

分类号: F272

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220720128



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 区块链技术驱动的双渠道供应链
定价和碳减排决策研究

论文作者 陈奎

指导教师 龚本刚 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：2220720128

区块链技术驱动的双渠道供应链
定价和碳减排决策研究

Research on Pricing and Carbon Emission Reduction
Decisions in Blockchain Technology-Driven Dual-
Channel Supply Chains

学生姓名：_____陈奎_____

指导教师：_____龚本刚 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：陈奎

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：

陈奎

日期：2025 年 5 月 14 日

指导教师签名：

姜志刚

日期：2025 年 5 月 14 日

区块链技术驱动的双渠道供应链定价和碳减排决策研究

摘 要

近年来，为了应对环境污染和工业化进程加快对生态系统构成的威胁，企业纷纷开展碳减排绿色转型，并以此满足消费者低碳偏好。另外，电子商务的快速发展使得平台经济发展迅猛，许多的企业为了满足消费者的购买习惯，选择平台和零售商共存的双渠道运营模式。然而在实际的运营过程中，远离制造商的消费者往往并不了解且不完全信任制造商的碳减排行为，从而导致市场需求不确定，进而引发资源浪费和库存积压等问题。区块链技术的出现为解决上述问题提供技术支持，基于其去中心化，数据不可篡改、透明和可追溯性等特征，产品在原料采购、生产运输过程中的数据都可以被消费者实时掌握，增加消费者对减排产品的信任程度。企业应用区块链需要高昂的成本，因此，双渠道供应链成员应用区块链技术的成本分配，以及区块链成本对企业决策的影响值得进一步研究。

基于上述背景，本文以碳减排制造商，平台和传统零售商组成的双渠道供应链为研究对象，理清引入区块链技术对双渠道供应链的影响机制，在此基础上，分析不同应用模式下企业引入区块链技术的条件以及探讨区块链成本变动对双渠道供应链定价和碳减排决策的影响。本文主要研究内容如下：

首先，探讨区块链技术对双渠道供应链的影响。介绍双渠道供应链和区块链技术的理论概念和发展，从多个维度详细阐述区块链

技术对双渠道供应链决策的影响，以及分析不同区块链应用模式下双渠道供应链的运营流程，为重点研究不同模式下双渠道供应链定价和碳减排决策的影响奠定了理论基础。

其次，研究制造商主导区块链赋能下的双渠道供应链定价和碳减排决策的影响。针对目前区块链平台存在不同费用模式的情形，根据制造商是否采用区块链技术以及选择何种费用模式构建三种双渠道供应链决策模型，探究制造商最佳区块链应用策略，分析区块链成本对企业定价和碳减排决策的影响。研究表明：制造商区块链应用决策与区块链成本有关，当区块链固定费用与单位运营费用均较低且其比值低于（高于）某一阈值时，制造商应会选择固定成本模式（单位运营成本模式）。

最后，研究双渠道供应链成员协同采用区块链技术对企业定价和碳减排决策的影响。根据双渠道供应链成员是否采用区块链技术构建两种供应链模型，研究双渠道供应链成员协同采用区块链技术的条件，并研究区块链上链成本对双渠道供应链成员决策的影响。研究表明，只有当区块链上链成本较低（较高）时，应用（不应用）区块链技术是双渠道供应链成员的均衡决策，当区块链上链成本适中时，供应链成员在区块链技术应用上无法达成一致。当区块链成本低于一定阈值时，采用区块链技术会促进产品定价和碳减排。

关键词：双渠道供应链，区块链技术，定价决策，碳减排决策，博弈论

RESEARCH ON PRICING AND CARBON EMISSION REDUCTION DECISIONS IN BLOCKCHAIN TECHNOLOGY-DRIVEN DUAL-CHANNEL SUPPLY CHAINS

ABSTRACT

In recent years, to address environmental pollution and ecosystem threats posed by accelerated industrialization, enterprises have increasingly pursued green transformations through carbon emission reduction initiatives while catering to consumer preferences for low-carbon products. Concurrently, the rapid development of e-commerce has spurred the growth of platform economies, prompting many manufacturers to adopt dual-channel supply chain models combining platform and traditional retail operations to accommodate evolving purchasing behaviors. However, operational challenges arise as geographically dispersed consumers often lack awareness and trust in manufacturers' carbon reduction efforts, resulting in demand uncertainty, resource waste, and inventory overstocking. Blockchain technology emerges as a viable solution, leveraging its decentralized architecture, immutability, transparency, and traceability to enable real-time tracking of product lifecycle data from raw

material procurement to distribution. This enhanced visibility fosters consumer trust in emission-reduction products. Given the substantial costs associated with blockchain implementation, this study investigates cost allocation mechanisms among dual-channel supply chain members and examines how blockchain costs influence operational decisions.

Against this backdrop, this paper investigates a dual-channel supply chain comprising a carbon-reducing manufacturer, an e-commerce platform, and a traditional retailer. It elucidates the impact mechanisms of blockchain adoption on supply chain operations and explores implementation conditions under different cost-sharing models. Furthermore, it analyzes how blockchain cost variations affect pricing strategies and carbon reduction decisions. The research framework encompasses three key components:

First, the study examines blockchain's systemic impacts on dual-channel supply chains. It establishes theoretical foundations by reviewing conceptual developments in dual-channel operations and blockchain technology. A multidimensional analysis details blockchain's influence on supply chain decision-making processes and compares operational workflows under distinct blockchain cost structures.

Second, the research investigates scenarios where manufacturers exclusively bear blockchain costs. Three decision-making models are constructed based on blockchain adoption status (adopted/not adopted) and

cost allocation modes (fixed cost/unit operation cost). Analytical results reveal that optimal blockchain implementation strategies depend on cost parameters: manufacturers prefer fixed-cost models when both fixed fees and unit operational costs remain below critical thresholds with their ratio under a specific value, while unit-cost models become preferable when the ratio exceeds this threshold.

Finally, the paper explores collaborative blockchain adoption across supply chain members. Two operational models (with/without blockchain integration) are developed to identify implementation conditions and assess cost impacts. Findings suggest that blockchain adoption constitutes an equilibrium strategy only when implementation costs fall below a critical threshold. Moderate cost levels create strategic conflicts among members regarding technology adoption. Notably, blockchain implementation below cost thresholds enhances product pricing flexibility and stimulates carbon reduction investments.

Author: Kui Chen(Management science and engineering)

Supervised by: Professor Bengang Gong

KEY WORDS: Dual-channel supply chain, blockchain technology, pricing decisions, carbon emission reduction, Game theory.

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
目 录.....	VI
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	3
1.2 国内外研究现状.....	4
1.2.1 碳减排背景下双渠道供应链决策研究.....	4
1.2.2 信息不对称下供应链管理决策研究.....	5
1.2.3 基于区块链技术的供应链管理研究.....	7
1.2.4 文献述评.....	8
1.3 研究内容和创新点.....	9
1.3.1 研究内容.....	9
1.3.2 创新点.....	10
1.4 研究方法和技术路线.....	11
1.4.1 研究方法.....	11
1.4.2 技术路线.....	12
第 2 章 区块链技术及其对双渠道供应链的影响.....	13
2.1 区块链技术相关理论.....	13
2.1.1 区块链技术基本概念.....	13
2.1.2 区块链技术的基本特征.....	14
2.1.3 区块链技术在国内外的发展.....	15
2.2 区块链技术在双渠道供应链中的应用.....	17
2.2.1 双渠道供应链的内涵及结构.....	17
2.2.2 区块链技术在双渠道供应链的应用.....	18
2.3 区块链技术应用对双渠道供应链决策的影响.....	19

2.3.1 区块链技术对双渠道供应链定价决策的影响.....	19
2.3.2 区块链技术不同成本分摊模式对双渠道供应链决策的影响.....	20
2.4 本章小结.....	22
第 3 章 制造商主导区块链赋能下双渠道供应链定价和碳减排决策.....	23
3.1 问题描述与相关假设.....	24
3.1.1 问题描述.....	24
3.1.2 相关假设.....	25
3.2 模型建立与求解.....	27
3.2.1 模型 O	27
3.2.2 模型 F	28
3.3.3 模型 S	29
3.3 结果比较与分析.....	31
3.3.1 最优解比较分析.....	31
3.3.2 敏感性分析.....	34
3.4 数值仿真.....	35
3.4.1 区块链成本对均衡解的影响.....	36
3.4.2 区块链成本对制造商、零售商以及区块链平台利润的影响.....	39
3.4.3 区块链平台对两种模式的偏好分析.....	39
3.5 本章小结.....	40
第 4 章 双渠道供应链成员协同赋能区块链下产品定价和碳减排决策.....	42
4.1 问题描述与相关假设.....	43
4.1.1 问题描述.....	43
4.1.2 相关假设.....	44
4.2 模型建立与求解.....	47
4.2.1 不采用区块链技术情形（模型 N ）.....	47
4.2.2 采用区块链技术情形（模型 B ）.....	47
4.3 结果分析.....	48
4.3.1 区块链技术影响分析.....	48
4.3.2 两种销售渠道上消费者比例影响分析.....	51

4.3.3 其它参数的影响分析.....	52
4.4 数值仿真.....	54
4.4.1 区块链的单位上链成本对均衡解的影响.....	54
4.4.2 消费者低碳偏好影响分析.....	57
4.4.3 零售商消费者比例对供应链决策的影响.....	58
4.5 本章小结.....	59
第 5 章 总结与展望.....	61
5.1 总结.....	61
5.2 展望.....	62
参考文献.....	64
附录.....	71
附录 1 证明模型 O 的最优结果	71
附录 2 证明命题 3.1.....	72
附录 3 证明命题 3.2.....	73
附录 4 证明命题 3.3.....	74
附录 5 证明命题 3.4.....	74
附录 6 证明命题 3.5.....	75
附录 7 证明命题 3.6.....	76
附录 8 证明命题 3.7.....	76
附录 9 证明第四章区块链上链成本阈值大小关系.....	77
附录 10 证明命题 4.1.....	78
附录 11 证明命题 4.2.....	78
附录 12 证明命题 4.3.....	79
附录 13 证明命题 4.4.....	80
附录 14 证明命题 4.5.....	81
附录 15 证明命题 4.6.....	81
附录 16 证明命题 4.7.....	82
附录 17 符号定义.....	83
攻读硕士学位期间发表或录用的学术论文.....	84

发表或录用论文.....	84
参与科研项目.....	84
致谢.....	85

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

近年来，随着世界人口的持续增加和工业化进程的加速，大量温室气体的排放导致全球温度持续上升^[1]。为了减少碳排放对环境气候的影响，推进经济社会绿色低碳发展，世界各国相继出台了一系列减少碳排放的政策举措。在 2015 年颁布的《巴黎协定》，多达 100 多个国家进行签订，在一定程度上促进了政府制定减排政策，以避免过多的碳排放产生。习近平总书记在第 75 届联合国大会上提出我国将努力实现 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和的目标，为实现“十四五期间”的环境保护攻坚战略目标^[2,3]。与此同时，消费者的低碳意识与日剧增，根据《2024 中国可持续消费报告》，截至 2024 年年底，超过 87% 的受访者已经在日常生活中以不同的形式与程度参与低碳消费，此外，超过 63% 的受访者明确感知到了气候变化对日常生活的影响^[4]。在“双碳”目标的国家战略背景下，制造企业纷纷开展碳减排等绿色生产活动，以此来满足消费者的低碳需求和偏好，如格力、海尔等知名企业推出的节能家电产品，有效地降低能耗和减少碳排放，迎合了消费者的低碳环保需求^[5]。

此外，随着互联网经济的迅猛发展，线上平台已经成为消费者的主要购物途径之一^[6]。据中国商务部研究院调查数据显示，2024 年全国线上零售额达 18.5 万亿元，同比增长 10%，占社会消费品零售总额比重提升至 35%，创历史新高。第三方机构艾瑞咨询报告指出，2023 年中国互联网平台经济规模预计突破 4.8 万亿元，年增长率保持在 18% 以上，美团、京东等头部平台季度营收同比增幅均超过 15%。在此背景下，越来越多的企业采用零售商和平台并存的双渠道营销模式，不仅能够满足消费者的购买选择，还能迅速占领消费市场，提高自身收益，例如，元气森林 2021 年正式抖音电商平台，其线上渠道销售额占比从 2020 年的 35% 跃升至 2023 年的 68%，带动整体营收增长 41%。

然而，在双渠道供应链实际运营过程中，制造企业在低碳经济转型过程往

往存在于消费者之间的信息不对称，即消费者往往难以准确了解制造商实际的碳减排水平，而制造商也难以准确了解消费者的低碳偏好。基于现有技术的减排产品溯源信息系统能够在一定程度上向消费者公开产品信息但难以保证信息真实可靠，这直接增加了低碳产品需求的不确定性，影响双渠道供应链的运营效率^[7]。引入区块链技术能够有效地克服上述难题，该技术本质上属于一种去中心化的分布式账本系统，能够有效解决多边信息共享问题，具有数据不可篡改、可溯源、建立信任，智能执行等优势^[8,9]。2016 年《“十三五”国家信息化规划》将区块链技术纳入其中，在国家战略中加大推动“区块链+”的理念逐渐深入，同时各行业也积极参与并投入区块链的应用和研究中。在区块链上运行并实施由一组规则控制的数字协议程序，即智能合约，能够优化供应链的协调机制；其自动化、透明化和防篡改等特点能够有效解决由于信息传递延迟或扭曲等问题对供应链利润的影响，并提升企业减排效率^[10]。例如，宝马集团应用区块链技术记录钢材生产过程中碳排放数据，带动供应链减排 14 万吨 CO₂，较传统模式减排效率提升了 27%。此外，企业利用区块链技术其去信任化、公开透明、防篡改防伪造、可追溯性等特征，可以向消费者展示企业清晰准确的碳减排投资信息，增强消费者对产品的信任感，从而提高消费者的购买意愿^[11]。例如，雀巢公司在爱尔兰牧场部署 IoT 传感器，实时采集奶牛喂养、粪便处理、牧场光伏发电等 12 项碳数据，并通过 Hyperledger Fabric 链上存证，消费者则可以通过扫描产品二维码可查看每升牛奶的碳足迹明细（包括牧场直供占比、运输里程碳中和证明），从而大大提升了产品的市场吸引力。

在供应链中应用区块链技术的实践显示，作为一项新兴技术，其实际应用并不十分普及。企业在引入区块链技术时需要投入大量资金，包括开发成本、运营成本和专业人才引进等方面^[12]。对于大多数企业而言，部署区块链技术往往伴随着财务上的重大考验，盲目引进可能会对企业的盈利状况造成直接的负面影响。例如，德国知名科技公司 Northern Data AG 曾斥巨资转型区块链基础设施服务后因成本失控而导致最终解散重组。因此，众多企业在进行区块链技术应用决策时，都应首先考虑其应用成本，其中，比较常见的区块链成本模式有按固定费用收费和按单位运营成本收费^[13]。例如，阿里云区块链服务 BaaS 提供 Hyperledger Fabric 作为其支持的三种主要区块链技术引擎之一，其区块链服务

采用包月或包年的固定费用收取模式。由华为云推出的企业级区块链技术平台 **Blockchain Service** 则提供按包月（或包年）收费以及按单位价格两种收费模式。因此，双渠道供应链相关决策者应关注如何在权衡区块链带来的收益与实施成本的基础上，选择区块链技术的应用策略。研究如何利用区块链技术解决制造商减排信息和消费者低碳偏好之间的信息不对称问题，以及区块链不同应用模式对双渠道供应链碳减排和定价决策的影响，是一个值得研究的双渠道供应链运营管理问题。

基于以上背景，本课题以制造商、平台和传统零售商组成的双渠道供应链为研究对象，引入区块链技术，首先考虑供应链成员采用区块链技术进行信息共享对产品市场需求的影响，刻画消费者的低碳偏好，渠道间交叉弹性系数对产品市场需求的影响因素；然后根据供应链成员是否采用区块链技术以及采用何种应用模式构建不同的双渠道供应链决策模型；最后比较分析不同应用模式下双渠道供应链成员的决策行为，并进行应用研究。预期得出各供应链成员的最优生产定价决策，供应链成员采用区块链技术的条件以及对不同模式进行选择，并从供应链成员、消费者角度给出建议。相关研究成果在丰富考虑区块链技术的双渠道供应链理论的同时，也为在双渠道供应链中各企业的相关运营决策提供借鉴。

1.1.2 研究意义

对区块链驱动下的双渠道供应链定价和碳减排决策研究具有重要的理论和现实意义，具体如下：

(1) 理论意义

本文运用博弈理论在制造商进行碳减排投资情形下，根据双渠道供应链成员不同区块链应用模式构建不同的决策模型，并探讨不同模式下双渠道供应链成员实施区块链技术的边界条件，以及研究区块链实施成本对双渠道供应链成员运营决策的影响。本文研究进一步发展了数字经济情形下双渠道供应链碳减排的决策理论。

(2) 现实意义

由于消费者对于企业产品真实碳减排数据认知不足，导致消费者对碳减排

制造品接受度和支付意愿较低，而区块链作为一种分布式共享账本可以有效解决消费者对产品的信任问题。本文帮助企业在数字化转型过程中平衡区块链技术投入与市场回报，以及企业定价和减排提供决策参考。这对加速制造业绿色转型、促进碳交易市场健康发展具有重要的现实指导意义。

1.2 国内外研究现状

为了更好的了解区块链技术驱动的双渠道供应链研究现状，本文对现有的相关研究进行了梳理和总结，主要包括碳减排背景下双渠道供应链决策研究、信息不对称下供应链管理决策研究，以及基于区块链技术的供应链管理研究三个方面。

1.2.1 碳减排背景下双渠道供应链决策研究

近年来，全球气候变暖和空气污染等环境问题日益凸显，为了响应政府号召，许多制造企业纷纷进行碳减排投资，旨在减少二氧化碳排放量。此外，随着互联网和电子商务的迅猛发展，越来越多的制造商企业采用双渠道的营销模式，从而迅速占领消费市场，提升自身收益。目前，相关学者围绕碳减排背景下双渠道供应链决策展开了研究，相关研究主要从碳减排背景下供应链的渠道选择和协调、碳排放政策和消费者行为对双渠道供应链决策的影响等方面展开研究。

(1) 碳减排背景下供应链渠道选择和协调方面。如 Yang 等^[14]探讨制造商在碳排放限制下，如何根据产品特性和消费者渠道偏好进行渠道选择，以及这些选择如何受政府碳配额政策影响的决策过程。Qiu 等^[15]研究政府低碳补贴政策下两级双渠道供应链中制造商与零售商的渠道选择与碳排放策略，探讨了补贴、在线渠道份额与供应链公平性之间的关系，并为供应链参与者提供策略。张川^[16]等研究电动汽车动力电池制造商在不同回收渠道模式选择下的碳减排和定价策略，通过 Stackelberg 博弈模型分析了四种混合渠道回收模式下的最优定价、利润及碳减排决策，并得出制造商在不同条件下最优回收渠道模式和碳减排水平。Xu 等^[17]构建一个由一家生产企业和一家分销企业组成的两级供应链模型，

通过信号博弈分析了在无信息和信息不对称情况下生产企业渠道侵占和碳减排策略，研究结果表明，无论何种信息情形下，生产企业的碳减排水平只有当侵占成本较低时才能得到改善。Ji 等^[18]探讨了低碳环境下供应链成员碳减排策略与渠道选择，发现联合减排策略及合适的渠道选择对实现减排目标、促进经济发展具有积极影响。

(2) 碳排放政策对双渠道供应链影响方面。如 Huang 等^[19]对比分析竞争性闭环供应链中碳排放政策与最优决策，发现混合碳排放政策在特定条件下相比单一碳税政策能带来更优的经济和环境效益。Ganguly 等^[20]构建一个包含制造商和零售商的双渠道供应链模型，研究结果发现，碳减排政策不仅促使制造商采用绿色技术降低生产碳排放，还影响线上线下渠道策略的制定，以应对市场需求的不确定性和搭便车行为。杨磊等^[21]基于碳交易机制针对由单制造商和单零售商组成的两级供应链，建立了四种不同渠道结构的供应链分销模型，采用逆向归纳法得到不同渠道结构下企业的最优定价决策、减排决策以及最优利润，并对模型的最优决策进行了对比分析。Gao 等^[22]基于主成分分析和核平滑方法，构建一个融合碳减排政策和双渠道（线上与线下）的可持续闭环供应链网络模型，为管理者制定策略提供了有力支持。

(3) 消费者行为对双渠道供应链决策的影响方面。如 Qiu 等^[23]探讨消费者虚拟展厅行为（VSB）对双渠道（线上与线下）供应链中制造商与零售商战略决策的影响，揭示消费者行为如何驱动供应链策略的调整。He 等^[24]研究揭示消费者搭便车行为对双渠道供应链中碳排放的影响，并提出政府电子商务税可作为调节手段，旨在平衡经济利益与环境保护。Feng 等^[25]分析消费者线上回收偏好对双回收渠道逆向供应链的影响，并提出了协调策略，从而实现双渠道供应链优化与双赢局面。王玉燕等^[26]构建由制造商线上直销和线下零售商分销组成的双渠道供应链，基于消费者对线上线下产品质量感知的差异，研究搭便车行为下的最优定价与服务决策问题，并分析初始质量感知系数、线上线下渠道竞争程度和搭便车程度等因素对最优决策和利润的影响。

1.2.2 信息不对称下供应链管理决策研究

信息不对称影响供应链的运作效率和成员决策，进而导致企业整体利润下

降，如今已经受到越来越多学者的关注。本文将对需求信息不对称、成本信息不对称以及其他信息不对称等情形下供应链管理决策相关研究进行总结。

(1) 需求信息不对称方面。如 Hu 等^[26]研究在双渠道供应链中当电商零售商掌握市场需求信息时，信息结构（对称与不对称）和权力结构对供应商和电商零售商权力结构偏好的影响，并探讨了需求信息不对称对双渠道成员决策的影响。Li 等^[27]研究当被许可方的产品需求潜力信息不对称时，技术供应商如何优化设计包含预付费用和产品销售版税的许可合同。夏良杰等^[28]构建由一个制造商和一个零售商组成的二级供应链，零售商持有制造商股份且拥有关于市场需求的私有信息，研究零售商和制造商主导供应链时上下游企业的定价决策，并探讨制造商和零售商实现双赢的条件。胡晓青等^[29]在考虑制造商拥有私有需求信息时，构建由一个制造商和一个零售商组成的双渠道供应链，分别基于两部定价契约和质量激励契约来构建信息甄别模型，探讨制造商实现需求信息共享的最优契约方案。Ma 等^[30]探究双积分政策下新能源汽车技术创新决策，重点研究了信息不对称对政策激励效果的影响及信息共享的条件与激励机制。

(2) 成本信息不对称方面。如 Huang 等^[31]在考虑成本信息不对称情境下，研究上游供应商如何基于下游零售商的公平关切进行定价策略调整，并揭示了这种不对称信息对供应链决策的影响。Bessler 等^[32]分析成本信息不对称和代理成本对企业分红倾向的影响，研究发现代理成本在解释分红政策上更为直接相关。Wang 等^[33]分析在考虑减排成本信息不对称情形下，不同合同设计对制造商决策扭曲的影响，结论表明，制造商应根据持股比例高低选择合适的合同类型。吴勇等^[34]探讨客户企业和管理安全服务提供商（MSSP）合作中的双重道德风险问题，提出了甄别 MSSP 私有成本信息的契约设计，并指出成本信息不对称导致服务低效，对客户企业决策具有重要影响。赵京彪等^[34]利用非合作博弈理论建立闭环供应链网络均衡模型，研究表明，制造商和零售商成本信息不对称策略影响其利润及供应链整体效益，适当选择信息不对称战略对各方均有利。

(3) 其他信息不对称方面。除了上述两种信息不对称情形外，部分学者考虑将其他的信息不对称因素引入供应链管理研究中。如李剑^[35]等在考虑消费者与制造商之间信息不对称的情形下，设计基于区块链驱动的供应链协同减排信息共享机制，研究表明消费者获得额外的信息租金是成员合作减排效率降低的关键

原因。胡强等^[36]研究信息不对称下政府契约激励科创平台协同创新的机制，研究发现，从信息甄别和服务质量激励角度看，政府应分别选择比例分成支付分离契约和一次性支付混同契约，而代理方需根据自身能力选择契约，应规避比例分成支付混同契约。Hiyari 等^[37]研究在质量信息不对称条件下，政府如何通过不同契约激励科创平台协同创新，并给出了政府和代理方的最优契约选择建议。

1.2.3 基于区块链技术的供应链管理研究

区块链技术作为一种去中心化的分布式账本数据库，其不可篡改性，可追溯性等特征使其在各种供应链中广泛应用。现有研究主要集中在区块链技术披露产品信息和信息共享两个方面。

(1) 利用区块链技术披露产品信息方面。如 Cao 等^[38]将区块链技术的信息披露水平设为内生变量，构建了两阶段半导体芯片供应链模型，结果表明，采用区块链技术披露信息能够有效增强整体盈利能力。Chen 等^[39]通过实证研究探讨区块链技术对 Scope 3 碳排放信息披露的促进作用，并发现结合 AI、云计算和 BDA 等数据处理技术能进一步增强这一促进作用。Huang 等^[40]通过博弈模型研究发现消费者隐私担忧和区块链实施成本对均衡零售价格、信息披露量及制造商和平台利润有负面影响，且区块链技术引入对市场定价和信息披露策略的影响与市场规模有关。Zhou 等^[41]分析包含一个零售商和两家制造商的供应链中区块链信息披露的投资策略，研究发现区块链披露能增强消费者对可持续性信息的信任，但可能导致制造商间竞争加剧、利润下降，而零售商则持续受益。王亚静等^[42]构建电商平台与两竞争商家为主体的三方博弈模型，探究考虑区块链技术的电商平台价格补贴策略和两竞争商家如何采用区块链的信息披露策略。Zhou 等^[43]构建由一个供应商和两个竞争零售商组成的两级供应链，分析其对产品成本、价格、利润的影响及采用条件，并指出补贴和竞争环境中的作用。

(2) 利用区块链技术信息共享方面。如 Zhang 等^[44]通过构建多阶段博弈理论模型分析质量成本系数和区块链采用单位成本对区块链采用和信息共享策略的影响，并探讨其均衡策略组合。Li 等^[45]通过构建基于均值-方差理论的分析模型，研究需求信息共享和区块链采用在减少碳排放方面的作用，以及它们对消费者

和社会整体福利的影响，探讨了在不同情境下供应链的最优决策。Wu 等^[46] 分析平台供应链不同销售合同下各参与者的策略，强调了区块链在消除交易成本和促进需求信息共享方面的作用，同时探讨信息共享情形下供应商的合同选择、政府补贴政策以及边际生产成本对平台策略的影响。Zhang 等^[47]提出一种基于区块链的去中心化供应链系统，并通过智能合约实现安全注册、正确认证和公平支付。Hajian 等^[48]探讨基于区块链的电子健康记录系统对患者信息共享行为的影响，发现区块链技术能增强患者对个人健康记录的控制感，从而激励他们与医疗服务提供者共享信息，有助于降低医疗成本并改善疾病管理。苏秦等^[49]针对竞争环境下质量信息不对称的两个供应商，分析其通过区块链授权实现无共享、双向共享和单边共享三种质量信息横向共享策略，进而探讨质量和价格竞争强度以及均衡偏离行为对供应链影响。

1.2.4 文献述评

根据上述文献回顾可知，现有文献在信息不对称情境下，双渠道供应链碳减排及其区块链技术应用研究已取得一定的研究成果，但仍存在以下几个领域亟待深入探索：

首先，在碳减排背景下双渠道供应链决策研究方面，学者从碳减排背景下供应链的渠道选择与协调、碳排放政策以及消费者行为对双渠道供应链决策的影响等三个方面展开，并取得了丰富的研究成果。但较少学者关注制造企业的减排量数据与消费者对低碳产品偏好之间的信息不对称，以及消费者对低碳产品信任不充分问题，此类问题值得进一步研究。

其次，在信息不对称下供应链管理决策研究方面。现有研究大多讨论需求信息不对称、成本信息不对称以及其他信息不对称等三个方面，并且主要集中在供应链成员之间的信息不对称，而很少学者关注制造商和消费者之间信息不对称，并在此基础上进一步探究，双渠道供应链成员采用区块链技术的边界条件、最优定价和碳减排决策。

最后，区块链作为一种分布式账本技术，其在披露产品信息和信息共享方面已经取得了丰硕的研究成果。但很少学者在双渠道供应链背景下，利用区块链技术披露制造商的碳减排信息，并关注不同区块链成本模式下供应链成员的

决策问题。

基于上述，在考虑区块链技术不同应用模式情形下，论文研究双渠道供应链定价和碳减排决策。考虑消费者低碳偏好、渠道购买偏等影响因素，根据是否采用区块链技术以及采用何种模式，分别构建制造商主导区块链技术、双渠道成员协同应用区块链技术的双渠道供应链模型；再利用博弈论方法研究不同应用模式下双渠道供应链成员的定价决策、碳减排决策以及供应链成员利润，最后进行数值仿真从不同角度探讨双渠道供应链成员的最佳决策。研究成果有助于丰富区块链和双渠道供应链理论体系，为相关企业碳减排、绿色发展提供实践指导。

1.3 研究内容和创新点

1.3.1 研究内容

第一章：绪论。本章主要从企业碳减排和双渠道运营发展模式、区块链技术能够解决目前双渠道供应链信息不对称，以及区块链技术不同应用模式等方面总结本文的研究背景和意义；接着对国内外研究现状进行梳理分析，给出进一步深入研究的方向；最后，给出研究特色和创新点、研究方法、技术路线图，以及明确后续研究方向和目标。

第二章：区块链技术及其对双渠道供应链的影响。本章首先阐述区块链技术的相关理论；接着介绍区块链技术在双渠道供应链的应用；最后，进一步探讨区块链技术对双渠道供应链定价和碳减排决策影响并提炼影响因素，为下文研究奠定基础。

第三章：制造商主导区块链赋能下双渠道供应链定价和碳减排决策研究。本章研究由单一制造商、单一平台和单一零售商组成的双渠道供应链，制造商进行碳减排投资，并通过平台渠道和零售商渠道销售减排产品。消费者并不完全信任制造商的碳减排信息，制造商采用区块链技术可以增加消费者的信任度，提升消费者对减排产品的支付意愿。考虑到目前区块链平台有固定费用和单位运营费用两种收费模式，根据制造商是否采用区块链技术以及选择何种收费模式构建三种双渠道供应链模型，分析不同模式下双渠道成员的决策和利润，探

讨制造商的最优区块链应用策略，以及不同费用模式下双渠道供应链成员最优定价和碳减排决策。

第四章：双渠道供应链成员协同赋能区块链下产品定价和碳减排决策研究。本章研究考虑双渠道供应链成员协同运用区块链技术，由单一制造商，单一平台和单一零售商组成的双渠道供应链，其中制造商承担其碳减排投资信息的上链成本，平台和零售商承担消费者低碳偏好的上链成本。根据双渠道供应链成员是否应用区块链技术分别构建两种双渠道供应链博弈模型。比较两种模型下的最优决策、利润、减排水平，研究区块链上链成本对双渠道供应链成员最优决策的影响，并分析双渠道供应链同时引入区块链技术的均衡条件。

第五章：总结和展望。本章通过梳理和总结上述研究内容，归纳本文研究的主要结论和管理启示。同时，给出本文研究的不足之处和未来进一步拓展的方向。

1.3.2 创新点

本文研究的主要创新之处主要体现在以下三个方面：

（1）目前大多数文章探讨制造商进行碳减排投资对双渠道供应链成员决策的影响，但本文考虑到制造商碳减排投资信息与消费者低碳偏好之间的信息不对称，并通过构建有无区块链技术的双渠道决策模型，研究不同模式下供应链成员定价和碳减排决策问题。

（2）本文将区块链技术引入双渠道供应链，用来解决制造商的碳减排信息不透明以及消费者信任不充分问题。考虑消费者低碳偏好、消费者渠道购买偏好，以及制造商减排成本系数等影响因素，研究供应链成员应用区块链技术的条件。

（3）本文研究不同于以往聚焦区块链应用价值的文献，而是关注双渠道成员的不同区块链技术赋能模式，分别探讨制造商应用区块链技术，双渠道供应链成员协同应用区块链技术的边界条件。此外，本文研究还为不同赋能模式下双渠道供应链成员的定价和碳减排决策提供一定的参考和借鉴。

1.4 研究方法和技术路线

1.4.1 研究方法

本研究在总结国内外最新研究成果的基础上，运用供应链管理、博弈论、经济学等理论与方法，系统地研究区块链不同应用模式下的双渠道供应链定价和碳减排决策问题，其具体研究方法如下：

1) 比较研究法

针对区块链不同应用模式下双渠道供应链定价和碳减排决策模型。一方面，当制造商单独采用区块链技术时披露碳减排信息时，对比不同费用模式下双渠道成员的利润、定价和碳减排决策，探讨制造商最优区块链采用策略；另一方面，当制造商、零售商和平台共同采用区块链技术共享碳减排信息和消费者低碳偏好信息时，通过比较是否采用区块链技术两种情形下产品价格、销量及利润，分析供应链成员采用区块链技术的边界条件。

2) 数学建模方法

综合运用博弈论、最优化理论、消费者效用理论等相关理论，构建不同双渠道供应链成员博弈模型，并采用逆向归纳法和最优化方法得到供应链节点企业的最优决策。

3) 仿真法

基于相关文献的经验值设定各参数的取值，运用 Matlab、Mathematic 等相关数学分析软件对模型中的变量进行数值仿真，给出并分析不同双渠道供应链决策模型下定价、销量、利润、消费者剩余和环境影响的变化趋势，验证本文结论的正确性和科学性。

1.4.2 技术路线

本文的技术路线图如图 1-1 所示。

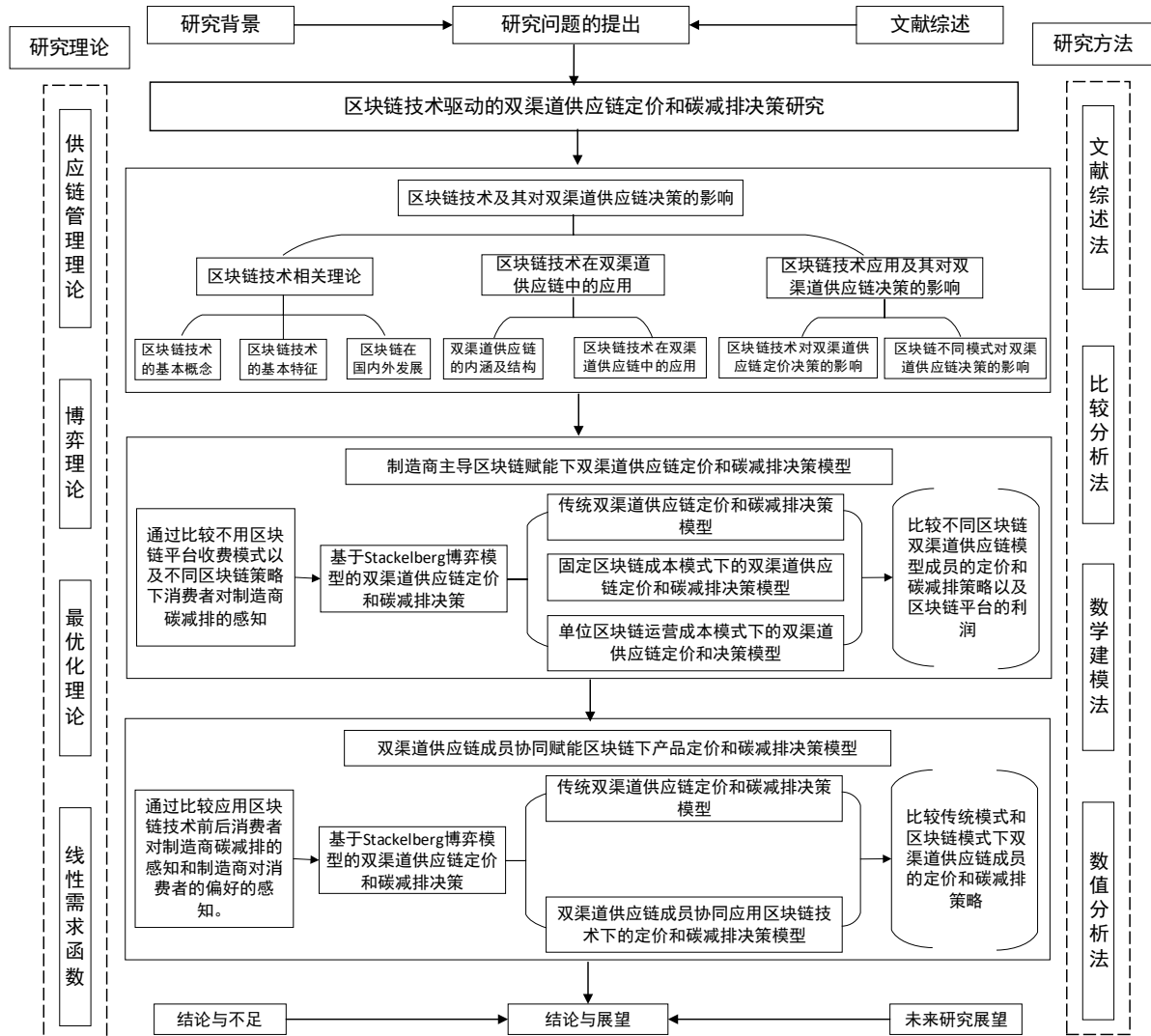


图 1-1 技术路线图

第2章 区块链技术及其对双渠道供应链的影响

2.1 区块链技术相关理论

2.1.1 区块链技术基本概念

在 2008 年，中本聪(Satoshi Nakamoto)通过发布《Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system》这篇论文，首次提出了比特币的构想，并运用区块链技术来构建一个去中心化的数字货币体系^[50]。2009 年，比特币主网上线，首个区块（创世区块）被挖出，标志着区块链技术的实际应用。区块链本质是由一个大量相互关联的数据块链（区块）组成，当每个交易完成时，区块就与前一个区块相链接。区块链通过哈希函数、非对称加密和数字签名构建了安全可信的底层架构，其核心结构是由多个区块按时间顺序链接而成的链条，每个区块包含交易数据和前一个区块的哈希值（类似数字指纹），形成环环相扣的链式验证。当用户发起交易时，网络节点通过非对称加密验证其数字签名，确认合法性后，交易被打包成候选区块。矿工或验证者通过工作量证明(PoW)或权益证明(PoS)等共识机制竞争记账权，成功者将新区块广播至全网，其他节点验证后同步更新账本^[51,52]。区块链的工作原理如图 2-1 所示。

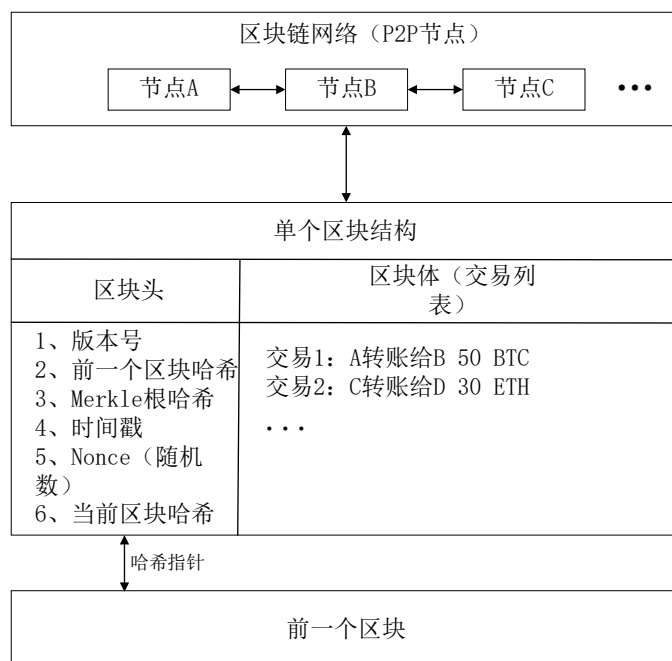


图 2-1 区块链的工作原理

经过多年数字货币的技术创新发展，现今区块链已经获得企业广泛的认可，涵盖了物联网、金融、供应链、物流、医疗健康等多个领域^[53]。根据赛迪区块链研究院的统计，2023 年中国新增区块链应用案例 450 个，同比增速 34.3%。区块链在供应链中的实践应用也在不断深入，为供应链管理提供更高的透明度、提升消费者对产品的信任。如图 2-2 所示，区块链技术可以保证企业产品从原材料采购，物流运输、生产销售到消费者整个供应链运作过程可追溯。消费者可以通过扫描产品上的二维码来了解企业在生产运输过程的数据，判断产品的来源、制造过程是否符合可持续和质量标准，提升消费者对产品的信任程度，增加其购买意愿^[54]。

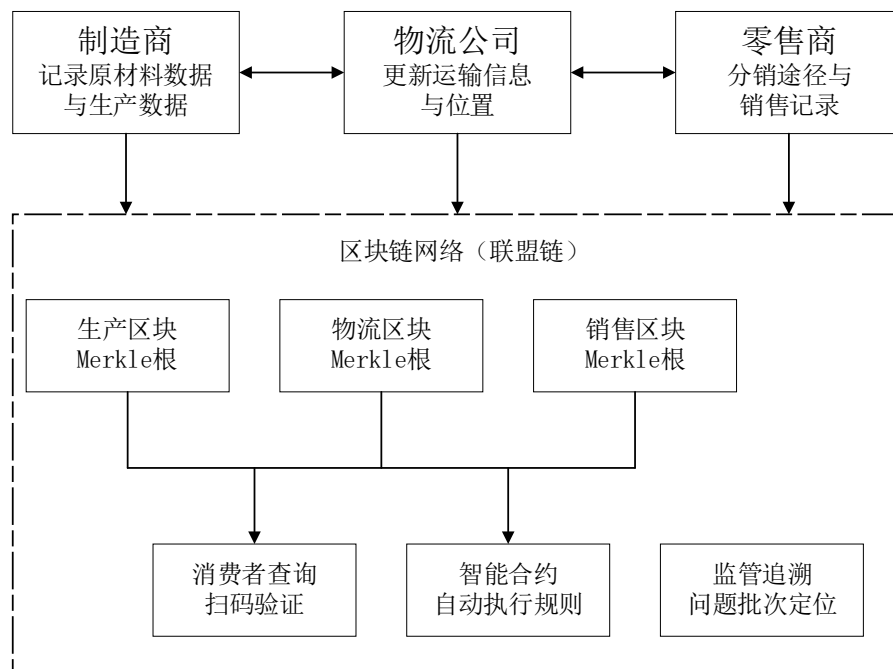


图 2-2 区块链在供应链管理中的应用流程

2.1.2 区块链技术的基本特征

区块链区别于传统的中心化系统，其具有去中心化，不可篡改性，可追溯性，匿名性和隐私可控性等特征，从而使其在不同领域得以广泛应用。

(1) 去中心化

区块链作为一个去中心化的分布式账本，依托其 P2P 网络结构，数据储存，验证和维护可以由网络中多个节点共同完成，这意味着供应链中所有的节点企业可以记录、验证和更新数据^[55]。不仅如此，由于区块链的使用不需要与第三

方组织合作，数据可以在多个系统上记录，大大减少了信息管理成本，提高供应链的运行效率。

(2) 不可篡改性

区块链技术的不可篡改性主要是基于其链式哈希结构和共识机制，即：每个区块包含前一个区块的唯一哈希值，任何数据修改都会导致后续所有区块的哈希值失效，且篡改需控制超 51% 的网络算力或代币，成本极高，近乎不可实现^[56]。这种不可篡改性降低了信任成本、减少欺诈风险、并增强了问责能力，使得供应链企业之间行为更为可靠和可信。

(3) 可追溯性

可追溯性是区块链技术的核心特性之一，通过其链上数据的时间顺序记录和不可篡改的哈希链接，能够完整追踪任意交易或数据的来源、流转路径和历史状态变化，从而解决了传统追溯机制的低效、不透明和易篡改问题^[56]。这种溯源机制作用不仅在于提升效率，更在于重塑社会协作的信任基础，即从依赖权威机构背书转向依赖数学与代码规则

(4) 公开透明

区块链技术通过分布式账本实现公开透明，所有交易数据全网节点共享且可验证，任何人都能通过区块浏览器查看交易历史、地址余额及智能合约执行状态，降低了信息不对称和欺诈的可能性^[55]。这种透明性基于哈希算法和共识机制确保数据不可篡改，同时消除信息不对称，增强多方协作信任。

2.1.3 区块链技术在国内外的发展

(1) 区块链技术在国内发展

自 2016 年国务院《“十三五”国家信息化规划》首次将区块链纳入战略性技术以来，国家层面相继出台《区块链信息服务管理规定》、《关于加快推动区块链技术应用和产业发展的指导意见》等政策框架，明确将区块链定位为数字经济与新型基础设施的核心支撑技术，据《中国区块链产业发展普查报告(2021)》统计，2016-2022 年区块链相关政策数量如图 2-3 所示。。技术路径上，国内聚焦自主可控的联盟链架构，突破异构跨链、隐私计算、高性能共识算法等关键技术，形成以长安链、FISCO BCOS 为代表的国产化底层平台，并在政务数据共

享（如北京市区块链政务平台）、供应链金融（微众银行供应链金融平台）、司法存证（最高人民法院“司法链”）等场景实现规模化应用。截至 2023 年，全国已有超过 30 个省市发布专项政策，超 5000 家企业通过国家网信办区块链信息服务备案，数字人民币试点扩展至 26 个城市，依托区块链的智能合约引擎实现资金可编程流转。然而，仍需在量子安全加密、链上链下协同治理及绿色低碳共识机制等方向深化突破，以平衡技术创新与合规发展的双重目标。

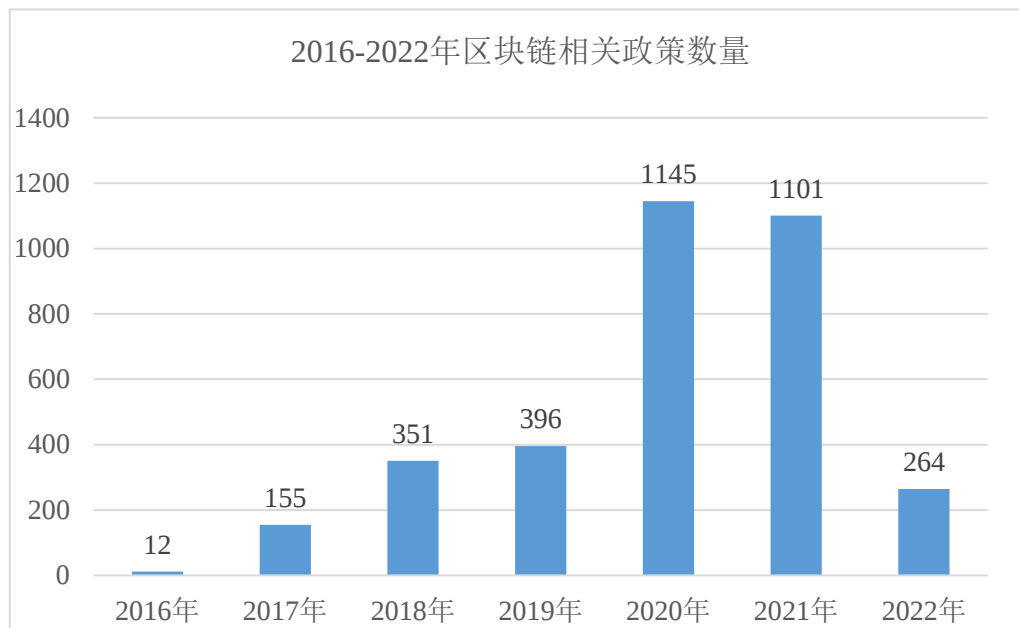


图 2-3 2016-2022 年区块链相关政策数量

(2)区块链技术在海外发展

区块链技术在海外的发展呈现出显著的阶段性特征与地域差异。2014 年以太坊白皮书发布，开启智能合约与去中心化应用(Dapp)时代；2020 年 DeFi（去中心化金融）爆发，Uniswap、Compound 等协议推动锁仓量突破千亿美元；2022 年 9 月以太坊完成“合并”升级，转向权益证明(PoS)，能耗降低 99%。2019 年 9 月 18 日，德国政府颁布了《德国国家区块链战略》，为德国在区块链技术领域的发展提供了明确的指导和支持，有助于推动德国在数字经济时代的创新和可持续发展。2023 年，欧盟通过 MiCA 法案，旨在规范区块链技术并促进加密资产市场的健康发展。2017 年 4 月，瑞穗银行与日本 IBM 共同开发的区块链贸易金融平台在提高供应链和贸易过程效率方面取得了显著成效，为日本的贸易金融领域带来了积极的影响。

2.2 区块链技术在双渠道供应链中的应用

2.2.1 双渠道供应链的内涵及结构

双渠道供应链概念最早是由 W. Y. Chiang 在 2003 年在 Management Science 发表的经典论文 “Direct Marketing, Indirect Profits: A Strategic Analysis of Dual-Channel Supply Chain Design” 中系统提出的。21 世纪初，随着我国电子商务的兴起，尤其是淘宝网，京东等平台的发展，企业开始面临线上线下渠道整合的问题，这促进了学术界对双渠道供应链的研究。双渠道供应链指企业通过线上与线下两类互补渠道协同满足市场需求的结构体系，具体供应链运作结构如图 2-4 所示。其核心在于整合制造商（如官网、自营电商）、零售商（实体店、第三方平台）及消费者资源，通过动态定价、库存共享和信息协同实现渠道互补，同时需解决价格冲突与利益分配难题^[57,58]。例如，苹果公司通过统一售价与品牌体验平衡直营店与经销商关系，最终在扩大市场覆盖、提升灵活性的同时，以消费者为中心构建全渠道营销模式，推动供应链整体效益最大化。

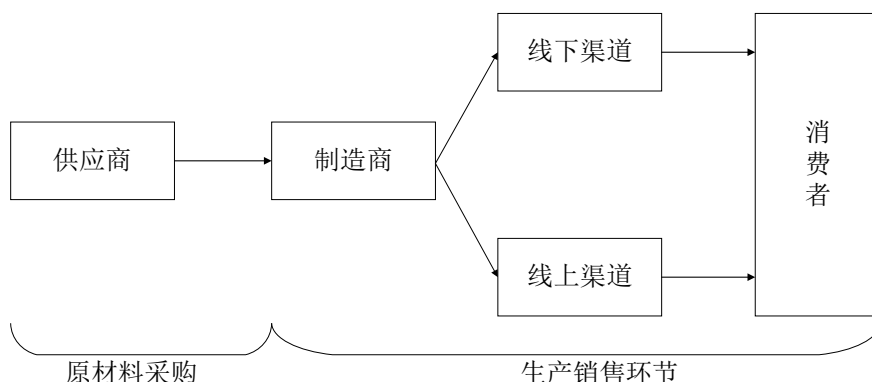


图 2-4 双渠道供应链运作结构图

双渠道供应链结构主要有以下三个特征：

(1) 双渠道结构具有互补性与独立性。双渠道供应链通常由传统线下零售渠道（如实体店）和线上直销渠道（如电商平台）构成。两类渠道在功能上具有互补性：线下渠道通过实体展示、即时交付和面对面服务提升消费者体验，而线上渠道凭借无地域限制、全天候运营和数字化交互降低交易成本。然而，二者的独立性也可能导致资源竞争，例如消费者可能在实体店体验产品后转向线上购买（“展厅现象”），需要企业通过差异化服务或利益分配机制平衡渠道关系。

(2) 双渠道模式可以通过库存与物流协同优化需求。企业可能采用“线上下单、线下提货”或“跨渠道调货”等策略，要求实时数据共享和高效的物流网络支持。例如，线上订单可能由区域仓库直发，而线下渠道依赖门店库存，这需要动态库存监控系统和智能补货算法来降低缺货风险，同时避免库存冗余。物流环节还需协调快递配送与传统供应链运输的优先级与成本差异。

(3) 双渠道模式可以实现动态定价，但需要平衡市场竞争和内部协调。线上渠道因成本较低可能倾向于低价促销，但易引发线下渠道的价格敏感型客户流失。企业常通过产品差异化（如线上专供款）、服务捆绑（如线下附加售后服务）或限时同步折扣来缓解冲突。此外，大数据驱动的动态定价模型被广泛应用，通过分析不同渠道的消费者行为弹性，实现收益最大化并维护品牌价格一致性，这对供应链的信息整合能力提出了更高要求。

2.2.2 区块链技术在双渠道供应链的应用

区块链技术作为一项颠覆性创新，其去中心化、公开透明、可溯源性等方面的特点可有效解决供应链成员间存在的互信差和透明度低等问题^[57]。这些特性使得区块链技术在许多领域都具有广泛的应用潜力，尤其是在需要高透明度、高安全性和多方协作的场景中。

现今，区块链技术已经成功运用于金融服务、医疗健康、版权保护、司法和政府治理等多个领域，且取得不错的效果。2017年，美国金融公司 Ripple 推出了允许银行和其他金融机构通过其区块链网络进行快速、低成本的国际转账的跨境支付解决方案，在保证安全的前提下，极大地节省了交易时间。2018年，摩根大通宣布开发出基于区块链的数字货币“JPM Coin”，旨在为企业客户提供更高效的跨境支付服务。2016年，麻省理工学院的研究人员启动了 MedRec 项目，该项目利用区块链技术管理患者的医疗记录，不仅确保数据的安全性和隐私性，同时简化了医疗记录的共享流程。IBM 使用区块链技术进行食品追溯，该技术可以在几秒钟内将食品的来源、生产、存储和其他信息传输给区块链服务用户^[58]。2017年，音乐流媒体平台 Spotify 收购了区块链初创公司 Mediachain Labs，用户可以自动识别音乐作品的版权所有者，并确保他们获得应有的收益。2018年，印度安得拉邦政府启动了一个名为“区块链驱动的数字治理”项目，

该项目利用区块链技术改进土地记录管理、出生和死亡证明等公共服务。

除此以外，由于在双渠道供应链中企业面临信息割裂，库存协同困难，消费者信任不足等挑战，越来越多的企业管理者开始运用区块链技术来优化双渠道供应链管理。区块链技术基于其分布式账本，可追溯性等核心特性，不仅可以为双渠道供应链节点企业共享跨渠道透明化数据、实现动态库存管理优化，还能通过全过程溯源增强消费者的信任。随着技术的进一步成熟，区块链有望成为双渠道供应链数字化转型的基础设施，推动企业实现成本优化、效率提升与消费者价值共创。例如，知名服装零售公司 ZARA 通过区块链追踪其服装从棉花种植到成衣加工，再到线上、线下门店的全生命周期碳足迹，消费者在购买时可查看每件衣服的环保数据，线上订单还提供区块链认证的“绿色标签”。区块链技术企业 Circulor 为高性能电动汽车知名品牌 Polestar 设计并实施了一项基于区块链技术的解决方案，旨在全面追踪并记录该品牌供应链全过程中的碳排放数据，从而线上和线下消费者能实现原材料快速追溯，极大地降低了原材料成本^[7]。2021 年，雀巢引入区块链溯源系统对高端奶粉产品的双渠道销售过程中实行全过程监控，从而保证消费者的利益，增强消费者的信任度。

2.3 区块链技术应用对双渠道供应链决策的影响

2.3.1 区块链技术对双渠道供应链定价决策的影响

区块链技术不仅可以提高双渠道供应链的透明度，实现双渠道供应链成员间的信息共享，还对企业定价决策有着非常重要的影响，主要体现在以下几个方面：

(1) 双渠道供应链成员的信息不对称可能会导致企业做出不合理的定价策略，进而影响企业利润。闫旭等^[59]在研究中指出传统零售业渠道和网上直销渠道之间价格竞争博弈的过程中，信息往往是不对称的。而供应链成员在信息不对称情形下很难制定最优定价决策。由于区块链技术具有数据可追溯性的技术特征，双渠道供应链成员通过区块链进行信息共享，链上企业都可以了解彼此的运营数据，包括生产信息、物流运输信息、产品订单信息等。在此基础上，不与消费者直接接触的制造商可以了解市场需求信息，线上和线下零售渠道也可以了

解产品的生产制造和运输过程，从而企业更容易做出合理的定价决策。

(2) 通过区块链技术可以增加消费者对于产品的信任程度，使得一些原本持观望态度的潜在消费者提高购买意愿，对产品定价也有着积极的影响。区块链的不可篡改特性使消费者能够追溯产品的生产、运输、销售全流程，验证其真实性，从而打破消费者与企业之间的信息壁垒，减低信任风险，扩大潜在消费者群体。此外，区块链实时共享市场需求数据，可以帮助企业快速响应消费者偏好变化，制定动态定价策略。

(3) 实施区块链技术需要花费一定的成本，这对双渠道供应链成员定价决策有着一定的影响。区块链技术的引入需要投入研发、维护和运营等费用，当企业采用区块链技术时，往往会伴随着产品价格的上升。梁喜等^[60]在研究中指出采用区块链技术后，批发价格、直销价格和零售价格均有所提高。但当产品价格上涨时，价格敏感性消费者可能会选择减少购买量或转向价格更低的替代品。这直接影响了企业的销量和市场份额，从而进一步影响产品定价。因此，企业在进行区块链决策之前，首先要考虑区块链的实施成本，因为这直接影响着双渠道供应链成员的定价策略，以及能否实现企业效益的优化和多方共赢。如 BP 及壳牌公司联手打造的 VAKT 区块链平台，虽然伴随着较高的区块链运行成本，但是针对石油行业定制化区块链服务也给该行业带来了显著的效益。

2.3.2 区块链技术不同成本分摊模式对双渠道供应链决策的影响

应用区块链技术的无疑需要企业承担高额的成本，双渠道供应链成员选择不同的成本模式往往会对其决策有着重要的影响，区块链技术成本模式主要有以下两种：

(1) 仅有制造商选择采用区块链技术时，制造商需要承担其产品信息（包括原材料，生产以及物流运输信息）的上链成本。如图 2-5 所示，通过区块链技术进行信息披露，消费者可以通过扫描产品上的二维码来了解产品的真实信息，这在一定程度上提升了消费者的购买意愿，增加了产品的市场需求。因此，制造商可以通过提高产品的批发价格来弥补由于应用区块链技术而导致的成本损失，平台和零售商也会相应的调整产品的定价策略。因此，当区块链费用仅由制造商承担时，制造商需要考虑应用该技术所带来的收益能否弥补其高昂的成

本，从而做出合理地区块链应用决策和运营决策。

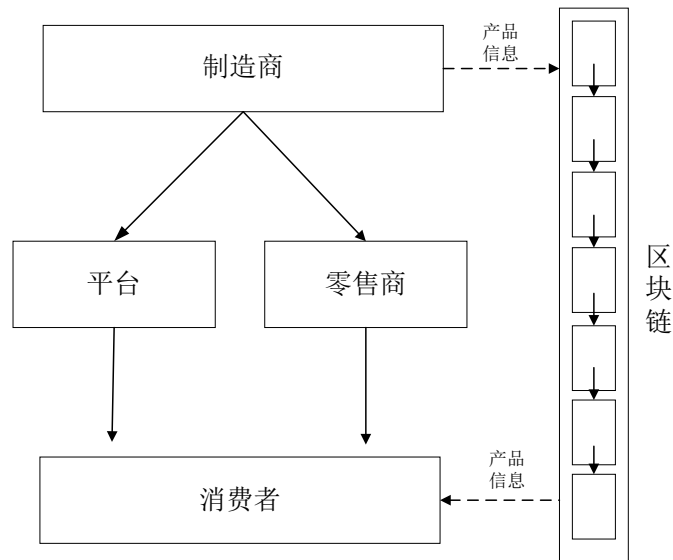


图 2-5 仅制造商采用区块链技术的双渠道供应链模式

(2) 当双渠道成员均采用区块链技术，共同承担区块链成本时，构建覆盖“生产-流通-消费”全链路的可信数据体系，其中制造商承担产品信息的上链成本，而平台和零售商则承担消费者市场信息的上链成本。具体双渠道供应链运作模式如图 2-6 所示，不仅消费者可以通过区块链技术追溯到产品生产、运输和消费过程的全周期信息，提高其购买意愿，供应链成员也可以根据市场信息合理地制定生产计划和定价策略。然而，双渠道供应链制定区块链实施战略时，应该统筹考虑区块链成本，在合适的成本区间内采用该技术，确保所有供应链企业能够实现多方共赢。

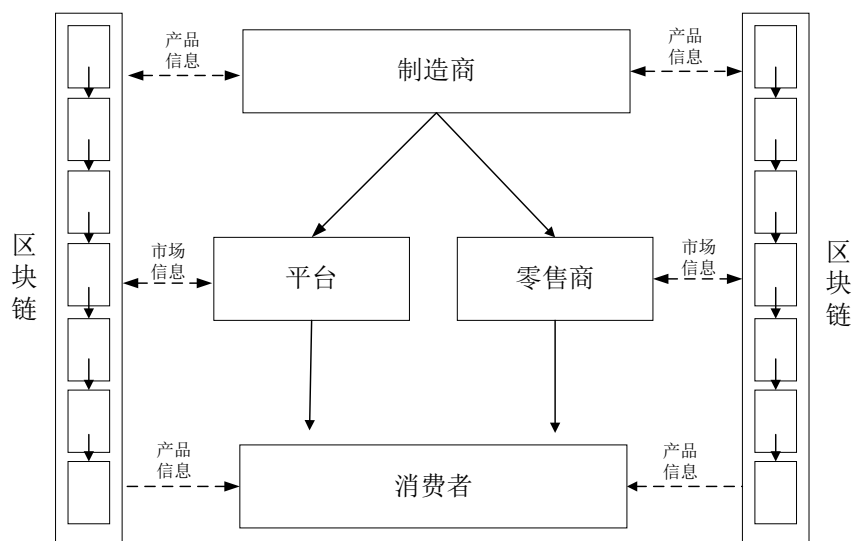


图 2-6 双渠道成员协同应用区块链技术的的供应链模式

2.4 本章小结

本章主要介绍了双渠道供应链和区块链技术的相关理论知识，以及区块链技术在双渠道供应链中的实际应用，并从不同角度刻画区块链技术对双渠道供应链决策的影响。最后，说明了供应链成员在不同应用模式下应用区块链技术对供应链成员决策的影响，企业应该根据具体的实际应用成本制定合理的区块链应用战略，除此以外，企业生产和定价策略也会随着区块链成本的变化而随之改变。本章为第三章和第四章的不同区块链成本分摊模式下双渠道供应链定价和碳减排决策研究鉴定基础。

第3章 制造商主导区块链赋能下双渠道供应链定价和碳减排决策

在节能减排的背景下，制造商企业纷纷开展碳减排活动，以满足消费者日益增长的减排意识，如格力、海尔等知名企业推出的节能家电产品，有效地降低能耗和减少碳排放，迎合了消费者的低碳环保需求。此外，随着电子商务的飞速发展以及消费者实时、便利、多样化等购物需求的提升，越来越多的制造商在传统零售渠道的基础上开辟网络直销渠道，通过这种双渠道营销模式来迅速占领消费市场，提升自身收益，如惠普，苹果等。但在实际运营环境中，制造商往往面临着生产环节碳减排信息透明度差以及消费者对减排产品信任度低等问题，基于现有技术的减排产品溯源信息系统能够在一定程度上向消费者公开产品信息但难以保证信息真实可靠。因此，如何在满足消费者低碳需求的同时，提高减排产品的可追溯性并增强消费者信任是目前制造商急需解决的问题。

区块链技术作为一种分布式账本，具有去中心化、公开透明信息不可篡改等特点，为解决上述问题提供关键的技术支持。区块链赋予每个产品一个独一无二的标签，该标签记录产品从原材料采购到生产、包装，再到运输等各个环节详细的碳排放数据，消费者可以通过扫描标签来了解制造商的碳减排投资信息。在实践方面，区块链在促进企业碳减排和提升产品可追溯性方面的应用潜力已得到业界认可。沃尔玛与 IBM 和 JD.com 合作，为猪肉和芒果等某些食品供应链开发区块链解决方案，使消费者能够扫描包装上的二维码并追踪食品的来源。2019 年，福特公司使用区块链技术追踪钴供应链，确保在生产锂离子电池时使用的钴是合法和环保的。虽然区块链技术给供应链在运营管理方面带来诸多好处，但其应用成本对企业决策仍具有重要影响，比较常见的区块链收费模式有按固定费用收费和按单位运营费用收费两种。例如，阿里云区块链服务 BaaS 提供 Hyperledger Fabric 作为其支持的三种主要区块链技术引擎之一，其区块链服务采用包月或包年的固定费用收取模式。由华为云推出的企业级区块链技术平台 Blockchain Service 则提供按包月（或包年）收费以及按单位价格两种

收费模式。不同的成本模式对制造商的减排行为和供应链成员的产品定价和利润的影响不同，因此，研究企业的区块链应用决策以及不同应用模式下双渠道供应链的减排和定价决策显得极为关键。

本文将重点研究在制造商主导区块链技术的应用策略，从制造商是否应用区块链以及选择何种成本模式出发构建三种博弈模型。首先，文章求解三种模式下双渠道供应链成员的最优决策；然后，对三种模型中双渠道供应链成员的定价、碳减排决策以及利润进行对比分析以及敏感性分析；最后，通过数值仿真分析讨论区块链平台对于两种成本模式的偏好程度。研究问题包括：(1)制造商是否会应用区块链技术，不同成本分摊模式下应用区块链技术的边际条件是什么？(2)从区块链平台的角度，区块链平台更倾向于何种成本模式？(3)不同应用模式下，区块链固定成本（单位运营成本）变动对供应链减排和定价决策有什么影响？本研究为双渠道环境下企业的区块链应用策略，减排和定价策略的制定提供一定理论依据。

3.1 问题描述与相关假设

3.1.1 问题描述

在由制造商和零售商组成的双渠道供应链中，制造商担任领导者，零售商作为追随者。消费者并不与制造商直接接触，消费者并不完全信任制造商的碳减排努力，即制造商和消费者之间存在信息不对称问题。为了实现减排产品的真实溯源，制造商选择让低碳产品“上链”，即：制造商可以选择跟区块链平台签订合同，约定在提供区块链服务的同时收取一定的成本，其收费形式有按固定费用收取和按单位运营费用收取两种。在固定成本模式下，区块链平台一次性向制造商收取固定费用，在单位运营成本收费模式下，制造商每生产一件低碳产品，就需要向区块链平台支付一定的单位运营成本。根据制造商是否采用区块链技术以及选择不同的成本模式，可以分为以下三种情形：一是不采用区块链技术的传统双渠道供应链模型，记为 O 模型；二是区块链技术按固定成本收费的双渠道供应链模型，记为 F 模型；三是区块链技术按单位运营成本收费的双渠道供应链模型，记为 S 模型；供应链运作模式分别如图 3-1 所示。在三种

情形下，制造商首先进行努力程度为 e^i 的减排投资，并以 w_r^i 和 w_d^i 的价格将产品分别批发给零售商和平台；然后零售商和平台再以 p_r^i 和 p_d^i 的价格将产品卖给消费者，其中 $i = \{O, F, S\}$ 。

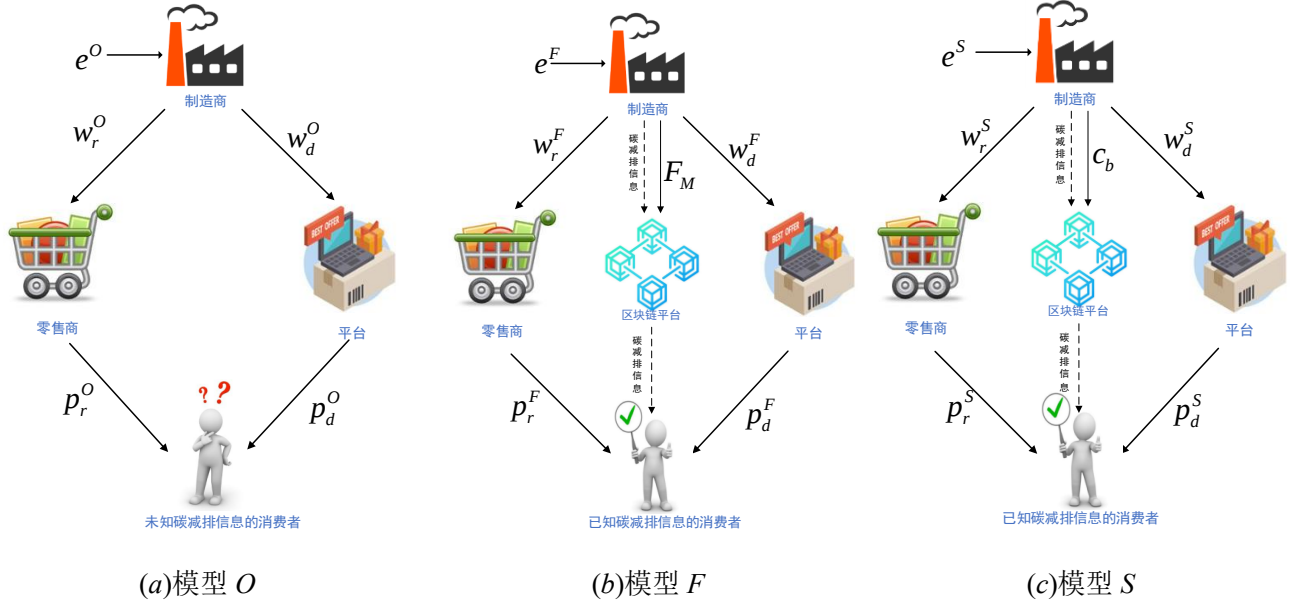


图 3-1 三种供应链运作结构图

3.1.2 相关假设

低碳产品的基本市场需求为 A ，考虑消费者的渠道偏好，借鉴文献[62]，假设消费者对传统零售渠道的支付意愿为 ρ ($0 < \rho < 1$)，而对直销渠道的支付意愿为 $1 - \theta$ 。传统零售渠道与直销渠道之间存在竞争关系，其定价策略会相互影响，依据文献[62]和[63]方法，设 n ($n \in (0, 1)$) 为双渠道之间的交叉弹性价格系数，且假设两渠道之间的影响系数相等。

制造商进行碳减排投资，其投资成本与制造商的碳减排努力程度和成本系数有关，参考文献[11]和[64]，假设制造商的碳减排成本为 $c_{(e^i)} = \frac{1}{2}k(e^i)^2$ ，其中 k 是碳减排成本系数， e^i 为 i 模式下制造商的减排努力程度，其中， $i = \{O, F, S\}$ 。

当制造商不采用区块链技术披露产品的碳减排信息时，消费者并不了解且不完全信任其碳减排努力，从而在一定程度上弱化制造商碳减排努力对市场需

求的正向影响，借鉴文献[7]和[65]，制造商碳减排带来的市场需求增量为 ηbe^i ，其中， η 为碳减排努力水平影响需求的折扣因子。在实施区块链技术情形下，消费者完全信任低碳产品，故碳减排带来的需求增量转化为 be^i 。

由于制造商的生产成本不影响本文的结论，为了简化分析，假设单位生产成本为 0。区块链平台的收费模式分为两种：按固定费用收费和按单位运营费用收费。在固定成本情形下，制造商需要向区块链平台一次性支付 F_M 的固定费用；在单位运营成本模式下，制造商每生产一件低碳产品，需要向区块链平台支付 c_b 的单位运营费用。此外，区块链对每单位产品的服务成本为 c_s ，且为保证区块链平台有利可图，其服务成本大小关系满足 $c_s \in (0, c_b)$ 。

制造商均不采用区块链技术的情形下（ N 模型），传统零售渠道和直销渠道的需求函数分别为：

$$D_r^O = \rho A - p_r^O + np_d^O + \eta be^O \quad (3-1)$$

$$D_d^O = (1 - \rho)A - p_d^O + np_r^O + \eta be^O \quad (3-2)$$

当制造商采用区块链技术时（ F/S 模型），传统零售渠道和直销渠道的需求函数分别为：

$$D_r^{F/S} = \rho A - p_r^{F/S} + np_d^{F/S} + be^{F/S} \quad (3-3)$$

$$D_d^{F/S} = (1 - \rho)A - p_d^{F/S} + np_r^{F/S} + be^{F/S} \quad (3-4)$$

本节中所涉及的符号如表 3-1 所示

表 3-1 符号定义

符号	符号定义
A	产品的基本市场需求量
n	双渠道之间的交叉弹性价格系数
k	制造商的碳减排成本系数
ρ	消费者对传统渠道/直销渠道的支付意愿
b	消费者的低碳偏好系数
η	碳减排努力水平影响需求的折扣因子

表 3-1 符号定义

符号	符号定义
F_M	制造商引入区块链技术一次性需要支付的固定费用
c_b	制造商引入区块链技术需要支付的单位运营费用
c_s	区块链平台追溯低碳产品信息的单位服务成本
e^i	i 模型下制造商的减排努力水平, 其中 $i = \{O, F, S\}$
p_d^i	i 模型下平台渠道产品的销售价格, 其中 $i = \{O, F, S\}$
p_r^i	i 模型下零售渠道产品的销售价格, 其中 $i = \{O, F, S\}$
w_d^i	i 模型下平台渠道产品的批发价格, 其中 $i = \{O, F, S\}$
w_r^i	i 模型下零售渠道产品的批发价格, 其中 $i = \{O, F, S\}$
D_d^i / D_r^i	i 模型下直销/零售渠道的市场需求, 其中 $i = \{O, F, S\}$
π_m^i / π_r^i	i 模型下制造商/零售商/区块链平台的利润函数, 其中 $i = \{O, F, S\}$
π_{bp}^F / π_{bp}^S	F/S 模式下区块链平台的利润函数

3.2 模型建立与求解

在本节中, 根据制造商是否采用区块链技术以及选择何种成本模式构建三种模型 (模型 O 、 F 、 S)。此外, 我们求解了四个模型的均衡结果。

3.2.1 传统双渠道供应链定价和减排决策模型 (模型 O)

在模型 N 中, 制造商和零售商的博弈决策顺序: 首先, 制造商决定碳减排投资努力 e^O 、零售商批发价格 w_r^O 和平台的批发价格 p_d^O ; 然后, 零售商和平台决定产品零售价格为 p_r^N 和 p_d^N 。制造商和零售商的利润函数分别为:

$$\pi_m^O = w_d^O D_d^O + w_r^O D_r^O - \frac{1}{2} k(e^O)^2 \quad (3-5)$$

$$\pi_r^O = (p_r^O - w_r^O) D_r^O \quad (3-6)$$

$$\pi_d^O = (p_d^O - w_d^O) D_d^O \quad (3-7)$$

采用逆向归纳法对式(3-5)至 (3-7) 进行求解, 当 $k > k_1$ 时, 模型 O 存在最优解, 最优解如命题 1 所示。求解过程详见附录 1。

命题 3.1 制造商不采用区块链技术情形下, 各个均衡解以及制造商和零售

商在均衡状态下的利润分别为：

$$w_r^{O*} = \frac{A(b^2\eta^2(1-2\theta) + 2k(2-n)(n(1-\rho) + \rho))}{4(1+n)(k(1-n)(2-n) - b^2\eta^2)},$$

$$w_d^{O*} = \frac{A(2k(2-n)(1-(1-n)\rho) - b^2\eta^2(1-2\rho))}{4(1+n)(k(2-n)(1-n) - b^2\eta^2)}, \quad e^{O*} = \frac{Ab\eta}{2k(2-n)(1-n) - 2b^2\eta^2},$$

$$p_r^{O*} = \frac{A(b^2(3+2n)\eta^2(1-2\rho) + 2k(6\rho + n(5-2n^2 - (1+n)(5-2n)\rho)))}{4(1+n)(2+n)(k(1-n)(2-n) - b^2\eta^2)},$$

$$p_d^{O*} = \frac{A\left(2k\left(6-6\rho + n\left(5\rho - n\left(3-(3-2n)\rho\right)\right)\right) - b^2(3+2n)\eta^2(1-2\rho)\right)}{4(1+n)(2+n)(k(1-n)(2-n) - b^2\eta^2)},$$

$$\pi_m^{O*} = \frac{A^2(2k(2+n^2 - 2(1-n)(2-n)\rho + 2(1-n)(2-n)\rho^2) - b^2\eta^2(1-2\rho)^2)}{8(1+n)(2+n)(k(1-n)(2-n) - b^2\eta^2)},$$

$$\pi_r^{O*} = \frac{A^2(b^2\eta^2(1-2\rho) + 2k(1-n)(n(1-\theta) + 2\rho))^2}{16(2+n)^2(k(1-n)(2-n) - b^2\eta^2)^2} \quad \text{和}$$

$$\pi_d^{O*} = \frac{A^2(b^2\eta^2(1-2\rho) - 2k(1-n)(2-(2-n)\rho))^2}{16(2+n)^2(k(1-n)(2-n) - b^2\eta^2)^2}。$$

3.2.2 区块链技术按固定费用收费的双渠道供应链模型（模型 F ）

在模型 F 中，制造商和零售商的博弈决策顺序：首先，制造商决定碳减排投资努力 e^F 以及零售商的批发价格 w_r^F 和平台的零售价格 p_d^F ；然后零售商和平台分别决定产品零售价格为 p_r^F 和 p_d^F 。制造商，零售商和区块链平台的利润函数为：

$$\pi_m^F = w_d^F D_d^F + w_r^F D_r^F - \frac{1}{2}k(e^F)^2 - F_M \quad (3-8)$$

$$\pi_r^F = (p_r^F - w_r^F)D_r^F \quad (3-9)$$

$$\pi_d^F = (p_d^F - w_d^F)D_d^F \quad (3-10)$$

$$\pi_{bp}^F = F_M - c_s(D_r^F + D_d^F) \quad (3-11)$$

采用逆向归纳法对模型进行求解，当 $k > k_2$ 时，模型 F 存在最优解，最优解如命题 17 所示。求解过程详见附录 1。

命题 3.2 在固定成本模式的情形下，各个均衡解以及制造商，零售商和区块链

链平台在均衡状态下的利润分别为： $w_r^{F*} = \frac{A(b^2(1-2\rho) + 2k(2-n)(n(1-\rho) + \rho))}{4(k(1-n)(2-n) - b^2)(1+n)}$ ，

$$w_d^{F*} = \frac{A(2k(2-n)(1-(1-n)\rho) - b^2(1-2\rho))}{4(k(1-n)(2-n) - b^2)(1+n)}, \quad e^{F*} = \frac{Ab}{2(k(1-n)(2-n) - b^2)}$$

$$p_r^{F*} = \frac{A(2k(6-6\rho + n(5\rho - n(3-(3-2n)\rho))) - b^2(3+2n)(1-2\rho))}{4(k(1-n)(2-n) - b^2)(1+n)(2+n)},$$

$$p_d^{F*} = \frac{A(b^2(3+2n)(1-2\rho) + 2k(6\rho + n(5-2n^2 - (1+n)(5-2n)\rho)))}{4(k(1-n)(2-n) - b^2)(1+n)(2+n)},$$

$$\pi_m^{F*} = \frac{A^2(2k(2+n^2) - b^2(1-2\rho)^2 - 4k(2-n)(1-n)(1-\rho)\rho)}{8(k(1-n)(2-n) - b^2)(1+n)(2+n)} - F_M,$$

$$\pi_r^{F*} = \frac{A^2(b^2(1-2\rho) + 2k(1-n)(n(1-\rho) - 2\rho))^2}{16(k(1-n)(2-n) - b^2)^2(2+n)^2} \quad \text{和}$$

$$\pi_d^{F*} = \frac{A^2(b^2(1-2\rho) - 2k(1-n)(2-(2-n)\rho))^2}{16(k(1-n)(2-n) - b^2)^2(2+n)^2}。 \text{区块链平台的最优利润为}$$

$$\pi_{bp}^{F*} = F_M - \frac{ak(1-n)c_s}{2(k(1-n)(2-n) - b^2)}。$$

3.3.3 区块链技术按单位运营费用收费的双渠道供应链模型（模型 S）

在模型 S 中，制造商和零售商的博弈决策顺序：首先，制造商决定碳减排投资努力 e^S 以及零售商的批发价格 w_r^S 和平台的批发价格 w_d^S ；然后零售商和平台决定产品零售价格为 p_r^S 和 p_d^S 。制造商，零售商和区块链平台的利润函数为：

$$\pi_m^S = (p_d^S - c_b)D_d^S + (w_r^S - c_b)D_r^S - \frac{1}{2}k(e^S)^2 \quad (3-12)$$

$$\pi_r^S = (p_r^S - w_r^S)D_r^S \quad (3-13)$$

$$\pi_d^S = (p_d^S - w_d^S)D_d^S \quad (3-14)$$

$$\pi_{bp}^S = (c_b - c_s)(D_r^S + D_d^S) \quad (3-15)$$

采用逆向归纳法对模型 S 求解，当 $k > k_2$ 时， S 模型存在最优解，对式(3-12)至(3-15)依次求解，可得到命题 3。求解过程详见附录 1。

命题 3 区块链技术按单位运营费用收费的情形下，各个均衡解以及制造商和零售商在均衡状态下的利润分别为：

$$w_r^{S*} = \frac{A(b^2(1-2\rho) + 2k(2-n)(n+(1-n)\rho))}{4(k(2-n)(1-n)-b^2)(1+n)} + \frac{(k(2-n)(1-n)-2b^2)c_b}{2(k(2-n)(1-n)-b^2)},$$

$$w_d^{S*} = \frac{A(2k(2-n)(1-(1-n)\rho) - b^2(1-2\rho))}{4(k(2-n)(1-n)-b^2)(1+n)} + \frac{(k(2-n)(1-n)-2b^2)c_b}{2(k(2-n)(1-n)-b^2)},$$

$$e^{S*} = \frac{b(A - 2(1-n)c_b)}{2(k(2-n)(1-n)-b^2)},$$

$$p_r^{S*} = \frac{A(b^2(3+2n)(1-2\rho) + 2k(6\rho + n(5-2n^2 - (1+n)(5-2n)\rho)))}{4(k(1-n)(2-n)-b^2)(1+n)(2+n)} + \frac{(k(1-n)-2b^2)c_b}{2(k(1-n)(2-n)-b^2)},$$

,

$$p_d^{S*} = \frac{A(2k(6-6\rho + n(5\rho + n(3(1-\rho) + 2n\rho))) - b^2(3+2n)(1-2\rho))}{4(k(1-n)(2-n)-b^2)(1+n)(2+n)} + \frac{(k(1-n)-2b^2)c_b}{2(k(1-n)(2-n)-b^2)},$$

,

$$\pi_m^{S*} = \frac{A^2(2k(2+n^2) - b^2(1-2\rho)^2 - 4k(1-n)(2-n)(1-\rho)\rho)}{8(k(1-n)(2-n)-b^2)(1+n)(2+n)} - \frac{k(1-n)c_b(A - (1-n)c_b)}{2(k(2-n)(1-n)-b^2)},$$

$$\pi_r^{S*} = \frac{(2k(1-n)^2(2+n)c_b - 2Ak(1-n)(n(1-\rho) + 2\rho) - Ab^2(1-2\rho))^2}{16(k(1-n)(2-n)-b^2)^2(2+n)^2},$$

$$\pi_d^{S*} = \frac{(ab^2(1-2\rho) - 2Ak(1-n)(2-(2-n)\rho) + 2k(1-n)^2(2+n)c_b)^2}{16(k(1-n)(2-n)-b^2)^2(2+n)^2}。区块链平台的$$

$$\text{最优利润为 } \pi_{bp}^{S*} = \frac{k(1-n)(A - 2(1-n)c_b)(c_b - c_s)}{2(k(2-n)(1-n)-b^2)}。$$

3.3 结果比较与分析

3.3.1 最优解比较分析

对比模型 O , F 和 S 下最优产品价格, 碳减排努力以及成员利润, 可以得到结论 1-6, 证明过程如附录 2-7 所示。结论中出现的符号详见附录 17。特别的, 为确保制造商进行碳减排投资, 区块链单位成本控制在一定的阈值范围内 (即: $c_b \in (0, c_b^1)$)。

命题 3.1(1) $e^{F*} > e^{S*}$, $e^{F*} > e^{O*}$; (2) 当 $0 < c_b < c_b^2$ 时, 有 $e^{S*} > e^{O*}$, 当 $c_b^2 \leq c_b < c_b^1$ 时, 有 $e^{O*} \geq e^{S*}$ 。

命题 3.1 表明, 区块链技术的应用对制造商的碳减排努力水平具有显著影响。通过应用区块链技术, 消费者能够透明地了解产品的碳足迹, 这不仅提升了产品的市场吸引力, 也增强了消费者对环保产品的认知。在固定成本模式下, 采用区块链技术的制造商倾向于增加其碳减排努力, 然而, 当区块链技术以单位运营费用收费时, 制造商仅在单位运营成本较低时 ($0 < c_b < c_b^2$) 增加对减排的投资, 进一步激发市场需求, 当区块链的单位运营成本较高时 ($c_b^2 \leq c_b < c_b^1$), 采用该技术反而会削弱制造商的减排动力。这是因为区块链技术的引入将导致制造商面临更高的运营成本。为了补偿这部分成本, 制造商可能会选择降低其产品的减排标准, 以维持利润水平。由命题 3.1 可知: 制造商根据不同的区块链成本模式, 合理地规划碳减排投资。当区块链成本按固定成本收费时, 制造商应该尽可能地提升其碳减排努力, 当区块链成本按单位运营成本收费时, 制造商应该关注区块链单位运营成本高低合理地进行减排投资。

命题 3.2(1) 若 $k_2 < k \leq k_3$, 当 $0 < c_b \leq c_b^3$ 时, 有 $w_r^{F*} > w_r^{S*} \geq w_r^{O*}$ 和 $w_d^{F*} > w_d^{S*} \geq w_d^{O*}$, 当 $c_b^3 < c_b < c_b^1$ 时, 有 $w_r^{F*} > w_r^{O*} > w_r^{S*}$ 和 $w_d^{F*} > w_d^{O*} > w_d^{S*}$; (2) 若 $k > k_3$, 有 $w_r^{S*} > w_r^{F*} > w_r^{O*}$ 和 $w_d^{S*} > w_d^{F*} > w_d^{O*}$ 。

命题 2 表明, 产品批发价格的波动不仅受到不同区块链收费成本的影响, 也与制造商进行碳减排的成本密切相关。区块链技术赋予消费者全面了解产品

碳减排信息的能力，消费者对减排产品的信任增加，市场需求随之上升。当碳减排成本系数较低时（即 $k_2 < k \leq k_3$ ），制造商会加大碳减排投资力度，提升产品的低碳水平，从而进一步刺激市场需求，而对于区块链不同应用模式，制造商会选择不同的产品定价决策。在固定成本模式下，制造商倾向于提高产品的批发价格，以此方式来补偿其在区块链技术上的投资成本。而在单位运营成本模式下，制造商仅会在区块链单位成本较低（ $0 < c_b \leq c_b^3$ ）时增加产品的批发价格，但考虑到单位模式下区块链成本与价格需求变动直接相关，单位运营成本模式下产品的批发价格上涨幅度小于固定模式。当碳减排成本系数较高时（ $k > k_3$ ），制造商的减排努力程度相应减弱，但区块链技术的引入能够让消费者了解制造商不易的减排过程，进而增加低碳消费者的购买意愿，因此两种模式下，制造商均会提高产品的批发价格弥补从而利润损失，并且单位运营成本模式下制造商给予零售商和平台的批发价格更高。由命题 3.2 可知：制造商在制定批发价格和直销价格时，必须综合考虑碳减排难度与区块链技术成本的双重影响，并据此审慎选择区块链服务的成本模式，灵活调整定价策略，优化利润并维持市场竞争力。

命题 3.3 (1)若 $k_2 < k \leq k_4$ ，当 $0 < c_b \leq c_b^4$ 时，有 $p_r^{F*} > p_r^{S*} \geq p_r^{O*}$ 和 $p_d^{F*} > p_d^{S*} \geq p_d^{N*}$ ，当 $c_b^4 < c_b < c_b^1$ 时，有 $p_r^{F*} > p_r^{O*} > p_r^{S*}$ 和 $p_d^{F*} > p_d^{O*} > p_d^{S*}$ ；(2)若 $k > k_4$ ，有 $p_r^{S*} > p_r^{F*} > p_r^{O*}$ 和 $p_d^{S*} > p_d^{F*} > p_d^{O*}$ 。

命题 3.3 表明，区块链技术的应用对产品销售价格的影响同样受到区块链成本和制造商的碳减排成本系数的双重制约。市场需求的波动并不会改变区块链固定费用，但与区块链的单位运营成本密切相关，当制造商减的碳排成本较低（ $k_2 < k \leq k_4$ ）时，制造商更有动力增加其碳减排投资努力，消费者通过区块链技术了解产品较高的绿色度，大大增加了碳减排产品的市场需求，固定成本模式下零售商和平台会顺势增加产品的销售价格已获得更高的利润，而在单位运营成本模式下，区块链成本与产品需求呈正相关关系，所以当区块链单位运营成本较低（ $0 < c_b \leq c_b^4$ ）时，相较于固定成本模式，单位运营成本模式下产品销

售价格的上涨幅度会更小，而当单位运营成本较高（ $c_b^4 < c_b < c_b^1$ ）时，迫于行业竞争和成本压力，零售商和平台为了维持利润，其产品的销售价格甚至会低于不采用区块链情形。当碳排成本极高（ $k > k_4$ ）时，制造商为了控制成本，会选择减少其在碳减排方面的投资，此时制造商采用区块链技术对市场需求的影
响较低，为了弥补区块链应用成本压力，制造商会选择提高产品的批发价格，而零售商和平台随之也会增加其销售价格，并且单位运营模式下产品的销售价格最高，固定成本情形下次之，不采用区块链时最低。由此可见，零售商应密切关注制造商的减排难度以及其区块链应用策略，及时调整产品零售价格，确保企业的长期盈利能力。

命题 3.4 (1) 若 $0 < c_b < c_b^5$ ，当 $0 < F_M < F_M^2$ 时，有 $\pi_m^{F^*} > \pi_m^{S^*} > \pi_m^{O^*}$ ；当 $F_M^2 < F_M < F_M^1$ 时，有 $\pi_m^{S^*} > \pi_m^{F^*} > \pi_m^{O^*}$ ；当 $F_M > F_M^1$ 时，有 $\pi_m^{S^*} > \pi_m^{O^*} > \pi_m^{F^*}$ ；(2) 若 $c_b \geq c_b^5$ ，当 $0 < F_M \leq F_M^1$ 时，有 $\pi_m^{F^*} > \pi_m^{O^*} > \pi_m^{S^*}$ ；当 $F_M^1 < F_M < F_M^2$ 时，有 $\pi_m^{O^*} > \pi_m^{F^*} > \pi_m^{S^*}$ ；当 $F_M > F_M^1$ 时，有 $\pi_m^{O^*} > \pi_m^{S^*} > \pi_m^{F^*}$ 。

命题 3.4 (1) 和 (2) 表明，制造商的利润与不同收费模式下区块链费用有关。制造商应该对比两种收费模式对其利润的影响，当区块链的单位运营费用较低（ $0 < c_b < c_b^5$ ）时，制造商采用单位运营模式，若区块链固定费用低于 F_M^2 ，则固定费用模式下制造商利润最高，若区块链固定费用高于 F_M^2 ，则制造商应该选择单位运营模式下的区块链技术。当区块链的单位运营费用和固定费用均较高时，制造商为了维持自身利润，并不会采用区块链技术，而当区块链固定费用阈值 F_M^1 时，制造商采用选择固定费用模式下的区块链技术。由命题 3.4 可知：制造商应权衡两种模式下区块链成本，以避免因高成本而侵蚀利润，以确保技术投资能够带来预期的经济效益。

命题 3.5 当 $0 < F_M \leq F_M^3$ 时，有 $\pi_{bp}^{F^*} \leq \pi_{bp}^{S^*}$ ；当 $F_M > F_M^3$ 时，有 $\pi_{bp}^{F^*} > \pi_{bp}^{S^*}$ 。

命题 3.5 表明，当区块链平台收取的固定成本低于阈值 F_M^3 时，区块链平台选择按单位运营费用收费可以获得较高的利润，这是因为随着服务产品数量的

增加，规模经济效应更加明显，提升了整体的利润率。当区块链平台收取的固定成本低于阈值 F_M^3 时，固定费用模式下制造商给与平台费用要高于单位运营模式下区块链平台的总利润，所以区块链平台更加倾向于按固定费用收费。由命题 3.5 可知，区块链平台应该根据其收取固定费用的高低合理地调整策略，在固定费用较高时，区块链平台优先选择按固定费用收费以增加利润，当固定费用较低时，区块链平台为了维持利润应选择以单位运营费用收费。

3.3.2 敏感性分析

命题 3.6 $\frac{\partial e^{i*}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial w_r^{i*}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial w_d^{i*}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial p_r^{i*}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial p_d^{i*}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial \pi_m^{i*}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial \pi_d^{i*}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial \pi_r^{i*}}{\partial k} < 0$, 其中 $i = \{O, F, S\}$ 。

由命题 3.6 可知，碳减排投资成本系数与区块链技术的应用及收费模式选择并无关联。随着碳减排投资成本系数的上升，制造商的碳减排难度也随之增加，这导致制造商在碳减排方面的努力程度有所降低；为促进低碳产品的销售，制造商会降低其给与零售商和平台产品的批发价格，随之零售商和平台也会降低产品的销售价格，从而刺激产品需求的增长，维持自己的市场竞争力。然而，这种通过降价策略刺激的市场需求增长，往往难以完全补偿因产品低碳水平下降和边际利润减少所导致的利润损失，使得制造商和零售商的利润均降低。由此可知，制造商在推进低碳转型过程时，应密切关注其碳减排投资难度，通过提高能源效率和采纳新型碳减排技术来减轻成本压力。

命题 3.7 模型 S 中不同碳减排难度下制造商的减排努力，产品的批发价格、直销价格以及零售价格随着区块链单位运营费用变化趋势如表 3-2 所示，其中符号 $\searrow$ 和 $\nearrow$ 分别表示递增和递减。

表 3-2 模型 S 最优解随参数 c_b 增大的变化

参数	$\frac{\partial e^{S*}}{\partial c_b}$	$\frac{\partial w_r^{S*}}{\partial c_b}$	$\frac{\partial w_d^{S*}}{\partial c_b}$	$\frac{\partial p_d^{S*}}{\partial c_b}$	$\frac{\partial p_r^{S*}}{\partial c_b}$	$\frac{\partial \pi_m^{S*}}{\partial c_b}$	$\frac{\partial \pi_r^{S*}}{\partial c_b}$	$\frac{\partial \pi_d^{S*}}{\partial c_b}$
$k_2 < k < k_3$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$

表 3-2 模型 S 最优解随参数 c_b 增大的变化

参数	$\frac{\partial e^{S^*}}{\partial c_b}$	$\frac{\partial w_r^{S^*}}{\partial c_b}$	$\frac{\partial w_d^{S^*}}{\partial c_b}$	$\frac{\partial p_d^{S^*}}{\partial c_b}$	$\frac{\partial p_r^{S^*}}{\partial c_b}$	$\frac{\partial \pi_m^{S^*}}{\partial c_b}$	$\frac{\partial \pi_r^{S^*}}{\partial c_b}$	$\frac{\partial \pi_r^{S^*}}{\partial c_b}$
$k_3 \leq k < k_4$	$\searrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$
$k \geq k_4$	$\searrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$

命题 3.7 表明，在当碳减排成本系数较低时（ $k_2 < k < k_3$ ），制造商更愿意投资于减排技术或措施，但随着区块链成本的增加，制造商为了缓解成本压力而适当降低产品的减排努力水平，同时其和零售商也会降低产品的价格以刺激低碳产品的市场需求，从而实现薄利多销，但增加的产品销量所获得的收益仍低于产品边际利润降低造成损失，制造商、零售商和平台利润均降低；当碳减排成本系数适中时（ $k_3 \leq k < k_4$ ），制造商会在减排努力和成本效益之间寻求平衡，随着区块链成本的提高，制造商会相应降低其减排努力减少其市场需求，适当增加产品的批发价格和直销价格来弥补由于采用区块链而导致的利润损失，此时产品的批发价格适中，零售商仍可以尝试降低销售价格刺激消费来达到薄利多销的效果，制造商和零售商的利润仍持续降低；当碳减排成本系数较高时（ $k \geq k_4$ ），制造商的批发价格持续升高，零售商被迫也提高产品的零售价格来减少利润损失。由命题 3.7 可知，在单位运营费用收费模式下，供应链企业应综合考虑区块链运营费用和碳减排难度，灵活调整定价和碳减排策略，以实现成本效益与环境责任的最优平衡。

3.4 数值仿真

本节将采用 *MATLAB* 进行数值仿真，更加清晰分析区块链不同应用模式对双渠道供应链决策的影响。参照文献[27]、某汽车品牌公司 2023 年度财务报表以及第三方区块链平台公布的碳减排数据，收集相关数据并进行处理，相关参数赋值如下： $a = 200, n = 0.5, \theta = 0.6, b = 4, \eta = 0.9$ 。

3.4.1 区块链成本对均衡解的影响

由结论 8 可知，区块链单位运营费用对模型均衡解的影响与制造商减排成本系数相关，因此，分别针对制造商减排成本系数较低（ $k_2 < k < k_3$ ），适中（ $k_3 \leq k < k_4$ ）和较高（ $k \geq k_4$ ）三种情况进行仿真，以分析两种模式下区块链费用对制造商减排努力水平，产品批发价格，直销价格以及零售价格的影响，结果如图 3-2 至 3-4 所示。

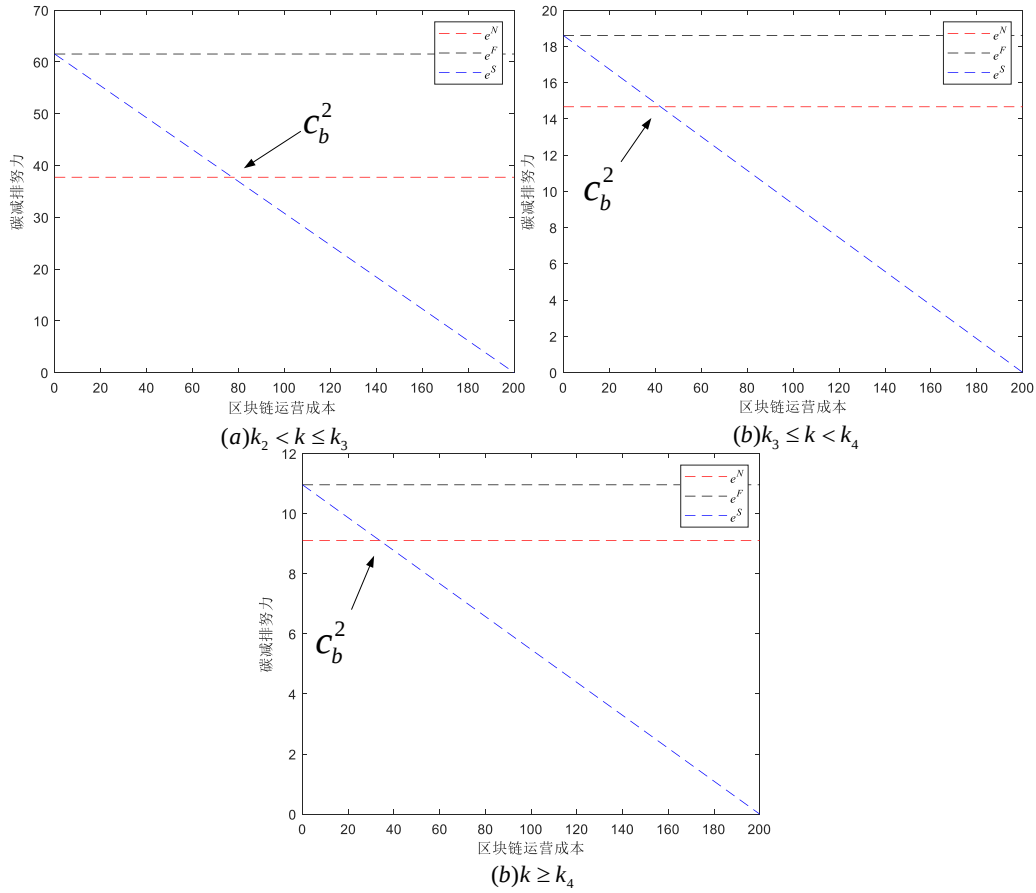


图 3-2 区块链费用对碳减排努力的影响

由图 3-2 可知，在固定费用收费模式下，制造商在碳减排方面的努力始终是最高的。在按单位成本收费的情况下，随着区块链技术单位运营费用的上升，制造商的碳减排努力呈现下降趋势，并且此结果与制造商的碳减排成本系数无关。具体来说，当区块链技术的单位运营费用低于阈值 c_b^2 时，采用这种技术将有助于促进制造商增加对碳减排的投资，当区块链技术的单位运营费用较高，

即 $c_b > c_b^2$ 时，那么使用区块链技术可能会抑制制造商在碳减排方面的投资。这些发现为我们理解区块链技术在促进碳减排方面的潜力和局限性提供了重要视角。

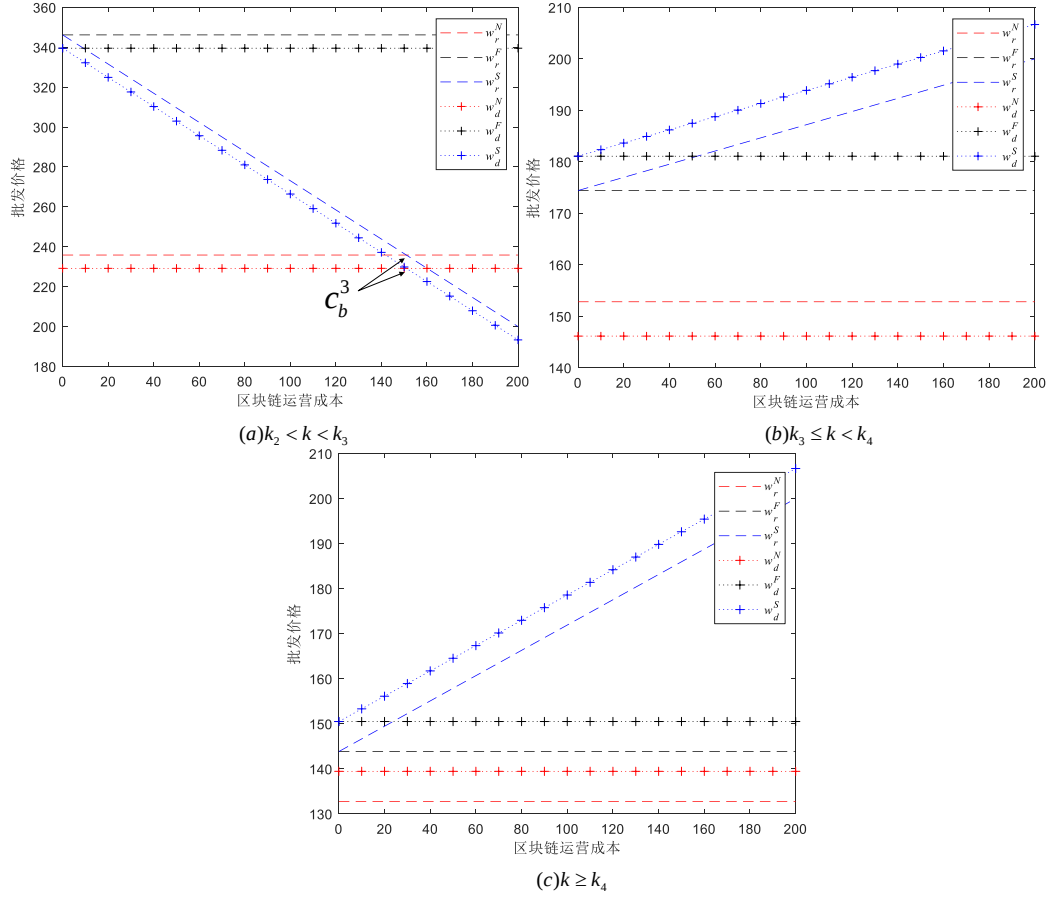


图 3-3 区块链费用对制造商的产品批发价格的影响

由图 3-3 可知，当制造商采用区块链技术并按固定费用收费时，制造商给与零售商和平台的产品批发价格均高于不采用区块链情形下时的水平。然而，若制造商选择在区块链技术以单位运营费用收费的情形下，若制造商的减排难度较低时（即 $k_2 < k < k_3$ ），制造商的产品批发价格和直销价格随着区块链单位运营成本的增加而减少，当区块链单位运营成本较低时（即 $0 < c_b < c_b^4$ ），区块链的应用会激励制造商增加产品的批发价格和直销价格，而当区块链单位运营成本较高时（即 $c_b^3 < c_b < c_b^1$ ），制造商会降低产品的批发价格和直销价格，对消费者有利的。若制造商的减排难度始终或者偏大时（即 $k > k_3$ ），随着区块链单位

运营成本的增加，制造商为了转移区块链成本，会随之增加产品批发价格和直销价格，进一步对比图 3-3 (b)、(c) 可知，随着制造商减排难度的增加，制造商提高产品批发价格幅度也相应增大。

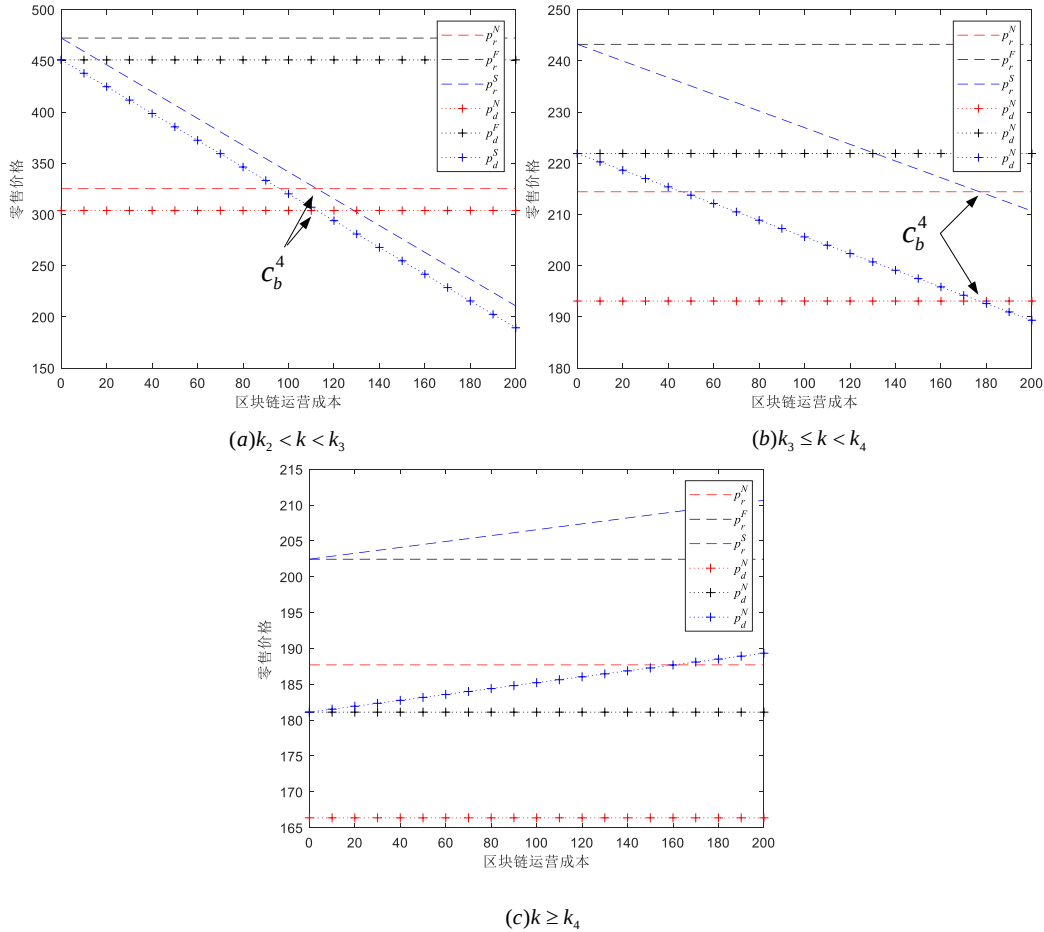


图 3-4 区块链费用对平台和零售商的产品销售价格的影响

由图 3-4 可知，区块链技术按固定费用收费情形下零售商的销售价格均高于不采用区块链情形时的水平。当区块链技术以单位运营费用收费且制造商的减排难度较低或适中时（即 $k_2 < k < k_4$ ），零售商的销售价格随着区块链单位运营费用的增加而降低，并且会在区块链成本低于阈值 C_b^5 时增加产品的零售价格，在区块链运营成本高于阈值 C_b^5 时降低产品的零售价格，若制造商的减排难度较高时（即 $k > k_4$ ），由于制造商会增加产品的批发价格并降低其碳减排努力，在这种情况下，为了保持其利润水平，零售商也可能会选择提高其产品的销售价格。

3.4.2 区块链成本对制造商、零售商以及区块链平台利润的影响

制造商在不同收费模式下区块链费用对制造商利润的影响如图 3-5 所示，其中 N ， F 和 S 分别代表在区块链费用变化时制造商的区块链引入策略。

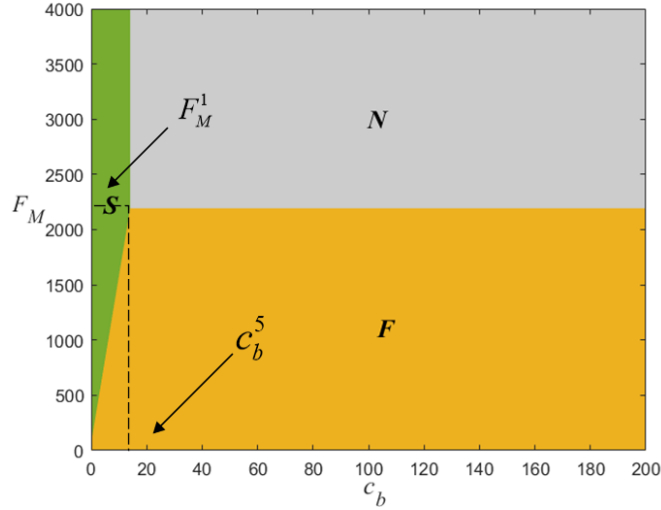


图 3-5 区块链费用对制造商利润的影响

由图 3-5 可知，不论制造商选择采用哪种区块链收费模式，制造商都在区块链成本较低时（即 $0 < F_M < F_M^1$ 和 $0 < c_b < c_b^5$ ），采用该技术才能够给制造商带来利润提升，进一步对比两种收费模式在区块链成本较低情形下的制造商利润可知，只有当区块链固定费用与单位运营费用之间的比值低于一定阈值（ $0 < \frac{F_M}{c_b} < \phi$ ）时，制造商更倾向于区块链技术按固定费用收费，反之，制造商应该选择按单位运营费用收费的区块链技术，即模型 F 。

3.4.3 区块链平台对两种模式的偏好分析

我们又从区块链平台角度研究其利润随着单位服务成本的变化，具体如图 3-6 所示。随着区块链单位服务成本的增加，两种收费模式下区块链平台的利润如图 9 所示，其中， $k = 60$ ， $F_M = 7000$ 和 $c_b = 50$ ，其他因素不变。

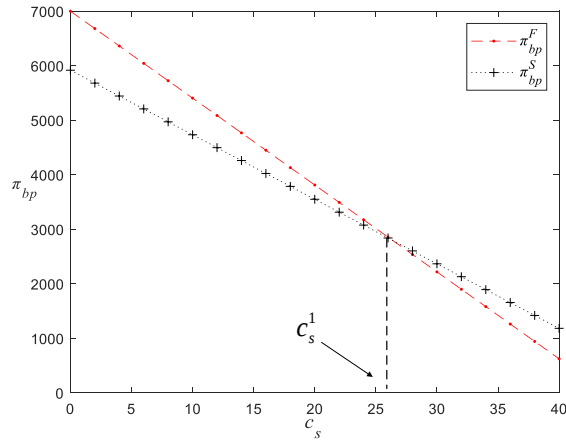


图 3-6 区块链单位服务成本对区块链平台利润的影响

由图3-6可知，随着区块链单位服务成本的增加，两种收费模式下区块链平台的利润均降低。当区块链的单位服务成本较低时（ $0 < c_s \leq c_s^1$ ），区块链平台按固定费用收费时的利润要高于按单位运营费用收费时的利润，当区块链单位服务成本高于阈值时，为了保证服务产品的单位利润，区块链平台更倾向于按单位运营费用收费。

3.5 本章小结

本文根据制造商选择固定成本模式和单位运营成本模式两种常见的区块链成本模式构建三种双渠道供应链模型。在考虑制造商的碳减排系数、区块链成本对双渠道供应链成员最优决策以及利润的影响。此外，还从区块链平台视角探究其对两种成本模式的偏好。研究得出不同主体的最佳决策。主要结论如下：

只有在区块链的固定费用或单位运营费用低于其应用阈值时，制造商才会考虑选择采用该技术。特别的，当固定费用和单位运营费用均较低且固定费用与单位运营费用之比低于（高于）阈值时，制造商倾向于选择固定费用（单位运营费用）收费模式。区块链平台利润始终随单位服务成本增加而递减，当该成本低于（高于）临界值时，固定费用（单位运营费用）模式更具盈利优势。固定费用模式下，制造商利润与区块链费用负相关，但其碳减排水平、批发价及直销价均能持续提升，且不受费用波动影响。单位运营费用模式则导致制造

商碳减排投入及供应链各方利润均与费用负相关，当碳减排成本系数较低时，各渠道价格随费用递增，反之则递减，而中等成本系数下给与平台和零售商的批发价格与费用正相关，与平台和零售商的零售价呈负相关关系。

第4章 双渠道供应链成员协同赋能区块链下产品定价和碳减排决策

在“双碳”目标的国家战略背景下，制造企业纷纷开展碳减排等绿色生产活动，以响应消费者对低碳生活的追求，如格力、海尔等知名企业通过推出节能家电产品^[5]。随着互联网经济的迅猛发展，线上平台已经成为消费者偏爱的购物方式之一，为了满足消费者的购买选择，众多制造商纷纷采用零售商和平台并存的双渠道营销模式，从而迅速占领消费市场，提高自身收益，如苹果、戴尔等^[66]。但在双渠道运营环境中，企业面临其减排量数据传递与消费者对低碳产品偏好之间的信息不对称以及消费者对低碳产品信任不充分的双重压力，直接增加了低碳产品需求的不确定性，如沃尔玛、亚马逊等企业曾因被曝光虚假使用零碳燃料而遭到公众质疑，这一行为不仅损害自身的声誉，也削弱了消费者对企业减排投资的信任^[67]，因此，制造商在满足消费者低碳需求的同时，如何实现与消费者之间信息共享并提升其对产品的信任度是目前亟需解决的问题。由于区块链本质上属于一种去中心化的分布式账本数据库，能够有效解决多边信息共享问题，具有数据不可篡改性、可追溯性、促进信任建立以及支持智能执行等优势^[6,7]。通过区块链结点构建的分散网络层次结构，制造商共享的碳减排投资信息以及零售商和平台可以共享消费者低碳偏好信息，不仅可以在整个双渠道供应链网络中实现全面传递，还能验证信息的准确性^[68]。唯链企业所研发的区块链技术支持的碳排放追踪云服务系统（SaaS平台），使企业用户能够轻松记录其低碳实践的关键数据。这些被赋予“可信任”标签的数据，将成为赢得消费者信任的关键因素，同时也有助于企业了解消费者对低碳产品的偏好程度。

随着双渠道营销模式的兴起以及信息不对称问题的日益突出，越来越多的学者开始关注双渠道供应链成员的区块链引入策略，并期望借助区块链技术解决供应链成员间的信息不对称难题。但目前大多学者主要关注供应链成员之间的信息差异性问题，较少有文献从双渠道视角下关注消费者低碳偏好与制造商

的减排数据之间信息不对称问题，更未在此基础上探讨引入区块链技术对双渠道供应链成员的碳减排和产品定价决策的影响。本文尝试提出“碳减排信任消费增长”这一概念，即市场中存在一些原本具有碳减排意识但又不信任产品的“低碳产品犹豫者”，他们通过区块链技术准确了解碳减排信息后会选择信任产品而进入消费者市场，由此带来的需求增长在本文中就被称为“碳减排信任消费增长”。例如，西门子股份公司所开发的基于区块链技术的碳足迹可信精确计算与追溯解决方案，通过提供透明且可验证的碳减排足迹信息，帮助消费者获取产品的精确碳减排数据，促使那些原本持观望态度的消费者作出购买决策。

基于此，本章以制造商、零售商以及电商平台所构成的双渠道供应链为研究对象，依据双渠道供应链成员是否共同应用区块链技术构建两种博弈模型，比较两种情形下供应链成员的定价和碳减排决策，并探讨区块链的单位上链成本等对供应链成员决策的影响。主要研究问题包括：（1）双渠道供应链成员引入区块链技术的边界条件是什么？（2）采用区块链技术时，单位上链成本会对制造商的碳减排决策、供应链成员的定价决策和利润产生怎样的影响？（3）双渠道供应链成员的决策和利润如何受到消费者在不同分销渠道上的分布比例的影响？本章从双渠道视角下探讨供应链成员的区块链采用策略问题，并进一步研究区块链技术应用对供应链产品定价和减排决策的影响机理，丰富了低碳消费的内涵，发展了数字经济新情景下低碳和双渠道供应链的运作决策理论；同时，为企业合理地制定区块链技术应用策略、产品定价和减排决策提供理论指导。

4.1 问题描述与相关假设

4.1.1 问题描述

在一个由制造商、传统店铺零售商（以下简称“零售商”）和电商平台（以下简称“平台”）组成的供应链中，制造商担任领导者角色，零售商和平台则作为追随者。依据供应链成员是否采用区块链技术，决策情景分为两种：一是不采用区块链技术情景，记为模型 N ；二是共同采用区块链技术情景，记为模型 B ；两种情形下供应链的运作过程如图 4-1 所示。在两种情景下，制造商首先进行碳

减排投资，其碳减排努力程度为 e^i ，根据平台和零售商销售策略的差异，借鉴文献[26]，制造商以 w_d^i 和 w_r^i 的价格将低碳产品分别批发给平台和零售商；然后，平台和零售商以 p_d^i 和 p_r^i 的价格将产品卖给消费者，其中 $i=\{N,B\}$ 。制造商与消费者并不直接接触，难以同平台和零售商一样准确把握顾客对低碳产品的青睐程度，而消费者也很难获取制造商实际的碳减排数据，即制造商与消费者之间存在信息不对称的问题。应用区块链技术可有效解决这一问题，即双渠道供应链成员可以通过区块链技术共享产品的碳减排信息和消费者的低碳偏好信息，以促使制造商更好地减排投资，如路易威登，古驰等^[68]。同时，区块链技术通过显著提升低碳产品的透明度和可信度，成功吸引了那些原本处于观望态度的潜在消费群体（即“低碳产品犹豫者”）进入市场，从而进一步推动了低碳经济的发展。

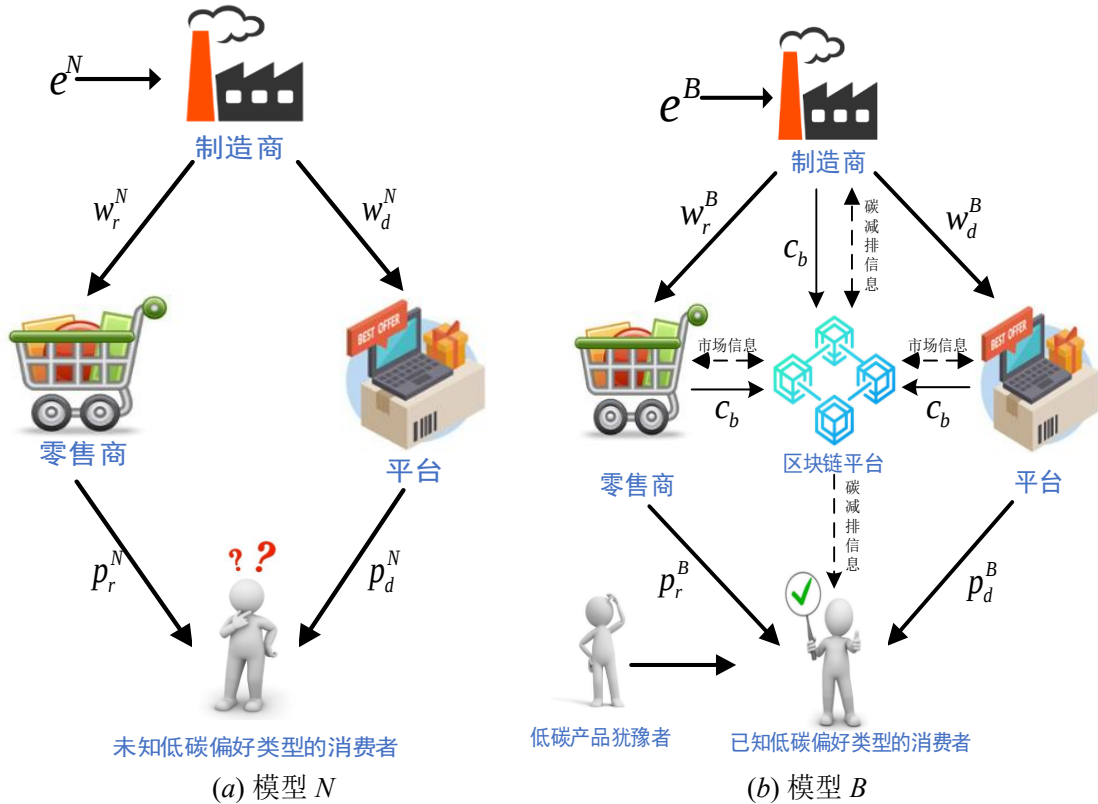


图 4-1 两种供应链运作模式

4.1.2 相关假设

假设低碳产品市场潜在需求量为 A ，消费者只能选择通过平台或零售商单一

渠道购买产品；借鉴文献[3,69]，假设消费者通过零售商渠道购买产品的比例为 ρ ，而通过平台销售渠道购买产品的比例为 $1-\rho$ 。平台和零售商相互竞争，双方定价互相影响；依据文献[69]方法，设定 n ($n \in (0,1)$) 为零售商和平台之间的交叉弹性价格系数，且双渠道之间的影响系数相等。

消费者对低碳产品的偏好信息属于个人隐私，制造商或零售商难以准确获取，只能通过市场调研等手段来预估消费者对低碳产品的偏好程度；借鉴文献[35]，假设市场中存在且只存在两种低碳偏好类型的消费者，即高-低碳偏好型（ H 型）和低-低碳偏好型（ L 型）的消费者，其中， H 型消费者在市场中的概率为 m ，而 L 型消费者的概率为 $1-m$ ，其低碳偏好系数分别为 b_H 和 b_L ，且有 $b_H > b_L$ 。

制造商一次性投入资金以实施减碳项目，其所需费用随着碳减排努力程度 e^i 的提升而增加。依据文献[17]和[21]，假设碳减排投资成本为 $c_{(e^i)} = k(e^i)^2/2$ ，其中， k 表示碳减排投资成本系数， e^i 表示 i 模型下制造商的减排努力水平， $i \in \{N, B\}$ 。在模型 N 中，制造商并不了解消费者低碳偏好，仿照文献[35]，碳减排带来的需求增长记为 $mb_H e^N + (1-m)b_L e^N$ ；在模型 B 中，制造商可通过区块链技术了解消费者的低碳偏好，碳减排带来的需求增长为 be^B ，其中 b 为采用区块链技术所精准获取的消费者低碳偏好系数；此外，区块链技术的应用会使市场中部分的“低碳产品犹豫者”购买产品，带来的需求增长为 ge^B ，其中 g 为“碳减排信任消费”系数。借鉴文献[70]，消费者通过区块链技术能够准确掌握制造商的碳排放数据，充分信任产品的碳减排努力水平，因而企业采用区块链技术能够带来消费者需求的增加，假设两种模式下制造商碳减排所带来的需求增长满足 $(b+g)e^B > mb_H e^N + (1-m)b_L e^N$ 。

借鉴文献[35]和[69]可知，不采用区块链情形下（模型 N ），零售商和平台的市场需求函数分别为：

$$D_r^N = \rho A - p_r^N + np_d^N + mb_H e^N + (1-m)b_L e^N \quad (4-1)$$

$$D_d^N = (1-\rho)A - p_d^N + np_r^N + mb_H e^N + (1-m)b_L e^N \quad (4-2)$$

应用区块链技术时（模型 B ），零售商和平台的市场需求函数为：

$$D_r^B = \rho A - p_r^B + np_d^B + (b+g)e^B \quad (4-3)$$

$$D_d^B = (1-\rho)A - p_d^B + np_r^B + (b+g)e^B \quad (4-4)$$

由于制造商的生产成本对本文的主要结论不产生直接影响，为了简化分析过程，参照文献[60]，假设制造商生产产品的单位成本为 0。本文只考虑区块链技术的单位上链成本。其中，制造商承担碳减排信息的单位上链成本，记为 c_{mb} ，平台和零售商承担消费者低碳偏好信息的单位上链成本，记为 c_{rb} 。为了方便计算和分析，在建模和均衡解分析过程中，假设两个单位上链成本一样，即 $c_{mb}=c_{rb}=c_b$ ；在数值仿真部分中，将进一步分析不同单位上链成本对供应链成员决策的影响。

本节中所涉及到的符号如表 4-1 所示。

表 4-1 符号定义及说明

符号	符号定义
A	产品的基本需求量
n	双渠道之间的交叉弹性价格系数
k	制造商的减排成本系数
g	“碳减排信任消费”系数
b	采用区块链技术获取的消费者低碳偏好系数
e^i	i 模型下制造商的碳减排努力程度，其中 $i = \{N, B\}$
c_{mb}	制造商承担区块链的单位上链成本
c_{rb}	零售商/平台承担区块链的单位上链成本
b_H / b_L	H / L 型消费者对低碳产品的敏感系数
$m / 1-m$	市场中存在 H / L 型消费者的先验概率
$\rho / 1-\rho$	零售商/平台的消费者比例
p_d^i / p_r^i	i 模型下平台/零售商的产品销售价格，其中 $i = \{N, B\}$
w_d^i / w_r^i	i 模型下平台/零售商的产品批发价格，其中 $i = \{N, B\}$
D_d^i / D_r^i	i 模型下平台/零售商的市场需求，其中 $i = \{N, B\}$
$\pi_m^i / \pi_d^i / \pi_r^i$	i 模型下制造商/平台/零售商的利润函数，其中 $i = \{N, B\}$

4.2 模型建立与求解

4.2.1 不采用区块链技术情形（模型 N ）

在模型 N 中，制造商、平台和零售商博弈决策顺序为：首先制造商决定碳减排努力程度 e^N 以及批发价格 w_r^N 和 w_d^N ；然后，零售商和平台同时决定各自的产品销售价格 p_r^N 和 p_d^N 。制造商、零售商以及平台的利润函数分别为：

$$\pi_m^N = w_r^N D_r^N + w_d^N D_d^N - \frac{1}{2} k (e^N)^2 \quad (4-5)$$

$$\pi_r^N = (p_r^N - w_r^N) D_r^N \quad (4-6)$$

$$\pi_d^N = (p_d^N - w_d^N) D_d^N \quad (4-7)$$

根据逆向归纳法可知，当 $k > k_5 = \frac{(mb_H + (1-m)b_L)^2}{(1-n)(2-n)}$ 时，海塞矩阵负定，模型 N 存在唯一均衡解。各个均衡解及制造商、平台和零售商在均衡状态下的利润如表 2 所示。求解过程详见附录 1。

4.2.2 采用区块链技术情形（模型 B ）

在模型 B 中，制造商、平台和零售商的博弈决策顺序为：制造商首先决定碳减排努力程度 e^B 以及产品批发价格 w_r^B 和 w_d^B ；然后，零售商和平台同时决定产品销售价格 p_r^B 和 p_d^B 。此时，制造商，零售商和平台的利润函数分别为：

$$\pi_m^B = (w_r^B - c_b) D_r^B + (w_d^B - c_b) D_d^B - \frac{1}{2} k (e^B)^2 \quad (4-8)$$

$$\pi_r^B = (p_r^B - w_r^B - c_b) D_r^B \quad (4-9)$$

$$\pi_d^B = (p_d^B - w_d^B - c_b) D_d^B \quad (4-10)$$

依据逆向归纳法可知，当 $k > k_6 = \frac{(b+g)^2}{(1-n)(2-n)}$ 时，海塞矩阵负定，模型 B

存在唯一均衡解。各个均衡解及制造商、平台和零售商的均衡状态下的利润如表 4-2 所示。求解过程详见附录 1。

表 4-2 均衡状态下两种模型的最优解和利润

	模型N	模型B
w_r^*	$\frac{A(2k(2-n)(n+(1-n)\rho)+(2\rho-1)\alpha^2)}{4(1+n)(k\gamma-\alpha^2)}$	$\frac{A(\beta^2+2k(2-n)n+2\rho(k\gamma-\beta^2))}{4(k\gamma-\beta^2)(1+n)} - \frac{\beta^2 c_b}{(k\gamma-\beta^2)}$
w_d^*	$\frac{A(2k(2-n)(1-(1-n)\rho)+(2\rho-1)\alpha^2)}{4(1+n)(k\gamma-\alpha^2)}$	$\frac{A((2k(2-n)-\beta^2)-2\rho(k\gamma-\beta^2))}{4(k\gamma-\beta^2)(1+n)} - \frac{\beta^2 c_b}{k\gamma-\beta^2}$
e^*	$\frac{A\alpha}{2(k\gamma-\alpha^2)}$	$\frac{\beta(A-4(1-n)c_b)}{2(k\gamma-\beta^2)}$
p_r^*	$\frac{1}{4}A(\frac{k(3-2n)}{k\gamma-\alpha^2} + \frac{(3+2n)(2\rho-1)}{(1+n)(2+n)})$	$\frac{A(((3+2n)(\beta^2+2\rho(k\gamma-\beta^2))+(10kn-4kn^3)))}{4(k\gamma-\beta^2)(1+n)(2+n)} + \frac{(k(1-n)-2\beta^2)c_b}{k\gamma-\beta^2}$
p_d^*	$\frac{1}{4}A(\frac{k(3-2n)}{k\gamma-\alpha^2} - \frac{(3+2n)(2\rho-1)}{(1+n)(2+n)})$	$\frac{A((12k-6kn^2)-(3+2n)(\beta^2+2\rho(k\gamma-\beta^2)))}{4(k\gamma-\beta^2)(1+n)(2+n)} + \frac{(k(1-n)-2\beta^2)c_b}{k\gamma-\beta^2}$
π_m^*	$\frac{1}{8}A^2(\frac{(2\rho-1)^2}{(1+n)(2+n)} + \frac{k}{k\gamma-\alpha^2})$	$\frac{A^2((2k(2+n^2)-\beta^2)-4(1-\rho)\rho(k\gamma-\beta^2))}{8(k\gamma-\beta^2)(1+n)(2+n)} - \frac{k(1-n)c_b(A-2(1-n)c_b)}{k\gamma-\beta^2}$
π_r^*	$\frac{A^2((2\rho-1)\alpha^2-2k(1-n)(n+(2-n)\rho))^2}{16(2+n)^2(k\gamma-\alpha^2)^2}$	$\frac{(A(\beta^2+2k(1-n)n+2(k\gamma-\beta^2)\rho)-4k(2-3n+n^3)c_b)^2}{16(k\gamma-\beta^2)^2(2+n)^2}$
π_d^*	$\frac{A^2((2\rho-1)\alpha^2+2k(1-n)(2-(2-n)\rho))^2}{16(2+n)^2(k\gamma-\alpha^2)^2}$	$\frac{(A(\beta^2-4k(1-n)+2\rho(k\gamma-\beta^2))+4k(2-3n+n^3)c_b)^2}{16(k\gamma-\beta^2)^2(2+n)^2}$

表 4-2 中 α , β 和 γ 详见附录 17。为保证制造商的碳减排努力为正值, 需满

足 $e^{B*} = \frac{\beta(A-4(1-n)c_b)}{2(k\gamma-\beta^2)} > 0$, 区块链的单位上链成本需满足 $0 < c_b < c_b^1$, 本文所

有研都遵循这一限制条件。

4.3 结果分析

4.3.1 区块链技术影响分析

对比模型 N 和 B 下的产品价格、碳减排努力水平以及成员收益, 可得结论 1、结论 2 和结论 3, 证明过程如附录 10 到附录 12 所示。结论中出现的符号详见附录 15, 特别的, 区块链上链的单位成本阈值关系如下: $c_b^6 > c_b^9 > c_b^7 > c_b^8$ 且 $c_b^6 > c_b^{11} > c_b^{12}$, 区块链上链成本阈值大小比较详见附录 9。

命题 3.1 (1) 当 $0 < c_b \leq c_b^7$ 时, 有 $w_d^{N*} \leq w_d^{B*}$ 和 $w_r^{N*} \leq w_r^{B*}$; 当 $c_b^7 < c_b < c_b^6$ 时, 有 $w_d^{N*} > w_d^{B*}$ 和 $w_r^{N*} > w_r^{B*}$; (2) 当 $0 < c_b \leq c_b^8$ 时, 有 $e^{N*} \leq e^{B*}$; 当 $c_b^8 < c_b < c_b^6$ 时, 有 $e^{N*} > e^{B*}$ 。

命题 3.1(1)表明, 区块链技术对产品批发价格的影响与区块链的单位上链成本密切相关。当区块链的单位上链成本低于阈值 c_b^8 时, 采用区块链技术能够促成消费者的低碳产品偏好信息与制造商的碳减排信息在供应链网络中的有效共享。这一举措使得制造商能够精准把握消费者的低碳需求动态, 而消费者亦能更全面地获取产品的减排详情, 从而增强对低碳产品的信任度, 进一步推动市场需求的增长。此时, 制造商将提升产品的批发价格, 以分享区块链技术应用带来的额外收益; 另外, 为进一步刺激市场需求, 制造商也会加大减排投资以提高产品的低碳水平。当区块链的单位上链成本适中时 ($c_b^8 < c_b \leq c_b^7$), 区块链技术的应用仍有利于制造商提高产品的批发价格, 但却会抑制制造商的减排努力; 当区块链的单位上链成本极高时 ($c_b^6 < c_b < c_b^5$), 采用区块链技术会使制造商、零售商和平台均承担较高的运营成本, 为了弥补平台和零售商的利润损失, 促使平台和零售商仍应用区块链技术, 制造商会降低产品的批发价格; 此时, 产品单位效益的降低会抑制制造商的减排投资, 制造商会适当降低产品的减排努力程度。由结论 1 可知, 企业决策时应将技术创新与成本效益分析相结合, 优化区块链智能合约设计并进行数据压缩和储存优化, 以降低区块链的上链成本, 进而获得较高的产品边际收益和环境收益。

命题 3.2 (1) 若 $k_5 < k \leq k_6$, 当 $0 < c_b \leq c_b^9$, 有 $p_d^{N*} \leq p_d^{B*}$ 和 $p_r^{N*} \leq p_r^{B*}$; 当 $c_b^9 < c_b < c_b^6$ 时, 有 $p_d^{N*} > p_d^{B*}$ 和 $p_r^{N*} > p_r^{B*}$; (2) 当 $k > k_6$ 时, 有 $p_d^{N*} < p_d^{B*}$ 和 $p_r^{N*} < p_r^{B*}$ 。

命题 3.2 表明, 区块链技术应用对产品销售价格的影响不仅与区块链的单位上链成本相关, 还与制造商的碳减排投资成本系数相关。当碳减排投资成本系数较高时 ($k > k_6$), 制造商的碳减排努力程度虽会偏低, 但区块链技术的引入能够让消费者了解制造商不易的减排过程, 进而增加低碳消费者的购买意愿,

此时，零售商或平台均会提高产品的销售价格。当碳减排投资成本系数较低时（ $k_5 < k \leq k_6$ ），制造商的实施减排措施相对容易，因此更有可能增加碳减排的投资，以期通过提升产品的环保属性来增强市场竞争力；此时，若区块链的单位上链成本较低（ $0 < c_b \leq c_b^9$ ），区块链技术的实施促使制造商上调了产品的批发价格，零售商和平台也随之提高产品的销售价格；当区块链的单位上链成本较高时（ $c_b^9 < c_b < c_b^6$ ），零售商和平台为了在竞争激烈的市场中保持竞争力，会选择降低销售价格来维持甚至抢占更多的市场份额。由命题 3.2 可知，零售商或平台在进行产品定价时应充分考虑制造商碳减排投资成本系数以及区块链的单位上链成本的影响，针对不同的碳减排投资成本系数和区块链的单位上链成本，选择不同的产品定价策略。

命题 3.3 (1) 当 $0 < c_b \leq c_b^{10}$ 时，有 $\pi_m^{B*} > \pi_m^{N*}$ ，当 $c_b^{10} < c_b < c_b^6$ 时，有 $\pi_m^{B*} < \pi_m^{N*}$ ；(2) 当 $0 < c_b \leq c_b^{11}$ 时，有 $\pi_d^{B*} > \pi_d^{N*}$ 和 $\pi_r^{B*} > \pi_r^{N*}$ ，当 $c_b^{11} < c_b < c_b^6$ 时，有 $\pi_d^{B*} < \pi_d^{N*}$ 和 $\pi_r^{B*} < \pi_r^{N*}$ 。

命题 3.3(1)表明，区块链技术应用对供应链成员利润的影响与区块链的单位上链成本密切相关。制造商通过区块链技术洞察消费者的低碳偏好，能够更好地满足其对环保产品的需求，而消费者对产品低碳特性的认知也随之提升，这种双向的信息透明度增强了消费者对低碳产品的信任，从而刺激了市场需求的增长。结合命题 3.1 和 3.2 可知，当区块链的单位上链成本极低时（ $0 < c_b \leq c_b^6$ ），应用区块链技术会增加产品的绿色程度、批发价格和销售价格，从而提高所有供应链成员的利润。当区块链的单位上链成本较低时（ $c_b^6 < c_b < c_b^5$ ），区块链技术的应用仅有利于制造商，对零售商和平台是不利的，此时，制造商若想在供应链中实施区块链技术，应建立合适的利益协调机制以保障平台和零售商的盈利能力；当区块链的单位上链成本高于阈值 c_b^5 时，区块链技术的应用虽能增加供应链的信息流通水平，但对各个供应链成员总是不利的，供应链成员若仅从盈利能力角度考虑，则不会采用区块链技术。

4.3.2 两种销售渠道上消费者比例影响分析

命题 4.4 (1) $\frac{\partial p_r^*}{\partial \rho} > \frac{\partial w_r^*}{\partial \rho} > 0$, $\frac{\partial p_d^*}{\partial \rho} < \frac{\partial w_d^*}{\partial \rho} < 0$, $\frac{\partial e^*}{\partial \rho} = 0$; (2) 当 $0 < \rho < \frac{1}{2}$ 时, 有

$\frac{\partial \pi_m^*}{\partial \rho} < 0$, 当 $\frac{1}{2} \leq \rho < 1$ 时, 有 $\frac{\partial \pi_m^*}{\partial \rho} \geq 0$, 其中, $i = \{N, B\}$ 。

结论 4.4 表明, 消费者在两个销售渠道上所占比例对产品定价决策、制造商的碳减排决策及供应链成员利润的影响与区块链技术的应用无关。随着零售商渠道上消费者数量的增加, 为让零售商和平台形成良好的竞争态势, 制造商会提高给零售商的产品批发价格且降低给平台的批发价格, 以抑制零售商而提升平台的竞争力; 零售商的销售价格随之升高, 平台的销售价格则随之降低。考虑制造商批发给两个销售途径的产品并无差异, 即表明制造商无法通过产品的减排努力进行双渠道竞争态势的调整, 因此, 制造商的减排努力程度不受消费者在两个销售渠道上所占比例的影响。

零售商渠道上消费者数量(ρ)的增加虽会提高该渠道上产品销售价格进而抑制产品需求, 但基本市场规模的增加仍会提高零售商利润和降低平台利润。对制造商而言, 其利润随着 ρ 的增加先递增后递减, 当 $\rho = \frac{1}{2}$ 时, 制造商利润最低, 此时, 零售商和平台在市场中竞争最激烈, 考虑双方相同的市场竞争力, 制造商会给予双方相同的产品批发价格, 产品双渠道上的销售价格也相同。由命题 4.4 可知, 制造商在制定批发策略时, 应灵活调整以平衡零售商和平台的竞争, 此外, 制造商、零售商和平台之间应该保持良好的沟通, 共同探索合作共赢的商业模式。

命题 4.5 当 $0 < \rho < \frac{1}{2}$ 时, 有 $w_d^* > w_r^*$, $p_d^* > p_r^*$ 和 $\pi_d^* > \pi_r^*$; 当 $\frac{1}{2} \leq \rho < 1$ 时, 有 $w_d^* \leq w_r^*$, $p_d^* \leq p_r^*$ 和 $\pi_d^* \leq \pi_r^*$, 其中, $i = \{N, B\}$ 。

命题 4.5 表明, 无论是否采用区块链技术共享信息, 平台和零售商的批发价格、销售价格以及利润大小都与消费者的渠道选择有关, 消费者占比较多的分销渠道具有较高的市场份额和力量, 制造商给予的产品批发价格越高, 其产品销售价格也越高, 其获利能力越高。

4.3.3 其它参数的影响分析

命题 4.6 $\frac{\partial w_r^{i*}}{\partial k} = \frac{\partial w_d^{i*}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial p_r^{i*}}{\partial k} = \frac{\partial p_d^{i*}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial e^{i*}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial \pi_r^{i*}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial \pi_d^{i*}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial \pi_m^{i*}}{\partial k} < 0$, 其中, $i = \{N, B\}$ 。

命题 4.6 表明, 碳减排投资成本系数对均衡解及供应链参与者的盈利水平的影响与区块链技术的应用无关。随着碳减排投资成本系数的增加, 碳减排难度增加, 制造商会减少其碳减排努力程度; 为促进低碳产品的销售, 制造商会降低产品的批发价格, 零售商和平台随之降低产品的销售价格, 产品需求量上升。但通过降低销售价格刺激的市场需求增加量仍无法弥补产品低碳程度降低和边际利润降低引发的收益损失, 使得制造商、零售商和平台利润均降低。由此可知, 减排投资成本是影响企业低碳转型的关键因素, 企业应积极提升能源利用效率, 并积极引进新型减排设备, 以系统化降低碳减排的成本负担, 不仅如此, 政府应当积极推动企业利用技术进步和市场工具实现绿色转型, 促进经济的可持续发展。

命题 4.7 模型 B 下产品价格、减排努力以及供应链成员利润随参数 g 增大的变化趋势如表 4-3 所示, 其中符号 $\nearrow$ 、 $\searrow$ 分别表示递增、递减。

表 4-3 模型 B 下的最优解随参数 g 增大的变化

参数	w_r^{B*}	w_d^{B*}	p_r^{B*}	p_d^{B*}	e^{B*}	π_m^{B*}	π_r^{B*}	π_d^{B*}
g	$\nearrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\begin{cases} \rho \leq \frac{1}{2} \text{ 且 } \begin{cases} c_b \in (0, c_b^{12}) \nearrow \\ c_b \in (c_b^{12}, c_b^6) \searrow \end{cases} \\ \rho > \frac{1}{2} \text{ 且 } c_b \in (0, c_b^6) \nearrow \end{cases}$	$\begin{cases} \rho \leq \frac{1}{2} \text{ 且 } c_b \in (0, c_b^6) \nearrow \\ \rho > \frac{1}{2} \text{ 且 } \begin{cases} c_b \in (0, c_b^{13}) \nearrow \\ c_b \in (c_b^{13}, c_b^6) \searrow \end{cases} \end{cases}$

命题 4.7 表明, 产品的批发价格、销售价格以及制造商在降低碳排放方面的努力水平和利润均与“碳减排信任消费”系数有关。在区块链技术应用场景中, 随着消费者对低碳产品信任和需求的增加, 制造商会增强其减排投资并提高产品批发价格, 其利润随之增加。随着产品批发价格的提高, 平台和零售商也会提高其销售价格; 此时, 消费者占比较高的分销渠道上的企业利润总是随着消

费者“碳减排信任消费”系数的增加而提高，而在消费者占比较低的分销渠道上，企业利润与消费者低碳产品信任度的关系与区块链的单位上链成本相关。当区块链的单位上链成本较低（高）时，随着消费者对低碳产品信任的增加，消费者数量较少的渠道成员利润随之增加（降低）。由此可知，在采用区块链技术的双渠道供应链模型中，随着“碳减排信任系数”的增加，产品价格与制造商利润呈现上升趋势，而零售企业应观察区块链的单位上链成本的变动，并通过动态调整产品定价策略来优化利润。

命题 4.8 在模型 B 中，(1)当 $k_2 < k < k_3$ 时，有 $\frac{\partial w_d^{B*}}{\partial c_b} = \frac{\partial w_r^{B*}}{\partial c_b} < \frac{\partial p_d^{B*}}{\partial c_b} = \frac{\partial p_r^{B*}}{\partial c_b} < 0$ ，当 $k \geq k_3$ 时，有 $\frac{\partial p_r^{B*}}{\partial c_b} = \frac{\partial p_d^{B*}}{\partial c_b} \geq 0$ 和 $\frac{\partial w_d^{B*}}{\partial c_b} = \frac{\partial w_r^{B*}}{\partial c_b} < 0$ ；(2) $\frac{\partial e^{B*}}{\partial c_b} < 0$ ， $\frac{\partial \pi_m^{B*}}{\partial c_b} < 0$ ， $\frac{\partial \pi_r^{B*}}{\partial c_b} < 0$ 和 $\frac{\partial \pi_d^{B*}}{\partial c_b} < 0$ 。

命题 4.8 表明，当碳减排成本系数适中或较低时（ $k_2 < k < k_3$ ），制造商主动进行减少碳排放的投资意愿较强，产品需求也越高，此时，随着区块链的单位上链成本的增加，制造商会适当降低其在减少碳排放方面的投资，但产品的低碳水平整体仍处于较高水平，此时，其和零售企业均会降低产品的价格以刺激低碳产品的市场需求，进而实现薄利多销；但增加的产品销量所获得的收益仍低于产品边际利润降低造成损失，制造商、零售商和平台利润均降低。当碳减排成本系数较高时（ $k \geq k_3$ ），制造商减排意愿较低，产品低碳水平偏低，此时，随着区块链的单位上链成本的提高，制造商会降低其在减少碳排放方面的投资，产品需求降低；为刺激产品的市场需求，其会降低产品的批发价格；产品边际收益和需求的降低会使制造商盈利能力也随之下落。相应的，零售商和平台为向消费者转移部分区块链的单位上链成本，会提高产品的销售价格，但增加的产品边际收益仍难以弥补区块链成本增加和需求较少而导致的利润损失，平台和零售商的利润也随之减少。

4.4 数值仿真

本节通过数值仿真，首先在相同和不同区块链上链成本两种情形下，分别验证区块链上链成本变动对双渠道供应链决策以及利润的影响，接着验证消费者低碳偏好以及零售商消费者比例对供应链成员决策的影响。参考文献[35]，结合《中国可持续消费报告》中消费者低碳消费认知的数据，设定 H 型和 L 型消费者的低碳偏好分别为 $b_H = 10$ 和 $b_L = 4$ ，市场中两种消费者出现概率均为 $m = 0.5$ 。依据文献[7]，收集某电脑品牌公司 2022 年度财务报表以及第三方区块链平台公布的碳排放数据，获得相关参数并处理，得到其余相关参数赋值： $A = 200$ ， $k_H = 250$ ， $k_L = 90$ ， $m = 0.5$ ， $n = 0.5$ ， $\rho = 0.6$ ， $g = 0.5$ 和 $b = 6.8$ 。

4.4.1 区块链的单位上链成本对均衡解的影响

(1) 当 $c_{mb} = c_{rb} = c_b$ 情形

由结论 3.8 可知，区块链的单位上链成本对模型均衡解的影响与制造商减排成本系数相关，因此，分别针对制造商减排成本系数较高和较低两种情况进行仿真，以分析区块链的单位上链成本对制造商的减排努力程度以及产品批发价格和销售价格影响，结果如图 4-2 和图 4-3 所示。

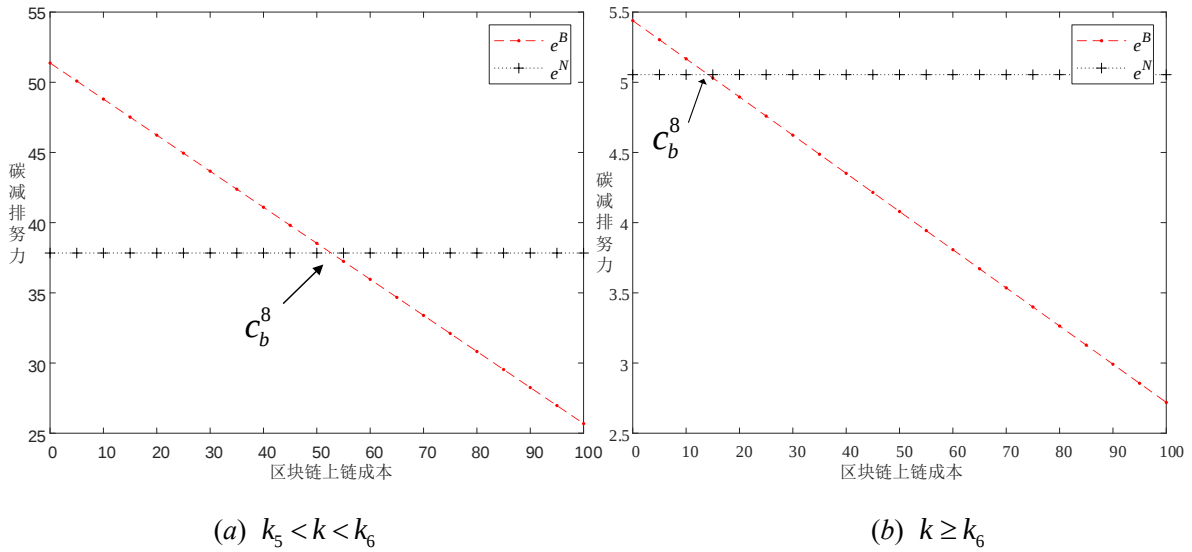


图 4-2 区块链的单位上链成本对碳减排努力的影响

由图 4-2 可知，当供应链采用区块链技术时，随着平台单位上链成本的增加，制造商的碳减排努力程度均降低，且该结果不受制造商减排成本系数的影响。比较图 4-2(a)和 2(b)可知，随着制造商减排成本系数的增加，区块链成本阈值 c_b^8 随之减少。当单位上链成本低于阈值 c_b^8 时，区块链技术的应用能激励制造商提高碳减排努力程度；当单位上链成本较高时，即 $c_b > c_b^8$ ，区块链技术的应用会抑制制造商碳减排努力。

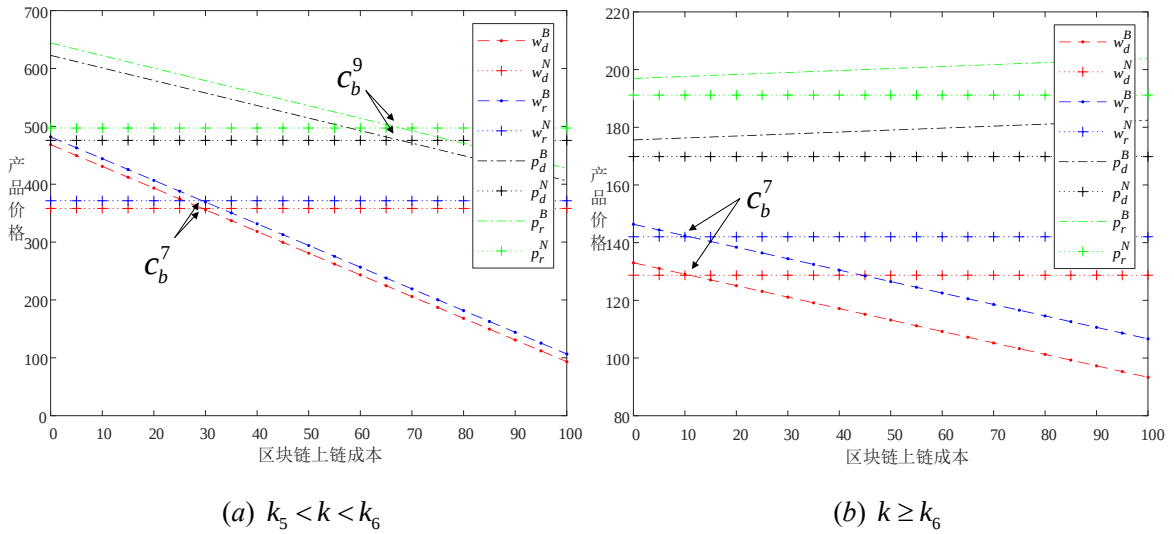


图 4-3 区块链的单位上链成本对产品价格的影响

由图 4-3(a)可知，当供应链采用区块链技术时，若碳减排难度较低（即碳减排成本系数较低，满足 $k_5 < k < k_6$ ），制造商给予平台和零售商的批发价格和产品的销售价格均随着区块链的单位上链成本的增加而降低；当区块链的单位上链成本较低（ $c_b < c_b^7$ ）时，采用区块链技术会增加产品的批发价格和零售价格；当区块链的单位上链成本适中（ $c_b^7 \leq c_b < c_b^9$ ）时，采用区块链技术后，制造商给予零售商和平台的批发价格将会降低，产品的销售价格则会增加；而当区块链的单位上链成本较高（ $c_b \geq c_b^9$ ）时，区块链技术的应用不仅会降低制造商给予平台和零售商的批发价格，产品的销售价格也随之降低，此行为对消费者是有利的。

由图 4-3(b)可知，当制造商的碳减排难度较大（即 $k \geq k_6$ ）时，制造商的碳

减排成本大幅增加，碳减排努力程度也随之大幅降低，制造商给予零售商和平台的批发价格以及产品的销售价格也大幅度降低；此时，随着区块链的单位上链成本的提高，产品批发价格虽会小范围内降低，但平台和零售商为转移区块链的应用成本，仍会小幅度提高产品的销售价格。虽然平台的消费者占比偏低，但由于当前环境下消费者互联网消费意识增强，制造商对平台更为友好，使得平台的产品销售价格低于零售商渠道，且不受制造商减排成本系数影响。

区块链的单位上链成本对制造商、平台和零售商利润的影响如图4-4所示。

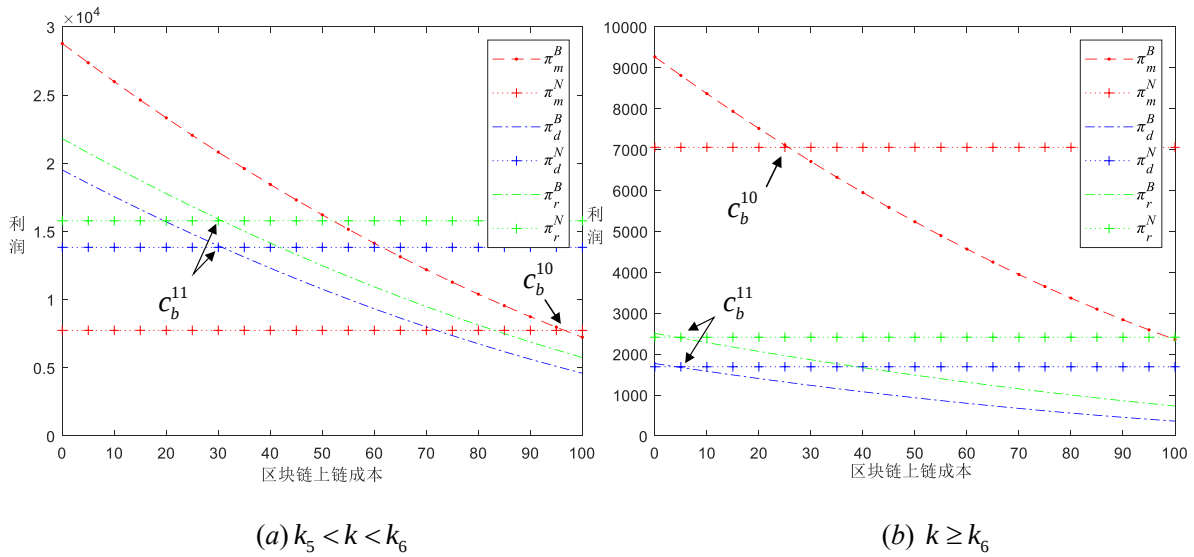


图 4-4 区块链的单位上链成本对制造商、平台和零售商利润的影响

图4-4表明，采用区块链技术进行信息共享时，随着区块链的单位上链成本的增加，制造商、平台和零售的利润均随之降低；当区块链的单位上链成本较低时（ $c_b < c_b^{11}$ ）时，采用区块链技术能够同时提高制造商、平台和零售商的利润，即对供应链成员均有利，应用区块链技术是供应链成员的均衡策略。当区块链的单位上链成本适中时（ $c_b^{11} \leq c_b < c_b^{10}$ ），区块链技术的应用仍能提高制造商的利润，但却不利于平台和零售商，此时，供应链成员在区块链技术应用与否上无法达成一致；当区块链的单位上链成本较高时（ $c_b > c_b^{10}$ ），区块链技术的应用对制造商、平台和零售商均不利，不应用区块链技术是供应链成员的均衡策略；以上结果与制造商的碳减排成本系数的高低无关。

(2) 当 $c_{mb} \neq c_{rb}$ 情形

本节运用数值仿真对区块链的单位上链成本更为一般的情形进行讨论，即 $c_{mb} \neq c_{rb}$ 情形。为了验证模型 B 中不同主体区块链的单位上链成本对各个均衡解的影响，将参数 c_{mb} 和 c_{rb} 在区间 $[10,50]$ 进行多组取值，其它参数不变，分析结果如表 4-4 所示。小括号内数字按顺序分别表示模型 B 下的产品的零售商和平台渠道的批发价格、产品的碳减排努力以及零售商和平台渠道的销售价格。

表 4-4 模型 B 中 c_{mb} 和 c_{rb} 对均衡解的影响

$c_{rb} \backslash c_{mb}$	10	25	50
10	(418.8,406.3,38.3,547.6, 527.4)	(407.5,395.0,35.8,528.8,508.7)	(388.8,376.3,31.7,497.6,477.4)
25	(392.5,380.0,35.8,528.8,508.7)	(381.3,368.8,33.3,510.1,489.9)	(362.5,350.0,29.2,478.8,458.7)
50	(348.8,336.3,31.7,497.6,477.4)	(337.5,325.0,29.2,478.8,458.7)	(318.8,306.3,25.0,447.6,427.4)

由表 4-4 可知，当制造商和零售商采用区块链承担不同单位运营成本时，随着其区块链的单位上链成本的增加，零售商和平台渠道的批发价格和销售价格以及制造商的碳减排努力均降低，这与制造商和零售商承担相同上链成本情形时一致。除此以外，制造商区块链的单位上链成本增加对产品批发价格的影响要小于零售商和平台的区块链的单位上链成本的影响，而三个成员的区块链的单位上链成本对制造商的碳减排投资努力程度和产品的销售价格变动影响相同。

4.4.2 消费者低碳偏好影响分析

本节将借助数值仿真，研究消费者不同的低碳偏好和“碳减排信任消费”系数对双渠道供应链成员利润的影响，将参数 m , b_H , b_L , b 和 g 分别在区间 $[0.4,0.6]$, $[6.2,6.6]$, $[3.2,3.6]$, $[4.5,4.9]$ 和 $[0.8,1.2]$ 中进行多组取值，设定 $c_{mb}=c_{rb}=20$ ，其它参数不变，分析结果如表 4-5 所示。在表 4-5 中，小括号内的数值按顺序分别表示在模型 N 和模型 B 下各个成员的利润。

表 4-5 两个模型下供应链成员的利润

(m, b_H, b_L, b, g)	π_m	π_r	π_d
(0.6,6.2,3.4,4.5,1.0)	(18345.5,14340.9)	(5934.5,5671.6)	(4808.5,4572.2)
(0.6,6.4,3.4,4.7,1.0)	(19311.8,17776.7)	(6545.0,7791.3)	(5359.5,6492.5)
(0.6,6.6,3.4,4.9,1.0)	(20412.3,20415.0)	(7276.6,10167.0)	(6023.4,8674.9)
(0.6,6.4,3.2,4.7,1.0)	(18654.2,17776.7)	(6126.3,7791.3)	(4981.3,6492.5)
(0.6,6.4,3.6,4.7,1.0)	(20028.9,17776.7)	(7017.3,7791.3)	(5787.7,6492.5)
(0.6,6.4,3.4,4.7,0.8)	(19311.8,15805.9)	(6545.0,6222.6)	(5359.5,5068.2)
(0.6,6.4,3.4,4.7,1.2)	(19311.8,17776.7)	(6545.0,7791.3)	(5359.5,6492.5)
(0.5,6.4,3.4,4.7,1.0)	(17100.0,17776.7)	(5191.8,7791.3)	(4142.4,6492.5)
(0.4,6.4,3.4,4.7,1.0)	(16495.4,17776.7)	(4849.1,7791.3)	(3837.0,6492.5)

表 4-5 表明，在模型 N 中，参数 m, b_H, b_L 与制造商、零售商和平台等成员利润均呈正相关关系，并且与制造商相比，平台利润和零售商利润对这三个参数变动更为敏感。模型 B 中，随着参数 b 和 g 的增加，制造商零售商和平台三方利润均随之增加，并且消费者数量较少的平台利润对于参数 b 和 g 变动最为敏感，而消费者数量较多的零售商利润对于参数 b 和 g 变动较为敏感，制造商利润对参数 b 和 g 变动最不敏感。相较于不采用区块链技术情形（模型 N ），采用区块链技术情形下供应链各成员的利润对消费者低碳偏好的敏感性更高。

4.4.3 零售商消费者比例对供应链决策的影响

随着零售商销售渠道上消费者比例 ρ 的变化，两个模型下供应链成员决策和利润如图 4-5 和图 4-6 所示，其中， $c_{mb}=c_{rb}=50$ 和 $k=90$ ，其他因素不变。

由图 4-5 和图 4-6 可知，无论是否采用区块链技术，随着零售商渠道上消费者比例的增加，零售商（平台）的产品批发价格、销售价格以及利润都随之上升（下降），并且当零售商销售渠道上消费者比例高于平台时（ $\rho > 0.5$ ），其产品价格及利润也高于平台。另外，随着零售商销售渠道上消费者比例的增加，无论是否采用区块链技术，制造商的利润均先降低后增加，并且当消费者对于平台和零售商的偏好一样时，市场竞争最为激烈，制造商的利润最低。

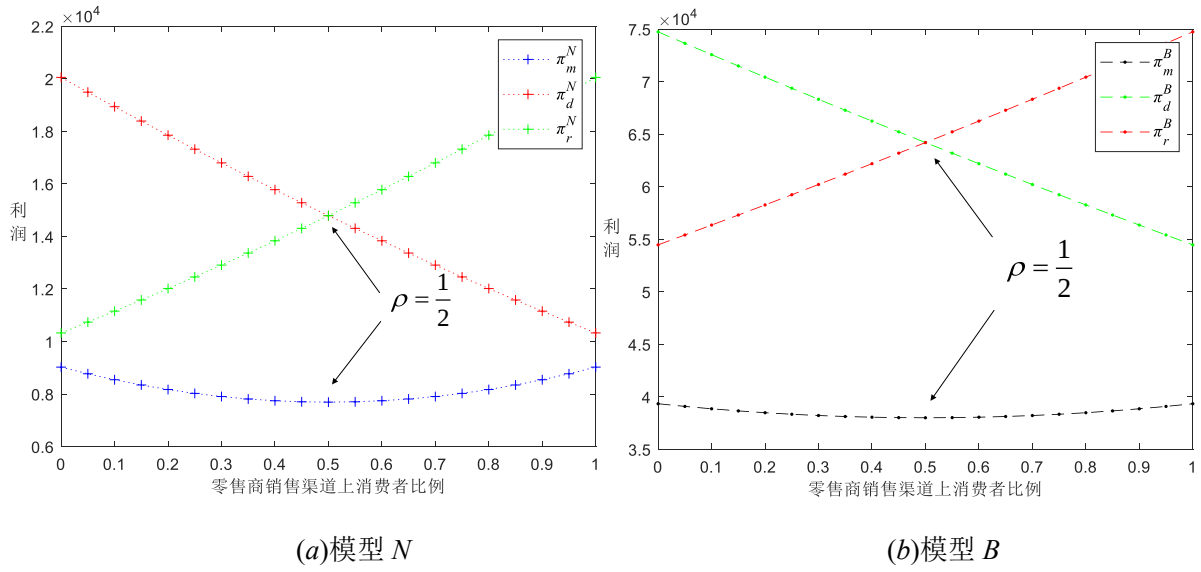


图 4-5 零售商销售渠道上消费者比例对产品价格的影响

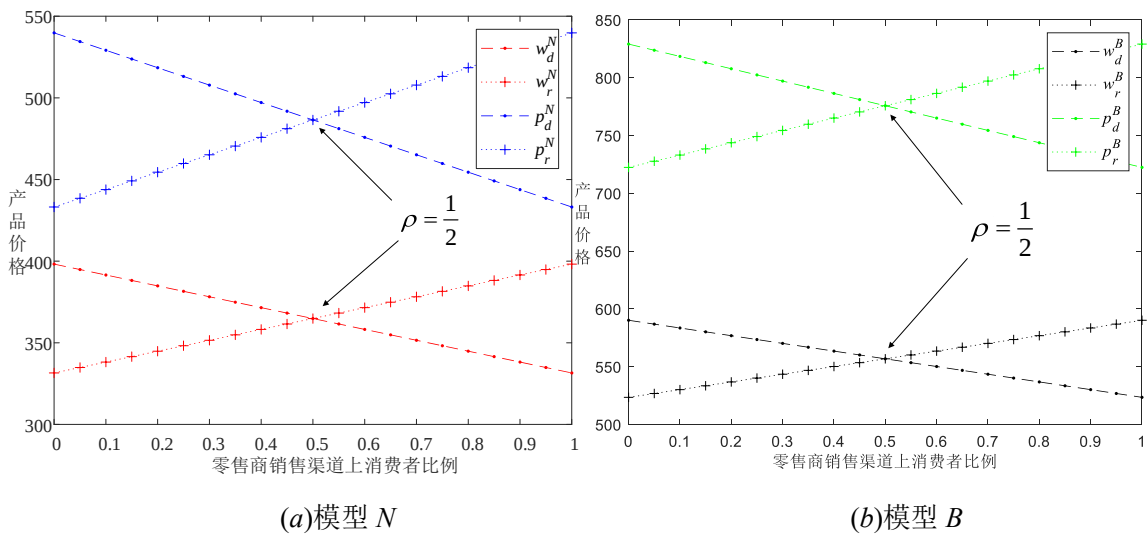


图 4-6 零售商销售渠道上消费者比例对利润的影响

4.5 本章小结

本章在考虑区块链的单位上链成本、不同销售渠道竞争和消费者低碳偏好的基础上，构建了有无区块链技术应用的双渠道供应链定价和减排决策模型，研究区块链技术应用、区块链的单位上链成本、消费者在不同渠道分布等因素对产品定价、减排决策及供应链成员利润的影响。主要结论如下：

供应链成员的区块链引入决策与区块链技术的单位上链成本大小直接相关。

当其处于较低水平时，区块链技术可提升产品低碳水平并推高批发价、销售价，实现供应链整体盈利增长，此时，若成本适中会引发成员间策略冲突而导致无法达到均衡，当区块链的单位上链成本较高时，不采用区块链技术是供应链成员的均衡策略。单位上链成本与供应链成员的碳减排投入、批发定价及利润均呈负相关。其对产品销售价格的影响与制造商碳减排成本系数相关，当碳减排成本系数低于阈值时，较高的上链成本会抑制平台与零售商的销售价格，反之则推动价格上涨；当碳减排成本系数高于阈值时，区块链技术的应用增加产品的价格。产品的批发价格、销售价格以及供应链成员的利润均与消费者在不同销售渠道上的分布和“碳减排信任消费”系数密切相关。随着零售商（平台）渠道上消费者比例的增加，零售商（平台）利润以及产品的批发价格和销售价格随之提高，制造商的利润随之先降低后增加，此结果不受区块链技术应用与否的影响。随着“碳减排信任消费”系数的增加，产品的批发价格、销售价格以及制造商利润均增加；当区块链的单位上链成本较低或者特定渠道消费者基数较小时，平台和零售商的利润也随之增加将获得额外的利益。

第 5 章 总结与展望

5.1 总结

本文基于不同的区块链应用模式，分别构建仅制造商采用区块链技术的双渠道供应链决策模型和双渠道供应链成员协同应用区块链技术的供应链模型，分析区块链技术对最优定价、碳减排决策以及企业利润的影响，探讨了企业的最佳区块链应用策略。主要工作和研究结论如下：

（1）仅制造商采用区块链技术的双渠道供应链定价和碳减排决策研究表明：只有在区块链技术的固定成本或单位运营成本低于其应用所设定的阈值时，制造商才会倾向于考虑采纳此项技术。特别地，当固定成本与单位运营成本均处于较低水平，且固定成本与单位运营成本之间的比值低于（或高于）某一特定阈值时，制造商更偏好于选择固定成本（或单位运营成本）的收费模式。区块链平台的利润始终呈现出随单位运营成本的增加而减少的趋势。当单位服务成本低于（或高于）某一临界值时，固定成本（或单位运营成本）模式在盈利方面展现出更为显著的优势。在固定成本模式下，制造商的利润与区块链的费用呈负相关关系，然而其碳减排水平、批发价格以及直销价格均能够持续提升，并且这种提升趋势不受费用波动的影响。相比之下，在单位运营成本模式下，制造商在碳减排方面的投入以及供应链各方的利润均与费用呈负相关关系。当碳减排的成本系数较低时，各渠道的价格随费用的增加而上升；反之，则随费用的增加而下降。而在碳减排成本系数处于中等水平时，制造商给予平台和零售商的批发价格与费用呈正相关关系，而给予平台和零售商的零售价格则与费用呈负相关关系。

（2）供应链成员对于区块链技术的引入决策，与区块链技术的单位上链成本紧密相关。当单位上链成本处于较低水平时，区块链技术能够有效提升产品的低碳属性，并进而推高产品的批发价格和销售价格，从而实现供应链整体盈利的增长。在此情境下，采用区块链技术成为供应链成员的均衡策略。然而，

当单位上链成本适中时，可能会引发供应链成员间的策略冲突，导致无法达到均衡状态。而当区块链的单位上链成本较高时，不采用区块链技术则成为供应链成员的均衡选择。单位上链成本与供应链成员的碳减排投入、批发定价以及利润均呈现出负相关关系。至于其对产品销售价格的影响，则与制造商的碳减排成本系数息息相关。当碳减排成本系数低于某一阈值时，较高的上链成本会抑制平台与零售商的销售价格；反之，则会推动价格上涨。而当碳减排成本系数高于该阈值时，区块链技术的应用将增加产品的市场价格。此外，产品的批发价格、销售价格以及供应链成员的利润，均与消费者在不同销售渠道上的分布以及“碳减排信任消费”系数密切相关。随着零售商（或平台）渠道上消费者比例的增加，零售商（或平台）的利润以及产品的批发价格和销售价格均会随之提高，而制造商的利润则会先降低后增加。这一结果并不受区块链技术是否应用的影响。同时，随着“碳减排信任消费”系数的增加，产品的批发价格、销售价格以及制造商的利润均会呈现出增加的趋势。当区块链的单位上链成本较低，或者特定渠道的消费者基数较小时，平台和零售商的利润也会随之增加，从而获得额外的利益。

5.2 展望

尽管本文对双渠道供应链中的不同区块链采用策略进行了研究，并得到一些有益的管理启示，但仍然存在一些问题尚未解决，这是未来改进和优化的方向，主要包括以下几点：

（1）本文只考虑双渠道供应链成员在单一时期的运营决策，未来的研究可以扩展为供应链的两阶段甚至多阶段决策问题。

（2）本文中，我们只考虑了消费者低碳偏好信息和制造商的碳减排信息之间的不对称性，然而在实践中影响双渠道供应链运作的不确定性因素更加复杂，不仅包括产品质量、运输时间和供应链成员的广告宣传努力等内部因素，还包括碳税和碳限额政策、国际承诺、国际局势等外部因素。未来可以考虑进一步拓展。

（3）本文只考虑了制造商进行碳减排投资的情形，而制造商、平台和零售

商联合减排供应链决策问题还可以进一步的扩展。

参考文献

- [1] 龚本刚, 唐文慧, 刘志等. 碳交易政策下区块链技术对再制造供应链定价与减排决策的影响[J]. 系统管理学报, 1-19[2025-02-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1977.N.20240415.1036.003.html>.
- [2] Cai J H, Jiang F Y. 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.
- [3] 郭金森, 周永务, 于春艳等. 资金约束下考虑制造商公平关切的双渠道供应链碳减排与融资策略[J]. 系统科学与数学, 1-22[2025-02-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2019.o1.20250125.1534.034.html>.
- [4] Ji J N, Li T, Yang L. Pricing and carbon reduction strategies for vertically differentiated firms under Cap-and-Trade regulation[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2023, 171, 103064.
- [5] 杨洁, 曾子豪, 吴林炜等. 限制交流结构下供应链碳减排策略的非合作-合作两型博弈研究[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(10): 2928-2940.
- [6] Wang J, Hou P W, Peng S X, et al. Contracting and advertising for e-commerce platforms with private-effectiveness information[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2024, 192, 103808.
- [7] 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.
- [8] Pournader M, Shi Y, Seuring S, et al. Blockchain applications in supply chains, transport and logistics: a systematic review of the literature[J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(7): 2063-2081.
- [9] Gong B G, Zhang H M, Gao Y L, et al. Blockchain adoption and channel selection strategies in a competitive remanufacturing supply chainp[J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 175, 108829.
- [10] Li J X, Liu X, Shao X P. Collaborative carbon emission reduction in power supply and

- demand entities based on blockchain technology[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2024, 157, 109840.
- [11] Kang Y W, Dong P W, Ju Y B, et al. Differential game theoretic analysis of the blockchain technology investment and carbon reduction strategy in digital supply chain with government intervention[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, 189, 109953.
- [12] Toufaily E, Zalan T, Dhaou S B. A framework of blockchain technology adoption: An investigation of challenges and expected value[J]. *Information & Management*, 2021, 58(3): 103444.
- [13] SCHMIDT C G, WAGNER S M. Blockchain and supply chain relations: A transaction cost theory perspective[J]. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 2019, 25(4), 100552.
- [14] Yang L, Ji J, Wang M Z, et al. The manufacturer's joint decisions of channel selections and carbon emission reductions under the cap-and-trade regulation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 193: 506-523.
- [15] Qiu J, Xu X, Yang Y X. Carbon emission reduction and channel development strategies under government subsidy and retailers' fairness concerns[J]. *Electronic Commerce Research and Applications*, 2024, 68, 101447.
- [16] 张川, 田雨鑫, 崔梦雨. 电动汽车动力电池制造商混合渠道回收模式选择与碳减排决策[J]. *中国管理科学*, 2024, 32(06): 184-195.
- [17] Xu, W B, Xu H Z. Channel encroachment and carbon reduction with demand information asymmetry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 171: 133443.
- [18] Ji J N, Zhang Z Y, Yang L. Carbon emission reduction decisions in the retail-/dual-channel supply chain with consumers' preference[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 141: 852-867.
- [19] Huang Y X, He P F, Cheng T, et al. Optimal strategies for carbon emissions policies in competitive closed-loop supply chains: A comparative analysis of carbon tax and cap-and-trade policies[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, 195, 110423.
- [20] Ganguly S, Das, P, Maiti M. A game theoretic model for dual supply chains with green

- and non-green products and bi-directional free-riding and carbon policy[J]. Supply Chain Analytics, 2025, 9, 100103.
- [21] 杨磊, 张琴, 张智勇. 碳交易机制下供应链渠道选择与减排策略[J]. 管理科学学报, 2017, 20(11): 75-87.
- [22] Gao Y, Lu S J, Cheng H, et al. Data-driven robust optimization of dual-channel closed-loop supply chain network design considering uncertain demand and carbon cap-and-trade policy[J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 187, 109811.
- [23] Qiu B Z, Li C X, Sun M H. Impacts of consumer virtual showrooming behavior on manufacturer and retailer strategic decisions in a dual-channel supply chain[J]. European Journal of Operational Research, 2024, 313(1): 325-342.
- [24] He R Y, Xiang Y, Lin Z B. Carbon emissions in a dual channel closed loop supply chain: the impact of consumer free riding behavior[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 134: 384-394.
- [25] Feng L P, Govindan K, Li C F. Strategic planning: Design and coordination for dual-recycling channel reverse supply chain considering consumer behavior[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 260(2): 601-612.
- [26] Hu X Q, Cai J H, Yue X H. Power structure preferences in a dual-channel supply chain: Demand information symmetry vs. asymmetry[J]. European Journal of Operational Research, 2024, 314(3): 920-934.
- [27] Li X F, Li B, Xing R X. Technology licensing contract design considering royalty transparency and demand information asymmetry with downstream co-opetition[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 238: 122183.
- [28] 夏良杰, 顾梦贤, 李友东, 等. 不同权力结构下考虑持股的需求信息不对称供应链定价研究[J]. 中国管理科学, 1-16. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0709>.
- [29] 胡晓青, 蔡建湖, 孙海宁, 等. 需求信息不对称背景下双渠道供应链信息甄别模型[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(01): 379-395.
- [30] Ma M M, Meng W D, Huang B, et al. The influence of dual credit policy on new energy vehicle technology innovation under demand forecast information asymmetry[J].

- Energy, 2023, 271: 127106.
- [31] Huang H, Wu D D, Xu H Y. Signaling or not? The pricing strategy under fairness concerns and cost information asymmetry[J]. European Journal of Operational Research, 2025, 321(3): 789-799.
- [32] Bessier W, Gonenc H, Tinoco M H. Information asymmetry, agency costs, and payout policies: An international analysis of IFRS adoption and the global financial crisis[J]. Economic Systems, 2023, 47(4): 101129.
- [33] Wang Q P, Su Y L. Emission-reduction contract with cost information asymmetry for emission reduction service providers: Loose or tight[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 434, 139899.
- [34] 赵京彪, 曲朋朋, 周岩. 考虑成本信息不对称的闭环供应链网络均衡[J]. 系统工程学报, 2022, 37(06): 749-765.
- [35] 李剑, 易兰, 肖瑶. 信息不对称下基于区块链驱动的供应链减排信息共享机制研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(10): 131-139.
- [36] 胡强, 谢家平, 张广思, 等. 政府激励科创平台协同创新的契约设计——基于双重信息不对称视角[J]. 中国管理科学, 1-20. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2024.0917>.
- [37] Al-Hiyari A, Kolsi M C, Lutfi A, et al. Information asymmetry and dividend payout in an emerging market: Does corporate governance quality matter?[J]. Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 2024, 10(1), 100188.
- [38] Cao C J, He Y F, Liu Y, et al. Blockchain technology adoption mechanism for semiconductor chip supply chains considering information disclosure under cost-sharing contract[J]. International Journal of Production Economics, 2025, 282, 109496.
- [39] Chen Y, Feng Y T, Lai K, et al. Value of blockchain for scope 3 carbon disclosure: The moderating role of data processing technologies[J]. International Journal of Production Economics, 2025, 279, 109445.
- [40] Huang J T, Xu B, Yan X B. Selling mode choice and blockchain adoption in an e-commerce platform with information disclosure[J]. Electronic Commerce Research and Applications, 2023, 62, 101331.

- [41] Zhou Y, Yan S Q, Li G D, et al. The impact of consumer skepticism on blockchain-enabled sustainability disclosure in a supply chain[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023, 179, 103323.
- [42] 王亚静, 李健, 朱士超, 等. 电商超长预售下基于区块链的信息披露博弈分析[J]. *运筹与管理*, 2023, 32(11): 48-55.
- [43] Zhou Z B, Liu X F, Zhang F M, et al. Improving the reliability of the information disclosure in supply chain based on blockchain technology[J]. *Electronic Commerce Research and Applications*, 2022, 52, 101121.
- [44] Zhang C, Zhu Y, Ren X J. Quality decision and demand information sharing: The role of blockchain adoption[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, 189, 10991.
- [45] Li Z W, Xu X H, Bai Q G, et al. Implications of information sharing on blockchain adoption in reducing carbon emissions: A mean–variance analysis[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023, 178, 103254.
- [46] Wu J H, Yu J H, Wang X. Platform information sharing and selling contract strategies with blockchain adoption[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 183, 109506.
- [47] Zhang G P, Yang Z G, Liu W Y. Blockchain-based decentralized supply chain system with secure information sharing[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 182, 109392.
- [48] Hajian A, Prybutok V, Chang C. An empirical study for blockchain-based information sharing systems in electronic health records: A mediation perspective[J]. *Computers in Human Behavior*, 2023, 138, 107471.
- [49] 苏秦, 张文博. 供应链质量信息共享与区块链授权策略[J]. *中国管理科学*, 2024, 32(03): 324-334.
- [50] 刘建明, 颜学明. 基于专利计量的区块链技术发展现状及关键技术分析[J]. *科技管理研究*, 2021, 41(16): 37-44.
- [51] 赵连霞, 程明宝. 基于制造商销售渠道选择的供应链定价策略研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(9): 2310-2319.
- [52] García-Valls M, Chirivella-Ciruelos A. VelogCPS: A safe blockchain network for cyber–physical systems leveraging block verifiers[J]. *Journal of Systems Architecture*,

2024, 153, 103177.

- [53] 伏树林, 冯勇. 结合区块链的电信运营商数据安全共享方案[J]. 小型微型计算机系统, 2025, 46(02): 430-442.
- [54] Liu X F, Zhou Z B, Zhong F M, et al. Resolving the information reliability issue in live streaming through blockchain adoption[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2024, 189, 103652.
- [55] Niranjanamurthy M, Nithya B N, Jagannatha S. Analysis of Blockchain technology: pros, cons and SWOT[J]. *Cluster Computing*, 2019, 22: 14743-14757.
- [56] Biswas D, Jalali H, Ansari poor A H, et al. Traceability vs. sustainability in supply chains: The implications of blockchain[J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 305(1): 128-147.
- [57] Huang S, Xu J W, Wang Y. Quality disclosure in a dual-channel supply chain with an online dual-purpose platform[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2025, 193, 103834.
- [58] Yavari M, Mihankha S, Jozani S M. Assessing cap-and-trade regulation's impact on dual-channel green supply chains under disruption[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 478, 143836.
- [57] 刘长义, 朱时范, 龚本刚, 等. 基于区块链的再制造供应链定价决策与智能合约[J]. 系统工程学报, 2024, 39(06) :868-884.
- [58] Yang L, Gao M, Feng L. Competition versus cooperation? Which is better in a remanufacturing supply chain considering blockchain[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, 165, 102855.
- [59] 闫旭. 非对称信息下双渠道供应链的定价决策分析[J]. 商场现代化, 2014, (27): 34-36.
- [60] 梁喜, 肖金凤. 基于区块链技术应用的双渠道供应链定价决策研究——考虑消费者对产品真假敏感的分析[J]. 价格理论与实践, 2021, (06): 145-167.
- [61] 刘瑞环, 赵程伟, 谭春桥. 区块链平台不同收费情形下疫苗供应链博弈模型及协调策略[J]. 中国管理科学, 1-17. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0631>.

- [62] Shekarian E, Ahmadreza M, Jukka M. Dual-channel remanufacturing closed-loop supply chains under carbon footprint and collection competition[J]. Sustainable Production and Consumption, 2021, 28: 1050-1075.
- [63] Gao Y, Lu S J, Cheng H, et al. Data-driven robust optimization of dual-channel closed-loop supply chain network design considering uncertain demand and carbon cap-and-trade policy[J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 187, 109811.
- [64] Maradyana R, Mahata G C. Impacts of dual carbon emission reduction technology and technology spillovers of deterioration reduction on supply chain system's performances considering government incentives and contract design[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 468(25), 142977.
- [65] Wang Y Y, Wang P, Wang J C, et al. Pricing and blockchain adoption for competitive sellers on an e-commerce platform with different contracts [J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 194, 110352.
- [66] 龚本刚, 汤家骏, 程晋石, 等. 产能约束下考虑消费者偏好的双渠道供应链决策与协调[J]. 中国管理科学, 2019, 27(04): 79-90.
- [67] JIANG Y M, MENG Q C, GUO Y, et al. Strategic disclosure of carrier's carbon emission reduction information by competitive shippers in marine supply chains[J]. Ocean & Coastal Management, 2024, 253, 107165.
- [68] LI Z W, XU X H, BAI Q G, et al. Implications of information sharing on blockchain adoption in reducing carbon emissions: A mean–variance analysis[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2023, 178, 103254.
- [69] 梁喜, 肖金凤. 基于区块链和消费者敏感的双渠道供应链定价与渠道选择[J]. 中国管理科学, 2023, 31(05): 29-38.
- [70] AHMED W A, MACCARTHY B L. Blockchain-enabled supply chain traceability—How wide? How deep?[J]. International Journal of Production Economics, 2023, 263: 108963.

附录

附录 1 证明模型 O 的最优结果

将 O 策略下平台和零售商的需求函数(3-1)和(3-2)分别带入(3-5)式和(3-6)式中，对产品销售价格进行二阶求导，可以得到二阶 *hessian* 矩阵：

$H_p = \begin{pmatrix} -2 & n \\ n & -2 \end{pmatrix}$ ，由于 $H_{p1} = -2 < 0$ ， $H_{p2} = 4 - n^2 > 0$ ，所以 π_r^O 是关于 p_r^O 的严格

凹函数，零售商的销售价格存在最优解。联立一阶导数 $\frac{\partial \pi_r^O}{\partial p_r^O} = 0$ 和 $\frac{\partial \pi_d^O}{\partial p_d^O} = 0$ 两式

得到反应函数，再将反应函数带入(5)中得到制造商的利润函数，分别求其关于 e^O 、 w^O 和 p_d^O 的二阶偏导数，可以得到关于制造商利润的 *hessian* 矩阵：

$$H_O = \begin{pmatrix} -\frac{2(2-n^2)}{4-n^2} & \frac{2n}{4-n^2} & \frac{b\eta}{2-n} \\ \frac{2n}{4-n^2} & -\frac{2(2-n^2)}{4-n^2} & \frac{b\eta}{2-n} \\ \frac{b\eta}{2-n} & \frac{b\eta}{2-n} & -k \end{pmatrix}, \quad \text{因 } H_{O1} < 0, \quad H_{O2} > 0,$$

$H_{O3} = -\frac{4(1+n)(k\gamma - b^2\eta^2)}{(2-n)^2(2+n)}$ 。当 $k > \frac{b^2\eta^2}{\gamma}$ 时， $H_{O3} < 0$ ，*hessian* 矩阵负定，因而，

制造商的利润函数是关于 e^O 、 w^O 和 p_d^O 的凹函数，最优解存在。对制造商的利润函数中 e^O 、 w^O 和 p_d^O 求一阶导并联立求解得到制造商最优减排努力，给平台和

零售商的最优批发价格： $e^{O*} = \frac{Ab\eta}{2k(2-n)(1-n) - 2b^2\eta^2}$ ；

$$w_r^{O*} = \frac{A(b^2\eta^2(1-2\theta) + 2k(2-n)(n(1-\rho) + \rho))}{4(1+n)(k(1-n)(2-n) - b^2\eta^2)};$$

$$w_d^{O*} = \frac{A(2k(2-n)(1-(1-n)\rho) - b^2\eta^2(1-2\rho))}{4(1+n)(k(2-n)(1-n) - b^2\eta^2)}。$$

接着将 e^{O*} 、 w_r^{O*} 和 w_d^{O*} 带入回带求解可得到平台和零售商的最优销售价格，
制造商、平台和零售商的最优利润：

$$p_r^{O*} = \frac{A(b^2(3+2n)\eta^2(1-2\rho) + 2k(6\rho + n(5-2n^2 - (1+n)(5-2n)\rho)))}{4(1+n)(2+n)(k(1-n)(2-n) - b^2\eta^2)},$$

$$p_r^{O*} = \frac{A(2k(6-6\rho + n(5\rho - n(3-(3-2n)\rho))) - b^2(3+2n)\eta^2(1-2\rho))}{4(1+n)(2+n)(k(1-n)(2-n) - b^2\eta^2)},$$

$$\pi_m^{O*} = \frac{A^2(2k(2+n^2 - 2(1-n)(2-n)\rho + 2(1-n)(2-n)\rho^2) - b^2\eta^2(1-2\rho)^2)}{8(1+n)(2+n)(k(1-n)(2-n) - b^2\eta^2)},$$

$$\pi_r^{O*} = \frac{A^2(b^2\eta^2(1-2\rho) + 2k(1-n)(n(1-\theta) + 2\rho))^2}{16(2+n)^2(k(1-n)(2-n) - b^2\eta^2)^2} \quad \text{和}$$

$$\pi_d^{O*} = \frac{A^2(b^2\eta^2(1-2\rho) - 2k(1-n)(2-(2-n)\rho))^2}{16(2+n)^2(k(1-n)(2-n) - b^2\eta^2)^2}。$$

模型 F 、模型 S 和模型 N 以及模型 B 的最优决策和利润证明过程与模型 O 类似。

附录 2 证明命题 3.1

通过分别比较模型 O ，模型 F 和模型 S 中制造商的最优碳减排努力，我们可以得到以下结果。

首先，比较模型 O 和模型 F 的最优碳减排努力：

$$e^{F*} - e^{O*} = \frac{(1-\eta)(k\gamma + b^2\eta)}{(k\gamma - b^2)(k\gamma - b^2\eta^2)} > 0, \text{ 所以恒有 } e^{F*} > e^{O*}。$$

接下来比较模型 O 和模型 S 的最优碳减排努力：

$$e^{S*} - e^{O*} = \frac{b(A - 2(1-n)c_b)}{2(k\gamma - b^2)} - \frac{Ab\eta}{2(k\gamma - b^2\eta^2)}, \text{ 令其为 } 0, \text{ 可得：区块链单位成本阈}$$

$$\text{值 } c_b^2 = \frac{A(1-\eta)(k\gamma + b^2\eta)}{2(1-n)(k\gamma - b^2\eta^2)}, \text{ 当 } 0 < c_b < c_b^2 \text{ 时，有 } e^{S*} > e^{O*}, \text{ 当 } c_b^2 \leq c_b < c_b^1 \text{ 时，有}$$

$$e^{O*} \geq e^{S*}。$$

最后，比较模型 F 和模型 S 的最优碳减排努力： $e^{F*} - e^{S*} = \frac{b(1-n)c_b}{k\gamma - b^2} > 0$ ，

所以恒有 $e^{F*} > e^{S*}$ 。

综上所述，制造商的碳减排努力满足：(1) $e^{F*} > e^{O*}$ ， $e^{F*} > e^{S*}$ ；(2) 当 $0 < c_b < c_b^2$ 时，有 $e^{S*} > e^{O*}$ ，当 $c_b^2 \leq c_b < c_b^1$ 时，有 $e^{O*} \geq e^{S*}$ 。

附录 3 证明命题 3.2

通过分别比较模型 O ，模型 F 和模型 S 中制造商的最优批发价格，我们可以得到以下结果：

首先，比较模型 O 和模型 F 制造商给零售商的优批发价格：

$$w_r^{F*} - w_r^{O*} = \frac{Ab^2k(2-n)(1-\eta^2)}{4(k\gamma - b^2)(k\gamma - b^2\eta^2)} > 0，\text{ 所以恒有 } w_r^{F*} > w_r^{O*}。$$

接下来比较模型 O 和模型 S 制造商给零售商的优批发价格：

$$w_r^{F*} - w_r^{O*} = \frac{Ab^2k(2-n)(1-\eta^2) + 2(k\gamma - 2b^2)(k\gamma - b^2\eta^2)c_b}{4(k\gamma - b^2)(k\gamma - b^2\eta^2)} > 0，\text{ 当 } k_2 < k \leq k_3 \text{ 时，存}$$

在区块链阈值 c_b^3 ，当 $0 < c_b \leq c_b^3$ 时，有 $w_r^{S*} \geq w_r^{O*}$ 。当 $k > k_3$ 时，恒有 $w_r^{S*} > w_r^{O*}$ 。

最后，比较模型 F 和模型 S 制造商给零售商的优批发价格：

$$w_r^{F*} - w_r^{O*} = \frac{(k\gamma - 2b^2)c_b}{2(b^2 - k\gamma)}，\text{ 当 } k_2 < k \leq k_3 \text{ 时，有 } \frac{(k\gamma - 2b^2)c_b}{2(b^2 - k\gamma)} \geq 0，\text{ 即： } w_r^{F*} \geq w_r^{O*}；$$

当 $k > k_3$ 时，有 $\frac{(k\gamma - 2b^2)c_b}{2(b^2 - k\gamma)} < 0$ ，即： $w_r^{F*} < w_r^{O*}$ 。

同理可证得，模型 O 和模型 F 制造商给平台的最优批发价格。综上所述，制造商给零售商和平台的批发价格满足：(1)若 $k_2 < k \leq k_3$ ，当 $0 < c_b \leq c_b^3$ 时，有 $w_r^{F*} > w_r^{S*} \geq w_r^{O*}$ 和 $w_d^{F*} > w_d^{S*} \geq w_d^{O*}$ ，当 $c_b^3 < c_b < c_b^1$ 时，有 $w_r^{F*} > w_r^{O*} > w_r^{S*}$ 和 $w_d^{F*} > w_d^{O*} > w_d^{S*}$ ；(2)若 $k > k_3$ ，有 $w_r^{S*} > w_r^{F*} > w_r^{O*}$ 和 $w_d^{S*} > w_d^{F*} > w_d^{O*}$ 。

附录 4 证明命题 3.3

通过分别比较模型 O ，模型 F 和模型 S 中零售商和平台的最优零售价格，我们可以得到以下结果：

首先，比较模型 O 和模型 F 零售商最优零售价格：

$$p_r^{F*} - p_r^{O*} = \frac{Ab^2k(3-2n)(1-\eta^2)}{4(k\gamma-b^2)(k\gamma-b^2\eta^2)} > 0, \text{ 所以恒有 } p_r^{F*} > p_r^{O*}.$$

接下来比较模型 O 和模型 S 零售商最优零售价格：

$$p_r^{F*} - p_r^{O*} = \frac{Ab^2k(3-2n)(1-\eta^2) - 2(2b^2 - k(1-n))(k\gamma - b^2\eta^2)c_b}{4(k\gamma - b^2)(k\gamma - b^2\eta^2)} > 0, \text{ 当 } k_2 < k \leq k_4$$

时，存在区块链阈值 c_b^4 ，当 $0 < c_b \leq c_b^4$ 时，有 $w_r^{S*} \geq w_r^{O*}$ 。当 $k > k_4$ 时，恒有 $w_r^{S*} > w_r^{O*}$ 。

最后，比较模型 F 和模型 S 零售商最优零售价格：

$$p_r^{F*} - p_r^{O*} = \frac{(k - kn - 2b^2)c_b}{2(b^2 - k\gamma)}, \text{ 当 } k_2 < k \leq k_4 \text{ 时，有 } \frac{(k - kn - 2b^2)c_b}{2(b^2 - k\gamma)} \geq 0, \text{ 即：}$$

$$p_r^{F*} \geq p_r^{O*}; \text{ 当 } k > k_4 \text{ 时，有 } \frac{(k - kn - 2b^2)c_b}{2(b^2 - k\gamma)} < 0, \text{ 即： } p_r^{F*} < p_r^{O*}.$$

同理可证得，模型 O 和模型 F 平台的最优零售价格。综上所述，零售商和平台的零售价格满足：(1)若 $k_2 < k \leq k_3$ ，当 $0 < c_b \leq c_b^3$ 时，有 $p_r^{F*} > p_r^{S*} \geq p_r^{O*}$ 和 $p_d^{F*} > p_d^{S*} \geq p_d^{O*}$ ，当 $c_b^3 < c_b < c_b^1$ 时，有 $p_r^{F*} > p_r^{O*} > p_r^{S*}$ 和 $p_d^{F*} > p_d^{O*} > p_d^{S*}$ ；(2)若 $k > k_3$ ，有 $p_r^{S*} > p_r^{F*} > p_r^{O*}$ 和 $p_d^{S*} > p_d^{F*} > p_d^{O*}$ 。

附录 5 证明命题 3.4

通过分别比较模型 O ，模型 F 和模型 S 中制造商的最优利润，我们可以得到以下结果：

首先，我们比较模型 O 和模型 F 制造商的最优利润：

$\pi_m^{F*} - \pi_m^{O*} = \frac{1}{8}a^2k(\frac{1}{k\gamma - b^2} - \frac{1}{k\gamma - b^2\eta^2}) - F_M$, 存在区块链固定成本

$F_M^1 = \frac{a^2b^2k(1-\eta^2)}{8(k\gamma - b^2)(k\gamma - b^2\eta^2)}$, 当 $0 < F_M \leq F_M^1$ 时, 有 $\pi_m^{F*} \geq \pi_m^{O*}$, 当 $F_M > F_M^1$ 时, 有

$\pi_m^{F*} < \pi_m^{O*}$ 。

接下来, 我们比较模型 O 和模型 S 制造商的最优利润:

$\pi_m^{S*} - \pi_m^{O*} = \frac{a^2b^2k(1-\eta^2)}{8(k\gamma - b^2)(k\gamma - b^2\eta^2)} - \frac{k(1-n)c_b(a - (1-n)c_b)}{2(k\gamma - b^2)}$, 存在

$c_b^5 = \frac{a}{2(1-n)}(1 - \sqrt{\frac{k\gamma - b^2}{k\gamma - b^2\eta^2}})$, 当 $0 < c_b \leq c_b^5$ 时, 有 $\pi_m^{S*} \geq \pi_m^{O*}$, 当 $c_b > c_b^5$ 时, 有

$\pi_m^{S*} < \pi_m^{O*}$ 。

最后比较模型 F 和模型 S 制造商的最优利润:

$\pi_m^{F*} - \pi_m^{S*} = \frac{k(1-n)c_b(a - (1-n)c_b)}{2(k\gamma - b^2)} - F_M$, 存在 $F_M^2 = \frac{k(1-n)c_b(a - (1-n)c_b)}{2(k\gamma - b^2)}$, 当

$0 < F_M \leq F_M^2$ 时, 有 $\pi_m^{F*} \geq \pi_m^{S*}$; 当 $F_M > F_M^2$ 时, 有 $\pi_m^{F*} < \pi_m^{S*}$ 。

综上所述, 可得三种模型下制造商最优利润的大小关系: (1) 若 $0 < c_b < c_b^5$,

当 $0 < F_M < F_M^2$ 时, 有 $\pi_m^{F*} > \pi_m^{S*} > \pi_m^{O*}$; 当 $F_M^2 < F_M < F_M^1$ 时, 有 $\pi_m^{S*} > \pi_m^{F*} > \pi_m^{O*}$;

当 $F_M > F_M^1$ 时, 有 $\pi_m^{S*} > \pi_m^{O*} > \pi_m^{F*}$; (2) 若 $c_b \geq c_b^5$, 当 $0 < F_M \leq F_M^1$ 时, 有

$\pi_m^{F*} > \pi_m^{O*} > \pi_m^{S*}$; 当 $F_M^1 < F_M < F_M^2$ 时, 有 $\pi_m^{O*} > \pi_m^{F*} > \pi_m^{S*}$; 当 $F_M > F_M^1$ 时, 有

$\pi_m^{O*} > \pi_m^{S*} > \pi_m^{F*}$ 。

附录 6 证明命题 3.5

通过比较模型 F 和模型 S 区块链平台的利润, 我们可以得到如下关系:

将两模型区块链平台利润相减可得:

$\pi_{bp}^{F*} - \pi_{bp}^{S*} = \frac{k(1-n)c_b(A + 2(1-n)(c_s - c_b))}{2(k\gamma - b^2)} + F_M$, 存在

$F_M^3 = \frac{k(1-n)c_b(A+2(1-n)(c_b-c_s))}{2(k\gamma-b^2)}$, 当 $0 < F_M \leq F_M^3$ 时, 有 $\pi_{bp}^{F*} \leq \pi_{bp}^{S*}$; 当

$F_M > F_M^3$ 时, 有 $\pi_{bp}^{F*} > \pi_{bp}^{S*}$ 。

附录 7 证明命题 3.6

通过检验关于制造商的碳减排成本系数的一阶偏导数, 我们确定了模型 O、模型 F 和模型 S 的产品的最优批发价格、最优零售价格以及最优碳减排努力关于 k 的敏感性分析结果。

首先, 分别求解模型 O 中最优碳减排努力、最优批发价格和最优零售价格

关于 k 的一阶偏导数: $\frac{\partial e^{O*}}{\partial k} = -\frac{2ab\gamma\eta}{(2k\gamma-2b^2\eta^2)^2} < 0$; $\frac{\partial w_r^{O*}}{\partial k} = -\frac{ab^2(2-n)\eta^2}{4(k\gamma-b^2\eta^2)^2} < 0$;

$$\frac{\partial w_d^{O*}}{\partial k} = -\frac{ab^2(2-n)\eta^2}{4(k\gamma-b^2\eta^2)^2} < 0 \quad ; \quad \frac{\partial p_r^{O*}}{\partial k} = -\frac{ab^2(3-2n)\eta^2}{4(k\gamma-b^2\eta^2)^2} < 0 \quad ;$$

$$\frac{\partial p_d^{O*}}{\partial k} = -\frac{ab^2(3-2n)\eta^2}{4(k\gamma-b^2\eta^2)^2} < 0 \quad ; \quad \frac{\partial \pi_m^{O*}}{\partial k} = -\frac{a^2b^2\eta^2}{8(k\gamma-b^2\eta^2)^2} < 0 \quad ;$$

$$\frac{\partial \pi_m^{O*}}{\partial k} = -\frac{a^2b^2(1-n)\eta^2(b^2\eta^2(1-2\rho)+2k(1-n)(n(1-\rho)+2\rho))}{8(2+n)(k\gamma-b^2\eta^2)^3} < 0 \quad ;$$

$$\frac{\partial \pi_m^{O*}}{\partial k} = -\frac{a^2b^2(1-n)\eta^2(b^2\eta^2(1-2\rho)+2k(1-n)(2-(2-n)\rho))}{8(2+n)(k\gamma-b^2\eta^2)^3} < 0 \quad .$$

同理可证得: $\frac{\partial e^{F*}}{\partial k} < 0$; $\frac{\partial w_r^{F*}}{\partial k} < 0$; $\frac{\partial w_d^{F*}}{\partial k} < 0$; $\frac{\partial p_r^{F*}}{\partial k} < 0$; $\frac{\partial p_d^{F*}}{\partial k} < 0$;

$$\frac{\partial \pi_m^{F*}}{\partial k} < 0; \quad \frac{\partial \pi_r^{F*}}{\partial k} < 0; \quad \frac{\partial \pi_d^{F*}}{\partial k} < 0 \quad . \quad \frac{\partial e^{S*}}{\partial k} < 0; \quad \frac{\partial w_r^{S*}}{\partial k} < 0; \quad \frac{\partial w_d^{S*}}{\partial k} < 0; \quad \frac{\partial p_r^{S*}}{\partial k} < 0;$$

$$\frac{\partial p_d^{S*}}{\partial k} < 0; \quad \frac{\partial \pi_m^{S*}}{\partial k} < 0; \quad \frac{\partial \pi_r^{S*}}{\partial k} < 0; \quad \frac{\partial \pi_d^{S*}}{\partial k} < 0 \quad .$$

附录 8 证明命题 3.7

通过检验关于零售渠道的消费者比例系数的一阶偏导数, 我们确定了模型

O 、模型 F 和模型 S 的产品的最优批发价格、最优零售价格以及最优碳减排努力关于 ρ 的敏感性分析结果。

我们分别求解模型 O 中最优批发价格和最优零售价格关于 ρ 的一阶偏导数，

$$\frac{\partial w_r^{O*}}{\partial \rho} = \frac{a}{2+2n}, \quad \frac{\partial w_d^{O*}}{\partial \rho} = -\frac{a}{2+2n}, \quad \frac{\partial p_r^{O*}}{\partial \rho} = \frac{a(3+2n)}{2(2+3n+n^2)}, \quad \frac{\partial p_d^{O*}}{\partial \rho} = -\frac{a(3+2n)}{2(1+n)(2+n)}。$$

所以有： $\frac{\partial p_r^{O*}}{\partial \rho} > \frac{\partial w_r^{O*}}{\partial \rho} > 0$ ， $0 > \frac{\partial w_r^{O*}}{\partial \rho} > \frac{\partial p_r^{O*}}{\partial \rho}$ 。同理可得模型 F 和模型 S 中最优价

格和最优零售价格关于 ρ 敏感性的大小关系： $\frac{\partial p_d^{F*}}{\partial \rho} > \frac{\partial p_d^{F*}}{\partial \rho} > 0$ ， $0 > \frac{\partial w_d^{F*}}{\partial \rho} > \frac{\partial p_d^{F*}}{\partial \rho}$ ；

$$\frac{\partial p_d^{S*}}{\partial \rho} > \frac{\partial p_d^{S*}}{\partial \rho} > 0, \quad 0 > \frac{\partial w_d^{S*}}{\partial \rho} > \frac{\partial p_d^{S*}}{\partial \rho}。$$

求解模型 O 中最优碳减排努力关于 ρ 的一阶偏导数，有 $\frac{\partial \pi_d^{O*}}{\partial \rho} = 0$ 。同理可

得模型 F 和模型 S 的一阶导数， $\frac{\partial \pi_d^{F*}}{\partial \rho} = \frac{\partial \pi_d^{S*}}{\partial \rho} = 0$ 。

综上所述，模型 O 、模型 F 和模型 S 的产品的最优批发价格、最优零售价

格以及最优碳减排努力关于 ρ 的敏感性分析结果满足： $\frac{\partial e^{i*}}{\partial k} < 0$ ， $\frac{\partial w_r^{i*}}{\partial k} < 0$ ，

$$\frac{\partial w_d^{i*}}{\partial k} < 0, \quad \frac{\partial p_r^{i*}}{\partial k} < 0, \quad \frac{\partial p_d^{i*}}{\partial k} < 0, \quad \frac{\partial \pi_m^{i*}}{\partial k} < 0, \quad \frac{\partial \pi_d^{i*}}{\partial k} < 0, \quad \frac{\partial \pi_r^{i*}}{\partial k} < 0, \quad \text{其中}$$

$i = \{O, F, S\}$ 。

附录 9 证明第四章区块链上链成本阈值大小关系

$$c_b^6 - c_b^7 = \frac{1}{4} A \frac{\alpha^2(k\gamma - \beta^2)}{\beta^2(k\gamma - \alpha^2)(1-n)}, \quad \text{由于 } k\gamma - \beta^2 > 0 \text{ 和 } k\gamma - \alpha^2 > 0, \text{ 所以}$$

$$\frac{1}{4} A \frac{\alpha^2(k\gamma - \beta^2)}{\beta^2(k\gamma - \alpha^2)(1-n)} > 0, \quad \text{即 } c_b^6 > c_b^7。类似可证其他区块链阈值大小，即可得$$

到如下的大小关系： $c_b^6 > c_b^9 > c_b^7 > c_b^8$ 且 $c_b^6 > c_b^{10} > c_b^{11}$ 。

附录 10 证明命题 4.1

通过比较模型 N 和模型 B 制造商给零售商和平台的最优批发价格以及制造商的最优碳减排努力，可得到以下结果。

首先，我们比较制造商给零售商的批发价格的大小关系，由于

$$w_r^{B*} - w_r^{N*} = \frac{(1+n)(4\beta^2(k\gamma - \alpha^2)c_b - Ak(2-n)(\beta^2 - \alpha^2))}{(k\gamma - \alpha^2)(k\gamma - \beta^2)}, \text{ 令其为零，即：}$$

$$(1+n)(4\beta^2(k\gamma - \alpha^2)c_b - Ak(2-n)(\beta^2 - \alpha^2)) = 0, \text{ 求解得： } c_b^7 = \frac{Ak(2-n)(\beta^2 - \alpha^2)}{4\beta^2(k\gamma - \alpha^2)}。$$

由于区块链阈值大小满足： $c_b^1 > c_b^2$ ，所以有当 $0 < c_b \leq c_b^2$ 时，有 $w_d^{B*} \geq w_d^{N*}$ ，当 $c_b^7 < c_b < c_b^6$ 时，有 $w_d^{B*} < w_d^{N*}$ 。类似可得制造商给平台批发价格的大小关系。

接下来，我们比较两种模式下制造商的碳减排努力的大小关系：

$$e^{B*} - e^{N*} = \frac{A\alpha}{2k\gamma - 2\alpha^2} - \frac{\beta(A - 4(1-n)c_b)}{2(k\gamma - \beta^2)}, \text{ 令其为零，可得区块链阈值}$$

$$c_b^8 = \frac{A(k\gamma - \alpha^2)\beta - A(k\gamma - \beta^2)\alpha}{2\beta(1-n)(k\gamma - \alpha^2)}, \text{ 当 } 0 < c_b \leq c_b^8 \text{ 时，有 } e^{B*} > e^{N*}; \text{ 当 } c_b > c_b^8 \text{ 时，有}$$

$$e^{B*} < e^{N*}。$$

综上所述，可得以下结论：当 $0 < c_b \leq c_b^7$ 时，有 $w_d^{N*} \leq w_d^{B*}$ 和 $w_r^{N*} \leq w_r^{B*}$ ；当 $c_b^7 < c_b < c_b^6$ 时，有 $w_d^{N*} > w_d^{B*}$ 和 $w_r^{N*} > w_r^{B*}$ ；当 $0 < c_b \leq c_b^8$ 时，有 $e^{N*} \leq e^{B*}$ ；当 $c_b^8 < c_b < c_b^6$ 时，有 $e^{N*} > e^{B*}$ 。

附录 11 证明命题 4.2

通过比较模型 N 和模型 B 平台和零售商的最优零售价格，可得到以下结果。

计算两种模型下零售商的零售价格：

$$p_r^{B*} - p_r^{N*} = \frac{4(2\beta^2 - k(1-n))c_b}{4(k\gamma - \beta^2)} - \frac{Ak(3-2n)(\beta^2 - \alpha^2)}{(k\gamma - \alpha^2)4(k\gamma - \beta^2)}, \text{ 令其为零, 可得到}$$

区块链阈值 $c_b^9 = \frac{Ak(3-2n)(\beta^2 - \alpha^2)}{4(2\beta^2 - k(1-n))(k\gamma - \alpha^2)}$, 若 $k_5 < k \leq k_6$, 当 $0 < c_b \leq c_b^9$ 时, 有

$p_r^{N*} \leq p_r^{B*}$; 当 $c_b^9 < c_b < c_b^6$ 时, 有 $p_r^{N*} > p_r^{B*}$; 若 $k > k_6$, 则 $c_b^9 < 0$, 所以当 $k > k_6$ 时, 有 $p_d^{N*} < p_d^{B*}$ 和 $p_r^{N*} < p_r^{B*}$ 。

接下来比较模型 N 和模型 B 平台零售价格:

$$p_d^{B*} - p_d^{N*} = \frac{4(2\beta^2 - k(1-n))c_b}{4(k\gamma - \beta^2)} - \frac{Ak(3-2n)(\beta^2 - \alpha^2)}{(k\gamma - \alpha^2)4(k\gamma - \beta^2)}, \text{ 令其为零, 同理可得:}$$

若 $k_5 < k \leq k_6$, 当 $0 < c_b \leq c_b^9$ 时, 有 $p_d^{N*} \leq p_d^{B*}$; 当 $c_b^9 < c_b < c_b^6$ 时, 有 $p_d^{N*} > p_d^{B*}$;

若 $k > k_6$, 则 $c_b^9 < 0$, 所以当 $k > k_6$ 时, 有 $p_d^{N*} < p_d^{B*}$ 和 $p_d^{N*} < p_d^{B*}$ 。

附录 12 证明命题 4.3

通过比较模型 N 和模型 B 制造商、平台和零售商的最优利润, 可得到以下结果。

首先比较两模型制造商的最优利润:

$$\pi_m^{B*} - \pi_m^{N*} = \frac{8k(A(1-n)c_b - 2(1-n)^2c_b^2)}{8(k\gamma - \beta^2)} - \frac{kA^2(\beta^2 - \alpha^2)}{(k\gamma - \alpha^2)8(k\gamma - \beta^2)}, \text{ 令其为零, 可得区}$$

块链阈值 $c_b^{10} = \frac{A(k\gamma - \alpha^2) - \sqrt{A^2(k\gamma - \beta^2)(k\gamma - \alpha^2)}}{4(1-n)(k\gamma - \alpha^2)}$, 由于 $0 < c_b^{10} < c_b^6$, 当

$0 < c_b \leq c_b^{10}$ 时, 有 $\pi_m^{B*} > \pi_m^{N*}$, 当 $c_b^{10} < c_b < c_b^6$ 时, 有 $\pi_m^{B*} < \pi_m^{N*}$ 。

接下来, 比较平台的最优利润: 另 $\pi_d^{B*} - \pi_d^{N*} = 0$, 可以解得

$$c_b^{11} = \frac{A(\beta^2 - \alpha^2)}{4(1-n)(k\gamma - \alpha^2)}, \text{ 当 } 0 < c_b \leq c_b^{11} \text{ 时, 有 } \pi_d^{B*} > \pi_d^{N*}; \text{ 当 } c_b^{11} < c_b < c_b^6 \text{ 时, 有}$$

$$\pi_d^{B*} < \pi_d^{N*}。$$

同理可证得零售商最优利润的大小关系: 当 $0 < c_b \leq c_b^{11}$ 时, 有 $\pi_r^{B*} > \pi_r^{N*}$,

当 $c_b^{11} < c_b < c_b^6$ 时, 有 $\pi_r^{B*} < \pi_r^{N*}$ 。

附录 13 证明命题 4.4

通过检验模型 N 和模型 B 关于零售渠道的消费者比例系数的一阶偏导数, 我们确定了两种模型产品的最优批发价格、最优零售价格以及制造商的利润和最优碳减排努力关于 ρ 的敏感性分析结果。

首先, 我们计算模型 N 中最优批发价格和最优零售价格关于 ρ 的一阶导数,

$$\frac{\partial w_r^{N*}}{\partial \rho} = \frac{A}{2+2n}, \quad \frac{\partial w_d^{N*}}{\partial \rho} = -\frac{A}{2+2n}, \quad \frac{\partial p_r^{N*}}{\partial \rho} = \frac{A(3+2n)}{2(2+3n+n^2)}, \quad \frac{\partial p_d^{N*}}{\partial \rho} = -\frac{A(3+2n)}{2(2+3n+n^2)}。$$

比较最优零售价格和最优批发价大小关系: $\frac{\partial p_r^{N*}}{\partial \rho} - \frac{\partial w_r^{N*}}{\partial \rho} = \frac{A}{4+2n} > 0$, 所以有

$$\frac{\partial p_r^{N*}}{\partial \rho} > \frac{\partial w_r^{N*}}{\partial \rho} > 0。同 理, 可 证 得 \frac{\partial p_d^{N*}}{\partial \rho} < \frac{\partial w_d^{N*}}{\partial \rho} < 0; \quad \frac{\partial p_r^{B*}}{\partial \rho} > \frac{\partial w_r^{B*}}{\partial \rho} > 0;$$

$$\frac{\partial p_d^{N*}}{\partial \rho} < \frac{\partial w_d^{N*}}{\partial \rho} < 0。$$

接下来, 比较两种模型最优碳减排努力关于 ρ 的一阶导数。可得:

$$\frac{\partial e^{N*}}{\partial \rho} = \frac{\partial e^{B*}}{\partial \rho} = 0$$

最后, 我们比较两模型制造商的最优利润, $\frac{\partial \pi_m^{N*}}{\partial \rho} = \frac{\partial \pi_m^{B*}}{\partial \rho} = \frac{A^2(1-2\rho)}{2(1+n)(2+n)}。$

可得: 当 $0 < \rho < \frac{1}{2}$ 时, 有 $\frac{\partial \pi_m^{i*}}{\partial \rho} < 0$, 当 $\frac{1}{2} \leq \rho < 1$ 时, 有 $\frac{\partial \pi_m^{i*}}{\partial \rho} \geq 0$, 其中,

$i = \{N, B\}。$

附录 14 证明命题 4.5

由于 $w_r^{N*} - w_d^{N*} = \frac{A(2\rho-1)}{2(1+n)} > 0$ ，所以可知双渠道供应链企业批发价格与 ρ 有关，当 $0 < \rho < \frac{1}{2}$ 时，有 $w_r^{N*} > w_d^{N*}$ ；当 $\frac{1}{2} \leq \rho < 1$ 时，有 $w_d^{N*} \leq w_r^{N*}$ 。同理可证得：当 $0 < \rho < \frac{1}{2}$ 时，有 $p_d^{N*} > p_r^{N*}$ ， $p_d^{N*} > p_r^{N*}$ ， $w_d^{B*} > w_r^{B*}$ ， $p_d^{B*} > p_r^{B*}$ 和 $\pi_d^{B*} > \pi_r^{B*}$ ；当 $\frac{1}{2} \leq \rho < 1$ 时，有 $p_d^{N*} \leq p_r^{N*}$ ， $p_d^{N*} \leq p_r^{N*}$ ， $w_d^{B*} \leq w_r^{B*}$ ， $p_d^{B*} \leq p_r^{B*}$ 和 $\pi_d^{B*} \leq \pi_r^{B*}$ 。

附录 15 证明命题 4.6

通过检验模型 N 和模型 B 关于制造商的碳减排成本系数的一阶偏导数，我们确定了两种模型产品的最优批发价格、最优零售价格、制造商的最优碳减排努力以及供应链成员利润关于 k 的敏感性分析结果。

$$\begin{aligned} \text{首先计算模型 } N \text{ 最优解关于 } k \text{ 的一阶导数 } \frac{\partial w_r^{N*}}{\partial k} &= \frac{\partial w_d^{N*}}{\partial k} = -\frac{A(2-n)\alpha^2}{4(k\gamma-\alpha^2)^2} < 0; \\ \frac{\partial p_r^{N*}}{\partial k} &= \frac{\partial p_d^{N*}}{\partial k} = -\frac{A(3-2n)\alpha^2}{4(k\gamma-\alpha^2)^2} < 0; \quad \frac{\partial e^{N*}}{\partial k} = -\frac{A\gamma\alpha}{2(k\gamma-\alpha^2)^2}; \quad \frac{\partial \pi_m^{N*}}{\partial k} = \frac{A^2\alpha^2}{8(k\gamma-\alpha^2)^2}; \\ \frac{\partial \pi_r^{N*}}{\partial k} &= -\frac{A^2(1-n)\alpha^2(2k(1-n)(n(1-\rho)+2\rho)+(1-2\rho)\alpha^2)}{8(2+n)(k\gamma-\alpha^2)^3} < 0; \\ \frac{\partial \pi_r^{N*}}{\partial k} &= -\frac{A^2(1-n)\alpha^2(2k(1-n)(2-(2-n)\rho)+(1-2\rho)\alpha^2)}{8(2+n)(k\gamma-\alpha^2)^3} < 0。 \end{aligned}$$

同理可得模型 B 最优解关于 k 的一阶导数的大小关系：

$$\begin{aligned} \frac{\partial w_r^{B*}}{\partial k} &= \frac{\partial w_d^{B*}}{\partial k} = -\frac{A(2-n)\alpha^2}{4(k\gamma-\alpha^2)^2} < 0; \quad \frac{\partial p_r^{B*}}{\partial k} = \frac{\partial p_d^{B*}}{\partial k} = -\frac{A(3-2n)\alpha^2}{4(k\gamma-\alpha^2)^2} < 0; \\ \frac{\partial e^{B*}}{\partial k} &= -\frac{A\gamma\alpha}{2(k\gamma-\alpha^2)^2}; \quad \frac{\partial \pi_m^{B*}}{\partial k} = \frac{A^2\alpha^2}{8(k\gamma-\alpha^2)^2}; \\ \frac{\partial \pi_r^{B*}}{\partial k} &= -\frac{A^2(1-n)\alpha^2(2k(1-n)(n(1-\rho)+2\rho)+(1-2\rho)\alpha^2)}{8(2+n)(k\gamma-\alpha^2)^3} < 0; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \pi_d^{B*}}{\partial k} = -\frac{A^2(1-n)\alpha^2(2k(1-n)(2-(2-n)\rho)+(1-2\rho)\alpha^2)}{8(2+n)(k\gamma-\alpha^2)^3} < 0。$$

附录 16 证明命题 4.7

通过检验模型 N 和模型 B 关于“消费者信任消费系数”的一阶偏导数，我们确定了两种模型产品的最优批发价格、最优零售价格、制造商的最优碳减排努力以及供应链成员利润关于 ρ 的敏感性分析结果。

$$\begin{aligned} \frac{\partial w_r^{B*}}{\partial g} &= \frac{\beta k(2-n)(A-4(1-n)c_b)}{2(k\gamma-\beta^2)^2} > 0, \quad \frac{\partial w_d^{B*}}{\partial g} = \frac{\beta k(2-n)(A-4(1-n)c_b)}{2(k\gamma-\beta^2)^2} > 0, \\ \frac{\partial p_r^{B*}}{\partial g} &= \frac{\beta^2 k(3-2n)(A-4(1-n)c_b)}{2(k\gamma-\beta^2)^2} > 0, \quad \frac{\partial p_d^{B*}}{\partial g} = \frac{\beta^2 k(3-2n)(A-4(1-n)c_b)}{2(k\gamma-\beta^2)^2} > 0, \\ \frac{\partial e^{B*}}{\partial g} &= \frac{(\beta^2+k\gamma)(A-4(1-n)c_b)}{2(k\gamma-\beta^2)^2} > 0, \quad \frac{\partial \pi_m^{B*}}{\partial k} = \frac{A^2\alpha^2}{8(k\gamma-\alpha^2)^2} > 0。 \\ \frac{\partial \pi_r^{B*}}{\partial g} &= -\frac{\beta k(1-n)(A-4(1-n)c_b)(A(\beta^2+2k(1-n)n-2(k\gamma-\beta^2)\rho)+4k(2-3n+n^3)c_b)}{4(k\gamma-\beta^2)^3(2+n)} \end{aligned}$$

，令其为零，可得区块链阈值 $c_b^{12} = \frac{A(\beta^2+2k(1-n)n+2(k\gamma-\beta^2)\rho)}{2k(1-n)^2(2+n)}$ ，当 $\rho \leq \frac{1}{2}$ 且

$$0 < c_b \leq c_b^{12} \text{ 时， } \frac{\partial \pi_r^{B*}}{\partial g} \geq 0, \quad \text{当 } c_b^{12} < c_b < c_b^6 \text{ 时， } \frac{\partial \pi_r^{B*}}{\partial g} < 0; \quad \text{当 } \rho > \frac{1}{2} \text{ 时，有}$$

$$\frac{\partial \pi_r^{B*}}{\partial g} > 0。$$

$$\frac{\partial \pi_d^{B*}}{\partial g} = \frac{\beta k(1-n)(A-4(1-n)c_b)(A(4k(10-n)-\beta^2)+2A(\beta^2-k\gamma)\rho-4k(2-3n+n^3)c_b)}{4(k\gamma-\beta^2)^3(2+n)}$$

$$\text{，令其为零，可得区块链阈值 } c_b^{13} = \frac{A(4k(1-n)-\beta^2-2(k\gamma-\beta^2)\rho)}{2k(1-n)^2(2+n)}，\text{当 } \rho > \frac{1}{2} \text{ 且}$$

$$0 < c_b \leq c_b^{13} \text{ 时， } \frac{\partial \pi_r^{B*}}{\partial g} \geq 0, \quad \text{当 } c_b^{13} < c_b < c_b^6 \text{ 时， } \frac{\partial \pi_r^{B*}}{\partial g} < 0; \quad \text{当 } \rho < \frac{1}{2} \text{ 时，有}$$

$$\frac{\partial \pi_r^{B*}}{\partial g} > 0。$$

附录 17 符号定义

$$\alpha = mb_H + (1-m)b_L, \quad \beta = b + g, \quad \gamma = (1-n)(2-n);$$

$$k_1 = \frac{\eta^2 b^2}{\gamma}, \quad k_2 = \frac{b^2}{\gamma}, \quad k_3 = \frac{2b^2}{\gamma}, \quad k_4 = \frac{2b^2}{1-n}, \quad k_5 = \frac{\alpha^2}{\gamma}, \quad k_6 = \frac{\beta^2}{\gamma};$$

$$c_b^1 = \frac{A}{2(1-n)}, \quad c_b^2 = \frac{A(1-\eta)(k\gamma + b^2\eta)}{2(1-n)(k\gamma - b^2\eta^2)}, \quad c_b^3 = \frac{Ab^2k(2-n)(1-\eta^2)}{2(2b^2 - k\gamma)(k\gamma - b^2\eta^2)},$$

$$c_b^4 = \frac{Ab^2k(3-2n)(1-\eta^2)}{2(2b^2 - k(1-n))(k\gamma - b^2\eta^2)}, \quad c_b^5 = \frac{A}{2(1-n)} \left(1 - \sqrt{\frac{k\gamma - b^2\eta^2}{k\gamma - b^2}}\right), \quad c_b^6 = \frac{A}{4(1-n)},$$

$$c_b^7 = \frac{Ak(2-n)(\beta^2 - \alpha^2)}{4\beta^2(k\gamma - \alpha^2)}, \quad c_b^8 = \frac{A(k\gamma - \alpha^2)\beta - A(k\gamma - \beta^2)\alpha}{2\beta(1-n)(k\gamma - \alpha^2)},$$

$$c_b^9 = \frac{Ak(3-2n)(\beta^2 - \alpha^2)}{4(2\beta^2 - k(1-n))(k\gamma - \alpha^2)}, \quad c_b^{10} = \frac{A(k\gamma - \alpha^2) - \sqrt{A^2(k\gamma - \beta^2)(k\gamma - \alpha^2)}}{4(1-n)(k\gamma - \alpha^2)},$$

$$c_b^{11} = \frac{A(\beta^2 - \alpha^2)}{4(1-n)(k\gamma - \alpha^2)}, \quad c_b^{12} = \frac{A(\beta^2 + 2k(1-n)n + 2(k\gamma - \beta^2)\rho)}{2k(1-n)^2(2+n)},$$

$$c_b^{13} = \frac{A(4k(1-n) - \beta^2 - 2(k\gamma - \beta^2)\rho)}{2k(1-n)^2(2+n)}; \quad F_M^1 = \frac{a^2 b^2 k(1-\eta^2)}{8(k\gamma - b^2)(k\gamma - b^2\eta^2)},$$

$$F_M^2 = \frac{k(1-n)c_b(a - (1-n)c_b)}{2(k\gamma - b^2)}, \quad F_M^3 = \frac{k(1-n)c_b(A + 2(1-n)(c_b - c_s))}{2(k\gamma - b^2)};$$

$$c_s^1 = \frac{(k\gamma - b^2)F_M}{k(1-n)^2 c_b} - \frac{a}{2(1-n)} + c_b。$$

攻读硕士学位期间发表或录用的学术论文

发表或录用论文

龚本刚, 陈奎, 刘志, 等. 基于区块链技术的双渠道供应链定价和减排决策[J]. 计算机集成制造系统, 1-24[2025-03-18]. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2024.0503>.

参与科研项目

国家自然科学基金面上项目《基于区块链技术的再制造供应链回收责任配置与协同机制研究》（项目编号：72071002，参与）

致谢

读书不觉已春深，一寸光阴一寸金。读研三年，回首如昨。

首先衷心感谢我的导师，龚本刚教授。龚老师学识渊博、严谨治学、平易近人的人格魅力一直感染着我。龚老师教导我撰写论文，从发现问题、分析问题到解决问题，令我受益匪浅。龚老师不仅在学术上给予我悉心指导和无私帮助，而且在为人处世方面做出了身体力行的榜样。在此向龚老师表示最诚挚的感谢！

感谢刘志教授、唐娟副教授对我论文的耐心指导和督促，两位老师精益求精和一丝不苟的学术态度使我深受教诲。感谢经济与管理学院所有给我授课的老师、开题中期答辩的老师、辅导员以及研究生秘书，传授我知识，关心我生活。

感谢已经毕业的高一凌师姐，张怀苗师姐，唐文慧师姐，李子豪师兄和任标标师兄在科研学习方面传授给我的经验，祝你们在以后工作顺利。感谢还在攻读学位的同门刘欣研、吴陈燕师妹、刘坤师弟和王凯师弟对我的帮助，良好的学术氛围使我学术水平成长得很快。感谢我的课题组同学们对我的帮助和鼓励，祝愿大家学有所成，一切顺利。

感谢我的家人。父母始终尊重并支持我的选择，默默支撑我的梦想，是最坚实的后盾，让我能够全身心投入科研学习。

最后，感谢在百忙之中评审本文的各位专家以及所有关心我、帮助我的人。