

环境税制下政府与企业环境治理协同行为演化博弈及仿真研究

罗明¹, 范如国², 张应青³, 朱超平²

(1. 广西师范大学 经济管理学院, 广西 桂林 541000; 2. 武汉大学 经济与管理学院, 武汉 430072;
3. 贵州财经大学 管理科学与工程学院, 贵阳 550000)

摘要:构建了政府与企业在环境治理中的博弈模型,采用拟生灭过程演化博弈分析了不同的环境税水平下主体博弈的演化均衡状态以及实现协同治理的环境税制条件,并分析了环境治理博弈突变率和主体学习能力对主体博弈演化均衡状态稳定性的影响。结果表明:在环境治理主体博弈的演化过程中,环境税率对政府和企业协同治理的实现存在门槛效应,并且在不同的政府监管力度差异和企业治理力度差异条件下,环境税的门槛效应存在差异性;环境治理主体的学习能力降低和治理系统突变率提高都会显著降低主体间的协同治理状态的稳定性。最后,为促进我国政府与企业环境协同治理提出相应的对策建议。

关键词:环境治理;协同行为;环境税;演化博弈;拟生灭过程

中图分类号:F272 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-980X(2019)11-0083-10

日益严重的环境污染问题不仅对公众身体健康形成了巨大的威胁,而且对我国经济实现高质量发展产生了重大的不利影响,因此,如何实现环境污染的有效治理,成为当前绿色经济发展的一个巨大挑战。在环境污染的治理过程中,排污企业和地方政府之间如何形成有效的合作,实现环境污染的协同治理,是实现环境污染有效防治的重要途径。因此,环境协同治理成为当前环境治理研究领域的一个热点问题。在环境治理过程中,作为排污主体的企业是污染治理的主要执行者,而政府作为监管者,通过制定相应的环境污染征税制度,并执行环境监管行为,对企业排污征收环境税,将企业排污带来的负外部性内化为企业的内部成本。环境协同治理本质上是治理主体在一定条件下,通过进行互动博弈,最终达到功能互补的均衡状态的动态演化过程。因此,对环境治理中的主体协同治理行为及其演化过程进行分析,对研究环境治理进程具有重要意义。

从现有文献来看,关于企业与政府间的博弈关

系问题的研究主要根据政府采取相关监管措施对企业的治污行为进行监管的互动过程中双方的收益、成本情况来构建相应的收益矩阵及博弈模型,然后对双方博弈行为进行演化分析。然而,不同的学者关注的政府与企业博弈机制具有较大的差异性。在国外的研究中,Sandmo^[1]以环境规制减排成本变化为参考,分析政府与企业博弈中的策略选择行为;Dong等^[2]则在政府与企业的博弈中增加了心理成本、环境收益估算以及治理激励等因素;Zhao等^[3]引入了减排标签制度,并运用政府对采取直接补贴、税收优惠的实际案例对政府与企业的博弈演化展开研究。在国内的研究中,需要考虑我国实际制度情况,如朱庆华等^[4]在排污收费制度环境下对政府与企业之间的博弈关系进行模型构建(因为我国2018年前采取的是排污收费制度),采用系统动力学详细剖析了演化的稳定状态、周期性特征;陈真玲和王文举^[5]则在环境税的制度环境下(我国当前以环境税取代排污收费制度),利用各级政府的税收共享比例、环

收稿日期:2019-09-08

基金项目:国家社会科学重大基金项目“全面深化改革视阈下社会治理体制与机制创新研究”(14ZDA062);广西高校中青年骨干教师科研基础能力提升项目“广西能源回弹效应的测度与演化机理研究”(2019KY0068);贵州财经大学引进人才科研启动项目“企业创新困境的微观机制及其行为决策研究”(2018YJ28);教育部哲学社会科学后期资助项目“新时期中国社会风险治理的复杂性理论及其应对策略”(19JHQ091)

作者简介:罗明(1989—),男,广西贵港人,博士,广西师范大学经济管理学院讲师,硕士研究生导师,研究方向:能源与环境管理;范如国(1965—),男,湖北潜江人,武汉大学经济与管理学院技术经济研究所所长,教授,博士研究生导师,研究方向:能源经济,社会治理;(通讯作者)张应青(1987—),男,贵州镇远人,贵州财经大学管理科学与工程学院副教授,研究方向:低碳创新管理;朱超平(1990—),男,湖北咸宁人,武汉大学经济与管理学院博士研究生,研究方向:环境治理。

境监管力度以及企业的减排程度等因素对中央政府、地方政府与治污企业的博弈关系进行演化分析。此外,还有学者从政府政策传导机制、减排信号以及环境绩效考核等方面对政府与企业的博弈关系进行研究^[6-9]。上述研究都对政府与企业的利益互动博弈关系进行演化分析和仿真模拟,探究实现协同治理的机制,而影响演化路径的因素主要是政府的监管力度、对环境污染的定价(包括排污费、环境税等)以及企业的治污损益、对污染治理的执行力等因素。

从现有研究的方法来看,关于环境治理主体之间的博弈关系研究的方法在不断的深入,一是体现在从传统的静态博弈分析到动态分析,再到后来的演化博弈分析^[10-13]。然而,从现有研究来看,环境治理中主体间的演化博弈关系研究多从复制者动态的策略转换模型出发,强调博弈主体遵循群体平均收益的准则来进行策略转换,但是却较少关注到博弈过程中的突变性、随机性,若要处理主体博弈过程中存在的突变因素,就需要采取新的演化博弈方法,如 Moran 过程、Fisher 过程以及基于拟生灭过程(quasi-birth-death process, QBD 过程)的随机演化博弈方法^[14-18],并结合具体的机制进行深入探索。由于环境治理是一个复杂的系统工程,其治理过程往往会存在众多突变因素,如环境群体性事件、突发环境事件等,导致博弈的主体容易受到治理过程这些不可测的随机因素干扰,做出差异化的主体策略调整。因此,相比单纯根据收益做出反应策略的复制动态过程,本文认为相比刻画突变情况的拟生灭过程更能刻画环境治理中企业与政府之间的博弈演化情况。因此本文采用拟生灭过程来刻画环境治理主体之间的直接博弈及其演化过程,并分析其演化结果,最终给出促进多主体协同治理的对策建议。

1 模型与算法构建

1.1 环境治理主体博弈模型的构建

环境治理主体包括企业主体与政府主体。基于演化博弈的思想,环境治理主体博弈可视为两个群体间的博弈,其中,企业群体为在生产过程中向环境排放污染并需要承担污染治理的排污企业组成的群体,政府群体是政府部门中的决策者、环境监管部门等具有行政监管权主体构成的群体。本文假设企业与政府的群体总数分别为 M_1 和 M_2 ,并保持稳定。为简化分析,假定群体规模有限(M_1 和 M_2 为有限整数)且 $M_1 = M_2$ 。

环境治理中企业群体和政府群体之间进行非对称博弈,企业的策略选择集合为{完全治理,不完全治理},分别记为 s_{11} 和 s_{12} ,政府的策略选择集合为

{严格监管,不严格监管},分别记为 s_{21} 和 s_{22} 。由此,企业与政府博弈的收益矩阵为

$$\begin{bmatrix} (\xi_1, \eta_1) & (\xi_2, \eta_2) \\ (\xi_3, \eta_3) & (\xi_4, \eta_4) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: ξ_i 和 η_i 分别代表企业和政府在双方选择不同的策略下的收益变量。在相关文献的基础上,本文对企业与政府的博弈收益变量进行设定^[9,19],博弈的收益矩阵见表 1。

表 1 政府与企业之间博弈的收益矩阵

		政府	
		严格监管	不严格监管
企业	完全治理	$-C_E - \theta h_1,$ $-C_L + \delta e + \theta h_1$	$-C_E - \theta h_1 \lambda_L,$ $-\lambda_L C_L + \delta e + \theta h_1 \lambda_L$
	不完全治理	$-\lambda_E C_E - \theta h_2,$ $-C_L + \lambda_E \delta e + \theta h_2$	$-\lambda_E C_E - \theta h_2 \lambda_L,$ $-\lambda_L C_L + \lambda_E \delta e + \theta h_2 \lambda_L$

表 1 中, λ_E 是企业选择不完全治理策略时对环境污染排放的治理力度; λ_L 是政府选择不严格监管策略时的监管力度; Q 表示企业生产中直接产生的环境污染排放总量; e 表示企业在当前其治理技术水平下尽最大努力能实现的环境污染治理量。当企业选择完全治理策略时,则企业在治理后的最终污染排放量为 $h_1 = Q - e$;当企业选择不完全治理策略时,设则企业在治理后的最终污染排放量为 $h_2 = Q - \lambda_E e$ 。此外, C_E 表示企业选择完全治理策略时治理环境污染需要的成本; C_L 表示政府选择严格监管策略时的监管成本; θ 表示政府对企业环境污染排放进行监管所征收的环境税的税率; δ 表示政府通过监管带来环境治理政绩提升的边际收益。

假定企业群体中选择完全治理策略的主体个数为 m_1 ,政府群体中选择严格监管策略的个数为 m_2 ,则各主体的预期性收益会受到对方群体的策略选择比例的影响,则企业群体选择完全治理与不完全治理的预期性收益分别为

$$\pi_{s_{11}}[m_2(t)] = \frac{m_2}{M_2} \times \xi_1 + \left(1 - \frac{m_2}{M_2}\right) \times \xi_2; \quad (2)$$

$$\pi_{s_{12}}[m_2(t)] = \frac{m_2}{M_2} \times \xi_3 + \left(1 - \frac{m_2}{M_2}\right) \times \xi_4. \quad (3)$$

同时,政府群体选择严格监管策略与不严格监管的预期性收益分别为

$$\pi_{s_{21}}[m_1(t)] = \frac{m_1}{M_1} \times \eta_1 + \left(1 - \frac{m_1}{M_1}\right) \times \eta_2; \quad (4)$$

$$\pi_{s_{22}}[m_1(t)] = \frac{m_1}{M_1} \times \eta_3 + \left(1 - \frac{m_1}{M_1}\right) \times \eta_4. \quad (5)$$

环境治理过程中企业与政府在进行策略选择的演化上是一个在博弈双方的策略选择影响下,通过学习、模仿行为不断进行策略选择来适应所处

的环境变化的适应过程。因此,采用演化博弈来研究环境治理过程中的政府与企业之间的博弈关系是符合实际情形的。

1.2 基于拟生灭过程的环境治理主体策略转换规则

在环境治理主体博弈的演化过程中,主体策略选择的规则如下:每次分别从中选取一个个体进行配对博弈,并进行策略学习,然后根据某个群体中选择不同策略的比例来衡量该主体的策略选择情况。环境治理中政府与企业间博弈的策略转换过程,本质上是一个随机过程 $m(t)$,其状态空间可表示为

$$S = \{m = (m_1, m_2) = \{0, 1, 2, \dots, M_1\} \times \{0, 1, 2, \dots, M_2\}\} \quad (6)$$

政府与企业环境治理中的策略选择过程,不仅受到所在群体中不同策略选择主体间的收益差异以及对方群体中的策略比例影响,还会受到博弈过程的系统随机性突变因素影响,这些突变因素的存在是环境治理这一复杂系统演化中不可避免的,往往会导致环境治理过程中政府与企业的策略转换存在突变情况。因此,本文选择拟生灭过程来刻画群体的策略转换过程。具体而言,该过程是一个有限状态空间的广义拟生灭过程,该过程的状态转移过程如图 1 所示。下文将过程简记为拟生灭过程。

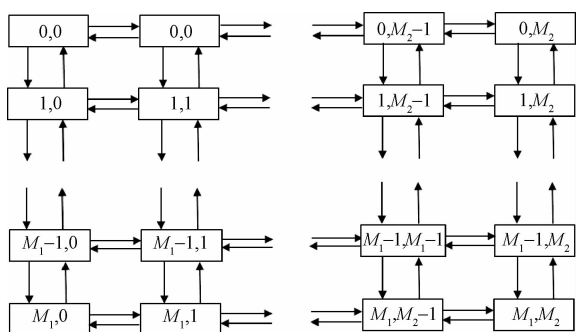


图 1 政府与企业演化博弈中双方主体的策略转化情况图

记企业群体中从策略 s_{12} 转换成策略 s_{11} 的转移率为 $\lambda_1[m_2(t)]$,从策略 s_{11} 转换成 s_{12} 的转移率为 $\mu_1[m_2(t)]$;政府群体从策略 s_{22} 转换成策略 s_{21} 的转移率为 $\lambda_2[m_1(t)]$,从策略 s_{21} 转换成 s_{22} 的转移率为 $\mu_2[m_1(t)]$ 。基于转移率的定义,环境治理主体的策略间转移率的计算,不仅需要考虑到同一主体选择不同策略的收益间的差异,还需要考虑到环境治理作为复杂社会系统自身具有的随机性和突发性。因此,主体的策略间转移率的计算方式如下。

(1)企业群体中从策略 s_{12} 转换成策略 s_{11} 的转移率为

$$\lambda_1[m_2(t)] = \epsilon + r \max\{0, \pi_{s_{11}}[m_2(t)] - \pi_{s_{12}}[m_2(t)]\} \quad (7)$$

$$\pi_{s_{12}}[m_2(t)] \quad (7)$$

(2)政府群体中从策略 s_{22} 转换成策略 s_{21} 的转移率为

$$\lambda_2[m_1(t)] = \epsilon + r \max\{0, \pi_{s_{21}}[m_1(t)] - \pi_{s_{22}}[m_1(t)]\} \quad (8)$$

(3)企业群体中从策略 s_{11} 转换成 s_{12} 的转移率为

$$\mu_1[m_1(t)] = \epsilon + r \max\{0, \pi_{s_{12}}[m_1(t)] - \pi_{s_{11}}[m_1(t)]\} \quad (9)$$

(4)政府群体中从策略 s_{21} 转换成 s_{22} 的转移率为

$$\mu_2[m_2(t)] = \epsilon + r \max\{0, \pi_{s_{22}}[m_2(t)] - \pi_{s_{21}}[m_2(t)]\} \quad (10)$$

其中: r 表示主体的学习能力; ϵ 表示演化系统存在的突变率。

同时,根据随机过程的定义,企业与政府之间博弈演化中 QBD 过程的生成元矩阵可以表示为 Hessenberg 分块矩阵 H ,如式(11)所示:

$$H = \begin{pmatrix} A_{00} & A_{01} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ A_{10} & A_{11} & A_{12} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{21} & A_{22} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & A_{M_2-1, M_2-2} & A_{M_2-1, M_2-1} & A_{M_2-1, M_2} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & A_{M_2, M_2-1} & A_{M_2, M_2} \end{pmatrix} \quad (11)$$

上述模型中设定的转移率的计算方式以及突变率 ϵ 的引入,可以使分块生成元矩阵满足以下条件:①矩阵非退化;②每行元素之和为 0;除了对角线上的元素外,其余元素严格大于 0。于是,在上述条件下,政府与企业之间的演化博弈过程,是以分块 Hessenberg 矩阵为生成元矩阵 H 的有限拟生灭过程。以下将通过相应的算法来计算该有限拟生灭过程最终的稳态,即博弈演化的均衡结果的平稳分布。

1.3 环境治理主体博弈演化的平稳分布求解算法

在前文构建了环境治理过程中政府与企业之间的博弈收益矩阵以及相应的拟生灭过程演化博弈模型的基础上,接下来要解决的问题就是要对上述的拟生灭过程进行求解,解出该过程的平稳概率分布,从而分析在不同的情形下,不同主体最终策略选择的演化情形。

根据上述定义的拟生灭过程及其有限生成元矩阵 H ,记 π 为上述拟生灭过程的最终平稳分布,其中 $\pi = \{p_i, i = 1, 2, \dots, S\}$,于是可以构建相应的平衡方程:

$$\pi H = 0, \pi e = 1 \quad (12)$$

其中： π 是政府群体与企业群体之间博弈而形成的拟生灭过程的最终平稳分布， e 是元素均为 1 的向量。本文采用基于分块矩阵的 Gauss 消元法来对上述拟生灭过程的平稳概率分布进行求解。该随机过程的平稳分布 π 可以将其分段为 $x = (x_1, x_2, \dots, x_{M_2})$ ，每一个分段向量的维数为 $M_1 + 1$ 。倘若需要平衡方程有解，必须假定该拟生灭过程为正常返。因此，该过程可以写成如下形式：

$$x_0 A_{00} + x_1 A_{10} = 0$$

$$x_{i-1} A_{i-1} + x_i A_{i0} + x_{i+1} A_{i+1} = 0, i = 1, 2, \dots,$$

$M_2 - 1$;

$$x_{M_2-1} A_{M_2-1} + x_{M_2} A_{M_2} = 0;$$

$$A_k = \begin{bmatrix} -f(k, 0) & \lambda_2(k) & 0 & \cdots & 0 \\ \mu_2(k) & -f(k, 1) & \lambda_2(k) & \cdots & 0 \\ 0 & \mu_2(k) & -f(k, 2) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \mu_2(k) \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$B_k =$

$$\begin{bmatrix} \lambda_1(1) & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_1(2) & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_1(3) & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \lambda_1(M_2 - 1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \lambda_1(M_2) \end{bmatrix} \circ$$

(16)

$C_k =$

$$\begin{bmatrix} \mu_1(1) & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_1(2) & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_1(3) & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \mu_1(M_2 - 1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \mu_1(M_2) \end{bmatrix} \circ$$

(17)

由此，则平衡方程可写成：

$$H^T x^T = 0 \quad (18)$$

将上述 A 、 B 、 C 矩阵形式代入，可得：

$$\begin{bmatrix} A_0^T & B_1^T & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ C_0^T & A_1^T & B_2^T & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_1^T & A_2^T & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & C_{M_2-2}^T & A_{M_2-1}^T & B_{M_2}^T \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & C_{M_2-1}^T & A_{M_2}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0^T \\ x_1^T \\ x_2^T \\ \vdots \\ x_{M_2}^T \end{bmatrix} = 0 \quad (19)$$

$$xe = 1 \quad (13)$$

于是，将该拟生灭过程的有限生成元矩阵 H 写成：

$$H = \begin{bmatrix} A_0 & C_0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ B_1 & A_1 & C_1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & A_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & B_{M_2-1} & A_{M_2-1} & C_{M_2-1} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & B_{M_2} & A_{M_2} \end{bmatrix} \circ \quad (14)$$

其中： A_i 、 B_i 和 C_i 分别为将矩阵 H 中的元素进行分块后的子矩阵，其具体形式如下所示。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ -f(k, M_1 - 1) & \lambda_2(k) \\ \mu_2(k) & -f(k, M_1) \end{bmatrix} \circ \quad (15)$$

关于上述这一拟生灭过程的平稳分布，Stewart 曾提出了一种求解的算法。该算法是基于 Gauss 消去法来求解拟生灭过程的平衡方程，其中涉及到一个重要的数值分解技术——LU 分解法^[20]。具体的算法步骤如下。

Step 1: 从 $j = 0$ 到 $j = M_2 - 1$ ，首先对 A_j^T 进行 LU 分解为 $A_j^T = L_j U_j$ ，然后将 A_{j+1}^T 进行更新，更新为 $A_{j+1}^T = A_{j+1}^T - C_j^T U_j^{-1} L_j^{-1} B_{j+1}^T$ 。

Step 2: 对 A_M^T 进行 LU 分解，即 $A_M^T = L_M U_M$ ；通过 Step 1 和 Step 2 的计算可以将有限生成元矩阵改写为

$$H = \begin{bmatrix} L_0 U_0 & B_1^T & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_1 U_1 & B_2^T & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_2 U_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & L_{M_2-1} U_{M_2-1} & B_{M_2} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & L_{M_2} U_{M_2} \end{bmatrix} \circ \quad (20)$$

Step 3: 将分解结果回代式(18)中，回代后可得 $H^T x^T = 0$ 的一般解。

Step 4: 代入归一化条件 $xe = 1$ ，即可得到平衡方程的解。

根据 Stewart 的研究，通过上述算法就可以计算得到 π ，即政府与企业之间博弈演化中的拟生灭过程的平稳分布，并分析博弈最终演化的稳定结果^[20]。

2 博弈演化的仿真分析

2.1 参数设置

上述分析构建了环境治理中政府与企业之间博弈的收益矩阵,并基于拟生灭过程设置了治理主体策略转换的规则,提供相应的求解算法。在此基础上,本文需要对主体博弈的演化均衡状态进行求解。若要对博弈演化进行均衡分析,则需要对本文的博弈进行参数设定,从而对博弈进行情景设置及其仿真模拟。

首先,定义以下变量:

(1)当政府选择严格监管策略时,企业选择完全治理策略的净收益:

$$\Delta\pi_1^E = (1 - \lambda_E)(\theta e - C_E) \quad (21)$$

(2)当政府选择不严格监管策略时,企业选择完全治理策略的净收益:

$$\Delta\pi_2^E = (1 - \lambda_E)(\lambda_L \theta e - C_E) \quad (22)$$

(3)当企业选择不完全治理策略时,政府选择严格监管策略的净收益:

$$\Delta\pi_1^L = (1 - \lambda_L)[\theta(Q - e) - C_L] \quad (23)$$

(4)当企业选择完全治理策略时,政府选择严格监管策略的净收益:

$$\Delta\pi_2^L = (1 - \lambda_L)[\theta(Q - \lambda_E e) - C_L] \quad (24)$$

上述定义的4个收益差额变量中,可以看出: $\Delta\pi_1^L > \Delta\pi_2^L$, $\Delta\pi_1^E > \Delta\pi_2^E$ 。本文以环境税率 θ 作为一个参考指标来设置相应的情形,对环境治理中政

府与企业之间的博弈关系展开分析,则 θ 存在4个临界点,分别为

$$\theta_1 = \frac{C_L}{Q - e}, \theta_2 = \frac{C_L}{Q - \lambda_E e}, \theta_3 = \frac{C_E}{\lambda_L e}, \theta_4 = \frac{C_E}{e}。$$

这4个临界值均有相应的经济含义: θ_1 和 θ_2 分别表示在企业选择不同的策略下让政府倾向于选择严格监管策略的临界值, θ_3 和 θ_4 分别表示在政府选择不同的策略下让企业倾向于选择完全治理策略的临界值。从数值大小上比较,显然有 $\theta_1 > \theta_2$, $\theta_3 > \theta_4$ 。由此,可以首先根据 $\theta_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 之间的关系,设置以下6种情况:① $\theta_1 > \theta_2 > \theta_3 > \theta_4$;② $\theta_1 > \theta_3 > \theta_2 > \theta_4$;③ $\theta_1 > \theta_3 > \theta_4 > \theta_2$;④ $\theta_3 > \theta_1 > \theta_2 > \theta_4$;⑤ $\theta_3 > \theta_1 > \theta_4 > \theta_2$;⑥ $\theta_3 > \theta_4 > \theta_1 > \theta_2$ 。同时,通过设定模型中相应参数的取值,使上述4个临界值大小关系能够分别满足上述的6种情形,相应的设置情况见表2。

根据表2的设定,可在这6种情形下进行 θ 的参数设置。在每种情形下,4个临界值均存在大小差异,且临界值的大小关系决定了博弈演化的结果。在每种情形下,4个临界值将参数 θ 的取值范围划分为5个区间。进一步对参数 θ 的取值进行具体设定,即在不同的区间中选取一个代表性的值,以便于进行仿真,设定结果见表3。

表2 各情形的参数设置

条件	情形	参数设置
$\theta_1 > \theta_4$	$\theta_1 > \theta_2 > \theta_3 > \theta_4$	$Q=1000, e=800, C_L=1000, C_E=2400, \lambda_L=0.90, \lambda_E=0.90$
	$\theta_1 > \theta_3 > \theta_2 > \theta_4$	$Q=1000, e=800, C_L=1000, C_E=2400, \lambda_L=0.80, \lambda_E=0.85$
	$\theta_1 > \theta_3 > \theta_4 > \theta_2$	$Q=1000, e=800, C_L=1000, C_E=2400, \lambda_L=0.90, \lambda_E=0.50$
	$\theta_3 > \theta_1 > \theta_2 > \theta_4$	$Q=1000, e=800, C_L=1000, C_E=2400, \lambda_L=0.50, \lambda_E=0.90$
	$\theta_3 > \theta_1 > \theta_4 > \theta_2$	$Q=1000, e=800, C_L=1000, C_E=2400, \lambda_L=0.50, \lambda_E=0.50$
$\theta_1 < \theta_4$	$\theta_3 > \theta_4 > \theta_1 > \theta_2$	$Q=1000, e=800, C_L=1000, C_E=4800, \lambda_L=0.90, \lambda_E=0.90$

表3 各情形下 θ 的取值设置

编号	情形	$\theta \in Q_1$	$\theta \in Q_2$	$\theta \in Q_3$	$\theta \in Q_4$	$\theta \in Q_5$
1	$\theta_1 > \theta_2 > \theta_3 > \theta_4$	$\theta = 6$	$\theta = 4$	$\theta = 3.5$	$\theta = 3.2$	$\theta = 2.5$
2	$\theta_1 > \theta_3 > \theta_2 > \theta_4$	$\theta = 6$	$\theta = 4$	$\theta = 3.5$	$\theta = 3.1$	$\theta = 2.5$
3	$\theta_1 > \theta_3 > \theta_4 > \theta_2$	$\theta = 6$	$\theta = 4$	$\theta = 3.2$	$\theta = 2.5$	$\theta = 1.5$
4	$\theta_3 > \theta_1 > \theta_2 > \theta_4$	$\theta = 7$	$\theta = 5.5$	$\theta = 4$	$\theta = 3.5$	$\theta = 2.5$
5	$\theta_3 > \theta_1 > \theta_4 > \theta_2$	$\theta = 7$	$\theta = 5.5$	$\theta = 4$	$\theta = 2.5$	$\theta = 1.5$
6	$\theta_3 > \theta_4 > \theta_1 > \theta_2$	$\theta = 7$	$\theta = 6.5$	$\theta = 5.5$	$\theta = 4$	$\theta = 3$

注: Q_i 分别表示以 θ_i 划分的区间,以 $\theta_1 > \theta_2 > \theta_3 > \theta_4$ 为例, Q_1 指的是 $[\theta_1, +\infty]$, Q_2 指的是 $[\theta_2, \theta_1]$,依次类推。

通过不同参数条件下设置的6种情形以及环境税率 θ 取值的代表性设置,我们可以首先对政府与企业之间博弈的拟生灭演化过程进行仿真,并对政府与企业之间博弈的演化过程进行分析。

2.2 政府与企业博弈的演化平稳分布分析

在上述参数设置的条件下,假定博弈双方群体规模稳定,不妨设 $M=N=10$,然后利用拟生灭过程的平稳分布求解算法,在本文参数设置的基础上,对

不同情形下的政府与企业拟生灭过程演化博弈的平稳分布进行求解。结果如图 2 所示。

图 2 显示了在上述 6 种情形下,若 θ 取不同的值时,政府与企业的博弈最终演化稳定分布的具体

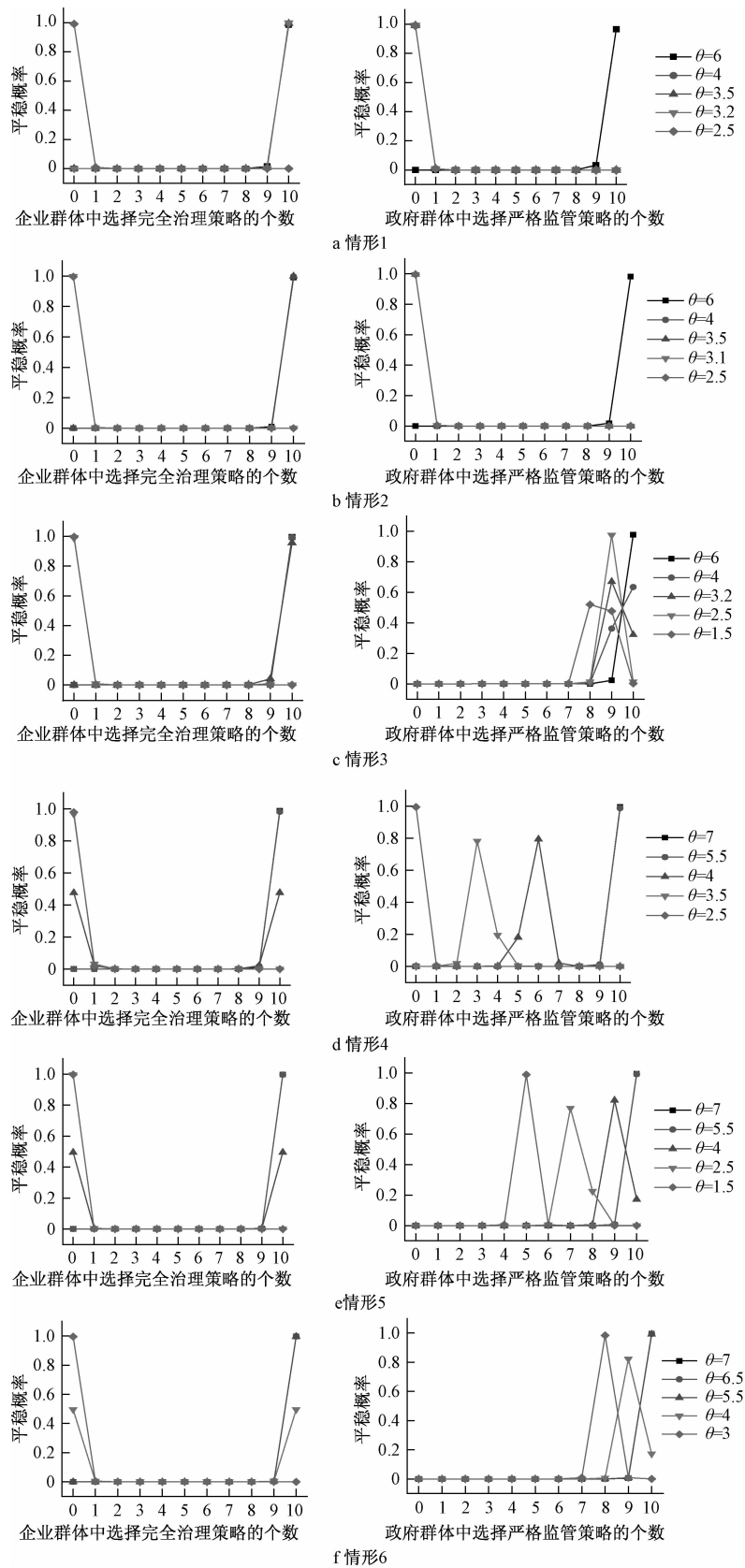


图 2 不同参数情形下政府与企业博弈的演化稳定状态

情况。从图2中,可以得出以下结论。

首先,根据图2的结果,政府环境监管下征收的环境税率对政府与企业的博弈的演化情况起到较大的影响作用。在政府执行环境监管过程中,若能制定一个合理有效的环境税率,可以促进政府与企业之间实现协同治理状态($m_1 = 10, m_2 = 10$)。以情形1为例,当环境税率 $\theta = 6$ 时,企业群体和政府群体出现协同治理状态的概率达到最大,表明对于企业而言, $\Delta\pi_1^E > 0, \Delta\pi_2^E > 0$,因此企业最终会选择完全治理策略,以避免在不完全治理策略下被征收较高的环境税费;同时,对于政府而言,也达到 $\Delta\pi_1^G > 0, \Delta\pi_2^G > 0$,表明政府最终也会选择严格监管策略,从而使政府的收益达到最大化,因此,最终出现($m_1 = 10, m_2 = 0$)协同治理状态的概率最高。但是在其他的税率条件下,如 $\theta = 4, \theta = 3.5, \theta = 3.2$ 的情况下,由于政府征收的环境税率相对较低,虽然能够倒逼企业去实行治理排污以实现污染减排,但是政府企业最终会倾向于选择不完全治理策略,否则会导致其承受较高的监管成本。在环境税率很低的情况下,如 $\theta = 2.5$ 时,会导致两个主体的稳定策略选择以最大的概率演化到($m_1 = 0, m_2 = 0$),此时,政府的环境税制没有起到显著的成效,不仅无法使环境税对企业治理减排的倒逼效果显现出来,反而使得政府的收入难以维持较大的监管支出,从而难以使有效的监管活动持续,最终导致了政府与企业双方均难以对环境治理选择协同治理的策略,并使得演化结果最终恶化,同样的规律在情形2、情形3、情形4、情形5和情形6中均存在。这表明了环境税率对企业进行环境污染治理的倒逼作用存在一定的“门槛效应”,即其制定的环境税率必须达到一定的程度,才能对实现双方的协同治理起到关键作用。

其次,在环境治理主体博弈过程中,政府在不同的策略选择下的监管力度存在差别,当政府选择严格监管策略时,监管力度为1,但倘若其本身执行力较低,选择负面的不完全监管策略时,其监管力度 λ_L 就会较低。因此,可采用策略间的监管力度差异程度($1 - \lambda_L$)反映政府环境监管的执行力水平,若差异程度($1 - \lambda_L$)越大,表明政府自身的执行力越低。在不同的政府监管力度差异($1 - \lambda_L$)的情况下,政府对排污企业征收的环境税率起到的作用也存在差异。在情形1和情形4中,均有 $\lambda_E = 0.90$,但政府监管力度差异值($1 - \lambda_L$)不同:在情形1中, $\lambda_L = 0.90$,表明政府策略间的监管力度差异值($1 - \lambda_L$)较小,这时政府制定的环境税率只要在一个较低的水平,就可以提高企业全部选择完全治理的概率;但情形4中,有 $\lambda_L = 0.50$,表明政府策略间

的监管力度差异值($1 - \lambda_L$)较大,若保持其他参数不变,则在情形4下政府需要制定较高的环境税率水平,才能激发企业选择“完全治理”策略的积极性。造成这种现象的原因在于,若政府部门在选择不同策略之间具有较大的监管力度差距($1 - \lambda_L$),容易促使企业在环境治理过程中滋生机会主义的心态,对于这种情形,若环境税率达不到一定的水平,其作用则难以显现出来。同理,在情形3与情形5中,政府监管力度差距($1 - \lambda_L$)较大,为了使企业选择完全治理策略,政府制定的环境税率水平的门槛也需要相应提高。

再次,企业在博弈过程中选择不同的治理策略也会存在治理力度的差距($1 - \lambda_E$),这一差距衡量的是企业在环境污染治理中执行能力水平。从演化结果来看,企业的治理力度差距($1 - \lambda_E$)也会对环境税率的效应产生影响。在情形1和情形3中,均有 $\lambda_L = 0.90$,当企业治理力度的差距($1 - \lambda_E$)较小时,即情形1的 $\lambda_E = 0.90$,政府在较小的环境税率下就可以维持其整个群体选择严格监管策略的概率最大,但是当企业治理力度的差距($1 - \lambda_E$)较大时,即情形3的 $\lambda_E = 0.50$,则政府选择严格监管的环境税水平的门槛就较高。因为政府对企业的监管本身是一个信息高度不对称的过程,若企业治理力度差距较大,治理污染的执行力较低,本身就意味着政府在监管过程中会遇到高度的不确定性,这在很大程度上导致政府监管的预期成本提高,在这种情形下,政府就需要在环境税水平较高时才倾向于选择严格监管的策略,通过较高的环境税收水平,一方面将企业治理执行力较低产生的负外部性内生化为企业自身的成本,倒逼其提高治理水平,另一方面则可以通过环境税来弱化政府监管预期成本较高的问题,以维持政府环境监管行为的持续运行。同理,在情形4和情形5中,企业的治理力度差距($1 - \lambda_E$)也较大,则需要较高的环境税门槛下才能实现双方的协同治理均衡状态。

2.3 系统突变率与主体学习能力对博弈演化的影响分析

上述分析指出,环境治理博弈中各主体所处的环境税制条件不同,导致最终演化均衡也不同。此外,政府与企业作为博弈主体具有的有限学习理性,以及博弈主体所处的环境具有的复杂性带来的不确定性,也会导致博弈演化均衡结果发生变化。从拟生灭过程演化博弈来看,表现为博弈系统的突变率和博弈主体学习能力对博弈均衡状态的影响。因此,本文进一步研究政府与企业之间博弈演化的突变率与主体学习能力对演化均衡状态的影响。

为了分析突变率对博弈演化均衡的影响,本文

选取情形 1 ($\lambda_L = 0.9, \lambda_E = 0.9$) 和情形 5 ($\lambda_L = 0.5, \lambda_E = 0.5$) 来进行分析, 因为在这两种情形中, 企业与政府的博弈达到了协同状态 ($m_1 = 10, m_2 = 10$), 若突变率产生变化, 使这种原有的协同状态被打破, 则均衡的稳定性较弱。从图 3 的结果来看, 系统的突变率会对政府与企业策略选择演化的协同状态产生显著的影响; 当突变率较小时, 政府与企业以最大的概率选择 $m_1 = 10, m_2 = 10$ 的状态, 此时环境治理主体博弈达到理想的协同演化均衡; 若产生较大的突变率 ϵ , 则政府与企业的策略选择达到理想状态的概率变小, 同时会有一定的概率出现部分政府主体选择不严格监管与企业主体选择不完全治理的组合策略。这表明了突变率的存在会直接影响到环境治理主体博弈的最终演化均衡状态。为此政府与企业环境治理过程中, 需要营造一个良好、平稳

的治理环境, 包括环境治理过程中的制度环境、技术环境、经济环境等, 以避免突变因素对环境治理的最终效果产生较大的影响。

在政府的监管力度差异 ($1 - \lambda_L$) 较小, 且企业的治理力度差异 ($1 - \lambda_E$) 也较小的情况下 (如图 3a~图 3c 所示), 可知突变率会对博弈的最终演化均衡产生较大的影响效应。通过图 3a 和图 3c 的对比可以发现, 当突变因素从 $\epsilon = 0.001$ 上升到 $\epsilon = 0.5$ 时, 会导致政府与企业博弈最终的演化稳定状态 ($m_1 = 10, m_2 = 10$) 出现的概率产生较大幅度的下降, 从 0.9503 下降到 0.1346, 并且其他组合策略出现的概率会提高。然而, 在政府的监管力度差异 ($1 - \lambda_L$) 较大, 且企业治理力度差异 ($1 - \lambda_E$) 也较大的情形下 (如图 3d~图 3f 所示), 博弈的最终演化均衡受到的影响相比前者较弱。

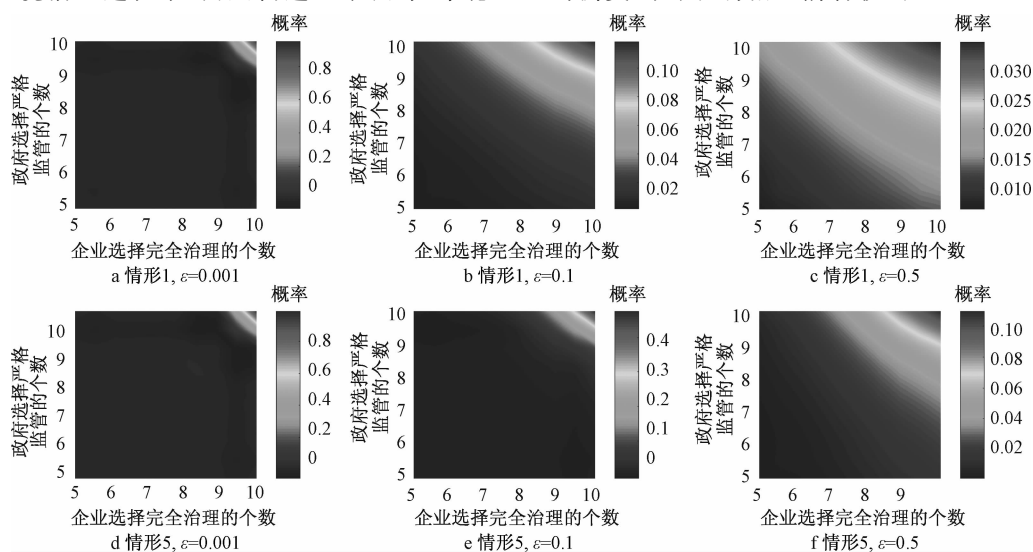


图 3 政府与企业博弈过程的突变率对博弈演化结果的影响分析

除了系统突变率, 主体的学习能力也会对企业与政府间的博弈演化均衡产生影响。主体学习能力衡量的是博弈主体的有限理性程度。同理, 选取情形 1 ($\lambda_L = 0.9, \lambda_E = 0.9$) 和情形 5 ($\lambda_L = 0.5, \lambda_E = 0.5$) 来进行分析。从图 4 中的结果来看, 主体学习能力对政府与企业的博弈演化结果也有显著的影响。

在政府的监管力度差异 ($1 - \lambda_L$) 较小, 且企业的治理力度差异 ($1 - \lambda_E$) 也较小的情况下, 学习能力对博弈的最终演化结果产生较大的影响。随着主体学习能力的减弱, 政府与企业原本达到协同治理状态 ($m_1 = 10, m_2 = 10$) 的概率也在降低, 从图 4a 与图 4c 的比较来看, 随着学习能力 r 从 1 下降到 0.01, 政府与企业达到协同状态的概率从 0.9503 下降到了 0.1279, 而其余状态的概率则有所提升, 表明主体学习能力下降会导致政府群体或企业群体会受到博弈中双方的信息不对称程度, 反而过多地受

到系统演化过程中的突变因素的干扰。这也表明了主体的学习能力对于博弈双方策略选择的重要性。然而, 在政府的监管力度差异 ($1 - \lambda_L$) 较大, 且企业治理力度差异 ($1 - \lambda_E$) 也较大的情形下 (图 4d~图 4f 所示), 博弈均衡结果受到的影响效应较弱。形成这种现象的原因在于当政府监管力度差异 ($1 - \lambda_L$) 或企业治理力度差异 ($1 - \lambda_E$) 较小的时候, 政府与企业策略选择的收益差距也较小, 加大了政府与企业间协同状态的不稳定性, 倘若学习能力降低, 便进一步放大了演化均衡不稳定性水平, 因此导致学习能力降低带来更大的影响效应。这表明了政府与企业在环境治理过程中需要进一步完善政府与企业之间的信息沟通平台, 促进主体在博弈过程中提高学习能力, 从而实现政府与企业的协同治理状态能够稳定持续地进行。

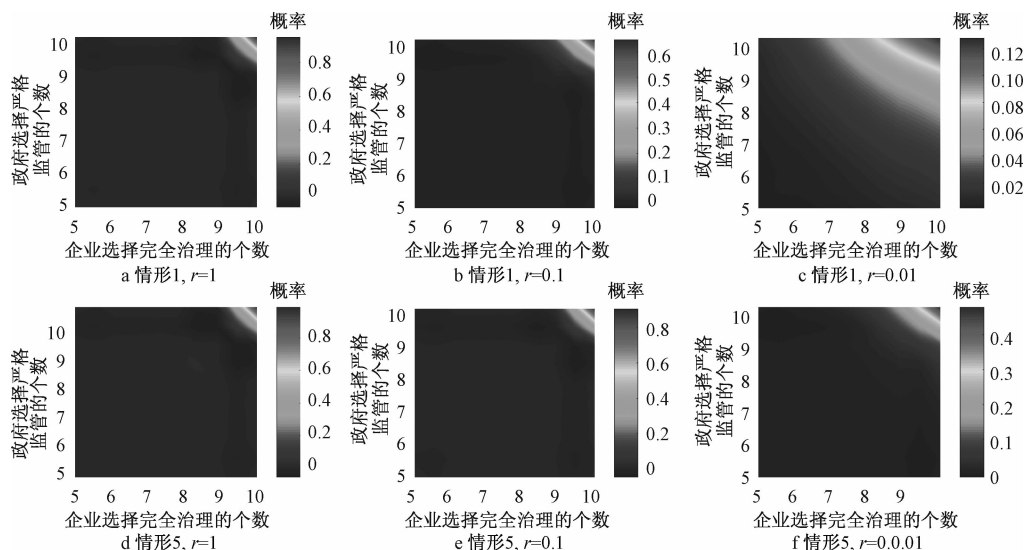


图 4 政府与企业的学习能力对博弈演化结果的影响分析

3 结论与对策

本文首先构建了政府与企业在环境治理中的博弈模型,基于拟生灭过程设置了博弈主体的策略转换规则,采用 Gauss 消去法与 LU 分解法,求出对不同主体之间博弈的拟生灭过程演化稳定分布;然后分析了不同的环境税水平下主体博弈的演化均衡状态以及实现协同治理的环境税制条件;最后分析了环境治理博弈突变率和主体学习能力对主体博弈演化均衡状态稳定性的影响。结果如下。

(1)在环境治理主体博弈的演化过程中,环境税率对政府和企业协同治理的实现存在“门槛效应”,即政府制定的环境税率需要达到一定的水平,并对企业在环境治理中倾向于选择完全治理策略起到倒逼作用,才能使政府与企业最终达到协同治理的博弈均衡状态。

(2)环境税率在不同的政府监管力度差异和企业治理力度差异条件下存在异质性的门槛效应,在较大的政府监管力度差异和企业治理力度差异条件下,环境税率需要达到更高的门槛水平,才能显现出对企业环境治理策略选择的正向倒逼作用,并防止政府承担较高的预期监管成本而难以持续其监管行为。

(3)环境治理主体的学习能力和治理系统的突变率都会显著影响到主体之间的演化稳定状态,随着学习能力的下降和突变率的提高,都会降低主体达到协同状态的稳定概率。

由此,本文为促进我国环境协同治理提出以下对策建议。

(1)政府对企业的排污行为,应采取严格监管的

模式,并针对监管区域的企业治理情况,制定合适的环境税方案,对企业污染排放起到成本内化的效果。当前我国环境税制度的设计依旧偏向保守,主要是因为考虑到环境税过高带来的企业压力和经济冲击影响,但适度提高环境税的税率征收力度,与稳定经济发展,本质上并非完全对立,可以从整体税负体系中进行适当调整,对特定税种进行减税,并对环境税等进行适度的结构性增加,从而有效实现环境税对环境治理的“杠杆作用”。

(2)政府应该进一步创新环境监管模式,扩大政府环境监管的覆盖范围。在政府的环境监管过程中,可以推行环境监管网格化的措施,并明确落实相关环境监管部门的权责,构建信息反馈流畅、奖惩渠道明晰的环境监管机制,确保排污企业得到有效监管、及时惩处环境违法行为,并实现环境秩序得到有力维护的治理局面。

(3)企业对于环境污染的治理,一方面应该不断提高环境污染治理技术,进一步降低治理成本,从而有效提高治理执行能力,另一方面需要加强环保理念的培育,将环保理念融入到企业的生产管理决策中,提高自身对环境治理意识,才能促进企业对于环境治理的坚定信心,有效实现产业经济的高质量发展。

参考文献

- [1] SANDMO A. Efficient environmental policy with imperfect compliance[J]. Environmental and Resource Economics, 2002, 23(1): 85-103.
- [2] DONG X, LI C, LI J, et al. A game-theoretic analysis of implementation of cleaner production policies in the Chinese electroplating industry[J]. Resources Conservation and Recycling, 2010, 54(12): 1442-1448.

- [3] ZHAO R, NEIGHBOUR G, HAN J, et al. Using game theory to describe strategy selection for environmental risk and carbon emissions reduction in the green supply chain[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2012, 25(6): 927-936.
- [4] 朱庆华, 王一雷, 田一辉. 基于系统动力学的地方政府与制造企业碳减排演化博弈分析[J]. *运筹与管理*, 2014(3): 71-82.
- [5] 陈真玲, 王文举. 环境税制下政府与污染企业演化博弈分析[J]. *管理评论*, 2017(5): 226-236.
- [6] 原毅军, 耿殿贺. 环境政策传导机制与中国环保产业发展——基于政府、排污企业与环保企业的博弈研究[J]. *中国工业经济*, 2010(10): 65-74.
- [7] 张倩, 刘丹, 章金霞. 环境偏好和环境税视角下企业技术决策博弈分析[J]. *技术经济*, 2014, 33(9): 66-73.
- [8] 张国兴, 叶亚琼, 管欣, 等. 京津冀节能减排政策措施的差异与协同研究[J]. *管理科学学报*, 2018, 21(5): 111-126.
- [9] 潘峰, 王琳. 环境规制中地方规制部门与排污企业的演化博弈分析[J]. *西安交通大学学报(社会科学版)*, 2018(1): 1-11.
- [10] 杜建国, 王敏, 陈晓燕, 等. 公众参与下的企业环境行为演化研究[J]. *运筹与管理*, 2013, 22(1): 244-251.
- [11] TENG M, HAN C. Evolution of cooperation in the regional environmental governance with institutional reward[J]. *International Journal of Computing Science and Mathematics*, 2015, 6(3): 232-240.
- [12] ZHU Y, ZHANG J, SUN Q, et al. Evolutionary dynamics of strategies for threshold snowdrift games on complex networks [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2017, 130: 51-61.
- [13] 常建伟, 赵刘威, 杜建国. 企业环境行为的监管演化博弈分析和稳定性控制——基于系统动力学[J]. *系统工程*, 2017(10): 79-87.
- [14] HAUERT C, IMHOF L A. Evolutionary games in demographically structured, finite populations[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2012, 299: 106-112.
- [15] WU B, TRAUlsen A, GOKHALE C. Dynamic properties of evolutionary multi-player games in finite populations[J]. *Games*, 2013, 4(2): 182-199.
- [16] NAKAJIMA Y, MASUDA N. Evolutionary dynamics in finite populations with zealots[J]. *Journal of Mathematical Biology*, 2015, 70(3): 465-484.
- [17] YU Q, FANG D, ZHANG X, et al. Stochastic evolution dynamic of the rock-scissors-paper game based on a Quasi birth and death process[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28585.
- [18] QUAN J, LIU W, CHU Y, et al. Stochastic evolutionary voluntary public goods game with punishment in a Quasi-birth-and-death process [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 16110.
- [19] 张学刚, 钟茂初. 政府环境监管与企业污染的博弈分析及对策研究[J]. *中国人口、资源与环境*, 2011(2): 31-35.
- [20] STEWART W J. Introduction to the numerical solution of Markov chains[M]. Princeton: Princeton University Press, 1994: 147-186.

Simulation Research on Evolutionary Game of Synergy Behavior between Government and Enterprise under Environmental Tax Condition

Luo Ming¹, Fan Ruguo², Zhang Yingqing³, Zhu Chaoping²

(1. School of Economics and Management, Guangxi Normal University, Guilin 541004, Guangxi, China;

2. Economics and Management School, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. School of Management Science, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China)

Abstract: The game payoff matrix between government and enterprise is constructed, applying Quasi-birth-death evolutionary game model to analyze the evolutionary equilibrium under different environmental tax level and the tax condition to achieve the synergy governance, and also analyzing the effect of system mutation rate and subject learning ability on the evolutionary equilibrium. The results show that there exist threshold effect of environmental tax on the synergy governance between government and enterprise in the evolutionary process of environment governance. And under different condition of the gap of strength of government supervision and the gap of strength of enterprise governance, the threshold effects of environmental tax are heterogeneous. Then the enhancement of system mutation rate and decrease of subject learning ability can weaken the stability of synergy equilibrium. At last, the policy suggestions to promote the synergy governance between government and enterprise are provided.

Keywords: environmental synergy governance; environmental tax; quasi-birth-death process; evolutionary game