

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.04.014

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:吕俊娜,朱游敏. 动态奖惩机制下道路 PPP 项目社会资本安全绩效投入行为演化研究[J]. 西安理工大学学报, 2024,40(4):574-583.

LÜ Junna, ZHU Youmin. Research on the evolution of safety performance investment behavior of the private sector in road PPP projects under dynamic premium-penalty mechanism [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(4):574-583.

动态奖惩机制下道路 PPP 项目社会资本安全绩效投入行为演化研究

吕俊娜, 朱游敏

(重庆交通大学 经济与管理学院, 重庆 400074)

摘要: 为激励社会资本加大安全绩效投入,政府亟需设计科学的奖惩机制以提高道路 PPP 项目安全绩效水平。本文分别构建了政府静态和动态奖惩机制下社会资本安全绩效投入策略演化博弈模型,研究了不同奖惩机制下道路 PPP 项目双方策略演化互动过程。研究表明:动态奖惩机制可以有效弥补静态奖惩机制的缺点,使得双方策略达到稳定均衡状态;社会资本加大安全绩效投入提升道路安全绩效行为的概率与惩罚上限值成正比,与激励监管成本和奖励上限值成反比。

关键词: 道路 PPP 项目; 动态奖惩机制; 安全绩效投入; 演化博弈

中图分类号:F282

文献标志码:A

文章编号:1006-4710(2024)04-0574-10

Research on the evolution of safety performance investment behavior of the private sector in road PPP projects under dynamic premium-penalty mechanism

LÜ Junna, ZHU Youmin

(School of Economics and Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To motivate the private sector to increase safety performance investment, the government needs to design a scientific premium-penalty mechanism by which to improve the safety performance level of road PPP projects. This paper constructs the model for the evolution of the private sector's safety performance investment strategy under the government's static and dynamic premium-penalty mechanism and studies the interactive process of strategy evolution between both parties of road PPP projects under different premium-penalty mechanisms. The results indicate that the dynamic premium-penalty mechanism could make up for the shortcomings from using the static premium-penalty mechanism effectively and make the strategies of both sides reach a stable equilibrium state; the probability of the private sector chosen to improve the road safety performance by increasing safety performance investment is directly proportional to the upper limit of the penalty and is inversely proportional to the incentive regulatory cost and the upper limit of reward.

Key words: road PPP projects; dynamic premium-penalty mechanism; safety performance investment; evolutionary game

根据世界卫生组织发布的《2018 年全球道路安全状况报告》,全球每年有 130 多万人死于道路交通

事故^[1];预计到 2030 年,道路交通事故将成为第七大死亡原因,道路交通事故将使低收入和中等收入

收稿日期:2022-10-26; 网络首发日期:2023-10-18

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20231016.1812.002>

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(71701028);教育部人文社会科学青年基金项目(15YJCZH105)

通信作者:吕俊娜,女,博士,副教授,研究方向为 PPP 项目投融资决策与管理。E-mail: wqljn@126.com

国家损失高达国内生产总值的 5%^[2]。因此,各国相关机构都将提升道路安全作为实现社会效益最大化的基本目标之一。采取 PPP 模式建设运营道路项目,社会资本方在特许期承担道路安全管理的责任^[3]。然而 PPP 模式中政府和社会资本目标的天然差异性^[4],导致社会资本会产生以谋取私利为目标的投机行为^[5],具体表现为社会资本往往会利用信息不对称条件,采取降低运营服务质量、降低道路养护频率或标准等机会主义行为,以达到节约成本目的^[6],从而引发道路安全问题^[7]。解决道路安全问题,仅仅凭借运营维护合同不足以激励社会资本加大安全绩效投入,提供足够水平的服务,而需要在 PPP 合同中引入与奖励和惩罚挂钩的绩效激励机制才能平衡政府和社会资本方的利益目标^[8]。因此,如何设计科学有效的奖惩机制以激励社会资本加大安全绩效投入,是本文理论与实践亟待解决的关键问题。

PPP 项目激励机制不仅能减少 PPP 项目不确定性,还能一定程度上保障政府以及社会公众的利益^[9],因此关于 PPP 项目激励机制以及道路 PPP 项目激励机制的研究引起了学者们的广泛关注,如徐飞等^[10]通过建立两阶段委托代理模型,分析了与激励机制相关的政府监督以及社会资本最优努力水平等因素,提出了 PPP 项目权变激励机制;Rangel 等^[11]采用负二项式回归模型分析了道路安全激励对高速公路 PPP 事故减少的正向影响;文献^[12]采用组合熵权秩和比(RSR)法研究道路安全绩效评价基准指数;曹启龙等^[13]基于声誉激励构建了显性激励和隐形激励相结合的最优动态激励契约模型;张宏等^[14]从政府方出发,基于委托代理理论构建动态绩效激励模型,研究了不同激励参数调整下社会资本方付出最优努力和政府方获得最大社会效益的激励机制;莫俊文等^[15]以高速公路绿化率为激励指标,构建对称信息和不对称信息下的激励机制,避免了机会主义行为的出现;Albalade 等^[16]基于固定效应面板数据模型,探究了道路 PPP 合同道路安全激励措施对道路安全的正向作用;王先甲等^[17]引入公平偏好理论改进了基于双重信息不对称的 PPP 项目激励机制;Alves 等^[18]基于巴西 2007—2017 年联邦高速公路的每日数据,运用双重差分方法检验 PPP 模式与道路安全的因果效应,证明在 PPP 特许经营合同中加入基于安全的激励措施可以显著改善道路安全表现;文献^[19]通过案例分析,探究了道路 PPP 项目安全管理激励机制对提升道路安全管理的作用。上述文献为道路 PPP 项目安全绩效激励机制的研究提供了理论支撑,但同时存在以下不

足:①现有研究大多是采用实证方法来探究道路安全激励机制与提升道路安全之间的关系,但对于政府应该如何的道路 PPP 合同中设置有效的安全绩效激励机制以激励社会资本加大安全绩效投入,目前研究还比较少;②现有关于 PPP 项目激励机制的研究主要是基于委托代理理论来构建绩效激励模型,忽视了 PPP 项目中政府和社会资本的策略选择并不总是静态唯一^[20],缺乏对 PPP 合同双方策略选择的互动关系的探究。

针对双方策略的动态演化,学者们多采用博弈理论进行研究,如王颖林等^[5]构建了“激励-努力博弈模型”,提出只有奖惩额度在合理范围内的激励机制才能发挥最有效的作用;Wang 等^[21]运用博弈论,分析了投资者潜在的投机策略与政府激励机制的适配性;Yang 等^[22]运用演化博弈模型,探讨了政府方激励与投资方意愿参与 PPP 重建项目绿色改造的策略演化;刘珈琪等^[23]通过建立政府激励与社会资本努力行为博弈模型,研究了事后奖励激励价值。以上研究中关于 PPP 项目政府奖惩机制的设置多为静态固定,而极少探究动态奖惩机制对社会资本行为的影响。因此,本文以道路 PPP 项目为研究对象,利用演化博弈理论,分别构建了静态/动态奖惩机制下社会资本安全绩效投入行为的演化博弈模型,重点分析了不同奖惩机制下社会资本安全绩效投入行为的演化规律,并进一步探究了奖惩上限值、政府激励监管成本以及超额收益分配率对政府激励和社会资本安全绩效投入行为的影响,可为相关道路 PPP 项目的奖惩机制设置提供参考和建议。

1 基本假设与模型构建

1.1 基本假设

道路 PPP 项目通常采用“按量与按效付费”相结合的支付机制,这里的“量”和“效”分别指 PPP 项目特许期内的需求量和绩效。安全绩效是 PPP 项目绩效考核的重要指标之一。为整体提升道路 PPP 项目的安全绩效,政府通常会在 PPP 合同中设置奖惩机制以激励社会资本加大安全投入。面对政府的奖惩机制,社会资本是否会采取积极措施加大安全绩效投入主要取决于为安全绩效提升所投入的成本与其预期收益大小的比较。当社会资本采取消极策略时,政府也会采取惩罚措施。为研究不同奖惩机制下道路 PPP 项目安全绩效投入行为的演化规律,本文提出如下假设。

1) 在道路 PPP 项目特许期内,政府的基本收益为 I_1 ,社会资本基于按量付费的基本收益为 I_2 。

2) 设政府在 PPP 合同中设定的安全绩效基准值为 τ_0 , 若社会资本采取积极措施, 道路安全绩效为 τ_1 ($\tau_1 > \tau_0$), 则政府会给予安全绩效奖励 F ; 若社会资本采取消极措施, 道路安全绩效为 τ_2 ($\tau_2 < \tau_0$), 则政府会施加惩罚 P 。政府实施激励需要付出的监管成本为 C 。

3) 社会资本采取积极措施投入包括提升运营道路服务质量、增加道路养护频率等, 付出的安全绩效成本为 K , 基于按效付费获得的收益为 D , 政府获得的安全效益为 G ; 同时由于道路安全水平提升, 交通需求量增加所带来的 PPP 项目超额收益为 E , 根据 PPP 合同中的风险共担、利益共享原则, 政府超额收益分配比率为 α 。

4) 社会资本采取消极措施投入的安全绩效成本为 B ($B < K$), 采取降低运营服务质量、降低道路养护频率或标准等机会主义行为所节约的道路运营成本为 A , 事故发生给政府带来的间接经济损失为 W 。设政府选择激励的概率为 x_1 , 其中 $x_1 \in [0, 1]$, 则选择不激励的概率为 $1 - x_1$; 社会资本选择采取积极措施的概率为 y_1 , 其中 $y_1 \in [0, 1]$, 则采取机会主义消极措施的概率为 $1 - y_1$ 。

1.2 静态奖惩机制下社会资本安全绩效投入行为演化博弈模型的构建

1.2.1 模型构建

基于以上假设, 政府与社会资本博弈的得益矩阵如表 1 所示。

表 1 静态奖惩机制下 PPP 两大主体博弈的得益矩阵
Tab.1 Payoff matrix of the two main entities evolutionary game of PPP under the static premium-penalty mechanism

政府	社会资本	
	积极措施 (y_1)	消极措施 ($1 - y_1$)
激励 (x_1)	$I_1 - F - C + G + \alpha E$ $I_2 + F + D + (1 - \alpha)E - K$	$I_1 + P - W - C$ $I_2 + A - P - B$
不激励 ($1 - x_1$)	$I_1 + G + \alpha E$ $I_2 + D + (1 - \alpha)E - K$	$I_1 - W$ $I_2 + A - B$

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial H(x_1)}{\partial x_1} & \frac{\partial H(x_1)}{\partial y_1} \\ \frac{\partial H(y_1)}{\partial x_1} & \frac{\partial H(y_1)}{\partial y_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ab \\ cd \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} (1 - 2x_1)[P - C - y_1(P + F)] & -x_1(1 - x_1)(P + F) \\ y_1(1 - y_1)(P + F) & (1 - 2y_1)\{x_1(P + F) + [D - K + (1 - \alpha)E - A + B]\} \end{bmatrix}$$

矩阵的特征值 $\det J_1 = ad - bc$, 矩阵的迹 $\text{tr} J_1 = a + d$, 当均衡点满足条件 $\det J_1 > 0$ 、

令政府激励与不激励情况下的期望收益及平均收益为 G_1 、 G_2 、 \bar{G} , 由表 1 可得:

$$G_1 = y_1(I_1 - F - C + G + \alpha E) + (1 - y_1)(I_1 + P - W - C) \quad (1)$$

$$G_2 = y_1(I_1 + G + \alpha E) + (1 - y_1)(I_1 - W) \quad (2)$$

$$\bar{G} = x_1 G_1 + (1 - x_1) G_2 \quad (3)$$

令社会资本采取积极措施与消极措施情况下的期望收益及平均收益为 E_1 、 E_2 、 \bar{E} , 由表 1 可得:

$$E_1 = x_1(I_2 + F + D + (1 - \alpha)E - K) + (1 - x_1)[I_2 + D + (1 - \alpha)E - K] \quad (4)$$

$$E_2 = x_1(I_2 + A - P - B) + (1 - x_1)(I_2 + A - B) \quad (5)$$

$$\bar{E} = y_1 E_1 + (1 - y_1) E_2 \quad (6)$$

根据式(1)和式(3), 得到政府行为策略的复制动态方程为:

$$H(x_1) = dx_1/dt = x_1(G_1 - \bar{G}) = x_1(1 - x_1)[P - C - y_1(P + F)] \quad (7)$$

同理, 根据式(4)和式(6), 得到社会资本行为策略的复制动态方程为:

$$H(y_1) = dy_1/dt = y_1(E_1 - \bar{E}) = x_1 y_1(1 - y_1)(P + F) + y_1(1 - y_1)[D - K + (1 - \alpha)E - (A - B)] \quad (8)$$

令 $H(x_1) = 0$ 、 $H(y_1) = 0$, 可以得到博弈的均衡点为 $(0, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, 0)$ 、 $(1, 1)$ 和 (x_1^*, y_1^*) , 其中 $x_1^* = \frac{(A - B) - [D - K + (1 - \alpha)E]}{P + F}$ ($x_1^* \in [0, 1]$), $y_1^* = \frac{P - C}{P + F}$ ($y_1^* \in [0, 1]$)。

1.2.2 演化稳定分析

上述均衡点未必是该博弈的演化稳定策略(ESS), 这里采用雅克比矩阵对均衡点的稳定性进行分析。根据复制动态方程式(7)和(8), 可得雅克比矩阵:

$\text{tr} J_1 < 0$ 时, 这一均衡点为该博弈的 ESS 点。通过计算, 可得均衡点 $(0, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, 0)$ 、 $(1, 1)$ 和

(x_1^*, y_1^*) 的稳定性分析情况,如表 2 所示。

表 2 静态奖惩机制下社会资本安全绩效投入均衡点稳定性分析

Tab. 2 Stability analysis of the equilibrium points of safety performance investment by the private sector under the static premium-penalty mechanism

均衡点	情形 1: $A - B < D + (1 - \alpha)E - K$			情形 2: $A - B > D + (1 - \alpha)E - K$		
	det J_1	tr J_1	稳定性	det J_1	tr J_1	稳定性
(0,0)	+	+	不稳定点	-	N	鞍点
(0,1)	+	-	ESS	-	N	鞍点
(1,0)	-	N	鞍点	-	N	鞍点
(1,1)	-	N	鞍点	-	N	鞍点
(x_1^*, y_1^*)		无意义		+	0	中心点

注:N 表示正负不确定,下同。

由表 2 可知,均衡点的稳定性分析要分两种情况讨论。

情形 1:当 $A - B < D + (1 - \alpha)E - K$ 时,系统的演化稳定策略为 (0,1),即政府选择不激励策略,社会资本选择采取积极措施。此策略为一种理想状态。然而,在项目实践中,社会资本安全绩效投入较大,在缺乏政府激励的情况下,会限制其积极策略的实施。

情形 2:当 $A - B > D + (1 - \alpha)E - K$ 时,(0,0)、(0,1)、(1,0)、(1,1) 均不是稳定状态,仅有一个中心点 (x_1^*, y_1^*) ,政府和社会资本的策略选择并不具有稳定性。

基于以上分析,静态奖惩机制难以保证社会资

本采取积极措施,加大安全绩效投入,故本文将在下一节引入动态奖惩机制。

1.3 动态奖惩机制下社会资本安全绩效投入行为演化博弈模型的构建

1.3.1 模型构建

与静态奖惩机制不同,动态奖惩机制将政府的奖励与惩罚看作是关于社会资本采取积极措施策略的概率 y_2 的函数,令奖励 $F(y_2) = (1 - y_2)\bar{F}$,惩罚 $P(y_2) = (1 - y_2)\bar{P}$,其中 \bar{F} 表示政府给予社会资本奖励的上限值; \bar{P} 表示政府给予社会资本惩罚的上限值。由此可得动态奖惩机制下政府与社会资本博弈的得益矩阵,如表 3 所示。

表 3 动态奖惩机制下 PPP 两大主体博弈的得益矩阵

Tab. 3 Payoff matrix of the two main entities evolutionary game of PPP under the dynamic premium-penalty mechanism

政府	社会资本	
	采取积极措施 (y_2)	采取消极措施 ($1 - y_2$)
激励 (x_2)	$I_1 - (1 - y_2)\bar{F} - C + G + \alpha E$ $I_2 + (1 - y_2)\bar{F} + D + (1 - \alpha)E - K$	$I_1 + (1 - y_2)\bar{P} - W - C$ $I_2 + A - (1 - y_2)\bar{P} - B$
不激励 ($1 - x_2$)	$I_1 + G + \alpha E$ $I_2 + D + (1 - \alpha)E - K$	$I_1 - W$ $I_2 + A - B$

用 $F(y_2) = (1 - y_2)\bar{F}$ 和 $P(y_2) = (1 - y_2)\bar{P}$ 替换式(7)和式(8)中的 F 和 P ,可得政府行为策略的复制动态演化方程为:

$$K(x_2) = dx_2/dt = x_2(1 - x_2)\{P(y_2) - C - y_2[P(y_2) + F(y_2)]\} \quad (9)$$

社会资本行为策略的复制动态方程为:

$$K(y_2) = dy_2/dt = y_2(1 - y_2)\{x_2[P(y_2) + F(y_2)] - v\} \quad (10)$$

其中 $v = (A - B) - [D - K + (1 - \alpha)E]$ 。

令 $K(x_2) = 0, K(y_2) = 0$,可得 (0,0)、(0,1)、

(1,0)、(1,1) 和 (x_2^*, y_2^*) 是博弈的均衡点,其中:

$$x_2^* = \frac{2\{(A - B) - [D - K + (1 - \alpha)E]\}}{\bar{F} + \sqrt{4\bar{F}C + 4\bar{P}C + \bar{F}^2}}$$

$$(x_2^* \in [0,1])$$

$$y_2^* = \frac{\bar{F} + 2\bar{P} - \sqrt{4\bar{F}C + 4\bar{P}C + \bar{F}^2}}{2(\bar{P} + \bar{F})}$$

$$(y_2^* \in [0,1])$$

1.3.2 演化稳定分析

与 1.2.2 节的分析类似,可得雅克比矩阵:

$$J_2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial K(x_2)}{\partial x_2} & \frac{\partial K(x_2)}{\partial y_2} \\ \frac{\partial K(y_2)}{\partial x_2} & \frac{\partial K(y_2)}{\partial y_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-2x_2) \{ (1-y_2) [(1-y_2)\bar{P} - y_2\bar{F}] - C \} & -x_2(1-x_2) [2(1-y_2)(\bar{P} + \bar{F}) - \bar{F}] \\ y_2(1-y_2)^2(\bar{P} + \bar{F}) & (1-2y_2) [x_2(1-y_2)(\bar{P} + \bar{F}) - v] + y_2(1-y_2) [-x_2y_2(\bar{P} + \bar{F}) - v] \end{bmatrix}$$

均衡点稳定性分析结果如表 4 所示。

表 4 动态奖惩机制下社会资本安全绩效投入均衡点稳定性分析

Tab. 4 Stability analysis of the equilibrium points of safety performance investment by the private sector under the dynamic premium-penalty mechanism

均衡点	det J_2	tr J_2	稳定性
(0,0)	-	N	鞍点
(0,1)	-	N	鞍点
(1,0)	-	N	鞍点
(1,1)	+	+	不稳定点
(x_2^*, y_2^*)	N	-	渐进稳定点

由表 4 可知,均衡点 (0,0)、(0,1) 和 (1,0) 均为鞍点,均衡点 (1,1) 是不稳定点。根据 Friedman^[24] 的研究,当 $\text{tr}J_2 < 0$ 时,复制动态系统可变得渐进稳定。因此 (x_2^*, y_2^*) 是渐进稳定的焦点,系统具有渐进稳定性。

1.3.3 模型分析

惩罚上限值 \bar{P} 、奖励上限值 \bar{F} 和激励监管成本 C 对政府和社会资本均衡稳定策略 (x_2^*, y_2^*) 的影响分析如下。

推论 1 政府采取激励措施的概率 x_2^* 与惩罚上限值 \bar{P} 成负相关,社会资本采取积极措施加大安全绩效投入的概率 y_2^* 与惩罚上限值 \bar{P} 成正相关。

证明:用惩罚上限值 \bar{P} 对 x_2^* 和 y_2^* 取偏导得 $\frac{\partial x_2^*}{\partial \bar{P}} = -\frac{4vC}{(\bar{F} + \sqrt{4\bar{F}C + 4\bar{P}C + \bar{F}^2})^2 \sqrt{4\bar{F}C + 4\bar{P}C + \bar{F}^2}} < 0,$

$$\frac{\partial y_2^*}{\partial \bar{P}} = \frac{F \sqrt{4\bar{F}C + 4\bar{P}C + \bar{F}^2} + 2C\bar{F} + 2C\bar{P} + \bar{F}^2}{2(\bar{P} + \bar{F})^2 \sqrt{4\bar{F}C + 4\bar{P}C + \bar{F}^2}} > 0.$$

由 $\frac{\partial x_2^*}{\partial \bar{P}} < 0$ 可知,当惩罚上限值越大,政府采取激励措施的概率就越小;而 $\frac{\partial y_2^*}{\partial \bar{P}} > 0$ 表示惩罚上限值越大,社会资本加大安全绩效投入的概率就越大。证毕。

推论 2 政府采取激励措施的概率 x_2^* 与奖励上限值 \bar{F} 成负相关,社会资本采取积极措施加大安全绩效投入的概率 y_2^* 与奖励上限值 \bar{F} 成负相关。

证明:用奖励上限值 \bar{F} 对 x_2^* 和 y_2^* 求偏导得 $\frac{\partial x_2^*}{\partial \bar{F}} = -\frac{v(\sqrt{4\bar{F}C + 4\bar{P}C + \bar{F}^2} + 4C + 2F)}{(F + \sqrt{4\bar{F}C + 4\bar{P}C + \bar{F}^2})^2 \sqrt{4\bar{F}C + 4\bar{P}C + \bar{F}^2}} < 0,$

$$\frac{\partial y_2^*}{\partial \bar{F}} = \frac{2C(\bar{P} + \bar{F}) - \bar{P}(\sqrt{4\bar{F}C + 4\bar{P}C + \bar{F}^2} + \bar{F})}{2\sqrt{4\bar{F}C + 4\bar{P}C + \bar{F}^2}(\bar{P} + \bar{F})^2} < 0.$$

由 $\frac{\partial x_2^*}{\partial \bar{F}} < 0$ 可知,当奖励上限值越大,政府采取激励措施的概率就越小;而 $\frac{\partial y_2^*}{\partial \bar{F}} < 0$ 表明奖励上限值越大,社会资本加大安全绩效投入的概率就越小。证毕。

推论 3 政府采取激励措施的概率 x_2^* 与激励监管成本 C 成负相关,社会资本采取积极措施加大安全绩效投入的概率 y_2^* 与激励监管成本 C 成负相关。

证明:用激励监管成本 C 对 x_2^* 和 y_2^* 求偏导得 $\frac{\partial x_2^*}{\partial C} = -\frac{v(4\bar{F} + 4\bar{P})}{(F + \sqrt{4\bar{F}C + 4\bar{P}C + \bar{F}^2})^2 \sqrt{4\bar{F}C + 4\bar{P}C + \bar{F}^2}} < 0,$

$$\frac{\partial y_2^*}{\partial C} = -\frac{(\bar{P} + \bar{F})}{\sqrt{4\bar{F}C + 4\bar{P}C + \bar{F}^2}(\bar{P} + \bar{F})} < 0.$$

由 $\frac{\partial x_2^*}{\partial C} < 0$ 可知,当激励监管成本值越大,政府采取激励措施的概率就越小;而 $\frac{\partial y_2^*}{\partial C} < 0$ 表示付出的激励监管成本越大,社会资本加大安全绩效投入的概率就越小。证毕。

由推论 1、推论 2 和推论 3 可知,政府设置的负向激励即惩罚,对社会资本的作用比正向激励大,且惩罚上限值越大,越能激励社会资本加大安全绩效投入,以避免高额罚金给自身带来的损失;而激励监管成本升高,不仅会导致政府付出的成本增加、收益减少,而且会对社会资本产生适得其反的作用。

2 算例描述及模型仿真分析

2.1 算例描述

为验证政府静态、动态奖惩机制下道路 PPP 项目社会资本安全绩效投入行为演化稳定性的分析结果,并探讨奖惩上限值和激励监管成本对政府与社会资本策略选择的影响,本文以国内某高速公路 PPP 项目为例,通过 MATLAB 软件进行数值仿真。

GZ 高速公路采用 PPP 模式建设,项目特许期为 25 年,特许期内社会资本负责项目的融资、设计、建造、运营和维护等。PPP 合同约定:项目的收费价格 $T = 150$ 元/辆,超额收益分配比率 $\alpha = 0.25$ 。特许期内政府会定期对项目的设备设施维护、路面质量和硬度等进行检查,同时为激励社会资本加大安全绩效投入,政府会采用以安全为导向的绩效标准和奖惩机制:当实际项目安全绩效高于安全绩效标准时,给予社会资本奖励,反之,则对社会资本实施惩罚。由于 PPP 项目部分真实数据不易获取,本文根据博弈模型均衡点的稳定条件,对以下参数的初始值做出合理假设: $P = 5$ 、 $F = 2$ 、 $C = 1$ 、 $D = 2$ 、 $K = 1.5$ 、 $E = 2$ 、 $A = 3$ 、 $B = 0.5$,以上参数的单位均为百万元。

2.2 仿真分析

2.2.1 静态奖惩机制下社会资本安全绩效投入行为演化博弈模型仿真分析

根据上述项目信息,将参数初始值代入静态奖惩机制下社会资本安全绩效投入行为演化博弈模型的复制动态方程式(7)和(8),可得社会资本和政府的演化路径,如图 1~3 所示。由图 1 可知,随着时间的推进,社会资本的策略选择会从最开始的积极措施逐渐向消极措施方向演化,最终社会资本会在积极措施和消极措施策略之间反复选择;由图 2 可知,随着时间的推进,政府的策略选择最终会在激励和不激励策略之间反复选择;由图 3 可知,政府与社会资本的策略选择路径呈现闭合曲线式,说明政府与社会资本的策略选择是循环往复不稳定的,与情形 2 的分析结果一致。因此,在静态奖惩机制下,政府和社会资本的策略选择呈现循环往复的周期性现象,无法达到稳定状态。

2.2.2 动态奖惩机制下社会资本安全绩效投入行为演化博弈模型仿真分析

动态奖惩机制下,政府奖励为 $F(y_2) = (1 - y_2)\bar{F}$,惩罚为 $P(y_2) = (1 - y_2)\bar{P}$,将各参数值代入复制动态方程式(10),得到社会资本的策略演化过程,如图 4 所示。

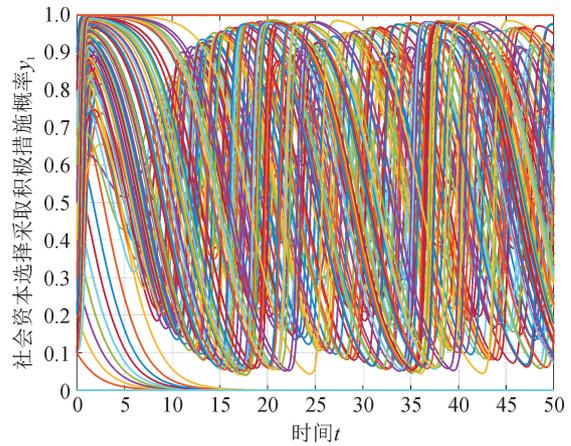


图 1 静态奖惩机制下社会资本不同初始比例演化路径
Fig. 1 Evolutionary paths of the private sector at different initial ratios under the static premium-penalty mechanism

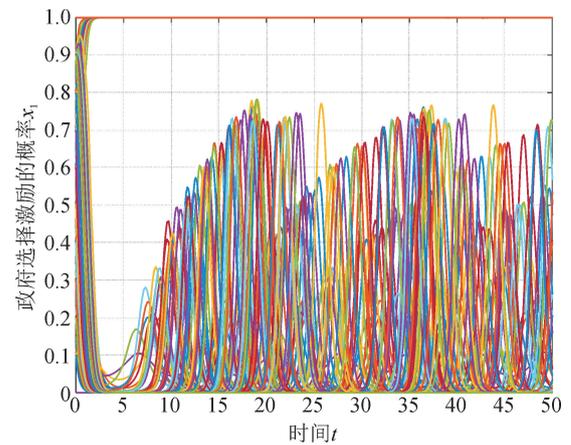


图 2 静态奖惩机制下政府不同初始比例演化路径
Fig. 2 Evolutionary paths of the government at different initial ratios under the static premium-penalty mechanism

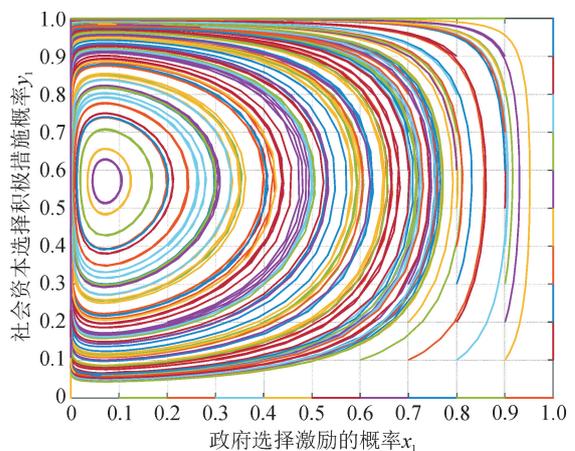


图 3 静态奖惩机制下政府和社会资本不同初始比例演化路径
Fig. 3 Evolutionary path of the government and the private sector at different initial ratios under the static premium-penalty mechanism

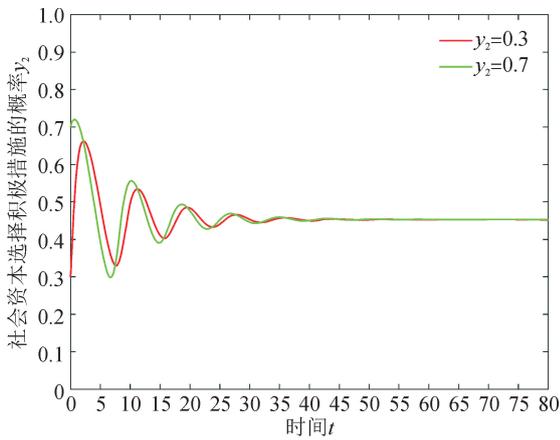


图4 动态奖惩机制下社会资本的演化路径
Fig. 4 Evolutionary path of the private sector under the dynamic premium-penalty mechanism

由图可知,无论社会资本初始采取积极措施的概率是 $y_2 = 0.3$ 还是 $y_2 = 0.7$, 随着时间的推移,最终选择采取积极措施的概率将稳定于 $y_2 \approx 0.46$; 政府的策略演化过程如图 5 所示,政府采取积极措施的概率最终稳定于 $x_2 \approx 0.13$ 。

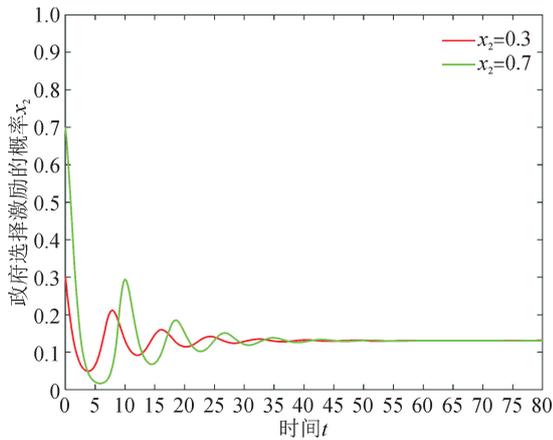


图5 动态奖惩机制下政府的演化路径
Fig. 5 Evolutionary path of the government under the dynamic premium-penalty mechanism

动态奖惩机制下政府与社会资本的策略演化路径如图 6 所示。图 6 表明,在动态奖惩机制激励下,随着时间的推移,双方博弈次数不断增加,使得政府与社会资本的混合策略演化呈现螺旋式收敛的状态,双方策略选择概率演化逐渐稳定于焦点,因此,动态奖惩机制有助于双方策略选择达到稳定状态。这也验证了动态奖惩机制能有效激励社会资本采取积极措施提升道路安全绩效。

将政府采取激励措施和社会资本采取积极措施的初始概率分别设定为 $x_2 = 0.4$ 和 $y_2 = 0.6$, 在其他相关参数不变的情况下,取惩罚上限值分别为 $\bar{P} = 4$ 百万元、 $\bar{P} = 5$ 百万元、 $\bar{P} = 6$ 百万元,分析

其对政府和社会资本的影响。如图 7 所示,政府选择激励的概率随着惩罚上限值的增加而下降;如图 8 所示,社会资本采取积极措施提升道路安全绩效的概率随着惩罚上限值的增加而上升,推论 1 得证。

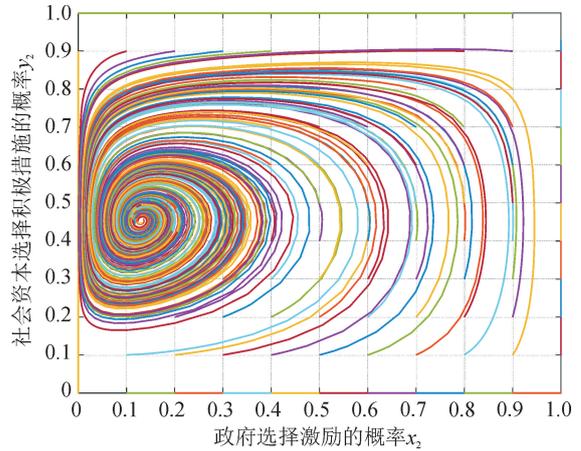


图6 动态奖惩机制下政府和社会资本的演化路径
Fig. 6 Evolutionary path between the government and the private sector under the dynamic premium-penalty mechanism

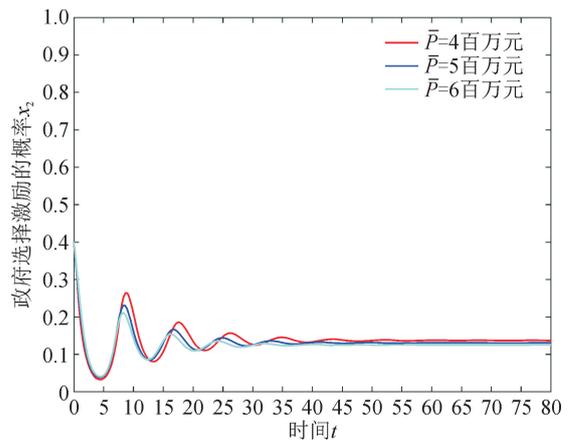


图7 动态奖惩机制下惩罚上限值对政府的影响
Fig. 7 Impact of the upper limit of penalty on government under the dynamic premium-penalty mechanism

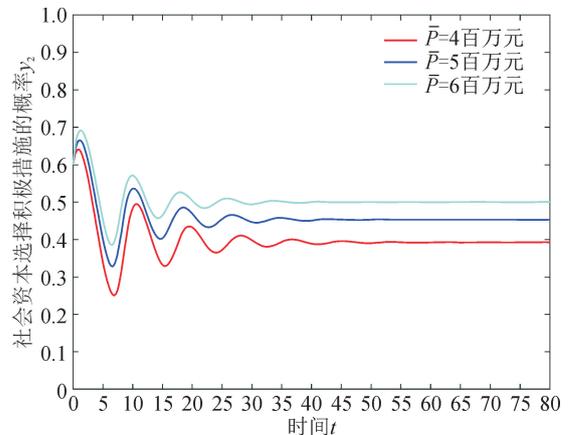


图8 动态奖惩机制下惩罚上限值对社会资本的影响
Fig. 8 Impact of the upper limit of penalty on the private sector under the dynamic premium-penalty mechanism

在其他参数保持不变的情况下,取奖励上限值分别为 $\bar{F} = 2$ 百万元、 $\bar{F} = 3$ 百万元、 $\bar{F} = 4$ 百万元,分析其对政府和社会资本的影响。如图 9 所示,政府采取激励的概率随着激励上限值的增加呈微弱下降趋势;如图 10 所示,社会资本采取积极措施的概率随着奖励上限值的增加而下降,说明政府给予社会资本的奖励越多,短期内能促使社会资本采取积极措施的概率增加,但是高额奖励势必会增加政府的财政负担,降低政府激励的意愿,从而影响社会资本采取积极措施提升道路安全绩效的意愿,降低社会资本的积极性。社会资本采取积极措施的概率下降幅度比政府采取激励措施的概率下降幅度大,推论 2 得证。

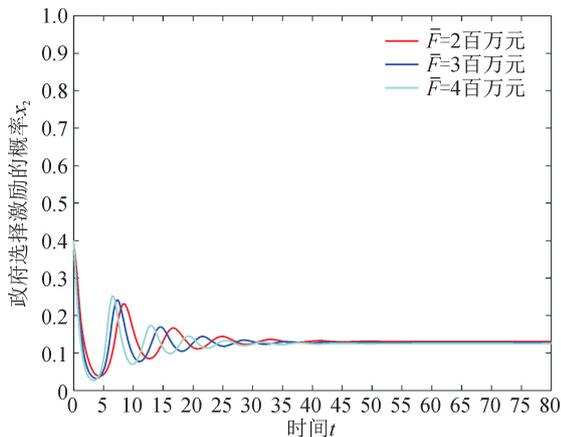


图 9 动态奖惩机制下奖励上限值对政府的影响
Fig. 9 Impact of the upper limit of premium on the government under the dynamic premium-penalty mechanism

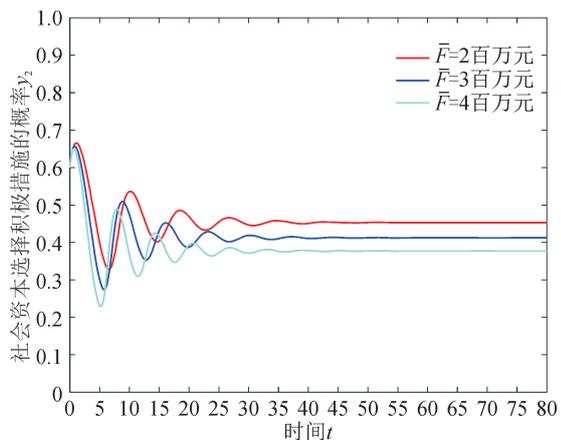


图 10 动态奖惩机制下奖励上限值对社会资本的影响
Fig. 10 Impact of the upper limit of premium on the private sector under the dynamic premium-penalty mechanism

在其他参数保持不变的情况下,取激励监管成本分别为 $C = 1$ 百万元、 $C = 2$ 百万元、 $C = 3$ 百万元,分析其对政府和社会资本的影响。如图 11 所

示,政府采取激励措施的概率随着激励监管成本的增加,其波动性也在增加,最终稳定概率呈现微弱下降趋势;如图 12 所示,社会资本采取积极措施的概率随着激励监管成本的增加而下降,且下降幅度略大。社会资本采取积极措施的概率下降幅度比政府采取激励措施的概率下降幅度大,推论 3 得证。

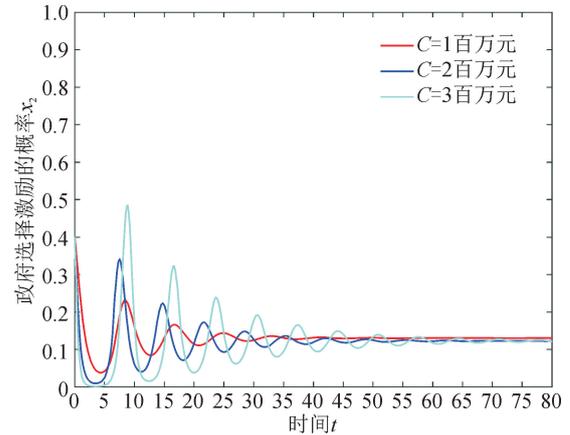


图 11 动态奖惩机制下激励监管成本对政府的影响
Fig. 11 Impact of the incentive regulatory cost on the government under the dynamic premium-penalty mechanism

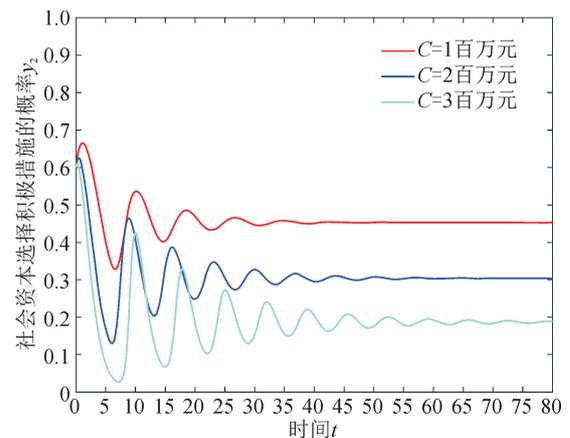


图 12 动态奖惩机制下激励监管成本对社会资本的影响
Fig. 12 Impact of the incentive regulatory cost on the private sector under the dynamic premium-penalty mechanism

由仿真结果可知,政府的动态奖惩机制可以弥补静态奖惩机制的不足;动态奖惩机制下政府与社会资本的策略选择趋于稳定。在动态奖惩机制下,奖惩上限值对政府部门采取激励策略的概率影响并不明显,而对社会资本采取积极措施的策略选择有显著影响:政府给予的惩罚上限值越高,社会资本采取积极措施提升道路安全绩效的概率越大;政府给予的奖励上限值越高,社会资本采取积极措施的概率越低;激励监管成本越高,社会资本采取积极措施的概率越低。

3 结论及建议

安全对于道路 PPP 项目的运营十分重要,通过设置奖惩激励机制来加大社会资本安全绩效投入是一种提升道路安全的方式,但由于双方有限理性且信息不对称,政府与社会资本的策略选择之间存在博弈,本文基于演化博弈理论,研究了静态奖惩机制和动态奖惩机制下政府与社会资本的策略演变,并探究了惩罚与奖励上限值和激励监管成本对政府和社会资本演化策略的影响。

3.1 结论

1) 静态奖惩机制下,系统不存在演化稳定策略,政府和社会资本的博弈行为呈现周期性变化,无法达到稳定状态。

2) 动态奖惩机制下,政府与社会资本的混合策略演化呈现螺旋式收敛的状态,双方策略选择概率演化逐渐稳定于焦点。这表明在动态奖惩机制的激励下,政府和社会资本的博弈可达均衡。

3) 动态奖惩机制下,社会资本采取积极措施的概率与惩罚上限值成正相关,与奖励上限值成负相关。

4) 动态奖惩机制下,政府采取激励策略和社会资本采取积极措施的概率与激励监管成本成负相关,而且社会资本采取积极措施的概率下降幅度比政府采取激励措施的概率下降幅度大。

3.2 建议

1) 为激励道路 PPP 项目社会资本加大安全绩效投入,提升道路安全绩效,政府应当根据社会资本的行为策略对奖惩机制做出科学动态的调整,即采取动态奖惩机制。

2) 随着社会资本安全投入积极性的增加,政府应适当减少奖励,以惩罚为主,以避免给予过高奖励,增加财政负担。

参考文献:

[1] World Health Organization. Global status report on road safety 2018: Summary [R]. Geneva: World Health Organization, 2018.

[2] World Health Organization. Road safety[R]. Malé: World Health Organization, 2017.

[3] AHMED A A M. The practice of roadway safety management in public-private partnerships[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2021, 147(12): 04021173.

[4] 孟惊雷. PPP 项目风险分担博弈策略研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2019.

MENG Jinglei. Research on game strategy of risk allocation for public-private partnership projects[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.

[5] 王颖林,刘继才,赖芑宇. 基于投资方投机行为的 PPP 项目激励机制博弈研究[J]. 管理工程学报,2016,30(2):223-232.

WANG Yinglin, LIU Jicai, LAI Jiyu. The incentive mechanism of PPP projects by using game theory based on the investor's speculation[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2016, 30(2): 223-232.

[6] XIANG P, ZHOU J, ZHOU X, et al. Construction project risk management based on the view of asymmetric information[J]. Journal of Construction Engineering & Management, 2012, 138(11): 1303-1311.

[7] ALBALATE D, FERNÁNDEZ L, YARYGINA A. The road against fatalities: infrastructure spending vs. regulation? [J]. Accident Analysis and Prevention, 2013, 59: 227-239.

[8] VASSALLO J M. Implementation of quality criteria in tendering and regulating infrastructure management contracts[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2007, 133(8):553-561.

[9] ZHANG H, YU L, ZHANG W. Dynamic performance incentive model with supervision mechanism for PPP projects[J]. Engineering Construction and Architectural Management, 2020, 27(9): 2643-2659.

[10] 徐飞,宋波. 公私合作制(PPP)项目的政府动态激励与监督机制[J]. 中国管理科学,2010,18(3): 165-173.

XU Fei, SONG Bo. The dynamic incentive and monitor mechanism of government in public-private partnership projects[J]. Chinese Journal of Management Science, 2010, 18(3): 165-173.

[11] RANGEL T, VASSALLO J M. Modeling the effect of contractual incentives on road safety performance [J]. Transport Policy, 2015, 40: 17-23.

[12] CHEN F, WU J, CHEN X, et al. Benchmarking road safety performance: identifying a meaningful reference (best-in-class)[J]. Accident Analysis & Prevention, 2016, 86: 76-89.

[13] 曹启龙,周晶,盛昭瀚. 基于声誉效应的 PPP 项目动态激励契约模型[J]. 软科学,2016,30(12):20-23.

CAO Qilong, ZHOU Jing, SHENG Zhaohan. Study on dynamic incentive mechanism of public private partnerships based on the reputation theory[J]. Soft Science, 2016, 30(12): 20-23.

[14] 张宏,乔文珊. 融入再审核的 PPP 项目动态绩效激励

- 机制研究[J]. 浙江大学学报:理学版,2018,45(2): 192-199.
- ZHANG Hong, QIAO Wenshan. Research on the dynamic performance incentive mechanism incorporated with re-examination of PPP project[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2018, 45(2): 192-199.
- [15] 莫俊文,周妍汝,殷怡. 高速公路 PPP 项目激励问题分析[J]. 工程管理学报,2019,33(1):73-78.
- MO Junwen, ZHOU Yanru, YIN Yi. An analysis on incentive problem of expressway PPP projects[J]. Journal of Engineering Management, 2019, 33(1): 73-78.
- [16] ALBALATE D, BEL-PINANA P. The effects of public private partnerships on road safety outcomes [J]. Accident Analysis & Prevention, 2019, 128: 53-64.
- [17] 王先甲,袁睢秋,林镇周,等. 考虑公平偏好的双重信息不对称下 PPP 项目激励机制研究[J]. 中国管理科学,2021,29(10):107-120.
- WANG Xianjia, YUAN Suiqiu, LIN Zhenzhou, et al. Research on incentive mechanism of PPP project under dual information asymmetry based on fair preference [J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(10): 107-120.
- [18] ALVES P J, EMANUEL L, PEREIRA R H M. Highway concessions and road safety: evidence from Brazil [J]. Research in Transportation Economics, 2021, 90: 101118.
- [19] AZIZA M A. The practice of roadway safety management in public-private partnerships [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2021, 147 (12): 4021173.
- [20] 尹贻林,徐志超,邱艳. 公共项目中承包商机会主义行为应对的演化博弈研究[J]. 土木工程学报,2014,47(6):138-144.
- YIN Yilin, XU Zhichao, QIU Yan. Study on countermeasures to contractor's opportunistic behaviors in public project based on evolutionary game theory[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47 (6): 138-144.
- [21] WANG Y, GAO H, LIU J. Incentive game of investor speculation in PPP highway projects based on the government minimum revenue guarantee [J]. Transportation Research Part A, 2019, 125: 20-34.
- [22] YANG X, ZHANG J, SHEN G Q, et al. Incentives for green retrofits: an evolutionary game analysis on public-private-partnership reconstruction of buildings [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 232: 1076-1092.
- [23] 刘珈琪,刘继才,雷晓莹. PPP 项目政府激励与社会资本努力的演化博弈与仿真[J]. 工业工程,2021,24(2):77-84.
- LIU Jiaqi, LIU Jicai, LEI Xiaoying. Evolution game and simulation on government incentive and social capital effort in PPP project [J]. Industrial Engineering Journal, 2021, 24(2): 77-84.
- [24] FRIEDMAN D. Evolutionary game in economics [J]. Econometrica, 1991, 59(3): 637-666.

(责任编辑 周 蓓)