

数字经济背景下三方博弈的供应链演化模型

王 娟

贵州大学管理学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2024年3月25日; 录用日期: 2024年4月7日; 发布日期: 2024年5月31日

摘 要

本文通过探讨数字经济背景下, 涉及零售商、供应商和政府三方主体的供应链演化博弈模型, 研究了各方在不同策略下的选择及其对供应链稳定性的影响。通过理论分析和仿真模拟, 识别了五个可能的策略均衡点, 展示了供应链系统在不同策略组合下可达到的稳定状态。研究发现, 随着市场条件和政策环境的变化, 各方的策略选择呈现动态演化, 对供应链的稳定性和发展方向产生影响。本文为供应链管理和政策制定提供了实用见解, 并指出了未来研究的方向, 旨在更全面理解供应链系统的动态演化, 为实现供应链的稳定和可持续发展提供理论支持。本研究不仅丰富了供应链管理和三方博弈理论, 也为零售商、供应商和政府数字经济时代下的策略选择提供了科学的指导, 具有重要的理论意义和实践价值。

关键词

数字经济, 三方博弈, 供应链

A Supply Chain Evolution Model with Three-Party Game in the Context of Digital Economy

Xian Wang

School of Management, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Mar. 25th, 2024; accepted: Apr. 7th, 2024; published: May 31st, 2024

Abstract

In this paper, by exploring a supply chain evolution game model involving three parties, namely retailers, suppliers and government, under the background of digital economy, we investigate the choices of each party under different strategies and their impacts on the stability of the supply

chain. Through theoretical analysis and simulation, five possible strategy equilibria are identified, demonstrating the stable states that the supply chain system can achieve under different strategy combinations. It is found that with the changes in market conditions and policy environment, the strategy choices of the parties show dynamic evolution, which has an impact on the stability and development direction of the supply chain. This paper provides practical insights for supply chain management and policy making, and points out the direction of future research, aiming at a more comprehensive understanding of the dynamic evolution of the supply chain system, and providing theoretical support for realizing the stability and sustainable development of the supply chain. This study not only enriches the theory of supply chain management and three-party games, but also provides scientific guidance for the strategic choices of retailers, suppliers, and governments in the era of digital economy, which is of great theoretical significance and practical value.

Keywords

Digital Economy, Three-Way Game, Supply Chain

Copyright © 2024 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

随着数字技术的飞速发展，数字经济已成为推动全球经济增长的重要力量。在这一背景下，供应链作为经济活动的重要组成部分，其运作模式和管理策略也随之发生了深刻变化。随着信息技术的进步，供应链管理已经从提升劳动效率转向增强整体运营效率[1]，进一步降低成本并提升利润。Delic [2]等人的研究表明，供应链灵活性对于提升供应链绩效起着关键作用。同时，政策文件如《关于积极推进供应链创新与应用的指导意见》和欧盟的“绿色协议”等，为供应链创新和可持续发展指明了方向。

在数字经济的大环境下，零售商、供应商和政府这三方主体，在供应链管理中的互动关系更是复杂多变，他们之间的策略选择不仅影响各自的利益，也对整个供应链系统的效率和稳定性产生重要影响。零售商面临着激烈的市场竞争，其策略选择从传统的价格竞争逐渐转向包括质量管理在内的多维度竞争。供应商为适应市场需求的快速变化，不断探索供应链优化和新产品开发的策略。同时，政府作为市场的调节者，通过价格管制和税收政策等手段，旨在促进市场公平竞争，保障消费者利益，同时促进经济的健康发展。这种三方之间的互动构成了一个复杂的博弈过程，其演化结果对供应链的稳定性和发展趋势有着重要影响。

三方博弈是博弈论中一个重要的研究领域，它涉及到三个独立决策者之间的策略选择和利益博弈。近期研究集中探讨了三方博弈理论在不同领域的应用及其对策略和治理的影响。汪翼[3]等人关注外卖配送风险，提出适度罚款与超时补偿机制可优化配送策略。于涛[4]等人聚焦于区块链技术在跨境贸易中的应用，通过构建海关、金融机构和贸易企业三方博弈模型，研究了这些主体在数字化转型过程中的动态互动。李子勋和宗刚[5]研究发现，通过三级监管机制，可以有效治理平台与商家的合谋问题。祝凌瑶[6]等人通过构建一个包括中央政府和两个地方政府的演化博弈模型，分析了政府数据质量管理中的行为动态及其稳定性。董雨[7]等人探讨了低碳行为信用监管，发现公众与政府合作可激励低碳行为。左迺谦[8]等人通过环境规制模型分析了绿色生产和营销策略的影响。何海龙和李明琨[9]研究了快递包装逆向物流中的三方博弈，强调政府激励的重要性。胡小飞[10]等人研究快递物流中的个人信息隐私保护，发现保护

成本影响系统稳定性。刘大维[11]等人通过三方博弈模型探讨零售商回收与制造商处理过期食品的策略，为决策提供理论依据。蒋致远[12]等人研究政府、供应商、零售商间的关系，指出政府参与能提升社会福利并促进合作。这些研究展示了三方博弈理论在不同领域的应用及其对策略选择的影响。

当前研究主要探讨了政府、电商、物流企业、消费者等多方在不同领域中的三方博弈关系，然而，关于零售商的价格竞争、供应商的供应链优化、政府的税收策略等方面的研究较少，特别是在考虑调拨决策的三方博弈分析方面。本文旨在构建一个三方博弈的供应链演化模型，以探究在数字经济背景下，零售商、供应商和政府之间的策略选择如何相互作用，以及这些互动如何影响供应链系统的演化稳定性。通过复制动态方程的分析，本文深入研究了各方策略的演化动态，揭示了在不同条件下三方演化策略的稳定性条件，进而通过仿真分析验证了模型的合理性和实际应用价值。本文的研究不仅丰富了供应链管理领域的理论基础，也为零售商、供应商和政府数字经济时代下的策略选择提供了科学的参考依据，具有重要的理论意义和实践价值。

2. 理论框架

本文探讨了零售商、供应商、政府在三方博弈中的策略选择：零售商考虑价格竞争与质量管理，供应商关注供应链优化与新产品开发，政府则着眼于税收与价格管制。这些策略相互作用，形成复杂的博弈关系。理解这些策略对分析博弈结果非常关键。在此系统中，三方都追求自身利益最大化，具备有限理性、自主学习和成长的能力。

对于零售商、供应商和政府，他们各自有两种策略选择，并且每种策略都涉及一系列成本和收益。假设当零售商选择“价格竞争策略”时，涉及利润降低的损失为 A_1 、销量增加带来的额外收益为 A_2 ，供应链优化带来的收益为 a_1 ；当零售商选择“质量管理策略”时，涉及品牌形象效用为 B_1 、增加的生产成本为 B_2 、吸引忠诚客户的长期利润为 B_3 、供应链优化带来的收益为 b_1 、受益于供应商新产品开发的收益为 b_2 。

假设当供应商选择“供应链优化策略”时，涉及初期投入的成本为 C_1 、长期运营成本降低的收益为 C_2 、受益于零售商价格竞争的收益为 c_1 、受益于零售商质量管理的收益为 c_2 ；当供应商选择“新产品开发策略”时，涉及研发成本为 D_1 、销售额增加的收益为 D_2 、受益于零售商价格竞争策略的收益为 d_1 。

假设当政府选择“价格管制策略”时，涉及监督成本为 E_1 、保护消费者权益的收益为 E_2 、影响零售商价格竞争策略所造成的损失为 e_1 、影响供应商新产品开发策略所造成的损失为 e_2 、受益于零售商的价格竞争策略的收益为 e_3 ；当政府选择“税收政策”时，涉及税收征管成本为 F_1 、税收收入为 F_2 、从零售商与供应商的成本降低中获得税收收入增加的好处为 f_1 、影响供应商造成的损失为 f_2 、受益于供应商新产品开发中带来的收益为 f_3 。

假设调拨机制(仅在供应链优化时产生)涉及运输、库存、及管理成本为 g_1 ，提升供应链效率及顾客满意度的收益为 g_2 。此外，零售商从高效的供应链中获得收益为 g_3 ，政府所获价值收益为 g_4 。

以上所有假设参数都大于零，且 $D_1 > C_1$ ， $C_2 > D_2$ ， $g_2 > g_1$ ， $E_1 > F_1$ ， $F_2 > E_2$ 。可得到零售商、供应商和政府博弈模型的支付表如表 1 所示。

Table 1. Payment tables for the three-party game model

表 1. 三方博弈模型的支付表

零售商	供应商	政府	
		价格管制政策 z	税收政策 $1-z$
价格竞争策略 x	供应链优化策略 y	$A_2 - A_1 + a_1 - e_1 + g_3$	$A_2 - A_1 + a_1 + g_3$
		$C_2 - C_1 + c_1 - g_1 + g_2$	$C_2 - C_1 + c_1 - g_1 + g_2 - f_2$

续表

	$E_2 - E_1 + e_3 + g_4$	$F_2 - F_1 + f_1 + g_4$
	$A_2 - A_1 - e_1$	$A_2 - A_1$
新产品开发策略 $1-y$	$D_2 - D_1 + d_1 - e_2$	$D_2 - D_1 + d_1 - f_2$
	$E_2 - E_1 + e_3$	$F_2 - F_1 + f_1 + f_3$
	$B_1 - B_2 + B_3 + b_1 + g_3$	$B_1 - B_2 + B_3 + b_1 + g_3$
供应链优化策略 y	$C_2 - C_1 + c_2 - g_1 + g_2$	$C_2 - C_1 + c_2 - g_1 + g_2 - f_2$
	$E_2 - E_1 + g_4$	$F_2 - F_1 + f_1 + g_4$
质量管理策略 $1-x$	$B_1 - B_2 + B_3 + b_2$	$B_1 - B_2 + B_3 + b_2$
新产品开发策略 $1-y$	$D_2 - D_1 - e_2$	$D_2 - D_1 - f_2$
	$E_2 - E_1$	$F_2 - F_1 + f_1 + f_3$

3. 模型稳定性分析

假设零售商有 x 的可能性选择“价格竞争策略”，有 $1-x$ 的可能性采取“质量管理策略”；供应商有 y 的可能性选择“供应链优化策略”，有 $1-y$ 的可能性选择“新产品开发策略”；政府有 z 的可能性选择“价格管制政策”，有 $1-z$ 的可能性选择“税收政策”。

3.1. 零售商的复制动态方程分析

零售商分别采取“价格竞争策略”和“质量管理策略”的期望收益为 U_{11} , U_{12} 。其中：

$$U_{11} = yz(A_2 - A_1 + a_1 - e_1 + g_3) + y(1-z)(A_2 - A_1 + a_1 + g_3) + (1-y)z(A_2 - A_1 - e_1) + (1-y)(1-z)(A_2 - A_1) = ya_1 + yg_3 - ze_1 + A_2 - A_1$$

$$U_{12} = yz(B_1 - B_2 + B_3 + b_1 + g_3) + y(1-z)(B_1 - B_2 + B_3 + b_1 + g_3) + (1-y)z(B_1 - B_2 + B_3 + b_2) + (1-y)(1-z)(B_1 - B_2 + B_3 + b_2) = yb_1 + yg_3 + B_1 - B_2 + B_3 + b_2 - yb_2$$

零售商决策的复制动态方程为：

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(1-x)(U_{11} - U_{12}) = x(1-x)(ya_1 - ze_1 + A_2 - A_1 - yb_1 - B_1 + B_2 - B_3 - b_2 + yb_2)$$

由复制动态方程稳定性定理知：

(1) 当 $y = \frac{ze_1 + A_1 - A_2 + B_1 - B_2 + B_3 + b_2}{a_1 - b_1 + b_2}$ 时， $F(x) \equiv 0$ ，表示一切 x 处于稳定状态。换句话说，零售商选择“价格竞争策略”时，无论它采取何种比例，都会是稳定策略；

(2) 当 $y \neq \frac{ze_1 + A_1 - A_2 + B_1 - B_2 + B_3 + b_2}{a_1 - b_1 + b_2}$ 时，只有 $x=0$, $x=1$ 两点代表稳定状态，有两种情况：

① 当 $0 < y < \frac{ze_1 + A_1 - A_2 + B_1 - B_2 + B_3 + b_2}{a_1 - b_1 + b_2}$ 时， $F'(x)|_{x=0} > 0$, $F'(x)|_{x=1} > 0$ ，在这种情况下， $x=0$ 是

一种演化稳定策略，也就是当供应商选择“供应链优化策略”的比例小于 $\frac{ze_1 + A_1 - A_2 + B_1 - B_2 + B_3 + b_2}{a_1 - b_1 + b_2}$

时，零售商最终会选择“质量管理策略”。

② 当 $0 < \frac{ze_1 + A_1 - A_2 + B_1 - B_2 + B_3 + b_2}{a_1 - b_1 + b_2} < y < 1$ 时, $F'(x)|_{x=0} > 0$, $F'(x)|_{x=1} < 0$, 在这种情况下, $x=1$ 是一种演化稳定策略, 也就是当供应商选择“新产品开发策略”的比例大于 $\frac{ze_1 + A_1 - A_2 + B_1 - B_2 + B_3 + b_2}{a_1 - b_1 + b_2}$ 时, 零售商最终会选择“价格竞争策略”。

根据上述研究可以看出, 政府和供应商的战略选择会对零售商的战略演变产生影响, 并且零售商选择价格竞争策略时利润降低造成的损失、销量增加带来的额外收益、零售商选择质量管理策略时品牌形象效用、增加的生产成本等各个方面的变化都会对零售商的战略演变产生影响。在零售商选择“质量管理策略”的情况下, 会有 $0 < y < \frac{ze_1 + A_1 - A_2 + B_1 - B_2 + B_3 + b_2}{a_1 - b_1 + b_2}$, 可得推论 1。

推论 1 当零售商选择价格竞争策略时利润降低造成的损失与销量增加带来的额外收益之差减少、供应链优化带来的收益增多、零售商选择质量管理策略时品牌形象效用与增加的生产成本之差减少、吸引忠诚客户的长期利润减少、受益于供应商新产品开发的收益减少及其与供应链优化带来的收益之差增多、政府选择价格管制策略时影响零售商价格竞争策略所造成的损失减少时, 存在

$0 < \frac{ze_1 + A_1 - A_2 + B_1 - B_2 + B_3 + b_2}{a_1 - b_1 + b_2} < y < 1$, 即零售商的策略将由“质量管理策略”转向“价格竞争策略”。

3.2. 供应商的复制动态方程分析

供应商分别采取“供应链优化策略”和“新产品开发策略”的期望收益为 U_{21} , U_{22} 。其中:

$$\begin{aligned} U_{21} &= xz(C_2 - C_1 + c_1 - g_1 + g_2) + x(1-z)(C_2 - C_1 + c_1 - g_1 + g_2 - f_2) \\ &\quad + (1-x)z(C_2 - C_1 + c_2 - g_1 + g_2) + (1-x)(1-z)(C_2 - C_1 + c_2 - g_1 + g_2 - f_2) \\ &= xc_1 + zc_2 + C_2 - C_1 + c_2 - g_1 + g_2 - f_2 - zC_2 + zf_2 - xc_2 \\ U_{22} &= xz(D_2 - D_1 + d_1 - e_2) + x(1-z)(D_2 - D_1 + d_1 - f_2) \\ &\quad + (1-x)z(D_2 - D_1 - e_2) + (1-x)(1-z)(D_2 - D_1 - f_2) \\ &= xd_1 - ze_2 + D_2 - D_1 - f_2 + zf_2 \end{aligned}$$

供应商的复制动态方程为:

$$\begin{aligned} F(y) &= \frac{dy}{dt} = y(1-y)(U_{21} - U_{22}) \\ &= y(1-y)(xc_1 + zc_2 + C_2 - C_1 + c_2 - g_1 + g_2 - zC_2 - xc_2 - xd_1 + ze_2 - D_2 + D_1) \end{aligned}$$

由复制动态方程稳定性定理知:

(1) 当 $z = \frac{-xc_1 + C_1 - C_2 - c_2 + g_1 - g_2 + xc_2 + xd_1 + D_2 - D_1}{c_2 - C_2 + e_2}$ 时, $F(y) \equiv 0$, 表示一切 y 处于稳定状态。

换句话说, 供应商选择“供应链优化策略”时, 无论它采取何种比例, 都会是稳定策略;

(2) 当 $z \neq \frac{-xc_1 + C_1 - C_2 - c_2 + g_1 - g_2 + xc_2 + xd_1 + D_2 - D_1}{c_2 - C_2 + e_2}$ 时, 只有 $y=0$, $y=1$ 两点代表稳定状态,

有两种情况:

① 当 $0 < z < \frac{-xc_1 + C_1 - C_2 - c_2 + g_1 - g_2 + xc_2 + xd_1 + D_2 - D_1}{c_2 - C_2 + e_2}$ 时, $F'(y)|_{y=0} < 0$, $F'(y)|_{y=1} > 0$, 在这种情况下, $y=0$ 是一种演化稳定策略, 也就是当政府选择“价格管制政策”的比例小于 $\frac{-xc_1 + C_1 - C_2 - c_2 + g_1 - g_2 + xc_2 + xd_1 + D_2 - D_1}{c_2 - C_2 + e_2}$ 时, 供应商最终会选择“新产品开发策略”。

② 当 $0 < \frac{-xc_1 + C_1 - C_2 - c_2 + g_1 - g_2 + xc_2 + xd_1 + D_2 - D_1}{c_2 - C_2 + e_2} < z < 1$ 时, $F'(y)|_{y=0} > 0$, $F'(y)|_{y=1} < 0$, 在这种情况下, $y=1$ 是一种演化稳定策略, 也就是当政府选择“税收政策”的比例大于 $\frac{-xc_1 + C_1 - C_2 - c_2 + g_1 - g_2 + xc_2 + xd_1 + D_2 - D_1}{c_2 - C_2 + e_2}$ 时, 供应商最终会选择“供应链优化策略”。

根据上述研究可以看出, 政府和零售商的战略选择会对供应商的战略演变产生影响, 并且供应商选择供应链优化策略时初期投入的成本、长期运营带来的收益、供应商选择新产品开发策略时的研发成本、销售额增加的收益等各个方面的变化都会对供应商的战略演变产生影响。在供应商选择“新产品开发策略”的情况下, 会有 $0 < z < \frac{-xc_1 + C_1 - C_2 - c_2 + g_1 - g_2 + xc_2 + xd_1 + D_2 - D_1}{c_2 - C_2 + e_2}$, 可得推论 2。

推论 2 当供应商选择供应链优化策略时初期投入的成本与长期运营成本降低的收益之差减少、长期运营成本降低的收益减少、受益于零售商质量管理策略的收益增多及其与受益于零售商价格竞争的收益之差减少、供应商选择新产品开发策略时销售额增加带来的收益与研发成本之差减少、受益于零售商价格竞争策略的收益减少、调拨机制涉及各项成本与收益之差减少、政府选择价格管制策略时影响供应商新产品开发策略所造成的损失增加时, 存在 $0 < \frac{-xc_1 + C_1 - C_2 - c_2 + g_1 - g_2 + xc_2 + xd_1 + D_2 - D_1}{c_2 - C_2 + e_2} < z < 1$, 即供应商的策略将由“新产品开发策略”转向“供应链优化策略”。

3.3. 政府的复制动态方程分析

政府分别采取“价格管制政策”和“税收政策”的期望收益为 U_{31} , U_{32} 。其中:

$$\begin{aligned} U_{31} &= xy(E_2 - E_1 + e_3 + g_4) + x(1-y)(E_2 - E_1 + e_3) \\ &\quad + (1-x)y(E_2 - E_1 + g_4) + (1-x)(1-y)(E_2 - E_1) \\ &= xe_3 + yg_4 + E_2 - E_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{32} &= xy(F_2 - F_1 + f_1 + g_4) + x(1-y)(F_2 - F_1 + f_1 + f_3) \\ &\quad + (1-x)y(F_2 - F_1 + f_1 + g_4) + (1-x)(1-y)(F_2 - F_1 + f_1 + f_3) \\ &= yg_4 + F_2 - F_1 + f_1 + f_3 - yf_3 \end{aligned}$$

政府的复制动态方程为:

$$F(z) = \frac{dz}{dt} = z(1-z)(U_{31} - U_{32}) = z(1-z)(xe_3 + E_2 - E_1 - F_2 + F_1 - f_1 - f_3 + yf_3)$$

由复制动态方程稳定性定理知:

1) 当 $x = \frac{E_1 - E_2 + F_2 - F_1 + f_1 + f_3 - yf_3}{e_3}$ 时, $F(z) \equiv 0$, 表示一切 z 处于稳定状态。换句话说, 政府选择“价格管制政策”时, 无论它采取何种比例, 都会是稳定策略;

2) 当 $x \neq \frac{E_1 - E_2 + F_2 - F_1 + f_1 + f_3 - yf_3}{e_3}$ 时, 只有 $z=0$, $z=1$ 两点代表稳定状态, 有两种情况:

① 当 $0 < x < \frac{E_1 - E_2 + F_2 - F_1 + f_1 + f_3 - yf_3}{e_3}$ 时, $F'(z)|_{z=0} < 0$, $F'(z)|_{z=1} > 0$, 在这种情况下, $z=0$ 是一种演化稳定策略, 也就是当零售商选择“价格竞争策略”的比例小于 $\frac{E_1 - E_2 + F_2 - F_1 + f_1 + f_3 - yf_3}{e_3}$ 时, 政府最终会选择“税收政策”。

② 当 $0 < \frac{E_1 - E_2 + F_2 - F_1 + f_1 + f_3 - \gamma f_3}{e_3} < x < 1$ 时, $F'(z)|_{z=0} > 0$, $F'(z)|_{z=1} < 0$, 在这种情况下, $z=1$

是一种演化稳定策略, 也就是当零售商选择“质量管理策略”的比例大于 $\frac{E_1 - E_2 + F_2 - F_1 + f_1 + f_3 - \gamma f_3}{e_3}$ 时, 政府最终会选择“价格管制政策”。

根据上述研究可以看出, 供应商和零售商的战略选择会对政府的战略演变产生影响, 并且政府选择价格管制策略时的监督成本、保护消费者权益的收益、政府选择税收政策时的税收征管成本、税收收入等各个方面的变化都会对政府的战略演变产生影响。在政府选择“税收政策”的情况下, 会有

$0 < x < \frac{E_1 - E_2 + F_2 - F_1 + f_1 + f_3 - \gamma f_3}{e_3}$ 。可得推论 3。

推论 3 当政府选择价格管制策略时的监督成本与保护消费者权益的收益之差减少、政府选择税收政策时的税收收入与税收征管成本之差减少、从零售商与供应商的成本降低中获得税收收入增加的好处减少、受益于供应商新产品开发带来的收益在一定程度相对减少、政府选择价格管制策略时受益于零售商的价格竞争策略的收益增加时, 存在 $0 < \frac{E_1 - E_2 + F_2 - F_1 + f_1 + f_3 - \gamma f_3}{e_3} < x < 1$, 即政府的策略将会由“税收政策”转向“价格管制策略”。

3.4. 三方演化策略分析

Ritzberger 和 Weibull [13]的研究结果指出, 对于涉及零售商、供应商和政府的系统, 只有均衡点 $A_1(0,0,0)$, $A_2(0,0,1)$, $A_3(0,1,0)$, $A_4(0,1,1)$, $A_5(1,0,0)$, $A_6(1,0,1)$, $A_7(1,1,0)$, $A_8(1,1,1)$ 的渐近稳定性须加以讨论, 其他各点都不是渐近稳定的。系统的雅可比矩阵[14]由零售商、供应商和政府的复制动态方程导出。

$$\begin{bmatrix} (1-2x)(\gamma a_1 - z e_1 + A_2 - A_1 - \gamma b_1 - B_1 + B_2 - B_3 - b_2 + \gamma b_2) & x(1-x)(a_1 - b_1 + b_2) & -x e_1(1-x) \\ \gamma(1-y)(c_1 - c_2 - d_1) & (1-2y)(x c_1 + z c_2 + C_2 - C_1 + c_2 - g_1 + g_2 - z C_2 - x c_2 - x d_1 + z e_2 - D_2 + D_1) & y(1-y)(c_2 - C_2 + e_2) \\ z(1-z)e_3 & z(1-z)f_3 & (1-2z)(x e_3 + E_2 - E_1 - F_2 + F_1 - f_1 - f_3 + \gamma f_3) \end{bmatrix}$$

Table 2. Stability discrimination of equilibrium points

表 2. 各均衡点稳定性判别

均衡点	特征根及符号	状态
$A_1(0,0,0)$	$A_2 - A_1 - B_1 + B_2 - B_3 - b_2(s)$, $C_2 - C_1 + c_2 - g_1 + g_2 - D_2 + D_1(+)$, $E_2 - E_1 - F_2 + F_1 - f_1 - f_3(-)$	不稳定
$A_2(0,0,1)$	$A_2 - e_1 - A_1 - B_1 + B_2 - B_3 - b_2(s)$, $2c_2 - C_1 - g_1 + g_2 + e_2 - D_2 + D_1(s)$, $E_1 - E_2 + F_2 - F_1 + f_1 + f_3(+)$	不稳定
$A_3(0,1,0)$	$a_1 + A_2 - A_1 - b_1 - B_1 + B_2 - B_3(s)$, $C_1 - C_2 - c_2 + g_1 - g_2 + D_2 - D_1(-)$, $E_2 - E_1 - F_2 + F_1 - f_1(-)$	条件①
$A_4(0,1,1)$	$a_1 - e_1 + A_2 - A_1 - b_1 - B_1 + B_2 - B_3(s)$, $-2c_2 + C_1 + g_1 - g_2 - e_2 + D_2 - D_1(s)$, $-E_2 + E_1 + F_2 - F_1 + f_1(+)$	不稳定
$A_5(1,0,0)$	$A_1 - A_2 + B_1 - B_2 + B_3 + b_2(s)$, $c_1 + C_2 - C_1 - g_1 + g_2 - d_1 - D_2 + D_1(s)$, $e_3 + E_2 - E_1 - F_2 + F_1 - f_1 - f_3(s)$	条件②
$A_6(1,0,1)$	$e_1 - A_2 + A_1 + B_1 - B_2 + B_3 + b_2(s)$, $c_1 + c_2 - C_1 - g_1 + g_2 - d_1 + e_2 - D_2 + D_1(s)$, $-e_3 - E_2 + E_1 + F_2 - F_1 + f_1 + f_3(s)$	条件③
$A_7(1,1,0)$	$A_1 - a_1 - A_2 + b_1 + B_1 - B_2 + B_3(s)$, $-c_1 - C_2 + C_1 + g_1 - g_2 + d_1 + D_2 - D_1(s)$, $e_3 + E_2 - E_1 - F_2 + F_1 - f_1(s)$	条件④
$A_8(1,1,1)$	$e_1 - a_1 - A_2 + A_1 + b_1 + B_1 - B_2 + B_3(s)$, $-c_1 - c_2 + C_1 + g_1 - g_2 + d_1 - e_2 + D_2 - D_1(s)$, $-e_3 - E_2 + E_1 + F_2 - F_1 + f_1(s)$	条件⑤

如果根据李雅普诺夫第一法则, 均衡点是渐近稳定策略(ESS), 那么其所属雅可比矩阵的特征根的实

部小于零，则可如表 2 所示确定每个均衡点的稳定性。“s”表示正负未知，括号中的符号表示特征根值的正负情况。

4. 演化结果分析

表 3 提供了均衡点的稳定性条件，通过分析可以得出以下结论。

Table 3. Equilibrium point stability conditions

表 3. 均衡点稳定性条件

均衡点	稳定性条件	编号
$A_3(0,1,0)$	$B_2 - B_1 - b_1 - B_3 < A_1 - a_1 - A_2$	①
$A_5(1,0,0)$	$B_1 - B_2 + B_3 + b_2 < A_2 - A_1, c_1 + C_2 - C_1 - g_1 + g_2 < d_1 + D_2 - D_1, F_1 - F_2 - f_1 - f_3 < E_1 - e_3 - E_2$	②
$A_6(1,0,1)$	$A_2 - A_1 - e_1 > B_1 - B_2 + B_3 + b_2, c_1 + c_2 - C_1 - g_1 + g_2 - d_1 < D_2 - D_1 - e_2, e_3 + E_2 - E_1 > F_2 - F_1 + f_1 + f_3$	③
$A_7(1,1,0)$	$A_2 - A_1 + a_1 > b_1 + B_1 - B_2 + B_3, -c_1 - C_2 + C_1 + g_1 - g_2 < -d_1 - D_2 + D_1, e_3 + E_2 - E_1 < F_2 - F_1 + f_1$	④
$A_8(1,1,1)$	$e_1 - a_1 - A_2 + A_1 < -b_1 - B_1 + B_2 - B_3, -c_1 - c_2 + C_1 + g_1 - g_2 < -d_1 + e_2 - D_2 + D_1, e_3 + E_2 - E_1 > F_2 - F_1 + f_1$	⑤

系统在均衡点 $A_3(0,1,0)$ 是稳定的，在这种情况下，需满足条件①， $B_2 - B_1 - b_1 - B_3 < A_1 - a_1 - A_2$ 。即当满足零售商选择价格竞争策略时利润降低的损失减去销量提升带来的收益以及减去供应链优化带来的收益之后大于零售商选择质量管理策略时所增加的生产成本减去品牌形象效用以及减去吸引忠诚客户的长期利润与供应链优化带来的收益时，零售商通常选择“质量管理策略”，供应商通常选择“供应链优化策略”，政府通常选择“税收政策”。

系统在均衡点 $A_5(1,0,0)$ 是稳定的，在这种情况下，需满足条件②， $B_1 - B_2 + B_3 + b_2 < A_2 - A_1$ ； $c_1 + C_2 - C_1 - g_1 + g_2 < d_1 + D_2 - D_1$ ； $F_1 - F_2 - f_1 - f_3 < E_1 - e_3 - E_2$ 。即当同时满足零售商选择价格竞争策略时销量提升带来的收益减去利润降低的损失之后大于零售商选择质量管理策略时品牌形象效用和吸引忠诚客户的长期利润以及受益于供应商新产品开发的收益之和减去零售商选择质量管理策略时所增加的生产成本时，供应商选择供应链优化策略时长期运营成本降低的收益与零售商价格竞争带来的收益以及调拨机制发生时供应商产生的收益之和减去供应商选择供应链优化策略时初期投入的成本与调拨机制发生时供应商涉及的成本之后小于供应商选择新产品开发策略时销售额增加带来的收益与零售商价格竞争策略所带来的收益之和减去研发成本时，政府选择价格管制政策时监督成本减去保护消费者权益的收益以及零售商的价格竞争策略带来的收益之后大于政府选择税收政策时税收征管成本减去税收收入和从零售商与供应商的成本降低中获得税收收入增加的好处以及供应商新产品开发带来的收益时，零售商通常选择“价格竞争策略”，供应商通常选择“新产品开发策略”，政府通常选择“税收政策”。

系统在均衡点 $A_6(1,0,1)$ 是稳定的，在这种情况下，需满足条件③， $A_2 - A_1 - e_1 > B_1 - B_2 + B_3 + b_2$ ； $c_1 + c_2 - C_1 - g_1 + g_2 - d_1 < D_2 - D_1 - e_2$ ； $e_3 + E_2 - E_1 > F_2 - F_1 + f_1 + f_3$ 。即当同时满足零售商选择价格竞争策略时销量提升带来的收益减去利润降低的损失以及政府选择价格管制政策时影响零售商价格竞争策略造成的损失之后大于零售商选择质量管理策略时的品牌形象效用和吸引忠诚客户的长期利润以及供应商新产品开发所带来的收益之和减去零售商选择质量管理策略时所增加的生产成本时，供应商选择新产品开发策略时销售额增加的收益减去研发成本以及政府选择价格管制政策所给供应商新产品开发策略造成的损失之后大于供应商选择供应链优化策略时受益于零售商质量管理的收益与零售商价格竞争带来的收益以及调拨机制发生时供应商产生的收益之和减去供应商选择供应链优化策略时初期投入的成本与调拨机制发生时供应商涉及的成本和供应商选择新产品开发策略时零售商价格竞争带来的收益，政府选择价

格管制政策时监督成本减去保护消费者权益的收益以及零售商的价格竞争策略带来的收益之后小于政府选择税收政策时税收征管成本减去税收收入和从零售商与供应商的成本降低中获得税收收入增加的好处以及供应商新产品开发带来的收益时，零售商通常选择“价格竞争策略”，供应商通常选择“新产品开发策略”，政府通常选择“价格管制政策”。

系统在均衡点 $A_7(1,1,0)$ 是稳定的，在这种情况下，需满足条件④， $A_2 - A_1 + a_1 > b_1 + B_1 - B_2 + B_3$ ； $-c_1 - C_2 + C_1 + g_1 - g_2 < -d_1 - D_2 + D_1$ ； $e_3 + E_2 - E_1 < F_2 - F_1 + f_1$ 。即当同时满足零售商选择价格竞争策略时销量提升带来的收益与供应链优化而带来的收益之和减去利润降低的损失之后大于零售商选择质量管理策略时品牌形象效用和吸引忠诚客户的长期利润以及供应链优化所带来的收益之和减去零售商选择质量管理策略时所增加的生产成本时，供应商选择新产品开发策略时研发成本减去销售额增加的收益与零售商价格竞争策略所带来的收益之后大于供应商选择供应链优化策略时初期投入的成本与调拨机制发生时供应商涉及的成本之和减去长期运营所获得的收益与零售商价格竞争带来的收益以及调拨机制发生时供应商产生的收益时，政府选择价格管制政策时监督成本减去保护消费者权益的收益以及零售商的价格竞争策略带来的收益之后大于政府选择税收政策时税收征管成本减去税收收入和从零售商与供应商的成本降低中获得税收收入增加的好处时，零售商通常选择“价格竞争策略”，供应商通常选择“供应链优化策略”，政府通常选择“税收政策”。

系统在均衡点 $A_8(1,1,1)$ 是稳定的，在这种情况下，需满足条件⑤， $e_1 - a_1 - A_2 + A_1 < -b_1 - B_1 + B_2 - B_3$ ； $-c_1 - c_2 + C_1 + g_1 - g_2 < -d_1 + e_2 - D_2 + D_1$ ； $e_3 + E_2 - E_1 > F_2 - F_1 + f_1$ 。即当同时满足零售商选择价格竞争策略时利润降低的损失与政府选择价格管制政策所给零售商价格竞争策略造成的损失之和减去销量提升带来的收益以及供应链优化而带来的收益之后小于零售商选择质量管理策略时所增加的生产成本减去品牌形象效用以及减去吸引忠诚客户的长期利润与供应链优化带来的收益时，供应商选择新产品开发策略时研发成本与政府选择价格管制政策所给供应商新产品开发策略造成的损失之和减去销售额增加带来的收益与零售商价格竞争策略所带来的收益之后大于供应商选择供应链优化策略时初期投入的成本与调拨机制发生时供应商涉及的成本之和减去长期运营所获得的收益与零售商价格竞争带来的收益与零售商质量管理策略带来的收益以及调拨机制发生时供应商产生的收益时，政府选择价格管制政策时监督成本减去保护消费者权益的收益以及零售商的价格竞争策略带来的收益之后小于政府选择税收政策时税收征管成本减去税收收入和从零售商与供应商的成本降低中获得税收收入增加的好处时，零售商通常选择“价格竞争策略”，供应商通常选择“供应链优化策略”，政府通常选择“价格管制政策”。

5. 仿真分析

将上述五种演化方案中的参数变量取具体数值，利用 Matlab 软件对这五种方案的演化稳定策略进行独立模拟，以便更直观地分析零售商、供应商和政府的演化路径和最终稳定状态。每个参数的值都必须满足要求： $D_1 > C_1$ ， $C_2 > D_2$ ， $g_2 > g_1$ ， $E_1 > F_1$ ， $F_2 > E_2$ 。

零售商、供应商和政府演化策略为 $A_3(0,1,0)$ 的条件是 $B_2 - B_1 - b_1 - B_3 < A_1 - a_1 - A_2$ 。则取 $A_1 = 8$ ， $A_2 = 12$ ， $a_1 = 6$ ， $B_1 = 10$ ， $B_2 = 11$ ， $B_3 = 9$ ， $b_1 = 5$ ， $b_2 = 7$ ， $C_1 = 13$ ， $C_2 = 40$ ， $c_1 = 9$ ， $c_2 = 8$ ， $D_1 = 35$ ， $D_2 = 15$ ， $d_1 = 9$ ， $E_1 = 30$ ， $E_2 = 18$ ， $e_1 = 7$ ， $e_2 = 8$ ， $e_3 = 9$ ， $F_1 = 14$ ， $F_2 = 38$ ， $f_1 = 7$ ， $f_2 = 8$ ， $f_3 = 6$ ， $g_1 = 9$ ， $g_2 = 28$ ， $g_3 = 10$ ， $g_4 = 12$ ，演化路径如图 1，模拟实验的结果是最终系统演化到 $[0, 1, 0]$ 。

零售商、供应商和政府演化策略为 $A_5(1,0,0)$ 的条件是 $B_1 - B_2 + B_3 + b_2 < A_2 - A_1$ ； $c_1 + C_2 - C_1 - g_1 + g_2 < d_1 + D_2 - D_1$ ； $F_1 - F_2 - f_1 - f_3 < E_1 - e_3 - E_2$ 。则取 $A_1 = 3$ ， $A_2 = 15$ ， $a_1 = 6$ ， $B_1 = 10$ ， $B_2 = 11$ ， $B_3 = 9$ ， $b_1 = 5$ ， $b_2 = 3$ ， $C_1 = 5$ ， $C_2 = 6$ ， $c_1 = 9$ ， $c_2 = 5$ ， $D_1 = 6$ ， $D_2 = 5$ ， $d_1 = 13$ ， $E_1 = 30$ ， $E_2 = 18$ ， $e_1 = 7$ ， $e_2 = 8$ ， $e_3 = 9$ ， $F_1 = 14$ ， $F_2 = 38$ ， $f_1 = 7$ ， $f_2 = 8$ ， $f_3 = 6$ ， $g_1 = 4$ ， $g_2 = 5$ ， $g_3 = 10$ ， $g_4 = 12$ ，演化路

径如图 2，模拟实验的结果是最终系统演化到[1, 0, 0]。

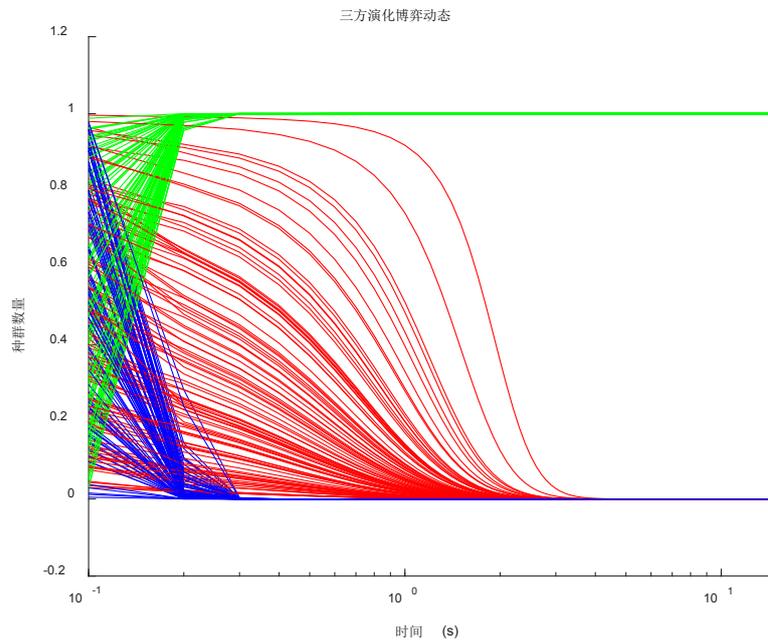


Figure 1. Evolution to [0, 1, 0]
图 1. 演化到[0, 1, 0]

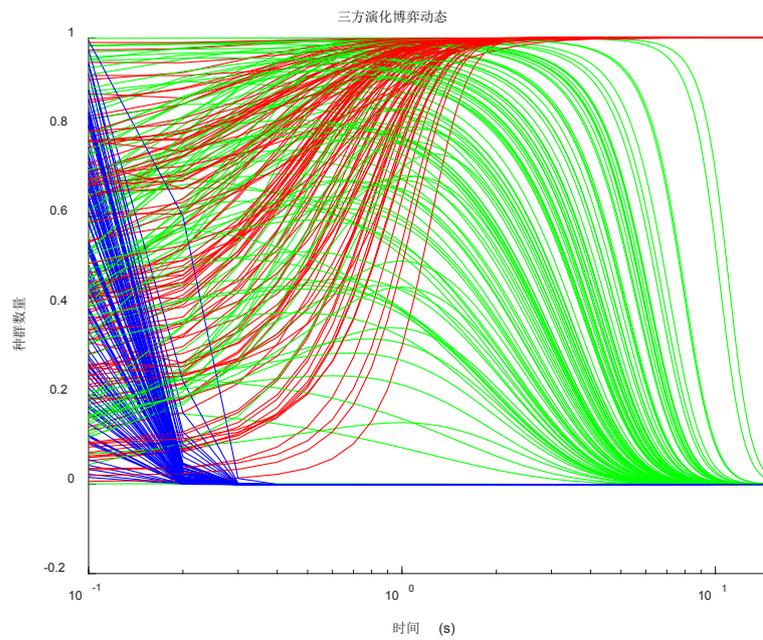


Figure 2. Evolution to [1, 0, 0]
图 2. 演化到[1, 0, 0]

零售商、供应商和政府演化策略为 $A_6(1,0,1)$ 的条件是 $A_2 - A_1 - e_1 > B_1 - B_2 + B_3 + b_2$;
 $c_1 + c_2 - C_1 - g_1 + g_2 - d_1 < D_2 - D_1 - e_2$; $e_3 + E_2 - E_1 > F_2 - F_1 + f_1 + f_3$ 。 则取 $A_1 = 6$, $A_2 = 18$, $a_1 = 6$, $B_1 =$

7, $B_2 = 10$, $B_3 = 8$, $b_1 = 5$, $b_2 = 3$, $C_1 = 1$, $C_2 = 31$, $c_1 = 3$, $c_2 = 2$, $D_1 = 2$, $D_2 = 30$, $d_1 = 25$, $E_1 = 7$, $E_2 = 8$, $e_1 = 3$, $e_2 = 4$, $e_3 = 9$, $F_1 = 5$, $F_2 = 9$, $f_1 = 3$, $f_2 = 8$, $f_3 = 2$, $g_1 = 4$, $g_2 = 5$, $g_3 = 10$, $g_4 = 12$, 演化路径如图 3, 模拟实验的结果是最终系统演化到[1, 0, 1]。

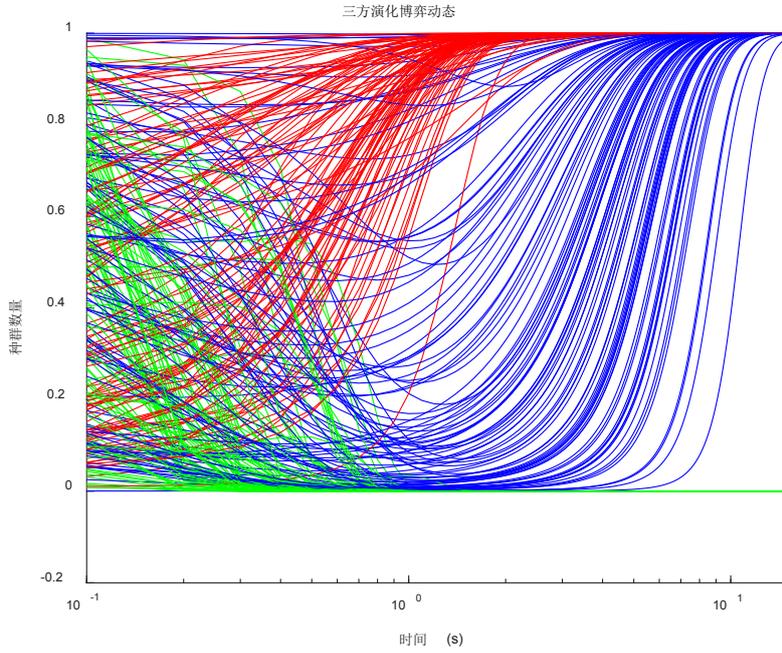


Figure 3. Evolution to [1, 0, 1]
图 3. 演化到[1, 0, 1]

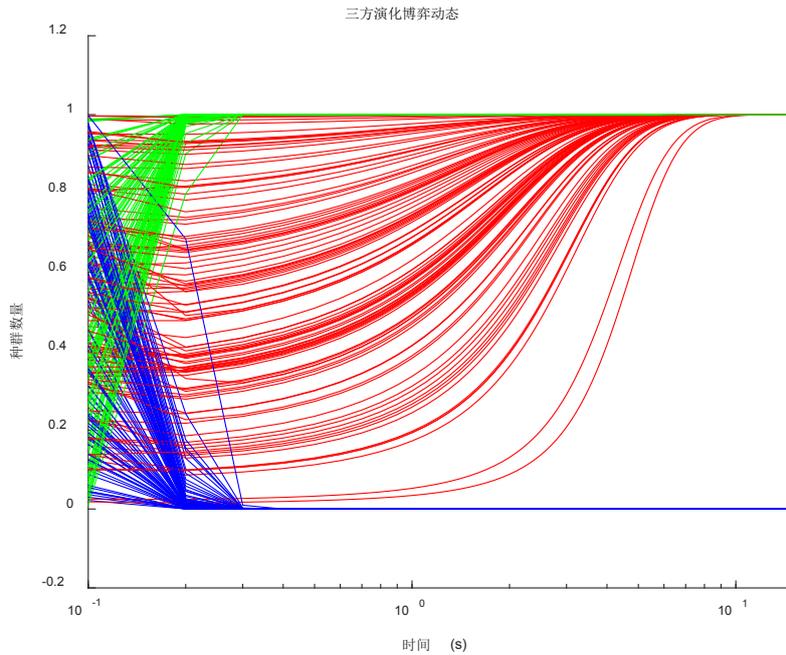


Figure 4. Evolution to [1, 1, 0]
图 4. 演化到[1, 1, 0]

零售商、供应商和政府演化策略为 $A_7(1,1,0)$ 的条件是 $A_2 - A_1 + a_1 > b_1 + B_1 - B_2 + B_3$;
 $-c_1 - C_2 + C_1 + g_1 - g_2 < -d_1 - D_2 + D_1$; $e_3 + E_2 - E_1 < F_2 - F_1 + f_1$ 。则取 $A_1 = 8, A_2 = 15, a_1 = 7, B_1 = 10,$
 $B_2 = 11, B_3 = 9, b_1 = 5, b_2 = 7, C_1 = 13, C_2 = 40, c_1 = 9, c_2 = 8, D_1 = 35, D_2 = 15, d_1 = 9, E_1 = 30,$
 $E_2 = 18, e_1 = 7, e_2 = 8, e_3 = 9, F_1 = 14, F_2 = 38, f_1 = 9, f_2 = 8, f_3 = 6, g_1 = 9, g_2 = 28, g_3 = 10, g_4 = 12,$
 演化路径如图 4, 模拟实验的结果是最终系统演化到 $[1, 1, 0]$ 。

零售商、供应商和政府演化策略为 $A_8(1,1,1)$ 的条件是 $e_1 - a_1 - A_2 + A_1 < -b_1 - B_1 + B_2 - B_3$;
 $-c_1 - c_2 + C_1 + g_1 - g_2 < -d_1 + e_2 - D_2 + D_1$; $e_3 + E_2 - E_1 > F_2 - F_1 + f_1$ 。则取 $A_1 = 6, A_2 = 18, a_1 = 6, B_1 = 7,$
 $B_2 = 10, B_3 = 8, b_1 = 5, b_2 = 3, C_1 = 2, C_2 = 6, c_1 = 4, c_2 = 3, D_1 = 8, D_2 = 5, d_1 = 9, E_1 = 2, E_2 = 30,$
 $e_1 = 3, e_2 = 1, e_3 = 25, F_1 = 1, F_2 = 31, f_1 = 1, f_2 = 8, f_3 = 2, g_1 = 4, g_2 = 5, g_3 = 10, g_4 = 12,$ 演化路
 径如图 5, 模拟实验的结果是最终系统演化到 $[1, 1, 1]$ 。

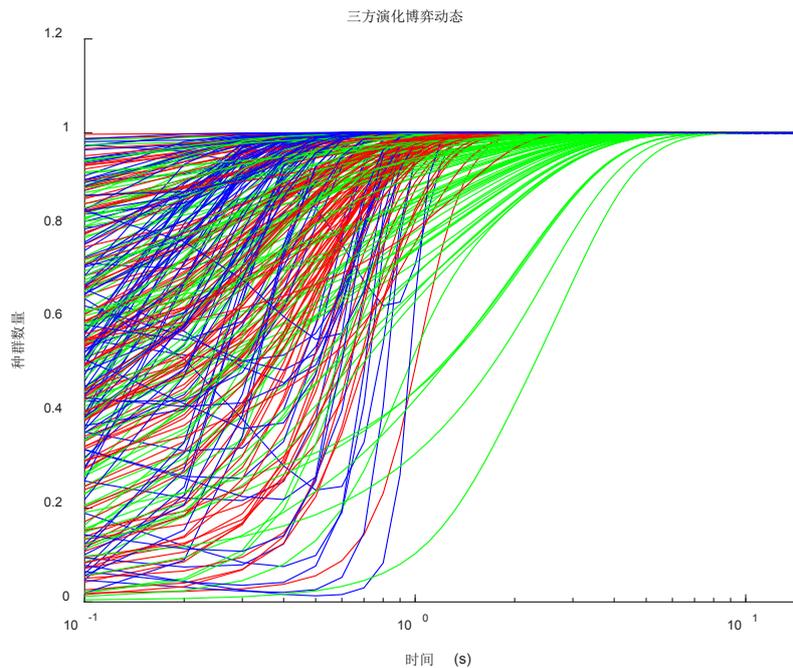


Figure 5. Evolution to $[1, 1, 1]$
 图 5. 演化到 $[1, 1, 1]$

6. 结论

在数字经济背景下, 本文深入探索了涉及零售商、供应商和政府三方主体的供应链演化博弈模型及其策略选择。通过精心构建的理论框架和细致的模型分析, 本研究成功揭示了供应链系统中存在的五个策略均衡点。这些均衡点清晰展示了在不同策略组合下, 供应链系统可能达到的稳定状态, 为供应链管理和政策制定提供了宝贵的理论见解和实践指导。本研究的发现强调了在数字经济时代, 零售商、供应商和政府的策略选择不是静态的, 而是会随着市场条件和政策环境的变化而演化, 从而对供应链系统的稳定性和发展方向产生深远影响。这一点对于供应链管理者和政策制定者而言尤为重要, 它要求零售商和供应商需要灵活调整其策略以适应市场和政策的变化, 同时政府在制定相关政策时, 也应当充分考虑其对供应链稳定性的潜在影响。未来研究可以在本文的基础上, 进一步探讨不同市场条件、技术进步和政策变化对供应链演化的影响。此外, 将研究扩展到更多主体和策略的互动, 将有助于更全面地理解和

预测供应链系统的动态演化，为实现供应链的稳定和可持续发展提供更加丰富的理论支持和实践指南。总体而言，本文不仅为理解数字经济时代供应链中的策略互动提供了新的理论视角，也为促进供应链的稳定性和可持续发展提出了具有实际应用价值的策略建议。

参考文献

- [1] EL-Khalil, R. and Zeaiter, H. (2015) Improving Automotive Efficiency through Lean Management Tools: A Case Study. *International Journal of Social, Education, Economics and Management Engineering*, **9**, 314-321.
- [2] Delic, M. and Eysers, D.R. (2020) The Effect of Additive Manufacturing Adoption on Supply Chain Flexibility and Performance: An Empirical Analysis from the Automotive Industry. *International Journal of Production Economics*, **228**, Article 107689. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107689>
- [3] 汪翼, 李秀晖, 雒兴刚. 考虑配送交通风险的新零售平台、骑手及消费者三方演化博弈分析[J]. 系统管理学报, 2024, 33(1): 46-58.
- [4] 于涛, 姚凡军, 高红伟. 区块链数字生态系统赋能跨境贸易中的博弈问题研究[J]. 运筹与管理, 2023, 32(11): 233-239.
- [5] 李子勋, 宗刚. 政府、平台、商家三方演化博弈分析与治理[J]. 中国商论, 2023(23): 57-61.
- [6] 祝凌瑶, 周丽, 柳虎威. 数字经济时代政府数据质量管理的演化博弈分析[J]. 运筹与管理, 2022, 31(9): 21-27.
- [7] 董雨, 甄锐, 杨婷婷. 物流企业低碳行为信用监管演化博弈分析(英文) [J]. 中国科学技术大学学报, 2022, 52(11): 56-68.
- [8] 左迺谦, 曲世友, 刘纪达. 零售商与制造商绿色产销模式中的环境规制策略研究——基于演化博弈视角[J]. 预测, 2021, 40(5): 40-47.
- [9] 何海龙, 李明琨. 有限管制下快递包装逆向物流三方博弈行为分析[J]. 工业工程与管理, 2021, 26(1): 157-164.
- [10] 胡小飞, 曾聪, 郭宇雯. 快递物流业个人信息隐私保护的演化博弈分析[J]. 现代情报, 2019, 39(6): 142-148.
- [11] 刘大维, 费威, 尹涛. 零售商回收与制造商处理过期食品模式下三方演化博弈[J]. 商业研究, 2019(2): 62-73.
- [12] 蒋致远, 李畅帆. 三方博弈模型下零售商主导型供应链演化研究[J]. 商业经济研究, 2015(29): 4-6.
- [13] Ritzberger, K. and Weibull, J.W. (1995) Evolutionary Selection in Normal-Form Games. *Econometrica*, **63**, 1371-1399. <https://doi.org/10.2307/2171774>
- [14] Friedman, D. (1991) A Simple Testable Model of Double Auction Markets. *Journal of Economic Behavior and Organization*, **15**, 47-70. [https://doi.org/10.1016/0167-2681\(91\)90004-H](https://doi.org/10.1016/0167-2681(91)90004-H)