E-Commerce Letters 电子商务评论, 2025, 14(11), 3360-3371
Published Online November 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ecl
https://doi.org/10.12677/ecl.2025.14113820

Hans汉斯

模糊环境下电商互补品供应链的Stackelberg博弈与定价策略研究

金　丝，丘小玲

贵州大学数学与统计学院，贵州　贵阳

收稿日期：2025年10月15日；录用日期：2025年10月29日；发布日期：2025年11月28日

摘　要

在电子商务环境下，针对网络渠道中常见的互补品组合销售场景(如手机与耳机、主机与配件等)，本研究构建了一个以制造商为主导、零售商为跟从的双互补品供应链Stackelberg博弈模型。考虑到电商市场中需求波动频繁、制造成本不确定等现实特征，模型将需求函数参数与生产成本设定为模糊变量。基于电商平台中常见的供应链协作与决策模式，研究分别探讨了链间与链内Stackelberg博弈，并据此建立了四种价格决策的期望值模型，包括：集中－集中决策(平台统一管控)、集中－分散决策(制造商主导定价)、分散－集中决策(零售商主导定价)以及分散－分散决策(各自独立决策)。运用博弈论方法，解析出四种结构下的均衡价格与利润水平。进一步通过数值仿真，验证了不同决策结构对电商互补品供应链定价与利润的影响，并比较得出可实现系统帕累托最优的协调机制。研究结果为电商企业在网络营销中制定互补品组合定价与渠道协同策略提供了理论参考与管理启示。

关键词

电商平台定价策略，互补品供应链，Stackelberg博弈，帕累托最优

Research on Stackelberg Game and Pricing Strategies in E-Commerce Complementary Product Supply Chains under Fuzzy Environments

Si Jin, Xiaoling Qiu

School of Mathematics and Statistics, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: October 15, 2025; accepted: October 29, 2025; published: November 28, 2025

文章引用: 金丝, 丘小玲. 模糊环境下电商互补品供应链的 Stackelberg 博弈与定价策略研究[J]. 电子商务评论, 2025, 14(11): 3360-3371. DOI: 10.12677/ecl.2025.14113820

Abstract

In the context of e-commerce, this study addresses the common scenario of bundled sales for complementary products (e.g., smartphones and earphones, main units and accessories) through online channels. A Stackelberg game model is developed for a two-complementary product supply chain, where the manufacturer acts as the leader and the retailer as the follower, reflecting the realities of the e-commerce market, such as frequent demand fluctuations and manufacturing cost uncertainties, the model characterizes demand function parameters and production costs as fuzzy variables. Based on common supply chain collaboration and decision-making modes in e-commerce platforms, the research explores both inter-chain and intra-chain Stackelberg games. Accordingly, four expected value models for pricing decisions are established: Centralized-Centralized (platform unified control), Centralized-Decentralized (manufacturer-led pricing), Decentralized-Centralized (retailer-led pricing), and Decentralized-Decentralized (independent decision-making). Using game theory methods, the equilibrium prices and profit levels under these four structures are derived. Furthermore, numerical simulations are conducted to verify the impact of different decision-making structures on pricing and profits within the e-commerce complementary product supply chain. A comparative analysis identifies a coordination mechanism that can achieve a system-wide Pareto optimum. The research findings provide theoretical references and managerial insights for e-commerce enterprises in formulating pricing strategies for complementary product bundles and channel coordination strategies in online marketing.

Keywords

E-Commerce Platform Pricing Strategy, Complementary Product Supply Chain, Stackelberg Game, Pareto Optimality

1. 引言

面对愈发激烈的市场竞争态势，供应链管理已然成为企业实现核心竞争力提升的决定性因素之一。在众多供应链管理问题中，价格策略因其直接影响到企业利润和市场竞争力而备受关注。在经典供应链理论中，Stackelberg 博弈模型作为一个有效的分析工具，能够很好地描述并分析领导者和追随者之间的动态竞争关系。然而，在现实世界中，市场环境常常伴随着不确定性和模糊性。传统的供应链管理模型往往假设需求是确定的，但这种假设并不总是成立。模糊环境下的需求不确定性给供应链的决策带来了更大的挑战。因此，研究模糊环境下的 Stackelberg 博弈模型对于制定有效的供应链管理策略具有重要的理论和实践意义。

近年来，众多学者对模糊环境下的供应链问题进行了广泛研究，其中主要在于对需求进行了模糊。例如，Zhao 等[1]研究了模糊环境下两个制造商在服务和价格下竞争向一个普通零售商提供两种可替代产品的分销系统。Wang [2]研究了一个制造商在模糊决策环境下向两个零售商销售他的产品的价格竞争问题，提出了博弈模型，证明在模糊环境下制造商可以通过合理的定价策略实现利润最大化。

汪等[3]针对需求不确定性背景下平台供应链的合作模式选择这一核心议题，本研究深入探讨了促销努力对于供应链决策效能的显著影响。为了全面理解不同合作机制下的供应链运作效果，我们构建了数

学模型，系统地对比了集中决策与分散决策等若干合作模式下供应链绩效的差异。研究发现，在面临需求波动的环境中，采取集中的决策模式不仅能够有效提升供应链的整体盈利能力，而且还能增强其运营效率，特别是在充分考量促销策略的前提下。与此相反，分散决策模式可能加剧供应链内部成员间的利益分歧，从而影响整体协同效应与经济效益。尽管当前关于模糊理论在供应链领域的应用文献颇丰[4] [5]，但针对模糊不确定性情境下双供应商与双制造商构成的供应链管理系统的研究却相对匮乏。因此，通过模糊理论来探讨此类供应链中的博弈模型及其特性，不仅具有理论价值，更显现出其在实践应用中的重要性。

当前，互补品供应链作为两主两从供应链体系的中枢环节，对供应链的整体发展具有重要影响。现有文献(如[6]-[8])主要集中在已知或假设需求稳定的情况下进行分析，忽略了现实中市场环境的不确定性及其带来的复杂性。实际上，诸多企业在实际操作中通过构建互补品策略获得了显著的竞争优势。然而，在复杂多变的供应链环境中，尤其是面对涉及多个制造商与零售商的冷链生产与销售模式下，互补品供应链的优化与管理面临着前所未有的挑战。具体而言，这种模式下的定价策略更加复杂，需要综合考量市场竞争、消费者偏好、以及供应链各节点间的动态互动，以实现整体效益的最大化[9]-[12]。在定价策略的形成过程中，不同供应链间的动态价格竞争机制显得尤为重要。当供应链作为互补品采取较高定价策略时，这种做法不仅直接制约了其自身产品在市场上的销售表现，还间接地对与其协同作用的产品销售构成了负面影响，进而对整个互补品供应链的成长态势产生不利效应。在这样的背景下，建立一个既能确保所有参与者实现最大化利益，又能维持价格竞争中的平衡与高效性的决策框架，成为了优化互补品供应链管理的核心策略。

以上文献为我们提供了很多研究成果，但在模糊环境下，互补品供应链中 Stackelberg 博弈策略分析仍然是一个值得深入探讨的课题。基于此，本文提出了一个模糊环境下互补品供应链的 Stackelberg 博弈模型，分析不同市场条件下的最优价格和产量策略，并且讨论了需求模糊性对供应链成员决策的影响，最后通过算例验证了模型的有效性，并提供了管理上的启示。

2. 基问题描述与假设

本文用到的符号说明如下：

$\tilde{a}$：市场基础需求；

$\tilde{c}_i$：单位产品的生产价格，$i=1,2$；

$\tilde{d}_i$：市场的需求量，$i=1,2$；

$\tilde{\gamma},\tilde{\beta}$：两种产品的互补程度；

p_i：单位产品的销售价格，$i=1,2$；

p_i^*：单位产品的最优零售价格，$i=1,2$；

w_i：单位产品的批发价格，$i=1,2$；

w_i^*：单位产品的最优批发价格，$i=1,2$；

α：置信水平；

Π_{m_i}：制造商的利润，$i=1,2$；

Π_{r_i}：零售商的利润，$i=1,2$；

Π_{sc_i}：供应链 i 的整体利润，$i=1,2$。

注：这些参数都大于 0，$\tilde{c}_i$ 与 $\tilde{a},\tilde{\gamma},\tilde{\beta}$ 无关，同时 $\tilde{a},\tilde{\gamma},\tilde{\beta}$ 这几个参数互相独立。

假设 1 产品 1 供应链与产品 2 供应链构成了一对互补性产品供应链系统(分别标记为 sc_1 和 sc_2)。在功能上，产品 1 与产品 2 相互补充，形成了紧密的配套关系。每条供应链均由一个制造商和一个零售商

组成，确保了生产环节与销售环节的紧密衔接。制造商的生产输出与零售商的销售数量保持一致，实现了供应链的高效协同。

假设 2 在供应链运行机制中，制造企业基于既定生产成本进行产品 i 的生产作业，随后通过批发定价 w_i 将产品分销至对应零售商;而零售商则通过市场终端定价 p_i，将产品最终售予消费群体($i=1,2$)。

假设 3 在供应链间的非合作博弈模型中，链 1 作为 Stackelberg 博弈的领导者优先制定策略，链 2 则作为追随者根据先动者的决策进行响应;而在供应链内部博弈结构中，制造商占据主导地位并率先决策，零售商作为从属方则采取相应的策略调整以实现自身利益最优化。

假设 4 在供应链系统中，各参与主体均呈现风险中性特征，且具备完全理性决策能力。

假设 5 需求函数分析来看，产品 1 和产品 2 的市场需求量与价格变量之间存在着显著的相关性。

$$\tilde{d}_1=\tilde{a}-p_1-\tilde{\gamma}p_2 \tag{1}$$

$$\tilde{d}_2=\tilde{a}-p_2-\tilde{\beta}p_1 \tag{2}$$

式(1)和式(2)中的各参数都大于 0， $\tilde{\gamma},\tilde{\beta}$ 较大表明两种产品间的互补性越强，基于此假，定可以推导出供应链内各参与方的收益函数

$$\Pi_{m_1}(w_1)=(w_1-\tilde{c}_1)(\tilde{a}-p_1-\tilde{\gamma}p_2) \tag{3}$$

$$\Pi_{r_1}(p_1)=(p_1-w_1)(\tilde{a}-p_1-\tilde{\gamma}p_2) \tag{4}$$

$$\Pi_{sc_1}(p_1)=(p_1-\tilde{c}_1)(\tilde{a}-p_1-\tilde{\gamma}p_2) \tag{5}$$

$$\Pi_{m_2}(w_2)=(w_2-\tilde{c}_2)(\tilde{a}-p_2-\tilde{\beta}p_1) \tag{6}$$

$$\Pi_{r_2}(p_2)=(p_2-w_2)(\tilde{a}-p_2-\tilde{\beta}p_1) \tag{7}$$

$$\Pi_{sc_2}(p_2)=(p_2-\tilde{c}_2)(\tilde{a}-p_2-\tilde{\beta}p_1) \tag{8}$$

3. 模型建构和求解

在市场地位不对等的互补商品供应链中的主从博弈理论框架下，主导供应链 sc_1 首先基于其战略目标，独立设定产品 1 的定价策略。然后，作为从属方的互补商品供应链 sc_2，在接收到产品 1 价格信息后，依据自身的最大利益原则，调整并确定产品 2 的零售价格策略。值得注意的是，每个供应链内部可能采取集中决策或分散决策两种不同的管理方式，本文探讨了四种不同的供应链决策架构：集中决策主导型与集中决策从属型(CC 模式)、集中决策主导型与分散决策从属型(CD 模式)、分散决策主导型与集中决策从属型(DC 模式)，两个均为分散决策的供应链(DD 模式)。本文将对这四种决策模式分别建立相应的数学模型，并通过深入分析，揭示每种模式下的最优策略及其对市场动态的影响。

3.1. DD 结构下互补品供应链利润模型

基于此利润模型架构，在互补品供应链体系内，各参与方均受追求个体利润极值之内在激励，从而实施了差异化定价策略。假设制造商占据主导地位，零售商采取追随策略。在这种决策下，互补品供应链 1 的生产商扮演着链内领导的角色，先确定的批发价格 w_1 是其向供应链下游零售商 1 供应互补商品的基础。与此同时，基于自身的利益考量，零售商 1 将确立最优化的零售定价 p_1 视为其决策的核心。然后，通过对互补品供应链 1 的价格策略进行细致分析，发现互补品供应链 2 的生产者亦采用类同的决策机制，向供应链下游的零售商 2 供应商品。在此基础上，零售商 2 则依据利润最大化的经济原则，进一步制定其最优的零售定价 p_2。

$$\begin{cases} \max\limits_{w_1} E\left[\Pi_{m_1}\left(w_1, p_1\left(w_1\right)\right)\right] \\ \text{s.t. Pos}\left(\left\{w_1 - \tilde{c}_1 < 0\right\}\right) = 0 \\ p_1\left(w_1\right)\text{是如下问题的解} \\ \begin{cases} \max\limits_{p_1} E\left[\Pi_{r_1}\left(p_1\right)\right] \\ \text{s.t. Pos}\left(\left\{p_1 - w_1 < 0\right\}\right) = 0 \end{cases} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \max\limits_{w_2} E\left[\Pi_{m_2}\left(w_2, p_2\left(w_2\right)\right)\right] \\ \text{s.t. Pos}\left(\left\{w_2 - \tilde{c}_2 < 0\right\}\right) = 0 \\ p_2\left(w_2\right)\text{是如下问题的解} \\ \begin{cases} \max\limits_{p_2} E\left[\Pi_{r_2}\left(p_2\right)\right] \\ \text{s.t. Pos}\left(\left\{p_2 - w_2 < 0\right\}\right) = 0 \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

命题 1 在分散 - 分散决策下，如果 $\text{Pos}\left(\left\{w_i^* - \tilde{c}_i < 0\right\}\right) = 0$，当 $0 < \tilde{\gamma}, \tilde{\beta}$ 且 $3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right] - 4 < 0$ 时，均衡决策如下：

$$\begin{cases} w_1^* = \dfrac{\left(4 - 3E[\tilde{\gamma}]\right)E[\tilde{a}] - E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}_2] + \left(4 - 3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_1]}{2\left(4 - 3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)} \\ p_1^* = \dfrac{3\left(4 - 3E[\tilde{\gamma}]\right)E[\tilde{a}] - 3E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}_2] + \left(4 - 3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_1]}{4\left(4 - 3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)} \\ w_2^* = \dfrac{\left(16 - 3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right] - 12E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{a}] + \left(16 - 9E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_2] - \left(4 - 3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E\left[\tilde{\beta}\right]E[\tilde{c}_1]}{8\left(4 - 3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)} \\ p_2^* = \dfrac{3\left(16 - 3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right] - 12E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{a}] + \left(16 - 3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_2] - 3\left(4 - 3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E\left[\tilde{\beta}\right]E[\tilde{c}_1]}{16\left(4 - 3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)} \end{cases}$$

证明：在主从博弈场景下，为求解 DD 结构组合所对应的最优定价，本研究运用逆向求解法。第一步，聚焦于求解互补品跟随链内部的动态博弈问题。基于前文所阐述的相关性质，能够推导出该链中制造商与零售商的期望利润表达式为：

$$E\left[\Pi_{r_2}\left(p_2\right)\right] = E[\tilde{a}]p_2 - p_2^2 - E\left[\tilde{\beta}\right]p_1 p_2 - E[\tilde{a}]w_2 + w_2 p_2 + E\left[\tilde{\beta}\right]p_1 w_2 \tag{9}$$

$$E\left[\Pi_{m_2}\left(w_2\right)\right] = E[\tilde{a}]w_2 - w_2 p_2 - E\left[\tilde{\beta}\right]p_1 w_2 - E[\tilde{a}\tilde{c}_2] + E[\tilde{c}_2]p_2 + E\left[\tilde{\beta}\tilde{c}_2\right]p_1 \tag{10}$$

现在对(9)式关于 P_2 的求导得

$$\frac{\partial}{\partial p_2}E\left[\Pi_{r_2}\left(p_2\right)\right] = E[\tilde{a}] - 2p_2 - E\left[\tilde{\beta}\right]p_1 + w_2 \tag{11}$$

$\dfrac{\partial^2}{\partial p_2^2}E\left[\Pi_{r_2}\left(p_2\right)\right] = -2 < 0$，因此 $E\left[\Pi_{r_2}\right]$ 是关于 p_2 的凹函数，对于该凹函数，存在一个最优解，令(11)式等于零得

$$p_2^*\left(w_2\right) = \frac{E[\tilde{a}] - E\left[\tilde{\beta}\right]p_1 + w_2}{2} \tag{12}$$

将式(12)带入式(10)并求关于 w_2 的导数得

$$\frac{\partial}{\partial w_2}E\left[\Pi_{m_2}\left(w_2\right)\right]=\frac{E\left[\tilde{a}\right]-E\left[\tilde{\beta}\right]p_1-2w_2+E\left[\tilde{c}_2\right]}{2} \tag{13}$$

$\frac{\partial^2}{\partial w_2^2}E\left[\Pi_{m_2}\left(w_2\right)\right]=-1$，因此 $E\left[\Pi_{m_2}\right]$ 是关于 w_2 的凹函数，对于该凹函数，存在一个最优解，令(13)式等于零得

$$w_2^*\left(p_1\right)=\frac{E\left[\tilde{a}\right]-E\left[\tilde{\beta}\right]p_1+E\left[\tilde{c}_2\right]}{2} \tag{14}$$

将式(14)带入式(12)即可得

$$p_2^*\left(p_1\right)=\frac{3E\left[\tilde{a}\right]-3E\left[\tilde{\beta}\right]p_1+E\left[\tilde{c}_2\right]}{4} \tag{15}$$

同样地，依据上述性质，能够得出供应链 sc_1 里制造商与零售商的预期望利润为

$$E\left[\Pi_{r_1}\left(p_1\right)\right]=E\left[\tilde{a}\right]p_1-p_1^2-E\left[\tilde{\gamma}\right]p_1p_2-E\left[\tilde{a}\right]w_1+w_1p_1+E\left[\tilde{\gamma}\right]w_1p_2 \tag{16}$$

$$E\left[\Pi_{m_1}\left(w_1\right)\right]=E\left[\tilde{a}\right]w_1-w_1p_1-E\left[\tilde{\gamma}\right]w_1p_2-E\left[\tilde{a}\tilde{c}_1\right]+E\left[\tilde{c}_1\right]p_1+E\left[\tilde{\gamma}\tilde{c}_1\right]p_2 \tag{17}$$

其次，互补品领导者 sc_1 在链内动态博弈的情形与互补品跟随者 sc_2 的链内动态博弈情形存在差异。作为主导链，其具备更为丰富的决策信息，具体体现为在开展链内动态博弈时，能够进行预测：若本链选取某一策略，则跟随链会依据相应情况进行决策。基于此，将(14)，(15)式代入(16)式中，并关于 p_1 求取偏导数得

$$\frac{\partial}{\partial p_1}E\left[\Pi_{r_1}\left(p_1\right)\right]=\frac{\left(4-3E\left[\tilde{\gamma}\right]\right)E\left[\tilde{a}\right]-E\left[\tilde{\gamma}\right]E\left[\tilde{c}_2\right]-2\left(4-3E\left[\tilde{\gamma}\right]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)p_1+\left(4-3E\left[\tilde{\gamma}\right]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)w_1}{4} \tag{18}$$

$\frac{\partial^2}{\partial p_1^2}E\left[\Pi_{r_1}\left(p_1\right)\right]=\frac{3E\left[\tilde{\gamma}\right]E\left[\tilde{\beta}\right]-4}{2}$，又有 $E\left[\tilde{\alpha}\right]E\left[\tilde{\beta}\right]-4<0$，因此，存在关于 p_1 的最优值，使式子(18)等于零可得出

$$p_1^*\left(w_1\right)=\frac{\left(4-3E\left[\tilde{\gamma}\right]\right)E\left[\tilde{a}\right]-E\left[\tilde{\gamma}\right]E\left[\tilde{c}_2\right]+\left(4-3E\left[\tilde{\gamma}\right]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)w_1}{2\left(4-3E\left[\tilde{\gamma}\right]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)} \tag{19}$$

将式(19)，式(14)，式(15)代入式(17)，并关于 w_1 求偏导得

$$\frac{\partial}{\partial w_1}E\left[\Pi_{m_1}\left(w_1\right)\right]=\frac{\left(4-3E\left[\tilde{\gamma}\right]\right)E\left[\tilde{a}\right]-E\left[\tilde{\gamma}\right]E\left[\tilde{c}_2\right]-2\left(4-3E\left[\tilde{\gamma}\right]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)w_1+\left(4-3E\left[\tilde{\gamma}\right]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E\left[\tilde{c}_1\right]}{8} \tag{20}$$

$\frac{\partial^2}{\partial w_1^2}E\left[\Pi_{m_1}\left(w_1\right)\right]=\frac{3E\left[\tilde{\gamma}\right]E\left[\tilde{\beta}\right]-4}{4}$，因为 $E\left[\tilde{\alpha}\right]E\left[\tilde{\beta}\right]-4<0$，所以存在关于 w_1 的最优值，令式(20)等于零得

$$w_1^*=\frac{\left(4-3E\left[\tilde{\gamma}\right]\right)E\left[\tilde{a}\right]-E\left[\tilde{\gamma}\right]E\left[\tilde{c}_2\right]+\left(4-3E\left[\tilde{\gamma}\right]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E\left[\tilde{c}_1\right]}{2\left(4-3E\left[\tilde{\gamma}\right]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)} \tag{21}$$

将式(21)代入式(19)得

$$p_1^* = \frac{3\left(4-3E[\tilde{\gamma}]\right)E[\tilde{a}]-3E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}_2]+\left(4-3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_1]}{4\left(4-3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)} \tag{22}$$

最后将式(21)带入式(14)、式(15)，就可以确定在分散决策情况下，两条供应链的最佳批发价格 w_1^*， w_2^* 和最佳零售价格 p_1^*， p_2^*。

3.2. DC 结构下互补品供应链利润模型

此利润模型阐述了在由互补商品驱动的供应链框架内，制造商与零售商分别追求其利益最大化，从而采取分散定价策略以指导市场行为；相反，在互补商品跟随的供应链场景下，双方协同作用以实现总体利益的最大化，进而实施集中定价决策。在这样的链间博弈背景下，制造商作为供应链的主导力量，以特定的批发价格 w_1 向零售商提供互补商品，继而零售商依据其追求利益最大化的目标来选定最佳定价 p_1；一旦零售商的价格策略得以明确，互补商品供应链则会基于整体利润最大化的目标，制定出最优价格 p_2。

$$\begin{cases}\max\limits_{w_1} E\left[\Pi_{m_1}\left(w_1, p_1\left(w_1\right)\right)\right] \\ \text{s.t. Pos}\left(\left\{w_1-\tilde{c}_1<0\right\}\right)=0 \\ p_1\left(w_1\right)\text{是如下问题的解} \\ \begin{cases}\max\limits_{p_1} E\left[\Pi_{r_1}\left(p_1\right)\right] \\ \text{s.t. Pos}\left(\left\{p_1-w_1<0\right\}\right)=0\end{cases} \\ \text{s.t.}\begin{cases}\max\limits_{p_2} E\left[\Pi_{sc_2}\left(p_2\right)\right] \\ \text{s.t. Pos}\left(\left\{p_2-\tilde{c}_2<0\right\}\right)=0\end{cases}\end{cases}$$

命题 **2** 在分散－集中决策下，如果 $\text{Pos}\left(\left\{w_1^*-\tilde{c}_1<0\right\}\right)=0$、 $\text{Pos}\left(\left\{p_2^*-\tilde{c}_2<0\right\}\right)=0$， 当 $0<\tilde{\gamma},\tilde{\beta}$ 且 $E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]-2<0$ 时，均衡决策如下：

$$\begin{cases}w_1^* = \dfrac{\left(2-E[\tilde{\gamma}]\right)E[\tilde{a}]-E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}_2]+\left(2-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_1]}{2\left(2-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)} \\ p_1^* = \dfrac{3\left(2-E[\tilde{\gamma}]\right)E[\tilde{a}]-3E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}_2]+\left(2-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_1]}{4\left(2-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)} \\ p_2^* = \dfrac{\left(8-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]-6E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{a}]+\left(8-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_2]-E\left[\tilde{\beta}\right]\left(2-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_1]}{8\left(2-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)}\end{cases}$$

证明：与分散决策模式不同，在互补品供应链 sc_2 中，各成员在追求整体利润最大化时，不会出现链内的动态博弈情况。因此，可以对该链的期望收益进行明确的表述

$$E\left[\Pi_{sc_2}\left(p_2\right)\right]=E[\tilde{a}]p_2-p_2^2-E\left[\tilde{\beta}\right]p_1p_2-E[\tilde{a}\tilde{c}_2]+E[\tilde{c}_2]p_2+E\left[\tilde{\beta}\tilde{c}_2\right]p_1 \tag{23}$$

对式(23)关于 p_2 求偏导，与上面分析类似，可以得到供应链 sc_2 的零售价为

$$p_2^*(p_1)=\frac{E[\tilde{a}]-E\left[\tilde{\beta}\right]p_1+E[\tilde{c}_2]}{2} \tag{24}$$

将式(24)带入式(16)并关于 p_1 求偏导，令导数等于零，得零售商 1 的零售价为

$$p_1^*(w_1)=\frac{\left(2-E[\tilde{\gamma}]\right)E[\tilde{a}]-E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}_2]+\left(2-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)w_1}{2\left(2-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)} \tag{25}$$

将式(24)、(25)带入式(17)并关于 w_1 求偏导，令导数等于零，得制造商 1 的批发价为

$$w_1^*=\frac{\left(2-E[\tilde{\gamma}]\right)E[\tilde{a}]-E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}_2]+\left(2-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_1]}{2\left(2-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)} \tag{26}$$

将式(26)代入式(25)的结果，再将其代入式(24)，即可求得 DC 结构下的最优零售价与最优批发价。

3.3. CD 结构下互补品供应链利润模型

在本利润框架内，主导互补品链条 sc_1 的生产商与经销商采取集中的定价策略，旨在实现供应链整体利润的最大化，从而驱动市场决策。相比之下，跟随互补品链条 sc_2 的生产商与经销商则以自身利益最大化为出发点，采取分散的定价策略进行决策。在此博弈场景中，具体流程如下：首先，主导互补品链条 sc_1 的成员基于供应链利润最大化的考量，确立最佳零售价格 p_1。接着，跟随互补品链条 sc_2 的生产商，在了解主导链条设定的价格后，设定批发价 w_2 提供给零售商；最后，零售商根据自身利益最大化的原则，制定最优零售价格 p_2。

$$\begin{cases}\max\limits_{p_1} E\left[\Pi_{sc_1}(p_1)\right]\\ \text{s.t. Pos}\left(\{p_1-\tilde{c}_1<0\}\right)=0\\ \text{s.t.}\begin{cases}\max\limits_{w_2} E\left[\Pi_{m_2}\left(w_2,p_2(w_2)\right)\right]\\ \text{s.t. Pos}\left(\{w_2-\tilde{c}_2<0\}\right)=0\\ p_2(w_2)\text{是如下问题的解}\\ \begin{cases}\max\limits_{p_2} E\left[\Pi_{r_2}(p_2)\right]\\ \text{s.t. Pos}\left(\{p_2-w_2<0\}\right)=0\end{cases}\end{cases}\end{cases}$$

命题 3 在集中–分散决策下，如果 $\text{Pos}\left(\{p_1^*-\tilde{c}_1<0\}\right)=0$、$\text{Pos}\left(\{w_2^*-\tilde{c}_2<0\}\right)=0$，当 $0<\tilde{\gamma},\tilde{\beta}$ 且 $3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]-4<0$ 时，均衡决策如下：

$$\begin{cases}p_1^*=\dfrac{\left(4-3E[\tilde{\gamma}]\right)E[\tilde{a}]-E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}_2]+\left(4-3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_1]}{2\left(4-3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)}\\ p_2^*=\dfrac{\left(24-12E\left[\tilde{\beta}\right]-9E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{a}]+\left(8-3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_2]-3E\left[\tilde{\beta}\right]\left(4-3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_1]}{8\left(4-3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)}\\ w_2^*=\dfrac{\left(8-4E\left[\tilde{\beta}\right]-3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{a}]+\left(8-5E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_2]-E\left[\tilde{\beta}\right]\left(4-3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_1]}{4\left(4-3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)}\end{cases}$$

证明：在具体求解流程中，类比于 DD 架构下的分析框架，核心差异体现在互补产品主导的供应链中采用集中定价策略时，并不存在动态博弈机制。这一特定情境下，决策主体之间的互动模式被简化，从而直接决定了价格设定和资源配置的过程。此时，我们可以将 sc_1 链的期望收益明确地表示出来

$$E\left[\Pi_{sc_1}\left(p_1\right)\right]=E[\tilde{a}]p_1-p_1^2-E[\tilde{\gamma}]p_1p_2-E[\tilde{a}\tilde{c}_1]+E[\tilde{c}_1]p_1+E[\tilde{\gamma}\tilde{c}_1]p_2 \tag{27}$$

sc_2 链内的博弈求解顺序与 DD 组合求解顺序相同，因此将式(14)，(15)带入式(27)并求关于 p_1 的一阶导数，可得 sc_1 供应链的最优零售价格为

$$p_1^*=\frac{\left(4-3E[\tilde{\gamma}]\right)E[\tilde{a}]-E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}_2]+\left(4-3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_1]}{2\left(4-3E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)} \tag{28}$$

将式(28)带入式(14)，(15)就可得 sc_2 链在分散决策下的最优批发价和最优零售价。

3.4. DD 结构下互补品供应链利润模型

在这一架构中，互补商品的主导链 sc_1 与追随链 sc_2 的参与者皆遵循最大化供应链总收益的原则,实施集中式定价策略。在两链间的战略互动中,主导链的成员率先以确保供应链总体利益最大化为宗旨，设定最佳零售价 p_1。紧随其后，追随链的成员基于观察到的主导链零售价格，同样以追求供应链总收益最大化为目标，制定出符合自身最优利益的零售价格 p_2。

$$\begin{cases}\max\limits_{p_1} E\left[\Pi_{sc_1}\left(p_1\right)\right]\\ \text{s.t. Pos}\left(\left\{p_1-\tilde{c}_1<0\right\}\right)=0\\ \text{s.t.}\begin{cases}\max\limits_{p_2} E\left[\Pi_{sc_2}\left(p_2\right)\right]\\ \text{s.t. Pos}\left(\left\{p_2-\tilde{c}_2<0\right\}\right)=0\end{cases}\end{cases}$$

命题 4 在集中－集中决策下，如果 $\text{Pos}\left(\left\{p_i^*-\tilde{c}_i<0\right\}\right)=0$，当 $0<\tilde{\gamma},\tilde{\beta}$ 且 $E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]-2<0$ 时，均衡决策如下：

$$\begin{cases}p_1^*=\dfrac{\left(2-E[\tilde{\gamma}]\right)E[\tilde{a}]-E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}_2]+\left(2-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_1]}{2\left(2-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)}\\ p_2^*=\dfrac{\left(4-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]-2E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{a}]+\left(4-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_2]-E\left[\tilde{\beta}\right]\left(2-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_1]}{4\left(2-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)}\end{cases}$$

证明：根据前面的我们得到两条供应链集中决策下的期望利润式(23)，式(27)，现在对式(23)关于 p_2 求偏导，可得到供应链 sc_2 的最优零售价格为

$$p_2^*\left(p_1\right)=\frac{E[\tilde{a}]-E\left[\tilde{\beta}\right]p_1+E[\tilde{c}_2]}{2} \tag{29}$$

将式(29)带入式(27)并对 p_1 求导偏，可得到供应链 sc_1 的最优零售价格为

$$p_1^*=\frac{\left(2-E[\tilde{\gamma}]\right)E[\tilde{a}]-E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}_2]+\left(2-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)E[\tilde{c}_1]}{2\left(2-E[\tilde{\gamma}]E\left[\tilde{\beta}\right]\right)} \tag{30}$$

DOI: 10.12677/ecl.2025.14113820

最后将式(30)带入式(29)就得到两条供应链在集中决策下的最优零售价。

4. 数据分析

在这一部分中，我们给出了一个数值例子来比较四种决策情景，并探讨供应链面对不确定环境的行为。为了简化分析，我们考虑如下参数

$$\tilde{a}=\left(190,270,390\right),\ E\left[\tilde{a}\right]=280,\ \delta=\tilde{\gamma}=\tilde{\beta}=\left(0.1,0.3,0.5\right),\ E\left[\tilde{\gamma}\right]=E\left[\tilde{\beta}\right]=0.3,$$

$$\tilde{c}_1=\tilde{c}_2=\left(21,24,31\right),\ E\left[\tilde{c}_1\right]=E\left[\tilde{c}_2\right]=25。$$

Table 1. Comparison of expected profits under different structures
表 1. 不同结构下期望利润对比

结构	$E\left[\prod r_1\right]$	$E\left[\prod r_2\right]$	$E\left[\prod m_1\right]$	$E\left[\prod m_2\right]$	$E\left[\prod sc_1\right]$	$E\left[\prod sc_2\right]$
DD	2465.95	2530.55	4931.90	5061.09	7397.86	7591.64
DC	4360.50		8721.01		13081.51	9794.59
CD		2933.45		5866.91	9863.82	8800.36
CC					11585.77	11497.93

Table 2. Comparison of equilibrium decisions under different structures
表 2. 不同结构下均衡决策对比

结构	p_1^*	p_2^*	w_1^*	w_2^*
DD	179.27	175.69	127.85	125.61
DC	190.22	123.97	135.14	
CD	127.85	187.48		133.32
CC	135.14	132.23		

Table 3. Impact of δ on optimal pricing decisions under DD, DC, CD, and CC structures
表 3. δ 对 DD, DC, CD, CC 结构下最优定价决策的影响

δ	DD				DC			
	p_1	p_2	w_1	w_2	p_1	p_2	w_1	w_2
(0.1, 0.2, 0.3)	189.30	187.85	134.54	133.57	197.19	132.78	139.80	
(0.2, 0.3, 0.4)	179.27	175.91	127.85	125.61	190.22	123.97	135.14	
(0.3, 0.4, 0.5)	171.16	164.90	122.44	118.27	184.78	115.54	131.52	
(0.4, 0.5, 0.6)	164.90	154.41	118.27	111.27	180.89	107.28	128.93	
(0.5, 0.6, 0.7)	160.62	143.97	115.41	104.32	178.66	98.90	127.44	
(0.6, 0.7, 0.8)	158.77	132.90	114.18	96.93	178.35	90.08	127.24	
(0.7, 0.8, 0.9)	160.58	119.90	115.38	88.27	180.51	80.29	128.68	
(0.8, 0.9, 1.0)	169.39	101.91	121.26	76.28	186.19	68.72	132.46	

续表

	CD			CC	
(0.1, 0.2, 0.3)	134.54	196.07	139.05	139.80	139.05
(0.2, 0.3, 0.4)	127.85	187.48	133.32	135.14	133.32
(0.3, 0.4, 0.5)	122.44	179.52	128.01	131.52	128.01
(0.4, 0.5, 0.6)	118.27	171.90	122.93	128.93	122.93
(0.5, 0.6, 0.7)	115.41	164.32	117.88	127.44	117.88
(0.6, 0.7, 0.8)	114.18	156.31	112.54	127.24	112.54
(0.7, 0.8, 0.9)	115.38	147.02	106.35	128.68	106.35
(0.8, 0.9, 1.0)	121.26	134.40	97.93	132.46	97.93

当$0<\delta<1$时，从表 1 可以看出我们在模糊需求环境下，需求函数参数和制造成本不确定时，无论互补品供应链sc_2选择集中还是分散的决策方式，可以看到互补品供应链sc_1整条链的期望利润在选择集中决策时，取得最大。集中－集中结构是链间博弈的均衡解，在此时整个供应链取得了帕累托最优。从表 2，表 3，可以得到供应链 1 的最优批发价和零售价随着δ的变化先增加后减少，供应链 2 的最优批发价和零售价随着δ的变化逐渐减少。

5. 总结

本文基于电子商务环境下，将由一家制造商与一家零售商构成的电商互补产品供应链作为研究主体，假设两条供应链链间、链内的地位不平等，构建了在不同决策下的期望值利润 Stackelberg 博弈模型。通过数值分析，比较了不同场景下各成员的最优决策。研究结果表明：在需求函数参数和制造成本不确定时，能够得到整个系统在选择哪种决策方式时，使得两条互补品供应链利润最大化，并可以得到整个供应链帕累托最优解。本文的研究给我们带来了以下启示：其一，在实际研究中，不能简单地假设需求函数与产品价格及互补性水平呈线性关系，因为实际市场中的需求更为复杂。我们应考虑需求的非线性函数以及诸如广告、促销等变量，以便更准确地描述和分析市场需求。其二，在电子商务供应链的研究中，不能局限于只考虑制造商和销售商两个成员。实际的市场环境中还有其他成员存在，我们应将更多的供应链成员纳入研究范围，以更全面地把握供应链的运行机制和特点。

基金项目

国家自然科学基金项目(12061020)；贵州省教育厅科学基金(黔科合 KY 字[2021]088 号，黔科合 KY 字[2022]301)；贵州省师范学院博士基金(2021BS005)。

参考文献

[1] Zhao, J., Liu, W. and Wei, J. (2013) Competition under Manufacturer Service and Price in Fuzzy Environments. *Knowledge-Based Systems*, **50**, 121-133. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2013.06.003

[2] Wang, S.N. (2017) A Manufacturer Stackelberg Game in Price Competition Supply Chain under a Fuzzy Decision Environment. *IAENG International Journal of Applied Mathematics*, **47**, 49-55.

[3] 汪宁宁，杨涛．需求不确定环境下考虑促销努力的平台供应链合作模式选择[J]．河南科技学院学报(自然科学版), 2022, 50(6): 61-73.

[4] 李军涛，刘朋飞，胡启贤．模糊环境下考虑公平偏好的绿色供应链博弈研究[J]．复杂系统与复杂性科学，2021, 18(4): 84-94.

[5] 王淑纳，胡志华．模糊环境下考虑零售商风险偏好的绿色供应链博弈模型[J]．控制与决策，2021, 36(3): 711-723.

[6] 尚文芳, 滕亮亮. 考虑政府补贴和销售努力的零售商主导型绿色供应链博弈策略[J]. 系统工程, 2020, 38(2): 40-50.

[7] 关志民, 曲优, 赵莹. 考虑决策者失望规避的供应链协同绿色创新动态优化与协调研究[J]. 运筹与管理, 2020, 29(5): 96-107.

[8] 公彦德, 陈梦泽. 考虑企业社会责任和公平偏好的绿色供应链决策[J]. 控制与决策, 2021, 36(7): 1743-1753.

[9] 卢安文, 陈浪. 互补品供应链 Stackelberg 博弈下纵向决策研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2024, 23(1): 125-137.

[10] 李柏勋, 周永务, 王圣东. 供应链间 Stackelberg 博弈下纵向结构决策模型[J]. 科研管理, 2012, 33(12): 50-58.

[11] 颜波, 李鸿媛, 胡蝶. 物流与价格双重竞争下产品替代对供应链决策的影响[J]. 科技管理研究, 2015, 35(15): 108-117.

[12] 鄢章华, 刘蕾, 白世贞. 互补品供应链广告策略研究[J]. 山东财经大学学报, 2016, 28(1): 83-91.