

Three-Party Evolutionary Game Analysis of Green Technological Innovation Development under Smart Manufacturing

Feng Hong

East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi, 330000, China

Email: 3346467089@qq.com

Abstract

"Made in China 2025" has positioned green manufacturing and smart manufacturing as national strategies, emphasizing the importance of the "dual drivers" in achieving high-quality economic development. Green technological innovation is considered key to achieving the simultaneous development of environmental protection and economic growth. However, China's enterprises have weak independent innovation capabilities and urgently need to enhance green technological innovation through collaborative innovation between industry, academia, and research. This paper, based on evolutionary game theory, constructs a collaborative innovation model involving government, universities, and enterprises, analyzing the evolutionarily stable strategies under different scenarios and exploring the role of cooperation mechanisms in promoting green technological innovation. Through numerical simulations, the paper studies the impacts of initial willingness probability, policy support, financial rewards, and penalties on the evolution of green collaborative innovation strategies, validating the critical roles of government, universities, and enterprises in promoting green technological innovation. The findings provide theoretical and practical guidance for the sustainable development of green technological innovation in the context of smart manufacturing.

Keywords: Smart Manufacturing; Evolutionary Game; Green Technological Innovation

智能制造下绿色技术创新发展的三方演化博弈分析

洪锋

华东交通大学, 江西南昌 330013

摘要: 《中国制造 2025》将绿色制造与智能制造列为国家战略, 强调“双驱动”对经济高质量发展的重要性。绿色技术创新被视为推动环境保护与经济增长协同发展的关键, 然而我国企业自主创新能力较弱, 亟需通过产学研协同创新提升绿色技术创新能力。本文基于演化博弈理论, 构建了政府、高校和企业三方参与的协同创新模型, 分析了不同情景下的演化稳定策略, 并探讨了合作机制对绿色技术创新的促进作用。通过数值仿真, 本文研究了初始意愿概率、政策支持、资金奖励及惩罚力度对绿色协同创新策略演化的影响, 验证了政府、高校和企业推动绿色技术创新中的关键作用, 为智能制造背景下绿色技术创新的可持续发展提供了理论依据和实践参考。

关键词: 智能制造; 演化博弈; 绿色技术创新

引言

自 20 世纪 80 年代智能制造概念提出以来, 其发展融合了信息化、网络化和自动化技术, 并逐渐成为全球制造业转型的核心驱动力。在碳达峰和碳中和目标的推动下, 绿色低碳发展成为智能制造企业的新趋势, 《中国制造 2025》更是将绿色制造和智能制造列为国家战略, 强调“绿色”与“智能”双驱动对于经济高质量发展的重要性。Phuyal 等强调, 在绿色智能制造风口下, 技术创新仍是决定性因素之一^[1]。龙子午等认

为绿色技术创新是推动经济社会向绿色发展方式和生活方式转变的创新^[2]，其核心在于构建从研发、成果转化到市场化的绿色智能技术创新生态体系。然而，我国当前企业自主创新能力较弱，核心技术不足，单一主体难以实现绿色技术的重大突破，Oskam 等认为创新生态系统强调的就是协同共生，主体间通过协同创新来实现价值共创^[3]。因此，产学研协同创新成为我国提升绿色技术创新能力的重要路径。通过政府引导、高校牵头、企业参与的政产学研模式，不仅能整合异质性知识资源，还能有效降低技术创新的不确定性和成本。本文基于演化博弈理论，构建政府、高校和企业三方参与的协同创新模型，分析不同情景下的演化稳定策略，探讨合作机制对绿色技术创新的促进作用。同时，借鉴 Chen 和 Zhu 的研究，本文分析政策驱动对制造业绿色技术创新的关键作用，指出合理的政策激励能够增强企业参与绿色创新的意愿^[4]。此外，循环经济理念在实现可持续发展中有着核心地位，这也为智能制造背景下绿色技术创新的实施提供了理论支持。在数据仿真部分，本文参考了吴洁等和佟岩等研究，通过博弈模型探讨不同变量对三方合作效果的影响^{[5][6]}。Li 等研究了企业与学研间的博弈，并用 Matlab 进行数值仿真模拟^[7]。本文试图在智能制造背景下寻求经济发展与环境保护的平衡点，通过数据仿真验证三方协同作用的可行性，为我国智能制造背景下绿色技术创新体系的健康可持续发展提供理论参考和实践启示。

1 绿色技术创新发展演化模型建立与求解

1.1 演化模型假设

本文的三大博弈主体，政府、企业、高校在绿色技术创新发展演化过程中，为追求自身利益最大化，需要根据其他两方的策略的选择来决定自身策略，最终趋于稳定的过程。该过程能够动态地反映政府、企业、高校在实际博弈过程中策略的演变，因此本文选择演化博弈方法对绿色技术创新发展的演化进行相关研究。基于此，做出如下假设：

假设 1：参与主体。在绿色技术创新发展演化过程中，一共有三类参与主体，分别是政府（G）、高校（S）和企业（E），政府主要是通过为企业和高校提供不同的激励以及绿色出行奖励机制，以及对绿色技术创新进行监督等手段，推动企业和高校的合作；企业主要负责提供绿色技术创新资源以及绿色技术创新成果的转化；高校主要负责绿色技术创新知识、技术以及相关人才的输出，而且三方在博弈过程中都是有限理性的，通过进行多次博弈找到最优策略。

假设 2：合作策略。绿色技术创新演化博弈中存在三大博弈主体：政府、企业、高校。三大主体各自有两种策略选择，即政府主动/不主动支持绿色技术创新，其概率分别为 x 和 $1-x$ 。企业进行/不进行绿色技术创新，其概率分别为 y 和 $1-y$ 。高校参与/不参与绿色技术创新，其概率分别分 z 和 $1-z$ 。三个主体中的个体都具有有限的理性，且会采取模仿的策略根据主体所在群体中其他个体的选择来选择自己的策略。

假设 3：合作成本。政府会为企业和高校的绿色技术创新制定优惠政策，并且监督企业和高校的创新过程，产生的总成本为 $C1$ ；企业和高校作为绿色技术创新的主要参与主体，高校参与绿色技术协同创新需付出的成本 $C3$ ，企业未采取绿色技术创新的初始的成本为 $C2$ ，后续如果参与绿色技术创新产生的额外成本为 C ，当政府选择参与创新时，政府所提供的优惠政策会使得企业和绿色技术创新过程中投入的总成本 C 减小，减少的成本量用 S 表示。

假设 4：合作收益。政府参与绿色技术协同创新获得的收益为 $R1$ ，用 $R2$ 和 $R3$ 分别表示企业和高校进行绿色技术创新之前的初始收益，当企业选择绿色技术创新时，绿色技术创新会为企业带来额外收益 R ，除此之外，政府对积极参与创新的高校和企业都会给予资金支持 G 。

假设 5：惩罚。在政府的监督下，为避免企业和高校参与创新出现违约的情况，当企业选择进行绿色技术创新而高校选择不进行绿色技术协同创新时，高校需要向企业支付一定的惩罚金，记为 M ；当企业违约时，企业需要向高校支付一定的惩罚金，记为 N 。根据上述五个假设，我们可以得出整个三方演化博弈模型中相关参数假设及其含义如表 1 所示。

表 1 模型中相关参数假设及其含义

参数	含义
R (100)	企业参与绿色技术创新获得的额外收益
R1 (50)	政府参与绿色技术协同创新获得的收益
R2 (100)	企业未采取绿色技术创新的初始的收益
R3 (30)	高校参与协同绿色技术创新获得的收益
C (20)	企业参与绿色技术创新付出的额外成本
C1 (20)	政府参与绿色技术协同创新需付出的成本
C2 (30)	企业未采取绿色技术创新的初始的成本
C3 (15)	高校参与绿色技术协同创新需付出的成本
S (10)	政府所提供的优惠政策会使得企业在绿色技术创新过程中减少的成本量
G (5)	政府对积极参与绿色技术创新的高校和绿色技术创新的企业分别给予的资金支持。
M (5)	当企业选择进行绿色创新而高校选择不进行创新时，高校需要向企业支付一定的惩罚，记为 M
N (5)	当高校选择进行创新而企业选择不进行绿色创新，即企业违约时，企业需要向高校支付一定的惩罚，记为 N

1.2 演化稳定策略求解

在模型中，政府、企业和高校依据自身意愿进行策略选择，假设政府选择参与绿色技术协同创新的意愿的概率为 x ，则政府选择不参与绿色技术协同创新的意愿为 $1-x$ ；企业选择进行绿色技术创新的意愿为 y ，则企业选择不进行协同创新的意愿为 $1-y$ ；高校选择进行绿色技术协同创新的意愿为 z ，则高校选择不进行绿色技术协同创新的意愿为 $1-z$ 。其中， $x, y, z \in (0,1)$ 。并根据以上假设，构建政产学研协同创新博弈的支付矩阵。根据支付矩阵建立收益期望函数，根据支付矩阵可知参数以及收益，我们假设政府在博弈时选择“参与”策略的期望收益、选择“不参与”策略的期望收益和平均期望收益。通过上面的分析，我们在 MATLAB 里面可以用函数求解，得到政府、企业和高校的复制动态方程，后续按照 Friedman 提出的方法，微分方程系统的演化稳定策略由该系统的雅克比矩阵的局部稳定性分析得到，由 MATLAB 求得到该系统的雅克比矩阵，然后令 $f(x) = f(y) = f(z) = 0$ ，可以得到局部均衡点共有十六个，其中，D1 (0,0,0)，D2 (1,0,0)，D3 (0,1,0)，D4 (0,0,1)，D5 (1,1,0)，D6 (1,0,1)，D7 (0,1,1)，D8 (1,1,1) 构成了演化博弈域的边界 $\{(x, y, z) | x = 0, 1; y = 0, 1; z = 0, 1\}$ ，由此围成的区域 D 是三方博弈的均衡解域，即 $D = \{(x, y, z) | 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq z \leq 1\}$ ，在此域内还存在其他均衡点满足条件。企业、政府和高校组成的动态复制系统中其他均衡点是非渐进稳定状态，因此只需要知道 D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8 的渐进稳定性。

2 绿色技术创新发展数值实验及仿真

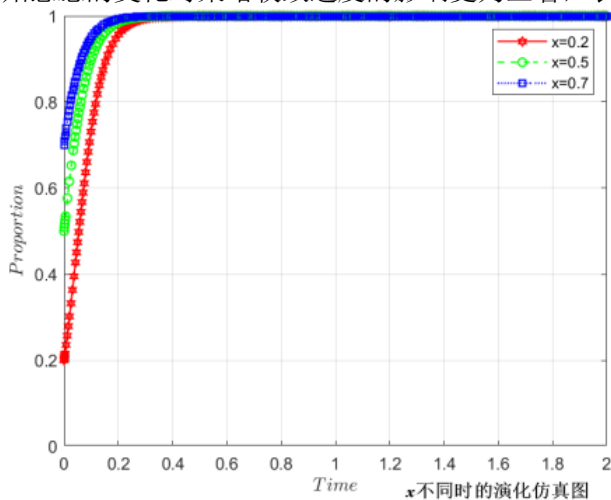
本节以系统最理想的稳定状态，三方主体的策略选择为{政府参与，企业参与，高校科研机构参与}时为例，即均衡点(1,1,1)作为系统的演化稳定点，进行参数取值，并用 Matlab 工具对企业、政府和高校的交互行为演化过程进行数值仿真，分析参数变动对演化结果的影响。本文打算考虑根据江西省协同创新实际情况，对支付矩阵中的参数初始值给出如下假设，统一单位为百万元。政府参与绿色协同创新的额外收益 $R1 = 50$ ，企业参与绿色协同创新的额外收益 $R = 100$ ，企业未采取绿色技术创新的初始的收益 $R2 = 100$ ，高校参与绿色技术创新的初始的收益 $R3 = 30$ ，这是三个主体整体收益的不同的一个假设值。成本方面，企业采取绿色技术创新付出的额外成本为 $C = 20$ ，政府参与绿色技术协同创新需付出的成本也为 $C1 = 20$ ，企业未采取绿色技术创新的初始的成本为 $C2 = 30$ ，高校参与绿色技术协同创新需付出的成本 $C3 = 15$ 。除了收益和成本这两个部分，政府所提供的优惠政策会使得企业在绿色技术创新过程中减少的成本量 $S = 10$ ，政府对积极参与绿色技术创新的高校和绿色技术创新的企业分别给予的资金支持都为

$G = 5$ 。与此同时，当企业选择进行绿色创新而高校选择不进行创新时，高校需要向企业支付一定的惩罚，记为 M ；当企业选择进行绿色创新而高校选择不进行创新时，高校需要向企业支付一定的惩罚，记为 N 。 M, N 都取值等于 5。

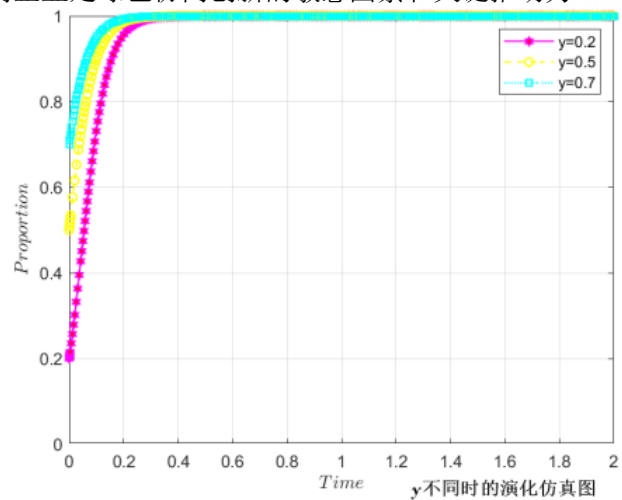
通过以上分析以及初始值的设置，本文运用 Matlab2020a 软件对政府、企业和高校不同初始状态下其策略选择的动态进化过程进行仿真，根据仿真分析结果，对参与主体的初始参与意愿概率、政府的政策支持和资金支持、惩罚力度系数进行讨论。

2.1 初始意愿概率对绿色创新关系演化的影响

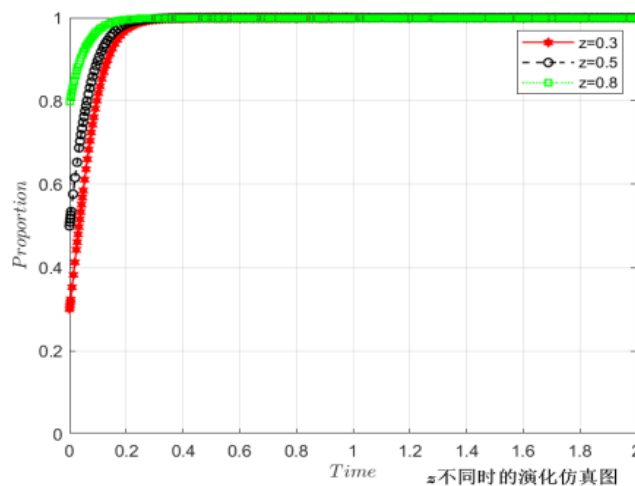
图 1 模拟了政府 (x)、企业 (y)、高校 (z) 参与初始意愿分别变化对绿色协同创新策略随时间变化的影响。仿真结果表明，在其他主体意愿保持不变的情况下，随着某一主体初始意愿的增加，整体策略向收敛值 1 的速度加快。这表明政府、企业和高校的参与均在推动绿色协同创新中发挥了关键作用。政府主导作用：当企业和高校意愿不变时，政府初始意愿的增加通过政策引导和机制完善显著加速策略收敛。企业关键地位：在政府和高校意愿不变的情况下，企业初始意愿的增加对策略收敛速度影响更为敏感，凸显其在推动协同创新中的核心作用。高校支持作用：当政府和企业意愿不变时，高校初始意愿的提高通过理论支撑和学术引导促进策略加速收敛。图 2 整合了三方主体初始意愿变化的仿真结果，进一步表明，无论政府、企业或高校，任何一方初始意愿的提升都会推动整体策略更快收敛。然而，与政府和高校相比，企业初始意愿的变化对策略收敛速度的影响更为显著，表明企业是绿色协同创新的敏感因素和关键推动力。



(a) x 初始概率变化时的仿真图



(b) y 初始概率变化时的仿真图



(c) z 初始概率变化时的仿真图

图 1 x, y, z 不同初始概率时数值变化仿真图

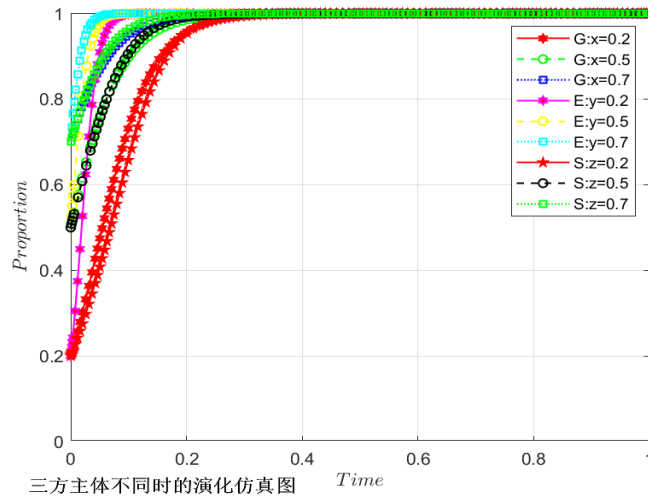
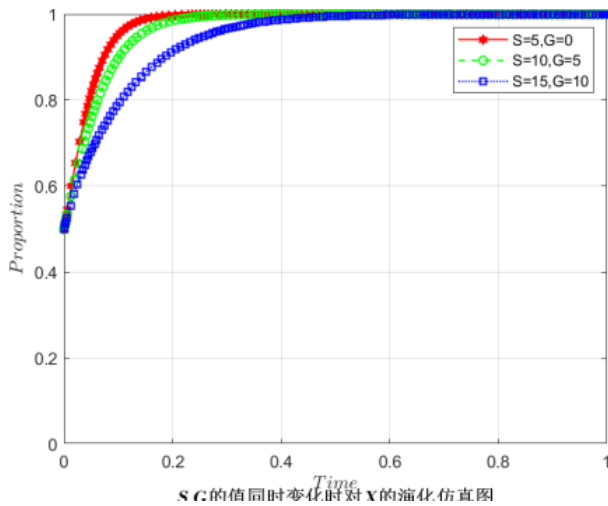


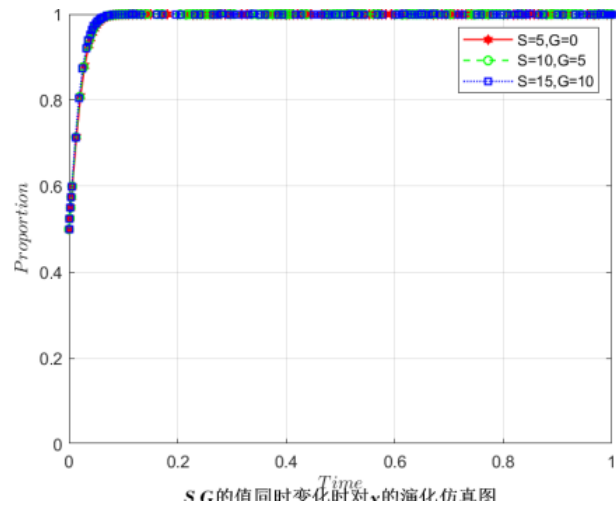
图 2 主体不同时不同初始概率时数值变化仿真图

2.2 政府政策支持和资金支持对绿色创新关系演化的影响

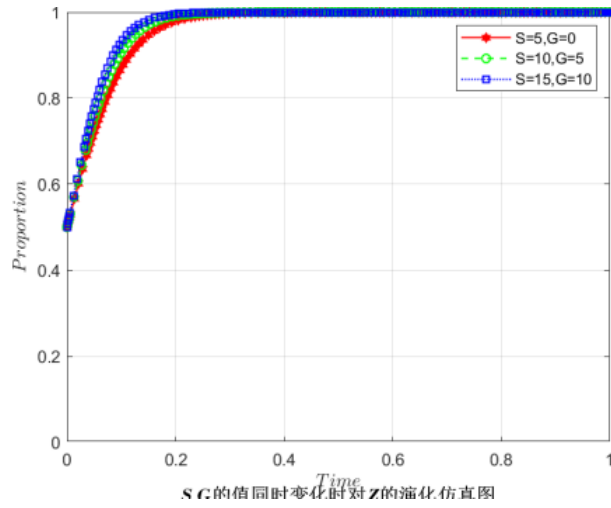
图 3 和图 4 展示了在政府、企业和高校的初始参与概率均为 0.5、其他参数保持不变的前提下，政策支持（S）和资金奖励（G）同时变化对整体绿色协同创新策略的影响。通过仿真分析可得以下结论：政府参与：随着 S 和 G 的逐步增加，政府的演化收敛速度逐渐减慢。这是因为政策支持和资金奖励均需政府投入，当 S 和 G 增加时，政府的成本显著上升，收益相对降低，从而使其参与意愿和收敛速度受限企业参与：从图 3 中具体部分可以看出，S 和 G 的增加对企业参与的收敛速度有积极影响，促使企业更快达到均衡点。然而，企业的收敛速度变化幅度较小，这表明相较于企业整体收益，政策支持和资金奖励的激励作用相对有限，但仍能发挥一定的促进效果。高校参与：与企业相比，高校的收敛速度受 S 和 G 增加的影响更加显著。高校投入资金规模通常小于企业，因此政策支持和资金奖励对高校参与意愿的提升效果更为明显，从而促使其更快达到均衡点。图 4 整合了政策支持（S）和资金奖励（G）同时变化对不同的三方主体影响的仿真结果，S 和 G 的同步增加对政府、企业和高校的影响具有明显差异。高校和企业的收敛速度逐渐加快，体现了政策和资金支持对其正向激励作用；而政府的收敛速度则因成本增加而逐渐减慢。此外，政策支持和资金奖励对高校的影响效果明显大于对企业，说明不同主体因投入与收益结构差异，对外部激励的响应程度存在显著不同。以上仿真结果表明，在绿色协同创新中，政策支持和资金奖励机制需要兼顾三方主体的差异性需求，以实现整体均衡和可持续发展。



(a) S 和 G 变化时对政府影响的仿真图



(b) S 和 G 变化时对企业影响的仿真图



(c) S 和 G 变化时对高校影响的仿真图

图 3 S 和 G 变化时对政府，企业，政府影响的仿真图

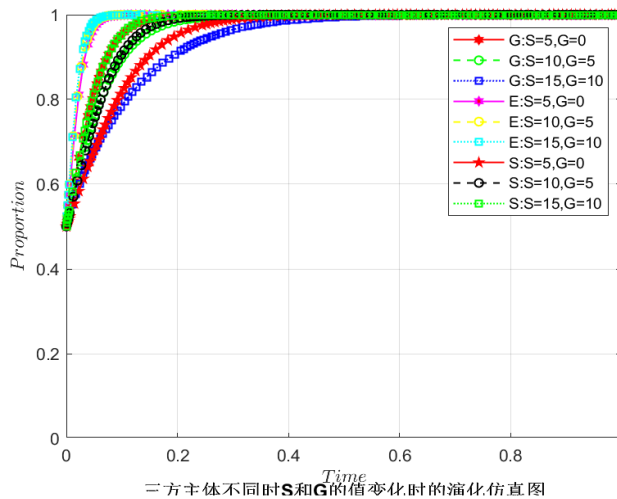


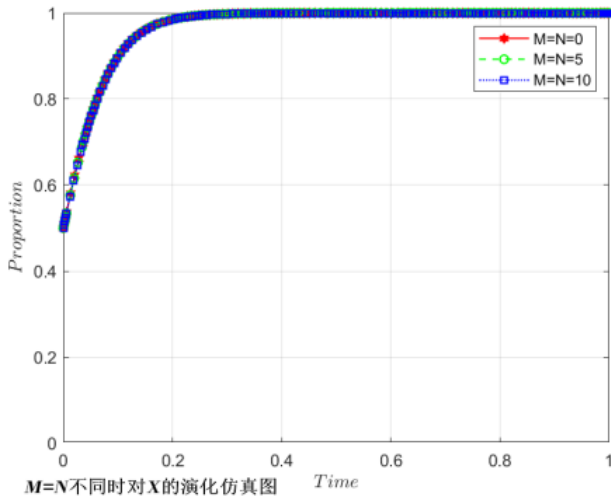
图 4 主体不同时 S 和 G 变化时对政府，企业，政府影响的仿真图

2.3 惩罚力度对绿色创新关系演化的影响

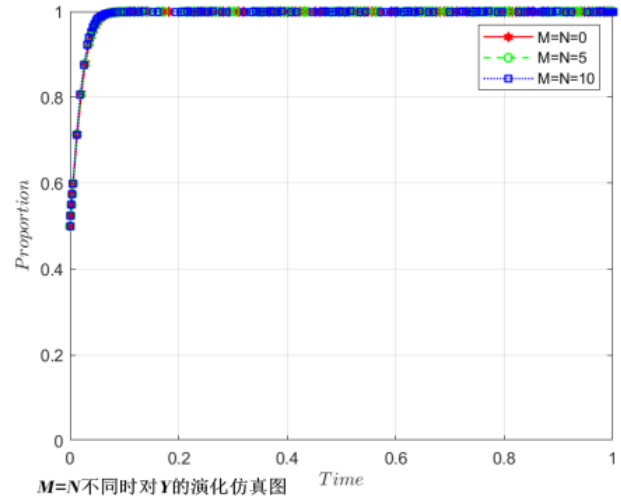
图 5 和图 6 展示了在政府、企业和高校的初始参与概率均为 0.5、其他参数保持不变的前提下，企业支付给高校的违约惩罚 M 和高校支付给企业的违约惩罚 N 同时变化时对整体绿色协同创新策略的影响。政府参与：图 5 中的结果显示，无论 M 和 N 的取值如何变化，企业与高校之间的违约惩罚对政府参与的影响微乎其微。这是因为违约惩罚机制主要作用于企业与高校之间，对政府的激励作用有限，因此其参与意愿和收敛速度变化不大。企业参与：图五中的数据表明，随着 M 和 N 增加，企业的收敛速度逐渐加快，尤其是在违约惩罚力度适度增加时，对企业的激励效果更为明显。企业对违约惩罚的敏感度较低，但在合适区间内，惩罚力度加大能够显著促进企业参与绿色协同创新的决策，加快其达成均衡点的速度。高校参与：相比企业，图 5 中显示高校对违约惩罚的反应更为敏感。随着 M 和 N 增加，高校的收敛速度显著加快，这表明违约惩罚对高校的激励作用更强，尤其是在高校的收益较少时，惩罚金额占收益的比例较大，因而其对惩罚变化的反应更加敏锐。

图 6 整合了企业支付给高校的违约惩罚 M 和高校支付给企业的违约惩罚 N 同时变化时对不同的三方主体影响的仿真结果。图 6 显示了违约惩罚对政府、企业和高校的不同影响。尽管违约惩罚主要作用于企业和高校，但高校的反应明显高于企业和政府。随着 M 和 N 增加，高校的收敛速度显著加快，而企业的收敛速度变化较小。政府的收敛速度几乎不受影响，这再次验证了违约惩罚对不同主体的作用机制差异。总的来

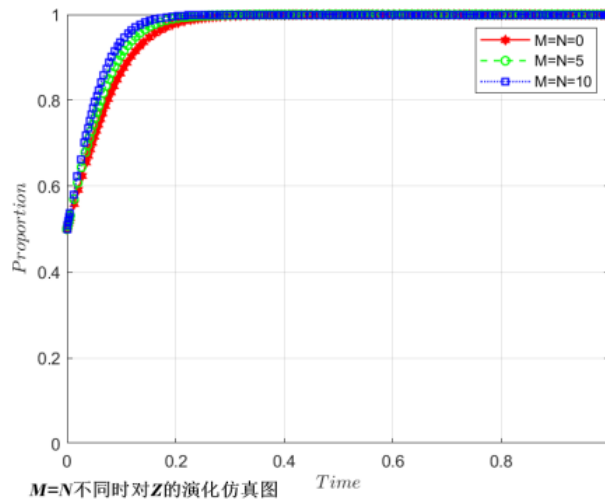
看，企业支付给高校的违约惩罚 M 和高校支付给企业的违约惩罚 N 的变化，尤其在适当区间内，能够加速企业和高校的决策收敛，而对政府的影响较小。不同的惩罚力度对三方主体的参与影响存在显著差异，特别是对高校的影响更为显著。



(c) $M=N$ 变化时对政府影响的仿真图



(b) $M=N$ 变化时对企业影响的仿真图



(c) $M=N$ 变化时对高校影响的仿真图

图5 $M=N$ 变化时对政府，企业，政府影响的仿真图

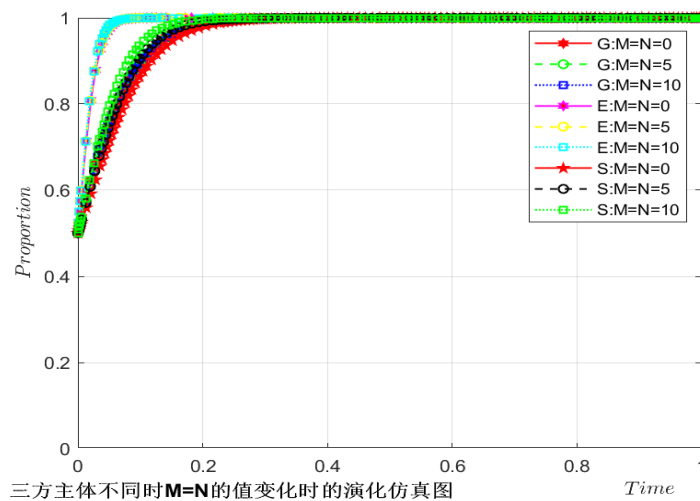


图6 主体不同时 $M=N$ 变化时对政府，企业，政府影响的仿真图

3 结论与建议

3.1 结论

本文针对我国智能制造背景下绿色技术创新发展的影响因素与演化趋势，构建了智能制造背景下绿色技术创新发展过程中企业、政府和高校的三方演化博弈模型及其动态复制方程，并对该模型进行了简单求解，运用 Matlab 工具对企业、政府和高校的交互行为演化过程进行数值仿真，分析参数变动对系统演化结果的影响，探究影响系统演化至理想状态的影响因素及其影响机理。最终通过探究得出结论：

政府，企业和高校初始参与意愿概率的增加，能够加速实现整体系统演化的速度。通过我们前面的演化过程，我们发现无论是政府，企业还是高校都在初始意愿概率逐渐变大的情况下加速了收敛与均衡点的速度，由此我们可以得出三方主体的初始意愿概率的变化是很重要的影响系统演化至理想状态的影响因素，而且演化速度与初始参与意愿概率是成正比关系。与此同时，我们通过对比发现，企业对初始参与意愿概率的敏感度比政府和高校是更加敏感的，这也说明了企业在三方主体中的重要性，所以我们可以提高企业的初始参与意愿概率来更快更有效的推动系统的演化发展。

政府政策支持和资金支持的不断提高对企业和高校来说能够加速演化速度，而对政府来说可能具有降速作用。政策支持主要体现为文章中 S 的值的增加，随着政策支持力度的增加，减少了企业和高校在参与协同创新时总成本；资金支持主要体现为文章中 G 的值的增加，随着资金支持力度的增加，减少了企业和高校在参与协同创新时总成本；但是 S 的增加和 G 的增加在减少企业和高校在参与协同创新时总成本的同时也加大了政府的投入成本，缩减政府的收益。所以，我认为我们需要在实际操作过程中找到合适的平衡点，在政府提供合适程度的政策支持和资金支持的基础上，也要合理的保证政府收益价值的最大化。

惩罚力度的变化能够有效的影响企业和高校的演化速度，但是对政府的演化速度影响收效甚微。根据上述数值实验及仿真分析的情况，我们能够发现随着惩罚力度在合理范围内的增加，能够有效地促进企业和高校收敛于均衡点的速度加快。与此同时，高校相比于企业，受到惩罚力度的变化的影响程度更大，而政府相对于企业和高校来说，受到惩罚力度变化的影响几乎没有，说明惩罚力度几乎很难影响到政府的演化速度，这是因为惩罚机制是建立在企业和高校之间的违约机制，所以说对政府的干扰和影响几乎可以忽略不计。虽然对政府的影响程度很小，但是我们通过惩罚机制的建立以及变化还是可以去影响企业和高校的演化，进而影响整体的演化博弈。

3.2 对策建议

1) 保证政府提供合理的政策支持和资金支持。政府在整个三方演化博弈中是非常重要的角色，他提供的政策支持和资金支持能够改变企业和高校的整体初始参与意愿，除此之外，他在整体博弈中扮演的引导者的角色也是相当的重要的。正是通过合理的政策和资金支持，在整体演化中一步步引导企业和高校参与整体的三方合作，实现了整体演化博弈的一个均衡状态。所以说保证政府制定合理的政策和提供资金奖励是整个演化过程中很重要的一环，能够有效的帮助整体的演化过程，进而实现整体的演化博弈达到理想状态，更好的实现我们最终期望的整体的绿色创新发展。

2) 积极提高企业的参与意愿。从之前的研究中我们发现企业相较于政府和高校对整体演化博弈速率的影响是最敏感的，所以我们要重点从企业入手提高整体效果，而这其中非常重要的一点就是提高企业的参与意愿。不论是政府的政策支持和资金支持，亦或是惩罚力度这些都能影响到企业的参与意愿，企业最看重的最终还是经济利益，如何提高整体的经济利益是影响企业参与意愿变化的非常重要的因素，企业能够获得的经济利益越高，相对来说，企业的参与意愿肯定更高。所以我们可以通过与政府和高校的合作，高校有效的减小企业的研发，技术等方面的成本，政府通过政策，机制的制定帮助企业减小成本，充分的利用三方合作的优势提高企业的经济收益，从而使企业的参与意愿提高。进一步我们就能够加速整体的演

化，使整体的绿色创新发展的演化博弈达到理想状态。

3) 制定合理的惩罚制度。企业往往追求经济利益最大化，违约金的变化会引起其参与意愿概率的快速变化，从而影响整体的演化；高校则以人才培养、科学研究和社会服务等为目标，对学术价值和社会利益更加敏感。因此，我们可以适当加大对企业的惩罚力度，通过负向激励作用来引导企业进行绿色协同创新；与此同时，我们也需要通过加大对高校的惩罚力度，采取同样的方式激励高校积极参与智能制造背景下的绿色创新发展，只有通过政府的合理引导，高校和企业积极参与整体的绿色创新发展，才能更有效的促进整体社会绿色经济发展，更好的发展国家的绿色经济。

参考文献

- [1] PHUYAL S, BISTA D, BISTA R. Challenges, Opportunities and Future Directions of Smart Manufacturing: A State of Art Review[J]. Sustainable Futures, 2020,2: 100023.
- [2] 龙子午,张晓菲.ESG表现对企业绿色技术创新的影响——基于中国上市公司的经验证据[J].南方金融,2023(09):56-70.
- [3] OSKAM I, BOSSINK B, MAN A. Valuing Value in Innovation Ecosystems: How Cross-Sector Actors Overcome Tensions in Collaborative Sustainable Business Model Development[J]. Business & Society, 2021,60(5): 1059-1091
- [4] Chen, Y., & Zhu, Z. (2022). Policy-Driven Green Technology Innovation in the Manufacturing Industry: Evidence from China. Environmental Science and Pollution Research, 29(1), 567-578.
- [5] 吴洁,车晓静,盛永祥,陈璐,施琴芬.基于三方演化博弈的政产学研协同创新机制研究[J].中国管理科学,2019,27(01):162-173.
- [6] 佟岩,蒋雪娇.基于SD模型的绿色技术创新影响机理——以企业与政府演化博弈为视角[J].沈阳大学学报(社会科学版),2022,24(01):25-33.
- [7] Li D, Liu C. An Evolutionary Game Analysis of Synergetic Innovation behaviour in regional innovation networks[J]. E3S Web of Conferences,2021,235.

【作者简介】



洪锋（1999-），男，汉族，学士学位，数据科学与大数据技术，2022年6月新余学院数据科学与大数据专业毕业，2022年9月-至今就读于华东交通大学经济管理学院会计专硕。Email: 3346467089@qq.com