

收益模糊与混合更新产业集群合作演化博弈

胡贤荣, 黄小庆

江西理工大学(南昌校区)商学院, 江西 南昌

收稿日期: 2026年6月14日; 录用日期: 2026年7月24日; 发布日期: 2026年8月3日

摘要

针对产业集群合作创新中收益不确定性与企业行为模式异质性并存的问题, 采用三角模糊数刻画收益不确定性, 基于雪堆博弈设定支付矩阵, 在正则网络上引入混合更新机制(模仿更新IM、死亡-出生DB、出生-死亡BD按比例并存), 通过重心法去模糊化, 建立弱选择下的复制动态方程并进行蒙特卡洛仿真。结果表明: 混合更新机制可通过调节IM权重连续调控合作水平, 纯IM促进合作能力最强, 纯BD最弱; 网络密度对合作呈倒U型影响; 不同拓扑下合作水平差异显著, 随机图最高, 小世界最差, 无标度网络因枢纽节点两极分化而波动剧烈。理论分析给出合作演化的方向性判据, 有限种群仿真中合作水平在中间值波动, 二者相互补充。产业集群治理应优先引导模仿学习文化, 构建适度连接的网络结构, 针对不同拓扑采取差异化策略。研究为不确定环境下合作演化提供了运筹分析框架。

关键词

模糊演化博弈, 混合更新机制, 雪堆博弈, 产业集群合作, 复杂网络

Uncertainty and Hybrid Update in the Evolutionary Game of Industrial Cluster Cooperation

Xianrong Hu, Xiaoqing Huang

Business School, Jiangxi University of Science and Technology (Nanchang Campus), Nanchang Jiangxi

Received: June 14, 2026; accepted: July 24, 2026; published: August 3, 2026

Abstract

In response to the problem of the coexistence of uncertainty in returns and heterogeneity in enterprise behavior patterns in industrial cluster cooperative innovation, triangular fuzzy numbers are used to depict the uncertainty of returns. The payment matrix is set based on the Snowdrift Game. A hybrid

update mechanism (imitative update IM, death-birth DB, birth-death BD, existing in proportion) is introduced on the regular network. The defuzzification is carried out by the center of gravity method, and the replication dynamic equation under weak selection is established and a Monte Carlo simulation is conducted. The results show that the hybrid update mechanism can continuously regulate the cooperation level by adjusting the IM weight. Pure IM promotes the cooperation ability the most, while pure BD is the weakest. Network density has an inverted U-shaped impact on cooperation. The cooperation level varies significantly under different topologies. Random graphs have the highest level, while small-world networks have the lowest. Scale-free networks fluctuate violently due to the polarization of hub nodes. The theoretical analysis provides a directional criterion for the evolution of cooperation. In the finite population simulation, the cooperation level fluctuates at the intermediate value, and the two complement each other. Cluster governance should prioritize guiding the imitation learning culture, constructing a moderately connected network structure, and adopting differentiated strategies for different topologies. The research provides an operational analysis framework for cooperative evolution in uncertain environments.

Keywords

Fuzzy Evolutionary Game, Hybrid Update Mechanism, Snowdrift Game, Industrial Cluster Cooperation, Complex Network

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

产业集群作为地理上集聚、产业上关联的经济组织形式,在整合研发资源、加速知识溢出、降低交易成本方面具有显著优势,已成为推动协同创新的关键载体。然而,集群内企业的合作创新具有三个显著特征:一是组织边界模糊,企业与高校、科研院所、供应商之间形成半正式的合作网络,收益归属难以清晰界定;二是知识溢出的非独占性,一项技术突破往往自发扩散至邻近企业,导致投入与回报难以精确匹配;三是机会主义风险,部分企业倾向于“搭便车”利用集群公共知识储备而规避自身研发投入。以生物医药为例,孙洁[1]指出产业方、医研方与政府三方在合作中相互牵制,各方均为有限理性。陈烨等[2]发现 DRG 付费改革下补偿比例等因素显著影响医疗机构策略,张省等[3]揭示了额外医疗服务收益是患者参与数据共享的关键。在此环境下,企业行为呈现多种模式并存:模仿学习、竞争博弈、优胜劣汰交织在一起[4]。如何在同一框架内刻画收益不确定性与行为异质性,成为重要研究命题。

演化博弈论是分析合作动态的主流工具。Ohtsuki 和 Nowak 在图上演化博弈中系统推导了模仿更新(IM)、死亡-出生更新(DB)和出生-死亡更新(BD)三种规则[5]。Nowak 总结了促进合作的五条规则[4],Ohtsuki 等进一步深化了图上演化博弈理论[6]。然而,这些模型均假设收益确定已知,与现实脱节。Zadeh 的模糊集合理论为刻画认知不确定性提供了工具[7]。国内学者开始融合模糊理论与演化博弈:王晶晶等[8]将三角模糊数引入供应链三方博弈;唐晓芬[9]研究了模糊收益下三种更新机制的复制动力学;鄢迪[10]系统研究了混合更新规则下具有模糊支付的演化博弈动态,明确指出“现有研究缺乏对多种更新行为并存情形的建模”;Gao 等[11]的研究表明,个体在不同更新规则间切换的可变过程可以有效促进合作,且合作水平与抱负值在结构化种群中呈现非单调关系。综上,现有文献未能同时处理“收益模糊性”与“更新机制异质性”。

本文后续安排如下:第二节构建模型,给出产业集群合作创新的基本设定,引入三角模糊数刻画收

益不确定性然后定义适应度函数与弱选择下的去模糊化方法。第三节进行理论分析, 推导模糊收益下的复制动态方程, 结合混合更新规则给出修正后的复制动力学, 分析均衡点的存在性与稳定性。第四节开展数值仿真, 通过蒙特卡洛方法依次考察: 不同更新机制及混合权重对合作演化的调控作用; 网络密度对稳态合作水平的影响; 正则图、随机图、小世界网络、无标度网络四种拓扑结构下合作演化的差异与成因。第五节总结全文主要发现, 提炼管理启示, 并指出研究局限与未来方向。

2. 模型构建

2.1. 基本设定

考虑一个包含 N 个企业的产业集群, 企业分布于网络结构 $G=(V,E)$ 中, 节点 $i \in V$ 代表企业, 边 $(i,j) \in E$ 表示两企业之间存在合作互动关系。网络采用度为 k 的正则图, 以模拟集群内有限次重复接触。

每个企业在每一轮博弈中选择策略为合作或背叛。合作指共享研发资源、交换非核心数据或参与联合攻关; 背叛指搭便车、隐瞒信息或仅获取他人成果而不付出。

产业集群中的合作创新往往具有“共同投入、共享成果”的特征, 但同时也存在搭便车激励。合作企业需要承担研发成本与风险, 而背叛企业不投入却仍能分享部分溢出收益——这种“单方付出即可产生公共收益”的结构与雪堆博弈的经典情境高度吻合。相比之下, 囚徒困境博弈要求相互背叛的收益高于被背叛者的收益 ($P > S$), 而现实中产业集群内如果双方都选择背叛, 往往陷入技术停滞与资源浪费, 其处境劣于单方合作-单方背叛的组合 ($S > P$)。因此, 雪堆博弈的收益序关系更贴近产业集群“合作优于互斗”, 但“背叛具有诱惑”的现实特征。此外, $2R > T + S$ 条件确保双方合作的总福利高于一方合作一方背叛, 这为政策干预提供了合理性基础。雪堆博弈的收益矩阵见表 1。

Table 1. Payoff matrix

表 1. 收益矩阵

企业 1	企业 2	
	合作 (C)	背叛 (D)
合作 (C)	(R,R)	(S,T)
背叛 (D)	(T,S)	(P,P)

其中各符号含义为 T 表示单方背叛获得的超额利润; R 表示双方合作带来的共赢收益; S 表示合作者遭遇背叛时的损失; P 表示双方背叛的低效均衡。

2.2. 三角模糊支付矩阵

现实中企业无法精确预知合作收益, 仅能给出区间估计。因此引入三角模糊数刻画认知不确定性。

设 $\tilde{A}=(a_1,a_2,a_3)$, 其隶属度函数为:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x-a_1}{a_2-a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

将雪堆博弈的四个收益参数 R, T, S, P 分别替换为三角模糊数:

$$\tilde{R} = (R_1, R_2, R_3), \tilde{T} = (T_1, T_2, T_3), \tilde{S} = (S_1, S_2, S_3), \tilde{P} = (P_1, P_2, P_3). \quad (2)$$

2.3. 适应度函数

企业在网络中的累积模糊支付为所有邻居博弈支付之和。由于支付是模糊数, 需要去模糊化以比较适应度。采用重心法进行去模糊化:

$$F(\tilde{A}) = \frac{a_1 + a_2 + a_3}{3}, \quad (3)$$

则企业 i 在第 t 轮的实际适应度为:

$$f_i(t) = \sum_{j \in N_i} F[\tilde{\pi}_{ij}(s_i(t), s_j(t))]. \quad (4)$$

其中 N_i 为 i 的邻居集合, $\tilde{\pi}_{ij}$ 为模糊支付。

2.4. 混合更新机制

集群内企业策略更新规则存在异质性。参照 Ohtsuki & Nowak (2006) [5] 及鄢迪(2025) [10] 的分类, 设定三种更新规则并存, 每种规则以固定比例 α, β, γ 存在, $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。

(1) 模仿更新(IM, Imitation Update)

该规则反映企业间的观察学习行为。企业随机选择一个邻居 j , 若 $f_j > f_i$, 则以概率 $p = \frac{f_j - f_i}{\Delta \max}$ 采纳 j 的策略; 否则保持原策略。 $\Delta \max$ 为最大适应度差, 用于归一化。IM 规则体现了“向优秀者看齐”的有限理性决策, 其更新方向依赖相对适应度差异。

(2) 死亡 - 出生更新(DB, Death-Birth Update)

该规则模拟市场竞争中的淘汰与补位。随机选择一个企业 i 死亡(概率 $1/N$), 其空位由邻居竞争填充。邻居被选中的概率与其适应度 f_j 成正比: $f_j / \sum_{k \in N_i} f_k$ 。DB 规则强调“适者生存”——适应度高的个体更有可能将其策略传播到死亡个体的位置, 而死亡是随机的, 不依赖适应度。

(3) 出生 - 死亡更新(BD, Birth-Death Update)

该规则模拟优势个体的扩张与空间占据。按适应度比例选择一个个体育种(出生), 该个体替换一个随机邻居(死亡)。即个体 i 被选中的概率为 $f_i / \sum_j f_j$ 。该“出生”个体随后随机选择一个邻居 j 死亡, 并将自己的策略传递给该邻居(或直接替换)。BD 规则强调“强者主导”——适应度高的个体更大概率繁殖并取代邻居, 而死亡是随机的。

在混合更新机制下, 每一个时间步按照比例 α, β, γ 随机抽取一定数量的企业分别按照 IM、DB、BD 规则进行异步更新。三种规则共存于同一集群中, 互不排斥。混合权重 α, β, γ 反映了集群的行为文化特征: α 较大时表征集群具有强烈的模仿学习氛围; β 较大时对应高度市场竞争、优胜劣汰的环境; γ 较大时则意味着少数优势企业主导策略扩散。通过调节混合权重, 可以模拟不同产业集群的治理模式与行为生态, 进而考察其对合作演化的调控作用。该混合机制既包含基于比较的模仿, 也包含基于适应度差异的竞争, 能够更真实地刻画现实中多种行为模式并存的产业集群。

3. 模糊复制动力学与稳定性分析

3.1. 模糊复制动态方程

在经典演化博弈中, 复制动态描述策略频率随时间的变化率。当收益为模糊数时, 需先将其转化为

清晰值以定义适应度。设集群中合作策略的频率为 x ，背叛频率为 $1-x$ 。在均匀混合或网络平均场近似下，合作者和背叛者的期望模糊收益分别为：

$$\tilde{f}_C = x\tilde{R} + (1-x)\tilde{S}, \tilde{f}_D = x\tilde{T} + (1-x)\tilde{P}, \quad (5)$$

平均模糊收益为：

$$\bar{f} = x\tilde{f}_C + (1-x)\tilde{f}_D, \quad (6)$$

在经典复制动态下，合作频率的变化率为 $\frac{dx}{dt} = x(1-x)(f_C - f_D)$ ，代入得：

$$\frac{dx}{dt} = x(1-x)[x(R-T) + (1-x)(S-P)]. \quad (7)$$

然而，式(7)仅适用于均质更新规则，未纳入本文关注的更新机制异质性，因此需进一步修正。

3.2. 混合更新规则下的修正复制方程

根据 Ohtsuki & Nowak (2006) [5]及鄢迪(2025) [10]的研究，不同更新规则(IM、DB、BD)在规则图上对应不同的选择梯度。对于度为 k 的正则图，在弱选择近似下，各规则下合作频率的变化率可统一表示为：

$$\frac{dx}{dt} = x(1-x)(A(R-S) + B(T-P) + C(R+T-S-P)). \quad (8)$$

系数 A, B, C 依赖于更新规则和网路度 k 。基于 Ohtsuki 等人(2007) [6]的推导，具体见表 2。

Table 2. Select the gradient coefficient under different update rules

表 2. 不同更新规则下的选择梯度系数

	A	B	C
IM	$\frac{k-2}{k(k-1)}$	$\frac{k-3}{k(k-1)}$	$\frac{2}{k(k-1)}$
DB	$\frac{k+1}{k(k-1)}$	$\frac{k+1}{k(k-1)}$	$-\frac{2}{k(k-1)}$
BD	$\frac{k+1}{k(k-1)}$	$\frac{k+1}{k(k-1)}$	$\frac{2}{k(k-1)}$

假设各规则独立作用于不同企业，且选择强度相同，则有效梯度为三者的加权平均：

$$\frac{dx}{dt} = \alpha \frac{dx_{IM}}{dt} + \beta \frac{dx_{DB}}{dt} + \gamma \frac{dx_{BD}}{dt}, \quad (9)$$

代入(8)得到混合规则下的复制动态方程：

$$\frac{dx}{dt} = x(1-x)(A_{mix}(R-S) + B_{mix}(T-P) + C_{mix}(R+T-S-P)), \quad (10)$$

其中混合系数为：

$$\begin{aligned} A_{mix} &= \alpha A_{IM} + \beta A_{DB} + \gamma A_{BD}, \\ B_{mix} &= \alpha B_{IM} + \beta B_{DB} + \gamma B_{BD}, \\ C_{mix} &= \alpha C_{IM} + \beta C_{DB} + \gamma C_{BD}. \end{aligned} \quad (11)$$

3.3. 均衡点与稳定性分析

令 $\Phi = A_{mix}(R - S) + B_{mix}(T - P) + C_{mix}(R + T - S - P)$, 则式(3)简化为:

$$\frac{dx}{dt} = x(1-x)\Phi. \quad (12)$$

式(12)有三个均衡点: $x = 0$, $x = 1$, 以及当 $\Phi = 0$ 时全体 $x \in [0, 1]$ 均为均衡。

稳定性分析如下:

若 $\Phi > 0$: $dx/dt > 0$, 合作频率单调增加, $x = 1$ 全局渐近稳定, $x = 0$ 不稳定;

若 $\Phi < 0$: $dx/dt < 0$, 合作频率单调减少, $x = 0$ 全局渐近稳定, $x = 1$ 不稳定;

若 $\Phi = 0$: 所有 x 均为中性均衡, 系统漂移。

在网络上的雪堆博弈中, 引入混合更新规则后, 合作要么席卷整个种群, 要么彻底消失, 不会出现合作与背叛长期共存的内点平衡。这一结论与同类研究中均匀混合种群下的结果形成强烈反差, 体现了网络结构与更新规则异质性对演化博弈动力学的根本性影响。然而这个全局稳定性结论是在无限大种群、确定性复制动态、弱选择近似这三个理想化假设下推导得到的。在实际的蒙特卡洛仿真中, 有限种群的随机漂移、网络局部涨落以及异步更新顺序将阻止系统严格收敛到 $x = 0$ 或 $x = 1$ 。此时, 合作频率会在某个中间水平附近波动, 其时间平均值由 Φ 的符号和大小以及随机扰动的强度共同决定。因此, 理论分析提供的是一种方向性预测: $\Phi > 0$ 合作水平总体呈上升趋势, 稳态均值显著高于初始值; $\Phi < 0$ 时, 合作水平呈下降趋势; Φ 绝对值越大, 趋势越强。

3.4. 理论预测与数值仿真的一致性分析

复制动态方程建立在无限大种群、平均场近似及弱选择条件下, 属于确定性动力系统。当种群规模趋于无穷时, 随机涨落可忽略, 系统最终收敛于理论均衡点。然而, 蒙特卡洛仿真采用有限规模网络, 每一步策略更新均具有随机性, 个体间的局部相互作用不断产生随机漂移, 使合作频率长期围绕某一中间水平波动, 而非收敛至边界均衡。随着种群规模增大, 随机漂移影响减弱, 仿真结果将逐步逼近复制动态预测。因此, 理论模型刻画演化方向, 仿真反映有限系统的统计行为, 两者互补。

此外, 复制动态采用了平均场近似, 默认所有节点具有相同的局部环境。该假设对正则网络适用性较好, 但对随机图、小世界及无标度网络, 其解释能力存在局限。尤其在无标度网络中, 枢纽节点对合作扩散具有决定性影响, 而平均场理论无法刻画局部关联及策略聚集, 因此仅提供总体趋势, 不能准确预测不同拓扑下的稳态差异——这解释了 4.4 节中不同拓扑仿真结果显著分异、而理论仅能给出统一趋势的现象。本文侧重混合更新机制与模糊支付的联合作用, 故采用平均场理论进行方向性分析, 并辅以蒙特卡洛仿真补充复杂网络的实际演化过程。

4. 数值仿真

4.1. 仿真设置

通过蒙特卡洛数值仿真验证理论模型的有效性。仿真参数设置如表 3 所示。

Table 3. Simulation parameter settings

表 3. 仿真参数设置

参数类别	参数符号	取值	说明
种群规模	N	100	集群内企业总数

续表

网络结构	k	4	正则图度
选择强度	w	0.05	弱选择
初始合作频率	p_0	0.3	—
总演化步数	T	1000	—
蒙特卡洛重复次数	—	100	取后 100 步平均

采用三角模糊数刻画收益不确定性, 设置雪堆博弈的模糊支付参数如下: 合作收益 $\tilde{R}=(8,10,12)$, 背叛诱惑 $\tilde{T}=(12,14,16)$, 受骗者收益 $\tilde{S}=(2,4,6)$, 双方背叛收益 $\tilde{P}=(-1,1,3)$, 该组参数满足雪堆博弈的序关系 $T > R > S > P$ 及条件 $2R > T + S$ 。

(1) 雪堆博弈收益参数的基本逻辑。在雪堆博弈中, 双方合作时共同分担成本、共享收益(R); 单方背叛时, 背叛者坐享合作者付出的成果(T), 合作者独自承担成本而收益有限(S); 双方背叛时各自为政、无合作收益(P)。其收益序关系 $T > R > P > S$ 是雪堆博弈区别于囚徒困境($T > R > P > S$ 虽相同, 但 $R > S$ 与 $R > P$ 的条件差异导致不同的演化结果)的核心特征。具体而言, $R > P$ 确保“双方合作优于互不合作”, 为合作提供了正向激励; $T > R$ 则刻画了“背叛的诱惑”——单方背叛可获得高于双方合作的超额收益, 这是合作难以自发维持的根本原因。

(2) 产业集群情境下的取值讨论。本文的基准收益设定 $(R, S, T, P) = (10, 4, 14, 1)$ 遵循了上述序关系, 并在数值比例上参考了产业集群合作创新的典型特征。在集群合作创新中, 合作企业需投入研发人员、共享技术数据、承担试验风险, 其投入成本通常占预期收益的 30%~50%。本文设定 $R=10$ 、 $T=14$, 即背叛者相对合作者的超额收益约为 40%, 这与产业集群中“搭便车”企业节省研发投入但分享溢出收益的现实情形相符。受骗者收益 $S=4$ 反映了合作者独自承担成本后的净收益(约为双方合作收益的 40%), 而双方背叛收益 $P=1$ 则对应企业互不合作时仅保留基本生产经营收益的情形。该比例结构在相关网络雪堆博弈文献中亦有采用。

(3) 模糊区间的设定参考。三角模糊数的区间幅度取基准值的 $\pm 20\%$ (如 $\tilde{R}=(8,10,12)$), 用以刻画企业与合作收益的认知偏差与估计不确定性。该幅度的选取参考了模糊演化博弈领域的通行做法: 一方面, 20%的模糊幅度足以体现现实中企业对未来收益“大致知晓但无法精确预知”的认知状态; 另一方面, 该幅度不至于过大而导致模糊数之间序关系的不确定, 保证了博弈结构的清晰性。此外, 在产业集群的实地调研中, 企业与合作创新的收益预期通常也是一个区间估计而非精确数值, 本文的三角模糊数设定正是对这一现实特征的数学刻画。

4.2. 混合更新机制对合作演化的影响

为考察混合更新机制对产业集群合作演化的调控作用, 分别仿真了三种纯更新机制(IM、DB、BD)以及三种混合权重情景。混合权重向量记为 $\theta = (\theta_{IM}, \theta_{DB}, \theta_{BD})$ 。设置混合 1 (高 IM): $\theta = (0.6, 0.2, 0.2)$ 混合 2 (均衡): $\theta = (0.4, 0.3, 0.3)$; 混合 3 (低 IM): $\theta = (0.2, 0.4, 0.4)$ 图 1 展示了六种机制下合作频率 $p(t)$ 随时间的演化轨迹。

仿真结果见图 1, 不同更新机制对集群合作水平的调控能力存在显著差异。在纯策略模式下, 纯模仿更新机制的稳态合作水平最高, 纯死亡-出生机制次之, 而纯出生-死亡机制最低。三种混合机制的合作水平均介于纯模仿更新机制与纯出生-死亡之间, 其中高 IM 混合机制与均衡混合机制的稳态合作水平相近, 而低 IM 混合机制的合作水平较低。

通过调节模仿更新的权重, 可以连续调控集群的合作水平。同时, 纯 IM 机制在模糊收益环境下表现

出最强的合作促进能力, 而纯 BD 机制最不利于合作涌现。上述结果与理论分析中关于 Φ 符号的预测一致: 在给定参数下, IM 机制对应的 Δ_{IM} 最大(正值), BD 机制对应的 Δ_{BD} 最小, 混合机制则取中间值。

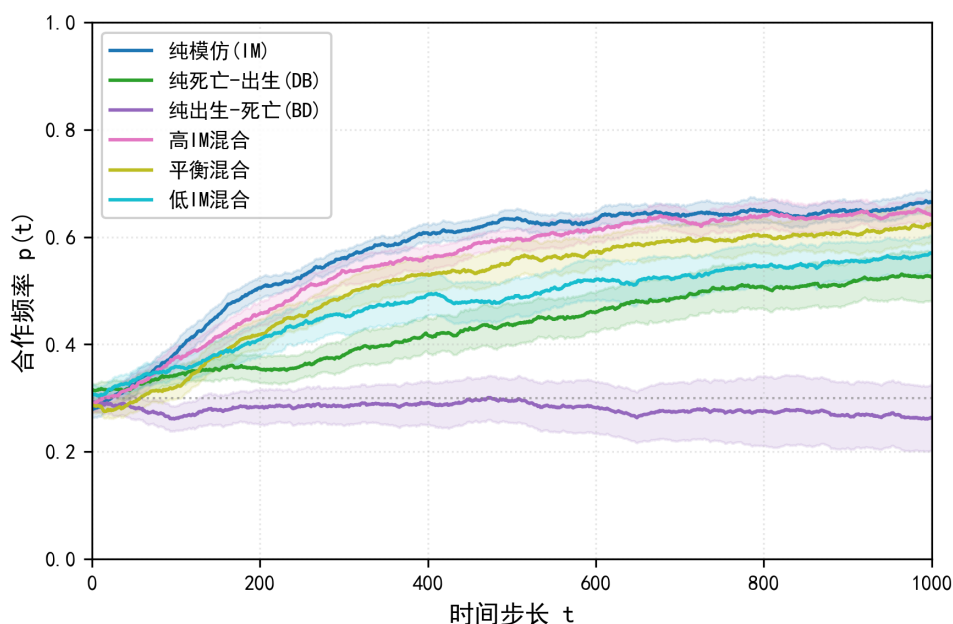


Figure 1. The evolution trajectory of cooperation frequency under different update mechanisms
图 1. 不同更新机制下的合作频率演化轨迹

4.3. 网络密度效应

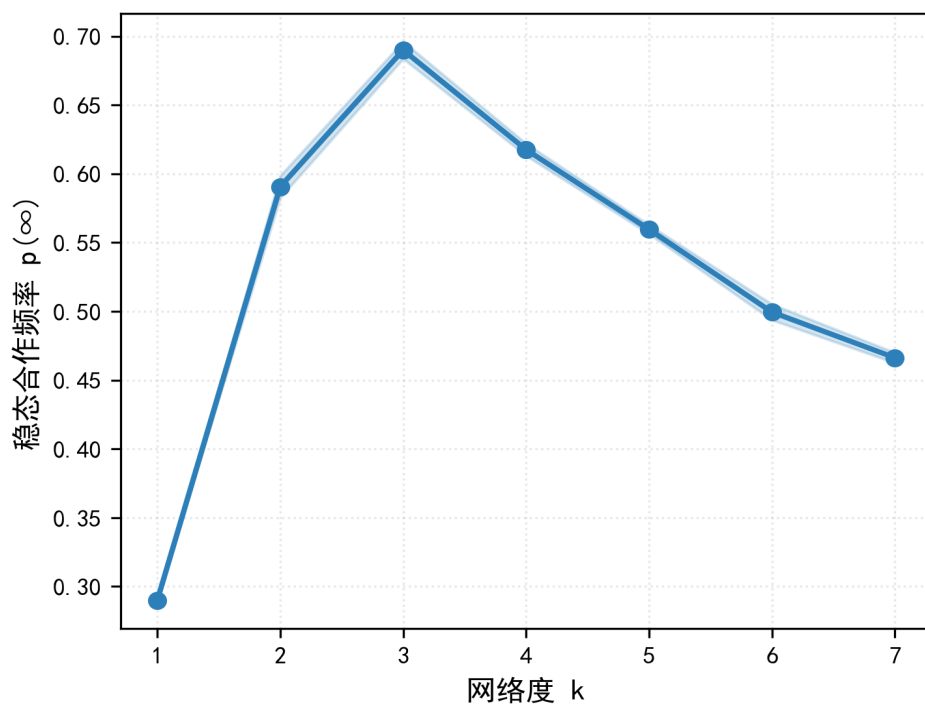


Figure 2. The variation of steady-state cooperative frequency with network degree
图 2. 稳态合作频率随网络度的变化

网络结构是影响产业集群合作演化的关键因素。为探究企业间连接密度对合作水平的影响, 固定混合更新权重为均衡配置 $\theta = (0.4, 0.3, 0.3)$, 改变网络度 k 从 1 到 7, 分别进行蒙特卡洛仿真。

仿真结果如图 2 所示, 稳态合作频率与网络度呈现显著的倒 U 型关系: 随着 k 增大, 合作水平迅速上升, 在 $k = 3$ 时达到峰值 0.69; 此后逐步下降, $k = 7$ 时降至 0.47。这一结果验证了网络结构对合作存在最优连接区间。倒 U 型关系的形成机制在于: 当网络过疏时, 企业间互动有限, 合作策略难以传播扩散; 当网络过密时, 每个企业连接大量邻居, 背叛者可通过搭便车从多个合作者处获利, 合作激励被稀释; 而适度密度在保障策略扩散效率的同时有效抑制了剥削行为, 从而最大化合作水平。这一发现表明, 产业集群治理应注重构建“适度连接”的网络结构。

4.4. 不同网络拓扑对合作演化的影响

为考察网络结构异质性的影响, 选取四种典型拓扑: 正则图、Erdos-Renyi 随机图、Watts-Strogatz 小世界网络和 Barabasi-Albert 无标度网络。所有网络节点数 $N = 100$, 平均度 $k = 4$ 。

正则图是最简单的规则网络, 每个节点具有完全相同的度, 无结构异质性。该拓扑作为对照基准, 用于揭示网络均匀性对合作演化的基线影响。Erdos-Renyi 随机图通过以固定概率 p 在节点间随机连边生成, 其度分布近似泊松分布, 大多数节点度接近平均值, 但连接关系完全随机, 不存在明显的模块化或中心节点。该拓扑模拟产业集群中企业间合作关系随机建立的情形。Watts-Strogatz 小世界网络通过从正则图以概率 p 随机重连边生成, 兼具高聚类系数(局部抱团合作)与短平均路径长度(全局信息快速传递)的特征。该拓扑刻画现实中企业往往具有局部紧密联系同时存在少量远程连接的情形。Barabasi-Albert 无标度网络通过优先连接机制生成, 其度分布服从幂律, 存在少数度极高的枢纽节点和大量度较低的边缘节点。该拓扑反映产业集群中常见的“核心-边缘”结构——少数龙头企业拥有大量合作伙伴, 多数中小企业只与少量企业建立联系。比较这四种拓扑下的仿真结果, 可以系统分析网络异质性对产业集群合作演化的影响。

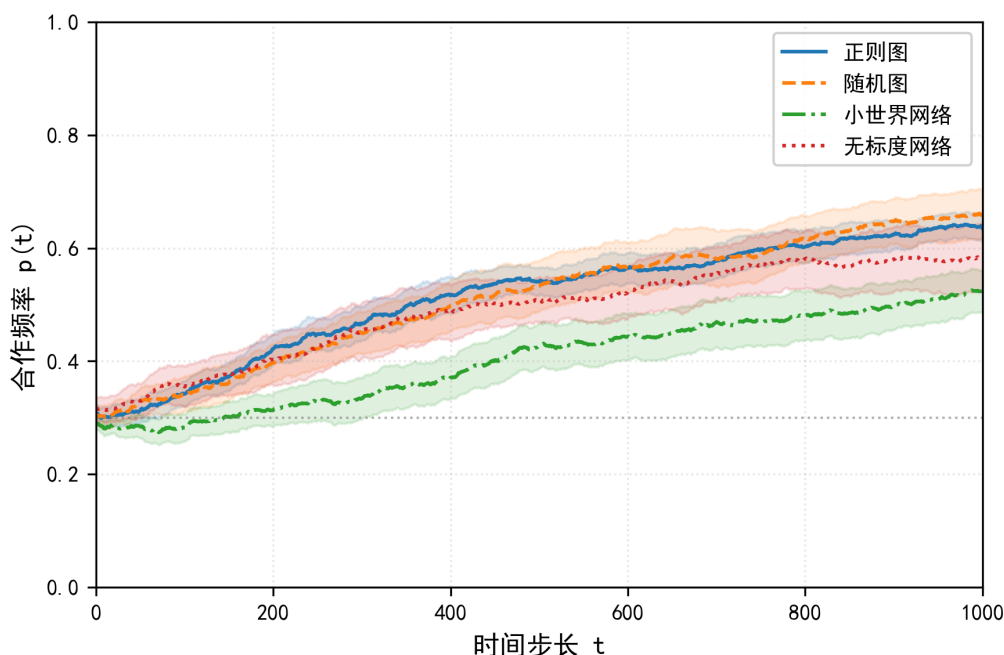


Figure 3. The evolution trajectories of cooperative frequencies under four network topologies
图 3. 四种网络拓扑下合作频率的演化轨迹

演化轨迹如图 3 所示四种网络拓扑中, 随着时间步长增加均呈上升趋势, 但演化轨迹显著分化, 小世界网络上升最为缓慢且始终垫底, 随机图则在后期攀升至均值最高。稳态分布如图 4 所示, 中位数水平排序为随机图 > 正则图 > 无标度网络 > 小世界网络; 其中正则图的结果分布最为集中、最可预测, 极差极小; 而无标度网络的极差最大, 表明演化结果高度不确定, 存在极端的“两极分化”效应——可能演化为极高合作, 也可能跌至极低水平。在模糊收益与混合更新机制下, 正则图的稳定性好; 适度引入随机连接能有效提升整体合作水平; 小世界结构在当前设定下抑制了合作涌现; 对于存在核心节点的无标度集群, 由于方差过大, 需要建立核心节点的信任与承诺机制来对冲不确定性风险。

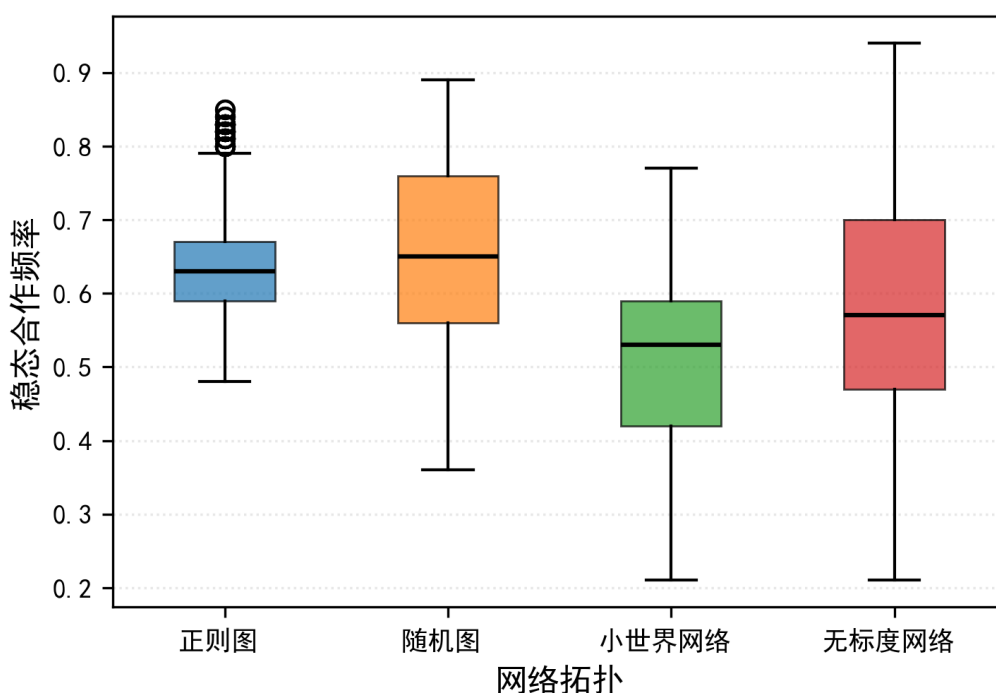


Figure 4. Box-line distribution of steady-state cooperative frequency

图 4. 稳态合作频率的箱线分布

图 5 展示了四种网络拓扑在不同时刻 ($t = 0, 200, 400, 1000$) 的快照, 其中红色节点表示合作者 ($s_i = 1$), 蓝色节点表示背叛者 ($s_i = 0$), 节点大小与度成正比。通过对比不同时刻的网络快照, 可以直观地观察合作策略在不同拓扑结构上的扩散与演化过程。

正则图: 初始时刻合作者随机分布; $t = 200$ 时合作策略开始形成若干个孤立簇; $t = 400$ 时合作簇逐渐扩大并连接; $t = 1000$ 时合作者已占据网络大部分节点, 呈现均匀分布。整个演化过程平稳有序, 无剧烈波动。

随机图: 初始时刻与正则图相似; $t = 200$ 时合作者已开始形成较大连通簇; $t = 400$ 时合作策略快速扩张; $t = 1000$ 时合作水平达到四种拓扑中最高。随机连接为合作策略提供了多样化的传播路径。

小世界网络: 初始时刻合作者随机分布; $t = 200$ 时局部聚类内开始形成合作簇; $t = 400$ 时可见长程连接将背叛策略引入局部合作簇, 表现为部分合作簇被“侵蚀”; $t = 1000$ 时合作水平在四种拓扑中最低, 背叛策略高效地引入原本稳定的局部合作簇, 抑制了整体合作水平的抬升。

无标度网络: 初始时刻合作者随机分布; $t = 200$ 时可见枢纽节点多为蓝色, 其背叛策略通过优先连

接机制迅速扩散至大量邻居； $t = 400$ 时背叛策略大面积蔓延，合作者逐渐退至边缘节点； $t = 1000$ 时合作者主要集中在边缘节点，枢纽节点及其近邻基本为背叛状态。这一“核心背叛 - 边缘合作”的分化格局解释了无标度网络稳态分布极差最大、演化结果高度不确定的微观机制。

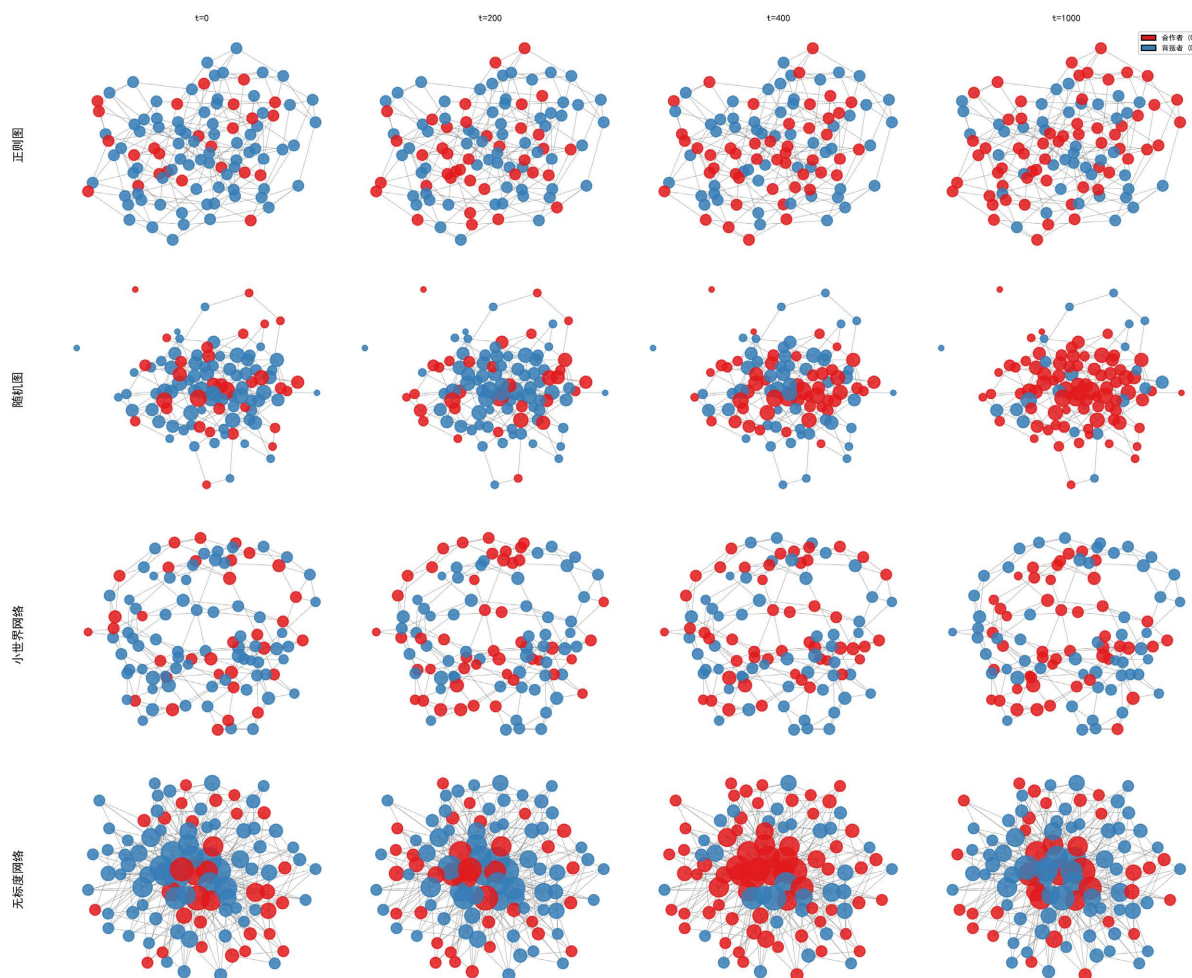


Figure 5. Snapshots of cooperation strategy propagation on four network topologies at different time steps

图 5. 四种网络拓扑上合作策略传播的快照

4.5. 稳健性检验

4.5.1. 更新机制排序的稳健性检验

将种群规模分别设定为 $N = 50$ 、 $N = 100$ 、 $N = 200$ ，选择强度分别设定为 $w = 0.01$ 、 $w = 0.05$ 、 $w = 0.10$ ，共构成 9 种参数组合。每种组合下对四种代表性机制(纯 IM、纯 DB、纯 BD、平衡混合)分别进行 10 次独立蒙特卡洛仿真，记录后 100 步的稳态合作频率均值。图 5 以热力图形式展示各组合下的检验结果。

由图 6 可知：第一，**机制排序高度稳健**——在所有 9 种参数组合下，纯 IM 的稳态合作频率均最高(0.487~0.700)，纯 BD 均最低(0.256~0.298)，纯 DB 居中(0.320~0.446)，平衡混合介于二者之间(0.391~0.574)， $IM > DB > BD$ 的排序未发生任何反转。第二，**种群规模效应**——当 N 从 50 增大至 200 时，各机制的标准差明显收窄，表明有限种群的随机漂移效应随规模增大而衰减。第三，**选择强度效应**——当 w 从 0.01

增大至 0.10 时, 机制间差异略有扩大, 但核心定性结论不变。上述结果表明, 本文关于“IM 机制更有利于合作演化”的结论具有较好的稳健性。

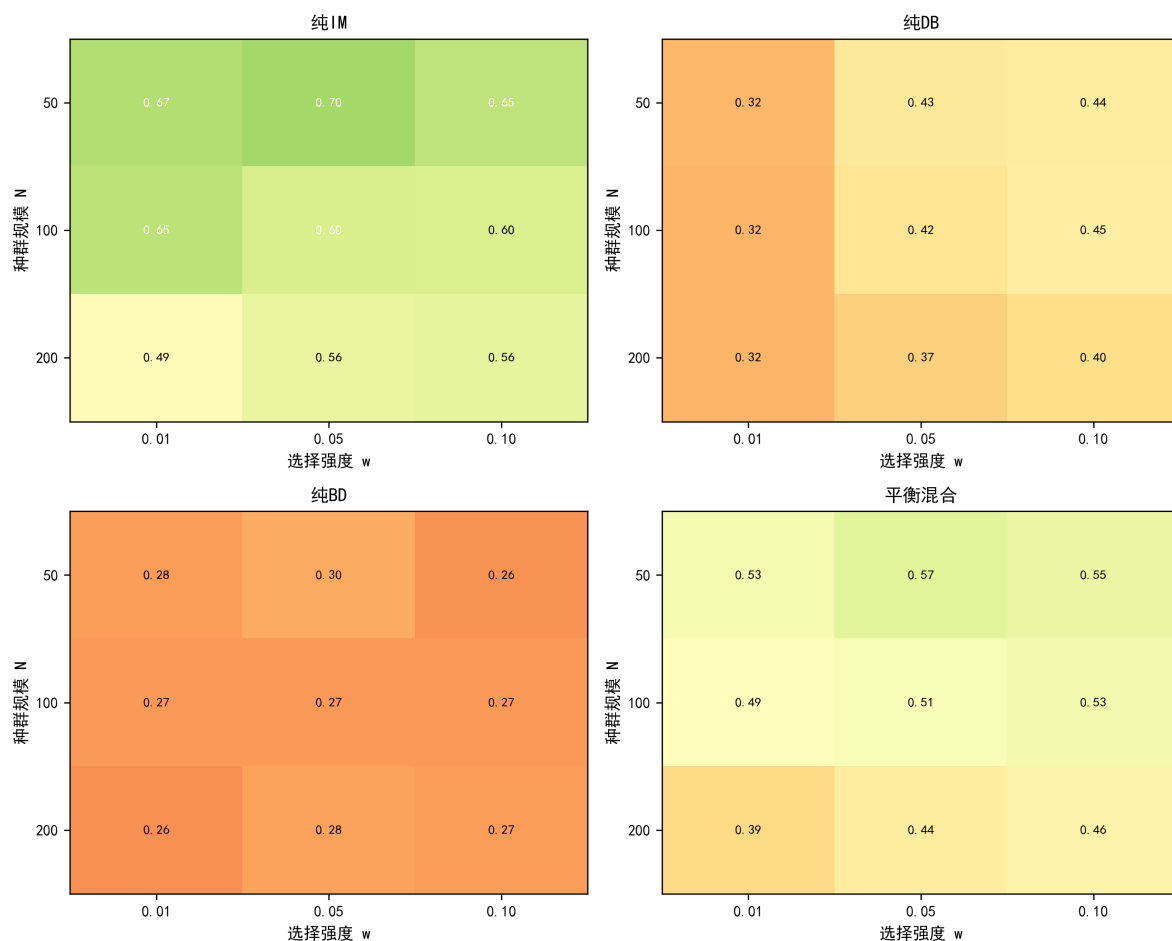


Figure 6. Robustness heatmap: steady-state cooperation frequency under different N and w

图 6. 稳健性热力图: 不同 N 和 w 下的稳态合作频率

4.5.2. 网络密度倒 U 型效应的稳健性检验

4.3 节已在基准参数下发现网络密度对合作水平存在倒 U 型影响。为进一步检验该效应在不同参数组合下的稳健性, 在 6 组参数组合 ($N = \{50, 100, 200\}$, $w = \{0.01, 0.10\}$) 下, 固定均衡混合机制 $\theta = (0.4, 0.3, 0.3)$, 分别扫描网络度 $k = 1 \sim 7$, 记录稳态合作频率。

由图 7 可知: 第一, 倒 U 型趋势具有参数稳健性——所有 6 组组合下, 合作频率均呈现先上升后下降的倒 U 型趋势, 表明最优连接区间的存在不依赖于特定的 N 或 w 取值。第二, 峰值位置与解释——各组合峰值集中在 $k = 3 \sim 5$ 区间, 其中 $N = 50$, $w = 0.10$ 时峰值最显著 ($k = 3, 0.662$); $N = 100$, $w = 0.01$ 时峰值偏右至 $k = 5$, 但 $k = 3 \sim 5$ 区间内合作频率差异较小 ($0.404 \sim 0.470$), 曲线顶部较为平坦。这种微小偏移源于弱选择条件下随机漂移效应相对增强, 导致峰值估计存在一定不确定性。但从整体趋势看, 各组合下 $k = 1 \sim 3$ 均呈上升阶段、 $k = 5 \sim 7$ 均呈下降阶段, 倒 U 型基本形态稳定。第三, 规模效应——当 N 从 50 增大至 200 时, 标准差明显收窄 ($N = 50$ 时标准差介于 $0.06 \sim 0.22$, $N = 200$ 时收窄至 $0.02 \sim 0.07$), 曲线更加平滑, 与理论预期一致。综上, 网络密度的倒 U 型效应具有良好的稳健性与普适性。

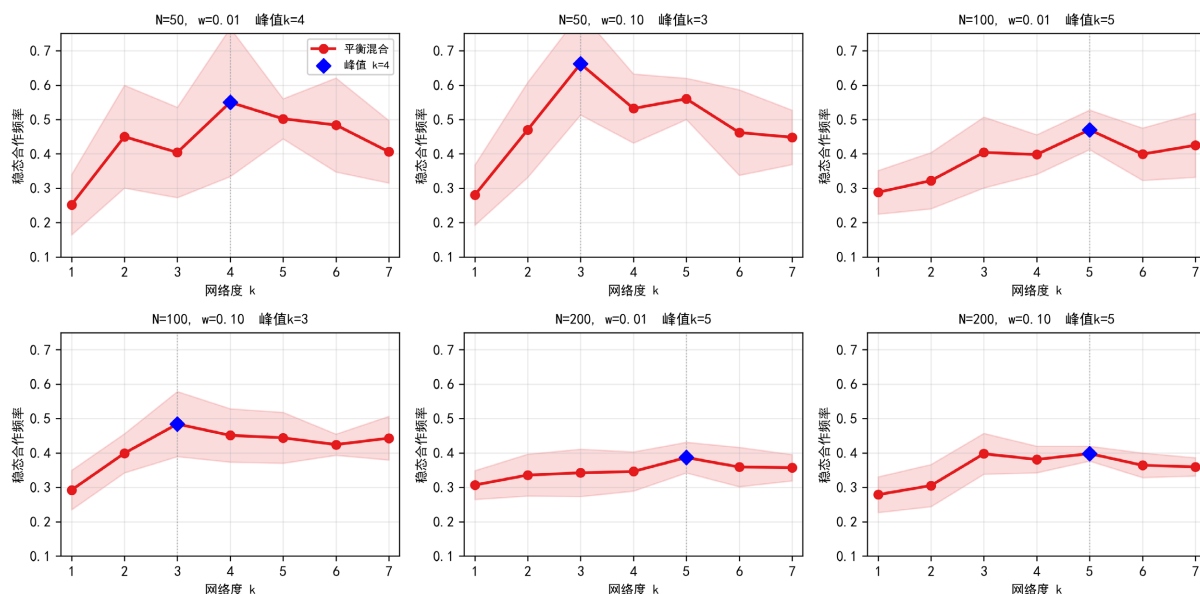


Figure 7. Robustness check of the inverted-U effect: steady-state cooperation frequency vs. network degree k under different N and w

图 7. 倒 U 型效应稳健性检验：不同 N 和 w 下稳态合作频率随网络度 k 的变化

5. 总结

本文针对产业集群合作创新中收益不确定与企业行为模式异质性并存的问题，构建了基于混合更新机制的网络演化博弈模型，以雪堆博弈为基本交互范式，在正则网络上进行了理论分析与蒙特卡洛仿真。研究发现：混合更新机制可通过调节模仿更新(IM)、死亡-出生(DB)、出生-死亡(BD)三种规则的权重实现合作水平的连续调控，其中纯 IM 机制促进合作能力最强，纯 BD 机制最弱；网络密度对合作呈现倒 U 型影响；不同网络拓扑下合作水平差异显著，随机图平均合作水平最高，小世界网络最差，无标度网络因枢纽节点的两极分化效应而波动剧烈。理论分析与数值仿真相互补充。在无限大种群平均场近似下，复制动态方程预测合作要么完全取胜、要么彻底消失；而在有限种群的蒙特卡洛仿真中，合作频率在中间水平波动，稳态均值由 Φ 的符号与大小决定。随着种群规模 N 增大，随机漂移效应减弱，仿真结果逐步逼近理论预测。两者分别从“方向性趋势”和“有限样本实现”两个层面揭示了合作演化的完整图景。管理启示方面，产业集群治理应优先引导合作文化而非直接提高经济补贴，适度构建每个企业维持 3~5 个紧密伙伴的网络结构，政府补贴与知识产权保护等现实政策工具可内化于模型参数发挥作用：补贴等效于提高合作收益 $\tilde{R}$ ，宜在集群发展初期或合作水平低于预期时阶段性使用；知识产权保护等效于降低背叛诱惑 $\tilde{T}$ 并提高背叛成本，宜作为长期制度安排持续巩固合作基础。

同时，集群合作策略的设计不能脱离外部宏观环境单独考量。黄小庆等[12]关于能源安全关键要素的识别研究表明，外部资源可得性的变化会显著影响集群内企业的成本结构与合作意愿，产业集群治理需将此类外生约束纳入合作激励机制的动态调整框架中。

针对不同拓扑采取差异化策略：无标度网络需重点监控核心企业的合作行为，小世界网络应审慎设计跨子群的长程连接，随机连接结构可适度利用其高合作水平但需配套风险对冲机制。本文未考虑网络动态演化及更新规则的内生选择。未来可引入时变网络、双层博弈模型及 Pair Approximation 等方法，进一步丰富分析框架。

基金项目

江西省人文社科项目(新质生产力背景下新能源产业链施策异质性评估及蜕变路径探究) (GL24108);
江西理工大学博士科研启动基金项目(FZ25-ZX-29)。

参考文献

- [1] 孙洁. 生物医药研发的利益相关者识别与演化博弈[J]. 科技管理研究, 2025, 45(19): 220-227.
- [2] 陈烨, 李佳明, 阳丰鸿, 等. DRG 付费改革背景下我国除外支付政策的演化博弈与仿真分析[J]. 中国药房, 2025, 36(22): 2753-2759.
- [3] 张省, 赵孟桥. 健康医疗数据共享中的个人隐私保护问题分析[J]. 中国医学伦理学, 2026, 39(4): 449-458.
- [4] Nowak, M.A. (2006) Five Rules for the Evolution of Cooperation. *Science*, **314**, 1560-1563. <https://doi.org/10.1126/science.1133755>
- [5] Ohtsuki, H. and Nowak, M.A. (2006) Evolutionary Games on Cycles. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **273**, 2249-2256. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3576>
- [6] Ohtsuki, H., Pacheco, J.M. and Nowak, M.A. (2007) Evolutionary Graph Theory: Breaking the Symmetry between Interaction and Replacement. *Journal of Theoretical Biology*, **246**, 681-694. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2007.01.024>
- [7] Zadeh, L.A. (1965) Fuzzy Sets. *Information and Control*, **8**, 338-353. [https://doi.org/10.1016/s0019-9958\(65\)90241-x](https://doi.org/10.1016/s0019-9958(65)90241-x)
- [8] 王晶晶, 贾世会. 基于收益模糊的三方博弈求解及供应链主体策略研究[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2025, 53(5): 40-51.
- [9] 唐晓芬. 模糊演化博弈中的复制动态方程的稳定点[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- [10] 鄢迪. 混合更新规则下具有模糊支付的演化博弈动态分析[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2025.
- [11] Gao, L.Y., Pan, Q. and He, M. (2020) Changeable Updating Rule Promotes Cooperation in Well-Mixed and Structured Populations. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **547**, Article 124446. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124446>
- [12] 黄小庆, 叶前林, 付皓骏. 基于双重视角的能源安全关键要素识别与水平测度[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2025.