

不同权力结构下绿色供应链竞争中的运营决策：定价策略及绿色投入研究

余承键

长沙理工大学数学与统计学院，湖南 长沙

收稿日期：2025年7月1日；录用日期：2025年7月24日；发布日期：2025年8月5日

摘要

产品绿色水平在减少碳排放方面发挥着至关重要的作用，帮助公司降低碳相关成本，同时增强市场竞争力。本文考虑两条关于价格竞争的绿色供应链，供应链1是供应商和零售商组成的分散式供应链，供应链2是将供应商和零售商整合的集中式供应链，其中制造商决定产品的批发价格和绿色水平，而零售商决定零售价格。利用博弈论方法，求解供应链成员在垂直纳什(VN)、制造商主导的Stackelberg (MS)和零售商主导的Stackelberg (RS)情形下的最优定价决策与绿色投入决策。总体结果通过三个命题和九个推论来呈现。此外，还进行了数值模拟，以进一步了解最优决策关于竞争对手价格、绿色水平和绿色投入的灵敏度。整体研究可以帮助企业掌握最优定价和绿色投入策略。

关键词

定价，绿色水平，不同权力结构，混合竞争供应链

Operational Decisions in Green Supply Chain Competition under Different Power Structures: Research on Pricing Strategies and Green Investment

Chengjian Yu

School of Mathematics and Statistics, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan

Received: Jul. 1st, 2025; accepted: Jul. 24th, 2025; published: Aug. 5th, 2025

Abstract

Green product level plays a crucial role in reducing carbon emissions, helping companies lower

文章引用：余承键. 不同权力结构下绿色供应链竞争中的运营决策：定价策略及绿色投入研究[J]. 应用数学进展, 2025, 14(8): 43-58. DOI: 10.12677/aam.2025.148369

carbon-related costs while enhancing market competitiveness. This study considers two green supply chains engaged in price competition. Supply Chain 1 is a decentralized chain comprising a supplier and a retailer. Supply Chain 2 is an integrated chain where the supplier and retailer are consolidated, with the manufacturer determining the product's wholesale price and green level, while the retailer sets the retail price. Utilizing game-theoretic approaches, the optimal pricing and green investment decisions for supply chain members are derived under three power structures: Vertical Nash (VN), Manufacturer-led Stackelberg (MS), and Retailer-led Stackelberg (RS). The overall findings are presented through three propositions and nine corollaries. Furthermore, numerical simulations are conducted to provide deeper insights into the sensitivity of the optimal decisions concerning competitor pricing, green level, and green investment. Collectively, this research provides valuable guidance for enterprises seeking to master optimal pricing and green investment strategies.

Keywords

Pricing, Green-Level, Different Power Structures, Hybrid Competing Supply Chains

Copyright © 2025 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

随着生态保护理念的普及和可持续发展成为国家战略重点，公众的环保意识显著增强。消费者在购物时，越来越倾向于选择环保属性更强的绿色产品。《公民生态环境行为调查报告(2020)》数据显示，近九成受访者认为选购低污染、环境友好的产品对生态环境保护至关重要。面对日益严格的政府监管和消费者对绿色产品的旺盛需求，制造商正积极承担环保责任，推动产品向绿色化转型。例如，宾利工厂通过安装太阳能板或采购认证绿电为生产供能；联想则创新性地将回收材料应用于显示屏制造。因此，通过与合作伙伴和供应商合作创建绿色供应链对于保护环境和提高供应链的整体可持续性至关重要[1] [2]。

2005 年，美国马丁克里斯多夫教授提出“21 世纪的竞争不再是企业与企业之间的竞争，而是供应链与供应链之间的竞争”。近年来，这种链与链的竞争模式已成为学界研究的重点领域。大多数供应链关于竞争性供应链的文献，都假设企业必须选择集中式或者分散式结构，多聚焦于同类型供应链的价格、质量或绿色竞争[3]-[5]，一些学者还考虑了混合结构模型，其中集中式供应链与分散式供应链之间的竞争。McGuire 等人研究了两个关于价格竞争的供应链，并构建了一个混合结构模型，其中集中式供应链与分散式供应链竞争[6]。Li 等人研究了生产主流产品的集中式供应链和生产强盗产品的分散式供应链之间的竞争[7]。混合竞争的供应链做法也存在于公司的业务层面。例如，2006 年之前，春兰、志高主要通过分散渠道销售空调，格力则通过自建渠道直接面向市场销售空调。

此外，在分散化的供应链中还存在双重边缘化现象，供应链成员各自独立决策，以实现自身利润最大化。这一般不会使整个供应链的利润最大化[8]。更具体地说，他们做出的库存或定价决策最终会导致整个供应链的销售额低于他们合作时的销售额。但是，这并不意味着集中式供应链总比分散式供应链好。当产品具有高度可替代性且仅考虑价格竞争时，制造商最好采用分散式分销系统[9]。因此，对于竞争性供应链的成员来说，为了面对市场竞争而采取分散还是集中的结构是一个非常重要的问题。本文从绿色投入的角度出发，探讨了企业在竞争中应采取何种结构的问题。

在供应链权力结构研究方面，学者们进行了多角度探索。Gaski 等[10]通过实证方法考察了渠道成员

权力来源,并分析了其对成员满意度的作用机制。Choi [11]基于供应链背景,将权力结构划分为多种形式(包括 Stackelberg 博弈和 Nash 博弈),并指出不同需求函数模型会导致差异化结果。Gao 等[12]的研究则聚焦闭环供应链,证实零售商权力优势与其收益呈正相关。Zhang 等[13]考察了产品可替代性及相对渠道地位在不同权力结构中对定价决策的影响。孙嘉轶[14]等分析了权力结构与股权合作对闭环供应链生产决策及企业利润的影响。范建昌[15]等在三种渠道权力结构下研究了责任成本分担对制造商产品质量决策的影响,并考察了渠道权力结构对供应链均衡结果及契约协调的影响。

综上所述,目前大部分的文献集中于相同供应链结构之间关于价格、绿色以及质量之间的竞争,很少考虑到混合竞争供应链中的定价以及绿色水平投入的问题。鉴于此,本文研究了不同权力结构下(垂直纳什(VN)、制造商主导的 Stackelberg (MS)和零售商主导的 Stackelberg (RS))混合竞争供应链中的定价决策和绿色水平决策问题。本文的创新点如下:

- 1) 运用三种博弈情境描述混合竞争供应链市场的动态权力结构。
- 2) 从产品价格和绿色水平两个方面分析了混合供应链之间的竞争并推导出来最优价格以及投入决策。
- 3) 研究了绿色投入后,分散式供应链的总利润会高于集中式供应链的总利润问题。

2. 模型构建与解决分析

本文研究了两条对产品零售价格构成竞争关系的供应链。一条由独立决策的制造商和零售商组成的分散式供应链,其中制造商决定批发价格和绿色水平投入,零售商决定零售价格以追求其利润最大化。另外一条由制造商和零售商相互整合而成的集中式供应链,以零售商的价格为条件使利润最大化。参考 McGuire & Staelin (1983) [8]等的研究,我们将一个集中的供应链等同于一个能够自己生产和销售产品的零售商。令 d, k 表示竞争价格和绿色水平的敏感系数,在此模型中,零售利润为 $m_i = P_i - W_i$ 。因此,需求函数为 $D_1 = a - P_1 + dP_2 + kS, D_2 = a - P_2 + dP_1$, hS^2 为绿色水平投入成本,其中 a 为常数。假设需求是价格和绿色水平的线性函数。此外,需求与自身价格呈负相关,与竞争对手的价格呈正相关。需求对产品的绿色水平也是正相关的。积极的绿色水平敏感性表明消费者对产品绿色水平的重视。目标函数用下面的方程表示:

$$\begin{aligned}\max \Pi_{M1} &= W_1 D_1 - hS^2 \\ \max \Pi_{R1} &= (P_1 - W_1) D_1 \\ \max \Pi_{R2} &= P_2 D_2\end{aligned}$$

首先,最优决策由以下三种博弈论方法确定:垂直纳什下制造商与零售商同时决策,通过联立方程组求解纳什均衡下的最优决策,Stackelberg 博弈则区分领导者与追随者角色,其中制造商主导由制造商先制定策略,零售商随后基于反应函数优化决策,反之则为零售商主导,都需运用逆向归纳法求解领导者最优策略及追随者反应函数。

此外,还对竞争价格敏感系数、绿色敏感系数以及绿色水平成本系数进行了敏感性分析,分析其对最优解的影响。本文采用了 3 种指数, N 、 M 和 R 分别表示垂直纳什、制造商 Stackelberg 和零售商 Stackelberg 博弈模型。本论文中使用的主要参数见表 1 所示。

Table 1. Model parameters and meanings

表 1. 模型参数及含义

参数符号	参数含义	参数符号	参数含义
D_i	零售商 i 的市场需求($i = 1, 2$)	a	产品的潜在市场需求

续表

d	竞争价格的敏感系数	k	绿色水平系数
h	绿色水平投入成本系数	S	绿色水平
W_1	制造商 1 的批发价格	P_i	零售商 i 的零售价格($i = 1, 2$)
Π_{M1}	制造商 1 的利润函数	Π_{Ri}	零售商 i 的利润函数($i = 1, 2$)

2.1. 垂直纳什博弈模型

命题 1: 在垂直纳什博弈模型下, 给定 $4h - k^2 > 0$ 的条件下, 制造商和零售商的最优决策如下:

$$W_1^N = \frac{ah(2+d)}{G_1}, S^N = \frac{ak(2+d)}{2G_1}, P_1^N = \frac{2ah(2+d)}{G_1} \text{ 和 } P_2^N = \frac{a}{2} + \frac{adh(2+d)}{G_1}$$

将 W_1^N, S^N, P_1^N, P_2^N 代入上式中, 得到供应链利润、制造商利润、零售商利润和产品需求如下:

$$D_1^N = \frac{ah(2+d)}{G_1}, D_2^N = \frac{a(6h - k^2 + 4hd)}{2G_1}, \pi_{M1}^N = \frac{a^2h(2+d)^2(4h - k^2)}{4G_1^2},$$

$$\pi_{R1}^N = \frac{a^2h^2(2+d)^2}{G_1^2}, \pi_{M1}^N + \pi_{R1}^N = \frac{a^2h(2+d)^2(8h - k^2)}{4G_1^2}, \pi_{R2}^N = \frac{a^2(6h - k^2 + 4hd)^2}{4G_1^2}$$

其中 $G_1 = 6h - k^2 - 2hd^2$ 。

证明: 通过 $\frac{\partial^2 \pi_{R1}}{\partial m_1^2} = -2 < 0$, 可以得出 π_{R1} 是 m_1 上的一个凹函数。通过 $\frac{\partial^2 \pi_{R2}}{\partial P_2^2} = -2 < 0$, 可以得出 π_{R2} 是 P_2 上的一个凹函数。当 $4h - k^2 > 0$ 时, π_{M1} 的黑塞矩阵 $H(W_1, S) = \begin{bmatrix} -2 & k \\ k & -2h \end{bmatrix}$ 是负定的。因此, 求解出

一阶条件(即 $\frac{\partial \pi_{M1}}{\partial W_1} = 0, \frac{\partial \pi_{M1}}{\partial S} = 0, \frac{\partial \pi_{R1}}{\partial m_1} = 0, \frac{\partial \pi_{R2}}{\partial P_2} = 0$), 并将这四个方程合并, 我们得到:

$$W_1 = \frac{a + dP_2 + kS - m_1}{2}, S = \frac{kW_1}{2h}, m_1 = \frac{a - W_1 + dP_2 + kS}{2} \text{ 和 } P_2 = \frac{a + d(m_1 + W_1)}{2}$$

接下来同时求解出 W_1, S, m_1, P_2 , 得到 $W_1^N = \frac{ah(2+d)}{G_1}, S^N = \frac{ak(2+d)}{2G_1}, m_1^N = \frac{ah(2+d)}{G_1}$, 和 $P_2^N = \frac{a}{2} + \frac{adh(2+d)}{G_1}$, 由

$m_1 = P_1 - W_1$ 可知 $P_1^N = \frac{2ah(2+d)}{G_1}$, 把 W_1^N, S^N, P_1^N, P_2^N 代入到市场需求函数和利润函数里面得

$$D_1^N = \frac{ah(2+d)}{G_1}, D_2^N = \frac{a(6h - k^2 + 4hd)}{2G_1}, \pi_{M1}^N = \frac{a^2h(2+d)^2(4h - k^2)}{4G_1^2}, \pi_{R1}^N = \frac{a^2h^2(2+d)^2}{G_1^2},$$

$\pi_{R2}^N = \frac{a^2(6h - k^2 + 4hd)^2}{4G_1^2}$, 然后合并制造商和零售商的利润可得供应链 1 整体的利润:

$$\pi_{M1} + \pi_{R1} = \frac{a^2h(2+d)^2(4h - k^2)}{4G_1^2} + \frac{a^2h^2(2+d)^2}{G_1^2} = \frac{a^2h(2+d)^2(8h - k^2)}{4G_1^2}, \text{ 其中 } G_1 = 6h - k^2 - 2hd^2。$$

推论 1: 垂直纳什博弈模型下, 关于竞争价格系数的敏感性如下:

$$\frac{\partial W_1^N}{\partial d} > 0, \frac{\partial P_1^N}{\partial d} > 0, \frac{\partial P_2^N}{\partial d} > 0, \frac{\partial S^N}{\partial d} > 0, \frac{\partial \pi_{M1}^N}{\partial d} > 0, \frac{\partial \pi_{R1}^N}{\partial d} > 0 \text{ 和 } \frac{\partial \pi_{R2}^N}{\partial d} > 0。$$

证明见附录。

推论 2: 垂直纳什博弈模型下, 关于绿色水平系数的敏感性如下:

- 1) $\frac{\partial W_1^N}{\partial k} > 0, \frac{\partial P_1^N}{\partial k} > 0, \frac{\partial P_2^N}{\partial k} > 0, \frac{\partial S^N}{\partial k} > 0, \frac{\partial \pi_{R1}^N}{\partial k} > 0$ 和 $\frac{\partial \pi_{R2}^N}{\partial k} > 0$
- 2) 当 $k^2 < 2h(1+d^2)$, 有 $\frac{\partial \pi_{M1}^N}{\partial k} > 0$; 当 $k^2 > 2h(1+d^2)$, 有 $\frac{\partial \pi_{M1}^N}{\partial k} < 0$

证明见附录。

推论 3: 垂直纳什博弈模型下, 关于绿色水平投入成本系数的敏感性如下:

- 1) $\frac{\partial W_1^N}{\partial h} < 0, \frac{\partial P_1^N}{\partial h} < 0, \frac{\partial P_2^N}{\partial h} < 0, \frac{\partial S^N}{\partial h} < 0, \frac{\partial \pi_{R1}^N}{\partial h} < 0$ 和 $\frac{\partial \pi_{R2}^N}{\partial h} < 0$
- 2) 当 $k^2 < 2h(1+d^2)$, 有 $\frac{\partial \pi_{M1}^N}{\partial h} < 0$; 当 $k^2 > 2h(1+d^2)$, 有 $\frac{\partial \pi_{M1}^N}{\partial h} > 0$

证明见附录。

2.2. 制造商主导的 Stackelberg 博弈模型

命题 2: 在制造商主导的 Stackelberg 博弈模型下, 给定 $G_2 = (4-2d^2)(4-d^2)h - 2k^2 > 0$ 的条件下, 制造商和零售商的最优决策如下:

$$W_1^M = \frac{ah(2+d)(4-d^2)}{G_2}, S^M = \frac{ak(2+d)}{G_2}, P_1^M = \frac{ah(2+d)(6-2d^2)}{G_2} \text{ 和 } P_2^M = \frac{a}{2} + \frac{adh(2+d)(6-2d^2)}{2G_1}$$

将 W_1^M, S^M, P_1^M, P_2^M 代入上式中, 得到供应链利润、制造商利润、零售商利润和产品需求如下:

$$D_1^M = \frac{ah(4+2d-2d^2-d^3)}{G_2}, D_2^M = \frac{a[(8+6d-3d^2-2d^3)h-k^2]}{G_2}, \pi_{M1}^M = \frac{a^2h(2+d)^2}{2G_2},$$

$$\pi_{R1}^M = \frac{a^2h^2(4+2d-2d^2-d^3)^2}{G_2^2}, \pi_{M1}^M + \pi_{R1}^M = \frac{a^2h(2+d)^2[2h(d^2-2)(d^2-3)-k^2]}{G_2^2},$$

$$\pi_{R2}^M = \frac{a^2[(8+6d-3d^2-2d^3)h-k^2]^2}{G_2^2}$$

证明: 在制造商主导的 Stackelberg 博弈模型中, 采用逆向归纳法求解。第一阶段, 分散式供应链中的制造商先决策其批发价格和绿色水平, 第二阶段, 两个零售商同时决策其零售价格, 以实现各自利润最大化。通过 $\frac{\partial^2 \pi_{R1}}{\partial m_1^2} = -2 < 0$ 可以得出 π_{R1} 是 m_1 上的一个凹函数, $\frac{\partial^2 \pi_{R2}}{\partial P_2^2} = -2 < 0$, 可以得出 π_{R2} 是 P_2 上的

一个凹函数。求解一阶条件 $\frac{\partial \pi_{R1}}{\partial m_1} = 0, \frac{\partial \pi_{R2}}{\partial P_2} = 0$, 我们可以求得 $m_1 = \frac{a-W_1+dP_2+kS}{2}, P_2 = \frac{a+d(m_1+W_1)}{2}$,

联立这两个方程得 $m_1 = \frac{a(2+d)+(d^2-2)W_1+2kS}{4-d^2}, P_2 = \frac{a(2+d)+d(W_1+kS)}{4-d^2}$, 把 m_1, P_2 代入 π_{M1} 中,

当 $(4-2d^2)(4-d^2)h - 2k^2 > 0$ 时 π_{M1} 的黑塞矩阵 $H(W_1, S) = \begin{bmatrix} \frac{2d^2-4}{4-d^2} & \frac{2k}{4-d^2} \\ \frac{2k}{4-d^2} & -2h \end{bmatrix}$ 为负定的, 求解一阶条件

(即 $\frac{\partial \pi_{M1}}{\partial W_1} = 0, \frac{\partial \pi_{M1}}{\partial S} = 0$) $W_1 = \frac{a(2+d)+2kS}{4-2d^2}, S = \frac{kW_1}{(4-d^2)h}$ 联立这两个方程得

$W_1^M = \frac{ah(2+d)(4-d^2)}{G_2}, S^M = \frac{ak(2+d)}{G_2}$, 再将 W_1^M, S_1^M 代入到 m_1, P_2 中得 $m_1^M = \frac{ah(2+d)(2-d^2)}{G_2}$ 和 $P_2^M = \frac{a}{2} + \frac{adh(2+d)(6-2d^2)}{2G_1}$, 由 $m_1 = P_1 - W_1$ 可得 $P_1^M = \frac{ah(2+d)(6-2d^2)}{G_2}$, 接下来把 W_1^M, S^M, P_1^M, P_2^M 代入到市场需求函数和利润函数里面得:

$$D_1^M = \frac{ah(4+2d-2d^2-d^3)}{G_2}, D_2^M = \frac{a[(8+6d-3d^2-2d^3)h-k^2]}{G_2},$$

$$\pi_{M1}^M = \frac{a^2h(2+d)^2}{2G_2}, \pi_{R1}^M = \frac{a^2h^2(4+2d-2d^2-d^3)^2}{G_2^2}, \pi_{R2}^M = \frac{a^2[(8+6d-3d^2-2d^3)h-k^2]^2}{G_2^2}$$

然后合并制造商和零售商的利润可得供应链 1 整体的利润:

$$\pi_{M1}^M + \pi_{R1}^M = \frac{a^2h(2+d)^2[2h(d^2-2)(d^2-3)-k^2]}{G_2^2}, \text{ 其中 } G_2 = (4-2d^2)(4-d^2)h-2k^2.$$

推论 4: 制造商主导的 Stackelberg 博弈模型下, 关于竞争价格系数的敏感性如下:

$$\frac{\partial W_1^M}{\partial d} > 0, \frac{\partial P_1^M}{\partial d} > 0, \frac{\partial P_2^M}{\partial d} > 0, \frac{\partial S^M}{\partial d} > 0, \frac{\partial \pi_{M1}^M}{\partial d} > 0, \frac{\partial \pi_{R1}^M}{\partial d} > 0 \text{ 和 } \frac{\partial \pi_{R2}^M}{\partial d} > 0.$$

证明见附录。

推论 5: 制造商主导的 Stackelberg 博弈模型下, 关于绿色水平系数的敏感性如下:

$$\frac{\partial W_1^M}{\partial k} > 0, \frac{\partial P_1^M}{\partial k} > 0, \frac{\partial P_2^M}{\partial k} > 0, \frac{\partial S^M}{\partial k} > 0, \frac{\partial \pi_{M1}^M}{\partial k} > 0, \frac{\partial \pi_{R1}^M}{\partial k} > 0 \text{ 和 } \frac{\partial \pi_{R2}^M}{\partial k} > 0$$

证明见附录。

推论 6: 制造商主导的 Stackelberg 博弈模型下, 关于绿色水平投入成本系数的敏感性如下:

$$\frac{\partial W_1^M}{\partial h} < 0, \frac{\partial P_1^M}{\partial h} < 0, \frac{\partial P_2^M}{\partial h} < 0, \frac{\partial S^M}{\partial h} < 0, \frac{\partial \pi_{M1}^M}{\partial h} < 0, \frac{\partial \pi_{R1}^M}{\partial h} < 0 \text{ 和 } \frac{\partial \pi_{R2}^M}{\partial h} < 0$$

证明见附录。

2.3. 零售商主导的 Stackelberg 博弈模型

命题 3: 在零售商主导的 Stackelberg 博弈模型下, 给定 $(2+d)(4h-k^2)-2hd^2 > 0$ 的条件下, 制造商和零售商的最优决策如下:

$$W_1^R = \frac{2ah[(2+d)(4h-k^2)-2hd^2]}{(4h-k^2)G_3}, S^R = \frac{ak[(2+d)(4h-k^2)-2hd^2]}{(4h-k^2)G_3},$$

$$P_1^R = \frac{a(6h-k^2)[(2+d)(4h-k^2)-2hd^2]}{(4h-k^2)G_3} \text{ 和 } P_2^R = \frac{a[8h-2k^2+6hd-dk^2]}{G_3}$$

将 W_1^R, S^R, P_1^R, P_2^R 代入上式中, 得到供应链利润、制造商利润、零售商利润和产品需求如下:

$$D_1^R = \frac{2ah[2h(4+2d-d^2)-(2+d)k^2]}{(4h-k^2)G_3}$$

$$D_2^R = \frac{a[4h^2(8+6d-4d^2-3d^3)-2(8+5d-2d^2-d^3)hk^2+(2+d)k^4]}{(4h-k^2)G_3}$$

$$\pi_{M1}^R = \frac{a^2h[2h(4+2d-d^2)-(2+d)k^2]^2}{(4h-k^2)G_3^2},$$

$$\pi_{R1}^R = \frac{2a^2h[2h(4+2d-d^2)-(2+d)k^2]^2}{(4h-k^2)G_3^2}$$

$$\pi_{M1}^R + \pi_{R1}^R = \frac{3a^2h[2h(4+2d-d^2)-(2+d)k^2]^2}{(4h-k^2)G_3^2}$$

$$\pi_{R2}^R = -\frac{a^2[2(-2+d^2)h+k^2][(8+6d)h-(2+d)k^2]^2}{(4h-k^2)G_3^2}$$

其中 $G_3 = 16h - 4k^2 - 10hd^2 + d^2k^2$ 。

证明：在零售商主导的 Stackelberg 博弈模型中，采用逆向归纳法求解。第一阶段，两条供应链中的零售商先决定其零售价格，第二阶段，分散式供应链中的制造商决定其批发价格以及绿色水平，以实现他们各自利润的最大化。当 $4h - k^2 > 0$ 时， π_{M1} 的黑塞矩阵 $H(W_1, S) = \begin{bmatrix} -2 & k \\ k & -2h \end{bmatrix}$ 是负定的。因此，求解出

一阶条件(即 $\frac{\partial \pi_{M1}}{\partial W_1} = 0, \frac{\partial \pi_{M1}}{\partial S} = 0$)，并将求得的两个方程联立，我们得到： $W_1 = \frac{2h(a + dP_2 - m_1)}{4h - k^2}$,

$S = \frac{k(a + dP_2 - m_1)}{4h - k^2}$ ，当 $(2+d)(4h - k^2) - 2hd^2 > 0$ 时，把 W_1, S 代入 π_{R1} 中，求解一阶条件即

$\left(\frac{\partial \pi_{R1}}{\partial m_1} = 0, \frac{\partial \pi_{R2}}{\partial P_2} = 0\right)$ 联立求解所得一阶方程 $m_1^R = \frac{a[(2+d)(4h - k^2) - 2hd^2]}{G_3}, P_2^R = \frac{a[8h - 2k^2 + 6hd - dk^2]}{G_3}$,

由 $m_1 = P_1 - W_1$ 可得 $P_1^R = \frac{a(6h - k^2)[(2+d)(4h - k^2) - 2hd^2]}{(4h - k^2)G_3}$ ，再将 m_1^R, P_2^R 代入到 W_1, S 中得

$W_1^R = \frac{2ah[(2+d)(4h - k^2) - 2hd^2]}{(4h - k^2)G_3}, S^R = \frac{ak[(2+d)(4h - k^2) - 2hd^2]}{(4h - k^2)G_3}$ ，接下来把 W_1^R, S^R, P_1^R, P_2^R 代入到市

场需求函数和利润函数里面可得：

$$D_1^R = \frac{2ah[2h(4+2d-d^2)-(2+d)k^2]}{(4h-k^2)G_3}$$

$$D_2^R = \frac{a[4h^2(8+6d-4d^2-3d^3)-2(8+5d-2d^2-d^3)hk^2+(2+d)k^4]}{(4h-k^2)G_3}$$

$$\pi_{M1}^R = \frac{a^2h[2h(4+2d-d^2)-(2+d)k^2]^2}{(4h-k^2)G_3^2}$$

$$\pi_{R1}^R = \frac{2a^2h[2h(4+2d-d^2)-(2+d)k^2]^2}{(4h-k^2)G_3^2}$$

$$\pi_{R2}^R = -\frac{a^2[2(-2+d^2)h+k^2][(8+6d)h-(2+d)k^2]^2}{(4h-k^2)G_3^2}$$

然后合并制造商和零售商的利润可得供应链 1 整体的利润 $\pi_{M1}^R + \pi_{R1}^R = \frac{3a^2h[2h(4+2d-d^2)-(2+d)k^2]^2}{(4h-k^2)G_3^2}$,

其中 $G_3 = 16h - 4k^2 - 10hd^2 + d^2k^2$ 。

推论 7: 零售商主导的 Stackelberg 博弈模型下, 关于竞争价格系数的敏感性如下:

$$\frac{\partial W_1^R}{\partial d} > 0, \frac{\partial P_1^R}{\partial d} > 0, \frac{\partial P_2^R}{\partial d} > 0, \frac{\partial S^R}{\partial d} > 0, \frac{\partial \pi_{M1}^R}{\partial d} > 0, \frac{\partial \pi_{R1}^R}{\partial d} > 0 \text{ 和 } \frac{\partial \pi_{R2}^R}{\partial d} > 0$$

证明见附录。

推论 8: 零售商主导的 Stackelberg 博弈模型下, 关于绿色水平系数的敏感性如下:

$$\frac{\partial W_1^R}{\partial k} > 0, \frac{\partial P_1^R}{\partial k} > 0, \frac{\partial P_2^R}{\partial k} > 0, \frac{\partial S^R}{\partial k} > 0, \frac{\partial \pi_{M1}^R}{\partial k} > 0, \frac{\partial \pi_{R1}^R}{\partial k} > 0 \text{ 和 } \frac{\partial \pi_{R2}^R}{\partial k} > 0$$

证明见附录。

推论 9: 零售商主导的 Stackelberg 博弈模型下, 关于绿色水平投入成本系数的敏感性如下:

$$\frac{\partial W_1^R}{\partial h} < 0, \frac{\partial P_1^R}{\partial h} < 0, \frac{\partial P_2^R}{\partial h} < 0, \frac{\partial S^R}{\partial h} < 0, \frac{\partial \pi_{M1}^R}{\partial h} < 0, \frac{\partial \pi_{R1}^R}{\partial h} < 0 \text{ 和 } \frac{\partial \pi_{R2}^R}{\partial h} < 0$$

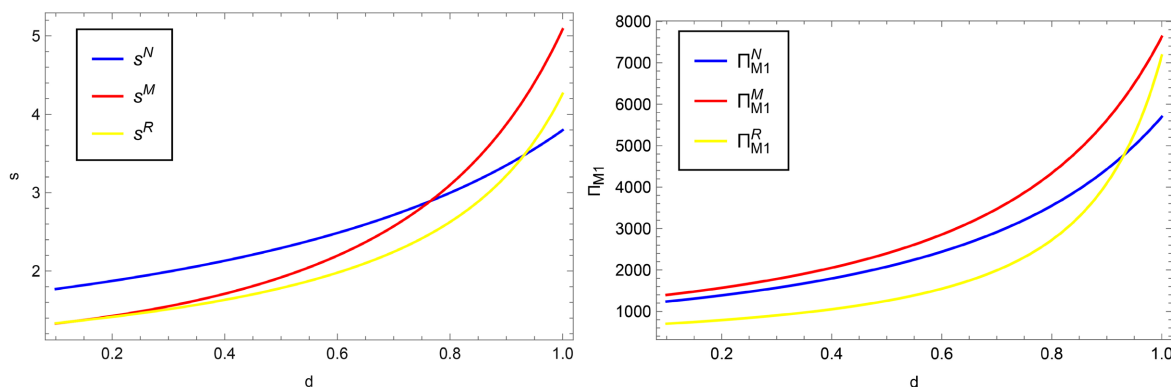
证明见附录。

3. 数值实验与分析

除了上述命题和推论之外, 还进行了数值模拟, 以进一步揭示了最优决策对竞争价格、绿色水平及绿色投入的敏感性。

3.1. 决策变量关于竞争价格系数的敏感性

在本小节中, 基本参数设置为 $a = 100$, $d = 0.8$, $k = 0.6$, $h = 5$, d 的取值范围设置为 $d = 0.1:0.05:1.0$ 。图 1 的分析结果表明: 随着竞争价格系数的增加, 在纳什均衡条件下, 制造商利润和零售商利润均呈现上升趋势。制造商 Stackelberg 博弈模型与零售商 Stackelberg 博弈模型的决策变量表现出相同的上升趋势, 跟推论 1, 4, 7 表述一致。



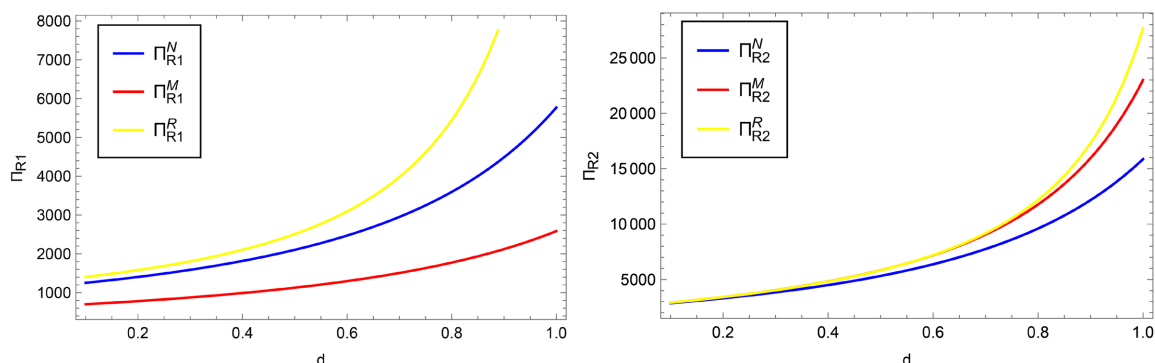


Figure 1. Impact of competitor-price coefficient

图 1. 竞争价格系数的影响

3.2. 决策变量关于绿色水平系数的敏感性

图 2 的有关参数设置为 $a=100$, $d=0.8$, $h=5$, k 的取值范围设置为 0.1 到 1。图 3 的有关参数设置为 $a=100$, $d=0.5$, $h=5$, 其中 k 的取值范围分别设置为 $k=2.5:0.1:4.3$ 和 $k=0.1:0.1:3.5$ 。两者的分析结果表明绿色水平以及两个零售商的利润都随着绿色水平系数的增加而增加。绿色水平系数 k 对两个零售商的利润有正面影响。 k 对改进绿色水平有积极影响。 k 值越高, 表明客户对产品绿色水平的关注度越高, 因此, 随着绿色水平系数的提高, 需求也随之增加。由于客户更倾向于选择绿色优质的产品, 零售价格也得以合理提高, 零售利润也会相应增加。需注意的是随着绿色水平系数的增加, 垂直纳什下制造商的利润先增大后减小, 这是因为绿色水平系数的增加意味着消费者对产品绿色愈发重视, 制造商大力投入绿色水平, 而由于垂直纳什下的双重边际效应, 导致制造商的批发价格过高, 市场需求因为过高的批发价格而减少, 又由于高额的绿色投入成本, 因此制造商的利润会减少。

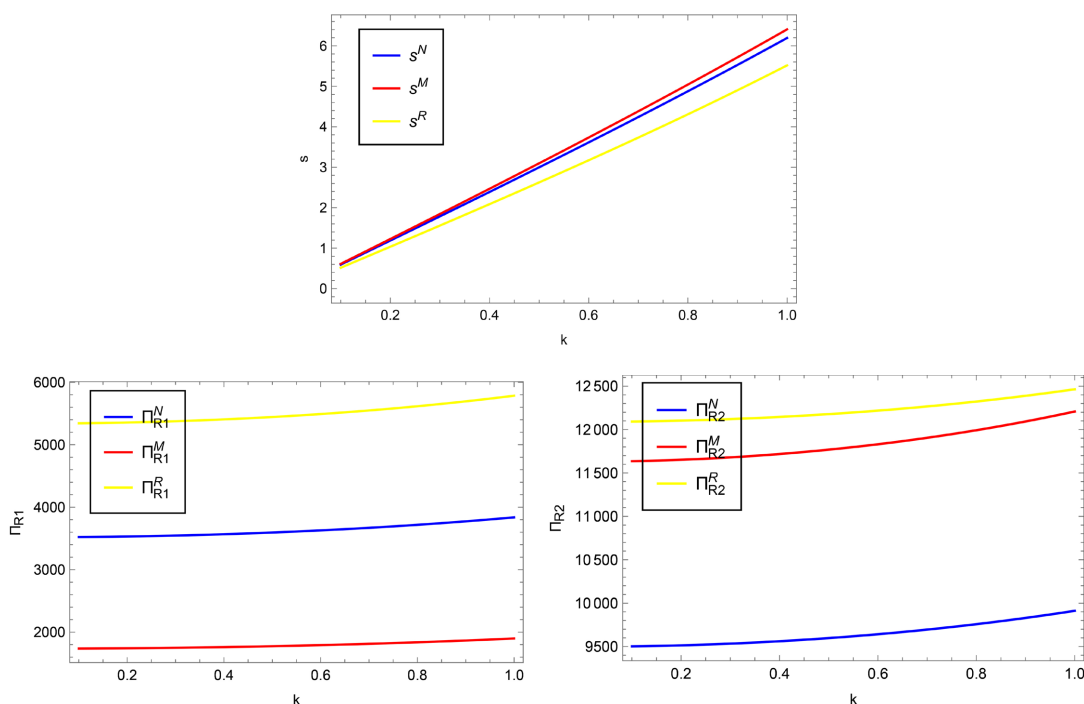


Figure 2. Impact of green-level coefficient

图 2. 绿色水平系数的影响

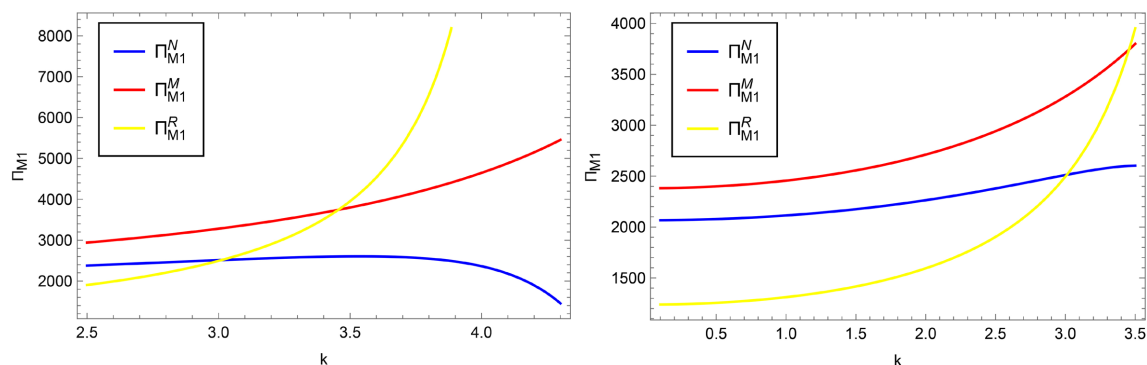


Figure 3. The Impact of the green-level coefficient on Manufacturer's Profit

图 3. 绿色水平系数对制造商利润的影响

3.3. 决策变量关于绿色水平投入系数的敏感性

3.3.1. 绿色水平投入系数对价格、市场需求以及供应链参与者利润的影响

图 4 的有关参数设置为 $a = 100$, $k = 0.6$, $d = 0.8$, h 的取值范围设置为 $h = 1:0.5:10$ 。图 5 的有关参数设置为 $a = 100$, $d = 0.4$, $k = 2$, 其中 h 的取值范围分别设置为 $h = 1.1:0.1:4$ 和 $h = 1.5:0.1:4$ 。两者的分析结果表明绿色水平投入系数 h 对供应链参与者的利润有负面影响。绿色水平随着投资成本系数的增加而下降, 可以说明较高的投资成本使制造商不愿意进行绿色升级, 从而降低其对产品绿色水平投入的积极性。此外, 需注意的, 当投入成本系数在较低的范围时, 会有制造商在纳什均衡下的利润会随着投入成本系数的增大而增加。

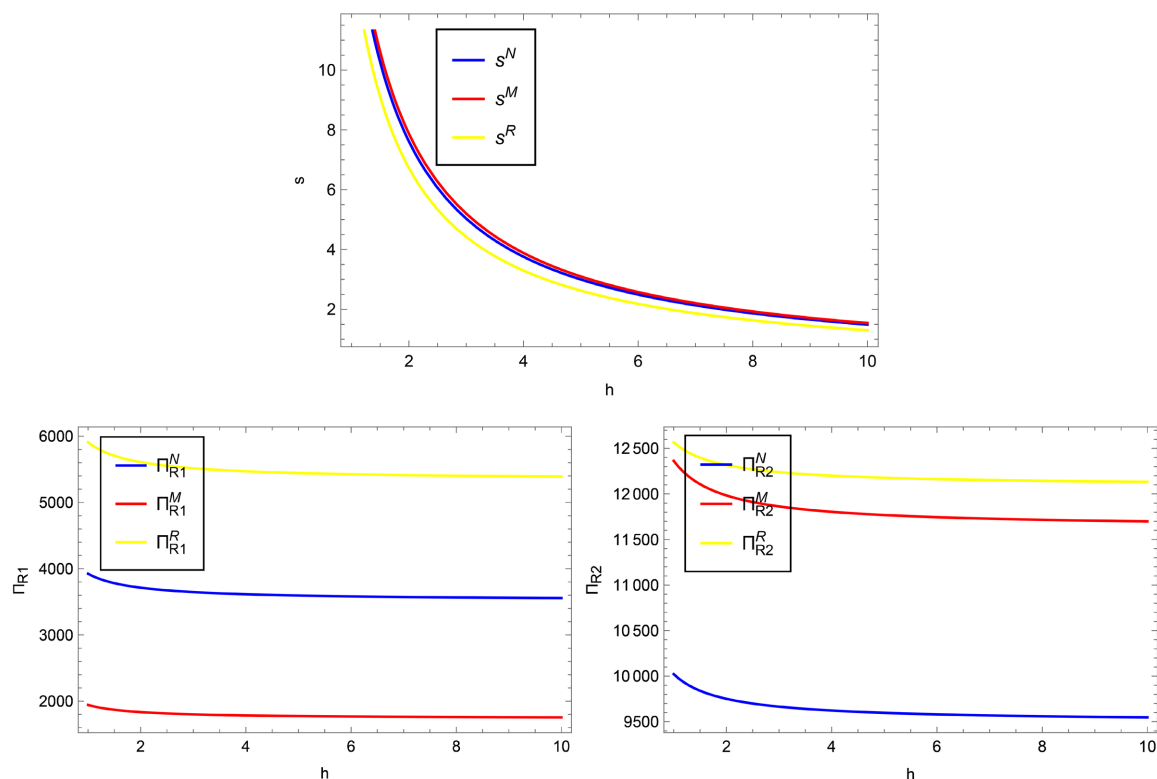


Figure 4. Impact of green-investment cost-coefficient

图 4. 绿色水平投入系数的影响

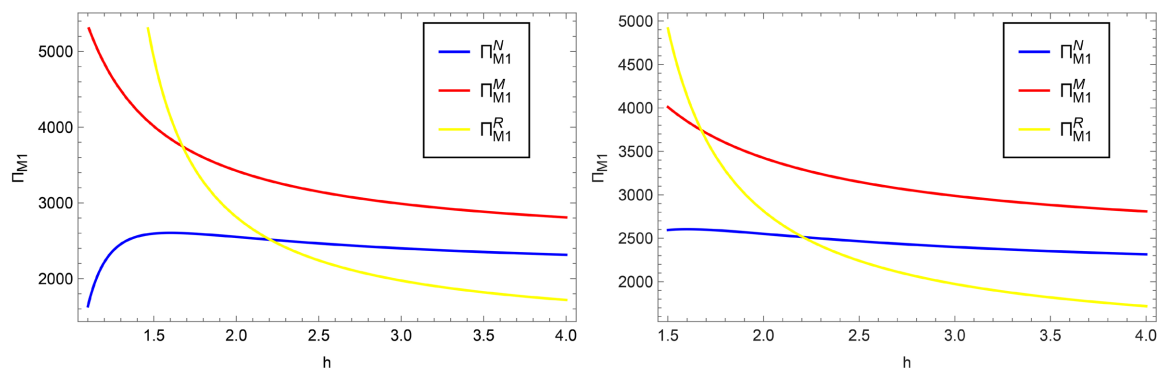


Figure 5. The Impact of green-investment cost-coefficient on Manufacturer's Profit

图 5. 绿色水平投入系数对制造商利润的影响

3.3.2. 绿色水平投入系数对供应链利润的影响

图 6 的有关参数设置为 $a=100$, $k=3$, $d=0.3$, h 的取值范围分别设置为 $h=4:0.2:10$ 以及 $h=2:0.1:4$ 。

图 6 的分析结果表明绿色水平投入系数 h 对供应链整体的利润有负面影响，只要绿色水平的投入成本系数在一定区间内，就有分散式供应链的总利润大于集中式供应链；当绿色水平的投入成本系数过大时，就有集中式供应链的总利润大于分散式供应链。

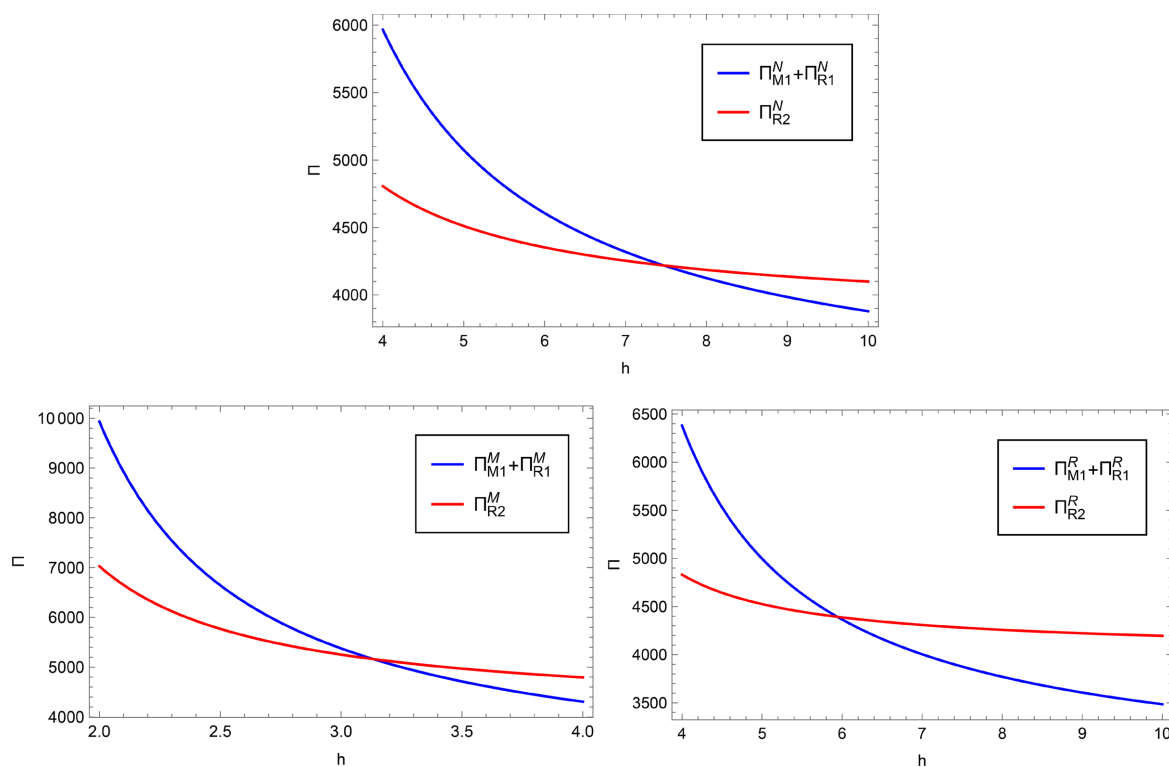


Figure 6. The Impact of green-investment cost-coefficient on Supply Chain's Profit

图 6. 绿色水平投入系数对供应链利润的影响

通过对比三种不同博弈模型的供应链参与者的利润。结果显示，在竞争价格系数的影响下，制造商在制造商 Stackelberg 博弈模型中的利润高于其他两种模型；在绿色水平系数的影响下，制造商在制造商 Stackelberg 博弈模型中的利润最高；然而，随着该系数的增大，零售商 Stackelberg 博弈模型下制造商的

利润将超过制造商 Stackelberg 模型；在绿色水平投入系数的影响下，制造商在零售商 Stackelberg 博弈模型下的初始利润高于制造商 Stackelberg 模型，但随着该系数的增加，制造商 Stackelberg 模型下的利润最终会实现反超。对于两个零售商而言，其在零售商 Stackelberg 博弈模型下获得的利润始终高于其他模型，因此，通过各自的领导，两个零售商都能提高自身的利润。此外还发现在三种博弈模型下，当绿色投入成本系数保持在一定区间内时，都会有分散式供应链的总利润超过集中式供应链。因此，在一定条件下，绿色投入对分散式供应链是有利的。

通过比较不同模型下的绿色水平，研究发现：在竞争价格系数的影响下，垂直纳什条件下的初始绿色水平显著高于制造商 Stackelberg 模型。然而，随着该系数的增加，制造商 Stackelberg 模型下的绿色水平最终将超过垂直纳什均衡下的水平。这一现象可解释为：在垂直纳什博弈中，制造商与零售商处于对等地位，均无主导优势，这促使双方为维持市场竞争力而维持相对较高的绿色水平。但是，随着消费者对产品绿色敏感度的提升，作为绿色成本唯一承担者的制造商在主导的 Stackelberg 模型中，具有更强的动机增加绿色投入。因此，其绿色水平得以实现反超。在绿色水平系数以及绿色水平投入系数的影响下，始终有制造商 Stackelberg 模型下的绿色水平最高。

通过对比三种博弈模型的定价与需求特征：在制造商 Stackelberg 模型中批发价格最高，零售商 Stackelberg 模型中零售价格最高，而垂直纳什博弈的零售价格最低。市场需求分析表明，分散式供应链在垂直纳什结构下达峰值(因制造商与零售商权力对等，通过协同提升绿色水平维持竞争力)；集中式供应链需求则在制造商 Stackelberg 模型中最优。值得注意的是，绿色水平系数与需求呈正向关系。原因是制造商 Stackelberg 模型下高绿色投入导致成本增加，提高分散式供应链零售价格，进而驱动需求向集中式供应链转移；而垂直纳什博弈凭借合理批发定价、较低零售价格与优质绿色水平的协同效应，有效促进了供应链市场的良性发展。

4. 结论

本文研究了不同权力结构下混合竞争供应链中定价与绿色投入决策，其中有两条关于价格竞争的供应链。一条由制造商和零售商组成的分散式供应链和一条制造商和零售商相互整合而成的集中式供应链。在此基础上提出了三个博弈论框架，以刻画制造商和零售商之间的市场权力结构，并分析推导了三种博弈情景下供应链参与者的最优行为。最后通过理论分析和数值实验说明最优行为对于各种系数的敏感性。

研究结果表明：最优价格、绿色水平以及供应链参与者利润与竞争价格系数和绿色水平系数普遍正相关，与绿色水平成本系数普遍负相关。基于均衡结果，比较了三种模型下的最优价格、绿色水平以及供应链参与者的利润，发现在制造商 Stackelberg (MS)模型中制造商设定最高批发价格，而零售商 Stackelberg (RS)模型产生最高零售价格，垂直纳什(VN)博弈则实现最低零售价格；分散式供应链的市场需求在 VN 下达到峰值，集中式供应链需求在 MS 模型中最高，这源于 VN 的权力对等结构促使双方维持高绿色水平(显著提升需求)，但 MS 模型中绿色成本推高零售价格导致需求向集中式转移；关键的是，MS 模型普遍有最高绿色水平——随着竞争价格系数增大，作为绿色成本承担者的制造商在 MS 模型下增加投入，最终反超 VN 下的绿色水平。这表明 VN 模式通过合理定价与优质绿色水平的结合，最大化了分散式供应链的市场效益，对供应链协调具有重要启示。

制造商在制造商 Stackelberg (MS)模型中始终获得竞争价格系数下的最高利润；当绿色水平系数较低时，其 MS 模型利润仍保持优势，但随着该系数增大，零售商 Stackelberg (RS)模型下的制造商利润将反超 MS 模型；在绿色水平投入系数影响下，RS 模型初期为制造商提供更高利润，但随系数增加，MS 模型最终实现逆转。对零售商而言，RS 模型始终是其利润最大化的最优选择，表明获取 Stackelberg 领导地位能有效提升零售商收益。关键发现是：当绿色投入成本系数处于特定阈值区间时，三种分散式供应链

的总利润均可能超越集中式供应链，证实适度绿色投入可增强分散式系统的竞争优势。垂直纳什下的批发价格是合理的，零售商也以较低的零售价格出售优质绿色的商品，因此，没有制造商和零售商之间的主导地位，将有利于供应链市场的繁荣发展。

从监管和政策影响的角度来看：

从供应链整体来看，在一定条件下，绿色投入可以给分散式供应链带来更大的利润，同时，集中式供应链的利润也会增加。且当绿色投入成本系数保持在一定区间时，三种博弈模型下的分散式供应链利润都大于集中式供应链。

从供应链参与者的来看，价格和利润以及产品最优绿色水平与竞争对手的价格呈正相关。与此同时，制造商和零售商都受益于消费者对绿色水平的敏感性和对产品绿色更高的要求。昂贵的投资使制造商没有动力提高产品的绿色水平，最终阻碍了供应链的盈利能力。

从社会角度来看，在垂直纳什博弈中，由于制造商与零售商权力对等，双方形成更为合理的定价机制：制造商设定适度批发价格，零售商则以较低零售价格提供高绿色水平商品。这种去中心化结构有效促进了供应链整体市场效率的提升与良性发展。

制造商由于高昂的投入成本和零售商的“搭便车”行为抑制了其绿色投入的积极性，导致产品绿色水平不能有效提高。因此在供应链成员中引入成本分摊合同以激励制造商提高绿色水平是一个相关的研究问题。其次，需求在现实中受到许多因素的影响，因此将该模型扩展到随机需求环境下的研究中也是有意义的。最后，政府补贴如何影响制造商的批发价格、绿色投入和整体供应链利润是本文未来的研究方向。

参考文献

- [1] Yao, X., Cheng, Y., Zhou, L. and Song, M. (2020) Green Efficiency Performance Analysis of the Logistics Industry in China: Based on a Kind of Machine Learning Methods. *Annals of Operations Research*, **308**, 727-752. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03763-w>
- [2] Chhabra, D. and Kr Singh, R. (2022) Analyzing Barriers to Green Logistics in Context of Circular Economy and Industry 4.0 in the Indian Manufacturing Industry. *International Journal of Logistics Research and Applications*, **27**, 1939-1952. <https://doi.org/10.1080/13675567.2022.2134847>
- [3] 鲁其辉, 朱道立. 质量与价格竞争供应链的均衡与协调策略研究[J]. 管理科学学报, 2009, 12(3): 56-64.
- [4] Feng, Q. and Liu, T. (2022) Selection Strategy and Coordination of Green Product R&D in Sustainable Competitive Supply Chain. *Sustainability*, **14**, Article No. 8884. <https://doi.org/10.3390/su14148884>
- [5] 黄甫, 宋华明, 杨慧, 等. 价格、质量与服务竞争情形下的二级供应链系统协调策略分析[J]. 中国管理科学, 2018, 26(8): 106-117.
- [6] McGuire, T.W. and Staelin, R. (1983) An Industry Equilibrium Analysis of Downstream Vertical Integration. *Marketing Science*, **2**, 161-191. <https://doi.org/10.1287/mksc.2.2.161>
- [7] Li, M., Sethi, S.P. and Zhang, J. (2014) Competing with Bandit Supply Chains. *Annals of Operations Research*, **240**, 617-640. <https://doi.org/10.1007/s10479-014-1632-4>
- [8] Zhang, J. and Chen, J. (2013) Coordination of Information Sharing in a Supply Chain. *International Journal of Production Economics*, **143**, 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.01.005>
- [9] Anderson, E.J. and Bao, Y. (2010) Price Competition with Integrated and Decentralized Supply Chains. *European Journal of Operational Research*, **200**, 227-234. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.11.049>
- [10] Gaski, J.F. and Nevin, J.R. (1985) The Differential Effects of Exercised and Unexercised Power Sources in a Marketing Channel. *Journal of Marketing Research*, **22**, 130-142. <https://doi.org/10.1177/002224378502200203>
- [11] Choi, S.C. (1991) Price Competition in a Channel Structure with a Common Retailer. *Marketing Science*, **10**, 271-296. <https://doi.org/10.1287/mksc.10.4.271>
- [12] Gao, J., Han, H., Hou, L. and Wang, H. (2016) Pricing and Effort Decisions in a Closed-Loop Supply Chain under Different Channel Power Structures. *Journal of Cleaner Production*, **112**, 2043-2057. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.066>

- [13] Zhang, R., Liu, B. and Wang, W. (2012) Pricing Decisions in a Dual Channels System with Different Power Structures. *Economic Modelling*, **29**, 523-533. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2011.08.024>
- [14] 孙嘉轶, 杨露, 张颖, 等. 考虑权力结构与股权合作的低碳闭环供应链生产决策及协调[J]. 控制与决策, 2024, 39(2): 669-679.
- [15] 范建昌, 付红, 李余辉, 等. 渠道权力结构与责任成本分担下供应链质量及协调研究[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(7): 1767-1779.

附 录

推论 1 的证明: 通过对 $W_1^N, P_1^N, P_2^N, S^N, D_1^N, D_2^N, \pi_{M1}^N, \pi_{R1}^N$ 和 π_{R2}^N 的 d 进行求偏导后, 可得如下表达式:

$$\begin{aligned}\frac{\partial W_1^N}{\partial d} &= \frac{ah[2h(1+d)(3+d)-k^2]}{(G_1)^2}, \quad \frac{\partial P_1^N}{\partial d} = \frac{2ah[2h(1+d)(3+d)-k^2]}{(G_1)^2}, \\ \frac{\partial P_2^N}{\partial d} &= \frac{2ah[2h(3+3d+d^2)-(1+d)k^2]}{(G_1)^2}, \quad \frac{\partial S^N}{\partial d} = \frac{ak[2h(1+d)(3+d)-k^2]}{(G_1)^2}, \quad \frac{\partial D_1^N}{\partial d} = \frac{ah[2h(1+d)(3+d)-k^2]}{(G_1)^2}, \\ \frac{\partial D_2^N}{\partial d} &= \frac{2ah[2h(3+3d+d^2)-(1+d)k^2]}{(G_1)^2}, \quad \frac{\partial \pi_{M1}^N}{\partial d} = -\frac{a^2h(2+d)(4h-k^2)[2h(1+d)(3+d)-k^2]}{2(-G_1)^3}, \\ \frac{\partial \pi_{R1}^N}{\partial d} &= -\frac{2a^2h^2(2+d)[2h(1+d)(3+d)-k^2]}{(-G_1)^3}, \quad \frac{\partial \pi_{R2}^N}{\partial d} = -\frac{2a^2h[(6+4d)h-k^2][2h(3+3d+d^2)-(1+d)k^2]}{(-G_1)^3}\end{aligned}$$

其中 $G_1 = 6h - k^2 - 2hd^2$, 因为有条件 $4h - k^2 > 0$ 成立, 所以有 $G_1 > 0$ 以及 $\frac{\partial W_1^N}{\partial d} > 0, \frac{\partial P_1^N}{\partial d} > 0,$

$$\frac{\partial P_2^N}{\partial d} > 0, \frac{\partial S^N}{\partial d} > 0, \frac{\partial \pi_{M1}^N}{\partial d} > 0, \frac{\partial \pi_{R1}^N}{\partial d} > 0 \text{ 和 } \frac{\partial \pi_{R2}^N}{\partial d} > 0.$$

推论 2 的证明: 通过对 $W_1^N, P_1^N, P_2^N, S^N, D_1^N, D_2^N, \pi_{M1}^N, \pi_{R1}^N$ 和 π_{R2}^N 的 k 进行求偏导后, 可得如下表达式:

$$\begin{aligned}\frac{\partial W_1^N}{\partial k} &= \frac{2ahk(2+d)}{(G_1)^2}, \quad \frac{\partial P_1^N}{\partial k} = \frac{4ahk(2+d)}{(G_1)^2}, \quad \frac{\partial P_2^N}{\partial k} = \frac{2adhk(2+d)}{(G_1)^2}, \\ \frac{\partial S^N}{\partial k} &= -\frac{a(2+d)[2h(-3+d^2)-k^2]}{2(G_1)^2}, \quad \frac{\partial D_1^N}{\partial k} = \frac{2ah(2+d)}{(G_1)^2}, \quad \frac{\partial D_2^N}{\partial k} = \frac{2adhk(2+d)}{(G_1)^2}, \\ \frac{\partial \pi_{M1}^N}{\partial k} &= -\frac{a^2hk(2+d)^2[2h(1+d^2)-k^2]}{2(-G_1)^3}, \quad \frac{\partial \pi_{R1}^N}{\partial k} = -\frac{4a^2h^2k(2+d)^2}{(-G_1)^3}, \quad \frac{\partial \pi_{R2}^N}{\partial k} = -\frac{2a^2dhk(2+d)[(6+4d)h-k^2]}{(-G_1)^3}\end{aligned}$$

其中 $G_1 = 6h - k^2 - 2hd^2$, 因为有条件 $4h - k^2 > 0$ 成立, 所以有 $G_1 > 0$ 以及 $\frac{\partial W_1^N}{\partial k} > 0, \frac{\partial P_1^N}{\partial k} > 0,$

$$\frac{\partial P_2^N}{\partial k} > 0, \frac{\partial S^N}{\partial k} > 0, \frac{\partial \pi_{R1}^N}{\partial k} > 0 \text{ 和 } \frac{\partial \pi_{R2}^N}{\partial k} > 0, \text{ 当 } 2h(1+d^2) > k^2 \text{ 时, 有 } \frac{\partial \pi_{M1}^N}{\partial k} > 0; \text{ 当 } 2h(1+d^2) \leq k^2 \text{ 时, 有 } \frac{\partial \pi_{M1}^N}{\partial k} \leq 0.$$

推论 3 的证明: 通过对 $W_1^N, P_1^N, P_2^N, S^N, D_1^N, D_2^N, \pi_{M1}^N, \pi_{R1}^N$ 和 π_{R2}^N 的 h 进行求偏导后, 可得如下表达式:

$$\begin{aligned}\frac{\partial W_1^N}{\partial h} &= -\frac{ak^2(2+d)}{(G_1)^2}, \quad \frac{\partial P_1^N}{\partial h} = -\frac{2ak^2(2+d)}{(G_1)^2}, \quad \frac{\partial P_2^N}{\partial h} = -\frac{adk^2(2+d)}{(G_1)^2}, \\ \frac{\partial S^N}{\partial h} &= \frac{a(2+d)(-3+d^2)k}{(G_1)^2}, \quad \frac{\partial D_1^N}{\partial h} = -\frac{ak^2(2+d)}{(G_1)^2}, \quad \frac{\partial D_2^N}{\partial h} = -\frac{adk^2(2+d)}{(G_1)^2}, \\ \frac{\partial \pi_{M1}^N}{\partial h} &= \frac{a^2(2+d)^2k^2[2h(1+d^2)-k^2]}{4(-G_1)^3}, \quad \frac{\partial \pi_{R1}^N}{\partial h} = \frac{2a^2hk^2(2+d)^2}{(-G_1)^3}, \quad \frac{\partial \pi_{R2}^N}{\partial h} = \frac{a^2dk^2(2+d)[(6+4d)h-k^2]}{(-G_1)^3}\end{aligned}$$

其中 $G_1 = 6h - k^2 - 2hd^2$, 因为有条件 $4h - k^2 > 0$ 成立, 所以有 $G_1 > 0$ 以及 $\frac{\partial W_1^N}{\partial h} > 0, \frac{\partial P_1^N}{\partial h} > 0,$

$\frac{\partial P_2^N}{\partial h} > 0, \frac{\partial S^N}{\partial h} > 0, \frac{\partial \pi_{R1}^N}{\partial h} > 0$ 和 $\frac{\partial \pi_{R2}^N}{\partial h} > 0$, 当 $2h(1+d^2) \geq k^2$ 时, 有 $\frac{\partial \pi_{M1}^N}{\partial h} \leq 0$; 当 $2h(1+d^2) < k^2$ 时, 有 $\frac{\partial \pi_{M1}^N}{\partial h} > 0$ 。

推论 4、推论 5、推论 6、推论 7、推论 8 和推论 9 的证明类似于推论 1、推论 2 和推论 3。