

要素投入效率情景下药品质量监管演化博弈分析

金浩, 刘德民, 安明

(河北工业大学经济管理学院, 天津 300401)

摘要: 研究药品生产供应链质量安全投入过程中考虑节点企业不同要素投入效率的政府监管机制. 基于柯布-道格拉斯生产函数刻画企业质量安全投入, 构建了“药品原辅料供应商-药品生产商”演化博弈模型, 着重探讨了要素投入效率对双方博弈策略选择结果的影响. 结果表明, 要素投入弹性系数影响了系统达到稳定所需时长, 劳动弹性系数越大系统达到稳定时间越短. 此外, 主要要素投入较少、综合技术水平较低的药品供应链节点企业, 在质量安全投入方面采用“搭便车”策略的概率更大, 对此类企业采用严格的监管惩罚力度, 可有效提升药品质量安全.

关键词: 药品质量安全; 演化博弈; 监管; 柯布-道格拉斯生产函数

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2022)03-0303-14

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2022.03.002

Evolutionary game analysis of drug quality supervision under the factor input efficiency scenario

Jin Hao, Liu Demin, An Ming

(School of Economics and Management, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: This paper studies government supervision mechanism in the process of the quality safety investment in drugs production supply chains, considering node enterprise's input efficiency of different elements. Using Cobb-Douglas production function to depict the quality safety investment of enterprises, this paper develops an evolutionary game model between the drug raw material supplier and drug manufacturer. The influence of the element input efficiency on the strategy choices of both sides is analyzed. Results show that the element input elasticity coefficient affects the time required for the system to reach the stability: the larger the labor elasticity coefficient, the shorter the system to reach the stability. In addition, the lower the main element input and the lower the comprehensive technical level of the drug supply chain node enterprise, the greater the probability of adopting the “hitching a ride” strategy in quality and safety input. Strict supervision punishment for such enterprises can be adopted to effectively improve the quality and safety of drugs.

Key words: drug quality safety; evolutionary game; supervision; Cobb-Douglas production function

1 引言

医药作为人类生存不可或缺的重要部分, 其安全问题关乎民众生命健康和国家安全, 保障医药产品安全也是各级政府的基本职责之一. 《“十三五”国家药品安全规划》明确指出, 要坚持把药品安全作为关系民生的政治任务来落实, 确保人民群众用药安全. 2020-06-02, 习近平在召开专家学者座谈会时着重强调, 人民

收稿日期: 2020-09-08; 修订日期: 2021-05-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71573142); 国家社会科学基金资助项目(19BGL054).

安全是国家安全的基石.但近年来人民群众用药安全问题事件频发,引起社会广泛关注.例如,2013年乙肝疫苗疑似致死事件、2014年浙江“毒胶囊”事件、2018年长生生物狂犬疫苗造假事件以及由2019年新冠肺炎引发的“毒口罩”等制售假货事件均危害到民众的生命安全^[1],产生了十分恶劣的社会影响.药品质量安全问题反复出现,充分暴露出我国药品质量安全监管存在严重不足问题,亟需相关政府部门进行“亡羊补牢”.

药品供应链相对其它产品供应链较长,一般包括原辅料供应商制造企业、批发企业、零售企业、医疗卫生机构和患者等参与主体,具有较强专业性和生产环节中的自然垄断特性^[2],节点企业间存在较严重的信息不对称,极易出现“劣币驱逐良币”的市场失灵现象^[3].此外,药品供应链节点企业具有独特信息优势,极易诱发道德风险—提供不合格药品原辅料或药品成品,引发药品安全问题.在此情况下,就需要政府或第三方监管部门采取有效手段,来降低此现象发生的概率^[4].已有研究表明,政府或第三方监管部门是否参与监管及其监管惩罚力度强弱都会对企业生产经营行为产生影响.比如,高昂的惩罚能够激励药品生产企业遵循FDA 规制^[5],严格的审计能够从监管角度形成对惩罚的较好补充^[6],并且加强监管的成本控制可以扩大利润空间形成对企业的监管投入激励^[7].总体来说,设定合理有效的监管惩罚机制有助于提升药品质量安全^[8].然而,当前我国药品行业普遍存在“大产业—弱监管”问题,产业发展能力和监管能力严重不匹配,药品安全的潜在风险不断上升^[9],药品制造企业生产低劣药品的谋利行为对人民健康构成严重威胁^[10].并且现阶段我国药品安全监管是由社会性监管和政府监管组成的混合制监管模式,这种监管模式可能会减弱政府监管的有效性^[11],因此适当引入第三方权威认证体系可提升政府监管部门监管效率^[12].

从博弈论角度分析提高产品质量安全的监管策略,是学者们通常采用的分析手段.刘长玉等^[13]构建绿色产品质量监管的三方静态博弈模型,分析讨论了影响政府、企业和第三方行为策略的关键因素.赵茨梅等^[14]基于静态博弈模型考察了信息不对称条件下的产品质量监管问题.朱立龙等^[15]构建多方静态博弈模型分析了药品监管部门与药品供应链节点企业的博弈关系.静态博弈模型假定博弈参与方是理性的,参与者同时做出决策.在药品制造供应链节点企业质量安全投入过程中,“搭便车”行为时有发生,潜在降低了药品质量安全性^[16].然而在实际应用中药品制造供应链节点企业进行决策是有先后顺序的,并且是有限理性的,静态博弈模型不能有效解决所存在问题.政府如何才能设计有效的监管机制来促使药品原辅料生产商和药品生产商积极参与质量安全投入,减少“搭便车”行为呢?

演化博弈考虑博弈参与人是有限理性,假定博弈参与方的理性会根据博弈局势的变化而变化^[17].演化博弈模型可有效刻画博弈参与者的决策选择,能够有效分析监管机制下的策略选择^[18],在产品质量监管和策略选择相关研究中被广泛应用.李杰等^[19]研究分析了商家售假行为与平台监管的演化博弈问题.曹裕等^[20]考虑了新媒体环境下政府监管与食品企业掺假行为的演化博弈问题.由以上研究可知,演化博弈是解决复杂博弈关系与决策选择演化问题的有效方法^[21],产品质量安全监管问题是多方博弈参与者随机配对的反复博弈问题^[22].因此演化博弈方法适用于药品质量安全监管分析中,能够更好解决政府如何设计有效监管机制问题.宋燕等^[23]通过构建“药品供应商—药监部门”演化博弈模型,研究分析得出药品安全监管的稳定状态与监管对象的安全投入成本息息相关.朱立龙等^[24]从“互联网+医疗健康”背景出发,构建“政府部门、药品生产商、医药电商和患者”四方演化博弈模型,从患者反馈角度分析了政府监管机制对药品质量安全的影响.

综上所述,药品质量安全监管问题的相关文献多以药品销售供应链为研究出发点,考察原辅料质量安全问题的研究相对不足.原辅料作为各类药品制作时的原材料,药品原辅料的质量从供应链源头直接影响药品安全性和合格率,药品生产商通常从外部采购原辅料,再加上多数原辅料具有天然特性,原辅料供应商所具有的垄断性质往往为追求利润会提供低劣原辅料.因此,原辅料质量的严格把控就成为药品供应链质量安全保障中的基础性环节.基于此,通过构建“原辅料供应商—药品生产商”演化博弈模型,并考虑博弈主体质量安全投入产出函数对系统稳定性的影响,最后对关键参数进行仿真分析.本文考虑到药品原辅料对于药品制造的重要性及自身独特性,通过构建动态演化博弈模型分析药品制造过程中的质量安全问题.其次,引入柯布—道格拉斯生产函数,将劳动要素和资本要素同时纳入药品原辅料质量监管投入的考虑范畴,具体

分析了综合技术水平、劳动产出弹性系数等参数系数变化如何影响博弈参与者的演化稳定策略. 最后, 设计严格的惩罚机制, 并对参数进行合理赋值, 运用 MATLAB 模拟仿真分析系统稳定性, 根据仿真结果为政府部门进一步构建和完善药品质量监管机制提供一定理论依据和决策参考.

2 药品质量监管演化博弈模型

2.1 基本假设

本文仅考虑一个包含药品原辅料供应商和药品生产商(分别简称为供应商和生产商)的系统, 并假定双方都是有限理性人, 生产决策过程都是不完美的. 在演化博弈的初始阶段他们的决策都不是最优决策, 参与方通过不断学习并了解对方的策略来调整自身决策, 直到双方达到均衡状态. 供应商 A 和生产商 B 的决策空间设定为(进行质量安全投入, 不进行质量安全投入, 简记为 Q_A, Q_B). 供应商的质量安全投入包括招聘专业人员筛选材料和引进先进设备对合格材料溯源. 生产商的质量安全投入主要包括招聘专业人员检测原辅料、引进先进质量安全生产线、统一产品包装并溯源. 结合以上内容, 作出如下假设:

1) 供应商以及生产商在进行质量安全投入时, 一般包括劳动投入 L 和资本投入 K , 根据柯布-道格拉斯生产函数供应商质量安全投入成本收益为 $AL_A^\alpha K_A^{1-\alpha}$, 同理生产商质量安全投入成本收益为 $BL_B^\beta K_B^{1-\beta}$.

2) 将供应商质量安全投入成本定义为 $C_A = L_A + K_A$, 生产商的成本定义为 $C_B = L_B + K_B$. 供应商不进行质量安全投入收益定义为 r_A , 生产商则定义为 r_B , 其中 $r_A > 0, r_B > 0$.

3) 当博弈中只有供应商进行质量安全投入时, 药品原辅料质量的提升会带动整个药品的质量提升. 此时供应商的收益为 $A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A + r_A$, 其中 $A_0 (A_0 \geq 1)$ 表示给定的技术水平对成本收益的效应. 而生产商因原辅料质量的提升会获得更多的收益 T_B , 其中 $T_B > r_B$. 相似的, 当只有生产商进行质量安全投入时, 生产商的收益为 $B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B + r_B$, 而供应商收益为 T_A , 其中 $T_A > r_A$.

4) 在博弈中, 当参与双方都进行质量安全投入时, 那么患者会更加信任药品的质量, 此时他们的收益分别为 $A_1 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A + r_A, B_1 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B + r_B$, 其中 $A_1 > A_0, B_1 > B_0$.

根据以上博弈假设, 建立双方支付矩阵, 如表 1 所示.

表 1 供应商与生产商之间的支付矩阵
Table 1 Payment matrix between the supplier and the manufacturer

		生产商	
		Q_A	Q_B
供应商	Q_A	$(A_1 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A + r_A, B_1 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B + r_B)$	$(A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A + r_A, T_B)$
	Q_B	$(T_A, B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B + r_B)$	(r_A, r_B)

2.2 模型构建

基于以上假设及博弈双方的支付矩阵(表 1), 可建立一个动力系统. 供应商选择策略 Q_A 和策略 Q_B 所获得的收益分别为 E_A 和 $E_{\bar{A}}$.

$$E_A = y(r_A + A_1 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A) + (1 - y)(A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A + r_A), \tag{1}$$

$$E_{\bar{A}} = yT_A + (1 - y)r_A. \tag{2}$$

供应商平均预期收益为

$$\bar{E}_A = xE_A + (1 - x)E_{\bar{A}}. \tag{3}$$

同理, 生产商选择策略 Q_A 和策略 Q_B 所获得的收益分别为 E_B 和 $E_{\bar{B}}$ 即

$$E_B = x(r_B + B_1 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B) + (1 - x)(B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B + r_B), \tag{4}$$

$$E_B = xT_B + (1-x)r_B. \quad (5)$$

生产商平均预期收益为

$$\bar{E}_B = yE_B + (1-y)E_B. \quad (6)$$

依据演化博弈理论,可构建出供应商和生产商在质量安全投入策略上的动态系统(I)

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = F_1(x, y) \\ \frac{dy}{dt} = G_1(x, y), \end{cases} \quad (7)$$

其中 $F_1(x, y) = x(1-x)((A_0L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A) - y((A_0 - A_1)L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A))$,

$$G_1(x, y) = y(1-y)((B_0L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B) - x((B_0 - B_1)L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B)).$$

依据微分方程理论,动态演化博弈的均衡点 (x, y) 需同时满足 $F_1(x, y) = 0$ 与 $G_1(x, y) = 0$,可得到 $A(0, 1), B(1, 1), C(1, 0), O(0, 0), D(x_D, y_D)$ 是潜在的演化稳定策略(ESS),其中

$$x_D = \frac{B_0L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B}{(B_0 - B_1)L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B}, \quad y_D = \frac{A_0L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A}{(A_0 - A_1)L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A}.$$

3 演化博弈稳定性分析

3.1 无惩罚约束下的演化稳定性分析

根据 Friedman 方法,由微分方程系统描述的动态演化稳定策略可从系统 (I) 的雅可比矩阵的局部稳定分析得出. 该雅可比矩阵 J 为

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x} & \frac{\partial F_1}{\partial y} \\ \frac{\partial G_1}{\partial x} & \frac{\partial G_1}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中

$$\frac{\partial F_1}{\partial x} = (1-2x)((A_0L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A) - y((A_0 - A_1)L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A)),$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial y} = -x(1-x)((A_0 - A_1)L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A),$$

$$\frac{\partial G_1}{\partial x} = -y(1-y)((B_0 - B_1)L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B),$$

$$\frac{\partial G_1}{\partial y} = (1-2y)((B_0L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B) - x((B_0 - B_1)L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B)).$$

将系统的 5 个均衡点分别代入到雅可比矩阵 J 中,可计算出矩阵行列式的 $\det J$ 值和迹 $\text{tr } J$ 值. 根据演化博弈理论,当 $\text{tr } J > 0$ 和 $\det J < 0$ 同时成立时,该系统平衡点就是局部稳定的,为系统的演化稳定策略(ESS). 各均衡点 $\det J$ 值和迹 $\text{tr } J$ 值如表 2 所示,其中

$$T = \frac{(B_0L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B)(B_1L_B^\beta K_B^{1-\beta} + r_B - T_B - C_B)((A_1 - A_0)L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A)}{((B_0 - B_1)L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B)^2},$$

$$N = \frac{(A_0L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A)(A_1L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} + r_A - T_A - C_A)((B_1 - B_0)L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B)}{((A_0 - A_1)L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A)^2}.$$

基于以上条件,可判断当 A_0, A_1, B_0, B_1 有所变化时,系统(I) 的演化稳定策略(ESS)也随之改变。

条件 1 当 $0 < A_0 < \frac{C_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}}, A_0 < A_1 < \frac{T_A + C_A - r_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}}$, 且 $0 < B_0 < \frac{C_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}}, B_0 < B_1 < \frac{T_B + C_B - r_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}}$ 同时成立时,系统(I)演化博弈将稳定在点 $(x, y) = (0, 0)$ 。

条件 2 当 $0 < A_0 < \frac{C_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}}, A_0 < A_1 < \frac{T_A + C_A - r_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}}$, 且 $\frac{C_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}} < B_0 < B_1 < \frac{T_B + C_B - r_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}}$ 成立时,系统(I)演化博弈将稳定在点 $(x, y) = (0, 1)$ 。

条件 3 当 $\frac{C_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}} < A_0 < A_1 < \frac{T_A + C_A - r_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}}$, 且 $0 < B_0 < \frac{C_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}}, B_0 < B_1 < \frac{T_B + C_B - r_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}}$ 同时成立时,系统(I)演化博弈将稳定在点 $(x, y) = (1, 0)$ 。

条件 4 当 $\frac{C_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}} < A_0 < A_1 < \frac{T_A + C_A - r_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}}$, 且 $\frac{C_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}} < B_0 < B_1 < \frac{T_B + C_B - r_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}}$ 成立时,系统(I)演化博弈将稳定在点 $(x, y) = (1, 0)$ 或点 $(x, y) = (0, 1)$ 。

条件 5 当 $\frac{T_A + C_A - r_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}} < A_0 < A_1$, 且 $\frac{T_B + C_B - r_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}} < B_0 < B_1$ 成立时,系统(I)演化博弈将稳定在点 $(x, y) = (1, 1)$ 。

表 2 各均衡点 $\det J$ 值和 $\text{tr } J$ 值

Table 2 Determinant and trace of J of equilibrium points

均衡点 (x, y)	$\det J$ 值和 $\text{tr } J$ 值
$O(0, 0)$	$\det J (A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A)(B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B)$ $\text{tr } J (A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A) + (B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B)$
$A(0, 1)$	$\det J (A_1 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} + r_A - T_A - C_A)(C_B - B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta})$ $\text{tr } J (A_1 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} + r_A - T_A - C_A) + (C_B - B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta})$
$B(1, 1)$	$\det J (T_A + C_A - r_A - A_1 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha})(T_B + C_B - r_B - B_1 L_B^\beta K_B^{1-\beta})$ $\text{tr } J (T_A + C_A - r_A - A_1 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}) + (T_B + C_B - r_B - B_1 L_B^\beta K_B^{1-\beta})$
$C(1, 0)$	$\det J (C_A - A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha})(B_1 L_B^\beta K_B^{1-\beta} + r_B - T_B - C_B)$ $\text{tr } J (C_A - A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}) + (B_1 L_B^\beta K_B^{1-\beta} + r_B - T_B - C_B)$
$D(x_D, y_D)$	$\det J \Delta = -TN \neq 0$ $\text{tr } J 0$

依据以上各均衡点雅克比矩阵 J 的行列式 ($\det J$)值和迹 ($\text{tr } J$)值的计算方法,可判断出系统的局部稳定性. 各条件下均衡点的局部稳定性如表 3 和表 4 所示。

表 3 条件 1、条件 2 和条件 3 均衡点局部稳定性

Table 3 Local stability of equilibrium point for conditions 1, 2 and 3

平衡点	条件 1			条件 2			条件 3		
	$\det J$	$\text{tr } J$	稳定性	$\det J$	$\text{tr } J$	稳定性	$\det J$	$\text{tr } J$	稳定性
$O(0, 0)$	+	-	ESS	-	不定	鞍点	-	不定	鞍点
$A(0, 1)$	-	不定	鞍点	+	-	ESS	-	不定	鞍点
$B(1, 1)$	+	+	不稳健	-	不定	鞍点	+	+	不稳健
$C(1, 0)$	-	不定	鞍点	+	+	不稳健	+	-	ESS
$D(x_D, y_D)$	Δ	0	鞍点	Δ	0	鞍点	Δ	0	鞍点

注: 表中“+”表示 $\det J(\text{tr } J) > 0$, “-”表示 $\det J(\text{tr } J) < 0$ 。

3.2 无惩罚约束下的演化结果分析

基于以上条件假设,可得出系统(I)中博弈参与双方的演化稳定相位图(如图 1),进一步对图 1 进行如下分析:

1) 当供应商和生产商的质量安全投入生产函数的综合技术水平 A_0, A_1, B_0, B_1 都较小时,即满足条

件 1 时. 不管是单方还是双方进行质量安全投入, 由于其综合技术水平较低, 付出的成本不能获得预期的收益, 此时双方选择不进行质量安全投入策略, 均会得到最大收益. 如图 1(a), $(x, y) = (0, 0)$ 是系统 (I) 的演化稳定策略.

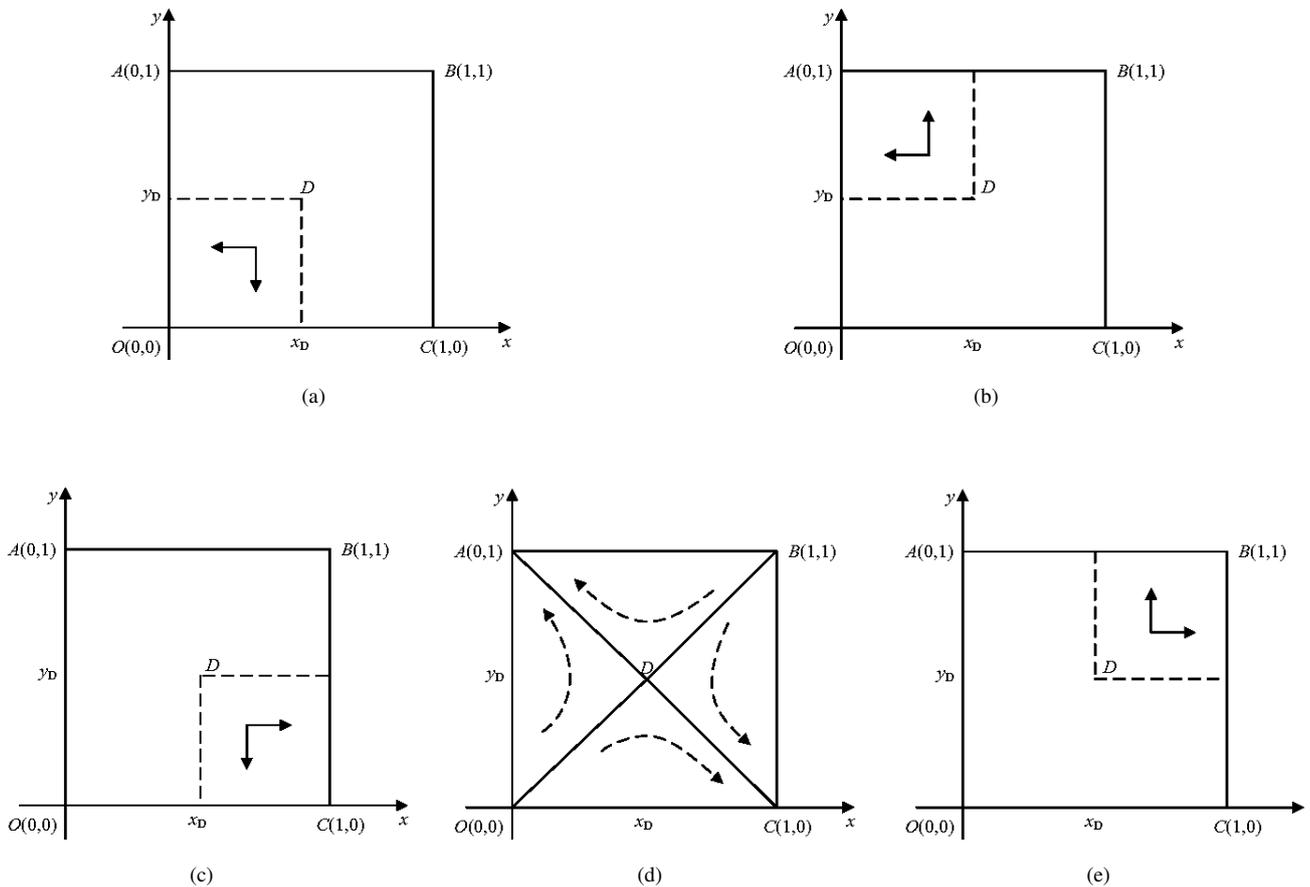


图 1 系统(I)的 ESS 相位图

Fig. 1 ESS of phase diagram System (I)

2) 当生产商的生产函数综合技术水平 B_0, B_1 较高而供应商的综合技术水平 A_0, A_1 较低, 即满足条件 2 时. 由于供应商生产函数的产出收益小于所投成本, 而生产商生产函数的产出收益大于所投成本且有正的外部性. 因此, 供应商为追求自身利益最大化不会选择质量安全投入策略, 相反生产商则会选择质量安全投入策略. 如图 1(b), $(x, y) = (0, 1)$ 是系统(I)的演化稳定策略.

表 4 条件 4 和条件 5 均衡点局部稳定性

Table 4 Local stability of equilibrium point for conditions 4 and 5

平衡点	条件4			条件5		
	det J	tr J	稳定性	det J	tr J	稳定性
$O(0,0)$	+	+	不稳健	+	+	不稳健
$A(0,1)$	+	-	ESS	-	不定	鞍点
$B(1,1)$	-	不定	鞍点	+	-	ESS
$C(1,0)$	+	-	ESS	-	不定	鞍点
$D(x_D, y_D)$	Δ	0	鞍点	Δ	0	鞍点

3) 当供应商质量安全投入生产函数的综合技术水平 A_0, A_1 较高而供应商的综合技术水平 B_0, B_1 较低, 即满足条件 3 时. 通过分析可知, 生产商生产函数产出收益小于所投成本, 而供应商生产函数产出收益

大于所投成本并有正的外部性. 因此, 生产商为追求自身利益最大化不会选择质量安全投入策略, 相反供应商则会选择质量安全投入策略. 如图 1(c), $(x, y) = (1, 0)$ 是系统(I)的演化稳定策略.

4) 在供应商和生产商两者的综合技术水平满足条件 4 的情景下, 两者的生产函数产出收益都大于所投成本并都具有正的外部性, 那么两者在进行决策时, 系统可能会出现两个稳定策略, 如图 1(d), $(x, y) = (1, 0)$ 和 $(x, y) = (0, 1)$. 由图可知系统的演化稳定策略与系统的初始状态有关, 当四边形 BDOC 的面积大于 BDOA 的面积时, 说明供应商的正外部性收益要大于生产商的正外部性收益, 系统的演化稳定策略更倾向于 $(x, y) = (0, 1)$. 而当四边形 BDOA 的面积小于 BDOC 的面积时, 供应商的正外部性收益要小于生产商的正外部性收益, 则系统的演化稳定策略更倾向于 $(x, y) = (1, 0)$.

5) 在供应商和生产商两者的综合技术水平满足条件 5 的情景下, 参与双方的生产函数产出收益足够大于双方产生的正外部性收益, 双方同时进行质量安全投入会给双方带来最大的收益, 系统会最终稳定在点 $(x, y) = (1, 1)$, 如图 1(e) 所示.

3.3 第 4 种情景下不同参数对系统演化稳定策略的影响

在第 4 种情景下, 供应商和生产商的生产函数综合技术水平分别满足 $\frac{C_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}} < A_0 < A_1 < \frac{T_A + C_A - r_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}}$, $0 < B_0 < \frac{C_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}}$, $B_0 < B_1 < \frac{T_B + C_B - r_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}}$ 时, 由图可判断 BDOA 的面积 S_A 和 BDOC 的面积 S_B 的大小决定着系统的演化稳定策略是 (Q_A, Q_B) 还是 (Q_B, Q_A) ; 当 $S_A < S_B$ 时, 系统的稳定策略为 (Q_A, Q_B) ; 当 $S_A > S_B$ 时, 系统的稳定策略为 (Q_B, Q_A) ; 当 $S_A = S_B$ 时, 系统的稳定策略为 (Q_A, Q_B) 和 (Q_B, Q_A) 的概率相等.

下面分析在不同参数变化情境下, S_A, S_B 的大小如何影响系统稳定策略. 通过计算, S_A 表示为

$$S_A = \frac{1}{2} \left[\frac{B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta}}{(B_0 - B_1) L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B} + \frac{T_A + C_A - r_A - A_1 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}}{(A_0 - A_1) L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A} \right]. \tag{9}$$

命题 1 当供应商的生产函数综合技术水平越小, 生产商的生产函数综合技术水平越大时, 系统稳定策略为 (Q_B, Q_A) 概率就会越大.

证明 在其它参数不变情况下, 将 S_A 分别对 A_0, A_1, B_0, B_1 求偏导, 可得

$$\frac{\partial S_A}{\partial A_0} = \frac{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} (T_A + C_A - r_A - A_1 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha})}{2((A_0 - A_1) L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A)^2}, \tag{10}$$

$$\frac{\partial S_A}{\partial A_1} = \frac{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} (A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A)}{2((A_0 - A_1) L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A)^2}, \tag{11}$$

$$\frac{\partial S_A}{\partial B_0} = \frac{L_B^\beta K_B^{1-\beta} (T_B + C_B - r_B - B_1 L_B^\beta K_B^{1-\beta})}{2((B_0 - B_1) L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B)^2}, \tag{12}$$

$$\frac{\partial S_A}{\partial B_1} = \frac{L_B^\beta K_B^{1-\beta} (B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B)}{2((B_0 - B_1) L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B)^2}. \tag{13}$$

由先前条件 $\frac{C_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}} < A_0 < A_1 < \frac{T_A + C_A - r_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}}$, $\frac{C_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}} < B_0 < B_1 < \frac{T_B + C_B - r_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}}$, 可得 $\frac{\partial S_A}{\partial A_0} > 0$, $\frac{\partial S_A}{\partial A_1} > 0$, $\frac{\partial S_A}{\partial B_0} > 0$, $\frac{\partial S_A}{\partial B_1} > 0$.

根据以上条件的成立, 可知在其它参数不变的条件下, 供应商的质量安全投入生产函数综合技术水平 A_0, A_1 越低, 而生厂商的质量安全投入生产函数综合技术水平 B_0, B_1 越高, 则系统演化稳定在 $(x, y) = (0, 1)$ 的概率越大. 证毕.

命题 2 当供应商的收益 r_A 较小, 而生产商的收益 r_B 较大时, 则系统稳定策略为 (Q_A, Q_B) 的概率就会

越大.

证明 在它参数不变情况下, 将 S_A 分别对 r_A, r_B 求偏导数. 由 $A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} > C_A, B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta} > C_B$ 可得

$$\frac{\partial S_A}{\partial r_A} = \frac{C_A - A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}}{2((A_0 - A_1)L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A)^2} < 0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial S_A}{\partial r_B} = \frac{B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B}{2((B_0 - B_1)L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B)^2} > 0. \quad (15)$$

根据以上条件的成立, 可知在其它参数不变的条件下, S_A 是 r_A 的减函数, 是 r_B 的增函数, 那么在 r_A 较小且 r_B 较大同时成立时, 系统演化稳定在 $(x, y) = (1, 0)$ 的概率越大. 证毕.

命题 3 当生产商的正外部性越大供应商获得的收益 T_A 越大, 供应商的正外部性越小生产商获得收益 T_B 越小时, 系统稳定策略为 (Q_B, Q_A) 的概率就会越大.

证明 在其它参数不变情况下, 将 S_A 分别对 T_A, T_B 求偏导, 由 $A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} > C_A, B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta} > C_B$ 可得

$$\frac{\partial S_A}{\partial T_A} = \frac{A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A}{2((A_0 - A_1)L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A)^2} > 0, \quad (16)$$

$$\frac{\partial S_A}{\partial T_B} = \frac{C_B - B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta}}{2((B_0 - B_1)L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B)^2} < 0. \quad (17)$$

由此可知, 在其它参数不变的条件下, S_A 是 T_A 的增函数, 是 T_B 的减函数, 当供应商获得的外部性收益 T_A 越小, 生产商获得的外部性收益 T_B 越大时, 系统将演化稳定在 $(x, y) = (0, 1)$ 的概率就越大. 证毕.

命题 4 本文假设 $C = L + K$, 其中 L 表示劳动投入, K 表示资本投入. 当供应商的劳动投入成本 L_A 越小, 生产商的劳动投入成本 L_B 越大时, 系统稳定策略为 (Q_A, Q_B) 的概率就会越大.

证明 在其它参数不变情况下, 将 S_A 分别对 L_A, L_B 求偏导数, 由 $\frac{C_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}} < A_0, T_B > r_B$, 经计算可得

$$\frac{\partial S_A}{\partial L_A} = \frac{1 - \alpha(L_A + K_A)/L_A}{2((A_0 - A_1)L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A)^2} < 0, \quad (18)$$

$$\frac{\partial S_A}{\partial L_B} = \frac{\beta B_0 (T_B - r_B) L_B^{1-\beta} K_B^{1-\beta}}{2((B_0 - B_1)L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B)^2} > 0. \quad (19)$$

由此可知, 在其它参数不变的条件下, S_A 是 L_A 的减函数, 是 L_B 的增函数. 供应商的劳动投入成本越小, 相反生产商的劳动投入成本越大, 则系统稳定策略为 $(x, y) = (1, 0)$ 的概率就越大. 证毕.

命题 5 当供应商的中资本投入成本 K_A 越小, 生产商资本投入成本 K_B 越大时, 系统稳定策略为 (Q_A, Q_B) 的概率就会越大.

证明 在其它参数不变情况下, 将 S_A 分别对 K_A, K_B 求偏导数, 由 $\frac{C_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}} < A_0, T_B > r_B$, 可得

$$\frac{\partial S_A}{\partial K_A} = \frac{(A_0 - A_1)L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}(\alpha(L_A + K_A) - L_A)}{2((A_0 - A_1)L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A)^2} + \frac{(T_A - r_A)(1 - (1 - \alpha)A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha})}{2((A_0 - A_1)L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A)^2} < 0, \quad (20)$$

$$\frac{\partial S_A}{\partial K_B} = \frac{(1 - \beta)B_0 (T_B - r_B) L_B^{1-\beta} K_B^{1-\beta}}{2((B_0 - B_1)L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B)^2} > 0. \quad (21)$$

根据以上条件可知, 在其它参数不变的条件下, S_A 是 K_A 以及 K_B 的增函数, 进一步分析可知 $\frac{\partial S_A}{\partial K_A} <$

$\frac{\partial S_A}{\partial K_B}$. 因此, 当生产商质量安全资本投入越大, 供应商质量安全资本投入越小, 此时供应商会比生产商带来更多的外部性收益, 系统稳定策略在 $(x, y) = (1, 0)$ 的概率越大. 证毕.

命题 6 α 代表供应商的劳动产出弹性系数, β 代表生产商的劳动产出弹性系数. 当供应商的劳动产出弹性系数越大, 生产商的劳动产出弹性系数越小时, 则系统稳定策略为 (Q_A, Q_B) 的概率就会越大.

证明 在其它参数不变情况下, 将 S_A 分别对 α, β 求偏导, 由 $\frac{C_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}} < A_0 < A_1 < \frac{T_A + C_A - r_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}}$, $\frac{C_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}} < B_0 < B_1 < \frac{T_B + C_B - r_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}}$, $L_A < K_A, L_B < K_B$ 可得

$$\frac{\partial S_A}{\partial \alpha} = \frac{(A_0 - A_1)C_A L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} (\ln L_A - \ln K_A) (\alpha(L_A + K_A) - L_A)}{2((A_0 - A_1)L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A)^2} + \frac{(T_A - r_A)A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} (\ln K_A - \ln L_A)}{2((A_0 - A_1)L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A)^2} > 0, \tag{22}$$

$$\frac{\partial S_A}{\partial \beta} = \frac{B_0(T_B - r_B)L_B^{1-\beta} K_B^{1-\beta} (\ln K_B - \ln L_B)}{2((B_0 - B_1)L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B)^2} < 0. \tag{23}$$

因此, 在其它参数不变的情况下, S_A 是 α 的增函数, β 的减函数. 供应商劳动产出弹性系数越大, 生产商劳动产出弹性系数越小, 则系统稳定策略为 $(x, y) = (1, 0)$ 的概率就越大, 即供应商生产函数的产出所带来的外部性效益大于生产商. 证毕.

3.4 惩罚约束下的演化博弈分析

综上所述可知, 如果博弈主体进行质量安全投入生产函数的综合技术水平越低, 其产出效益低于所投成本, 或者还没有不投入任何成本获得对方的外部性收益大, 在这种情境下参与单方不会选择质量安全投入策略. 在现实社会生活中, 供应商和生产商的专业知识以及追求目标不一致, 这造成了他们之间的信息不对称, 那么市场出现机会主义行为和道德风险的概率会大幅增加. 在这种现实背景下, 只有借助外部力量, 如政府或第三方监管, 制定相关的惩罚机制来约束参与方履行契约, 方可降低机会主义行为和道德风险出现的概率. 假设在政府监管下, 供应商和生产商双方各签订一份惩罚约束契约: 如果只有单方履行所签订契约, 那么未履行契约的那一方将会给履行契约的那一方一笔罚金, 若双方都履行或者都不履行契约, 双方则不用进行转移罚金. 基于此给出在惩罚约束下演化博弈参与双方的支付矩阵, 如表 5 所示.

表 5 惩罚约束下供应商与生产商支付矩阵
Table 5 Payment matrix of suppliers and producers under penalty constraints

供应商		生产商	
		Q_A	Q_B
Q_A	$(A_1 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A + r_A, B_1 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B + r_B)$	$(A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A + r_A + F, T_B - F)$	
Q_B	$(T_A - F, B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B + r_B + F)$	(r_A, r_B)	

根据微分方程理论, 构建出惩罚约束下供应商和生产商在质量安全投入策略上的动态系统(II)

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = F_2(x, y) \\ \frac{dy}{dt} = G_2(x, y), \end{cases} \tag{24}$$

其中

$$F_2(x, y) = x(1 - x)((A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A + F) - y((A_0 - A_1)L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A)),$$

$$G_2(x, y) = y(1 - y)((B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B + F) - x((B_0 - B_1)L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B)).$$

命题7 系统(II)的平衡点为 $(x, y) = (0, 0)$, $(x, y) = (0, 1)$, $(x, y) = (1, 0)$, $(x, y) = (1, 1)$. 当且仅当以下不等式成立时, 点 (x_D^*, y_D^*) 为系统的平衡点, 即

$$\begin{cases} \max(C_B - B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta}, C_A - A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}) < F \\ F < \min(C_B - B_1 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B, C_A - A_1 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A), \end{cases} \quad (25)$$

$$\text{其中 } x_D^* = \frac{B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B + F}{(B_0 - B_1) L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B}, y_D^* = \frac{A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A + F}{(A_0 - A_1) L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A}.$$

证明 当 $0 < x_D^* < 1$, $0 < y_D^* < 1$ 同时成立时, 点 (x_D^*, y_D^*) 存在. 需满足以下条件

$$\begin{cases} B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B + F > 0 \\ B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - C_B + F < (B_0 - B_1) L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B, \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A + F > 0 \\ A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - C_A + F < (A_0 - A_1) L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A. \end{cases} \quad (27)$$

由此可得

$$\begin{cases} \max(C_B - B_0 L_B^\beta K_B^{1-\beta}, C_A - A_0 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}) < F \\ F < \min(C_B - B_1 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B, C_A - A_1 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A). \end{cases} \quad (28)$$

证毕.

命题8 平衡点 $(x, y) = (1, 1)$ 是系统(II)唯一的ESS的充要条件为

$$F > \max(C_A - A_1 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A, C_B - B_1 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B). \quad (29)$$

证明 在系统(II)的演化博弈过程中, 参与双方的演化稳定策略的条件为

$$\begin{cases} F_2(x, y) = 0 \\ G_2(x, y) = 0, \end{cases} \quad (30)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial F_2}{\partial x} < 0 \\ \frac{\partial G_2}{\partial y} < 0. \end{cases} \quad (31)$$

即

$$\begin{cases} -(F - T_A - C_A + A_1 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} + r_A) < 0 \\ -(F - T_B - C_B + B_1 L_B^\beta K_B^{1-\beta} + r_B) < 0. \end{cases} \quad (32)$$

由此可得

$$F > \max(C_A - A_1 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A, C_B - B_1 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B). \quad (33)$$

根据之前条件当 $\frac{C_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}} < A_0 < A_1 < \frac{T_A + C_A - r_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}}$, 且 $\frac{C_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}} < B_0 < B_1 < \frac{T_B + C_B - r_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}}$ 成立时, 供应商和生产商都会有不进行质量安全投入的动机. 政府或相关监管部门应该制订相关的惩罚约束契约, 并且契约的惩罚力度要大于他们不履行行为获得的收益与共同履约获得的收益之差, 即 $F > \max(C_A - A_1 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A, C_B - B_1 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B)$. 由于供应商和生产商违约成本太高, 为最大化收益会选择履约. 综上所述, 药品制造供应链节点的供应商和生产商可通过签订具有一定惩罚约束的契约, 并加大违约的惩罚力度, 最大限度降低出现违约行为的概率, 最大限度保障药品质量安全.

4 仿真分析

为更加真实反映政府或第三方监管制订的惩罚约束契约对演化博弈最终稳定策略的影响, 本文在对系统模型中的参数进行赋值的基础上, 对演化博弈模型进行了仿真分析. 在满足条件 $\frac{C_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}} < A_0 < A_1 < \frac{T_A + C_A - r_A}{L_A^\alpha K_A^{1-\alpha}}$, 且 $\frac{C_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}} < B_0 < B_1 < \frac{T_B + C_B - r_B}{L_B^\beta K_B^{1-\beta}}$, $C_A = L_A + K_A$, $C_A < r_A < T_A$, $C_B = L_B + K_B$, $C_B < r_B < T_B$, $0 < \alpha < 1$, $0 < \beta < 1$ 的情况下, 假设参数初始值如下: $L_A = 1.25$, $K_A = 1.75$, $r_A = 2.1$, $T_A = 2.3$, $A_0 = 1.95$, $A_1 = 2.0$, $\alpha = 0.3$, $L_B = 1.2$, $K_B = 1.8$, $r_B = 2.2$, $T_B = 2.4$, $B_0 = 1.9$, $B_1 = 1.95$, $\beta = 0.25$. 根据柯布-道格拉斯生产函数的特点, 为说明参与双方劳动力投入和资本投入的不同对演化稳定结果的影响, 采取不同的赋值方式来讨论不同条件背景下的演化稳定策略. 参数变化如下: 1) 在保持其它参数初始值不变的情况下, 分别改变 α, β 为 0.35 和 0.2; 2) 在保持其它参数初始值不变的情况下, 重新赋值 L_A, K_A, L_B, K_B , 其中 $L_A = 1.75$, $K_A = 1.25$, $L_B = 1.1$, $K_B = 1.9$. 根据以上三种参数设定情况, 分别得到三个初始策略选择比例, 分别为 $(x_D, y_D) = (0.8, 0.7)$, $(x_D, y_D) = (0.6, 0.3)$, $(x_D, y_D) = (0.6, 0.3)$.

不同惩罚制度下供应商与生产商演化稳定策略仿真结果如图 2 所示.

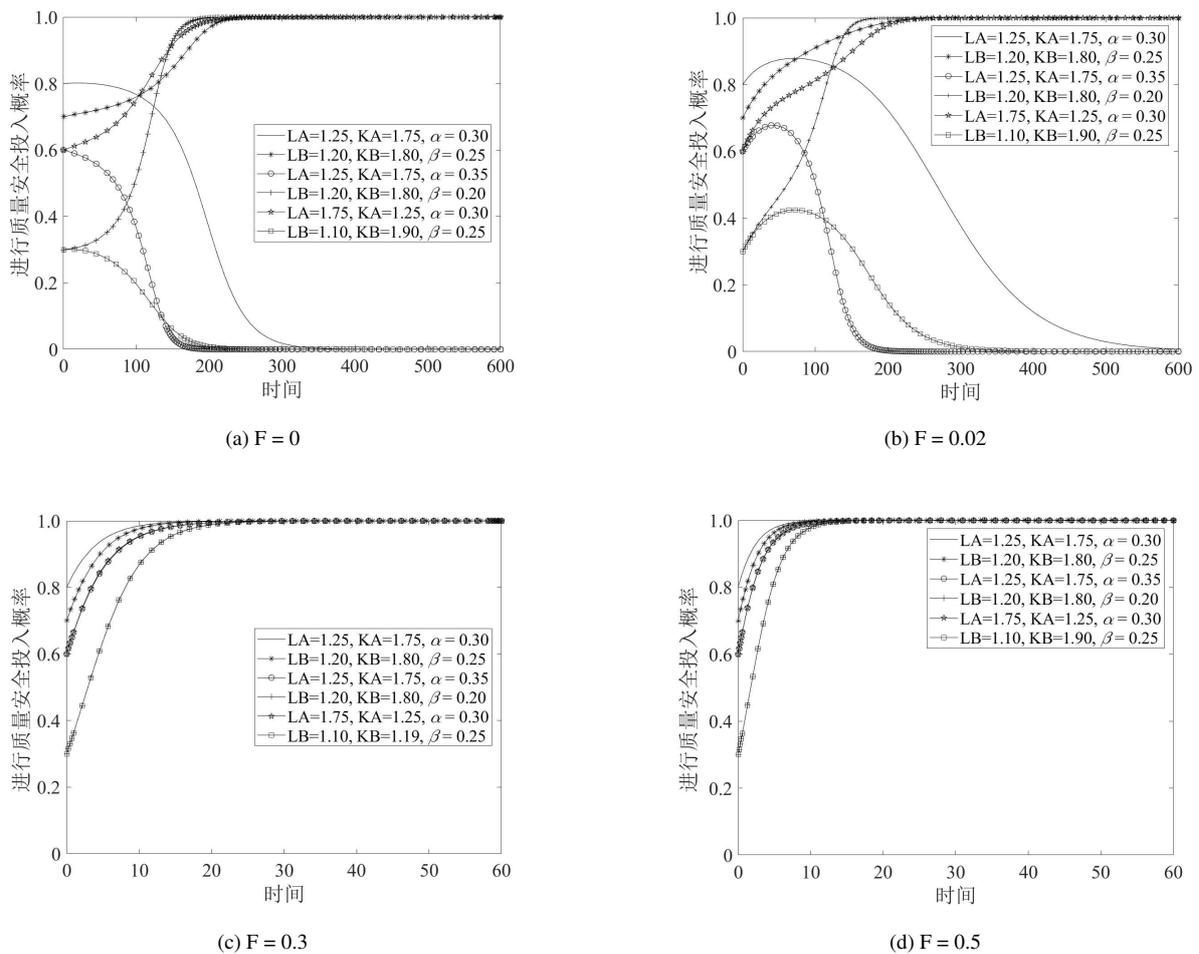


图 2 不同惩罚制度下供应商与生产商演化稳定策略仿真

Fig. 2 Simulation of evolutionary stability strategies of suppliers and manufacturers under different penalty systems

在没有政府或第三方惩罚监管下,三种参数设定情况下的博弈如图 2(a)所示,结果分析如下:1)在不改变任何参数情景下,参与双方的初次博弈策略为 $(x_D, y_D) = (0.8, 0.7)$,随着时间的变化供应商的策略选择比例逐步下降,生产商的策略选择比例逐步上升,双方经过多次的博弈,博弈结果为稳定在 $(x_D, y_D) = (0, 1)$,即博弈的长期结果为供应商会出现违约行为,选择不进行质量安全投入策略;2)当其它参数不变,在增加 α 值并降低 β 值的情境下,参与双方的初次博弈策略为 $(x_D, y_D) = (0.6, 0.3)$.与第一种情境下博弈结果相比,随着时间的变化供应商的策略选择会以更多的比例下降,生产商的策略选择会以更多的比例上升,最终博弈结果也稳定在 $(x_D, y_D) = (0, 1)$,即博弈的长期结果为供应商会出现违约行为,选择不进行质量安全投入策略;3)当其它参数不变,在增加 L_A 并降低 L_B 的情境下,参与双方的初次博弈策略为 $(x_D, y_D) = (0.6, 0.3)$.与第一种情境下博弈结果相比,随着时间的变化生产商的策略选择比例逐步下降,供应商的策略选择比例逐步上升,双方经过多次的博弈,博弈结果为稳定在 $(x_D, y_D) = (0, 1)$,博弈的长期结果为生产商会违约行为,选择不进行质量安全投入策略.因此,在没有政府或第三方惩罚监管下,增加 α 值降低 β 值会博弈会更快到达稳定策略,但是不会改变长期的博弈稳定策略,即劳动投入弹性系数的变化会影响博弈达到稳定策略的时间.此外,若增加 L_A 并降低 L_B 会改变博弈稳定策略,即要素投入的变化会影响博弈双方的策略选择.

接下来考察在惩罚力度不同的情况下,系统稳定性如何发生变化.在其它参数不变的情况下,当 F 在命题7约束条件下时,取 $F = 0.02$,图 2(b)展示了在此背景下系统随时间变化的演化结果.可以看出,当惩罚力度较小时,博弈演化稳定结果没有改变,并延长了系统达到演化稳定状态的时间,惩罚力度较小的监管短期会影响博弈双方的选择态度,但长期内不会影响博弈双方的策略选择,不能达到预期的监管目的.当惩罚力度 $F > \max(C_A - A_1 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A, C_B - B_1 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B)$ 时,在其他参数不变情况下,分别取 $F = 0.3$ 和 $F = 0.5$,此时系统演化结果如图 2(c)、图 2(d)所示,可以清晰看出,当惩罚力度较大时,供应商和生产商都会选择进行质量安全投入策略,并随着惩罚力度的增大,系统将会以更快的速度达到稳定状态.进一步的,图 3 将供应商和生产商放在同一平面内考察不同惩罚力度下系统演化结果,以此来分析整个系统的演化路径.可以看出,当惩罚力度 $F > \max(C_A - A_1 L_A^\alpha K_A^{1-\alpha} - r_A + T_A, C_B - B_1 L_B^\beta K_B^{1-\beta} - r_B + T_B)$ 时,系统演化稳定策略趋向于 $(1, 1)$,为系统的唯一演化稳定策略.综上可知,采取强有力的惩罚力度会改变系统演化结果,能够在较短时间内促使系统达到演化稳定状态,促使博弈双方选择质量安全投入策略,有效从药品生产供应链源头保障药品质量,切实保障人民群众健康安全.

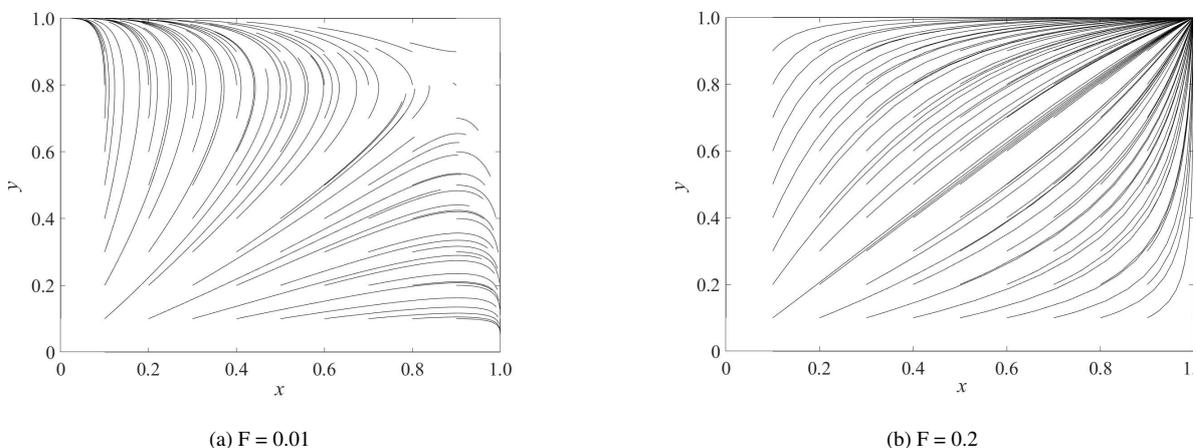


图3 不同惩罚制度下系统(II)的演化稳定策略仿真

Fig. 3 Evolutionary stability strategy simulation under different penalty systems of system (II)

5 结束语

本文基于现实中个体理性的研究假设,引入柯布-道格拉斯生产函数,构建“药品原辅料供应商-药品生产商”的演化博弈模型.通过求解相应的复制动态方程及绘制演化示意图,系统分析了博弈参与者策略选择的动态演化过程.结合数值仿真分析,详细考察在不同惩罚机制下系统的差异性演化稳定策略.此外,探讨了综合技术水平和要素投入效率等重要参数的变化对博弈参与双方策略选择的影响.最后,为药品质量安全监管提供有效的解决思路.

通过演化博弈分析,发现较高综合技术水平有利于博弈参与方进行质量安全投入,较高劳动投入弹性系数及惩罚力度均可缩短系统达到稳定策略的时间.在以不同主要要素投入为主的药品生产供应链中,主要要素投入较高的参与方进行质量安全投入的概率更高.因此,为保障药品质量安全,政府应当建立健全相关政策体系,积极引导药品制造供应链节点企业采取正确的行为决策.一方面,加强对药品生产供应链节点企业中综合技术水平较低企业的监管,并积极引导其提升自身技术水平.另一方面,对于以劳动要素投入为主的药品生产供应链,应加大对劳动要素投入较少企业的惩罚力度,对于以资本要素投入为主的药品生产供应链,应加大对资本要素投入较少企业的惩罚力度,降低企业“搭便车”行为发生的概率.此外,政府或第三方监管部门应制定有效的惩罚力度契约,对违约企业实施严格的惩罚机制,最大限度降低违约行为的出现.

参考文献:

- [1] 梁雁茹,刘亦晴. COVID-19 疫情下医疗防护用品市场监管演化博弈与稳定性分析. 中国管理科学: 1-11[2020-10-27]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.0448>.
Liang Y R, Liu Y Q. The evolutionary game and stability of the regulatory mechanism of medical protective equipment market under COVID-19 epidemic. Chinese Journal of Management Science: 1-11[2020-10-27]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.0448>. (in Chinese)
- [2] 胡颖廉,傅凯思. 从政治科学、商业利益和公共政策视角研究国外药品安全监管. 中国药事, 2008, 22(12): 1043-1050.
Hu Y L, Fu K S. Political science, business interest and public policy: Review of drug safety regulation research in foreign countries. Chinese Pharmaceutical Affairs, 2008, 22(12): 1043-1050. (in Chinese)
- [3] 林毅夫,潘士远. 信息不对称、逆向选择与经济发展. 世界经济, 2006(1): 3-11.
Lin Y F, Pan S Y. Information asymmetry, adverse selection and economic development. The Journal of World Economy, 2006(1): 3-11. (in Chinese)
- [4] Arrow K J. The Economics of Information. Washington: Basil Blackwell Limited, 1984.
- [5] Stratton S D. The Application of Lean Thinking to Pharmaceutical Quality Systems, Defining the FDA as the Customer. USA: California State University, 2004: 21-34.
- [6] Handley S M, Gray J V. Inter-organizational quality management: The use of contractual incentives and monitoring mechanisms with outsourced manufacturing. Production and Operations Management, 2013, 22(6): 113-137.
- [7] 王喆,丁姿. 公共服务供给模式改革的多案例研究:以医疗服务为例. 管理评论, 2018, 30(3): 264-272.
Wang Z, Ding Z. Multi-case study on the reform of public service delivery mode: Medical services as an example. Management Review, 2018, 30(3): 264-272. (in Chinese)
- [8] 朱立龙,荣俊美. 政府奖惩机制下药品安全质量监管三方演化博弈及仿真分析. 中国管理科学, 2021, 29(11): 55-67.
Zhu L L, Rong J M. Three-party evolutionary game and simulation analysis of drug quality supervision under the government reward and punishment mechanism. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(11): 55-67. (in Chinese)
- [9] 胡颖廉,慕玲. 超越监管看安全:国家药品安全治理体系构建. 中国行政管理, 2017(6): 115-120.
Hu Y L, Mu L. Beyond the regulation: National drug safety governance system in China. Chinese Public Administration, 2017(6): 115-120. (in Chinese)
- [10] Busby J S. The co-evolution of competition and parasitism in the resource-based view: A risk model of product counterfeiting. European Journal of Operational Research, 2018, 276(1): 300-313.

- [11] 刘 鹏. 混合型监管: 政策工具视野下的中国药品安全监管. 公共管理学报, 2007, 4(1): 12–24.
Liu P. Mixed regulation: China's drugs safety regulation in policy instrument perspective. Journal of Public Management, 2007, 4(1): 12–24. (in Chinese)
- [12] 张国兴, 高晚霞, 管 欣. 基于第三方监督的食品安全监管演化博弈模型. 系统工程学报, 2015, 30(2): 153–164.
Zhang G X, Gao W X, Guan X. Evolutionary game model of food safety supervision based on the third-party intendance. Journal of Systems Engineering, 2015, 30(2): 153–164. (in Chinese)
- [13] 刘长玉, 于 涛. 绿色产品质量监管的三方博弈关系研究. 中国人口资源与环境, 2015, 25(10): 170–176.
Liu C Y, Yu T. Study on the tripartite game in quality regulation of green products. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(10): 170–176. (in Chinese)
- [14] 赵荧梅, 郭本海, 刘思峰. 不完全信息下产品质量监管多方博弈模型. 中国管理科学, 2017, 25(2): 111–120.
Zhao Y M, Guo B H, Liu S F. A multi-player game model about product quality regulation based on incomplete information. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(2): 111–120. (in Chinese)
- [15] 朱立龙, 荣俊美. 药品供应链质量投入与政府分层监管策略研究. 软科学, 2019, 33(2): 26–31.
Zhu L L, Rong J M. Quality investment and government stratification supervision strategy in drug supply chain. Soft Science, 2019, 33(2): 26–31. (in Chinese)
- [16] Zhang M M, Zhang J L, Cheng T C E, et al. The effect of unannounced inspection on prevention of drug fraud. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2019, 28(1): 63–90.
- [17] 全 吉, 储育青, 王先甲. 自愿参与机制下的公共物品博弈与合作演化. 系统工程学报, 2020, 35(2): 188–200.
Quan J, Chu Y Q, Wang X J. Public goods game under voluntary participation mechanism and the evolution of cooperation. Journal of Systems Engineering, 2020, 35(2): 188–200. (in Chinese)
- [18] 杨丰梅, 王安瑛, 吴 军, 等. 电商平台信用信息共享策略演化. 系统工程学报, 2017, 32(5): 596–603.
Yang F M, Wang A Y, Wu J, et al. Evolutionary dynamics of E-commerce platform's credit information sharing strategy. Journal of Systems Engineering, 2017, 32(5): 596–603. (in Chinese)
- [19] 李 杰, 张 睿, 徐 勇. 电商平台监管与商家售假演化博弈. 系统工程学报, 2018, 33(5): 649–661.
Li J, Zhang R, Xu Y. Evolutionary game between E-commerce platform supervision and merchants selling fakes. Journal of Systems Engineering, 2018, 33(5): 649–661. (in Chinese)
- [20] 曹 裕, 余振宇, 万光羽. 新媒体环境下政府与企业食品掺假中的演化博弈研究. 中国管理科学, 2017, 25(6): 179–187.
Cao Y, Yu Z Y, Wan G Y. Evolutionary game study between government and enterprises in food adulteration under the new media environment. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(6): 179–187. (in Chinese)
- [21] 张 明, 朱建军, 王嵩华. 主-供模式下大型客机协同研制的演化博弈分析. 系统工程学报, 2019, 34(6): 748–759.
Zhang M, Zhu J J, Wang H H. Evolutionary game analysis of co-development of large passenger aircraft under main manufacturer-supplier mode. Journal of Systems Engineering, 2019, 34(6): 748–759. (in Chinese)
- [22] 汪旭晖, 任晓雪. 基于演化博弈的平台电商信用监管机制研究. 系统工程理论与实践, 2020, 40(10): 2617–2630.
Wang X H, Ren X X. Research on credit supervision mechanism of E-commerce platform based on evolutionary game. Systems Engineering: Theory Practice, 2020, 40(10): 2617–2630. (in Chinese)
- [23] 宋 燕, 甄天民. 药品安全监管的演化博弈与对策分析. 中国药房, 2016(19): 2593–2595.
Song Y, Zhen T M. Evolutionary game and countermeasure analysis of drug safety supervision. China Pharmacy, 2016(19): 2593–2595. (in Chinese)
- [24] 朱立龙, 荣俊美. “互联网+医疗健康”背景下考虑患者反馈机制的药品质量监管策略研究. 中国管理科学, 2020, 28(5): 122–135.
Zhu L L, Rong J M. Drug quality supervision strategy considering patient feedback mechanism under the background of “Internet + Medical Health”. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(5): 122–135. (in Chinese)

作者简介:

金 浩(1958—), 男, 吉林延吉人, 博士, 教授, 研究方向: 供应链管理, Email: 245486309@qq.com;

刘德民(1992—), 男, 河北邯郸人, 博士生, 研究方向: 供应链管理, Email: 719998771@qq.com;

安 明(1994—), 女, 河北保定人, 博士生, 研究方向: 供应链管理, Email: 945794695@qq.com.