

矿业安全生产与监察的进化博弈分析

路荣武¹, 王新华², 李 丹²

(1. 山东科技大学 理学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 经济管理学院, 山东 青岛 266590)

摘要:为研究矿业生产过程中安全监察工作对安全生产干预的有效性,建立了安全生产与监察的博弈模型。结合生物进化理论,建立进化博弈模型的复制者动态方程;应用动力系统稳定性理论,研究了安全监察博弈中策略选择的进化稳定性。研究结果表明,博弈的动力系统不满足自控性,在原有的约束激励条件下,安全监察博弈模型不存在进化稳定策略;为有效控制矿业工程中的安全生产,除一般意义下的约束激励措施外,必须对监督者的策略集进行下限约束,才能有效保证生产者选择安全生产策略。

关键词:安全生产;监察;进化博弈;纳什均衡;动态系统;稳定性

中图分类号:TD76;F224

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2012)05-0037-04

Mining Safe Production Supervision Model Based on Evolutionary Game Theory

LU Rongwu¹, WANG Xinhua², LI Dan²

(1. College of Science, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. College of Economics and Management, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The effect of safe production supervision in mining engineering is studied in the paper, and a game model between safe production and supervision is built. By using theory of evolutionary, the replicator dynamical equations constitute the dynamic system and evolutionary stable strategy is studied. The result shows that dynamical system is unsteady without extra conditions and evolutionary stable strategy of the game theory does not exist. In order to guarantee the safe production, a lower limit should be added to the set of supervisor strategy. If the probability of inspectors executing the supervision strategy exceeds the lower limit, mining engineering tends to execute the strategy of safety in the long run.

Key words: safe production; supervision; evolutionary game; Nash equilibrium; dynamical system; stability

1970 年代, Maynard Smith 等^[1-2] 结合生物进化论与经典博弈理论在研究生态演化现象的基础上提出进化博弈理论的基本均衡概念——进化稳定策略(evolutionarily stable strategy, ESS), 标志着进化博弈理论的诞生。1980 年代以后, 随着新古典经济学及博弈论固有的缺陷逐渐被人们所认识, 有限理性概念得到了学术界的普遍认可^[3]。在进化博弈理论中, 每个参与人通过学习、模仿等行为动态调整自己的决策, 其均衡的结果依赖于博弈的初始状态, 外部环境的变化会影响博弈的进化路径。经济系统的进化有多种不动点或均衡点的选择。传统博弈论告诉人们, 一个博弈存在多个可能的纳什均衡; 进化博弈论则进一步指出, 哪一个才是现实中真正实现的均衡, 它并不一定是帕累托最优的均衡。进化博弈论逐渐发展成一个经济学的新领域^[4-8]。

矿业生产安全监察过程是对参与煤矿生产的所有主体的行为和活动结果的管理过程, 涉及到矿业生产各部门、勘察设计、设备供应商、质量检测机构等, 具有长期性、重复性和动态性等特点^[9]。进化博弈论认为, 参与人并不能最大化自己的利益, 不能对信息变化做出迅速的最优化反应, 即强调系统变迁中的动态过程。

收稿日期: 2012-03-22

作者简介: 路荣武(1978—), 男, 山东沂南人, 讲师, 博士研究生, 主要从事资源经济与管理研究. E-mail: lurong5@sdu.edu.cn

进化博弈理论结合经典博弈理论及生态理论研究成果,以有限理性的参与人群体为研究对象,利用动态分析方法把影响参与人行为的各种因素纳入其模型之中,并应用系统论的观点来考察群体行为的演化趋势。本文利用进化博弈的方法来研究矿业工程中安全生产与监察的过程。

1 矿业生产安全与监察博弈模型与基本假设

构成博弈的两个局中人,局中人 I 是有关矿业生产的政府监管机构,局中人 II 是矿业生产者。局中人 I 的纯策略选择是对矿业生产过程进行监察或不进行监察。本文假设监管部门是具有较高职业道德素质和技术监察水平的执法机构,即认为只要监管部门进行监察,矿业生产过程就不存在不安全生产的欺骗行为。由于监察过程要花费时间成本和物质成本,考虑到监察行为与生产过程紧密相关,假设局中人 I 的监察成本与局中人 II 的同期产值 R 成比例,设为 αR 。局中人 II 的纯策略选择是安全生产和不安全生产。

安全生产是指煤矿生产过程中对已知的危险因素进行预防,并达到政府部门对生产过程要求的标准,这要付出一定生产成本,设生产安全投入与其产值 R 成比例,比例系数为 β ;不安全生产是指煤矿生产者对可预知的危险置之不理,或者生产过程存在不符合政府和行业相关规定的行为。

政府监管部门一旦发现煤矿不安全生产会给予相应惩罚,假设罚金为 γR , γ 为罚金系数。为了提高监察的有效性,上级监管部门对局中人 I 采取约束激励措施。若局中人 I (监察者)进行有效监察,局中人 II 安全生产,政府支付罚金的一定比例 k 给局中人 I;一旦上级监管部门发现局中人 II 存在欺骗行为而局中人 I 没有发现,政府将对局中人 I 进行处罚,罚金也设为 γR 。

本研究考虑到矿业生产工程与监察过程的实际,认为监察成本 αR 不会超过生产安全投入成本 βR ,而作为惩罚措施,罚金 γR 会远大于安全投入 βR ,则上述比例系数的大小关系是: $0 < \alpha < \beta < \gamma < 1, k\gamma > \alpha$ 。监察者和生产者博弈的支付矩阵如表 1 所示。其中,行参与人为局中人 I (监察者),列参与人为局中人 II (生产者)。

表 1 安全监察博弈的支付表

Tab. 1 The payoff matrix of safety supervision game

	安全生产		不安全生产	
	I	II	I	II
监察	$-\alpha R$	$(1-\beta)R$	$(k\gamma-\alpha)R$	$(1-\beta-\gamma)R$
不监察	0	$(1-\beta)R$	$-\gamma R$	R

该博弈不存在纯策略纳什均衡。如果局中人 I 选择监察策略,则 II 选择安全生产策略;相应地,局中人 I 选择不监察策略,则 II 选择不安全生产。因而, I 只好选择监察策略。

2 安全监察博弈的纳什均衡与进化博弈模型的动态系统

2.1 混合策略均衡的存在性

假设局中人 I 以概率 $x \in [0, 1]$ 选择监察策略,局中人 II 以概率 $y \in [0, 1]$ 选择安全生产策略。局中人 I 和 II 的收益分别是

$$E_1 = [x \quad 1-x] \mathbf{A} [y \quad 1-y]^T; \quad (1)$$

$$E_2 = [y \quad 1-y] \mathbf{B} [x \quad 1-x]^T. \quad (2)$$

其中, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\alpha & k\gamma-\alpha \\ 0 & -\gamma \end{bmatrix} R$ 和 $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1-\beta & 1-\beta \\ 1-\beta-\gamma & 1 \end{bmatrix} R$ 分别为局中人的支付矩阵。

令 $\frac{\partial E_1}{\partial x} = 0, \frac{\partial E_2}{\partial y} = 0$, 得一阶条件

$$(1-y)(\gamma+k\gamma-\alpha)-\alpha y=0; \quad (3)$$

$$(\beta+\gamma)x-\beta=0. \quad (4)$$

解得 $x^* = \frac{\beta}{\beta+\gamma}, y^* = 1 - \frac{\alpha}{(1+k)\gamma}$ 。由此可见,该博弈存在一个混合策略纳什均衡 $P(x^*, y^*)$ 。混合策略纳什均衡是一个随机稳定状态。在混合策略纳什均衡处,给定一方的选择,另一参与人选择何种策略都是无差

异的。这样,监察博弈中监察者采用混合均衡策略时,生产者采用安全生产策略和不安全生产策略的期望支付是相等的,矿业安全生产不能得到保证。当参与人策略选择偏离混合策略均衡概率时,对手选择产生更好效果的策略的概率会增加,博弈会呈现动态性。

2.2 安全监察进化博弈的动态系统

为了判定矿业生产安全监察博弈的均衡点的局部渐进稳定性,引入动态方程——复制者动态(replicator dynamic)。根据生物进化理论^[1-2],种群的进化优势体现在参与者的比例提高,行参与人的增长率 \dot{x}/x 等于其适应度 $[1 \ 0]A[y \ 1-y]^T$ 与平均适应度 $[x \ 1-x]A[y \ 1-y]^T$ 的差,即

$$\dot{x} = x(1-x)[1 \ -1]A[y \ 1-y]^T; \tag{5}$$

同理,对于列参与人有

$$\dot{y} = y(1-y)[1 \ -1]B[x \ 1-x]^T. \tag{6}$$

上述两式构成进化博弈的动态系统,整理得

$$\dot{x} = x(1-x)[(1+k)\gamma(1-y) - \alpha]R; \dot{y} = y(1-y)(\beta x + \gamma x - \beta)R. \tag{7}$$

3 动态系统的稳定性

3.1 均衡点的局部稳定性分析

在平面 $\pi = \{(x, y) : 0 \leq x, y \leq 1\}$ 上,动力系统(7)有5个均衡点,分别是: $(0, 0), (1, 0), (0, 1), (1, 1), P(x^*, y^*)$ 。动力系统(7)的 Jacobian 矩阵

$$J = \frac{\partial(\dot{x}, \dot{y})}{\partial(x, y)} =$$

$$R \begin{bmatrix} (1-2x)[(\gamma+k\gamma)(1-y) - \alpha] & -x(1-x)(1+k)\gamma \\ y(1-y)(\beta+\gamma) & (1-2y)(\beta x + \gamma x - \beta) \end{bmatrix}.$$

利用动力系统稳定性理论^[10],动力系统(7)各均衡点处的局部稳定性分析如表2(为简便描述,表中公式将常数R省略)所示,相位图如图1所示。分析可知,动力系统(7)只存在一个中心点稳定状态(混合策略纳什均衡点P),不存在局部渐近稳定点。这说明当前动力系统并不具有自控性,在没有外部约束条件时,系统不会自动趋于理想状态。也就是说,安全生产者不会主动选择安全生产策略。所以,为了达到矿业生产管理监察的目标,监察者的策略选择需要添加约束,缩小策略集。

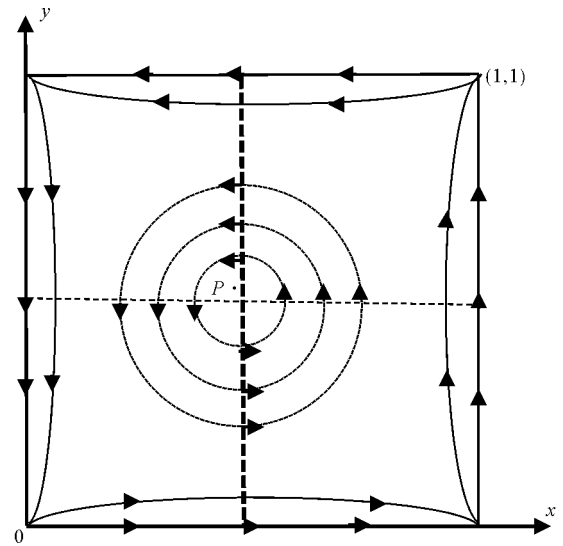


图1 动态系统的相位图

Fig. 1 The argand diagram of the dynamical system

表2 动力系统稳定性分析表

Tab. 2 The stability of the dynamics system

稳定性	鞍点 (0,0)	鞍点 (1,0)	鞍点 (0,1)	鞍点 (1,1)	中心点稳定 $P(x^*, y^*)$
detJ	$[\alpha - (1+k)\gamma]\beta < 0$	$[\alpha - (1+k)\gamma]\gamma < 0$	$-\alpha\beta < 0$	$\alpha(\beta - \gamma) < 0$	$\frac{\alpha\beta\gamma(\gamma+k\gamma-\alpha)}{\beta+\gamma} > 0$
trJ	$[(1+k)\gamma - \alpha - \beta] > 0$	$\alpha - k\gamma < 0$	$\beta - \alpha > 0$	$(\alpha + \gamma) > 0$	0

3.2 进化稳定策略的选择与约束

令 $\dot{x} = 0$, 得 $x = 0, x = 1$ 两个稳定状态。进化稳定策略要求 $\frac{dx}{dx} < 0$, 故 $y > 1 - \frac{\alpha}{(1+k)\gamma}$ 时, $x = 0$ 是进化稳

定策略; $y < 1 - \frac{\alpha}{(1+k)\gamma}$ 时, $x = 1$ 是进化稳定策略。即博弈开始时, 若生产者选择安全生产策略的概率大于 $1 - \frac{\alpha}{(1+k)\gamma}$, 监察者会选择监察策略; 反之, 监察者会选择不监察策略。

令 $\dot{y} = 0$, 得 $y = 0, y = 1$ 两个稳定状态。当 $x < \frac{\beta}{\beta+\gamma}$ 时, $y = 0$ 是进化稳定策略; 当 $x > \frac{\beta}{\beta+\gamma}$ 时, $y = 1$ 是进化稳定策略。当监督者选择监督策略的概率超过 $\frac{\beta}{\beta+\gamma}$ 时, 生产者必然选择安全生产策略。

4 结论

安全监察进化博弈的结论表明, 在原有的约束激励条件下, 该博弈模型不存在进化稳定策略, 博弈的动力系统不满足自控性。因此, 为了有效控制矿业安全生产过程, 除了一般意义下的约束激励措施外, 必须对监督者的策略集进行下限约束, 才能保证生产者选择安全生产策略。就是说, 如果安监博弈中监督者的选择策略集缩小为 $(\frac{\beta}{\beta+\gamma}, 1]$, 则生产者的安全生产策略为进化稳定策略。这样才能保证生产者主动提高安全生产投入, 在最大程度上避免事故的发生。

参考文献:

- [1] SMITH M. The theory of games and the evolution of animal conflict[J]. Journal of Theory Biology, 1974, 47: 209-212.
- [2] TAYLOR P, JONKER L B. Evolutionarily stable strategies and game dynamics[J]. Mathematical Bioscience, 1978, 40: 145-156.
- [3] 肖条军. 博弈论及其应用[M]. 上海: 上海三联书店, 2004: 429-449.
- [4] BILLARD E A. Evolutionary strategies of stochastic learning automata in the prisoner's dilemma[J]. BioSystems, 1996, 39: 93-107.
- [5] 谢识予. 有限理性条件下的进化博弈理论[J]. 上海财经大学学报, 2001, 3(5): 3-9.
XIE Shiyu. Evolutionary game theory under bounded rationality[J]. Journal of Shanghai University of Finance and Economics, 2001, 3(5): 3-9.
- [6] 张良桥. 进化稳定均衡与纳什均衡: 兼谈进化博弈理论的发展[J]. 经济科学, 2001(3): 103-111.
ZHANG Liangqiao. ESS and NE: Discussion on the development of evolutionary game theory[J]. Economic Science, 2001(3): 103-111.
- [7] 易余胤, 刘汉民. 经济研究中的演化博弈理论[J]. 商业经济与管理, 2005(8): 8-13.
YI Yuyin, LIU Hanmin. Evolutionary game theory in economic research[J]. Business Economics and Administration, 2005(8): 8-13.
- [8] 朱庆华, 窦一杰. 绿色供应链中政府与核心企业进化博弈模型[J]. 系统工程理论与实践, 2007(12): 85-89.
ZHU Qinghua, DOU Yijie. An evolutionary game model between governments and core enterprises in greening supply chains [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2007, 27(12): 85-89.
- [9] 沈斐敏. 安全系统工程理论与应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001: 84-126.
- [10] 廖晓昕. 动力系统的稳定性理论和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 15-30.