

环境污染治理的演化博弈分析

马国顺, 任 荣

(西北师范大学 数学与统计学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 运用演化博弈理论的相关知识, 结合我国环境污染的实际情况, 建立政府与企业、企业与企业之间的支付矩阵, 并进行演化动态稳定性分析, 建立复制动态方程, 求解演化稳定策略(ESS). 结果表明, 政府加大监管力度, 企业之间加强合作, 可以有效降低污染物的产生及污染治理成本.

关键词: 环境污染; 演化博弈; 演化稳定策略; 支付矩阵

中图分类号: O 225

文献标志码: A

文章编号: 1001-988X(2015)02-0019-05

Evolutionary game analysis of environment pollution control

MA Guo-shun, REN Rong

(College of Mathematics and Statistics, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Based on the related knowledge of the evolutionary game theory and the environmental pollution actual situation in China, this paper establishes the payment matrix to solve the evolutionary stable strategy(ESS) by analyzing dynamic stability of the evolution and establishing replicated dynamic equation between the government and enterprises as well as enterprises and enterprises. The results show that the governments strengthen the supervision and enterprises strengthen cooperation can effectively reduce the generation and governance cost of pollutants.

Key words: environmental pollution; evolutionary game; evolutionary stable strategy; payment matrix

0 引言

人类的生存和发展就是不断开发利用自然资源、促进经济增长的过程。然而, 随着经济水平的不断提高, 尤其是全球进入工业革命以来, 人类与自然、生态与经济的不和谐日益突出。人类从最初的大自然受益者逐步变成了受害者。自然灾害增多, 植被退化, 生物多样性减少, 水资源缺乏, 全球气温升高等等一系列的生态问题日益突出。近年来, 极端天气气候事件频繁发生。所谓极端天气气候事件是指在一定时期内, 某一区域或地点出现的出现频率较低的或有相当强度的对人类社会有重要影响的天气气候事件。气候变暖是导致一些极端天气气候发生的主要原因, 因为全球变暖过程中, 季

节性波动减弱, 中高纬度区域天气波动(尤其是在冷季)也普遍减弱, 对应冬季寒潮减弱, 夏季局部对流性天气增强, 强降水、高温等天气增多。温室气体(二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、臭氧、氟利昂等)排放量的增加导致了温室效应, 其中二氧化碳的影响最大。低碳经济成为当前中国经济发展的必然选择。所谓低碳经济是指一种低污染、低排放、低消耗以及高质量的经济发展模式^[1]。

改革开放以来, 我国工业化进程加快, 在经济高速增长的背后, 也付出了较高的资源和环境代价。以 2003 年为例, 我国单位 GDP 所消耗的能源是日本的 10 倍、美国的 5 倍、加拿大的 3 倍; 消耗的金属是世界平均水平的 2~4 倍。每增加单位 GDP 的废水排放量, 要比发达国家高出 4 倍, 单

收稿日期: 2014-12-06; 修改稿收到日期: 2014-12-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71061012); 甘肃省自然科学基金资助项目(145RJZA102)

作者简介: 马国顺(1964—), 男, 甘肃天水人, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为博弈论及其应用。

E-mail: guoshunma@163.com

位工业产值产生的固体废弃物要高出世界平均水平 10 倍以上。严峻的环境污染和生态破坏开始制约经济的发展。目前,我国环境污染的最主要来源是企业生产排污,因此政府相关部门应该加强监管,企业应该严格遵守相关规定,有效地控制排污。

政府部门是公众的当家人,必须加强环境管制,为人民创造良好的生存和生活环境。政府需要综合运用奖励、罚款等行政手段,促进环保经济的发展。企业在追求利益最大化的前提下,应该从长远利益考虑,积极进行低碳环保生产改造,相互合作,互利共赢,这样不但可以减少环保生产方面的投资,也有助于经济整体的健康发展^[2]。以往研究多是从政府或企业一方面考虑此问题^[3],本文运用演化博弈模型分析企业和企业之间、政府和企业之间如何有效地促进低碳环保生产,进而更加有效地治理环境污染问题。

1 演化博弈理论

演化博弈论不同于传统博弈,演化博弈不是将重点放在静态均衡,而是强调动态演化过程,并且弥补了经典博弈理论中假定参与人完全理性的缺陷^[4],即在有限理性条件下,通过反复的博弈得到最优策略^[5]。“演化稳定策略”(ESS)是演化博弈的核心,在重复博弈过程中,具备有限理性的参与人通过相互之间的学习、模仿等过程,不断调整自己的策略,最终达到一种平衡,并且其中每一个人都不会单方面改变策略。复制动态是系统中有限理性参与人具有统计分析能力和对不同策略收益的事后判断能力,通过不断学习模仿另一类型的参与人,使自身获得更大收益的动态描述过程^[6]。

2 政府与企业之间在环保方面的演化博弈

低碳环保的生产离不开企业的大力支持,更离不开政府的干预。政府运用法律和行政手段对企业的低碳环保生产进行规范和引导是十分有效的。本文运用演化博弈的相关知识,探究政府政策与企业环保生产之间的相互影响^[7]。

为了讨论方便,假设政府和企业都是有限理性的。设政府群体与企业群体进行策略交往,政府选择监管策略的可能性为 x ,而选择不监管策略的可能性为 $1-x$;企业选择环保生产策略的可能性为 y ,而选择非环保生产策略的可能性为 $1-y$ 。于是政府和企业策略的支付矩阵见表 1。

表 1 政府与企业策略空间支付矩阵

Tab 1 Payoff matrix of government and enterprise strategy

企业 政府	环保生产	非环保生产
监管	$A_1 - C + F - G, A_2 - B + C$	$A_1 + D - G, A_2 - D$
不监管	$A_1 - E, A_2 - B$	$A_1 - E, A_2$

表 1 中, $A_1, A_2, B, C, D, E, F, G > 0, C < B, G < E, E > F, C + D > B$ 。其中, A_1 表示政府的基本收益, A_2 表示企业的基本收益, B 表示企业环保生产的成本, C 表示政府对环保企业的补助及奖励等支出, D 表示政府对非环保企业的处罚, E 表示政府不监管的损失, F 表示上级政府对相关监管单位的奖励, G 表示政府监管的成本。

1) 政府的收益

政府的监管策略期望收益为

$$U_1 = y(A_1 - C + F - G) + (1 - y)(A_1 + D - G),$$

不监管策略期望收益为

$$U_2 = y(A_1 - E) + (1 - y)(A_1 - E),$$

所以其平均收益为

$$\bar{U} = xU_1 + (1 - x)U_2,$$

政府的复制动态方程为

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(U_1 - \bar{U}) =$$

$$x(1 - x)[D + E - G - (C + D - F)y]. \quad (1)$$

2) 企业的收益

企业的环保策略期望收益为

$$V_1 = x(A_2 - B + C) + (1 - x)(A_2 - B),$$

非环保策略期望收益为

$$V_2 = x(A_2 - D) + (1 - x)A_2,$$

所以其平均收益为

$$\bar{V} = yV_1 + (1 - y)V_2,$$

企业的复制动态方程为

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(V_1 - \bar{V}) =$$

$$y(1 - y)[C + D)x - B]. \quad (2)$$

由(1),(2)构成的微分方程组描述了政府与企业之间演化博弈系统的群体动态。该系统共有 5 个平衡点

$$A(0, 0), B(0, 1), C(1, 0), D(1, 1),$$

$$E\left(\frac{B}{C + D}, \frac{D + E - G}{C + D - F}\right).$$

对微分方程(1),(2)分别关于 x, y 求偏导,得到相应的雅可比矩阵

$$J = \begin{pmatrix} (1-2x)[D+E-G-(C+D-F)y] & -x(1-x)(C+D-F) \\ y(1-y)(C+D) & (1-2y)[(C+D)x-B] \end{pmatrix}$$

将 5 个平衡点分别代入雅可比矩阵，得到相应行列式的值和符号，以及相应矩阵迹的值和符号。

对这 5 个平衡点进行局部稳定性分析^[8]，结果见表 2。

表 2 局部稳定性分析结果

Tab 2 Anglysis results about local stability

平衡点	detJ	detJ 的符号	trJ	trJ 的符号	局部稳定性
A(0,0)	$-(D+E-G)B$	-	$D+E-G-B$		鞍点
B(0,1)	$(E-C-G+F)B$	+	$E-C-G+F+B$	+	不稳定点
C(1,0)	$(G-D-E)(C+D-B)$	-	$C+G-B-E$		鞍点
D(1,1)	$(C+G-E-F)(B-C-D)$	+	$G+B-D-E-F$	-	ESS
$E\left(\frac{B}{C+D}, \frac{D+E-G}{C+D-F}\right)$	$\frac{B(C+D-B)(D+E-G)(C+G-E-F)}{(C+D)(C+D-F)}$	-	0		鞍点

由此可见，只有 D(1,1)是该演化博弈的演化稳定策略(ESS)，即政府选择监管、企业选择低碳环保生产，它们之间交往的动态过程见图 1。

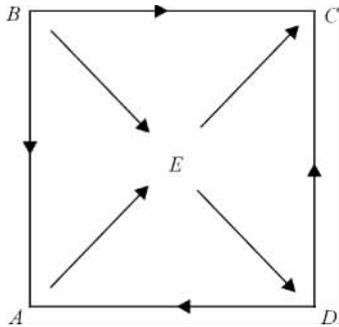


图 1 政府和企业间的复制动态相位图

Fig 1 Dynamic replication phase diagram between government and enterprise

在上述模型中，我们假设 $E > F$ ，即：政府相关监管部门如果玩忽职守，则来自上级的处罚和社会的不信任等声誉损失 E 就会远大于上级对其相关部门的奖励 F 。假设 $C < B$ ，因为我国还处于并将长期处于社会主义初级阶段，经济发展水平并不是很高，所以奖励力度 C 远小于企业改进生产方式所需成本 B 。

3 企业与企业之间在环保方面的演化博弈

在现实经济中，生产企业之间在资源、技术、设备等领域往往存在着既合作又竞争的关系^[9]。然而，在环境污染问题上，目前只有极少数的企业会选择与其他企业合作^[10]。一方面，一些企业靠自身的能力很难解决污染问题，所以会将污染处理成本转嫁到他人和社会；而另一方面，一些企业在实现利润最大化的同时，会忽视污染问题，监管部门的惩罚对其而言起不了实质性的作用。所以在环

境污染问题上，企业之间有必要进行相互合作，共同防治环境污染^[11]。本文通过建立博弈模型，分析企业之间的合作行为对治理环境污染方面的影响。

为了讨论方便，假设企业 1 和企业 2 是某企业集群中的两家企业，他们在处理污染问题决策方面都有合作与不合作两种策略。假设企业 1 选择合作策略的可能性为 x ，而选择不合作策略的可能性为 $1-x$ ；企业 2 选择合作策略的可能性为 y ，而选择不合作策略的可能性为 $1-y$ 。企业 1 和企业 2 的策略组合支付矩阵见表 3。

表 3 两家企业策略支付矩阵

Tab 3 Strategy payoff matrix of two enterprises

企业 \ 企业	合作	不合作
合作	$a_1 - b_1 + c_1 + e,$ $a_2 - b_2 + c_2 + e$	$a_1 - d_1 + c_1 + e,$ $a_2 - f$
不合作	$a_1 - f,$ $a_2 - d_2 + c_2 + e$	$a_1 - f,$ $a_2 - f$

表 1 中， $a_i, b_i, c_i, d_i, e, f > 0, d_i > c_i > b_i, i = 1, 2$ 。其中， a_i 表示企业在同时选择不合作时的收益， b_i 表示两家企业同时选择合作时的投入成本， c_i 表示企业在选择合作时增加的收益， d_i 表示只有一家企业选择合作时的投入成本， e 表示政府对选择合作处理污染问题企业的奖励， f 表示政府对选择不合作处理污染问题企业的处罚。

1) 企业 1 的收益

企业 1 的合作策略期望收益为

$$U_1 = y(a_1 - b_1 - c_1 + e) + (1-y)(a_1 - d_1 + c_1 + e),$$

不合作策略期望收益为

$$U_2 = y(a_1 - f) + (1 - y)(a_1 - f),$$

则其平均收益为

$$\bar{U} = xU_1 + (1 - x)U_2,$$

所以企业 1 的复制动态方程为

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(U_1 - \bar{U}) = x(1 - x)[(d_1 - b_1)y - d_1 + c_1 + e + f]. \quad (3)$$

2) 企业 2 的收益

企业 2 的合作策略期望收益为

$$V_1 = x(a_2 - b_2 + c_2 + e) + (1 - x)(a - d_2 + c_2 + e),$$

不合作策略期望收益为

$$V_2 = x(a_2 - f) + (1 - x)(a_2 - f),$$

则其平均收益为

$$J = \begin{pmatrix} (1 - 2x)[(d_1 - b_1)y - d_1 - c_1 + e + f] & x(1 - x)(d_1 - b_1) \\ y(1 - y)(d_2 - b_2) & (1 - 2y)[(d_2 - b_2)x - d_2 + c_2 + e + f] \end{pmatrix}$$

将 5 个平衡点分别代入雅可比矩阵, 等到相应行列式的值和符号, 以及相应矩阵迹的值和符号.

$$\bar{V} = yV_1 + (1 - y)V_2,$$

所以企业 2 的复制动态方程为

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(V_1 - \bar{V}) = y(1 - y)[(d_2 - b_2)x - d_2 + c_2 + e + f]. \quad (4)$$

由 (3), (4) 构成的微分方程组描述了企业 1 与企业 2 之间演化博弈系统的群体动态. 该系统共有 5 个平衡点:

$$A(0, 0), B(0, 1), C(1, 0), D(1, 1),$$

$$E\left(\frac{d_2 - c_2 - e - f}{d_2 - b_2}, \frac{d_1 - c_1 - e - f}{d_1 - b_1}\right).$$

对微分方程 (3), (4) 分别关于 x, y 求偏导, 得到相应的雅可比矩阵

表 4 局部稳定性分析结果

Tab 4 Analysis results about local stability

平衡点	detJ	detJ 的符号	trJ	trJ 的符号	局部稳定性
A(0,0)	$(c_1 + e + f - d_1)(c_2 - d_2 + e + f)$	+	$c_1 - d_1 + c_2 - d_2 + 2e + 2f$	-	ESS
B(0,1)	$(c_1 - b_1 + e + f)(d_2 - c_2 - e - f)$	+	$c_1 - b_1 + d_2 - c_2$	+	不稳定点
C(1,0)	$(c_2 - b_2 + e + f)(d_1 - c_1 - e - f)$	+	$c_2 - b_2 + d_1 - c_1$	+	不稳定点
D(1,1)	$(b_1 - c_1 - e - f)(b_2 - c_2 - e - f)$	+	$b_1 + b_2 - c_1 - c_2 - 2e - 2f$	-	ESS
$E\left(\frac{d_2 - c_2 - e - f}{d_2 - b_2}, \frac{d_1 - c_1 - e - f}{d_1 - b_1}\right)$	$-(d_1 - c_1 - e - f)(d_2 - c_2 - e - f) / (c_1 - b_1 + e + f)(c_2 - b_2 + e + f) / (d_1 - b_1)(d_2 - b_2)$	-	0		鞍点

由此可见, 只有 A(0,0)和 D(1,1)是该演化博弈的演化稳定策略(ESS), 即企业 1 和企业 2 同时采取合作或同时采取不合作策略, 它们之间交往的动态过程如图 2 所示.

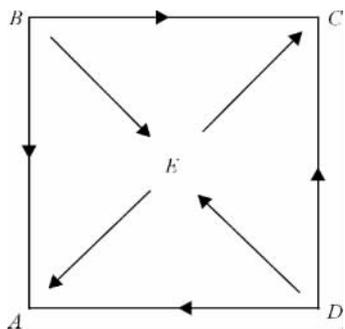


图 2 两企业间的复制动态相位图

Fig 2 Dynamic replication phase diagram between two enterprises

在上述模型中, 由于我们假设 $d_i > c_i > b_i$, 即: 一方面企业独自投资的成本 d_i 大于合作时的投资成本 b_i , 且企业所得到的收益 c_i 小于 d_i ; 另一方面企业选择合作时的投资成本 b_i 小于独自投资的成本 d_i 且所得的收益 c_i 大于 b_i . 所以, 作为企业来说, 选择合作策略要优于选择不合作策略, 而且合作的企业越多其投资成本 b_i 也越小, 所以 E 点会逐渐靠近于 A 点, 即四边形 BEDC 的面积会逐渐变大, 最终趋于合作这一最优策略.

4 结论

从上述两个演化博弈模型可以看出, 当 E 点向左下方移动时, 四边形 CBED 的面积会逐渐增大, 从而会达到最优决策, 即企业之间相互合作, 监管部门积极监督, 企业积极改造, 而影响点 E

的主要因素有：

1) 企业合作时的环保支出 b_i 。当 b_i 越小时，企业选择合作的可能性越大，相关企业间会加强合作，互利共赢。而减小 b_i 最有效的方法：一是增加合作企业，这一点是很容易做到的；二是企业积极研究和开发环保生产技术，有效降低投资成本。

2) 环保生产企业的收益 c_i 。当 c_i 越大时，企业选择环保生产的可能性也越大。如何使其尽可能增大，一方面，需要政府采取合理的奖励、惩罚措施，促进企业优先进行低碳环保生产，另一方面，企业应该从长远发展考虑，制定与经济发展和政策要求相适应的发展战略，实现企业的可持续发展。

3) 政府对是否选择合作治理污染问题企业的奖励和处罚。当 e, f 逐渐增大时， E 逐渐向左下方移动，即企业选择合作的可能性就会越大。政府不但要积极鼓励一些小型企业之间加强合作，加大奖励 e ，从而使企业之间在资金和设备等方面进行优势互补，共同处理环境污染问题，而且要对特立独行，只追求自己利益最大化而不考虑环境污染问题的不合作企业加大处罚力度 f ，促使其改进生产方式，加强企业之间在环境污染问题方面的合作。

4) 政府对非环保企业的处罚 D 。政府应该建立健全相应的奖罚机制，对一些不进行环保生产的企业进行严厉的处罚，处罚力度的增加不但会督促企业改进生产，而且会警示其他企业更加重视环保生产。

5) 政府对环保企业的奖励 C 。政府为了加快所有企业低碳环保生产的改进，可以从资金、设

备、技术等方面予以大力支持，减少企业投入成本，鼓励企业进行改造。

参考文献：

- [1] 郑林昌, 付加锋. 中国城市低碳环保发展协调性分析——以环保模范城市为例[J]. 生态经济, 2014, 30(3): 26-30.
- [2] 蔡宁, 吴结兵. 企业集群的竞争优势: 资源的结构整合[J]. 中国工业经济, 2002(7): 45-50.
- [3] 王斌, 张英杰, 孙志和. 环境污染治理的博弈分析[J]. 青岛建筑工程学院学报, 2004, 25(2): 103-106.
- [4] 施锡铨. 博弈论[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2000.
- [5] 张维迎. 博弈论与信息经济学[M]. 上海: 上海人民出版社, 1996.
- [6] 谢识予. 经济博弈论[M]. 第2版. 上海: 复旦大学出版社, 2002.
- [7] 肖条军. 博弈论及其应用[M]. 上海: 上海三联书店, 2004.
- [8] FRIEDMAN D. Evolutionary games in economics [J]. *Journal of the Econometric Society*, 1991: 637-666.
- [9] 魏守华, 石碧华. 论企业集群的竞争优势[J]. 中国工业经济, 2002(1): 59-65.
- [10] 王怡, 罗杰, 陈天鹏, 等. 企业污染治理战略联盟的动态演化博弈分析[J]. 统计与决策, 2011(17): 68-71.
- [11] 程贵孙, 郭朝晖. 集群中企业协作与竞争行为的演化博弈分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2006, 28(3): 335-343.

(责任编辑 马宇鸿)

(上接第 11 页)

参考文献：

- [1] EMBRECHTS P, KLUPPELBERG C, MIKOSCH T. *Modelling Extremal Events for Insurance and Finance*[M]. Berlin: Springer, 1997.
- [2] GOLDIE C M, KLUPPELBERG C. *Subexponential Distributions: A Practical Guide to Heavy Tails: Statistical Techniques for Analysing Heavy Tailed Distributions*[M]. Boston: Birkhauser, 1998.
- [3] ROLSKI T, SCHMIDLI H, SCHMIDT V, et al. *Stochastic Processes for Insurance and Finance*[M]. Chichester: John Wiley Sons, 1999.
- [4] NG K W, TANG Q H, YAN J A, et al. Precise large deviations for the prospective-loss process[J]. *Appl Prob*, 2003, 40: 391-400.
- [5] WANG Y B, WANG K Y, CHENG D Y. Precise large deviations for sums of negatively associated

random variables with common dominatedly varying tails[J]. *Acta Mathematica Sinica (English Series)*, 2006, 22(6): 1725-1734.

- [6] 马学敏, 胡亦钧. 复合二项过程风险模型的精细大偏差及有限时间破产概率[J]. 数学学报, 2008, 51(6): 1119-1130.
- [7] 肖鸿民, 刘建霞. 带负相依重尾潜在索赔额的风险模型的有限时间破产概率[J]. 山东大学学报: 理学版, 2011, 46(9): 117-121.
- [8] 江涛. 常息力更新场合有限时间破产概率对负相依索赔额的不敏感性[J]. 高校应用数学学报: A 辑, 2009, 24(4): 401-409.
- [9] TANG Qi-he, TSITSIASHVILI G. Randomly weighted sums of subexponential random variables with application to ruin theory[J]. *Extremes*, 2003, 6(3): 171-188.

(责任编辑 马宇鸿)