

航空危险品运输安全监管演化博弈分析

文 军, 马思源, 孙 一, 樊志翔, 陈治明

(中国民用航空飞行学院机场学院, 四川 广汉 618307)

摘要: 为解决航空危险品运输安全问题, 在社会视角下, 构建主体为政府、航空公司和托运人的三方演化博弈模型, 分析不同条件下的策略选择。运用 MATLAB 对重要参数进行数值仿真, 探究处罚金、政府积极监管成本、积极监管成功率、航空公司的违规收益和托运人的管理成本的敏感性变化对系统演化的影响。结果表明, 政府的处罚金和积极监管的成功率对托运人和航空公司是正向激励, 政府应增加处罚金, 才能有效解决航空危险品运输安全问题。

关键词: 航空危险品运输; 社会责任视角; 安全监管; 三方演化博弈; 敏感性分析

中图分类号: [U8] **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)03-0057-08

随着全球经济的不断发展, 企业对危险品运输的需求也越来越强烈。航空危险品的种类和运输量也随着航空业的不断发展壮大呈逐年上升的趋势。但是危险品航空运输的不安全事故也逐渐增加。事故发生的原因从来都是复杂的, 涉及危险品本身的特性、政府部门的监管、安全规章制度、托运人的利益和航空公司的安全管理体系等多方面因素^[1]。

国内外对危险品运输展开了大量的研究。吴海涛和刘月^[2]分析了区块链技术在危险货物道路运输安全监管中的应用价值, 利用了演化博弈法建立由监管方、承运方和托运方构成的三方演化博弈模型, 探究三方演化博弈中相关变量对三方演化策略选择的影响。吴芮函^[3]从法律层面, 为准确有效地规制危险品航空运输违法犯罪行为, 协调统一法律法规中与危险品相关的法律术语, 适当地调整国内惩治非法航空运输危险品行为的法律法规, 降低与非法运输危险品相关罪名的最低起刑点, 并通过司法解释确定运输不同种类危险品的构罪标准, 通过完善刑法规范, 保护人民合法权益的同时, 合法合理地惩戒违法犯罪行为, 为危险品航空安全运输提供有效的保障。王伟等^[4]探讨了公众监督对危险品运输行业监管的影响, 构建一个演化博弈模型

研究了政府和危险品运输企业的演化博弈策略, 发现了公众参与程度和运输收益是影响危险品运输企业策略选择的决定因素。程志友等^[5]针对港口危化品运输管理中存在的安全问题, 采用演化博弈理论, 构建政府监管部门与危化品港口企业间的演化博弈模型, 研究双方在博弈过程中的策略选择, 在建立惩罚机制的基础上考虑双方期望损失对系统均衡的影响, 结合系统动力学模型分析不同参数变化下的演化结果。

在危险品运输过程中, 政府部门既要控制安全监管成本又要同时降低危险品事故发生率。在社会责任的视角下, 社会与企业是不可分割的关系, 企业不仅要关注自身利益, 也要注重履行社会责任^[6]。社会责任视角方面, 张路等^[7]针对由低碳景区和旅行社构成的低碳旅游供应链, 考虑了供应链成员企业社会责任行为对供应链动态均衡的影响, 构建了企业社会责任行为下的低碳旅游供应链微分博弈模型。韩震等^[8]以责任、发展和效益为目标, 构建了基于共享价值创造 (creating shared value, CSV) 理论的研究框架, 依据港口供应链分析, 确定港口运营商、港口物流商、政府的功能定位, 建立两阶段主从博弈, 分析得出政府通过监管成本基数设置, 能够有效控制港口

收稿日期: 2024-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(61179074); 大学生创新创业训练计划(S202310624060)

作者简介: 文军(1968—), 男, 四川成都人, 博士, 教授, 研究方向为航空安全、航空运输规划与管理、航空危险品运输; 马思源(2000—), 女, 新疆巴州人, 硕士研究生, 研究方向为交通运输、航空危险品运输; 孙一(2001—), 男, 河南汝州人, 硕士研究生, 研究方向为交通运输、航空危险品运输; 樊志翔(1997—), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 研究方向为交通运输、航空危险品运输; 陈治明(1999—), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 研究方向为交通运输、航空危险品运输。

物流商的安全状态。政府方面,裴彬^[9]通过阐述航空运输危险品的概念,分析国内危险品航空运输管理现状以及存在的问题,并提出了相应的解决办法及策略。Lee 和 Seo^[10]研究了国内外航空运输危险品的分类、划分和储存规则,发现仁川国际机场航站楼存在的问题和改进点,提出改进先进危险品分类、划分和储存规则的建议。Wang^[11]结合前人关于航空危险品运输的文献,对航空危险品运输和仓储存在的风险进行分析,进而指出相应的管理策略,以降低航空危险品运输安全事故发生的概率。

在研究国内外研究成果中发现,对于危险品运输的研究主要是从法律层面和政府监管层面展开,在港口等其他领域有学者从社会责任视角方向开展研究,但很少有学者在社会责任视角下对航空危险品运输进行研究。因此,本文将政府、航空公司和托运人作为博弈主体,运用演化博弈理论,在社会责任视角下分析各博弈主体的策略选择,为航空安全和危险品管理理论的完善提供建议,以期提高危险品航空运输管理水平,进而促进国内航空运输业更加健康快速地发展。

1 演化博弈模型假设与构建

1.1 模型基本假设

假设 1:政府部门在整个危险品运输过程中对航空公司和托运人进行监管^[12]。

假设 2:政府部门如果采取积极监管策略需要增加机构、人员和设备等投入以防止危险品运输不安全事故的发生,付出的监管成本为 C_1 ,政府会获得形象上的提升声誉收益记为 R_1 发现的概率为 p_1 ,如果选择消极监管则监管成本为 C_2 ,获得的形象上的声誉收益记为 R_2 ,发现的概率为 p_2 ,不同监管级别下违规被发现的概率不同,反映监管严格性的增加;政府监管或者群众监督发现航空公司或者托运人违规操作均需要缴纳处罚金为 F ,在不安全事故发生后政府会面对许多投诉和上访,失去公众的信任,造成公信力受损,政府也需要对事故进行善后,造成的损失记为 M ^[13]。

假设 3:航空公司合规运输,运营成本记为 C_3 ,合规运输时获得的收益为 R_3 ;违规运输时运营成本记为 C_4 ,获得的违规收益为 R_4 ,当不安全事故发生后航空公司会造成经济、设备等的损失为 N ,因航空公司对社会需要承担必要的社会责任^[14],因其原因对社会造成了负面影响,航空公司需要通过社会公益等间接方式给予社会一定的补偿来承担社会

责任记为 S ^[15],且 $F > R_2, R_2 - N > R_1$ 。航空公司和托运人因违规操作导致不安全事故发生的概率为 q 。

假设 4:托运人履行责任时的管理成本记为 C_5 ,会获得合规收益 R_5 ,托运人不履行责任时的管理成本记为 C_6 ,会获得违规收益 R_6 。

假设 5:政府在航空危险品运输过程中积极监管的概率为 $x(0 < x < 1)$;航空公司合规运输的概率为 $y(0 < y < 1)$;托运人履行责任的概率为 $z(0 < z < 1)$ 。

1.2 建立支付矩阵

根据模型的基本假设,不同的策略选择下政府、航空公司和托运人三方的收益各不相同。支付矩阵见表 1。

表 1 政府、航空公司和托运人的三方支付矩阵

托运人 z	航空公司 y	政府 x	
		积极监管	消极监管
履行	合规	$-C_1 + R_1$ $-C_3 + R_3$ $-C_5 + R_5$	$-C_2 + R_2$ $-C_3 + R_3$ $-C_5 + R_5$
	违规	$-C_1 + R_1 + p_1F - qM$ $-C_4 + R_4 - p_1F - qN - qS$ $-C_5 + R_5$	$-C_2 + R_2 + p_2F - qM$ $-C_4 + R_4 - p_2F - qN - qS$ $-C_5 + R_5$
不履行	合规	$-C_1 + R_1 + p_1F - qM$ $-C_3 + R_3 - qN$ $-C_6 + R_6 - p_1F$	$-C_2 + R_2 + p_2F - qM$ $-C_3 + R_3 - qN$ $-C_6 + R_6 - p_2F$
	违规	$-C_1 + R_1 + 2p_1F - qM$ $-C_4 + R_4 - p_1F - qN - qS$ $-C_6 + R_6 - p_1F$	$-C_2 + R_2 + 2p_2F - qM$ $-C_4 + R_4 - p_2F - qN - qS$ $-C_6 + R_6 - p_2F$

1.3 模型构建

1.3.1 政府的收益

政府选择积极监管策略可以得到的收益函数 E_x , 即

$$E_x = yz(-C_1 + R_1) + (1 - y)z(-C_1 + R_1 + p_1F - qM) + y(1 - z)(-C_1 + R_1 + p_1F - qM) + (1 - y)(1 - z)(-C_1 + R_1 + 2p_1F - qM) \quad (1)$$

政府选择消极监管策略可以得到的收益函数 E_{1-x} , 即

$$E_{1-x} = yz(-C_2 + R_2) + (1 - y)z(-C_2 + R_2 + p_2F - qM) + y(1 - z)(-C_2 + R_2 + p_2F - qM) + (1 - y)(1 - z)(-C_2 + R_2 + 2p_2F - qM) \quad (2)$$

由选择积极监管策略时的收益函数 E_x 和选择消极监管策略时的收益函数 E_{1-x} 可以得到政府的平均收益函数 \bar{E}_x , 即

$$\bar{E}_x = xE_x + (1-x)E_{1-x} \quad (3)$$

可得政府的复制动态方程 $F(x)$, 即

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(E_x - \bar{E}_x) = x(x-1)(C_1 - C_2 - R_1 + R_2 - 2p_1F + 2p_2F + yp_1F - yp_2F + zp_1F - zp_2F) \quad (4)$$

1.3.2 航空公司的收益

航空公司选择合规运输策略可以得到的收益函数 E_y , 即

$$E_y = xz(-C_3 + R_3) + (1-x)z(-C_3 + R_3) + x(1-z)(-C_3 + R_3 - qN) + (1-x)(1-z)(-C_3 + R_3 - qN) \quad (5)$$

航空公司选择违规运输策略可以得到的收益函数 E_{1-y} , 即

$$E_{1-y} = xz(-C_4 + R_4 - p_1F - qN - qS) + (1-x)z(-C_4 + R_4 - p_2F - qN - qS) + x(1-z)(-C_4 + R_4 - p_1F - qN - qS) + (1-x)(1-z)(-C_4 + R_4 - p_2F - qN - qS) \quad (6)$$

由选择合规运输策略的收益函数 E_y 和选择违规运输策略时的收益函数 E_{1-y} 可以得到航空公司的平均收益函数 \bar{E}_y , 即

$$\bar{E}_y = yE_y + (1-y)E_{1-y} \quad (7)$$

可得航空公司的复制动态方程 $G(y)$, 即

$$G(y) = \frac{dy}{dt} = y(E_y - \bar{E}_y) = y(1-y)(C_4 - C_3 + R_3 - R_4 + p_2F + qS + xp_1F - xp_2F + zqN) \quad (8)$$

1.3.3 托运人的收益

托运人选择履行责任策略可以得到的收益函数 E_z , 即

$$E_z = xy(-C_5 + R_5) + (1-x)y(-C_5 + R_5) + x(1-y)(-C_5 + R_5) + (1-x)(1-y)(-C_5 + R_5) \quad (9)$$

托运人选择不履行责任策略可以得到的收益函数 E_{1-z} , 即

$$E_{1-z} = xy(-C_6 + R_6 - p_1F) + (1-x)y(-C_6 + R_6 - p_2F) + x(1-y)(-C_6 + R_6 - p_1F) + (1-x)(1-y)(-C_6 + R_6 - p_2F) \quad (10)$$

由选择履行责任策略的收益函数 E_z 和选择不履行责任策略的收益函数 E_{1-z} 可以得到托运人的平均收益函数 \bar{E}_z , 即

$$\bar{E}_z = zE_z + (1-z)E_{1-z} \quad (11)$$

可得托运人的复制动态方程 $W(z)$, 即

$$W(z) = \frac{dz}{dt} = z(E_z - \bar{E}_z) = z(1-z)(C_6 - C_5 + R_5 - R_6 + p_2F + xp_1F - xp_2F) \quad (12)$$

2 演化博弈模型分析

2.1 演化博弈模型均衡点

对 3 个复制动态方程进行求解, 令 $F(x)$ 、 $G(y)$ 、 $W(z)$ 等于 0, 可以得到 8 个纯策略均衡点及 5 个混合策略均衡点 X^* , 因处于稳定状态的均衡点不仅要满足严格纳什均衡的条件, 还要满足纯策略纳什均衡的条件。因此, 本文不会将混合策略均衡点考虑在内。8 个纯策略均衡点为 $X_1 = (0 \ 0 \ 0)$, $X_2 = (1 \ 0 \ 0)$, $X_3 = (1 \ 1 \ 0)$, $X_4 = (1 \ 0 \ 1)$, $X_5 = (1 \ 1 \ 1)$, $X_6 = (0 \ 1 \ 0)$, $X_7 = (0 \ 0 \ 1)$, $X_8 = (0 \ 1 \ 1)$ 。

对 3 个复制动态方程依次求出对 x 、 y 、 z 的偏导数, 可以得到对应的雅可比矩阵 J , 即

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial x} & \frac{\partial F}{\partial y} & \frac{\partial F}{\partial z} \\ \frac{\partial G}{\partial x} & \frac{\partial G}{\partial y} & \frac{\partial G}{\partial z} \\ \frac{\partial W}{\partial x} & \frac{\partial W}{\partial y} & \frac{\partial W}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{pmatrix} \quad (13)$$

系统均衡点代入雅可比矩阵后, 同时满足 $\lambda_1 < 0$ 、 $\lambda_2 < 0$ 、 $\lambda_3 < 0$ 时系统均衡点为演化稳定策略, 将复制动态方程中的均衡点代入雅可比矩阵, 得到各个均衡点所对应的雅可比矩阵特征值, 见表 2。

表 2 各博弈均衡点的特征值

均衡点	特征值 λ_1	特征值 λ_2	特征值 λ_3
(0 0 0)	$C_2 - C_1 + R_1 - R_2 + 2p_1F - 2p_2F$	$C_4 - C_3 + R_3 - R_4 + p_2F + qS$	$C_6 - C_5 + R_5 - R_6 + p_2F$
(1 0 0)	$C_1 - C_2 - R_1 + R_2 - 2p_1F + 2p_2F$	$C_4 - C_3 + R_3 - R_4 + p_1F + qS$	$C_6 - C_5 + R_5 - R_6 + p_1F$
(1 1 0)	$C_1 - C_2 - R_1 + R_2 - p_1F + p_2F$	$C_3 - C_4 - R_3 + R_4 - p_1F - qS$	$C_6 - C_5 + R_5 - R_6 + p_1F$
(1 0 1)	$C_1 - C_2 - R_1 + R_2 - p_1F + p_2F$	$C_4 - C_3 + R_3 - R_4 + p_1F + qN + qS$	$C_5 - C_6 - R_5 + R_6 - p_1F$
(1 1 1)	$C_1 - C_2 - R_1 + R_2$	$C_3 - C_4 - R_3 + R_4 - p_1F - qN - qS$	$C_5 - C_6 - R_5 + R_6 - p_1F$
(0 1 0)	$C_2 - C_1 + R_1 - R_2 + p_1F - p_2F$	$C_3 - C_4 - R_3 + R_4 - p_2F - qS$	$C_6 - C_5 + R_5 - R_6 + p_2F$
(0 0 1)	$C_2 - C_1 + R_1 - R_2 + p_1F - p_2F$	$C_4 - C_3 + R_3 - R_4 + p_2F + qN + qS$	$C_5 - C_6 - R_5 + R_6 - p_2F$
(0 1 1)	$C_2 - C_1 + R_1 - R_2$	$C_3 - C_4 - R_3 + R_4 - p_2F - qN - qS$	$C_5 - C_6 - R_5 + R_6 - p_2F$

2.2 均衡点的稳定性分析

情景 1: 当 $C_2 - C_1 + R_1 - R_2 + 2p_1F - 2p_2F < 0$, $C_4 - C_3 + R_3 - R_4 + p_2F + qS < 0$ 且 $C_6 - C_5 + R_5 - R_6 + p_2F < 0$ 时, 此时系统的演化结果为 $X_1 = (0 \ 0 \ 0)$, 即政府选择消极监管策略, 航空公司选择违规运输策略, 托运人选择不履行责任策略, 此时的稳定状态最不利于航空危险品运输的安全, 此时政府应该增加罚金, 航空公司自觉增加对社会的公益行为。

情景 2: 当 $C_1 - C_2 - R_1 + R_2 - 2p_1F + 2p_2F < 0$, $C_4 - C_3 + R_3 - R_4 + p_1F + qS < 0$ 且 $C_6 - C_5 + R_5 - R_6 + p_1F < 0$ 时, 此时系统的演化结果为 $X_2 = (1 \ 0 \ 0)$, 此时政府选择积极监管的策略, 但由于监管过程中投入的成本不大, 发现违规操作的概率 q 仍然较小, 此时航空公司和托运人都会选择违规操作的策略。

情景 3: 当 $C_1 - C_2 - R_1 + R_2 - p_1F + p_2F < 0$, $C_3 - C_4 - R_3 + R_4 - p_1F - qS < 0$ 且 $C_6 - C_5 + R_5 - R_6 + p_1F < 0$ 时, 此时系统的演化结果为 $X_3 = (1 \ 1 \ 0)$, 此时政府选择积极监管策略, 由于积极监管发现违规的概率增加, 所以航空公司选择合规运输策略, 但由于罚金低于托运人获得的违规收益所以托运人选择不履行责任的策略, 政府应该继续加大对违规操作的处罚力度。

情景 4: 当 $C_1 - C_2 - R_1 + R_2 - p_1F + p_2F < 0$, $C_4 - C_3 + R_3 - R_4 + p_1F + qN + qS < 0$ 且 $C_5 - C_6 - R_5 + R_6 - p_1F < 0$ 时, 此时系统的演化结果为 $X_4 = (1 \ 0 \ 1)$, 即政府选择积极监管策略, 航空公司倾向于选择违规运输策略, 托运人选择履行责任。由于事故的发生率低, 航空公司违规运输时的收益高于罚款, 航空公司愿意承担风险获得高额收益。

情景 5: 当 $C_1 - C_2 - R_1 + R_2 < 0$, $C_3 - C_4 - R_3 + R_4 - p_1F - qN - qS < 0$ 且 $C_5 - C_6 - R_5 + R_6 - p_1F < 0$ 时, 此时系统的演化结果为 $X_5 = (1 \ 1 \ 1)$, 由于政府消极监管时获得的声誉等收益是极小的所以政府更愿意选择积极监管策略, 因为政府积极监管导致违规被发现的概率增加, 此时航空公司和托运人如果违规操作面临的罚款和补救费用将会高于违规收益, 所以此时航空公司和托运人都倾向于合规操作, 此时系统的演化稳定状态是最优的。

情景 6: 当 $C_2 - C_1 + R_1 - R_2 + p_1F - p_2F < 0$, $C_3 - C_4 - R_3 + R_4 - p_2F - qS < 0$ 且 $C_6 - C_5 +$

$R_5 - R_6 + p_2F < 0$ 时, 此时系统的演化结果为 $X_6 = (0 \ 1 \ 0)$, 政府积极监管的成本远高于消极监管时的成本, 政府倾向于选择消极监管策略, 因此托运人也选择不履行责任若发生不安全事件航空公司需要更多的金钱来维护企业的声誉和地位, 所以会选择合规运输。

情景 7: 当 $C_2 - C_1 + R_1 - R_2 + p_1F - p_2F < 0$, $C_4 - C_3 + R_3 - R_4 + p_2F + qN + qS < 0$ 且 $C_5 - C_6 - R_5 + R_6 - p_2F < 0$, 此时系统的演化结果为 $X_7 = (0 \ 0 \ 1)$, 政府积极监管的成本远高于消极监管时的成本, 政府倾向于选择消极监管策略, 因为政府消极监管发现违规运输的概率降低, 所以航空公司也倾向于选择违规运输策略, 托运人因为罚金高于不履行责任时的收益所以选择履行责任的策略。

情景 8: 当 $C_2 - C_1 + R_1 - R_2 < 0$, $C_3 - C_4 - SR_3 + R_4 - p_2F - qN - qS < 0$ 且 $C_5 - C_6 - R_5 + R_6 - p_2F < 0$ 时, 此时系统的演化结果为 $X_8 = (0 \ 1 \ 1)$, 即政府选择消极监管策略, 航空公司选择合规运输策略, 托运人选择履行责任的策略, 因为政府设定了较高的罚金, 导致航空公司和托运人为了避免违规操作被发现赔偿高额的罚金而选择合规操作, 此时因为政府设定了高额的罚金, 可以放松监管力度降低监管成本。

3 演化仿真分析

3.1 数值假设及演化结果分析

危险品航空运输不安全事故时有发生, 1996 年美国 value jet 航空公司的 592 航班运输使用过的氧气发生器, 因氧气发生器意外发生反应, 造成货舱内激烈燃烧温度高达 $3\ 000\ ^\circ\text{F}$, 15 min 后飞机坠毁, 机上 110 名旅客和机组人员全部罹难。2010 年 9 月 3 日, 一架载有危险品的波音 747 货机在迪拜机场坠毁, 造成两名机组人员死亡, 这起事故的原因是货物中的危险品发生爆炸, 导致飞机坠毁。在满足模型要求的前提下, 考虑到危险品航空运输的实际运输案例, 并咨询相关领域专家对参数进行初始赋值。对参数的初始设定如下: $C_1 = 5, C_2 = 2, C_3 = 7, C_4 = 5, C_5 = 6, C_6 = 4, R_1 = 7, R_2 = 3, R_3 = 9, R_4 = 15, R_5 = 8, R_6 = 10, F = 10, M = 10, N = 15, S = 5, p_1 = 0.8, p_2 = 0.4, q = 0.3$ 。根据参数的初始值运用 MATLAB 软件绘制三维图像, 得到系统的初始演化路径^[16], 仿真结果如图 1 所示。

图 1 显示, 系统演化趋向于 $X_5 = (1 \ 1 \ 1)$ 状态, 即政府选择积极监管策略, 航空公司选择合规

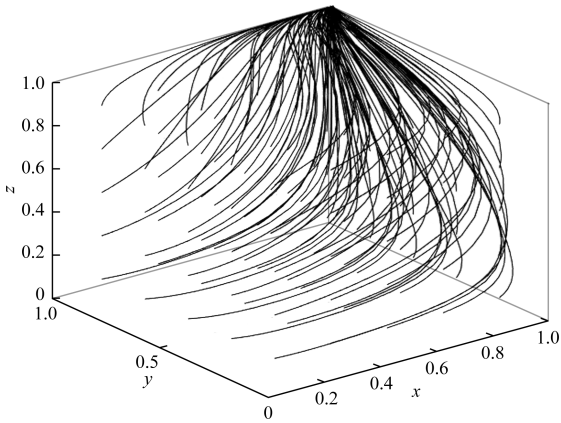


图 1 初始演化路径

运输策略, 托运人选择履行责任策略。

3.2 关键参数敏感性分析

3.2.1 F 对系统演化状态的影响

以初始策略选择 $x = y = z = 0.5$ 为例, 政府罚款 F 分别取 3、10、15, 其他参数不变。得到参数 F 变化对系统演化结果的影响和参数 F 变化分别对三方演化路径的影响^[17], 如图 2 图 3 所示。

从仿真结果可发现, F 由 10 突变为 3 时, 系统的演化均衡由 $X_5 = (1 \ 1 \ 1)$ 向 $X_2 = (1 \ 0 \ 0)$ 转变, 当 F 由 10 突变为 15 时, 系统的演化均衡状态仍然为 $X_5 = (1 \ 1 \ 1)$, 说明再增加政府对航空公司和托运人的罚款只会加快到达演化均衡状态的速度, 不会影响演化均衡的结果。 F 增大时, x 向 1 演化的速率增加, 所以 F 增大对 x 向 1 演化是正向激励, 对 x 向 0 演化是负向激励, 即政府对航空公司和托运人的罚款增加, 政府更倾向于选择积极监管策略。 F 增大, y 向 1 演化的速率增加, F 增大对 y 向 0 演化是负向激励, 对 y 向 1 演化是正向激励, 即政府罚款增加时, 航空公司更倾向于选择合规运输策略。 F 增大, z 向 1 演化的速率增加, F 增大对 z

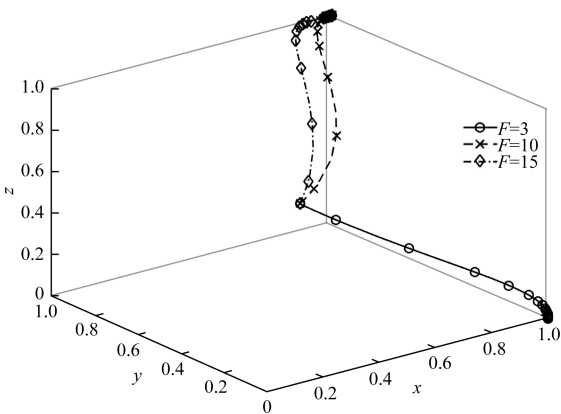


图 2 参数 F 变化对系统演化结果的影响

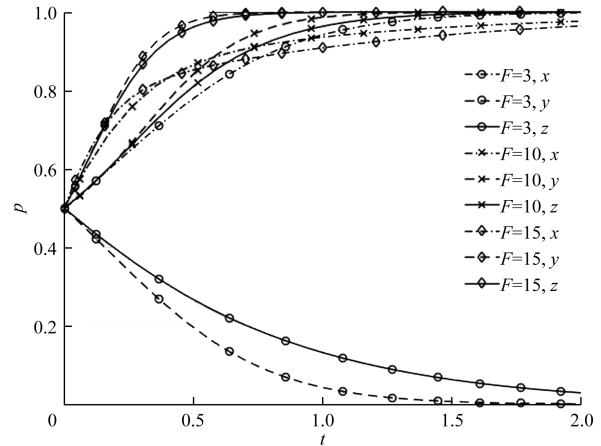


图 3 参数 F 变化分别对三方演化路径的影响

向 0 演化是负向激励, 对 z 向 1 演化是正向激励, 即政府罚款增加时, 托运人更倾向于选择履行责任策略。当 F 突变到 3 时, 托运人和航空公司最终会选择不履行责任策略和违规运输策略。

3.2.2 C_1 对系统演化状态的影响

以初始策略选择 $x = y = z = 0.5$ 为例, C_1 分别取 2、5、8, 其他参数不变。得到参数 C_1 变化对系统演化结果的影响和参数 C_1 变化分别对三方演化路径的影响, 如图 4、图 5 所示。

从图 4、图 5 中可以发现, 当 C_1 从 5 突变为 2 时, 系统的演化均衡仍然为 $X_5 = (1 \ 1 \ 1)$, 当 C_1 从 5 突变为 8 时, 系统的演化均衡由 $X_5 = (1 \ 1 \ 1)$ 向 $X_8 = (0 \ 1 \ 1)$ 转变, 政府积极监管时的成本过高时政府可能会选择消极监管策略。政府积极监管成本增加对 x 向 0 演化是正向激励, 对 x 向 1 演化是负向激励。 C_1 增加对 y 向 0 演化是正向激励, 对 y 向 1 演化是负向激励, 但最终 y 仍然会向 1 演化。 C_1 增加对 z 向 1 演化是负向激励, 对 z 向 0 演化是正向激励, C_1 降低时会加快 z 向 1 演化

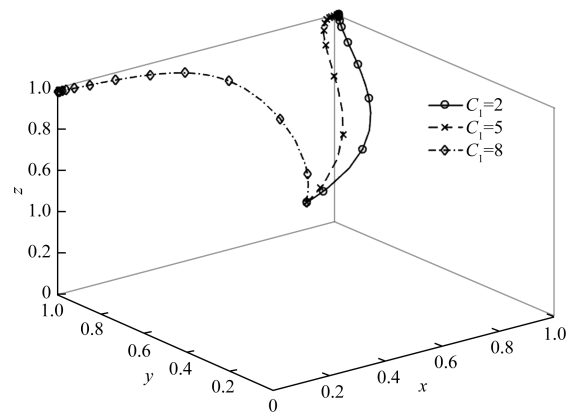


图 4 参数 C_1 变化对系统演化结果的影响

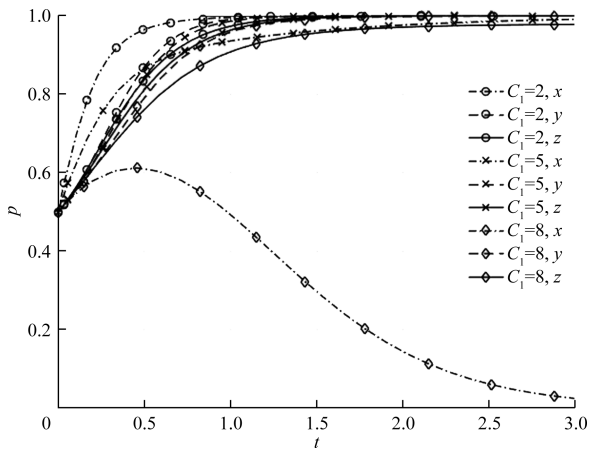


图 5 参数 C_1 变化分别对三方演化路径的影响

的速度,使系统更快地达到稳定状态。 C_1 的增加或减少并不能改变航空公司和托运人策略选择的结果,只会影响系统演化稳定的速率,但 C_1 的变化会影响政府的决策, C_1 逐渐增加时,政府为规避高额成本而选择消极监管策略。

3.2.3 R_4 对系统演化状态的影响

以初始策略选择 $x = y = z = 0.5$ 为例, R_4 分别取 5、15、25,其他参数不变。得到参数 R_4 变化对系统演化结果的影响和参数 R_4 变化分别对三方演化路径的影响,如图 6、图 7 所示。

当 R_4 由 15 突变为 5 时,系统的演化均衡仍然为 $X_5 = (1 \ 1 \ 1)$, R_4 由 15 突变为 25 时,系统的演化均衡由 $X_5 = (1 \ 1 \ 1)$ 变为 $X_4 = (1 \ 0 \ 1)$ 。 R_4 增加对 x 向 1 演化是正向激励,对 x 向 0 演化是负向激励, R_4 的增加只会加快 x 向 1 演化的速度,并不会改变政府的策略演化结果。 R_4 增加对 y 向 1 演化是负向激励,对 y 向 0 演化是正向激励,即随着航空公司违规运输的违规收益的增加,航空公司会为了高额的违规收益铤而走险选择违规运输策略。

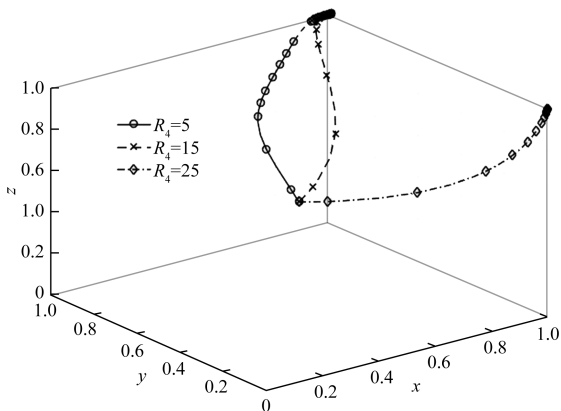


图 6 参数 R_4 变化对系统演化结果的影响

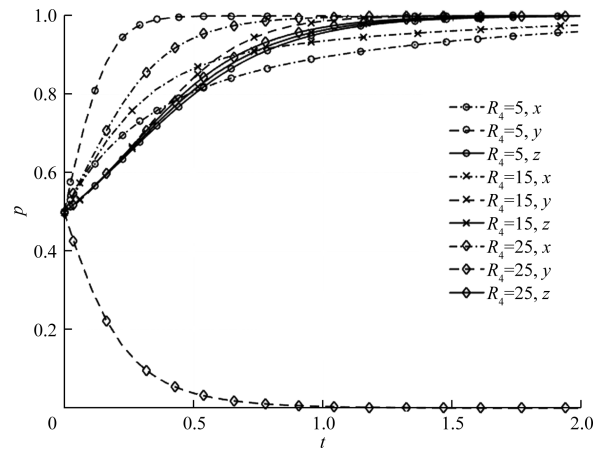


图 7 参数 R_4 变化分别对三方演化路径的影响

R_4 的增加对 z 向 1 演化是正向激励,对 z 向 0 演化是负向激励,但 R_4 的改变只会影响 z 的演化速率,并不会改变 z 的演化结果。

3.2.4 p_1 对系统演化状态的影响

以初始策略选择 $x = y = z = 0.5$ 为例, p_1 分别取 0.6、0.7、0.8,其他参数不变。得到参数 p_1 变化对系统演化结果的影响和参数 p_1 变化分别对三方演化路径的影响,如图 8、图 9 所示。

p_1 变化系统的演化结果仍为 $X_5 = (1 \ 1 \ 1)$, 即政府选择积极监管策略,航空公司选择合规运输策略,托运人选择履行责任策略。 p_1 的增加对 x 向 1 演化是正向激励,对 x 向 0 演化是负向激励, p_1 的增加会加快 x 向 1 演化的速度,使 x 更快到达稳定状态。 p_1 的增加对 y 向 1 演化是正向激励,对 y 向 0 演化是负向激励。 p_1 的增大对 z 向 0 演化是负向激励,对 z 向 1 演化是正向激励。

3.2.5 C_5 对系统演化状态的影响

以初始策略选择 $x = y = z = 0.5$ 为例, C_5 分别取 1、6、15,其他参数不变。得到参数 C_5 变化对

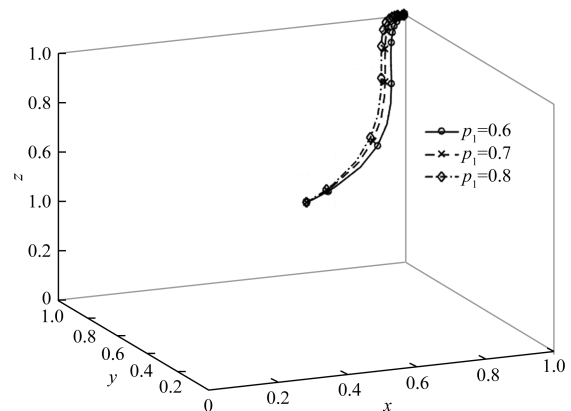


图 8 参数 p_1 变化对系统演化结果的影响

系统演化结果的影响和参数 C_5 变化分别对三方演化路径的影响,如图 10、图 11 所示。

当 C_5 由 6 突变为 1 时,系统的演化均衡仍然为 $X_5 = (1 \ 1 \ 1)$, 当 C_5 突变为 15 时系统的演化均衡点由 $X_5 = (1 \ 1 \ 1)$ 变为 $X_3 = (1 \ 1 \ 0)$, 此时政府选择积极监管,航空公司选择 合规运输,托

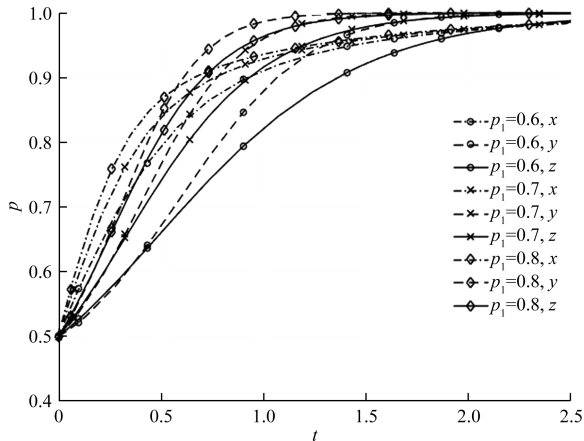


图 9 参数 p_1 变化分别对三方演化路径的影响

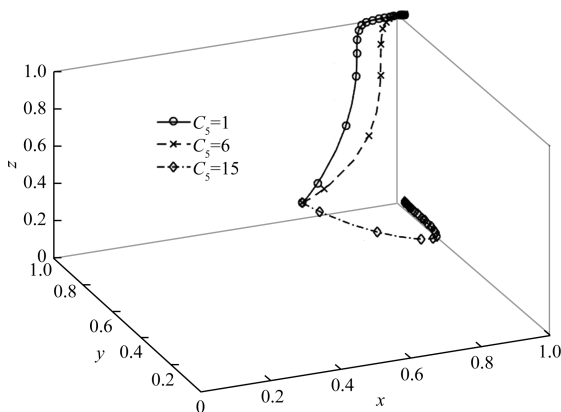


图 10 参数 C_5 变化对系统演化结果的影响

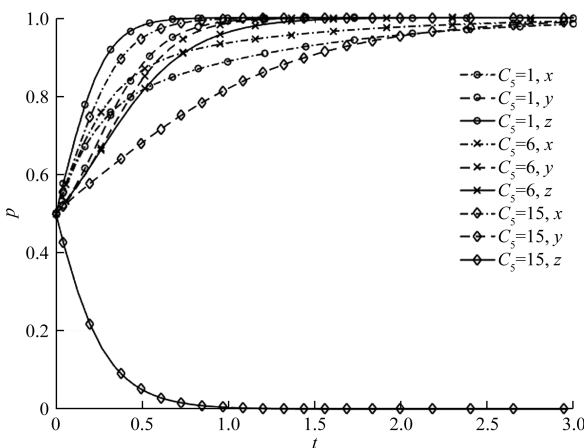


图 11 参数 C_5 变化分别对三方演化路径的影响

运人选择不履行责任,这意味着当托运人履行责任时的成本过高时托运人会为了使自己获得更高的收益而选择不履行责任。 C_5 增加对 x 向 1 演化是正向激励,对 x 向 0 演化是负向激励,随着 C_5 的增加,政府向 1 演化的速率增加。 C_5 增加对 y 向 1 演化是负向激励,对 y 向 0 演化是正向激励, C_5 增加航空公司向 1 演化的速度逐渐变缓。 C_5 增加对 z 向 0 演化是正向激励,对 z 向 1 演化是负向激励,当 C_5 逐渐增加时托运人向 1 演化的速度逐渐变慢, C_5 增加到 15 时,托运人最终的演化结果为 0,即托运人最终会选择不履行责任。

4 结论

对航空危险品货物安全运输运用演化博弈理论,建立了政府、托运人和航空公司三方的演化博弈模型,通过对演化博弈模型的求解得出政府、托运人和航空公司三方的复制动态方程并求出了 8 个均衡点,对均衡点进行了稳定性分析,得到以下结论。

(1)通过演化博弈模型可知,政府的监管成本、惩罚力度、航空公司的管理成本、航空公司和托运人的违规收益等因素均会对演化博弈结果产生影响。

(2)政府采取的策略会影响托运人和航空公司的选择策略,政府采取积极监管策略的同时增大对托运人和航空公司的处罚力度,托运人和航空公司的行为会更加规范,能够有效地降低危险品不安全事故发生率。

(3)航空公司会因合规运输成本的增加而进行不合规运输来获得航空公司利益最大化,为此政府应当加大监管力度,制定合理的监管措施,可以促使航空公司按照规范运营,降低危险品事故发生的概率。航空公司在保障危险品作业过程安全的同时,也要维护机场环境、提高航线投资环境、积极承担社会责任。

未来可对更多的航空危险品不安全事故案例进行研究,增大数据量让演化博弈仿真参数的初始数据值更具有真实性,以获得更加贴近现实的仿真结果和决策建议^[18]。

参考文献

- [1] 罗锋. 内河危险品运输风险分析与监管策略博弈研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- [2] 吴海涛, 刘月. 区块链赋能视角下危险货物道路运输安全监管演化博弈研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(5): 1894-1903.

- [3] 吴芮函. 规制危险品航空运输的刑行衔接研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2022.
- [4] 王伟, 王晓楠, 丁黎黎, 等. 考虑公众监督的政府与危险品运输企业的演化博弈分析[J]. 系统科学学报, 2022, 30(1): 92-96, 136.
- [5] 程志友, 罗锋, 吴蕊, 等. 基于系统动力学模型的港口危化品运输管理演化博弈[J]. 上海海事大学学报, 2023, 44(3): 71-78, 99.
- [6] 赖红珍, 周艳菊, 陈晓红, 等. 考虑供应链上游社会责任履行的供应链协调机制研究[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(9): 2502-2519.
- [7] 张路, 马德青, 胡劲松. 企业社会责任下的旅游供应链低碳运营研究[J]. 运筹与管理, 2022, 31(6): 189-195.
- [8] 韩震, 王蕊, 杨丽. 基于 CSV 的港口危险品管理博弈研究[J]. 科研管理, 2022, 43(1): 161-167.
- [9] 裴彬. 我国危险品航空运输管理现状及方法[J]. 中国航务周刊, 2023(38): 51-53.
- [10] LEE B, SEO D. A Study on improvement of safety management of air dangerous goods terminal[J]. Korean Journal of Hazardous Materials, 2018, 6(1): 29-36.
- [11] WANG Y. Risk management research of aviation dangerous goods transportation and storage[C]//Proceedings of 2019 International Conference on Emerging Researches in Management. Denver: Francis Academic Press, 2019: 756-759.
- [12] 沈海滨, 赵胜男, 袁铭烽, 等. 基于演化博弈的民航危险品运输培训监管[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(3): 96-102, 127.
- [13] 张广胜, 徐旭. 政府参与危险品物流安全协同保障系统演化博弈研究[J]. 系统科学学报, 2024, 32(1): 97-103.
- [14] 赵连霞, 刘佳, 张小峰, 等. 三方博弈视角下供应商社会责任审查策略研究[J]. 管理学报, 2023, 20(9): 1380-1388.
- [15] 李凤, 程春龙, 郭焯锋. 考虑零售商企业社会责任的低碳供应链政府补贴策略[J]. 山东大学学报(理学版), 2024, 59(1): 85-99.
- [16] 吴维, 林芷伊, 王兴隆. 同质竞争下补贴策略对多机场航线网络演化博弈研究[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 1-17 [2024-11-03]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0477>.
- [17] 李圆圆, 孙李傲, 袁文燕, 等. 考虑恐怖袭击下危险品运输安全监管的演化博弈与稳定性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(5): 18-24.
- [18] 民用航空危险品运输管理规定[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2024(10): 50-61.

Analysis of the Evolutionary Game of Air Dangerous Goods Transportation Safety Regulation

WEN Jun, MA Siyuan, SUN Yi, FAN Zhixiang, CHEN Zhiming

(Airport College, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China)

Abstract: In order to solve the safety problem of aviation dangerous goods transportation, under the perspective of social responsibility, a three-party evolutionary game model with the subjects being the government, airlines and shippers was constructed, and the strategy choices under different conditions were analyzed. MATLAB was used to numerically simulate the important parameters to explore the effects of the sensitivity changes of the penalty, the government's active regulation cost, the success rate of active regulation, the airline's violation revenue and the shipper's management cost on the evolution of the system. The results show that the government's penalty and the success rate of active regulation are positive incentives for shippers and airlines, and the government should increase the penalty in order to effectively solve the safety problem of air dangerous goods transportation.

Keywords: air dangerous goods transportation; social responsibility perspective; safety regulation; three-party evolutionary game; sensitivity analysis