

排污权交易系统中政府监管策略分析

金 帅^{1,2}, 盛昭瀚², 杜建国^{1,2}

(1. 江苏大学工商管理学院, 江苏 镇江 212013; 2. 南京大学社会科学实验中心, 江苏 南京 210093)

摘 要:有效监管是发挥排污权交易制度优越性的根本前提。本文通过构建管制者与排污企业之间的两阶段博弈模型, 在分析排污权交易条件下企业行为特征的基础上, 从监管力度、许可证分配、违规处罚结构三方面, 对有效实现总量控制目标的最优监管对策进行均衡分析。基于博弈分析结论并针对其不足, 利用社会科学计算实验方法, 构建基于异质主体的排污权交易实验平台, 从动态、有限理性的视角对复杂系统监管策略进行验证分析。结果表明: 实现总量控制的最优机制设计是激励企业守法排放。这并不是单纯地设置更高的惩罚力度, 而是需要追求监管水平与处罚力度的统一。整合了许可证价格的动态监管策略能够更加成本有效的确保环境质量目标达成。

关键词: 排污权交易系统; 监管策略; 博弈分析; 计算实验

中图分类号: F205; X 32 **文献标识码:** A

1 引言

面对日益严峻的全球性环境问题, 传统管制手段愈发力不从心。从国际发展趋势看, 积极探索与运用环境经济政策已成为环境管理改革的重要方向。其中, 实现直接管制与经济激励有机结合的排污权交易制度最具生命力。它不但经美国等发达国家实践证明是兼具环境质量保障和成本效率的高效治污途径, 还构成了国际公约《京都议定书》的核心减排机制。为了缓和经济发展与环境保护之间日趋尖锐的矛盾, 我国从上世纪 80 年代末期便将其提上重要议事日程。尽管如此, 我国实施排污权交易的环境与发达国家相比还存在明显差异与不足, 例如, 资源欠缺导致监测能力有限的问题依然严峻、行政执法职能逐级授权但尚未建立垂直统一的监管体系、管理部门制裁成本过大、决策与执行过程随意等, 使得“守法成本高、执法成本高、违规成本低”的困境依然制约着该政策在我国的完善与推广。在引入排污权交易后, 如何设计与之相配套的监管体系以保障其优越性发挥是制度有效实施的关键所在。

在环境管制的理论研究方面, Downing 与 Wat-

son(1974) 最早提出环境政策实施的理论模型^[1]。Harford(1987) 重点研究了不完全可实施排污标准与税收下的企业行为^[2]。排污权交易的逐步推广也吸引了众多学者致力于该政策下的企业行为与政府管制研究。Malik(1990) 研究了违规行为对市场效率的影响, 结果表明违规行为会影响许可证价格形成, 从而影响其它企业行为, 因此良好的机制设计必须将其纳入考虑范畴^[3]; Keeler(1991) 对不完全实施条件下排污权交易和排污标准的效率进行比较, 发现当边际处罚加重或减轻时, 企业会更多地污染环境, 当边际处罚不变时, 排污权交易的治污效率更高^[4]; van Egteren 等(1996) 应用市场势力模型分析了不完全实施条件下初始分配对违规行为及社会福利的影响, 并提出利用初始分配来控制市场势力与违规行为^[5]; Stranlund(1999) 重点探讨了存在预算约束的管制者如何在异质企业之间分配资源以监督和处罚违规企业^[6]; Lundgren(2003) 应用实物期权方法, 探讨了不同监管制度、监管强度对企业治污投资决策的影响以及最优的投资时机^[7]; Morzek 与 Keeler(2004) 提出在污染排放具有随机性情况下, 排污权交易通过赋予企业应对不确定性的柔性机制可以减少总污染排放量与管制目标的偏离程度^[8]; Konishi(2005) 基于政府对企业削减成本具有完全信息假设, 考察了固定违规惩罚方案下政府间与污染源间排污权交易的相对成本有效性, 提出严格的违规惩罚可提高政府间交易的成本有效性, 却导致污染源间交易的成本有效性明显降低^[9]; Cason 与

收稿日期: 2010-08-04; 修订日期: 2011-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70731002); 教育部博士点科研基金资助项目(20090091110001)

作者简介: 金帅(1985-), 男(汉族), 山东济宁人, 江苏大学工商管理学院, 讲师, 博士, 研究方向: 计算实验与环境经济政策。

Gangadharan(2006)应用实验经济学方法揭示了污染排放不可完全监控情形下企业排污决策与银行存储机制的关联影响,结果表明存储机制可降低污染随机性带来的价格波动,却会诱发更显著的违规行为^[10]; Ch vez 等(2009)考察了不完全信息下存在巨大实施成本的排污权交易系统中政府的污染控制对策,提出竞争性的排污权交易市场并不能确保治污成本有效的效果^[11]; McEvoy 与 Stranlund(2009)则对国际环境协议中自我实施机制进行了探讨,并认定巨大的监测成本限制了国际合作保护环境的尝试^[12]。

总体而言,目前对于排污权交易实施与监管的研究主要集中在政策不完全实施条件下企业违规行为规律及其影响的研究,或者将监管作为硬性约束研究特定惩罚方案下企业生产经营的优化决策,缺乏对管制者为实现总量控制目标的多种策略选择的系统把握,进而鲜有对成本有效地达成该目标的监管机制设计进行深入探讨。同时,现有研究偏重于污染治理及其成本有效性的分析,污染量一般为外生变量;实际上,当许可证被赋予流通性后,其便于劳动力、原材料等一同成为企业的资产与生产要素,企业经营运作的诸多环节将受到显著影响,从微观层面将企业生产、削减、交易等环节综合起来考虑是必要的^[13]。此外,仅停留在微观层面分析依然是不够的,生态系统修复的长期性决定了排污权交易需要经历漫长的实施过程,进而有必要从动态演化的视角重新审视监管策略的有效性及其效率。基于以上认知,在上述文献的基础上,本文通过构建由一个管制者与多个排污企业组成的两阶段博弈模型,从许可证分配、监管力度、行政处罚方案三方面,研究实现总量控制目标的排污权交易最优监管策略设计。进而,在数理分析的基础上,应用计算实验方法^[14],通过构造更贴近现实的实验模型,从动态复杂性与有限理性的视角,论证不完全信息条件下各种方案的可行性和经济合理性。

2 基本假设与参数

本文主要通过讨论单期排污权交易中企业在产品生产、污染削减、违规排放、许可证交易等环节的最优决策,从许可证分配、监管力度、惩罚方案三方面,研究实现总量目标的最优监管策略设计,如图 1。结合现实情况,作出如下假设:

(1) 完善的污染总量核算体系应纳入社会、经济、环境等因素,得到实现三者效益统一的总量目

标,管制者的基本职能是确保其实现。

(2) 系统中存在大量企业,它们在产成品市场及许可证市场中无显著的支配力。在确定技术水平下,企业产污系数不随产量变化而改变。

(3) 现实环境执法面临巨大的制裁成本^[15],包括惩罚与收缴罚金等相关的行政成本、调查取证与立案审查等带来的潜在成本以及因寻租而丧失的隐性成本等。假定制裁成本与罚金总额线性相关。

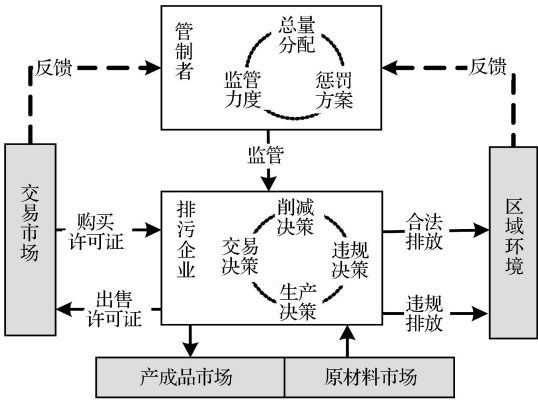


图 1 排污权交易系统中政府监管策略分析框架

本文所涉及的主要参数符号汇总如下:

- N : 系统中企业数量, 单个企业用 i 标识;
- \bar{E} 、 L : 分别为区域污染排总量控制目标与许可证分配总量, 则有效实施必先满足 $L \leq \bar{E}$;
- l_i^0 : 企业 i 初始分配许可证数量, 则 $\sum_{i=1}^N l_i^0 = L$;
- e_i : 企业 i 生产带来的污染量, 与产量 q_i 线性相关, 即 $e_i = k_i q_i$, 其中, k_i 为产污系数;
- a_i 、 v_i 、 l_i : 分别为企业 i 的污染削减量、违规量与许可证持有量;
- E 、 A 、 V : 分别表示区域内所有企业污染产生总量、削减总量与违规总量;
- $b_i(e_i)$: 产品收益函数, $b_i(e_i) = \theta q_i - d_i(q_i)$, 其中 θ 为产品价格, $d_i(q_i)$ 为生产成本, $b'_i > 0$, $b''_i < 0$;
- $c_i(a_i)$: 企业污染削减成本函数, $c'_i > 0$, $c''_i > 0$;
- $F(v_i)$: 违规排放惩罚函数, 不失一般性, 假定 $F(v_i) = F_0 + f(v_i)$, 其中, F_0 为固定罚款, $f(v_i)$ 为变动罚款, $f'(v_i) \geq 0$, $F(0) = 0$, $f(0) = 0$;
- p : 许可证市场价格;
- π_i : 管制者对企业 i 的监管水平, $0 \leq \pi_i \leq 1$;
- μ 、 β : 分别对每个企业进行监控所耗费的平均监测成本与收缴单位罚金付出的期望制裁成本;

$C(a, L)$ 、 $B(e, L)$: 分别为总量为 L 时区域治污总成本与经济产值, $C(a, L) = \sum_{i=1}^N C_i(a_i)$, $B(e, L) = \sum_{i=1}^N b_i(e_i)$, 其中, $a = (a_1, a_2 \dots a_N)$, $e = (e_1, e_2 \dots e_N)$ 。

3 博弈模型建立与分析

在目前环境监管体系下, 管制者无法拥有企业实际排污的完全信息, 因而, 企业趋利性本质与污染治理的外部性决定其生产及治污决策建立在各种方案的成本收益分析之上。在排污权交易系统中, 企业生产带来的污染物主要有三种处理渠道: 污染削减量 a_i 、持有许可证对应的合法排污量 l_i 以及违规排放量 v_i 。则守法企业为达总量控制目标, 须 $e_i \leq a_i + l_i$; 违规企业的违规量 $v_i = e_i - a_i - l_i$ 。假定许可证不能存储与借贷, 但可通过市场自由交易, 则企业一旦存在许可证剩余可以通过卖出富余或降低削减量节约治污成本。因而, 对于任何理性企业, $e_i = l_i + a_i + v_i$ 。当 $l_i^0 > l_i$ 时, 企业出售许可证; 反之, 从市场中购买。由此可见, 在排污权交易条件下, 企业生产、削减、交易、违规等决策彼此紧密相关。故其净收益可表述为:

$$\prod_i = b_i(e_i) - c_i(a_i) - p(l_i - l_i^0) - \pi_i F(v_i)$$

为实现环境质量目标, 管制者同样存在多种策略选择。如果区域内存在违规行为, 一方面可调节 $L \leq \bar{E} - V$, 使污染排放总量不超过环境容量; 另一方面也可通过提高 π_i 或 $F(v)$ 迫使企业守法排放。然而, 根据对现实环境执法过程的分析^[16, 17], 管制必然带来可能巨大的监测与制裁成本, 期望管制成本 $TE(\pi, v) = \sum_{i=1}^N \pi_i [F(v_i) + W]$, 其中, $\pi = (\pi_1, \pi_2 \dots \pi_N)$, $v = (v_1, v_2 \dots v_N)$ 。由于环境管制难免会对区域经济产出、污染治理成本等产生影响, 因而, 监管策略设计也需要综合考虑各种方案下的成本与收益, 以实现更多社会福利。故管制者效用函数可描述为:

$$SW = B(e, L) - C(a, L) - TE(\pi, v)$$

因此, 管制者与排污企业之间是一个动态博弈过程。首先, 管制者制定监管策略, 包括 L 、 π 与 $F(v)$, 在实现总量目标的同时, 最大化社会福利; 企业基于 π_i 与 $F(v)$, 进行净收益最大化的经营决策制定。该问题可用一个两阶段博弈模型表示如下

$$\max_{\{L, \pi, F(\cdot), v\}} SW = B(e, L) - C(a, L) - TE(\pi, v) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t. } & \max_{\{e_i, a_i, v_i\}} \prod_i = b_i(e_i) - c_i(a_i) - p(e_i - a_i - v_i - l_i^0) - \pi_i F(v_i) \quad i = 1, 2 \dots N \\ & e \geq 0, a \geq 0, v \geq 0, e - a - v \geq 0, L + V \leq \bar{E} \end{aligned} \quad (2)$$

该问题采用逆向归纳思路解决。首先分析特定 π_i 、 $F(v)$ 下企业最优经营决策; 进而, 在考虑企业最优反应的基础上, 设计社会最优的监管策略。

3.1 企业决策行为分析

基于特定 π_i 与 $F(v_i)$, 企业分两步进行决策, 首先决定守法是否成本有效, 然后再制定排污方案。

定理 1 在特定 π_i 、 $F(v)$ 下, 无论企业是否守法, 其最优决策是 $c'_i(a_i) = p$, $b'_i(e_i) = p$ 。而若企业存在违规, 其违规量成本有效的必要条件为 $\pi_i f'(v) = p$, 最优违规量满足:

$$\begin{aligned} \text{当 } F_0 = 0 \text{ 时, } v_i^* &= \begin{cases} 0, & \pi_i f'(0) \geq p \\ v, & \pi_i f'(v) = p \end{cases} \\ \text{当 } F_0 > 0 \text{ 时, } v_i^* &= \begin{cases} 0, & \pi_i F(v) \geq pv \\ v, & \pi_i F(v) < pv \end{cases} \end{aligned}$$

证明: 若企业选择达标排放, 则 $a_i + l_i = e_i$, $v_i = 0$, 代入式 (2), 由其一阶条件知, 企业污染量与削减量满足 $b'_i(e_i) = p$, $c'_i(a_i) = p$; 但若选择违规, 则 $a_i + l_i + v_i = e_i$, $v_i > 0$, 此时, 式 (2) 一阶条件为

$$c'_i(a_i) - \pi_i f'(v_i) = 0 \quad (3)$$

$$p - \pi_i f'(v_i) = 0 \quad (4)$$

$$p - b'_i(e_i) = 0 \quad (5)$$

因为目标函数是严格凸函数, 且约束条件为线性, 因此可得到唯一的关于生产量、削减量、违规量的最优解。式 (3)、(4) 结合可得, $c'_i(a_i) = p$ 。

由式 (4) 可知, 当 $F_0 = 0$ 时, 若管制者对企业 i 的监管力度 $\pi_i = p/f'(v)$, 则企业违规排污量为 v 。进而可得, 企业守法的均衡条件为 $\pi_i = p/f'(0)$ 。若 $\pi_i \geq p/f'(0)$, 守法排放是企业的最优决策; 反之, 企业最优违规量 $v_i^* = \varphi^1(p/\pi_i) > 0$, 其中 $\varphi(x) = f'(x)$ 。而当 $F_0 > 0$ 时, 由于企业的目标函数在 $v = 0$ 点不连续, 若 $\pi_i = p/f'(v)$, 企业仍需对守法与违规排放的期望成本进行比较。由于企业最优生产与削减决策只与 p 相关, 因而, 是否违规只需权衡许可证市场价值与期望惩罚成本。如果 $pv \leq \pi_i F(v)$, 则 $v_i^* = 0$; 反之, $v_i^* = v$ 。定理得证。

定理 1 表明: (1) 企业的生产与削减决策都是保持其 $c'_i(a_i)$ 、 $b'_i(e_i)$ 与许可证市场价格相一致, 并不受 π_i 、 $f(v)$ 的影响; (2) F_0 并不影响企业边际行为, 只是在其选择违规时增加了期望成本, 因而, 激

励企业守法的监管水平阈值,在 $F_0 = 0$ 时等于 $p/f'(0)$, 当 $F_0 > 0$ 时小于 $p/f'(0)$; (3) 不论 F_0 取值如何,企业只要突破其约束,进而选择违规,则最优违规量取决于 π 、 $f(v)$ 等外部因素,不再受自身内部特征的影响。所以,在刚性约束 (F_0) 不能确保守法的情况下,即便有预算约束的管制者也不宜依据企业微观成本差异而设定差异化监管策略。

由此可见,排污权交易管制下的企业行为特征与在传统命令-控制手段下截然不同。在后者,企业独立决策,面临高削减成本或严格排放标准的企业存在更大违规动机,进而,企业内部特征是固定标准等制定的关键因素^[6]。在排污权交易系统中,许可证价格将企业生产、削减以及违规等决策紧密联系在一起,并成为企业衡量自身决策成本有效的重要标准。通过交易,许可证直接从治理成本低的企业流向治理成本高的污染者,降低社会治理成本;同时,资源也间接地定向流动到生产收益更高的企业,提高资源利用率与社会资本。这是排污权交易区别于命令-控制手段的显著特征,而许可证价格在其中同时履行着价格的配给功能与分配功能。

3.2 最优监管策略分析

通过以上分析,管制者可以推断特定 π 与 $F(v)$ 下企业的最优决策,进而可在确保总量控制目标实现的前提下进行监管对策设计,使区域社会福利最大化,包括区域经济效益、治理成本以及管制成本。

定理 2 若监管策略满足 $L^* = \bar{E} - Nv^*$, $\pi^* = p/f'(v^*)$, $v^* < \bar{E}/N$, 则 p^* 、 E^* 、 A^* 为常数,且满足 $A^* = E^* - \bar{E}$ 。

证明: 用反证法证明,假设存在两个许可证均衡价格 p^1 与 p^2 , 且 $p^1 > p^2$ 。在 p^1 与 p^2 下,企业 i 的污染量、削减量、许可证持有量及违规量分别为 e_i^1 、 a_i^1 、 l_i^1 、 v_i^1 与 e_i^2 、 a_i^2 、 l_i^2 、 v_i^2 , 则有 $e_i^1 = a_i^1 + l_i^1 + v_i^1$, $e_i^2 = a_i^2 + l_i^2 + v_i^2$ 。由定理 1 可知, $b'_i(e_i^1) = c'_i(a_i^1) = p^1$, $b'_i(e_i^2) = c'_i(a_i^2) = p^2$ 。由于 $b''_i(e_i) < 0$, $c''_i(a_i) > 0$, 所以, $e_i^1 < e_i^2$, $a_i^1 > a_i^2$ 。进而有, $l_i^1 + v_i^1 < l_i^2 + v_i^2$, 则 $\sum_{i=1}^N (l_i^1 + v_i^1) < \sum_{i=1}^N (l_i^2 + v_i^2)$ 。由于许可证通过市场再分配后总量不变,可得 $L^* + \sum_{i=1}^N v_i^1 < L^* + \sum_{i=1}^N v_i^2$ 。由定理 1 知,当 π^* 一定时, $v_i^1 = v_i^2 = v^*$, 推知 $L^* + Nv^* < L^* + Nv^*$, 故假设不成立。所以,当定理 2 条件满足时,存在唯一均衡价格 p^* 。由定理 1 得,企业最优决策 a_i^* 与 e_i^* 都为常数,进而 A^* 、 E^* 均为定值,且 $A^* = \sum_{i=1}^N a_i^* = E^* - \sum_{i=1}^N l_i^* - \sum_{i=1}^N v_i^* = E^* - \bar{E}$ 。定

理得证。

由此可知,只要管制者严格按照总量控制目标分配许可证,则区域污染治理成本与经济效益只与环境容量有关,并不受任何备选监管策略的影响。进而,社会最优的监管策略设计实质上只需实现管制成本有效。由定理 1 可知,虽然违规决策是企业对监管方案做出的反应,但是管制者依然可以通过改变监管水平、惩罚方案等对其调节,故企业违规量可以看作管制者的决策变量。因此,在特定惩罚方案下,最优监管策略转化为下式的解:

$$\begin{aligned} \min_{(v)} & \beta\pi F(v) + \mu\pi \\ \text{s. t. } & \mathcal{F}'(v) - p = 0, v \geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)充分展现了管制者的两难境地。监测成本与 π 正相关,降低 π 可减少监测成本,但会导致 v 升高,进而期望制裁成本也会增加。所以,管制者需要在减少监控成本与增加制裁成本之间权衡。进而,如果允许违规行为并不能降低管制成本,则需迫使企业合作守法, $L^* = \bar{E}$; 否则,诱导企业进行一定违规排放, $L^* = \bar{E} - Nv^*$ 。但仍须满足 $v^* \leq \bar{E}/N$, 不然,排污权交易就沦为了变相的排污收费制度。

结论 1 最优监管策略激励企业守法排放的充分条件为: $(\mu + \beta F_0)f''(0) \leq \beta f'^2(0)$, $\pi^* = p/f'(0)$; 最优监管策略诱导企业违规排放的必要条件为: $(\mu + \beta F_0)f''(0) > \beta f'^2(0)$, 最优设计满足: $\pi^* = p/f'(v^*)$, $\beta f^2(v^*) = (\mu + \beta F_0)f''(v^*)$, $L^* = \bar{E} - Nv^*$ 。

证明: 式(6)的拉格朗日函数为 $L = \pi[\mu + \beta F(v)] + \lambda[\mathcal{F}'(v) - p] - \lambda v$, 则其最优性的充分必要条件满足:

$$L'_v = \pi\beta f'(v) + \lambda\mathcal{F}''(v) - \lambda = 0 \quad (7)$$

$$L'_\pi = \mu + \beta F(v) + \lambda\mathcal{F}'(v) = 0 \quad (8)$$

$$\mathcal{F}'(v) - p = 0 \quad (9)$$

$$\lambda v = 0, \lambda \geq 0 \quad (10)$$

先考虑最优监管策略激励企业守法的情况,即 $v = 0$ 时,由式(10)可知, $\lambda \geq 0$ 。代入式(7)得

$$\beta f'(0) + \lambda\mathcal{F}''(0) \geq 0 \quad (11)$$

由式(8)可知

$$\mu + \beta F_0 + \lambda\mathcal{F}'(0) = 0 \quad (12)$$

式(11)与(12)联立则得,最优监管策略为激励企业守法的充分条件为

$$\beta f^2(0) \geq (\mu + \beta F_0)f''(0) \quad (13)$$

但是,当 $F_0 > 0$ 时,管制成本在 $v = 0$ 时不连续,即便以上条件不满足, F_0 足够大仍可对企业产

生吓阻作用,因而,式(13)并非激励守法的必要条件。当 $\beta^2(0) < (\mu + \beta F_0)f''(0)$ 时,诱导企业违规是最优监管策略,但由于 F_0 足够大仍能驱使企业守法,因而, $\beta^2(0) < (\mu + \beta F_0)f''(0)$ 也只是诱导违规的必要条件。只有 $F_0 = 0$ 时,以上条件才为充要条件。

当最优监管决策需要管制者诱导企业违规排放,即 $v > 0$ 时,由式(10)知, $\lambda = 0$ 。代入式(7)可知, $\beta'(v) + \lambda''(v) = 0$ 。因此,若管制者需要诱导企业违规,则最优策略满足:

$$\beta^2(v) = (\mu + \beta F_0)f''(v) \quad (14)$$

$$\beta'(v) - p = 0 \quad (15)$$

结论得证。

结论 2 如果最优策略为激励企业守法,则 $f''(0) = 0$, $f'(0)$ 越大越好;反之, $f'(0) = 0$, $f''(0)$ 越大越好。但在任何情况下, $F_0 = 0$ 。

证明:如果最优策略为激励企业守法,则制裁成本为 0。因此,追求社会福利最大化实质上为监测成本最小化。而监测水平与监测概率线性相关。由定理 1 可知,当 $F_0 = 0$ 时,最优监管水平 π 与 $f'(0)$ 成反比,则 $f'(0)$ 越大社会福利越大;当 $F_0 > 0$ 时,增加 F_0 会提升企业违规门槛,最优监管水平 $\pi < p/f'(0)$ 。此时,看似 F_0 越大越好,但需保证 F_0 已足以驱使企业守法,否则在最优监管水平下一旦 F_0 对企业的约束力丧失,最优违规量仅与边际惩罚有关,所以,引入 F_0 会冒更大违规风险。结论 1 同样也表明, $f'(0)$ 越大, F_0 与 $f''(0)$ 越小,最优决策为激励企业守法的充分条件越容易满足。

如果最优策略为诱导企业违规,则存在制裁成本。从结论 1 证明部分可知, F_0 不影响成本最优条件,但会增加制裁成本,因而, $F_0 = 0$ 时社会福利更优。将 $f(v)$ 用其二阶泰勒展开形式近似表示,则 $F(v) = f'(0)v + f''(0)v^2/2$ 。可知,当 $2df'(0) + vdf''(0) = 0$ 时,所有最优诱导违规量为 v 的惩罚方案下收缴的罚款数目相等。进而,将其带入结论 1 中的拉格朗日函数中,并对 $f'(0)$ 求导可得:

$$\begin{aligned} dL/df'(0) &= \partial L/\partial f'(0) - \partial L/\partial f''(0)df''(0)/df'(0) \\ &= \pi(\beta + \lambda)df'(0) - (\beta + 2\lambda)df'(0) \\ &= -\lambda df'(0) \end{aligned}$$

从式(8)知, $\lambda < 0$, $dL/df'(0) > 0$ 。所以,当备选方案的罚金一定时,提高 $f'(0)$ 会加重管制成本压力,进而社会福利降低。由于 $df''(0)/df'(0) = -2/v$, 则 $f'(0)$ 越小,须 $f''(0)$ 越大。因此,若最

优策略为诱导违规,则 $f'(0) = 0$ 时社会福利更优。结论得证。

然而,管制者选择激励企业守法还是诱导违规决定了许可证供给量及最优监管力度的确定。因此,成本有效的监管策略仍需对这两类策略进行权衡。

结论 3 当 $\beta \geq 0$ 时,存在实现总量控制目标的社会最优监管策略为激励企业守法排放,并满足 $L = \bar{E}$, $\pi^* = p/f'(0)$, $F(v) = f'(0)v$, 其中 $f'(0) > p$ 。

证明:假定激励企业守法与诱导违规的两类监管策略在相同区域内实施,且监管力度均为 π 。以下分别用下标 0、 v 区分,则所有备选策略下监测成本为 $N\mu\pi$ 。当管制者选择激励企业守法时, $f'_0(0) = p/\pi$, 期望处罚为零, $TE_0 = N\mu\pi$;而当选择诱导违规时, $f'_v(0) + f''_v(0)v = p/\pi$, $v > 0$, 期望处罚大于零,则 $TE_v > N\mu\pi$ 。故有 $TE_0 \leq TE_v$ 。而且,激励企业守法的监管策略最优设计独立于管制者的成本参数,仅与许可证价格有关。此外,将结论 2 代入结论 1 可知,激励企业守法的最优策略满足的必要条件为 $\beta'^2(0) \geq 0$, 即只要 $\beta \geq 0$ 则该策略发挥作用;而诱导违规的最优策略设计为 $\beta v^{*2}f''(0) = \mu$, 由于 $v^* \leq \bar{E}/N$, 可知 $\beta \bar{E}^2 f''(0) \geq \mu N^2$, 故该策略有效的条件为 $\beta \geq \mu N^2 / [\bar{E}^2 f''(0)] > 0$, 否则,追求管制成本有效必定使排污权交易制度名存实亡。实际上,企业在生产与削减等方面存在显著差异决定了 $v^* \leq \bar{E}/N$, 因为若系统中存在过多企业 $e_i^* - a_i^* < v^*$, 此时,企业最优决策为 $c'(a_i) = b'(e_i) < p$, $l_i^* = 0$, 这依旧意味着管制缺失。因此,相比而言,激励企业守法的策略还有更为广泛的适用空间。结论得证!

结论表明:(1)如果管制者能够从行政处罚中获得高收益,则任何追求管制成本有效的行为都会形成管制者职能缺失。(2)只要管制者存在正的执法成本,则实现总量控制目标的最优策略为激励企业守法排放,这并不是单纯地通过设置更高的监管力度或惩罚力度来实现的,而是需要追求两者的统一。

4 计算实验模型的进一步分析

通过构建管制者与企业间的博弈模型,从均衡视角分析了排污权交易中的政府监管对策。不过模型暗含着完全信息这一重要假设,即企业对许可证价格具有理性预期,管制者对市场价格或企业成本

收益函数也有完全知识。而现实中排污权交易系统是由众多具有自主性与适应性能力的异质主体组成的复杂系统。主体间信息的不完备性、经验驱动的行为偏差与架构效应以及要素间的非线性关联,使系统演化具有不稳定性与多态均衡。管制者无法有效预测系统状态,进而制定最优监管策略。同时,管制的有效性、与外界干扰进一步加大了系统演化的不确定性。政策本身的复杂性、实施效果的滞后性、系统演化的不确定性、过程的不可逆性等使得政府对该政策一直持谨慎态度。因此,在博弈分析的基础上,本文应用计算实验方法构建基于异质主体的可控制可复现的排污权交易实验模型,从动态、有限理性的视角对系统监管策略进行更贴近现实的实验分析,并论证各种方案的可行性与经济合理性。

4 1 计算实验模型构建

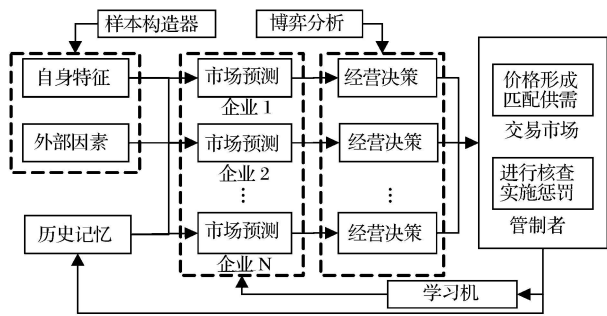


图 2 排污权交易计算实验模型框架

对排污权交易监管策略研究的实验模型的总体架构如图 2 所示。利用 Multi-agent 技术实现对系统参与主体的异质性建模,参照博弈模型分析的结论,设定相应流程与决策规则,并赋予主体自主决策、记忆与学习的能力。具体如下:

(1) 样本构造: 对任意企业 i , $d_i(q) = d_i^F + d_i^V q$, $c_i(a) = c_i^F + c_i^V a$, 其中, d_i^V , c_i^V 为变动成本, 主要受原材料、燃料及动力等价格影响。则产量为 q_i 时, $\Pi_i = \theta k_i q_i - k_i(d_i^F q_i - c_i^F a_i) - k_i^2(d_i^V q_i^2 - c_i^V a_i^2) + \xi$ 其中, ξ 为固定收益。由于 ξ 并不影响企业边际行为, 故模型设定 $\xi = 0$ 。鉴于现实企业在产品种类 (k_i 、 θ)、生产与削减技术 (d_i^V 、 c_i^V) 等方面存在明显差异, 利用 Multi-agent 技术实现具有多属性差异的实验样本构建。并假定区域内所有企业的特定属性近似服从对数正态分布。

(2) 一级分配市场: 由科斯定理可知, 若交易费用为零, 无论初始权利如何界定, 都可以通过市场交易达到资源最佳配置, 所以, 模型仅采用同比比例削减法进行初始许可证分配, 削减率 $R = 1 - \bar{E}/E$, 企业

i 初始分配得到的许可证数量 $l_i^0 = R \cdot e_i$ 。

(3) 企业行为描述: 在每交易周期开始, 企业首先依据特定决策机制预测许可证价格 \hat{p} , 据此制定经营决策, 参见定理 1。企业若许可证富余, 则以不低于 \hat{p} 的价格出售剩余; 反之, 从市场购买。由于 $c_i''(a) > 0$, \hat{p} 偏低的需方仍可能具有较强的动机, 购买 t_i 单位许可证使当期实际边际削减成本 $c_i'(e_i - l_i^0 - t_i) = p^i > \hat{p}$, 以最大可能弥补预测失准带来的损失。因而, 需方购入价格上限为当期削减责任下的最大边际削减成本, 即 $c_i'(e_i - l_i^0)$ 。交易结束后, 企业根据许可证盈余重新优化削减与违规决策。需要指出, 模型用有限理性假设代替了理性预期假设。即每个企业拥有不同的预测方法, 主要表现在其预测市场价格时对历史平均价格、前期现货价格、前期预测价格等具有不同的权重。交易结束后, 企业进入学习过程, 根据当期交易与收益情况改变权重分配, 以提高未来预测的准确度。

(4) 二级交易市场: 在供需双方匿名提交供需量及价格底线后, 进入价格形成过程。模型未再探讨普遍研究的交易机制, 如密封拍卖等, 而是采用拟瓦尔拉斯拍卖机制来近似模拟交易过程。政府作为拍卖人利用计算机在满足卖方保留价格小于成交价格与买方最高承受价格的情况下, 对供需双方进行撮合, 使市场中许可证得到最优配置, 进而得到每期现货价格。

4 2 实验设计与结果分析

从博弈分析已知, 实现总量控制的最优策略设计为 $L = \bar{E}$, $f'(0) = p/\pi$ 激励企业守法。然而, 现实系统的复杂性致使管制者对许可证价格的预测与均衡值存在偏差。因而, 本实验固定监管水平, 重点从惩罚力度设定的角度出发, 对不完全信息条件下的排污权交易监管策略进行实验分析与检验。(注意: 以下惩罚力度进行了无量纲处理, 表述为实际边际处罚与理论边际处罚的比率) 实验步骤如下: 首先, 生成实验样本, 对特定惩罚力度下的系统演进过程进行实验模拟, 每次实验模拟运行 80 个周期。由于主体决策受路径依赖与随机因素的影响, 每次实验结果仅是系统演化的一种路径, 为此, 每个实验运行 20 次, 以上为一组实验。分别选取惩罚力度从 0.025 到 1.5, 间隔 0.025, 共进行了 60 组实验。为了使得每组实验在相同区域企业样本下运行, 在样本构造器中加入伪随机数生成样本。

实验模型主要初始参数设置如下: $N = 100$, $E(\theta) = 6$ 元/kg, $D(\theta) = 2$ 元/kg, $E(k_i) = 1$,

$D(k_i) = 0.2, E(d_i^V) = E(c_i^V) = 2 \text{ 元/kg}, D(d_i^V) = D(c_i^V) = 0.5 \text{ 元/kg}, \bar{E} = L = 50000 \text{ 吨}, \pi = 0.5, \beta = 0, \mu = 0.$

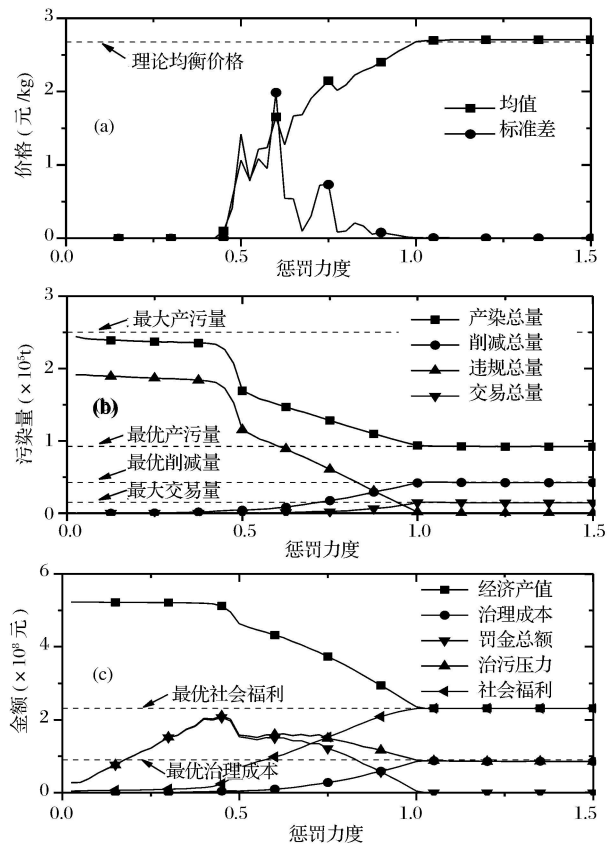


图3 惩罚力度对系统演化影响规律的示意图

通过对不同惩罚力度下系统演化最终状态的统计处理,得到惩罚力度对许可证价格、相关污染统计量及经济指标的影响规律,见图3。由图3可知,当惩罚力度大于理论值时,系统最终都可以演化到接近均衡状态,且更高的惩罚力度对最终状态并无明显提升。但随着惩罚力度从1不断降低,许可证平均价格具有加速下降趋势;当惩罚力度小于0.45时,许可证几乎一文不值。而数次实验的许可证价格标准差先增加后降低,表明当惩罚力度小于理论值时,市场价格已无法有效引导资源的合理配置,尤其是当惩罚力度小于0.6时,价格偏差接近甚至大于均值,系统处于混沌状态,价格引导作用几乎丧失。与此同时,削减量与交易量也随惩罚力度同步下降,制度有效性愈发得不到体现;经济产值虽然与污染产生量、违规量一同不断升高,但仍无法改变社会福利锐减的局面。因此,惩罚与监管力度不协调会对许可证价格产生负效应,进而,价格又反向作用于企业决策,致使系统效率降低。不仅如此,降低惩

罚力度虽然使区域治理成本降低,但是这种看似消失的成本实际上以罚金的形式转嫁到排污企业身上,致使企业污染治理压力实际上不降反升。此时,如果 $\beta > 0$,则必然又给管制者带来沉重的执法成本负担。由此可见,合理的惩罚力度对系统效率的发挥起着决定性作用。

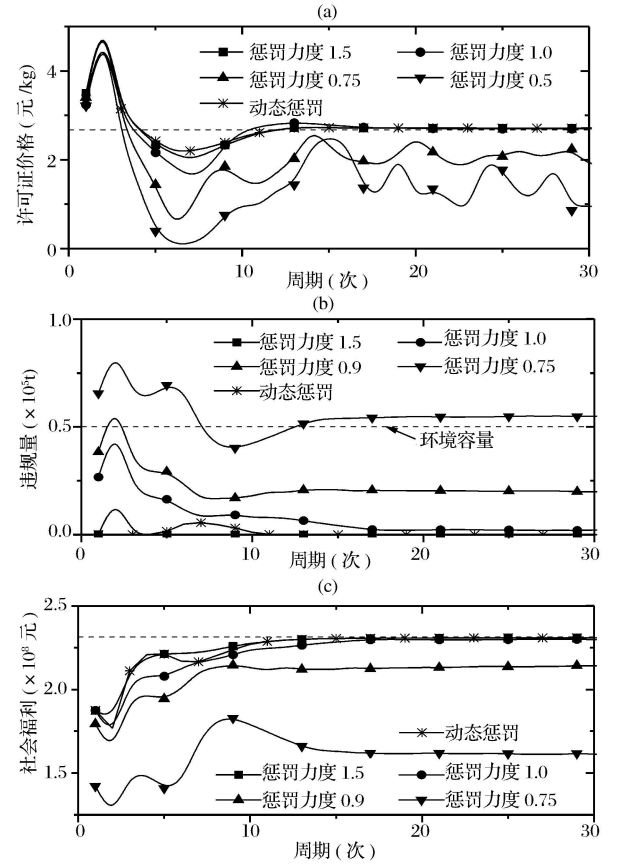


图4 不同惩罚力度下各指标走势比较图

为了更深入地理解惩罚力度对系统演化的影响规律,本文对每组实验的过程数据进行统计与处理,对比分析了不同惩罚力度下许可证价格、违规量、社会福利等在前30周期的走势,见图4。不难发现,合理的惩罚力度对系统有效运行同样有重要影响。从过程上看,力度越大越有助于形成稳定的许可证市场价格秩序,并趋于均衡状态。当惩罚力度失当时,市场价格处于波动之中,振幅随力度的减小而增大,此时违规量与社会福利却相对稳定在次优化水平。仔细分析图4(b)却让我们对追求合理的监管策略依然保持警惕:一方面,惩罚力度稍有不当可能就会对环境造成致命性的伤害,当惩罚力度等于0.75时,仅违规量就已超过环境容量,此时即便管制者不发放许可证,环境质量也会恶化;另一方面,在任何惩罚力度下,监管实施效果的显现具有明显的滞后性,首先表现在系统运行初期许可证价格都

明显偏高于均衡价格, 管制者单纯从价格无法判断力度设定是否得当。同时, 在运行初期违规量相对偏高也是比较棘手的问题。即便惩罚力度等于 1 时, 最大违规量也已逼近环境容量, 尽管随着系统运行违规量逐步降低, 违规现象依然无法杜绝。此时, 社会福利虽然仅略逊于均衡状态, 但仍需指出: 为简单起见, 本文假定的超量污染对社会福利的影响 $DM = 1.2(E - \bar{E}) \sum_{i=1}^N (b_i - c_i) / E$, 尚属流量型的低损害成本函数, 并未考虑污染存量带来的累积效应。

同时, 排污权交易系统的开放性还决定其必然受外界的影响。本文以先前实验设定为基准年, 采用 1985 年至 2008 年工业品出厂价格指数来反映特定期产成品价格变动趋势与程度, 并选取同期原材料、燃料、动力购进价格指数来反映企业生产与削减投入的变动趋势和程度。通过实验得到动态经济下许可证均衡价格的变化趋势, 如图 5 所示。图 5 表明, 随着时间的推进, 许可证价格从基准年的 2.6 元/千克上升到 11 元/千克, 翻了近 4 番。因而, 动态经济下许可证价格的变动性必定成为监管策略制定并有效实施的一大障碍。管制者如果选择异常严峻的惩罚策略, 则必然存在许多不必要的监测成本浪费; 而若定期对惩罚力度进行调整, 又无疑降低了政策的一致性与连贯性。而且, 在任何情况下, 管制者都会冒政策失灵的危险。

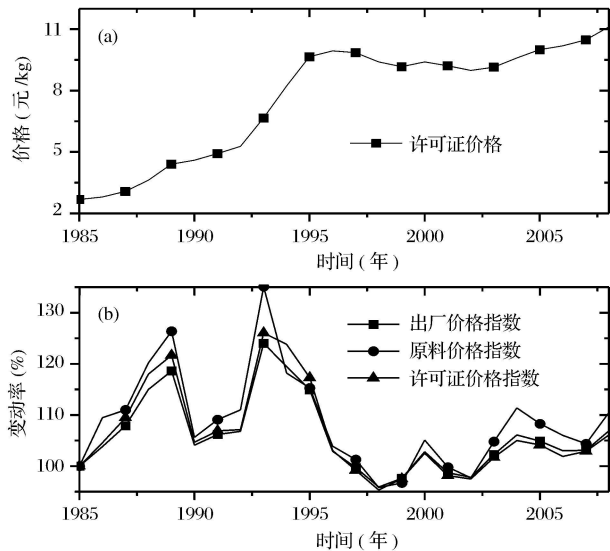


图 5 动态经济下许可证价格变化趋势图

由此可见, 实施效果的滞后性、许可证价格的变动性等使得管制者先于企业制定惩罚标准的静态监管策略尚不能确保制度有效实施。不过从结论 3 还

可发现, 尽管核定许可证价格需要企业生产收益与削减成本的完全信息, 但在不完全信息条件下, 只要许可证市场价格能充分反映其稀缺性, 则最优监管策略设计只与价格有关, 这是排污权交易区别于传统管制的另一明显特征。鉴于此, 本文引入一种整合许可证市场价格的动态监管策略: 管制者事先与企业约定边际违规惩罚为当期许可证市场价格 p 的 T 倍, 即 $f'(0) = Tp$, $T > 1$ 。由结论 3 知, $\pi^* = 1/T$ 就可实现企业守法排放。由于企业经营决策先于交易与惩罚, 所以该策略实际上赋予管制者了博弈主动权, 将守法排放内化到企业决策中。基于先前实验设定, 通过实验得到该策略下系统演进的规律, 并呈现在图 4 中与静态监管进行比较。实验结果表明, 动态监管策略与静态监管相比具有明显优势。在动态监管策略下, 企业违规排放行为比在惩罚力度为 1 的静态监管下得到了更有效地抑制, 且最大违规排放量比惩罚力度为 1.5 时还低。同时, 实施动态监管策略可以产生比前两者更良好的许可证价格形成趋势。尽管在动态监管下社会福利曾略低于高惩罚力度下的社会福利, 但与理论惩罚力度相比已经带来了显著提升。因此, 管制者实施动态的监管策略既能有效控制区域内企业的违规排放行为, 也能使社会福利得到更好的保障。

4 3 对实验结果的讨论及管理启示

(1) 合理的监管机制对系统有效性发挥具有决定性影响。惩罚力度与监管能力不协调将直接干扰许可证市场价格形成, 进而价格反作用于企业决策, 导致宏观层面上次优化的治污效率与社会产出。这对于理解我国现有实践普遍无效率有一定启示。就目前而言, 由于受资源、法律等多方限制, 环境监管能力不足的局面相当普遍并将长期存在^[18], 然而现有实践对违规行为的惩罚力度却与其极不相适应, 突出表现在: ①环境立法对违法行为处罚过轻, 如大气污染防治法、水污染防治法等行政处罚依据都对罚款数额进行双重限定, 严重影响执法力度; 管制者也缺乏强制执行手段, 制裁成本过高。②环保部门一再强调加大惩处力度, 众多实施细则中罚则不清却是一直被忽视的重要缺陷, 导致管制者的惩罚结构选取各异, 进而影响其对违规行为的态度及监管策略的选择; 在具体实施中, 不少地方仍依据排污费制定惩罚标准, 而目前偏低的排污费征收标准显然不能充分反映治污成本和环境资源损失。此外还存在其它原因, 如总量控制不到位、监管机制缺乏柔性等。总之, 在多方影响下, 企业行为与制度选择一直

受排污费等传统管制的惯性与刺激,排污权交易流于形式是必然产生的结果。

(2) 设计合理的监管机制,关键在于识别并系统把握排污权交易区别于传统管制的显著特征。排污权交易优越性根源于环境容量资源的市场化。实验结论表明,整合许可证市场价格的动态监管策略是制度有效实施的更优方案。国外已有经验也印证了该策略的必要性。纵观国际有关 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 等排放交易实践不难发现,由于社会经济系统的动态影响,许可证价格具有很强的不确定性。以酸雨计划为例, SO_2 排放许可的市场价格在 1990 至 2008 年间最低仅 60 美元,最高近 900 美元。然而,酸雨计划却实现了接近完全守法的结果。这诚然与美国完善的连续排放监测系统可实现对企业实时监控以及严厉的超量排放惩罚有密切关联,如在 1990 年每吨超量惩罚为 2 千美元,是当时许可证市价的十多倍。但更应归功于酸雨计划中随居民消费指数动态调节的惩罚方案,消除了价格不确定性带来的影响。因为同在美国的 RECLAIM 计划就曾饱受固定惩罚带来的无法有效实施的困扰,尤其是在 2000 年加州电力危机刺激下, NO_x 排放许可价格由每吨 2 千美元急剧攀升至 4 万美元,导致违规现象异常明显^[17]。在 2003 年整合许可证拍卖出清价格的动态监管机制在《清洁空气法》修正议案中获得提议,由于酸雨计划已经取得了良好成效,该策略并未广泛推广,但无疑也印证了其现实可行性。

更重要的是,动态监管策略通过市场激励与行政监督的有机结合,使其在动态经济下体现出更高的成本有效性与灵活性。动态监管将守法排放内化到企业决策中,企业对市场动态的预期及偏好可以通过企业间自发的市场交易充分反映到许可证市场价格中。进而,监管能力限制不再是制约有效实施的重要障碍,且该策略设计仅取决于管制者自身监管能力,不但节约了区域环境价值核算等所耗费的大量人力与物力,还有助于管制者从繁杂的事务中解脱出来,促进其职能重心放在交易机制及市场行为的规范与完善上。同时,它还因不必对监管策略进行频繁调节,既避免了策略调节带来的资源闲置或缺,又保证政策实施具有连续性与一致性。

此外,本文认为实施动态监管是解决我国现有实践普遍无效率的有益尝试。然而,现有实践一方面相对注重初始分配市场的构建,合理的价格形成机制尚未真正确立;另一方面行政手段应用过多,既遏制了市场机制作用发挥,还导致行政机构不堪重

负。因此,有必要重视排污权交易市场机制及其规则的培育与完善,并通过逐步强化市场化手段与行政管制的整合,形成有效的污染减排机制。

5 结语

本文通过构建管制者与排污企业之间的博弈模型以及系统演化的计算实验模型,分别从静态与动态视角对有效实现总量控制目标的排污权交易监管策略进行分析。主要结论表明:合理的监管机制对系统有效性发挥具有决定性影响;实现总量控制的最优策略设计需要激励企业守法排放,这不是简单地通过设置更高的惩罚力度或监管力度来实现,而要追求监管水平与处罚力度的统一;在不完全信息条件下,管制效果的滞后性、许可证价格的变动性等原因使得管制者先于排污企业制定固定惩罚方案的静态监管策略尚不能确保制度有效实施;而整合许可证市场价格的动态监管策略不但可以有效缓解资源与能力欠缺形成的监管困境,而且在动态经济下具有更高的灵活性与成本有效性。

本文对认识与设计有效的监管机制具有一定的启发性,并从侧面强调了坚持管制科学性的重要性。然而,构建有效的排污权交易监管机制是涉及多层面、多方位的复杂系统工程。本文只是在该领域的初步尝试,试图以数理分析为出发点,通过逐步放宽假设逼近现实系统,构建更符合现实结构与过程的计算实验模型,对其进行精细化研究。

参考文献:

- [1] Downing, P. B., Watson, W. D.. The economics of enforcing air pollution controls[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 1974, 1: 219 - 236.
- [2] Harford, J. D.. Firm behavior under imperfectly enforceable pollution standards and taxes[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 1987, 5: 26 - 43.
- [3] Malik, A. S.. Markets for pollution control when firms are noncompliant[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 1990, 18: 97- 106.
- [4] Keeler, A. G.. Noncompliant firms in transferable discharge permit markets: some extensions[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 1991, 21: 180- 189.
- [5] van Egteren, H., Weber, M.. Marketable permits, market power and cheating[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 1996, (30): 161- 173.

- [6] Stranlund, J. K., Dhanda, K. K.. Endogenous monitoring and enforcement of a transferable emissions permit system[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 1999, 38: 267– 282.
- [7] Lundgren, T.. A real options approach to abatement investments and green goodwill[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2003, 25(1): 17– 31.
- [8] Mrozek, J. R., Keeler, A. G.. Pooling of uncertainty: enforcing tradable permits regulation when emissions are stochastic[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2004, 29(4): 459– 481.
- [9] Konishi, H.. Intergovernmental versus intersource emissions trading when firms are noncompliant[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2005, 49(2): 235– 261.
- [10] Cason, T. N., Gangadharan, L.. Emissions variability in tradable permit markets with imperfect enforcement and banking[J]. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 2006, 61(2): 199– 216.
- [11] Chavez, C. A., Villena, M. G., Stranlund, J. K.. The choice of policy instruments to control pollution under costly enforcement and incomplete information [J]. *Journal of Applied Economics*, 2009, 12(2): 207– 227.
- [12] McEvoy, D. M., Stranlund, J. K.. Self-enforcing international environmental agreements with costly monitoring for compliance[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2009, 42(4): 491– 508.
- [13] 杜少甫, 董骏峰, 梁樑, 张靖江. 考虑排放许可与交易的生产优化[J]. *中国管理科学*, 2009, 17(3): 081– 086.
- [14] 盛昭瀚, 张军, 杜建国. 社会科学计算实验理论与应用[M]. 上海: 上海三联书店, 2009.
- [15] Polinsky, A. M., Shavell, S. Enforcement costs and the optimal magnitude and probability of fines [J]. *Journal of Law Economics*, 1992, 35(1): 133– 148.
- [16] 国家环保部. 环境行政处罚办法[Z]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bl/201002/t20100201_185230.htm.
- [17] Stranlund, J. K., Chavez, C. A., Field, B. C.. Enforcing emissions trading programs: theory, practice, and performance[J]. *Policy Studies Journal*, 2002, 30(3): 343– 361.
- [18] 齐晔. 中国环境监管机制研究[M]. 上海: 上海三联书店, 2008.

Study on Supervision Mechanism in Emissions Trading System

JIN Shuai^{1,2}, SHENG Zhao-han², DU Jian-guo^{1,2}

(1. College of Business Administration, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Computational Experiment Center for Social Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Effective supervision is the fundamental premise of emissions trading programs to exert advantages. In a two-stage dynamic game of regulator and polluting firms, the optimal supervision strategies to achieve a fixed aggregate emissions target cost-effectively in emissions trading system is studied, including supervision level, the aggregate supply of permits and penalty shape. Based on gaming analysis, a heterogeneous agent-based experiment platform for regional emissions trading system is established using computational experiment. Then further analysis are done from perspectives of dynamic and bounded rational. The results show that, the optimal strategy to achieve target is to induce full compliance. This is not simply setting severe punishment, but seeking tradeoff between level of supervision and penalty. Finally, integrating the permit price directly into the penalty shape allows the policy objective to be achieved more cost-effective.

Key words: emissions trading system; supervision mechanism; gaming analysis; computational experiment.