

# 能源环境约束下垂直技术进步、 产业结构变迁与经济可持续增长

郑丽琳<sup>1</sup>, 朱启贵<sup>2</sup>

(1. 安徽财经大学 管理科学与工程学院, 安徽 蚌埠 233030;

2. 上海交通大学 安泰经济与管理学院, 上海 200030)

**摘要:**文章通过构建包含能源和环境约束的多部门内生增长模型,首先从理论上分析了能源导向型和劳动导向型这两类垂直技术进步如何影响一国的产业结构变迁和经济增长,然后在此基础上进行了数值模拟分析。研究发现:(1)经济能否持续增长与产业结构变迁密切相关,而产业间垂直技术进步差异和能源环境约束又直接影响产业结构变迁状况;(2)在一定的参数设置下,经济可实现持续增长,环境库兹涅茨曲线成立,经济变量变动率长期趋同。

**关键词:**能源环境约束;垂直技术进步;产业结构变迁;经济增长

**中图分类号:**F061.2;F062.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9952(2013)07-0049-12

## 一、引言

从巴厘岛到哥本哈根、德班,在历届气候大会上,中国政府切实履行绿色发展的庄严承诺。从国家“十一五”规划首次设立约束性指标,到党的十八大提出“美丽中国”,中国正逐步告别粗放式发展,走上绿色低碳发展、永续发展之路。如何在能源和环境承载能力有限的约束下创造更多有效产出,并降低污染损害,实现生态文明建设目标,科技进步与创新将成为一条重要的途径。一国经济内部各产业的技术进步速度有所不同,技术需求和吸收能力方面的明显差异导致各产业的增长速度也存在较大差别,从而可能引起一国产业结构发生变化;同时,在经济发展过程中,主导产业更替也将直接影响投入要素在产业间的流动,进而影响一国的生产、消费等。因此,研究如何在能源环境约束下通过技术进步来推动产业结构变迁进而实现经济可持续增长,具有重要的理论和现实意义。

**收稿日期:**2013-01-28

**基金项目:**教育部人文社会科学研究青年项目(12YJC790285);国家社会科学基金重点项目(11AZD031)

**作者简介:**郑丽琳(1981—),女,安徽合肥人,安徽财经大学管理科学与工程学院副教授,硕士生导师;朱启贵(1962—),男,安徽合肥人,上海交通大学安泰经济与管理学院教授,博士生导师。

自20世纪70年代以来,有关能源或环境约束下的经济增长研究逐步受到重视。无论是新古典框架还是内生增长框架,技术进步都被认为是解释经济持续增长的关键因素之一。一些学者(如Aghion和Howitt,1998;Groth和Schou,2007)假设经济增长是同质的,产业结构变化相对不重要,从而设置了单一的技术进步和简单的生产函数形式(如CD、AK),由此专注于技术进步而忽略了结构变动对能源消耗、环境变化和经济增长的影响。考虑到能源的稀缺性及不同产业间能源消耗强度的差异性,也有一些学者利用多部门模型并设置特殊的生产函数来反映产业结构问题。例如,Smulder和Nooij(2003)设置了CES形式生产函数,以不同中间产品和多种技术进步来反映结构问题;Sue(2006)、Acemoglu等(2012)通过细分清洁产品和污染产品,分析在不同产品技术进步存在差异的情况下经济系统的变化。国内相关研究以实证分析为主,如史丹(2003)、王俊松和贺灿飞(2009)、姜磊和季民河(2011)等,理论研究则大多集中在技术进步影响经济增长与环境污染的兼容性、经济最优增长率、政府最优调控工具等问题上,只有少数学者涉及结构问题,如余江(2008)等。

综上所述,国内外已有相关文献为本文提供了重要的参考,但对产业结构变量往往缺少明确的模型设置,而且技术进步又大多附加于中间产品。因此,本文借鉴Smulder和Nooij(2003)的研究思路,将Acemoglu等(2012)提出的要素导向技术进步引入能源环境约束下的三部门模型,利用研发人员在不同部门间的分布差异,从理论上分析能源导向型和劳动导向型这两类垂直技术进步如何影响一国的产业结构变迁,进而影响能源消费、污染排放、经济增长等,并在此基础上对经济变量均衡变动路径进行数值模拟。

## 二、理论模型构建

能源在经济增长中扮演着“动力源”和“污染源”的双重角色。本文以能源为突破口,在模型构建时考虑能源环境约束下多部门之间的有机联系。

### (一)最终产品部门

一国经济产出不仅取决于要素投入数量,也与要素投入形式密切相关。为了突出反映产业结构,本文假设最终产品由能源密集型投入品和劳动密集型投入品组合生产,其生产函数采用不变替代弹性(CES)形式。绝大多数实证文献发现,在多国多行业的CES生产函数中,要素替代弹性往往小于1,故假设 $\sigma$ 小于1,即两类投入品相对投入量的变化小于相对价格的变化。

$$Y_t = [Y_{L_t}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + Y_{R_t}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad (1)$$

能源密集型投入品由能源R、技术水平 $A_{R_t}$ 和机器设备 $x_{R_t}$ 共同决定,劳动密集型投入品则由劳动L、技术水平 $A_{L_t}$ 和机器设备 $x_{L_t}$ 共同决定。两类投入

品都是规模报酬不变的,生产函数分别为:

$$Y_{Rt} = R_t^{1-\alpha} \int_0^1 A_{Rit}^{1-\alpha} x_{Rit}^\alpha di, Y_{Lt} = L_t^{1-\alpha} \int_0^1 A_{Lit}^{1-\alpha} x_{Lit}^\alpha di, 0 < \alpha < 1 \quad (2)$$

假设最终产品的价格  $p_Y$  为 1,能源密集型投入品和劳动密集型投入品的价格分别为  $p_R$  和  $p_L$ ,每种机器设备的价格分别为  $p_{Ri}$  和  $p_{Li}$ ,则最终产品及两个产业的利润函数分别为:

$$\pi_t^Y = Y_t - p_{Rt} Y_{Rt} - p_{Lt} Y_{Lt} \quad (3)$$

$$\pi_t^R = p_{Rt} Y_{Rt} - p_{Et} R_t - \int_0^1 p_{Rit} x_{Rit} di, \pi_t^L = p_{Lt} Y_{Lt} - w_t L_t - \int_0^1 p_{Lit} x_{Lit} di \quad (4)$$

现有研究中产业结构常用来反映国民经济各产业部门之间以及各产业部门内部的构成,绝大多数实证文献采用各产业产值占总产值的比例来衡量。因此,本文设置产业结构变量  $g_{Rt} = p_{Rt} Y_{Rt} / p_{Yt} Y_t$  和  $g_{Lt} = p_{Lt} Y_{Lt} / p_{Yt} Y_t$  来描述能源密集型产业和劳动密集型产业产值占总产值的比重,以其变动反映一国产业结构变迁。

## (二)中间产品部门

中间产品部门主要生产机器设备,它们投入  $\phi$  单位最终产品获得 1 单位机器设备。两类机器设备生产厂商均有无穷多个,其中任何一个厂商凭借自身独有的技术生产性能唯一的机器设备( $x_{Ri}, x_{Li}$ ),获得垄断利润,这部分利润最终用于机器设备的技术研发。机器设备生产厂商的利润函数为:

$$\pi_{Rit}^m = p_{Rit} x_{Rit} - p_{Yt} \phi x_{Rit}, \pi_{Lit}^m = p_{Lit} x_{Lit} - p_{Yt} \phi x_{Lit} \quad (5)$$

## (三)R&D 部门

研发部门利用科研人员的研发时间和精力投入来推动不同产业的垂直技术进步。科研人员的人数被标准化为 1,假设他们可以从事各种机器设备的研发工作,并自由分配时间和精力。研发活动服务于所有中间产品生产厂商,通过垂直技术创新实现机器设备的质量升级或更新换代。Acemoglu 等(2012)所提出的导向型技术变动描述了产品质量的持续提升,在某种意义上是垂直技术创新的一种简易表达。因此,本文借鉴 Acemoglu 等(2012)的设置形式,得到各类机器设备的垂直技术变动率:<sup>①</sup>

$$\dot{A}_{Rit} = \gamma_R s_{Rit} A_{Rit}, \dot{A}_{Lit} = \gamma_L s_{Lit} A_{Lit} \quad (6)$$

假设能源导向型和劳动导向型技术研发的成功概率分别为  $\gamma_R$  和  $\gamma_L$ ,科研人员的研发时间分配比例分别为  $s_{Ri}$  和  $s_{Li}$ 。产业中原有的技术水平( $A_{Rt}, A_{Lt}$ )反映知识外溢能力的大小,若技术水平较高,则对机器设备的更新升级具有正向促进作用。两类 R&D 部门的利润函数分别为:

$$\pi_{Rit}^{R\&D} = \pi_{Rit}^m - w_s s_{Ri}, \pi_{Lit}^{R\&D} = \pi_{Lit}^m - w_s s_{Li} \quad (7)$$

## (四)能源和环境约束

能源是有限且同质的,部分用于能源消费  $R$ ,部分消耗于能源开采。给定

开采成本  $\mu_t$ , 能源开采利用率为  $K_\mu = R / [(1 + \mu)R]$ , 其变化率为  $\hat{K}_\mu = -\dot{\mu} / (1 + \mu)$ 。由于能源是同质的, 不考虑优先开采高品质能源的情况, 因此, 随着时间推移, 能源开采技术不断提高, 开采成本不断下降,  $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{K}_\mu = 0$ 。假设污染排放量  $P_t$  取决于能源密集型投入品的产量  $Y_{Rt}$  和污染生成系数  $h$ , 即  $P_t = hY_{Rt}$ 。环境污染存量变化不仅取决于当期污染排放量, 还取决于自然环境的自我更新状况(设环境自我更新系数为  $\theta$ )。考虑到环境承载能力有限, 环境质量在一定区间内变动, 上界为初始状态  $E_0$ , 下界为生态系统崩溃时的状态  $E_{-\infty}$ 。由此, 能源约束条件和环境质量变动律分别为:

$$\dot{S}_t = -R_t(1 + \mu_t), S_t \in [0, S_0] \quad (8)$$

$$\dot{E}_t = -P_t + \theta E_t, \theta \in (0, 1), E_t \in [E_{-\infty}, E_0] \quad (9)$$

### (五) 代表性居民

假设代表性居民具有永续生命, 他们既是消费者又是生产者, 物质消费和生存环境质量共同影响居民的效用水平  $U(c_t, E_t) = \ln c_t + \omega E_t$ 。假定代表性居民拥有的资产包括机器设备和能源储备, 即  $V_t = \int_0^1 x_{Rit} di + \int_0^1 x_{Lit} di + p_{Et} S_t / (1 + \mu)$ 。居民既可以出借机器获得租金  $r(V - p_{Et} S_t / (1 + \mu))$ , 也可以通过开采能源获得收入  $\dot{p}_{Et} S_t / (1 + \mu) + p_{Et} S_t / (1 + \mu) \hat{K}_\mu$ 。<sup>②</sup> 资产收入和工资用于消费、缴纳税金  $T$  等, 则其预算约束可表示为:

$$\dot{V} = r \left( V - \frac{p_{Et} S_t}{1 + \mu} \right) + \frac{\dot{p}_{Et} S_t}{1 + \mu} + \frac{p_{Et} S_t}{1 + \mu} \hat{K}_\mu + wL - cL - T \quad (10)$$

## 三、模型均衡求解

### (一) 竞争性均衡

竞争性均衡是给定初始污染存量和初始能源存量, 在价格体系和政府政策下, 资源达到合理配置, 代表性居民效用最大, 企业利润最大, 各个市场出清。假设所有中间厂商都是同质的, 则有  $\int_0^1 x_{ji} di = x_j$ ,  $\int_0^1 A_{ji} di = A_j$ 。

第一, 最终产品部门利润最大化。由最终产品利润函数可得投入品的相对价格满足  $p_R / p_L = (Y_R / Y_L)^{-1/\sigma}$ , 表明两类投入品的相对价格是其相对供给的递减函数。考虑到最终产品价格被设定为 1, 则有  $[p_R^{1-\sigma} + p_L^{1-\sigma}]^{1/(1-\sigma)} = 1$ 。利用能源密集型产业和劳动密集型产业的利润函数即式(4), 可得中间产品部门两类机器设备的需求函数及要素需求函数。

第二, 中间产品部门利润最大化。利用中间产品部门的利润函数即式(5), 可得机器设备的价格函数  $p_{Ri} = p_{Li} = \psi / \alpha$ 。由于  $0 < \alpha < 1$ , 机器设备的价格高于其成本, 表明中间产品部门具有垄断市场结构。

整理上述两部门的利润最大化条件,假定  $A_R R$  为有效能源,  $A_L L$  为有效劳动,则投入品相对需求为  $Y_R/Y_L = (A_R R/A_L L)^{\frac{\sigma(1-\alpha)}{\sigma(1-\alpha)+\alpha}}$ ,投入品相对价格为  $p_R/p_L = (A_R R/A_L L)^{\frac{-(1-\alpha)}{\sigma(1-\alpha)+\alpha}}$ ,机器设备相对需求为  $x_R/x_L = (A_R R/A_L L)^{\frac{(\sigma-1)(1-\alpha)}{\sigma(1-\alpha)+\alpha}}$ 。这表明在  $\sigma < 1, \alpha < 1$  的情况下,投入品相对需求是有效要素比值的递增函数,即有效要素投入越多的产业产出水平越高,产出增长带来规模效应,导致价格下降;机器设备相对需求是有效要素比值的递减函数,由于部门内部有效要素与机器之间存在替代关系,有效要素投入多的中间产品部门机器设备需求会受到遏制。将上述比值带入式(5),可得两类中间产品部门利润比值式(11),其中存在三种效应:第一,价格效应,即产品价格越高,利润越多;第二,技术效应,即技术水平越高,利润越多;第三,要素规模效应,即要素投入越多,利润也越多。利润比值为有效要素比值的递减函数。

$$\frac{\pi_R^m}{\pi_L^m} = \frac{\int_0^1 \pi_{Ri} di}{\int_0^1 \pi_{Li} di} = \frac{p_R^{\frac{1}{1-\alpha}}}{p_L^{\frac{1}{1-\alpha}}} \cdot \frac{A_R}{A_L} \cdot \frac{R}{L} = \left( \frac{A_R R}{A_L L} \right)^{\frac{\Omega}{\Omega-1}} \quad (11)$$

其中,  $\Omega = (1-\sigma)(1-\alpha)$ 。结合产业结构变量定义式,能源密集型产业产值比例为:

$$g_R = \left( 1 + \left( \frac{A_R R}{A_L L} \right)^{\frac{-\Omega}{\Omega-1}} \right)^{-1} \quad (12)$$

式(12)表明产业结构变动与有效要素投入之间存在特定关系,而有效要素投入又与不同产业的技术水平直接相关,因此产业结构变动与技术水平相关。能源密集型产业产值比例与有效要素比值负相关,即在有效能源投入多于有效劳动投入时,能源密集型产业产值比例反而会下降。这一结论主要源自投入品替代弹性  $\sigma$  小于 1 的假设。如果有效能源投入的增加幅度大于有效劳动投入,则能源密集型投入品的价格变动小于劳动密集型投入品,但数量变动大于劳动密集型投入品。由于  $\sigma$  小于 1,数量变动小于价格变动,最终出现劳动密集型产业比例上升、能源密集型产业比例下降的情况。此外,整理各中间产品与最终产品的关系可得,消费函数  $C = (1-\alpha^2)Y$ ,则内生储蓄率为  $\alpha^2$ 。

第三, R&D 部门利润最大化。建立能源密集型 R&D 部门的现值汉密尔顿函数:

$$H = (p_{Ri} - \psi) x_{Ri} - w_s s_{Ri} + \lambda (\gamma_R s_{Ri} A_R)$$

对控制变量  $s_{Ri}$  和状态变量  $A_{Ri}$  求一阶条件,并结合研发部门的利润分配状况,即其收入来源于中间产品部门的垄断利润,支出是科研人员的薪酬,薪酬越高的部门科研人员投入越多,从而产业产值比例与研发时间配置内生相关,科研人员研发时间的分配条件为:

$$g_R = s_R, g_L = s_L \quad (13)$$

第四,代表性居民效用最大化。建立代表性居民的现值汉密尔顿函数:

$$H = e^{-\rho t} L(\ln c + \omega E) + \lambda \left[ r \left( V - \frac{p_E S}{1 + \mu} \right) + \frac{\dot{p}_E S}{1 + \mu} + \frac{p_E S}{1 + \mu} \hat{K}_\mu + wL - cL - T \right] + \varphi(-hY_R + \theta E)$$

对控制变量  $c$ 、 $S$  及状态变量  $V$ 、 $E$  求一阶条件,可得凯恩斯-拉姆齐条件和霍特林条件:

$$\hat{c} = r - \rho, \hat{p}_E = r - \hat{K}_\mu \quad (14)$$

凯恩斯-拉姆齐条件表明人均消费变动率等于利息率与时间贴现率之差;霍特林条件表明能源价格变动率等于利息率与能源开采利用变动率之差,能源开采利用程度的提高会带来能源价格的下降。

### (二) 最优变动率

令  $\hat{x} = \dot{x}/x$  为各变量的变动率。由式(13)可得两个产业的内生技术进步率  $\hat{A}_j = \gamma_j g_j$ , 则人均经济增长率、人均能源消费变动率、人均污染排放变动率和能源密集型产业比例变动率分别为:<sup>③</sup>

$$\hat{Y} - \hat{L} = \Delta g_R \{ [g_R(\gamma_R + \gamma_L) - \gamma_L] + \hat{K}_\mu - \rho \} + \gamma_L(1 - g_R) \quad (15)$$

$$\hat{R} - \hat{L} = \Delta(\hat{K}_\mu - \rho) + (\Delta - 1)[g_R(\gamma_R + \gamma_L) - \gamma_L] \quad (16)$$

$$\hat{P} - \hat{L} = \left[ \left( \frac{\alpha}{\Omega} + 1 \right) (\Delta - 1) + 1 \right] (\hat{K}_\mu - \rho) + \left( \frac{\alpha}{\Omega} + 1 \right) (\Delta - 1) [g_R(\gamma_R + \gamma_L) - \gamma_L] + \gamma_R g_R \quad (17)$$

$$\hat{g}_R = (\Delta - 1) \{ [g_R(\gamma_R + \gamma_L) - \gamma_L] + \hat{K}_\mu - \rho \} + \gamma_R g_R \quad (18)$$

经济变量均衡变动率不仅取决于某一产业的技术进步率,还与产业间技术进步差异密切相关。 $g_R(\gamma_R + \gamma_L) - \gamma_L$  为能源密集型产业与劳动密集型产业之间的内生垂直技术进步率之差。 $\hat{K}_\mu - \rho$  被 Sinclair(1992)称为“有效耐心因素”,社会成员越有耐心,能源越迟被开采,我们可以将其理解为能源被延迟开采的机会成本。研发成功概率影响技术进步率,也决定技术进步差异能否弥补能源开采的机会成本。给定有效耐心因素及其他参数设置,式(15)一式(18)有数值解,以描述经济变量的最优变化趋势。值得一提的是,式(18)是关于  $g_R$  的一阶微分方程,也是求解所有变量的起点。

### (三) 结果分析

1. 产业结构变迁与技术进步、能源环境约束密切相关。能源密集型产业比例变动率  $\hat{g}_R$  与产业间技术进步差异和有效耐心因素负相关,如果  $g_R(\gamma_R + \gamma_L) - \gamma_L + \hat{K}_\mu - \rho$  为负,则该产业比例上升。时间贴现率  $\rho$  越小、能源开采效率  $\hat{K}_\mu$  越高、能源密集型机器设备研发成功概率  $\gamma_R$  越高、劳动密集型机器设备研发成功概率  $\gamma_L$  越低,则能源密集型产业比例负向变动的概率越大。

2. 经济增长可持续性也与技术进步、能源环境约束密切相关。经济可持

续增长表现为  $\hat{Y} - \hat{L}$  大于 0。如果  $g_R(\gamma_R + \gamma_L) - \gamma_L + \hat{K}_\mu - \rho > 0, \hat{g}_R < 0$ , 则  $\lim_{t \rightarrow \infty} g_R = 0$ , 即人均经济增长率取决于劳动密集型产业技术进步率, 这种情况类似于新古典模型; 如果  $g_R(\gamma_R + \gamma_L) - \gamma_L + \hat{K}_\mu - \rho < 0, \hat{g}_R > 0$ , 则  $\lim_{t \rightarrow \infty} g_R = 1$ , 即人均经济增长率取决于  $\gamma_R + \hat{K}_\mu - \rho$ , 这种情况类似于 Dasgupta 和 Heal(1974) 的分食蛋糕模型; 如果  $g_R(\gamma_R + \gamma_L) - \gamma_L + \hat{K}_\mu - \rho = 0, \hat{g}_R = 0$ , 则  $g_R$  为常数, 即人均经济增长率由能源密集型产业和劳动密集型产业共同决定。能源约束通过能源开采利用程度对经济增长产生显性影响, 隐性影响则表现为通过能源产出弹性及能源密集型投入品替代弹性等参数作用于能源密集型产业比例, 进而影响经济增长。环境约束则更多地通过时间贴现率来反映。

3. 能源消费、环境质量变动同样与技术进步、能源环境约束密切相关。而产业结构变量  $g_R$  的非线性表达式则为环境库兹涅茨曲线(EKC)的存在性提供了一种理论参考。此外, 在竞争性均衡中, 储蓄率  $\alpha^2$  和消费率  $1 - \alpha^2$  取决于机器等物质资本的产出弹性, 资本产出弹性越大, 储蓄的愿望越强烈。

#### 四、数值模拟

##### (一) 参数设置

第一, 设置最终产品部门 CES 生产函数中的要素替代弹性  $\sigma$ 。Burniaux 等(1992)采用 Green 模型计算得到资本和能源之间的替代弹性为 0.8, 资本能源组合与劳动之间的替代弹性为 0.18; 吕振东等(2009)利用中国 1980—2006 年时序数据, 得到能源和资本之间的替代弹性为 0.47, 资本能源组合与劳动之间的替代弹性为 0.84。本文采取折中办法, 令  $\sigma = 0.5$ 。

第二, 设置能源密集型和劳动密集型投入品中的要素产出弹性。视机器设备为物质资本, 则  $\alpha$  表示资本产出弹性。SGU(2011)利用极大似然估计方法得到  $\alpha$  为 0.37, Acemoglu 等(2012)设定  $\alpha$  为 0.33, 黄贇琳(2005)确定资本产出弹性为 0.503。在国内外相关文献中, 资本产出弹性往往被设置为 0.36, 本文借鉴这一基础参数, 令  $\alpha = 0.36$ 。

第三, 设置研发成功概率和有效耐心因素。借鉴 Acemoglu 等(2012)的做法, 本文将研发成功概率设置为 0.1。代表性居民的年主观贴现率  $\rho$  在 RBC 相关文献中一般被设置为 0.05。能源开采利用率类似于能源中间环节效率, 《中国能源统计年鉴》显示近十年这一数值提高不足 4 个百分点, 因此设定  $\hat{K}_\mu$  为 -0.005。此外, 近五年第二产业产值占 GDP 比重相对稳定且接近 50%, 因此设置能源密集型产业产值比例初始值  $g_{R0} = 0.5$ , 即研发人员研发时间的分配比例为 50%。

第四, 设置能源环境约束中的相关参数。选择污染物  $CO_2$ , 环境自我更新能力  $\theta$  采用郑丽琳和朱启贵(2012)设置的分解率 0.0083。污染生产系数  $h$

使用国际上常用的标准煤折算成碳排放量折算系数 0.6413。环保意识系数  $\omega$  比较抽象,一般使用大气中  $\text{CO}_2$  浓度来衡量污染对环境的影响,结合 2008 年世界银行提供的全球  $\text{CO}_2$  排放总量为  $3.21 \times 10^{11}$  吨、人均排放量为 4.8 吨,本文设定数量级  $10^{-11}$  作为个体对环境的影响系数。根据国际劳工组织 2010 年 11 月发布的《全球工资报告》,设置工资增长率约为 1.6%。后续研究可以在一定范围内对上述参数进行调整以进行敏感性检验。

## (二)数值模拟

### 1. 基础参数模拟结果分析

本文在求解微分方程时利用 MATLAB 中基于龙格—库塔(4,5)积分方法 ODE45 完成。设置能源密集型产业比例初始值,求解式(18),并以此为起点,模拟人均经济增长率、人均能源消费变动率、人均污染排放变动率、能源密集型产业比例等变量的最优路径(见图 1)。

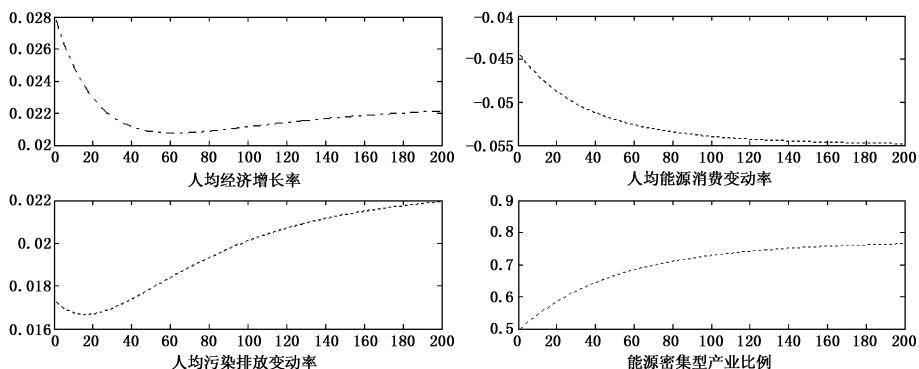


图 1 竞争性均衡中各变量变动率

图 1 显示,在基础参数设置下,产业间技术进步差异不足以弥补能源开采的机会成本,此时,人均经济增长率、人均污染排放变动率、能源密集型产业比例正向变动,人均能源消费变动率负向变动。较低的能源密集型产业技术进步率和能源开采利用程度反映出社会对能源的消费需求减少,使生产部门投入的有效能源小于有效劳动。较少的有效能源投入不仅使生产能源密集型机器设备的中间产品部门更加有利可图,造成能源密集型投入品的数量正向变动,还会使能源密集型投入品的价格变动高于劳动密集型投入品。数量和价格的双重作用使能源密集型产业产值比例呈现上升趋势,产业结构发生调整。技术进步在促进经济持续增长的同时也加剧了污染排放。由于污染排放量直接取决于能源密集型产品数量而非能源消费量,人均污染排放量逐年上升,但并没有与人均能源消费呈现正相关关系。

图 1 还显示,能源密集型产业比例持续增加,在经历了前 80 年的快速变

化后收敛于 0.77 左右,此后基本稳定。人均经济增长率始终为正,在前 50 年内由最初的 2.77% 较快地降至 2.08%,又在此后的 150 年间缓慢升至 2.21%,可见经济增长具有可持续性。同时,人均能源消费变动率始终为负,由最初的一4.45%降至一5.48%。在能源稀缺性约束下,人均能源消费量加速减少。人均污染排放变动率有较大变动,呈现短期下降、中长期上升的特征,由最初的 1.73% 降至 23 年后的 1.63%,又在 200 年后升至 2.19%。

## 2. 参数变动模拟结果比较

(1) 时间贴现率  $\rho$ 。我们设置了  $\rho=0.03$  和  $\rho=0.01$  两个对比组,主要变量变动情况见图 2 第一列。在三组不同的时间贴现率下,  $g_R(\gamma_R + \gamma_L) - \gamma_L + \hat{K}_n - \rho$  都小于 0,所有变量变动率的走势基本不变,但初始值等略有差异。时间贴现率越小,人们对未来经济可持续增长、环境质量的要求越高,放弃当前消费的意愿越强,由此引起:第一,能源消费快速下降,使能源持续使用的时间延长;第二,有效能源投入减少,能源密集型投入品数量增速放缓,有利于缓解污染排放过快增长;第三,能源密集型产品价格快速上涨,使能源密集型产业比例快速提高,产业结构调整速度加快。值得注意的是,能源密集型产品价格变动是产业结构变迁的主要原因。

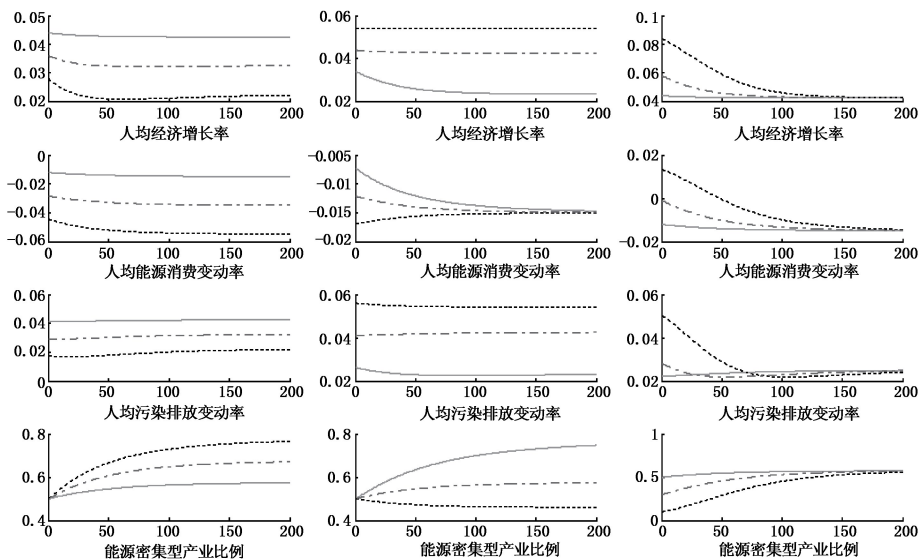


图 2 参数  $\rho$ 、 $\gamma_R$  和  $g_{R0}$  调整后的结果比较<sup>①</sup>

(2) 机器设备研发成功概率  $\gamma_R$  和  $\gamma_L$ 。基础组中  $\gamma_R$  和  $\gamma_L$  相等,这里设置了能源密集型机器设备研发成功概率较小( $\gamma_R=0.05$ )和较大( $\gamma_R=0.15$ )两个对比组,主要变量变动情况见图 2 第二列。第一,当  $\gamma_R=0.05$  且  $\gamma_L=0.1$  时,在能源稀缺性约束下,唯有能源消费量逐年合理下降,才能在能源长期可

用的同时保持经济长期增长。研发成功概率差异引起能源密集型产业技术进步率低于劳动密集型产业,使生产部门投入的有效能源  $A_R R$  小于有效劳动  $A_L L$ 。有效能源投入相对不足不仅提高了能源密集型机器设备的社会需求,使生产这类机器设备的厂商更加有利可图,进而吸引科研人员投身于相关技术研发活动,还会引起能源密集型投入品价格变动高于劳动密集型投入品。数量和价格的正向变动最终使能源密集型产业比例不断提高。第二,当  $\gamma_R = 0.15$  且  $\gamma_L = 0.1$  时,虽然能源消费量在稀缺性约束下持续下降,但由于能源密集型机器设备研发成功概率较高,相关产业技术进步更为突出,使生产部门投入的有效能源大于有效劳动。有效劳动投入相对不足不仅使生产劳动密集型机器设备的厂商更加有利可图,吸引科研人员投身于相关研发活动,还会引起劳动密集型投入品价格变动高于能源密集型投入品。在数量和价格的双重作用下,劳动密集型产业所占份额会提高,进而产业结构发生调整。第三,在三组不同的研发成功概率下,各变量最优变动率的走势不变,但初始值等存在一定差异: $\gamma_R$  越高,能源密集型产业比例负向变动的可能性、人均污染排放变动率和人均经济增长率的初始值越大。

(3)能源密集型产业比例初始值。我们设置了  $g_{R0} = 0.3$  和  $g_{R0} = 0.1$  两个对比组,主要变量变动情况见图 2 第三列。一国初始的能源密集型产业比例越低,发展前半段人均经济增长率越高、人均能源消费下降越慢、人均污染排放变动率越高,这与“追赶效应”类似;在其他参数不变时,能源密集型产业比例呈现上升趋势;从长期看,无论其初始状况如何,竞争性均衡中所有变量的变动率呈现趋同趋势。结果表明:当一国初始的能源密集型产业比例较低时,能源密集型投入品的数量较少、价格较低。此时,投入品数量较少意味着能源密集型技术水平和能源消费量初始值较低,投入品价格较低则意味着能源价格初始值较低。一方面,初始技术落后的国家通过模仿发达国家的先进技术,在未来可获得比发达国家更快的技术进步,实现技术追赶;另一方面,由于能源边际报酬递减,在初始人均能源消费较少的国家,能源消费的少量增加会大大提高生产率、增加经济产出,由此出现能源密集型产业初始比例越低、经济增长越快的情况。

此外,在一定的参数设置下,人均产出与人均污染排放之间呈现倒 U 形或 N 形关系,表明实证研究中可能出现多种 EKC 形式。

## 五、结 论

中国政府高度重视资源节约型、环境友好型社会建设,加快推进科技创新、产业结构升级和生产方式变革,努力实现绿色低碳发展,建设“美丽中国”。本文通过理论分析和数值模拟,考察了能源环境约束下垂直技术进步如何影响一国各宏观经济变量的均衡变动。研究发现:第一,在一定的参数设置下,

能源消费不断下降,污染排放量在长期内缓慢增加,经济持续增长。第二,产业结构变迁与技术进步、能源环境约束密切相关。当产业间技术进步差异不足以弥补能源开采的机会成本时,只能通过提高能源密集型产业比例来促进经济增长;而当产业间技术进步差异可以弥补能源开采的机会成本时,则需要能源开采与能源稀缺性、环境污染外部性之间进行权衡调整,此时可以通过提高劳动密集型产业比例来促进经济增长。第三,在一定的参数设置下,人均产出与人均污染排放之间呈现倒U形或N形关系,这为环境库兹涅茨曲线的存在性提供了一种理论解释。第四,一国初始的产业结构会影响经济变量的长期变化,在一定的参数设置下,经济变量变动率长期趋同。

为了简化分析,本文研究的是封闭经济,假定能源同质,并外生给定初始的产业结构。如果考虑产业结构内生或者能源异质性,则模型会更加复杂,当然也更贴近现实,这为未来的研究提供了方向。

#### 注释:

- ①熊彼特认为技术是升级替代的,即  $A_t = \epsilon A_{t-1}$ , 技术产出服从参数为  $\lambda$  的泊松过程,研发中人力投入为  $s$ , 则技术变动率为  $\dot{A} = (\epsilon - 1)\lambda s A$ 。若  $(\epsilon - 1)\lambda = \gamma_I$ , Acemoglu 等(2012)提出的导向型技术变动即为垂直技术进步。
- ②能源开采收入等于开采收益减去不开采时的机会成本,即  $p_E S / (1 + \mu) - d[p_E S / (1 + \mu)] / dt$ 。
- ③令  $\Delta = [1 - \Omega] / [1 - \Omega + \Omega(1 - g_R)]$ 。
- ④第一列表示  $\rho$  变化,实线表示基础参数即  $\rho = 0.05$ ,点线结合线表示  $\rho = 0.03$ ,点线表示  $\rho = 0.01$ ;第二列表示  $\gamma_R$  变化,点线结合线表示基础参数即  $\gamma_R = 0.1$ ,实线表示  $\gamma_R = 0.05$ ,点线表示  $\gamma_R = 0.15$ ;第三列表示  $g_{R0}$  变化,实线表示基础参数即  $g_{R0} = 0.5$ ,点线结合线表示  $g_{R0} = 0.3$ ,点线表示  $g_{R0} = 0.1$ 。

#### 参考文献:

- [1]姜磊,季民河.基于空间异质性的中国能源消费强度研究——资源禀赋、产业结构、技术进步和市场调节机制的视角[J].产业经济研究,2011,(4):61-70.
- [2]史丹,张金隆.产业结构变动对能源消费的影响[J].经济理论与经济管理,2003,(8):30-32.
- [3]王俊松,贺灿飞.技术进步、结构变动与中国能源利用效率[J].中国人口·资源与环境,2009,(2):157-161.
- [4]余江.资源约束、结构变动与经济增长[M].北京:人民出版社,2008.
- [5]郑丽琳,朱启贵.技术冲击、二氧化碳排放与中国经济波动——基于 DSGE 模型的数值模拟[J].财经研究,2012,(7):37-48.
- [6]Acemoglu D, Aghion P, Bursztyn L, et al. The environment and directed technical change[J].American Economic Review,2012,102(1): 131-166.
- [7]Groth C, Schou P. Growth and non-renewable resources: The different roles of capital and resource taxes[J].Journal of Environmental Economics and Management,2007,53

(1): 80—98.

- [8]Smulders S, de Nooij M. The impact of energy conservation on technology and economic growth[J].Resource and Energy Economics,2003,25(1): 59—79.
- [9]Sinclair P. High does nothing and rising is worse: Carbon taxes should keep declining to cut harmful emissions[J].Manchester School of Economic and Social Studies,1992,60(1): 41—52.
- [10]Wing I S. Representing induced technological change in models for climate policy[J].Energy Economics,2006,28(5—6): 539—562.

## Vertical Technological Progress, Industrial Structure Change and Sustainable Economic Growth under Energy and Environment Constraints

ZHENG Li-lin<sup>1</sup>, ZHU Qi-gui<sup>2</sup>

(1.School of Management Science and Engineering, Anhui University of Finance and Economics, Bengbu 233030, China;2. Antai College of Economics and Management, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** By the construction of a multi-sector endogenous model with energy and environment constraints, this paper first theoretically analyzes the effects of energy-oriented and labor-oriented vertical technological progress on industrial structural change and economic growth and then makes a numerical simulation analysis. It comes to the following conclusions: firstly, sustainable economic growth is closely correlated with industrial structural change, which is directly influenced by the differences in inter-industry vertical technological progress and energy and environment constraints; secondly, under the setting of certain parameters, economic growth is sustainable, and the environmental Kuznets curve is established; the change rates of economic variables converge in the long term.

**Key words:** energy and environment constraint; vertical technological progress; industrial structural change; economic growth

(责任编辑 康健)