

社会公众参与的药品质量安全共治演化博弈分析

闫志华^{1,2}, 唐锡晋^{1,2}

(1. 中科院数学与系统科学研究院, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为探析社会公众对药品质量安全监管的影响, 通过构建社会公众、医药企业与监管部门的三方演化博弈模型, 分析三方策略的均衡条件、影响因素和选择机制. 研究表明, 社会公众参与监管可以减少监管机构的不作为和医药企业违法行为, 只有社会公众参与药品质量安全监管的收益和曝光率高于阈值时, 社会公众参与监管才可以作为监管部门监管的有效补充. 强化对医药企业的惩罚制度和监管部门的问责制度, 可以减少医药企业与监管机构的共谋, 防止社会公众参与监管而导致药品质量安全监管陷入动荡状态.

关键词: 药品质量安全监管; 社会公众参与; 演化博弈; 公共治理

中图分类号: C931 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2021)06-0731-13

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2021.06.002

Evolutionary game analysis of drug safety regulation considering public participation

Yan Zhihua^{1,2}, Tang Xijin^{1,2}

(1. Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to analyze the influence of the public on the supervision of drug safety, a tripartite evolutionary game model, including the public, pharmaceutical enterprises and regulatory agencies, is established. The equilibrium condition, influencing factors and selection mechanism of the three-party strategy are analyzed. The results show that public participation in supervision can reduce malpractice of regulators and illegal behaviors of pharmaceutical enterprises. Only when the benefits and exposure rate of public participation in drug safety supervision are higher than the thresholds, can the public supervision be an effective supplement to the supervision of regulatory authorities. Strengthening the punishment for pharmaceutical enterprises and the accountability for regulatory departments helps to reduce collusion between pharmaceutical companies and regulators, improve the supervision level of drug safety, and prevent the instability of drug safety supervision with public participation.

Key words: drug safety regulation; public participation; evolutionary game theory; public management

1 引言

药品质量安全不仅影响国民的身心健康, 也关系社会的和谐稳定, 是社会舆情关注的焦点. 近年来频发的药品质量安全事件产生了恶劣的社会影响, 如 2012 年和 2015 年被曝光的“毒胶囊事件”, 2010 年、2016 年

收稿日期: 2019-08-30; 修订日期: 2020-09-10.

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2016YFB1000902); 国家自然科学基金资助项目(71731002; 71971190).

和2018年被曝光的“疫苗事件”。同类药品质量问题反复出现折射出国内药品质量监管存在的困境:药品生产企业众多,药品生产流程和工艺复杂,虽然国内已经建立起较为完善的药品生产许可制度、药品抽检制度和飞行检查制度,但是地方保护主义的普遍存在和巨大利益的诱惑都会使医药企业铤而走险选择生产劣质药品^[1,2]。随着社交媒体的发展,社会公众参与社会治理的渠道增多,已经成为药品质量安全监管的重要力量。社会公众通过实地考察、热点舆情事件传播、监管部门投诉等方式,将医药企业的违法行为、监管部门的不作为公诸于众,形成事件舆情,不仅推动了事件的解决,而且对医药企业和监管部门的行为产生很大影响。因此,考虑社会公众的曝光和社会公众的损失,研究社会公众参与对医药企业和监管部门行为的影响是非常必要的。

演化博弈论将生物学中的动态演化、演化稳定策略、复制动态等概念与博弈论相结合^[3],在突发事件管理^[4]、社会事务监管^[5,6]、突发事件群体行为^[7,8]和企业知识转移^[9]等研究中到广泛的应用。演化博弈要求博弈主体具有有限理性,通过个体的模仿和突变实现博弈均衡。药品质量安全监管包括药品质量安全政策法规制定、药品从研发、生产到使用过程中的安全管理等^[10]。产品质量监管包括监管机制设计、监管角色管理、政府企业管理等。浦徐进等^[11]认为产品质量是有由企业和政府官员监管共同决定的,政府官员努力监管的激励和企业违法行为的惩罚会影响演化博弈的均衡。牛亮云等^[12]基于前景理论构建中央政府、地方政府和企业三方博弈模型对产品质量监管中的共谋行为进行分析,认为主观心理因素是地方政府与企业合谋的重要原因,中央政府需要加强信息公开和完善声誉机制,才能抑制地方政府与企业的共谋行为。张雪等^[13]对中药产品质量安全监管进行分析,认为监管部门需要进行监管体系改革,降低监管成本,建立专业化的监管队伍,改革现有药品质量监管奖惩体系,改善与公众的关系以及接受公众的监督等。

随着互联网的发展,新闻媒体、社会公众等作为第三方监管力量参与社会共治受到关注。新闻媒体通过曝光产品质量问题,引发社会关注,社会公众通过线上和线下的传播、政府举报等措施参与社会事务监管。谢康等^[14]提出药品质量安全社会共治“预防-免疫-治疗”三级协同管理体系,对“预防”体系、“免疫”体系和“治疗”体系制度的构建进行分析。周开国等^[15]认为媒体、资本市场和政府的协同治理是产品质量监管的有效模式,新闻媒体的负面关注会影响资本市场对企业未来业绩的预期,影响企业短期的质量管理行为,而政府权威媒体的介入则对企业的质量行为产生长期的影响。张曼等^[16]的研究通过构建中央政府与地方政府的食品质量监管委托代理模型,发现媒体曝光可以降低中央政府的监管成本,并提高地方政府的监管水平。万晓榆等^[17]研究了不完全信息下公众参与度、惩罚力度等对政府部门和应用平台的动态行为的影响,认为社会公众参与度在阈值之上、加大对应用平台的惩罚力度都可以提升监管水平。赵黎明等^[18]构建政府、公众和企业的三方博弈模型,分析了社会公众对企业环境行为的影响,认为公众参与在一定程度上对政府监管具有替代作用。陆如霞等^[19]构建包括社会私人部门、社会公众、政府监管部门在内的博弈模型,认为通过拓宽公众维权渠道,降低私人部门成本等可以实现多赢。张国兴等^[20]构建演化博弈模型对食品安全监管中的第三方监管的作用和影响进行分析,指出食品安全监管中的“激励悖论”现象,提出监管机构的应对策略。

综上,现有的药品质量监管研究主要从医药企业、政府监管部门、供应链等角度进行分析,而社会公众已经参与到环境保护、金融监管和腐败治理等社会事务中,这将在未来的社会治理中扮演越来越重要的角色。本文以社会公众参与为切入点,研究社会公众行为对医药企业和监管部门的行为的影响,揭示演化博弈的均衡条件和演化路径,提出社会公众参与药品质量安全监管的条件,为药品质量安全监管政策的制定提供参考。

2 公众参与的药品质量监管演化博弈模型

2.1 博弈主体界定与模型基本假设

药品质量安全监管参与者包括医药企业、监管部门和社会公众等。参与者是有限理性的个体,具有不同的利益诉求,药品质量安全监管的状态是不同主体博弈的结果。

监管部门是药品质量监管的政策制定和执行机构,包括国家药品质量监督局、地方药品监督管理局、地

方政府等. 国家药品质量监督管理局负责药品研发环节的许可、检查和处罚, 以及对省级监管部门的管理. 省级药品监督管理局负责药品生产环节的许可、检查和处罚, 是本文模型的博弈主体^[21].

药品供应链参与者众多, 包括原材料供应商、生产企业、物流企业等, 各环节对药品质量均有影响. 其中药品企业供应链的主要参与者, 药品的生产工艺、生产流程管理、原材料采购等直接关系药品质量, 也是药品质量安全监管的核心环节. 国内对医药企业进行严格管理, 只有取得药品生产许可、GMP 认证等方可进行药品的生产. 近年来国内出现的多起严重药品质量事件均是由于医药生产企业没有严格按照 GMP 进行生产引起的^[22].

社会公众是药品的消费者, 也是药品质量问题的主要受害者, 对药品质量安全事件非常关注. 公众通过多种渠道参与药品质量监管, 如药品生产企业实地考察、社交媒体曝光、药监局网站投诉、各级纪检委举报等, 得到政府的支持和认可^[23]. 随着社交媒体的发展, 社会公众获取信息和参与监管的可能性不断增加, 成为政府监管之外重要的药品质量监管力量.

综上所述, 本文的研究假设如下:

1) 演化博弈的参与者包括社会公众、医药企业和监管部门, 都是有限理性的. 社会公众可以采取社交媒体发布、向监管部门举报等方法曝光医药企业的不合规生产行为, 也可以采取不作为的策略, 其策略集合为{参与, 不参与}. 医药企业可以选择成本较高的严格按照国家 GMP 标准进行生产, 也可以为了获取超额利润而选择不严格按照 GMP 标准进行生产, 其策略集合为{合规生产, 不合规生产}. 监管部门可以选择严格按照法律规定对药品生产企业进行严格监管, 也可以出于经济利益和社会就业等地方保护主义而选择不严格监管, 其策略集合为{严格执行, 不严格执行}.

2) 如果医药企业严格按照 GMP 标准进行生产, 则选择合规生产策略的净收益为 R_{11} . 医药企业选择不合规生产策略可以降低生产成本, 获得净收益为 R_{12} , 满足 $R_{11} < R_{12}$. 但是如果药品企业的不合规生产行为被监管部门发现, 或者被社会公众曝光, 就会受到没收违法所得、罚款、吊销《药品生产许可证》等处罚, 处罚力度为 P . 惩罚力度 P 越高意味着药品生产企业选择不合规生产策略的风险和成本越高.

3) 监管部门的成本包括机构运营成本、抽检成本和声誉损失等, 收益包括中央政府的考核绩效、地方经济发展等. 监管部门的策略选择会影响其收益: 监管部门选择严格执行策略会提升绩效水平和政府形象, 对地方经济发展产生消极影响, 净收益为 R_{21} ; 监管部门选择不严格执行策略会促进地方经济发展, 对地方政府绩效、政府形象产生消极影响, 净收益为 R_{22} ^[24,25]. 如果监管部门的不严格监管策略导致药品质量安全事件并被社会公众曝光, 则会受到上级管理部门严厉的问责, 惩罚力度为 L . 近年来随着政府问责力度 L 的增加, 监管部门对会选择更加严格的监管^[26].

4) 社会公众为了自身利益, 会对药品生产企业的违法行为进行曝光, 曝光率为 α , 需要一定的时间和经济支出. 社会公众参与药品质量监督是有风险的, 可能会受到医药企业威胁, 甚至司法诉讼. 因此社会公众参与药品质量监督的净收益为 R_{31} , 不参与药品质量监督的净收益为 R_{32} . 如果医药企业的不合格生产行为没有被发现, 则社会公众的身心的健康就会受到损失 C . 曝光率 α 表明社会公众曝光的难易程度, 对公众的参与行为产生直接影响. 损失 C 是公众不作为而导致的损失, 损失值越大, 公众的参与度也会越高.

5) 医药企业选择合规生产策略的概率为 $x \in [0, 1]$, 选择不合规生产策略的概率为 $1 - x$. 监管部门选择严格监管策略的概率为 $y \in [0, 1]$, 选择不严格监管策略的概率为 $1 - y$. 社会公众选择参与策略的概率为 $z \in [0, 1]$, 选择不参与策略的概率为 $1 - z$.

根据以上假设, 社会公众、监管部门和医药企业的药品质量安全监管三方博弈模型的收益矩阵见表 1.

2.2 演化博弈模型构建

医药企业选择合规生产策略的适应度为

$$E_x = yzR_{11} + y(1 - z)R_{11} + (1 - y)zR_{11} + (1 - y)(1 - z)R_{11} = R_{11}, \quad (1)$$

医药企业选择不合规生产策略的适应度为 $E_{1-x} = R_{12} - Py - \alpha P(1-z)$.

表1 医药企业、监管部门和社会公众的收益矩阵
Table 1 Payoff matrix of pharmaceutical company, regulator and the public

主体策略	监管部门: 严格监管		监管部门: 不严格监管	
	社会公众: 参与	社会公众: 不参与	社会公众: 参与	社会公众: 不参与
医药企业	$\begin{pmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{32} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} R_{11} \\ R_{22} \\ R_{31} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} R_{11} \\ R_{22} \\ R_{32} \end{pmatrix}$
	$\begin{pmatrix} R_{12} - P \\ R_{21} \\ R_{31} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} R_{12} - P \\ R_{21} \\ R_{32} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} R_{12} - \alpha P \\ R_{22} - \alpha L \\ R_{31} - (1-\alpha)C \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} R_{12} \\ R_{22} \\ R_{32} - C \end{pmatrix}$

演化博弈的复制动态方程是描述种群中采用特定策略的比例随时间的变化的微分方程^[27]. 根据 Malthusian 方程, 医药企业的复制动态方程为

$$\frac{dx}{dt} = E(x, y, z), \quad (2)$$

其中 $E(x, y, z) = x(1-x)(E_x - E_{1-x}) = x(1-x)[R_{11} - R_{12} + Py + \alpha P(1-y)z]$.

监管部门选择严格监管策略的适应度和选择不严格监管策略的适应度分别为

$$E_y = xzR_{21} + x(1-z)R_{21} + (1-x)zR_{21} + (1-x)(1-z)R_{21} = R_{21} \text{ 和 } E_{1-y} = R_{22} - \alpha L(1-x)z,$$

则监管部门的演化博弈复制动态方程为

$$\frac{dy}{dt} = G(x, y, z), \quad (3)$$

其中 $G(x, y, z) = y(1-y)(E_y - E_{1-y}) = y(1-y)[R_{21} - R_{22} + \alpha L(1-x)z]$.

社会公众选择参与策略的适应度和选择不参与策略的适应度分别为

$$E_z = R_{31} - (1-x)(1-y)(1-\alpha)C \text{ 和 } E_{1-z} = R_{32} - C(1-x)(1-y),$$

则社会公众的演化博弈复制动态方程为

$$\frac{dz}{dt} = S(x, y, z), \quad (4)$$

其中 $S(x, y, z) = z(1-z)(E_z - E_{1-z}) = z(1-z)[R_{31} - R_{32} + \alpha C(1-x)(1-y)]$.

根据式(2)、式(3)和式(4)可以组成社会公众参与的药品质量监管博弈的复制动态方程组

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x(1-x)[R_{11} - R_{12} + Py + \alpha P(1-y)z] \\ \frac{dy}{dt} = y(1-y)[R_{21} - R_{22} + \alpha L(1-x)z] \\ \frac{dz}{dt} = z(1-z)[R_{31} - R_{32} + \alpha C(1-x)(1-y)]. \end{cases} \quad (5)$$

2.3 演化博弈模型均衡分析

演化博弈的 ESS 是对应复制动态方程组均衡点的子集^[28], 均衡点的局部稳定性可以根据 Jacobi 矩阵的特征值进行判断: 如果均衡点对应 Jacobi 矩阵的特征值均有非正实部, 则均衡点为渐进稳定点, 是演化博弈的演化均衡点^[29,30]. 复制动态方程组(5)对应的 Jacobi 矩阵为

$$J_1 = \begin{bmatrix} (1-2x)[R_{11} - R_{12} + Py + \alpha P(1-y)z] & -\alpha Px(1-x)z & \alpha Px(1-x)(1-y) \\ -\alpha Ly(1-y)z & (1-2y)[R_{21} - R_{22} + \alpha L(1-x)z] & \alpha Ly(1-x)(1-y) \\ -\alpha Cz(1-y)(1-z) & -\alpha Cz(1-x)(1-z) & (1-2z)[R_{31} - R_{32} + \alpha C(1-x)(1-y)] \end{bmatrix}. \quad (6)$$

根据假设条件, $V = \{(x, y, z) | x \in [0, 1], y \in [0, 1], z \in [0, 1]\}$ 是公众参与的药品质量监管演化博弈的策略空间. 令 $E(x, y, z) = 0$, $G(x, y, z) = 0$ 和 $S(x, y, z) = 0$, 可以得到演化博弈的均衡点, 均衡点可能位于

博弈策略空间的顶点, 也可能位于策略空间的边界和内部. 其中位于博弈策略空间内部的均衡点可能是中心点或者鞍点, 不是演化博弈的 ESS^[19]. 下面就对博弈策略空间的顶点和边界点进行分析.

1) 均衡点(0,0,0), (0,1,0), (1,1,0), (0,0,1), (1,0,1), (0,1,1)和(1,1,1) 在一定条件下是演化博弈的 ESS, 均衡点(1,1,0) 不是演化博弈的 ESS. 分别计算均衡点对应的 Jacobi 矩阵的特征值, 可以得到各均衡点是演化博弈 ESS 的条件, 如表 2 所示. 根据假设, 医药企业不合规生产的净收益 R_{12} 大于合规生产的收益 R_{11} , 均衡点(1,0,0)在任何条件下均为不稳定点.

表 2 均衡点的稳定性分析
Table 2 Stability of the rest points

均衡点	Jacobi矩阵特征值符号	稳定性
情形1 (0,0,0)	当 $R_{22} - R_{21} > 0$ 且 $R_{32} - R_{31} > \alpha C$ 时, 均为负	ESS
情形2 (1,0,0)	有正值	不稳定点
情形3 (0,1,0)	当 $R_{12} - R_{11} > P, R_{22} - R_{21} < 0$ 且 $R_{32} - R_{31} > 0$ 时, 均为负	ESS
情形4 (1,1,0)	当 $R_{12} - R_{11} < P, R_{22} - R_{21} < 0$ 且 $R_{32} - R_{31} > 0$ 时, 均为负	ESS
情形5 (0,0,1)	当 $R_{12} - R_{11} > \alpha P, R_{22} - R_{21} > \alpha L$ 且 $R_{32} - R_{31} < \alpha C$ 时, 均为负	ESS
情形6 (1,0,1)	当 $R_{12} - R_{11} < \alpha P, R_{22} - R_{21} > 0$ 且 $R_{32} - R_{31} < 0$ 时, 均为负	ESS
情形7 (0,1,1)	当 $R_{12} - R_{11} > P, R_{22} - R_{21} < \alpha L$ 且 $R_{32} - R_{31} < 0$ 时, 均为负	ESS
情形8 (1,1,1)	当 $R_{12} - R_{11} < P, R_{22} - R_{21} < 0$ 且 $R_{32} - R_{31} < 0$ 时, 均为负	ESS

2) 通过计算 Jacobi 矩阵可知, 位于演化博弈模型策略空间 V 边界的均衡点都不是 ESS. 如满足 $R_{11} - R_{12} + Py + \alpha P(1 - y)z = 0, y(1 - y) = 0$ 和 $z(1 - z) = 0$ 的均衡点的 Jacobi 矩阵为

$$J_2 = \begin{bmatrix} 0 & Px(1-x)(1-\alpha z) & \alpha Px(1-x)(1-y) \\ 0 & (1-2y)[R_{21} - R_{22} + \alpha L(1-x)z] & 0 \\ 0 & 0 & (1-2z)[R_{31} - R_{32} + \alpha C(1-x)(1-y)] \end{bmatrix}. \quad (7)$$

J_2 存在特征值为 0, 不满足 ESS 的条件.

综上分析, 在社会公众、医药企业和监管部门的三方演化博弈模型中, 除均衡点(1,0,0) 外, 均衡点(0,0,0), (0,1,0), (1,1,0), (0,0,1), (1,0,1), (0,1,1)和(1,1,1)均可能是 ESS. 社会公众、医药企业和监管机构的策略选择分别由 $R_{12} - R_{11}, R_{22} - R_{21}$ 和 $R_{32} - R_{31}$ 决定. $R_{12} - R_{11}$ 表示医药企业不合规生产可以获得的超额收益, $R_{22} - R_{21}$ 表示监管部门宽松监管可以获得的超额收益, $R_{32} - R_{31}$ 表示社会公众不参与监管可以获得的超额收益. 根据对表 2 的分析, $R_{12} - R_{11}$ 的值可以分为区间 $(0, \alpha P), (\alpha P, P)$ 和 $(P, +\infty)$, $R_{22} - R_{21}$ 的值为区间 $(-\infty, 0), (0, \alpha L)$ 和 $(\alpha L, +\infty)$, $R_{32} - R_{31}$ 的值为区间 $(-\infty, 0), (0, \alpha C)$ 和 $(\alpha C, +\infty)$. 演化博弈的稳定性分析如下:

1) 如果 $R_{12} - R_{11} \in (0, \alpha P)$, 医药企业选择不合规生产的超额收益低于由于社会公众曝光而受到的期望惩罚, 合规生产是医药企业的最优策略. 如果 $R_{12} - R_{11} \in (\alpha P, P)$, 医药企业的策略选择受到社会公众和监管部门策略选择的影响. 如果 $R_{12} - R_{11} \in (P, +\infty)$, 医药企业选择不合规生产的超额收益高于可能受到惩罚, 必然会选择不合规生产策略.

2) 如果 $R_{22} - R_{21} \in (-\infty, 0)$, 监管部门选择选择宽松监管的收益小于严格监管的收益, 严格监管是监管部门的最优策略. 如果 $R_{22} - R_{21} \in (0, \alpha L)$, 监管部门策略的选择需要考虑由于社会公众曝光而受到的问责损失, 因此医药企业根据社会公众和医药企业的选择选择严格监管策略和宽松监管策略. 如果 $R_{22} - R_{21} \in (\alpha L, +\infty)$, 监管部门对经济增长和地方就业更加重视, 监管部门宽松监管的超额收益高于社会公众曝光药品质量安全事件而受到的问责损失, 监管部门会选择宽松监管的策略.

3) 如果 $R_{32} - R_{31} \in (-\infty, 0)$, 社会公众参与的收益大于不参与的收益, 选择参与策略是社会的最佳选择. 如果 $R_{32} - R_{31} \in (0, \alpha C)$, 社会公众参与的收益小于不参与的收益, 监管部门如果不严格监管, 社会公众就会遭受巨大的损失, 因此社会公众策略选择依赖于监管部门的策略选择. 如

果 $R_{32} - R_{31} \in (\alpha C, +\infty)$, 社会公众选择不参与的超额收益大于在药品质量安全事件中遭受的可能损失, 则社会公众就会选择不参与策略. 这种情况的出现往往是由于社会公众担心医药企业的报复.

3 演化博弈模型 ESS 演化路径分析

为了分析社会公众曝光率 α 、社会公众损失 C 、监管部门惩罚力度 P 和上级部门问责力度 L 对演化博弈 ESS 的影响, 研究根据 2.3 节中对博弈主体策略的选择影响要素的划分, 将 $R_{12} - R_{11}$, $R_{22} - R_{21}$ 和 $R_{32} - R_{31}$ 表示在三维坐标空间中, 分为 27 个子区域, 每个区域都有唯一的 ESS 或者无 ESS.

3.1 社会公众曝光率 α 对 ESS 的影响

社会公众曝光率 α 对医药企业、监管部门和社会公众的策略选择都有影响. 分别对医药企业、监管机构和社会公众的复制动态方程求一阶偏导数可得

$$\frac{\partial E(x, y, z)}{\partial \alpha} = Px(1-x)(1-y)z, \tag{8}$$

$$\frac{\partial G(x, y, z)}{\partial \alpha} = Lyz(1-x)(1-y)z, \tag{9}$$

$$\frac{\partial S(x, y, z)}{\partial \alpha} = \alpha Cz(1-x)(1-y)(1-z). \tag{10}$$

根据研究假设 $x \in [0, 1]$, $y \in [0, 1]$ 和 $z \in [0, 1]$, 可得式(13)、式(14)和式(15)均非负. 因此, 随着社会公众曝光率 α 的提高, 医药企业合规生产比例、监管部门严格监管的比例和社会公众参与的比例不会下降. 演化博弈 ESS 的演化路径取决于初始状态. 如图 1 所示, 根据 $R_{32} - R_{31}$ 取值的不同划分为三个子图.

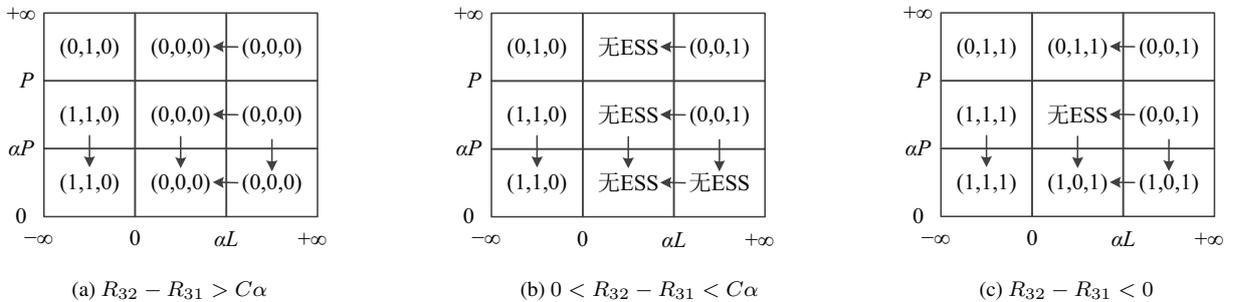


图 1 社会公众曝光率 α 对 ESS 影响

Fig. 1 The influence of public exposure α on ESS

图 1(a) 表示社会公众不参与, 图 1(b) 表示社会公众部分参与, 图 1(c) 表示社会公众完全参与. 随着曝光率 α 的增加, 演化博弈模型的 ESS 沿着箭头的方向进行演化, 且每个子图中 ESS 的均朝着左下角的方向演化. 因此, 其它参数不变, 曝光率 α 增加演化博弈模型最终的 ESS 可能为(0,1,0), (1,1,0), (1,1,1), (0,1,1)和(1,0,1), 而(0,0,0)和(0,0,1)将演化为不稳定点. 随着社会公众曝光率的提高, 演化博弈出现 ESS 为(0,0,0)的情况逐渐减少, 但是药品质量安全监管可能陷入“违法、曝光、监管和再违法”的震荡状态.

通过以上分析, 可以得出随着社会公众不断的参与药品质量安全监管, 曝光能力不断增强, 可以消除在药品质量监管中存在的医药企业不合规生产、监管部门宽松监管的现象, 减少医药企业和监管部门的共谋, 推动国内药品生产质量的提升. 但是社会公众药品质量安全监管需要满足条件: 社会公众参与的收益高于不参与的收益; 社会公众的曝光率足够高. 否则社会公众参与监管无法起到监管作用, 甚至会引起药品质量安全监管体系的混乱.

3.2 社会公众损失 C 对 ESS 的影响

社会公众损失 C 对社会公众的策略选择有影响. 对社会公众的复制动态方程求一阶偏导可得

$$\frac{\partial S(x, y, z)}{\partial C} = \alpha z(1-x)(1-y)(1-z). \tag{11}$$

根据研究假设 $x \in [0, 1]$, $y \in [0, 1]$ 和 $z \in [0, 1]$, 可得式(16) 为非负. 因此随着社会公众损失 C 的增加, 社会公众选择参与策略的比例不会下降. 社会公众策略选择则与社会公众博弈初始状态有关. 根据 $R_{22} - R_{21}$ 取值的不同划分为三个子图: 图 2(a) 表示监管部门采取不严格监管策略, 图 2(b) 表示监管机构部分采取严格监管策略, 图 2(c) 表示监管部门采取严格监管策略. 随着社会公众损失 C 的增加, 演化博弈模型的 ESS 沿着箭头的方向进行演化. 因此, 其它参数不变, 社会公众损失的增加演化博弈模型最终的 ESS 可能为(0,0,1), (1,0,1), (0,1,1), (1,1,1), (0,1,0)和(1,1,0). 在图 2(a)和图 2(b)中, 监管部门选择不严格监管, 社会公众损失 C 对医药企业的行为无影响, 甚至会让药品质量监管陷入震荡状态. 在图 2(c) 中, 社会公众损失对监管部门和医药企业的策略都无影响.

由此可见, 随着药品质量安全给社会公众带来的损失的增加, 社会公众为了自身的利益会选择参与策略. 但是社会公众损失的增加不会对医药企业决策产生影响, 甚至会引起药品质量监管出现混乱.

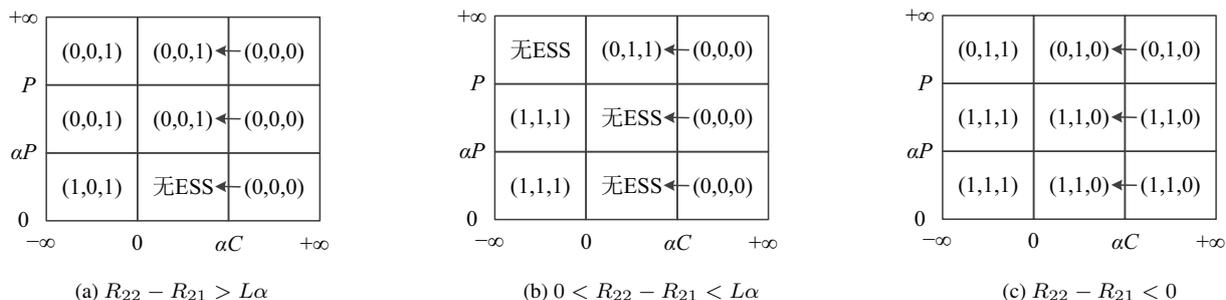


图 2 社会公众损失 C 对 ESS 的影响

Fig. 2 The influence of public cost C on ESS

3.3 监管部门的惩罚力度 P 对 ESS 的影响

监管部门的惩罚力度 P 对医药企业的策略选择有影响. 对医药企业的复制动态方程求一阶偏导可得

$$\frac{\partial E(x, y, z)}{\partial P} = x(1-x)[y + \alpha(1-y)z]. \tag{12}$$

根据研究假设 $x \in [0, 1]$, $y \in [0, 1]$ 和 $z \in [0, 1]$, 可得式(17) 为非负. 因此随着监管机构对医药企业的不法行为惩罚力度 P 的增加, 医药企业选择合规生产的比例不会下降. 与 3.1 节中相同, 根据社会公众的不同的参与度划分为三个子图, 如图 3 所示, 箭头表示演化博弈 ESS 的演化方向. 随着惩罚力度 P 的增加, 医药企业选择合规生产策略的比例不断增加, 保持其它参数不变, 演化博弈模型最终的 ESS 可能是(1,1,0), (0,0,0), (1,1,1)和(1,0,1). 演化均衡解(0,0,1) 随着惩罚力度 P 的增大而变为不稳定状态. 监管部门的惩罚对医药企业的策略选择有着很大的影响, 监管部门惩罚力度的增大, 越来越多的医药企业会选择合规生产作为其最优策略. 监管部门的惩罚力度需要足够大, 才能避免药品质量安全监管陷入震荡状态.

3.4 上级部门问责力度 L 对 ESS 的影响

上级部门问责力度 L 对政府监管部门的策略选择有影响. 对监管部门的复制动态方程求一阶偏导可得

$$\frac{\partial G(x, y, z)}{\partial L} = \alpha y z(1-x)(1-y). \tag{13}$$

根据研究假设 $x \in [0, 1]$, $y \in [0, 1]$ 和 $z \in [0, 1]$, 可得式(18) 为非负. 因此随着上级部门问责力度的加大, 监管部门选择严格监管的比例不会下降. 与 3.1 节中相同, 根据社会公众的不同的参与度划分为三个子图,

如图 4 所示, 箭头表示演化博弈 ESS 的演化方向. 随着上级部门问责力度的增加, 演化博弈模型最终的 ESS 可能为可能是(0,1,0), (1,1,0), (0,0,0), (1,1,1)和(1,0,1). 演化均衡解(0,0,1) 随着问责力度 L 的增大可能变为不稳定状态.

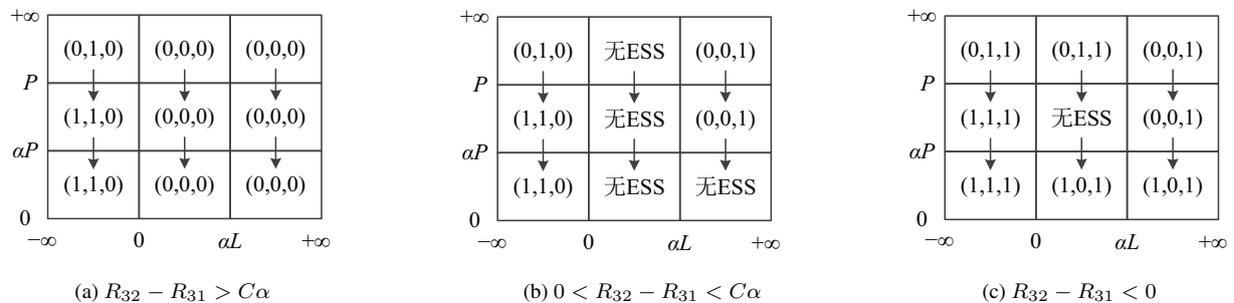


图 3 监管部门的惩罚力度 P 对 ESS 的影响

Fig. 3 The influence of punishment P of regulator on ESS

在社会公众参与时, 上级部门问责力度对监管部门的行为有较强的约束力, 促使监管部门选择严格监管. 但是在社会公众不参与的情况下, 问责力度对演化均衡没有影响, 甚至会导致药品质量监管的混乱, 如图 4(a) 和图 4(b) 所示. 这种现象的出现是由于没有第三方监管力量社会公众的曝光, 监管部门往往可以通过与医药企业的共谋, 掩盖事情的真相, 规避上级部门的问责.

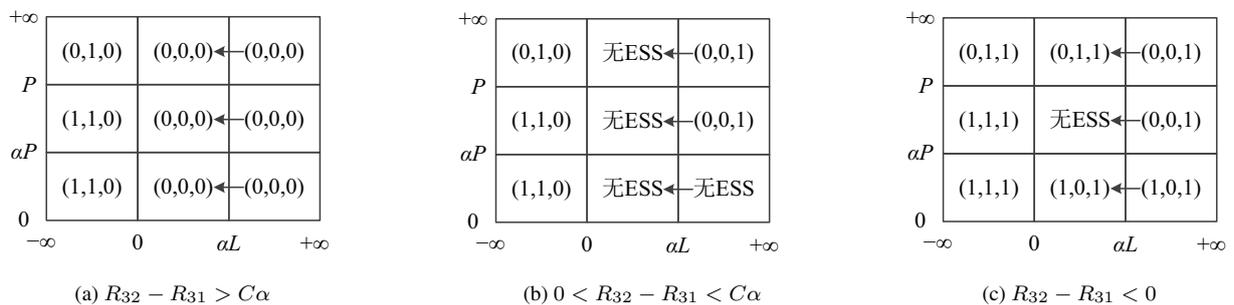


图 4 上级部门问责力度 L 对 ESS 的影响

Fig. 4 The influence of accountability L of superior government on ESS

4 数值模拟分析

长生生物是国内知名的疫苗生产企业, 主要经营人用疫苗产品的研发、生产和销售. 在 2018 年 7 月, 该公司员工向国家药品监督管理局举报长生生物的不合规生产行为. 到 7 月 21 日, 《疫苗之王》文章在网络媒体广泛传播, 疫苗造假问题引发全社会强烈关注, 围绕长生生物的造假疫苗流向、造假疫苗产生的社会危害成为舆情焦点. 监管机构的调查和取证表明长生生物存在长期的不合规生产行为, 严重违反药品生产质量管理规范和国家药品标准的相关规定. 最终, 政府相关人员被严厉问责, 长生生物被吊销《药品生产许可证》, 并处以没收违法所得和罚款 91 亿元等处罚^[31].

根据以上分析, 长生生物长期以来选择不合规生产, 获取超额利润. 监管部门为了促进地方经济发展和就业, 对长生生物采取不严格监管策略, 未根据 GMP 的要求对生产流程、原材料进行严格检查, 仅在抽检不合格时采取没收违法所得、罚款等措施. 根据相关资料, 长生生物在 2017 年营业收入为 15.3 亿元, 净利润为 5.7 亿元. 该公司销售利润率为 85%, 行业平均销售利润为 25%, 因此可以推算长生生物合规生产利润为 1.9 亿元. 在过去很长时间里, 医药企业选择不合规生产, 监管部门选择不严格监管, 社会公众由于投诉渠

道受限, 容易受到医药企业的报复, 对药品质量安全事件曝光率较低. 实证研究初始参数设置为 $R_{11} = 1.9$, $R_{12} = 5.7$, $R_{21} = 2$, $R_{22} = 4$, $R_{31} = 1$, $R_{32} = 3$, $P = 8$, $L = 6$, $C = 6$, $\alpha = 0.2$. 本文使用 MATLAB 2018b 进行仿真, 分析社会公众的曝光率 α 、社会公众损失 C 、监管机构惩罚力度 P 、上级部门问责力度 L 对长生疫苗中医药企业、监管部门和社会公众博弈均衡的影响.

4.1 社会公众、医药企业与监管部门动态演化过程仿真分析

根据前文分析, 在药品质量安全监管中, 社会公众、医药企业和监管部门博弈的均衡点由博弈主体的净收益决定. 为了对社会公众、医药企业和监管部门的动态演化过程进行分析, 设置仿真参数 $R_{21} = 3$, $R_{22} = 2$, $R_{31} = 2$, $R_{32} = 1$, 其余参数与初始参数设置相同, 满足 2.3 节中情形 4 的条件, 演化博弈的均衡点为(1,1,0), 如图 5(a) 所示. 图 5(b) 表明, 仿真初始值医药企业选择合规生产策略比例, 监管部门选择严格监管策略比例和社会公众选择参与比例对演化均衡解无影响.

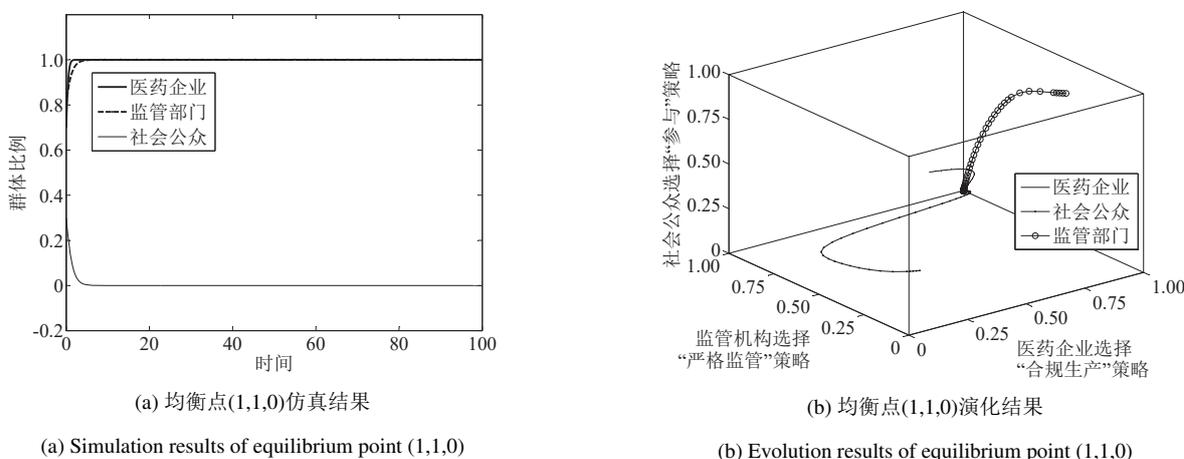


图 5 均衡点(1,1,0) 动态演化分析

Fig. 5 Dynamic evolution analysis of equilibrium point (1,1,0)

4.2 社会公众参与对药品质量安全监管影响仿真分析

由于药品质量监管制度不健全, 地方保护现象普遍存在, 医药企业由于利益的驱使仍然会选择违规生产策略, 社会公众的曝光会对医药企业的违规生产行为起到一定的抑制作用, 但会陷入“违法、曝光、监管、再违法”的震荡状态. 设置 α 值为 0.5, 在公众曝光度 α 不断提高的情况下, 药品质量监管博弈演化如图 6 所示.

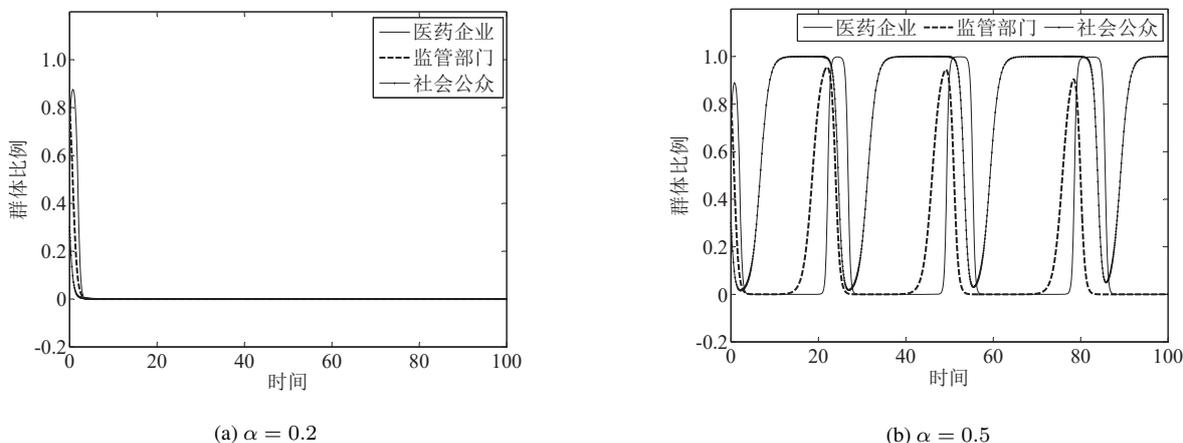


图 6 公众曝光率 α 对药品质量监管均衡影响

Fig. 6 The influence of public exposure α on drug regulation

社会公众的感知损失 C 也对药品质量安全监管博弈均衡有影响. 疫苗质量安全关系公民身心健康, 感知损失非常大. 因此, 在本文初始参数设置的基础上, 分别设置 C 为 15 和 50, 如图 7 所示. 社会公众感知损失的增加, 无法使得处于震荡状态的药品质量监管趋于均衡, 验证了 3.2 节中的分析结果. 但是社会公众损失增加会驱使公众以更加积极的态度参与药品质量问题曝光, 医药企业选择不合规生产的比例会逐渐降低.

4.3 惩罚力度对药品质量安全监管影响仿真分析

监管部门的惩罚力度 P 是监管部门对医药企业的不合规生产的容忍程度, 会增加医药企业不合规生产的成本. 当惩罚力度足够高时, 医药企业选择不合规生产策略无利可图. 研究在本文初始参数设置的基础上, 分别设置监管机构的惩罚力度 P 为 20 和 91, 仿真结果如图 8 所示. 随着监管部门的惩罚力度的增强, 药品质量安全监管由震荡状态逐步达到平衡, 医药企业选择合规生产策略, 监管部门选择不严格监管策略.

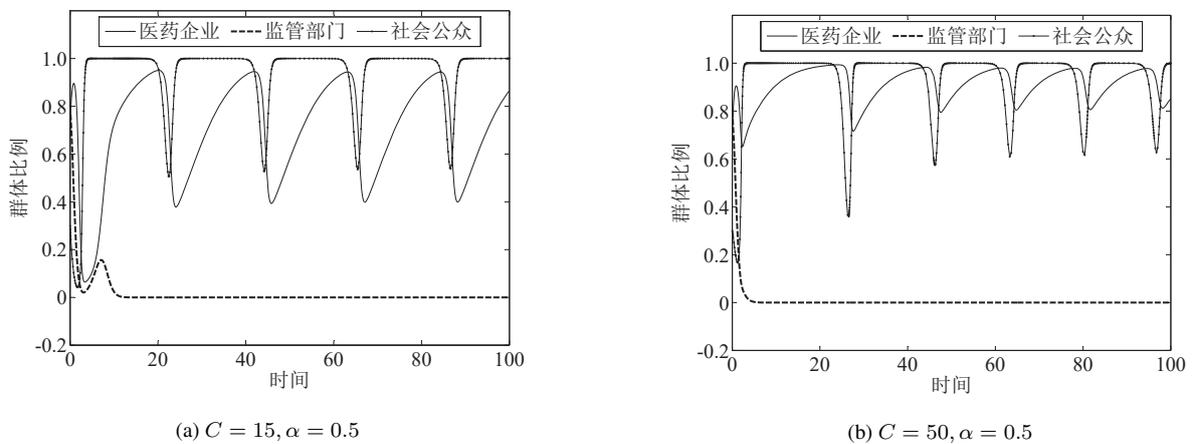


图 7 社会公众损失 C 对药品监管均衡影响

Fig. 7 The influence of the public cost C on drug regulation

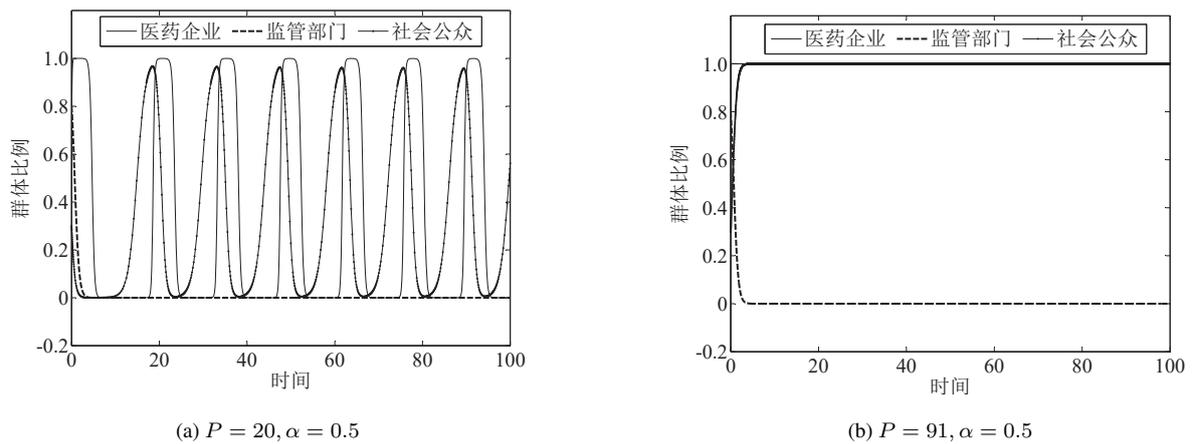
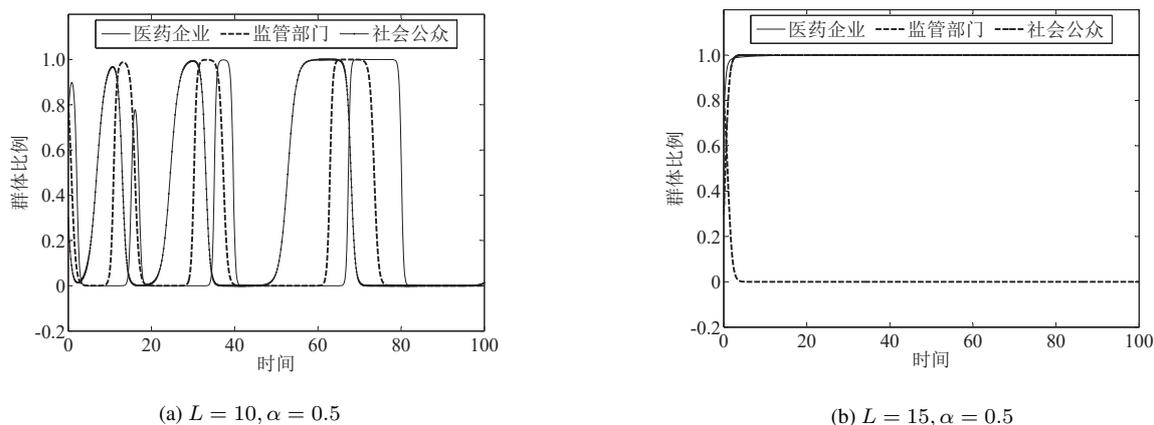


图 8 监管部门惩罚力度 P 对药品监管均衡的影响

Fig. 8 The influence of Regulation punishment P on drug regulation

4.4 问责力度对药品质量安全监管影响仿真分析

上级部门问责力度 L 会影响监管部门的收益水平, 对监管部门的策略选择产生直接影响. 研究在本文初始参数设置的基础上, 设置上级部门问责力度 L 为 10 和 15, 仿真结果如图 9 所示. 随着上级部门加大问责力度, 药品质量安全监管博弈将达到均衡, 医药企业选择合规生产策略. 问责力度虽然可以促使监管部门的严格监管, 但是监管部门根据其收益净收益进行策略选择. 如果医药企业选择合规生产, 监管部门虽然面对巨大的问责压力, 但是仍会选择不严格监管策略.

图9 上级部门问责力度 L 对药品监管均衡的影响Fig. 9 The influence of accountability L on drug regulation

5 结束语

本文基于演化博弈理论建立社会公众、医药企业和监管部门的三方博弈模型, 分析了不同博弈主体的策略选择与影响要素, 探讨了模型参数对演化博弈 ESS 演化路径的影响. 本文的分析表明: 社会公众曝光率、社会公众损失、监管部门的惩罚力度、上级部门的问责力度都会对社会公众、医药企业和监管部门的行 为产生影响; 社会公众可以作为监管部门监管的补充, 对医药企业的不合法行为产生威慑, 减少医药企业和 监管部门的共谋行为; 合理的监管机制设计可以引导医药企业选择合规生产策略, 监管部门选择严格监管 策略, 否则会出现监管部门、社会公众和医药企业陷入“违法、曝光、再违法”恶性循环.

参考文献:

- [1] 聂辉华, 李金波. 政企合谋与经济发展. 经济学(季刊), 2007(1): 75–90.
Nie H H, Li J B. Collusions between governments and firms and economic development. China Economic Quarterly, 2007(1): 75–90. (in Chinese)
- [2] 全世文, 曾寅初. 我国食品安全监管者的信息瞒报与合谋现象分析: 基于委托代理模型的解释与实践验证. 管理评论, 2016, 28(2): 210–218.
Quan S W, Zeng Y C. Informaiton concealing and conspiring problems of food safety regulators in China: Interpretation based on principal-agent model and its practical verification. Management Review, 2016, 28(2): 210–218. (in Chinese)
- [3] Sandholm W H. Population Games and Evolutionary Dynamics. Cambridge: MIT Press, 2010.
- [4] 刘德海, 陈静锋. 环境群体性事件“信息–权利”协同演化的仿真分析. 系统工程理论与实践, 2014, 34(12): 3157–3166.
Liu D H, Chen J F. Information-right co-evolutionary simulation analysis of mass emergency derived from enviromental pollution. Systems Engineering: Theory and Practice, 2014, 34(12): 3157–3166. (in Chinese)
- [5] 罗 珺, 王帅斌, 赵永乐. 公众媒体参与下食品安全监管策略演化研究. 南京工业大学学报(社会科学版), 2018, 17(4): 88–96.
Luo J, Wang S B, Zhao Y L. Research on evolution of food safety supervision strategy under the public media participation. Journal of Nanjing Tech University (Social Science Edition), 2018, 17(4): 88–96. (in Chinese)
- [6] 周 辉, 陈淑凌, 崔亚梅. 基于演化博弈的旅游市场监管机制研究. 系统工程学报, 2016, 31(5): 618–624.
Zhou H, Chen S L, Cui Y M. Study of supervision mechanism of tourism market based on evolutionary game model. Journal of Systems Engineering, 2016, 31(5): 618–624. (in Chinese)
- [7] 柴瑞瑞, 刘德海, 陈静锋. 环境群体性事件“策略–结构”协同演化的仿真分析. 系统工程学报, 2019, 34(5): 577–586.
Chai R R, Liu D H, Chen J F. Strategy-structure co-evolutionary simulation analysis of mass emergency derived from environmental pollution. Journal of Systems Engineering, 2019, 34(5): 577–586. (in Chinese)

- [8] 王治莹, 李勇建. 货车事故中哄抢现象发生机制及其演化规律. 系统工程学报, 2017, 32(1): 19–29.
Wang Z Y, Li Y J. Occurrence mechanism and evolution law of group-scrambling phenomenon in truck accidents. Journal of Systems Engineering, 2017, 32(1): 19–29. (in Chinese)
- [9] 徐建中, 朱晓亚, 贯君. 基于演化博弈的制造企业研发团队知识转移网络演化. 系统工程学报, 2018, 33(2): 145–156.
Xu J Z, Zhu X Y, Guan J. Evolution of knowledge transfer network of R&D team in manufacturing enterprises based on evolutionary game theory. Journal of Systems Engineering, 2018, 33(2): 145–156. (in Chinese)
- [10] 杨世民. 药事管理学. 第6版. 北京: 人民卫生出版社, 2016.
Yang S M. Pharmacy Administration. 6th Edition. Beijing: People's Medical Publishing House, 2016. (in Chinese)
- [11] 浦徐进, 吴亚, 路璐, 等. 企业生产行为和官员监管行为的演化博弈模型及仿真分析. 中国管理科学, 2013, 21(S1): 390–396.
Pu X J, Wu Y, Lu L, et al. The analysis of evolution game model and simulation between the productive behavior of the firms and supervision of the officials. Chinese Journal of Management Science, 2013, 21(S1): 390–396. (in Chinese)
- [12] 牛亮云, 吴林海. 政府与食品生产企业的合谋监管博弈. 华南农业大学学报(社会科学版), 2018, 17(2): 107–117.
Niu L Y, Wu L H. Regulation game of collusion between government and food production enterprises. Journal of South China Agricultural University(Social Science Edition), 2018, 17(2): 107–117. (in Chinese)
- [13] 张雪, 张维维, 谢明. 基于博弈论分析中药饮片质量监管策略. 中国药房, 2017, 28(7): 872–877.
Zhang X, Zhang W W, Xie M. Game theory-based strategies for quality supervision over Chinese herbal pieces. China Pharmacy, 2017, 28(7): 872–877. (in Chinese)
- [14] 谢康, 刘意. 中国药品安全社会共治的制度分析与安排. 产业经济评论, 2017(3): 5–14.
Xie K, Liu Y. The institutional analysis and institution arrangement of drug safety social co-governance in China. Review of Industrial Economics, 2017(3): 5–14. (in Chinese)
- [15] 周开国, 杨海生, 伍颖华. 食品安全监督机制研究: 媒体、资本市场与政府协同治理. 经济研究, 2016, 51(9): 58–72.
Zhou K G, Yang H S, Wu Y H. Research on collaborative food safety governance involving media, capital market and government. Economic Research Journal, 2016, 51(9): 58–72. (in Chinese)
- [16] 张曼, 喻志军, 郑风田. 媒体偏见还是媒体监管: 中国现行体制下媒体对食品安全监管作用机制分析. 经济与管理研究, 2015, 36(11): 106–114.
Zhang M, Yu Z J, Zheng F T. Governance or bias: Media effect on food safety management in current Chinese political institution. Research on Economics and Management, 2015, 36(11): 106–114. (in Chinese)
- [17] 万晓榆, 龙宇, 蒋婷. 公众参与、政府监管与移动应用安全治理动态演化研究. 运筹与管理, 2018, 27(11): 50–60.
Wan X Y, Long Y, Jiang T. Public participation, government regulation and the dynamic evolution research into mobile application security management. Operations Research and Management Science, 2018, 27(11): 50–60. (in Chinese)
- [18] 赵黎明, 陈妍庆. 环境规制、公众参与和企业环境行为: 基于演化博弈和省级面板数据的实证分析. 系统工程, 2018, 36(7): 55–65.
Zhao L M, Chen Y Q. Environmental regulation, public participation and enterprises' environmental behaviour: Based on tripartite evolutionary game and empirical research of provincial panel data. Systems Engineering, 2018, 36(7): 55–65. (in Chinese)
- [19] 陆如霞, 王卓甫, 丁继勇. 公众参与下环保PPP项目运营监管演化博弈分析. 科技管理研究, 2019, 39(6): 184–191.
Lu R X, Wang Z F, Ding J Y. Evolutionary game analysis of environmental protection PPP project's operation supervision with public participation. Science and Technology Management Research, 2019, 39(6): 184–191. (in Chinese)
- [20] 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)
- [21] 董作军, 钟元华, 沈黎新, 等. 我国药品GMP监管体系存在问题的研究及思考. 中国现代应用药学, 2017, 34(7): 1049–1052.
Dong Z J, Zhong Y H, Shen L X, et al. Research on drug GMP supervision system of China and recommendations. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2017, 34(7): 1049–1052. (in Chinese)
- [22] 胡颖廉. 监管和市场: 我国药品安全的现状、挑战及对策. 中国卫生政策研究, 2013, 6(7): 38–44.
Hu Y L. Regulation and the market of drug safety in China: Current status, challenges and policies. Chinese Journal of Health Policy, 2013, 6(7): 38–44. (in Chinese)

- [23] 梁晨. 对转型时期我国药品监管体制的宏观思考. 中国卫生政策研究, 2015, 8(4): 18–23.
Liang C. Macroscopic reflections on China's drug supervision system in transition. Chinese Journal of Health Policy, 2015, 8(4): 18–23. (in Chinese)
- [24] 郁建兴, 朱心怡, 高翔. 政府职能转变与市场监管治理体系构建的共同演进逻辑: 基于疫苗监管治理体系及应对危机事件的案例研究. 管理世界, 2020, 36(2): 7–16.
Yu J X, Zhu X Y, Gao X. The common evolutionary logic of the transformation of government functions and the construction of market regulatory governance system: A case study based on the vaccine regulatory governance system and the response to crisis events. Management World, 2020, 36(2): 7–16. (in Chinese)
- [25] 黄冬娅. 企业家如何影响地方政策过程: 基于国家中心的案例分析和类型建构. 社会学研究, 2013, 28(5): 172–196.
Huang D Y. How do entrepreneurs influence the local policy process: A case study and typology construction from the state-centered perspective. Sociological Studies, 2013, 28(5): 172–196. (in Chinese)
- [26] 赖诗攀. 权力配置、问责与地方政府食品安全监管履职: 争论与检验. 公共行政评论, 2014, 7(1): 120–142.
Lai S P. Power allocation, accountability and local government food safety regulation: Debate and empirical test. Journal of Public Administration, 2014, 7(1): 120–142. (in Chinese)
- [27] Weibull J W. Evolutionary Game Theory. Cambridge: MIT Press, 1997.
- [28] Hirsch M W, Smale S, Devaney R L. Differential Equations, Dynamical Systems, and an Introduction to Chaos. New York: Academic Press, 2012.
- [29] Friedman D. Evolutionary games in economics. Econometrica, 1991, 59(3): 637–666.
- [30] Gintis H. Game Theory Evolving: A Problem-centered Introduction to Modeling Strategic Behavior. Princeton: Princeton University Press, 2000.
- [31] 赵欣悦, 姜柏生. 长春长生疫苗事件中存在的监管问题及建议措施. 南京医科大学学报(社会科学版), 2019, 19(2): 106–109.
Zhao X Y, Jiang B S. Analysis on the supervision issues and suggestions in the case of Changchun Changsheng vaccine. Journal of Nanjing Medical University (Social Sciences Edition), 2019, 19(2): 106–109. (in Chinese)

作者简介:

闫志华 (1987—), 男, 山西朔州人, 博士生, 研究方向: 数据挖掘与决策支持, 博弈论, Email: zhyan@amss.ac.cn;

唐锡晋 (1967—), 女, 江苏无锡人, 博士, 研究员, 研究方向: 系统集成, 决策支持和知识科学, Email: xjtang@iss.ac.cn.