

文章编号: 1005-0523(2023)01-0034-10



## 基于奖惩机制的网络货运平台监管策略演化博弈分析

甘卫华, 刘 郑, 刘亚楠, 李春芝

(华东交通大学交通运输工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 基于演化博弈理论, 引入奖励和惩罚机制, 构建网络货运平台与政府监管部门间的演化博弈模型, 并对其均衡点的稳定性进行分析。理论研究与仿真结果表明: 在静态惩罚下, 无论是静态还是动态的奖励机制, 系统均不存在均衡稳定点; 在静态奖励动态惩罚和动态奖惩机制下, 两者均趋于一个稳定的均衡点, 且在动态奖惩机制下效果更好; 网络货运平台的运营行为受到政府奖惩政策的影响, 且惩罚机制的约束性作用更为显著。

**关键词:** 网络货运平台; 动态奖惩机制; 演化博弈; 政府监管

**中图分类号:** U492; F542

**文献标志码:** A

**本文引用格式:** 甘卫华, 刘郑, 刘亚楠, 等. 基于奖惩机制的网络货运平台监管策略演化博弈分析[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(1): 34-43.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20230209.012

## Evolutionary Game Analysis of Regulating Strategy Based on Reward and Punishment Mechanisms

Gan Weihua, Liu Zheng, Liu Yanan, Li Chunzhi

(School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Based on evolutionary game theory, with the introduction of reward and punishment mechanisms, an evolutionary game model between online freight platforms and government regulators is constructed, and the stability of their equilibrium points is analyzed. The results show that under static punishment, there is no equilibrium stability point in the system, no matter whether the reward mechanism is static or dynamic; under the static reward dynamic punishment and dynamic reward and punishment mechanism, both sides tend to reach a stable equilibrium point, and the effect is better under the dynamic reward and punishment mechanism; the online freight platforms' behavior is affected by the government's reward and punishment mechanism, and the binding effect of the punishment mechanism is more significant.

**Key words:** online freight platform; dynamic reward and punishment; evolutionary game; government regulation

**Citation format:** GAN W H, LIU Z, LIU Y N, et al. Evolutionary game analysis of regulating strategy based on reward and punishment mechanisms[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(1): 34-43.

学者们对平台监管和政府奖惩政策进行的研究, 主要包括平台监管模式和平台监管策略两个方面。平台监管模式主要分为政府公共监管、平台私

人监管和协同治理 3 类。政府公共监管可以引导平台规范化运作, 达到保护公众利益、稳定社会秩序的目的<sup>[1-3]</sup>。而 Farrell 等<sup>[4]</sup>认为平台具有一定的监管

收稿日期: 2022-04-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(72061013)

作用,可以被视为“公共利益”的监管者。Piracha 等<sup>[5]</sup>、王勇等<sup>[6]</sup>也肯定了平台私人监管的重要作用。这两种单一主体治理模式虽有一定的成效,但不足以保障平台的可持续发展。必须充分发挥多方主体的作用和优势,建立协同治理模式,Wilkin 等<sup>[7]</sup>设计了多方利益相关者在内的协调治理机制。汪旭辉等<sup>[8-9]</sup>先后提出了“平台-政府”二元管理范式和“市场-平台-政府”三元复合治理模式。

在平台监管策略上,一是基于双边市场理论,探讨不同补贴或收费对双边用户参与程度和平台盈利性的影响,如 Chaudhuri 等<sup>[10]</sup>基于 Hotelling 模型确定了 MaaS 平台与供应商的共同利润最大化时的加盟费。Kung 等<sup>[11]</sup>则设计了平台交付的 3 种定价策略。甘卫华等<sup>[12]</sup>针对货运平台的延迟赔付问题提出了 Free 策略和 Constraint 策略以供货主进行选择。桂云苗等<sup>[13]</sup>从用户归属方面分析了信息策略对网络货运平台绩效的影响。

二是根据演化均衡策略为政府监管部门提供建议。相比于传统博弈方法,演化博弈是有限理性的决策者在考虑了诸多不确定因素时序变化的情况下,在博弈过程中不断调整策略,最终形成稳定的均衡点,更加符合实际。演化博弈理论被广泛应用于监管博弈中,如 Liu 等<sup>[14]</sup>、雷丽彩等<sup>[15]</sup>建立平台与用户间的演化博弈模型,并分析博弈行为演化过程及均衡条件。Liu 等<sup>[16]</sup>、付淑换等<sup>[17]</sup>将第三方监管引入到演化博弈模型中,并针对研究问题提出了可行性对策。甘卫华等<sup>[18]</sup>通过建立演化博弈模型对中小型货运企业的平台化转型问题进行了研究。

随着平台治理工作的不断推进,部分学者在监管博弈中探讨了政府奖惩政策对系统演化的影响,

Zhang<sup>[19]</sup>、He 等<sup>[20]</sup>发现政府对平台的处罚会对系统稳定策略产生影响。李亚兵<sup>[21]</sup>发现直播平台监管力度与监管处罚力度呈倒 U 型关系,与激励力度呈正相关关系。Wu 等<sup>[22]</sup>、吴斌等<sup>[23]</sup>认为加强处罚可有效减少电商平台杀熟定价倾向。曹裕等<sup>[24]</sup>的研究表明,通过加强对网络平台的惩罚可以提高政府间接监管策略的有效性。

综上所述,国内外学者在研究平台治理策略时虽然考虑了奖惩政策的影响,却忽视了政府奖惩政策的动态特征,缺乏对不同奖惩组合的差异化影响的探讨。

## 1 模型假设与参数说明

为构建政府监管部门和网络货运平台间的监管博弈模型,提出以下研究假设。

假设 1:网络货运平台的策略空间为{合规运营  $O_1$ , 违规运营  $O_2$ }, 选择策略  $O_1$  的概率为  $x$  ( $0 \leq x < 1$ ), 选择策略  $O_2$  的概率为  $1-x$ ; 政府监管部门的策略空间为{积极监管  $G_1$ , 消极监管  $G_2$ }, 选择策略  $G_1$  的概率为  $y$  ( $0 \leq y \leq 1$ ), 选择策略  $G_2$  的概率为  $1-y$ 。

假设 2: 如果博弈双方为了追求自身利益最大化而采取消极策略, 即网络货运平台选择策略  $O_2$  或者政府监管部门选择策略  $G_2$ , 网络货运平台市场秩序被打乱, 此时网络货运平台和政府监管部门需要承担因网络货运平台发展不规范带来的责任成本  $C$ , 网络货运平台企业所承担的责任成本为  $kC$ , 政府监管部门所承担的责任成本为  $(1-k)C$ , 其中  $k$  为责任成本分担系数。

通过上述假设, 所涉及的模型变量和参数如表 1 所示。

表 1 相关符号说明

Tab.1 Related symbols description

Symbols	Significance and description
$x$	Probability of online freight platform companies choosing to operate in compliance.
$y$	Probability of government regulators choosing to actively regulate.
$p_i$	The probability of irregular development of the online freight platforms.
$C_o$	The cost of compliance operations for online freight platforms, $C_o \geq 0$ .
$C_g$	The cost of active regulation by government regulators, $C_g \geq 0$ .
$R_1$	The benefits of the online freight platforms when choosing Strategy $O_1$ , $R_1 \geq 0$ .
$R_2$	The benefits of the online freight platforms when choosing Strategy $O_2$ , $R_2 \geq 0$ .
$C_r$	The liability cost when the online freight platforms develops irregularly.
$k$	Responsibility cost sharing coefficient.
$M$	Rewards for online freight platform companies to operate in compliance when the government regulators actively supervise, $M \geq 0$ .
$P$	The punishment of online freight platform companies operating in non-compliance when the government mregulators actively supervise, $P \geq 0$ .

## 2 模型建立与分析

基于上述假设,参数描述和监管主体之间的关系,网络货运平台与政府监管部门之间的收益矩阵如表 2 所示。

表 2 网络货运平台监管博弈方的收益矩阵  
Tab.2 Revenue matrix of regulatory gaming parties of online freight platform

Online freight platform	Government regulators	
	Active supervision	Passive supervision
Compliance operations	$R_1+M-C_o$ $-M-C_g$	$R_1-C_o-kC_R$ $-(1-k)C_R$
Non-compliant operation	$R_2-kC_R-P$ $P-C_g-(1-k)C_R$	$R_2-kC_R$ $-(1-k)C_R$

针对政府监管部门对网络货运平台不同的奖惩政策,从 4 个不同情景进行讨论分析。

### 2.1 情景 1 奖惩政策均为静态

双方的博弈收益矩阵如表 2 所示,政府监管部门对网络货运平台的奖励与惩罚为固定值。网络货运平台选择不同策略时的预期收益和平均收益如式(1)所示

$$\left. \begin{aligned} E_{O1} &= y(R_1+M-C_o) + (1-y)(R_1-C_o-kC_R) \\ E_{O2} &= y(R_2-kC_R-P) + (1-y)(R_2-kC_R) \\ \bar{E}_{O1} &= xE_{O1} + (1-x)E_{O2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

同理,政府监管部门选择不同策略时的预期收益和平均收益如式(2)所示

$$\left. \begin{aligned} E_{G1} &= x(-M-C_g) + (1-x)(P-C_g-(1-k)C_R) \\ E_{G2} &= x(-(1-k)C_R) + (1-x)(-(1-k)C_R) \\ \bar{E}_G &= yE_{G1} + (1-y)E_{O2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由 Malthusian 方程可得博弈双方的复制动态方程为

$$\left. \begin{aligned} F(x) &= \frac{dx}{dt} = x(1-x)[-C_o+R_1-R_2+y(kC_R+M+P)] \\ F(y) &= \frac{dy}{dt} = y(1-y)\{-C_g+P+x[(1-k)C_R-M-P]\} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

因为政府监管部门和网络货运平台双方在网络货运平台运营监管中皆是有限理性且利己的,都想从中争取更多利益。要使政府监管部门的奖惩政策有效,则必须保证网络货运平台获得奖励后的收益是高于其被惩罚后的收益,即  $R_1+M-C_o > R_2-kC_R-P$ ;此外,对政府监管部门而言,其积极监管时,对网

络货运平台惩罚后的总收入应是大于 0 的,即  $P-C_g-(1-k)C_R > 0$ 。

#### 2.1.1 网络货运平台策略的演化稳定性分析

为后续计算方便,令  $\Delta R=C_o-R_1+R_2$ ,由假设 2 可知,双方均会为了满足自身利益最大化而采取消极策略,由此可知,网络货运平台合规运营时的收益  $R_1$  是小于其违规运营时的收益  $R_2$ ,  $\Delta R=C_o-R_1+R_2 > 0$ 。

网络货运平台策略的演化博弈复制动态方程为 
$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(1-x)[- \Delta R + y(kC_R + M + P)] \quad (4)$$

现针对不同情形讨论如下。

1) 若  $y = \frac{\Delta R}{kC_R + M + P}$  ( $0 \leq \frac{\Delta R}{kC_R + M + P} \leq 1$ ), 则  $F(x) = 0$  恒成立,此时,不管  $x$  为何值,系统都是稳定状态。

2) 若  $y \neq \frac{\Delta R}{kC_R + M + P}$ , 则令  $F(x) = 0$ , 求解可得  $x_1 = 0$  和  $x_2 = 1$  可能是系统的稳定点。

对  $F(x)$  求导,得到

$$F'(x) = \frac{dF(x)}{dx} = (1-2x)[- \Delta R + y(kC_R + M + P)] \quad (5)$$

演化稳定策略(ESS)要求满足:  $F'(x) < 0$ , 以下对不同情形进行讨论。

1) 若  $\frac{\Delta R}{kC_R + M + P} > 1$ , 则  $y$  恒小于  $\frac{\Delta R}{kC_R + M + P}$ , 此时,  $x = 0$  是系统的演化稳定策略,也就是说,当系统达到均衡时,网络货运平台选择策略  $O_2$ 。

2) 若  $\frac{\Delta R}{kC_R + M + P} < 0$ , 则  $y$  恒大于  $\frac{\Delta R}{kC_R + M + P}$ , 此时,  $x = 1$  是系统的演化稳定策略,也就是说,当系统达到均衡时,网络货运平台选择策略  $O_1$ 。

3) 当  $0 \leq \frac{\Delta R}{kC_R + M + P} \leq 1$  时。

① 若  $y > \frac{\Delta R}{kC_R + M + P}$ , 则  $y(kC_R + M + P) - \Delta R > 0$  恒成立,由此可得:  $F'(0) > 0, F'(1) < 0$ , 此时,  $x = 1$  是系统的演化稳定策略,也就是说,当系统达到均衡时,网络货运平台选择策略  $O_1$ 。

② 若  $y < \frac{\Delta R}{kC_R + M + P}$ , 则  $y(kC_R + M + P) - \Delta R < 0$  恒成立,由此可得:  $F'(0) < 0, F'(1) > 0$ , 此时,  $x = 0$  是系统的演化稳定策略,也就是说,当系统达到均衡时,网络货运平台选择策略  $O_2$ 。

2.1.2 政府监管部门策略的演化稳定分析

为方便计算,令  $\frac{C_g-P}{(1-k)C_R-M-P}=\Gamma$ 。

1) 若  $x=\Gamma, (0\leq\Gamma\leq 1)$ , 则  $F(y)=0$  恒成立, 此时, 不管  $y$  为何值, 系统都是稳定状态。

2) 当  $x\neq\Gamma$ , 则令  $F(y)=0$ , 求解可得  $y_1=0$  和  $y_2=1$  可能是系统的稳定点。

对  $F(y)$  求导, 得到

$$F'(y)=\frac{dF(y)}{dy}=(1-2y)\{-C_R+P+x[(1-k)C_R-M-P]\} \quad (6)$$

演化稳定策略(ESS)要求满足  $F'(y)<0$ , 以下对不同情形进行讨论。

1) 若  $\Gamma>1$ , 则  $x$  恒小于  $\Gamma$ , 此时,  $y=0$  是系统的演化稳定策略, 也就是说, 当在系统达到均衡时, 政府监管部门选择策略  $G_2$ 。

2) 若  $\Gamma<0$ , 则  $x$  恒大于  $\Gamma$ , 此时,  $y=1$  是系统的演化稳定策略, 也就是说, 当在系统达到均衡时, 政府监管部门选择策略  $G_1$ 。

3) 当  $0\leq\Gamma\leq 1$  时。

① 若  $x>\Gamma$ , 则  $-C_g+P+x[(1-k)C_R-M-P]>0$  恒成立, 由此可得:  $F'(0)>0, F'(1)<0$ , 此时,  $y=1$  是系统的演化稳定策略, 也就是说, 当系统达到均衡时, 政府监管部门选择策略  $G_1$ 。

② 若  $x<\Gamma$ , 则  $-C_g+P+x[(1-k)C_R-M-P]<0$  恒成立, 由此可得:  $F'(0)<0, F'(1)>0$ , 此时,  $y=0$  是系统的演化稳定策略, 也就是说, 当系统达到均衡时, 政府监管部门选择策略  $G_2$ 。

2.1.3 双方混合策略的演化稳定分析

上述分析表明, 在不同的初始条件下, 网络货运平台与政府监管部门之间存在不同演化稳定策略(ESS)。但是就现实情况而言, 如果网络货运平台策略  $O_2$  获得的额外收益远远高于政府监管部门对其的奖惩时, 无论政府如何选择, 网络货运平台都会选择策略  $O_2$ 。仅讨论  $0\leq\frac{\Delta R}{kC_R+M+P}\leq 1$  且  $0\leq\Gamma\leq 1$  时, 双方混合策略的稳定性。

由式(3)可得, 当  $0\leq\frac{\Delta R}{kC_R+M+P}\leq 1$  且  $0\leq\Gamma\leq 1$  时, 复制动态方程组 5 个局部均衡点为  $(0,0), (0,1), (1,0), (1,1)$  和  $(x_0,y_0)$ 。其中:

$$x_0=\frac{C_g-P}{(1-k)C_R-M-P}$$

$$y_0=\frac{\Delta R}{kC_R+M+P}$$

根据 Friedman 提出的判定方法<sup>[25]</sup>, Jacobian 矩阵被用来确定系统是否达到稳定均衡状态(ESS)。式(3)组成的二维动态系统的 Jacobian 矩阵为

$$J=\begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中:

$$\begin{aligned} a_{11}&=(1-2x)[- \Delta R+y(kC_R+M+P)] \\ a_{12}&=x(1-x)[kC_R+M+P] \\ a_{21}&=y(1-y)[(1-k)C_R-M-P] \\ a_{22}&=(1-2y)\{-C_g+P+x[(1-k)C_R-M-P]\} \end{aligned}$$

式(3)组成的二维动态系统若想达到稳定, 必须同时满足式(8)所示的两个条件, 此时局部均衡点就是演化稳定策略。

$$\left. \begin{aligned} \det J &=a_{11}a_{22}-a_{12}a_{21}>0 \\ \text{tr } J &=a_{11}+a_{22}<0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

根据式(7)可以计算出 5 个局部均衡点的行列式与迹, 如表 3 所示。

表 3 情景 1 中各均衡点的  $\det J$  和  $\text{tr } J$  的值  
Tab.3 Determinants and traces of each equilibrium point in Scenario 1

Equilibrium point	$\det J$	$\text{tr } J$
$(0,0)$	$-\Delta R(C_g+P)$	$-\Delta R-C_g+P$
$(0,1)$	$(-\Delta R+kC_R+M+P)(C_g-P)$	$-\Delta R+kC_R+C_g+M$
$(1,0)$	$\Delta R[-C_g-M+(1-k)C_R]$	$\Delta R-C_g-M+(1-k)C_R$
$(1,1)$	$[\Delta R-kC_R-M-P][C_g+M-(1-k)C_R]$	$\Delta R+C_g-P-C_R$
$(x_0,y_0)$	$A$	$0$

$$A=\frac{\Delta R(C_g-P)(-\Delta R+kC_R+M+P)[(1-k)C_R-M-C_g]}{(kC_R+M+P)[(1-k)C_R-M-P]}$$

由 Jacobian 矩阵的局部稳定分析法可知, 在  $0\leq\frac{\Delta R}{kC_R+M+P}\leq 1$  且  $0\leq\frac{C_g-P}{(1-k)C_R-M-P}\leq 1$  时, 系统的局部稳定性如表 4 所示。

对于点  $(x_0,y_0)$  不能单纯用 Jacobian 矩阵的局部稳定分析法 ( $\text{tr } J=0$ ), 利用微分方程进一步分析。将式(3)分别对  $x, y$  求导, 并将  $(x_0,y_0)$  代入可得:  $\frac{dF(x)}{dy}>0, \frac{dF(y)}{dx}>0$ , 所以点  $(x_0,y_0)$  不是稳定点。

表4 情景1中各均衡点的稳定性分析  
Tab.4 Analysis of the stability of each equilibrium point in Scenario 1

Equilibrium point	det <i>J</i>	tr <i>J</i>	Stability
(0,0)	-	Uncertain	Saddle point
(0,1)	-	Uncertain	Saddle point
(1,0)	-	Uncertain	Saddle point
(1,1)	-	Uncertain	Saddle point
( <i>x</i> <sub>0</sub> , <i>y</i> <sub>0</sub> )	+	0	Instability point

由此可得结论1:奖惩政策均为静态时,网络货运平台与政府监管部门间不存在演化稳定策略(ESS),任何微小的变化都会对双方的策略选择产生更大的影响。当初始状态发生变化时,系统将演化到不同的平衡状态,在每种情况下实现演化稳定策略(ESS)。

2.2 情景2 奖惩政策仅有奖励政策为动态

假设政府监管部门对网络货运平台的奖励与网络货运平台的策略选择有关且政府监管部门给予的奖励与网络货运平台选择策略 *O*<sub>1</sub> 的概率成正比,即政府监管部门给网络货运平台的奖励 *M* 为 *M*=*xm*, 其中 *m* 为政府监管部门对网络货运平台的奖励上限,而政府监管部门对网络货运平台的惩罚仍为 *P*。此时,系统的复制动态方程可修改为

$$\left\{ \begin{aligned} F'(x) &= x(1-x)[-ΔR+y(kC_R+xm+P)] \\ F'(y) &= y(1-y)\{-C_g+P+x[(1-k)C_R-xm-P]\} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

仅讨论  $0 \leq \frac{\Delta R}{xm+kC_R+P} \leq 1$  且  $0 \leq \frac{C_g-P}{-xm+(1-k)C_R-P} \leq 1$  时,双方混合策略的稳定性。

求解式(9)可得系统的5个局部均衡点为(0,0)、(0,1)、(1,0)、(1,1)和(*x*<sub>1</sub>,*y*<sub>1</sub>)。其中:

$$x_1 = \frac{(1-k)C_R-P+\sqrt{\Delta_1}}{2m}$$

$$y_1 = \frac{2\Delta R}{(1+k)C_R+P+\sqrt{\Delta_1}}$$

$$\Delta_1 = [(1-k)C_R-P]^2 - 4m(C_g-P)$$

此时,式(9)的 Jacobian 矩阵为

$$J' = \begin{bmatrix} \frac{\partial F'(x)}{\partial x} & \frac{\partial F'(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F'(y)}{\partial x} & \frac{\partial F'(y)}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} \\ a'_{21} & a'_{22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中:

$$a'_{11} = (1-2x)[-ΔR+y(xm+kC_R+P)]+x(1-x)ym$$

$$a'_{12} = x(1-x)[xm+kC_R+P]$$

$$a'_{21} = y(1-y)[(1-k)C_R-xm-P]$$

$$a'_{22} = (1-2y)\{-C_g+P+x[(1-k)C_R-xm-P]\}$$

基于 Jacobian 矩阵的局部稳定分析法,对式(9)各均衡点进行稳定性分析,结果如表5所示。

表5 情景2中各均衡点的稳定性分析  
Tab.5 Analysis of the stability of each equilibrium point in Scenario 2

Equilibrium point	det <i>J</i>	tr <i>J</i>	Stability
(0,0)	-	Uncertain	Saddle point
(0,1)	-	Uncertain	Saddle point
(1,0)	-	Uncertain	Saddle point
(1,1)	-	Uncertain	Saddle point
( <i>x</i> <sub>1</sub> , <i>y</i> <sub>1</sub> )	-	0	Center point

由此可得结论2:仅当奖励政策为动态时,网络货运平台与政府监管部门之间仍不存在演化稳定策略(ESS)。

2.3 情景3 奖惩政策仅有惩罚政策为动态

假设政府监管部门对网络货运平台的惩罚与网络货运平台的策略选择有关并且呈线性关系,即政府监管部门对网络货运平台的惩罚为 *P*=(1-*x*)*p* (*p* 为政府监管部门对网络货运平台的惩罚上限)。此时,系统的复制动态方程可修改为

$$\left\{ \begin{aligned} F''(x) &= x(1-x)\{-ΔR+y[kC_R+M+(1-x)p]\} \\ F''(y) &= y(1-y)\{-C_g+(1-x)p+x[(1-k)C_R-M-(1-x)p]\} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

仅讨论  $0 \leq \frac{\Delta R}{kC_R+M+(1-x)p} \leq 1$  且  $0 \leq \frac{C_g-(1-x)p}{(1-k)C_R-M-(1-x)p} \leq 1$  时,双方混合策略的稳定性。

求解式(11)可得系统的5个局部均衡点为(0,0)、(0,1)、(1,0)、(1,1)和(*x*<sub>2</sub>,*y*<sub>2</sub>)。其中:

$$x_2 = \frac{M+2p-(1-k)C_R+\sqrt{\Delta_2}}{2p}$$

$$y_2 = \frac{2\Delta R}{(k+1)C_R+M-\sqrt{\Delta_2}}$$

$$\Delta_2 = [(1-k)C_R-M-2p]^2 - 4p(-C_g+P)$$

此时,式(11)的 Jacobian 矩阵为

$$J'' = \begin{bmatrix} \frac{\partial F''(x)}{\partial x} & \frac{\partial F''(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F''(y)}{\partial x} & \frac{\partial F''(y)}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a''_{11} & a''_{12} \\ a''_{21} & a''_{22} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中:

$$a''_{11} = (1-2x)\{-ΔR+y[kC_R+M+(1-x)p]\}-x(1-x)yp$$

$$\begin{aligned}
 a''_{12} &= x(1-x)[kC_R+M+(1-x)p] \\
 a''_{21} &= y(1-y)[(1-k)C_R-M-2p(1-x)] \\
 a''_{22} &= (1-2y)\{-C_g+(1-x)p+x[(1-k)C_R-M-(1-x)p]\}
 \end{aligned}$$

基于 Jacobian 矩阵的局部稳定分析法,对式(11)均衡点进行稳定性分析,结果如表 6 所示。

表 6 情景 3 中各均衡点的稳定性分析  
**Tab.6 Analysis of the stability of each equilibrium point in Scenario 3**

Equilibrium point	det <i>J</i>	tr <i>J</i>	Stability
(0,0)	-	Uncertain	Saddle point
(0,1)	-	Uncertain	Saddle point
(1,0)	-	Uncertain	Saddle point
(1,1)	-	Uncertain	Saddle point
( <i>x</i> <sub>2</sub> , <i>y</i> <sub>2</sub> )	+	-	ESS

由此可得结论 3:当只有惩罚政策为动态时,系统在(*x*<sub>2</sub>,*y*<sub>2</sub>)处渐进稳定,网络货运平台与政府监管部门之间存在一个演化稳定策略(ESS)。在这种情况下,网络货运平台选择策略 *O*<sub>1</sub> 的概率为 *x*<sub>2</sub>,政府监管部门选择策略 *G*<sub>1</sub> 的概率为 *y*<sub>2</sub>。

### 2.4 情景 4 奖惩政策均为动态

假设政府监管部门对网络货运平台的奖励和惩罚都与网络货运平台的策略选择有关,分别用 *M*=*xm*,*P*=(1-*x*)*p* 代替式(3)中的 *M* 和 *P*,此时,系统的复制动态方程可修改为

$$\begin{cases}
 F'(x) = x(1-x)\{-\Delta R + y[kC_R + xm + (1-x)p]\} \\
 F'(y) = y(1-y)\{-C_g + (1-x)p + x[(1-k)C_R - xm - (1-x)p]\}
 \end{cases} \quad (13)$$

仅讨论  $0 \leq \frac{\Delta R}{kC_R + xm + (1-x)p} \leq 1$  且  $0 \leq$

$\frac{C_g - (1-x)p}{(1-k)C_R - xm - (1-x)p} \leq 1$  且时,双方混合策略的稳定性。

求解式(13)可得系统的 5 个局部均衡点为(0,0),(0,1),(1,0),(1,1)和(*x*<sub>3</sub>,*y*<sub>3</sub>),其中:

$$x_3 = \frac{2p - (1-k)C_R + \sqrt{\Delta_3}}{2(p-m)}$$

$$y_3 = \frac{2\Delta R}{(k+1)C_R + 2p - \sqrt{\Delta_3}}$$

$$\Delta_3 = [(1-k)C_R - 2p]^2 - 4(p-m)(-C_g + p)$$

此时,式(13)的 Jacobian 矩阵为

$$J''' = \begin{bmatrix} \frac{\partial F'''(x)}{\partial x} & \frac{\partial F'''(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F'''(y)}{\partial x} & \frac{\partial F'''(y)}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a'''_{11} & a'''_{12} \\ a'''_{21} & a'''_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中:

$$a'''_{11} = (1-2x)\{-\Delta R + y[kC_R + xm + (1-x)p]\} - x(1-x)y(p-m)$$

$$a'''_{12} = x(1-x)[kC_R + xm + (1-x)p]$$

$$a'''_{21} = y(1-y)[(1-k)C_R - p - 2x(1-m)]$$

$$a'''_{22} = (1-2y)\{-C_g + (1-x)p + x[(1-k)C_R - xm - (1-x)p]\}$$

基于 Jacobian 矩阵的局部稳定分析法,对式(13)各均衡点进行稳定性分析,结果如表 7 所示。

表 7 情景 4 中各均衡点的稳定性分析  
**Tab.7 Analysis of the stability of each equilibrium point in Scenario 4**

Equilibrium point	det <i>J</i>	tr <i>J</i>	Stability
(0,0)	-	Uncertain	Saddle point
(0,1)	-	Uncertain	Saddle point
(1,0)	-	Uncertain	Saddle point
(1,1)	-	Uncertain	Saddle point
( <i>x</i> <sub>3</sub> , <i>y</i> <sub>3</sub> )	+	-	ESS

由此可得结论 4:奖惩政策均为动态时,系统在点(*x*<sub>3</sub>,*y*<sub>3</sub>)处渐进稳定,网络货运平台与政府监管部门间存在一个演化稳定策略(ESS)。在这种情况下,网络货运平台选择策略 *O*<sub>1</sub> 的概率为 *x*<sub>3</sub>,政府监管部门选择策略 *G*<sub>1</sub> 的概率为 *y*<sub>3</sub>。

### 3 数值验证及仿真

为了进一步验证系统演化博弈的稳定均衡结果,并比较不同奖惩政策下双方策略的选择,借助数值算例进行分析讨论。在满足模型要求的前提下,考虑到网络货运平台实际运营情况,对初始参数的赋值如表 8 所示。

表 8 初始参数赋值表  
**Tab.8 Initial parameter assignment**

$\Delta R$	<i>C</i> <sub>R</sub>	<i>C</i> <sub>g</sub>	<i>M</i>	<i>P</i>	<i>k</i>	<i>f</i> <sub>1</sub>	<i>f</i> <sub>2</sub>
20	10	20	15	25	0.5	0.4	0.6

则 4 种奖惩机制下,系统的演化路径如图 1 和图 2 所示。

由图 1 和图 2 可知:

1) 当政府监管部门采取静态的奖惩政策时,系统的演化过程是一个闭轨线环,不存在稳定的均衡点,且双方策略的演化呈现周期性行为模式。

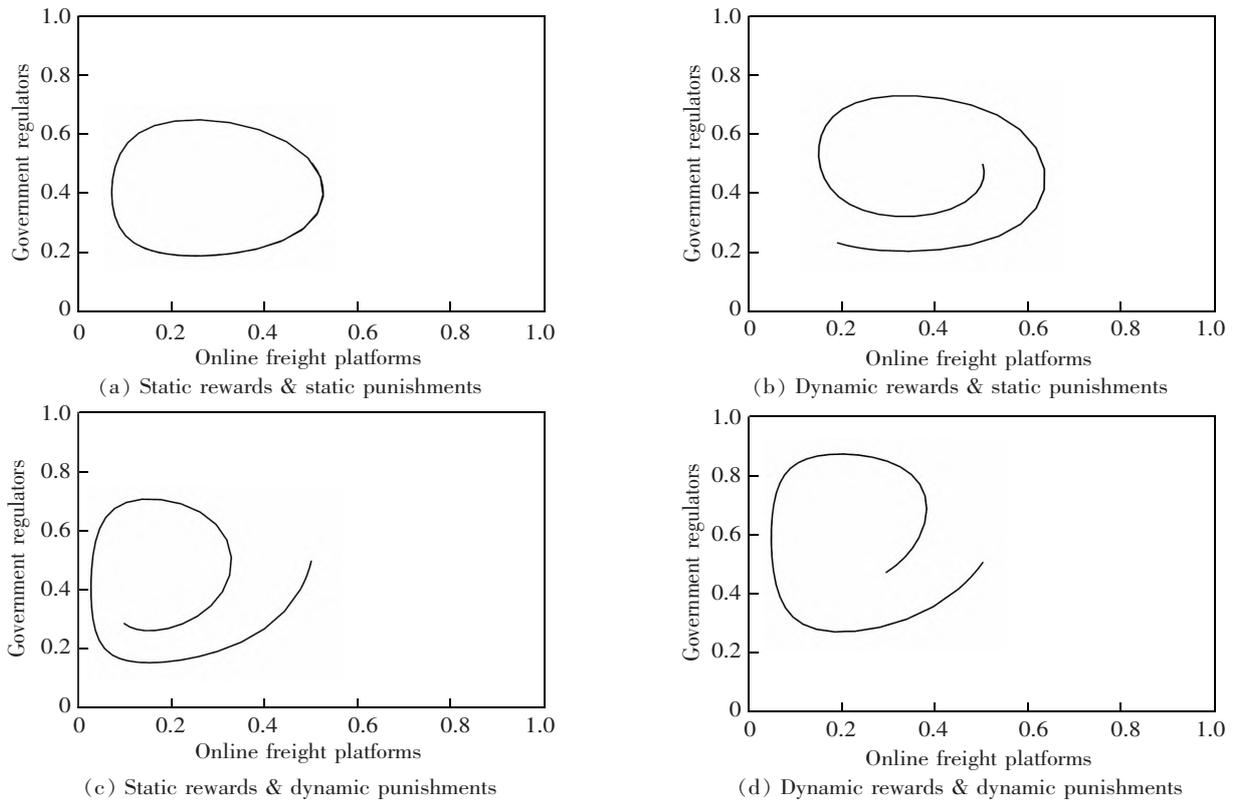


图1 系统在4种奖惩政策下的演化路径

Fig.1 Evolutionary path of the system under four kinds of reward and punishment policies

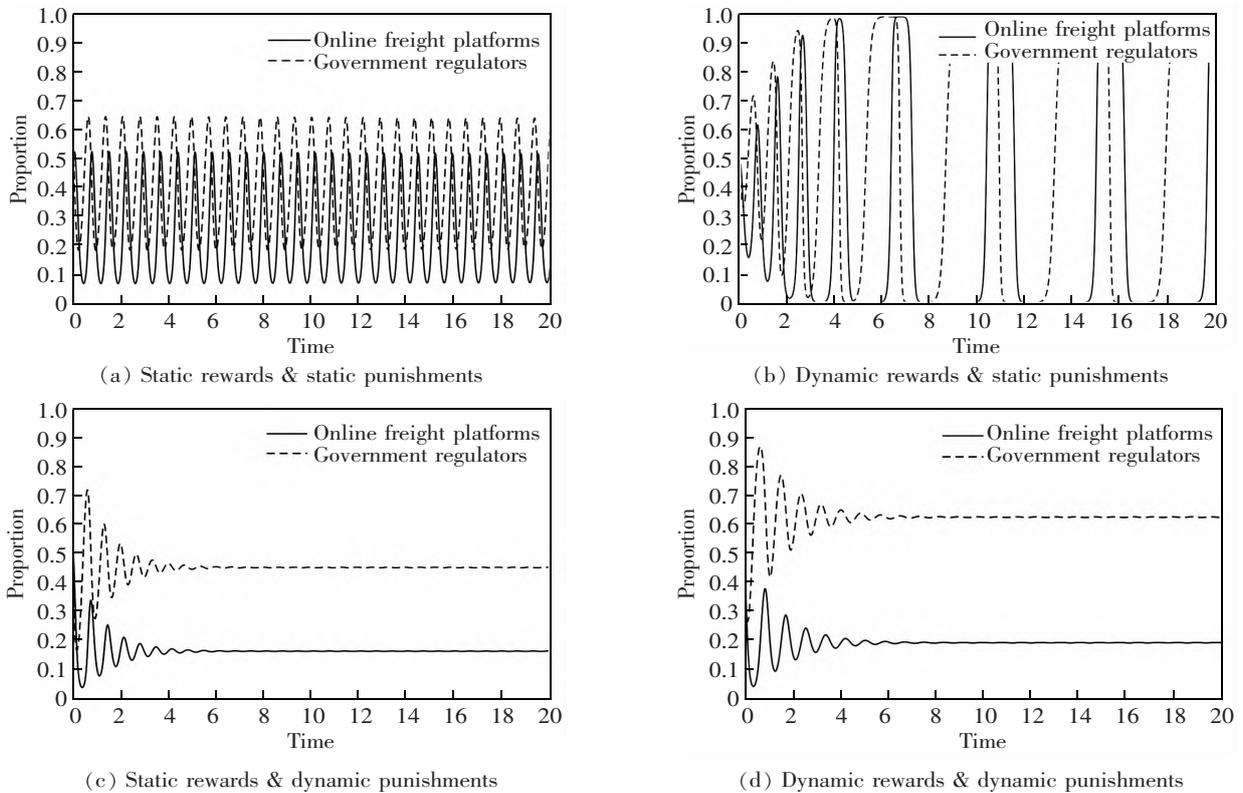


图2 双方策略在4种奖惩政策下的演化路径

Fig.2 The evolutionary path of both parties' strategies under four kinds of reward and punishment policies

2) 当政府监管部门采取“动态奖励+静态惩罚”时,系统的演化过程是一个围绕起点的环线,且与静态奖励机制相比,双方策略的振荡幅度明显增大,博弈过程将保持不稳定的状态。

3) 当政府监管部门采取“静态奖励+动态惩罚”时,系统的演化过程是逐渐收敛的,而双方策略的演化过程也随着时间和博弈次数的增加而逐渐收敛,最终趋于稳定。

4) 当政府监管部门实行动态奖惩政策时,双方策略都是经过短暂的振荡之后,逐渐收敛趋于稳定。

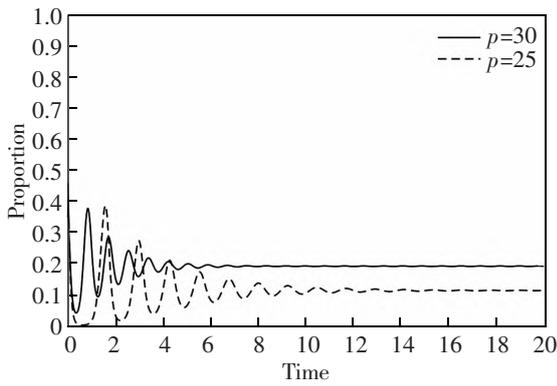
5) 虽然采取动态惩罚政策的两种情形最终都趋于稳定,但相比之下,网络货运平台选择策略  $O_1$  的概率和政府监管部门选择策略  $G_1$  的概率均比动态奖励政策时更高。

在动态奖惩政策下,进一步讨论奖励与惩罚强度对系统演化路径的影响。

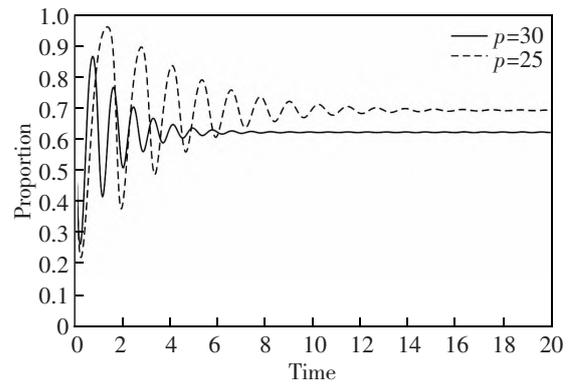
1) 惩罚力度变化对双方策略的影响。由图 3 可知,在保持其他参数不变的情况下,随着惩罚力度的增加, $x, y$  均逐步趋于稳定, $x$  随着惩罚力度的增加而增加, $y$  随着惩罚力度的增加而减少。

2) 奖励力度变化对双方策略的影响。由图 4 可知,在保持其他参数不变的情况下,随着奖励力度的增加, $x, y$  均逐步趋于稳定, $x$  随着奖励力度的增加而增加, $y$  随着奖励力度的增加而减少,但是变化幅度都比较小。

由此可得结论 5: 在保持其他参数不变的情况下,调整奖惩力度都会对双方策略变化造成影响。无论是增加奖励力度还是惩罚力度,网络货运平台都倾向于选择策略  $O_1$ , 但是奖励力度的改变引起  $x$  的涨幅变化较小,这说明奖励力度增大对网络货运平台的激励作用有限,惩罚力度增大对网络货运平台的约束作用更为显著。



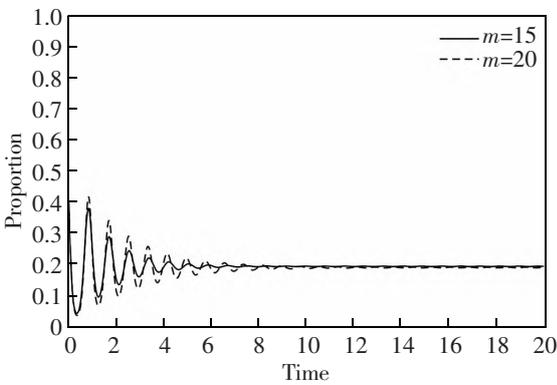
(a) Online freight platforms



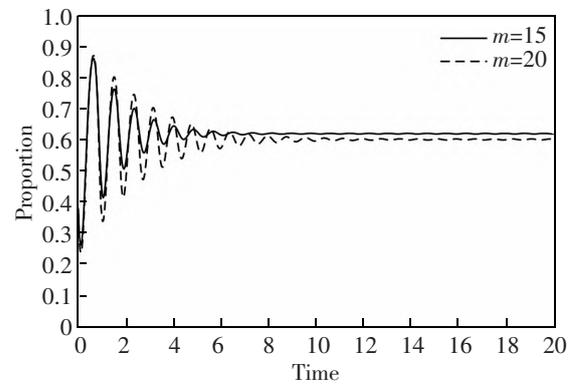
(b) Government regulators

图 3 惩罚力度对网络货运平台与政府监管部门策略的影响

Fig.3 The impact of punishment on the strategies of online freight platforms and government regulators



(a) Online freight platforms



(b) Government regulators

图 4 奖励力度对网络货运平台与政府监管部门策略的影响

Fig.4 The impact of rewards on the strategies of online freight platforms and government regulators

## 4 结论

1) 当政府监管部门采取静态奖惩政策时,系统的演化过程是一个闭轨线环,没有稳定的均衡点。以往政府监管部门一成不变的监管模式明显无法发挥好监管平台的作用,亟需通过调整奖惩政策来引导或激励网络货运平台合规运营,从而达到规范市场的目的。

2) 当政府监管部门采取静态惩罚时,无论奖励政策是静态还是动态,系统均不存在稳定的均衡点;而当政府监管部门采取动态惩罚时,系统的演化过程均逐渐收敛趋于稳定,其中动态奖惩政策提供了更多的激励,网络货运平台选择“合规运营”策略的概率更高,所以动态奖惩政策相较于其他3种奖惩政策效果更好。

3) 增加惩罚力度对网络货运平台有很大的震慑作用,所以政府监管部门要加大惩罚力度。这不仅会增加网络货运平台合规运营的概率,也减少政府监管部门的工作量,降低了监管成本。

4) 政府监管部门要根据网络货运平台的行为策略对奖惩政策做出科学的动态调整。对处于初创期的网络货运平台,政府监管部门应采取奖励为主,惩罚为辅的措施,以扶持网络货运平台发展。随着网络货运平台市场日益成熟,政府监管部门则应以监管和惩罚为主。

### 参考文献:

- [1] LI L, LI G, LIANG S. Does government supervision suppress free-floating bike sharing development? Evidence from Mo-bike in China[J]. *Information Technology for Development*, 2021, 27(4): 802-826.
- [2] HOFMANN S, YETSEIN S, BRACCINI A M, et al. The public sector's roles in the sharing economy and the implications for public values[J]. *Government Information Quarterly*, 2019, 36(4): 101399.
- [3] KRAMER J, SCHNURR D. Is there a need for platform neutrality regulation in the EU?[J]. *Telecommunications Policy*, 2018, 42(7): 514-529.
- [4] FARRELL J, KATZ M L. Innovation rent extraction and integration in systems markets[J]. *The Journal of Industrial Economics*, 2000, 48(4): 413-432.
- [5] PIRACHA A, SHARPLES R, FORREST J, et al. Racism in the sharing economy: Regulatory challenges in a neo-liberal cyber world[J]. *Geoforum*, 2019, 98: 144-152.
- [6] 王勇, 陈美瑛. 平台经济治理中的私人监管和规制[J]. *经济社会体制比较*, 2020(4): 62-68.  
WANG Y, CHEN M Y. Division of work between private monitoring and public regulation in the platform governance process[J]. *Comparative Economic & Social Systems*, 2020(4): 62-68.
- [7] WILKIN C L, CAMPBELL J, MOORE S, et al. Creating value in online communities through governance and stakeholder engagement[J]. *International Journal of Accounting Information Systems*, 2018, 30: 56-68.
- [8] 汪旭晖, 张其林. 平台型网络市场“平台—政府”二元管理范式研究: 基于阿里巴巴集团的案例分析[J]. *中国工业经济*, 2015(3): 135-147.  
WANG X H, ZHANG Q L. Research on dual management paradigm of “platform-governance” in platform-mediated network market: A case study of Alibaba[J]. *China Industrial Economics*, 2015(3): 135-147.
- [9] 汪旭晖, 张其林. 平台型网络市场中的“柠檬问题”形成机理与治理机制: 基于阿里巴巴的案例研究[J]. *中国软科学*, 2017(10): 31-52.  
WANG X H, ZHANG Q L. Formation mechanism and governance mechanism of lemon problem in platform-mediated network market: A case study of Alibaba[J]. *China Soft Science*, 2017(10): 31-52.
- [10] CHAUDHURI A, DATTA P P, FERNANDES K J, et al. Optimal pricing strategies for manufacturing as a service platforms to ensure business sustainability[J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 234: 108065.
- [11] KUNG L C, ZHONG G Y. The optimal pricing strategy for two-sided platform delivery in the sharing economy[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 101: 1-12.
- [12] 甘卫华, 苏雷, 鄢伟安, 等. 公路货运平台延迟赔付服务定价策略研究[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(2): 202-209.  
GAN W H, SU L, YAN W A, et al. Research on pricing strategy of delay compensation service for highway freight platform[J]. *Operations Research and Management Science*, 2021, 30(2): 202-209.
- [13] 桂云苗, 程静, 龚本刚. 动态竞争下网络货运平台信息策略与定价研究[J]. *系统科学与数学*, 2021, 41(10): 2892-2905.  
GUI Y M, CHENG J, GONG B G. Research on information strategy and pricing of network freight platform under dynamic competition[J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2021, 41(10): 2892-2905.

- [14] LIU W, LONG S, WEI S, et al. Smart logistics ecological cooperation with data sharing and platform empowerment[J]. *International Journal of Production Research*, 2022, 60(13/14): 4295–4315.
- [15] 雷丽彩, 高尚, 蒋艳. 网约车新政下网约车平台与网约车司机的演化博弈分析[J]. *管理工程学报*, 2020, 34(1): 55–62.  
LEI L C, GAO S, JIANG Y. Evolutionary game analysis of car-hailing industry between platforms and drivers based on new policies of car-hailing[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2020, 34(1): 55–62.
- [16] LIU W, LONG S, XIE D, et al. How to govern the big data discriminatory pricing behavior in the platform service supply chain? An examination with a three-party evolutionary game model[J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 231: 107910.
- [17] 付淑换, 石岚然. 网约车行业监管困境的演化博弈分析及优化对策[J]. *经济问题*, 2019(12): 8–15.  
FU S H, SHI K R. Evolutionary game analysis of regulatory dilemma in online car-hailing and optimizing policy[J]. *On Economic Problems*, 2019(12): 8–15.
- [18] 甘卫华, 曹坪, 李春芝. 基于演化博弈的中小型货运企业平台化转型研究[J]. *华东交通大学学报*, 2021, 38(5): 8–15.  
GAN W H, CAO P, LI C Z. Research on the platform transformation of small and medium freight enterprises based on evolutionary game[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2021, 38(5): 8–15.
- [19] ZHANG S. Evolutionary game research on the supervision of network cars based on the network platform under the punishment mechanism[J]. *Journal of Mathematics and Informatics*, 2019, 16: 77–85.
- [20] HE H, ZHU L. Online shopping green product quality supervision strategy with consumer feedback and collusion behavior[J]. *Plos One*, 2020, 15(3): e0229471.
- [21] 李亚兵, 张家瑞. 网络直播治理策略的演化博弈: 基于利益相关者视角[J]. *经济与管理*, 2020, 34(2): 25–31.  
LI Y B, ZHANG J R. Evolutionary game of webcast governance strategy: stakeholder perspective[J]. *Economy and Management*, 2020, 34(2): 25–31.
- [22] WU B, CHENG J, QI Y. Tripartite evolutionary game analysis for “deceive acquaintances” behavior of e-commerce platforms in cooperative supervision[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, 550: 123892.
- [23] 吴斌, 程晶, 宋琰. 心理账户视角下电商平台“杀熟”现象演化博弈分析[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(11): 37–44.  
WU B, CHENG J, SONG Y. Evolutionary game analysis of the phenomenon of deceiving acquaintances in e-commerce platform from the perspective of mental account[J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(11): 37–44.
- [24] 曹裕, 王显博, 万光羽. 平台参与下网络食品安全政府监管策略研究[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(6): 111–117.  
CAO Y, WANG X B, WAN G Y. Research on government regulation strategy of internet food safety on platform participation[J]. *Operations Research and Management Science*, 2021, 30(6): 111–117.
- [25] FRIEDMAN D. Evolutionary games in economics[J]. *Journal of the Econometric Society*, 1991, 221: 637–666.



第一作者: 甘卫华(1969—), 女, 教授, 博士, 研究方向为物流与供应链管理。E-mail: weihuagan@163.com。



通信作者: 刘郑(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为物流与供应链管理。E-mail: leo19970727@163.com。

(责任编辑: 刘棉玲)