
可再生能源、中间产品质量与可持续发展

肖文 唐兆希*

内容提要 本文通过构建一个基于中间产品质量创新的四部门内生增长模型,研究了在可再生能源和技术进步的双重作用下,基于市场主体最优决策的均衡增长路径,较为完整地分析了市场均衡中能源资源、研发创新与经济增长之间的相互作用机理。我们采用多种连续中间产品的产出效率来刻画技术创新,求解并讨论了经济系统的均衡增长路径及其存在条件,运用比较静态和数值模拟方法分析了各类参数的长期产出增长效应和能源消耗增长效应。最后得出结论并提出了相关的政策建议和进一步研究的方向。

关键词 可再生能源 中间产品 内生增长 市场均衡

一 引言

经济在有限能源资源和持续技术进步的双重作用下能否维持无限期的连续增长,或者说经济发展的可持续性问题,是宏观经济学和资源能源经济学中最为引人关注的研究领域之一。假如经济长期增长是可能的,那么紧接着的问题是,市场主体各自最优化的分散决策将如何影响经济增长的动态均衡,技术进步和能源可再生性在长期均衡增长中扮演什么样的角色,以及各经济变量具有怎样的特性和关联。

从20世纪70年代开始,主流经济学家在新古典增长理论的基础上增加资源约

* 肖文、唐兆希:浙江大学经济学院 浙江省杭州市玉古路浙江大学玉泉校区经济学院 310027 电子邮箱: xiao_w80@hotmail.com(肖文) zxtang@zju.edu.cn(唐兆希)。

本文系国家自然科学基金重大项目“深入贯彻落实科学发展观加快发展方式转变”(10ZD&003)及宁波市科技计划项目“科技进步推动宁波经济转型升级的对策研究”(2010A10025)的部分研究成果。

束,对经济的长期增长路径进行研究。在此之前的新古典增长理论,包括标准的 Solow 模型、Ramsey 模型和 Diamond 模型,并不重视自然资源的影响。可耗竭能源的新古典增长理论出现的现实背景是 1973 ~ 1974 年席卷全球的石油危机,它使得经济学家重新思考是否需要把石油一类的不可再生能源,作为独特的投入要素来重估经济增长的可持续性。这方面最重要的研究有 Dasgupta 和 Heal(1974)、Solow(1974a、b)、Stiglitz(1974)及 Dasgupta 和 Heal(1979),而在此基础上发展的 DHSS 模型(Dasgupta - Heal - Solow - Stiglitz model)就是基于资源约束的新古典增长理论的标准分析框架。DHSS 模型的主要结论是如果技术持续进步,即使资源存量有限,人均产出和消费在长期内仍可能增长,即经济可持续增长是可以在技术进步的条件下实现的。

自上世纪 80 年代中期以后,新古典增长模型的技术外生假定招致内生增长理论的挑战。Lucas(1988)和 Romer(1990)分别从人力资本积累和研发部门投入两个最重要的技术内生机制,分析了技术进步对经济长期均衡增长率的作用。此后的大量文献均沿用他们的研究范式来研究内生经济增长,但大部分文献都没有考虑自然资源特别是能源对长期经济增长的影响,而其中涉及能源资源可再生性的研究就更少。诚然,能源资源特别是化石能源的矿产储量似乎具有不可逆转的可耗竭性,但这只是视角问题。其关键在于,技术进步使得能源和其他生产要素之间,以及不可再生和可再生能源之间的替代在多大程度上是完全和有效的。从这些角度看,能源资源的可再生性是普遍的。^①所以把能源资源的可再生性作为能源要素的一般形式写入增长模型或许是合理的,而在理论分析中,不可再生性可以被视为一种特例。考虑到既要能够刻画出能源可再生性的基本特征和综合效应,又要兼顾内生增长模型的简洁可解,本文在基本模型中仅以存量线性动态(linear stock dynamics)的形式来表述这种普遍特性。^②

在处理技术进步的具体方法中,Romer(1990)将中间产品的垄断市场结构引入到一个三部门的增长模型,文中对技术进步的刻画实际上是指通过有目的的研发投入来获得中间产品种类的扩大,即所谓水平创新。而与此相对,技术进步也可以表示为生产能力或产品质量的提升,Grossman 和 Helpman(1991a、b)以及 Aghion 和 Howitt(1992)建立了产品质量阶梯模型,即所谓以垂直创新来描述的技术进步。Aghion 和

^① 这也是上世纪中后期西方主流经济学家与生态学家、环境主义者以及热力学派经济学家论战的焦点之一。新古典经济学理论家,比如 Solow 和 Dasgupta,十分强调资源、物质资本与人力资本之间的替代作用;后来的内生增长理论经济学家也均强调无限增长中技术进步的关键作用。

^② 能源资源的存量效应是比较强的假设,《自然资源与能源经济学手册》第 3 卷的第 17、18 章中,Sweeney(2006)和 Heal(2006)对不存在存量效应和存在存量效应的两类最优化模型做了较为深入的讨论,读者可以参考。

Howitt(1992)的模型强调了高质量产品将完全替代旧产品的“创造破坏”的新熊彼得思想。^① Jones 和 Manuelli(1997)、Aghion 和 Howitt(1998)、Scholz 和 Ziemes(1999)、Schou(2000、2002)及 Grimaud 和 Rouge(2003)等均基于多部门和复杂动力系统,构建纳入可耗竭自然资源或能源要素的更一般化的内生增长模型。在假设最终产品生产函数包含技术存量、资本、劳动和能源四种要素的多部门增长文献中, Scholz 和 Ziemes(1999)与 Schou(2002)均借鉴了 Romer(1990)的方法,以中间产品多样化即水平创新来刻画技术进步,而 Aghion 和 Howitt(1998)与 Grimaud 和 Rouge(2003)是以垂直创新来描述。两类技术进步的刻画方法都可通过各局部市场的均衡条件,将最终产品生产函数转化为以产品种类数或质量水平为变量的标准形式。

已有文献中,将能源再生、中间产品、技术研发、质量进步及市场均衡纳入统一分析框架的内生增长模型很少。Grimaud 和 Rouge(2003)构建了包含不可再生能源约束的内生增长模型,并在中间产品的生产中考虑了熊彼得创新,但是此模型只考虑一种中间产品的情况,而在文章最后,也指出将中间产品的数目扩大到 N 种,可以是模型扩展的一个主要方向。本文的目的是试图通过建立一个基于多种连续中间产品质量创新的分析框架,来研究在可再生能源和技术持续进步条件下市场主体的分散决策,是否能够使整体经济处于长期均衡增长路径。本文第二部分是基本模型的介绍;第三部分是市场均衡增长路径及其存在条件的求解和讨论;第四部分是经济均衡增长路径的比较静态分析和数值模拟;最后是结论和政策建议。

二 基本模型

本文借鉴了 Romer(1990)内生增长模型的基本分析方法,把能源资源要素纳入最终产品部门的总量生产函数,来考察一个具有最终产品部门、中间产品部门、技术研发部门和能源生产部门的四部门经济系统。假设经济系统按如下机制运行:研发部门通过人力资本结合已有的技术知识存量进行研发(R&D),并将研发成果转让给中间产品生产部门;中间产品部门结合技术知识和物质资本生产出具有更高质量的中间产品,然后将中间产品出售给下游的最终产品生产部门;最终产品部门使用购买的中间产品,结合能源生产部门提供的能源产品与一定量的人力资本生产出最终产品。

对于技术进步的刻画,本文沿用 Aghion 和 Howitt(1992)中“创造破坏”(creative

^① 这两种对技术进步的刻画都借鉴 Spence(1976)特别是 Dixit 和 Stiglitz(1977)中介绍的 Dixit - Stiglitz(D-S)函数形式,并将中间产品纳入分析框架,Barro 和 Sala-i-Martin(1995)对此作了较为详尽的阐述。

destruction) 的新熊彼得思想,将中间产品质量内生化。在能源生产部门考虑能源的综合再生能力,将能源再生率以线性形式写入资源积累方程,使模型更一般化。

(一) 生产技术

我们将能源作为生产要素纳入最终产品部门生产函数,连续形式的中间产品种类标准化为 1,则扩展模型最终产品部门产出的 D-S 形式为:

$$Y_t = H_{Y_t}^{\alpha_1} \left[\int_0^1 Q_t(i) x_t(i)^{\alpha_2} di \right] E_t^{\alpha_3}, \quad \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1 \quad (1)$$

模型中 Y_t 为 t 时期的最终产品的总产出, H_{Y_t} 为该部门投入的人力资本数量, $Q_t(i)$ 为第 i 种中间产品的产出效率,也可以被认为是第 i 种中间产品的质量, E_t 为投入的能源产品, α_1 、 α_2 、 α_3 均非负,分别为人力资本、中间产品和能源产品的产出弹性, $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ 表示最终产品部门具有不变的规模报酬。

在中间产品生产部门,假设各种中间产品的生产相互独立并且保持不变的规模报酬。中间产品的产出 $x_t(i)$ 与 $K_t(i)$ 对应,并且假设在生产相同数量的中间产品时,体现技术进步的高质量中间产品的生产需要更多的实物资本积累。类似于 Romer (1990) 中一单位中间产品生产恰好对应于一单位资本的假设,我们进一步假定在中间产品生产中,每单位质量加权后的中间产品数量恰好一一对应于所需的资本量,即 $x_t(i) = K_t(i) / Q_t(i)$ 。所以经济中实物资本可写为:

$$K_t = \int_0^1 Q_t(i) x_t(i) di \quad (2)$$

经济中实物资本积累方程为: $\dot{K}_t = Y_t - C_t$ (3)

假设研发部门的技术产出服从参数为 λ 的泊松过程(Poisson process),即投入 H_{Q_t} 数量的人力资本到研发部门,在 Δt 时间内技术产出的发生概率为 $\lambda H_{Q_t} \Delta t$ 。现在假设每次技术创新对原有技术完全替代,即具有所谓的创造破坏性质,并且假设技术水平的增量为 η ,即满足 $Q_{t+\Delta t} = (1 + \eta) Q_t$ 。则技术水平的动态微分方程为:

$$\dot{Q}_t = \lambda \eta H_{Q_t} Q_t \quad (4) \textcircled{1}$$

上式表明技术研发部门的技术产出取决于该部门投入的人力资本、已有的技术知识存量和创新过程的泊松参数。

① 假设在任意 Δt 这段时间内,技术创新发生的概率为 $\lambda H_{Q_t} \Delta t$,则技术创新不发生的概率为 $1 - \lambda H_{Q_t} \Delta t$ 。那么在 Δt 时段末技术水平的数学期望为: $E(Q_{t+\Delta t}) = \lambda H_{Q_t} \Delta t (1 + \eta) Q_t + (1 - \lambda H_{Q_t} \Delta t) Q_t = Q_t + \lambda \eta H_{Q_t} \Delta t Q_t$ 。令 Δt 趋近 0,则可得: $\dot{Q}_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{E(Q_{t+\Delta t}) - Q_t}{\Delta t} = \lambda \eta H_{Q_t} Q_t$ 。

在能源生产部门,我们将能源资源的综合再生率引入积累方程,以线性形式简单刻画可再生能源的储量效应(store effects)。假设 S_t 表示资源存量, E_t 表示资源开采量,数量上等于全社会能源产品的投入。 ν_t 表示能源资源的综合再生率,不计资源开采成本,则能源资源的存量方程为:

$$\dot{S}_t = \nu_t S_t - E_t, \quad E_t > 0 \quad (5)$$

(5) 式表明能源资源存量与资源再生数量和开采使用数量相关。 ν_t 可以视为能源储量的综合再生能力。实际中,勘探开采的效率提升和成本下降,不可再生能源资源的深度开采利用、不可再生能源和可再生能源比重的变化、能源和其他生产要素之间以及不同能源之间的替代等,都可以认为是提升能源综合再生能力的有效途径。

(二) 消费者效用

假设社会代表性家庭的效用可用 CCRA 函数表述,即瞬时效用只与消费数量 C 和长期中不变的相对风险厌恶系数 θ 有关: $U(C_t) = (C_t^{1-\theta} - 1) / (1 - \theta)$, 则在无限时间上的 CCRA 函数为:

$$U = \int_0^{\infty} \frac{C_t^{1-\theta} - 1}{1 - \theta} e^{-\rho t} dt \quad (6)$$

(6) 式中 θ 为边际效用弹性的绝对值,也就是不变的跨期替代弹性(CIES)的倒数。直观上 θ 表示代表性家庭对消费在不同时期之间转移的意愿,即平滑消费的偏好程度。 $\rho > 0$ 是代表性家庭的主观时间偏好率。

三 市场均衡增长路径

我们接下来在上述模型基础上分析市场均衡增长路径,即讨论在市场经济中,各微观主体自身效用或利润最大化的决策,如何使整体经济处在长期增长的动态均衡状态。假设经济中的人力资本总量 H 固定,人力资本可以在最终产品部门生产最终产品,也可以在研发部门生产技术; W_Y 和 W_Q 分别表示最终产品部门和研发部门需要支付的人力资本工资。我们假设人力资本市场为完全竞争市场,人员可以无成本的自由流动,所以可得 W_Y 和 W_Q 均等于 W 。其他价格变量作如下假设: P_x 、 P_Q 和 P_E 分别表示中间产品价格、研发成果价格和能源资源价格, r 为市场利率,最终产品 Y 的价格标准化为 1。下文中为了书写简洁,如果表达清楚则省去变量的时间下标。

(一) 最终产品部门

最终产品部门的利润函数可写为:

$$\pi_Y = H_Y^{\alpha_1} \left[\int_0^1 Q(i) x(i)^{\alpha_2} di \right] E^{\alpha_3} - W_Y H_Y - P_E E - \int_0^1 P_x x(i) di \quad (7)$$

故最终产品部门代表性厂商的利润最大化决策为:

$$\max_{H_Y, X(i), E} H_Y^{\alpha_1} \left[\int_0^1 Q(i) x(i)^{\alpha_2} di \right] E^{\alpha_3} - W_Y H_Y - P_E E - \int_0^1 P_{x_i} x(i) di \quad (8)$$

一阶条件分别解得: ① $W = W_Y = \alpha_1 Y / H_Y$ (9)

$$P_E = \alpha_3 Y / E \quad (10)$$

$$P_{x_i} = \alpha_2 H_Y^{\alpha_1} Q(i) x(i)^{\alpha_2-1} E^{\alpha_3} \quad (11)$$

(二) 中间产品部门

根据基本模型假设, 各种中间产品 $x_i(i)$ 与 $K_i(i)$ 一一对应, 并且高质量中间产品的生产对应更多的实物资本, 即 $x_i(i) = K_i(i) / Q_i(i)$, 又已假设 r 为市场利率, 则各中间产品部门代表性厂商的利润最大化决策为:

$$\max_{x(i)} \pi_{x(i)} = P_{x_i} x(i) - Q(i) x(i) r \quad (12)$$

将(11)代入上式, 一阶条件解得对于任意 i 均有:

$$P_{x_i} = Q(i) r / \alpha_2 \quad (13)$$

联立(11)、(13)式消去 P_{x_i} 有: $x(i) = \left(\frac{\alpha_2^2 H_Y^{\alpha_1} E^{\alpha_3}}{r} \right)^{\frac{1}{1-\alpha_2}}$ (14)

从上式可知市场主体最优决策约束使得每种中间产品的数量相等, 故设:

$$x(i) = x = K / Q$$

上式中实物资本 $K = \int_0^1 Q(i) X(i) di$, $Q = \int_0^1 Q(i) di$ 可理解为中间产品的平均质量。故(1)式中最终产品部门的产出又可写为:

$$Y_t = H_Y^{\alpha_1} x^{\alpha_2} \int_0^1 Q_i(i) di E_t^{\alpha_3} = H_Y^{\alpha_1} Q^{1-\alpha_2} K^{\alpha_2} E^{\alpha_3} \quad (15)$$

(三) 研发部门

研发部门的利润函数为: $\pi_{R\&D} = P_Q \dot{Q} - W_Q H_Q = P_Q \lambda \eta H_Q Q - W_Q H_Q$ (16)

故研发部门利润最大化决策为: $\max_{H_Q} \pi_{R\&D} = P_Q \lambda \eta H_Q Q - W_Q H_Q$ (17)

一阶条件解得: $W = W_Q = P_Q \lambda \eta Q$ (18)

(四) 能源生产部门

不考虑开采成本, 完全竞争能源市场上的能源生产部门最优决策为:

$$\max_{E_t} \pi_E = \int_t^\infty P_E E_\tau e^{-\int_t^\tau r^u du} d\tau \quad (19)$$

① (8) 式中的积分形式可以看作 n 种连续中间产品质量加权后投入加总的简略形式, 对具体的任意 $x(i)$ 的一阶条件可解得(11)式。

$$\text{s. t.} \quad \dot{S} = \nu S - E, \quad S, E \geq 0, \quad \tau \geq t$$

可以写出式的最优控制现值 Hamilton 函数,其中 E 为控制变量, S 为状态变量, 联立其一阶条件可得:

$$g_{PE} = r - \nu \quad (20)$$

(20) 式可以看作霍特林准则(Hotelling Rule) (Hotelling, 1931) 的一个推广,说明能源价格的增长率与市场利率和能源再生率相关。

(五) 代表性家庭

在标准的拉姆齐模型(Ramsey model)中,如果效用函数采用上文提到的 CCRA 函数形式,则代表性家庭的效用最大化决策满足:

$$g_C = \frac{r - \rho}{\theta} \quad (21)$$

即消费的增长率与市场利率、消费者主观时间偏好率和跨期替代弹性相关。^①

命题 1 市场中的各决策主体(企业或家庭)作各自最优决策,均衡增长路径上各经济变量的增长率为:

$$g_Y^* = g_C^* = \frac{(\alpha_1 + \alpha_3) \lambda \eta H_Q^* + \alpha_3 \nu - \alpha_3 \rho}{\alpha_1 + \alpha_3 \theta} \quad (22)$$

$$g_Q^* = \lambda \eta H_Q^* \quad (23)$$

$$g_S^* = g_E^* = \frac{(\alpha_1 + \alpha_3) (\lambda \eta H_Q^* (1 - \theta) + \nu - \rho)}{\alpha_1 + \alpha_3 \theta} \quad (24)$$

$$\text{其中, } H_Q^* = \frac{(\alpha_1 + \alpha_3) (\alpha_1 + \alpha_3 \theta) \alpha_2 \lambda \eta H - \alpha_1 [(\alpha_1 + \alpha_3) \rho + (\theta - 1) \alpha_3 \nu]}{\lambda \eta \{ (\alpha_1 + \alpha_3) (\alpha_1 + \alpha_3 \theta) \alpha_2 + \alpha_1 [(\alpha_1 + \alpha_3) \theta + (\theta - 1) \alpha_3] \}} \quad (25)$$

证明:根据(4)式易知(23)式成立,现在首先计算(22)、(24)式,即将均衡路径上的最终产品或消费的增长率以及能源资源存量或消费量的增长率表示为研发部门人力资本数量 H_Q^* 的函数,然后求出 H_Q^* 代入上述各式得出结果。

由于经济处于平衡增长路径,根据产出、消费和投资的关系, Y 、 C 和 K 具有同一不变的增长速率。同理, S 和 E 也有相同的增长率。因为平衡增长路径上中间产品质量的增长率为常数,所以 H_Y 和 H_Q 的增长率均为常数。

对(15)式两侧对数求导,并考虑处于平衡增长路径,可得:

$$(1 - \alpha_2) g_Y^* = (1 - \alpha_2) g_C^* + \alpha_3 g_E^* \quad (26)$$

$$\text{与(4)式及(21)式联立可得:} \quad \frac{r - \rho}{\theta} = \lambda \eta H_Q^* + \frac{\alpha_3 g_E^*}{\alpha_1 + \alpha_3} \quad (27)$$

$$\text{对(10)式两侧对数求导有:} \quad g_{PE}^* = g_Y^* - g_E^* \quad (28)$$

^① Barro 和 Sala-i-Martin(1995)的第二部分对此作了推导和阐述,并给出了相应的横截面条件。

代入(20)、(21)式,考虑均衡条件可得:

$$r^* - \nu = \frac{r^* - \rho}{\theta} - g_E^* \quad (29)$$

联立(27)、(29)式消去 g_E^* ,解得平衡增长路径上的市场利率:

$$r^* = \frac{(\alpha_1 + \alpha_3) \theta \lambda \eta H_Q^* + \alpha_1 \rho + \alpha_3 \theta \nu}{\alpha_1 + \alpha_3 \theta} \quad (30)$$

故依次解得以下两式:

$$g_Y^* = \frac{r^* - \rho}{\theta} = \frac{(\alpha_1 + \alpha_3) \lambda \eta H_Q^* + \alpha_3 \nu - \alpha_3 \rho}{\alpha_1 + \alpha_3 \theta}$$

$$g_E^* = g_Y^* - g_{P_E}^* = g_Y^* - (r^* - \nu) = \frac{(\alpha_1 + \alpha_3) (\lambda \eta H_Q^* (1 - \theta) + \nu - \rho)}{\alpha_1 + \alpha_3 \theta}$$

(22)、(24)式得证。

下面求解投入到研发部门的人力资本数量 H_Q^* 。按照 Romer(1990)的思路,在市场均衡条件下,中间产品部门获得研发成果的成本应该等于它的垄断利润的贴现值,即垄断的中间产品部门对技术创新成果的需求取决于其对企业未来净收益的折现流与当下购买或投资于技术创新的收益之比较。因为假设研发市场是完全竞争的,所以研发成果的价格将达到中间产品部门能够出的最高价。^①

$$\int_t^\infty \pi_x(\tau) e^{-\int_t^\tau r_u du} d\tau = P_Q Q \quad (31)$$

根据(21)式拉姆齐模型的基本结论,可知平衡增长路径的市场利率 r 为常数,上式两侧对时间求导可解得:

$$\pi_x = (r^* - g_{P_Q}) P_Q Q \quad (32)$$

下面先求 π_x 。由(12)式中的中间产品部门利润函数和(13)式联立有:

$$\pi_{x(i)} = P_{x_i} x(i) - Q(i) x(i) r = (1 - \alpha_2) P_{x_i} x(i)$$

故解得:

$$\pi_x = \int_0^1 (1 - \alpha_2) P_{x_i} x(i) di = (1 - \alpha_2) \alpha_2 Y \quad (33)$$

现计算(32)式右侧各变量,联立(9)、(18)式可得:

$$P_Q Q = \alpha_1 Y / \lambda \eta H_Y \quad (34)$$

由(9)式易知在平衡增长路径最终产出 Y 和人力资本工资 W 具有相同的增长率,再结合(18)式两侧对数求导结果,可得:

$$g_{P_Q}^* = g_Y^* - g_Q^* \quad (35)$$

^① 这是 Romer(1990)中最重要的思想之一,即对于技术成果这种兼具非竞争性和排他性(专利)的特殊产品,垄断利润存在的合理之处在于,它可以被看做企业购买技术或者投入研发的成本支出的来源,其中跨期零利润约束的具体形式借鉴于 Grossman 和 Helpman(1989)。

将(33)式代入(32)式左侧,将(22)、(23)、(30)式解得的 g_Y^* 、 g_Q^* 和 r^* 以及(34)、(35)式代入(32)式右侧,可解出(25)式,命题得证。

需要指出的是,以上命题市场均衡的获得还需满足内点解假设。这个假设意味着:在经济中人力资本必须在最终产品部门和研发部门分配,而不是全部集中在某一部门,即满足 $0 < H_Q^* < H$ 。显而易见,满足该条件也即满足 $0 < H_Y^* < H$ 。

当 $H_Q^* < H$ 据(25)式易知需要满足条件:

$$- [(\alpha_1 + \alpha_3)\rho + (\theta - 1)\alpha_3\nu] < \lambda\eta H [(\alpha_1 + \alpha_3)\theta + (\theta - 1)\alpha_3] \quad (36)$$

下面据(25)式分两种情形讨论 $H_Q^* > 0$ 。

$$\text{情形 1: } (\alpha_1 + \alpha_3)(\alpha_1 + \alpha_3\theta)\alpha_2\lambda\eta H > \alpha_1 [(\alpha_1 + \alpha_3)\rho + (\theta - 1)\alpha_3\nu] \quad (37)$$

$$(\alpha_1 + \alpha_3)(\alpha_1 + \alpha_3\theta)\alpha_2 > -\alpha_1 [(\alpha_1 + \alpha_3)\theta + (\theta - 1)\alpha_3] \quad (38)$$

因为(36)、(37)式联立可推出(38)式,同理(36)、(38)式联立也推出(37)式,故(36)、(37)式或(36)、(38)式联立均可作为市场均衡的内点解条件。

$$\text{情形 2: } (\alpha_1 + \alpha_3)(\alpha_1 + \alpha_3\theta)\alpha_2\lambda\eta H < \alpha_1 [(\alpha_1 + \alpha_3)\rho + (\theta - 1)\alpha_3\nu] \quad (39)$$

$$(\alpha_1 + \alpha_3)(\alpha_1 + \alpha_3\theta)\alpha_2 < -\alpha_1 [(\alpha_1 + \alpha_3)\theta + (\theta - 1)\alpha_3] \quad (40)$$

(36)、(40)式联立可推出(39)式,故该两式联立可作为市场均衡的内点解条件。

综上两情形可知,(36)式即为市场均衡的内点解条件。^①化简得到以下命题:

$$\text{命题 2: 如果满足 } [1 + \frac{(\theta - 1)(1 + \nu)}{\lambda\eta H\theta + \rho}] \frac{\alpha_3}{\alpha_1} + 1 > 0 \text{, 则 } 0 < H_Q^* < H \text{ 和 } 0 < H_Y^* < H$$

同时成立,经济系统存在内点解均衡。

下面对平衡增长路径上的各变量增长率作简单的讨论。一方面,平衡增长路径上的产出增长率由技术进步率和能源消费增长率共同决定,(26)式阐明了这一点。这里有三点需要说明:一是在模型中技术进步率和能源消费增长率可看作产出取得持续增长的决定性因素,而共同决定的含义是如果技术和能源之间的相互要素替代是有效的,即可以不管两者此消彼长,总效应决定了均衡产出增长率的大小和方向。二是平衡增长路径的技术进步率和能源消费增长率对产出增长率的贡献程度受到要素投入份额或要素投入弹性的影响。比如在模型中,能源消费增长率对产出增长率的作用程度还取决于其投入份额在其与最终产品部门人力资本共同要素份额中的比重,而对于技术进步率,则1个百分点的增长率就是1个百分点的最终产出增长。三是如果提高

^① (36)式实际已隐含 $(\alpha_1 + \alpha_3)(\alpha_1 + \alpha_3\theta)\alpha_2 \neq -\alpha_1 [(\alpha_1 + \alpha_3)\theta + (\theta - 1)\alpha_3]$ 条件,若上式等号成立,则可推出 $H_Q^* = H$,与假设矛盾。

相等幅度的最终均衡产出增长率,通过提高技术进步率的途径要比提高能源消费增长率更加有效。其现实的政策含义是,通过科技进步带动的集约型经济增长方式要比纯粹依靠能源资源消耗的粗放型增长方式更有效率。

另一方面,(22)式实际上意味着市场均衡产出增长率或消费增长率的符号由中间产品质量增长率、能源再生率和消费者主观时间偏好率共同决定,前两者对市场均衡产出增长率有正向影响,后者有负向影响。故只要经济中研发部门投入和能源再生率的增长效应大于消费者的就近时间消费偏好,则经济能够保持可持续增长。与(22)式类似,(24)式表明了市场均衡能源消费增长率或储量增长率的符号,由中间产品质量增长率、能源再生率和消费者的边际效用弹性和主观时间偏好率共同决定。两者的不同之处在于:对于均衡产出增长率,边际效用弹性只影响增长率数值大小而不决定符号,即不影响经济增长的方向。对于均衡能源消费增长率,边际效用弹性不仅影响程度大小,而且和其他三因素共同决定增长的正负方向。总体上,(22)和(24)式说明了技术创新和能源再生对于经济长期增长和能源持续供给的关键作用。

四 比较静态分析与数值模拟

(一) 比较静态分析

现在讨论均衡增长路径时,模型中各参数的变化对经济系统的重要变量和均衡增长率的影响。

将(25)式代入(22)式可得:

$$g_Y^* = g_C^* = \frac{(\alpha_1 + \alpha_3) \{ (\alpha_1 + \alpha_3) (\alpha_1 + \alpha_3 \theta) \alpha_2 \lambda \eta H - \alpha_1 [(\alpha_1 + \alpha_3) \rho + (\theta - 1) \alpha_3 \nu] \}}{(\alpha_1 + \alpha_3 \theta) \{ (\alpha_1 + \alpha_3) (\alpha_1 + \alpha_3 \theta) \alpha_2 + \alpha_1 [(\alpha_1 + \alpha_3) \theta + (\theta - 1) \alpha_3] \}} + \frac{\alpha_3 (\nu - \rho)}{(\alpha_1 + \alpha_3 \theta)} \quad (41)$$

基于(41)式求 g_Y^* 对各参数的偏导数,并假设系统均衡满足上文分析内点解时 $H_Q^* > 0$ 的第1种情形,即(36)、(38)式同时成立,如果 $\theta < 1$ 则有:

$$\frac{\partial g_Y^*}{\partial \rho} = \frac{-\alpha_1 (\alpha_1 + \alpha_3)^2 \rho}{(\alpha_1 + \alpha_3 \theta) \{ (\alpha_1 + \alpha_3) (\alpha_1 + \alpha_3 \theta) \alpha_2 + \alpha_1 [(\alpha_1 + \alpha_3) \theta + (\theta - 1) \alpha_3] \}} - \frac{\alpha_3}{(\alpha_1 + \alpha_3 \theta)} < 0,$$

$$\frac{\partial g_Y^*}{\partial H} = \frac{(\alpha_1 + \alpha_3)^2 (\alpha_1 + \alpha_3 \theta) \alpha_2 \lambda \eta}{(\alpha_1 + \alpha_3 \theta) \{ (\alpha_1 + \alpha_3) (\alpha_1 + \alpha_3 \theta) \alpha_2 + \alpha_1 [(\alpha_1 + \alpha_3) \theta + (\theta - 1) \alpha_3] \}} > 0,$$

$$\frac{\partial g_Y^*}{\partial \eta} = \frac{(\alpha_1 + \alpha_3)^2 (\alpha_1 + \alpha_3 \theta) \alpha_2 \lambda H}{(\alpha_1 + \alpha_3 \theta) \{ (\alpha_1 + \alpha_3) (\alpha_1 + \alpha_3 \theta) \alpha_2 + \alpha_1 [(\alpha_1 + \alpha_3) \theta + (\theta - 1) \alpha_3] \}} > 0,$$

$$\frac{\partial g_Y^*}{\partial \nu} = \frac{\alpha_1 \alpha_3 (1-\theta) \nu}{(\alpha_1 + \alpha_3 \theta) \{ (\alpha_1 + \alpha_3) (\alpha_1 + \alpha_3 \theta) \alpha_2 + \alpha_1 [(\alpha_1 + \alpha_3) \theta + (\theta - 1) \alpha_3] \}} + \frac{\alpha_3}{(\alpha_1 + \alpha_3 \theta)} > 0.$$

同理,分别将(25)式代入(23)、(24)和(30)式可得 g_Q^* 、 g_E^* 、 r^* 的表达式,对各参数分别求偏导数并根据假设条件判断符号,结果经整理总结在表1。

命题3 经济中消费者的主观时间偏好率 ρ 是均衡产出增长率和消费增长率的减函数;当边际效用弹性系数 $\theta < 1$ 时,均衡能源消费增长率是 ρ 的减函数。

命题3 可以视为经济中代表性家庭主观偏好的长期增长效应。 ρ 的增加意味着代表性家庭更偏好于近期消费,即从当下消费中获得的效用大于未来消费的效用,故消费者没有意愿作更多的当期投资,去获得将来更多的消费。这样,代表性家庭减少储蓄的个体理性决策将使资本市场的供需平衡发生变化,市场利率将提高。根据能源部门最优化决策解的表达式(霍特林准则的推广),能源价格均衡增长率会随着市场均衡利率升高而提高,这将使均衡能源消费增长率有下降的趋势。

根据拉姆齐模型的市场均衡解,均衡产出增长率的符号由均衡市场利率和主观时间偏好率之差决定。在上述均衡增长路径上,虽然 ρ 和 r^* 同方向变动,但经济扰动的传导路径是主观时间偏好率的提高首先引起储蓄率的变化,由此导致的资本市场供求变化促使市场利率升高。所以在此机制里主观时间偏好率是主因。对均衡产出增长率的作用效应是时间偏好率大于市场利率,故均衡产出增长率将减小,即均衡产出增长率是 ρ 的减函数。

再看研发部门,根据 Romer(1990) 中间产品部门最优化决策的跨期利润约束方程可知,因为中间产品部门购买研发成果的收益等于它未来垄断利润的市场利率贴现值,故市场利率的升高即提高了中间产品部门获取当下创新技术的成本;这样,市场利率升高将使研发部

门减少投入研发的人力资本数量,均衡技术进步率将下降。可见在上述条件下,代表性家庭主观时间偏好率的增加将改变市场主体的决策,并通过市场机制使社会人力资本更多地从研发部门转向最终产品部门。

表1 经济系统市场最优均衡的比较静态分析结果

	$\zeta = \rho$	$\zeta = H$	$\zeta = \eta$	$\zeta = \nu$
$\frac{\partial H_Q^*}{\partial \zeta}$	< 0	> 0	> 0	< 0 如果 $\theta > 1$
$\frac{\partial r^*}{\partial \zeta}$	> 0 如果 $\theta > 1$	> 0	> 0	> 0 如果 $\theta < 1$
$\frac{\partial g_Y^*}{\partial \zeta}$	< 0	> 0	> 0	> 0 如果 $\theta < 1$
$\frac{\partial g_Q^*}{\partial \zeta}$	< 0	> 0	> 0	< 0 如果 $\theta > 1$
$\frac{\partial g_E^*}{\partial \zeta}$	< 0 如果 $\theta < 1$	< 0 如果 $\theta > 1$	< 0 如果 $\theta > 1$	> 0

命题4 提升研发部门创新的技术水平增量 η (或研发泊松过程 λ 参数) 以及增加社会人力资本总量 H 均可提高研发产出(中间产品质量)和最终产品产出的均衡增长率;当 $\theta > 1$ 时,提升 η 和增加 H 均将降低能源均衡增长率。

表1的第2、3列阐述了这一性质。首先, η 和 λ 具有类似的增长效应,所以可以考察其中之一或把 $\lambda\eta$ 看作一整体,来分析研发效率对长期均衡增长率的影响。研发部门效率的提升,意味着人力资本在该部门投入会比在其他部门具有更高的收益,所以研发部门将加大人力资本投入来提高技术产品增长率 g_Q^* ,而根据(22)式,经济中最终产品生产部门的均衡产出增长率 g_Y^* 也将提高。

其次,根据拉姆齐模型结论可知, g_Y^* 和 r^* 有相同的变动方向,所以市场利率也会上升。据命题3的分析可知市场利率升高使研发部门有降薪减员的动机,故均衡的技术进步率和产出增长率似乎有下降的趋势。但是上述扰动的主导因素是研发部门创新效率的提高,因为首先是创新效率的提升使得研发部门试图通过研发成果获利从而雇佣更多的人力资本,而经济中的人力资本就会被更多地配置到更具有效率和更具产出潜能的研发部门,结果是提高了研发成果和最终产品的产出增长率。而在此过程中,根据基本模型中高质量中间产品的生产对应更多实物资本的假设,中间产品部门也将有更大的资本需求,这将导致市场利率的上升趋势,但在此机制中总体上前者是主因。

此外,假设社会人力资本 H 的增加同比例地提高各部门使用的人力资本数目,将相应提高研发成果和最终产品的产出增长率,其增长效应类似于 η 或 λ 通过提高技术产出对均衡产出增长率产生的作用。再看能源消费均衡增长率,类似于对命题3的分析,根据霍特林准则,随市场均衡利率升高的能源价格均衡增长率,将使均衡能源消费增长率具有下降趋势。

命题5 在均衡增长路径上,能源消费和存量增长率是能源再生率 ν 的增函数;当 $\theta < 1$ 时,提升 ν 将增加最终产品产出和消费的均衡增长率;当 $\theta > 1$ 时,提升 ν 将增加研发部门的技术效率和技术产品产出的均衡增长率。

首先在直观上,能源再生率增加能够使能源储量上升,故在均衡路径上,能源再生率是能源存量增长率进而是能源消费增长率的增函数。据上文可知均衡能源消费或存量增长率等于人力资本工资与能源价格的增长率之差,故能源再生率提升导致的能源价格相对下降,使均衡能源消费增长率增加。

根据能源部门最优化决策解的表达式(霍特林准则的推广),均衡市场利率为能源再生率与能源价格均衡增长率之和。类似于命题3和命题4中的分析方法,在以上机制中能源再生率的提高是主导因素,故市场均衡利率会随着能源再生率的升高而上

升,从而根据拉姆齐模型的结论,最终产品产出和消费的均衡增长率有上升趋势。同样,类似命题3和命题4中的分析结论,在上述均衡条件下能源再生率引起的市场利率上升将导致研发部门投入和技术进步率下降。

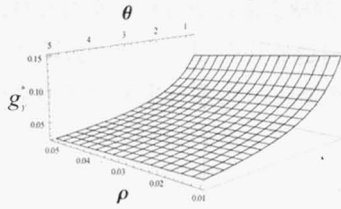
(二) 数值模拟

为使结果更为直观,下面选取参数的经验值做市场均衡的数值模拟。假定在初始的最终部门生产中,人力资本、中间产品、能源资源投入的份额分别为40%、40%、20%,主观时间偏好率 ρ 为0.02,相对风险厌恶系数 θ 为2,社会人力资本数量 H 标准化为1,研发部门效率参数 $\lambda\eta$ 为0.2,能源再生率 ν 为0.05,模拟结果如表2所示。由表2可知:其一,在较高能源再生率($\nu = 0.05$)和较低主观时间偏好率($\rho = 0.02$)的经济中,经济都能保持正增长,且经济增长率高于能源消费的增长率,经济呈现可持续发展的态势。其二,各种生产要素的产出份额配置对长期增长有影响,比如中间产品部门份额的提高同时大幅度提高了经济和能源消费的增长率。其三,微观主体的主观偏好对均衡增长路径影响很大。其四,能源再生对可持续发展意义重大。从模拟结果可见能源再生率从0.05减为0(可耗尽能源)时,均衡增长率下降,同时能源消费增长率大幅度提高。

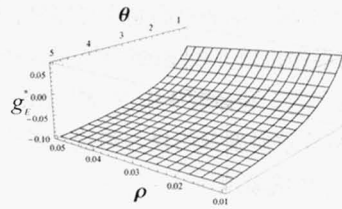
社会偏好、研发效率、能源再生能力和能源要素份额等因素对均衡增长率具有不同的作用方向,下面进一步考察这些因素对均衡增长率的综合效应。我们选取几种较为典型的情况,分别模拟两个代表性参数同时变化对均衡产出(或消费)增长率和均衡能源消费增长率的影响,图1~4中坐标Z轴均为均衡增长率。

表2 经济系统市场最优均衡的数值模拟结果

α_1	α_2	α_3	ρ	θ	$\lambda\eta$	ν	g_Y^*	g_E^*	g_Q^*
0.4	0.4	0.2	0.02	2	0.2	0.05	3.30	-0.30	3.40
0.4	0.3	0.3	0.02	2	0.2	0.05	3.29	-0.29	3.42
0.6	0.2	0.2	0.02	2	0.2	0.05	1.66	1.34	1.32
0.2	0.6	0.2	0.02	2	0.2	0.05	5.88	-2.88	7.33
0.4	0.4	0.2	0.04	2	0.2	0.05	2.32	-1.32	2.77
0.4	0.4	0.2	0.01	2	0.2	0.05	3.79	0.21	3.72
0.4	0.4	0.2	0.02	4	0.2	0.05	1.47	-0.14	1.94
0.4	0.4	0.2	0.02	1	0.2	0.05	7.25	-3.00	6.25
0.4	0.4	0.2	0.02	2	0.4	0.05	7.13	-4.13	8.51
0.4	0.4	0.2	0.02	2	0.2	0.02	3.03	-3.03	4.04
0.4	0.4	0.2	0.04	2	0.2	0	2.85	-4.85	4.47

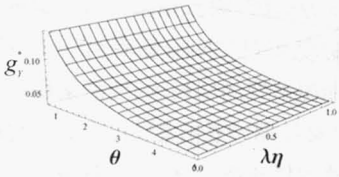


a ρ 和 θ 对均衡产出增长率 g_y^* (或消费增长率 g_c^*)的影响

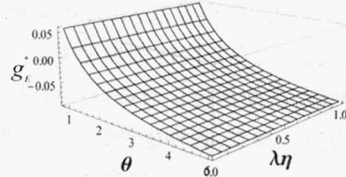


b ρ 和 θ 对均衡能源消费增长率 g_E^* (或能源储量增长率 g_s^*)的影响

图1 相关参数设定: $\alpha_1=0.4, \alpha_2=0.4, \alpha_3=0.2, H=1, \lambda\eta=0.2, \nu=0.05$

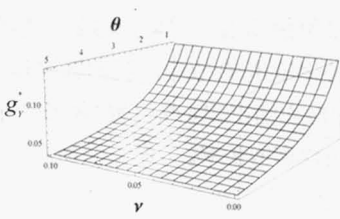


a θ 和 $\lambda\eta$ 对均衡产出增长率 g_y^* (或消费增长率 g_c^*)的影响

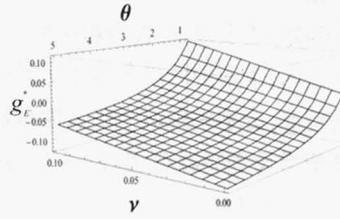


b θ 和 $\lambda\eta$ 对均衡能源消费增长率 g_E^* (或能源储量增长率 g_s^*)的影响

图2 相关参数设定: $\alpha_1=0.4, \alpha_2=0.4, \alpha_3=0.2, H=1, \rho=0.02, \nu=0.05$

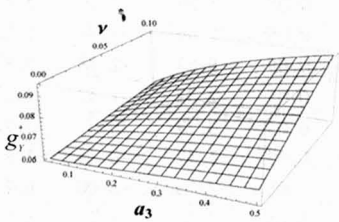


a ν 和 θ 对均衡产出增长率 g_y^* (或消费增长率 g_c^*)的影响

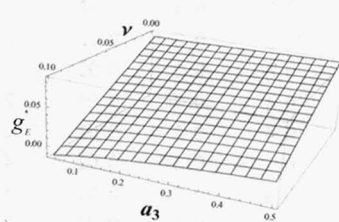


b ν 和 θ 对均衡能源消费增长率 g_E^* (或能源储量增长率 g_s^*)的影响

图3 相关参数设定: $\alpha_1=0.4, \alpha_2=0.4, \alpha_3=0.2, H=1, \rho=0.02, \lambda\eta=0.2$



a α_3 和 ν 对均衡产出增长率 g_y^* (或消费增长率 g_c^*)的影响



b α_3 和 ν 对均衡能源消费增长率 g_E^* (或能源储量增长率 g_s^*)的影响

图4 相关参数设定: $\alpha_1=0.4, H=1, \rho=0.02, \lambda\eta=0.2, \theta=2$

五 基本结论和政策建议

本文基于新熊彼得垂直创新方法和能源资源可再生性假设,构建了一个四部门内生增长模型,较为完整地分析了市场条件下能源资源、研发创新与经济可持续增长之间的相互作用。我们采用多种连续中间产品的产出效率来刻画技术创新,考虑能源资源的可再生性,求解并讨论了经济的市场均衡增长路径及其存在条件,运用比较静态和数值模拟方法分析了各类参数的长期产出增长效应和能源消费增长效应。本文的基本结论为: 1. 如果经济中拥有足够的人力资本积累带来的研发产出效率,即创新活动的产出质量是充分有效的,那么经济就可以保持长期增长。经济中的能源综合再生能力对均衡产出增长率和能源消费增长率有着不同程度的正向作用。2. 社会消费偏好对长期均衡增长的作用是显著的。因为消费者对当下或未来消费时间的选择本质上决定了社会资源储蓄率和投资率,所以只有经济中技术研发效率和能源再生能力的提升程度大于社会代表性家庭就近消费的愿望,才会有正的长期均衡增长率。

首先,正如本文模型中显示的中间产品市场具有向右下方倾斜的需求曲线。在现实经济中,垄断竞争的市场结构是普遍的,政府需要考虑各种不同类型的垄断市场结构带来的社会福利损失问题,进而可以通过制定和执行相关的公共政策来改善经济的长期增长路径。在对市场分散决策均衡的分析中我们知道,中间产品价格大于等于资本价格(市场利率)的 $1/\alpha_2$ 倍,所以中间产品的实际市场需求会因为价格提高而小于社会最优均衡时的需求数量。与中间产品部门的静态效率损失类似,研发部门面临技术跨期外溢的动态效率损失,这主要是因为研发的投资收益要小于其社会收益而使得在该部门的投资小于社会最优均衡时的需求数量。能源市场上也有类似的问题。但是在市场利率不变时,能源再生率与能源价格具有相反的变动方向,在一定程度上补偿了能源市场扭曲。所以政府可以通过恰当的税收和补贴等财政政策,鼓励对中间技术产品的购买、对研发资本的投入及对能源勘探开采和能源替代技术方面的创新。从这个方面看,合适的财政政策是不可或缺的。

其次,政府应该高度重视科技人才兴国战略和能源资源产业政策。本文的一个基本结论是技术创新是长期增长的源泉,实际上技术创新的重要作用不仅体现在可以提高整体经济的产出效率,而且其自身即是存在资源耗竭可能性的实际经济能否持续增长的决定性因素。一方面,由技术进步带来的能源资源更高的综合再生能力是对资源稀缺性的克服;另一方面,在本质上,技术进步提供了生产要素之间和要

素之内完全替代和有效替代的可能性。如果没有耗竭要素和再生要素的相互替代作用,经济不可能长期的存在和发展。能源产业政策也应侧重于对技术创新的激励。比如对新能源的研发和对不可再生能源资源深度开采技术的推广、对勘探开采的成本降低和效率增进的激励,都可以提升能源综合再生能力,即可以通过提高经济中能源产业的创新水平来提升能源产品的持续供给能力。同时在需求方面,特别是第二产业中的高耗能产业,必须通过技术创新、结构调整和严格执法来避免能源资源的浪费和过度使用。

最后是对社会消费观念的合理引导。我们知道在任何一种经济增长理论中,储蓄率对长期增长都是至关重要的,因为理论上资本是一种可以自生增长的财富。我们已经分析了以消费的时间偏好率和跨期替代弹性系数刻画的社会消费偏好对长期最优增长的作用,但实际上消费时间选择的问题并不仅限于此。一个关键的问题是,为什么消费的时间偏好率必须大于零?实际上这意味着对于今天决策的消费者,可以因为决策者未来消费效用的折现而理所当然地加大对当下所有社会资源的消费,所以这里还存在一个规范经济学的问题。^①

本文的模型还只是分析了技术创新和能源可再生条件下的分散决策均衡增长问题,今后我们将考虑在以下两个方面拓展研究:一是在能源约束条件下再加入环境约束,分析能源和环境双重约束下的市场均衡增长路径;二是可以通过在模型中加入政策工具变量,来研究和评价与能源资源相关的公共政策的长期增长效应。

参考文献:

Aghion, P. and Howitt, P. "A Model of Growth through Creative Destruction." *Econometrica*, 1992, 60, pp. 323 - 351.

Aghion, P. and Howitt, P. *Endogenous Growth Theory*. Cambridge: MIT press, 1998.

Barro, R. J. and Sala-i-Martin, X. *Economic Growth*. New York: McGraw-Hill, Inc., 1995.

Dasgupta, P. S. and Heal, G. M. "Optimal Growth and Exhaustible Resources." *Review of Economic Studies*, 1974, 41, pp. 3 - 28.

Dasgupta, P. S. and Heal, G. M. *Economic Theory and Exhaustible Resources*. Oxford: Oxford University Press, 1979.

Dixit, A. K. and Stiglitz, J. E. "Monopolistic Competition and Optimum Product Diversity." *American Economic Review*, 1977, 67, pp. 297 - 308.

Grimaud, A. and Rouge J. "Non-renewable Resources and Growth with Vertical Innovations Optimum, Equilibrium and Economic Policies." *Journal of Environmental Economic and Management* 2003 45, pp. 433 - 453.

^① Hartwick(1977)和Solow(1979)较早对经济长期增长中的折现率和代际公平问题作了阐述。

- Grossman , G. and Helpman , E. “Product Development and International Trade.” *Journal of Political Economy* , 1989 , 97 , pp. 1261 – 1283.
- Grossman , G. and Helpman , E. “Quality Ladders in the Theory of Growth.” *Review of Economic Studies* , 1991a , 97 , pp. 43 – 61.
- Grossman , G. and Helpman , E. *Innovation and Growth in the Global Economy* , Cambridge: MIT press 1991b.
- Hartwick , J. M. “Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources.” *American Economic Review* 1977 , 67 , pp. 972 – 974.
- Heal , G. M. “The Optimal Use of Exhaustible Resources ,” in A. V. Kneese and J. L. Sweeney eds. , *Handbook of Natural Resources and Energy Economics Volume3*. Oxford: Elsevier Press , 2006.
- Hottelling H. “The Economics of Exhaustible Resources.” *Journal of Political Economy* 1931 39 pp. 137 – 185.
- Jones , L. and Manuelli , R. “The Sources of Growth.” *Journal of Economic Dynamics and Control* 1997 , 21 , pp. 75 – 114.
- Lucas R. E. “On the Mechanics of Economic Development.” *Journal of Monetary Economics* 1988 22 , pp. 3 – 42.
- Romer , P. M. “Endogenous Technical Change.” *Journal of Political Economy* 1990 , 98 , pp. 71 – 102.
- Scholz , C. M. and Ziemes , G. “Exhaustible Resources , Monopolistic Competition and Endogenous Growth.” *Environmental and Resources Economics* , 1999 , 13 , pp. 169 – 185.
- Schou , P. “Polluting Nonrenewable Resources and Growth.” *Environmental and Resource Economics* 2000 , 16 , pp. 211 – 27.
- Schou , P. “When Environmental Policy Is Superfluous: Growth and Polluting Resources.” *Scandinavian Journal of Economics* , 2002 , 104 , pp. 605 – 620.
- Solow , R. M. “The Economics of Resources or the Resources of Economics.” *American Economic Review*. 1974a , 64 , pp. 1 – 14.
- Solow , R. M. “Intergenerational Equity and Exhaustible Resources.” *Review of Economic Studies* , 1974b , 41 , pp. 29 – 45.
- Spence , M. “Product Selection , Fixed Costs , and Monopolistic Competition.” *Review of Economic Studies* 1976 , 43 , pp. 217 – 235.
- Stiglitz , J. “Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths.” *Review of Economic Studies* , 1974 , 41 , pp. 123 – 137.
- Sweeney , J. L. “Economic Theory of Depletable Resources: An Introduction ,” in A. V. Kneese and J. L. Sweeney , eds. , *Handbook of Natural Resources and Energy Economics Volume3*. Oxford: Elsevier Press , 2006.

(截稿: 2011 年 10 月 责任编辑: 宋志刚)