

考虑能源耗竭、污染治理的 经济持续增长内生模型^①

于 渤¹, 黎永亮¹, 迟春洁²

(1. 哈尔滨工业大学管理学院, 哈尔滨 150001; 2. 华东理工大学商学院, 上海 200237)

摘要: 基于 R&D 的内生增长模型, 建立了同时考虑能源资源耗竭、环境阈值限制与环境治理成本的可持续增长模型, 并运用最优控制方法讨论了模型的平衡增长解. 在该解的基础上进一步讨论可持续发展的必要条件的规范性特征, 即能源资源耗竭速率、污染治理的投入比例与经济增长之间应满足动态关系.

关键词: R&D 增长模型; 最优增长; 能源资源耗竭; 污染治理

中图分类号: F830.91

文献标识码: A

文章编号: 1007-9807(2006)04-0012-06

0 引 言

能源问题成为当代人类可持续发展的核心问题之一. 作为最大的发展中国家, 中国人均化石燃料资源仅为世界均值的 56%, 石油的人均可采储量仅为世界均值的 8%, 而中国因能源生产和使用造成的主要污染物排放量已跃居世界前列. 但根据中国的国家发展战略, 到 2050 年中国要达到中等发达国家水平, 这使得中国能源面临经济增长与环境保护的双重压力^[1]. 中国必须寻求一条在能源资源耗竭、能源污染治理与经济增长三者协调发展的道路. 本文在 Aghion 与 Howitt 的研究^[2]基础上, 通过将耗竭性能源资源、特别是人为的环境治理加入到 R&D 增长模型中, 对上述问题进行理论上的探讨.

耗竭性自然资源是 20 世纪 70 年代经济学家关注的热点^[3-5]. 当时人们主要探讨耗竭性资源的最优配置及其对长期经济增长的限制. Hartwick 的一篇文章^[4]是这一时期最著名的文献, 其研究成果随后被称为 Hartwick 准则. 但是, 由于以下两个原因使得这一时期的研究结果的合理性受到了很大的限制. 一是该时期运用的新古典增长模型

将技术进步率视为外生给定的常数, 因而未能正确揭示技术进步对耗竭性资源可持续利用所产生的影响; 二是这一时期的模型没有考虑耗竭性自然资源特别是能源、矿产资源在开发和使用过程中引发的环境成本, 而事实上环境问题已成为人类可持续发展的首要问题.

Romera^[6]使得增长理论重新成为研究的热点. 研究者开始从不同的方面解释资本的边际报酬不再递减, 提出了 AK 模型、边干边学模型、人力资本积累模型、R&D 与技术变迁模型等. 这些内生增长模型与当时全球气候变化和可持续发展理论相结合, 使得环境污染问题成为 20 世纪 90 年代以来内生增长理论分析的重点^[7-9]. 这些模型很好地将环境治理成本内生到经济增长过程中, 但由于其分析的重点是环境治理政策与经济增长和社会福利的关系, 因而模型中没有考虑资源耗竭对经济长期增长的制约. 中国的王海建博士自 1999 年起发表的四篇论文^[10-13]分别以不同的内生增长模型为基础, 同时考虑了资源耗竭与环境污染. 但由于计算的复杂性, 表征污染治理的变量被外生化处理了, 即模型只考虑了环境系统自身的自净能力而没有考虑人为的污染治理投

① 收稿日期: 2004-09-10; 修订日期: 2005-02-18.

作者简介: 于 渤(1960—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士生导师.

人,而资源约束与环境污染的治理同为可持续发展的关键因素,因此需要在内生增长模型中同时将这两个变量内生生化以便更为全面地描述可持续发展必要条件的特征.本文试图在这一方面作一些探索.另外由于运用不同的内生增长模型得出的结论具有很大的差别,本文选择了内生增长模型中的 R&D 模型,理由之一是在不考虑制度与伦理的前提下,技术的选择与创新是解决可持续发展过程中资源与环境问题的根本途径,另一个原因则是该模型的计算相对简便.

1 模型描述

1.1 投入与产出

本文采用两部门的宏观经济生产函数.但与增长理论中通常的分类不同,本文的两部门指的是物质资料的生产部门 Y 和新产品新技术的研发部门 B ,这样做的目的是通过技术创新 B 这个变量将资源耗竭与污染治理联系起来,完成变量的内生生化,下文还将详细论述.物质资本可用于消费、投资及污染治理,研发部门则提高社会的知识存量.假定最终产品的生产决定于实物资本存量 K 、人力资本总量 L 、耗竭性能源资源投入量 R 以及污染物存量 A ,如下式

$$Y(t) = F(K_t, B_t L_t, R_t, A_t) \quad (1)$$

其中, t 表示时间,本文采用连续时间分布,时间 t 不直接进入生产函数,而是通过投入要素 K_t, B_t, L_t, R_t, A_t 的变化进入分析. K_t, B_t, L_t, R_t, A_t 分别表示时间的资本存量、知识技术存量、人力资本总量、能源资源投入量、能源污染物存量.我们假定人力资本总量等于人口总数.为使问题简化,人口总数为常数且标准化为 1.

与绝大多数运用内生增长模型对环境污染和资源耗竭的分析不同,本文采用了一个含有污染物存量 A 的生产函数,这个变量对物质资本生产的贡献为负(为计算的方便不考虑当期流量污染物对生产的影响).Stokey 提供的方法^[14]也在生产函数中考虑了污染,但他通过引入衡量生产清洁程度的技术变量 z 来分析污染对持续增长的影响.在他的模型中, z 实际上综合了污染物存量、技术变化及环境治理对经济增长的影响,而且 z 独立于一个经济体系的资本及技术存量,这实

质上是将环境影响外生化.为了将环境及污染治理的因素内生生化地考虑到模型中,本文将污染物存量作为一个单独的投入要素.假设生产函数采用柯布—道格拉斯形式,则有

$$Y = K^\alpha [B(1-n)]^\beta R^{1-\alpha-\beta} A^{-\gamma} \quad (2)$$

式中, $0 < \alpha, \beta < 1, 0 < \alpha + \beta < 1, \gamma > 1$ (以下为了书写方便,一律略去下标 t).

注意技术存量进入生产函数的形式 $B_t L_t$ 意味着技术进步是劳动增进型的,而做这样的假设是出于模型收敛的考虑^[15].根据 Schumpeter R&D 模型,技术存量的变化为^[16]

$$\dot{B} = \sigma \eta B n \quad (3)$$

假定只投入人力资本,式中 n 为投入研发的人力资本比例,并假定创新的频率与研发的投入量成比例关系 ηn ,其中 η 为正的研究技术参数,表示对于单个研究人员而言创新发生的泊松抵达率, σ 表示创新流推动经济体系中技术前沿的速率.

1.2 消费与投资

前文所述,物质资料的生产可用于三个部分,一是消费 C ,二是当期投资 $\dot{K}$,三是污染治理 V .用于当期投资部分导致实物资本存量增加,用于环境治理部分使得污染物存量减少,于是实物资本的变化 $\dot{K}$ 为

$$\dot{K} = Y - C - V \quad (4)$$

污染治理投入 V 与治理比例 τ 和当期的产出 Y 有关.为了得到系统的收敛解,进一步假定 V 是 τ 的凸函数,则有^[17]

$$V = (b_0 + b_1 \tau^b) Y \quad (5)$$

式中 b_0, b_1, b 规定为常数,可根据污染治理与经济体系运行的相关数据后验测定,且 $b_0, b_1 \in [0, 1], 0 < \tau < 1, 0 < b_0 + b_1 < 1$.

1.3 环境与污染

假定污染物的排放与经济活动总量 Y 及能源的生产与利用技术有关.这里如何定义与内生生化能源的生产与利用技术是各种内生模型研究污染问题的一个关键.前文已提及,在模型中使用不同的技术内生方式会得到不同的结果.Boone^[18]、Newell^[19]专门讨论了能源领域的技术进步与内生生化问题.为了不使问题复杂化,本文假定在稳态中能源领域的技术等于社会平均的水平,则污染

物存量的变化可表示为

$$\dot{A} = (1 - \tau)YB^{-a} - \theta A \quad (6)$$

式中 a 为能源技术的清洁指数,且大于 1; θ 为环境系统对污染物的自净能力, $0 < \theta < 1$. θA 表明污染物存量在任一时点的衰减比例不变,这种线性的假设完全是为了计算的方便.实际上,污染物在环境中的衰减方式是一个很复杂的问题,不在本文讨论.在任一时点上污染物存量都必须满足: $A < A^{\text{Max}}$. A^{Max} 为环境系统的容量阈值.式(6)的关键在于通过变量 Y 、 τ 、 B 使耗竭性资源使用量、污染治理成本同时内生化了,式中的 B^{-a} 相当于 Stokey 模型中的 z ,不过它不再独立于生产体系和污染治理; YB^{-a} 为当期生产活动产生的污染物总量,它与当期的经济产出规模 Y 成正比,与能源技术水平 B 成反比;它与 $(1 - \tau)$ 的乘积表示当期未能治理而存留在环境中的污染物,这个乘积值减去环境系统的自净能力 θA 后就表示当期污染物的变化.这样,资源的耗用量 R (通过 Y 起作用)、污染治理投入 (通过 τ 起作用) 和技术的变迁 B 就有机组成了一个动态系统,从而完成了变量内生化的过程.

1.4 社会福利

在传统的最优内生增长理论的研究中,社会福利只是消费的函数.社会福利最大化也就是消费或产出的最大化.为了将内生增长理论与可持续发展的规范相结合,需要建立一个包含物质消费、自然资本与环境质量的效用函数.尽管如此,在用内生增长模型研究可持续发展问题时,具体的福利函数形式仍是可持续性的决定因素. Michale 和 Rotillon^[20] 讨论了可持续性如何依赖效用函数的性质.在他们的分析中,当且仅当消费和环境质量为替代品时,最优增长路径可以表现为无限制的增长.因此本文采用可加的等弹性效用函数形式,但与其他模型不同的是,这个社会福利函数同时包含了耗竭性资源和污染物的存量,见下式

$$u(C, N, A) = \frac{C^{1-\epsilon} - 1}{1-\epsilon} + \frac{N^{1-\omega} - 1}{1-\omega} - \frac{A^{1+\varphi}}{1+\varphi} \quad (7)$$

式中, u 为瞬时效用函数, N 为 t 时刻的耗竭性能源资源存量, $\epsilon, \omega, \varphi > 0$. 耗竭性能源资源存量的净变化 (为计算方便,这里不考虑储量增长的影响) 为

$$\dot{N} = -R \quad (8)$$

假设存在一个理性的社会计划者,其目标是使跨期效用最大化.这样就建立了一个时间连续

条件下同时考虑耗竭性能源资源、环境污染与治理的动态模型如下

$$\text{目标函数: } \max U = \max \int_{t=0}^{\infty} e^{-\rho t} \left(\frac{C^{1-\epsilon} - 1}{1-\epsilon} + \frac{N^{1-\omega} - 1}{1-\omega} - \frac{A^{1+\varphi}}{1+\varphi} \right) dt \quad (\rho \text{ 为跨期效用贴现率})$$

约束条件: 式(3)、(4)、(6)、(8)

控制变量: C, R, τ, n

阶段变量: K, N, B, A

2 模型求解

根据模型建立哈密尔顿方程

$$H = \left(\frac{C^{1-\epsilon} - 1}{1-\epsilon} + \frac{N^{1-\omega} - 1}{1-\omega} - \frac{A^{1+\varphi}}{1+\varphi} \right) + \lambda_1 [K^\alpha (B(1-n))^{\beta} R^{1-\alpha-\beta} A^{-\gamma} - C - (b_0 + b_1 \tau^b) Y] + \lambda_2 \sigma \eta B n - \lambda_3 R + \lambda_4 [(1-\tau)YB^{-a} - \theta A]$$

式中, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 分别为 K, B, N, A 的影子价格.

经整理,得四个控制变量的一阶条件为

$$\lambda_1 = C^{-\epsilon} \quad (9)$$

$$[\lambda_1(1 - b_0 - b_1 \tau^b) + \lambda_4(1 - \tau)B^{-a}] \times \beta \frac{Y}{1 - n} = \lambda_2 \sigma \eta B \quad (10)$$

$$[\lambda_1(1 - b_0 - b_1 \tau^b) + \lambda_4(1 - \tau)B^{-a}] \times (1 - \alpha - \beta) \frac{Y}{R} = \lambda_3 \quad (11)$$

$$b_1 b \lambda_1 \tau^{b-1} = -\lambda_4 B^{-a} \quad (12)$$

四个阶段变量的欧拉方程为

$$\rho \lambda_1 = \lambda_1 [\lambda_1(1 - b_0 - b_1 \tau^b) + \lambda_4(1 - \tau)B^{-a}] \frac{\alpha Y}{K} + \dot{\lambda}_1 \quad (13)$$

$$\rho \lambda_2 = \lambda_2 [\lambda_1(1 - b_0 - b_1 \tau^b) + \lambda_4(1 - \tau)B^{-a}] \frac{\beta Y}{B} + \lambda_2 \sigma \eta n - \dot{\lambda}_2 \quad (14)$$

$$\rho \lambda_3 = N^{-\omega} + \dot{\lambda}_3 \quad (15)$$

$$\rho \lambda_4 = A^\varphi - \lambda_4 [\lambda_1(1 - b_0 - b_1 \tau^b) + \lambda_4(1 - \tau)B^{-a}] \frac{\gamma Y}{B} - \theta \lambda_4 + \dot{\lambda}_4 \quad (16)$$

令 g 为各个变量的增长率,即

$$g_c = \frac{\dot{C}}{C}, g_K = \frac{\dot{K}}{K}, g_B = \frac{\dot{B}}{B}, g_{\lambda_1} = \frac{\dot{\lambda}_1}{\lambda_1} \quad (\text{其余依})$$

次类推)

由式(10)、(11)、(13)可得

$$\frac{\dot{\lambda}_1}{\lambda_1} = \rho - \frac{a\lambda_2\sigma\eta B(1-n)}{\lambda_1\beta K} \quad (17)$$

在稳态中各个变量的增长率均为常量,故上式右端最后一项为常量,两边求微分得

$$g_{\lambda_3} + g_R = g_{\lambda_1} + g_K \quad (18)$$

由式(10)、(11)、(14)可得

$$\frac{\dot{\lambda}_2}{\lambda_2} = \rho - \eta\sigma + \frac{a\lambda_4(1-\tau)YB^{-a-1}}{\lambda_2} \quad (19)$$

在经济可持续发展的稳态中,污染治理比例 τ 为常数,故式(19)右端最后一项也为常数,两边求微分得

$$g_{\lambda_4} + g_Y = (a+1)g_B + g_{\lambda_2} \quad (20)$$

同理可推得其他关系如下

$$g_{\lambda_1} = -\varepsilon g_C \quad (21)$$

$$g_{\lambda_1} + (b-1)g_\tau = g_{\lambda_4} - ag_B \quad (22)$$

$$g_{\lambda_3} + g_R = g_K + g_{\lambda_1} \quad (23)$$

$$g_{\lambda_2} + g_B = g_K + g_{\lambda_1} \quad (24)$$

$$\omega g_N + g_{\lambda_3} = 0 \quad (25)$$

$$\varphi g_A = g_{\lambda_4} \quad (26)$$

$$g_{\lambda_3} + g_R = g_A + g_{\lambda_4} \quad (27)$$

$$g_{\lambda_2} + g_B = g_A + g_{\lambda_4} \quad (28)$$

$$g_Y - g_\tau = ag_B + g_A \quad (29)$$

由上述关系式可求得

$$g_n = g_\tau = 0 \quad (30)$$

$$g_N = -\frac{R}{N} \quad (31)$$

$$g_{\lambda_1} = -\varepsilon g_K \quad (32)$$

$$g_{\lambda_2} = \frac{a(1-\varepsilon)(1+\varphi) - \varepsilon + \varphi}{a(1+\varphi)} g_K \quad (33)$$

$$g_{\lambda_3} = -g_N = (1-\varepsilon)g_K - g_R \quad (34)$$

$$g_{\lambda_4} = \frac{1-\varepsilon}{\varphi(1+\varphi)} g_K \quad (35)$$

$$g_A = \frac{1-\varepsilon}{1+\varphi} g_K \quad (36)$$

$$g_B = \frac{1}{a} \left(1 - \frac{1-\varepsilon}{1+\varphi} \right) g_K \quad (37)$$

由 K 的方程两边同时除以 K 并根据稳态中 g_K 为常量知 Y/K 为常量,两边求微分并整理得

$$\begin{aligned} & \left(\alpha - 1 + \frac{\beta(\varepsilon - \varphi)}{a(1 - \varphi)} - \frac{\gamma(1 - \varepsilon)}{1 + \varphi} \right) g_K \\ & = (\alpha + \beta - 1) g_R \end{aligned} \quad (38)$$

由式(31)和(36)得

$$g_K = \omega \frac{R}{N} \left[1 - \varepsilon + \frac{a(1+\varphi)(\alpha-1) + \beta(\varepsilon-\varphi) + \gamma(1-\varepsilon)}{a(1+\varphi)(1-\alpha-\beta)} \right]^{-1} \quad (39)$$

3 结果分析

3.1 持续增长的必要条件

由于有环境容量阈值 A^{Max} 的限制,就必然要求在稳态增长中污染物的增长率为负.由式(36)知,要满足这个条件就必须有

$$\varepsilon > 1 \quad (40)$$

在可持续发展中不可替代的耗竭性资源(这里指能源资源)的使用量必须逐渐减少(即 $g_R < 0$),否则枯竭的能源资源基础将使人类的发展不可持续.同时,可持续发展要求经济增长为非负.这些条件决定了式(36)左端 g_K 的系数必须大于零,经整理后得

$$\frac{\beta(\varepsilon - \varphi) + a\gamma(\varepsilon - 1)}{a(1 + \varphi)} > 1 - \alpha \quad (41)$$

由此可得可持续发展的必要条件为式(40)和(41)成立.式(38)意味着边际消费弹性必须大于1,即消费的跨期替代弹性必须小于1.这种对消费偏好的强烈限制表明了环境污染对可持续发展的巨大影响,还没有经验证据表明这一关系总是成立,这也使得人们重新考虑增长的极限问题^[14,21].式(41)表明这一生产与消费体系的各类偏好参数应满足的关系式.由于内生模型自身的限制,这些偏好参数(如消费偏好、技术偏好)被规定为外生给定的常数.David^[17]用数值模拟的方式考虑了这些参数的变化对模型结果的影响,提供了一个弥补这一缺陷的思路,本文不再重述.

3.2 经济增长与能源耗竭

由式(36)和(39)得

$$\frac{g_K}{|g_R|} > \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha - \beta} \quad (42)$$

由式(37)和(39)得

$$g_K < \omega \frac{R}{N} \left(1 - \varepsilon + \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha - \beta} \right)^{-1} \quad (43)$$

式(42)表明,在稳态的持续增长中,经济增长的速率与耗竭性能源资源消耗递减的绝对速度之比必须大于1.这就要求经济增长必须逐步

走向能源节约型道路。目前我国正处于工业化的初中期阶段,重化工产品的生产与消费在经济中占的比重很大,平均产值的能耗是发达国家的 3 ~ 5 倍。自 1977 年以来,我国的能源消费强度仅以平均每年 4% 的速率下降^②,而期间平均的经济增长率在 8% 左右,二者之比为 0.5,离大于 1 的水平还相差很远。这表明如果能源消费强度没有更大幅度的下降,能源资源将极大限制我国可持续发展。式(43)表明,能源资源的耗竭速度限制了经济增长的速度,加快资源耗竭的速度虽然可使经济更快增长,但也使可持续发展迅速面临资源枯竭的威胁。根据 Daly^[22] 的可持续发展理论,耗竭性资源的消耗速度不应大于其替代速度。因此,加快石化能源的替代速度是经济长期稳定增长的必然选择。在政策上应该纠正扭曲的能源价格体系,通过市场机制提高石化能源的使用效率,引导可再生能源对石化能源的替代。

3.3 污染治理的投入比例

给定初始值满足 $A_0 < A^{\text{Max}}, N_0 > 0$, 由模型的递归路径可求得污染治理比例的初始值 τ_0 由以下轨迹方程给出(递归推导过程过于繁杂,限于篇幅本文从略)

$$\left(1 - \tau_0 - \frac{1 - b_0 - b_1 \tau_0^b}{b_1 b \tau_0^{b-1}}\right)(1 - \tau_0) = \frac{\alpha \sigma \eta (1 - n)}{\beta (g_{\lambda_2} + \sigma \eta - \rho)} \quad (44)$$

由此可求得,在稳态中能源污染物的治理投入应占国民生产总值的比例为

$$\frac{V}{Y} = \frac{V_0(1 + g_Y)^t}{Y_0(1 + g_Y)^t} = \frac{V_0}{Y_0} = b_0 + b_1 \tau_0^b \quad (45)$$

根据国际上通行的一种经验说法,如果环境污染得到控制,对治理环境的投入要达到国民生产总值的 1.2%,如果要改善就要达到 1.5%。“八五”期间我国的投入基本上只占国民生产总值的 0.7% ~ 0.8%,至“九五”期间占 0.85%,2001 年达到了 1%,2003 年中国环境治理总投资仅占国民生产总值的 1.39%。而根据世界银行对中国空气污染造成损失的估计,仅 CO₂ 排放(能源生产与消费排放的 CO₂ 占总排放量的 80% 以上)造成的损失就占 GDP 的 2.9%^[23]。显然环境治理的投入比例过低。很多人担心加大环境治理的投入会影响经济增长。而式(45)表明了在最优稳态增长中环境治理的投入占国民生产总值应满足的比例。即使 τ_0 取保守的 50%(即只有一半的污染物得到治理), b_0 取 0.01, b_1 取 0.2, b 取 3,污染治理投入占国民生产总值的比例也应达到 3.5%。

4 结 论

本文建立了一个同时将能源资源耗竭、环境污染及人为治理内生化的最优增长模型,是将内生增长理论用于分析我国能源可持续发展的初步尝试。文中的结论是通过分析实现可持续发展的必要条件而不是充分条件而得出的。但应当指出,将最优增长作为目标与可持续发展的要求未必一致。但对中国这样的发展中国家而言,可持续发展的前提是发展^[1],因而在最优增长理论的框架下加入资源与环境的约束是分析可持续发展问题的第一步。

参 考 文 献:

- [1] 国家计委等. 中国 21 世纪议程——中国人口、环境和发展白皮书[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994. 3—11.
National Development and Reform Commission. China 21st Agenda[M]. Beijing: China Environment Science Press, 1994. 3—11.
(in Chinese)
- [2] Aghion P, Howitt P. Endogenous Growth Theory[M]. Massachusetts: MIT Press, 1998: 136—154.
- [3] Dasgupta P, Heal G M. The Optimal Depletion of Exhaustible Resources[J]. Review of Economic Studies, Special Issue, 1974, 41 (128): 3—26.
- [4] Hartwick J M. Intergenerational equity and the investing of rents from exhaustible resources[J]. American Economic Review, 1977, 67(5): 972—974.
- [5] Beckmann M J. The limits to growth in a neoclassical world[J]. American Economic Review, 1975, 65(3): 695—699.

② 见郑健超 2004 年 6 月 3 日在中国工程院第七次院士大会上所作的《中国可持续能源供应的挑战和技术机遇》报告

- [6]Romer P M. Increasing returns and long-trem growth[J]. Journal of Political Economy, 1986, 94(8): 1002—1037.
- [7]Beltratti A. Growth with Natural and Environment Resource[C]. Fondazione ENI Enrico Mattei Working Paper, 1995: 28—45.
- [8]Goulder L, Mathai K. Optimal CO₂ Abatement in the Presence of Induced Technological Change[C]. Workingpaper 6994, National Bureau of Economic Research, Cambridge, USA, 1998. 225—249.
- [9]Nordhaus W. Modeling Induced Innovation in Climate Change Policy[C]. Paper for the workshop Induced Technological Change and the Environment, IIASA, Laxenburg, 1999. 355—367.
- [10]王海建. 资源环境约束之下的一类内生经济增长模型[J]. 预测, 1999, (4): 36—38.
Wang Hai-jian. An endogenous economic growth model with exhaustible resources[J]. Forecast, 1999, (4): 36—38. (in Chinese)
- [11]王海建. 耗竭性资源、R&D 与内生经济增长模型[J]. 系统工程理论方法应用, 1999, 8(3): 38—42.
Wang Haijian. An endogenous economic growth model with exhaustible resources use and R&D[J]. System Engineering: Theory Methodology Applications, 1999, 8(3): 38—42. (in Chinese)
- [12]王海建. 资源约束、环境污染与内生经济增长[J]. 复旦学报(社会科学版), 2000, (1): 76—80.
Wang Haijian. Exhaustible resources, environment pollution and endogenous economic growth[J]. FUDAN Journal (Social Science), 2000, (1): 76—80. (in Chinese)
- [13]王海建. 耗竭性资源管理与人力资本积累内生经济增长[J]. 管理工程学报, 2000, 14(3): 11—13.
Wang Haijian. Exhaustible resources management and human capital accumulation endogenous economic growth[J]. Journal of Industrial Engineering & Engineering Management, 2000, 14(3): 11—13. (in Chinese)
- [14]Stokey N L. Are there limits to growth? [J]. International Economic Review, 1998, 39(1): 1—33.
- [15]Barro J R, Sala-i-Martin. Economic Growth[M]. Massachusetts: McGraw-Hill Inc, 1995. 39—40.
- [16]Aghion P, Howitt P. Research and development in the growth[J]. Journal of Economic Growth, 1996, (1): 49—73.
- [17]David L. On environmental Kuznets curves arising from stock externalities[J]. Journal of Economic Dynamics & Control, 2003, 27 (5): 1367—1390.
- [18]Boone L, Hall S. Endogenous technical progress in fossil fuel demand[J]. Journal of Policy Modeling, 1996, 18(2): 141—155.
- [19]Newell R G, Jaffe A B. The induced innovation hypothesis and energy-saving technological change[J]. Quarterly Journal of Economics, 1999, 114(3): 941—975.
- [20]Michel P, Rotillon G. Disutility of Pollution and Endogenous Growth[C]. GREQAM, Paris: University of Aix Marseille and MODEM, University of Paris, 1996. 144—156.
- [21]Daly H. Sustainable Growth: An Impossibility Theorem[J]. Development, 1994, 3(4): 126—138.
- [22]John P H, Daly H G, Paul R E. The Meaning of Sustainability: Biogeophysical Aspects, Defining and Measuring Sustainability [C]. New York: The Biogeophysical Foundations, 1996. 1—17.
- [23]World Bank. Expending the Measure of Wealth: Indicators of Environmentally Sustainable Development[R]. The Environment Department, New York: 1997. 237—256.

Endogenous model with exhaustible energy, pollution abatement spending and sustainable growth induced

YU Bo¹, LI Yong-liang¹, CHI Chun-jie²

1. Management School, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Business School of East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

Abstract: Based on the R&D model, this paper presents a model with exhaustible energy, environment threshold and abatement spending input. The method of optimal control is employed to obtain the balance growth solutions. Further, the characteristics of the prerequisites to sustainable development are discussed according to these solutions, that is, what dynamic relations must be satisfied between economic growth and the rate of energy exhausting, the proportion of investment in abatement. These relations supply an alternative theoretical criterion when assessing the effects of various energy policies.

Key words: R&D model; optimal growth; exhaustible energy; abatement spending