

碳排放标准与碳税对企业减排及社会福利的影响研究

徐 浩

西南石油大学经济管理学院, 成都

摘 要 | 制定适当的环境政策是解决环境问题的关键措施之一, 针对市场导向型与命令控制型两种环境政策对企业总排放及社会福利的影响, 分别建立碳排放标准和碳税政策下的政府和双寡头企业Stackelberg微分博弈模型。通过对比两种环境政策对碳排放总量与社会福利等的影响发现, 当考虑市场结构差异以及碳排放动态变化时, 市场型环境策略并非完全优于命令控制型环境政策, 当满足一定条件时, 碳排放标准下的碳排放总量轨迹小于碳税政策下的碳排放量轨迹, 但同时碳税政策具有更高的社会福利, 并且上述最优决策都会收敛于稳定状态。因此, 在双寡头市场情况下, 碳排放标准能迅速达到控制和治理污染的目的, 有利于解决生态环境问题, 但同时存在效率缺失而导致社会福利的降低, 政府需要根据实际实际情况综合运用环境策略。

关键词 | 碳排放标准; 碳税; 微分博弈; 社会福利; 污染容量

Copyright © 2025 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



1 引言

节能减排和低碳经济已成为《京都议定书》和《巴黎协定》缔约国家的共识, 我国作为世界最大的发展中国家, 已提前3年落实《巴黎协定》部分承诺, 并且将在2020年百分之百兑现承诺。2018年的《中国应对气候变化的政策与行动2018年度报告》^[1]指出, 我国已基本完成2020年碳强度下降目标, 将着眼于落实2030年左右碳排放达峰目标。其中特别提到, 将在重点行业设立碳排放标准, 在不同行业、地区统筹使用碳税、碳交易以及碳排放标准政策等环境政策。根据生态环境部的研究报告, 我国电力、煤气、石油加工、金属冶炼等几个主要第二产业的碳排放量占全国总的碳排放量的70%以上,

而上述行业主要是国有垄断大型企业。为此, 如何针对寡头垄断企业实施正确的环境政策以减少碳排放量是当前我国在绿色发展理念下亟待解决的问题。目前, 各国实施的主要环境政策主要可以分为两类: 第一是基于政府命令控制的规制策略 (Command and Control), 命令控制型环境政策倾向于让企业承受相同的污染控制负担并强制性限制排放而对其产生直接影响, 但对不同性质、不同规模和不同地区的企业采用完全划一的标准会使得很多资源的浪费和生产效率低下, 尤其是对环境污染治理成本差异较大的企业之间, 会限制边际污染成本较低的企业做出更大的减排努力, 因此, 若企业之间边际污染治理成本差距较小且具有行业垄断性质时较为适用碳排放标准政策。与此相反的是基于市场机制的环境政策

基金项目: 四川省自然科学基金青年项目 (2023NSFSC1055); 教育部人文社会科学研究青年基金项目 (22YJC630171)。

作者简介: 徐浩, 西南石油大学经济管理学院讲师, 博士, 研究方向: 环境政策与管理、决策科学。

文章引用: 徐浩. 碳排放标准与碳税对企业减排及社会福利的影响研究 [J]. 社会科学进展, 2025, 7 (1): 81-90.

<https://doi.org/10.35534/pss.0701015>

(Market-based Incentives)，主要通过碳税、碳交易等市场机制来影响企业的碳排放行为。在市场机制下，环境规制部门通过增加企业的污染排放成本使外部性内部化从而促进污染治理投资，与命令控制型政策不同的是，市场导向型环境策略是一种自我实施机制(Self-enforcing Mechanism)，适用于市场机制健全，竞争环境较为公平的市场结构。为此，本文以市场中的双寡头企业为研究目标，探讨政府在市场机制(碳税)和指令控制机制(碳排放标准)环境政策下总的碳排放轨迹以及社会福利的大小。与以往研究所不同的是，由于排放量是一个动态变化的过程，因此当污染容量改变时，原本的最优策略将可能变得不再是“最优”，在此基础上，本文首先构造了一个Stackelberg微分博弈，环境规制部门首先确定碳排放标准额度或者碳税，随后企业根据此标准选择最优产量及碳减排量，环境规制部门在制定碳税或者碳排放标准时不仅考虑社会福利，并且环境伤害会随着企业排放量和减排量动态变化。因此，在考虑碳排放动态变化的情形下分析两种环境策略的影响对政府环境政策的实施具有重要的参考意义。

2 文献综述

目前，国外学术界已对环境政策与企业减排最优控制和微分博弈方面做了相关研究。多克纳(Docker)和龙(Long)^[2]首先分析了跨界污染中的合作和非合作微分博弈，将环境污染容量动态变化作为控制条件，通过马尔可夫反馈均衡得到最优的合作策略。柳濂(Yanase)^{[3][4]}分析了两个地区存在贸易时政府运用碳限额政策与碳税政策对本国和外国企业以及社会福利的影响，通过微分博弈建模发现由于本国企业和国外企业存在“租金漂移”和“搭便车”行为，不管是政府间合作或者不合作，政府采用对称策略或者不同的策略，碳排放限额政策都比碳税政策具有更高的社会福利与更低的碳排放水平。梅内塞斯(Meneze)和佩雷拉(Pereira)^[5]考虑了一个具有线性损害和技术溢出的模型，分析了最优环境策略(碳税与研发补贴的结合)，通过Stackelberg微分博弈建模得到了政府最优碳税和补贴以及最佳减排水平如何随着竞争的加剧而变化。维尔(Wirl)和卢比奥(Rubio)等^{[6][7]}研究了垄断企业或使用碳排放税或碳排放标准来控制流量污染物的监管机构之间的微分博弈模型，作为领导者的监管机构选择征收排放税以最大化净社会福利，作为追随者的垄断者选择产出和减排技术投资以实现利润最大化，结论发现若环境边际伤害增加，最优政策是在接近稳定状态时给予企业补贴，而当环境边际伤害是常数时，最优碳税政策则是传统的庇古税。卡普(Karp)和张(Zhang)^[8]比较了当监管机构和公司有关于减排成本的不对称信息时碳税政策和碳限额政策，对于一般的线性伤害函数形式，当监管者使用配额时，企业的投资政策是信息约束有效的；对于一个特殊的函

数形式(线性二次型伤害函数)，这两个策略都是约束有效的，但税收政策下总污染容量更低。叶(Ye)和赵(Zhao)^[9]分析了国有垄断企业和私有企业的古诺竞争问题，发现更严格的环境监管并不一定会降低污染水平，环境税和环境标准之间的等价性会被打破，而这些结果的差异来源于国有垄断公司CEO职业选择的内生性，这种内生性能够促使CEO选择减少排放和改善社会福利方面最为有效的环境策略。萨尔塔里(Saltari)和(Travaglini)^[10]用动态最优控制理论研究了环境政策对企业绿色技术投资的影响，结论表明税收对企业绿色技术投资的影响具有不确定性，对企业补贴能刺激企业绿色技术研发投资，但同时企业的利润具有不确定性。马苏迪(Masoudi)和扎克库尔(Zaccour)^[11]比较了当监管机构面临两个不确定性来源时，基于价格的政策(税收)以及基于数量的政策(配额)在动态污染控制中的作用机制，研究表明，税收和配额政策下，预期的排放水平是相同的。然而，税收具有更高的社会福利。此外，霍尔(Hoel)和卡普(Karp)^[12]研究了微分博弈中的折现率和环境分解率以及环境伤害的时间一致性对碳税及配额政策的影响，结论表明上述参数的增加都会促使政府选择碳税政策。

国内关于环境政策对企业减排及低碳技术投资影响的微分博弈或最优控制问题的文献较为缺乏，其中，张盼和熊中楷^[13]比较了碳交易和碳税两种市场手段下对企业最优利润、总排放量和社会福利的影响，研究发现当二氧化碳等对环境的伤害较低时，碳交易具有显著的优势，而当二氧化碳等温室气体对环境伤害较高时，碳税政策较为适宜。周维良和杨仕辉^[14]分析了消费者意识与环境规制政策对供应链减排的环境与经济效应，研究发现利用消费者环保意识来实现供应链减排目标时，要考虑消费者环保意识强弱、环境规制力度及初始碳足迹等的影响。易永锡等^[15]运用微分博弈研究了在排污权交易机制下的企业最优污染治理技术的投资选择问题。赵黎明和殷建立^[16]分析了碳交易和碳税下减排的二层规划模型，研究发现与单一型政策相比，复合型碳减排政策体系下企业享有更高的减排决策弹性。郭军华等^[17]运用演化博弈模型分析了制造商碳减排决策的动态演化过程，研究结果表明当政府设定的碳限额小于某个条件时，碳限额交易政策才能有效激励企业减排并演化到系统最优状态。上述国内的文献大多是考虑静态环境下的企业决策问题且集中于供应链问题的研究，鲜有运用微分博弈对市场和行政两种环境策略进行对比分析的文献，并且与上述文献不同的是，本文假定选择碳排放标准或者碳税政策是政府在企业最优生产和减排的机制上的决策问题，在碳排放动态变化的约束及环境伤害下考虑社会福利最大化问题。

3 政府与企业博弈的碳减排模型

考虑一个地区包括双寡头企业和环境规制部门(政

府), 企业生产同质的产品且面临的逆需求函数为 $p = a - Q$ 。其中 a 为消费者的最大支付意愿或者代表市场规模, $Q = q_i + q_j$, $i \neq j$, q_i, q_j 分别代表企业 i 和企业 j 的产量。为分析方便, 假设企业每生产一单位的产品产生一单位的碳排放量^[2-4], 企业 i 可以通过减排投入使总的排放量降低, 假设 r_i 为企业 i 通过减排活动或投资等方式减少的碳排放量。为此, 企业 i 的成本函数可以表示为 $c(q_i, r_i) = cq_i + \frac{\gamma}{2} r_i^2$ ^[18], 其中, c 为企业的边际生产成

本, $\gamma(\gamma > 0)$ 表示减排活动的效率或者成本系数, γ 越小表明减少的碳排放所需的成本越低。

企业的净排放函数为 $\varepsilon_i = q_i - r_i - \beta r_j$, $0 \leq \beta \leq 1$, 参数 β 表示技术溢出水平, 表明企业不仅能从自身的减排投入获得收益, 还能通过技术溢出从企业 j 的减排投资中获得减排收益。因此, 总的碳排放函数可以表示为: $\varepsilon = \varepsilon_i + \varepsilon_j = q_i - r_i - \beta r_j + q_j - r_j - \beta r_i$ 。假设碳排放会随着时间累积而对这个地区产生环境伤害, 假设碳排放容量累积函数为^[2]:

$$\dot{x}(t) = q_i(t) + q_j(t) - (1 + \beta)[r_i(t) + r_j(t)] - \delta x(t), \quad x(0) = x_0 \geq 0 \quad (1)$$

其中, $x(t)$ 为环境污染容量, δ 为环境的自然分解率, x_0 为初始的碳排放量。根据大量的文献^[2-5], 碳排放产生的环境伤害可以表示为一个二次函数, $D = \frac{d}{2} x^2$, 其中, d 为地区承受环境伤害的程度。为控制碳排放对地区环境的影响, 政府有两种环境政策可供选择: 碳限额或者碳排放标准 (Standard) 以及碳税 (Emission Tax)。其中, 碳限额或碳排放标准通过总量控制, 为企业设定总的碳排放标准量; 碳税政策即政府对企业总的碳排放量征收总量税, 企业可以通过减排努力减少碳税的支付。因此, 下文将分析在上述假设下的微分博弈问题。

3.1 碳排放标准政策

在碳排放标准政策下, 政府与双寡头企业之间组成了一个Stackelberg博弈系统, 在第一阶段, 政府选择企业 i 碳排放的额度或者标准 $\bar{\theta}_i$, 在第二阶段, 企业在此标准下选择自身利益最大化的总排放量 (总产量) 和碳减排量。企业 i 的产量是碳排放标准和减排量的函数, 即 $q_i = \bar{\theta}_i + r_i + \beta r_j$, $i \neq j$, 其中, $\bar{\theta}_i$ 为政府对企业 i 制定的碳排放标准。为此, 企业的利润函数为: $\pi_i = [a - q_i - q_j]q_i - c(\bar{\theta}_i + r_i + \beta r_j) - \frac{\gamma}{2} r_i^2$, 将 $q_i(\bar{\theta}_i, r_i)$ 带入利润函数可以得到两个企业在碳排放标准或选择政策下的利润函数:

$$\pi_i = [a - (\bar{\theta}_i + r_i + \beta r_j) - (\bar{\theta}_j + r_j + \beta r_i)](\bar{\theta}_i + r_i + \beta r_j) - c(\bar{\theta}_i + r_i + \beta r_j) - \frac{\gamma}{2} r_i^2 \quad (2a)$$

$$\pi_j = [a - (\bar{\theta}_i + r_i + \beta r_j) - (\bar{\theta}_j + r_j + \beta r_i)](\bar{\theta}_j + r_j + \beta r_i) - c(\bar{\theta}_j + r_j + \beta r_i) - \frac{\gamma}{2} r_j^2 \quad (2b)$$

假设企业是对称的, 即 $\bar{\theta}_i = \bar{\theta}_j = \bar{\theta}$, 通过一阶最大化条件可得到企业的最优减排为:

$$r_i(\bar{\theta}) = r_j(\bar{\theta}) = \frac{m - (3 + \beta)\bar{\theta}}{3 + 4\beta + \beta^2 + \gamma}, \quad \frac{dr}{d\bar{\theta}} = \frac{-3 - \beta}{3 + 4\beta + \beta^2 + \gamma} < 0$$

将上述的反应函数带入利润函数并通过最大化条件可得到企业的最优排放量:

$$q_i(\bar{\theta}) = q_j(\bar{\theta}) = \frac{m + m\beta + \gamma\bar{\theta}}{3 + 4\beta + \beta^2 + \gamma}, \quad \frac{dq}{d\bar{\theta}} = \frac{\gamma}{3 + 4\beta + \beta^2 + \gamma} > 0$$

为分析方便, 我们假设 $m = a - c$ 。给定企业最优生产和减排的反应函数, 政府在碳排放标准政策下选择最优的碳排放标准使社会福利最大化。由于总污染容量或者碳排放容量是企业排放和减排量的微分方程, 为此, 政府的目标函数是获得价值函数最大化。即

$$\begin{aligned} \max_{\bar{\theta}} &= \int_0^\infty e^{-\varepsilon t} \left\{ \int_0^{2q(\bar{\theta})} (a - c - z) dz - \frac{\gamma}{2} [r_i(\bar{\theta}) + r_j(\bar{\theta})]^2 - \frac{d}{2} x^2 \right\} dt \\ &= \int_0^\infty e^{-\varepsilon t} \left\{ 2mq(\bar{\theta}) - \frac{1}{2} [2q(\bar{\theta})]^2 - \frac{\gamma}{2} [r_i(\bar{\theta}) + r_j(\bar{\theta})]^2 - \frac{d}{2} x^2 \right\} dt \end{aligned} \quad (3)$$

$$s. t. \quad \dot{x}(t) = 2q(\bar{\theta}) - (1 + \beta)[r_i(\bar{\theta}) + r_j(\bar{\theta})] - \delta x(t), \quad x(0) = x_0 \geq 0 \quad (4)$$

其中, ε 为折扣因子, 将 $r_i(\bar{\theta}), r_j(\bar{\theta}), q_i(\bar{\theta}), q_j(\bar{\theta})$ 带入上式并化简可得到的相应的Hamilton-Jacobi-Bellman方程为:

$$\varepsilon \cdot V(x) = \max_{\{\theta\}} \left\{ \frac{2\gamma(m - (3 + \beta)\bar{\theta})^2}{(3 + 4\beta + \beta^2 + \gamma)^2} + \frac{2m(m + m\beta + \gamma\bar{\theta})}{3 + 4\beta + \beta^2 + \gamma} - \frac{2(m + m\beta + \gamma\bar{\theta})^2}{(3 + 4\beta + \beta^2 + \gamma)^2} - \frac{d}{2}x^2 + V'(x)(2\bar{\theta} - \delta x) \right\} \quad (5)$$

最大化HJB方程右侧可得到碳排放标准的一阶最优条件:

$$\bar{\theta}^* = \frac{V'(x)(3 + 4\beta + \beta^2 + \gamma) + m\gamma(7 + 4\beta + \beta^2 + \gamma)}{2\gamma(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)} \quad (6)$$

参考Docker等的研究文献^[19], 上述 HJB方程的价值函数 $V(x)$ 可以看作是污染容量 $x(t)$ 的二次价值函数, 即 $V_s(x) = \frac{1}{2}A_s x^2 + B_s x + C_s$, 为此, $V'_s(x) = A_s x + B_s$ 。带入 V_s 和 V'_s 到(5)式并通过计算可得到如下命题1。

命题1 在碳排放标准政策下, 政府的最优马尔科夫反馈纳什均衡 (markov feedback nash equilibrium, MPNE) 下的碳排放标准 ($\bar{\theta}^*$), 最优排放量 ($\tilde{E}_{\bar{\theta}}(x)$) 以及稳定状态下的地区碳排放污染容量 (x_{ss}^*) 以及碳排放累积存量动态方程 (x_s) 如下:

$$\bar{\theta}_i^* = \bar{\theta}_j^* = \frac{(3 + 4\beta + \beta^2 + \gamma)^2 + m\gamma(7 + 4\beta + \beta^2 + \gamma)}{2\gamma(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)}(A_s x + B_s) \quad (7)$$

$$\tilde{E}_{\bar{\theta}}(x) = \frac{(A_s x + B_s)(3 + 4\beta + \beta^2 + \gamma)^2 + m\gamma(7 + 4\beta + \beta^2 + \gamma)}{\gamma(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)} - \delta x \quad (8)$$

$$x_{ss}^* = \frac{m\gamma(7 + 4\beta + \beta^2 + \gamma) + B_s(3 + 4\beta + \beta^2 + \gamma)^2}{\gamma(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)\delta - A_s(3 + 4\beta + \beta^2 + \gamma)^2} \quad (9)$$

$$x_s = (x_0 - x_{ss}^*)e^{-\varepsilon t} + x_{ss}^* \quad (10)$$

其中,

$$A_s = \frac{2\delta + \varepsilon - 2\sqrt{(\delta + \frac{\varepsilon}{2})^2 + 2d\Phi}}{4\Phi} < 0, \quad B_s = \frac{A_s m(7 + 4\beta + \beta^2 + \gamma)}{(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)(\delta + \varepsilon - 2A_s \Phi)} < 0$$

$$C_s = \frac{m^2(8 + 4\beta + \gamma) + 2B_s m(7 + 4\beta + \beta^2 + \gamma) + 2B_s^2(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)\Phi}{2(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)\varepsilon}$$

$$\Phi = \frac{3 + 4\beta + \beta^2 + \gamma}{2\gamma(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)} > 0$$

证明:

由HJB方程(5)式, 对 $\bar{\theta}$ 求导数可得到一阶最优的碳排放标准 $\bar{\theta}(V'(x))$ 为:

$$\bar{\theta}(V'(x)) = \frac{V'(x)(3 + 4\beta + \beta^2 + \gamma) + m\gamma(7 + 4\beta + \beta^2 + \gamma)}{2\gamma(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)} \quad (11)$$

将(11)式代入HJB方程(5)并化简得到

$$\begin{aligned} \varepsilon V(x) = & \frac{[V'(x)]^2}{2} \frac{3 + 4\beta + \beta^2 + \gamma}{\gamma(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)} + \gamma \frac{m^2(8 + 4\beta + \gamma) - dx^2(t)(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)}{2\gamma(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)} \\ & + \frac{2[V'(x)]\gamma[m(7 + 4\beta + \beta^2 + \gamma) - x(t)(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)\delta]}{2\gamma(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)} \end{aligned} \quad (12)$$

通过(12)式的形式可以假设价值函数 $V_s(x)$ 满足 $V_s(x) = \frac{1}{2}A_s x^2 + B_s x + C_s$ 形式, 其一阶导数为 $V'_s(x) = A_s x + B_s$,

其中 A_s, B_s, C_s 为未知的参数, 将 $V_s(x)$ 和 $V'(x)$ 带入上式并满足如下条件:

$$-\Phi A_s^2 + A_s(\delta + \frac{\varepsilon}{2}) + \frac{d}{2} = 0 \quad (13)$$

$$B_s \varepsilon - [2A_s B_s \Phi + \frac{2A_s m \gamma (7 + 4\beta + \beta^2 + \gamma) - 2B_s \gamma (9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma) \delta}{2\gamma (9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)}] = 0 \quad (14)$$

$$\varepsilon C_s - [\frac{m^2 \gamma (8 + 4\beta + \gamma) + 2B_s m \gamma (7 + 4\beta + \beta^2 + \gamma)}{2\gamma (9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)} + B_s^2 \Phi] = 0 \quad (15)$$

解得 (13) 式, 可得到

$$A_s = \frac{2\delta + \varepsilon \pm \sqrt{(2\delta + \varepsilon)^2 + 8d\Phi}}{4\Phi} \quad (16)$$

其中, 根据污染控制微分博弈的相关文献^[2-8], 为了使系统收敛于稳定状态, 故要舍去 A_s 的正值。因此, 将 A_s 带入到 (14) 和 (15) 式, 可得到相应地 B_s 和 C_s , 如命题 1 所示。同理, 将 A_s, B_s, C_s 带入 (11) 式可得到 MPNE 均衡 $\bar{\theta}^*$, 将 $\bar{\theta}^*$ 带入污染容量方程得到最优污染或碳排放容量 $\tilde{E}_v(x)$ 。

进一步令 $\dot{x}(t) = 0$, 可知: $\frac{(A_s x + B_s)(3 + 4\beta + \beta^2 + \gamma)^2 + m\gamma(7 + 4\beta + \beta^2 + \gamma)}{\gamma(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)} - \delta x = 0$, 解上述方程可得到稳定状态

下的碳排放容量 x_{ss} , 根据 x_{ss} 以及 (4) 式可解得线性微分方程, 因此得到 $x_s = (x_0 - x_{ss}^*)e^{-\alpha t} + x_{ss}^*$ 。

3.2 碳税政策

与碳排放标准政策同理, 政府实施碳税政策时, 首先制定碳税 τ , 其次, 企业根据政府的碳税进行最优的生产和最优碳减排。利用逆向求解法, 企业在碳税政策下的利润函数为:

$$\max_{q_i} [(a - q_i - q_j)q_i] - cq_i - \frac{\gamma}{2}r_i^2 - \tau(q_i - r_i - \beta r_j) \quad (17a)$$

$$\max_{q_j} [(a - q_i - q_j)q_j] - cq_j - \frac{\gamma}{2}r_j^2 - \tau(q_j - r_j - \beta r_i) \quad (17b)$$

在博弈最后阶段, 企业首先选择最优产量, 根据一阶条件可得到企业最优产量为:

$$q_i(\tau) = q_j(\tau) = \frac{m - \tau}{3} \quad (18)$$

其次, 企业决定其最优碳减排量, 带入 (18) 式到 (17) 并最大化 r_i, r_j 可得到最优的减排量为:

$$r_i(\tau) = r_j(\tau) = \frac{\tau}{\gamma} \quad (19)$$

在第一阶段, 政府选择碳税最大化其社会福利:

$$\max_{\tau} \int_0^{\infty} e^{-\alpha t} \left\{ \int_0^{2q(\tau)} (a - c - z) dz - \frac{\gamma}{2} [r_i(\tau) + r_j(\tau)]^2 - \frac{d}{2} x^2 \right\} dt \quad (20)$$

$$s. t. \quad \dot{x}(t) = 2q(\tau) - [r_i(\tau) + r_j(\tau)](1 + \beta) - \delta x(t), \quad x(0) = x_0 \geq 0 \quad (21)$$

与碳排放标准情况下同理, 带入企业最优产量和减排量可得到如下的 HJB 方程:

$$\varepsilon V(x) = \max_{\tau} \left[\frac{4m^2 \gamma - 2m\gamma \tau - 2(9 + \gamma)\tau^2}{9\gamma} - \frac{d}{2} x^2(t) + V'(x) \left(\frac{2(m - \tau)}{3} - \frac{2(1 + \beta)\tau}{\gamma} - \delta x(t) \right) \right] \quad (22)$$

同理, 经过计算可得到 HJB 方程的解如命题 2 所示

命题 2 在碳税政策下, 政府最优马尔科夫反馈纳什均衡下的碳税 (τ^*), 最优碳排放量 ($\tilde{E}_\tau(x)$), 稳定状态下的地区碳排放污染容量 (x_{st}^*) 以及碳排放累积存量动态方程 (x_t) 由下列式子给出:

$$\tau^* = -\frac{m\gamma + 3(3 + 3\beta + \gamma)(A_\tau x + B_\tau)}{2(9 + \gamma)} \quad (24)$$

$$\tilde{E}_\tau(x) = \frac{m\gamma(7+\beta+\gamma) + (B_T + A_T x)(3+3\beta+\gamma)^2}{\gamma(9+\gamma)} - \delta x \quad (25)$$

$$x_{ST}^* = \frac{m\gamma(7+\beta+\gamma) + B_T(3+3\beta+\gamma)^2}{\gamma(9+\gamma)\delta - A_T(3+3\beta+\gamma)^2} \quad (26)$$

$$x_T = (x_0 - x_{ST}^*)e^{-\epsilon t} + x_{ST}^* \quad (27)$$

其中,

$$A_T = \frac{2\delta + \epsilon - 2\sqrt{(\delta + \frac{\epsilon}{2})^2 + 2d\Delta}}{4\Delta} < 0, \quad B_T = \frac{A_T m(7+\beta+\gamma)}{(9+\gamma)(\delta + \epsilon - 2A_T\Delta)} < 0$$

$$C_T = \frac{m^2(8+\gamma) + 2B_T m(7+\beta+\gamma) + 2B_T^2(9+\gamma)\Delta}{2(9+\gamma)\epsilon}, \quad \Delta = \frac{(3+3\beta+\gamma)^2}{2\gamma(9+\gamma)} > 0$$

证明:

与碳排放标准下的证明过程类似, 由HJB方程(22)式, 对 τ 求导可得到:

$$\tau(V'(x)) = -\frac{m\gamma + 3V'(x)(3+3\beta+\gamma)}{2(9+\gamma)} \quad (28)$$

将(28)式以及 $V_T = \frac{1}{2}A_T x^2 + B_T x + C_T$, $V_T' = A_T x + B_T$ 代入HJB方程(22)式并化简得到:

$$\epsilon(\frac{1}{2}A_T x^2 + B_T x + C_T) = \frac{m^2\gamma(8+\gamma) + 2B_T m\gamma(7+\beta+\gamma) + B_T^2(3+3\beta+\gamma)^2}{2\gamma(9+\gamma)}$$

$$+ \frac{x^2[-d\gamma(9+\gamma) + A_T^2(3+3\beta+\gamma)^2 - 2A_T\gamma(9+\gamma)\delta]}{2\gamma(9+\gamma)} \quad (29)$$

$$+ \frac{x[2A_T m\gamma(7+\beta+\gamma) + 2A_T B_T(3+3\beta+\gamma)^2 - 2B_T\gamma(9+\gamma)\delta]}{2\gamma(9+\gamma)}$$

通过上式可得到 $-\Delta A_T^2 + (\delta + \frac{\epsilon}{2})A_T + \frac{d}{2} = 0$, 其中 Δ 如命题2所示, 解得 A_T 并舍去正值可得到:

$$A_T = \frac{2\delta + \epsilon - 2\sqrt{(\delta + \frac{\epsilon}{2})^2 + 2d\Delta}}{4\Delta} < 0 \quad (30)$$

与碳排放标准情况下证明类似, 通过 A_T 可相应得到 B_T, C_T 如命题2, 并带入(28)式可得到 τ^* , 与命题1同理, 可得到最优的碳排放总量 $\tilde{E}_\tau(x)$, 稳定状态下的污染容量 x_{ST}^* 以及动态最优下的污染容量 x_T , 证毕。

4 均衡结果比较分析

4.1 两种环境政策下总污染容量对比

通过对碳排放标准以及碳税两种环境政策下的政府与企业之间Stackelberg博弈, 得到企业和政府决策变量的马尔科夫反馈纳什均衡, 与静态情况不同的是, 上述马尔科夫反馈纳什均衡描述了政府决策中考考虑碳排放量变化的动态过程及稳定性状态均衡量, 并且反馈纳什均衡则保证了最优策略具有时间一致性, 即政府和企业的最优政策不会随着时间而改变, 依赖于当前的状态, 每个

参与者在此状态下的支付都不少于独自偏离反馈纳什均衡的支付。下文将对两种政策进行对比分析。首先, 通过命题1和命题2可以得到均衡状态下的碳排放量是污染容量 x 的函数, 进一步对比分析可得到如下命题:

命题3 在任意时间 t 内, 当 $0 \leq \beta \leq 1$, $\gamma > 0$ 且

$$\frac{2(\varphi_S - \varphi_T)(\delta + \epsilon) + \varphi_T \rho_S}{\varphi_S} < \rho_T < \rho_S \text{ 时, 碳排放标准政策下}$$

的地区总碳排放量小于碳税政策下的地区总碳排放量, 即

$$\tilde{E}_\theta(x) < \tilde{E}_\tau(x) \text{。反之, 若 } \rho_T < \frac{2(\varphi_S - \varphi_T)(\delta + \epsilon) + \varphi_T \rho_S}{\varphi_S}$$

时, $\tilde{E}_\theta(x) > \tilde{E}_\tau(x)$ 。并且当 $x_0 < x_{SS}^*$ 或者 $x_0 < x_{ST}^*$, 即碳排放标准政策或者碳税政策下初始碳排放量小于稳定状态下的碳排放量时, $\tilde{E}_\theta(x)$ 和 $\tilde{E}_\tau(x)$ 会先呈增长趋势然后收敛于稳定状态; 反之, 当 $x_0 > x_{SS}^*$ 或 $x_0 > x_{ST}^*$, 即初始

碳排放量大于稳定状态下的碳排放量时, $\tilde{E}_{\bar{\theta}}(x)$ 和 $\tilde{E}_{\tau}(x)$ 会呈下降趋势并最终收敛于稳定状态。

证明: 借助Yanase^[3, 4]的方法, 首先对 $\tilde{E}_{\bar{\theta}}(x)$ 和 $\tilde{E}_{\tau}(x)$ 求一阶导数并相减, 如下:

$$\tilde{E}_{\bar{\theta}}'(x) - \tilde{E}_{\tau}'(x) = \frac{1}{2}(\rho_s - \rho_r) \quad (31)$$

其中, $\rho_s = 2\delta + \varepsilon - \sqrt{(2\delta + \varepsilon)^2 + 8d\Phi}$, $\rho_r = 2\delta + \varepsilon - \sqrt{(2\delta + \varepsilon)^2 + 8d\Delta}$, Φ, Δ 分别为命题1和命题2所示, 两者相减可得 $\Delta - \Phi = \frac{\gamma(4\beta - \beta^2) + \beta(12 + 11\beta - 2\beta^2 - \beta^3)}{2(9 + \gamma)(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)}$, 又 $0 \leq \beta \leq 1$, 可得 $\Delta - \Phi > 0$, 可得 $0 > \rho_s > \rho_r$ 因而可以得到

$0 > \tilde{E}_{\bar{\theta}}'(x) > \tilde{E}_{\tau}'(x)$ 。由命题1和命题2可知 B_s 和 B_r 并化简后分别为:

$$B_s = \frac{m\gamma(7 + 4\beta + \beta^2 + \gamma)\rho_s}{(3 + 4\beta + \beta^2 + \gamma)^2 [2(\delta + \varepsilon) - \rho_s]}$$

$$B_r = \frac{m\gamma(7 + \beta + \gamma)\rho_r}{(3 + 3\beta + \gamma)^2 [2(\delta + \varepsilon) - \rho_r]}$$

令 $x = 0$ 并带入 $\tilde{E}_{\bar{\theta}}(x)$ 和 $\tilde{E}_{\tau}(x)$ 可得到:

$$\begin{aligned} \tilde{E}_{\bar{\theta}}(0) - \tilde{E}_{\tau}(0) &= 2m(\delta + \varepsilon) \left\{ \frac{7 + 4\beta + \beta^2 + \gamma}{(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)[2(\delta + \varepsilon) - \rho_s]} - \frac{7 + \beta + \gamma}{(9 + \gamma)[2(\delta + \varepsilon) - \rho_r]} \right\} \\ &= 2m(\delta + \varepsilon) \left\{ \frac{\varphi_s}{[2(\delta + \varepsilon) - \rho_s]} - \frac{\varphi_r}{[2(\delta + \varepsilon) - \rho_r]} \right\} \end{aligned} \quad (32)$$

其中, $\varphi_s = \frac{(7 + 4\beta + \beta^2 + \gamma)}{(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)}$, $\varphi_r = \frac{(7 + \beta + \gamma)}{9 + \gamma}$;

又 $\varphi_r - \varphi_s = \frac{\beta[4\beta + \beta^2 + 3(5 + \gamma)]}{(9 + \gamma)(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)} > 0$, 为此, 当 $\rho_r < \frac{2(\varphi_s - \varphi_r)(\delta + \varepsilon) + \varphi_r \rho_s}{\varphi_s}$ 时, $\frac{\varphi_s}{[2(\delta + \varepsilon) - \rho_s]} > \frac{\varphi_r}{[2(\delta + \varepsilon) - \rho_r]}$,

可知 $\tilde{E}_{\bar{\theta}}(0) > \tilde{E}_{\tau}(0)$; 当 $\frac{2(\varphi_s - \varphi_r)(\delta + \varepsilon) + \varphi_r \rho_s}{\varphi_s} < \rho_r < \rho_s$ 时, $\frac{\varphi_s}{[2(\delta + \varepsilon) - \rho_s]} < \frac{\varphi_r}{[2(\delta + \varepsilon) - \rho_r]}$, 可知 $\tilde{E}_{\bar{\theta}}(0) < \tilde{E}_{\tau}(0)$ 。

通过(31)式可知 $0 > \tilde{E}_{\bar{\theta}}'(x) > \tilde{E}_{\tau}'(x)$, 为此当 $\tilde{E}_{\bar{\theta}}(0) > \tilde{E}_{\tau}(0)$ 时, $\tilde{E}_{\bar{\theta}}(x) > \tilde{E}_{\tau}(x)$; 反之, 当 $0 > \tilde{E}_{\bar{\theta}}'(x) > \tilde{E}_{\tau}'(x)$ 且 $\tilde{E}_{\bar{\theta}}(0) < \tilde{E}_{\tau}(0)$ 时可得到 $\tilde{E}_{\bar{\theta}}(x) < \tilde{E}_{\tau}(x)$ 。

通过命题2和命题3可知: $\tilde{E}_{\bar{\theta}}(x) = x_{ss}^* - \delta x$, $\tilde{E}_{\tau}(x) = x_{sr}^* - \delta x$ 为此可知当 $x_{ss}^* < x_{sr}^*$, $x_s^* < x_r^*$, 因此当 $x_0 < x_{ss}^*$ 或者 $x_0 < x_{sr}^*$ 时, $\frac{\partial x_s}{\partial t} > 0, \frac{\partial x_r}{\partial t} > 0$, 即当初始排

放量 x_0 大于稳定状态下的碳排放量时, 碳排放量随时间增加而累积, 反之, 当 $x_0 > x_{ss}^*$ 或者 $x_0 > x_{sr}^*$ 时,

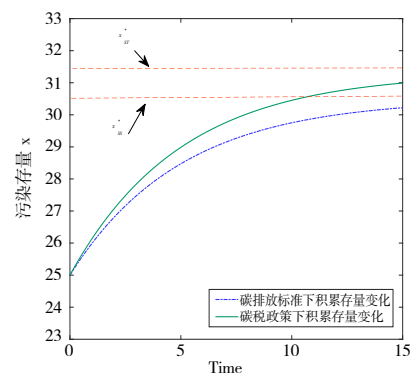
$\frac{\partial x_s}{\partial t} < 0, \frac{\partial x_r}{\partial t} < 0$, 碳排放量随时间增加而减少, 证毕。

命题3表明, 两种环境政策下环境中碳排放量的大小与 ρ_s 、 ρ_r 、减排技术投资溢出以及环境伤害量等参数之间相关, 从上述求解和证明过程可以看出, 两种政策下的最优解对比十分复杂, 为了能够清晰对比两种环境政策对企业减排量、社会福利以及环境的影响, 下文将通过matlab2016进行数值方法对上述结果进行分析, 首先, 考虑情形1(情形2具有类似的结果), 当

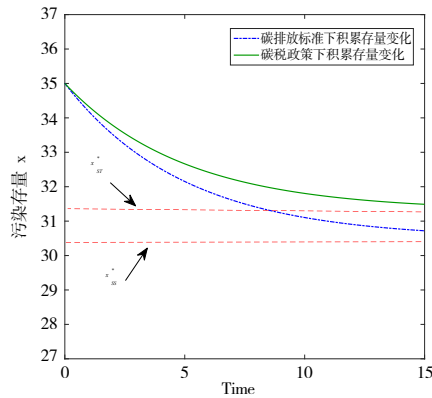
$\frac{2(\varphi_s - \varphi_r)(\delta + \varepsilon) + \varphi_r \rho_s}{\varphi_s} < \rho_r < \rho_s$ 时, 假设参数如下:

$a = 520, c = 20, \gamma = 8, \beta = 0.5, d = 5, \delta = 0.2, \varepsilon = 0.2$ 。

此时, 对应的碳排放污染存量如图1(a)和图1(b)所示:



(a) 初始点小于稳定状态下的碳排放存量轨迹



(b) 初始点大于稳定状态下的碳排放存量轨迹

图1 两种政策下的总碳排放容量轨迹 (情形1)
Figure 1 Trajectory of total carbon emission capacity under two policies (Scenario 1)

由图1可以看到, 首先, 碳排放标准政策下的总碳排放轨迹低于碳税政策下的碳排放轨迹并且都收敛于稳定状态下的碳排放量 (x_{ss}^* 和 x_{st}^*)。政府在面对一个双寡头市场时, 并非基于市场导向的环境政策完全优于指令控制型环境政策, 在满足一定的条件时, 强制性的碳限制措施能带来更低的总排放。在我国目前的市场结构下, 主要的碳排放由国有大型企业所贡献, 而这些企业往往都是寡头垄断型企业, 这些企业间具有类似的生产性质和治污成本, 因此对政府来说, 实施碳排放标准能迅速达到控制和治理污染的目的。

4.2 两种环境政策下总社会福利对比

通过价值函数可知地区在两种环境政策下的总福利函数分别为:

$$W_s^* = \frac{1}{2} A_s x^2 + B_s x + C_s \quad (33a)$$

$$W_t^* = \frac{1}{2} A_t x^2 + B_t x + C_t \quad (33b)$$

由 (13) 式和 (29) 式可知 A_s 与 B_s 分别满足以下等式:

$$-\Phi A_s^2 + A_s \left(\delta + \frac{\varepsilon}{2} \right) + \frac{d}{2} = 0 \quad (34a)$$

$$-\Delta A_t^2 + A_t \left(\delta + \frac{\varepsilon}{2} \right) + \frac{d}{2} = 0 \quad (34b)$$

$$\text{又因为 } \Delta - \Phi = \frac{\gamma(4\beta - \beta^2) + \beta(12 + 11\beta - 2\beta^2 - \beta^3)}{2(9 + \gamma)(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)} > 0$$

($0 < \beta < 1$), 为此可得 $A_s < A_t < 0$, 同理可证明当

$$\rho_T < \frac{2(\varphi_s - \varphi_T)(\delta + \varepsilon) + \varphi_T \rho_s}{\varphi_s} \text{ 时, } B_s < B_t < 0, \text{ 又 } C_T$$

与 C_s 相减可得:

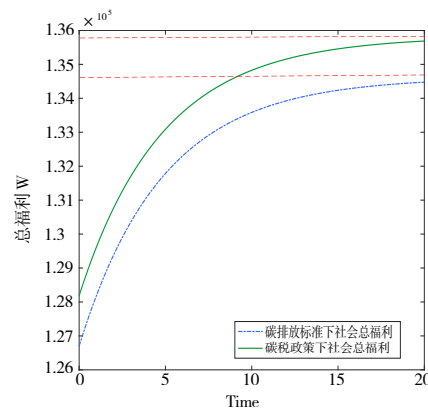
$$C_T - C_s = \frac{\beta[2(6 + \gamma) + \beta(8 + \gamma)]}{2(9 + \gamma)(9 + 6\beta + \beta^2 + \gamma)\varepsilon} m^2 \quad (35)$$

$$+ \left[\frac{B_t m \varphi_T}{\varepsilon} - \frac{B_s m \varphi_s}{\varepsilon} \right] + \left(\frac{\Delta B_t^2}{\varepsilon} - \frac{\Phi B_s^2}{\varepsilon} \right)$$

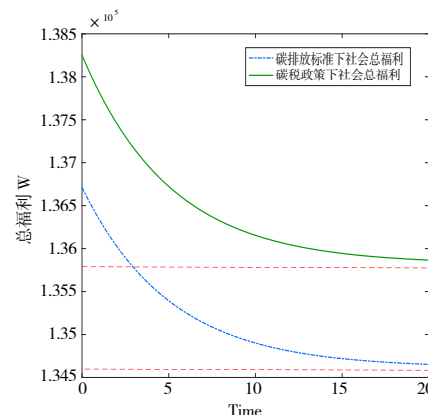
因为 $B_s < B_t < 0$, 又由命题3可知 $\varphi_T > \varphi_s > 0$, 为此 $C_T - C_s > 0$, 因此 $W_s^* < W_T^*$ 。通过以上分析, 可得到如下命题4:

命题4: 在任意时间 t 内, 当 $0 \leq \beta \leq 1$, $\gamma > 0$ 且 $\rho_T < \frac{2(\varphi_s - \varphi_T)(\delta + \varepsilon) + \varphi_T \rho_s}{\varphi_s}$ 时, 碳排放标准政策下的

地区总福利小于碳税政策下的地区总福利, 即 $W_s^*(x) < W_T^*(x)$, 并且当初始碳排放满足 $x_0 < x_{ss}^*$ 或者 $x_0 < x_{st}^*$ 时, 社会福利轨迹会先呈增长趋势然后收敛于稳定状态, 反之, 当 $x_0 > x_{ss}^*$ 或者 $x_0 > x_{st}^*$ 时, 社会福利函数轨迹则下降并收敛于稳定状态。



(a) 初始点小于稳定状态下的社会福利轨迹



(b) 初始点大于稳定状态下的社会福利轨迹

图2 两种政策下的总社会福利轨迹 (情形1)
Figure 2 Total social welfare trajectory under two policies (Scenario 1)

命题4 表明在与命题3同样的限制条件下, 碳排放

标准与碳税相比社会福利更低,由图2可以看到,当满

足条件 $\rho_T < \frac{2(\varphi_S - \varphi_T)(\delta + \varepsilon) + \varphi_T \rho_S}{\varphi_S}$ 时,碳税政策下具

有更高的社会福利轨迹并收敛于稳定状态,即具有时间一致性。这首先是由于碳排放标准的执行效率低,成本较大而带来社会总福利的额外损失,另外,基于指令控制的政策容易发生“劣币驱逐良币”现象,即某些企业的违规排放使得政府制定更为趋紧的排放标准而使得在排放标准下的企业受到同样的惩罚,其生存环境进一步恶化,最终导致合法企业的衰败甚至倒闭。因此,通过上述的分析可知,对双寡头市场,碳排放标准等指令型环境政策能带来更低的碳排放量,与此同时也导致效率低下从而导致社会福利的损失,而实施碳税政策则节约了因效率损失的社会福利,但产生了更多的排放量。因此,对我国来说,目前的环境政策是针对不同的市场行业和地区结构综合使用市场导向型环境政策与指令控制型环境政策。

5 结论与启示

本文运用Stackelberg微分博弈方法对指令控制型和市场导向型两种不同性质的环境政策进行了比较研究。运用逆向求解法首先求得双寡头企业在政府碳排放标准和碳税下的最优碳排放量和减排量,然后政府在考虑碳排放容量动态变化的约束机制及环境伤害的基础上求得马尔科夫反馈纳什均衡下的排放标准和碳税并对两种政策进行了对比分析。研究结论表明,当考虑市场结构的差异、环境伤害动态性以及碳排放容量的动态性时,市场导向型的环境政策不一定完全优于指令控制型的环境政策。当环境伤害量、减排投资溢出以及折现率等参数满足一定条件时,碳排放标准下的碳排放低于碳税下的碳排放量,同时碳税政策具有更高的社会福利,的观点数值分析表明两种政策下的碳排放容量轨迹不管高于或低于初始排放,最后都会收敛于稳定值,具有时间一致性。本文的结论表明,政府在面对诸如国有大型垄断寡头企业时,在运用碳税以及碳交易等市场化环境的同时适时运用碳减排政策等传统行政指令型环境政策,在实践中不断完善我国的环境经济政策体系。

参考文献

- [1] 生态环境部. 中国应对气候变化的政策与行动2018年度报告[R]. 2018.
- [2] Dockner E J, Long N V. International pollution control: Cooperative versus noncooperative strategies [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 1993, 25 (1): 13-29.
- [3] Yanase A. Dynamic Games of Environmental Policy in a Global Economy: Taxes versus Quotas [J]. *Review*

- of International Economics*, 2007, 15 (3): 20-32.
- [4] Yanase A. Global environment dan dynamic games of environmental policy in an international duopoly [J]. *Journal of Economics*, 2009, 97 (2): 121-140.
- [5] Menezes F M, Pereira J. Emissions abatement R&D: Dynamic competition in supply schedules [J]. *Journal of Public Economic Theory*, 2017, 19 (4): 841-859.
- [6] Wirl F. Taxes versus permits as incentive for the intertemporal supply of a clean technology by a monopoly [J]. *Resource and Energy Economics*, 2014, 36 (1): 248-269.
- [7] Martín-Herrán, Guiomar, Rubio S J. Second-best taxation for a polluting monopoly with abatement investment [J]. *Energy Economics*, 2018 (73): 178-193.
- [8] Karp L, Zhang J. Taxes versus quantities for a stock pollutant with endogenous abatement costs and asymmetric information [J]. *Economic Theory*, 2012, 49 (2): 371-409.
- [9] Ye G, Zhao J. Environmental Regulation in a Mixed Economy [J]. *Environmental and Resource Economics*, 2016, 65 (1): 273-295.
- [10] Saltari E, Travaglini G. The effects of environmental policies on the abatement investment decisions of a green firm [J]. *Resource and Energy Economics*, 2011, 33 (3): 666-685.
- [11] Masoudi N, Zaccour G. Emissions control policies under uncertainty and rational learning in a linear-state dynamic model [J]. *Automatica*, 2014, 50 (3): 719-726.
- [12] Hoel M, Karp L. Taxes versus quotas for a stock pollutant [J]. *Resource and Energy Economics*, 2002, 24 (2): 367-384.
- [13] 张盼, 熊中楷. 基于政府视角的最优碳减排政策研究 [J]. *系统工程学报*, 2018, 33 (5): 53-62, 123.
- [14] 周维良, 杨仕辉. “胡萝卜”还是“大棒”: 驱动企业减排政策效应研究 [J]. *商业研究*, 2018, 493 (5): 158-168.
- [15] 易永锡, 李寿德, 刘文君, 等. 排污权交易条件下企业污染治理技术投资最优控制策略 [J]. *系统管理学报*, 2014, 23 (1): 57-61.
- [16] 赵黎明, 殷建立. 碳交易和碳税情景下碳减排二层规划决策模型研究 [J]. *管理科学*, 2016, 29 (1): 137-146.
- [17] 郭军华, 孙林洋, 张诚, 等. 碳限额交易政策下双寡头企业碳减排决策的演化博弈分析 [J]. *软科学*, 2019, 33 (3): 54-60.

- [18] McDonald S, Poyago - Theotoky J. Green technology and optimal emissions taxation [J] . Journal of Public Economic Theory, 2017, 19 (2) : 362–376.
- [19] Dockner E J, Jorgensen S, Long N G, et al. Differential games in economics and management science [M] . Cambridge University Press, 2000.

Research on the Impact of Carbon Emission Standard and Carbon Tax on Emission Reduction of Duopoly and Social Welfare

Xu Hao

School of Economics and Management, Southwest Petroleum University, Chengdu

Abstract: One of the key measures to control environmental problem is to implement the appropriate environmental policies. This paper establishes the differential game between regulator and duopoly under emission standard and emission tax to analysis the impact on total emissions and social welfare based on the market-based policy and command-and-control policies respectively. By comparing the impact of the two environmental policies on total carbon emissions and social welfare, we find that market-based environmental policy is not entirely superior to command-and-control environmental policy when considering the difference of market structure and the dynamic change of carbon emissions. The total carbon emission trajectory under the carbon emission standards is smaller than that under the carbon tax policy when certain conditions are satisfied. Meanwhile, the carbon tax policy has higher social welfare, and the above optimal decision will converge to a stable state. Therefore, in the case of duopoly market, carbon emission standards can quickly achieve the purpose of controlling the pollution, which is conducive to solving the ecological environment problems. But at the same time, there is a lack of efficiency which leads to the decline of social welfare. The government needs to use environmental strategies comprehensively according to the realities.

Key words: Emission standard; Emission tax; Differential game; Social welfare; Pollution stock