

# 资源消耗、污染控制下经济可持续最优增长路径<sup>①</sup>

许士春<sup>1</sup>, 何正霞<sup>2</sup>, 魏晓平<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学管理学院, 徐州 221116 2 徐州师范大学经济学院, 徐州 221009)

**摘要:** 节能减排下的经济可持续增长是可持续发展理论的重要研究课题, 为此将耗竭性资源和环境污染问题纳入内生经济增长模型, 并运用最优控制方法研究稳态的经济可持续最优增长路径. 讨论模型的平衡增长解, 并在平衡增长解的基础上, 进一步探讨实现经济可持续最优增长路径的必要条件, 即消费跨期替代弹性、人力资本积累效率与时间贴现率之比应满足一定的动态关系. 通过对影响经济可持续增长的变量进行比较静态分析和模拟检验发现, 消费跨期替代弹性、时间贴现率、人力资本积累效率、物质产品部门和研发部门的产出弹性、污染的产出和控制弹性对稳态下的经济增长率、污染排放增长率和资源消耗速度产生一定影响.

**关键词:** 资源消耗; 污染控制; 可持续增长; 最优增长路径

**中图分类号:** F061.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-9807(2010)01-0020-11

## 0 引言

随着经济的快速增长, 资源与环境问题日益凸现, 人类同时也付出了极大的代价: 资源短缺、环境污染、生态破坏等严重问题. 因此, 人们不得不对产业革命以来工业化发展道路以及传统的经济增长方式进行重新评价, 试图寻找一种不同于传统工业化发展方向的新的发展模式, 作为当代最新发展观念的可持续发展思想应运而生. 可持续发展是比经济增长广泛得多的概念, 其中资源环境与经济增长关系问题是可持续发展研究的重要组成部分. 然而, 人类经济发展规律表明, 经济发展与资源消耗、环境污染会存在一定的联系. 自然资源与环境是否具有稳定持久的供给能力是经济得以持续稳定发展的重要限制性因素, 然而快速的经济增长又不可避免地加剧了对资源与环境的压力. 如何协调好两者之间的关系, 已成为普遍关注、亟待解决的重大问题.

中国实施可持续发展战略面临着经济发展和环境保护的双重任务, 随着人口增长、国民经济发

展和人民生活水平的提高, 不可再生资源的需求将有较大的增长, 一方面中国的大多数资源如煤、石油、天然气等的储量有限, 这些不可再生资源的消耗速度随着经济的发展越来越快, 面临枯竭的危险; 另一方面, 这些资源在生产使用过程中带来的环境问题越来越严峻, 而且对全球气候都将产生影响. 所以, 要实施可持续发展战略, 首先要解决好不可再生资源的可持续利用和污染控制问题, 这不仅对中国, 而且对世界的可持续发展都有重要的意义.

本文研究的目的在于: 通过拓展 R&D 内生经济增长模型, 将资源消耗和污染控制等因素引入模型, 力求模型与现实经济更贴近, 利用动态最优控制方法, 在一般均衡框架下研究节能环保下经济最优增长路径问题: 在稳态的经济可持续最优增长路径中, 消费和经济增长率上升而资源消耗和污染排放增长率下降的条件是什么? 哪些因素会影响以及如何影响稳态中的经济可持续最优增长路径?

① 收稿日期: 2008-06-23; 修订日期: 2009-09-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90610032).

作者简介: 许士春 (1979—), 男, 江苏徐州人, 硕士, 讲师. E-mail: xushichun78@sina.com

## 1 文献回顾

### 1.1 国外研究现状

国外早在马尔萨斯的《人口原理》李嘉图的《物种起源》中就有土地和粮食与经济增长关系的研究。1972年“罗马俱乐部”研究报告《增长的极限》提出经济增长受有限资源制约而不可能长期持续增长,并倡议为保护资源有必要人为降低经济增长速度。真正较系统地研究资源环境与经济增长问题是20世纪70年代出现石油危机以后,此方面的理论研究根据模型特点大致可以分为三类:

#### 1) 考虑资源或环境的新古典增长模型

Dasgupta和Heal<sup>[1]</sup>首次将效用函数引入新古典增长模型,以消费者无限时域上跨期效用最大化为目标,利用最优控制方法求得经济最优增长路径。Stiglitz、Solow、Garg和Sweeney<sup>[2-4]</sup>等运用新古典增长模型对资源最优开采、利用路径进行分析,得出在一定技术条件下,即使自然资源存量有限,人口增长率为正,人均产出持续增长仍有可能,初始的资本和资源存量对经济增长率不会产生影响,但会影响长期的经济增长水平,技术进步才是长期经济增长的源泉。此类研究仅仅从资源的角度研究,忽视了经济行为对环境质量的影响。Keeler、Spence和Zeckhauser、D'Arge和Kogiku、Forster、Becker<sup>[5-8]</sup>等将污染引入经济模型,讨论环境污染与经济长期增长的关系。此后,Chichilnisky<sup>[9]</sup>将污染因素和环境本身放进新古典生产函数和效用函数予以分析。需要指出的是,这些模型通常把总的环境质量指标当作一种资本品,由于污染的负外部效应,使得完善的产权保护与有效的市场交易体制成为决定环境是否随经济增长不断恶化的关键因素;当环境质量存量作为投入要素进入生产函数时,最优污染税或环境标准是维持最优环境质量水平的必要条件而非充分条件。

#### 2) 考虑资源或环境的内生增长模型

20世纪80年代中后期,以Romer、Lucas、Grossman和Helpman、Aghion和Howitt<sup>[10-13]</sup>等为代表的新增长经济学家,通过运用AK模型、人力资本积累模型、R&D模型等将技术进步内生化来研究经济增长的内生机制。此后便有人将环境或

污染引入生产函数,把环境质量引入效用函数,在内生增长模型框架下讨论环境与经济增长及可持续发展问题。Bovenberg和Smulders<sup>[14]</sup>通过对技术进步内生化处理,放松新古典增长模型要素边际报酬递减的假设,通过将资源和污染引入生产函数,把环境质量引入效用函数,考察生态环境与长期经济增长的关系问题,得出最优污染控制需要降低稳态增长率及效用函数形式会影响最优均衡的结论。Lopez<sup>[15]</sup>将资源、环境质量等同于传统生产函数中的生产要素,发现资源要素投入存在最优增长路径。Sellen和Song、Stokey<sup>[16-17]</sup>等研究发现环境变化、污染排放影响着产出与消费偏好的变化从而会作用于经济增长。需要说明的是这类研究大多仅考虑资源或环境问题,很少把资源和环境问题通过效用函数引入模型中予以分析,更没有对相关政策予以分析。

#### 3) 资源或环境与经济增长关系的宏观理论模型

Chen、Lai和Shieh<sup>[18]</sup>通过AK模型对环境污染与经济持续增长问题进行研究。Grimaud和Rougé<sup>[19]</sup>将环境污染和不可再生资源引入模型中,并假定资源使用是污染产生的原因,考察资源环境对可持续发展的影响。Antweiler、Copeland和Taylor<sup>[20]</sup>利用小国开放一般均衡模型,从开放经济角度考察环境与经济增长的内在关系,研究结果支持了最优增长模型关于环境与经济增长关系的基本结论。

### 1.2 国内研究现状

国内研究主要以王海建、彭水军等为代表。王海建<sup>[21]</sup>指出为达到经济可持续增长,人力资本增长率与资源投入增长率之比应大于资源与人力资本产出弹性之比,且消费跨期替代弹性应小于1。马利民、王海建<sup>[22]</sup>研究认为通过增加R&D部门劳动投入来推动技术进步会减缓资源消耗速度。彭水军等<sup>[23-25]</sup>认为在内生人力资本和内生技术进步模型中,无限制的增长是可持续的,且在环境污染约束下人力资本投资和研发创新是经济可持续发展的决定因素,如果经济中有足够的人力资本积累和较高的R&D产出效率,则可以保持经济最优可持续增长。于渤等<sup>[26]</sup>提出可持续发展的必要条件是消费跨期替代弹性小于1和经济增长速度与能源消耗递减速度之比大于1。

综上所述,已有的研究主要是探讨资源消耗或环境污染与经济增长的关系,但由于资源和环境同为可持续发展的关键因素,有必要将资源与环境问题结合起来予以研究,由于资源与环境也会影响消费者效用,所以应把资源与环境因素引入效用函数中予以分析.本文在已有研究的基础上,构建了一个自然资源约束、环境污染、污染控制、内生人力资本积累和内生技术进步的动态模型,来分析在人均资源消耗、环境污染和政府污染控制约束下的经济可持续增长问题.

## 2 模型的构建

### 2.1 代表性消费者的效用

为了分析可持续发展问题,必须综合地考虑福利的内涵. Ramsey模型的一个明显缺陷是,它假定追求尽可能高的消费效用水平是唯一的福利目标.实际上,福利包含除消费之外,还有资源环境、休闲等因素,因而效用函数本质上是一个多元函数.所以设定代表性消费者的效用不仅来自于物质产品的消费,也来自于其生活中自然资源的数量以及生存的环境质量水平.自然资源会给消费者带来正的效用,但环境污染会给消费者带来负的效用.借鉴 Grimaud 和 Rouge<sup>[27]</sup>采用的是可加的等弹性效用函数形式,与 Grimaud 和 Rouge的模型不同的是, Grimaud 和 Rouge的模型仅将环境质量加入效用函数,本文做了改进,将资源因素也考虑进效用函数中,这与文献[26]的做法相似.设定消费者的效用函数为  $U(C_t, N_t, E_t) = \frac{C_t^{1-\varepsilon} - 1}{1-\varepsilon} + \frac{N_t^{1-\delta} - 1}{1-\delta} - \frac{E_t^{1+\varphi}}{1+\varphi}$  其中  $C_t, N_t, E_t$  分别表示消费者在  $t$  时期消费的物质产品数量,自然资源数量和污染物的数量.  $U(C_t, N_t, E_t)$  为瞬时效用函数,假定代表性消费者以追求无限时域上所有瞬时效用贴现值加总的最大化为其目标,则代表性消费者的目标效用为  $\max_0 \int_0^{\infty} U(C_t, N_t, E_t) e^{-\rho t} dt$  其中  $\rho$  为主观时间贴现率. 参数  $\varepsilon$  和  $\varphi$  为正常数,分别衡量物质产品、自然资源与环境污染对消费者效用的影响程度.

### 2.2 物质产品部门的投入与产出

传统的经济增长模型主要使用物质资本、人

力资本、劳动力等生产要素来解释经济的增长,经济学家大多都没有考虑环境成本方面的问题.随着各国经济增长所导致的环境质量下降,以及消费者的环保意识的提高,经济增长的负面影响也逐渐被重视起来.目前环境已经不像古典经济学家所称的是一种免费的可以无限获得的特殊的生产要素,所以有必要将自然资源和污染控制这两个要素考虑到物质产品生产部门中.

设定物质产品部门的生产函数为 Cobb-Douglas型函数,为了问题分析的简化,假设劳动数量为 1 其生产函数具体形式为  $Y_t = A_t K_t^\alpha (H_t)^\beta R_t^{1-\alpha-\beta} z^{-1}$ , 其中  $0 < \alpha, \beta, 1 - \alpha - \beta < 1, 0 < \mu < 1$  分别表示生产函数是规模报酬不变和投入到物质产品生产部门的人均人力资本与所有人均人力资本的比率应是大于 0 小于 1.  $Y_t$  为  $t$  时期的人均产出,  $A_t$  为  $t$  时期物质产品部门的生产率水平,设定物质产品部门的生产率水平主要取决于生产技术的存量水平;  $K_t$  为  $t$  时期的人均物质资本;  $H_t$  为  $t$  时期的人均人力资本水平;  $\mu$  表示投入到物质产品生产部门的人均人力资本比率;  $R_t$  为  $t$  时期的自然资源的人均使用数量;  $z$  为污染控制的程度,且  $z \geq 1$   $z$  越大表示污染控制程度越高.假定污染控制程度  $z$  与产出成反比的关系,当  $z$  等于 1 时表示没有环境管制,此时生产函数不受环境的影响;当  $z$  趋近无穷大时表示政府污染控制达到了极点,将迫使物质产品部门不生产,此时物质产品部门的产量趋近于零.假设物质产品部门的产出除了用来消费,其余都用来作为物质资本进行投资再生产,设定物质资本折旧率为  $\phi$ ,则任意时点上的人均物质资本存量随时间的变化可以表示为  $\dot{K}_t = Y_t - C_t - \phi K_t$ .

### 2.3 人力资本的积累

人力资本主要指潜藏在人身的生产能力,如企业家才能、工人的生产技能等.由于人力资本像技术知识一样具有一定的外部性,所以人力资本积累具有非凸性.依循 Lucas<sup>[11]</sup> 的模型思想,人力资本的增加主要取决于人力资本的生产效率以及已有的人力资本的存量水平.为了问题的简化,人力资本部门的生产函数可以表示为  $\dot{H}_t = A_H t H_t$ , 其中  $0 < v < 1, \dot{H}_t$  为  $t$  时期人均人力资本的增量,  $A_H$  为人力资本积累效率系数,它是反映

人力资本部门的生产效率;  $v$  为投入到人力资本部门生产的人均人力资本的比率;  $H_t$  表示  $t$  时期经济体系中已有人均人力资本水平。

### 2.4 生产技术的研发

假定物质生产部门生产率  $A_Y$  的高低主要取决于人力资本存量水平, Jones<sup>[28]</sup> 在模型中将技术研发表示成技术存量与劳动投入量的线性形式, 且劳动的增长率是外生的。由于技术的研发需要高素质的人才, 所以本文的不同之处在于, 研发部门的技术研发主要取决于该部门的研发效率、技术存量和人力资本投入量, 且人力资本是内生的。其生产函数形式为  $\dot{A}_{Yt} = A_T [(1 - \mu - v)H_t]^\sigma$ , 其中  $\sigma > 0$   $0 < 1 - \mu - v < 1$   $A_T$  为研发效率参数;  $(1 - \mu - v)H_t$  为  $t$  时期投入到研发部门中的人均人力资本数量;  $\dot{A}_{Yt}$  为  $t$  时期技术知识的增量。 $\sigma > 0$  表示技术创新随着研发活动中人均人力资本投入量的增加而提高。

### 2.5 人均资源消耗

假定社会中的自然资源都是不可再生的, 设定初始资源人均总存量为  $N_0$ 。关于人均资源消耗模型参照了 Stiglitz<sup>[2]</sup> 的模型思想, 设定在任意时点上资源部门开采并出售给物质产品生产部门的人均资源数量是  $R_t$ 。假定资源部门的开采成本为零, 则任意时点上的资源存量变化为  $N_t = N_0 - \int_0^t r_t(v) dt$  对此式求导可得  $\dot{N}_t = -R_t$ , 即表示任意时点上人均资源的变化情况。

### 2.6 环境污染

本文借鉴 Chen, Lai 和 Shieh<sup>[18]</sup> 的模型思想, 但不同之处在于假定经济体中的污染是产出水平和污染控制程度的函数, 而不是私人资本投入和公共消减支出。这是因为, 一方面, 产出是主要的污染源; 另一方面, 政府污染控制程度则可以有效地降低污染排放。因此, 环境中人均污染的流量方程设定为  $P_t = Y_t^b z^{-\gamma}$ 。其中,  $P_t$  为  $t$  时期的人均污染物排放量;  $Y_t$  为  $t$  时期的物质产品的人均产出;  $z$  为政府污染控制程度;  $b$  为污染量的产出弹性;  $\gamma$  表示政府污染控制弹性, 即政府环境管制的效率。 $b, \gamma$  均大于 0 表示人均产出量越大, 人均污染物的排放量越大; 污染排放的产出弹性越大, 人均污染物的排放量越大。由于本文假定环境管制程度

$z \geq 1$  所以环境管制越严  $z$  越大, 人均污染物排放越少;  $\gamma$  越高人均污染排放越少, 表明政府环境管制效率越高。假定环境有一定的自我排解能力, 本文用  $\theta E_t$  表示人均污染物在任意时点上的衰减比例不变。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很复杂的过程, 这不在本文的讨论范围内。由于污染物的排放会降低环境质量, 而污染物的自我衰减能力又可以缓解环境污染的压力。最终可以将人均污染物排放的变化情况写成  $\dot{E}_t = P_t - \theta E_t = Y_t^b z^{-\gamma} - \theta E_t$ 。

## 3 均衡分析

### 3.1 最优平衡增长路径的求解

根据以上经济模型的假设, 依据物质产品部门的投入与产出、人力资本积累、技术研发、自然资源消耗以及环境污染的约束条件, 考察社会计划者决策的动态最优化问题 (为了书写的方便, 将省略时间下标  $t$ )

$$\begin{aligned} \max U(C, N, E) &= \max \int_0^{\infty} \left( \frac{C^{1-\varepsilon} - 1}{1-\varepsilon} + \frac{N^{1-\delta} - 1}{1-\delta} - \frac{E^{1+\varphi}}{1+\varphi} \right) e^{-\rho t} dt \\ \text{s.t. } Y &= A_Y K^\alpha (H)^\beta R^{1-\alpha-\beta} z^{-1} \\ \dot{K} &= Y - C - \phi K \\ \dot{H} &= A_H H \\ \dot{A}_Y &= A_T [(1 - \mu - v)H]^\sigma \\ \dot{N} &= -R \\ \dot{E} &= Y^b z^{-\gamma} - \theta E \end{aligned}$$

对此建立 Hamilton 函数

$$\begin{aligned} J &= \frac{C^{1-\varepsilon} - 1}{1-\varepsilon} + \frac{N^{1-\delta} - 1}{1-\delta} - \frac{E^{1+\varphi}}{1+\varphi} + \\ &\lambda_1 (Y - C - \phi K) + \lambda_2 A_H H + \\ &\lambda_3 A_T [(1 - \mu - v)H]^\sigma + \lambda_4 (-R) + \\ &\lambda_5 (Y^b z^{-\gamma} - \theta E) \end{aligned}$$

在 Hamilton 函数中, 状态变量分别为  $K, H, A_Y, N, E$ ; 控制变量分别为  $C, R, \mu, v, z$  共积变量分别为  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ , 同时这五个共积变量也分别表示  $K, H, A_Y, N, E$  的影子价格。

由最优化定理, 最大化  $J$  的一阶条件为

$$C^{-\varepsilon} = \lambda_1 \tag{1}$$

$$(\lambda_1 + bY^{b-1}z^{-\gamma}\lambda_5) \frac{1-\alpha-\beta}{R}Y = \lambda_4 \tag{2}$$

$$(\lambda_1 + bY^{b-1}z^{-\gamma}\lambda_5) \frac{\beta}{\mu}Y = \lambda_3 \sigma A_T H^\sigma (1-\mu-v)^{\sigma-1} \tag{3}$$

$$\lambda_2 A_H H = \lambda_3 \sigma A_T H^\sigma (1-\mu-v)^{\sigma-1} \tag{4}$$

$$\lambda_1 = -\lambda_5(b+\gamma)Y^{b-1}z^{-\gamma} \tag{5}$$

欧拉方程为

$$\dot{\lambda}_1 = \rho\lambda_1 - (\lambda_1 + bY^{b-1}z^{-\gamma}\lambda_5) \frac{\alpha}{K}Y + \phi\lambda_1 \tag{6}$$

$$\dot{\lambda}_2 = \rho\lambda_2 - (\lambda_1 + bY^{b-1}z^{-\gamma}\lambda_5) \frac{\beta}{H}Y - \lambda_2 A_H v - \lambda_3 \sigma A_T (1-\mu-v)^\sigma H^{\sigma-1} \tag{7}$$

$$\dot{\lambda}_3 = \rho\lambda_3 - (\lambda_1 + bY^{b-1}z^{-\gamma}\lambda_5) \frac{Y}{A_Y} \tag{8}$$

$$\dot{\lambda}_4 = \rho\lambda_4 - N^{-\delta} \tag{9}$$

$$\dot{\lambda}_5 = \rho\lambda_5 + E^\varphi + \theta\lambda_5 \tag{10}$$

横截性条件为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_1 K e^{-\rho t} = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_2 H e^{-\rho t} = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_3 A_Y e^{-\rho t} = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_4 N e^{-\rho t} = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_5 E e^{-\rho t} = 0$$

由式(1)、(5)、(6)可以得出稳态下的人均消费的增长路径为  $g_C = (1/\varepsilon)[\gamma\alpha Y/(b+\gamma)K - \rho - \phi]$  ( $g_i$ 表示变量  $i$ 的增长率  $\dot{i}/i$ )。由于在稳态的经济增长路径中,要求  $g_C$  为一常数,两边求导可知  $g_Y = g_K$ , 结合约束条件  $\dot{K} = Y - C - \phi K$  能够判断出  $g_Y = g_K = g_C$ ; 由式(3)、(4)、(7)可得  $g_{\lambda_2} = \rho - A_H$ ; 同理根据(1)~(10),并结合 Hamilton函数一系列约束条件可以得出以下关系

$$g_{\lambda_1} = -\varepsilon g_C$$

$$g_{\lambda_1} + g_Y = g_{\lambda_4} + g_R$$

$$g_{\lambda_1} + g_Y = g_{\lambda_3} + \sigma g_H$$

$$g_{\lambda_2} + g_H = g_{\lambda_3} + \sigma g_H$$

$$-\gamma g_z + (b-1)g_Y + g_{\lambda_5} = g_{\lambda_1}$$

$$g_{\lambda_4} = -\delta g_N$$

$$g_{\lambda_5} = \varphi g_E$$

$$g_H = A_H v$$

$$g_N = g_R$$

$$g_E = -\gamma g_z + b g_Y$$

$$g_{A_Y} = \sigma g_H$$

$$g_Y = g_{A_Y} + \alpha g_K + \beta g_H + (1-\alpha-\beta)g_R - g_z$$

联立以上方程组,可以求得最优增长路径上各变量的稳态增长率为

$$g_E = \frac{1-\varepsilon}{1+\varphi} g_Y \tag{11}$$

$$g_R = \frac{1-\varepsilon}{1-\delta} g_Y \tag{12}$$

$$g_z = \frac{\varepsilon-1+b(1+\varphi)}{\gamma(1+\varphi)} g_Y \tag{13}$$

$$g_H = (1-\varepsilon)g_Y + A_H - \rho \tag{14}$$

$$g_{A_Y} = \sigma(1-\varepsilon)g_Y + \sigma(A_H - \rho) \tag{15}$$

$$g_Y = (\beta + \sigma)(A_H - \rho) \left[ \frac{\varepsilon-1+b(1+\varphi)}{\gamma(1+\varphi)} - (\beta + \sigma)(1-\varepsilon) - \frac{(1-\alpha-\beta)(1-\varepsilon)}{1-\delta} \right]^{-1} \tag{16}$$

### 3.2 可持续最优平衡增长路径的存在性条件分析

通过对以上模型的求解,将稳态的经济可持续最优增长路径的必要条件限定为:人均经济增长率应为正数,而人均资源消耗和人均污染排放的增长率应为负数。这是因为如果不满足这个条件,则会出现要么经济增长衰退,要么人均资源消耗或人均污染排放逐渐增大,这都不是经济可持续最优增长路径。所以经济可持续最优增长的必要条件是  $g_Y > 0$ ,  $g_E < 0$ ,  $g_R < 0$ 。由式(11)、(12)、(16)可知满足这些条件时必须满足

$$\varepsilon > 1$$

$$\delta < 1$$

$$A_H > \rho$$

$\varepsilon > 1$ 表明任意两时点上产品消费之间的替代弹性  $(1/\varepsilon)$  在 0至 1之间,由于  $\varepsilon$ 也决定了消费者在不同时期转换消费的愿望, $\varepsilon$ 越大表明消费者消费物质产品的边际效用下降速度越快,所以对这种偏好的限制有利于保证理性消费者不会过于追求当前物质产品的消费,有利于保证消费者以“平滑型”的方式消费,从而不会导致物质产品部门大规模地生产,从而不会大量地消耗自然资源

源和破坏环境. 否则, 如果  $\varepsilon$  小于 1 将会使得消费边际效用下降速度很慢. 此时在时间贴现率不变的情况下, 消费者会增加当前消费与未来消费的比值, 这样的消费方式最终将会为了增加眼前的物质产品的消费而大力地破坏资源与环境, 从而不利于经济可持续增长.

当  $\delta < 1$  时, 这与  $\varepsilon > 1$  的情形恰好相反, 表明消费者很关注当前的自然资源. 因为  $\delta$  较小表明现期自然资源消费的边际效用比物质产品消费的边际效用下降的慢, 从而消费者对自然资源的需求大于对物质产品的需求. 由于自然资源是不可再生的, 这将“挤出”了物质产品部门的部分资源投入量, 从而降低了资源的消耗, 有利于资源的保护. 反之, 如果  $\delta$  大于 1 甚至大于  $\varepsilon$  则表明消费者消费自然资源的边际效用比消费物质产品的边际效用下降的快, 从而使得消费者以放弃自然资源为代价来换取物质产品的消费, 这样将不利于资源的保护和经济的可持续增长.

$A_H > \rho$  表明如果人力资本的积累的效率大于时间的贴现率, 将会使经济稳定地增长. 这是因为人力资本积累部门效率的提高有助于人力资本和生产技术的增长, 所以要求人力资本积累部门要

有足够的生产能力来保证经济的增长, 如果没有人力资本的大量积累将不会有经济的发展. 如果经济中人力资本积累是充分有效率的, 则可以克服污染外部性和消费者相对“缺乏耐心” (impatient)<sup>②</sup> 等的约束, 维持产出与消费的无限制增长.

综上所述, 将自然资源与环境污染问题纳入到内生人力资本积累和内生技术进步的模型中, 发现当产品消费的跨期替代弹性 ( $1/\varepsilon$ ) 大于 0 而小于 1, 自然资源消费的跨期替代弹性 ( $1/\delta$ ) 大于 1 以及人力资本积累充分有效时, 经济可持续增长的路径是可以实现的, 此时  $g_Y > 0$ ,  $g_E < 0$ ,  $g_R < 0$  从而在稳态经济增长中达到最优增长路径.

### 3.3 可持续最优平衡增长路径的比较静态分析

下面进一步考察代表性消费者偏好、物质产品部门投入产出弹性、研发部门投入产出弹性、政府污染控制效率等变量的变化对长期经济可持续最优增长路径的影响. 在  $\rho < A_H$ ,  $\varepsilon > 1$ ,  $0 < \delta < 1$ ,  $\varphi > 0$ ,  $0 < \alpha < 1$ ,  $0 < \beta < 1$ ,  $\sigma > 0$ ,  $b > 0$ ,  $z \geq 1$  的条件约束下, 通过对 (11)、(12)、(16) 求偏导数, 容易得到表 1.

表 1 稳态下的可持续最优增长路径的影响因素分析<sup>③</sup>

Table 1 Influencing of parameters on steady optimal growth path

$\xi$	消费偏好				物质产品部门投入产出弹性		人力资本积累效率	技术研发投入产出弹性	污染排放的产出和控制弹性	
	$\xi = \rho$	$\xi = \varepsilon$	$\xi = \delta$	$\xi = \varphi$	$\xi = \alpha$	$\xi = \beta$	$\xi = A_H$	$\xi = \sigma$	$\xi = b$	$\xi = \gamma$
$\partial g_Y / \partial \xi$	< 0	< 0	< 0	< 0	> 0	> 0	> 0	> 0	< 0	> 0
$\partial g_E / \partial \xi$	> 0	< 0	> 0	> 0	< 0	< 0	< 0	< 0	> 0	< 0
$\partial g_R / \partial \xi$	> 0	< 0	< 0	> 0	< 0	< 0	< 0	< 0	> 0	< 0

#### 1) 消费偏好对长期经济最优增长路径的影响

从表 1 可以看出消费者的时间贴现率  $\rho$  越大, 稳态中人均经济增长率越低, 污染增长率和人均资源消耗增长率越高. 这是因为  $\rho$  越大意味着消费者越“缺乏耐心”, 因此相对于未来消费而言,

当前消费能够给消费者带来更大的效用, 即消费者对未来消费效用的评价较低, 因此消费者将会增加当前的消费, 消费的增加将提高当前的产出水平, 进而使得人均资源消耗和污染排放的增加, 加大了自然资源的消耗, 同时也不利于环境质量的改善. 同时  $\rho$  越大表明消费者的可持续发展的

② “缺乏耐心”是指对于未来消费而言, 消费者更偏好于当前消费.

③  $\xi$  分别代表  $\rho, \varepsilon, \delta, \varphi, \alpha, \beta, A_H, \sigma, b, z$  的情况下,  $\partial g_Y / \partial \xi, \partial g_E / \partial \xi, \partial g_R / \partial \xi$  的正负, 以此分别判定变量  $\rho, \varepsilon, \delta, \varphi, \alpha, \beta, A_H, \sigma, b, z$  与  $g_Y, g_E, g_R$  的正负相关性.

意识越弱,越不利于长期的经济增长。

$\varepsilon$ 越大表示任意两时点上物质产品消费之间的替代弹性越低,消费者对物质产品消费的效用函数越“弯曲”,边际效用递减速度越快,消费者越不偏爱当前消费,稳态的人均经济增长率越低。同时在消费函数中,当物质产品的消费与资源和环境的需求互补时,消费增长会带来资源与环境质量需求的提高,则经济越容易达到可持续最优增长;反之,当物质产品的消费与资源和环境需求互为替代时,则消费的增长是以牺牲资源与环境为代价,或者为了提高资源和环境的质量而限制消费,则越难实现可持续最优增长。这里发现,消费者对物质产品的消费与资源和环境的需求存在一定的替代关系,所以会出现随着  $\varepsilon$  的增大,稳态中人均经济增长率有下降的趋势,然而资源与环境却有改善的趋势。

$\delta$ 越大稳态中人均经济增长率和资源消耗增长率越低,然而稳态的污染排放增长率越高。这表明消费者对自然资源消费的边际效用下降越快的情况下,消费者对自然资源的偏好越小,越不利于经济可持续增长。在其他条件不变的情况下,人均经济增长率越低,资源消耗增长率越低,然而稳态时的环境污染速度却提高了。这说明经济增长与环境协调发展还是要由生产方式和政府的污染控制措施来决定,否则就会出现随着经济增长,人均污染速度就会越快的尴尬局面。

消费者对环境质量的偏好程度越高  $\varphi$  越大,类似于环保意识越强,从而在一定程度上会限制经济增长速度,虽然人均污染排放量和人均资源消耗量有下降的趋势(人均污染排放增长率和人均资源消耗增长率仍为负数),但稳态时的污染排放增长率和自然消耗增长率却没有下降。这说明节能减排问题主要靠生产技术或政府有效的管制来解决,仅仅依靠消费者提高环保意识是很难实现节能减排目标的。

2) 物质生产部门要素产出弹性对长期经济最优增长路径的影响

从表 1 可以看出,提高物质资本和人力资本要素的产出弹性,会提高稳态中人均经济增长率,降低人均环境污染速度和人均资源消耗速度。这点很容易理解,主要是由于生产要素产出能力的

提高有助于经济从粗放型向集约型转化,从而有利于长期经济可持续增长。

3) 人力资本积累效率对长期经济最优增长路径的影响

表 1 表明随着人力资本积累的效率参数  $A_H$  的提高,意味着人力资本的边际报酬提高,从而有利于人力资本的积累和技术的研发,从而有利于经济长期增长和资源与环境的改善。

4) 研发部门产出弹性对长期经济最优增长路径的影响

研发部门的人力资本产出弹性越高,越有利于稳态的人均经济增长率,同时也会降低稳态经济中的环境污染速度和人均资源消耗速度。这主要是因为人力资本产出弹性越高,物质产品部门的生产率越高,单位产出的资源消耗量和污染排放量降低,从而有利于长期经济可持续增长。

5) 污染排放的产出和控制弹性对长期经济最优增长路径的影响

表 1 表明污染的产出弹性越大,稳态的人均经济增长率越低,人均资源消耗和污染排放增长率越高,这说明依靠高污染为代价的产出在长期是不利于经济可持续发展的。政府污染控制效率的提高会促使稳态中的人均经济增长率的提升,同时又促使人均资源消耗增长率和污染排放增长率的降低。这点说明了环境管制效率的重要性,管制仅仅是一种手段而不是目的,要注重环境管制政策的使用效率。在本文中,并没有说明政府使用何种管制手段,但从本文的经济模型中可以看出,环境管制的效率主要体现在对产出的负面影响最小化和促使污染排放最小化的思想。这点启示就是政府环境管制政策的效率应体现在提高企业的清洁生产水平,这样才能达到经济的最优增长。

## 4 模拟检验

类似于阿诺(Arnold)的做法,选取各参数的经验值如表 2 所示。此时在满足必要性条件的情况下,存在  $g_Y > 0$   $g_E < 0$   $g_R < 0$  稳态的人均经济增长率、资源消耗增长率与污染排放增长率受各参数变量的影响情况如表 2 所示。

表 2 稳态条件下经济可持续增长路径的数值模拟

Table 2 Numerical simulation test of steady optimal growth path

编号	$\rho$	$\varepsilon$	$\delta$	$\varphi$	$\alpha$	$\beta$	$A_H$	$\sigma$	$b$	$\gamma$	$g_Y$	$g_E$	$g_R$
1	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	7.604 6%	-1.17%	-2.535%
2	0.11	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	7.224 3%	-1.111%	-2.408%
3	0.12	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	6.844 1%	-1.053%	-2.281%
4	0.13	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	6.463 9%	-0.994%	-2.155%
5	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	7.604 6%	-1.17%	-2.535%
6	0.1	1.3	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	6.128 7%	-1.414%	-3.064%
7	0.1	1.4	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	5.132 6%	-1.579%	-3.422%
8	0.1	1.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	4.415%	-1.698%	-3.679%
9	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	7.604 6%	-1.17%	-2.535%
10	0.1	1.2	0.5	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	7.490 6%	-1.152%	-2.996%
11	0.1	1.2	0.6	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	7.326%	-1.127%	-3.663%
12	0.1	1.2	0.7	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	7.067 1%	-1.087%	-4.711%
13	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	7.604 6%	-1.17%	-2.535%
14	0.1	1.2	0.4	0.4	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	7.177%	-1.025%	-2.392%
15	0.1	1.2	0.4	0.5	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	6.779 7%	-0.904%	-2.26%
16	0.1	1.2	0.4	0.6	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	6.410 3%	-0.801%	-2.137%
17	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	7.604 6%	-1.17%	-2.535%
18	0.1	1.2	0.4	0.3	0.3	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	8.010 7%	-1.232%	-2.67%
19	0.1	1.2	0.4	0.3	0.4	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	8.462 6%	-1.302%	-2.821%
20	0.1	1.2	0.4	0.3	0.5	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	8.968 6%	-1.38%	-2.99%
21	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	7.604 6%	-1.17%	-2.535%
22	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3	0.8	0.1	0.3	8.407 6%	-1.293%	-2.803%
23	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.4	0.3	0.8	0.1	0.3	9.219%	-1.418%	-3.073%
24	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.5	0.3	0.8	0.1	0.3	10.038 6%	-1.544%	-3.346%
25	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	7.604 6%	-1.17%	-2.535%
26	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.31	0.8	0.1	0.3	7.984 8%	-1.228%	-2.662%
27	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.32	0.8	0.1	0.3	8.365%	-1.287%	-2.788%
28	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.33	0.8	0.1	0.3	8.745 2%	-1.345%	-2.915%
29	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	7.604 6%	-1.17%	-2.535%
30	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.9	0.1	0.3	8.301 9%	-1.277%	-2.767%
31	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	1	0.1	0.3	8.988 8%	-1.383%	-2.996%
32	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	1.1	0.1	0.3	9.665 4%	-1.487%	-3.222%
33	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	7.604 6%	-1.17%	-2.535%
34	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.11	0.3	7.445 1%	-1.145%	-2.482%
35	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.12	0.3	7.292 2%	-1.122%	-2.431%
36	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.13	0.3	7.145 4%	-1.099%	-2.382%
37	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.3	7.604 6%	-1.17%	-2.535%
38	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.31	7.740 3%	-1.191%	-2.58%
39	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.32	7.872 1%	-1.211%	-2.624%
40	0.1	1.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.8	0.1	0.33	8%	-1.231%	-2.667%

在表2中,时间贴现率( $\rho$ )、物质产品消费对效用的影响系数( $\varepsilon$ )、资源消费对效用的影响系数( $\delta$ )、污染排放对效用的影响系数( $\varphi$ )、物资资本产出弹性( $\alpha$ )、人力资本产出弹性( $\beta$ )、人力资本积累效率( $A_H$ )、技术研发投入产出弹性( $\sigma$ )、污染排放的产出弹性( $b$ )和污染的控制弹性( $\gamma$ )的初始值分别为0.1, 1.2, 0.4, 0.3, 0.2, 0.3, 0.8, 0.1, 0.3。此时稳态的经济增长率为7.604%, 污染排放增长率为-1.17%, 资源消耗增长率为-2.535%。通过编号1~4可以看出当 $\rho$ 分别变为0.11, 0.12, 0.13时, 稳态的经济增长率分别下降为7.2243%、6.8441%、6.4639%; 而污染排放增长率却有上升的趋势, 分别为-1.111%、-1.053%、-0.994%; 资源消耗增长率也有上升的趋势, 分别为-2.408%、-2.281%、-2.155%。这说明时间贴现率与稳态的经济增长率成负相关关系, 与稳态的污染排放增长率和稳态的资源消耗增长率成正相关关系。

同理, 通过编号5~8可以看出,  $\varepsilon$ 与 $g_Y$ 、 $g_E$ 和 $g_R$ 都成负相关关系。通过编号9~12可以看出,  $\delta$ 与 $g_Y$ 和 $g_R$ 成负相关关系, 与 $g_E$ 成正相关关系。通过编号13~16可以看出,  $\varphi$ 与 $g_Y$ 成负相关关系、与 $g_E$ 和 $g_R$ 成正相关关系。通过编号17~20可以看出,  $\alpha$ 与 $g_Y$ 成正相关关系、与 $g_E$ 和 $g_R$ 成负相关关系。通过编号21~24可以看出,  $\beta$ 与 $g_Y$ 成正相关关系、与 $g_E$ 和 $g_R$ 成负相关关系。通过编号25~28可以看出,  $A_H$ 与 $g_Y$ 成正相关关系、与 $g_E$ 和 $g_R$ 成负相关关系。通过编号29~32可以看出,  $\sigma$ 与 $g_Y$ 成正相关关系、与 $g_E$ 和 $g_R$ 成负相关关系。通过编号33~36可以看出,  $b$ 与 $g_Y$ 成负相关关系、与 $g_E$ 和 $g_R$ 都成正相关关系。通过编号37~40可以看出,  $\gamma$ 与 $g_Y$ 成正相关关系、与 $g_E$ 和 $g_R$ 成负相关关系。通过模拟结果可以进一步验证以上的理论分析。

## 参考文献:

[1] Dasgupta P S, Heal G. Economic Theory and Exhaustible Resources[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1979: 32-58.

[2] Stiglitz J. Growth with exhaustible natural resources: Efficient and optimal growth paths[J]. Review of Economic Studies

## 5 结 论

首先, 如果消费者不过于追求当前物质产品的消费(产品消费跨期替代弹性 $1/\varepsilon$ 大于0小于1), 消费者对当前的自然资源关注程度比较高(自然资源消费的跨期替代弹性 $1/\delta$ 大于1), 以及经济中有足够的人力资本积累效率(人力资本积累效率 $A_H$ 大于消费的时间贴现率 $\rho$ ), 经济可持续最优增长路径是可以实现的。

其次, 对于代表性消费者而言, 在最优路径中, 消费的时间贴现率越大, 消费者的可持续发展的意识越弱, 稳态中人均经济增长率越低, 人均污染增长率和人均资源消耗增长率越高。越不利于经济可持续发展, 这表明政府有必要通过政策宣传来提高消费者的可持续发展意识。消费者越偏好未来的消费, 越有利于经济可持续发展, 这表明政府有必要引导消费者理性消费。对于物质生产部门而言, 物质资本和人力资本要素的产出弹性越大, 越有利于经济可持续发展。对于人力资本积累而言, 人力资本积累的效率越高, 越有利于经济可持续发展。对于研发部门而言, 人力资本产出弹性越高, 越有利于经济可持续发展。这表明政府应注重要素的生产效率, 不仅要重视经济增长的数量, 更要重视经济增长的质量, 提高经济增长的效益和质量, 政府应注重技术的积累, 有必要制订相关政策鼓励研发活动, 应重视人力资本的积累, 完善制度, 创造良好的人力资本成长环境, 提高人力资本的积累效率。

最后, 污染的产出弹性越大, 稳态的人均经济增长率越低, 人均资源消耗和污染排放增长率越高, 这说明依靠高污染为代价的产出在长期是不利于经济可持续发展的。政府污染控制效率越高, 越有利于稳态中人均经济增长率的提高和资源与环境的改善。这点说明了环境管制效率的重要性, 政府制订和实施环境管制政策时, 要注重政策的使用效率。

- 1974 41(Symposium): 123- 137
- [ 3] Solow R. Intergenerational equity and exhaustible resources[ J]. *Review of Economic Studies*, 1974 41( Symposium Issue): 29- 46
- [ 4] Gang P C, Sweeney J L. Optimal growth with depletable resources[ J]. *Resources and Energy*, 1978 1( 1): 43- 56
- [ 5] Keeler E, Spence M, Zeckhauser R. The optimal control of pollution[ J]. *Journal of Economic Theory*, 1972 4( 1): 19- 34
- [ 6] D' Arge R C, Kogiku K C. Economic growth and the environment[ J]. *Review of Economic Studies*, 1973 40( 1): 61- 77
- [ 7] Foster B A. Optimal capital accumulation in a polluted environment[ J]. *Southern Economic Journal* 1973 39( 4): 544- 547
- [ 8] Becker R A. Intergenerational equity: The capital-environment trade-off[ J]. *Journal of Environmental Economics and Management* 1982 9( 2): 162- 185
- [ 9] Chichihisky G. Global environment and north-South trade[ J]. *American Economic Review*, 1994 84( 4): 851- 874
- [ 10] Romer P. Endogenous technological change[ J]. *Journal of Political Economy*, 1990 98( 5): 71- 102
- [ 11] Lucas R. On the mechanics of economic development[ J]. *Journal of Monetary Economics*, 1988 22( 1): 3- 42
- [ 12] Gosan G M, Helpm E. Innovation and Growth in the Global Economy[M]. Cambridge M I T Press, 1991: 43- 61
- [ 13] Aghion P, Howitt P. Endogenous Growth Theory[M]. Cambridge M I T Press, 1998 3- 105
- [ 14] Bovenberg A S, Smulders S. Environment quality and pollution augmenting technological change in a two sector endogenous growth model[ J]. *Journal of Public Economics* 1995 57( 3): 369- 391
- [ 15] Lopez R. Environmental externalities in traditional agriculture and the impact of trade liberalization: The case of Ghana [ J]. *Journal of Development Economics* 1997, 53( 1): 17- 39
- [ 16] Selden T, Song D. Environmental quality and development: Is there a Kuznetz curve for air pollution emissions[ J]? *Journal of Environmental Economics and Management* 1994, 27( 2): 147- 162
- [ 17] Stokey N L. Learning by doing and the introduction of new goods[ J]. *Journal of Political Economy* 1988 96( 4): 701- 717
- [ 18] Chen JH, Lai C, Shieh JY. Anticipated environmental policy and transitional dynamics in an endogenous growth model [ J]. *Environmental and Resource Economics* 2003, 25( 2): 233- 254
- [ 19] Grimaud A, Rouge L. Non-renewable resources and growth with vertical innovations: Optimum, equilibrium and economic policies[ J]. *Journal of Environmental Economics and Management* 2003, 45( 2): 433- 453
- [ 20] Antweiler W, Copeland B R, Taylor M S. Is free trade good for the environment [ J]? *American Economic Review*, 2001, 91( 3): 877- 908
- [ 21] 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)
- [ 22] 马利民, 王海建. 耗竭性资源约束之下的 R&D 内生经济增长模型 [ J]. *预测*, 2001, 20( 4): 62- 64  
Ma Lin, Wang Haijian. An R&D endogenous growth model under the constraints of exhaustible resources[ J]. *Forecasting* 2001, 20( 4): 62- 64 ( in Chinese)
- [ 23] 彭水军, 包群. 环境污染、内生经济增长与经济可持续发展 [ J]. *数量经济技术经济研究*, 2006, 23( 9): 114- 126  
Peng Shujun, Bao Qun. Environmental pollution, endogenous growth and sustainable development[ J]. *Quantitative & Technical Economic Research*, 2006, 23( 9): 114- 126 ( in Chinese)
- [ 24] 彭水军, 包群, 赖明勇. 自然资源耗竭、内生技术进步与经济可持续发展 [ J]. *上海经济研究*, 2005, ( 3): 3- 13  
Peng Shujun, Bao Qun, Lai Mingyong. Natural resource depletion, endogenous technological progress and sustainable economic growth[ J]. *Shanghai Economic Research*, 2005, ( 3): 3- 13 ( in Chinese)
- [ 25] 彭水军. 自然资源耗竭与经济可持续增长: 基于四部门内生增长模型分析 [ J]. *管理工程学报*, 2007, 21( 4): 417- 421  
Peng Shujun. Natural resource depletion and sustainable economic growth based on a four-sector endogenous growth model

- [ J]. *Journal of Industrial Engineering & Engineering Management* 2007, 21(4): 417–421. ( in Chinese)
- [ 26] 于 渤, 黎永亮, 迟春洁. 考虑能源耗竭, 污染治理的经济持续增长内生模型 [ J]. *管理科学学报*, 2006, 9(4): 12–17.
- Yu Bo, Li Yongliang, Chi Chunjie. Endogenous model with exhaustible energy, pollution abatement spending and sustainable growth induced [ J]. *Journal of Management Science*, 2006, 9(4): 12–17. ( in Chinese)
- [ 27] Grinaud A, Rouge L. Polluting non-renewable resources, innovation and growth: Welfare and environmental policy [ J]. *Resource and Energy Economics*, 2005, 27(2): 109–129.
- [ 28] Jones C. R&D-based models of economy growth [ J]. *Journal of Political Economy*, 1995, 103(4): 759–784.

## Sustainable optimal economic growth path under resource consumption and pollution control

XU Shi-chun<sup>1</sup>, HE Zheng-xia<sup>2</sup>, WEI Xiaoping<sup>1</sup>

1. Management School, China's University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2. Economics School, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221009, China

**Abstract** Based on R&D endogenous economic growth model, this paper presents a model with exhaustible resources and environment control to obtain the optimal economic growth path solutions. Moreover, the prerequisites to sustainable optimal growth path are discussed based on these solutions. It is found that through the comparative static analysis of variables and numerical simulation test, consumption, intertemporal substitution elasticity, time discount rate, human capital accumulation efficiency, output elasticity of product sector and R&D sector, pollution output elasticity, and pollution control elasticity have effects on stable growth rate of economy, pollutant emissions and resource consumption.

**Key words** resources consumption, pollution control, sustainable growth, optimal growth path