

分类号: F272

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220720108



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 不同权力结构下考虑数字化技术的供
链定价与减排决策研究

论 文 作 者 苏丹丹

指 导 教 师 刘长义 教授

学 科 (专 业) 管理科学与工程

研 究 方 向 物流与供应链管理

论文提交日期: 2025 年 5 月 14 日

分类号: F272
密 级: 公开

单位代码: 10363
学 号: 2220720108

题 目 不同权力结构下考虑数字化技术的供应链定价与减排
决策研究

英文并列

题 目 Research on Supply Chain Pricing and Emission
Reduction Decisions Considering Digital Technologies
under Different Power Structures

学生姓名: 苏丹丹

指导教师: 刘长义 教授

专 业: 管理科学与工程

研究方向: 物流与供应链管理

论文答辩日期: 2025 年 5 月 14 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：苏丹丹

日期：2025 年 5 月 14 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：

苏丹丹

日期：2025 年 5 月 14 日

指导教师签名：

刘本武

日期：2025 年 5 月 14 日

不同权力结构下考虑数字化技术的供应链定价与减排决策研究

摘 要

随着全球气候治理的深入推进,发展低碳经济已成为各国政府与企业的核心战略。作为市场化减排工具,碳交易机制通过经济激励推动企业减排,但制造业在碳减排实践中普遍存在资金不足与技术创新能力薄弱等现实困境。因此,供应链成员之间的合作以及有效应用数字化技术,成为解决这些问题的重要途径。本文考虑由一个供应商和一个制造商组成的两级低碳供应链,依据供应链成员是否减排及减排方式的差异性构建无减排和数字化技术投入、仅进行减排技术投入、减排和数字化技术共同投入以及合作数字化减排四种决策模型,分析碳交易下数字化技术引入和减排合作策略对供应链产品定价决策、市场需求、成员利润的影响以及减排决策研究,分别探讨了供应商主导、制造商主导以及双方权力对等三种情形。

通过以上研究,本文得到以下结论:

(1) 当供应商主导时,制造商在减排技术上的投入以及供应商采用数字化技术都能提升产品的批发价格 and 市场需求,而双方的合作减排效果尤为显著。如果供应商的数字化技术投入成本较低(较高),或者双方的技术投入水平都较高(较低),那么供应链成员的合作减

排将有助于降低（提升）产品的零售价格。生产成本和减排成本系数的提高会降低供应链市场需求、供应商及制造商利润，而消费者低碳偏好的增强则会提升低碳供应链的市场需求、供应商及制造商利润。碳交易价格的上升将提高碳减排率，同时减少总碳排放量和消费者剩余。采用数字化技术后合作减排时的总碳排放量最少以及消费者剩余高于非合作减排。

（2）当制造商主导时，合作减排的单位批发价格、市场需求以及碳减排率最高，而不进行任何技术投入时单位批发价格和市场需求最低，当制造商减排技术投入成本较高（较低）时，其会降低（提升）产品零售价格。生产成本和减排成本系数的提高会降低供应链市场需求和供应商利润，而消费者低碳偏好的增强则会提升低碳供应链的市场需求和供应商利润。碳交易价格的上升将提高碳减排率，同时减少总碳排放量和消费者剩余。采用数字化技术后合作减排时的总碳排放量最少以及消费者剩余高于非合作减排。

（3）当双方权力对等时，合作减排的批发价格和市场需求高于非合作减排，相较于无额外减排技术投入情形，当制造商减排技术投入成本较高（较低）时，其会降低（提升）产品零售价格。生产成本和减排成本系数的提高会降低供应链市场需求和供应商利润，而消费者低碳偏好的增强则会提升低碳供应链的市场需求和供应商利润。碳交易价格的上升将提高碳减排率，同时减少总碳排放量和消费者剩余。采用数字化技术后合作减排时的总碳排放量最少以及消费者剩余高于非合作减排。此外，无论是否合作减排，供应商主导时供应商利润

最高，制造商利润最低。

关键词：低碳供应链，数字化技术，碳交易政策，定价决策，碳减排

RESEARCH ON SUPPLY CHAIN PRICING AND EMISSION REDUCTION DECISIONS CONSIDERING DIGITAL TECHNOLOGIES UNDER DIFFERENT POWER STRUCTURES

ABSTRACT

With the deepening of global climate governance, the development of a low-carbon economy has become a core strategy for governments and enterprises worldwide. As a market-based emission reduction tool, the carbon trading mechanism incentivizes enterprises to reduce emissions through economic means. However, the manufacturing sector faces practical challenges such as insufficient funding and weak technological innovation capabilities in carbon reduction practices. Therefore, collaboration among supply chain members and the effective application of digital technologies have emerged as crucial solutions to these issues. This paper examines a two-tier low-carbon supply chain consisting of one supplier and one manufacturer. Based on whether supply chain members engage in emission reduction and the differences in their reduction

approaches, four decision-making models are constructed: no emission reduction and no digital technology investment, only the manufacturer invests in emission reduction technology, the supplier adopts digital technology while the manufacturer invests in emission reduction technology, and collaborative digital emission reduction. The study analyzes the impact of introducing digital technologies and collaborative emission reduction strategies under carbon trading on product pricing decisions, market demand, and member profits within the supply chain, as well as emission reduction decision-making. Three scenarios are explored: supplier dominance, manufacturer dominance, and equal power between both parties.

The following conclusions are drawn from this research:

(1) When the supplier is dominant, the manufacturer's investment in carbon reduction technologies and the supplier's investment in digital technologies can both enhance the wholesale price and market demand for products, with the effects of their cooperative carbon reduction being particularly significant. If the supplier's digital technology investment costs are low (or high), or if both parties have high (or low) levels of technology investment, then the cooperative carbon reduction among supply chain members will help lower (or raise) the retail price of the product. The scale coefficients of unit production costs and carbon reduction costs inversely affect the market demand for low-carbon supply chains, as well as the

profits of both suppliers and manufacturers, while consumers' preference for low-carbon products positively influences the market demand for low-carbon supply chains and the profits of both suppliers and manufacturers. Regardless of whether supply chain members actively engage in carbon reduction, the carbon reduction rate increases with the rise in carbon trading prices, leading to a decrease in total carbon emissions and consumer surplus. The total carbon emissions during cooperative carbon reduction with digital technology are the lowest, and consumer surplus is higher than that of non-cooperative carbon reduction.

(2) When the manufacturer is dominant, the unit wholesale price, market demand, and carbon reduction rate during cooperative reduction are the highest, while the unit wholesale price and market demand are the lowest when no technology investment is made. If the manufacturer's investment costs in carbon reduction technologies are high, it will reduce the retail price of the product; conversely, it will raise the retail price if the costs are low. The scale coefficients of unit production costs and carbon reduction costs inversely affect the market demand for low-carbon supply chains and the profits of suppliers, while consumers' preference for low-carbon products positively influences the market demand for low-carbon supply chains and the profits of suppliers. Regardless of whether supply chain members actively engage in carbon reduction, the carbon reduction rate increases with the rise in carbon trading prices, resulting in a decrease

in total carbon emissions and consumer surplus. The total carbon emissions during cooperative carbon reduction with digital technology are the lowest, and consumer surplus is higher than that of non-cooperative carbon reduction.

(3) When both parties have equal power, the wholesale price and market demand during cooperative carbon reduction are higher than those during non-cooperative carbon reduction. Compared to the scenario without additional carbon reduction technology investment, if the manufacturer's investment costs in carbon reduction technologies are high, it will reduce the retail price of the product; conversely, it will raise the retail price if the costs are low. The scale coefficients of unit production costs and carbon reduction costs inversely affect the market demand for low-carbon supply chains and the profits of suppliers, while consumers' preference for low-carbon products positively influences the market demand for low-carbon supply chains and the profits of suppliers. Regardless of whether supply chain members actively engage in carbon reduction, the carbon reduction rate increases with the rise in carbon trading prices, leading to a decrease in total carbon emissions and consumer surplus. The total carbon emissions during cooperative carbon reduction with digital technology are the lowest, and consumer surplus is higher than that of non-cooperative carbon reduction. Furthermore, regardless of whether collaborative emission reductions are undertaken,

when suppliers are in a dominant position, the suppliers achieve the highest profits while manufacturers experience the lowest profits.

Author: Dandan Su (Management science and engineering)

Supervised by: Professor Changyi Liu

KEY WORDS: low-carbon supply chain, digital technology, carbon trading policy, pricing decisions; carbon reduction

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	IV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究意义.....	3
1.2.1 理论意义.....	3
1.2.2 现实意义.....	3
1.3 国内外研究现状.....	4
1.3.1 碳交易政策下供应链减排决策.....	4
1.3.2 数字化技术对供应链减排赋能机理研究.....	5
1.3.3 供应链减排合作模式.....	5
1.3.4 研究现状评述.....	6
1.4 研究内容与组织结构图.....	7
1.4.1 研究内容.....	7
1.4.2 组织结构图.....	8
1.5 研究方法与创新点.....	9
1.5.1 研究方法.....	9
1.5.2 创新点.....	9
第 2 章 相关理论基础.....	11
2.1 低碳供应链.....	11
2.1.1 低碳供应链的概念.....	11
2.1.2 低碳供应链结构.....	12
2.2 数字化技术.....	13
2.2.1 数字化技术的概念.....	13
2.2.2 数字化技术应用.....	14

2.3 博弈论.....	15
2.3.1 博弈论的概念.....	15
2.3.2 Stackelberg 博弈.....	16
第 3 章 供应商主导下考虑数字化技术的供应链定价与减排决策研究.....	17
3.1 问题描述.....	17
3.1.1 相关假设.....	18
3.1.2 模型符号.....	19
3.2 模型构建.....	20
3.2.1 无减排和数字化技术投入—— SN 模型.....	20
3.2.2 仅进行减排技术投入—— SO 模型.....	20
3.2.3 减排和数字化技术共同投入—— SD 模型.....	21
3.2.4 合作数字化减排—— SC 模型.....	21
3.3 结果分析.....	22
3.3.1 供应链成员减排方式和合作策略对最优决策和利润的影响.....	22
3.3.2 敏感性分析.....	25
3.4 数值仿真分析.....	27
3.4.1 供应链成员减排方式和合作策略对利润的影响.....	27
3.4.2 碳交易价格对产品价格和需求的影响.....	29
3.4.3 碳交易价格对碳减排率和总碳排放量的影响.....	30
3.4.4 碳交易价格对消费者剩余和社会总福利的影响.....	31
3.5 本章小结.....	32
第 4 章 制造商主导下考虑数字化技术的供应链定价与减排决策研究.....	34
4.1 模型构建.....	34
4.1.1 无减排和数字化技术投入—— MN 模型.....	34
4.1.2 仅进行减排技术投入—— MO 模型.....	34
4.1.3 减排和数字化技术共同投入—— MD 模型.....	35
4.1.4 合作数字化减排—— MC 模型.....	35
4.2 结果分析.....	36
4.2.1 供应链成员减排方式和合作策略对最优决策和利润的影响.....	36

4.2.2 敏感性分析.....	38
4.3 数值仿真分析.....	41
4.3.1 供应链成员减排方式和合作策略对利润的影响.....	41
4.3.2 碳交易价格对产品价格和需求的影响.....	42
4.3.3 碳交易价格对碳减排率和总碳排放量的影响.....	44
4.3.4 碳交易价格对消费者剩余和社会总福利的影响.....	45
4.4 本章小结.....	46
第 5 章 双方权力对等下考虑数字化技术的供应链定价与减排决策研究.....	47
5.1 模型构建.....	47
5.1.1 无减排和数字化技术投入—— <i>BN</i> 模型	47
5.1.2 仅进行减排技术投入—— <i>BO</i> 模型	47
5.1.3 减排和数字化技术共同投入—— <i>BD</i> 模型	48
5.1.4 合作数字化减排—— <i>BC</i> 模型	48
5.2 结果分析.....	49
5.2.1 供应链成员减排方式和合作策略对最优决策和利润的影响.....	49
5.2.2 敏感性分析.....	51
5.3 数值仿真分析.....	55
5.3.1 供应链成员减排方式和合作策略对利润的影响.....	55
5.3.2 碳交易价格对产品价格和需求的影响.....	56
5.3.3 碳交易价格对碳减排率和总碳排放量的影响.....	57
5.3.4 碳交易价格对消费者剩余和社会总福利的影响.....	58
5.4 本章小结.....	59
第 6 章 不同权力结构下最优决策和利润对比.....	61
6.1 产品批发价格.....	61
6.2 产品零售价格.....	62
6.3 市场需求.....	62
6.4 碳减排率.....	63
6.5 数字化水平.....	64
6.6 供应商利润.....	64

6.7 制造商利润.....	65
6.8 数值仿真分析.....	65
6.9 本章小结.....	67
第 7 章 结论与展望.....	68
7.1 结论.....	68
7.2 研究展望.....	69
参考文献.....	70
附 录.....	77
攻读硕士学位期间发表或录用的学术论文.....	86
致谢.....	87

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

随着全球气候治理进程持续推进，国际社会对气候变化问题的关注度持续提高^[1]。1992 年，联合国政府间气候变化专门委员会通过《联合国气候变化框架条约》，1997 年，通过《京都议定书》，提出将市场机制作为解决温室气体减排问题的新路径^[2,3]。2016 年，联合国 178 个成员国签署《巴黎协定》，确立了把全球气温上升控制在工业化前水平之上 2℃ 以内，力争 1.5℃ 以内的核心目标^[4,6]。中国作为一个负责任的大国，主动倡导并遵守以上条款的重要规定。2020 年，中国在第 75 届联合国大会上郑重承诺“双碳”目标，即实现碳达峰、碳中和，为全球低碳发展注入强大信心和动力^[5,6]。次年 9 月，中共中央、国务院印发《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》，明确提出“双碳”目标的总体要求、主要目标和路径^[6]。

“双碳”战略的制定既是中国实现可持续发展的内在需求，也是践行人类命运共同体理念的重要体现，其核心在于统筹经济发展与减排目标的协同推进。自“十一五”规划以来，节能减排已成为我国政府常态化工作的重要内容，但在实践过程中仍面临诸多挑战。当前，碳减排目标已被纳入全球主要国家发展计划中^[7,8]。为此，许多国家和地区出台了监管政策来减少碳排放量，包括碳税、碳补贴、碳配额和碳交易等；其中，碳交易政策是通过政府法规和市场运行的双重机制来限制二氧化碳的排放，被证明是实现碳排放目标最有效的政策之一^[9]。碳交易政策增加了高碳排放和高能耗企业的管理成本，促使这些企业寻求更低碳的生产方式，从源头上减少碳排放，以实现可持续发展。同时，企业可通过出售剩余的碳配额获得额外收益，促进资源优化配置。欧盟于 2005 年率先建立了碳交易市场；作为全球最大的发展中国家，中国于 2011 年已在七个省市推出了碳排放权交易试点项目，并于同年建立了全球规模最大的碳交易体系，2024 年实施了《碳排放权交易管理暂行条例》；这些证明碳交易政策的实施为经济低碳转型提供了有效

路径。低碳供应链通过优化生产流程和物流体系，减少资源消耗与浪费。企业采用节能技术和环保材料，在降低能耗与排放的同时，实现运营成本下降和经济效益提升，既契合国家减排政策导向，又增强市场竞争力。

目前，新兴数字化技术（如物联网、大数据、云计算、人工智能和区块链等）的应用提升了碳交易市场效率，同时革新了供应链运营模式，为供应链成员提供了重要的减排技术支撑^[10]。但是，碳交易市场实践中存在着数据造假、虚假交易、交易成本与风险高、监管透明度不足、核查成本高及安全风险等问题^[11]，导致消费者难以识别产品碳足迹信息，降低了对低碳产品的信任度，进而影响企业减排动力。首先，数字化技术通过对碳市场数据的深度分析，可以识别异常交易行为，帮助监管部门及时发现问题，增强消费者对低碳产品及其信息的信任，提升消费者对低碳产品的信任度和需求，如英国气候变化委员会利用数据分析技术监控碳市场，通过深度分析碳交易数据，促进低碳产品的需求增长；其次，数字化技术具有智能化、透明化、连接化等特点^[10]，有效提升交易双方的信任程度、规避企业间的交易风险、降低交易成本，推动企业之间的交易与合作，如沃尔玛利用区块链技术追踪食品来源，通过提高交易的透明度和可追溯性，增强了供应商和消费者之间的信任，降低了交易风险和成本，推动了企业间的合作；最后，数字化技术为实现产品信息透明、可溯源、质量保证提供了新兴的解决方案^[12,13]，改变了供应链企业内部和链上企业间的业务流程和管理方式，有利于促进供应链成员的联合减排，如 IBM 和沃尔玛合作开发的 Food Trust 区块链平台帮助企业实时追踪食品来源以确保产品质量，并促进供应链成员之间的联合减排合作。

虽然数字化技术能够带来上述好处，但企业是否应用数字化技术很大程度上也取决于供应链其他成员的决策。例如，沃尔沃是否应用数字化技术也取决于供应商 IBM 的决策，若 IBM 不投入数字化技术，沃尔沃是否会产生益处；若 IBM 投入数字化技术及政府制定的碳交易政策如何影响沃尔沃减排合作决策？本文构建了碳交易政策下由一个供应商和一个制造商组成的低碳供应链，分析单位生产成本、单位碳交易价格以及碳减排投资成本系数等因素对供应链定价与减排决策的影响机制，通过分析数字化技术应用与碳交易政策对协同减排的促进作用，提出供应链最优技术采纳与合作策略。同时，鉴于供应链成员间权力结构的差异性，本文深入探讨了不同主导模式下决策行为对减排效果的差异化影响。本文研

究旨在为碳交易政策下供应链的数字化技术应用及减排合作策略选择提供理论依据及决策参考。

1.2 研究意义

1.2.1 理论意义

在研究供应链减排合作方面,学者们大都没有考虑合作主体间的信息传递以及碳排放量等信息的披露。供应商与制造商之间彼此难以完全信任,合作的成本较高,且市场鱼龙混杂,虚假营销层出不穷,消费者难以识别低碳产品。数字化带来的新兴的合作模式,为上述问题的解决带来了新思路。此外,在供应链减排决策方面,现有文献多聚焦于碳交易制度下供应链减排决策与供应链优化问题,但对数字化技术的影响探讨不足,在一定程度上丰富了供应链减排合作领域的研究成果。本文进一步分析了不同供应链权力结构下的博弈情况,通过建立多种模型获得了不同博弈情形的最优解,通过各模式均衡结果的横向对比得出一般性的管理启示,探讨碳交易价格对企业运营决策和消费者剩余的影响程度,丰富低碳供应链理论。

1.2.2 现实意义

碳交易政策的实施能够帮助企业实现提高经济效益和减少碳排放量的双重目标,但目前我国碳交易市场的碳价格普遍较低,对供应链企业碳减排的作用效果还不明显,在此基础上引入数字化技术,能够使供应链做出更优的碳减排决策。此外,供应链成员之间可以展开碳减排合作,为政府优化“双碳”目标的规制政策体系贡献有益思路。考虑到供应链中不同权力结构的存在,供应商与制造商之间的实力和地位差异可能会影响其决策的有效性。在此背景下,研究数字化技术如何在不同权力结构下优化供应链的定价与减排决策,能够帮助相关企业设计更具针对性的策略,实现利益均衡,推动供应链可持续发展。碳交易下考虑数字化技术的供应链定价与减排决策研究,既为企业运营提供实践指引,也为政府政策制定提供理论支撑,有助于推进可持续发展目标的达成。

1.3 国内外研究现状

本文将从碳交易政策下供应链减排决策、数字化技术对供应链减排赋能机理研究、供应链减排合作模式三个方面对与本文研究相关的国内外研究现状进行阐述。

1.3.1 碳交易政策下供应链减排决策

碳排放控制作为全球环境治理的核心议题，其紧迫性日益凸显。碳交易机制已被证实是有效的减排政策工具，相关研究主要从两个方面探讨其对供应链减排的影响。

一是碳交易政策下供应链自身因素对运营决策的研究。秦立公等^[14]研究发现协同集中决策下碳减排量更高，更接近碳减排的帕累托最优。Ji 等^[15]研究碳排放量与碳交易政策的关系，发现宽松型碳政策虽会提升供应链碳排放量，但能够带来更大的社会福利。石平等^[16]发现双向合作模式可使低碳供应链实现利润最大化，但同时也导致更高的碳排放量，并且供应链整体利润和碳排放总量均与互惠系数无关。王文宾等^[17]分析认为制造商较零售商订购大数据服务时，碳减排量较高。张川等^[18]提出不同融资模式下，减排投资成本系数的增加会导致制造商的碳减排量减少。

二是碳交易政策下供应链运营决策研究。邹清明等^[19]研究了由公平关切制造商和公平关切零售商组成的低碳供应链，发现零售商公平关切对制造商利润有负向影响。邹浩等^[20]在考虑公平关切的基础上，碳交易政策会提高产品售价，同时激励企业加大减排投入力度。Kuiti 等^[21]研究销售互补绿色产品的制造商和零售商，发现在高交易价格的情况下，制造商被激励改进其产品供应，消费者更加受益。朱晨等^[22]探讨了碳交易与碳税双重政策下制造商、再制造商及零售商的联合减排策略。Xia 等^[23]分析不同生产模式下碳交易对低碳供应链的影响，发现制造商只生产低碳产品时，碳交易机制能够提高低碳产品的市场需求。Zhang 等^[24]证实碳交易与绿色信贷能够协同促进企业绿色技术创新。Cai 等^[25]指出合理的政策上限设定有助于供应链可持续发展。Liu 等^[26]通过对比分析发现，供应链联合减排模式较单一主体减排能够实现更高的减排效率。此外，学者们还探讨了碳交易

下消费者偏好^[27]、过度自信^[28]以及技术投资^[29]等因素对供应链减排决策的影响机制。

1.3.2 数字化技术对供应链减排赋能机理研究

“数字化技术在促进供应链减排方面发挥着重要作用”已成为学界广泛共识，其内在的赋能机理研究从定性的框架性分析逐渐向定量的精细化刻画转变^[30]。在框架性研究方面，李勇建等^[31]分析了数字化技术对供应链管理功能和流程的影响，系统分析了人工智能、云计算及区块链等技术在提升供应链透明度、实现智能制造、保障物流安全、优化销售平台及完善治理体系等方面的应用价值与潜在风险，同时重点探讨了区块链技术在促进信息共享、强化溯源能力及构建信任机制三个维度对供应链管理的赋能路径。陈晓红等^[32]分析了数字化技术对减排信息监管和共享的影响，指出利用互联网、信息化和数字化等新技术，在实现节能减排的同时降低成本并创造收益，是企业提升竞争力、实现绿色运营和高质量发展的关键所在。Yang 等^[33]分析了数字技术资源配置的影响。宋华等^[34]研究了数字化技术在供应链碳减排中的应用机理及其独特价值。学者们从各维度与传统供应链减排进行比较，以揭示数字化对供应链减排的赋能机理。在微观运营方面，林强等^[35]将区块链技术引入低碳供应链决策模型，分析了不同激励契约下制造商采用区块链对减排效果的影响。Camel 等^[36]研究发现区块链技术与绿色产品平台整合有利于减少农业食品部门的碳足迹。Wang 等^[37]研究发现无论是否采用区块链，较高的单位区块链成本会导致较低的总碳排放量。Wang 等^[38]分析了数字贸易和碳排放，还涵盖了产业集聚和碳排放交易机制对数字贸易以及碳减排影响的作用。Belhadi 等^[39]探讨了数据驱动的数字转型有利于实现供应链碳中和。

1.3.3 供应链减排合作模式

供应链上下游企业间的合作减排能够优化决策并提升绩效。减排合作主要分为纵向与横向两种模式，其中纵向合作通常采用成本分担和收益共享机制。王道平等^[40]构建了政府参与下的制造商-零售商微分博弈模型，探讨了减排、促销及补贴策略的优化问题。潘晨等^[41]研究发现在绿色供应链中，当零售商承担较低比例减排成本时，制造商可实现最优减排效果。Yang 等^[42]发现在预售规模较大的

情况下,采用成本分担合同的影响更为显著,并且能提高零售商的利润。林强等^[35]在低碳供应链中引入区块链技术,发现在收益共享契约下实施区块链后的产品批发价格小于未实施区块链的情况。在横向合作减排模式方面,学者们取得了显著成果。刘名武等^[43]通过对比零售商分散决策与合作决策下的成本与碳排放,证明横向合作能够实现成本节约与碳排放减少的双重目标。卓四清和韩雪^[44]构建了包含单一制造商和双竞争零售商的低碳供应链微分博弈模型,系统研究了集中决策、横向合作、纵向合作及分散决策四种情境下的动态优化策略。唐金环等^[45]建立了双制造商-双零售商两级可持续供应链模型,对比分析了纵向合作、横向合作及混合收益共享三种模式对减排效率、社会责任、定价策略及利润分配的影响机制。Ouardighi 等^[46]采用两阶段博弈方法,深入探讨了横向与纵向竞争对供应链污染累积效应的动态影响。

1.3.4 研究现状评述

通过梳理以上相关文献可知,现有文献在碳交易政策下的供应链减排决策、数字技术赋能机制及合作模式等方面已取得显著进展,但仍存在以下研究空间,主要体现在以下三个方面:

(1) 关于碳交易政策下的供应链减排决策研究,学者们多关注碳定价、供应链结构、社会福利及消费者偏好等传统因素对企业减排策略的影响,却较少探讨数字化技术在优化减排决策中的作用。本文将重点分析数字化技术如何提升供应链对碳市场的动态响应能力,从而提高减排效率。

(2) 现有数字化技术赋能研究多停留在理论框架层面,缺乏对其在减排决策中具体应用的深入分析。本研究不仅考察数字化技术在实时监测与数据分析中的功能,还将探讨其如何协助企业应对碳交易政策挑战,实现更优减排效果。同时,本文也将弥补现有研究在数字化技术促进企业间减排合作方面的不足。

(3) 针对供应链减排合作模式,现有文献主要聚焦上下游企业的纵向协作。本文将在此基础上,结合碳交易政策背景,深入分析纵向合作的优势。同时,鉴于数字平台对横向合作的重要作用,本研究将探讨如何利用数字化技术构建高效的减排合作模式,并考虑不同权力结构下的决策差异。

1.4 研究内容与组织结构图

1.4.1 研究内容

本文构建了一个由供应商和制造商组成的低碳供应链，考虑到数字化技术的应用对供应链减排效率与运营效率的促进作用，但需供应链成员投入较高的固定成本，进而承担较大的运营风险。同时，考虑政府的碳交易机制和减排技术的高投入特征，供应链成员在减排和数字技术应用方面均面临着是否应投入的决策。鉴于此，本文依据供应链成员是否减排及减排方式的差异性，构建无碳减排和数字化技术投入、仅有碳减排技术投入、碳减排和数字化技术共同投入、合作数字化碳减排四种供应链决策模型，分别研究了供应商主导、制造商主导以及双方权力对等时的产品定价和减排决策问题，探讨数字化技术和碳交易机制对供应链合作减排策略的影响，进而提出供应链最优数字化技术应用及减排合作策略选择提供理论依据及决策参考。主要研究内容分为以下六章：

第一章：绪论。本章阐述碳交易政策、数字技术应用及供应链减排的研究背景，明确研究意义，系统评述相关研究，介绍研究方法、内容框架及技术路线，并归纳研究创新点。

第二章：相关理论基础，本章概述低碳供应链理论、数字技术实践应用及博弈论基础，为后续研究提供理论支撑。

第三章：供应商主导下考虑数字化技术的供应链定价与减排决策研究。本章研究由一个供应商和一个制造商组成的两级供应链，分别建立四种决策模型：无减排与数字化技术投入、仅减排投入、减排与数字化技术共同投入、合作数字化减排。比较各模式下的最优决策与利润，分析生产成本、碳交易价格及减排成本系数对决策的影响，探讨数字化技术与碳交易政策对供应链合作减排策略的作用。

第四章：制造商主导下考虑数字化技术的供应链定价与减排决策研究。本章以第三章的研究结果为基础，考虑制造商为领导者，供应商为追随者，并探讨数字化技术与碳交易政策对供应链合作减排策略的作用。

第五章：双方权力对等下考虑数字化技术的供应链定价与减排决策研究。本章构建的模型同前两章相同，其中制造商和供应商处于平等地位，并探讨数字化技术与碳交易政策对供应链合作减排策略的作用。

第六章：不同权力结构下的最优决策和利润对比。本章根据前三章的最优决策和利润进行对比分析，探讨不同权力结构下对供应链定价和利润的影响。

第七章：结论与展望。对本文的研究得出的结论进行总结，得出相关的管理启示。并且指出本文研究的不足之处，对未来的研究进行展望。

1.4.2 组织结构图

本文的组织结构图如图 1-1 所示：

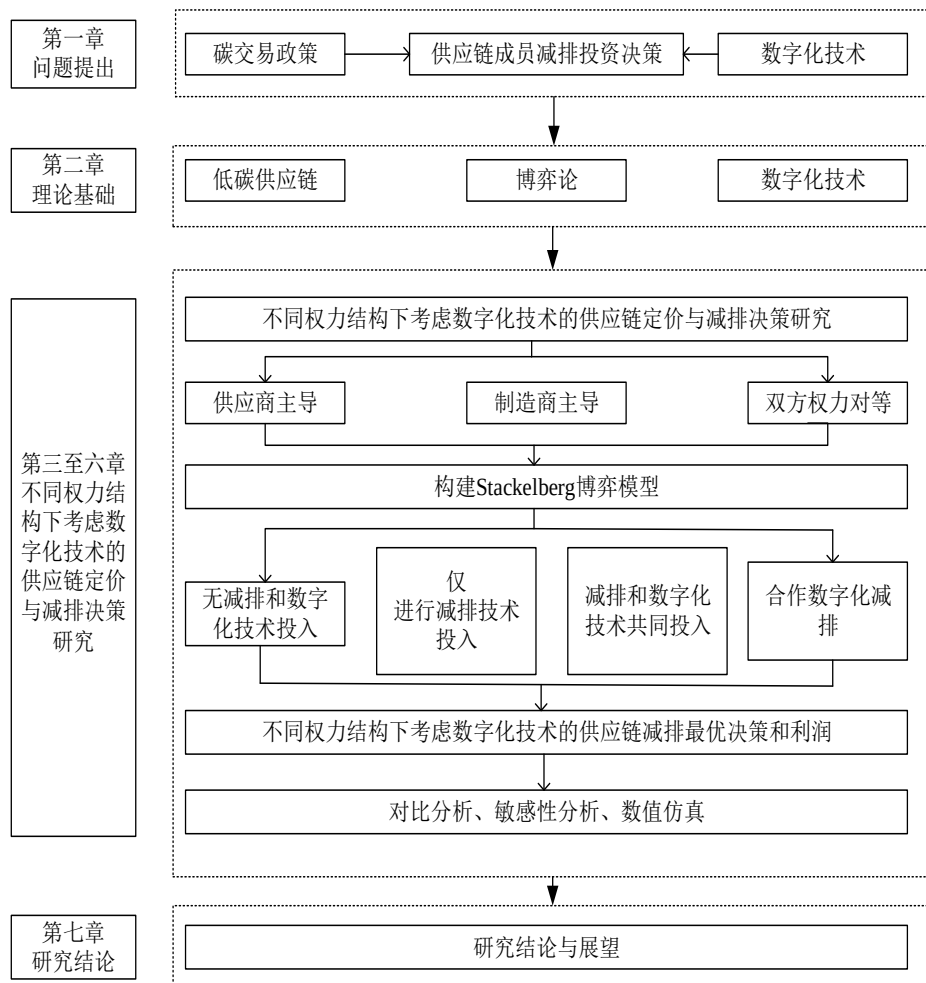


图 1-1 组织结构图

1.5 研究方法与创新点

1.5.1 研究方法

(1) 文献研究法：系统搜集并分析了国内外学者在碳交易机制下的供应链减排策略、数字技术赋能减排机制以及供应链协同减排模式等领域的研究成果，了解相关领域研究现状，对研究成果进行归纳和总结，找出研究领域可能存在可以进一步深入探究的空间，进而为本文研究指明方向。

(2) 博弈理论：将低碳供应链运作管理过程各因素量化处理，构建供应链成员有无采用减排技术、数字化技术及合作减排的理论模型，建立不同供应商和制造商主体的利润函数，运用博弈论的相关原理，对供应链各个主体的最优决策和利润进行分析和比较。

(3) 对比分析法：在碳交易政策下考虑数字化技术和合作减排的不同情形下，通过比较不同决策模型下供应链成员最优均衡解、利润等，为低碳供应链的数字化技术使用及减排合作策略提供理论依据。

(4) 数值仿真法：运用 Mathematic, Origin, Matlab 等相关软件对论文模型中的关键参数进行数值仿真，并作图，以更好地分析命题中的主要结果，从而验证结论的科学性以及正确性。

1.5.2 创新点

(1) 在数字化技术对供应链减排决策的研究中，目前的文献主要聚焦于碳交易政策下的减排与定价决策，如何在碳市场中优化定价策略以及评估碳配额的影响。然而，对于数字化技术如何与多种减排模式相结合，以实现更全面的减排效果的综合分析仍然不足。

(2) 针对不同减排合作模式的供应链决策问题，现有研究尚未深入探讨数字技术如何驱动多元主体在复杂供应链中进行合作减排的作用机理，也缺少对合作动机的识别与合作行为的提炼研究。本课题将关注更贴近现实情况的合作减排模式。

(3) 目前的供应链减排决策研究中，对供应商领导下的供应链成员决策问

题展开的研究较多,但关于权力对等下的供应链和制造商领导下的供应链展开的研究较少。

第 2 章 相关理论基础

2.1 低碳供应链

2.1.1 低碳供应链的概念

自 2003 年“低碳供应链”概念提出以来，该领域研究备受学界关注。相较于传统供应链，低碳供应链在运营中嵌入了环保理念与可持续发展思维。在政府环保规制与消费者绿色需求的双重驱动下，如何实现企业经济效益与社会环境效益的平衡，已成为当前亟待解决的关键问题，这也使得该领域迅速成为学术研究的热点话题。

学术界对低碳供应链的定义尚未形成统一共识，但学者们从不同视角提出了各自见解。Shaharudin 等^[47]将其界定为涵盖产品设计、采购、生产及物流等环节的碳排放规划、管控与优化体系。Das 等^[48]从两个维度进行阐释：一是供应链管理的功能运营层面，包括采购、生产规划、分销网络设计及协调；二是碳足迹的核算与概念化。Mao 等^[49]则将其定义为贯穿产品全生命周期的管理模式，统筹考虑环境影响与资源利用，同时平衡供应商与客户利益。王飞等^[50]认为低碳供应链是在传统供应链中融入低碳要素的升级概念，其复杂程度超越绿色供应链与可持续供应链，具有更强的环境响应能力。该模式要求在原材料采购、运输、加工及回收等各环节实施减排措施，从而提高资源效率并最大限度保护环境。祝凌燕^[51]强调低碳供应链将环保理念贯穿于供应链全过程，致力于实现碳排放最小化乃至零排放。这一体系涵盖从原材料采购到产品设计、制造、交付及生命周期支持的完整绿色供应链，其核心是在最小化环境负荷的前提下实现可持续发展。

本文认为低碳供应链是指在供应链全流程中系统整合低碳经济理念，以实现温室气体减排和可持续发展为目标的管理模式。该模式以环境保护与资源优化为核心，通过改进原材料采购、生产制造、物流运输、销售及废弃物处理等环节，有效降低碳足迹。基于供应链管理理论，低碳供应链应遵循最小化资源消耗与排放的原则设计业务流程，以达成生态效益与经济效益的最优平衡。简言之，

低碳供应链通过提升管理效能、优化材料使用效率以及应用清洁技术，最大限度地减少资源消耗与环境影响，从而实现经济绩效与生态效益的双重优化。

2.1.2 低碳供应链结构

低碳供应链结构是为了在经济发展与环境保护之间寻求平衡而设计的一种综合性管理体系。其核心在于在传统供应链的基础上，融入低碳理念，并通过各个环节的协同作用，实现资源的高效利用和碳排放的有效控制。低碳供应链通常由多个相互关联的环节组成，包括原材料采购、生产制造、物流配送、销售市场以及产品回收与再利用等。每一个环节均需遵循环保和节能的原则。在原料采购阶段，供应链成员需优先选择环保材料和可再生资源，建立绿色采购标准，以降低原材料的碳足迹。同时，合作关系的建立也有助于确保供应商在环保方面的合规性。在生产制造过程中，企业应采用低碳技术和节能设备，优化生产流程以减少碳排放。此外，产品设计应考虑可回收性及环境影响，确保最终产品在生命周期内对环境的影响最小化。在物流配送方面，物流环节是降低碳排放的重要阶段。通过优化运输路线、提升运输效率以及使用低碳运输工具（如电动车、铁路运输等），可以显著降低物流环节的碳排放。在销售环节，企业应加强对消费者环保意识的宣传，推广低碳产品。同时，根据市场需求和消费者偏好的变化，灵活调整产品策略，以实现环保与经济效益的双赢。在产品回收与再利用阶段，建立有效的产品回收机制，可以促进资源的循环使用，减少新材料的需求和生产过程中的碳排放。通过回收再制造，企业不仅可以降低环境负担，还能创造新的经济价值。在政策与协调机制方面，低碳供应链各参与方需建立有效的沟通与协调机制，以应对政府的碳排放政策和市场的变化需求。通过合同设计和成本分担机制，确保供应链各方的利益平衡，促进整体协调发展。

低碳供应链的结构设计强调各环节的协同和互动，通过整合资源和优化流程，达到降低碳排放和提升经济效益的双重目标。其成功实施不仅依赖于技术的进步，更需要各方的共同努力和政策的有效支持。具体如下图 2-1 所示。

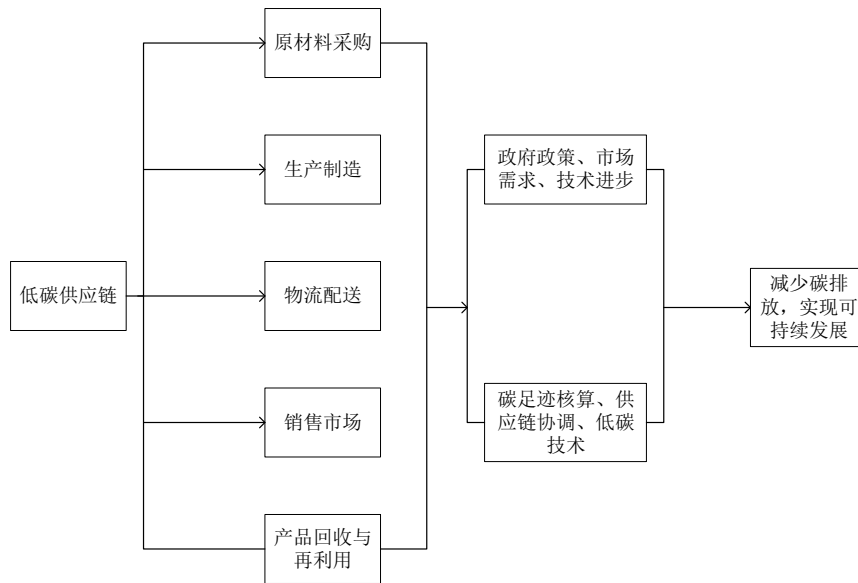


图 2-1 低碳供应链结构图

2.2 数字化技术

2.2.1 数字化技术的概念

为落实“双碳”目标，党的二十大报告强调“加快节能降碳先进技术研发推广，推动绿色低碳生产生活方式转型”及“加速建设网络强国、数字中国”，旨在实现低碳化与数字化的深度融合。数字化作为当前经济发展的重要趋势，随着第三次工业革命的深入，其应用领域不断拓展创新，已成为驱动经济增长的核心动力。这一趋势源于信息化的积累与演进，逐渐形成新的发展范式。学界对数字化的界定存在不同视角。有学者认为其本质是互联网、大数据、人工智能等新兴信息技术的广泛应用，这一概念的提出与信息技术革新阶段相对应^[52,53]。Li 等^[54]将其定义为工业 4.0 时代各种智能和创新技术的集合和范式，例如大数据分析、物联网和云计算。另一方面，Yang 等^[55]则认为数字化技术包括所有具有数字元素的技术，如物联网、大数据和人工智能等。Martínez 等^[56]数字化技术是信息处理、计算、通信与连接技术的有机整合，能够为企业创造持续竞争优势。Zaki^[57]强调数字技术具备移动性与泛在连接特性，可实现实时交互并提供海量数据访问与计算能力。

数字化技术是指将传统信息转化为数字形式的技术体系，包括数据采集、存储、处理、传输及应用等完整流程。它不仅是一种技术实现方式，更是推动社会

经济文化转型的重要驱动力。具体如下图 2-2 所示。

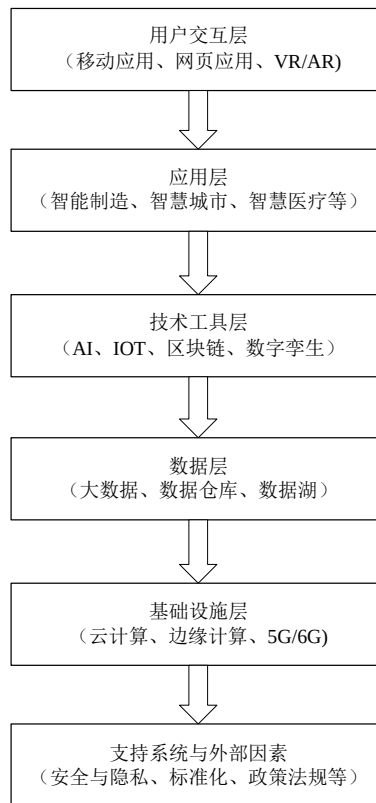


图 2-2 数字化技术结构图

2.2.2 数字化技术应用

数字化技术的快速发展为个人、组织及社会带来了深刻变革，其产生的海量数据已成为企业价值创造的重要源泉^[55]。数字化价值开发能力体现为企业运用数字技术创造价值的能力。企业在数字技术领域的投资可转化为多种价值创造活动，包括知识创新、决策优化、客户服务提升、供应商协同改进以及流程再造等。以欧洲家具行业为例，各类企业普遍采用 CAD 软件与 3D 工具，不仅优化了产品设计流程，还显著提升了终端消费体验。同时，物联网技术的应用使企业能够实时监控物流与库存状态，快速响应市场需求变化，有效降低库存成本。如沃尔玛通过物联网技术实现供应链实时监控，确保商品精准供应，从而提升客户满意度。大数据分析技术使企业能够从历史数据中挖掘有价值的信息，进行精准需求预测与趋势研判。亚马逊运用先进的数据分析技术，实现了需求预测与库存优化，大幅提升了运营效率。数字化平台促进了供应链各参与主体间的信息共享与协同合作。海尔通过构建开放生态系统，实现了与供应商和零售商的深度协同，显著

提升了供应链整体效率与竞争力。自动化技术的应用，如智能仓储系统与机器人技术，提高了订单处理与物流调度效率。京东的智能仓库与配送机器人系统有效降低了人力成本，提升了配送效能。区块链等数字化工具增强了供应链透明度，提升了消费者信任度。耐克运用区块链技术实现产品全流程追溯，确保了供应链透明度并强化了品牌形象。数字化技术还提升了企业对市场变化与突发事件的响应能力。星巴克在疫情期间通过数字化转型，快速调整供应链策略，拓展在线订单与配送服务，有效应对了消费行为的变化。

总体而言，数字化技术的应用不仅提升了运营效率与响应速度，还促进了供应链各环节的协同与透明，为企业应对市场竞争提供了有力支撑。

2.3 博弈论

2.3.1 博弈论的概念

博弈论作为现代数学与运筹学的重要分支，其核心在于运用数学模型求解决策主体在互动情境下的最优策略。该理论系统总结了竞争与对抗现象的数学分析方法。1934年，德国经济学家 Herinrich Von Stacklberg 首次提出这一理论，开创了具有先发优势的动态博弈研究。1944年，John von-Neumann 与 Oskar Morgenstern 在其著作《Theory of Games and Economic Behavior》中进一步完善了理论框架，明确了相关术语、概念及表述方法，推动了该理论的快速发展。目前，博弈论已形成完整的理论体系，在金融、生物、哲学、政治、军事战略及运营管理等领域得到广泛应用。其基本构成要素主要包括以下六个方面：

- (1) 参与者：理性决策者，可以是个人、企业、国家等。
- (2) 策略：参与者可选择的行动方案，包括纯策略和混合策略。
- (3) 收益：每个策略组合下参与者的效用或支付，决定其偏好。
- (4) 信息结构：参与者对其他参与者特征、策略、收益等的了解程度，如完全信息与不完全信息。
- (5) 行动顺序：同时行动或序贯行动，影响博弈类型（静态或动态）。
- (6) 均衡：策略组合的稳定状态，如纳什均衡。

2.3.2 Stackelberg 博弈

Stackelberg 博弈是以经济学家 Heinrich von Stackelberg 命名的市场竞争分析模型。该模型将企业划分为领导者（Leader）与跟随者（Follower）两类角色。领导者率先制定产量或价格等决策，跟随者则根据观察到的领导者决策作出相应选择。这个过程反映了现实市场中通常存在的先动优势和反应策略。

在 Stackelberg 博弈中，领导者通过预见跟随者的反应来最大化自身的收益。这种预测能力使得领导者在决策过程中能够考虑到跟随者的最佳反应函数，即跟随者在面对领导者的不同决策时会选择的最优策略。领导者通过优化这个反应函数来选择自己的最优策略，从而获得比同时决策博弈（如 Cournot 博弈）中更高的收益。

这种模型在诸多领域都有应用，尤其是在垄断竞争、寡头市场和供应链管理中，被广泛用于解释和预测企业行为及市场动态。Stackelberg 博弈适用于已经建立权力结构的模型，本文的第三和第四章均是基于建立 Stackelberg 博弈模型研究碳交易下考虑数字化技术的供应链定价和减排的最优决策和利润。

第3章 供应商主导下考虑数字化技术的供应链定价与减排决策研究

在当前低碳经济的发展背景下,企业面临着越来越大的碳减排压力,尤其是在碳交易政策的影响下,供应链成员的决策行为愈加复杂。供应商作为供应链的重要参与者,其行为决策不仅影响自身的经济效益,还对整个供应链的环保目标实现起着关键作用。随着数字化技术的迅猛发展,企业能够获取更为实时和精准的数据,优化供应链管理,提升决策效率。在碳减排的过程中,数字化技术能够帮助企业分析市场需求、监测碳排放、评估减排效果等,从而制定更加合理的定价策略和减排计划。然而,企业在实施碳减排措施时,往往面临着高昂的前期投资和不确定的长期效益,决策者需要在权衡成本与收益的过程中,探索适合自身的减排路径。此外,供应链内部的博弈关系、权力结构的变化以及市场环境的动态变化,都对企业的决策产生了深远的影响。在这样的环境下,供应商必须在确保自身利益的同时,考虑到消费者日益增长的低碳偏好和社会责任,形成更加协调的供应链关系。如 Unilever 的供应商通过数据共享、技术创新和激励机制发挥了主导作用,积极参与碳排放的监控,还与 Unilever 共同设定可持续发展目标,从而影响产品设计和生产流程。本章旨在探讨在供应商主导下,如何有效利用数字化技术,优化供应链的定价和减排决策,以实现经济效益与环境效益的双赢目标。

3.1 问题描述

在碳交易政策下,考虑一个由供应商和制造商组成的两级低碳供应链,其中供应商为领导者,制造商为跟随者,供应商以批发价格 w 向制造商提供原材料,制造商则以零售价格 p 将产品销售给消费者。为了降低碳排放,供应商和制造商均采用低碳生产方式。其中,制造商是受碳限额约束的高耗能、高排放型企业,政府分配给制造商免费的碳排放额为 K ,并可以单位价格 c_e 可购买或出售碳排放

额度。

数字化技术的应用可提高供应链减排和运营的效率,但需供应链成员投入较高的固定成本,进而承担较大的运营风险。同时,考虑政府的碳交易机制和减排技术的高投入特征,供应链成员在减排和数字技术应用方面均面临着是否应投入的决策。鉴于此,本文根据供应链成员有无采用减排技术、数字化技术及合作减排,可以分为以下四种情形:一是无减排和数字化技术投入,记为 SN 模型;二是仅进行减排技术投入,记为 SO 模型;三是减排与数字化技术共同投入,记为 SD 模型;四是合作数字化减排,记为 SC 模型。其中, SD 和 SC 模型下供应商和制造商的决策过程具体如图 3-1 所示, SN 和 SO 模型属于 SD 模型的特例,不再详细描述。

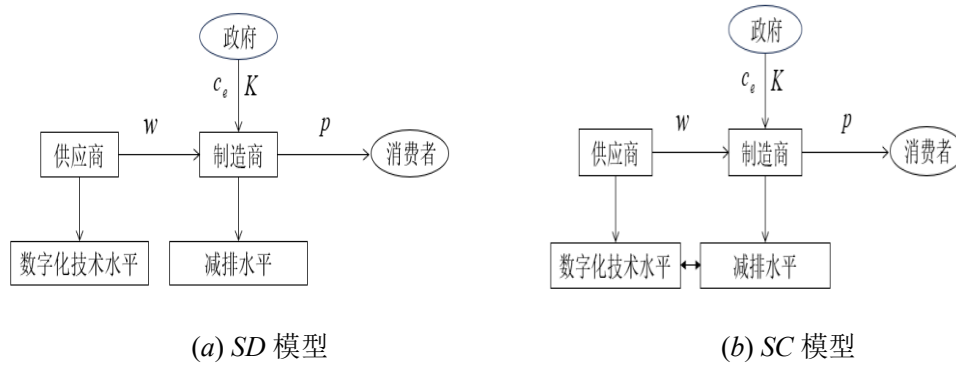


图 3-1 供应链减排模式

3.1.1 相关假设

假设 3.1 假设市场需求是价格的线性函数,有 $Q = D_0 - p$ ^[58], 其中 D_0 表示市场总容量。在碳交易机制下,供应链成员通过减排投资可有效降低生产环节的碳排放水平。鉴于消费者对低碳产品的偏好,减排投入的增加将直接带动产品市场需求的提升。因此,假设市场需求受到售价和减排率的影响,即当进行减排和数字化技术共同投入以及合作数字化减排时,市场需求则为 $Q = D_0 - p + \beta r_m$ ^[59], 其中 β 为消费者低碳偏好程度, r_m 为制造商的碳减排率。

假设 3.2 生产过程中的单位碳排放量为 $a - br_m$ ^[60], 其中 a 是初始单位碳排放量, b 是碳减排率对单位碳排放量降低的影响系数。

假设 3.3 制造商实施碳减排技术投资时，其成本投入为减排水平的二次函数，即 $\frac{1}{2}c_l r_m^2$ ^[61]，其中 c_l 为碳减排成本规模系数。

假设 3.4 供应商采用数字化技术时，可以减少生产过程中的碳排放，此时单位碳排放量为 $a - br_m - B_s t$ ，供应商投入成本为 $\frac{1}{2}hB_s^2$ ^[62,63]，其中 t 为数字化技术投入水平对单位碳排放量降低的影响系数， B_s 为供应商的数字化技术投入， h 为数字化技术投入成本规模系数。

假设 3.5 供应商和制造商都是风险中性的决策者，以利润最大化为决策目标^[64]。其中，供应商处于领导地位，制造商作为跟随者进行决策。

假设 3.6 为了保证减排率的非负性，设有 $D_0 - c - ac_e > 0$ ^[65,66]。

3.1.2 模型符号

为了便于研究，本章所采用的相关符号及其说明见下表 3-1。

表 3-1 符号及说明

符号	符号说明
p	产品的单位零售价格
r_m	制造商的碳减排率
D_0	市场总容量
a	产品的初始单位碳排放量，即减排率为零时的单位碳排放量
b	碳减排率对单位碳排放量降低的影响系数
K	政府规定的碳排放量额度
c_e	单位碳排放市场交易价格
c_l	碳减排成本规模系数

续表 3-1 符号及说明

符号	符号说明
B_s	供应商的数字化技术投入水平
t	数字化技术投入水平对单位碳排放量降低的影响系数
h	数字化技术投入成本规模系数
Q	市场需求
β	消费者的低碳偏好程度
w	产品的单位批发价格
c	产品的单位生产成本
π_s^i / π_m^i	供应商和制造商在模型 i 中的利润，其中 $i = \{SN, SO, SD, SC\}$

3.2 模型构建

3.2.1 无减排和数字化技术投入——SN 模型

供应链成员无减排和数字化技术投入，此时，供应商首先决定批发价格 w ，制造商随后决定产品零售价格 p 。供应商和制造商的利润函数分别如下：

$$\pi_s(w) = (w - c)Q \quad (3-1)$$

$$\pi_m(p) = (p - w)Q - c_e(aQ - K) \quad (3-2)$$

3.2.2 仅进行减排技术投入——SO 模型

仅制造商进行减排技术投入，此时，供应商首先决定批发价格 w ，制造商随后决定产品零售价格 p 和碳减排率 r_m 。供应商和制造商的利润函数分别如下：

$$\pi_s(w) = (w - c)Q \quad (3-3)$$

$$\pi_m(p, r_m) = (p - w)Q - c_e((a - br_m)Q - K) - \frac{1}{2}c_l r_m^2 \quad (3-4)$$

3.2.3 减排和数字化技术共同投入——SD 模型

供应商采用数字化技术而制造商进行减排技术投入，此时，供应商和制造商首先同时决定数字化技术投入水平 B_s 和碳减排率 r_m ，然后，供应商决定批发价格 w ，制造商随后决定产品零售价格 p 。供应商和制造商的利润函数分别如下：

$$\pi_s(w, B_s) = (w - c)Q - \frac{1}{2}hB_s^2 \quad (3-5)$$

$$\pi_m(p, r_m) = (p - w)Q - c_e((a - br_m - B_s t)Q - K) - \frac{1}{2}c_l r_m^2 \quad (3-6)$$

3.2.4 合作数字化减排——SC 模型

供应商和制造商合作数字化减排，此时，供应商和制造商依据总利润最大化原则共同决定数字化技术投入水平 B_s 和碳减排率 r_m 。然后，供应商决定批发价格 w ，制造商随之决定产品零售价格 p 。供应商和制造商的利润函数分别如下：

$$\pi_s(w) = (w - c)Q - \frac{1}{2}hB_s^2 \quad (3-7)$$

$$\pi_m(p) = (p - w)Q - c_e((a - br_m - B_s t)Q - K) - \frac{1}{2}c_l r_m^2 \quad (3-8)$$

供应链的总利润为：

$$\pi_{sc} = (p - c)Q - c_e((a - br_m - B_s t)Q - K) - \frac{1}{2}c_l r_m^2 - \frac{1}{2}hB_s^2 \quad (3-9)$$

根据逆向归纳法，求得四种模型下的最优决策和利润，具体如表 3-2 所示。

表 3-2 四种模型下的最优决策和利润

	SN 模型	SO 模型	SD 模型	SC 模型
B_s	——	——	$\frac{2tc_e c_l A_1}{A_2}$	$\frac{3tc_e c_l A_1}{A_3}$
w	$\frac{1}{2}(D_0 + c - ac_e)$	$\frac{1}{2}(D_0 + c - ac_e)$	$c + \frac{4hc_l A_1}{A_2}$	$c + \frac{4hc_l A_1}{A_3}$

续表 3-2 四种模型下的最优决策和利润

	SN 模型	SO 模型	SD 模型	SC 模型
p	$\frac{1}{4}(3D_0 + c + ac_e)$	$D_0 - \frac{A_1 c_l}{4c_l - 2b^2 c_e^2}$	$c + \frac{A_4 + A_5}{A_2}$	$c + \frac{3A_4 + A_5}{A_3} - \frac{(D_0 - c)t^2 c_e^2 c_l}{A_3}$
r_m	——	$\frac{bc_e A_1}{4c_l - 2b^2 c_e^2}$	$\frac{hA_1(\beta + bc_e)}{A_2}$	$\frac{3hA_1(\beta + bc_e)}{A_3}$
Q	$\frac{1}{4}A_1$	$\frac{c_l A_1}{4c_l - 2b^2 c_e^2}$	$\frac{2hc_l A_1}{A_2}$	$\frac{2hc_l A_1}{A_3}$
π_s	$\frac{1}{8}A_1^2$	$\frac{A_1^2 c_l}{8c_l - 4b^2 c_e^2}$	$\frac{2hA_1^2(4h - t^2 c_e^2)c_l^2}{A_2^2}$	$\frac{hA_1^2(16h - 9t^2 c_e^2)c_l^2}{2A_3^2}$
π_m	$Kc_e + \frac{1}{16}A_1^2$	$Kc_e + \frac{A_1^2 c_l}{8(2c_l - b^2 c_e^2)}$	$\frac{Kc_e + h^2 A_1^2(8c_l - (\beta + bc_e)^2)c_l}{2A_2^2}$	$\frac{Kc_e + \frac{8h^2 A_1^2 c_l^2}{2A_3^2} - 9c_l(\beta + bc_e)^2}{2A_3^2}$

3.3 结果分析

3.3.1 供应链成员减排方式和合作策略对最优决策和利润的影响

本节首先对最优结果进行对比分析,探讨供应链成员减排方式和合作策略对最优决策和利润的影响,可得命题 3.1-3.3。

命题 3.1 (1) $w^{SC*} > w^{SD*} > w^{SO*} = w^{SN*}$; (2) $p^{SN*} > p^{SO*}$; (3) 当 $h > h_1$ 时, 若 $c_l > \overline{c_{l1}}$, 则 $p^{SD*} > p^{SC*}$, 反之, $p^{SD*} \leq p^{SC*}$; 当 $0 < h < h_1$ 时, $p^{SD*} > p^{SC*}$; (4) 当 $c_l > \overline{c_{l2}}$ 时, $p^{SN*} > p^{SC*}$, 反之, $p^{SN*} \leq p^{SC*}$; (5) 当 $c_l > \frac{1}{2}\overline{c_{l2}}$ 时, $p^{SN*} > p^{SD*}$, 反之, $p^{SN*} \leq p^{SD*}$; (6) 当 $0 < c_l < \overline{c_{l3}}$ 或 $c_l > \overline{c_{l4}}$ 时, $p^{SO*} > p^{SC*}$, 反之, $p^{SO*} \leq p^{SC*}$; (7) 当 $0 < c_l < \overline{c_{l5}}$ 或 $c_l > \overline{c_{l6}}$ 时, $p^{SO*} > p^{SD*}$, 反之, $p^{SO*} \leq p^{SD*}$ 。

命题 3.1 表明, 对比四个模型下的单位批发价格可知, SC 模型下的单位批发价格最高, SO 模型和 SN 模型下的单位批发价格最低且相同, 但 SO 模型下的单位零售价格低于 SN 模型。这是因为制造商的减排投入不影响供应商原材料

的生产过程，但却会增加产品的销售量，为进一步刺激产品销售，制造商会降低产品销售价格。制造商通过薄利多销方式获得的收益也高于减排技术的投入成本，实现市场扩容和收益提升的双重效应。

对比 SD 模型和 SC 模型可知，当供应商进行数字化技术投入且制造商进行减排投入时，若供应商的数字化技术投入成本较低或双方的技术投入均较高，供应链成员的合作减排有利于降低产品零售价格；当供应商的数字化技术投入成本较高且制造商的减排投入成本较低时，双方合作减排则会提升产品零售价格。这是因为当供应商的数字化技术投入成本较低时，数字化技术可以提高生产效率、降低生产成本，从而有助于制造商降低产品的整体生产成本。合作减排带来的环保措施和技术提升，也能进一步降低资源的浪费和生产成本，最终使零售价格下降。相反，当供应商的数字化技术投入成本较高时，投入的成本可能会转嫁到产品价格上，加之制造商的减排投入相对较低，整体成本上升可能导致零售价格上涨。相较于无额外减排技术或数字化技术投入情形（即模型 SN ），供应链成员投入数字化技术和减排技术会增加零部件批发价格，且当制造商减排技术投入成本较高时，其会降低产品零售价格，反之，则会提升产品零售价格；因为此时，高额的减排成本使得制造商降低碳减排率，产品销量缩减，为扩大市场份额，制造商将降低产品销售价格。

由命题 3.1 可知，供应链成员应权衡数字化和减排投入的成本与收益，通过合作减排和技术提升，优化定价策略，实现市场扩容与收益增长。

命题 3.2 (1) $Q^{SN*} < Q^{SO*}$, $Q^{SN*} < Q^{SD*} < Q^{SC*}$; (2) 当 $c_l > \overline{c_{l7}}$ 时, $Q^{SO*} < Q^{SC*}$, 反之, $Q^{SO*} \geq Q^{SC*}$; (3) 当 $c_l > \overline{c_{l8}}$ 时, $Q^{SO*} < Q^{SD*}$, 反之, $Q^{SO*} \geq Q^{SD*}$ 。

命题 3.2 表明，在四种模型下， SN 模型市场需求最低， SC 模型市场需求最高，表明减排技术和数字化技术的引入均会降低产品碳排放量，提升产品市场需求，且合作减排对市场需求的刺激作用高于非合作减排。相较于仅制造商增加减排努力情形（模型 SO ），供应商通过引入数字化技术参与减排对市场需求的影 响并不总是有利的；当制造商减排难度较小时（ $c_l \leq \min\{\overline{c_{l7}}, \overline{c_{l8}}\}$ ），供应商参与减排不利于产品市场需求的提升，当制造商减排难度较大时（ $c_l > \max\{\overline{c_{l7}}, \overline{c_{l8}}\}$ ），供应商参与减排有利于产品市场需求的提升，此时，应鼓励供应商参与减排。这

是因为当制造商减排难度较小时, 制造商已经能够以较低的成本和较高的效率实现减排, 消费者对环境友好产品的需求得到了满足。在这种情况下, 供应商引入数字化技术参与减排, 虽然可能提升了生产效率, 但由于制造商的主动减排已经降低了产品的环境影响, 消费者对供应商的参与并没有显著的额外需求刺激, 反而可能导致市场需求的疲软。当制造商减排难度较大时, 制造商面临较大的减排挑战, 需要更多的外部支持与合作。这时, 供应商通过引入数字化技术参与减排, 可以帮助制造商克服技术瓶颈、降低生产成本, 从而提升产品的市场竞争力。此时, 市场上对环保产品的需求会因供应链的整体减排能力提升而增强。

命题 3.2 可知, 企业应评估减排难度, 鼓励供应商通过数字化技术参与减排, 以增强市场需求和提升产品竞争力, 实现双赢。

命题 3.3 (1) 当 $h > h_2$ 时, 若 $c_l > \overline{c_{l9}}$, 则 $r_m^{SO*} < r_m^{SD*}$, 反之, $r_m^{SO*} \geq r_m^{SD*}$; 当 $0 < h < h_2$ 时, 若 $c_l > \overline{c_{l9}}$, 则 $r_m^{SO*} > r_m^{SD*}$, 反之, $r_m^{SO*} \leq r_m^{SD*}$; (2) 当 $h > h_3$ 时, $r_m^{SD*} < r_m^{SC*}$, 反之, $r_m^{SD*} \geq r_m^{SC*}$; (3) 当 $c_l > \overline{c_{l10}}$ 时, $r_m^{SO*} < r_m^{SC*}$, 反之, $r_m^{SO*} \geq r_m^{SC*}$; (4) $B_s^{SC*} > B_s^{SD*}$ 。

命题 3.3 表明, 对比 SO 模型和 SD 模型可知, 当供应商进行数字化技术投入参与减排且制造商进行减排投入时, 若供应商的数字化技术投入成本较低或双方的技术投入均较高, 供应链成员均参与减排但不合作的方式有利于提高产品碳减排率; 当供应商的数字化技术投入成本较高且制造商的减排投入成本较低时, 双方非合作减排则会降低产品碳减排率。当供应商的数字化技术投入成本较低时, 供应商能够以较低的成本提升自身的生产效率和环保水平, 从而促进整个供应链的减排效果。如果双方的技术投入均较高, 说明双方都在为减排做出较大的投入, 此时即使不合作, 依然能在各自的领域内实现减排目标, 最终提高产品的碳减排率。当供应商的数字化技术投入成本较高, 而制造商的减排投入成本较低时, 如果双方不进行合作, 供应商可能会因为高成本投入而限制其技术应用和推广, 导致整体的减排效果不佳。相较于仅制造商增加减排努力情形 (模型 SO) 和双方均参与减排但不合作 (SD 模型), 当供应商的数字化技术投入成本或双方的技术投入均较高时, 供应链成员的合作减排有利于提高产品碳减排率; 当供应商的数字化技术投入成本或双方的技术投入均较低时, 供应链成员的合作减排会降低产品碳减排率。这是因为高投入情况下的合作可以使得双方更好地整合技术与资

源，避免重复投资，充分发挥各自的优势，从而提高整体的减排效率。低投入情况下的合作可能导致资源的分散和效率的降低。此时，个体的减排努力和成本效益可能已经足够高，额外的合作投入反而可能导致管理复杂性增加，而未必能有效提升减排效果。双方合作时供应商的数字化技术投入水平始终高于非合作情形，因为合作减排促使供应商与制造商之间在数字化技术上的协同创新。通过合作，双方可以共同开发和实施新技术，从而提高投入的效率和效果。

命题 3.3 可知，企业应根据技术投入成本选择合作减排策略，合理配置资源，以最大化碳减排效率和市场竞争力，实现可持续发展。

3.3.2 敏感性分析

将四个模型各最优决策和利润分别对相关参数求一阶偏导可得下列结论。

命题 3.4 (1) $\frac{\partial Q^{j*}}{\partial c} < 0$, $\frac{\partial \pi_s^{j*}}{\partial c} < 0$, $\frac{\partial \pi_m^{j*}}{\partial c} < 0$, 其中 $j = \{SN, SO, SD, SC\}$; (2) $\frac{\partial w^{j*}}{\partial c} > 0$, $\frac{\partial p^{j*}}{\partial c} > 0$, 其中 $j = \{SN, SO\}$; (3) 当 $c_l > \overline{c_{l11}}$ 时, $\frac{\partial w^{SD*}}{\partial c} > 0$, 反之, $\frac{\partial w^{SD*}}{\partial c} \leq 0$; 当 $c_l > \frac{1}{2}\overline{c_{l12}}$ 时, $\frac{\partial p^{SD*}}{\partial c} > 0$, 反之, $\frac{\partial p^{SD*}}{\partial c} \leq 0$; (4) 当 $c_l > \overline{c_{l13}}$ 时, $\frac{\partial w^{SC*}}{\partial c} > 0$, 反之, $\frac{\partial w^{SC*}}{\partial c} \leq 0$; 当 $c_l > \frac{3}{2}\overline{c_{l12}}$ 时, $\frac{\partial p^{SC*}}{\partial c} > 0$, 反之, $\frac{\partial p^{SC*}}{\partial c} \leq 0$ 。

命题 3.4 表明，在四种模型下，随着产品单位生产成本的增加，产品市场需求降低，供应商和制造商的利润也随之降低；但是，其对产品批发价格和零售价格的影响与供应商是否参与减排和制造商的碳减排难度相关。当供应商不参与减排（即模型 SN 和 SO ），产品批发价格和零售价格随着其单位生产成本的增加而增加。当供应商参与减排时，若制造商碳减排难度较大，其减排率较低，无法有效刺激市场需求，此时，供应商和制造商为保持产品的边际利润，会随着产品单位生产成本的增加而提升各自的产品价格。

命题 3.4 可知，企业应关注生产成本与减排参与的关系，合理定价策略以维护利润，同时激励市场需求，确保可持续发展。

命题 3.5 (1) $\frac{\partial Q^{j*}}{\partial c_l} < 0$, $\frac{\partial \pi_s^{j*}}{\partial c_l} < 0$, $\frac{\partial \pi_m^{j*}}{\partial c_l} < 0$, 其中 $j = \{SO, SD, SC\}$; (2) $\frac{\partial w^{SO*}}{\partial c_l} = 0$, $\frac{\partial p^{SO*}}{\partial c_l} < 0$; (3) $\frac{\partial w^{j*}}{\partial c_l} < 0$, 其中 $j = \{SD, SC\}$; (4) 当 $0 < t < t_1$ 时, $\frac{\partial p^{SD*}}{\partial c_l} < 0$,

反之, $\frac{\partial p^{SD*}}{\partial c_l} \geq 0$; (5) 当 $0 < t < \sqrt{\frac{2}{3}}t_1$ 时, $\frac{\partial p^{SC*}}{\partial c_l} < 0$, 反之, $\frac{\partial p^{SC*}}{\partial c_l} \geq 0$ 。

命题 3.5 表明, 在 SO 、 SD 、 SC 三种模型下, 随着碳减排成本规模系数的增加, 产品市场需求降低, 供应商和制造商的利润也随之降低; 但是, 其对产品批发价格和零售价格的影响与供应商是否参与减排和其数字化技术投入水平对单位碳排放量降低的影响相关。当供应商不参与减排时 (即模型 SO), 产品批发价格与碳减排成本规模系数没有关系, 零售价格随着碳减排成本规模系数的增加而降低, 这是因为当供应商不参与减排时意味着供应商的减排成本并不会直接影响批发价格。随着碳减排成本规模系数的增加, 制造商为了维持市场竞争力和销售量, 必须通过降低价格来吸引消费者, 尤其在消费者关注环保和可持续性时, 零售商可能会通过降低价格来强化其品牌形象。当供应商参与减排时, 产品批发价格也随着碳减排成本规模系数的增加而降低, 若供应商的数字化技术投入水平对单位碳排放量降低的影响系数较小, 产品零售价格随着碳减排成本规模系数的增加而降低; 若供应商的数字化技术投入水平对单位碳排放量降低的影响系数较大, 产品零售价格随着碳减排成本规模系数的增加而增加, 因为此时数字化技术在提升生产效率、降低碳排放方面发挥了显著作用。在这种情况下, 虽然碳减排成本可能增加, 但由于数字化技术的有效应用, 单位生产成本可能得到控制或降低。然而, 随着碳减排成本的增加, 供应商可能需要将这些成本转嫁给消费者, 尤其是在市场竞争较小的情况下; 这导致零售价格随着碳减排成本规模系数的增加而上升。

命题 3.5 可知, 企业应重视碳减排成本与数字化技术投入的平衡, 优化定价策略以应对市场需求变化, 同时提升品牌形象, 增强竞争力, 实现可持续发展。

命题 3.6 (1) $\frac{\partial w^{j*}}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial Q^{j*}}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial \pi_s^{j*}}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial \pi_m^{j*}}{\partial \beta} > 0$, 其中 $j = \{SD, SC\}$;

(2) 当 $h > h_4$ 时, 若 $c_l > \overline{c_{l4}}$, 则 $\frac{\partial p^{SD*}}{\partial \beta} > 0$, 反之, $\frac{\partial p^{SD*}}{\partial \beta} \leq 0$, 当 $0 < h < h_4$ 时, $\frac{\partial p^{SD*}}{\partial \beta} < 0$;

(3) 当 $h > \frac{3}{2}h_4$ 时, 若 $c_l > \overline{c_{l5}}$, 则 $\frac{\partial p^{SC*}}{\partial \beta} > 0$, 反之, $\frac{\partial p^{SC*}}{\partial \beta} \leq 0$, 当 $0 < h < \frac{3}{2}h_4$ 时,

$$\frac{\partial p^{SC*}}{\partial \beta} < 0。$$

命题 3.6 表明，当制造商和供应商均积极减排时，无论双方是否合作，随着消费者低碳偏好程度的增加总会提升产品批发价格 and 市场需求，供应商和制造商利润随之增加；但是，消费者低碳偏好程度对产品零售价格的影响与供应链成员减排成本相关。当供应商的数字化技术投入成本或双方的技术投入均较高时，供应链成员减排成本较高，此时，消费者较高的低碳偏好程度使得其愿意为低碳产品支付更高的零售价格，为转移减排成本和风险，制造商会提升产品零售价格；当供应商的数字化技术投入成本或双方的技术投入均较低时，供应链成员减排成本较低，此时，为扩大市场份额，制造商愿意且有能力去降低产品零售价格以刺激低碳消费者的购买意愿。

命题 3.6 可知，企业应加大数字化技术投入，提升减排效率，以满足消费者的低碳偏好。同时，灵活调整零售价格策略，平衡成本转移与市场竞争，增强市场份额。

3.4 数值仿真分析

本节将通过数值仿真，进一步分析供应链成员减排方式和合作策略对成员利润的影响，同时，探讨碳交易价格对企业运营决策和消费者剩余的影响程度。参考文献[59,60]，其中相关参数的赋值如下： $c=150$ ， $D_0=230$ ， $a=6$ ， $b=0.2$ ， $K=300$ ， $t=0.1$ ， $\beta=0.8$ ， $h=13$ 和 $c_e=12$ 。

3.4.1 供应链成员减排方式和合作策略对利润的影响

由命题 1 可知，供应商和制造商的减排策略和合作策略会影响产品单位批发价格和零售价格，进而影响着双方利润，其影响如图 3-2 所示。

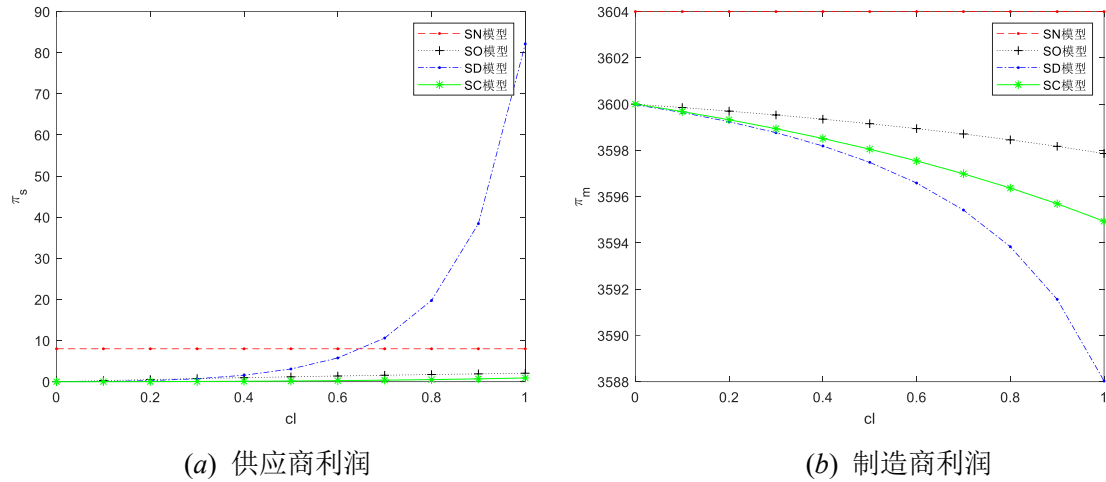


图 3-2 供应链成员减排方式和合作策略对利润的影响

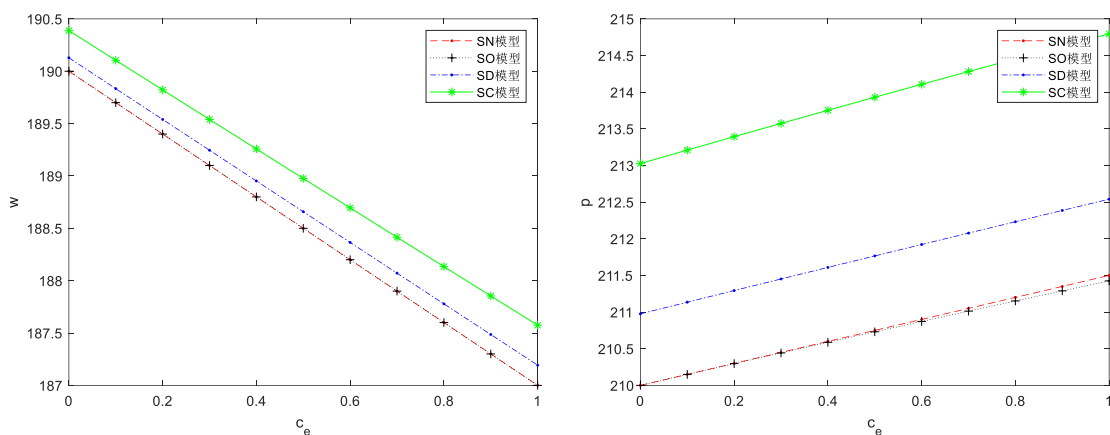
图 3-2 表明，相较于无减排和数字化技术投入（ MN 模型），供应商和制造商进行减排和数字化技术投入会使得供应商利润有所提升，这是因为减排措施不仅符合日益严格的环境法规，还能够降低能源成本，提高资源利用效率，从而提升整体经营效益。数字化技术的引入，例如物联网和大数据分析，能够增强供应链的透明度和响应速度，优化生产流程，降低库存成本，并提升客户满意度。这些因素综合作用，使得供应商在竞争中获得更大的市场份额和利润空间。非合作减排时供应商利润高于合作减排情形，而非合作减排时制造商利润低于合作减排情形。这是因为供应商在非合作模式中能够独立决策，优化自身的成本结构，以实现短期内的利润最大化。同时，供应商可能不愿意承担减排所需的初始投资和成本，这使其在短期内保持了较高的利润水平。相反，制造商在非合作情形中由于缺乏与供应商的协作，无法实现规模经济和资源优化配置，导致生产成本上升，从而利润下降。而供应商和制造商进行减排和数字化技术投入会使得制造商利润有所下降，这是因为供应商在减排和数字化转型过程中通常需要进行显著的资本支出，导致成本上升，进而把部分费用转嫁给制造商。数字化技术的应用虽然能够提高生产效率，但初期实施阶段可能伴随着技术整合和员工培训的额外成本，增加了制造商的运营负担。此外，供应商在推动可持续发展目标时，可能会优先考虑自身利益，导致制造商在价格和交付条件上处于相对不利的地位，进一步压缩了其利润空间。

由图 3-2 可知，企业应当重视与供应商的合作，积极推动减排和数字化转型，以实现双赢的局面。此外，应当建立激励机制，鼓励供应商在可持续发展和技术

创新方面进行投入，从而在整体供应链中形成良性循环，提高竞争力。同时，制造商应评估供应商的投资决策对自身财务状况的影响，并探索新的商业模式以分担成本和风险。

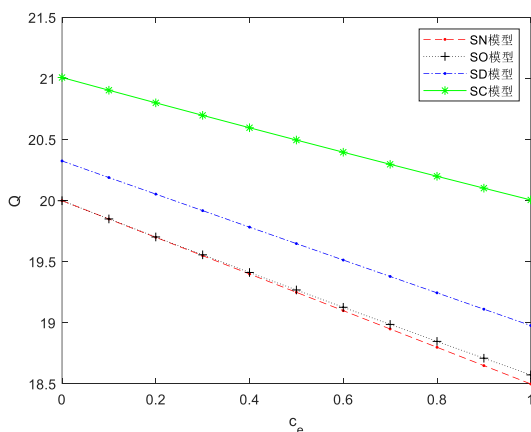
3.4.2 碳交易价格对产品价格和需求的影响

政府实施碳交易政策的目的是为了减少碳排放，达到碳减排目标。碳交易价格作为碳交易市场的主要激励因素，通过调节其价格，可以影响供应链各成员的生产成本和产品定价，进而影响产品的市场需求。为分析碳交易价格对产品价格和需求的影响，令 $c_l=25$ ，图 3-3 展示了碳交易价格对产品价格和需求的影响。



(a) 批发价格

(b) 零售价格



(c) 市场需求

图 3-3 碳交易价格对产品价格和需求的影响

图 3-3 表明, 无论供应链成员是否积极减排, 随着碳交易价格的增加, 产品批发价格 and 市场需求均降低, 但零售价格增加, 意味着碳交易价格增加对供应商总是有害的, 但随着供应商参与减排, 其负面影响将被逐渐减低。此时, 为降低碳交易价格增加引发的负面影响, 供应商可通过引入数字化技术与制造商共同减排。对制造商而言, 碳交易价格的增加会使得其在中购入的碳配额成本增加, 此时, 为转移成本压力, 其会提升产品零售价格, 进而降低产品市场竞争力, 产品需求降低。为削弱碳交易价格对产品需求的负面影响, 制造商也应选择与供应商合作减排, 以降低产品的碳减排量。这是因为碳交易价格上升使得排放成本增加, 企业为了降低成本而减少排放。合作减排可以降低个体企业的风险, 使它们更愿意投资于创新和高效的减排技术。

由图 3-3 可知, 企业应重视与供应链上下游合作, 通过协同减排和数字化转型, 共同提升市场竞争力和响应市场需求的能力, 特别是在碳交易价格波动的情况下。

3.4.3 碳交易价格对碳减排率和总碳排放量的影响

本节进一步分析了碳交易价格对碳减排率和总碳排放量的影响, 具体如下图 3-4 所示。

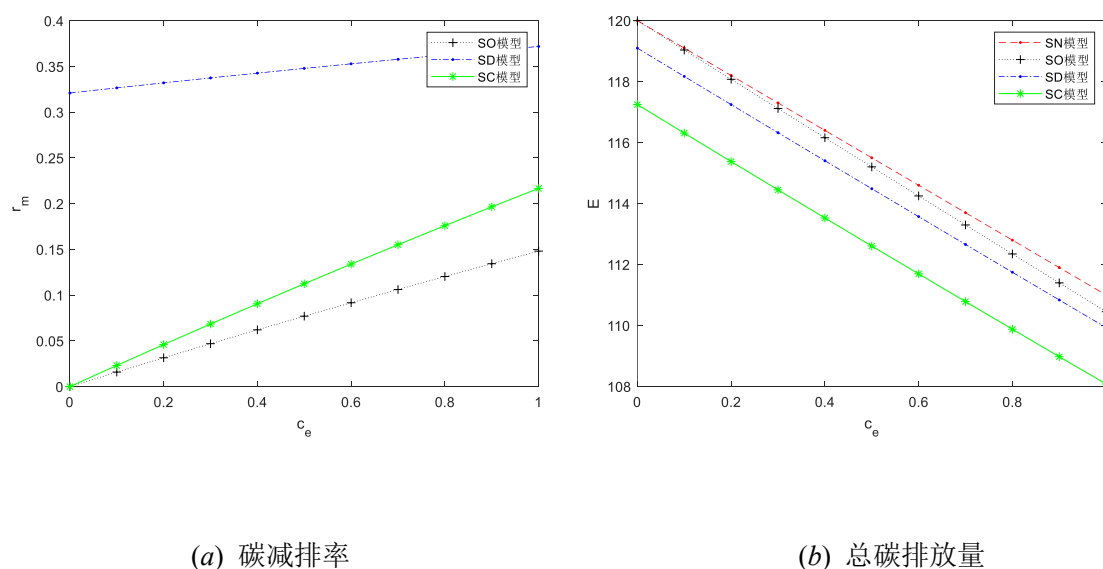


图 3-4 碳交易价格对碳减排率和总碳排放量的影响

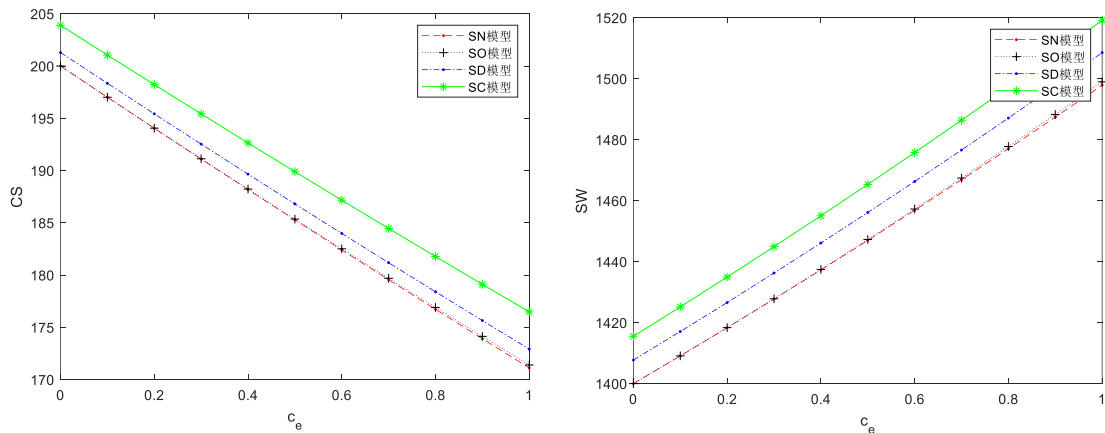
图 3-4 表明, 无论供应链成员是否积极减排, 随着碳交易价格的增加, 碳减

排率逐渐增加，这是由于随着碳交易价格的上升，碳排放的成本增加，企业为了降低碳交易支出，会更加积极地采取减排措施，从而提升碳减排率。初期，非合作碳减排率高于合作减排可能源于个体企业在竞争中更积极追求成本效益和短期利益，而合作减排则可能因协调成本和信任缺乏导致效率降低。总碳排放量随着碳交易价格的增加逐渐下降，合作减排时的总碳排放量最少。

由图 3-4 可知，应鼓励企业在减排中寻求合作，通过建立信任机制和共享资源，提升合作减排的效果与效率。推动供应链成员间的合作与信息共享，优化资源配置，以实现更高效的减排效果和降低总碳排放。

3.4.4 碳交易价格对消费者剩余和社会总福利的影响

参考文献[67]，在传统供应链中，消费者剩余函数为 $CS = \frac{(D_0 - p)^2}{2}$ ，在采用数字化技术中，消费者剩余为 $CS = \frac{(D_0 - p + \beta r_m)^2}{2}$ 。参考文献[68,69]，社会总福利为消费者剩余与供应链总利润之和，即 $SW = CS + \pi_s + \pi_m$ 。碳交易价格对消费者剩余和社会总福利的影响如下图 3-5 所示。



(a) 消费者剩余

(b) 社会总福利

图 3-5 碳交易价格对消费者剩余和社会总福利的影响

图 3-5 表明，无论供应链成员是否积极减排，随着碳交易价格的增加，消费者剩余逐渐下降，采用数字化技术后，合作减排时的消费者剩余高于非合作减排。

这是因为企业在减排过程中可能提高产品价格以覆盖成本，特别是在非合作模式下，消费者面临更高的价格。合作减排能提高资源利用效率，降低整体生产成本，从而使产品价格保持相对稳定，提升消费者剩余。社会总福利随着碳交易价格的增加而增加，合作减排时的社会总福利最高，主要是因为高碳价格促使企业内化温室气体排放的外部成本，推动资源的有效配置和低碳技术的投资。此外，合作减排能够激励企业之间共享技术和最佳实践，降低减排成本并促进创新，从而实现更高效的减排效果。最终，这种合作不仅改善了环境质量，还促进了经济的可持续发展，从而使社会总福利达到最高水平。

由图 3-5 可知，鼓励企业间合作减排，通过降低成本和提升产品价值，提高消费者剩余，增强市场竞争力。企业应积极适应和响应碳交易政策，通过内部激励措施促进低碳技术的研发与应用。其次，鼓励跨企业合作，共享资源和信息，以实现协同减排的效益。同时，管理层应重视外部环境变化，以动态调整企业的战略，确保在高碳价格环境中保持竞争力。

3.5 本章小结

本章针对一个由供应商和制造商构成的低碳供应链，探究在供应商主导下碳交易政策和数字化技术对供应链定价决策与碳减排策略的影响，主要研究结论如下：(1)制造商在减排技术上的投入以及供应商在数字化技术上的投入都能提升产品的批发价格 and 市场需求，而双方的合作减排效果尤为显著。如果供应商的数字化技术投入成本较低（较高），或者双方的技术投入水平都较高（较低），那么供应链成员的合作减排将有助于降低（提升）产品的零售价格。(2)单位生产成本和碳减排成本规模系数皆逆向影响低碳供应链市场需求、供应商以及制造商利润，而消费者的低碳偏好程度正向影响低碳供应链市场需求、供应商以及制造商利润。(3)无论供应链成员是否积极减排，碳减排率随着碳交易价格的增加而增加，总碳排放量和消费者剩余随之减少，采用数字化技术后合作减排时的总碳排放量最少以及消费者剩余和社会总福利高于非合作减排。

依据上述结论可得到如下管理启示：(1)制造商应积极投资于减排技术，供应商则应关注数字化技术的投入，增强供应链的整体竞争力。供应链成员建立合作机制，共同推进减排项目，尤其在数字化技术的应用上，提高减排效果。(2)企业

应通过精细化管理和技术创新来实现成本控制,提升低碳产品的市场需求和利润水平。增加对消费者的低碳教育,通过市场营销宣传低碳产品的环境价值和社会责任感,塑造积极的品牌形象,积极调整产品策略和市场推广,吸引更多低碳意识强的消费者。(3)供应链成员应密切关注碳交易市场的动态,及时调整减排策略,增强对市场变化的响应能力。加大对数字化技术(如物联网、大数据分析、人工智能等)的投资,以提升生产效率和资源管理能力,从而实现更高效的碳减排。

第 4 章 制造商主导下考虑数字化技术的供应链定价与减排决策研究

上一章研究了供应商主导下考虑数字化技术的供应链定价与减排决策研究，然而，随着供应链内部的博弈关系、权力结构的变化，制造商作为供应链的核心参与者，其决策不仅关乎自身的经济效益，同时也对整个供应链的环境表现具有重要影响。通过引入数字化技术，制造商能够更有效地获取市场数据、监测碳排放情况，并优化生产流程，从而在制定定价策略和减排计划时作出更加科学的决策，如宝马作为制造商，制定了严格的碳排放标准和可持续发展目标，对其供应链中的所有合作伙伴施加了减排要求，确保整个供应链符合其环保战略。

本章研究制造商主导下考虑数字化技术的供应链定价与减排决策，由于模型结构、模型假设及相关参数说明与 3.1 节保持一致，本章不再赘述，直接进行模型的求解与分析。

4.1 模型构建

4.1.1 无减排和数字化技术投入——MN 模型

供应链成员无减排和数字化技术投入，此时，制造商首先决定零售价格 p ，供应商随后决定批发价格 w 。供应商和制造商的利润函数分别如下：

$$\pi_s(w) = (w - c)Q \quad (4-1)$$

$$\pi_m(p) = (p - w)Q - c_e(aQ - K) \quad (4-2)$$

4.1.2 仅进行减排技术投入——MO 模型

仅制造商进行减排技术投入，此时，制造商首先决定产品零售价格 p 和碳减排率 r_m ，供应商随后决定批发价格 w 。供应商和制造商的利润函数分别如下：

$$\pi_s(w) = (w - c)Q \quad (4-3)$$

$$\pi_m(p, r_m) = (p - w)Q - c_e((a - br_m)Q - K) - \frac{1}{2}c_l r_m^2 \quad (4-4)$$

4.1.3 减排和数字化技术共同投入——MD 模型

供应商采用数字化技术而制造商进行减排技术投入，此时，供应商和制造商首先同时决定数字化技术投入水平 B_s 和碳减排率 r_m ，然后，制造商首先决定产品零售价格 p ，供应商随后决定批发价格 w 。供应商和制造商的利润函数分别如下：

$$\pi_s(w, B_s) = (w - c)Q - \frac{1}{2}hB_s^2 \quad (4-5)$$

$$\pi_m(p, r_m) = (p - w)Q - c_e((a - br_m - B_s t)Q - K) - \frac{1}{2}c_l r_m^2 \quad (4-6)$$

4.1.4 合作数字化减排——MC 模型

供应商和制造商合作数字化减排，此时，供应商和制造商依据总利润最大化原则共同决定数字化技术投入水平 B_s 和碳减排率 r_m 。然后，制造商决定产品零售价格 p ，供应商随之决定批发价格 w 。供应商和制造商的利润函数分别如下：

$$\pi_s(w) = (w - c)Q - \frac{1}{2}hB_s^2 \quad (4-7)$$

$$\pi_m(p) = (p - w)Q - c_e((a - br_m - B_s t)Q - K) - \frac{1}{2}c_l r_m^2 \quad (4-8)$$

供应链的总利润为：

$$\pi_{sc} = (p - c)Q - c_e((a - br_m - B_s t)Q - K) - \frac{1}{2}c_l r_m^2 - \frac{1}{2}hB_s^2 \quad (4-9)$$

根据逆向归纳法，求得四种模型下的最优决策和利润，具体如表 4-1 所示。

表 4-1 四种模型下的最优决策和利润

	MN 模型	MO 模型	MD 模型	MC 模型
B_s	——	——	$\frac{tc_e c_l A_1}{A_6}$	$\frac{3tc_e c_l A_1}{A_3}$

续表 4-1 四种模型下的最优决策和利润

	<i>MN</i> 模型	<i>MO</i> 模型	<i>MD</i> 模型	<i>MC</i> 模型
w	$\frac{1}{4}(D_0 + 3c - ac_e)$	$c + \frac{A_1 c_l}{4c_l - b^2 c_e^2}$	$c + \frac{2hc_l A_1}{A_6}$	$c + \frac{2hc_l A_1}{A_3}$
p	$\frac{1}{4}(3D_0 + c + ac_e)$	$D_0 - \frac{A_1 c_l}{4c_l - b^2 c_e^2}$	$c + \frac{2A_4 + A_5}{A_6} + \frac{(D_0 - c)t^2 c_e^2 c_l}{A_6}$	$c + \frac{3A_4 + A_5}{A_3} - \frac{(D_0 - c)t^2 c_e^2 c_l}{A_3}$
r_m	——	$\frac{bc_e A_1}{4c_l - b^2 c_e^2}$	$\frac{2hA_1(\beta + bc_e)}{A_6}$	$\frac{3hA_1(\beta + bc_e)}{A_3}$
Q	$\frac{1}{4}A_1$	$\frac{c_l A_1}{4c_l - b^2 c_e^2}$	$\frac{2hc_l A_1}{A_6}$	$\frac{2hc_l A_1}{A_3}$
π_s	$\frac{1}{16}A_1^2$	$\frac{A_1^2 c_l^2}{(4c_l - b^2 c_e^2)^2}$	$\frac{hA_1^2(8h - t^2 c_e^2)c_l^2}{2A_6^2}$	$\frac{hA_1^2(8h - 9t^2 c_e^2)c_l^2}{2A_3^2}$
π_m	$Kc_e + \frac{1}{8}A_1^2$	$Kc_e + \frac{A_1^2 c_l}{8c_l - 2b^2 c_e^2}$	$Kc_e + \frac{8h^2 A_1^2 c_l^2}{A_6^2} - \frac{(\beta + bc_e)^2 c_l}{A_6^2}$	$Kc_e + \frac{8h^2 A_1^2 c_l^2}{A_3^2} - \frac{9(\beta + bc_e)^2 c_l}{2A_3^2}$

4.2 结果分析

4.2.1 供应链成员减排方式和合作策略对最优决策和利润的影响

本节首先对最优结果进行对比分析, 探讨供应链成员减排方式和合作策略对最优决策和利润的影响, 可得命题 4.1-4.3。

命题 4.1 (1) $w^{MC*} > w^{MD*} > w^{MO*} > w^{MN*}$; (2) $p^{MN*} > p^{MO*}$; (3) 当 $c_l > \overline{c_{l16}}$ 时, 则 $p^{MD*} > p^{MC*}$, 反之, $p^{MD*} \leq p^{MC*}$; (4) 当 $c_l > \overline{c_{l12}}$ 时, $p^{MN*} > p^{MC*}$, 反之, $p^{MN*} \leq p^{MC*}$; (5) 当 $c_l > 2\overline{c_{l2}}$ 时, $p^{MN*} > p^{MD*}$, 反之, $p^{MN*} \leq p^{MD*}$; (6) 当 $0 < c_l < \overline{c_{l17}}$ 时或 $c_l > \overline{c_{l18}}$, $p^{MO*} > p^{MC*}$, 反之, $p^{MO*} \leq p^{MC*}$; (7) 当 $0 < c_l < \overline{c_{l19}}$ 或 $c_l > \overline{c_{l20}}$ 时, $p^{MO*} > p^{MD*}$, 反之, $p^{MO*} \leq p^{MD*}$ 。

命题 4.1 表明, 对比四个模型下的单位批发价格可知, *MC* 模型下的单位批

发价格最高， MN 模型下的单位批发价格最低，这是因为合作数字化减排时投入了减排和数字化技术，提高了效率和透明度，但同时增加了成本，导致批发价格上升。而不进行任何技术投入时，成本和价格较低。制造商在减排过程中通过技术创新或其他措施降低了生产成本，从而能够以更低的价格竞争。而在 MO 模型中，虽然制造商进行了减排技术投入，但由于没有数字化技术的支持，零售价格仍低于 N 模型。这可能是由于减排技术的投入在一定程度上提高了生产效率，降低了最终产品的零售价格。当制造商减排技术投入成本较高时，合作数字化减排的零售价格较不合作时的零售价格低。这表明通过合作进行数字化减排，双方可以分摊成本，提高效率，从而降低零售价格。相较于无额外减排技术投入情形（即模型 MN ），当制造商减排技术投入成本较高时，其会降低产品零售价格，反之，则会提升产品零售价格；因为此时，高额的减排成本使得制造商降低碳减排率，产品销量缩减，为扩大市场份额，制造商将降低产品销售价格。

由命题 3.1 可知，企业在决策技术投入时需权衡成本与收益。虽然数字化技术和减排技术都可能增加初期投入，但从长期来看，能否提高生产效率和市场竞争力是关键。供应链成员之间的合作可以显著降低成本，提高效率。通过共享资源和信息，双方能够共同应对市场挑战，特别是在面对高成本的减排技术时，合作模式提供了更具成本效益的解决方案。

命题 4.2 $Q^{MC*} > Q^{MD*} > Q^{MO*} > Q^{MN*}$ 。

命题 4.2 表明，在四种模型下， MN 模型市场需求最低， MC 模型市场需求最高，表明减排技术和数字化技术的引入均会降低产品碳排放量，提升产品市场需求，且合作减排对市场需求的刺激作用高于非合作减排。这是因为随着环保法规的日益严格和消费者对绿色产品需求的增加，减排技术的引入使得产品能够更好地符合市场要求，提升了市场竞争力。 MN 模型由于缺乏相关技术，无法满足这些要求，导致市场需求最低。数字化技术能够提升供应链的透明度和响应速度，增强消费者的信任感和购买意愿。合作数字化减排的高市场需求正是得益于这种技术的应用，使得产品在市场上的吸引力大大增强。供应商与制造商之间的合作不仅分摊了技术投入的成本，还通过协同效应提升了项目的有效性，从而进一步刺激了市场需求。这种模式表明，合作减排在提升市场需求方面具有显著优势。

命题 4.2 可知，企业应优先考虑投资减排和数字化技术，以提升产品的市场

竞争力和满足消费者的需求。结合可持续发展目标，技术投入应成为企业战略的重要组成部分。

命题 4.3 (1) $r_m^{MC*} > r_m^{MD*} > r_m^{MO*}$; (2) $B_s^{MC*} > B_s^{MD*}$ 。

命题 4.3 表明，*MC* 模型的碳减排率最高，*MO* 模型的碳减排率最低，这是因为供应商和制造商都同时采用了减排技术和数字化技术，这种协同作用不仅提高了技术的有效性，还促使资源的最优配置，从而实现了更高的碳减排率。数字化技术的应用使得生产过程更加精细化和高效，能够实时监测和调整排放，进一步推动碳减排。仅有制造商在进行减排技术的投入，而没有数字化技术的支持。这种单一的减排措施未能充分利用数字化所带来的优势，导致了碳减排率相对较低。双方合作时供应商的数字化技术投入水平始终高于非合作情形，因为合作减排促使供应商与制造商之间在数字化技术上的协同创新。通过合作，双方可以共同开发和实施新技术，从而提高投入的效率和效果。

命题 3.3 可知，企业应加强合作与投资数字化技术，以提升碳减排率和市场竞争力，实现可持续发展目标。

4.2.2 敏感性分析

将四个模型各最优决策和利润分别对相关参数求一阶偏导可得下列结论。

命题 4.4 (1) $\frac{\partial Q^{j*}}{\partial c} < 0$, $\frac{\partial \pi_s^{j*}}{\partial c} < 0$, $\frac{\partial \pi_m^{j*}}{\partial c} < 0$, 其中 $j = \{MN, MO, MD, MC\}$; (2) $\frac{\partial w^{MN*}}{\partial c} > 0$, 当 $c_l > \overline{c_{l21}}$ 时, $\frac{\partial w^{MO*}}{\partial c} > 0$, 反之, $\frac{\partial w^{MO*}}{\partial c} \leq 0$; $\frac{\partial p^{j*}}{\partial c} > 0$, 其中 $j = \{MN, MO\}$; (3) 当 $c_l > \overline{c_{l22}}$ 时, $\frac{\partial w^{MD*}}{\partial c} > 0$, 反之, $\frac{\partial w^{MD*}}{\partial c} \leq 0$; 当 $c_l > \overline{c_{l12}}$ 时, $\frac{\partial p^{MD*}}{\partial c} > 0$, 反之, $\frac{\partial p^{MD*}}{\partial c} \leq 0$; (4) 当 $c_l > 2\overline{c_{l11}}$ 时, $\frac{\partial w^{MC*}}{\partial c} > 0$, 反之, $\frac{\partial w^{MC*}}{\partial c} \leq 0$; 当 $c_l > \frac{3}{2}\overline{c_{l12}}$ 时, $\frac{\partial p^{MC*}}{\partial c} > 0$, 反之, $\frac{\partial p^{MC*}}{\partial c} \leq 0$ 。

命题 4.4 表明，在四种模型中，随着产品单位生产成本的上升，产品市场需求下降，导致供应商和制造商的利润减小。然而，产品批发价格和零售价格的变化与供应商的减排参与程度以及制造商的减排难度相关。当供应商不参与减排（即在模型 *MN* 和 *MO* 中），产品的零售价格会随着单位生产成本的增加而上升。而当供应商参与减排时，如果制造商面临较大的减排难度，且减排率较低，

未能有效激发市场需求，供应商和制造商就会为了维持产品的边际利润，随着单位生产成本的增加而提高各自的产品价格。

命题 4.4 可知，企业应重视生产成本与减排参与之间的关系，制定合理的定价策略，以维护利润并激励市场需求，从而实现可持续发展。

命题 4.5 (1) $\frac{\partial w^{j*}}{\partial c_l} < 0$, $\frac{\partial Q^{j*}}{\partial c_l} < 0$, $\frac{\partial \pi_s^{j*}}{\partial c_l} < 0$, 其中 $j = \{MO, MD, MC\}$; (2) $\frac{\partial p^{MO*}}{\partial c_l} > 0$, $\frac{\partial \pi_m^{MO*}}{\partial c_l} < 0$; (3) 当 $0 < h < \frac{2}{3}h_1$ 时, $\frac{\partial p^{MD*}}{\partial c_l} > 0$, 反之, $\frac{\partial p^{MD*}}{\partial c_l} \leq 0$; (4) 当 $0 < h < 2h_1$ 时, $\frac{\partial p^{MC*}}{\partial c_l} > 0$, 反之, $\frac{\partial p^{MC*}}{\partial c_l} \leq 0$; (5) 当 $c_l > \overline{c_{l23}}$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{MD*}}{\partial c_l} < 0$, 反之, $\frac{\partial \pi_m^{MD*}}{\partial c_l} \geq 0$; (6) 当 $c_l > \overline{c_{l24}}$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{MC*}}{\partial c_l} < 0$, 反之, $\frac{\partial \pi_m^{MC*}}{\partial c_l} \geq 0$ 。

命题 4.5 表明，在 MO 、 MD 、 MC 三种模型下，随着碳减排成本规模系数的增加，产品的单位批发价格和市场需求降低，供应商的利润也随之降低；但是，其产品零售价格和制造商利润的影响与供应商是否参与减排和数字化技术投入成本规模系数相关。当供应商不参与减排时（即模型 MO ），零售价格随着碳减排成本规模系数的增加而增加，产品制造商利润随着碳减排成本规模系数的增加而降低，这是因为随着碳减排成本规模系数的增加，制造商面临更高的生产成本。这些成本通常会被转嫁到零售价格上，以维持利润水平。因此，零售价格上升，随着碳减排成本规模系数的增加，制造商面临更高的生产成本。这些成本通常会被转嫁到零售价格上，以维持利润水平。因此，零售价格上升，但制造商的利润可能会受到挤压，因为他们的生产成本增加可能超过了零售价格的增长。这意味着制造商在提升价格的同时，销售量可能受到市场需求下降的影响，从而导致整体利润下降。供应商通过引入数字化技术参与减排对制造商利润的影响并不总是有利的；当制造商减排难度较小时（ $c_l \leq \min\{\overline{c_{l23}}, \overline{c_{l24}}\}$ ），产品制造商利润随着碳减排成本规模系数的增加而增加，当制造商减排难度较大时（ $c_l > \max\{\overline{c_{l23}}, \overline{c_{l24}}\}$ ），产品制造商利润随着碳减排成本规模系数的增加而降低，此时，应鼓励供应商参与减排。这是因为当制造商减排难度较小时，供应商的数字化投入能有效降低生产成本，从而提升制造商的利润，当制造商减排难度较大

时，尽管成本上升，但由于减排难度导致的市场需求下降，制造商无法有效转嫁成本。当供应商参与减排时，若供应商的数字化技术投入成本规模系数较小，产品零售价格随着碳减排成本规模系数的增加而增加；若供应商的数字化技术投入成本规模系数较大，产品零售价格随着碳减排成本规模系数的增加而降低，因为当供应商的数字化技术投入成本规模系数较小，意味着其投入相对较低，技术升级和减排措施能够在一定程度上吸收或消化这些成本。由于生产效率的提高和成本控制，供应商能够以较小的成本增加减排努力。尽管碳减排成本规模系数上升，产品零售价格仍然可能随之增加，因为供应商能够通过提高生产效率传递部分成本给消费者，同时维护利润水平。当数字化技术投入成本规模系数较大时，供应商的减排成本显著增加，可能导致整个供应链的成本上升。在这种情况下，制造商可能无法完全将这些增加的成本转嫁给消费者，因为高价格可能抑制市场需求。为了保持市场份额和竞争力，制造商可能被迫降低零售价格，以应对消费者的价格敏感性和市场竞争压力。这种情况下，即使碳减排成本规模系数增加，产品零售价格也可能随之降低。

命题 4.5 可知，企业应鼓励供应商提高数字化技术投入，以降低生产成本并提升利润，但需考虑市场需求的变化。

命题 4.6 (1) $\frac{\partial p^{j*}}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial w^{j*}}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial Q^{j*}}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial \pi_s^{j*}}{\partial \beta} > 0$, 其中 $j = \{MD, MC\}$;
 (2) 当 $c_l > \overline{c_{l23}}$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{MD*}}{\partial \beta} > 0$, 反之, $\frac{\partial \pi_m^{MD*}}{\partial \beta} \leq 0$; (3) 当 $c_l > \overline{c_{l24}}$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{MC*}}{\partial \beta} > 0$, 反之, $\frac{\partial \pi_m^{MC*}}{\partial \beta} \leq 0$ 。

命题 4.6 表明，当制造商和供应商均积极减排时，无论双方是否合作，随着消费者低碳偏好程度的增加总会提升产品零售价格、批发价格 and 市场需求，供应商的利润随之增加；但是，消费者低碳偏好程度对制造商利润的影响与碳减排成本规模系数相关。当碳减排成本规模系数较大时，制造商利润随着消费者低碳偏好程度的增加而增加；当碳减排成本规模系数较小时，制造商利润随着消费者低碳偏好程度的增加而降低。这是因为消费者低碳偏好程度对制造商利润的影响与碳减排成本规模系数相关。当碳减排成本规模系数较大时，制造商利润随着消费

者低碳偏好程度的增加而增加；当碳减排成本规模系数较小时，制造商利润随着消费者低碳偏好程度的增加而降低。当碳减排成本较低时，制造商在生产低碳产品时所需的额外投资和运营成本相对较小。在这种情境下，消费者的低碳偏好可能导致制造商在定价策略上面临压力，因为消费者对价格更为敏感，可能不愿支付更高的价格以购买低碳产品。随着低碳偏好的增加，制造商可能需降低价格以维持竞争力，导致利润下降。

命题 4.6 可知，企业在制定低碳战略时，应考虑碳减排成本的影响，以平衡消费者偏好与定价策略，从而最大化利润。

4.3 数值仿真分析

本节将通过数值仿真，进一步分析供应链成员减排方式和合作策略对成员利润的影响，同时，探讨碳交易价格对企业运营决策和消费者剩余的影响程度。参考文献[59,60,72]，其中相关参数的赋值如下： $c=100$ ， $D_0=180$ ， $a=6$ ， $b=0.2$ ， $K=300$ ， $t=0.1$ ， $\beta=0.8$ ， $h=40$ 和 $c_e=12$ 。

4.3.1 供应链成员减排方式和合作策略对利润的影响

由命题 1 可知，供应商和制造商的减排策略和合作策略会影响产品单位批发价格和零售价格，进而影响着双方利润，其影响如图 4-1 所示。

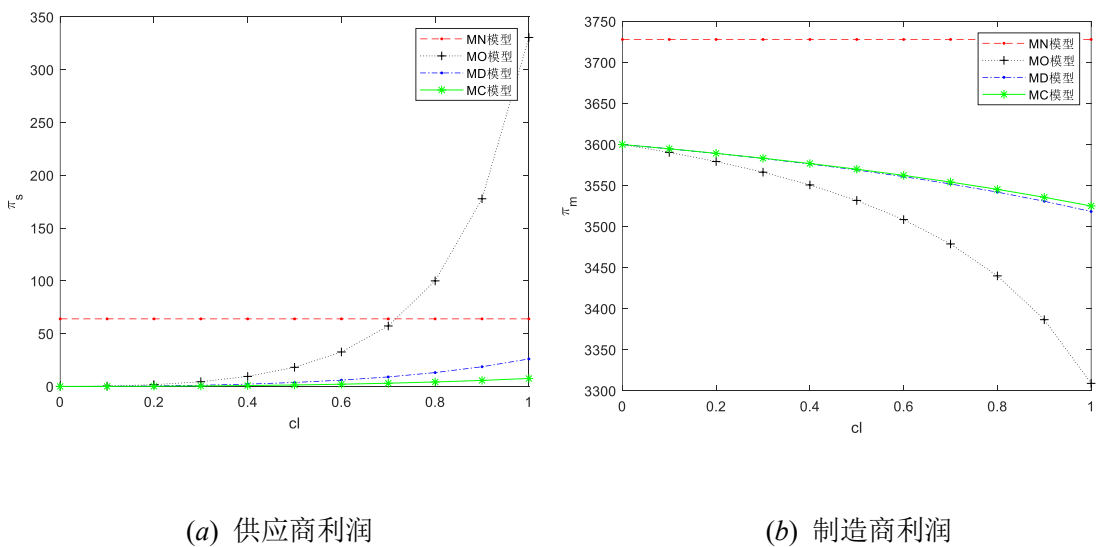


图 4-1 供应链成员减排方式和合作策略对利润的影响

图 4-1 表明，相较于无减排和数字化技术投入（ MN 模型），供应商和制造商进行减排和数字化技术投入会使得供应商利润有所提升，并且仅进行减排投入时的供应商利润在后期提升速度较快，这是因为减排投入能迅速满足消费者对低碳产品的需求，增强市场竞争力，同时降低运营成本，带来更高的销售额；而数字化技术的投入虽然也能提升效率，但通常需要较长时间才能实现收益。因此，单独进行减排投入时，供应商利润提升速度较快，能够快速适应市场变化并获取市场份额。非合作减排时供应商利润高于合作减排情形，而非合作减排时制造商利润低于合作减排情形。这是因为非合作减排时供应商可以独立决策并最大化自身利益，减少成本和风险，而不需共享收益或承担合作带来的不确定性；而制造商的利润则在合作减排情形下更高，因为合作可以实现资源的优化配置、共同承担减排成本并提高市场竞争力，从而增强整体盈利能力。因此，非合作减排对供应商更有利，但对制造商来说，合作减排则能更有效提升利润。而供应商和制造商进行减排和数字化技术投入会使得制造商利润有所下降，并且仅进行减排投入时的制造商利润在后期下降速度较快，这是因为减排和数字化转型需要较高的初期投资和运营成本，而这些费用在短期内可能无法通过销售增加来弥补。此外，单独进行减排投入时，制造商面临的市场压力和成本上升可能导致利润下降速度加快，因为减排措施可能未能及时提升产品竞争力或市场接受度，因此在后期利润下滑的风险更大。

由图 4-1 可知，企业在进行减排与数字化技术投入时需权衡利益分配与合作模式。供应商可通过独立减排快速提升利润，但制造商则应考虑合作以优化资源配置和降低风险，从而提升整体盈利能力。在减排和数字化转型过程中，制造商应关注初期投资和运营成本，确保措施能够及时提升市场竞争力，以应对市场压力并降低利润下滑风险。

4.3.2 碳交易价格对产品价格和需求的影响

政府实施碳交易政策的目的是为了减少碳排放，达到碳减排目标。碳交易价格作为碳交易市场的主要激励因素，通过调节其价格，可以影响供应链各成员的生产成本和产品定价，进而影响产品的市场需求。为分析碳交易价格对产品价格和需求的影响，令 $c_f=50$ ，图 4-2 展示了碳交易价格对产品价格和需求的影响。

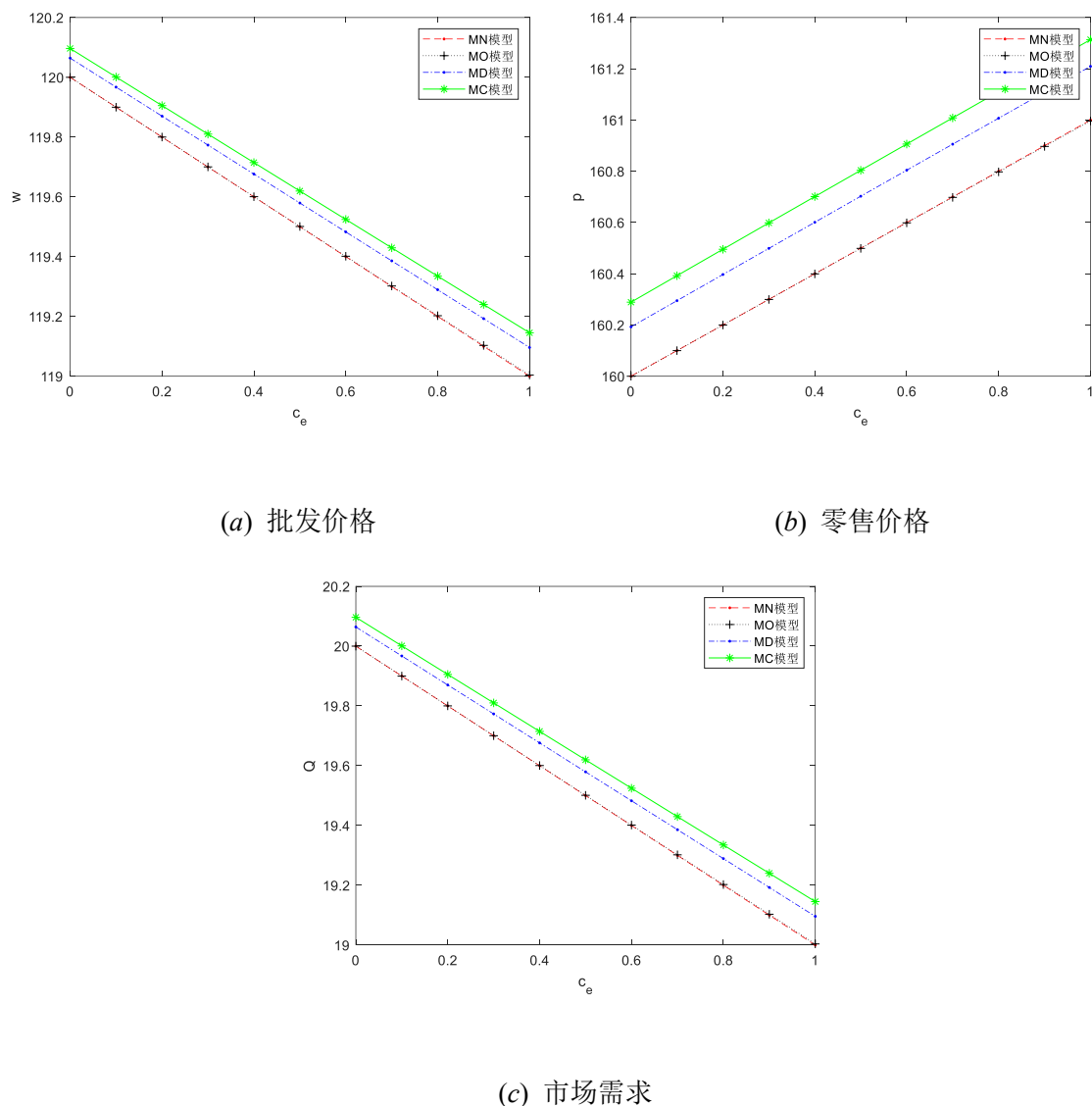


图 4-2 碳交易价格对产品价格和需求的影响

图 4-2 表明，无论供应链成员是否积极减排，随着碳交易价格的增加，产品批发价格 and 市场需求均降低，但零售价格增加，意味着高碳成本会增加生产成本，迫使批发商提高价格以维持利润，从而抑制市场需求。同时，零售价格增加主要是由于高碳成本传递至终端消费者，导致制造商在应对成本上升时不得不提高售价。整体上，虽然批发价格和需求降低，但零售价格因成本转嫁而上涨，形成这一矛盾现象。

由图 4-2 可知，企业需关注碳交易价格的波动对成本和供需关系的影响，采取有效战略，优化生产和定价，以在高碳成本环境中保持竞争力，满足市场需求，保障盈利。

4.3.3 碳交易价格对碳减排率和总碳排放量的影响

本节进一步分析了碳交易价格对碳减排率和总碳排放量的影响，具体如下图4-3所示。

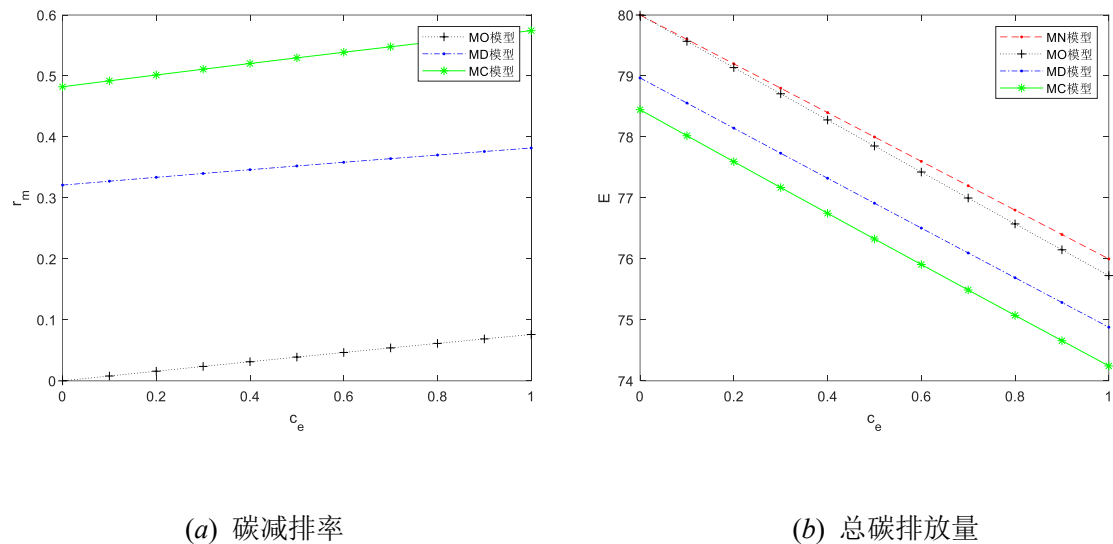


图 4-3 碳交易价格对碳减排率和总碳排放量的影响

图 4-3 表明，无论供应链成员是否积极减排，随着碳交易价格的增加，碳减排率逐渐增加，这是由于高碳成本迫使企业更注重碳排放管理，以降低自身的碳交易费用。企业为了应对不断上升的成本，往往会加大对减排技术和可持续实践的投资，从而推动整体减排率的提升。此趋势促使企业在生产和运营过程中更加积极地采取减排措施，以符合越来越严格的环境标准。随着碳交易价格的增加，总碳排放量逐渐下降，合作减排时的总碳排放量最少。这是因为高碳成本促使企业采取减排措施以降低自身碳排放，进而减少碳交易费用。在合作减排情形下，供应链成员能够共享信息、资源和技术，从而实现更高效的减排策略，优化整体生产流程，进一步降低总碳排放量。因此，合作减排能够有效整合各方优势，使得总碳排放量降至最低。

由图 4-3 可知，企业应关注碳交易价格的变化，积极投资于减排技术和可持续实践，以应对高碳成本。提高碳减排率，降低碳交易费用，增强市场竞争力，符合环境标准，提升品牌形象，从而在日益严格的环保政策中占据有利位置。

4.3.4 碳交易价格对消费者剩余和社会总福利的影响

参考文献[67]，在传统供应链中，消费者剩余函数为 $CS = \frac{(D_0 - p)^2}{2}$ ，在采用数字化技术中，消费者剩余为 $CS = \frac{(D_0 - p + \beta r_m)^2}{2}$ 。参考文献[68,69]，社会总福利为消费者剩余与供应链总利润之和，即 $SW = CS + \pi_s + \pi_m$ 。碳交易价格对消费者剩余和社会总福利的影响如下图 4-4 所示。

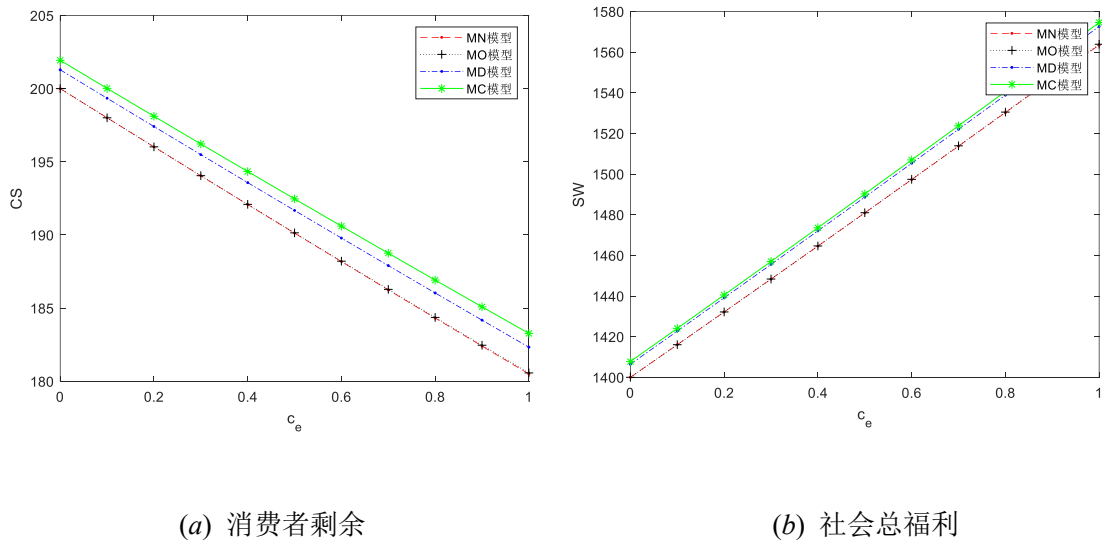


图 4-4 碳交易价格对消费者剩余和社会总福利的影响

图 4-4 表明，无论供应链成员是否积极减排，随着碳交易价格的增加，消费者剩余逐渐下降，采用数字化技术后，合作减排时的消费者剩余高于非合作减排。这是因为碳成本的增加最终会转嫁给消费者，导致产品价格上升；而采用数字化技术后，合作减排能够提高资源利用效率和产品质量，从而降低生产成本，增加市场供给，缓解价格上涨的压力。这使得在合作减排情形下，消费者能够享受更具竞争力的价格和更高的产品价值，进而提升消费者剩余，相较于非合作减排更具优势。社会总福利随着碳交易价格的增加而增加，合作减排时的社会总福利最高，主要因为高碳价格促使制造商内化碳排放的外部成本，从而激励他们投资于更清洁的生产技术和效率更高的流程。此外，制造商之间的合作减排能够促进技术共享和最佳实践的实施，降低成本并提高整体减排效率，使得各方在减排过程中受益。最终，这种合作不仅有效减少了温室气体排放，还推动了产业的可持续

发展，最大化了社会总福利。

由图 4-4 可知，企业在面对碳交易价格上升时，应积极采用数字化技术与合作减排策略，以降低生产成本和提升产品竞争力。通过合作，供应链成员可以优化资源配置，缓解价格上涨带来的消费者剩余下降压力，从而提高市场吸引力。此外，企业还需积极适应碳交易政策，通过投资低碳技术和促进企业间合作减排，以最大化社会总福利和提升竞争力。

4.4 本章小结

本章针对一个由供应商和制造商构成的低碳供应链，探究在制造商主导下碳交易政策和数字化技术对供应链定价决策与碳减排策略的影响，主要研究结论如下：(1)合作减排时的单位批发价格、市场需求以及碳减排率最高，而不进行任何技术投入时单位批发价格和市场需求最低，当制造商减排技术投入成本较高时，其会降低产品零售价格，反之，则会提升产品零售价格。(2)单位生产成本和碳减排成本规模系数皆逆向影响低碳供应链市场需求和供应商利润，而消费者的低碳偏好程度正向影响低碳供应链市场需求和供应商利润。(3)无论供应链成员是否积极减排，碳减排率随着碳交易价格的增加而增加，总碳排放量和消费者剩余随之减少，采用数字化技术后合作减排时的总碳排放量最少以及消费者剩余和社会总福利高于非合作减排。

依据上述结论可得到如下管理启示：(1)企业应优先考虑合作减排，以达到更高的单位批发价格和市场需求。同时，需评估减排技术投入的成本效益。当技术投入成本较高时，可以适当降低零售价格以刺激需求；反之，保持零售价格适度提升以保证利润。(2)企业需关注消费者的低碳偏好，利用这一趋势提升市场需求和供应商利润。同时，应控制单位生产成本和碳减排成本，以优化市场竞争力，确保在低碳供应链中获得更好的经济效益。(3)企业应积极应对碳交易价格的变化，通过采用数字化技术和合作减排策略，降低总碳排放量，提升消费者剩余。这不仅有助于符合环保政策，也能在竞争中保持优势。

第 5 章 双方权力对等下考虑数字化技术的供应链定价与减排决策研究

前两章研究了供应商和制造商主导下考虑数字化技术的供应链定价与减排决策研究，然而，随着供应链内部的博弈关系以及权力结构的变化，还有双方权力对等的情况，如耐克与棉花供应商建立了对等的合作关系，双方共同关注碳排放和可持续性。耐克利用区块链和物联网技术跟踪棉花的来源和生产过程，确保其满足严格的碳排放标准。在这一合作中，耐克与供应商共同设定可持续发展目标，并根据碳足迹数据调整定价策略。本章研究双方权力对等下考虑数字化技术的供应链定价与减排决策，由于模型结构、模型假设及相关参数说明与 3.1 节保持一致，本章不再赘述，直接进行模型的求解与分析。

5.1 模型构建

5.1.1 无减排和数字化技术投入——BN 模型

供应链成员无减排和数字化技术投入，此时，供应商与制造商相互独立，独立决策，供应商决定批发价格 w ，制造商决定零售价格 p 。供应商和制造商的利润函数分别如下：

$$\pi_s(w) = (w - c)Q \quad (5-1)$$

$$\pi_m(p) = (p - w)Q - c_e(aQ - K) \quad (5-2)$$

5.1.2 仅进行减排技术投入——BO 模型

仅制造商进行减排技术投入，此时，供应商决定批发价格 w ，制造商决定产品零售价格 p 和碳减排率 r_m 。供应商和制造商的利润函数分别如下：

$$\pi_s(w) = (w - c)Q \quad (5-3)$$

$$\pi_m(p, r_m) = (p - w)Q - c_e((a - br_m)Q - K) - \frac{1}{2}c_l r_m^2 \quad (5-4)$$

5.1.3 减排和数字化技术共同投入——BD 模型

供应商采用数字化技术而制造商进行减排技术投入，此时，供应商和制造商首先同时决定数字化技术投入水平 B_s 和碳减排率 r_m ，然后，供应商决定批发价格 w ，制造商决定零售价格 p 。供应商和制造商的利润函数分别如下：

$$\pi_s(w, B_s) = (w - c)Q - \frac{1}{2}hB_s^2 \quad (5-5)$$

$$\pi_m(p, r_m) = (p - w)Q - c_e((a - br_m - B_s t)Q - K) - \frac{1}{2}c_l r_m^2 \quad (5-6)$$

5.1.4 合作数字化减排——BC 模型

供应商和制造商合作数字化减排，此时，供应商和制造商依据总利润最大化原则共同决定数字化技术投入水平 B_s 和碳减排率 r_m 。然后，供应商决定批发价格 w ，制造商决定零售价格 p 。供应商和制造商的利润函数分别如下：

$$\pi_s(w) = (w - c)Q - \frac{1}{2}hB_s^2 \quad (5-7)$$

$$\pi_m(p) = (p - w)Q - c_e((a - br_m - B_s t)Q - K) - \frac{1}{2}c_l r_m^2 \quad (5-8)$$

供应链的总利润为：

$$\pi_{sc} = (p - c)Q - c_e((a - br_m - B_s t)Q - K) - \frac{1}{2}c_l r_m^2 - \frac{1}{2}hB_s^2 \quad (5-9)$$

根据逆向归纳法，求得四种模型下的最优决策和利润，具体如表 5-1 所示。

表 5-1 四种模型下的最优决策和利润

	BN 模型	BO 模型	BD 模型	BC 模型
B_s	——	——	$\frac{2tc_e c_l A_1}{A_7}$	$\frac{4tc_e c_l A_1}{A_8}$
w	$\frac{1}{3}(D_0 + 2c - ac_e)$	$c + \frac{A_1 c_l}{3c_l - b^2 c_e^2}$	$c + \frac{3hc_l A_1}{A_7}$	$c + \frac{3hc_l A_1}{A_8}$

续表 5-1 四种模型下的最优决策和利润

	BN 模型	BO 模型	BD 模型	BC 模型
p	$\frac{1}{3}(2D_0 + c + ac_e)$	$D_0 - \frac{A_1 c_l}{3c_l - b^2 c_e^2}$	$c + \frac{2A_4 + A_5}{A_7} + \frac{ahc_l c_e}{A_7}$	$c + \frac{4A_4 + A_5}{A_8} + \frac{(ahc_e - 2(D_0 - c)t^2 c_e^2)c_l}{A_8}$
r_m	——	$\frac{bc_e A_1}{3c_l - b^2 c_e^2}$	$\frac{2hA_1(\beta + bc_e)}{A_7}$	$\frac{4hA_1(\beta + bc_e)}{A_8}$
Q	$\frac{1}{3}A_1$	$\frac{c_l A_1}{3c_l - b^2 c_e^2}$	$\frac{3hc_l A_1}{A_7}$	$\frac{2hc_l A_1}{A_8}$
π_s	$\frac{1}{9}A_1^2$	$\frac{A_1^2 c_l^2}{(3c_l - b^2 c_e^2)^2}$	$\frac{hA_1^2(9h - 2t^2 c_e^2)c_l^2}{2A_7^2}$	$\frac{hA_1^2(9h - 8t^2 c_e^2)c_l^2}{2A_8^2}$
π_m	$Kc_e + \frac{1}{9}A_1^2$	$Kc_e + \frac{A_1^2(2c_l - b^2 c_e^2)c_l}{2(3c_l - b^2 c_e^2)^2}$	$Kc_e + \frac{9h^2 A_1^2 c_l^2}{A_7^2} - \frac{2(\beta + bc_e)^2 c_l}{A_7^2}$	$Kc_e + \frac{9h^2 A_1^2 c_l^2}{2A_8^2} - \frac{4(\beta + bc_e)^2 c_l}{A_8^2}$

5.2 结果分析

5.2.1 供应链成员减排方式和合作策略对最优决策和利润的影响

本节首先对最优结果进行对比分析,探讨供应链成员减排方式和合作策略对最优决策和利润的影响,可得命题 5.1-5.3。

命题 5.1 (1) $w^{BC*} > w^{BD*}$, $w^{BO*} > w^{BN*}$, 当 $c_l > \overline{c_{l25}}$ 时, $w^{BD*} > w^{BO*}$, 反之, $w^{BD*} \leq w^{BO*}$; (2) $p^{BN*} > p^{BO*}$; (3) $c_l > \overline{c_{l26}}$, $p^{BD*} > p^{BC*}$, 反之, $p^{BD*} \leq p^{BC*}$; (4) $c_l > \overline{c_{l26}}$, $p^{BN*} > p^{BC*}$, 反之, $p^{BN*} \leq p^{BC*}$; (5) $c_l > \overline{c_{l26}}$, $p^{BN*} > p^{BD*}$, 反之, $p^{BN*} \leq p^{BD*}$; (6) 当 $0 < c_l < \overline{c_{l27}}$ 或 $c_l > \overline{c_{l28}}$ 时, $p^{BO*} > p^{BC*}$, 反之, $p^{BO*} \leq p^{BC*}$; (7) 当 $0 < c_l < \overline{c_{l29}}$ 或 $c_l > \overline{c_{l30}}$ 时, $p^{BO*} > p^{BD*}$, 反之, $p^{BO*} \leq p^{BD*}$ 。

命题 5.1 表明, 合作减排时的批发价格高于不合作, 进行减排技术投入时的批发价格高于没有任何减排投入的情况, 但单位零售价格较低, 对比 BD 模型和 BO 模型, 当制造商减排难度较大时, 投入数字化技术时的批发价格较高, 而当

制造商减排难度较小时，投入数字化技术时的批发价格较低，这是因为合作需要双方共同承担减排投资和相关成本，这些额外的成本往往会被转嫁到批发价格中。此外，合作可以提高产品的市场需求，进而推动批发价格的上涨。减排技术的投资需要一定的资金和资源，制造商为了弥补这些投入所带来的成本，通常会提高批发价格。同时，投入数字化技术可能提升生产效率和产品质量，但初期的投资仍会影响批发价格。当制造商面临较大的减排难度时，投入数字化技术的成本较高，这会导致批发价格上升。制造商在这种情况下可能会将风险溢价纳入零售价格，以抵消高成本的压力。这种情况下，权力对等的关系使得供应商在面对较高的批发价格时，可能会选择不接受，导致制造商需要进一步考虑供应商的反应。当制造商减排难度较小时，投入数字化技术相对容易，所需的成本较低，批发价格则可能降低。此时，制造商能够更灵活地调节价格，以吸引供应商和消费者，进而提升市场竞争力。当制造商面临较大的减排难度时，投入数字化技术的成本较高，这会导致批发价格上升。制造商在这种情况下可能会将风险溢价纳入零售价格，以抵消高成本的压力。这种情况下，权力对等的关系使得供应商在面对较高的批发价格时，可能会选择不接受，导致制造商需要进一步考虑供应商的反应。当制造商减排难度较小时，投入数字化技术相对容易，所需的成本较低，批发价格则可能降低。此时，制造商能够更灵活地调节价格，以吸引供应商和消费者，进而提升市场竞争力。当制造商减排技术投入成本较高时，合作数字化减排的零售价格较不合作时的零售价格低。这表明通过合作进行数字化减排，双方可以分摊成本，提高效率，从而降低零售价格。相较于无额外减排技术投入情形（即模型 BN ），当制造商减排技术投入成本较高时，其会降低产品零售价格，反之，则会提升产品零售价格；因为此时，高额的减排成本使得制造商降低碳减排率，产品销量缩减，为扩大市场份额，制造商将降低产品销售价格。

由命题 5.1 可知，在合作减排和数字化技术投入时，制造商需权衡成本与价格策略。高成本可通过合作分摊，提升市场需求并降低零售价格。面对减排难度，制造商应灵活调整批发和零售价格，以吸引供应商与消费者，增强市场竞争力。有效的合作和技术投入有助于实现可持续发展与经济效益的双赢。

命题 5.2 $Q^{BC*} > Q^{BD*}$, $Q^{BO*} > Q^{BN*}$, 当 $c_l > \overline{c_{l25}}$ 时, $Q^{BD*} > Q^{BO*}$, 反之 $Q^{BD*} \leq Q^{BO*}$ 。

命题 5.2 表明，合作减排时的市场需求高于不合作，进行减排技术投入时的

市场需求高于没有任何减排投入的情况，当制造商减排难度较大时，投入数字化技术时的市场需求较高，而当制造商减排难度较小时，投入数字化技术时的市场需求较低。这是因为合作可以降低成本和风险，共同承担减排投资，从而吸引更多消费者。然而，当制造商面临较大的减排难度时，投入数字化技术时的市场需求较高，因为这种技术提高了生产效率和产品的低碳属性，满足了消费者对环保产品的偏好。相反，当减排难度较小时，投入数字化技术时的市场需求可能较低，可能是因为消费者对低碳产品的偏好不再是主要驱动因素，因此市场需求受到影响。

命题 5.2 可知，政府应积极推动相关政策以支持低碳技术创新，助力企业在市场竞争中取得优势。

命题 5.3 (1) $r_m^{BC*} > r_m^{BD*} > r_m^{BO*}$; (2) $B_s^{BC*} > B_s^{BD*}$ 。

命题 5.3 表明， BC 模型的碳减排率最高， BO 模型的碳减排率最低，这是因为供应商和制造商都同时采用了减排技术和数字化技术，这种协同作用不仅提高了技术的有效性，还促使资源的最优配置，从而实现了更高的碳减排率。数字化技术的应用使得生产过程更加精细化和高效，能够实时监测和调整排放，进一步推动碳减排。仅有制造商在进行减排技术的投入，而没有数字化技术的支持。这种单一的减排措施未能充分利用数字化所带来的优势，导致了碳减排率相对较低。双方合作时供应商的数字化技术投入水平始终高于非合作情形，因为合作减排促使供应商与制造商之间在数字化技术上的协同创新。通过合作，双方可以共同开发和实施新技术，从而提高投入的效率和效果。

命题 5.3 可知，企业应加强合作与投资数字化技术，以提升减排效率和市场竞争力，实现可持续发展目标。

5.2.2 敏感性分析

将四个模型各最优决策和利润分别对相关参数求一阶偏导可得下列结论。

命题 5.4 (1) $\frac{\partial Q^{j*}}{\partial c} < 0$, $\frac{\partial \pi_s^{j*}}{\partial c} < 0$, $\frac{\partial \pi_m^{j*}}{\partial c} < 0$, 其中 $j = \{BN, BO, BD, BC\}$; (2) $\frac{\partial w^{BN*}}{\partial c} > 0$, 当 $c_l > \frac{3}{2}\overline{c_{l21}}$ 时, $\frac{\partial w^{BO*}}{\partial c} > 0$, 反之, $\frac{\partial w^{BO*}}{\partial c} \leq 0$; $\frac{\partial p^{j*}}{\partial c} > 0$, 其中 $j = \{BN, BO\}$; (3) 当 $c_l > \overline{c_{l22}}$ 时, $\frac{\partial w^{BD*}}{\partial c} > 0$, 反之, $\frac{\partial w^{BD*}}{\partial c} \leq 0$; 当 $c_l > \frac{2}{3}\overline{c_{l12}}$ 时, $\frac{\partial p^{BD*}}{\partial c} > 0$, 反之, $\frac{\partial p^{BD*}}{\partial c} \leq 0$; (4)

当 $c_l > \overline{c_{l31}}$ 时, $\frac{\partial w^{BC*}}{\partial c} > 0$, 反之, $\frac{\partial w^{BC*}}{\partial c} \leq 0$; 当 $c_l > \frac{4}{3}\overline{c_{l12}}$ 时, $\frac{\partial p^{BC*}}{\partial c} > 0$, 反之, $\frac{\partial p^{BC*}}{\partial c} \leq 0$ 。

命题 5.4 表明, 在四种模型中, 随着产品单位生产成本的上升, 产品市场需求下降, 导致供应商和制造商的利润减小。然而, 产品批发价格和零售价格的变化与供应商的减排参与程度以及制造商的减排难度相关。当供应商不参与减排 (即在模型 BN 和 BO 中), 产品的零售价格会随着单位生产成本的增加而上升。而当供应商参与减排时, 如果制造商面临较大的减排难度, 且减排率较低, 未能有效激发市场需求, 供应商和制造商就会为了维持产品的边际利润, 随着单位生产成本的增加而提高各自的产品价格。

命题 5.4 可知, 企业应重视生产成本与减排参与之间的关系, 制定合理的定价策略, 以维护利润并激励市场需求, 从而实现可持续发展。

命题 5.5 (1) $\frac{\partial w^{j*}}{\partial c_l} < 0$, $\frac{\partial Q^{j*}}{\partial c_l} < 0$, $\frac{\partial \pi_s^{j*}}{\partial c_l} < 0$, 其中 $j = \{BO, BD, BC\}$; (2) $\frac{\partial p^{BO*}}{\partial c_l} > 0$, 当 $c_l > 3\overline{c_{l21}}$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{BO*}}{\partial c_l} < 0$, 反之, $\frac{\partial \pi_m^{BO*}}{\partial c_l} \geq 0$; (3) 当 $0 < h < h_5$ 时, $\frac{\partial p^{BD*}}{\partial c_l} > 0$, 反之, $\frac{\partial p^{BD*}}{\partial c_l} \leq 0$; (4) 当 $0 < h < 2h_5$ 时, $\frac{\partial p^{BC*}}{\partial c_l} > 0$, 反之, $\frac{\partial p^{BC*}}{\partial c_l} \leq 0$; (5) 当 $c_l > \overline{c_{l32}}$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{BD*}}{\partial c_l} < 0$, 反之, $\frac{\partial \pi_m^{BD*}}{\partial c_l} \geq 0$; (6) 当 $c_l > \overline{c_{l33}}$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{BC*}}{\partial c_l} < 0$, 反之, $\frac{\partial \pi_m^{BC*}}{\partial c_l} \geq 0$ 。

命题 5.5 表明, 在 BO 、 BD 、 BC 三种模型下, 随着碳减排成本规模系数的增加, 产品的单位批发价格 and 市场需求降低, 供应商的利润也随之降低; 但是, 其对产品零售价格和制造商利润的影响与供应商是否参与减排和数字化技术投入成本规模系数相关。当供应商不参与减排时 (即模型 BO), 零售价格随着碳减排成本规模系数的增加而增加, 当减排难度较大时, 产品制造商利润随着碳减排成本规模系数的增加而降低, 这是因为制造商需要将更高的减排成本转嫁给消费者, 以保持其利润水平, 提高了零售价格, 在减排难度较大的情况下, 市场竞争可能变得更加激烈。制造商可能无法完全将成本转嫁给消费者, 因为其他竞争者可能提供相似产品且价格更具竞争力。这使得制造商在定价策略上受到制约, 无法实现预期的利润增长。供应商通过引入数字化技术参与减排对制造商利润的影响并不总是有利的; 当制造商减排难度较小时 ($c_l \leq \min\{\overline{c_{l32}}, \overline{c_{l33}}\}$), 产品制造商

利润随着碳减排成本规模系数的增加而增加，当制造商减排难度较大时（ $c_l > \max\{\overline{c_{132}}, \overline{c_{133}}\}$ ），产品制造商利润随着碳减排成本规模系数的增加而降低，此时，应鼓励供应商参与减排。这是因为当制造商减排难度较小时，供应商的数字化投入能有效降低生产成本，从而提升制造商的利润，当制造商减排难度较大时，尽管成本上升，但由于减排难度导致的市场需求下降，制造商无法有效转嫁成本。当供应商参与减排时，若供应商的数字化技术投入成本规模系数较小，产品零售价格随着碳减排成本规模系数的增加而增加；若供应商的数字化技术投入成本规模系数较大，产品零售价格随着碳减排成本规模系数的增加而降低，因为当供应商的数字化技术投入成本规模系数较小，意味着其投入相对较低，技术升级和减排措施能够在一定程度上吸收或消化这些成本。由于生产效率的提高和成本控制，供应商能够以较小的成本增加减排努力。尽管碳减排成本规模系数上升，产品零售价格仍然可能随之增加，因为供应商能够通过提高生产效率传递部分成本给消费者，同时维护利润水平。当数字化技术投入成本规模系数较大时，供应商的减排成本显著增加，可能导致整个供应链的成本上升。在这种情况下，制造商可能无法完全将这些增加的成本转嫁给消费者，因为高价格可能抑制市场需求。为了保持市场份额和竞争力，制造商可能被迫降低零售价格，以应对消费者的价格敏感性和市场竞争压力。这种情况下，即使碳减排成本规模系数增加，产品零售价格也可能随之降低。

命题 5.5 可知，企业应考虑供应商的减排和数字化投入情况，以优化定价策略和维护竞争力。

命题 5.6 (1) $\frac{\partial w^{j*}}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial Q^{j*}}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial \pi_s^{j*}}{\partial \beta} > 0$, 其中 $j = \{BD, BC\}$; (2) 当 $h > h_6$, 若 $c_l > \overline{c_{134}}$, $\frac{\partial p^{BD*}}{\partial \beta} > 0$, 反之, $\frac{\partial p^{BD*}}{\partial \beta} \leq 0$, 当 $0 < h < h_6$ 时, $\frac{\partial p^{BD*}}{\partial \beta} < 0$; (3) 当 $h > 2h_6$, 若 $c_l > \overline{c_{135}}$, $\frac{\partial p^{BC*}}{\partial \beta} > 0$, 反之, $\frac{\partial p^{BC*}}{\partial \beta} \leq 0$, 当 $0 < h < 2h_6$ 时, $\frac{\partial p^{BC*}}{\partial \beta} < 0$; (4) 当 $c_l > \overline{c_{132}}$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{BD*}}{\partial \beta} > 0$, 反之, $\frac{\partial \pi_m^{BD*}}{\partial \beta} \leq 0$; (5) 当 $c_l > \overline{c_{133}}$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{BC*}}{\partial \beta} > 0$, 反之, $\frac{\partial \pi_m^{BC*}}{\partial \beta} \leq 0$ 。

命题 5.6 表明，当制造商和供应商均积极减排时，无论双方是否合作，随着

消费者低碳偏好程度的增加总会提升产品批发价格 and 市场需求, 供应商的利润随之增加; 若供应商的数字化技术投入成本较低或制造商的减排投入成本较低, 零售价格随着消费者低碳偏好程度的增加而降低, 若当供应商的数字化技术投入成本较高且双方的技术投入均较高时, 零售价格随着消费者低碳偏好程度的增加而增加, 这是因为当供应商的数字化技术投入成本较低或制造商的减排投入成本较低时, 企业能够通过提高生产效率和降低成本来应对消费者对低碳产品的需求。这种情况下, 零售价格可以随着消费者低碳偏好程度的增加而降低, 因为企业愿意通过降低价格来吸引更多的低碳偏好消费者, 从而扩大市场份额。然而, 当供应商的数字化技术投入成本较高且双方的技术投入均较高时, 企业面临着较大的成本压力。在这种情况下, 尽管消费者对低碳产品的偏好增加, 但由于高昂的技术投入和减排成本, 企业可能无法有效地降低零售价格以吸引消费者。相反, 为了维持利润水平, 企业可能需要提高零售价格。这意味着在高成本环境下, 企业更倾向于将部分成本转嫁给消费者, 以保持其财务稳定性, 导致零售价格随着消费者低碳偏好的增加而上升。

但是, 消费者低碳偏好程度对制造商利润的影响与碳减排成本规模系数相关。当碳减排成本规模系数较大时, 制造商利润随着消费者低碳偏好程度的增加而增加; 当碳减排成本规模系数较小时, 制造商利润随着消费者低碳偏好程度的增加而降低。这是因为消费者低碳偏好程度对制造商利润的影响与碳减排成本规模系数相关。当碳减排成本规模系数较大时, 制造商利润随着消费者低碳偏好程度的增加而增加; 当碳减排成本规模系数较小时, 制造商利润随着消费者低碳偏好程度的增加而降低。当碳减排成本较低时, 制造商在生产低碳产品时所需的额外投资和运营成本相对较小。在这种情境下, 消费者的低碳偏好可能导致制造商在定价策略上面临压力, 因为消费者对价格更为敏感, 可能不愿支付更高的价格以购买低碳产品。随着低碳偏好的增加, 制造商可能需降低价格以维持竞争力, 导致利润下降。

命题 5.6 可知, 企业在应对消费者低碳偏好时需综合考虑成本结构。低碳技术投入成本较低时, 降低零售价格可吸引更多消费者, 增加市场份额; 而高成本环境下则需谨慎定价, 以维护利润。

5.3 数值仿真分析

本节将通过数值仿真,进一步分析供应链成员减排方式和合作策略对成员利润的影响,同时,探讨碳交易价格对企业运营决策和消费者剩余的影响程度。参考文献[59,60,72],其中相关参数的赋值如下: $c=100$, $D_0=200$, $a=6$, $b=0.2$, $K=300$, $t=0.1$, $\beta=0.8$, $h=18$ 和 $c_e=12$ 。

5.3.1 供应链成员减排方式和合作策略对利润的影响

由命题 1 可知,供应商和制造商的减排策略和合作策略会影响产品单位批发价格和零售价格,进而影响着双方利润,其影响如图 5-1 所示。

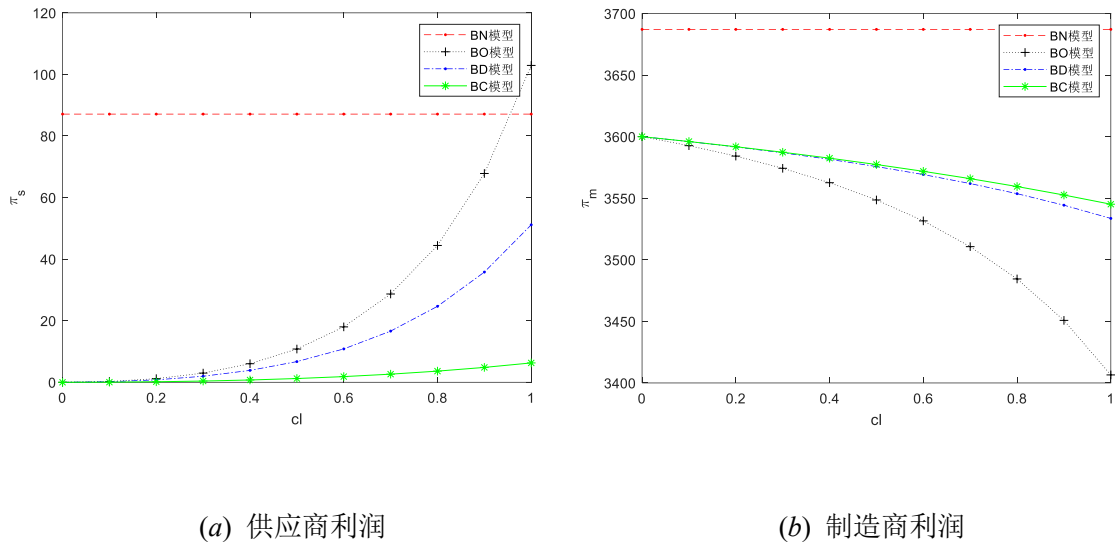


图 5-1 供应链成员减排方式和合作策略对利润的影响

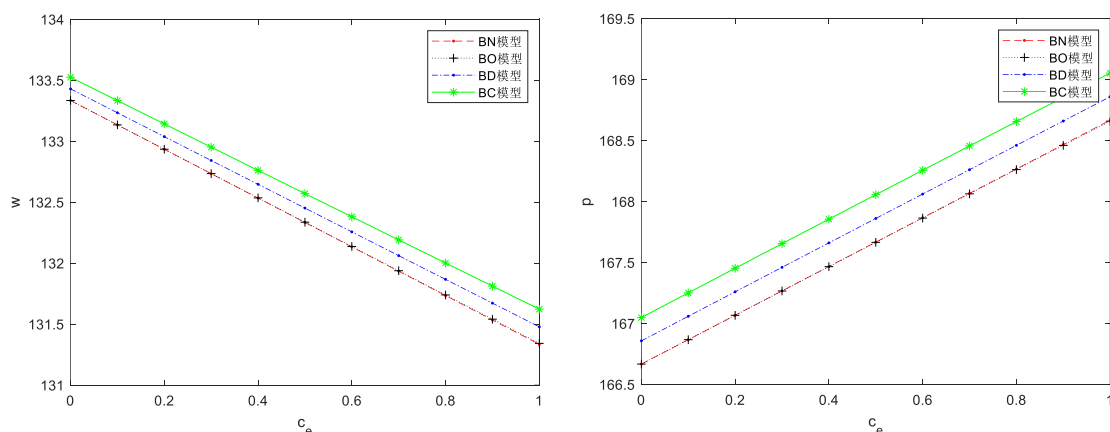
图 5-1 表明,相较于无减排和数字化技术投入 (MN 模型), 供应商和制造商进行减排和数字化技术投入会使得供应商利润有所提升,并且仅进行减排投入时的供应商利润在后期提升速度较快,这是因为减排投入能迅速满足消费者对低碳产品的需求,增强市场竞争力,同时降低运营成本,带来更高的销售额;而数字化技术的投入虽然也能提升效率,但通常需要较长时间才能实现收益。因此,单独进行减排投入时,供应商利润提升速度较快,能够快速适应市场变化并获取市场份额。非合作减排时供应商利润高于合作减排情形,而非合作减排时制造商利润低于合作减排情形。这是因为非合作减排时供应商可以独立决策并最大化自

身利益，减少成本和风险，而不需共享收益或承担合作带来的不确定性；而制造商的利润则在合作减排情形下更高，因为合作可以实现资源的优化配置、共同承担减排成本并提高市场竞争力，从而增强整体盈利能力。因此，非合作减排对供应商更有利，但对制造商来说，合作减排则能更有效提升利润。而供应商和制造商进行减排和数字化技术投入会使得制造商利润有所下降，并且仅进行减排投入时的制造商利润在后期下降速度较快，这是因为减排和数字化转型需要较高的初期投资和运营成本，而这些费用在短期内可能无法通过销售增加来弥补。此外，单独进行减排投入时，制造商面临的市场压力和成本上升可能导致利润下降速度加快，因为减排措施可能未能及时提升产品竞争力或市场接受度，因此在后期利润下滑的风险更大。

由图 5-1 可知，供应商应优先进行减排投入，以快速提升利润并适应市场需求；而制造商在合作减排中可实现更高利润，通过资源优化和风险共担提升竞争力。虽然数字化技术提升效率，但初期投资大，需谨慎评估。

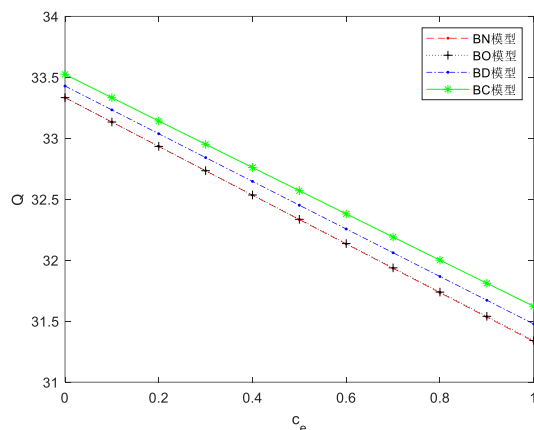
5.3.2 碳交易价格对产品价格和需求的影响

政府实施碳交易政策的目的是为了减少碳排放，达到碳减排目标。碳交易价格作为碳交易市场的主要激励因素，通过调节其价格，可以影响供应链各成员的生产成本和产品定价，进而影响产品的市场需求。为分析碳交易价格对产品价格和需求的影响，令 $c_f=50$ ，图 5-2 展示了碳交易价格对产品价格和需求的影响。



(a) 批发价格

(b) 零售价格



(c) 市场需求

图 5-2 碳交易价格对产品价格和需求的影响

图 5-2 表明，无论供应链成员是否积极减排，随着碳交易价格的增加，产品批发价格 and 市场需求均降低，但零售价格增加，意味着碳交易价格增加对供应商总是有害的，但随着供应商参与减排，其负面影响将被逐渐减低。此时，为降低碳交易价格增加引发的负面影响，供应商可通过引入数字化技术与制造商共同减排。对制造商而言，碳交易价格的增加会使得其在中购入的碳配额成本增加，此时，为转移成本压力，其会提升产品零售价格，进而降低产品市场竞争力，产品需求降低。为削弱碳交易价格对产品需求的负面影响，制造商也应选择与供应商合作减排，以降低产品的碳减排量。

由图 5-2 可知，企业应重视与供应链上下游合作，通过协同减排和数字化转型，共同提升市场竞争力和响应市场需求的能力，特别是在碳交易价格波动的情况下。

5.3.3 碳交易价格对碳减排率和总碳排放量的影响

本节进一步分析了碳交易价格对碳减排率和总碳排放量的影响，具体如下图 5-3 所示。

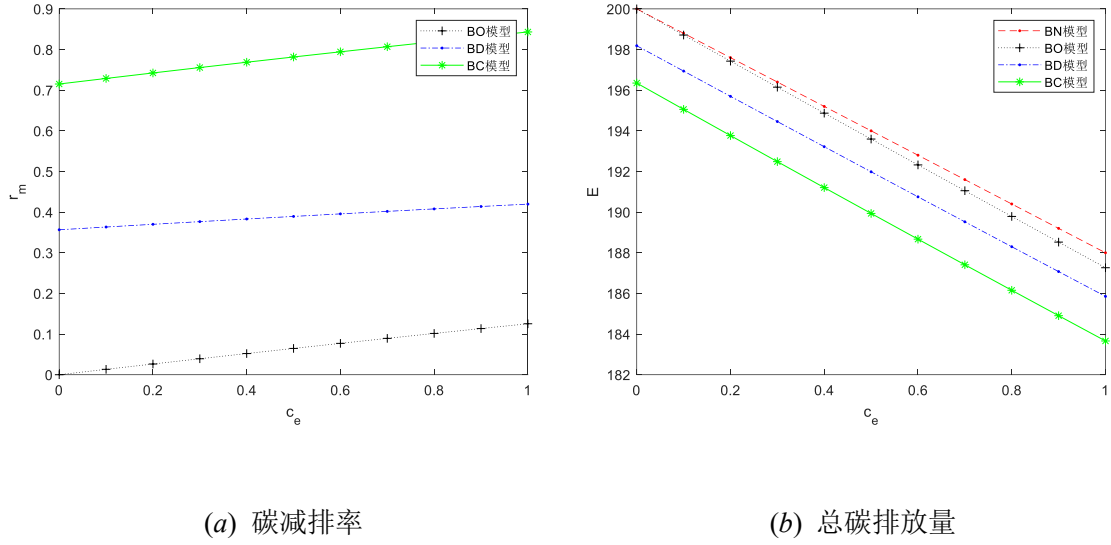


图 5-3 碳交易价格对碳减排率和总碳排放量的影响

图 5-3 表明，无论供应链成员是否积极减排，随着碳交易价格的增加，碳减排率逐渐增加，合作减排时的碳减排率最高，这是由于随着碳交易价格的增加，供应链成员面临更高的碳成本压力，从而激励他们提高碳减排率。合作减排时，各方可以共享资源和技术，优化减排措施，形成协同效应，因此碳减排率最高。相较于单独行动，合作能够更有效地整合各方优势，提升整体减排效率。随着碳交易价格的增加，总碳排放量逐渐下降，合作减排时的总碳排放量最少。这是因为碳交易价格上升使得排放成本增加，企业为了降低成本而减少排放。合作减排可以降低个体企业的风险，使它们更愿意投资于创新和高效的减排技术。

由图 5-3 可知，供应链成员应积极合作减排，以提升碳减排率和市场竞争力。合作能够优化资源配置，降低成本，提高整体效率。企业需关注碳成本的影响，制定灵活的减排策略，以应对市场变化并增强盈利能力。

5.3.4 碳交易价格对消费者剩余和社会总福利的影响

参考文献[67]，在传统供应链中，消费者剩余函数为 $CS = \frac{(D_0 - p)^2}{2}$ ，在采用

数字化技术中，消费者剩余为 $CS = \frac{(D_0 - p + \beta r_m)^2}{2}$ 。参考文献[68,69]，社会总福

利为消费者剩余与供应链总利润之和，即 $SW = CS + \pi_s + \pi_m$ 。碳交易价格对消费

者剩余和社会总福利的影响如下图 5-4 所示。

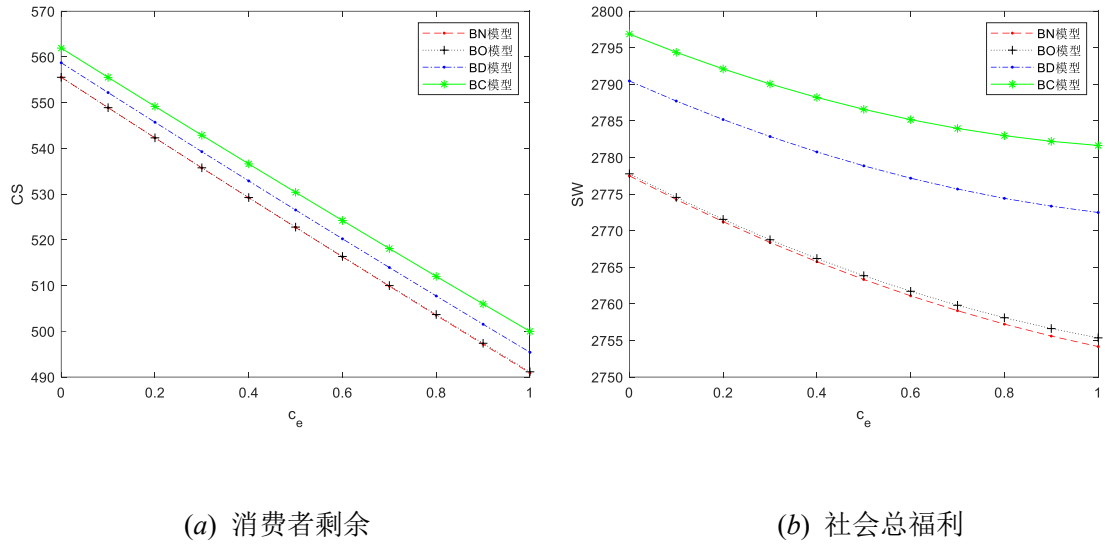


图 5-4 碳交易价格对消费者剩余和社会总福利的影响

图 5-4 表明，无论供应链成员是否积极减排，随着碳交易价格的增加，消费者剩余逐渐下降，采用数字化技术后，合作减排时的消费者剩余高于非合作减排。这是因为企业在减排过程中可能提高产品价格以覆盖成本，特别是在非合作模式下，消费者面临更高的价格。合作减排能提高资源利用效率，降低整体生产成本，从而使产品价格保持相对稳定，提升消费者剩余。社会总福利随着碳交易价格增加而降低，合作减排时社会总福利最高，主要因为高碳价格可能导致生产成本上升，进而抑制经济活动和消费需求。然而，当供应商和制造商共同合作减排时，双方能够共享减排技术和成本，增强整体效率，降低一方负担，从而实现更有效的减排效果。这种合作不仅可以提高生产的可持续性，还能提升社会总福利，抵消因碳价格上升带来的负面影响。

由图 5-4 可知，鼓励企业间合作减排，通过降低成本和提升产品价值，提高消费者剩余，增强市场竞争力。应重视供应链成员的合作，通过共同投资低碳技术和减排措施来降低成本和提升效率。此外，应建立有效的沟通机制，以确保信息共享和技术转移，从而实现协同减排的最佳效果，缓解高碳交易价格带来的经济压力，提升整体的社会总福利。

5.4 本章小结

本章针对一个由供应商和制造商构成的低碳供应链，探究在双方权力对等下

下碳交易政策和数字化技术对供应链定价决策与碳减排策略的影响,主要研究结论如下:(1)合作减排时的批发价格 and 市场需求高于非合作减排,相较于无额外减排技术投入情形,当制造商减排技术投入成本较高时,其会降低产品零售价格,反之,则会提升产品零售价格。(2)单位生产成本和碳减排成本规模系数皆逆向影响低碳供应链市场需求和供应商利润,而消费者的低碳偏好程度正向影响低碳供应链市场需求和供应商利润。(3)无论供应链成员是否积极减排,碳减排率随着碳交易价格的增加而增加,总碳排放量和消费者剩余随之减少,采用数字化技术后合作减排时的总碳排放量最少以及消费者剩余高于非合作减排。

依据上述结论可得到如下管理启示:(1)在合作减排情境中,制造商应根据减排技术投入的成本灵活调整产品零售价格。高成本时可适当降低价格以刺激需求,低成本时则可提高价格以增强利润,从而在市场中保持竞争力。(2)企业需关注单位生产成本和碳减排成本对市场需求和供应商利润的影响。降低生产和减排成本将有助于提升市场需求,而消费者的低碳偏好应成为市场策略制定的重要考量。(3)面对不断上升的碳交易价格,供应链成员应积极参与减排,因其会促进碳减排率的提升。采用数字化技术的合作减排方式最为有效,能够在减少总碳排放的同时,提升消费者剩余,增强整体市场竞争力。

第 6 章 不同权力结构下最优决策和利润对比

在前三章，本文对供应商主导、制造商主导及双方权力对等三种权力结构下考虑数字化技术的供应链定价与减排决策进行了深入分析，探讨了其对碳交易价格变化下的减排率、总碳排放量、消费者剩余以及社会总福利的影响，本章将对这三种权力结构的最优策略及利润进行对比研究。

6.1 产品批发价格

不同权力结构下的产品批发价格对比如命题 6.1。

命题 6.1 (1) $w^{SN*} > w^{MN*}$, $w^{SN*} > w^{BN*}$, $w^{MN*} < w^{BN*}$; (2) $w^{SO*} > w^{MO*}$, $w^{SO*} > w^{BO*}$, $w^{MO*} < w^{BO*}$; (3) $w^{SD} > w^{MD}$, 当 $c_l > \frac{5}{4} \overline{c_{l22}}$ 时, $w^{SD*} > w^{BD*}$, 反之, $w^{SD*} \leq w^{BD*}$, 当 $c_l > \overline{c_{l36}}$, $w^{MD*} < w^{BD*}$, 反之, $w^{MD*} \geq w^{BD*}$; (4) $w^{SC*} < w^{MC*}$, 当 $c_l > \overline{c_{l37}}$ 时, $w^{SC*} > w^{BC*}$, 反之, $w^{SC*} \leq w^{BC*}$, 当 $c_l > \frac{1}{2} \overline{c_{l22}}$ 时, $w^{MC*} > w^{BC*}$, 反之, $w^{MC*} \leq w^{BC*}$ 。

命题 6.1 表明，当无减排投入和仅制造商进行减排投入时，供应商主导时的产品批发价格高于制造商主导和双方权力对等的情况，而制造商主导下的产品批发价格低于双方权力对等的情况，这是由于供应商在价格制定中拥有更大的议价能力，进而能够转嫁更高的成本给制造商。制造商在减排投入中拥有更强的成本控制能力和市场竞争优势，从而能够实现规模经济效应，降低产品价格。采用数字化减排后，非合作减排时供应商主导时的批发价格高于制造商主导时的批发价格，而合作减排时相反，供应商主导时的批发价格低于制造商主导时的批发价格，因为供应商在价格形成过程中能够施加更大的市场影响力，从而在缺乏合作的情况下提高价格。合作减排时，双方能够共享减排技术和成本，进而降低整体生产成本，提升效率。

由 6.1 可知，企业应在制定减排策略时，考虑不同权力结构对价格形成的影

响,积极探索与供应商和制造商之间的合作机制,以优化成本结构和提升市场竞争力。

6.2 产品零售价格

不同权力结构下的产品零售价格对比如命题 6.2。

命题 6.2 (1) $p^{SN*} = p^{MN*} < p^{BN*}$; (2) $p^{SO*} < p^{MO*}$, $p^{SO*} > p^{BO*}$, $p^{MO*} > p^{BO*}$;
(3)当 $c_l > \overline{c_{l38}}$ 时, $p^{SD*} < p^{MD*}$, 反之, $p^{SD*} \geq p^{MD*}$, 当 $c_l > \overline{c_{l39}}$ 时, $p^{SD*} > p^{BD*}$,
反之, $p^{SD*} \leq p^{BD*}$, 当 $c_l > \overline{c_{l40}}$ 时, $p^{MD*} > p^{BD*}$, 反之, $p^{MD*} \leq p^{BD*}$; (4) $p^{SC*} = p^{MC*}$,
当 $c_l > \overline{c_{l41}}$ 时, $p^{MC*} > p^{BC*}$, 反之, $p^{MC*} \leq p^{BC*}$ 。

命题 6.2 表明,无减排投入时的产品零售价格在供应商主导和制造商主导时相同,双方权力对等时的零售价格更高,进行减排投入时,双方权力对等时的零售价格反而较低。双方在价格制定中需要考虑的额外成本和风险分担,导致最终消费者承担更高的价格。进行减排投入后带来的成本降低或市场竞争加剧,使得双方在价格上有更大的让步空间。当制造商减排难度较大时,双方权力对等下无论是否合作减排,产品零售价格较低,这是因为制造商对成本控制的压力 and 市场需求对价格敏感性的提高,导致其即使在减排方面的努力有限,仍需通过降低价格以维持竞争力。当制造商减排难度较小时,双方权力对等下无论是否合作减排,产品零售价格较高,因为制造商能够有效地实施减排措施,提升产品的环保价值,从而增强市场定价能力,消费者愿意为绿色产品支付更高的价格。

由 6.2 可知,企业在进行减排投入时,应充分考虑供应链各方的权力关系,合理配置资源与成本,以最大化整体利益。同时,企业应重视市场竞争态势,通过减排措施提升产品竞争力,进而在价格策略上实现双赢局面。

6.3 市场需求

不同权力结构下的市场需求对比如命题 6.3。

命题 6.3 (1) $Q^{SN*} = Q^{MN*} < Q^{BN*}$; (2) $Q^{SO*} > Q^{MO*}$, $Q^{SO*} < Q^{BO*}$, $Q^{MO*} < Q^{BO*}$;
(3)当 $c_l > \overline{c_{l33}}$ 时, $Q^{SD*} > Q^{MD*}$, 反之, $Q^{SD*} \leq Q^{MD*}$, $Q^{SD*} < Q^{BD*}$, 当 $c_l > \overline{c_{l36}}$ 时,

$Q^{MD*} < Q^{BD*}$, 反之, $Q^{MD*} \geq Q^{BD*}$; (4) $Q^{SC*} = Q^{MC*}$, 当 $c_l > \frac{1}{2} \frac{\overline{c_{l22}}}{c_{l22}}$ 时, $Q^{MC*} > Q^{BC*}$, 反之, $Q^{MC*} \leq Q^{BC*}$ 。

命题 6.3 表明, 无减排投入时市场需求在供应商主导和制造商主导时相同, 双方权力对等时的市场需求更高, 进行减排投入时, 供应商主导时的市场需求高于制造商主导。供应商能够更有效地优化产品质量和交付效率, 满足市场对环保和可持续产品的日益增长的需求。当制造商减排难度较大时, 双方权力对等下相较于仅进行减排投入非合作减排时市场需求较高, 合作减排时的市场需求较低, 这是因为消费者对制造商在环保领域的努力持有积极态度, 愿意为其付出更高的价格以支持其可持续发展。在合作过程中, 消费者可能对减排成效的透明度和信任度产生疑虑, 或者认为合作减排所产生的成本并未显著转化为产品价值的提升, 从而导致购买意愿的下降。

由 6.3 可知, 企业在制定市场策略时, 应充分考虑供应链各方的权力关系对市场的影响, 尤其是在减排投入的背景下。企业应积极寻求与供应商的合作, 利用减排措施提升产品的市场吸引力, 从而增强消费者的购买意愿。面对减排挑战时, 应灵活选择减排策略, 在合作减排中注重价值传递, 确保消费者能够清晰地识别合作所带来的附加价值, 以提升市场需求并促进销售增长。

6.4 碳减排率

不同权力结构下的碳减排率对比如命题 6.4。

命题 6.4 (1) $r_m^{SO*} > r_m^{MO*}$, $r_m^{SO*} < r_m^{BO*}$, $r_m^{MO*} < r_m^{BO*}$; (2) 当 $h > 2h_3$ 时, $r_m^{SD*} < r_m^{MD*}$, 反之, $r_m^{SD*} \geq r_m^{MD*}$, 当 $h > \frac{32}{21}h_3$ 时, $r_m^{SD*} < r_m^{BD*}$, 反之, $r_m^{SD*} \geq r_m^{BD*}$, 当 $h > \frac{16}{3}h_3$ 时, $r_m^{MD*} > r_m^{BD*}$, 反之, $r_m^{MD*} \leq r_m^{BD*}$; (3) $r_m^{SC*} = r_m^{MC*} < r_m^{BC*}$ 。

命题 6.4 表明, 进行减排投入时, 双方权力对等下的碳减排率高于供应商和制造商主导时的碳减排率, 而供应商主导时的碳减排率高于制造商主导时的碳减排率。在权力对等的环境中, 供应链成员能够实现更有效的资源整合和协同合作, 供应商在技术和资源配置上的优势, 能够更有效地实施减排措施并推动创新, 而制造商主导时对成本控制导致减排投入不足, 进而影响减排效果。非合作减排时, 当数字化技术投入较高时, 供应商主导下的碳减排率低于制造商主导和双方权力

对等情形。供应商在资源和技术优势的运用上受到限制，难以充分发挥数字化技术的潜力。制造商主导的情况下，制造商能够更有效地整合数字化技术与内部流程，针对性地优化生产和运营，从而实现更高的减排率。而在双方权力对等的情况下，合作与信息共享能够促进最佳实践的传播和技术的协同应用，进而提升整体减排效果。

由 6.4 可知，企业在选择合作伙伴时，应评估其在减排技术和能力方面的优势。此外，企业应针对不同的权力结构灵活调整减排策略，以最大化碳减排效果和可持续发展收益。在投资数字化技术时，企业需重视技术与组织流程的整合，确保数字化转型能够有效推动碳减排的实现。

6.5 数字化水平

不同权力结构下的数字化水平对比如命题 6.5。

命题 6.5 (1) $B_s^{SD*} > B_s^{MD*}$, $B_s^{SD*} > B_s^{BD*}$, $B_s^{MD*} < B_s^{BD*}$; (2) $B_s^{SC*} = B_s^{MC*} < B_s^{BC*}$ 。

命题 6.5 表明，无论是否合作减排，双方权力对等下的数字化水平高于供应商主导下的数字化技术水平，但非合作减排时，供应商主导时的数字化水平高于双方权力对等的情况，合作减排相反，供应商主导时的数字化水平低于双方权力对等的情况。在双方权力对等情况下，企业能够更有效地进行资源整合和技术投资，实现数字化转型的协同效应。然而，非合作减排时供应商在特定技术或领域内的专业优势，使其能够独立推动数字化进程。合作减排时双方的协同需求导致了对数字化技术的共享与共同投资，从而提升了整体的数字化水平。

由 6.5 可知，企业在推动数字化转型和减排策略时，应关注权力结构对数字化水平的影响。在非合作模式下，制造商应积极寻求与供应商的合作，以提升整体的数字化能力和减排效果。同时，在合作减排的情况下，企业应建立有效的沟通机制和协同机制，以确保数字化技术的共享与优化应用，进而推动双方的可持续发展目标。企业还需定期评估权力关系对数字化投资决策的影响，以便在不同的环境中灵活调整策略，最大化数字化技术的应用效益。

6.6 供应商利润

不同权力结构下的供应商利润对比如命题 6.6。

命题 6.6 (1) $\pi_s^{SN*} > \pi_s^{MN*}$, $\pi_s^{SN*} > \pi_s^{BN*}$, $\pi_s^{MN*} < \pi_s^{BN*}$; (2) $\pi_s^{SO*} > \pi_s^{MO*}$, $\pi_s^{SO*} > \pi_s^{BO*}$, $\pi_s^{MO*} < \pi_s^{BO*}$ 。

命题 6.6 表明, 无论是否进行减排投入, 供应商主导时的利润高于制造商主导和双方权力对等的情况, 制造商主导时的利润低于双方权力对等的情况。供应商在资源配置、技术创新以及市场控制方面的优势, 使其能够更灵活地应对市场需求和价格波动, 从而实现更高的利润水平。制造商在决策过程中面临较大的成本压力 and 市场竞争, 限制了其利润空间, 而缺乏与其他供应链成员的合作, 导致资源和信息的低效配置。

由 6.6 可知, 企业应积极探索与供应商的合作模式, 利用供应商的技术优势和市场洞察力, 优化资源配置。此外, 企业应建立开放的沟通平台和合作机制, 提高各方的参与感和责任感, 从而共同促进利润增长和价值创造。

6.7 制造商利润

不同权力结构下的制造商利润对比如命题 6.7。

命题 6.7 (1) $\pi_m^{SN*} < \pi_m^{MN*}$, $\pi_m^{SN*} < \pi_m^{BN*}$, $\pi_m^{MN*} > \pi_m^{BN*}$; (2) $\pi_m^{SO*} < \pi_m^{MO*}$, $\pi_m^{SO*} < \pi_m^{BO*}$, $\pi_m^{MO*} > \pi_m^{BO*}$ 。

命题 6.7 表明, 无论是否进行减排投入, 供应商主导时的利润低于制造商主导和双方权力对等的情况, 制造商主导时的利润高于双方权力对等的情况。供应商在资源控制和市场谈判中的主导地位, 使得制造商面临较高的采购成本和较低的议价能力, 从而压缩了其利润空间。在制造商主导时, 制造商能够更有效地协调生产与市场需求, 优化供应链管理, 进而实现更高的利润水平。

由 6.7 可知, 企业应强化与供应商的合作与沟通, 提升整体价值创造能力。同时, 通过建立长期的合作关系和信任机制, 从而在复杂的市场环境中保持竞争优势。

6.8 数值仿真分析

本节将数值仿真, 进一步分析不同权力结构下非合作减排和合作减排时的供应商以及制造商利润对比, 参考文献[59,60,72], 其中相关参数的赋值如下: $c=100$,

$D_0=200$, $a=6$, $b=0.2$, $K=300$, $t=0.1$, $\beta=0.8$, $h=18$ 和 $c_e=12$ 。利润对比如图 6-1 所示。

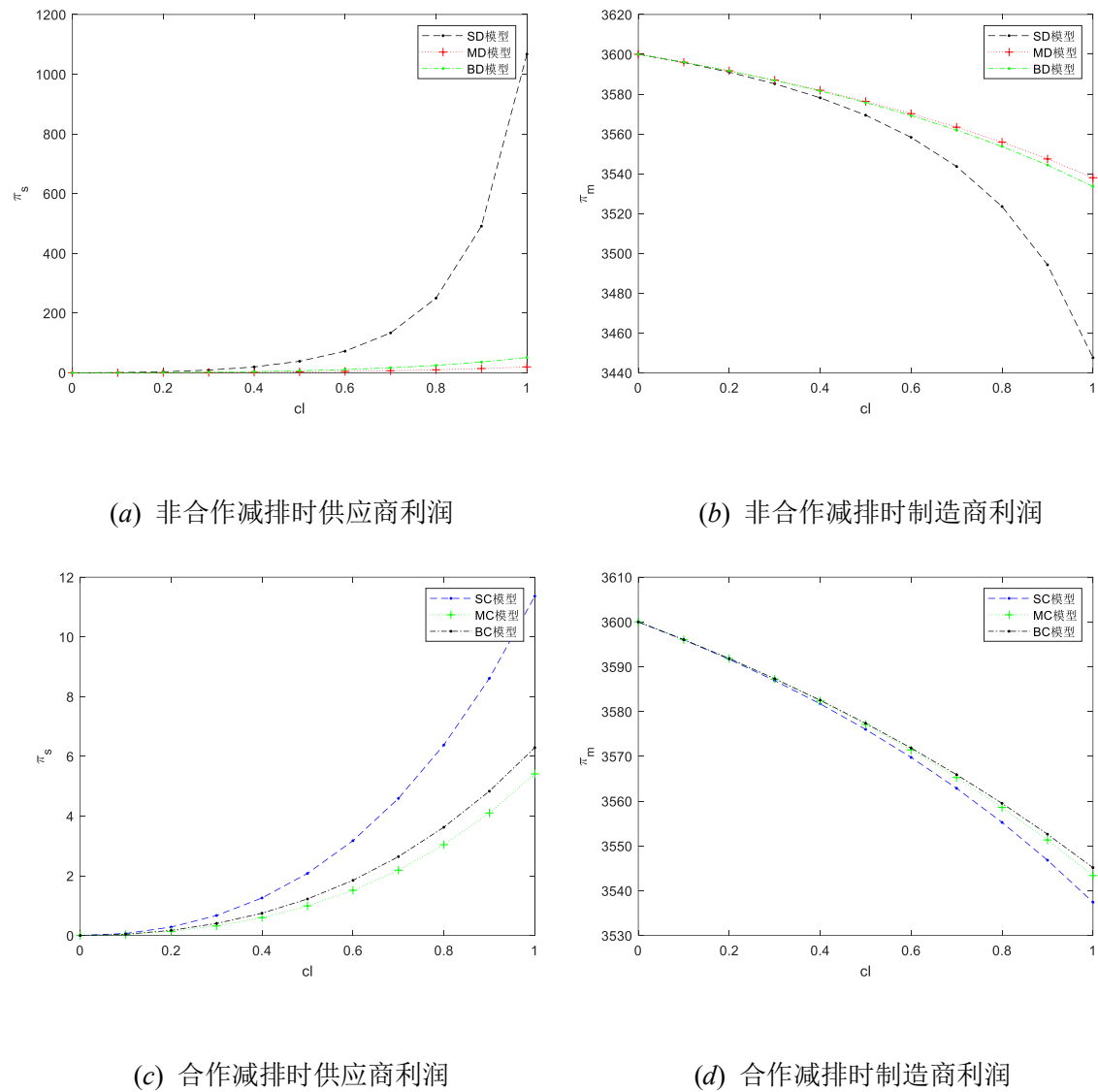


图 6-1 非合作减排和合作减排时供应商和制造商利润对比

图 6-1 表明, 无论是否合作减排, 供应商主导时供应商利润最高, 制造商利润最低。供应商在市场上的议价能力较强, 能够在决策中优先考虑自身利益, 最大化利润。在供应商主导的情况下, 制造商往往依赖于供应商提供的原材料或服务, 这使得供应商能够通过提高价格或降低服务水平来实现利润最大化。同时, 制造商在面临供应链风险时, 缺乏足够的谈判能力, 导致其利润空间受到压缩。此外, 供应商的减排投入可能并未充分考虑制造商的利益, 进而加重了制造商的成本负担。

由 6-1 可知, 制造商应当积极寻求与供应商之间的战略合作, 特别是在减排和可持续发展方面, 以期实现价值的共创。同时, 制造商可以通过建立更为透明和公平的合作机制, 以增强自身的议价能力, 从而在供应链中获得更为有利的地位。此外, 开展供应商绩效评估和激励机制, 鼓励供应商在追求利润的同时, 也兼顾制造商的利益, 从而实现双赢的局面。

6.9 本章小结

本章通过对不同权力结构的最优决策及利润进行对比, 主要结论如下: (1)非合作减排时供应商主导时的批发价格高于制造商主导时的批发价格, 而合作减排时相反, 供应商主导时的批发价格低于制造商主导时的批发价格。无减排投入时产品零售价格、市场需求在供应商主导和制造商主导时相同, 双方权力对等时的产品零售价格、市场需求更高。(2)无论是否合作减排, 双方权力对等下的数字化水平高于供应商主导下的数字化技术水平, 但非合作减排时, 供应商主导时的数字化水平高于双方权力对等的情况, 合作减排相反, 供应商主导时的数字化水平低于双方权力对等的情况。(3)无论是否合作减排, 供应商主导时供应商利润最高, 制造商利润最低。

依据上述结论可得到如下管理启示: (1)制造商应积极寻求与供应商之间的权力平衡, 通过建立对等的合作关系, 提升自身在定价和市场需求方面的议价能力。重视提升自身数字化水平, 以增强在供应链中的地位和能力, 特别是在与供应商合作的背景下。数字化技术的应用可以提高生产效率和市场响应能力, 从而在激烈的市场竞争中占据优势。(2)在减排和数字化转型过程中, 制造商应与供应商建立更紧密的合作关系, 鼓励双方在技术创新和可持续发展方面的共同投资。(3)考虑建立利润共享机制, 以激励供应商在追求自身利益的同时, 兼顾制造商的利润需求, 促进双方在市场中的长期合作与发展。

第 7 章 结论与展望

7.1 结论

本文在碳交易政策下，考虑政府的碳交易机制和减排技术的高投入特征，供应链成员在减排和数字技术应用方面均面临着是否应投入的决策，根据供应链成员有无采用减排技术、数字化技术及合作减排，构建四种决策模型，基于 Stackelberg 博弈理论，求得不同模型的最优解，分析单位生产成本，碳减排成本规模系数、消费者的低碳偏好程度等关键参数对低碳供应链最优决策和成员利润的影响，考虑供应链权力结构的差异，分别研究供应商主导、制造商主导和双方权力对等下考虑数字化技术的供应链定价和减排决策研究，本文得到的主要结论如下：

供应商主导时，制造商在减排技术上的投入以及供应商在数字化技术上的投入都能提升产品的批发价格 and 市场需求，而双方的合作减排效果尤为显著。如果供应商的数字化技术投入成本较低（较高），或者双方的技术投入水平都较高（较低），那么供应链成员的合作减排将有助于降低（提升）产品的零售价格。单位生产成本和碳减排成本规模系数皆逆向影响低碳供应链市场需求、供应商以及制造商利润，而消费者的低碳偏好程度正向影响低碳供应链市场需求、供应商以及制造商利润。无论供应链成员是否积极减排，碳减排率随着碳交易价格的增加而增加，总碳排放量和消费者剩余随之减少，采用数字化技术后合作减排时的总碳排放量最少以及消费者剩余高于非合作减排。

制造商主导时，合作减排时的单位批发价格、市场需求以及碳减排率最高，而不进行任何技术投入时单位批发价格和市场需求最低，当制造商减排技术投入成本较高时，其会降低产品零售价格，反之，则会提升产品零售价格。单位生产成本和碳减排成本规模系数皆逆向影响低碳供应链市场需求和供应商利润，而消费者的低碳偏好程度正向影响低碳供应链市场需求和供应商利润。无论供应链成员是否积极减排，碳减排率随着碳交易价格的增加而增加，总碳排放量和消费者剩余随之减少，采用数字化技术后合作减排时的总碳排放量最少以及消费者剩余

高于非合作减排。

双方权力对等时，合作减排时的批发价格 and 市场需求高于非合作减排，相较于无额外减排技术投入情形，当制造商减排技术投入成本较高时，其会降低产品零售价格，反之，则会提升产品零售价格。单位生产成本和碳减排成本规模系数皆逆向影响低碳供应链市场需求和供应商利润，而消费者的低碳偏好程度正向影响低碳供应链市场需求和供应商利润。无论供应链成员是否积极减排，碳减排率随着碳交易价格的增加而增加，总碳排放量和消费者剩余随之减少，采用数字化技术后合作减排时的总碳排放量最少以及消费者剩余高于非合作减排。此外，无论是否合作减排，供应商主导时供应商利润最高，制造商利润最低。

7.2 研究展望

本文的后续工作可以从以下几个方面进行展开：

（1）本文主要集中于供应商和制造商之间的联合决策，然而在实际合作过程中，收益共享和成本共担机制是至关重要却未被充分探讨的要素。如何公正合理地分配合作产生的收益以及共同承担成本，不仅影响合作的稳定性，还关系到各方的激励与满意度。未来将对合作过程中的收益共享、成本共担等机制进行深入研究。

（2）本文仅考虑了由一个供应商和一个制造商构成的供应链结构，而现实中的供应链往往涉及多个供应商和制造商的复杂网络关系。在多供应商和多制造商的情境下，合作决策的复杂性显著增加。未来的研究将构建多方参与的供应链模型，以探讨在多方合作情况下如何优化决策过程、提升效率。

（3）本文尚未考虑政府对数字化技术的补贴政策。政府的政策导向和补贴措施在促进企业数字化转型方面发挥着重要作用，尤其是推动中小企业与大型企业之间的合作。未来研究应探讨政府补贴政策如何影响供应商和制造商的合作决策。

参考文献

- [1] Yang L, Hu Y, Huang L. Collecting mode selection in a remanufacturing supply chain under cap-and-trade regulation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 287(2): 480-496.
- [2] 潘家华. 碳排放交易体系的构建、挑战与市场拓展[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(08): 1-5.
- [3] Doan N, Doan H, Nguyen C P, et al. From Kyoto to Paris and beyond: A deep dive into the green shift[J]. *Renewable Energy*, 2024, 228: 120675.
- [4] Schneider L, La Hoz Theuer S. Environmental integrity of international carbon market mechanisms under the Paris Agreement[J]. *Climate Policy*, 2019, 19(3): 386-400.
- [5] Wang Y, Liu J, Zhao Z, et al. Research on carbon emission reduction effect of China's regional digital trade under the “double carbon” target--combination of the regulatory role of industrial agglomeration and carbon emissions trading mechanism[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 405: 137049.
- [6] 刘名武, 林强, 王晓斐. 供应链减排运作决策研究现状与发展趋势[J]. *电子科技大学学报(社科版)*, 2022, 24(02): 86-95.
- [7] Bakshi P. A Balancing Act: Tracking Japan’ s Energy Transition in the Age of COVID-19[J]. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 2021, 63(6): 29-37.
- [8] Seydanlou P, Jolai F, Tavakkoli-Moghaddam R, et al. A multi-objective optimization framework for a sustainable closed-loop supply chain network in the olive industry: Hybrid meta-heuristic algorithms[J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 203: 117566.
- [9] 邹清明, 刘春, 曹裕. 碳交易机制下考虑公平关切产出不确定的低碳供应链减排与融资策略研究[J]. *中国管理科学*, 2024, 32(09): 248-259.
- [10] Büyüközkan, Gülcin, Fethullah Göcer. Digital supply chain: literature review and a proposed framework for future research[J]. *Computers in Industry*, 2018, 97:

- 157-177.
- [11] 叶强, 高超越, 姜广鑫. 大数据环境下我国未来区块链碳市场体系设计[J]. 管理世界, 2022, 38(01): 229-249.
- [12] 陈剑, 黄朔, 刘运辉. 从赋能到使能——数字化环境下的企业运营管理[J]. 管理世界, 2020, 36(02): 117-128.
- [13] 李青原, 李昱, 章尹赛楠, 等. 企业数字化转型的信息溢出效应——基于供应链视角的经验证据[J]. 中国工业经济, 2023(07): 142-159.
- [14] 秦立公, 张勇. 碳限额与碳交易下考虑时间偏好差异的供应链联合减排动态博弈[J]. 工业工程, 2022, 25(05): 55-64.
- [15] Ji J N, Zhang Z Y, Yang L. Comparisons of initial carbon allowance allocation rules in an O2O retail supply chain with the cap-and-trade regulation [J]. International Journal of Production Economics, 2017, 187: 68-84
- [16] 石平, 韩坤, 后锐. 碳交易机制下基于互惠的供应链广告合作与减排成本分担契约[J]. 管理科学学报, 2024, 27(12): 57-81.
- [17] 王文宾, 管婕, 戚金钰, 等. 碳限额交易机制下大数据服务商参与的供应链决策模型[J]. 系统管理学报, 2025, 34(01): 68-80.
- [18] 张川, 马慧敏, 郭振. 碳限额与交易机制和消费者低碳偏好下的供应链减排及融资策略[J]. 控制与决策, 2023, 38(11): 3271-3278.
- [19] 邹清明, 胡李庆, 邹霆钧. 碳限额与碳交易机制下考虑公平关切的供应链定价与协调研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(10): 142-154.
- [20] 邹浩, 秦进, 杨鹏. 碳交易机制下考虑公平关切的低碳供应链网络均衡模型[J]. 统计与决策, 2023, 39(23): 168-173.
- [21] Kuiti M R, Ghosh D, Basu P, Bisi A. Do cap-and-trade policies drive environmental and social goals in supply chains: Strategic decisions, collaboration, and contract choices[J]. International Journal of Production Economics, 2020, 223: 1-26.
- [22] 朱晨, 马静, 李犖. 混合碳政策下的供应链联合减排决策和优化[J]. 系统管理学报, 2024, 33(05): 1204-1217.
- [23] Xia X, Li C, Zhu Q. Game analysis for the impact of carbon trading on low-carbon

- supply chain[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276(3): 123220.
- [24] Zhang X F, Fan D C. Research on the synergistic emission reduction effect of carbon emission trading and green financial policy[J]. Journal of Environmental Management, 2024,(367): 121924.
- [25] Cai J, Jiang F. Decision models of pricing and carbon emission reduction for low-carbon supply chain under cap-and-trade regulation[J]. International Journal of Production Economics, 2023, 264: 108964.
- [26] Liu H, Kou X F, Xu G Y, et al. Which emission reduction mode is the best under the carbon cap-and-trade mechanism?[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 314: 128053.
- [27] 蒋晓芬, 高广阔, 孙浩. 碳限额交易政策下考虑消费者偏好的外包减排策略研究[J]. 运筹与管理, 2023, 32(07): 15-22.
- [28] 孙立成, 于锦涵, 王雨时. 碳交易政策下考虑过度自信的供应链减排决策研究[J]. 工业工程, 2023, 26(03): 8-17.
- [29] 王道平, 常敬雅, 郝玫. 碳交易政策下基于技术投资的供应链纵向合作动态减排研究[J]. 控制与决策, 2024, 39(05): 1654-1664.
- [30] Ahmadova G, Delgado-Márquez B L, Pedauga L E, et al. Too good to be true: The inverted U-shaped relationship between home-country digitalization and environmental performance[J]. Ecological Economics, 2022, 196: 107393.
- [31] 李勇建, 陈婷. 区块链赋能供应链: 挑战、实施路径与展望[J]. 南开管理评论, 2021, 24(05): 192-203.
- [32] 陈晓红, 唐湘博, 梁伟, 等. 数字经济时代的企业运营管理与服务创新[J]. 商学研究, 2021, 28(05): 5-12.
- [33] Yang S, Li F, Trajanovski S, et al. Recent advances of resource allocation in network function virtualization[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2020, 32(2): 295-314.
- [34] 宋华, 韩梦玮, 于亢亢, 等. 数字技术如何助力供应链碳减排——基于国网浙江电力的案例研究[J]. 南开管理评论, 2024, 27(01): 27-41.
- [35] 林强, 刘名武, 邹梓琛. 不同激励契约下嵌入区块链的供应链碳减排与定价

- 决策[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(04): 1506-1517.
- [36] Camel A, Belhadi A, Kamble S, et al. Integrating smart Green Product Platforming for carbon footprint reduction: The role of blockchain technology and stakeholders influence within the agri-food supply chain[J]. International Journal of Production Economics, 2024, 272: 109251.
- [37] Wang M, Wu J, Chen X, et al. Grandfathering or benchmarking? The performance of implementing blockchain technology in a low-carbon supply chain[J]. Energy, 2023, 284: 128691.
- [38] Wang Y, Liu J, Zhao Z, et al. Research on carbon emission reduction effect of China's regional digital trade under the “double carbon” target--combination of the regulatory role of industrial agglomeration and carbon emissions trading mechanism[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 405: 137049.
- [39] Belhadi A, Venkatesh M, Kamble S, et al. Data-driven digital transformation for supply chain carbon neutrality: Insights from cross-sector supply chain[J]. International Journal of Production Economics, 2024, 270: 109178.
- [40] 王道平, 王婷婷. 政府补贴下供应链合作减排与促销的动态优化[J]. 系统管理学报, 2021, 30(01): 14-27.
- [41] 潘晨, 杨柏, 冯鹤林, 等. 碳交易制度下绿色供应链不同成本分担合同选择[J]. 系统工程学报, 2023, 38(04): 555-576.
- [42] Yang H, Chen X, Li L, et al. Supply chain decision-making of green products considering a retailer's fairness concerns under a pre-sale model[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 414: 137457.
- [43] 刘名武, 万谧宇, 吴开兰. 碳交易政策下供应链横向减排合作研究[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(03): 28-35.
- [44] 卓四清, 韩雪. 碳补贴与零售商竞争下供应链合作方式的微分博弈研究[J]. 管理工程学报, 2023, 37(02): 80-89.
- [45] 唐金环, 张益阁, 赵礼强, 等. 横纵合作下考虑 CSR 的可持续供应链定价与减排决策研究[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(20): 1-12.
- [46] Ei Ouardighi F, Sim J, Kim B. Pollution accumulation and abatement policies in

- two supply chains under vertical and horizontal competition and strategy types[J]. Omega, 2021, 98: 102108.
- [47] Shaharudin M S, Fernando Y, Jabbour C J C, et al. Past, present, and future low carbon supply chain management: A content review using social network analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 218: 629-643.
- [48] Das C, Jharkharia S. Low carbon supply chain: A state-of-the-art literature review[J]. Journal of Manufacturing Technology Management, 2018, 29(2): 398-428.
- [49] Mao Z, Zhang S, Li X. Low carbon supply chain firm integration and firm performance in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 153: 354-361.
- [50] 王飞, 张肖. 低碳供应链管理研究综述[J]. 价值工程, 2017, 36(15): 58-59.
- [51] 祝凌燕. 基于碳排放权交易的低碳供应链研究综述[J]. 科技创业月刊, 2018, 31(10): 158-160.
- [52] Verhoef P C., Broekhuizen T, Bart Y, Bhattacharya A, Qi Dong J, Fabian N, Haenlein M. Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda[J]. Journal of Business Research, 2021, 122: 889-901.
- [53] 刘飞. 数字化转型如何提升制造业生产率——基于数字化转型的三重影响机制[J]. 财经科学, 2020, (10): 93-107.
- [54] Li Y, Dai J, Cui L. The impact of digital technologies on economic and environmental performance in the context of industry 4.0: A moderated mediation model[J]. International Journal of Production Economics, 2020, 229: 107777.
- [55] Yang M, Fu M, Zhang Z. The adoption of digital technologies in supply chains: Drivers, process and impact[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2021, 169: 120795.
- [56] Martínez-Caro E, Cegarra-Navarro J G, Alfonso-Ruiz F J. Digital technologies and firm performance: The role of digital organisational culture[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020, 154: 119962.
- [57] Zaki M. Digital transformation: harnessing digital technologies for the next generation of services[J]. Journal of Services Marketing, 2019, 33(4): 429-435.

- [58] 闫彦超, 马祖军. “线上销售/回收+线下服务”的闭环供应链定价与服务决策[J]. 中国管理科学, 2022, 30(01): 175-184.
- [59] 张令荣, 彭博, 程春琪. 基于区块链技术的低碳供应链政府补贴策略研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31(10): 49-60.
- [60] Xu J, Chen Y, Bai Q. A two-echelon sustainable supply chain coordination under cap-and-trade regulation[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 135: 42-56.
- [61] Guo Y, Wang M, Yang F. Joint emission reduction strategy considering channel inconvenience under different recycling structures[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 169: 108159.
- [62] 林欢, 马骋, 孙琦, 等. 企业社会责任下碳减排优化策略与协调机制研究[J]. 运筹与管理, 2021, 30(1): 29-35.
- [63] Ullah A, Ayat M, He Y, et al. An analysis of strategies for adopting blockchain technology in the after-sales service supply chain[J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 179: 109194.
- [64] 林强, 赵震铮, 霍宝锋, 等. 考虑碳交易政策的零售商合作减排策略: 融资减排或技术减排[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(03): 986-1005.
- [65] 范建昌, 付红, 洪定军, 等. 基于产品责任的零售商主导供应链质量成本分担合同研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31(5): 187-197.
- [66] 汤婷, 徐海燕, 张智超. 不同融资模式下线上双渠道供应链运营策略[J]. 中国管理科学, 2023, 31(10): 106-115.
- [67] 林志炳, 陈莫凡, 李钰雯. 考虑绿色制造及企业社会责任行为的零售商自有品牌策略研究[J]. 管理工程学报, 2023, 37(01): 216-224.
- [68] 周晓阳, 柯湾, 扈衷权, 等. 竞争环境下非对称平台的兼并策略及社会福利研究[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(01): 52-67.
- [69] 高鹏, 王苗苗, 何宁. 考虑消费者偏好的再制造供应链市场进入及质量策略研究[J]. 供应链管理, 2021, 2(12): 50-62.
- [70] 王博. 不同权力结构下双渠道低碳供应链契约机制设计研究[D]. 杭州. 浙江工商大学, 2020.
- [71] Liu Z, Li K W, Tang J, et al. Optimal operations of a closed-loop supply chain

under a dual regulation[J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 233: 107991.

- [72] 刘名武, 任威, 宋慧玲, 等. 碳交易制度下嵌入区块链的供应链决策研究[J]. *价格理论与实践*, 2024, (11): 197-201.

附录

附录 1 3.2 证明过程

SN 模型：根据逆向归纳法，将需求函数 $Q = D_0 - p$ 带入式 (3-2) 中，由二阶偏导 $\frac{\partial^2 \pi_m^{SN}}{\partial p^2} = -2 < 0$ 可知， π_m^{SN} 是关于 p 的严格凹函数，存在最优解，由一阶条件

$\frac{\partial \pi_m^{SN}}{\partial p} = 0$ ，可知 p 的最优反应函数为 $p = \frac{1}{2}(D_0 + w + ac_e)$ ，将 p 的最优反应函数

带入式 (3-1) 中，易知 π_s^{SN} 是关于 w 的严格凹函数，由一阶条件 $\frac{\partial \pi_s^{SN}}{\partial w} = 0$ ，可得

$w^{SN*} = \frac{1}{2}(c + D_0 - ac_e)$ ，将 w^{SN*} 带入 p 的最优反应函数，可得

$p^{SN*} = \frac{1}{4}(c + 3D_0 + ac_e)$ ，将 w^{SN*} 和 p^{SN*} 依次带入需求函数、供应商和制造商利润函数，得到 N 模型下的均衡解如表 3-2 第 1 列所示。

SO 模型：根据逆向归纳法，将需求函数 $Q = D_0 - p$ 带入式 (3-4) 中，构建 π_m^{SO}

关于决策变量 p 和 r_m 的海塞矩阵 $H = \begin{bmatrix} -2 & -bc_e \\ -bc_e & -c_l \end{bmatrix}$ ，由于其一阶顺序主子式

$|H_1| = -2 < 0$ ， $|H_2| = -c_l < 0$ ，二阶顺序主子式 $|H| = -b^2c_e^2 + 2c_l > 0$ 时，该海塞矩阵

负定，利润函数 π_m^{SO} 关于决策变量 p 和 r_m 的严格凹函数，模型存在最优解，进一步

将 π_m^{SO} 分别对 p 和 r_m 求一阶偏导并联立方程，可得最优决策

$p = \frac{b^2D_0c_e^2 - (D_0 + w + ac_e)c_l}{b^2c_e^2 - 2c_l}$ ， $r_m = \frac{bc_e(-D_0 + w + ac_e)}{b^2c_e^2 - 2c_l}$ ，接着将 p 和 r_m 带入式 (3-

3) 中，由二阶偏导 $\frac{\partial^2 \pi_s^{SO}}{\partial w^2} = \frac{2c_l}{b^2c_e^2 - 2c_l} < 0$ 可知， π_s^{SO} 是关于 w 的严格凹函数，存在最

优解，由一阶条件 $\frac{\partial \pi_s^{SO}}{\partial w} = 0$ ，可知 w 的最优反应函数为 $w = (c + D_0 - ac_e)$ ，将 w 带入

所求的 p 和 r_m ，可得最优决策 $p^{SO*} = D_0 + \frac{A_1 c_l}{4c_l - 2b^2 c_e^2}$ ， $r_m^{SO*} = \frac{bc_e A_1}{4c_l - 2b^2 c_e^2}$ ，将 p^{SO*}

和 r_m^{SO*} 依次带入需求函数、供应商和制造商利润函数，得到 O 模型下的均衡解如表 3-2 第 2 列所示。

SD 模型：根据逆向归纳法，将需求函数 $Q = D_0 - p + \beta r_m$ 带入式 (3-6) 中，由二阶偏导 $\frac{\partial^2 \pi_m^{SD}}{\partial p^2} = -2 < 0$ 可知， π_m^{SD} 是关于 p 的严格凹函数，存在最优解，由一阶

条件 $\frac{\partial \pi_m^{SD}}{\partial p} = 0$ ，可知 p 的最优反应函数为 $p = \frac{1}{2}(D_0 + w + ac_e - tB_s c_e + \beta r_m - bc_e r_m)$ ，

将 p 的最优反应函数带入式 (3-5) 中，易知 π_s^{SD} 是关于 w 的严格凹函数，由一阶条

件 $\frac{\partial \pi_s^{SD}}{\partial w} = 0$ ，可得 $w = \frac{1}{2}(c + D_0 - ac_e + tB_s c_e + \beta r_m + bc_e r_m)$ ，将 w 带入 p 的最优反应

函数，接着带入式 (3-5) 和式 (3-6) 中，分别对 B_s 和 r_m 求二阶偏导，构建关于

变量 B_s 和 r_m 的海塞矩阵 $H = \begin{bmatrix} \frac{1}{8}(2t^2 c_e^2 - 8h) & \frac{1}{4}tc_e(\beta + bc_e) \\ \frac{1}{8}tc_e(\beta + bc_e) & \frac{1}{8}((\beta + bc_e)^2 - 8c_l) \end{bmatrix}$ ，由于其一阶顺

序主子式 $|H_1| = \frac{1}{8}(2t^2 c_e^2 - 8h) < 0$ ， $|H_2| = \frac{1}{8}((\beta + bc_e)^2 - 8c_l) < 0$ ，二阶顺序主子式 $|H| = \frac{1}{8}(-h(\beta + bc_e)^2 + 2(4h - t^2 c_e^2)c_l) > 0$ 时，该海塞矩阵负定，模型存在最优解，

联立一阶偏导方程，可得最优决策 $B_s^{SD*} = \frac{2tc_e c_l A_1}{A_2}$ ， $r_m^{SD*} = \frac{hA_1(\beta + bc_e)}{A_2}$ ，将 B_s^{D*} 和

r_m^{D*} 依次带入 p 和 w 的最优反应函数、需求函数、供应商和制造商利润函数，得到 D 模型下的均衡解如表 3-2 第 3 列所示。

SC 模型：根据逆向归纳法，将需求函数 $Q = D_0 - p + \beta r_m$ 带入式 (3-8) 中，由

二阶偏导 $\frac{\partial^2 \pi_m^{SC}}{\partial p^2} = -2 < 0$ 可知， π_m^{SC} 是关于 p 的严格凹函数，存在最优解，由一阶条

件 $\frac{\partial \pi_m^{SC}}{\partial p} = 0$, 可知 p 的最优反应函数为 $p = \frac{1}{2}(D_0 + w + ac_e - tB_s c_e + \beta r_m - bc_e r_m)$, 将

p 的最优反应函数带入式 (3-7) 中, 易知 π_s^{SC} 是关于 w 的严格凹函数, 由一阶条件

$\frac{\partial \pi_s^{SC}}{\partial w} = 0$, 可得 $w = \frac{1}{2}(c + D_0 - ac_e + tB_s c_e + \beta r_m + bc_e r_m)$, 将 w 带入 p 的最优反应函

数, 接着带入式 (3-9) 中, 构建 π_{sc}^{SC} 关于决策变量 B_s 和 r_m 的海塞矩阵

$$H = \begin{bmatrix} \frac{1}{8}(3t^2 c_e^2 - 8h) & \frac{3}{8}tc_e(\beta + bc_e) \\ \frac{3}{8}tc_e(\beta + bc_e) & \frac{1}{8}(3(\beta + bc_e)^2 - 8c_l) \end{bmatrix}, \text{ 由于其一阶顺序主子式}$$

$|H_1| = \frac{1}{8}(3t^2 c_e^2 - 8h) < 0$, $|H_2| = \frac{1}{8}(3(\beta + bc_e)^2 - 8c_l) < 0$, 二阶顺序主子式

$|H| = \frac{1}{8}(-3h(\beta + bc_e)^2 + (8h - 3t^2 c_e^2)c_l) > 0$ 时, 该海塞矩阵负定, 利润函数 π_{sc}^{SC} 关于

决策变量 B_s 和 r_m 的严格凹函数, 模型存在最优解, 进一步将 π_{sc}^{SC} 分别对 B_s 和 r_m 求

一阶偏导并联立方程, 可得最优决策 $B_s^{SC*} = \frac{3tc_e c_l A_1}{A_3}$, $r_m^{SC*} = \frac{3hA_1(\beta + bc_e)}{A_3}$, 将 B_s^{SD*}

和 r_m^{SD*} 依次带入 p 和 w 的最优反应函数、需求函数、供应商和制造商利润函数, 得

到 C 模型下的均衡解如表 3-2 第 4 列所示。

3.2 证明完毕。

附录 2 命题 3.1 证明过程

(1)

$$w^{SC*} - w^{SD*} = \frac{8h^2(D_0 - c - ac_e)c_l((\beta + bc_e)^2 + t^2 c_e^2 c_l)}{(2(4h - t^2 c_e^2)c_l - h(\beta + bc_e)^2)((8h - 3t^2 c_e^2)c_l - 3h(\beta + bc_e)^2)} > 0, \quad ,$$

$$w^{SD*} - w^{SO*} = \frac{(D_0 - c - ac_e)(h(\beta + bc_e)^2 + 2t^2 c_e^2 c_l)}{4(4h - t^2 c_e^2)c_l - 2h(\beta + bc_e)^2} > 0, \quad w^{SO*} - w^{SN*} = 0; \quad (2)$$

$$p^{SN*} - p^{SO*} = \frac{b^2 c_e^2 (D_0 - c - ac_e)}{8c_l - 4b^2 c_e^2} > 0; \quad (3)$$

$$p^{SC*} - p^{SD*} = \frac{h(c - D_0 + ac_e)c_l((\beta + bc_e)(4bhc_e + 3t^2\beta c_e^2 - 12h\beta) + 2t^2c_e^2c_l)}{(h(\beta + bc_e)^2 + 2(t^2c_e^2 - 4h)c_l)(3h(\beta + bc_e)^2 + (3t^2c_e^2 - 8h)c_l)}, \quad \text{令}$$

$$(\beta + bc_e)(4bhc_e + 3t^2\beta c_e^2 - 12h\beta) + 2t^2c_e^2c_l = 0, \quad \text{可解得}$$

$$\overline{c_{l1}} = \frac{(\beta + bc_e)(12h\beta - 4bhc_e - 3t^2\beta c_e^2)}{2t^2c_e^2}, \quad \text{令 } 12h\beta - 4bhc_e - 3t^2\beta c_e^2 = 0, \quad \text{可解得}$$

$$h_1 = \frac{3t^2\beta c_e^2}{12\beta - 4bc_e}, \quad \text{因为 } c - D_0 + ac_e < 0, \quad \text{}$$

$$(h(\beta + bc_e)^2 + 2(t^2c_e^2 - 4h)c_l)(3h(\beta + bc_e)^2 + (3t^2c_e^2 - 8h)c_l) > 0, \quad \text{所以当 } h > h_1 \text{ 时,}$$

$$\text{若 } c_l > \overline{c_{l1}}, \text{ 则 } p^{SD*} > p^{SC*}, \text{ 反之, } p^{SD*} \leq p^{SC*}; \text{ 当 } 0 < h < h_1 \text{ 时, } p^{SD*} > p^{SC*}; \quad (4)$$

$$p^{SC*} - p^{SN*} = \frac{3(D_0 - c - ac_e)(-3h\beta^2 - 2bh\beta c_e + c_e^2(b^2h + t^2c_l))}{12h(\beta + bc_e)^2 + 4(-8h + 3t^2c_e^2)c_l}, \quad \text{令}$$

$$-3h\beta^2 - 2bh\beta c_e + c_e^2(b^2h + t^2c_l) = 0, \quad \text{可得 } \overline{c_{l2}} = \frac{h(3\beta - bc_e)(\beta + bc_e)}{t^2c_e^2}, \quad \text{所以当}$$

$$c_l > \overline{c_{l2}} \text{ 时, } p^{SN*} > p^{SC*}, \quad \text{反之, } p^{SN*} \leq p^{SC*}; \quad (5)$$

$$p^{SD*} - p^{SN*} = \frac{(c - D_0 + ac_e)(3h\beta^2 + 2bh\beta c_e - c_e^2(b^2h + 2t^2c_l))}{4h(\beta + bc_e)^2 + 8(-4h + t^2c_e^2)c_l}, \quad \text{令}$$

$$3h\beta^2 + 2bh\beta c_e - c_e^2(b^2h + 2t^2c_l) = 0, \quad \text{可得 } c_l = \frac{h(3\beta - bc_e)(\beta + bc_e)}{2t^2c_e^2}, \quad \text{所以当}$$

$$c_l > \frac{1}{2}\overline{c_{l2}} \text{ 时, } p^{SN*} > p^{SD*}, \quad \text{反之, } p^{SN*} \leq p^{SD*}; \quad (6)$$

$$p^{SC*} - p^{SO*} = \frac{(c - D_0 + ac_e)(6b^2h\beta c_e^2(\beta + bc_e) - h(3\beta + bc_e)^2c_l + 3t^2c_e^2c_l^2)}{2(b^2c_e^2 - 2c_l)(3h(\beta + bc_e)^2 + (-8h + 3t^2c_e^2)c_l)}, \quad \text{令}$$

$$6b^2h\beta c_e^2(\beta + bc_e) - h(3\beta + bc_e)^2c_l + 3t^2c_e^2c_l^2 = 0, \quad \text{可解得}$$

$$\overline{c_{l3}} = \frac{h(3\beta + bc_e)^2 - \sqrt{h(-72b^2t^2\beta c_e^4(\beta + bc_e) + h(3\beta + bc_e)^4)}}{6t^2c_e^2}, \quad \text{}$$

$$\overline{c_{l4}} = \frac{h(3\beta + bc_e)^2 + \sqrt{h(-72b^2t^2\beta c_e^4(\beta + bc_e) + h(3\beta + bc_e)^4)}}{6t^2c_e^2}, \quad \text{所以当 } 0 < c_l < \overline{c_{l3}} \text{ 或}$$

$$c_l > \overline{c_{l4}} \quad \text{时} \quad , \quad p^{SO*} > p^{SC*} \quad , \quad \text{反 之} \quad , \quad p^{SO*} \leq p^{SC*} \quad ; \quad (7)$$

$$p^{SD*} - p^{SO*} = \frac{(c - D_0 + ac_e)(2b^2 h \beta c_e^2 (\beta + bc_e) - h(3\beta^2 + bc_e(2\beta + 3bc_e))c_l + 2t^2 c_e^2 c_l^2)}{2(b^2 c_e^2 - 2c_l)(h(\beta + bc_e)^2 + 2(-4h + t^2 c_e^2)c_l)}$$

$$, \quad \text{令} \quad 2b^2 h \beta c_e^2 (\beta + bc_e) - h(3\beta^2 + bc_e(2\beta + 3bc_e))c_l + 2t^2 c_e^2 c_l^2 = 0 \quad , \quad \text{可 得}$$

$$\overline{c_{l5}} = \frac{3h\beta^2 + 2bh\beta c_e + 3b^2 h c_e^2 - \sqrt{h(-16b^2 t^2 \beta c_e^4 (\beta + bc_e) + h(3\beta^2 + bc_e(2\beta + 3bc_e))^2)}}{4t^2 c_e^2} ,$$

$$\overline{c_{l6}} = \frac{3h\beta^2 + 2bh\beta c_e + 3b^2 h c_e^2 + \sqrt{h(-16b^2 t^2 \beta c_e^4 (\beta + bc_e) + h(3\beta^2 + bc_e(2\beta + 3bc_e))^2)}}{4t^2 c_e^2}$$

$$, \quad \text{所以当} \quad 0 < c_l < \overline{c_{l5}} \quad \text{或} \quad c_l > \overline{c_{l6}} \quad \text{时} \quad , \quad p^{SO*} > p^{SD*} \quad , \quad \text{反之} \quad , \quad p^{SO*} \leq p^{SD*} .$$

命题 3.1 得证。

附录 3 命题 3.2-3.3 的证明过程

命题 3.2-3.3 的证明过程与命题 3.1 类似，此处不一一赘述。

附录 4 命题 3.4 证明过程

$$(1) \frac{\partial Q^{SN*}}{\partial c} = -\frac{1}{4} < 0, \quad \frac{\partial Q^{SO*}}{\partial c} = \frac{c_l}{2b^2 c_e^2 - 4c_l} < 0, \quad \frac{\partial Q^{SD*}}{\partial c} = \frac{2hc_l}{h(\beta + bc_e)^2 + 2(-4h + t^2 c_e^2)c_l} < 0,$$

$$\frac{\partial Q^{SC*}}{\partial c} = \frac{2hc_l}{3h(\beta + bc_e)^2 + (-8h + 3t^2 c_e^2)c_l} < 0 \quad , \quad \frac{\partial \pi_s^{SN*}}{\partial c} = \frac{1}{4}(c - D_0 + ac_e) < 0 \quad ,$$

$$\frac{\partial \pi_s^{SO*}}{\partial c} = \frac{2(c - D_0 + ac_e)c_l}{8c_l - 4b^2 c_e^2} < 0 \quad , \quad \frac{\partial \pi_s^{SD*}}{\partial c} = \frac{4h(c - D_0 + ac_e)(4h - t^2 c_e^2)c_l^2}{(h(\beta + bc_e)^2 + 2(-4h + t^2 c_e^2)c_l)^2} < 0 \quad ,$$

$$\frac{\partial \pi_s^{SC*}}{\partial c} = \frac{h(c - D_0 + ac_e)(16h - 9t^2 c_e^2)c_l^2}{(3h(\beta + bc_e)^2 + (-8h + 3t^2 c_e^2)c_l)^2} < 0 \quad , \quad \frac{\partial \pi_m^{SN*}}{\partial c} = \frac{1}{8}(c - D_0 + ac_e) < 0 \quad ,$$

$$\frac{\partial \pi_m^{SO*}}{\partial c} = \frac{(c - D_0 + ac_e)c_l}{4(2c_l - b^2 c_e^2)} < 0 \quad , \quad \frac{\partial \pi_m^{SD*}}{\partial c} = -\frac{h^2(c - D_0 + ac_e)((\beta + bc_e)^2 - 8c_l)c_l}{(h(\beta + bc_e)^2 + 2(-4h + t^2 c_e^2)c_l)^2} < 0 \quad ,$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \pi_m^{SC*}}{\partial c} &= -\frac{h^2(c-D_0+ac_e)(9(\beta+bc_e)^2-8c_l)c_l}{(3h(\beta+bc_e)^2+(-8h+3t^2c_e^2)c_l)^2} < 0; \quad (2) \quad \frac{\partial w^{SN*}}{\partial c} = \frac{1}{2} > 0, \quad \frac{\partial w^{SO*}}{\partial c} = \frac{1}{2} > 0, \\
 \frac{\partial p^{SN*}}{\partial c} &= \frac{1}{4} > 0, \quad \frac{\partial p^{SO*}}{\partial c} = \frac{c_l}{4c_l-2b^2c_e^2} > 0; \quad (3) \quad \frac{\partial w^{SD*}}{\partial c} = \frac{h(\beta+bc_e)^2+2(-2h+t^2c_e^2)c_l}{h(\beta+bc_e)^2+2(-4h+t^2c_e^2)c_l}, \quad \text{令} \\
 h(\beta+bc_e)^2+2(-2h+t^2c_e^2)c_l &= 0, \quad \text{可得 } c_l = \frac{h(\beta+bc_e)^2}{2(2h-t^2c_e^2)}, \quad \text{所以当 } c_l > \overline{c_{l11}} \text{ 时, } \frac{\partial w^{SD*}}{\partial c} > 0, \\
 \text{反之, } \frac{\partial w^{SD*}}{\partial c} &\leq 0; \quad \frac{\partial p^{SC*}}{\partial c} = \frac{h\beta^2+bh\beta c_e-2hc_l}{h(\beta+bc_e)^2+2(-4h+t^2c_e^2)c_l}, \quad \text{令 } h\beta^2+bh\beta c_e-2hc_l = 0, \quad \text{可得} \\
 c_l &= \frac{1}{2}(\beta^2+b\beta c_e), \quad \text{所以当 } c_l > \frac{1}{2}\overline{c_{l12}} \text{ 时, } \frac{\partial p^{SD*}}{\partial c} > 0, \quad \text{反之, } \frac{\partial p^{SD*}}{\partial c} \leq 0; \quad (4) \\
 \frac{\partial w^{SC*}}{\partial c} &= \frac{-3h\beta^2-6bh\beta c_e-3b^2hc_e^2+4hc_l-3t^2c_e^2c_l}{(3t^2c_e^2-8h)c_l-3h(\beta+bc_e)^2}, \quad \text{令} \\
 -3h\beta^2-6bh\beta c_e-3b^2hc_e^2+4hc_l-3t^2c_e^2c_l &= 0, \quad \text{可得 } c_l = \frac{3h(\beta+bc_e)^2}{4h-3t^2c_e^2}, \quad \text{所以当 } c_l > \overline{c_{l13}} \text{ 时,} \\
 \frac{\partial w^{SC*}}{\partial c} &> 0, \quad \text{反之, } \frac{\partial w^{SC*}}{\partial c} \leq 0; \quad \frac{\partial p^{SC*}}{\partial c} = \frac{3h\beta^2+3bh\beta c_e-2hc_l}{3h(\beta+bc_e)^2+(-8h+3t^2c_e^2)c_l}, \quad \text{令} \\
 3h\beta^2+3bh\beta c_e-2hc_l &= 0, \quad \text{可得 } c_l = \frac{3}{2}(\beta^2+b\beta c_e), \quad \text{所以当 } c_l > \frac{3}{2}\overline{c_{l12}} \text{ 时, } \frac{\partial p^{SC*}}{\partial c} > 0, \quad \text{反之,} \\
 \frac{\partial p^{SC*}}{\partial c} &\leq 0.
 \end{aligned}$$

命题 3.4 得证。

附录 5 命题 3.5-3.6 证明过程

命题 3.5-3.6 的证明过程与命题 3.4 类似，此处不一一赘述。

附录 6 4.1 证明过程

参考文献[70,71]，由于零售价是在批发价格的基础上有一定的加价，因此可以表示为 $p = w + x$ ，其中 x 为制造商加价。这样，可以将零售商的决策变量转化为单位利润 x 。剩下的求解过程类似于 3.2 节模型求解过程，本节具体求解过程在此省略。

4.1 证明完毕。

附录 7 命题 4.1-4.3 证明过程

命题 4.1-4.3 的证明过程与命题 3.1 类似，此处不一一赘述。

附录 8 命题 4.4-4.6 证明过程

命题 4.4-4.6 的证明过程与命题 3.4 类似，此处不一一赘述。

附录 9 5.1 证明过程

5.1 证明过程与 4.1 证明过程类似，此处不一一赘述。

附录 10 命题 5.1-5.3 证明过程

命题 5.1-5.3 的证明过程与命题 3.1 类似，此处不一一赘述。

附录 11 命题 5.4-5.6 证明过程

命题 5.4-5.6 的证明过程与命题 3.4 类似，此处不一一赘述。

附录 12 命题 6.1-6.7 证明过程

命题 6.1-命题 6.7 的证明过程与命题 3.1 类似，此处不一一赘述。

附录 13 相关符号设置

$$\begin{aligned}
 A_1 &= D_0 - c - ac_e, & A_2 &= 2(4h - t^2c_e^2)c_l - h(\beta + bc_e)^2, \\
 A_3 &= (8h - 3t^2c_e^2)c_l - 3h(\beta + bc_e)^2, & A_4 &= h(b(c - D_0) - a\beta)c_e(\beta + bc_e), \\
 A_5 &= (6(D_0 - c)h + 2ahc_e - 2(D_0 - c)t^2c_e^2)c_l, & A_6 &= (8h - t^2c_e^2)c_l - 2h(\beta + bc_e)^2, \\
 A_7 &= (9h - 2t^2c_e^2)c_l - 2h(\beta + bc_e)^2, & A_8 &= (9h - 4t^2c_e^2)c_l - 4h(\beta + bc_e)^2, \\
 h_1 &= \frac{3t^2\beta c_e^2}{12\beta - 4bc_e}, h_2 = \frac{bt^2c_e^3}{2(bc_e - \beta)}, h_3 = \frac{3}{16}t^2c_e^2, h_4 = \frac{t^2c_e^2(2\beta + bc_e)}{6\beta + 2bc_e}, h_5 = \frac{2t^2\beta c_e^2}{6\beta - 3bc_e}, \\
 h_6 &= \frac{2t^2c_e^2(2\beta + bc_e)}{3(4\beta + bc_e)}, & B_1 &= h(h(3\beta + bc_e)^4 - 72b^2t^2\beta c_e^4(\beta + bc_e)), \\
 B_2 &= h(h(3\beta^2 + bc_e(2\beta + 3bc_e))^2 - 16b^2t^2\beta c_e^4(\beta + bc_e)), \\
 B_3 &= h(h(9\beta^2 + bc_e(6\beta - bc_e))^2 - 36b^2t^2\beta c_e^4(\beta + bc_e)), \\
 B_4 &= 4(3h\beta^2 + 2bh\beta c_e)^2 - 8b^2ht^2\beta c_e^4(\beta + bc_e),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_5 &= h \left(h \left(8\beta^2 + bc_e (4\beta - bc_e) \right)^2 - 64b^2t^2\beta c_e^4 (\beta + bc_e) \right), \\
 B_6 &= h \left(h \left(4\beta^2 + bc_e (2\beta + bc_e) \right)^2 - 16b^2t^2\beta c_e^4 (\beta + bc_e) \right), \\
 \frac{1}{c_{11}} &= \frac{(\beta + bc_e)(12h\beta - 4bhc_e - 3t^2\beta c_e^2)}{2t^2c_e^2}, \quad \frac{1}{c_{12}} = \frac{h(3\beta - bc_e)(\beta + bc_e)}{t^2c_e^2}, \\
 \frac{1}{c_{13}} &= \frac{h(3\beta + bc_e)^2 - \sqrt{B_1}}{6t^2c_e^2}, \quad \frac{1}{c_{14}} = \frac{h(3\beta + bc_e)^2 + \sqrt{B_1}}{6t^2c_e^2}, \\
 \frac{1}{c_{15}} &= \frac{3h\beta^2 + 2bh\beta c_e + 3b^2hc_e^2 - \sqrt{B_2}}{4t^2c_e^2}, \quad \frac{1}{c_{16}} = \frac{3h\beta^2 + 2bh\beta c_e + 3b^2hc_e^2 + \sqrt{B_2}}{4t^2c_e^2}, \\
 \frac{1}{c_{17}} &= \frac{h(bc_e(bc_e - 6\beta) - 3\beta^2)}{3t^2c_e^2}, \quad \frac{1}{c_{18}} = \frac{h(bc_e - \beta)(\beta + 3bc_e)}{2t^2c_e^2}, \quad \frac{1}{c_{19}} = \frac{bhc_e(\beta^2 - b^2c_e^2)}{4bhc_e - 4h\beta - 2bt^2c_e^3}, \\
 \frac{1}{c_{110}} &= \frac{3bhc_e(b^2c_e^2 - \beta^2)}{12h\beta + 4bhc_e + 3bt^2c_e^3}, \quad \frac{1}{c_{111}} = \frac{h(\beta + bc_e)^2}{2(2h - t^2c_e^2)}, \quad \frac{1}{c_{112}} = \beta^2 + b\beta c_e, \quad \frac{1}{c_{113}} = \frac{3h(\beta + bc_e)^2}{4h - 3t^2c_e^2}, \\
 \frac{1}{c_{114}} &= \frac{bhc_e(\beta + bc_e)^2}{12h\beta + 4bhc_e - 2t^2c_e^2(2\beta + bc_e)}, \quad \frac{1}{c_{115}} = \frac{3bhc_e(\beta + bc_e)^2}{12h\beta + 4bhc_e - 6t^2\beta c_e^2 - 3bt^2c_e^3}, \\
 \frac{1}{c_{116}} &= \frac{(\beta + bc_e)(6h\beta - 2bhc_e + 3t^2\beta c_e^2)}{4t^2c_e^2}, \quad \frac{1}{c_{117}} = \frac{9h\beta^2 + 6bh\beta c_e - b^2hc_e^2 - \sqrt{B_3}}{6t^2c_e^2}, \\
 \frac{1}{c_{118}} &= \frac{9h\beta^2 + 6bh\beta c_e - b^2hc_e^2 + \sqrt{B_3}}{6t^2c_e^2}, \quad \frac{1}{c_{119}} = \frac{6h\beta^2 + 4bh\beta c_e - \sqrt{B_4}}{2t^2c_e^2}, \\
 \frac{1}{c_{120}} &= \frac{6h\beta^2 + 4bh\beta c_e + \sqrt{B_4}}{2t^2c_e^2}, \quad \frac{1}{c_{121}} = \frac{1}{3}b^2c_e^2, \quad \frac{1}{c_{122}} = \frac{2h(\beta + bc_e)^2}{6h - t^2c_e^2}, \quad \frac{1}{c_{123}} = \frac{2h(\beta + bc_e)^2}{8h + t^2c_e^2}, \\
 \frac{1}{c_{124}} &= \frac{9h(\beta + bc_e)^2}{8h + 9t^2c_e^2}, \quad \frac{1}{c_{125}} = \frac{h(bc_e(bc_e - 4\beta) - 2\beta^2)}{2t^2c_e^2}, \quad \frac{1}{c_{126}} = \frac{h(2\beta - bc_e)(\beta + bc_e)}{t^2c_e^2}, \\
 \frac{1}{c_{127}} &= \frac{8h\beta^2 + 4bh\beta c_e - b^2hc_e^2 - \sqrt{B_5}}{8t^2c_e^2}, \quad \frac{1}{c_{128}} = \frac{8h\beta^2 + 4bh\beta c_e - b^2hc_e^2 + \sqrt{B_5}}{8t^2c_e^2}, \\
 \frac{1}{c_{129}} &= \frac{4h\beta^2 + 2bh\beta c_e + b^2hc_e^2 - \sqrt{B_6}}{4t^2c_e^2}, \quad \frac{1}{c_{130}} = \frac{4h\beta^2 + 2bh\beta c_e + b^2hc_e^2 + \sqrt{B_6}}{4t^2c_e^2}, \\
 \frac{1}{c_{131}} &= \frac{2h(\beta + bc_e)^2}{3h - 2t^2c_e^2}, \quad \frac{1}{c_{132}} = \frac{2h(\beta + bc_e)^2}{9h + 2t^2c_e^2}, \quad \frac{1}{c_{133}} = \frac{h(\beta + bc_e)^2}{t^2c_e^2},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \overline{c_{l34}} &= \frac{2bhc_e(\beta + bc_e)^2}{12h\beta + 4bhc_e - t^2c_e^2(2\beta + bc_e)} \quad , \quad \overline{c_{l35}} = \frac{4bhc_e(\beta + bc_e)^2}{12h\beta + c_e(3bh - 4t^2c_e(2\beta + bc_e))} \quad , \\
 \overline{c_{l36}} &= \frac{2h(\beta + bc_e)^2}{6h + t^2c_e^2} \quad , \quad \overline{c_{l37}} = \frac{7h(\beta + bc_e)^2}{12h - 7t^2c_e^2} \quad , \quad \overline{c_{l38}} = \frac{(\beta + bc_e)(2bhc_e + 3t^2\beta c_e^2 - 6h\beta)}{2t^2c_e^2} \quad , \\
 \overline{c_{l39}} &= \frac{(\beta + bc_e)(6h\beta - bhc_e - 2t^2\beta c_e^2)}{2(3h - t^2c_e^2)} \quad , \quad \overline{c_{l40}} = \frac{2c_e(\beta + bc_e)(bh + t^2\beta c_e)}{6h + t^2c_e^2} \quad , \\
 \overline{c_{l41}} &= \frac{6h\beta^2 + 7bh\beta c_e + b^2hc_e^2}{6h - t^2c_e^2} \quad , \quad t_1 = \frac{\sqrt{3h\beta - bhc_e}}{\sqrt{\beta c_e}} \quad .
 \end{aligned}$$

攻读硕士学位期间发表或录用的学术论文

- [1] 苏丹丹, 刘长义, 刘志, 刘从虎. 碳交易下数字化技术对供应链定价与减排决策的影响[J]. 安徽工程大学学报 (录用,待发表).

致谢

行文至此，在安工程七年的学习生涯很快就结束了，非常感谢学习路上帮助我的人。

首先，感谢我的家人，含辛茹苦地养育我。在我求学过程中，尤其是初中三年，因为离校远，每天得坚持五点起床，坐上接送的车辆去学校，而一束柔和的灯光总是陪伴我上车。春夏秋冬，从不间断。感谢他们的付出，让我能够专心学习。

其次，感谢我学习路上教学的老师。从小学的启蒙老师到现在指导论文并关心我生活的老师们，感谢他们的辛勤付出。感谢刘长义老师对我学习以及生活上的关心。在论文写作过程中，感谢刘志老师从模型建立、分析到结论不断地提供修改意见，同时感谢唐娟老师对论文语言的打磨。感谢他们对我无微不至的关心，让我在读硕期间受益匪浅。

最后，感谢陪伴我学习生活的同学朋友。感谢舍友大牛、二牛和小汪对我的鼓励和帮助，感谢同门任佳宝和陈奎在我论文遇到难题时提供建议，未来的日子里，无论我们身处何方，这段友谊将永远留在我的心中，成为我人生中最美好的回忆。