

焦萍,张帅,赵小曼.基于第三方的政府与道路运输企业安全监管演化博弈[J].长安大学学报:自然科学版,2021,41(3):106-115.
JIAO Ping,ZHANG Shuai,ZHAO Xiao-man.Evolutionary game of safety supervision between government and road transport enterprises
based on third-party[J].Journal of Chang'an University:Natural Science Edition,2021,41(3):106-115.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2021.03.011

基于第三方的政府与道路运输 企业安全监管演化博弈

焦萍¹,张帅²,赵小曼³

(1. 西安航空学院 经济管理学院,陕西 西安 710077; 2. 南开大学 经济学院,天津 300071;
3. 西安交通大学城市学院 经济系,陕西 西安 710018)

摘要:为探析第三方安全监管下政府和道路运输企业的行为策略演化规律,解决道路运输存在的安全监管不足问题。借鉴演化博弈理论,将政府监管成本及收益、道路运输企业成本及利润、政府奖惩额度、企业违规操作程度、政府及道路运输企业交通事故损失作为两者行为策略选择的影响因素,构建了包含第三方安全监管机构和奖惩机制的政府安全监管及道路运输企业安全生产的演化博弈模型。利用复制动态方程、雅克比矩阵推导了政府和道路运输企业博弈过程中的局部均衡点,并对其进行了稳定性分析。在不同的参数设定下,采用 MATLAB 软件对长期稳定均衡点进行数值仿真模拟,获得了道路运输企业疏于安全生产和安全生产 2 种情景下,政府和道路运输企业行为选择的长期演变规律。并通过微分方程探究了奖惩额度和第三方安全监管机构对道路运输企业行为选择的影响。研究表明:在道路运输企业疏于安全生产时,政府存在着监管和不监管 2 种长期稳定策略;在道路运输企业安全生产时,监管是政府唯一的长期稳定策略;政府对道路运输企业的奖惩力度越大,其越倾向于采取安全生产的行为策略,但奖惩机制的效果受到了第三方安全监管机构的间接影响;第三方安全监管机构能够通过影响安全生产成本对道路运输企业安全生产的概率产生复杂的影响;同时,其也会降低道路运输企业的交通事故损失额,使其倾向于选择疏于安全生产策略;第三方安全监管机构的监管能力越强,越能披露更多的违规操作,进而促使道路运输企业选择安全生产策略。

关键词:交通工程;道路运输安全监管;演化博弈模型;第三方安全监管

中图分类号:U492.85 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-8879(2020)03-0106-10

Evolutionary game of safety supervision between government and road transport enterprises based on third-party

JIAO Ping¹, ZHANG Shuai², ZHAO Xiao-man³

(1. School of Economics and Management, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, Shaanxi, China;
2. School of Economics, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3. Department of Economics,
Xi'an Jiaotong University City College, Xi'an 710018, Shaanxi, China)

收稿日期:2020-11-30

基金项目:陕西省社会科学基金项目(2019D027)

作者简介:焦萍(1980-),女,山东潍坊人,工学博士,E-mail:1054132960@qq.com.

通讯作者:张帅(1992-),男,陕西宜川人,经济学博士研究生,E-mail:cd_zhangshuai@163.com.

Abstract: To analyze the evolution of the behavior strategies of government and road transport enterprises under third-party safety supervision, and to solve the problem of insufficient safety supervision in road transport, the government supervision costs and benefits, road transport enterprises costs and profits, government rewards and penalties, the degree of violations by enterprises, and traffic accident losses of government and road transportation enterprises were regarded as the influencing factors of behavior strategies for government and road transportation enterprises. Using the theory of evolutionary game, an evolution game model of government safety supervision and safety production of road transportation enterprises considering the third-party safety supervision and reward and punishment mechanisms were established. The local equilibrium point between the government and road transportation enterprises was derived by employing replicated dynamic equation and Jacobian matrix method, and its stability was also analyzed. Under different parameter settings, the MATLAB software was used to simulate the long-term stable equilibrium point. At the same time, the long-term evolution law of the behavior choices of the government and road transportation enterprises was obtained under the scenario of road transport neglecting safety and safety in production. And through differential equations, the influence of reward and punishment and third-party safety supervision on the behavior choices of road transport enterprises were discussed. The results show that when road transport enterprises neglect the safety in production, the government has two long-term stable strategies, supervised and unsupervised. If road transport enterprises are producing safety, supervision is the only long-term stable strategy for government. The stronger the reward and punishment, the more they tend to adopt the behavior strategy of safety production, but the effect of the reward and punishment mechanism is indirectly affected by the third-party safety supervision agency. The third-party safety supervision agency can influence the probability that road transport enterprises produce safety by affecting their safety production costs, but the effect is complex. Third-party supervision will also reduce the amount of road accident losses of road transportation enterprises, and then makes them tend to choose to neglected safety production strategy. The stronger the supervision capacity of the third-party, the more illegal operations it can expose, which in turn can prompt road transport enterprises to choose safety production strategy. 2 tabs, 3 figs, 28 refs.

Key words: traffic engineering; road transportation safety supervision; evolutionary game model; third-party safety supervision

0 引言

目前,随着城镇化、机动化水平的快速提升,交通安全问题接踵而至,并已经上升为全球性的灾难和世界性难题,其中道路运输是最易发生交通事故的方式^[1]。据世界卫生组织《2018年全球道路安全现状报告》统计数据,全球范围内每年约有135万人因道路交通事故死亡,另外有高达5000万人受伤^[2]。近些年,虽然中国道路运输交通事故起数、死亡及受伤人数均在下降,但其依旧位于较高的水平,交通安全问题依然突出^[3]。道路运输安全监管被认为是道路交通风险预防的重要手段,在遏制交通事故、降低事故发生率方面具有重要的

作用。交通运输管理部门也逐渐开始重视安全监管问题,并分别出台了《道路运输车辆动态监督管理办法(交通运输部2014年第5号)》和《公路水路行业安全生产风险管理暂行办法(交安监发[2017]60号)》,以期强化道路运输的安全生产监督,降低交通事故风险。但由于道路运输企业动态监督成本较大、奖惩机制缺乏等原因,安全监管不足的现象依然普遍存在,且已经成为导致道路运输交通事故频繁发生的重要原因之一。为解决道路运输企业动态监督成本较大、监管绩效不足等问题,近些年,第三方安全监管机构或平台的创新模式受到了政府和学术界的广泛关注,且已经在上海、深圳等地区实施。对此,有必要推演第三方监管机构模式下政府与道路

运输企业的博弈关系及其策略选择路径,挖掘第三方监管机构对均衡结果的影响,探究约束道路运输企业违规行为的有效路径,以期对道路运输安全监管奖惩机制和第三方监管模式的完善提供参考。

国内外众多学者在道路运输安全监管方面做了深入的研究。①道路安全监管体系现状、问题及改进措施的研究。Dong等从价值观、法规、执行力、目标和绩效评价5个角度对中国道路运输监管体系所包含的问题进行了定性说明,并借鉴美国的经验,提出了提升中国道路运输现代化监管能力的路径^[4]。Liu等基于故障树分析方法,定性研究了道路交通安全监管体系的薄弱环节,以及不同因素对道路交通安全监管的影响程度^[5]。东炜对山东省危险货物运输安全监管的现状、问题进行梳理分析,并从加强文化建设和强化信息管理等方面提出了改进意见^[6]。周菊通过梳理对比中国与美国道路安全监管体制、监管规则的差异性,对中国道路运输安全监管体系的改善提出了启示^[7]。耿丹阳对中国危险货物道路运输的监管现状及主要问题进行了阐述,并从法律法规、管理体系等多方面提出了提升监管的建议^[8]。②从交通运输事故的角度研究安全监管的作用。Zhang等基于1985~2014年中国28个省份396起道路交通事故数据,利用系统分析法对道路交通事故的原因进行了分析探讨,发现监管不足是事故发生的主要原因之一^[3]。Saccomanno等也指出加拿大危化品运输安全事故的发生需要以继续加强监管来遏制^[9]。③随着大数据、互联网等技术的兴起,部分研究开始针对物联网等信息技术或第三方平台在道路安全监控中的应用技术、框架搭建等方面开展研究。Mikulski分析了远程信息技术在道路安全监管中应用的可行性^[10]。Krivda介绍了利用视频监控道路冲突、区分潜在事故发生原因并进行排除的可能性^[11]。Nian等指出传统的动态监控存在不足,并提出了基于全球定位系统/北斗技术的第三方商用车监管体系,对策略实施前后的事故数量、安全水平指标进行了对比分析评价,发现该模式提升了地区交通安全水平^[12]。Li等论述了智能卡(IC卡)道路运输电子证书在客运站监管、危险品运输管理等多方面的应用实例,发现其对于提高道路运输行业监管能力和服务质量具有重要作用^[13]。刘晓曼等综述了车联网安全监管的国内外现状、标准以及相关策略^[14]。周辉等设计并探讨了基于网络地理信息

系统、车载移动视频、数字信号处理等技术的车辆动态监控系统框架^[15-17]。刘恒认为第三方能够降低政府部门的监管难度,有效提升交通部门的监管能力及效率^[18]。

综上所述,以往的研究偏重于定性评价道路安全监管体系并探讨其发展优化策略,部分学者针对第三方监管机构在道路运输安全监管中的应用进行了探讨,且主要集中在其作用及技术框架层面。但是,一方面,根据经济学原理和博弈论,系统中的参与者具有不同的目的和行为准则,因而各参与者行为策略的选择存在博弈关系,而以往的文献鲜有针对第三方安全监管模式下政府和道路运输企业的行为策略选择,以及第三方安全监管机构对道路运输企业安全生产行为影响的研究;另一方面,奖惩机制是规范道路运输企业安全生产的主要方式之一,但在实践中尚未建立与道路运输企业安全状况相关的完善安全奖惩机制,且鲜有关于奖惩机制对政府和道路运输企业行为策略演化影响的报道。

本文基于演化博弈理论,构建了考虑第三方安全监管机构及奖惩机制的政府与道路运输企业行为策略选择的演化博弈模型,对政府和道路运输企业的行为策略选择均衡点、稳定策略点进行了仿真模拟,并分析了奖惩力度及第三方对道路运输企业安全生产策略选择的影响。

1 基于第三方的演化博弈模型构建

1.1 基本假设

演化博弈是博弈论和动态演化分析结合起来的一种理论^[19],其认为短期内有限理性的博弈参与者无法获取全部的信息来准确判定自身在博弈中的状态,但在长期的行为策略博弈后,各参与者将达到一种稳态^[20]。相对于传统的博弈模型,该理论更贴合实际,并且可以考察博弈参与者的长期策略演变过程,因而在众多的领域中得到了广泛的应用,如食品安全风险^[21]、重大突发公共卫生事件^[22]、航空物流基础设施建设奖惩机制设计^[23]、高铁快运物流基地经营模式选择^[24]、民航安全监管^[25]、机场运行安全监管^[26]等。在考虑第三方安全监管机构的模式下,道路运输安全监管的模型包含2个有限理性的博弈方:政府和道路运输企业,分别记为g和d,前者是以社会福利最优化为目标,而后者以实现利润最大化为目标,并以此来选择策略。假定双方分别具有2种策略,即政府可以选择监管和不监管,道路运输企业可以选择安全生产和疏于安全生产,并且分别

将政府和道路运输企业2种策略的概率记为 x 和 $1-x$,以及 y 和 $1-y$,其中 $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$ 。另外,假设:

(1)如果政府对道路运输企业进行监管,则其成本为 C_g ,收益(如社会声望、政绩等)为 R_g ;此时,道路运输企业的安全生产成本为 C_{d1} 。设定道路运输企业在政府“不监管”下的安全生产成本为 $C_{d2}(s)$,且 $C_{d1} > C_{d2}(s)$,且其正常利润为 R_d ,其中 s 表示道路运输第三方安全监管机构的综合能力。

(2)政府依据第三方安全监管机构的监督结果,对违规的道路运输企业进行处罚。在此,引入违规操作程度 $\gamma(s)$ 来反映企业的违规状况,则政府的处罚对道路运输企业造成的损失为 $\gamma(s)F$,即违规操作的程度越多,政府对道路运输企业的处罚额度越高,其中, $\gamma(s)$ 的取值范围为 $[0,1]$, F 为政府处罚所导致的最大损失额。在处罚中,政府所能获得的经济罚款收益为 $\gamma(s)P$, P 为最大的经济罚款收益。另外,假定在企业安全生产的状况下,企业将获得政府奖励 B 。

(3)为简化分析,假设道路运输企业进行安全生产的交通事故发生率为0。同时假设,在政府不监管情况下,企业疏于安全生产而导致的道路运输事故损失为 $L_{d2}(s)$,此时,政府面临的损失为 $L_{g2}(s)$;在政府监管情况下,政府和企业面临的交通事故损失分别为 $L_{g1}(s)$ 和 $L_{d1}(s)$,且 $L_{g2}(s) > L_{g1}(s)$, $L_{d2}(s) > L_{d1}(s)$ 。需要说明的是,重特大交通事故发生率较低,而一般交通事故发生率较高,但损失较少,因而,企业普遍存在侥幸心理,趋向于选择疏于安全生产策略,也就是说,相对于安全生产策略,企业选择疏于安全生产策略所节约的成本一般大于交通事故发生导致的损失,即 $C_{d1} - C_{d2} > L_{d2}(s)$ 。

在上述假设的基础上,本文根据演化博弈理论,构建得到了基于第三方的政府和道路运输企业的演化博弈支付矩阵,如表1所示。

表1 基于第三方的政府与道路运输企业演化博弈支付矩阵

Tab.1 Evolutionary game payment matrix of government and road transport enterprise based on third-party

主体策略		安全生产(y)	疏于安全生产($1-y$)
政府	监管(x)	$(R_g - C_g - B, R_d + B - C_{d1})$	$(R_g + \gamma(s)P - C_g - L_{g1}(s), R_d - C_{d2} - \gamma(s)F - L_{d1}(s))$
	不监管($1-x$)	$(0, R_d - C_{d1})$	$(-L_{g2}(s), R_d - C_{d2}(s) - L_{d2}(s))$

1.2 演化博弈局部均衡点求解

在政府与道路运输企业的安全监管博弈中,当

各参与者无法选择最优策略时,可以通过复制动态(replicator dynamics)方程来描述策略的选择机制,其反映的是政府或者道路运输企业某一纯策略被采用频数的动态微分方程。根据表1可得政府与道路运输企业的复制动态方程 $G(x)$ 和 $D(y)$ 分别为

$$G(x) = \frac{\partial x}{\partial t} = x(1-x)[R_{g1} + \gamma(s)P - C_g - L_{g1}(s) + L_{g2}(s) + y(-B - \gamma(s)P + L_{g1}(s) - L_{g2}(s))] \quad (1)$$

$$D(y) = \frac{\partial y}{\partial t} = y(1-y)[-C_{d1} + C_{d2}(s) + L_{d2}(s) + x(B + \gamma(s)F + L_{d1}(s) - L_{d2}(s))] \quad (2)$$

式中: t 为时间。

在此基础上构建得到演化系统的复制动态方程组。复制动态方程组反映的是政府与道路运输企业在道路运输安全监管中模拟学习的方向和速度,令 $G(x)$ 和 $D(y)$ 分别等于0,可以求得该系统的4个纯策略均衡点 $E_1(0,0), E_2(0,1), E_3(1,0)$ 和 $E_4(1,1)$,以及该系统的1个混合策略均衡点

$$E_5(a, b)。其中, a = \frac{C_{d1} - C_{d2}(s) - L_{d2}(s)}{B + \gamma(s)F + L_{d1}(s) - L_{d2}(s)}, b = \frac{R_g + \gamma(s)P - C_g - L_{g1}(s) + L_{g2}(s)}{B + \gamma(s)P - L_{g1}(s) + L_{g2}(s)}。$$

2 演化博弈稳定策略 ESS 分析

演化博弈模型的核心在于求解系统的稳定策略(evolutionarily stable strategy, ESS),而上述复制动态方程组求出的局部均衡点并不一定是演化博弈系统的演化稳定策略^[27]。为此,Friedma指出可以通过演化系统的雅克比矩阵来判断局部均衡点的稳定性^[28],其判断的标准为

$$\begin{cases} \det(\mathbf{J}) = F_{11}F_{22} - F_{12}F_{21} > 0 \\ \text{tr}(\mathbf{J}) = F_{11} + F_{22} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: \mathbf{J} 为演化系统的雅克比矩阵; $\det(\mathbf{J}), \text{tr}(\mathbf{J})$ 分别为雅克比矩阵的行列式和迹; F_{11}, F_{12} 分别为复制动态方程 $G(x)$ 对 x 和 y 的偏导数; F_{21}, F_{22} 分别为复制动态方程 $D(y)$ 对 x 和 y 的偏导数。

雅克比矩阵 \mathbf{J} 可具体表示为

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial G(x)}{\partial x} & \frac{\partial G(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial D(y)}{\partial x} & \frac{\partial D(y)}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$F_{11} = (1-2x)[R_{g1} + \gamma(s)P - C_g - L_{g1}(s) + L_{g2}(s) + y(-B - \gamma(s)P + L_{g1}(s) - L_{g2}(s))]$$

$$F_{12} = x(1-x)(-B-\gamma(s)P+L_{g1}(s)-L_{g2}(s))$$

$$F_{21} = y(1-y)(B+\gamma(s)F+L_{d1}(s)-L_{d2}(s))$$

$$F_{22} = (1-2y)[-C_{d1}+C_{d2}(s)+L_{d2}(s)+x(B+\gamma(s)F+L_{d1}(s)-L_{d2}(s))]$$

需要说明的是,混合纳什均衡点 $E_5(a,b)$ 的行列式迹 $\text{tr}(J)$ 为 0,并不满足稳定策略点的要求。在此基础上,本文依据 ESS 判定条件对 $E_1(0,0)$, $E_2(0,1)$, $E_3(1,0)$ 和 $E_4(1,1)$ 四个局部均衡点的稳定状态进行了分析,如表 2 所示。

表 2 局部均衡点的稳定分析

Tab. 2 Stability analysis of local equilibrium points

局部均衡点	(F_{11}, F_{22})	$\det(J)$	$\text{tr}(J)$	稳定状态
$E_1(0,0)$	$(+, -)$	$-$	不确定	鞍点
	$(-, -)$	$+$	$-$	稳定点
$E_2(0,1)$	$(+, +)$	$+$	$+$	不稳定点
	$(-, +)$	$-$	不确定	鞍点
$E_3(1,0)$	$(+, +)$	$+$	$+$	不稳定点
	$(+, -)$	$-$	不确定	鞍点
	$(-, +)$	$+$	不确定	鞍点
	$(-, -)$	$+$	$-$	稳定点
$E_4(1,1)$	$(+, +)$	$+$	$+$	不稳定点
	$(+, -)$	$-$	不确定	鞍点
	$(-, +)$	$+$	$+$	不稳定点
	$(-, -)$	$+$	$-$	稳定点

注: +、- 分别表示相应指标大于 0 和小于 0; 不确定表示 $\text{tr}(J)$ 的正负性未知。

通过表 2 可以发现,基于第三方安全监管机构的政府与道路运输企业的演化博弈过程及稳定策略点受到了多种因素的影响:政府采取监管策略,所得到的收益 R_g ,监管成本 C_g ;道路运输企业的安全生产成本 C_{d1} 、 $C_{d2}(s)$;政府对企业的经济奖励 B 及惩罚 P ;第三方监管得到并通过异议审核的道路运输企业违规违法操作程度 $\gamma(s)$;交通事故所导致的政府与企业损失 $L_{g1}(s)$ 、 $L_{g2}(s)$ 、 $L_{d1}(s)$ 和 $L_{d2}(s)$ 。具体分析如下:

(1)在道路运输企业疏于安全生产策略下,如果政府采取监管策略的收益大于不监管策略的收益,即 $R_g + \gamma(s)P - C_g - L_{g1}(s) > -L_{g2}(s)$,则 $E_1(0,0)$ 为鞍点;同时,若政府采取监管策略,道路运输企业安全生产策略的收益大于疏于安全生产策略的收益,即 $B - C_{d1} > -\gamma(s)F - C_{d2}(s) - L_{d1}(s)$,则 $E_3(1,0)$ 为鞍点,否则 $E_3(1,0)$ 为稳定点。

(2)在道路运输企业疏于安全生产策略下,如果政府采取监管策略的收益小于不监管策略的收益,即 $R_g + \gamma(s)F - C_g - L_{g1}(s) < -L_{g2}(s)$,则 $E_1(0,0)$

为稳定点;同时,如果道路运输企业在政府监管情况下的安全生产策略收益大于疏于安全生产策略收益,则 $E_3(1,0)$ 为不稳定点,否则, $E_3(1,0)$ 为鞍点。

(3)如果在道路运输企业安全生产策略下,政府监管策略的收益为正,即 $R_g - C_g - B > 0$,则 $E_2(0,1)$ 为不稳定点;此时,如果仅第三方进行监管,且道路运输企业安全生产策略收益大于疏于安全生产策略收益,则 $E_4(1,1)$ 为鞍点,否则, $E_4(1,1)$ 为不稳定点。

(4)如果在道路运输企业安全生产策略下,政府监管策略的收益为负,即 $R_g - C_g - B < 0$,则 $E_2(0,1)$ 为鞍点;此时如若政府进行监管,且道路运输企业安全生产获得的收益大于疏于安全生产时,则 $E_4(1,1)$ 为鞍点,否则为不稳定点。

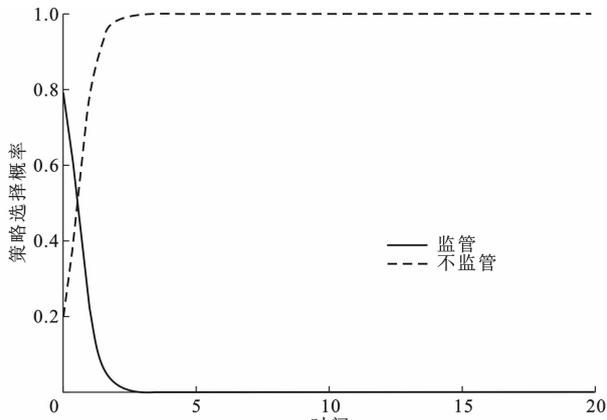
3 策略选择的影响因素分析

3.1 演化博弈系统 ESS 点演化

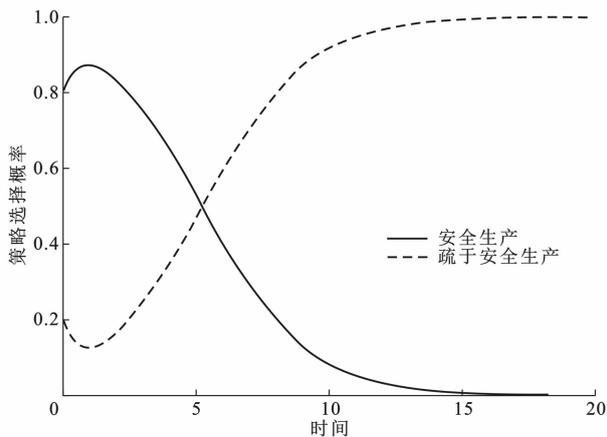
通过上述分析,可以发现该演化博弈的稳定演化策略 ESS 点位于 $E_1(0,0)$ 、 $E_3(1,0)$ 和 $E_4(1,1)$ 点,重特大交通运输事故损失大、发生率低、一般交通运输事故发生率虽大却损失小,使得道路运输企业普遍存在侥幸心理,偏向于选择不进行或者疏于安全生产,此时, $C_{d1} > C_{d2} - L_{d2}(s)$,因而 $E_3(1,0)$ 的局部均衡点并不稳定,是演化博弈中的鞍点或不稳定点。为更深入探讨政府与道路运输企业在第三方监管存在情况下的稳定演化策略形成过程,本文通过设定相关参数,对 3 种演化博弈稳定策略点 ESS 进行了模拟仿真。

(1) $E_1(0,0)$ 为 ESS 点。该点作为演化博弈稳定策略点 ESS 需满足的条件为: $R_g + \gamma(s)P - C_g - L_{g1}(s) < -L_{g2}(s)$,即在道路运输企业疏于安全生产的情况下,政府监管的整体收益小于不监管的整体收益。本文在假定 $R_g = 3$, $R_d = 5$, $C_g = 5$, $C_{d1} = 3$, $C_{d2}(s) = 1.5$, $B = 1$, $P = 10$, $F = 15$, $\gamma(s) = 0.1$, $L_{g1}(s) = 1$, $L_{g2}(s) = 1.5$, $L_{d1}(s) = 0.5$, $L_{d2}(s) = 1$, 初始监管概率 $x_0 = 0.8$ 以及初始安全生产概率 $y_0 = 0.8$ 的前提下,利用 MATLAB 得到图 1 所示的策略选择演化路径。从图 1 可以看出:在此参数设定下,随着时间的推移,政府选择监管策略的概率逐渐降低;而道路运输企业选择疏于安全生产的概率呈现先下降后上升的趋势,最终分别保持在 0 和 1 的稳定状态。同时,道路运输企业调整策略的时期较长,而政府调整策略的时期较短,其原因在于:不监管策略是政府的占优策略,此时无论道路运输企业

采取何种策略,不监管策略下政府的整体收益均最大,因而其会逐渐增加该策略的选择概率;而对于道路运输企业而言,其最优决策实际上是政府监管下的安全生产,此时其整体收益最优,因而道路运输企业会首先选择安全生产策略,但在政府选择监管策略的概率不断上升的情境下,道路运输企业随后将调整其策略,转向疏于安全生产,疏于安全生产策略的概率随之逐渐上升。



(a) 政府策略演化路径



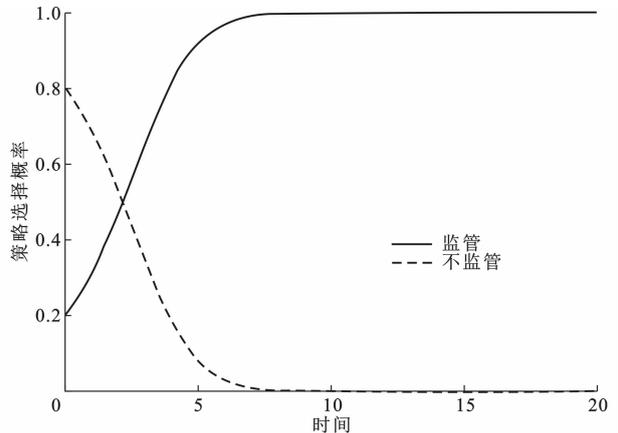
(b) 道路运输企业策略演化路径

图 1 $E_1(0,0)$ 政府与道路运输企业策略演化路径

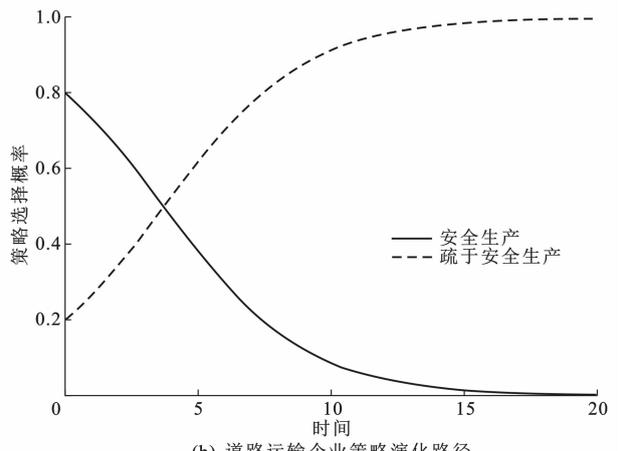
Fig. 1 Government and road transport enterprise strategy evolution paths in $E_1(0,0)$

(2) 当 $R_g + \gamma(s)P - C_g - L_{g1}(s) > -L_{g2}(s)$ 且 $B - C_{d1} < -\gamma(s)F - C_{d2}(s) - L_{d1}(s)$ 时, $E_3(1,0)$ 为 ESS 点。此时,需满足 2 个条件:其一,在道路运输企业疏于安全生产的策略下,政府采取监管策略所获得的收益大于其在不监管策略下的收益;其二,在政府监管道路运输企业的情况下,道路运输企业采取安全生产策略的整体收益小于疏于安全生产策略。本文假定 $R_g = 3, R_d = 5, C_g = 2, C_{d1} = 3, C_{d2} = 1, B = 0.5, P = 3, F = 5, \gamma(s) = 0.1, L_{g1}(s) = 1, L_{g2}(s) = 1.5, L_{d1}(s) = 0.5, L_{d2}(s) = 1.5$, 初始监管

概率 $x_0 = 0.2$ 以及初始安全生产概率 $y_0 = 0.8$, 得到了政府和道路运输企业的演化博弈演变路径,如图 2 所示。从图 2 可以看出,在此参数设定下,由于监管和疏于安全生产分别是政府和道路运输企业的占优策略,因而政府和道路运输企业在演化博弈过程中将逐渐以更大的概率分别趋向于选择监管和疏于安全生产策略。



(a) 政府策略演化路径



(b) 道路运输企业策略演化路径

图 2 $E_3(1,0)$ 政府与道路运输企业策略演化博弈路径

Fig. 2 Government and road transport enterprise strategy evolution paths in $E_3(1,0)$

(3) 当 $R_g - C_g - B > 0$ 且 $B - C_{d1} > -\gamma(s)F - C_{d2}(s) - L_{d1}(s)$ 时, $E_4(1,1)$ 为 ESS 点,此时需满足:在道路运输企业安全生产的前提下,政府监管所得到的社会声望、政绩提升等收益大于进行监管所需的成本及奖励企业安全生产的经济支出之和;同时,道路运输企业在政府监管的前提下,需满足其获得的政府奖励与其进行安全生产的成本之差(即生产收益)小于其疏于安全生产时所面临的政府处罚、有限安全生产的成本以及可能的交通运输事故损失之和。本文假设 $R_g = 5, R_d = 8, C_g = 1.5, C_{d1} = 6.5, C_{d2}(s) = 4, B = 0.5, P = 3, F = 4, \gamma(s) = 0.5$,

$L_{g1}(s)=1, L_{g2}(s)=1.5, L_{d1}(s)=1, L_{d2}(s)=2$, 初始监管概率 $x_0=0.2$ 以及初始安全生产概率 $y_0=0.2$, 对该种状况下政府和道路运输企业的策略选择概率进行了模拟, 其结果如图 3 所示。从图 3 可以看出: 在该参数设置下, 政府选取监管的概率逐渐上升, 且调整时期相对较短、速率较快; 而道路运输企业选取安全生产的概率变动存在一个观望期, 即并未调整初始概率, 在此之后, 其选择安全生产策略的概率逐渐上升, 其原因在于监管策略是政府的占优策略; 而道路运输企业在政府选取监管且自身选择安全生产策略时的整体收益与政府选取不监管且自身选择疏于安全生产策略时相同, 因而道路运输企业并未调整其初始的概率 x_0 。

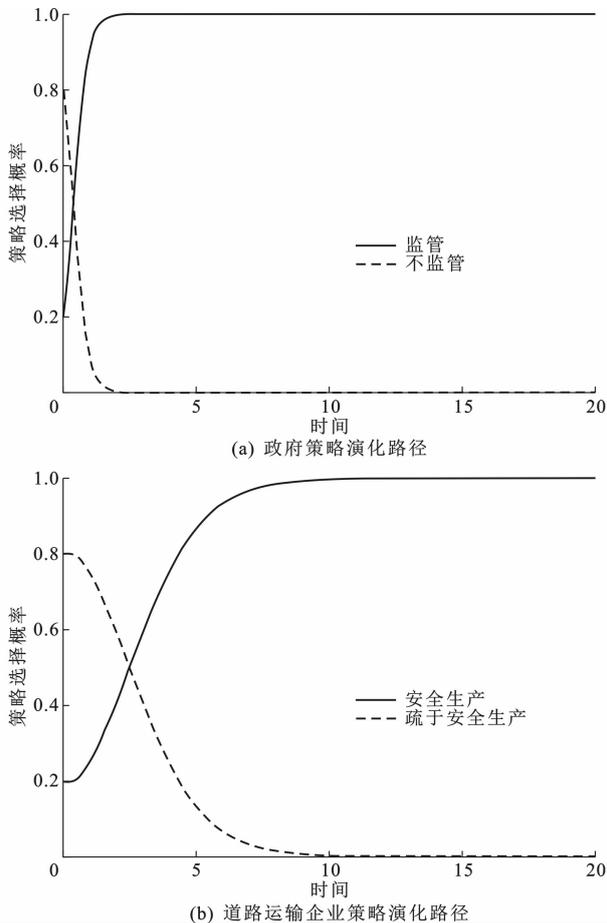


图 3 $E_4(1,1)$ 政府与道路运输企业策略演化路径

Fig. 3 Government and road transport enterprise strategy evolution paths in $E_4(1,1)$

3.2 奖惩机制对道路运输企业演化策略选择的影响分析

为分析政府的奖惩机制对道路运输企业策略选择的影响, 本文对式(2)的 B 和 F 求偏导, 得到

$$\begin{cases} \frac{\partial D(y)}{\partial F} = y(1-y)x\gamma(s) \\ \frac{\partial D(y)}{\partial B} = y(1-y)x \end{cases} \quad (5)$$

由于政府选择监管的概率 x 、道路运输企业选择安全生产的概率 y 以及企业违法违规程度 $\gamma(s)$ 的取值范围均为 $[0, 1]$, 因而式(5)的 $\frac{\partial D(y)}{\partial F} \geq 0$ 且 $\frac{\partial D(y)}{\partial B} \geq 0$, 由此可以说明: ①在政府与道路运输企业的动态演化博弈过程中, 政府的奖励力度(经济奖励、税收优惠和补贴等)越大, 道路运输企业选择疏于安全生产的机会成本越大, 则企业将会以更大的概率选择安全生产策略; 因而, 在实际管理过程中, 政府可以通过奖励力度的调整, 有效推动道路运输企业开展安全生产设施购置、驾驶人安全培训及车辆安全性能监测等安全保障活动, 以确保道路运输运营活动的安全生产; ②政府对道路运输企业的处罚力度(经济及行政处罚)越大, 道路运输企业在政府监管情境下的机会损失越严重, 这将会对企业运营利润产生较大影响, 因而企业选择安全生产的概率越高; ③在政府处罚力度与企业的安全状况挂钩的前提下, 企业安全隐患越严重、数量越多或者整改力度越低, 则其面临的可能损失越大, 这将会促使道路运输企业选择安全生产策略, 此时企业安全状况或违规违法操作程度的衡量及测度至关重要, 而这取决于第三方监管机构的专业知识水平、监管检查力度和数据处理能力等多种因素。基于以上分析, 有理由认为, 道路运输企业在演化博弈过程中, 选择安全生产的概率间接受到了第三方的影响, 即第三方监管能力出众时, 监测发现的企业安全状况将更趋于真实状况, 从而能够有效消除政府与道路运输企业间的信息不对称, 降低道路运输企业安全状况的隐瞒程度, 使得存在安全隐患的道路运输企业以更大的概率进行安全生产。

3.3 第三方对道路运输企业策略选择的影响

为探究第三方对道路运输企业的影响, 本文首先将式(2)进行变换, 得到

$$\frac{\partial y}{\partial t} = D(y) = y(1-y)(-C_{d1} + C_{d2}(s) + L_{d2}(s) + x(B + \gamma(s)F + \Delta L_d)) \quad (6)$$

式中: $\Delta L_d = L_{d1}(s) - L_{d2}(s)$ 。

需要说明的是, 根据本文的假设, $L_{d1}(s)$ 与 $L_{d2}(s)$ 的差异是由政府监管形成的, 而与第三方并无关联, 即 $L_{d1}(s) - L_{d2}(s)$ 并不是 s 的函数。在此基础上, 求解 $D(y)$ 对 s 的偏导, 得到结果如下

$$\frac{\partial D(y)}{\partial s} = y(1-y) \cdot \left(\frac{\partial C_{d2}(s)}{\partial s} + \frac{\partial L_{d2}(s)}{\partial s} + \frac{\partial \gamma_{d2}(s)}{\partial s} xF \right) \quad (7)$$

由式(7)可以发现,第三方对于道路运输企业选择安全生产概率的影响作用路径主要包括三方面。

①第三方对道路运输企业在政府不监管情况下安全生产成本的影响。第三方在监管过程中会将企业存在的安全隐患通告,可能会引起选择性或完全地对隐患问题进行纠正,从而使得在不安全生产策略下,企业的安全生产成本上升;第三方对车辆监控程度的加强,可能会降低道路运输企业在驾驶人监督、车辆安全性能等方面的安全保障成本。因而,综合来看,第三方对道路运输企业安全生产成本的影响呈现复杂特性,并不能准确判断其综合影响方向。

②第三方对不存在政府监管情况下道路运输企业交通事故损失程度的影响,即 $\partial L_{d2}(s)/\partial s$ 。第三方会通过降低道路运输交通事故损失的微观路径,降低道路运输企业选择安全生产的概率,具体分析如下:目前,第三方监控平台承担着公路营运的载客汽车、危险货物运输车辆、半挂牵引车以及重型载货汽车(总质量为12 t及以上的普通货运车辆)的动态监管任务,并在驾驶人出现疲劳驾驶和超速等违规现象时,以语音短信或其他形式通知驾驶人,并定期或即时将违规操作监测结果通告道路运输企业;第三方安全检查服务机构承担着对企业潜在安全隐患的检查,并将安全隐患通告企业,甚至采取现场整改的方式对安全隐患进行处理,同时部分第三方机构也承担着安全生产的教育工作。这些工作在一定程度上能够有效督促驾驶人安全操作、消除道路运输企业的安全隐患,降低道路运输事故发生率及损失。因而,如果第三方综合能力(监管力度和专业能力等)越强,交通运输安全事故损失将会越低,即 $\partial L_{d2}(s)/\partial s < 0$,此时,道路运输企业由交通运输事故所面临的机会成本(损失)下降,将会以更大的概率选择疏于安全生产策略,而以更小的概率选择安全生产策略。

③第三方对企业安全状况或违规违法程度 $\gamma(s)$ 的影响,即 $\partial \gamma(s)/\partial s$ 。一般而言,第三方的专业能力及监管力度越大,监测发现的违规违法行为将会越多,但由于道路运输企业的安全状况既定,因而随着第三方综合能力的提升, $\gamma(s)$ 的增长率呈现下降趋势,并最终趋于0,即 $\partial \gamma(s)/\partial s \geq 0$ 。这说明,第三方综合能力 s 越强,越能够披露道路运输企业的真实安全隐患状态,加重道路运输企业所面临的处

罚力度,使得道路运输企业更倾向于选择安全生产策略。

综上所述,第三方可以通过影响政府不监管下道路运输企业疏于安全生产策略下的安全生产成本 C_{d2} 、交通运输事故损失 L_{d2} 和处罚 $\gamma(s)F$ 三种微观路径对其选择安全生产策略的概率产生影响,但是其综合影响的方向是不确定的。

4 结 语

(1)基于演化博弈理论,构建了包含第三方安全监管机构的政府和道路运输企业安全监管的演化博弈模型,通过模型推导和数据模拟,获得了不同情境下政府安全监管和道路运输企业安全生产的长期稳定策略点,并着重研究了奖惩机制及第三方安全监管机构对道路运输企业行为策略选择概率的影响。

(2)政府不监管且道路运输企业疏于安全生产,政府监管且道路运输企业疏于安全生产,以及政府监管且道路运输企业安全生产均是政府和道路运输企业在博弈过程中可能形成的长期稳定策略均衡点或策略选择组合。

(3)奖惩机制对于提升道路运输企业进行安全生产具有推动作用,即奖惩力度越大,道路运输企业将会以更大的概率进行安全生产。第三方安全监管机构可通过调节交通事故损失额、安全生产成本对道路运输企业的长期稳定策略产生影响。同时,综合能力强、资历深的第三方安全监管机构更能够督促道路运输企业进行安全生产。

(4)本文中的奖励惩戒机制建立在静态的视角下,而动态的奖惩机制可发挥有效的调节作用,同时本文实际上是基于演化理论基础上的推导分析。后续将进一步地纳入动态奖惩机制,采用实际案例数据进行更细化、深入地分析。

参考文献:

References:

- [1] 郭培杰,蒋军成. 模糊综合评价法在危险化学品道路运输风险评价中的应用[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2006, 28(5): 57-62.
GUO Pei-jie, JIANG Jun-cheng. Fuzzy multi-criteria modeling and its application in the risk assessment of hazardous chemical materials road transportation[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2006, 28(5): 57-62.
- [2] World Health Organization. Global status report on road safety 2018[R]. Geneva: World Health Organi-

- zation, 2018.
- [3] ZHANG Y Y, LIU T Z, BAI Q G, et al. New systems-based method to conduct analysis of road traffic accidents[J]. *Transportation Research Part F*, 2018, 54:96-109.
- [4] DONG G, FU Y. Study on the modernization of supervision system and governance ability of the road transportation service industry based on five elements [C]//The Advanced Science and Technology Application Research Center. Proceedings of 2018 International Conference on Computer, Communication and Network Technology. Lancaster: DEStech Publications, Inc., 2018:564-567.
- [5] LIU T, ZHAO T T. Study on fault tree analysis model of road transport safety supervision system and control strategies[C]//IEEE. Proceedings of 2012 International Conference on Modelling, Identification and Control. New York: IEEE, 2012:448-453.
- [6] 东 炜. 山东省道路危险货物运输安全监管问题研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
DONG Wei. Research on safety supervision of road hazardous freight transportation in Shandong Province[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [7] 周 菊. 中、美道路交通安全监管体系比较研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
ZHOU Ju. Comparative research of highway traffic safety regulation system between China and America [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [8] 耿丹阳. 关于危险货物道路运输行业监管现状的研究和对策[J]. *公路*, 2014, 59(6):187-191.
GENG Dan-yang. Research and countermeasures on the status quo of supervision of road transportation industry of dangerous goods[J]. *Highway*, 2014, 59(6):187-191.
- [9] SACCOMANNO F F, CHAN A. Economic evaluation of routing strategies for hazardous road shipments [J]. *Transportation Research Record*, 1985(1020): 12-18.
- [10] MIKULSKI J. Using telematics in transport [C]//CCIS. Proceedings of International Conference on Transport Systems Telematics. Heidelberg: Springer, 2010:175-182.
- [11] KRIVDA V. Use of video-apparatus during monitoring of conflict situations in road traffic on roundabout in the Czech Republic[J]. *Faculty of Transport and Traffic Sciences*, 2013, 25(3):295-303.
- [12] NIAN G Y, LI J P, SUN D, et al. Commercial vehicle dynamic third party safety supervision of based on GPS/Beidou technologies[C]//ZENG X Q, XIE X Y, SUN J, et al. Proceedings International Symposium for Intelligent Transportation and Smart City. Singapore: Springer, 2019:251-264.
- [13] LI W W, GU J Y. Application of IC card license for road transportation in commercial vehicles supervision and service[C]//FIGUEIRE M, GUO Z H. Proceedings of 5th International Conference on Transportation and Traffic Engineering. Les Ulis: EDP Sciences, 2016:1-5.
- [14] 刘晓曼, 于广琛, 陈诗洋. 车联网安全监管策略与标准研究[J]. *信息通信技术与政策*, 2018(8):51-53.
LIU Xiao-man, YU Guang-chen, CHEN Shi-yang. Research on vehicle network security supervision strategy and standards [J]. *Information and Communications Technology and Policy*, 2018(8):51-53.
- [15] 周 辉, 叶 桦, 仰燕兰. 基于 WebGIS 与车载移动视频的智能车辆监控系统[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(增 1):192-197.
ZHOU Hui, YE Hua, YANG Yan-lan. Intelligent vehicle monitoring system based on WebGIS and mobile video [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2010, 40(S1):192-197.
- [16] CAI Y F, WANG H, ZHANG W. Video-based urban expressway traffic measurement and performance monitoring[J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2011, 27(2):164-168.
- [17] 乔鸿海, 薛 静, 徐继伟, 等. 基于 DSP 的车载智能移动报警监控系统设计与实现[J]. *西北工业大学学报*, 2013, 31(2):189-194.
QIAO Hong-hai, XUE Jing, XU Ji-wei, et al. Implementation and design of vehicle movement intelligent monitoring system based on DSP [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2013, 31(2): 189-194.
- [18] 刘 恒. 湖北省道路运输第三方监控平台设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
LIU Heng. Design and implementation of third party monitoring platform in Hubei wheel transport [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [19] 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, 166(8):8-13.
YI Yu-yin, LIU Han-min. Evolutionary game theory in economic research[J]. *Business Economics and Administration*, 2005, 166(8):8-13.
- [20] 谢识予. *经济博弈论*[M]. 四版. 上海: 复旦大学出版社, 2017.

- XIE Zhi-yu. Economic game theory [M]. 4th ed. Shanghai: Fudan University Press, 2017.
- [21] 王冀宁,张宇昊,王雨桐,等. 经济利益驱动下食品企业安全风险演化动态研究[J]. 中国管理科学, 2019, 27(12): 113-126.
- WANG Ji-ning, ZHANG Yu-hao, WANG Yu-tong, et al. Evolutionary dynamics of food safety risk by driven of economic interests[J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27(12): 113-126.
- [22] 刘德海,王维国,孙康. 基于演化博弈的重大突发公共卫生事件情景预测模型与防控措施[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(5): 937-946.
- LIU De-hai, WANG Wei-guo, SUN Kang. Scenario forecasting model and prevention control measurements of important public health event based evolutionary game[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2012, 32(5): 937-946.
- [23] 姜旭,胡雪芹. 基于演化博弈的航空物流基础设施建设奖惩机制设计[J]. 管理评论, 2020, 32(4): 231-241.
- JIANG Xu, HU Xue-qin. Research on the reward and punishment mechanism of aviation logistics infrastructure construction [J]. Management Review, 2020, 32(4): 231-241.
- [24] 王丹竹,周凌云,王强,等. 基于演化博弈的高铁快运物流基地经营模式选择策略研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(3): 24-29, 35.
- WANG Dan-zhu, ZHOU Ling-yun, WANG Qiang, et al. A study on strategy of high-speed railway express logistics center business mode selection based on evolutionary game theory[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(3): 24-29, 35.
- [25] 王文轲,蔡洁,陈曾洁,等. 民航安全监管中的多方演化博弈研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(1): 136-141.
- WANG Wen-ke, CAI Jie, CHEN Zeng-jie, et al. Research on multi-parties evolutionary game in civil aviation safety supervision [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(1): 136-141.
- [26] 文军,孙静,侯明利,等. 基于演化博弈的机场安全运行监管研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(5): 1655-1661.
- WEN Jun, SUN Jing, HOU Ming-li, et al. On the evolutionary game in executing the airport security operation supervision[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(5): 1655-1661.
- [27] 于涛,刘长玉. 政府与第三方在产品质量监管中的演化博弈分析及仿真研究[J]. 中国管理科学, 2016, 24(6): 90-96.
- YU Tao, LIU Chang-yu. The analysis of evolution game model and simulation between governments and the third-party in product quality regulation [J]. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(6): 90-96.
- [28] FRIEDMAN D. Evolutionary game in economics[J]. Econometrics, 1991, 59(3): 637-666.