

# 基于碳限额政策的供应链减排创新决策 博弈研究

宋慧琳

贵州大学, 贵州 贵阳

收稿日期: 2022年4月27日; 录用日期: 2022年5月23日; 发布日期: 2022年5月31日

## 摘要

面对愈发严峻的全球气候局势, 供应链低碳化逐渐成为人们关注的话题与未来发展趋势。在此背景下, 本文基于供应链理论与博弈论方法, 结合碳限额与碳交易政策背景, 构建供应链减排创新决策博弈模型, 分析在集中决策与分散决策情形下供应链的低碳表现。研究发现, 集中决策在各个维度上均优于分散决策, 且低碳创新成本的大小、消费者对产品的低碳偏好程度在两种决策模型中起到不同方向的影响。

## 关键词

低碳供应链, 减排创新, 碳限额与碳交易

# Research on Innovative Decision-Making Game of Supply Chain Emission Reduction Based on Cap-and-Trade Policy

Huilin Song

Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Apr. 27<sup>th</sup>, 2022; accepted: May 23<sup>rd</sup>, 2022; published: May 31<sup>st</sup>, 2022

## Abstract

In the face of the increasingly severe global climate situation, supply chain decarbonization has gradually become a topic of concern and future development trend. In this context, based on the supply chain theory and game theory, this paper constructs a game model of supply chain innovation decision based on the background of carbon cap and carbon trading policy, and analyzes the

**low-carbon performance of both suppliers under the centralized and decentralized decision situations. It is found that the centralized decision is better than the decentralized decision in all dimensions, and the magnitude of low-carbon innovation cost and the degree of consumers' low-carbon preference for products play different directions in the two decision models.**

## Keywords

Low Carbon Supply Chain, Emission Reduction Innovation, Carbon Quota and Carbon Trading

Copyright © 2022 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

随着科技的发展与环保意识的觉醒,全球气候变化愈发成为从顶层设计到微观市场十分重视的话题,降低碳排放成为全球各国共同面对的、人类发展进程中亟待解决的重大问题。与此同时,中国在全球二氧化碳排放量中占比迅速上升,成为了碳排放增长最快的国家之一[1]。为承担起应有的大国责任、展现大国风范,我国做出了2030年碳达峰、2060年碳中和的郑重承诺。在该目标愿景下,我国严谨设计并迅速执行了碳限额政策、碳交易市场政策等一系列减排政策,为碳减排工作的顺利推进做出了重要贡献。

碳限额与碳交易政策在对制造业供应链造成碳排放约束的同时,也为其创新优化发展提供了巨大的动力。一方面,这种在政策与成本上的双重强力约束进一步明确了低碳经济与低碳供应链的发展方向与长远趋势,强调了“低消耗、低污染、低排放”的重要性,为供应链的转型升级提供了方向与指引。供应链及供应链企业为适应一系列减排政策所引导的中国经济发展方向与必经之路,必将更加重视低碳化发展,更倾向于选择碳减排策略、做出以碳减排为目的的技术创新[2]。另一方面,碳交易政策通过提供卖出剩余碳排放限额的市场,为供应链企业的减排创新决策提供了更多的盈利方式与利润空间,变相降低了创新成本,实现减排和利润的双赢[3],是供应链获取竞争优势、实现高质量创新发展的关键[4]。实证研究也证实,供应链的减排技术创新能够显著提高企业绩效,更为减排决策的广泛实施提供了可靠的数据支持[5][6]。

基于不同情形,国内外学者对供应链减排策略进行了研究与探讨。从供应链所面对的外部环境而言,主要有政府规制、政府补贴与市场偏好等研究切入点。政府规制方面,Zakeri等(2015)对碳税政策与碳限额政策进行了研究,指出碳限额与碳交易政策对供应链中制造商的减排具有积极影响[7]。Chai等(2018)等针对再制造产品进行了研究,进一步肯定了碳交易政策对供应链制造商利润的积极影响[8]。政府补贴方面,Zhao等(2016)指出,优惠税率政策与政府直接补贴都对企业的低碳创新决策具有促进作用,尤其当同时采用两种鼓励措施时,供应链的减排积极性将会大幅提高[9]。李友东等(2014)则进一步分析了政府补贴下的供应链合作减排措施,明确了供应链中各个成员的最优成本投入与政府最优补贴率[10]。市场偏好方面,Li等(2019)和王一雷等(2017)研究发现,消费者的低碳意识通过影响市场需求特征,也对制造商的减排决策与零售商的联合减排决策产生重要影响[11][12]。

从供应链内部而言,主要有成员利他偏好、公平关切与协调契约等研究方向。王冬冬等(2020)的研究表明,成员的利他偏好根据成员在供应链中身份的不同具有不同的影响,供应商的利他偏好有助于供应链积极减排,而零售商的利他偏好则仅在一定范围内具有促进减排的作用,超出该范围则会产生负面影

响[13]。赵丹、戢守峰(2020)强调了公平关切的重要作用,指出存在公平关切时,供应链中单方的减排投资会使得减排方对其他供应链成员的减排行为产生迫切需求,从而对供应链减排决策产生影响[14]。Benjaafar (2013)指出,供应链成员间的合作能够有效降低碳减排成本[15],因此在高效减排目的下的供应链协调契约与联合减排也是重要的研究方向。此外,从研究方法而言,有微分博弈、Stackelberg 博弈与演化博弈等研究方法。叶同等(2021)基于 Nash 讨价还价利润,运用微分博弈方法构建了集中决策、分散决策模型,研究了公平关切对供应链决策及协调契约的影响[16]。张令荣等(2020)研究了碳配额政策下交易路径、交易条件、减排策略与利润的影响因素,发现上下游企业之间存在减排决策的互相影响[17]。刘枚莲等(2017)从前景理论进行切入,运用演化博弈方法构建了地方政府监督下的企业低碳生产策略模型,发现了环境效益最大化的企业低碳生产条件以及影响策略收敛速度的影响因素[18]。

## 2. 问题描述与参数设定

基于以上分析,本文选择以包含单个制造商与单个零售商的供应链为研究对象,考虑碳限额与碳交易政策情形,结合消费者低碳偏好,建立政策背景下的供应链低碳创新决策动态博弈模型,分别在集中决策与分散决策情况下,分析制造商最优减排水平、零售商最优定价水平与供应链最优利润。

为规范简化模型的研究需要,本文有以下假设:

假设 1: 模型中信息完全对称,供应链中的定价信息等在上下游各成员间完全透明,消费者能够通过碳标签、宣传或其他碳排放信息获知产品的低碳水平,并据此做出选择与判断。

假设 2: 根据 D'Aspremont 和 Jacquemin (1998) [19]、王芹鹏等(2014) [20]的研究,设低碳水平为  $h$ ,为连续变量,减排创新成本  $C(h)$  是  $h$  的二次增函数,  $C(h) = \frac{1}{2}kh^2$ , 其中  $k$  为减排创新投资成本系数。

即随着减排创新水平的提高,减排投资边际效用递减。

假设 3: 碳减排技术投资为制造商的决策变量,其减排所导致的边际成本增加通过批发价与下游零售商部分共担。

假设 4: 市场需求函数同时受产品价格与产品低碳创新水平影响,参考 Zhu 和 He (2017) [21]、Ghosh 和 Shah (2015) [22]以及刘丛等(2020) [23]等文献,设置市场需求为  $Q = a - bp + \alpha h$ 。其中  $a$  为市场最大的潜在需求,  $b$  为消费者需求的价格敏感系数,  $\alpha$  表示消费者需求的低碳敏感系数,  $\alpha, \beta > 0$ 。

假设 5: 产品的边际生产成本为固定值,不随生产量、碳减排创新水平等变化。根据杨光勇和计国君(2013) [24],碳交易价格  $p_e$  外生给定。

具体参数符号说明如表 1 所示:

**Table 1.** Description of the main symbols in this article

**表 1.** 本文主要符号说明

参数符号	说明	参数类型
$c$	产品边际生产成本	
$a$	产品市场潜在最大需求	
$b$	消费者需求的价格敏感系数	
$\alpha$	消费者需求的低碳敏感系数	外生参数
$k$	减排创新投资成本系数	
$e_0$	初始单位产品碳排放量	
$G$	供应链中制造商的碳排放权配额	
$p_e$	单位碳排放权交易价格	

## Continued

$w$	单位产品批发价格	
$h$	制造商减排水平	决策变量
$p$	单位产品零售价格	
$C(h)$	$C(h) = \frac{1}{2}kh^2$ , 制造商减排创新成本函数	
$Q$	$Q = a - bp + \alpha h$ , 市场需求函数	相关函数
$\pi_R$	零售商利润	
$\pi_M$	制造商利润	
$\pi_{SC}$	供应链利润	

其中,  $w$ 、 $h$  为制造商决策函数,  $p$  为零售商决策函数。供应链集中决策的情形标记为上标  $C$ , 分散决策的情形标记为上标  $D$ 。

### 3. 供应链集中决策模型(C)

供应链集中决策模型中, 制造商与零售商为一个利益整体, 以供应链利润最大化为决策依据, 对产品低碳创新水平与零售价格做出共同决策, 即解决以下问题:

$$\max \pi_{SC}^C(h, p) = (p - c)Q - \frac{1}{2}kh^2 - p_e(e_0Q - G - h)$$

上式中, 第一项为供应链进行产品销售的单位利润, 第二项为减排创新成本, 第三项为在存在碳限额情况下所存在的碳排放权买卖成本或收益。

供应链利润函数的 Hesse 矩阵  $H = \begin{bmatrix} -2b & \alpha \\ \alpha & -k \end{bmatrix}$ , 当  $\alpha^2 - 2bk < 0$  时,  $H$  负定, 供应链利润函数是  $h$ ,  $p$  的严格凹函数。对  $\pi_{SC}^C$  求  $h$  和  $p$  的一阶偏导并令其等于零, 求解方程组得:

$$h^C = \frac{2bp_e - \alpha(b(e_0p_e + c) - a)}{2bk - \alpha^2}$$

$$p^C = \frac{\alpha p_e + k(b e_0 p_e + bc + a) - \alpha^2(e_0 p_e + c)}{2bk - \alpha^2}$$

此时, 产品的市场需求为

$$Q^C = \frac{2\alpha p_e - k(b(e_0 p_e + c) - a)}{2k}$$

### 4. 供应链分散决策模型(D)

供应链分散决策模型中, 制造商与零售商各自依据自身利润最大化, 分别对相关变量进行决策, 博弈模型为制造商领导的 Stackelberg 博弈模型。决策顺序为: 1) 制造商根据减排创新成本、碳交易成本以及生产成本, 决定批发价格  $w$  与减排创新水平  $h$ ; 2) 零售商根据制造商的决策与市场需求信息, 决定零售价格  $p$ 。采用逆向求解法, 首先对零售价格进行决策, 求解

$$\max \pi_R^D(p) = (p - w)(a - bp + \alpha h)$$

根据一阶最优条件, 得到

$$p = \frac{\alpha h + wb + a}{2b}$$

将上述公式代入制造商利润函数

$$\begin{aligned} \max \pi_M^D(h, w) &= (w - c)Q - \frac{1}{2}kh^2 - p_e(e_0Q - G - h) \\ Q &= a - bp + \alpha h \end{aligned}$$

制造商利润函数的 Hesse 矩阵  $H = \begin{bmatrix} -2b & \alpha \\ \alpha & -k \end{bmatrix}$ , 当  $\alpha^2 - 4bk < 0$  时,  $H$  负定, 制造商利润函数是  $h, w$  的严格凹函数。对  $\pi_M^D$  求  $h$  和  $w$  的一阶偏导并令其等于零, 求解方程组得:

$$\begin{aligned} h^D &= \frac{2bp_e - \alpha(b(e_0p_e + c) - a)}{2bk - 2\alpha^2} \\ w^D &= \frac{2\alpha p_e + k(be_0p_e + bc + a) - 2\alpha^2(e_0p_e + c)}{2bk - 2\alpha^2} \end{aligned}$$

则零售价格与市场需求分别为

$$\begin{aligned} p^D &= \frac{b(\alpha^2(-3e_0p_e - 3c) + 4\alpha p_e + 3ak) + b^2k(e_0p_e + c) - \alpha^2a}{4b(bk - \alpha^2)} \\ Q^D &= \frac{a - b(e_0p_e + c)}{4} \end{aligned}$$

## 5. 算例仿真分析

在以上模型分析的基础上, 参考 Benjaafar 等[15]、骆瑞玲等(2014) [25]文献, 令  $a = 100, b = 2, c = 3, p_e = 2, G = 200, e_0 = 1.5$ 。运用 Matlab 软件, 对前文所得到的各个公式进行数值仿真分析, 针对消费者需求的低碳敏感系数变化、低碳创新成本系数及二者同时变化三种情形, 分析供应链各种表现的变化。

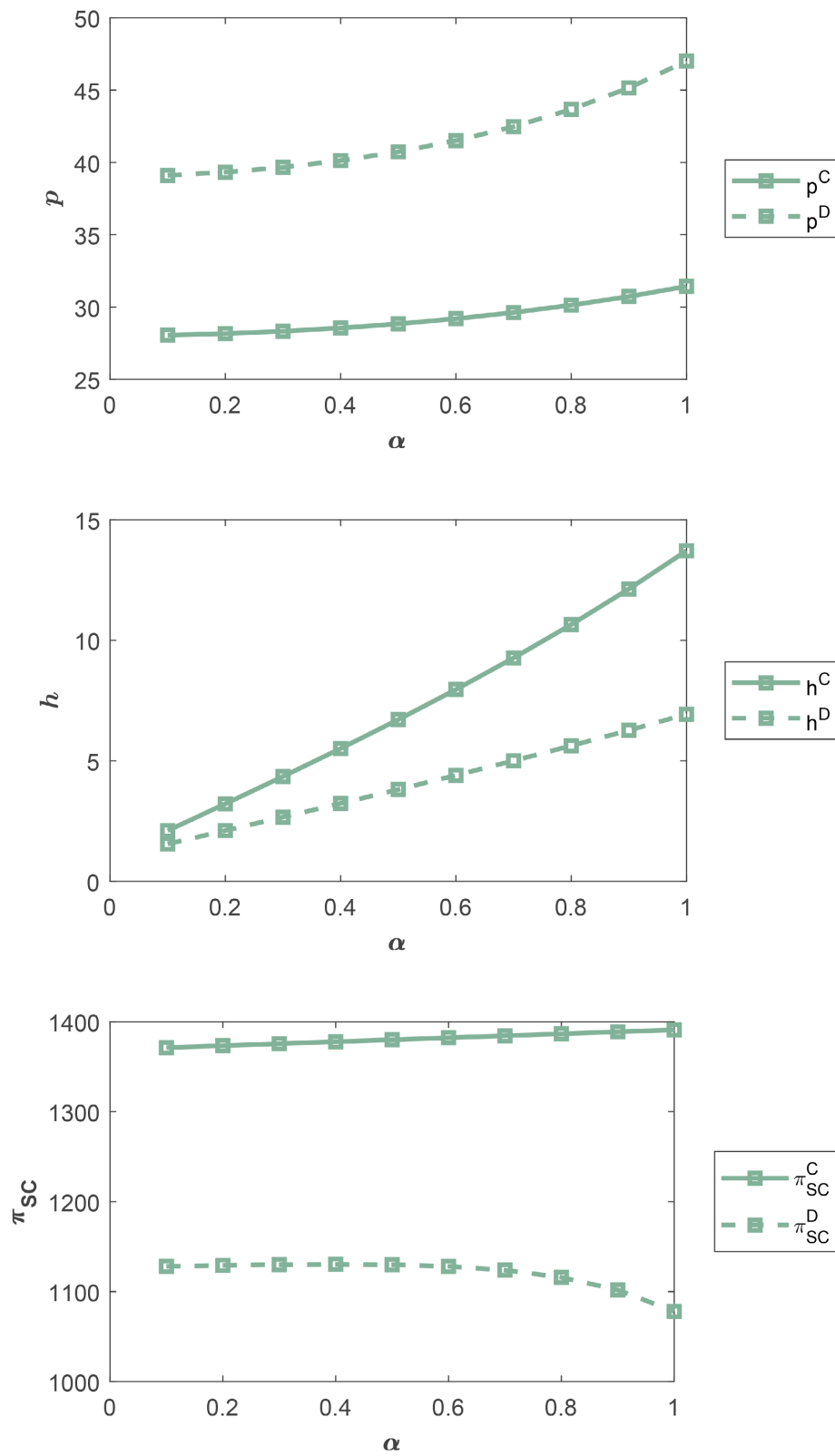
### 5.1. 低碳敏感系数变化的影响分析( $k = 2$ )

低碳敏感系数的变动反映出消费者对低碳产品的偏好, 即市场偏好的变化。本文根据前两章对集中决策模型与分散决策模型的博弈模型, 分别研究了两个模型中, 在  $k = 2$ , 其他条件不变的情况下,  $\alpha$  在  $[0.1, 1]$  范围上的变化对零售价格  $p$ 、产品低碳创新水平  $h$  以及供应链整体利润水平  $\pi_{sc}$  的影响, 并绘图如图 1 所示。具体数据如表 2。

由图 1 可以直观地看出: 1) 从单个模型自身对比来看, 两个模型中产品零售价格与产品低碳创新水平平均随着消费者需求的低碳敏感程度上升而上升, 低碳敏感程度对供应链整体利润在集中决策模型中起到积极影响, 而在分散决策模型中起到消极影响。2) 从集中决策模型与分散决策模型的对比来看, 在相同条件下, 集中决策模型价格更低、低碳水平更高、供应链利润更高, 即供应链整体表现较好, 社会效益更高, 而分散决策模型的整体表现相对较差。

### 5.2. 低碳创新成本系数变化的影响分析( $\alpha = 0.6$ )

低碳创新成本系数直接影响制造商投资低碳创新的投入产出比, 即投资效率。本文根据前两章对集中决策模型与分散决策模型的博弈模型, 分别研究了两个模型中, 在  $\alpha = 0.6$ , 其他条件不变的情况下,  $k$  在  $[0.5, 3]$  范围上的变化对零售价格  $p$ 、产品低碳创新水平  $h$  以及供应链整体利润水平  $\pi_{sc}$  的影响, 并绘图如图 2 所示。具体数据如表 3。



**Figure 1.** Influence of low carbon sensitivity coefficient changes on supply chain  
**图 1.** 低碳敏感系数变化对供应链的影响

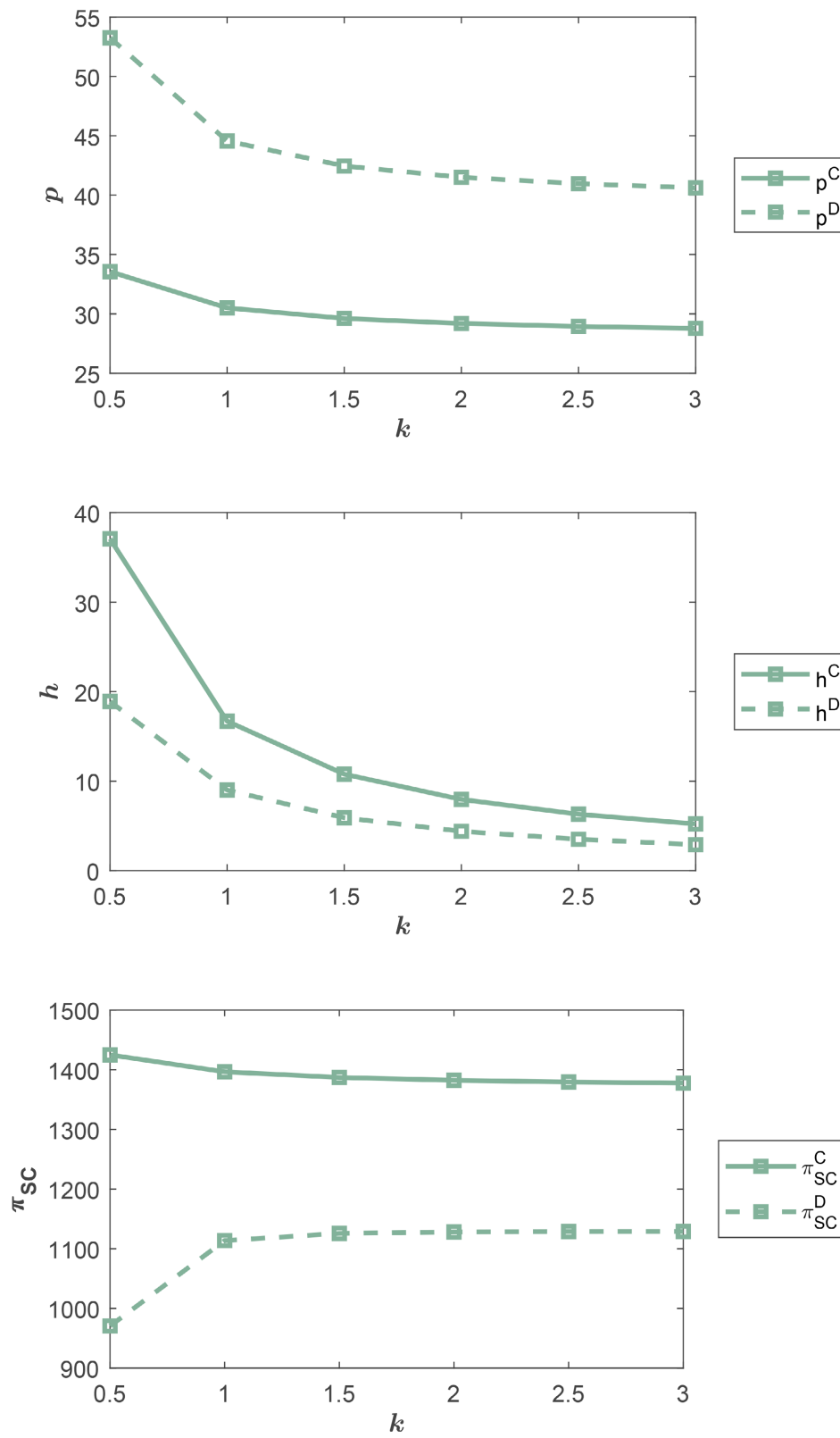


Figure 2. Influence of change of low-carbon innovation cost coefficient on supply chain

图 2. 低碳创新成本系数变化对供应链的影响

**Table 2.**  $\alpha$  changes in retail prices, low-carbon levels of products and supply  
**表 2.**  $\alpha$  变化对零售价格、产品低碳水平及供应链利润的影响

	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.2$	$\alpha = 0.3$	$\alpha = 0.4$	$\alpha = 0.5$	$\alpha = 0.6$	$\alpha = 0.7$	$\alpha = 0.8$	$\alpha = 0.9$	$\alpha = 1$
$p^C$	28.05	28.16	28.33	28.55	28.84	29.19	29.62	30.13	30.73	31.43
$p^D$	39.11	39.32	39.66	40.13	40.73	41.51	42.47	43.67	45.15	47.00
$h^C$	2.10	3.22	4.35	5.51	6.71	7.96	9.27	10.65	12.13	13.71
$h^D$	1.55	2.11	2.66	3.23	3.81	4.40	5.00	5.63	6.27	6.93
$\pi_{SC}^C$	1371.20	1373.40	1375.60	1377.80	1380.00	1382.20	1384.40	1386.60	1388.80	1391.00
$\pi_{SC}^D$	1128.09	1129.13	1129.96	1130.36	1129.93	1128.07	1123.87	1115.89	1101.84	1078.00

**Table 3.** Influence of  $k$  changes on retail price, low carbon level of products and profit of supply chain  
**表 3.**  $k$  变化对零售价格、产品低碳水平及供应链利润的影响

	$k = 0.5$	$k = 1$	$k = 1.5$	$k = 2$	$k = 2.5$	$k = 3$
$p^C$	33.56	30.51	29.62	29.19	28.95	28.78
$p^D$	53.25	44.56	42.45	41.51	40.97	40.62
$h^C$	37.07	16.70	10.78	7.96	6.31	5.22
$h^D$	18.90	9.01	5.91	4.40	3.50	2.91
$\pi_{SC}^C$	1424.80	1396.40	1386.93	1382.20	1379.36	1377.47
$\pi_{SC}^D$	970.44	1113.61	1125.58	1128.07	1128.69	1128.78

由图 2 可以直观地看出：1) 从单个模型自身对比来看，两个模型中产品零售价格与产品低碳创新水平均随着低碳创新成本系数上升而下降，低碳创新成本系数对供应链整体利润在集中决策模型中起到消极影响，而在分散决策模型中起到积极影响。2) 从集中决策模型与分散决策模型的对比来看，在相同条件下，集中决策模型价格更低、低碳水平更高、供应链利润更高，即供应链整体表现较好，社会效益更高，而分散决策模型的整体表现相对较差。3) 当低碳创新成本系数较低时，单位变化对供应链各方面的影响较为显著，而当其上升到一定水平后，供应链表现趋于稳定。

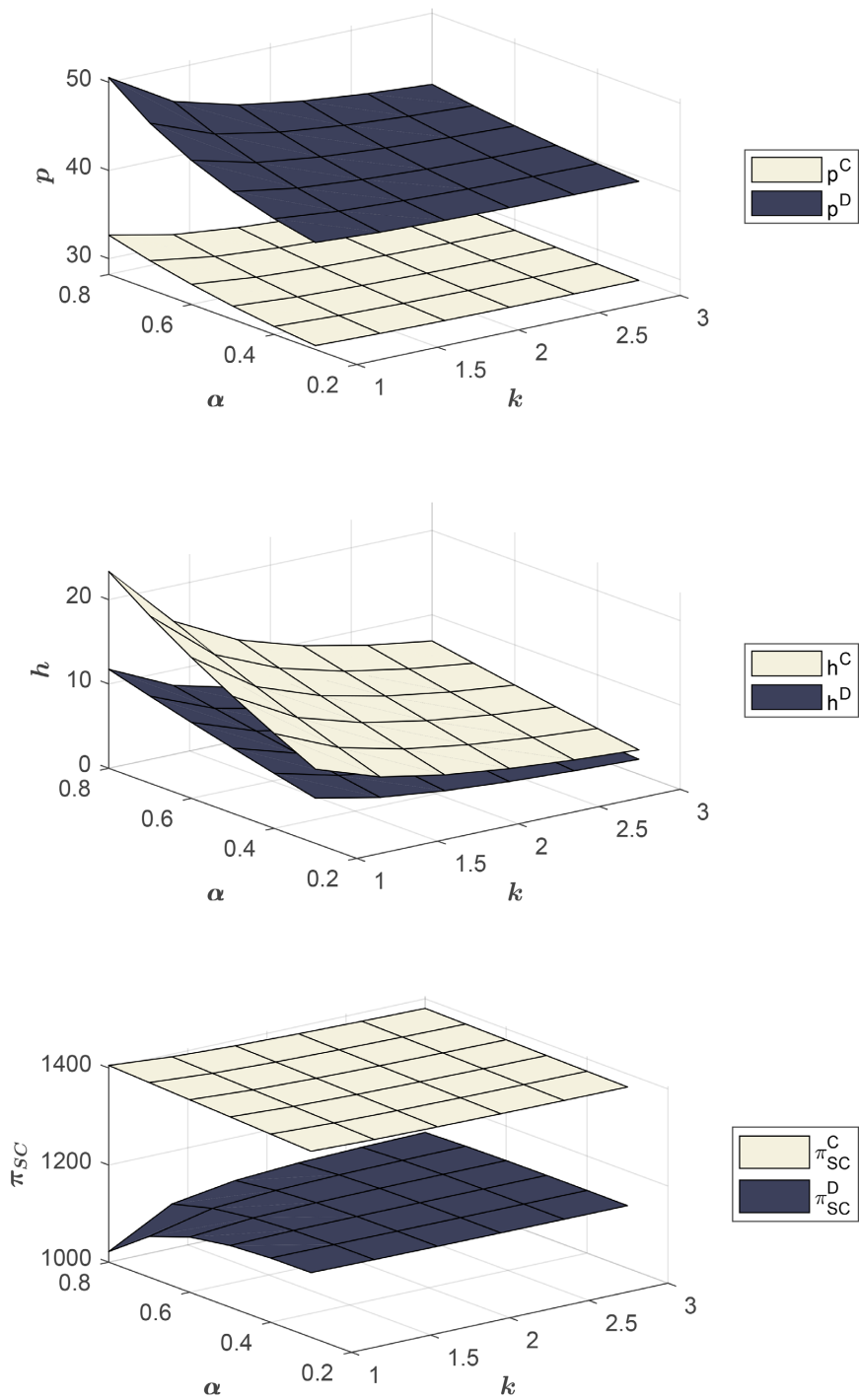
在以上分析的基础上，进一步在合理范围内令两个参数同时变化，并观察其影响，如图 3 所示。该结果进一步肯定了供应链整体决策方式的优越性与稳定性。

## 6. 结果讨论

本文针对碳限额与碳交易政策下的制造业供应链进行了研究，并在宏观政策背景下同时考虑了消费者低碳偏好的存在性，构建了制造商与零售商的动态博弈模型，研究了集中决策与分散决策两种情形，并将其进行了对比。基于公式推导，本文进一步通过参数赋值进行了数值模拟分析，通过 Matlab 软件对公式结果进行了可视化，使结果更加直观。

通过以上分析过程，本文提出以下观点与建议：在碳限额与碳交易政策背景下，集中决策在绝大多数情况下优于分散决策的供应链表现，且当低碳敏感系数与低碳创新成本系数变化时，集中决策的供应链也表现出更加稳定的特征，有助于供应链的长期发展。即在低碳化目的下，供应链的纵向一体化有助于实现供应链的优化。通过降低低碳创新成本，供应量能够表现出更高的社会责任感，尤其当低碳创新成本系数较低而低碳敏感系数较高时，二者的微小优化也能够为供应链的低碳化提供巨大的动力。





**Figure 3.** Influence of common changes of low-carbon sensitivity coefficient and low-carbon innovation cost coefficient  
**图 3.** 低碳敏感系数与低碳创新成本系数共同变化的影响

同时，本文的下一步研究方向一方面将考虑动态的碳交易价格，进一步放宽模型限制，使其更加契合现实环境。另一方面，本文的研究基于信息完全对称的市场，而将信息不对称纳入考虑也将是重要的拓展方向。

## 参考文献

- [1] 胡鞍钢, 鄢一龙, 张君忆, 高宇宁, 刘生龙. 中国碳排放趋势: 从相对减排到绝对减排(1990-2050年) [C]//清华大学国情研究中心. 国情报告第十八卷 2015年. 北京: 清华大学国情研究中心, 2017: 550-567.
- [2] 周泽辉, 张桂涛, 尹晓娜. 低碳背景下政府、企业与低碳服务提供商的演化博弈[J/OL]. 运筹与管理. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1133.G3.20220321.2019.004.html>
- [3] Bai, Q., Gong, Y., Jin, M., et al. (2019) Effects of Carbon Emission Reduction on Supply Chain Coordination with Vendor-Managed Deteriorating Product Inventory. *International Journal of Production Economics*, **208**, 83-99. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.11.008>
- [4] 邬彩霞. 中国低碳经济发展的协同效应研究[J]. 管理世界, 2021, 37(8): 105-117.
- [5] 徐建中, 贾大风, 李奉书, 王玥. 装备制造企业低碳技术创新对企业绩效的影响研究[J]. , 2018, 30(3): 82-94.
- [6] Li, F., Xu, X., Li, Z., et al. (2021) Can Low-Carbon Technological Innovation Truly Improve Enterprise Performance? The Case of Chinese Manufacturing Companies. *Journal of Cleaner Production*, **293**, Article ID: 125949. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125949>
- [7] Zakeri, I.A., Dehghanian, F., Fahimnia, B., et al. (2015) Carbon Pricing versus Emissions Trading: A Supply Chain Planning Perspective. *International Journal of Production Economics*, **164**, 197-205. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.11.012>
- [8] Chai, Q.F., Xiao, Z.D., Lai, K.H., et al. (2018) Can Carbon Cap and Trade Mechanism Be Beneficial for Remanufacturing? *International Journal of Production Economics*, **203**, 311-321. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.07.004>
- [9] Zhao, R., Zhou, X., Han, J.J. and Liu, C.L. (2016) For the Sustainable Performance of the Carbon Reduction Labeling Policies under an Evolutionary Game Simulation. *Technological Forecasting and Social Change*, **112**, 262-274. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.03.008>
- [10] 李友东, 赵道致, 夏良杰. 低碳供应链纵向减排合作下的政府补贴策略[J]. 运筹与管理, 2014, 23(4): 1-11.
- [11] Li, H., Wang, C.X., Shang, M., et al. (2019) Cooperative Decision in a Closed-Loop Supply Chain Considering Carbon Emission Reduction and Low-Carbon Promotion. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, **38**, 143-153. <https://doi.org/10.1002/ep.13092>
- [12] 王一雷, 朱庆华, 夏西强. 基于消费偏好的供应链上下游联合减排协调契约博弈模型[J]. 系统工程学报, 2017, 32(2): 188-198.
- [13] 王冬冬, 刘勇. 考虑利他偏好和碳减排努力绩效的供应链决策[J]. 工业工程与管理, 2020, 25(6): 116-125.
- [14] 赵丹, 戢守峰. 公平关切和低碳偏好下供应链减排投资策略研究[J]. 工业技术经济, 2020, 39(1): 94-104.
- [15] Benjaafar, S., Li, Y.Z. and Daskin, M. (2013) Carbon Footprint and the Management of Supply Chains: Insights from Simple Models. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **10**, 99-116. <https://doi.org/10.1109/TASE.2012.2203304>
- [16] 叶同, 关志民, 张大儒, 曲优. Nash 讨价还价公平关切下基于低碳商誉的供应链联合减排与广告的动态优化与协调[J]. 中国管理科学, 2021, 29(3): 119-132.
- [17] 张令荣, 王健, 彭博. 内外部碳配额交易路径下供应链减排决策研究[J]. 中国管理科学, 2020, 28(11): 145-154.
- [18] 刘枚莲, 李宗活, 张婕. 基于前景理论的政企低碳策略演化博弈分析[J]. 科技管理研究, 2017, 37(20): 245-253.
- [19] D'Aspremont, C. and Jacquemin, A. (1998) Cooperative and Non-Cooperative R&D in Duopoly with Spillovers. *American Economic Review*, **78**, 1133-1137.
- [20] 王芹鹏, 赵道致, 何龙飞. 供应链企业碳减排投资策略选择与行为演化研究[J]. 管理工程学报, 2014, 28(3): 181-189+180.
- [21] Zhu, W. and He, Y. (2017) Green Product Design in Supply Chains under Competition. *European Journal of Operational Research*, **258**, 165-180. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.08.053>
- [22] Ghosh, D. and Shah, J. (2015) Supply Chain Analysis under Green Sensitive Consumer Demand and Cost Sharing Contract. *International Journal of Production Economics*, **164**, 319-329. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.11.005>
- [23] 刘丛, 黄卫来, 杨超, 等. 竞争环境下制造商激励共享供应商创新的决策研究[J]. 系统工程学报, 2020, 35(1): 105-119.
- [24] 杨光勇, 计国君. 构建基于产品生命周期的低碳足迹供应链[J]. 厦门大学学报(哲学社会科学版), 2013(2): 65-74.
- [25] 骆瑞玲, 范体军, 夏海洋. 碳排放交易政策下供应链碳减排技术投资的博弈分析[J]. 中国管理科学, 2014, 22(11): 44-53.