

城市轨道交通产业协同创新投机行为治理

——基于复杂网络博弈的仿真分析

李中会¹, 张思敏², 王哲润¹, 施力子¹, 张阳阳²

(1. 济南轨道交通集团有限公司, 济南 250101; 2. 济南大学管理科学与工程学院, 济南 250024)

摘要: 为了探索城市轨道交通产业协同创新过程中投机行为的微观决策所导致的宏观涌现现象,采用复杂网络演化博弈,将城市轨道交通产业协同创新的所有企业看作小世界网络,建立无约束条件下和治理机制下成员的微观决策模型,使用 Python 软件编程仿真研究微观决策影响因素对协同创新网络的影响。仿真结果表明,在无约束条件下,协同创新成员的创新收益、投入成本与挪用收益之间的关系大小对投机行为的最终选择比例有显著影响;网络规模对成员最终选择投机行为影响不大,但对演化时间进程有显著影响。在治理机制下,加大惩罚力度、监管概率与声誉损失能够有效抑制投机行为。

关键词: 城市轨道交通产业; 协同创新; 复杂网络演化博弈; 投机行为

中图分类号: F570.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)02-0254-07

当前,城市轨道交通产业结构不断优化,产业链不断延伸,具有巨大的发展潜力。然而,城市轨道交通产业同时存在着创新实力薄弱、创新体制不完善等问题,严重制约了其创新发展。在此背景下,依靠自身企业的力量已无法满足市场的需求,激烈的外部竞争促使轨道交通企业转向寻求轨道交通产业链上具有优势互补的企业,进行协同创新,以提高自身的创新绩效^[1]。但企业在协同创新过程中出于自身利益最大化目的可能会采取不正当的投机行为,投机行为会使协同创新过程中成员之间的关系协调产生困难^[2],甚至会出现窃取成员技术或不履行相关合作承诺等许多内部问题^[3]。投机是指在交易中缺乏真诚或诚实的自我利益寻求,还包含非真实的信息和不可信承诺^[4]。投机行为的出现会使整个城市轨道交通产业协同创新处于不稳定状态。因此,探讨城市轨道交通产业协同创新过程中投机行为的规律并进行有效治理具有重要意义。

目前,国内外学者研究产业协同创新主要集中在其对于产业融合及转型升级的影响因素、发展路径及作用机制的研究^[5-7],对协同创新主体合作投机

行为研究较少,缺乏针对城市轨道交通产业协同创新投机行为的治理的研究。因此,对产业创新主体合作投机行为进行深入研究,一方面能有效地减少企业创新资源的投入成本,提升企业创新资源使用效率,另一方面可以提高合作企业自身自主创新能力,提高科技转化率。

Parkhe^[8]认为成员之间合作的建立是相互博弈的结果。演化博弈近年来被广泛应用于个体之间微观互动决策机制研究^[9],演化博弈一般假设博弈群体中所有成员以均匀混合的方式相互接触。但在现实中协同创新成员间的联系并非全耦合或完全随机的,现实中许多系统具有网络拓扑特征,如城市轨道交通协同创新^[10]。此外,协同创新成员的演化博弈与网络结构之间有密切的联系。相关研究的实证发现产业技术创新网络符合小世界网络的特征^[11-12],因此,本文将城市轨道交通产业协同创新网络看作小世界网络,从网络演化博弈的视角来研究协同创新成员之间的投机问题,建立无约束条件下和治理机制下成员投机决策博弈模型来描述网络中个体间的决策互动机制,从有限理性特征

收稿日期: 2023-09-17

基金项目: 济南市哲学社会科学研究课题重点项目(JNSK23B15, JNSK22B57); 山东省重点研发计划(软科学)项目(2021RKY04063)

作者简介: 李中会(1981—),男,山东济南人,副研究员,博士,研究方向为轨道交通技术管理、产业组织等;张思敏(2000—),女,湖南常德人,硕士研究生;王哲润(1989—),男,山东济南人,硕士研究生,研究方向为轨道交通咨询;施力子(1995—),女,山东济南人,济南轨道交通集团有限公司,研究方向为轨道交通咨询;张阳阳(1999—),女,山东枣庄人,硕士研究生。

角度描述网络中个体间博弈的演化规则,通过Python编程仿真分别探讨无约束条件下不同收益和网络规模,以及治理机制下的惩罚力度、监管概率和声誉损失等治理因素对协同创新成员投机行为的影响。

1 问题描述与模型构建

城市轨道交通产业协同创新网络平均路径短且聚集系数高,符合小世界网络的特征,因此将城市轨道交通产业协同创新网络抽象为异质的小世界网络,用无向图 $G(V, E)$ 表示。顶点集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示城市轨道交通产业协同创新中所有成员的集合,成员 $v_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 有限理性,且成员之间信息不对称。边集合 $E = \{e_{ij} = 0 \text{ 或 } 1 \mid i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n\}$ 代表两个企业成员之间的合作关系。当 $e_{ij} = 1$ 时,表示两个成员有直接的合作关系;当 $e_{ij} = 0$ 时,表示两个成员没有直接的关系;任意一个成员只参与自己有直接联系的成员博弈。城市轨道交通产业协同创新中任一成员的策略集合为 $P = \{P_1, P_2\}$, P_1 为诚信合作, P_2 为投机行为。

基于此,分别建立无激励机制下与激励机制下联盟成员之间的决策博弈模型。

1.1 无约束下的联盟成员间博弈模型

如表1所示, i, j 为城市轨道交通产业协同创新中任意两个有直接联系的成员。假设成员的收益可以划分为基本收益、创新收益、共享收益、挪用收益4个部分:基本收益 (π_b) 表示不用参加合作就能获得的收益;创新收益 (π_c) 表示成员利用双方共享的知识进行创新所获得的收益;共享收益 (π_s) 表示成员接受或学习对方知识后,在市场上竞争优势增加所获得的收益;挪用收益 (π_d) 即成员采取投机行为,将仅限于合作内的知识或资源挪用到其他地方,从而获得的收益。假设每个成员参与合作需要投入成本 C 。当参加博弈的两个成员同时采取诚实合作时,两个成员获得的收益分别为 $\pi_b + \pi_c + \pi_s - C$;当两个成员同时采用投机行为策略时,两者获得基本收益 π_b ;当参加博弈一方采用诚实合作策略,而另一方采取投机行为策略,两者的收益分别为 $\pi_b - C, \pi_b + \pi_s + \pi_d$ 。

表1 无约束下的城市轨道交通产业协同创新博弈模型

行为策略		成员 i	
		P_1	P_2
成员 j	P_1	$\pi_b + \pi_c + \pi_s - C, \pi_b + \pi_c + \pi_s - C$	$\pi_b - C, \pi_b + \pi_s + \pi_d$
	P_2	$\pi_b + \pi_s + \pi_d, \pi_b - C$	π_b, π_b

1.2 治理机制下的联盟成员间博弈模型

投机行为的防范方式主要有两种:一是通过契约明确违约责任,通过政府、行业协会对投机行为进行处罚,对诚实合作行为进行补偿;二是通过声誉等非正式社会制度的约束与惩罚,促使协同创新成员关注投机行为带来的负面及累积效应^[13-14]。由于投机行为具有难以监管的特点,假设第三方会对投机行为的处罚以一定的监管概率 r 出现罚款 f ,诚实合作的一方得到 f 的成本补偿;一旦某一成员实施投机行为并被对方发现,其声誉损失为 s 。当参与合作的双方同时实施投机行为,双方均不会诉诸第三方,也不会有相应的声誉损失。基于此,参与博弈的成员的支付矩阵如表2所示。

表2 治理机制下的城市轨道交通产业协同创新博弈模型

行为策略		成员 i	
		P_1	P_2
成员 j	P_1	$\pi_b + \pi_c + \pi_s - C, \pi_b + \pi_c + \pi_s - C$	$(\pi_b - c + r) \times f, (\pi_b + \pi_s + \pi_d - r) \times (f - s)$
	P_2	$(\pi_b + \pi_s + \pi_d - r) \times (f - s), (\pi_b - C + r) \times f$	π_b, π_b

1.3 策略演化规则

采用费米规则来设置协同创新成员的策略演化^[15]:在每轮博弈结束后,任意一个成员 i 会随机选取与自己有直接联系的一个邻居 j 进行收益比较,如果邻居的收益高于自己,则以一定的概率模仿邻居的策略,根据统计物理中费米函数表示如下:

$$\omega(p_i \leftarrow p_j) = \frac{1}{1 + \exp[(U_i - U_j)/k]} \quad (1)$$

式中: ω 为其随机选择的邻居策略 j 的概率; p_i 为本轮博弈中成员 i 采取的策略; p_j 为本轮博弈中成员 j 采取的策略; U_i 与 U_j 为本轮博弈中个体 i 与 j 的收益。当 U_i 的值小于 U_j 时,成员 i 倾向于学习成员 j 的策略,并且当两者收益值差值越大,越倾向于学习 j 的策略;当 U_i 的值大于 U_j 的时候, i 也可以以微小的概率学习 j 的策略。这种非理性的学习用噪声系数 k 来描述,表示策略更新过程中的不确定性。当 $k \rightarrow +\infty$ 时,表示系统的噪声非常大, i 无法做出理性决策,策略更新完全是随机的;当 $k \rightarrow 0$ 时,系统不存在噪声,表示确定的模仿规则,即当成员 j 的收益值高于 i 收益值时,个体 i 必然会学习 j 的策略。

2 仿真过程及结果分析

基于上文的研究模型,将城市轨道交通产业协

同创新抽象为异质小世界网络,按照以下步骤进行仿真。

(1)网络及策略初始化。根据 György 和 Gábor^[16]提出的规则构建节点数量为 n 的 NW 小世界网络,并随机初始化博弈策略。假设设定初始阶段选择投机行为的协同创新成员比例为 50%。

(2)协同创新成员博弈。在每一轮博弈周期内,成员与自己有联系的个体进行博弈,并计算收益。

(3)协同创新成员博弈策略更新。成员随机选取邻居节点进行收益比较,并根据公式 $w(p_i \leftarrow p_j)$ 更新新一轮策略。

(4)循环执行。循环执行直到选择投机行为的成员的比例为 y 连续 10 次不再变化,或者达到循环次数 $T=300$ 次的上限。

根据上一节中建立的无约束条件下与治理机制下的不同博弈模型进行仿真,通过改变各参数的数值来研究对城市轨道交通产业协同创新网络中投机行为选择的影响。参照徐莹莹和綦良群^[17]的研究,选择网络规模 $n=50, 200, 500, 1\ 000$ 四种,无约束条件下的基本参数按照正交实验方法设置情况如表 3 所示^[18]。

表 3 无约束条件下参数设置

编码	π_b	π_c	π_s	π_d	C
$J_1, J_{10}, J_{19}, J_{28}$	4	1	2	1	4
$J_2, J_{11}, J_{20}, J_{29}$	4	2	3	2	4
$J_3, J_{12}, J_{21}, J_{30}$	4	3	4	3	4
$J_4, J_{13}, J_{22}, J_{31}$	5	1	3	3	5
$J_5, J_{14}, J_{23}, J_{32}$	5	2	4	1	5
$J_6, J_{15}, J_{24}, J_{33}$	5	3	2	2	5
$J_7, J_{16}, J_{25}, J_{34}$	6	1	4	2	6
$J_8, J_{17}, J_{26}, J_{35}$	6	2	2	3	6
$J_9, J_{18}, J_{27}, J_{36}$	6	3	3	1	6

2.1 无约束下的网络博弈结果分析

在不同协同创新网络规模下,通过改变基本收益、创新收益、共享收益、挪用收益与投入成本的大小进行对比研究,探究无约束机制下影响产业协同创新成员最终选择投机行为的因素,各组参数测试 50 次,取投机行为比例的平均值。仿真结果如图 1 所示。可以得出以下结论。

结论 1:协同创新成员的创新收益、投入成本与挪用收益之间的关系大小对投机行为的最终选择比例有显著影响。创新收益 π_c 越大,成员选择投机行为的概率越小;挪用收益 π_d 与投入成本 C 越高,成员选择投机行为的概率越大;当创新收益 π_c

与投入成本之差大于挪用收益 π_d 时,协同创新网络最终将演化为诚实合作的稳定状态,如图 1 中的 $J_1, J_6, J_9, J_{10}, J_{15}, J_{18}$;当挪用收益 π_d 大于创新收益 π_c 与投入成本之差时,协同创新网络易陷于“投机行为”的陷阱,如图中 $J_2 \sim J_4, J_8, J_{11} \sim J_{13}, J_{17}$ 。当挪用收益 π_d 与创新收益 π_c 与投入成本之差相等时,投机行为在协同创新网络中的比例具有不稳定性,最终演化结果也具有不确定性。如图 1 中的 $J_5, J_7, J_{14}, J_{16}, J_{23}, J_{25}$ 。

结论 2:城市轨道交通产业协同创新网络规模对成员最终选择投机行为影响不大,但对演化时间进程有显著影响。从图 1 的演化博弈过程来看,除 $J_5, J_7, J_{14}, J_{16}, J_{23}, J_{25}$ 最终演化结果不一样外,其余参数设置相同的实验结果最终保持一致。通过对比图 1 中相同参数设置的不同网络规模下博弈均衡的结果发现,网络规模越大,博弈均衡结果出现得越晚,博弈的次数越多。

2.2 治理机制下的网络博弈结果分析

在无约束条件下网络博弈仿真结果的基础上,进一步讨论治理机制中罚金(补偿金)、惩罚概率与声誉损失三方面的治理措施对与投机行为选择的影响,选取无约束条件下投机行为均衡比例为 1 的情景设置参数,即设置 $\pi_b=3, \pi_c=4, \pi_s=2, \pi_d=3, C=2$,在此基础上进行仿真。

2.2.1 罚金对网络演化的影响

固定监管概率为 $r=0.2$,声誉损失为 $s=1$,分别取罚金为 $f=0, 1, 2, 3, 4$,在上述参数的基础上分别在网络规模分别为 $n=50, 200, 500, 1\ 000$ 上进行仿真实验,实验结果如图 2 所示。

结论 3:加大罚金的惩罚力度能够抑制成员选择投机行为,且网络规模越大,对于惩罚力度越敏感。由图 2 可知,在 50 个成员的小规模网络中 f 从 0 增加到 3 时,投机行为最终演化比例为 1,继续增加至 4 时投机行为演化到比例为 0 的稳定状态;在成员分别为 200 与 500 的中型网络中, f 取值为 0 时联盟网络的最终演化为投机行为的比例为 1 的稳定状态, f 取值为 1 时,演化到投机行为不稳定状态, f 值增加到 2 时演化到投机行为比例为 0 的稳定状态,继续增加到 3, 4 时,投机行为仍然演化到比例为 0 稳定状态。在成员为 1 000 的大型网络中, f 取值为 0 时联盟网络的最终演化为投机行为比例为 1 的稳定状态;当 f 取值为 1 时,投机行为的最终演化比例不稳定,当 f 取值分别为 2, 3, 4 时,协同创新网络的最终演化为投机行为比例为 0 的稳定状态。

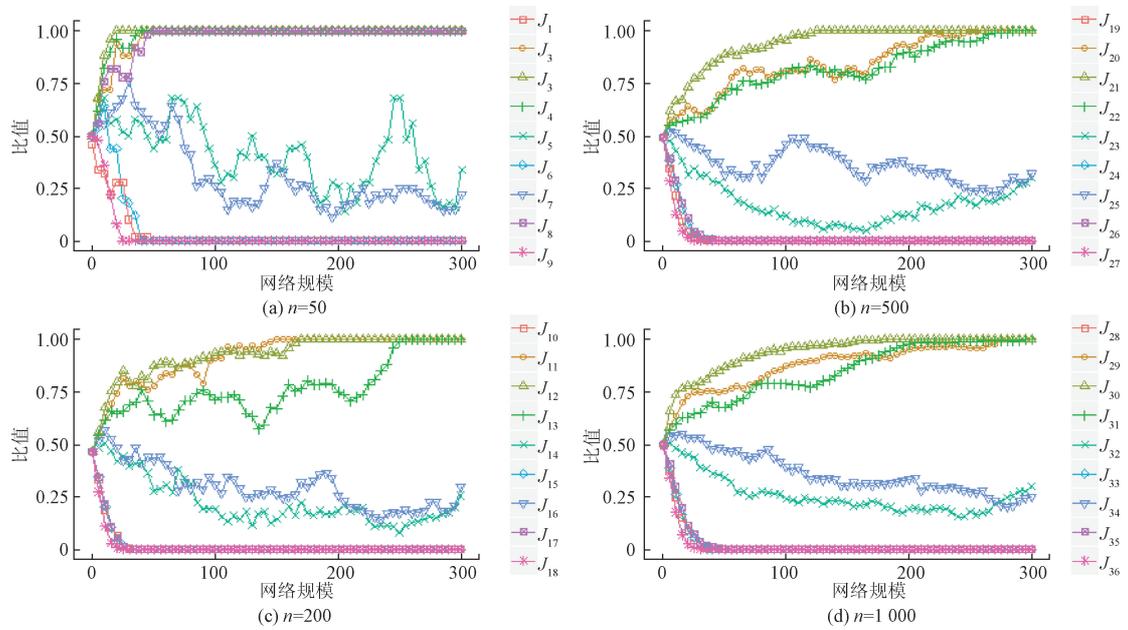


图 1 无约束机制下博弈结果

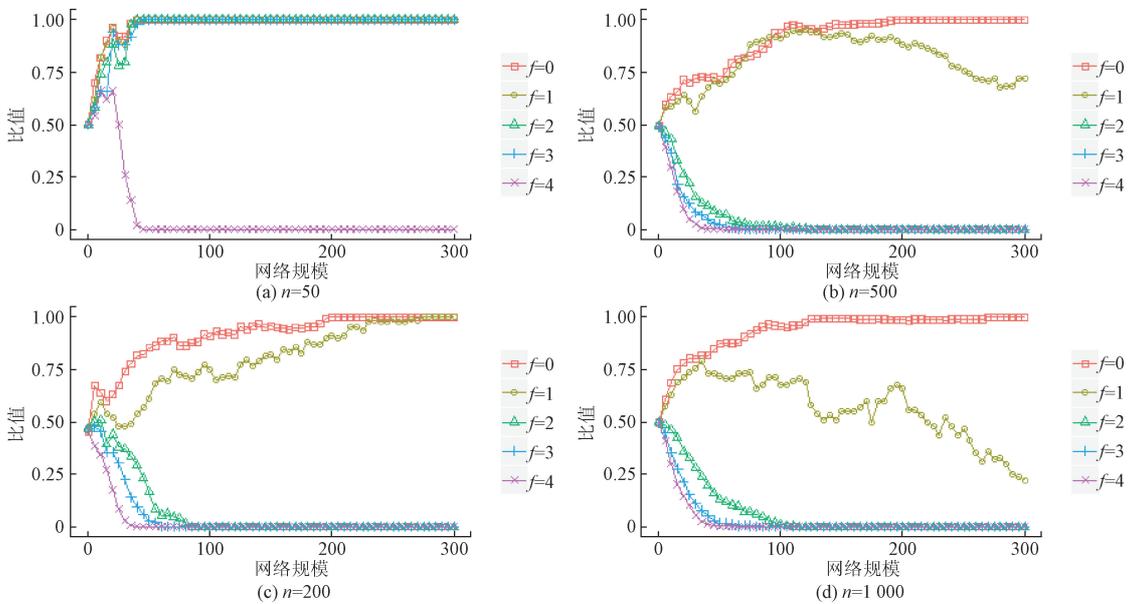


图 2 罚金对网络演化的影响

2.2.2 监管概率对网络演化的影响

固定罚金 $f=1$, 声誉损失为 $s=1$, 分别取监管概率为 $r=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$, 在上述参数的基础上分别在网络规模分别为 $n=50, 200, 500, 1000$ 上进行仿真实验, 实验结果如图 3 所示。

结论 4: 加大监管概率能够抑制成员选择投机行为, 且协同创新网络规模越大, 对监管概率越敏感。由图 3 可知, 在 50 个成员的小规模网络中 r 值取 $0, 0.2, 0.4, 0.6$ 时, 投机行为最终演化比例为 1, 继续增加至 0.8 时投机行为演化到比例为 0 的稳定

状态; 在成员为 500 的中型网络中, r 取值为 0 时协同创新网络的最终演化为投机行为比例为 1 的稳定状态, r 增加到 0.2 时, 演化至投机行为比例为 0 的稳态, 继续增加到 0.2, 0.4, 0.6 时, 投机行为仍然演化到比例 0 稳定状态。在成员为 1000 的大型网络中, r 取值为 0 时, 协同创新网络的最终演化为投机行为比例为 1 的稳定状态; 当 f 取值分别为 0.2, 0.4, 0.6 时, 协同创新网络的最终演化为投机行为比例为 0 的稳定状态。据此, 加大监管概率对投机行为有明显的抑制作用, 且网络规模越大对监管概

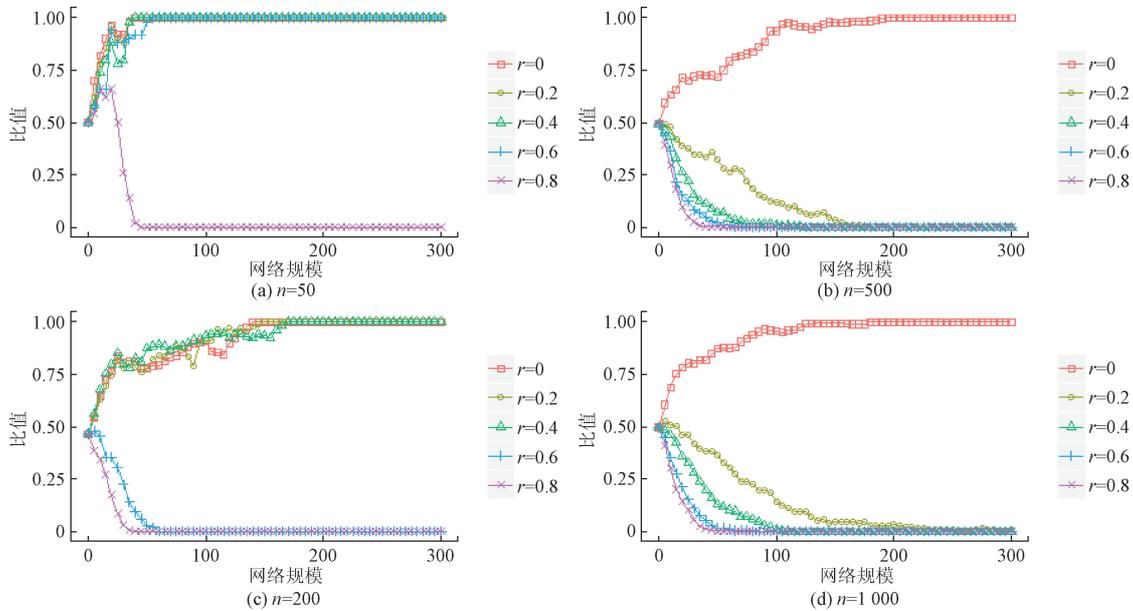


图 3 监管概率对网络演化的影响

率的变化越明显。

2.2.3 声誉损失对网络演化的影响

固定罚金 $f=1$, 监管概率为 $r=0.2$, 分别声誉损失 s 为 $r=0, 1, 2, 3, 4$, 在基本参数的之上分别在网络规模分别为 $n=50, 200, 500, 1000$ 上进行仿真实验, 实验结果如图 4 所示。

结论 5: 加大声誉损失能够抑制成员选择投机行为, 在不同规模的协同创新网络对声誉损失的大小没有明显的差异。由图 4 可知, 在网络规模分别为 50、200、500、1000 时, s 取 0、1 时, 协同创新网络的最终演化状态为投机行为的比率为 1; 当 $s=2, 3,$

4, 时, 协同创新网络最终演化状态为投机行为的比率为 0, 且随着 s 取值的增大, 不同网络规模上的演化速度逐渐加快。据此, 增大声誉损失能够抑制成员选择投机行为。

3 结论

本文对城市轨道交通产业协同创新过程中投机行为的网络演化问题进行了研究, 分析了无约束条件下与治理机制下的惩罚力度、监管概率和声誉损失等治理因素对协同创新成员投机行为的影响, 得出如下结论: 协同创新成员的创新收益、投入成本与挪用收益之间的关系大小对投机行为的最终

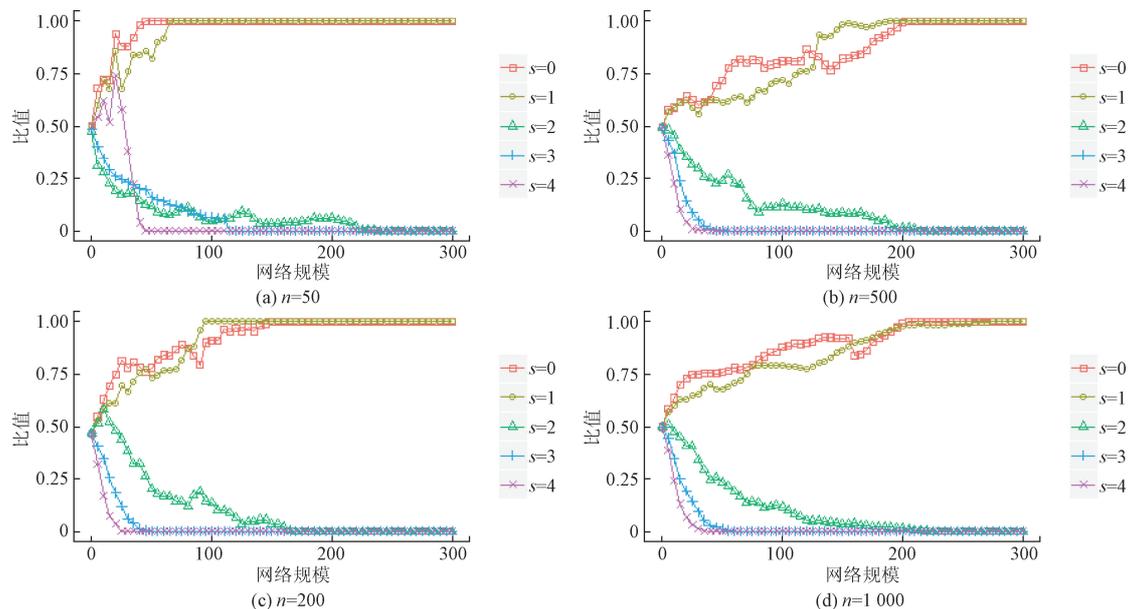


图 4 声誉损失对网络演化的影响

选择比例有显著影响。创新收益越大,成员选择投机行为的概率越小;挪用收益与投入成本越高,成员选择投机行为的概率越大;当创新收益与投入成本之差大于挪用收益时,协同创新网络将演化为诚实合作的稳定状态,当挪用收益大于创新收益与投入成本之差时,协同创新网络将演化为投机行为的稳定状态。当挪用收益与创新收益投入成本之差相等时,投机行为在协同创新网络中的比例具有不稳定性,最终演化结果也具有不稳定性。城市轨道交通产业协同创新网络规模对成员最终选择投机行为影响不大,但对演化时间过程有显著影响。此外,加大惩罚力度、监管概率与声誉损失是抑制投机行为的有效措施。具体而言,加大罚金的惩罚力度能够抑制协同创新成员选择投机行为,且网络规模越大,对于惩罚力度越敏感。监管概率同惩罚力度的作用相同,有效的监督机制可以提高信息共享和透明度,正向激励成员之间协同创新。此外,良好的声誉机制能够有效抑制投机行为的选择,且对不同网络规模的影响力度相同。

基于研究结论,为城市轨道交通产业协同创新创造良好的环境和成果,最大限度规避投机行为的发生,应该采取相应积极的措施。首先,城市轨道交通产业协同创新组织应制定好协同创新成本分担与收益分配机制,防止因责任不清导致企业的投机行为;其次,城市轨道交通产业协同创新组织要发挥好监督管理作用,加大监管力度,根据协同创新企业成员的数量,合理利用惩罚机制做好整体调控,对投机行为采取惩罚措施,保障成员各方收益;最后,建立有效的声誉市场是城市轨道交通产业协同创新治理机构的一项重要措施,可以考虑建设协同创新项目大数据平台,记录成员的投机行为,在后续的创新合作中,对有投机行为等不良记录的成员企业综合考虑,严重者将失去合作的机会。

参考文献

- [1] 崔巧玲. 城市轨道交通职业教育联盟及其对城市轨道交通行业发展的作用分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(3): 228-229.
- [2] FENG W, ZHAO L, CHEN Y. Research on collaborative innovation mode of enterprise group from the perspective of comprehensive innovation management[J]. Sustainability, 2022, 14(9): 5304.
- [3] 徐二明, 徐凯. 资源互补对机会主义和战略联盟绩效的影响研究[J]. 管理世界, 2012(1): 93-103.
- [4] 武健, 曹丽霞, 黄琪华, 等. “互联网+”背景下再生资源产业协同创新三方演化博弈研究[J]. 中国软科学, 2021(12): 175-186.
- [5] 艾尚乐, 杨万寿, 黄永弟. 平台经济视域下的数字内容产业协同创新演化博弈研究[J]. 工业技术经济, 2022, 41(10): 51-56.
- [6] 万晶晶. 创新型领军企业协同创新的实践与启示——以德国拜耳集团为例[J]. 科技与产业, 2022, 22(7): 148-153.
- [7] ZHU W. Analyzing the influencing factors of collaborative innovation and industrial structure upgrading on the economy: reflection on the economic dilemma of enterprises[J/OL]. Environmental Science and Pollution Research, 2023[2023-09]. <https://dx.doi.org/10.1007/s11356-023-29176-3>.
- [8] PARKHE A. Strategic alliance structuring: a game theoretic and transaction cost examination of interfirm cooperation[J]. Academy of Management Journal, 1993, 36(4): 794-829.
- [9] 和征, 曲姣姣, 李勃. 考虑政府奖惩的绿色供应链企业合作创新行为的演化博弈分析[J]. 生态经济, 2021, 37(11): 62-70.
- [10] 阮平南, 魏云凤, 张国红. 企业创新网络创新协同影响因素研究[J]. 科技管理研究, 2016, 36(21): 1-5.
- [11] 赵炎, 王琦. 联盟网络的小世界性对企业创新影响的实证研究——基于中国通信设备产业的分析[J]. 中国软科学, 2013(4): 108-116.
- [12] 宋东林. 产业技术创新战略联盟网络的结构及其运行研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
- [13] ZHOU Y, ZHANG X, FAN Y. Choice of knowledge collaboration strategy of knowledge chain members[J/OL]. Group Decision and Negotiation, 2023[2023-10-22]. <https://link.springer.com/10.1007/s10726-023-09847-9>.
- [14] FAWAD S S M, NAIDING Y, UR REHMAN A, et al. From partners' learning intent to knowledge leakage: the role of contract and trust[J]. Knowledge Management Research & Practice, 2023, 21(1): 107-118.
- [15] QUAN H J, ZHU C Y. Behaviors of imitated agents in an evolutionary minority game on NW small world networks[J]. Physics Procedia, 2010, 3(5): 1741-1745.
- [16] GYÖRGY S, GÁBOR F. Evolutionary games on graphs[J]. Physics Reports, 2007, 446(4-6): 97-216.
- [17] 徐莹莹, 蔡良群. 基于复杂网络演化博弈的企业集群低碳技术创新扩散研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(8): 16-24.
- [18] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

Simulation Study on Collaborative Innovation and Speculative Behavior of Urban Rail Transit Industry Based on Complex Network Evolutionary Game Theory

LI Zhonghui¹, ZHANG Simin², WANG Zherun¹, SHI Lizi¹, ZHANG Yangyang²

(1. Jinan Railway Transit Group Co., Jinan 250101, China;

2. School of Management Science and Engineering, University of Jinan, Jinan 250024, China)

Abstract: In order to explore the macro emergence phenomenon caused by the micro decision-making of speculative behavior in the process of urban rail transit industry collaborative innovation, the Complex network evolution game was used to treat all enterprises of urban rail transit industry collaborative innovation as a small world network, establish a micro Decision model for members under unconstrained conditions and governance mechanisms, and Python software was used to program and simulate the impact of micro decision-making influencing factors on the collaborative innovation network. The simulation results show that under unconstrained conditions, the relationship between the innovation benefits, investment costs, and misappropriation benefits of collaborative innovation members has a significant impact on the final selection proportion of speculative behavior. The size of the network has little impact on the final choice of speculative behavior among members, but it has a significant impact on the evolutionary time process. Under the governance mechanism, increasing punishment, regulatory probability, and reputation loss can effectively suppress speculative behavior.

Keywords: collaborative innovation of urban rail transit industry; evolutionary game theory on networks; opportunistic behavior