排污税调节下厂商绿色技术创新投资动态控制策略研究

易永锡,程粟粟①
(南华大学 经济管理与法学学院,湖南 衡阳 421001)

[摘　要] 考虑政府对厂商污染物排放总量征收排污税以及厂商绿色技术创新中的“干中学”,在 Dragone 等的基础上构建了一个新的垄断厂商绿色技术创新投资动态控制模型。模型分析的结果表明:其一,并不是排污税率越高对厂商绿色创新的激励作用越强,而是存在一个税率的临界值,过了临界值随着排污税率的提高绿色技术创新反而减少。其二,垄断者最优与社会规划者最优下的稳态均衡均具有鞍点均衡性质。其三,存在一个最优的排污税率,该排污税率下垄断者最优的社会福利恰好等于社会规划者最优时的社会福利。

[关键词] 绿色技术创新; 排污税; 干中学; 动态控制策略
[中图分类号] F812.42;F279.23 [文献标识码] A [文章编号] 1673-0755(2018)06-0089-07

实现社会、经济、生态可持续发展,其根本途径在于激励厂商进行绿色技术创新,以降低单位产品污染物的排放量[1]。由于绿色技术创新投资具有“双重外部性”特点,厂商缺乏明确的经济激励去主动实施绿色技术创新,使得政府需要制定相关的环境规制,通过强迫和诱使两种方式影响厂商所有者对自然环境的态度[2]。Porter 等也强调环境规制的重要作用,认为适当的环境规制可以促使厂商进行更多的创新活动,并且这些绿色创新将提高厂商的竞争力[3]。

在当前所使用的环境规制政策中,排污税政策被各国所广泛使用。排污税下的厂商绿色技术创新行为及其影响也成为了学界密切关注的问题。Dragone 等[4]运用随机最优控制模型分析了厂商在排污税下的污染治理投资行为,并对排污税率的设计进行了探讨。Presley[5]对最优排污税进行了分析,并分别提出了高、中、低收入国家最优排污税的具体标准。Pal 等[6]考虑到政府同时实行私有化和排污税政策时,发现私有化水平变化对环境质量的影响是非单调的。赵文会等[7]发现当存在不对称跨区域污染时,自由交易的排污权交易市场无法实现社会财富最大化,需要通过设置地方排污权对排污权交易市场进行干预。马祖军等[8]发现政府社会福利最大的碳税政策受环境成本的影响,当市场需求较大且环境成本系数较高时,引导厂商采用低碳技术的目标和社会福利最大化的目标可以同时实现。根据 Dragone 等[4]的研究,本文分析了厂商绿色技术创新投资行为,其中,政府环境规制政策是厂商投资的重要驱动力量。此外,在投资过程中的干中学也是考虑的重要因素,对于此问题,Arrow[9]、Argotte 等[10]、Pe'rez 等[11]、Bouché[12]和 Li[13]进行了卓有成效的研究。在其开创性研究中,Arrow[9]分析了投资成本曲线与干中学导致的知识积累的关系,发现随着知识积累的增加,投资成本呈下降趋势。Argotte 等[10]认为知识积累是投资的直接结果,同时也是生产经验的副产品。Pe'rez 等[11]构建了一个干中学下的技术采纳模型。Bouché[12]提出了一个经济增长模型,分析的结果表明,通过干中学可以实现内生经济增长。Li[13]认为,干中学是投资和生产效率改善的重要途径。

总之,本文扩展 Dragone 等[4]的研究,建立一个新的排污税调节下的厂商绿色技术创新投资决策模型。与 Dragone 等[4]的模型不同的是,第一,考虑对厂商所征收的“排污税”以污染物总量征收,而

[收稿日期] 2018-10-08
[基金项目] 湖南省哲学社会科学基金项目“环境规则的绿色创新激励机制研究”资助(编号:16YBA315);湖南省哲学社会科学基金项目“企业绿色创新激励机制研究”资助(编号:18YBA368);湖南省自然科学基金项目“流域跨界生态补偿机制研究”资助(编号:2018JJ2335);衡阳市社科基金项目“湘江流域跨界生态补偿机制研究”资助(编号:2018D020);南华大学研究生科研基金项目“企业产品与工艺创新策略研究”资助(编号:2018KYZ033)
[作者简介] 易永锡(1965-),男,湖南湘潭人,南华大学经济管理与法学学院教授,博士。
①南华大学经济管理与法学学院硕士研究生。

Dragone 等[4]分析的排污税是对单位产品污染物排放率征收。由于单位产出污染物排放量存在计量上的技术性障碍,显然,我们所“设计”的排污税更具现实可操作性。第二,绿色技术创新中的“干中学”被引入模型,因为干中学是影响厂商投资行为的重要因素[9-13],引入“干中学”因素使得本研究更接近于现实。通过模型分析,得出了几个有重要理论和现实意义的结论。

一 基本模型

考虑一个生产单一产品的垄断厂商,在任意时间 $t \in [0, +\infty)$ 内面临的瞬时反需求函数为:

$$p(t) = a - Q(t) \tag{1}$$

其中:$p(t)$ 表示产品的瞬时市场价格;$a>0$ 代表消费者对产品的保留价格,$Q(t) \in [0, a-c]$ 表示垄断厂商的产量水平,$c \in [0, a]$ 为边际成本。厂商在生产过程中不可避免地会排放污染物,污染物存量 $S(t)$ 随时间 $t \in [0, +\infty)$ 变化的变动服从下列动态方程[4]。

$$\dot{S}(t) = b(t)Q(t) - \delta S(t) \tag{2}$$

其中:$\delta>0$ 表示自然环境对污染物净化的净化率,$b(t)$ 表示厂商生产一单位产品排放的污染物(本文解释为绿色技术水平),如果厂商的生产技术越绿色化,则 $b(t)$ 越小,那么生产单位产品排放的污染物也就越少。绿色技术水平可以通过绿色技术创新投资来提高,其动态方程如下:

$$\dot{b}(t) = -k(t) + \eta b(t) \tag{3}$$

式中 $k(t)$ 表示厂商对绿色技术创新的投资。

根据文献[7-11],考虑厂商绿色技术创新投资过程中存在的知识积累,且其积累过程服从下运动方程:

$$\dot{A}(t) = \mu k(t) - \gamma A(t) \tag{4}$$

式中 $A(t)$ 表示绿色技术创新知识积累的数量,$\mu, \gamma>0$ 分别表示知识积累的增长率与遗忘率。

在 Dragone 和 Lambertini[4] 的研究中,厂商的研发投入成本仅与研发投入水平 $k(t)$ 有关,即 $C(k(t)) = \alpha k^2(t)$,$\alpha>0$ 表示为厂商研发投资效率。Arrow[9]认为在技术创新过程中,随着积累的经验越来越多,厂商研发投入的成本呈下降的趋势。我们将 Li[13] 等人关于干中学对生产成本影响的思想引入到本文中,即“干中学”下厂商的研发投入成本为:

$$C(k(t), A(t)) = \alpha k^2(t) - \beta[A(t) - A_0] \tag{5}$$

式中 $\beta>0$ 表示知识积累学习率。

为了激励厂商进行绿色技术创新,政府对厂商排污征收排污税。与 Dragone 和 Lambertini[4] 设想的对“单位产品排污率”征税不同,本文考虑的是一种更具现实可操作性的排污税,即对厂商的排污量征税,对厂商征收的排污税总量为 $\tau b(t)Q(t)$,其中 τ 为排污税税率。

综上,可以得到在排污税、“干中学”下厂商的瞬时利润函数:

$$\pi(t) = [p(t) - c]Q(t) - C(k(t), A(t)) - \tau b(t)Q(t) \tag{6}$$

接下来,我们研究垄断厂商最优行为和社会规划者最优行为下的投资水平 $k(t)$、产量水平 $Q(t)$ 以及社会福利最大化的最优税率 τ。

二 垄断者最优

垄断者的目标是发现能够达到最大利润现值的投资水平 $k(t)$ 和产量 $Q(t)$,即:

$$\prod = \max_{k,Q} \int_0^{+\infty} e^{-\rho t}[(a - c - Q(t))Q(t) - C(k(t), A(t)) - \tau b(t)Q(t)]dt$$

$$S.t \begin{cases} \dot{S}(t) = b(t)Q(t) - \delta S(t) \\ \dot{b}(t) = -k(t) + \eta b(t) \\ \dot{A}(t) = \mu k(t) - \gamma A(t) \end{cases} \tag{7}$$

式中 $\rho>0$ 表示折现率。

目标函数式(7)对应的现值汉密尔顿函数为:

$$H = (a - c - Q(t))Q(t) - \alpha k^2(t) + \beta[A(t) - A_0] - \tau b(t)Q(t) + \lambda_1(t)[b(t)Q(t) - \delta S(t)] + \lambda_2(t)[-k(t) + \eta b(t)] + \lambda_3(t)[\mu k(t) - \gamma A(t)] \tag{8}$$

式中 $\lambda_1(t), \lambda_2(t), \lambda_3(t)$ 分别是状态变量 $S(t)$, $b(t)$, $A(t)$ 的影子价格。最大化现值汉密尔顿函数(8)的一阶条件和共态方程如下:

$$\frac{\partial H}{\partial k(t)} = -2\alpha k(t) - \lambda_2(t) + \mu\lambda_3(t) = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial H}{\partial Q(t)} = a - c - 2Q(t) + \lambda_1(t)b(t) - \tau b(t) = 0 \tag{10}$$

$$\dot{\lambda}_1(t) = \rho\lambda_1(t) - \frac{\partial H}{\partial S(t)} = (\rho + \delta)\lambda_1(t) \tag{11}$$

$$\dot{\lambda}_2(t) = \rho\lambda_2(t) - \frac{\partial H}{\partial b(t)} = (\rho - \eta)\lambda_2(t) - \lambda_1(t)Q(t) + \tau Q(t) \tag{12}$$

$$\dot{\lambda}_3(t) = \rho\lambda_3(t) - \frac{\partial H}{\partial A(t)} = (\rho + \gamma)\lambda_3(t) - \beta \tag{13}$$

相应的边界条件为:$\lim_{t\to\infty} e^{-\rho t}\lambda_1(t)S(t) = 0$, $\lim_{t\to\infty} e^{-\rho t}$

$\lambda_2(t)b(t)=0$ 和 $\lim_{t\to\infty}e^{-\rho t}\lambda_3(t)A(t)=0$。

由等式(9)和动态表达式(11)、(12)以及(13)可得厂商的研发投资水平 $k(t)$ 的动态方程,即:

$$\dot{k}(t)=(\rho-\eta)k(t)+\frac{\mu(\gamma+\eta)\lambda_3(t)}{2\alpha}-\frac{[a-c-2Q(t)]Q(t)}{2\alpha b(t)}-\frac{\beta\mu}{2\alpha} \tag{14}$$

由动态表达式(14)可得:

$$\frac{\partial\dot{k}(t)}{\partial\beta}=-\frac{\mu}{2\alpha}<0 \tag{15}$$

$$\frac{\partial\dot{k}(t)}{\partial\gamma}=\frac{\mu\lambda_3(t)}{2\alpha}\propto\lambda_3(t) \tag{16}$$

$$\frac{\partial\dot{k}(t)}{\partial\mu}=\frac{(\gamma+\eta)\lambda_3(t)-\beta}{2\alpha} \tag{17}$$

下面我们研究在影子价格 $\lambda_3(t)$ 稳态值附近,知识积累增长率 μ 与遗忘率 γ 对厂商研发投入率 $\dot{k}(t)$ 的影响。由式(13)可以得到影子价格 $\lambda_3(t)$ 稳态值 $\bar{\lambda}_3$,即 $\bar{\lambda}_3=\frac{\beta}{\rho+\gamma}$,将 $\bar{\lambda}_3$ 分别代入(16)和(17)中可以得到:

$$\left.\frac{\partial\dot{k}(t)}{\partial\gamma}\right|_{\bar{\lambda}_3}=\frac{\beta\mu}{2\alpha(\rho+\gamma)}>0、\left.\frac{\partial\dot{k}(t)}{\partial\mu}\right|_{\bar{\lambda}_3}=-\frac{\beta(\rho-\eta)}{2\alpha(\rho+\gamma)}$$

以上分析可总结为命题 1。

命题 1:在垄断者最优条件下,$\forall t\in[0,\infty)$,$\frac{\partial\dot{k}(t)}{\partial\beta}<0$、$\left.\frac{\partial\dot{k}(t)}{\partial\gamma}\right|_{\bar{\lambda}_3}>0$ 和 $\left.\frac{\partial\dot{k}(t)}{\partial\mu}\right|_{\bar{\lambda}_3}=-\frac{\beta(\rho-\eta)}{2\alpha(\rho+\gamma)}\begin{cases}>0,\text{if } \eta>\rho\\=0,\text{if } \eta=\rho\\<0,\text{if } \eta<\rho\end{cases}$

命题 1 表明:1.厂商研发投入率 $\dot{k}(t)$ 随着知识积累学习率 β 的增加而减少;2.在影子价格 $\lambda_3(t)$ 稳态值附近,厂商研发投入率 $\dot{k}(t)$ 随着知识积累遗忘率 γ 的增加而增加;3.影子价格 $\lambda_3(t)$ 稳态值附近,当知识积累学习率 η 低于折现率 ρ 时,厂商研发投入率 $\dot{k}(t)$ 随着知识积累增长率 μ 的增加而减小。

由等式(9)和动态表达式(11)可以得到垄断者最优下产量 $Q(t)$ 的变动方程,即:

$$\dot{Q}(t)=\frac{a-c-2Q(t)}{2b(t)}[k(t)-(\rho+\delta+\eta)b(t)]+\frac{\tau(\rho+\delta)b(t)}{2} \tag{18}$$

由动态方程式(2)、(3)、(4)、(13)、(14)和(18)可得如下动态控制系统:

$$\begin{cases}\dot{k}(t)=(\rho-\eta)k(t)+\frac{\mu(\gamma+\eta)\lambda_3(t)}{2\alpha}-\frac{[a-c-2Q(t)]Q(t)}{2\alpha b(t)}-\frac{\beta\mu}{2\alpha}\\\dot{Q}(t)=\frac{a-c-2Q(t)}{2b(t)}[k(t)-(\rho+\delta+\eta)b(t)]+\frac{\tau(\rho+\delta)b(t)}{2}\\\dot{\lambda}_3(t)=(\rho+\gamma)\lambda_3(t)-\beta\\\dot{S}(t)=b(t)Q(t)-\delta S(t)\\\dot{b}(t)=-k(t)+\eta b(t)\\\dot{A}(t)=\mu k(t)-\gamma A(t)\end{cases} \tag{19}$$

在稳态条件下,即:$\dot{k}(t)=\dot{Q}(t)=\dot{\lambda}_3(t)=\dot{S}(t)=\dot{b}(t)=\dot{A}(t)=0$,求解动态系统(19)可得稳态均衡解 $\{k^m,Q^m,\lambda_3^m,S^m,b^m,A^m\}$,即:

$$k^m=\frac{\eta[\tau(a-c)(\rho+\gamma)+2\beta\mu(\rho-\eta)]}{(\rho+\gamma)[\tau^2+4\alpha\eta(\rho-\eta)]}$$

$$Q^m=\frac{(\rho-\eta)[2\alpha\eta(a-c)(\rho+\gamma)-\tau\beta\mu]}{(\rho+\gamma)[\tau^2+4\alpha\eta(\rho-\eta)]}$$

$$\lambda_3^m=\frac{\beta}{\rho+\gamma}$$

$$S^m=\frac{(\rho-\eta)[\tau(a-c)(\rho+\gamma)+2\beta\mu(\rho-\eta)][2\alpha\eta(a-c)(\rho+\gamma)-\tau\beta\mu]}{\delta(\rho+\gamma)^2[\tau^2+4\alpha\eta(\rho-\eta)]^2}$$

$$b^m=\frac{[\tau(a-c)(\rho+\gamma)+2\beta\mu(\rho-\eta)]}{(\rho+\gamma)[\tau^2+4\alpha\eta(\rho-\eta)]}$$

$$A^m=\frac{\eta\mu[\tau(a-c)(\rho+\gamma)+2\beta\mu(\rho-\eta)]}{\gamma(\rho+\gamma)[\tau^2+4\alpha\eta(\rho-\eta)]}$$

我们已经得到了垄断者最优下的稳态解$\{k^m, Q^m, \lambda_3^m, S^m, b^m, A^m\}$,下面分析稳态解的鞍点性。用$J_m = \frac{\partial(\dot{k}(t), \dot{Q}(t), \dot{\lambda}_3(t), \dot{S}(t), \dot{b}(t), \dot{A}(t))}{\partial(k(t), Q(t), \lambda_3(t), S(t), b(t), A(t))}$表示动态控制系统(19)的雅克比矩阵,如果雅克比矩阵的特征值中至少有一个为负,那么,我们就可以判断动态控制系统(19)的稳定解具有鞍点性。由动态控制系统(19)可得:

$$J_m = \begin{bmatrix} \rho-\eta & \frac{4Q^m-a+c}{2\alpha b^m} & \frac{\mu(\gamma+\eta)}{2\alpha} & 0 & \frac{\tau Q^m}{2\alpha b^m} & 0 \\ \frac{\tau}{2} & \frac{\tau(\rho+\delta)}{2} & 0 & 0 & \frac{\tau(\rho+\delta-\eta)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \rho-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b^m & 0 & -\delta & Q^m & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & \eta & 0 \\ \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma \end{bmatrix}$$

用$\zeta_i, i=1,2,3,4,5,6$表示雅克比矩阵J_m的特征值,E表示六阶单位矩阵,求解特征方程$|\zeta E - J_m| = 0$,可以得到雅克比矩阵J_m必有负的特征值:$\zeta_1^{J_m} = -\delta, \zeta_2^{J_m} = -\gamma$。以上分析可总结为命题2。

命题2:在垄断者最优条件下,稳态解$\{k^m, Q^m, \lambda_3^m, S^m, b^m, A^m\}$是鞍点均衡。

接下来我们对运用数例分析法来研究稳态均衡时垄断厂商的研发投资k^m、产量Q^m和利润π^m关于排污税率τ的变动情况。参考Dragone[4]、Li[12]和Lambertini[12],对模型参数进行赋值,具体数据呈现如表1。

表1 模型基本参数赋值表

a	c	α	δ	η	γ	μ	ρ	ξ	A_0
10	1	0.5	0.1	0.15	0.1	0.2	0.2	0.002	1

利用表1给出的参数值和垄断者最优下的稳态均衡解,我们可以得到稳态均衡时垄断厂商的研发投资k^m、产量Q^m和利润π^m关于排污税率τ的图像如下:

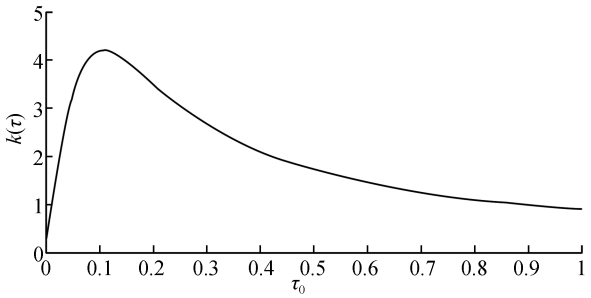

图1 稳态时厂商研发投入$k^m(\tau)$图

分析图1我们发现,在垄断者最优条件下,存在一个临界税率τ_0,当排污税率τ低于临界τ_0时,厂商研发投入水平k^m随着排污税率τ的增加而增加;当排污税率τ高于临界τ_0时,厂商研发投入水平k^m随着排污税率τ的增加而减小;当$\tau=\tau_0$时,厂商的研发投入达到最大值。

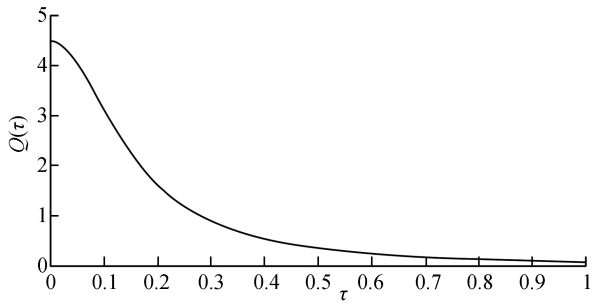

图2 稳态时厂商产量$Q^m(\tau)$图

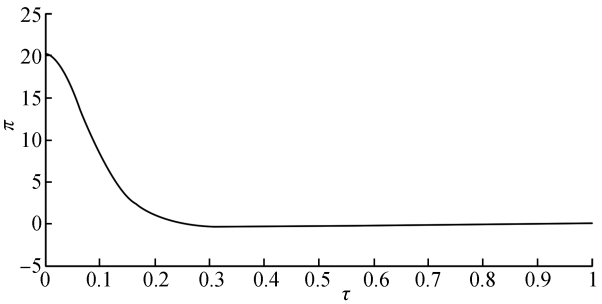

图3 稳态时厂商利润$\pi^m(\tau)$图

分析图2和图3不难发现,在垄断者最优条件下,厂商的产量Q^m和利润π^m分别随着排污税率τ的增加而减小,当政府对垄断者征收的排污税率τ过高时,垄断者有可能停止生产。

根据上述对图1-3的分析,我们归纳出下列具有重要意义的推论1。

推论1:并不是环境政策越严厉(环境税率越高),厂商的绿色技术创新投资数量越大;只有在适当的税率下,厂商才进行最大可能的绿色技术创新投资。

存在推论1是因为如果排污税高过一定边界,厂商的利润下降以至于不足以支撑更高的绿色技术创新投资,甚至有可能因为利润水平太低而停止生

产,从图 2 和图 3 就可以看到这样现象。

三　社会最优

为了得到社会福利最大化的排污税率,下面,我们假定企业的行为由社会规划者所完全控制,其目标不再是利润最大化而是社会福利最大化,即最大化下列表达式:

$$SW=\max_{k,Q}\int_0^{+\infty}e^{-\rho t}sw(t)dt$$

$$S.t\begin{cases}\dot{S}(t)=b(t)Q(t)-\delta S(t)\\ \dot{b}(t)=-k(t)+\eta b(t)\\ \dot{A}(t)=\mu k(t)-\gamma A(t)\end{cases}\tag{20}$$

其中:$sw(t)=\pi(t)+cs(t)-\xi S(t)=(p(t)-c)Q(t)+\frac{Q^2(t)}{2}-\xi S(t)-C(k(t),A(t))$

式中 $\xi>0$ 表示污染损害成本。

目标函数(20)对应的现值汉密尔顿函数为:

$$\begin{aligned}H=&[a-c-Q(t)]Q(t)+\frac{Q^2(t)}{2}-\xi S(t)-\\&\alpha k^2(t)+\beta[A(t)-A_0]\\&+\omega_1(t)[b(t)Q(t)-\delta S(t)]+\omega_2(t)[-\\&k(t)+\eta b(t)]+\omega_3(t)[\mu k(t)-\gamma A(t)]\end{aligned}\tag{21}$$

式中 $\omega_1(t),\omega_2(t),\omega_3(t)$ 分别是状态变量 $S(t),b(t),A(t)$ 的影子价格。最大化现值汉密尔顿函数的一阶条件和共态方程如下:

$$\frac{\partial H}{\partial k(t)}=-2\alpha k(t)-\omega_2(t)+\mu\omega_3(t)=0\tag{22}$$

$$\frac{\partial H}{\partial Q(t)}=a-c-Q(t)+\omega_1(t)b(t)=0\tag{23}$$

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_1(t)&=\rho\omega_1(t)-\frac{\partial H}{\partial S(t)}\\&=(\rho+\delta)\omega_1(t)+\xi\end{aligned}\tag{24}$$

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_2(t)&=\rho\omega_2(t)-\frac{\partial H}{\partial b(t)}\\&=(\rho-\eta)\omega_2(t)-\omega_1(t)Q(t)\end{aligned}\tag{25}$$

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_3(t)&=\rho\omega_3(t)-\frac{\partial H}{\partial A(t)}\\&=(\rho+\gamma)\omega_3(t)-\beta\end{aligned}\tag{26}$$

相应的边界条件为:$\lim_{t\to\infty}e^{-\rho t}\omega_1(t)S(t)=0$,$\lim_{t\to\infty}e^{-\rho t}\omega_2(t)b(t)=0$ 和 $\lim_{t\to\infty}e^{-\rho t}\omega_3(t)A(t)=0$。

由等式(22)和动态表达式(24)、(25)以及(26)可得社会福利最优下厂商的研发投资水平 $k(t)$ 的动态方程,即:

$$\dot{k}(t)=(\rho-\eta)k(t)+\frac{\mu(\gamma+\eta)\omega_3(t)}{2\alpha}-\frac{[a-c-Q(t)]Q(t)}{2\alpha b(t)}-\frac{\beta\mu}{2\alpha}\tag{27}$$

由动态表达式(27)可得:

$$\frac{\partial\dot{k}(t)}{\partial\beta}=-\frac{\mu}{2\alpha}<0\tag{28}$$

$$\frac{\partial\dot{k}(t)}{\partial\gamma}=\frac{\mu\omega_3(t)}{2\alpha}\propto\omega_3(t)\tag{29}$$

$$\frac{\partial\dot{k}(t)}{\partial\mu}=\frac{(\gamma+\eta)\omega_3(t)-\beta}{2\alpha}\tag{30}$$

下面我们研究在影子价格 $\omega_3(t)$ 稳态值附近知识积累的增长率 μ 与遗忘率 γ 对厂商研发投入率 $\dot{k}(t)$ 的影响。由式(26)可以得到影子价格 $\omega_3(t)$ 稳态值 $\hat{\omega}_3$,即 $\hat{\omega}_3=\frac{\beta}{\rho+\gamma}$,将 $\hat{\omega}_3$ 分别带入(29)和(30)中可以得到:$\left.\frac{\partial\dot{k}(t)}{\partial\gamma}\right|_{\hat{\omega}_3}=\frac{\beta\mu}{2\alpha(\rho+\gamma)}>0$、$\left.\frac{\partial\dot{k}(t)}{\partial\mu}\right|_{\hat{\omega}_3}=-\frac{\beta(\rho-\eta)}{2\alpha(\rho+\gamma)}$。以上分析可总结为命题 3。

命题 3:在垄断者最优条件下,$\forall t\in[0,\infty)$,$\frac{\partial\dot{k}(t)}{\partial\beta}<0$、$\left.\frac{\partial\dot{k}(t)}{\partial\gamma}\right|_{\hat{\omega}_3}>0$ 和 $\left.\frac{\partial\dot{k}(t)}{\partial\mu}\right|_{\hat{\omega}_3}=-\frac{\beta(\rho-\eta)}{2\alpha(\rho+\gamma)}\begin{cases}>0,if\eta>\rho\\=0,if\eta=\rho\\<0,if\eta<\rho\end{cases}$

由等式(22)和动态表达式(24)可以得到规划者最优下产量 $Q(t)$ 的变动方程,即:

$$\dot{Q}(t)=\xi b(t)-\frac{a-c-Q(t)}{b(t)}[k(t)-(\rho+\delta+\eta)b(t)]\tag{31}$$

由动态方程式(2)、(3)、(4)、(26)、(27)和(31)可得如下动态控制系统:

$$\begin{cases}\dot{k}(t)=(\rho-\eta)k(t)+\frac{\mu(\gamma+\eta)\omega_3(t)}{2\alpha}-\frac{[a-c-Q(t)]Q(t)}{2\alpha b(t)}-\frac{\beta\mu}{2\alpha}\\ \dot{Q}(t)=\xi b(t)-\frac{a-c-Q(t)}{b(t)}[k(t)-(\rho+\delta+\eta)b(t)]\\ \omega_3(t)=(\rho+\gamma)\omega_3(t)-\beta\\ \dot{S}(t)=b(t)Q(t)-\delta S(t)\\ \dot{b}(t)=-k(t)+\eta b(t)\\ \dot{A}(t)=\mu k(t)-\gamma A(t)\end{cases}\tag{32}$$

在稳态条件下,即:$\dot{k}(t)=\dot{Q}(t)=\dot{\lambda}_3(t)=\dot{S}(t)=\dot{b}(t)=\dot{A}(t)=0$,求解动态控制系统(32)可得稳态解 $\{k^s,Q^s,\omega_3^s,S^s,b^s,A^s\}$,即:

$$k^s=\frac{\eta(\rho+\delta)[(a-c)(\rho+\gamma)\xi-\beta\mu(\rho+\delta)(\rho-\eta)]}{(\rho+\gamma)[2\alpha\eta(\rho-\eta)(\rho+\delta)^2-\xi^2]},$$

$$Q^s=\frac{(\rho+\delta)(\rho-\eta)[2\alpha\eta(\rho+\delta)(a-c)-\beta\mu\xi]}{(\rho+\gamma)[2\alpha\eta(\rho-\eta)(\rho+\delta)^2-\xi^2]},$$

$$\omega_3^s=\frac{\beta}{\rho+\gamma},$$

$$S^s=\frac{b^sQ^s}{\delta},$$

$$b^s=\frac{(\rho+\delta)[(a-c)(\rho+\gamma)\xi-\beta\mu(\rho+\delta)(\rho-\eta)]}{(\rho+\gamma)[2\alpha\eta(\rho-\eta)(\rho+\delta)^2-\xi^2]},$$

$$A^s=\frac{\mu\eta(\rho+\delta)[(a-c)(\rho+\gamma)\xi-\beta\mu(\rho+\delta)(\rho-\eta)]}{\gamma(\rho+\gamma)[2\alpha\eta(\rho-\eta)(\rho+\delta)^2-\xi^2]},$$

我们已经得到了规划者最优下的稳态解$\{k^s,Q^s,\omega_3^s,S^s,b^s,A^s\}$,下面分析稳态解的鞍点性。用$J_s=\frac{\partial(\dot{k}(t),\dot{Q}(t),\dot{\lambda}_3(t),\dot{S}(t),\dot{b}(t),\dot{A}(t))}{\partial(k(t),Q(t),\lambda_3(t),S(t),b(t),A(t))}$表示动态控制系统(32)的雅克比矩阵,即:

$$J_s=\begin{bmatrix}\rho-\eta & -\frac{a-c-2Q^s}{2\alpha b^s} & \frac{\mu(\gamma+\eta)}{2\alpha} & 0 & 0 & 0\\ \frac{a-c-Q^s}{b^s} & \frac{(\rho+\delta+\eta)b^s-k^s}{b^s} & 0 & 0 & \xi-\frac{\eta(a-c-Q^s)}{b^s} & 0\\ 0 & 0 & \rho+\gamma & 0 & 0 & 0\\ 0 & b^s & 0 & -\delta & 0 & 0\\ -1 & 0 & 0 & 0 & \eta & 0\\ \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma\end{bmatrix}$$

用$\zeta_i,i=1,2,3,4,5,6$表示雅克比矩阵J_s的特征值,E表示六阶单位矩阵,求解特征方程$|\zeta E-J_s|=0$,可以得到雅克比矩阵J_s必有负的特征值:$\lambda_1^{J_s}=-\delta,\lambda_2^{J_s}=-\gamma$。以上分析可总结为命题4。

命题4:在社会福利最大化条件下,稳态解$\{k^s,Q^s,\omega_3^s,S^s,b^s,A^s\}$是鞍点均衡。

四 最优排污税率

本节中,我们研究规划者如何设定最优排污税率的问题,即规划者设定最优的排污税率使垄断者最优下创造的社会福利等于最大福利(社会规划者最优时的社会福利)。规划者的目标函数可由如下形式给出:

$$\Delta SW=SW_s^*-SW_m^*=0 \tag{33}$$

由第3部分的稳态均衡解可以得到垄断者最优下创造的社会福利为:

$$SW_m^*=(a-c-\tau b^m-\frac{Q^m}{2})Q^m-\alpha(k^m)^2+\beta(A^m-A_0)-\xi S^m \tag{34}$$

由第4部分的稳态均衡解可以得到最优的社会福利为:

$$SW_s^*=(a-c-\tau b^s-\frac{Q^s}{2})Q^s-\alpha(k^s)^2+\beta(A^s-A_0)-\xi S^s \tag{35}$$

借助表1中的参数值,分别做出垄断者最优下创造的社会福利SW_m^*和最优的社会福利SW_s^*关于排污税率$\tau\in[0.1]$的图像,见图4。

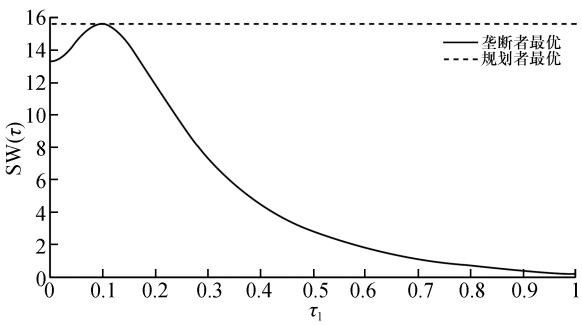

图4 SW_m^*和SW_s^*关于排污税率$\tau\in[0.1]$的图像

分析图4我们可以得到分析3。

分析3:当$\tau<\tau_1$时,垄断者最优下创造的社会福利SW_m^*随着排污税率τ的提高而增加;当$\tau>\tau_1$时,垄断者最优下创造的社会福利SW_m^*随着排污税率τ的提高而减小;当$\tau=\tau_1$时,垄断者最优下创造的社会福利SW_m^*达到最大值,并且等于最优的社会福利SW_s^*。

分析 3 表明:为了使垄断者最优下创造的社会福利 SW_m^* 等于最大福利 SW_s^*,规划者设定的最优排污税率应该为 τ_1。

五　结　论

本文设想政府对厂商的排放总量征收排污税,并把绿色技术创新投资中的“干中学”引入到垄断厂商污绿色技术创新投资动态控制模型中,分别研究了垄断者最优与规划者最优下的厂商绿色技术创新投资水平、产量水平、厂商利润以及社会福利。研究结果表明:

第一,并不是排污税率越高,对厂商绿色创新的激励作用越强,而是存在一个税率的临界值,过了临界值随着排污税率的提高绿色技术创新反而减少。

第二,“干中学”对厂商绿色技术创新技术投资具有重要影响,随着知识积累学习率的增加,厂商绿色技术创新投资增长率呈下降趋势。

第三,厂商最优与社会规划者最优下的稳态均衡均具有鞍点均衡性质。

第四,存在一个最优的排污税率,该排污税率下垄断者最优下的社会福利恰好等于社会规划者最优时的社会福利。

本文的研究对最优排污税率的设计具有较强的借鉴意义。在后续研究中,厂商绿色技术创新中的不确定性因素等问题将是我们关注的重要问题。

[参考文献]

[1] 聂爱云,何小钢.企业绿色技术创新发凡:环境规制与政策组合[J].改革,2012(4):102-108.

[2] JABBOUR A B, JABBOUR C, GOVINDAN K, et. al. Mixed methodology to analyze the relationship between maturity of environmental management and the adoption of green supply chain management in Brazil[J]. Resources, Conservation and Recycling ,2014,92(11): 255-267.

[3] PORTER M E, VAN d L C. Green and competitive: ending the stalemate[J]. Harvard Business Review, 1995, 28(6):128-129.

[4] DRAGONE D, LAMBERTINI L, LEITMANN G, et al. A Stochastic Optimal Control Model of Pollution Abatement [J]. Working Papers, 2009, 10(2):117-124.

[5] WESSEH P K, LIN B. Optimal emission taxes for full internalization of environmental externalities[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 137:871-877.

[6] Pal R, Saha B. Pollution tax, partial privatization and environment[J]. Resource and Energy Economics, 2015 (40):19-35.

[7] 赵文会,高 岩,戴天晟.跨区域污染排污税管理调控模型[J].系统工程理论与实践,2010,30(2):221-226.

[8] 马祖军,慕艳芬,聂佳佳.碳税政策下竞争性低碳技术策略选择[J].系统管理学报,2017,26(5):980-989.

[9] ARROW K J . The Economic Implications of Learning by Doing[J]. Review of Economic Studies, 1971, 29(3): 155-173.

[10] ARGOTE L, EPPLE D.Learning Curves in Manufacturing [J].Science,1990, 247(4945):920-924.

[11] PÉREZ, CARLOS J, PONCE C J. Disruption costs, learning by doing, and technology adoption[J]. International Journal of Industrial Organization, 2015, 41(4): 64-75.

[12] BOUCHÉ S. Learning by doing, endogenous discounting and economic development[J]. Journal of Mathematical Economics, 2017, 73(3):34-43.

[13] LI S. Dynamic control of a multiproduct monopolist firm's product and process innovation[J]. Journal of the Operational Research Society,2018,69(5):714-733.

Research on Dynamic Control Strategy of Green Technology Innovation Investment Under Regulation of Emission Tax

YI Yong-xi, CHENG Su-su

(*University of South China*, *Hengyang* 421001, *China*)

Abstract: Considering the government's imposition of pollutant emission tax on manufacturers and the green technology innovation of “learning by doing”, a new dynamic control model of investment in green technology innovation for monopoly manufacturers is constructed on the basis of Dragone et al. The results of the model analysis show that: Firstly, it is not that the higher the emission tax rate, the stronger the incentive effect on green innovation, but there is a critical value of tax rate, which decreases with the increase of emission tax rate; Secondly, the stable equilibrium under the monopolist's optimal and the social planner's optimal has the saddle point equilibrium property; Finally, there is an optimal emission tax rate, under which the monopolist's optimal social welfare is exactly equal to the social welfare when the social planner is optimal.

Key words: green technology innovation; pollution tax; learning by doing; dynamic control strategy