 随着中国经济复苏, 民众恢复信心, 边际效用弹性增大。另外, 2012 年边际效用弹性变小, 可能受欧洲主权危机波及所致。总体看来, 虽然测算的 θ 值波动较大, 但符合经济实际且 θ 值所在区间符合经典文献的取值范围。

3. 其他变量。被解释变量为能源消耗, 以各地区人均能源消费量衡量。下述变量均为控制变量: 能源价格 ($Price$) 以原材料、燃料、动力购进价格指数衡量; 能源消费结构 ($Ener$) 以煤炭消费量占能源消费总量的比重衡量; 产业结构 ($Indu$) 以第二产业产值占地区生产总值的比重衡量; 研发强度 ($R\&D$) 以 R&D 经费支出占 GDP 的比重衡量; 外商直接投资 (FDI) 以使用实际利用外商直接投资占 GDP 的比重衡量。

表 2 省际全要素能源效率指数、分解值和边际效用弹性值 (2002—2012)

年份	全要素能源效率	技术进步	技术效率	边际效用弹性
2003/2002	0.917	0.918	1.000	10.001
2004/2003	0.961	0.970	0.991	4.703
2005/2004	0.980	1.006	1.006	1.791
2006/2005	1.021	1.021	0.999	2.138
2007/2006	1.038	1.005	1.087	2.159
2008/2007	1.051	1.028	1.032	0.179
2009/2008	1.051	1.042	1.010	0.707
2010/2009	1.042	1.121	0.979	1.403
2011/2010	1.017	1.064	0.964	1.059
2012/2011	1.076	1.050	1.025	0.784
平均值	1.015	1.023	1.009	2.492

五、实证结果

能源节约型技术进步对能源消耗影响的结果如表 3 所示。模型 I—III 为计量方程 (1) 的估计结果, 模型 IV—VI 为计量方程 (2) 的估计结果, 而模型 VII 则包含了所有本文关注的解释变量的估计结果。作为参照, 本文同时报告了普通最小二乘法的估计结果。容易看出, 所有模型中, Wald F 检验均在 1% 的水平上拒绝原假设, 意味着固定效应模型优于普通最小二乘法, 同时 Hausman 检验至少在 5% 水平上拒绝原假设, 说明固定效应模型也胜于随机效应模型, 因此下文重点关注固定效应模型的回归结果。

模型 IV—VI 中, 能源节约型技术进步一次方和二次方项的系数分别在 1% 的水平上显著为正和显著为负, 表明两者之间存在倒 U 型曲线关系, 即在能源节约型技术进步较低的水平上, 能源节约型技术进步促进能源消耗, 体现了“能源回弹效应”; 而当能源节约型技术进步越过阈值时, 则抑制能源消耗, 随着能源节约型技术进步的提升, 技术进步的作用由“回弹效应”演变为“节能效应”, 从而佐证了命题 1。模型 V—VI 考虑了能源节约型技术进步与边际效用弹性的交叉项, 回归结果表明交叉项的系数显著为正, 并通过 1% 的显著性水平检验, 阐释了在边际效用弹性的作用下, 能源节约型技术进步驱动能源消耗。根据前文边际效用弹性的测算结果, 虽然 2007 年、2008 年的边际弹性小于 1, 能源节约型技术进步减少了能源消耗, 但是 2002—2012 年中国各地区消费者边际效用弹性的均值为 2.49, 大于 1, 从而总体上而言, 能源节约型技术进步应该增加了能源消耗, 即边际效用弹性放大了能源回弹效应。因此, 回归结果与理论模型相吻合, 完善了对命题 1 的考证。模型 VII 同时引入能源节约型技术进步的二次方项和其与边际效用弹性的交叉项, 一次方、二次方和交叉项的系数均在统计意义上显著, 进一步表明两者间的倒 U 型曲线关系与边际效用弹性具备放大能源回弹效应的特性。

表 3 能源节约型技术进步影响能源消耗的回归结果

解释变量	I (OLS)	II (FE)	III (RE)	IV (OLS)	V (FE)	VI (RE)	VII (FE)
<i>Estc</i>	0.011 077*** (0.003 038)	0.004 125*** (0.000 901)	0.004 307*** (0.000 938)				0.003 290*** (0.000 947)
<i>Estc</i> ²	-0.000 078*** (0.000 015)	-0.000 020*** (0.000 005)	-0.000 021*** (0.000 005)				-0.000 019*** (0.000 005)
<i>Estc</i> × θ				-0.000 226 (0.000 527)	0.000 494*** (0.000 146)	0.000 486*** (0.000 149)	0.000 439*** (0.000 168)
<i>Price</i>	-0.006 042 (0.004 582)	-0.001 702 (0.001 323)	-0.002 305* (0.001 374)	-0.006 936 (0.004 786)	-0.002 371* (0.001 349)	-0.002 853** (0.001 373)	-0.002 078 (0.001 316)
<i>Ener</i>	-0.000 271 (0.001 527)	0.005 923*** (0.001 335)	0.005 838*** (0.001 328)	0.001 088 (0.001 567)	0.006 217*** (0.001 355)	0.006 178*** (0.001 335)	0.005 982*** (0.001 321)
<i>Indu</i>	0.064 989*** (0.004 155)	0.033 132*** (0.002 569)	0.035 557*** (0.002 617)	0.065 768*** (0.004 368)	0.033 379*** (0.002 631)	0.035 378*** (0.002 638)	0.031 773*** (0.002 594)
<i>R&D</i>	0.197 219*** (0.029 468)	0.499 967*** (0.028 787)	0.457 880*** (0.028 174)	0.227 857*** (0.030 425)	0.516 909*** (0.028 724)	0.484 193*** (0.027 991)	0.496 924*** (0.028 498)
<i>FDI</i>	-0.074 407*** (0.017 284)	-0.013 419 (0.010 589)	-0.022 767** (0.010 692)	-0.068 517*** (0.017 958)	-0.008 964 (0.010 757)	-0.016 504 (0.010 723)	-0.011 501 (0.010 499)
<i>_cons</i>	6.997 281*** (0.517 424)	6.820 591*** (0.198 020)	6.874 413*** (0.220 271)	6.907 264*** (0.544 512)	6.831 785*** (0.203 347)	6.869 319*** (0.227 973)	6.914 775*** (0.199 165)
<i>R</i> ²	0.561 5	0.766 3	0.764	0.521 2	0.758 2	0.756 7	0.772 3
Wald F test		131.39 [0.000 0]			139.63 [0.000 0]		134.52 [0.000 0]
Hausman test		67.01 [0.000 0]			22.10 [0.001 2]		69.09 [0.000 0]

注: ***, **, * 分别表示 1%、5%、10% 的显著水平, 系数下方小括号内数值为其稳健标准误, 中括号内为相应检验的 p 值; 表中各模型的含义分别如下: OLS (普通最小二乘法)、FE (固定效应模型)、RE (随机效应)。

控制变量中,能源价格与能源消耗之间呈不显著的负相关关系,没有证据表明能源价格的上涨能够有效抑制能源消耗。可能的解释在于,中国的能源定价机制还没有实现市场化,价格扭曲导致供需双方不能获得准确信号,无法有效调节能源的生产和消费行为,造成能源过度利用和能源效率低下的后果。同时,这一结论也相一致于 Lin 等^[25]的工作,认为人为压低能源价格是导致这一现象的罪魁祸首,使能源价格并不能真实反映能源的需求和供给及其稀缺性。能源消费结构是驱动能源消耗的重要诱因,中国“富煤贫油少气”的能源禀赋结构决定了长期煤炭为主的能源消费结构,而煤炭利用效率低下是能源消耗盘踞在高位的重要原因之一。此外,产业结构的重型化更加剧了能源消耗,因此调整产业结构,鼓励清洁产业为主的服务业发展,进而促使产业结构高级化是节约能源的有效途径。令人惊奇的是,以 R&D 支出衡量的研发水平与能源消耗呈显著的正相关关系,与经济直觉相悖。其原因可能在于一味追求发展经济,使得系列制度安排让环境保护让位于经济发展的要求,从而 R&D 支出更倾向于用于提高资本和劳动效率的技术研发,而忽略了提高环境保护技术和能源效率的投资^[26]。这也说明通过提高 R&D 支出降低能源消耗还存在较大空间,未来政府需要进一步加大 R&D 投入。通常认为,FDI 通过规模效应、技术效应和结构效应三个方面影响能源消耗,并且作用方向既可能是“污染光环”效应,也可能是“污染避难所”效应。回归结果表明,FDI 遏制能源消耗但不显著,意味着上述两种力量谁占主导尚不清晰。

六、结论与政策启示

本文从技术外生和技术内生两个层面以及“自主式”效应、“干中学”效应和“巨人肩膀”效应三个维度勾勒能源节约型技术进步,并在一般均衡框架下系统剖析了能源节约型技术进步对能源消耗的作用机理。理论结论表明,能源节约型技术进步对能源消耗的影响呈非线性,验证了客观存在的能源回弹效应。某种意义上,边际效用弹性具有调节能源回弹效应的作用。具体来说,当边际效用弹性大于 1 时,边际效用弹性放大能源回弹效应;反之,则抑制能源回弹效应。在理论分析的基础上,利用 2002—2011 年中国省际面板数据检验了两者之间的关系。研究揭示,能源节约型技术进步与能源消耗呈显著的倒 U 型曲线关系,同时边际效用弹性放大了能源回弹效应。具体而言,边际效用弹性越高,意味着人们偏好当前消费,延长了 U 型曲线的爬升阶段,不利于能源节约型技术进步的“节能效应”。因此,本文的研究结论蕴含着如下政策涵义。

其一,内外并重,切实提高我国能源节约型技术水平。如前所述,能源节约型技术进步对能源消耗的影响轨迹呈倒 U 型,因此,只有能源节约型技术水平充分高并越过拐点时,才能降低能源消耗。对内,应该增加研发投入和提高研发强度,因地制宜采取针对性的激励政策,创造有利于企业能源技术创新的外部环境,着力增强自身创新能力;对外,积极引进与自身生产力水平、技术吸收能力相匹配的能源技术,对其反向学习和二次开发,充分发挥后发优势。

其二,理顺能源价格机制,真实反映能源稀缺成本和环境成本。前文实证分析表明,能源价格对降低能源消耗的作用并不显著,甚至在动态模型中能源价格驱动能源消耗。一些研究已经指出能源价格偏低是导致我国能源消耗居高不下的关键原因。因此,理顺能源价格机制,减小能源价格扭曲是当务之急。理顺能源价格机制包括三方面:一是理顺煤价和电价,实行煤价、上网电价和终端电价的联动;二是理顺成品油定价机制,更加接轨国际油价,建立自动调价机制;三是理顺天然气价格,有效解决进口价格与国内气价倒挂问题。理顺能源价格机制,归根结底就是要使能源价格真实反映能源稀缺成本和环境成本。通过资源税和环境税将能源使用的环境外部成本内部化,修正被扭曲的价格信号。

其三,合理引导社会消费观念,有效抑制能源回弹效应。本文最重要的结论在于,中国当前的边际效用弹性延长了倒 U 型曲线的爬升阶段,不利于能源节约型技术进步的“节能效应”。因此,坚持

科学发展观,塑造公众的可持续发展理念,倡导节能、绿色的消费观,使边际效用弹性维持在合理区间,从而发挥边际效用弹性遏制能源回弹效应的作用。另外,公众需要保持适当的“储蓄”率。究其根源,在任何一种经济增长理论中,储蓄率对长期经济增长至关重要。在某种意义上,储蓄率等同于边际效用弹性,都反映消费者的决策行为。过高的边际效用弹性促进能源消费,放大能源回弹效应。本质上,能源是可耗竭的“资产”,过度消费将有损下一代人的利用,有违可持续发展的公平性原则,因此有必要适度“储蓄”这种资产。

参考文献

- [1] Popp,D. Induced innovation and energy prices[J]. *American Economic Review*,2002,(1).
- [2] Greening,L. A. ,D. L. Greene,C. Difiglio. Energy efficiency and consumption—the rebound effect—a survey[J]. *Energy Policy*,2000,(6-7).
- [3] Hu,J. L. ,S. C. Wang. Total-factor energy efficiency of regions in China[J]. *Energy Policy*,2006,(17).
- [4] 刘昌义. 气候变化经济学中贴现率问题的最新研究进展[J]. *经济学动态*,2012,(3).
- [5] Newell, R. G. ,A. B. Jaffe, R. N. Stavins. The induced innovation hypothesis and energy-saving technological change[J]. *The Quarterly Journal of Economics*,1999,(3).
- [6] Hassler,J. ,P. Krusell,C. Olovsson. *Energy-saving Technical Change*[Z]. NBER Working Paper, No. 18456, 2012.
- [7] Acemoglu,D. Directed technical change[J]. *The Review of Economic Studies*,2002,(4).
- [8] 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,(2).
- [9] Dasgupta,P. ,G. Heal. The optimal depletion of exhaustible resources[J]. *Review of Economic Studies*, *Symposium on the Economics of Exhaustible Resources*,1974,41.
- [10] Solow,R. M. Intergenerational equity and exhaustible resources[J]. *Review of Economic Studies*, *Symposium on the Economics of Exhaustible Resources*,1974,41.
- [11] Stiglitz,J. Growth with exhaustible natural resources; Efficient and optimal growth paths[J]. *Review of Economic Studies*, *Symposium on the Economics of Exhaustible Resources*,1974,41.
- [12] Grimaud, A. ,L. Rougé. Environment, directed technical change and economic policy[J]. *Environment Resource Economic*,2008,(3).
- [13] Bretschger, L. ,S. Smulders. Sustainability and substitution of exhaustible natural resources; How structural change affects long-term R&D-investments[J]. *Journal of Economic Dynamics & Control*,2012,(4).
- [14] Acemoglu,D. ,P. Aghion,L. Burszty, et al. The environment and directed technical change[J]. *American Economic Review*,2012,(1).
- [15] van Zon,A. ,I. H. Yetkiner. An endogenous growth model with embodied energy-saving technical change[J]. *Resource and Energy Economics*,2003,(1).
- [16] Yetkiner,I. H. ,A. ,van Zon. *Further Results on “An Endogenous Growth Model with Embodied Energy-Saving Technical Change”*[Z]. Working Paper,2007.
- [17] Nordhaus, W. D. *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change* [M]. Cambridge: MIT Press,1994.
- [18] Gillingham,K. ,R. G. Newell,W. A. Pizer. Modeling endogenous technological change for climate policy analysis[J]. *Energy Economics*,2008,(6).
- [19] Oh,D. A global malmquist-luenberger productivity index[J]. *Journal of Productivity Analysis*,2010,(3).
- [20] 王兵,吴延瑞,颜鹏飞. 中国区域环境效率与环境全要素生产率增长[J]. *经济研究*,2010,(5).
- [21] 杜立民. 我国二氧化碳排放的影响因素:基于省级面板数据的研究[J]. *南方经济*,2010,(11).
- [22] 顾六宝,肖红叶. 中国消费跨期替代弹性的两种统计估算方法[J]. *统计研究*,2004,(9).
- [23] Bovenberg,L. A. ,S. Smulders. Environmental quality and pollution-augmenting technological change in a two-sector endogenous growth model[J]. *Journal of Political Economy*,1995,57.

- [24]刘凤良,吕志华. 经济增长框架下的最优环境税及其配套政策研究——基于中国数据的模拟运算[J]. 管理世界, 2009, (6).
- [25]Lin, B. Q., H. Y. Long. How to promote energy conservation in China's chemical industry[J]. *Energy Policy*, 2014, 73.
- [26]张华,魏晓平. 绿色悖论抑或倒逼减排: 环境规制对碳排放影响的双重效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, (9).

(责任编辑 朱 蓓)