

分类号: F273

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220720125



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 碳税政策下考虑区块链技术的制造商
碳谎报行为治理策略研究

论 文 作 者 孟庆伟
指 导 教 师 张云丰教授
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：F273

学校代码：10363

密 级：公开

学 号：2220720125

**碳税政策下考虑区块链技术的制造商碳谎报行为
治理策略研究**

**Research on Governance Strategies for Manufacturers'
Carbon Misreporting Behavior Considering Blockchain
Technology under Carbon Tax Policy**

学生姓名： 孟庆伟

指导教师： 张云丰教授

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后果由本人承担。

学位论文作者签名：孟庆伟

日期：2025 年 5 月 21 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：

孟庆伟

日期：2025 年 5 月 21 日

指导教师签名：

张云丰

日期：2025 年 5 月 21 日

碳税政策下考虑区块链技术的制造商碳谎报行为 治理策略研究

摘 要

随着全球碳减排目标的推进,政府在这个过程中发现了各种各样的问题,其中对减排目标影响较大的问题之一就是碳谎报问题,部分企业为了降低成本,存在谎报碳排放数据来规避碳减排责任的行为,这严重影响了碳税政策的执行效果。本文旨在研究在碳税政策框架下,如何运用监管机制、区块链技术与政府补贴策略,优化碳减排决策,通过引入惩罚机制和区块链技术,增加制造商的谎报成本和谎报难度,限制制造商的碳谎报行为,通过引入合适的补贴政策,提升碳税政策的实施效果。

本研究基于碳税政策、政府补贴与监管机制在低碳供应链中的应用背景,构建了由单一制造商和单一零售商组成的二级供应链模型。运用 Stackelberg 博弈理论,深入分析了政府、制造商和零售商三者间的互动关系,重点探讨了碳税政策、监管机制以及区块链技术对企业减排决策的影响机制。研究结果表明,政府通过实施碳税政策和建立监管机制能够有效引导企业如实披露碳信息并推动企业"上链"行为。然而,严格的监管措施与较高的碳税税率导致企业面临显著的减排压力,迫使其采取消极减排策略以维持利润水平。为激励企业增加减排投资,本研究引入政府补贴政策以缓解企业减排压力。通过构建技术补贴和产量补贴的激励机制,研究发现政府补贴政策能够显著促进企业增加碳减排投资,尤其是在高排放行业,补贴政策有效降低了企业

减排成本，提升了减排投资意愿。同时，合理的碳税政策设计能够激励低排放企业加大减排投入，而对高排放企业则需进行适度调节，以避免造成过度负担。进一步研究表明，在碳税政策框架下，区块链技术与补贴政策的协同效应对企业和社会产生显著影响：（1）未采用区块链时，产量补贴对企业减排投资的激励效果更为显著；（2）采用区块链时，技术补贴则表现出更强的激励作用。通过数值仿真分析，本研究验证了不同政策情境下政府决策对供应链各主体行为的影响机制，为碳税政策背景下的政府监管提供了理论依据，为低碳供应链的监管优化提供了新的研究思路，研究结论表明该协同机制能够有效提升碳税政策的执行效率，抑制企业碳信息谎报行为，促进绿色技术创新，对实现全球碳中和目标和社会福利最大化具有重要的理论价值和实践意义。

本文最后的结论是，政府能够通过碳税和监管机制引导企业诚信上报减排信息，但是企业的减排投资会减少，为了缓解企业的减排压力，政府可以通过技术补贴和产量补贴激励企业增加减排投资，最终的最优政策组合有两种：一是通过碳税和监管机制引导企业“上链”，企业“上链”后，运用技术补贴激励企业增加减排投资；二是通过碳税和监管机制引导企业诚信上报企业碳信息，此时运用产量补贴激励企业增加减排投资。

关键词：碳税政策，区块链技术，政府补贴，碳谎报，低碳供应链，社会福利

RESEARCH ON GOVERNANCE STRATEGIES FOR MANUFACTURERS' CARBON MISREPORTING BEHAVIOR CONSIDERING BLOCKCHAIN TECHNOLOGY UNDER CARBON TAX POLICY

ABSTRACT

With the advancement of global carbon emission reduction targets, governments have discovered various problems in this process, among which the problem that has a significant impact on emission reduction targets is the issue of false reporting. Some companies, in order to reduce costs, engage in false reporting of carbon emission data to avoid carbon emission reduction responsibilities, which seriously affects the effectiveness of carbon tax policies. This article aims to study how to combine blockchain technology with government subsidy strategies under the framework of carbon tax policies, optimize carbon reduction decisions, reduce manufacturers' carbon false reporting behavior, and thereby enhance the implementation effectiveness of carbon tax policies. By constructing a low-carbon supply chain model, this article explores how the government can use carbon taxes, subsidies, and blockchain technology to guide enterprises to honestly report carbon reduction emissions and actively reduce them, ultimately achieving maximum social welfare.

This study is based on the application background of blockchain technology, carbon tax policies, and government subsidies and regulatory

strategies in low-carbon supply chains, and constructs a two-level supply chain model consisting of a single manufacturer and a single retailer. Using Stackelberg game theory, this paper deeply analyzes the interactive relationship between the government, manufacturers, and retailers, with a focus on exploring the impact mechanism of carbon tax policies, regulatory mechanisms, and blockchain technology on corporate emission reduction decisions. The research results indicate that the government can effectively guide enterprises to truthfully disclose emission reduction information and promote their "on chain" behavior by implementing carbon tax policies and establishing regulatory mechanisms. However, strict regulatory measures and high carbon tax rates have put significant pressure on companies to reduce emissions, forcing them to adopt passive emission reduction strategies to maintain their profit levels. To incentivize enterprises to increase their investment in emissions reduction, this study introduces government subsidy policies to alleviate the pressure on enterprises to reduce emissions. By establishing incentive mechanisms for technology and production subsidies, research has found that government subsidy policies can significantly promote enterprises to increase their carbon emission reduction investments, especially in high emission industries. Subsidy policies effectively reduce the cost of emission reduction for enterprises and increase their willingness to invest in emission reduction. Meanwhile, a reasonable carbon tax policy design can incentivize low emission enterprises to increase their emissions reduction investment, while moderate adjustments need to be made to high emission enterprises to avoid excessive burden. Further research shows that under the framework of carbon tax policy, the synergistic effect of blockchain technology and subsidy policy has a significant impact on enterprises and society: (1) When blockchain is not adopted, the incentive effect of output subsidies on enterprise emission reduction investment is more significant;

(2) When adopting blockchain, technology subsidies show a stronger incentive effect. Through numerical simulation analysis, this study verifies the impact mechanism of government decisions on the behavior of various entities in the supply chain under different policy scenarios, providing theoretical basis for government regulation under the background of carbon tax policies and new research ideas for optimizing the regulation of low-carbon supply chains. The research conclusion shows that this collaborative mechanism can effectively improve the implementation efficiency of carbon tax policies, suppress the false reporting of carbon information by enterprises, promote green technology innovation, and has important theoretical value and practical significance for achieving global carbon neutrality goals and maximizing social welfare.

The final conclusion of this article is that the government can guide enterprises to report emission reduction information in good faith through carbon taxes and regulatory mechanisms, but the emission reduction investment of enterprises will decrease. In order to alleviate the emission reduction pressure on enterprises, the government can incentivize enterprises to increase emission reduction investment through technology subsidies and production subsidies. There are two optimal policy combinations in the end: one is to guide enterprises to "use blockchain" through carbon taxes and regulatory mechanisms, and then use technology subsidies to incentivize enterprises to increase emission reduction investment; The second is to guide enterprises to report their carbon information in good faith through carbon taxes and regulatory mechanisms, and use production subsidies to incentivize enterprises to increase their emissions reduction investments.

Qingwei Meng(Management science and engineering)

Supervised by Yunfeng Zhang

KEY WORDS: Carbon tax policy, Blockchain technology, Government subsidies, Carbon fraud, Low-carbon supply chain, Social welfare

目录

摘 要	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 研究内容与方法	4
1.2.1 研究内容	4
1.2.2 研究方法	5
1.3 技术路线与创新点	6
1.3.1 技术路线	6
1.3.2 创新点	7
第 2 章 理论基础与文献综述	8
2.1 区块链技术	8
2.1.1 区块链技术文献研究述评	8
2.1.2 区块链技术应用于低碳供应链的研究	8
2.2 政府补贴政策	10
2.2.1 政府补贴政策文献研究述评	10
2.2.2 低碳供应链中政府补贴的研究现状	11
2.3 消费者绿色信任	12
2.3.1 消费者绿色信任文献研究述评	12
2.3.2 消费者绿色信任相关研究现状	13
2.4 碳谎报行为	14
2.4.1 碳谎报行为文献研究述评	14
2.4.2 供应链中的碳谎报行为研究现状	14

第 3 章 碳税政策下考虑区块链技术的制造商碳谎报行为监管策略研究	16
3.1 问题描述与假设	16
3.1.1 问题描述	16
3.1.2 符号说明与假设	16
3.2 未采用区块链技术的监管机制研究	17
3.2.1 制造商不谎报下的减排模型 (NN 模型)	18
3.2.2 制造商谎报下的减排模型(NC 模型)	19
3.2.3 NN 模型和 NC 模型下的利润比较	21
3.3 采用区块链技术的监管机制研究(Y 模型).....	22
3.4 算例分析	24
3.4.1 最优单位碳减排量分析	24
3.4.2 最优利润分析	26
3.5 本章小结	28
第 4 章 碳税政策下考虑区块链技术的减排技术补贴策略研究	30
4.1 问题描述与假设	30
4.1.1 问题描述	30
4.1.2 符号说明与假设	30
4.2 未采用区块链技术的减排技术补贴模型(NT 模型).....	31
4.3 采用区块链技术的减排技术补贴模型 (YT 模型)	34
4.4 算例分析	37
4.4.1 最优社会福利分析	37
4.4.2 最优碳减排水平分析	39
4.5 本章小结	40
第 5 章 碳税政策下考虑区块链技术的产量补贴策略研究	42
5.1 问题描述与假设	42
5.1.1 问题描述	42
5.1.2 符号说明与假设	42
5.2 未采用区块链技术的产量补贴模型 (NQ 模型)	43
5.3 采用区块链技术的产量补贴模型 (YQ 模型)	46
5.4 算例分析	49

5.4.1 最优社会福利分析	49
5.4.2 最优碳减排水平分析	51
5.5 本章小结	52
第 6 章 结论与展望	54
6.1 研究结论	54
6.2 研究展望	55
参考文献	57
附录	62
攻读学位期间发表的学术论文	76
致谢	77

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

十八届五中全会确定绿色发展为五大发展理念之一，在此之后，绿色发展成为我国经济和社会的发展规划的重要依据，2023 年 1 月，国务院新闻办公室发布的《新时代的中国绿色发展》白皮书总结了十八大以来的绿色发展成果，内容涉及到自然环境，民生，经济，法律等多个方面，总结了这些年来重要成果。在这个过程中，各行业的企业根据政策的要求调整了生产经营策略，进行碳减排技术的革新，将生产线进行改造升级，使得企业的碳排放降低，承担自己的社会责任，但同时，部分企业为了降低成本，谎报瞒报本企业的碳排放情况，如：中碳能投科技（北京）有限公司伪造碳检测报告，虚报燃煤用量(2021 年)；锡山某公司虚报、瞒报温室气体排放报告等。企业的碳谎报行为是目前确实存在的问题，针对这些谎报违法行为，政府制定了相关法律法规，其中涉及相关涉事人员的刑事处罚以及相关企业的经济性处罚，在重罚之下，企业开始探究新的碳减排方案，但是仍有企业不惜铤而走险，通过碳谎报获利，这个过程中涉及到生产企业的谎报、第三方技术服务机构的隐瞒作假和相关监管部门的“保护”，那么，政府如何制定监管机制才能尽可能避免企业谎报呢？

在此背景下，区块链技术凭借其透明性和不可篡改的特性，为低碳供应链的优化提供了创新的解决方案。区块链的应用逐渐渗透到经济发展的各个领域，其在供应链中的应用也在其列。这种透明性和可追溯性不仅有助于企业实现碳中和目标，还能增强消费者对绿色产品的信任，推动绿色消费市场的发展。由于区块链的可追溯性，将区块链引入低碳供应链能够使消费者完全信任产品的绿色度，能够有效促进制造商碳减排^[1,2]。政府可以通过建立公共区块链平台的方式，让企业承担部分区块链使用成本，促进企业上链，并且能够有效增加社会福利^[3]。企业一旦上链，对于碳减排量以及其他生产指标都会被政府有效监管，政府能够

更好的约束企业^[4]，并且区块链能够安全的实现供应链上下游之间的信息交互，降低了成本^[5]。碳税政策是约束企业碳排放的有效政策手段，其优点是能够将碳排放的管控力度掌握在政府手中，但又不会强制企业进行碳减排^[6]，而随着区块链的应用，碳税政策受到区块链的影响应如何改变也需要思考。

2021 年 6 月，工业和信息化部与中央网络安全和信息化委员会办公室联合发布了《关于加快推动区块链技术应用和产业发展的指导意见》。该文件系统分析了当前区块链技术应用的局限性，并进一步明确了其潜在的应用价值。文件指出，区块链技术在供应链管理领域具有显著的应用潜力，尤其是在提升数据透明度、优化资源配置效率以及降低运营成本等方面。然而，文件同时指出，区块链技术的广泛应用仍面临多重挑战，包括技术成熟度不足、标准化体系尚未完善以及跨行业协同机制不健全等问题。针对这些问题，文件提出了一系列政策建议，主要包括强化技术研发投入、推进标准化体系建设、促进跨行业协同合作以及支持示范性项目的实施等。推动供应链的低碳化转型对于实现碳中和目标至关重要。然而，低碳供应链的构建面临诸多挑战，包括技术升级成本高、企业转型动力不足以及市场机制不完善等问题。在此背景下，政府补贴作为一种重要的政策工具，被广泛认为是促进低碳供应链发展的有效手段。政府补贴可以通过降低企业的技术升级成本、激励绿色技术创新以及增强企业的市场竞争力，推动供应链各环节的低碳化转型。碳税政策作为政府控制碳排放的有效手段，优势在于能够确保政府对碳排放的管控力度。政府可以通过适当力度的补贴激励企业进行减排投资^[7]。

1.1.2 研究意义

本研究在系统梳理政府低碳补贴政策、绿色信任和碳谎报等领域相关文献的基础上，构建了包含政府监管机制的二级供应链模型，考察采用区块链技术前后的供应链运作机制。具体而言，研究建立了两个对比模型：其一为传统模式下包含政府针对制造商碳谎报行为监管机制的二级供应链模型；其二为引入区块链技术前后补贴政策（技术补贴和产量补贴）的二级供应链模型，以对比分析区块链技术应用前后的政策效果差异。通过上述模型构建与分析，本研究旨在为政府治理企业碳谎报行为提供理论依据与决策参考。本研究的开展兼具重要的理论价值与实践意义。

（1）现实意义

本研究将政府监管机制与区块链技术作为治理企业碳谎报行为的双重路径，构建了包含采用区块链前政府监管机制与采用区块链后两种情景的供应链减排决策模型，并系统分析了政府碳税、监管机制及区块链技术对政府补贴政策的交互影响，发现企业受到严格监管的影响，其实际减排量下降，于是引入补贴政策（技术补贴和产量补贴），通过求解供应链最优减排决策与社会福利最大化问题，得出了两种基于现实情境的政策组合方案，为政府制定补贴政策与监管机制以引导企业诚信经营提供了理论依据。

进一步地，本研究通过参数化分析，深入探讨了企业谎报系数、补贴方式（技术补贴与产量补贴）、补贴比例、监管力度、惩罚力度以及区块链技术成本等关键变量对企业减排决策、利润水平及社会福利最优化的影响机制。基于研究结果，本文为政府以治理企业碳谎报为目标，制定差异化的监管机制与低碳补贴政策提供了具有针对性的政策建议。

（2）理论意义

本研究基于 Stackelberg 博弈理论，构建了包含企业谎报行为与政府惩罚机制、采用区块链前后技术补贴和产量补贴等多重情境下的博弈模型。

研究通过对企业谎报系数进行量化分析，实证考察了企业利润与谎报系数之间的内在关联，从而明确了企业实施碳谎报行为的理论动因，为供应链碳谎报行为的深入研究提供了重要的理论支撑。同时，本文创新性地将区块链技术、监管机制与政府低碳补贴策略相结合，深入探讨了区块链技术对政府碳政策制定及企业减排决策的影响机制，进一步丰富了政府治理供应链碳谎报行为的研究体系。

从理论贡献来看，本研究不仅拓展了低碳供应链管理的研究视角，促进了相关学科的交叉融合，还为供应链碳减排研究提供了新的理论框架和分析思路。通过构建基于区块链技术的政府监管机制与补贴政策体系，本研究旨在有效抑制制造商的碳谎报行为，提升企业减排积极性，从而为推动全球碳中和目标的实现提供可行的解决方案。

1.2 研究内容与方法

1.2.1 研究内容

本研究聚焦于碳税政策框架下,探讨如何通过制定监管机制或引入区块链技术,抑制制造商的碳谎报行为,如何选择和制定补贴政策,激励企业增加减排投资。本研究构建了以制造商为主导者、零售商为跟随者、政府为政策制定者与监管者的低碳供应链模型,系统分析了政府、制造商与零售商三者之间的互动关系。研究重点考察了碳税政策、监管机制、区块链技术与政府补贴政策的协同作用对企业减排决策以及碳谎报决策的影响机制。具体而言,制造商基于收益最大化原则进行碳减排决策,政府则根据企业的减排绩效以及应用区块链技术前后的收益变化,评估企业的谎报决策和"上链"决策,并据此制定相应的监管策略与补贴政策。主要研究以下问题:

- (1) 政府能否运用碳税政策和监管机制引导企业诚信经营?
- (2) 政府的严格监管对企业的减排决策和利润有什么影响? 企业应当如何应对?
- (3) 政府针对企业的应对方式,应当如何制定碳税政策和监管机制?
- (4) 政府应当如何选择和制定补贴政策,以此激励企业增加减排投资?
- (5) 对于政府来说,为了实现碳目标和社会福利最大化,哪种政策组合最优?

基于以上问题,具体内容分成下面六章进行探讨:

第 1 章,绪论。本章首先阐述了区块链技术、低碳补贴等相关政策的背景,明确了本研究的现实意义与理论价值。随后,系统介绍了研究的主要内容、研究方法及技术路线,最后总结了本研究的创新点。

第 2 章,理论基础与文献综述。本章详细阐述了区块链技术、政府低碳补贴政策、绿色信任及碳谎报行为等相关理论,介绍了目前的研究现状,为后续研究展开奠定了理论基础。

第 3 章,碳税政策下考虑区块链技术与制造商碳谎报行为的政府监管机制研究。本章构建了采用区块链技术前后的低碳供应链模型,模型中引入了政府的监管机制,对比分析了谎报与不谎报行为下,以及应用区块链技术前后的制造商收益与零售商收益。基于企业在不同情景下的收益对比,政府制定了碳税政策与监

管机制，以引导企业做出有利于社会整体利益的决策（宽松监管、严格监管或引导企业“上链”）。

第 4 章，碳税政策下考虑区块链技术的减排技术补贴策略研究。本章在第 3 章的基础上，引入技术补贴政策，构建了未采用区块链技术时包含监管机制的技术补贴模型和采用区块链技术时的技术补贴模型，对比分析了最优社会福利、制造商利润及最优单位产品减排量，探讨了技术补贴下的最优政策组合。

第 5 章，碳税政策下考虑区块链技术的产量补贴策略研究。本章在第 3 章的基础上，引入产量补贴政策，构建了未采用区块链技术时包含监管机制的产量补贴模型和采用区块链技术时的产量补贴模型，对比分析了最优社会福利、制造商利润及最优单位产品减排量，探讨了产量补贴下的最优政策组合。

第 6 章，结论与展望。本章对全文的研究内容及重要结论进行了归纳总结，给出最优的政策组合，并对本研究的局限性进行了展望。

1.2.2 研究方法

（1）文献研究法

本研究通过系统梳理与整合政府低碳补贴政策、企业碳谎报行为及相关领域的文献，对国内外研究现状进行了全面评述与总结，为后续研究的理论框架构建与模型分析提供了坚实的理论基础与学术支撑。

（2）博弈论方法

本研究采用 Stackelberg 博弈理论对供应链企业行为进行建模分析。在综合考虑区块链技术建设与应用成本、绿色信任等关键因素的基础上，构建了包含制造商谎报行为、区块链技术应用前后情景的博弈模型。模型涵盖了减排技术补贴与低碳产品产量补贴两种政策情境，并以制造商为主导者、零售商为跟随者的博弈结构展开分析。通过运用逆向归纳法对模型进行求解，本研究旨在揭示不同情境下供应链成员的最优决策机制及其内在规律。

（3）数值仿真法

结合相关领域学者的研究数据，本研究利用 Matlab 进行数值仿真，对四种情境下的最优社会福利、制造商与零售商利润、单位产品减排量等关键指标进行对比分析。通过研究谎报系数、技术补贴比例、产量补贴金额等参数对最优

结果的影响，验证了研究结论的合理性与稳健性，进一步增强了研究结果的可信度与实践指导价值。

1.3 技术路线与创新点

1.3.1 技术路线

技术路线图 1-1 如下：

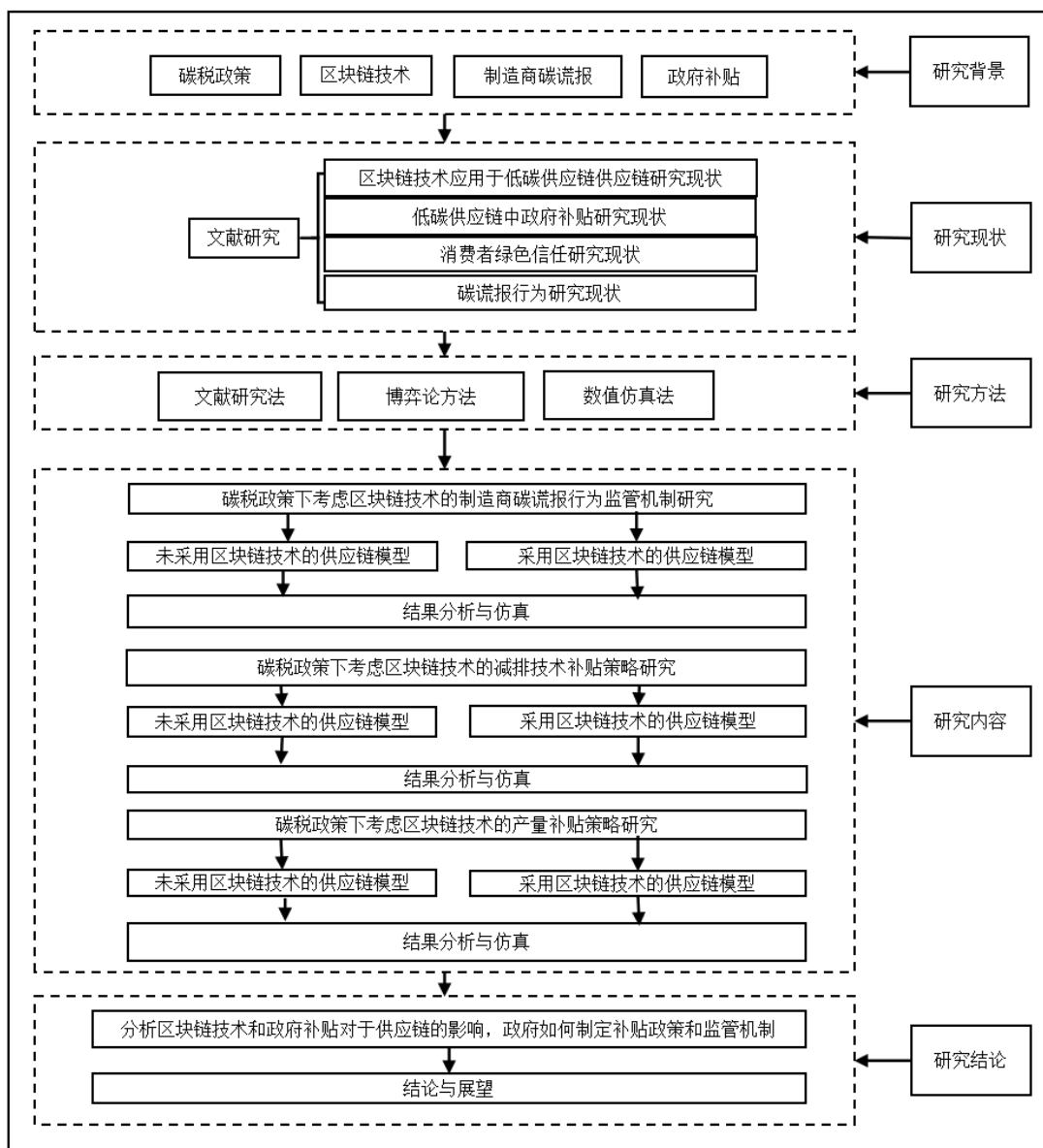


图 1-1 技术路线图

1.3.2 创新点

本文创新点体现在以下三个方面：

（1）现有的研究没有考虑制造商碳谎报后的惩罚措施，本文系统研究了制造商的碳谎报行为，并提出了通过区块链技术和政府监管机制来减少谎报行为的策略。通过引入惩罚机制，使得企业在选择谎报碳信息时考虑政府的监管，以及是否能够承担被发现谎报后的惩罚。

（2）以往关于政府政策的研究都集中于探究政策给企业和社会所带来的影响，很少给出能够完成政府目标的最优的政策组合，本文在探究碳税政策、补贴政策 and 监管机制给企业和社会所造成的影响后，根据分析结果，给出了不同情况下的最优政策组合。

（3）本文还综合考虑监管机制和政府补贴同时作用下，供应链的反应和社会福利的变化，希望通过研究供应链成员的利润变化和决策变化以及社会福利的变化，得到符合政府目标的政策组合或建议。

第2章 理论基础与文献综述

2.1 区块链技术

2.1.1 区块链技术文献研究述评

区块链技术是一种基于分布式账本的新型信息技术，其核心特征在于去中心化、透明性和不可篡改性。数据由网络中的多个节点共同维护，每个节点都保存完整的账本副本，从而实现了去中心化的数据存储与管理。区块链通过加密算法保障数据安全，确保交易信息的机密性和完整性。智能合约技术的引入进一步扩展了区块链的功能，使其能够自动执行预设规则，提升了业务流程的自动化水平。在供应链管理中，区块链能够显著提高透明度和可追溯性，帮助企业追踪产品从生产到消费的全过程，从而提升供应链效率并减少欺诈行为。特别是在低碳供应链中，区块链技术的应用具有重要意义。通过区块链，企业可以实时记录和共享碳排放数据、能源使用情况以及原材料的来源信息，确保供应链各环节的碳足迹可追溯和可验证。此外，区块链还可以与物联网技术结合，实时监控物流运输中的碳排放，优化运输路线和能源使用，从而降低供应链的碳强度。这种技术应用不仅有助于企业实现碳中和目标，还能增强消费者对绿色产品的信任，推动绿色消费市场的发展。总体而言，区块链技术作为一种颠覆性创新，正在为低碳供应链的构建和全球碳中和目标的实现提供重要技术支持，推动绿色经济的可持续发展。

2.1.2 区块链技术应用用于低碳供应链的研究

近年来，随着全球碳中和目标的持续推进，区块链技术在低碳供应链管理中的应用日益受到学术界与产业界的广泛关注。区块链技术凭借其去中心化、数据透明性及不可篡改性等核心特征，为低碳供应链中的碳排放数据追溯、碳足迹管理以及资源优化配置提供了全新的技术路径与解决方案，区块链技术应用用于供应链的研究现状如下：

Saberi 等^[8]的研究表明, 区块链技术能够有效突破组织间的信息壁垒, 对供应链金融领域的革新产生颠覆性影响。Du 等^[9]通过利用区块链技术对供应链金融进行全流程管理, 构建了一种新型供应链金融平台, 解决了供应链成员间的信任缺失问题, 显著提升了资金流与信息流的效率, 同时降低了运营成本, 为供应链相关方提供了更加优质的金融服务。唐丹等^[10]通过分析区块链债转平台模式下的供应链企业运作模型, 发现区块链债转平台能够提升供应商的产量, 并增加供应链企业的整体利润。Dong 等^[11]的研究指出, 区块链技术能够增强供应链的可见性, 使制造商能够更好地设计深层融资策略, 从而提高供应链的弹性。李健等^[12]针对中小企业的仓单质押业务展开研究, 构建了区块链技术对供应链金融影响的定量模型。Zhang 等^[13]的研究结果表明, 通过将区块链技术整合到供应链金融的各个环节中, 能够有效缓解中小企业在供应链金融中面临的融资困境。

闫妍等^[14]运用 Stackelberg 博弈理论构建了由零售商、供应商与物流服务集成商构成的三级供应链模型, 通过实证分析发现区块链技术的应用能有效降低供应链节点企业间的交易成本, 促进信息共享机制的建立, 进而提升供应链整体利润水平。刘亮等^[15]的研究进一步证实, 区块链技术在供应链中的应用不仅能够显著降低交易成本、缩短交易周期, 还能有效抑制流通过程中生鲜产品的品质损耗。林木西等^[16]从经济学理论视角出发, 系统论证了区块链技术的应用价值, 研究表明该技术能够缓解供应链成员间在绿色生产领域的信息不对称现象, 降低交易成本, 从而推动企业向绿色生产模式转型。Kshetri 等^[17]深入探讨了区块链技术对供应链管理各维度的影响机制, 重点分析了其在成本控制、质量保证、可靠性提升及灵活性增强等方面的作用机理。李剑等^[18]则聚焦于“区块链+协同减排”框架下的信息共享机制, 揭示了其对供应商与制造商收益均衡状态的影响机制。张令荣等^[19]通过研究区块链技术对于低碳产品和普通产品的影响, 发现区块链技术可以提高低碳产品的最优减排量, 随着单位减排量的增加, 低碳产品的增加量大于普通产品的减小量, 产品总需求量增加; 消费者对区块链技术的绿色信任度的提高会激励企业进行减排投入以及区块链投入, 同时降低碳排放总量; 制造商投入区块链成本承担比例高于某值后, 制造商和零售商的期望利润均会较不投入区块链技术增加。

Korpela 等^[20]深入阐释了区块链技术在供应链整合中的应用路径, 揭示了其推动数字化供应链及网络实现颠覆性转型的内在机制。孙中苗等^[21]通过构建理

论模型，将区块链技术对产品真实性验证的时间成本与辨别效果纳入考量，系统研究了区块链技术支持下的供应链最优产品定价策略。Tan 等^[22]的实证研究表明，区块链技术与供应链管理的深度融合显著提升了供应链信用管理水平，有效弥补了节点企业间的信任缺失。研究指出，通过充分利用区块链的多主体参与、去中心化架构等特征，结合智能合约中的对称加密、授权机制、共识算法等技术创新，可有效解决供应链管理中的信任构建与安全保障等关键问题。Manupati 等^[23]创新性地提出了一种基于分布式账本技术的区块链解决方案，用于解决碳税政策背景下多级供应链中的生产分配优化问题。梁喜和肖金凤^[24]则从实践应用角度出发，探索了区块链技术在制造商网络平台改造中的应用，通过将传统平台升级为兼具检验与销售功能的综合平台，深入研究了区块链环境下双渠道供应链的定价策略与渠道选择问题。上述研究充分挖掘了区块链技术的核心特征，将其创新性地应用于供应链管理中的各类问题求解，显著拓展了该领域的理论研究边界。

2.2 政府补贴政策

2.2.1 政府补贴政策文献研究述评

政府补贴作为推动低碳供应链转型的重要政策工具，其核心目标在于通过经济激励手段，降低企业减排成本，促进绿色技术创新，并引导市场向低碳化方向发展。低碳供应链的构建面临诸多挑战，包括技术研发的高投入、市场机制的不完善以及企业减排动力不足等问题。政府补贴通过直接或间接的经济支持，能够有效缓解这些障碍，推动供应链各环节的低碳化转型。

政府补贴的主要形式包括技术补贴和产量补贴。技术补贴侧重于支持企业的减排技术研发和设备升级，通过分担企业的初始投资成本，激励其采用清洁能源、优化生产工艺以及改进物流运输等低碳技术。这种补贴形式能够显著提升企业的减排效率，尤其是在高排放行业中，技术补贴的作用尤为突出。产量补贴则侧重于通过单位产量补贴降低低碳产品的市场价格，刺激消费者需求，从而扩大绿色产品的市场份额。这种补贴形式对需求敏感型产品（如电动汽车、节能家电）的推广效果显著，但其潜在风险在于可能诱发企业“重产量轻质量”的行为，需通过动态调整补贴强度与监管机制结合以规避风险。

2.2.2 低碳供应链中政府补贴的研究现状

政府实施的低碳补贴政策对供应链减排决策机制及社会福利水平具有显著影响^[25]。在现行政策框架下，政府对企业的低碳补贴主要采取两种模式：一是针对减排技术研发投入的补贴（简称技术补贴），二是针对低碳产品生产量的补贴（简称产量补贴）。其中，技术补贴属于过程导向型激励措施，旨在促进企业加大减排技术研发投入力度；而产量补贴则属于结果导向型激励措施，主要对成功实现低碳产品生产的企业给予奖励^[26]。

在技术补贴研究领域，Che 等^[27]构建了政府技术补贴框架下的双渠道供应链决策模型，重点探讨减排研发投入与单位产品减排量的最优决策问题。Lim 等^[28]通过实证研究发现，当技术补贴政策与碳税机制协同实施时，可实现实际 GDP 增长与碳排放控制的协调发展。曹细玉^[29]和王道平^[30]等学者的研究表明，政府实施适度的技术补贴政策能够有效激励企业增加减排技术投入，同时提升社会福利水平。贺勇等^[31]通过构建理论模型，分析了政府技术补贴下制造商不同减排模式的选择问题，研究证实当政府提供技术补贴时，制造商采用自主研发减排策略所获利润显著高于外包减排模式。史成东和刘飞^[32]则深入研究了政府技术补贴对不同权力结构下闭环供应链定价决策的影响机制，发现制造商市场主导地位越强，技术补贴政策对产品零售价格及零售商社会责任投入水平的调控效果越显著。

在产量补贴研究领域，Brown 等^[33]通过实证分析发现，监管机构实施产量补贴政策能够有效降低排放定价机制的成本负担，并缓解由此带来的电价上涨压力。Galinato^[34]和 Bajona 等^[35]的研究表明，相较于对高碳产品征税，对低碳产品实施产量补贴更能有效促进企业减排行为。Nie 等^[36]通过比较研究发现，产量补贴政策相较于固定补贴模式能够产生更高的消费者剩余，但会导致较低的生产者剩余。聂佳佳和李伟琛^[37]的研究揭示了市场波动性与产量补贴效果之间的负相关关系，即市场波动幅度越大，政府产量补贴对制造商低碳技术研发投入的激励效应越弱。Yang 等^[38]深入探讨了非对称信息条件下可再生能源发电行业的产量补贴策略，研究表明政府只能基于可再生能源企业的成本概率分布提供补贴，且补贴额度随高成本企业概率的增加而相应提高。

部分学者对技术补贴与产量补贴的社会福利效应进行了对比研究。徐朗等^[39]基于产品差异性和技术溢出率构建了三阶段博弈模型，研究结果表明，在短期内，

无论是技术补贴还是产量补贴政策均能有效激励制造商提升低碳产品减排水平，进而提高制造商利润并增进社会福利。Kesavayuth 等^[40]的研究发现，技术补贴与产量补贴的社会福利效应具有情境依赖性：当技术溢出效应较高时，技术补贴更有利于社会福利提升；而当技术溢出效应较低时，产量补贴则更具优势。卢亚丽^[41]通过构建考虑下游企业产品研发投入的二级供应链博弈模型，研究证实当减排难度系数与价格弹性系数的乘积超过特定阈值时，政府实施产量补贴政策相较于技术补贴政策能显著提升社会福利水平。Lee 等^[42]则聚焦于部分私有化的双寡头垄断市场，研究结果表明，虽然产量补贴较技术补贴能带来更优的社会福利效果，但会促使政府倾向于将上市公司私有化。

2.3 消费者绿色信任

2.3.1 消费者绿色信任文献研究述评

消费者绿色信任是指消费者对企业的环保承诺、绿色产品的真实性以及企业社会责任履行情况的信任程度是影响绿色消费行为的关键因素。随着全球环境问题的日益严峻，消费者对绿色产品的关注度逐渐提升，绿色消费成为推动可持续发展的重要力量。然而，消费者在购买绿色产品时，往往面临信息不对称的问题，难以准确判断产品的环保属性，因此绿色信任的形成和维持显得尤为重要。绿色信任的形成依赖于企业的环保行为、信息透明度、第三方认证以及消费者的个人特征和社会舆论等多方面因素。企业的环保行为是绿色信任的核心，消费者通过企业的环保宣传、产品标签、第三方认证等信息来源，判断企业是否真正履行了环保承诺。如果企业能够提供透明、可信的环保信息，并通过实际行动证明其对环保的承诺，如减少碳排放、使用可再生能源等，消费者的信任度会显著提升。相反，如果企业存在“漂绿”行为，即通过虚假宣传夸大环保效果，消费者的信任度会大幅下降，甚至导致品牌形象的严重损害。此外，第三方认证和环保标签是消费者判断绿色产品真实性的重要依据，通过权威机构的认证，消费者可以更加信任产品的环保属性。

2.3.2 消费者绿色信任相关研究现状

在中国政府积极引导与政策支持下,国内企业逐步重视绿色品牌建设。然而,由于绿色低碳产品生产成本较高,部分企业出现了"漂绿"等虚假宣传行为。

现有文献中关于消费者绿色信任的实证研究较为丰富。Alamsyah 和 Febriani^[43]通过对 100 名曾在万隆自助零售店购买有机蔬菜的消费者进行调查,证实绿色品牌意识对消费者购买决策中的绿色信任具有直接影响。多数学者聚焦于绿色信任对购买意愿的影响机制: Wasaya 等^[44]研究发现绿色信任、绿色感知风险与绿色感知质量对绿色购买意愿具有显著预测作用,且环境意识在绿色购买意向与其预测因素之间发挥显著调节作用。盛光华和解芳^[45]研究表明,内控型心理控制源通过绿色信任对绿色购买意愿产生正向调节效应。Dhir 等^[46]基于 387 名日本消费者的截面数据分析,证实绿色信任、环境态度及标签满意度与绿色服装购买行为呈显著正相关。Ahmad 和 Zhang^[47]通过收集中国不同省份 1002 名受访者的问卷调查数据,发现电子服务质量、消费者社会责任、绿色信任及绿色感知价值对绿色购买意愿具有显著正向影响,而"漂绿"行为则对绿色购买意愿产生显著负向影响。部分学者探讨了绿色信任的中介作用: Suhartanto 等^[48]将绿色信任模型整合入绿色购买意愿模型,评估了年轻消费者对绿色塑料制品的再购买意愿。Li 等^[49]研究了环境价值观对绿色产品购买意愿的影响路径,证实绿色信任在环境关注与绿色产品购买意愿之间发挥正向调节作用。。

现有文献中较少有学者将绿色信任因素纳入供应链博弈模型进行研究。林强等^[50]基于消费者对绿色产品存在不完全信任的现实情境,构建了考虑区块链技术的绿色供应链博弈模型,深入探讨了在环境价值与经济价值双重目标下区块链技术应用的必要条件。曹裕等^[51]则聚焦于绿色供应链的环境标签策略选择问题,研究结果表明制造商与零售商的绿色努力水平与消费者绿色信任度呈正相关关系。

2.4 碳谎报行为

2.4.1 碳谎报行为文献研究述评

碳谎报是指企业在碳排放数据披露过程中，故意隐瞒、篡改或虚报碳排放信息的行为。这种行为通常源于企业为规避碳税、碳配额限制或其他监管压力，试图通过虚假信息获取经济利益或竞争优势。

碳谎报的动因主要包括经济利益驱动、监管压力和信息不对称。企业通过虚报或瞒报碳排放数据，可以减少碳税支出、规避碳配额限制，甚至获取额外的补贴或市场优势。然而，这种行为不仅损害了碳市场的公平性，还可能引发法律风险和声誉损失。研究表明，碳谎报行为不仅影响企业的财务绩效，还会对供应链整体绩效产生负面影响。

为应对碳谎报问题，学术界和政策制定者提出了多种治理对策。加强碳信息披露的透明度和监管力度是减少碳谎报的关键。例如，通过引入第三方认证、区块链技术等手段，可以提高碳排放数据的可信度和可追溯性。此外，完善碳税政策、碳配额分配机制以及加强企业社会责任意识，也是减少碳谎报的重要途径。总之，碳谎报是当前碳减排领域面临的重要挑战之一，需通过多方协作加以解决。

2.4.2 供应链中的碳谎报行为研究现状

随着全球碳减排目标的推进，碳谎报问题逐渐成为学术界和政策制定者关注的焦点。碳谎报不仅影响碳市场的公平性，还可能导致环境政策的失效。目前对碳谎报的研究现状如下：

杨磊等^[52]基于供应链模型的研究表明，零售商的碳谎报行为虽然能提高其自身利润，但会降低供应链整体绩效，因为碳谎报短期内可能为企业带来经济利益，但长期来看会损害企业的声誉和投资者信任。国外学者普遍认为，加强碳信息披露的透明度和监管力度是减少碳谎报的关键。例如，美国通过《上市企业气候风险披露指南》等法规，强制要求企业披露碳排放信息，有效提升了碳信息的可信度。国内对碳谎报的研究起步较晚，但近年来逐渐受到重视，国内学者从企业特征、制度环境、利益相关者压力等角度分析了碳谎报的成因。例如，刘景月等^[53]发现，企业内部治理结构和外部监管力度是影响碳信息披露质量的重要因

素。戈乐等^[54]发现,企业是否披露碳信息,与它自身的碳排放水平(高排放、低排放)、披露成本和披露后的社会影响有关。针对碳谎报问题,部分学者提出了完善碳信息披露制度、加强第三方认证、引入区块链技术等建议。例如,杨磊等^[55]提出通过收益共享契约协调供应链中的碳谎报行为,以提高碳信息的真实性和透明度;这种方案具有一定的合理性,具体情况要根据行业特性,例如:陈晓红^[56]等发现新能源汽车的零售商存在“搭便车”现象,制造商进行碳减排投资,零售商也能得到更多收益,因此,可以通过收益共享契约协调供应链,以达到减少制造商碳谎报的情况,并且 Hsueh^[57]提出了一种嵌入了社会责任的收益共享契约,这种契约能够激励企业履行社会责任。

第3章 碳税政策下考虑区块链技术的制造商碳谎报行为监管策略研究

3.1 问题描述与假设

3.1.1 问题描述

针对制造商的碳谎报行为，政府有两种方式抑制：严格监管和引导企业“上链”，严格监管就是政府制定严格的监管机制，以抑制制造商谎报碳信息，引导企业“上链”需要考虑碳税政策、监管机制和区块链成本问题，确定企业有足够的“上链”动机，因此本章要通过监管机制抑制制造商谎报碳信息或者引导企业“上链”。

本章在碳税政策和区块链技术下，考虑由一个制造商和一个零售商组成的二级供应链，制造商为供应链主导者，零售商为跟随者，政府投资建设区块链平台，供应链成员有偿使用区块链平台，制造商生产低碳产品，当供应链成员不使用区块链平台时，顾客绿色信任度为 b ，此时制造商对于减排结果可以选择谎报或者不谎报，若谎报，谎报的单位碳减排量 $e=ir$ ， i 为谎报系数，由于本文中制造商谎报的是单位碳减排量，而低报碳减排量对于制造商无任何好处，因此 $i \geq 1$ 。若 $i=1$ ，表示制造商未谎报；若 $i>1$ ，则表示制造商多报了碳减排量；谎报违反了相关法律法规，有被政府发现的可能性，若被发现，则受到政府惩罚；当供应链成员使用区块链平台时，顾客绿色信任度为 $b=1$ ，此时制造商无法谎报减排效果，顾客完全信任制造商提供的减排结果。

3.1.2 符号说明与假设

本章涉及的符号说明如表 3-1 所示：

表 3-1 符号说明

符号	含义	符号	含义
w	低碳产品批发价	k	碳减排技术投入成本系数, $k > 0$
p	低碳产品零售价	t	碳税税率
β	消费者低碳偏好, $\beta > 0$	a	低碳产品潜在市场需求
b	消费者绿色信任度 $0 < b \leq 1$	v	惩罚倍数
e_0	初始单位碳排放量	C	区块链总使用成本
τ	单位产品碳减排量	η	制造商承担的区块链总使用成本比例

假设条件如下:

假设 1 制造商和零售商关于市场的信息完全对称, 制造商的生产量和零售商的订货量与市场的需求量相等^[58];

假设 2 碳排放只产生于生产环节, 制造商的减排投资也是针对设备和工艺, 对产品单位生产成本无影响, 为了便于计算, 假设生产成本为 0;

假设 3 市场需求由市场潜在需求, 产品零售价, 碳减排量, 消费者低碳偏好和消费者信任度共同决定, 低碳产品市场需求 $D = a - p + b\beta i\tau$, i 为谎报系数, 制造商谎报减排量时, $i > 1$; 制造商不谎报减排量时, $i = 1$;

假设 4 参考文献姜跃等^[59]的减排成本设置方式, 本文的碳减排成本与制造商的单位碳减排量有关, 设置为 $\frac{1}{2}k\tau^2$;

假设 5 政府对制造商所上报的总碳排放量征收碳税, 在制造商不谎报单位碳排放量的情况下, 政府征收的总碳税税额为 $tD(e_0 - \tau)$; 在制造商谎报单位碳排放量的情况下, 政府征收的总碳税税额为 $tD(e_0 - i\tau)$ 。

3.2 未采用区块链技术的监管机制研究

供应链成员不使用区块链平台时, 制造商可以选择是否谎报实际单位碳减排量, 无论谎报与否, 消费者都无法完全相信制造商所公布的单位碳减排量, 此时, 消费者需求函数为: $D^{NN} = a - p + b\beta i\tau$, b 为消费者绿色信任度, 令 $b\beta = \mu$, μ 为消费者信任度和消费者低碳偏好共同决定的系数。

3.2.1 制造商不谎报下的减排模型（NN 模型）

制造商不谎报时，谎报系数 $i=1$ ， $D^{NN} = a - p + \mu\tau$ ，此时不存在政府惩罚，因此制造商的利润函数为：

$$\pi_m^{NN} = wD^{NN} - \frac{1}{2}k\tau^2 - tD^{NN}(e_0 - \tau) \quad (3.1)$$

零售商的利润函数为：

$$\pi_r^{NN} = (p - w) D^{NN} \quad (3.2)$$

命题 3-1 在 NN 模型中，存在最优的批发价 w^{NN*} ，最优零售价 p^{NN*} 和最优目标单位碳减排量 τ^{NN*} 使得制造商和零售商的收益最大化。

最优批发价：

$$w^{NN*} = \frac{a(2k - t(t + \mu)) - t(-2k + \mu(t + \mu))e_0}{4k - (t + \mu)^2} \quad (3.3)$$

最优零售价：

$$p^{NN*} = \frac{a(3k - t(t + \mu)) + te_0(k - \mu(t + \mu))}{4k - (t + \mu)^2} \quad (3.4)$$

最优目标单位碳减排量：

$$\tau^{NN*} = \frac{(t + \mu)(a - te_0)}{4k - (t + \mu)^2} \quad (3.5)$$

制造商最优利润：

$$\pi_m^{NN*} = \frac{k(a - te_0)^2}{8k - 2(t + \mu)^2} \quad (3.6)$$

零售商最优利润：

$$\pi_r^{NN*} = \frac{k^2(a - te_0)^2}{(4k - (t + \mu)^2)^2} \quad (3.7)$$

证明见附录 1。

推论 3-1 在制造商不谎报且不引入区块链的情况下，(1) 当 $e_0 < \frac{a(4k + (t + \mu)^2)}{4k(2t + \mu) - \mu(t + \mu)^2}$ 时， $\frac{\partial \tau}{\partial t} > 0$ ；(2) 当 $e_0 > \frac{a(4k + (t + \mu)^2)}{4k(2t + \mu) - \mu(t + \mu)^2}$ 时， $\frac{\partial \tau}{\partial t} < 0$ 。

证明见附录 2。

由推论 3-1 可知，随着碳税税率的增加，低排放制造商会增加减排投入，高排放制造商会减少减排投入，这是由于随着减排水平的提高，减排成本呈指数增

加，而收益增加有限，低排放制造商增加减排投入，能够获得更多的收益，而高排放制造商减排所带来的减排成本大于收益，此时随着碳税的增加，低排放制造商能够通过减排来降低碳税成本，而高排放制造商无法通过增加减排水平来获得更大的利润。

推论 3-2 在制造商不谎报且不引入区块链的情况下，(1)当 $e_0 < \frac{a(t+\mu)}{4k-\mu(t+\mu)}$ 时， $\frac{\partial \pi_m^{NN*}}{\partial t} > 0$ ；(2)当 $e_0 > \frac{a(t+\mu)}{4k-\mu(t+\mu)}$ 时， $\frac{\partial \pi_m^{NN*}}{\partial t} < 0$ 。

证明见附录 3。

推论 3-2 表明制造商不引入区块链且不谎报的情况下，低排放制造商的利润会随着碳税税率的增加而减少，高排放制造商的利润会随着碳税税率的增加而增加，这是由于随着减排水平的增加，减排成本呈指数增加，而需求量的增加是线性的，因此低排放企业可以以较小的代价获得较大的收益，但对于高排放企业，此时减排所带来的收益小于成本，因此利润会逐渐下降。据此，高排放企业在引入区块链的情况下，有动机谎报减排水平。

推论 3-3 在制造商不谎报且不引入区块链的情形下，(1)当 $e_0 < \frac{2a(t+\mu)}{4k+t^2-\mu^2}$ 时， $\frac{\partial \pi_r^{NN*}}{\partial t} > 0$ ；(2)当 $e_0 > \frac{2a(t+\mu)}{4k+t^2-\mu^2}$ 时， $\frac{\partial \pi_r^{NN*}}{\partial t} < 0$ 。

证明见附录 4。

推论 3-3 表明低排放制造商所在供应链的零售商利润随着碳税的增加而增加，高排放制造商所在供应链的零售商利润随着碳税增加而减少，这是由于随着碳税的增加，低排放制造商会选择减排以降低碳税成本，而减排会增加需求量，零售商利润随之增加，而高排放企业的减排量随着碳税增加会逐渐减少，即减排水平会下降，需求量随之减少，零售商利润下降。

3.2.2 制造商谎报下的减排模型(NC 模型)

制造商谎报时，谎报系数 $i \neq 1$ ，有被政府发现的风险，概率为 $\lambda(0 < \lambda < 1)$ ，一旦被发现，将会被 $v(v > 1)$ 倍罚谎报部分的碳税，此时需求函数为 $D^{NC} = a - p + b\beta i \tau$ ，制造商未被发现谎报减排量时的利润函数为：

$$\pi_m^{NC(1)} = wD^{NC} - \frac{1}{2}k\tau^2 - tD^{NC}(e_0 - i\tau) \quad (3.8)$$

制造商被发现谎报减排量时的利润函数：

$$\pi_m^{NC(2)} = wD^{NC} - \frac{1}{2}k\tau^2 - tD^{NC}(e_0 - i\tau + (i-1)v\tau) \quad (3.9)$$

制造商被发现谎报的概率为 λ ，则制造商的期望利润函数为：

$$\begin{aligned} E(\pi_m^{NC}) &= (1-\lambda)\pi_m^{NC(1)} + \lambda\pi_m^{NC(2)} \\ &= wD^{NC} - \frac{1}{2}k\tau^2 - tD^{NC}(e_0 - i\tau + (i-1)\lambda v\tau) \end{aligned} \quad (3.10)$$

零售商的利润函数为：

$$\pi_r^{NC} = (p-w)D^{NC} \quad (3.11)$$

命题 3-2 在 NC 模型中，存在最优的批发价 w^{NC*} ，最优零售价 p^{NC*} 和最优目标单位碳减排量 τ^{NC*} ，使得制造商和零售商的利润最大化。

最优批发价：

$$w^{NC*} = \frac{a(2k + t(i(1-i)v\lambda)(-tv\lambda + i(t-tv\lambda - \mu))) + te_0(2k - i\mu(tv\lambda + i(t-tv\lambda + \mu)))}{4k - (tv\lambda + i(t-tv\lambda + \mu))^2} \quad (3.12)$$

最优零售价：

$$p^{NC*} = \frac{te_0(k - i\mu(tv\lambda + i(t-tv\lambda + \mu))) - a(3k + t(i + (1-i)v\lambda)(tv\lambda + i(t-tv\lambda + \mu)))}{4k - (tv\lambda + i(t-tv\lambda + \mu))^2} \quad (3.13)$$

最优目标单位碳减排量：

$$\tau^{NC*} = \frac{(tv\lambda + i(t-tv\lambda + \mu))(a - te_0)}{4k - (tv\lambda + i(t-tv\lambda + \mu))^2} \quad (3.14)$$

制造商最优利润：

$$\pi_m^{NC*} = \frac{k(a - te_0)^2}{2(4k - (tv\lambda + i(t-tv\lambda + \mu))^2)} \quad (3.15)$$

零售商最优利润：

$$\pi_r^{NC*} = \frac{k^2(a - te_0)^2}{(4k - (tv\lambda + i(t-tv\lambda + \mu))^2)^2} \quad (3.16)$$

证明见附录 5。

推论 3-4 在制造商谎报情形下，(1)当 $1 < v < \frac{i(t+\mu)}{(i-1)t\lambda}$ 时， $\frac{\partial \pi_m^{NC*}}{\partial v} > 0$ ， $\frac{\partial \pi_r^{NC*}}{\partial v} < 0$ ；

$$(2) \text{当 } v > \frac{i(t+\mu)}{(i-1)t\lambda} \text{ 时, } \frac{\partial \pi_m^{NC*}}{\partial v} < 0, \frac{\partial \pi_r^{NC*}}{\partial v} > 0。$$

证明见附录 6。

推论 3-4 表明在制造商谎报情形下，当政府惩罚倍数较小时，制造商的利润会随着惩罚倍数的增加而增加，零售商的利润会随着惩罚倍数的增加而减少；当政府惩罚倍数较大时，制造商利润会随着惩罚倍数的增加而减少，零售商利润会随着惩罚倍数的增加而增加；说明惩罚机制能有效约束企业的谎报行为。

3.2.3 NN 模型和 NC 模型下的利润比较

为了探究政府是否能够通过碳税和监管机制引导企业诚信经营，本小节比较了 NN 模型和 NC 模型下制造商利润的大小关系，以此作为判断制造商和零售商谎报决策的依据，同时找到碳税、监管力度与惩罚力度之间呈现怎样的关系时，制造商还会选择诚信经营；此外，本小节还比较了 NN 模型和 NC 模型下零售商利润的大小关系，探究零售商受到制造商谎报的影响，同时确定零售商在什么情况下有动机“上链”。

推论 3-5 (1) 当 $\frac{t+\mu}{t\lambda} < v < \frac{(1+i)(t+\mu)}{(i-1)t\lambda}$ 时, $\pi_m^{NN*} > \pi_m^{NC*}$; (2) 当 $1 < v < \frac{t+\mu}{t\lambda}$ 或 $\frac{(1+i)(t+\mu)}{(i-1)t\lambda} < v < \frac{2\sqrt{k}+i(t+\mu)}{(i-1)t\lambda}$ 时, $\pi_m^{NN*} < \pi_m^{NC*}$ 。

证明见附录 7。

推论 3-5 说明存在一个惩罚倍数区间，使得企业在不使用区块链的条件下，仍不会谎报碳减排量，而这个惩罚倍数的区间与碳税，政府监管力度成反比，与消费者信任度和消费者低碳偏好成正比，因此对于政府而言，可以通过调节惩罚倍数，碳税和政府监管力度来鼓励企业诚信经营。

$$\text{当 } \frac{t+\mu}{t\lambda} < v < \frac{(1+i)(t+\mu)}{(i-1)t\lambda}, \text{ 时, } 0 < \tau < \frac{i(t-K+\mu)(a-te_0)}{4k-(K+i(t-K+\mu))^2}, \text{ 政府通过监管机}$$

制迫使企业诚信经营时，最优碳减排量受到了抑制，制造商为了保证利润最大化，降低了碳减排水平，所以通过监管机制能够迫使制造商不谎报，但同时制造商的碳减排水平下降，这并不完全符合政府的目标。很显然，制造商降低碳减排水平是因为在政府严苛的监管机制下，制造商无法达到预期的最优碳减排水平，同时

无法通过谎报满足这个目标，于是制造商只能降低碳减排水平，以保证利润进一步受损，制造商存在减排压力。

推论 3-6 (1) 当 $\frac{t+\mu}{t\lambda} < v < \frac{(1+i)(t+\mu)}{(i-1)t\lambda}$ 时， $\pi_r^{NN*} > \pi_r^{NC*}$ ；(2) 当 $1 < v < \frac{t+\mu}{t\lambda}$ 或 $\frac{(1+i)(t+\mu)}{(i-1)t\lambda} < v < \frac{2\sqrt{k}+i(t+\mu)}{(i-1)t\lambda}$ 时， $\pi_r^{NN*} < \pi_r^{NC*}$ 。

证明见附录 8。

推论 3-6 说明存在一个惩罚倍数区间，使得企业在不使用区块链的条件下，仍不会谎报碳减排量，而这个惩罚倍数的区间与碳税，政府监管力度成反比，与消费者信任度和消费者低碳偏好成正比，因此对于政府而言，可以通过调节惩罚倍数，碳税和政府监管力度来鼓励企业诚信经营。

通过比较 NN 模型和 NC 模型下制造商利润和零售商利润可以得到：惩罚倍数和监管力度是在理论上作用相同的两个方面，两者确实存在一个合理的范围，引导企业不谎报，但是这个范围难以确定，监管力度过小，监管不到位，不足以警示企业；监管力度过大，监管成本太大，得不偿失；惩罚倍数过小，惩罚机制没有作用；惩罚倍数过大，企业一旦选择谎报，就会增加谎报比例；所以政府需要慎重制定惩罚倍数和监管力度。对于企业来说，根据政策制定自己的定价和减排策略。值得注意的是，此时政府制定的监管和惩罚机制只能作用于企业的碳排放量，即政府所投入的这部分成本只能约束企业的碳谎报行为；对于企业，消费者此时仍然无法完全信任其产品的碳减排量；所以无论是政府还是企业，都有动机引入区块链，供应链企业一旦上链，政府不但能监督企业的碳排放行为，还能监管企业的其他生产行为，并且由于区块链的可追溯性，这种监管是强有力的；对于企业来说，一旦上链，消费者能够完全信任自己的产品，不仅仅是产品的碳减排量，还有自己公布的其他产品信息，从而增加需求量。因此，本文继续研究了供应链引入区块链后，供应链企业的减排决策。

3.3 采用区块链技术的监管机制研究(Y 模型)

供应链成员使用区块链平台时，制造商无法谎报实际单位碳减排量，区块链的总使用费用为 C ，制造商和零售商共同承担区块链使用费，制造商承担的比例

为 η ，此时消费者完全信任制造商所公布的单位减排量，消费者绿色信任度 $b=1$ ，此时，需求函数为： $D^Y = a - p + \beta\tau$ ，制造商的利润函数为：

$$\pi_m^Y = wD^Y - \frac{1}{2}k\tau^2 - tD^Y(e_0 - \tau) - \eta C \quad (3.17)$$

零售商的利润函数为：

$$\pi_r^Y = (p - w)D^Y - (1 - \eta)C \quad (3.18)$$

命题 3-3 在 Y 模型中，存在最优批发价 w^{Y*} 、最优零售价 p^{Y*} 和最优目标单位碳减排量 τ^{Y*} ，使得制造商和零售商的利润最大化。

最优批发价：

$$w^{Y*} = \frac{a(2k - t(t + \beta)) + te_0(2k - \beta(t + \beta))}{4k - (t + \beta)^2} \quad (3.19)$$

最优零售价：

$$p^{Y*} = \frac{a(3k - t(t + \beta)) + te_0(k - \beta(t + \beta))}{4k - (t + \beta)^2} \quad (3.20)$$

最优目标单位碳减排量：

$$\tau = \frac{(t + \beta)(a - te_0)}{4k - (t + \beta)^2} \quad (3.21)$$

制造商最优利润：

$$\pi_m^{Y*} = \frac{a^2k - 2C\eta(4k - (t + \beta)^2) - kte_0(2a - te_0)}{8k - 2(t + \beta)^2} \quad (3.22)$$

零售商最优利润：

$$\pi_r^{Y*} = \frac{a^2k^2 - C(4k - (t + \beta)^2)^2(1 - \eta) - k^2te_0(2a - te_0)}{(4k - (t + \beta)^2)^2} \quad (3.23)$$

证明见附录 9。

由于 Y 模型使用区块链技术需要承担区块链的使用费用 C ，所以区块链使用费用 C 存在一个阈值 $C_{\max}$ ，当区块链使用费大于 $C_{\max}$ 时，制造商不会使用区块链，反之，则会使用区块链，同理，对于零售商也是相同的决策。经计算可得下列关系：

$$\eta C_{\max} = \frac{k(\beta - \mu)(2t + \beta + \mu)(-a + te_0)^2}{2(4k - (t + \beta)^2)(4k - (t + \mu)^2)} \quad (3.24)$$

$$(1 - \eta)C_{\max} = \frac{k^2(\beta - \mu)(2t + \beta + \mu)(4k - (t + \beta)^2 + 4k - (t + \mu)^2)(-a + te_0)^2}{(4k - (t + \beta)^2)^2(4k - (t + \mu)^2)^2} \quad (3.25)$$

根据式(3.24)和式(3.25)可得：

$$C_{\max} = \frac{k(\beta - \mu)(2t + \beta + \mu)(-a + te_0)^2}{2\eta(4k - (t + \beta)^2)(4k - (t + \mu)^2)} \quad (3.26)$$

$$\frac{1-\eta}{\eta} = k(4k - (t + \beta)^2 + 4k - (t + \mu)^2) \quad (3.27)$$

当区块链的总使用费用高于或等于阈值 $C_{\max}$ 时，企业不会采用区块链技术；当区块链的总使用费用略低于 $C_{\max}$ 时，存在一个最优的承担比例 $k(4k - (t + \beta)^2 + 4k - (t + \mu)^2)$ ，制造商和零售商以此比例承担区块链总使用费用，双方会达成一致，采用区块链技术；当区块链的总使用费用远低于 $C_{\max}$ 时，制造商和零售商一定会采用区块链技术。阈值 $C_{\max}$ 的大小与多方面因素有关，对于政府而言，只能通过调节碳税来改变 $C_{\max}$ 的大小，其他的参数都是由市场和科学技术决定的，短时间内无法改变，因此，能够有效影响企业是否采用区块链技术决策的因素只有政府的碳税税率，因此，政府想要引导企业使用区块链，可以通过调节碳税税率以达到目的。

3.4 算例分析

为了更加直观的说明在引入和不引入区块链技术两种情况下，政府碳税、惩罚倍数和监管力度对供应链决策的影响，本小节运用 Matlab 对部分结论进行算例分析。假设 $a=300$ ， $\mu=b\beta$ ， $k=25$ ， $b=0.5$ ， $\beta=2$ ， $e_0=20$ ，分析最优单位碳减排量和供应链成员最优利润的变化规律，推出不同情形下供应链的最优决策，分析政府如何调整政策引导企业，使得碳减排量增加的同时，企业能够诚信经营。

3.4.1 最优单位碳减排量分析

NN 模型与 Y 模型中，能够影响单位产品碳减排量的因素中，政府可以调节的只有碳税税率，因此，在研究这两个模型中的最优单位减排量时，只考虑碳税税率对最优碳减排量的影响，结果如图 3-1，在满足存在最优单位碳减排量的情况下，最优碳减排量会随着碳税税率的增加而增加，并且 Y 模型总大于 NN 模型的最优碳减排量，这说明不谎报情形下，引入区块链有利于碳减排目标。

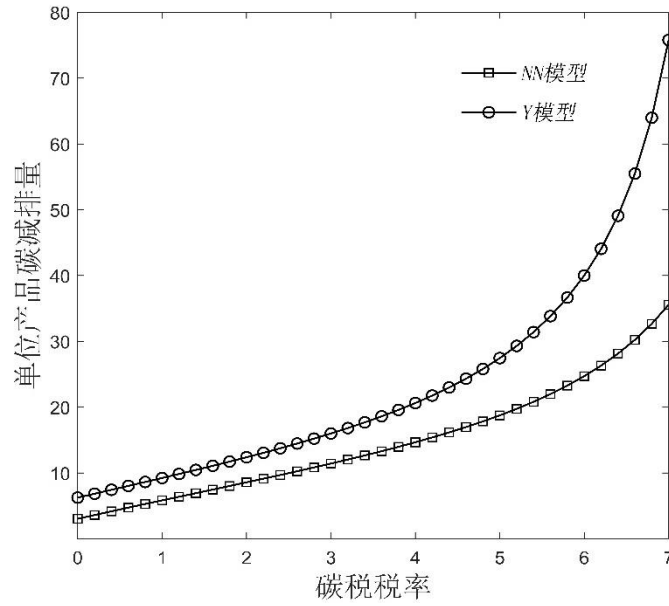


图 3-1 碳税税率对单位产品碳减排量的影响

在 NC 模型中，最优单位碳减排量的变化受到碳税，碳谎报系数，惩罚倍数和监管力度，根据这几个参数之间的作用关系可以得到：惩罚倍数和监管力度是作用的相同的两个方面，由于本文没有考虑监管成本，并且重点在于研究企业谎报对于供应链的影响，所以在研究 NC 模型时，我们重点研究谎报系数对最优碳减排量的影响。于是假设 $t=5$ ， $\lambda=0.5$ ，参考欧盟 2023 年 10 月 1 日起实施的欧盟碳边境调节机制($CBAM$)和 2024 年 1 月 5 日国务院签署的《碳排放权交易管理暂行条例》， $CBAM$ 规定碳谎报行为的处罚是 3 倍的谎报部分的碳税，《碳排放权交易管理暂行条例》的碳谎报行为处罚较为复杂，但是经济方面的处罚主要部分是 5 倍以上，10 倍以下的违法所得（以碳市场上的碳排放权价格为标准计算谎报部分的碳排放权总值），分别研究当 $v=2$ ， $v=4$ 和 $v=6$ 时，制造商谎报系数对最优碳减排量的影响。

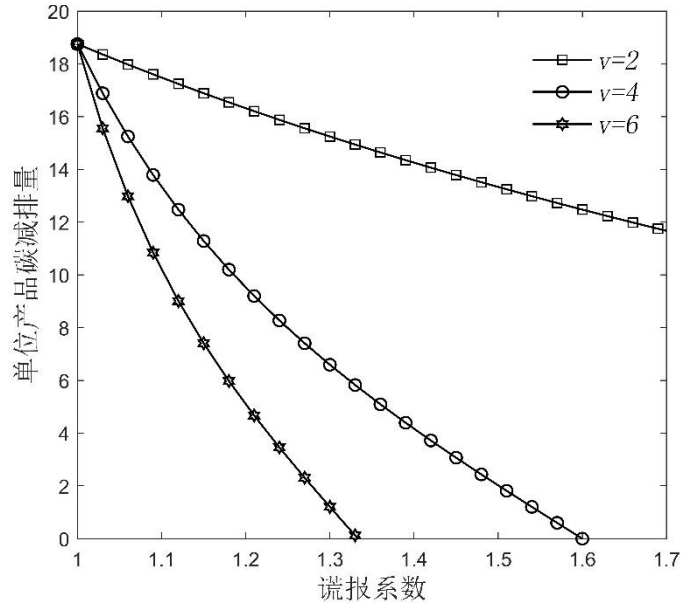


图 3-2 不同惩罚力度下单位产品碳减排量受到谎报系数的影响

图 3-2 表明，政府的惩罚力度越大，企业越消极减排，当惩罚惩罚力度足够大时，制造商不会谎报减排量，但是仍会消极减排，这对于政府实现减排目标不利，根据后面对不同惩罚倍数下制造商最优利润的分析，惩罚力度过大时，企业理论上可以通过将谎报系数增加到一定水平，使得最优利润增加，这对于政府实现引导企业不谎报的目标也是不利的，因此，政府在制定惩罚倍数时，存在一个合适的区间，使得企业积极减排，不过此时企业仍会谎报碳减排量，因此政府通过惩罚机制完成了碳减排目标，无法保证企业不谎报碳减排量。

3.4.2 最优利润分析

NN 模型与 Y 模型中，能够影响制造商最优利润的因素中，政府可以调节的只有碳税税率，因此，在研究这两个模型中的最优利润时，只考虑碳税税率对制造商最优利润的影响，结果如图 3-3，在满足存在最优利润的情况下，最优利润会随着碳税税率的增加先减少后增加，其原因是碳税较小时，企业的减排量有限，随着碳税的增加，迫使企业增加减排量此时碳税所带来的利润大于减排成本，所以最优利润增加，但是总体上 Y 模型下的制造商最优利润始终大于 NN 模型下的制造商最优利润，因此从最优利润的角度，制造商有动机引入区块链。

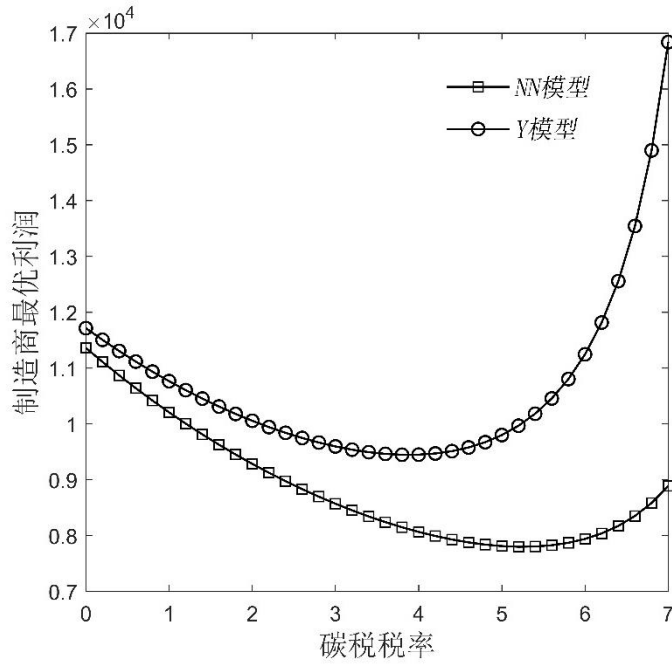


图 3-3 碳税税率对制造商最优利润的影响

在 NC 模型中，制造商最优利润的变化受到碳税，碳谎报系数，惩罚倍数和监管力度，根据这几个参数之间的作用关系可以得到：惩罚倍数和监管力度是作用的相同的两个方面，由于本文没有考虑监管成本，并且重点在于研究企业谎报对于供应链的影响，所以在研究 NC 模型时，我们重点研究谎报系数对最优碳减排量的影响，同上文中参数设置相同，假设 $t=5$ ， $\lambda=0.5$ ，分别研究当 $v=2$ ， $v=4$ 和 $v=6$ 时，制造商谎报系数对最优碳减排量的影响。

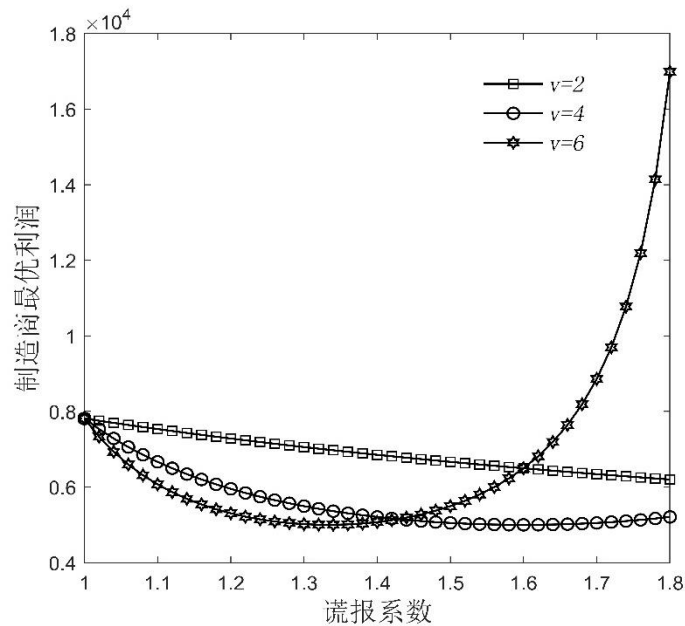


图 3-4 不同惩罚倍数下谎报系数对制造商最优利润的影响

图 3-4 表明,当惩罚倍数较小时,制造商的利润会随着谎报系数的增加而减少,这说明惩罚机制的存在能够有效约束制造商的谎报行为,但是当惩罚倍数过大时,制造商可以通过增加谎报系数到一定水平,以此增加最优利润,而且合适的惩罚倍数使得企业谎报时,最优利润会下降,企业有动机引入区块链,这表明,政府可以通过调节碳税并制定有效的惩罚机制引导企业“上链”。

对于零售商最优利润的分析,与上述分析内容相同,首先对比 NN 与 Y 模型中碳税税率对于零售商利润的影响,结果如图 3-5,随着碳税税率的增加,零售商最优利润先减少后增加,其原因与制造商的最优利润变化原因一致,并且总体上也是“上链”后的零售商利润大于“不上链”的零售商利润,因此零售商也有动机引入区块链。

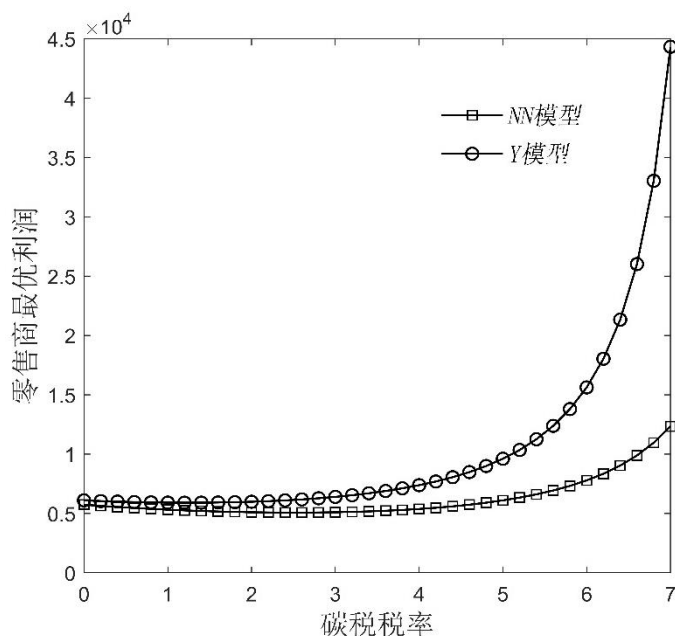


图 3-5 碳税税率对零售商最优利润的影响

综上所述,制造商和零售商都有动机引入区块链,前提是政府制定合适的碳税以及惩罚机制,引导企业不谎报,在企业无法谎报的情况,“上链”是最优决策,而根据推论 3-5,推论 3-6 和对供应链成员最优利润的算例分析,政府能够制定这样的碳税政策和惩罚机制,迫使企业不谎报,进而引导企业“上链”。

3.5 本章小结

本章针对碳税和监管机制下由单一制造商与单一零售商组成的二级低碳供应链,构建制造商主导的 $stackelberg$ 博弈模型,运用逆向归纳法求得制造商最优

减排决策，通过比较制造商谎报、不谎报和引入区块链三种情况下的制造商利润变化，从政府角度出发，得出以下结论：

（1）惩罚力度和监管力度是政府监管机制中迫使企业诚信经营的两个影响因素，对企业来说，惩罚力度过小或者过大都会选择谎报单位碳减排量，即政府对于企业谎报行为的惩罚力度存在一个合理的区间，迫使企业不谎报。

（2）政府可以通过调节碳税、监管机制和分担部分区块链成本的方式引导企业“上链”。

（3）从政府角度看，引导企业“上链”，不仅能够监管企业的碳信息，还能监管企业所有需要披露的信息，对于政府来说，这是一举多得的决策。

（4）在政府政策引导下，制造商和零售商都有动机“上链”，并且“上链”后的利润优于“上链”前的利润，。

（5）企业是否选择“上链”，存在一个“上链”成本的阈值，这个成本由制造商和零售商共同承担，对于零售商来说，“上链”能够增加它的利润，但是增幅有限，因此，它的承担比例有限，一旦制造商的“上链”成本超过这个阈值，企业不会选择“上链”，如果政府希望企业“上链”，可以分担部分区块链成本。

（6）政府严格监管或企业“上链”后，制造商的单位产品碳减排量下降，这并不完全符合政府的目标，因此政府需要激励企业增加减排投资。

综上所述，政府能够通过碳税政策与监管机制抑制企业谎报碳信息，进而“上链”，但是“上链”后的利润小于“上链”前谎报的利润，所以政府需要制定严格的碳税政策和监管机制抑制企业谎报碳信息，进而引导企业“上链”，在现实政策制定时，很难把握碳税的制定范围以及监管力度和惩罚力度的设定，因此，给予企业一定的“上链”补贴或许能够缓解企业的区块链成本压力。并且政府严格监管或者企业“上链”后，制造商减排积极性下降，因此，下面的章节将政府补贴引入模型，探究补贴政策是否能够有效激励企业增加减排投资。

第 4 章 碳税政策下考虑区块链技术的减排技术补贴策略研究

4.1 问题描述与假设

4.1.1 问题描述

根据第 3 章的研究结论，政府可以通过调节碳税、惩罚力度和监管力度，引导企业诚信经营，但是企业的减排压力增加，导致企业的减排积极性严重下降，严格监管时的减排量小于宽松监管时的减排量，这并不完全符合政府的目标，应当明确政府的两个目标：(1)遏制企业谎报碳信息；(2)提高企业的减排积极性，完成社会减排目标。因此，本章引入技术补贴政策，希望通过技术补贴激励企业增加减排投资，同时实现政府的两个目标。

本章构建一个由单一制造商和单一零售商组成的二级供应链，制造商为主导者，零售商为跟随者，制造商通过技术改进实现碳减排，制造商可选择是否应用区块链，区块链平台由政府建设， G 是区块链平台的建设总成本， N 为区块链平台使用周期，区块链平台的单周期成本为 G/N 。制造商可以应用区块链技术，也可以不应用区块链技术，制造商一旦应用区块链技术，消费者能够完全信任制造商所公布的碳减排结果，即消费者绿色信任度 $b=1$ ，若不应用区块链技术，消费者对制造商所公布的碳减排结果不完全信任，即 $0 < b < 1$ ，政府有相应的监管和惩罚机制，政府的监管力度用 $\lambda(0 < \lambda < 1)$ ，制造商一旦被发现谎报，要缴纳数额 s (依据相关法律法规数额)的罚款， s 与第 3 章罚款数额大小相同，制造商的谎报系数为 $i(i \geq 1)$ ，谎报的是单位产品碳减排量，政府对于企业的碳减排行为进行技术补贴。

4.1.2 符号说明与假设

本章涉及的符号说明如表 4-1 所示：

表 4-2 符号说明

符号	含义	符号	含义
a	潜在市场需求	θ	技术补贴系数 ($0 \leq \theta < 1$)
t	碳税税率	b	消费者绿色信任度 ($0 < b \leq 1$)
w	低碳产品批发价	β	消费者低碳偏好
p	低碳产品零售价	λ	政府监管力度 ($0 < \lambda < 1$)
e_0	单位产品初始碳排放量	s	碳谎报单位惩罚金
τ	单位产品碳减排量	k	碳减排成本系数

本章的模型假设如下：

假设 1 制造商和零售商关于市场信息完全对称，制造商生产低碳产品产量与市场需求量相等^[60]。

假设 2 碳排放只产生于生产环节，制造商的减排投资也是针对设备和工艺，对产品单位生产成本无影响，设生产成本为 0，参考文献 Wang 等^[61]人的减排成本设置方式，减排成本为 $\frac{1}{2}k\tau^2$ 。

假设 3 政府针对制造商所上报的总碳排放量征收碳税，政府征收的碳税税额为 $tq(e_0 - i\tau)$ 。

假设 4 市场需求由市场潜在需求，产品零售价，碳减排量，消费者低碳偏好和消费者信任度共同决定，低碳产品市场需求 $D = a - p + b\beta i\tau$ ， i 为谎报系数，制造商谎报减排量时， $i > 1$ ；制造商不谎报减排量时， $i = 1$ 。

假设 5 政府的收益为社会福利，包括生产者剩余、消费者剩余、环境改善以及政府财政支出，生产者剩余为供应链总利润，消费者剩余为 $CS = \int_p^{\hat{p}} Ddp = \frac{D^2}{2}$ ， $\hat{p}$ 为消费者愿意支付的最高价格，即产品需求为 0 时的价格，政府支出为财政补贴、监管成本及区块链建设成本支出等，环境改善为 τDt ，表示总的环境改善程度^[3]。

4.2 未采用区块链技术的减排技术补贴模型(NT 模型)

未采用区块链时，制造商有可能谎报碳减排量，谎报系数 $i \geq 1$ ，其制造商的谎报行为有概率 λ 被发现，若被发现，将被处以惩罚金 s 的罚款；产品的社会需

求函数为： $D^{NT} = a - p + b\beta i\tau$ ；社会福利包括生产者剩余、消费者剩余、财政补贴支出、环境改善。

制造商不谎报或者谎报行为未被发现时的利润函数为：

$$\pi_m^{NT(1)} = (w - c)D - \frac{1}{2}(1 - \theta)k\tau^2 - (e_0 - i\tau)D^{NT}t \quad (4.1)$$

制造商谎报且被发现时的利润函数为：

$$\pi_m^{NT(2)} = (w - c)D - \frac{1}{2}(1 - \theta)k\tau^2 - (e_0 - i\tau)D^{NT}t - \lambda s \quad (4.2)$$

于是，制造商的期望利润函数为：

$$\begin{aligned} \pi_m^{NT} &= (1 - \lambda)\pi_m^{NT(1)} + \lambda\pi_m^{NT(2)} \\ &= (w - c)D - \frac{1}{2}(1 - \theta)k\tau^2 - (e_0 - i\tau)D^{NT}t - \lambda s \end{aligned} \quad (4.3)$$

零售商的利润函数为：

$$\pi_r^{NT} = (p - w)D^{NT} \quad (4.4)$$

社会福利为：

$$\begin{aligned} \pi_g^{NT} &= \pi_m^{NT} + \pi_r^{NT} + CS + EB - GS \\ &= (p - c)D^{NT} - \frac{1}{2}k\tau^2 + \frac{D^{NT2}}{2} + \tau D^{NT} \end{aligned} \quad (4.5)$$

命题 4-1 NT 模型中存在最优批发价 w^{NT*} ，最优零售价 p^{NT*} ，最优单位碳减排量 τ^{NT*} ，使得制造商利润，零售商利润和社会福利最大化。

最优批发价：

$$w^{NT*} = \frac{b^2 i^2 \beta^2 (c - it + te_0) + 2B(a + c - it + te_0)k}{b^2 i^2 \beta^2 + 4Bk} \quad (4.6)$$

最优零售价：

$$p^{NT*} = \frac{b^2 i^2 \beta^2 (c - it + te_0) + B(3a + c - it + te_0)k}{b^2 i^2 \beta^2 + 4Bk} \quad (4.7)$$

最优单位减排量：

$$\tau^{NT*} = -\frac{bi\beta A}{b^2 i^2 \beta^2 + 4Bk} \quad (4.8)$$

制造商最优利润：

$$\pi_m^{NT*} = \frac{-2b^2 i^2 s \beta^2 \lambda + B((a - c + it)^2 - 8s\lambda + te_0(-2(a - c + it) + te_0))k}{2b^2 i^2 \beta^2 + 8Bk} \quad (4.9)$$

零售商最优利润：

$$\pi_r^{NT*} = \frac{B^2 A^2 k^2}{(b^2 i^2 \beta^2 + 4Bk)^2} \quad (4.10)$$

最优社会福利：

$$\pi_g^{NT*} = -\frac{Ak_1(bi\beta(aX - cX + it(2B + bi\beta(-1 + 2\theta)) + t(2 + bi\beta(1 - 2\theta) - 2\theta)e_0) - B^2(7a - 7c - it + te_0)k)}{2(b^2 i^2 \beta^2 + 4Bk)^2} \quad (4.11)$$

其中， $A = a - c + it - te_0$ ， $B = -1 + \theta$ ， $X = -2 + bi\beta + 2\theta$ 。

证明见附录 10。

推论 4-1 NT 模型中，(1) $\frac{\partial \pi_m^{NT*}}{\partial t} < 0$ ， $\frac{\partial \pi_m^{NT*}}{\partial \theta} > 0$ ， $\frac{\partial \pi_r^{NT*}}{\partial \theta} > 0$ ；(2) 当 $e_0 > i$ 时， $\frac{\partial \pi_r^{NT*}}{\partial t} > 0$ ；当 $e_0 < i$ 时， $\frac{\partial \pi_r^{NT*}}{\partial t} < 0$ ；(3) 当 $e_0 > i$ 时， $\frac{\partial \tau^{NT*}}{\partial t} < 0$ ；(3) 当 $e_0 < i$ 时， $\frac{\partial \tau^{NT*}}{\partial t} > 0$ 。

证明见附录 11。

在 NT 模型中，制造商利润随着碳税的增加而减小，随着政府技术补贴比例的增加而增大；碳税税率对于零售商利润的影响存在一个阈值，当单位产品初始碳排放量大于制造商谎报系数时，制造商利润随着碳税税率增加而增大；当单位产品初始碳排放量小于制造商谎报系数时，制造商利润随着碳税税率增加而减少；此时政府碳税税率和补贴政策对于制造商利润的影响是最直接的，政府的补贴能够有效激励制造商进行减排投资，同时碳税税率的增加会导致制造商利润减少。碳税税率对于制造商单位产品减排量的影响存在一个阈值，当单位产品初始碳排放量大于谎报系数时，单位产品减排量随着碳税的增加而减小；当单位产品初始碳排放量小于谎报系数时，单位产品减排量随着碳税的增加而增大；其原因是：当单位产品初始碳排放量较大时，相同的减排投资水平，减排量所占减排比例较小，一旦碳税税率增加，制造商利润下降，为了维持利润，制造商更倾向于通过增加谎报系数；当单位产品初始碳排放量较小时，相同的减排投资水平，减排量所占减排比例较大，一旦政府增加碳税税率，为了维持利润，制造商更倾向于增加减排水平。

推论 4-2 NT 模型中，(1) 当 $0 < e_0 < \frac{a-c}{t} - \frac{4(-1+\theta)k}{b^2 i \beta^2}$ 时， $\frac{\partial \pi_m^{NT*}}{\partial i} > 0$ ；(2) 当 $e_0 > \frac{a-c}{t} - \frac{4(-1+\theta)k}{b^2 i \beta^2}$ 时， $\frac{\partial \pi_m^{NT*}}{\partial i} < 0$ 。

证明见附录 12。

在 NT 模型中，单位产品初始碳排放量存在一个阈值，当单位产品初始碳排放量小于这个阈值时，制造商利润随着谎报系数的增加而增加；当单位产品初始碳排放量大于这个阈值时，制造商利润随着谎报系数的增加而减少；其原因是：当单位产品初始碳排放量小于这个阈值时，可将制造商视为低排放企业，谎报所带来的期望收益大于期望处罚金，因此制造商利润会随着谎报系数的增加而增大；当单位产品初始碳排放量大于这个阈值时，可将制造商视为高排放企业，谎报所带来的期望收益小于于期望处罚金，因此制造商利润会随着谎报系数的增加而减小。

推论 4-3 NT 模型中，(1)当 $0 < e_0 < \frac{i}{2} + \frac{a-c}{t} - \frac{2(-1+\theta)k}{b^2 i \beta^2}$ 时， $\frac{\partial \pi_r^{NT*}}{\partial i} > 0$ ；(2)当 $e_0 > \frac{i}{2} + \frac{a-c}{t} - \frac{2(-1+\theta)k}{b^2 i \beta^2}$ 时， $\frac{\partial \pi_r^{NT*}}{\partial i} < 0$ 。

证明见附录 13。

在 NT 模型中，单位产品初始碳排放量存在一个阈值，当单位产品初始碳排放量小于这个阈值时，零售商的利润随着谎报系数的增加而增加；当单位产品初始碳排放量大于这个阈值时，零售商的利润随着谎报系数的增加而减少；由于零售商在供应链中不是主导者，其利润大小更多地受到制造商决策的影响，因此，其利润的大致变化规律与制造商相似。

4.3 采用区块链技术的减排技术补贴模型（ YT 模型）

区块链平台由政府搭建， G 是区块链平台的建设总成本， N 为区块链平台使用周期，区块链平台的单周期成本为 G/N 。应用区块链后，制造商无法谎报碳减排量，消费者完全信任产品减排信息，于是产品需求量为： $q^{YT} = a - p + \beta\tau$ ，此时政府的监管成本可以忽略不计。制造商和零售商使用区块链平台会产生期间费用，制造商的单期期间费用为 C_m ，零售商的单期期间费用为 C_r 。

制造商和零售商的利润函数为：

$$\pi_m^{YT} = (w - c)D^{YT} - \frac{1}{2}(1 - \theta)k\tau^2 - (e_0 - \tau)D^{YT}t - C_m \quad (4.12)$$

$$\pi_r^{YT} = (p - w)D^{YT} - C_r \quad (4.13)$$

社会福利函数为：

$$\begin{aligned}\pi_g^{YT} &= \pi_m^{YT} + \pi_r^{YT} + CS + EB - GS \\ &= (p - c)D^{YT} - C_m - C_r + \frac{D^{YT^2}}{2} + \tau D^{YT} - \frac{1}{2}k_1\tau^2 - \frac{G}{N}\end{aligned}\quad (4.14)$$

命题 4-2 YT 模型中存在最优批发价 w^{YT*} ，最优零售价 p^{YT*} ，最优单位碳减排量 τ^{YT*} ，最优技术补贴比例 θ^{YT*} ，使得制造商利润，零售商利润和社会福利最大化。

最优批发价：

$$w^{YT*} = \frac{at(t + \beta) + c\beta(t + \beta) + 2ak(\theta - 1) + 2ck(\theta - 1) + te_0(\beta(t + \beta) + 2k(\theta - 1))}{(t + \beta)^2 + 4k(\theta - 1)} \quad (4.15)$$

最优零售价：

$$p^{YT*} = \frac{2c(\beta(t + \beta) + kB) + a(t^2 - \beta^2 + 2kB) + 2t(\beta(t + \beta) + kB)e_0}{2((t + \beta)^2 + 4kB)} - \frac{1}{2}a \quad (4.16)$$

最优单位减排量：

$$\tau^{YT*} = \frac{(t + \beta)(-a + c + te_0)}{(t + \beta)^2 + 4k(\theta - 1)} \quad (4.17)$$

制造商最优利润：

$$\pi_m^{YT*} = \frac{k(\theta - 1)(-5a + c + te_0)(-a + c + te_0)}{2((t + \beta)^2 + 4k(\theta - 1))} - C_m \quad (4.18)$$

零售商最优利润：

$$\pi_r^{YT*} = -\frac{(a(Z^2 + 5kB) - ckB - ktBe_0)(a(Z^2 + 3kB) + ckB + ktBe_0)}{(Z^2 + 4kB)^2} - C_r \quad (4.19)$$

最优社会福利：

$$\begin{aligned}\pi_g^{YT*} &= \frac{8Z(c - a + te_0)(a(Z^2 + 5kB) - ckB - ktBe_0) - 4kZ^2(c - a + te_0)^2}{8(Z^2 + 4kB)^2} + \\ &\quad \frac{4(ckB + ktBe_0 - a(Z^2 + 5kB))^2 - 8(ctZ + a\beta Z + akB + 3ckB - t(\beta Z + kB)e_0)(a(Z^2 + 5kB) - ckB - ktBe_0)}{8(Z^2 + 4kB)^2} \\ &\quad - \frac{G}{N} - C_m - C_r\end{aligned}\quad (4.20)$$

证明见附录 14。

推论 4-4 在 YT 模型中, (1) $\frac{\partial \pi_m^{YT*}}{\partial \theta} > 0$, $\frac{\partial \pi_r^{YT*}}{\partial \theta} > 0$; (2) 当 $k < \frac{\beta(t+\beta)^2}{4(2t+\beta)(1-\theta)}$ 时, $\frac{\partial \tau^{YT*}}{\partial t} > 0$; (3) 当 $k > \frac{\beta(t+\beta)^2}{4(2t+\beta)(1-\theta)}$ 时, 若 $0 < e_0 < \frac{(a-c)(4k(\theta-1)-(t+\beta)^2)}{\beta(t+\beta)^2 + 4k(2t+\beta)(\theta-1)}$, 则 $\frac{\partial \tau^{YT*}}{\partial t} > 0$; 若 $e_0 > \frac{(a-c)(4k(\theta-1)-(t+\beta)^2)}{\beta(t+\beta)^2 + 4k(2t+\beta)(\theta-1)}$, 则 $\frac{\partial \tau^{YT*}}{\partial t} < 0$ 。

证明见附录 15。

在 YT 模型中, 制造商利润和零售商利润都随着政府技术补贴比例的增加而增加; 在单位产品减排量和碳税税率的变化关系中, 碳减排成本系数和单位产品初始碳减排量分别存在一个阈值: 当碳减排成本系数小于这个阈值时, 单位产品减排量随着碳税的增加而增加; 当减排成本系数大于这个阈值时, 出现两种情况: 高排放制造商的单位产品减排量随着碳税税率的增加而减小, 低排放制造商的单位产品减排量随着碳税税率的增加而增加。其原因是当碳减排成本系数较小时, 当碳税税率增加, 制造商首先考虑的是增加碳减排投资; 当减排成本系数较大时, 对于低排放制造商, 其初始碳排放量较低, 增加减排投资所减少的碳税与缴纳碳税相比占比较大, 减排投资的效果较好; 对于高排放制造商, 其初始碳排放量较高, 增加减排投资所减少的碳税与缴纳碳税相比占比较小, 减排投资的效果较差。

推论 4-5 在 YT 模型中, (1) 当 $x_1 < e_0 < x_2$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{YT*}}{\partial t} < 0$; (2) 当 $0 < e_0 < x_1$, 或 $e_0 > x_2$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{YT*}}{\partial t} > 0$ 。

其中,

$$x_1 = \frac{-\sqrt{(c-3a)^2(\beta^2 + 4kB - t^2)^2 + 4(a-c)(5a-c)tZ(\beta Z + 4kB)} + 3a(\beta^2 + 4kB - t^2) + c(t^2 - \beta^2 - 4kB)}{2t(\beta Z + 4kB)}$$

$$x_2 = \frac{\sqrt{(c-3a)^2(\beta^2 + 4kB - t^2)^2 + 4(a-c)(5a-c)tZ(\beta Z + 4kB)} + 3a(\beta^2 + 4kB - t^2) + c(t^2 - \beta^2 - 4kB)}{2t(\beta Z + 4kB)}$$

证明见附录 16。

在 YT 模型中, 单位产品初始碳排放量存在两个分界点将单位产品初始碳排放量的取值分为三个部分, 我们将三个部分分别视为三种制造商类型: 高排放制造商, 一般排放制造商和低排放制造商, 在区块链条件下, 制造商无法谎报, 当碳税税率增加时, 高排放制造商进行减排投资能够有效减少所缴碳税, 进而增加

利润；低排放制造商进行碳减排投资能够有效增加产品需求量，进而增加利润；而一般排放制造商进行减排投资既无法有效减少所缴碳税，又不能增加产品需求量，一般排放制造商的初始排放水平处于一个完全受制于碳税变化的区间，政府的碳税政策不能有效引导这类制造商进行减排投资，但是技术补贴能够激励制造商进行减排投资。

推论 4-6 在 YT 模型中，(1)当 $0 < e_0 < \frac{2(a-c)(t+\beta)}{t^2 - \beta^2 + 4k(1-\theta)}$ 时， $\frac{\partial \pi_r^{YT*}}{\partial t} > 0$ ；(2)当 $e_0 > \frac{2(a-c)(t+\beta)}{t^2 - \beta^2 + 4k(1-\theta)}$ 时， $\frac{\partial \pi_r^{YT*}}{\partial t} < 0$ 。

证明见附录 17。

在 YT 模型中，单位产品初始碳排放量存在一个阈值，当单位产品初始碳排放量小于这个阈值时，零售商利润随着碳税的增加而减小；当单位产品初始碳排放量大于这个阈值时，零售商利润随着碳税的增加而增加；由于零售商不是供应链的主导者，因此，零售商利润受到制造商的决策的影响较大，制造商的初始减排技术水平一定程度上影响了零售商的利润，当制造商是低排放企业时，碳税税率增加，制造商会选择增加减排投资，使得产品需求量增加，进而制造商利润增加，产品需求量的增加同样会使零售商的利润增加；当制造商是高排放企业时，制造商通过减排投资能够有效减少所缴碳税，进而使得制造商利润增加，但是碳税的增加会使制造商提高产品批发价，零售商的利润空间被压缩，因此零售商利润会随着碳税税率的增加而减小。

4.4 算例分析

为了更加直观的说明在引入和不引入区块链技术两种情况下，技术补贴对制造商减排决策和政府决策的影响，本小节运用 Matlab 对部分结论进行算例分析。假设 $a=10$ ， $c=1$ ， $k=2$ ， $b=0.5$ ， $\beta=0.5$ ， $e_0=2$ ， $t=1$ ， $C_m=3$ ， $C_r=2$ ， $G=6$ ， $N=12$ 。

4.4.1 最优社会福利分析

本章的研究重点在于政府补贴策略对于供应链谎报行为和社会福利的影响，所以在分析各个因素对社会福利的影响时，重点关注补贴政策和谎报行为对于社

会福利的影响，以社会福利的变化衡量社会效益、供应链成员的谎报行为以及政府的补贴政策的制定策略；基于此，我们分析了两个模型中政府技术补贴比例对于社会福利的影响。

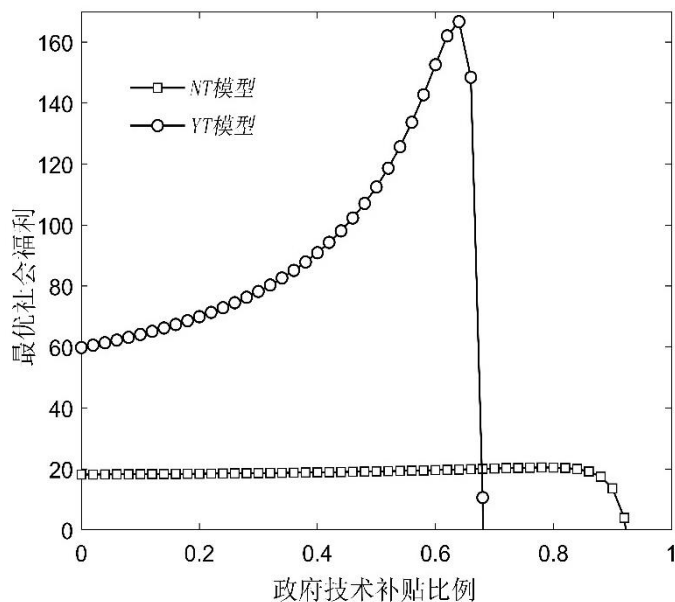


图 4-2 $i=1.5$ 时，技术补贴比例对最优社会福利的影响

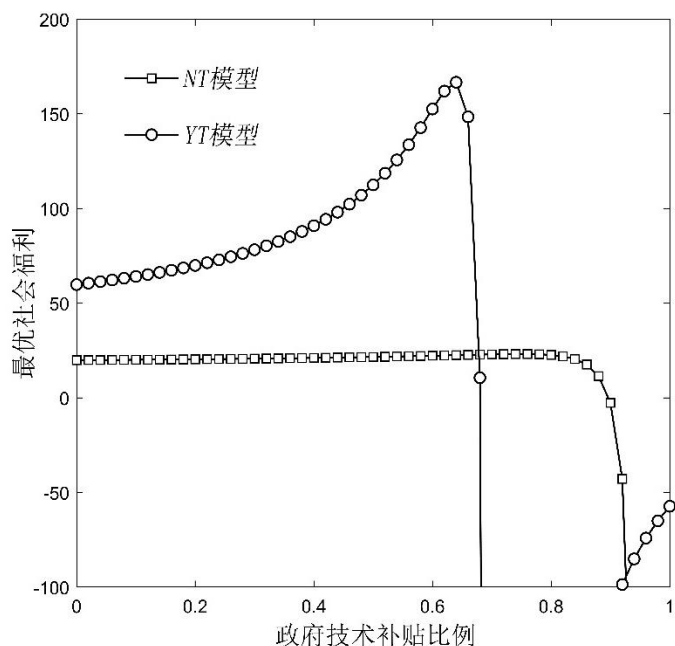


图 4-3 $i=2$ 时，技术补贴比例对最优社会福利的影响

如图 4-1 和图 4-2 所示，应用区块链前，最有社会福利随着政府技术补贴比例增加并无明显增加，应用区块链后，最优社会福利随着政府技术补贴比例的增加明显增加，在达到最高点后陡然下降，其原因是：在应用区块链前，企业谎报减排量，此时的政府技术补贴并未完全用于减排技术的投资，相反，此时的技术

补贴会使得企业选择增加谎报系数,在监管力度和惩罚力度不变的情况下增加了企业谎报决策的期望利润,不仅没有激励企业增加碳减排投资,反而增大了企业谎报的可能性和谎报比例,由于企业的碳排放并没有明显降低,所以总体社会福利上升幅度极小。应用区块链后,企业无法谎报碳减排量,所以政府的补贴是以真实的企业碳减排投资进行补贴的,所以此时的政府补贴能够有效激励企业进行减排投资,但是碳减排投资的成本是二次方指数增加的,因此存在一个临界点,此时碳减排投资成本大于减排投资给社会所带来的收益之和,总体社会福利开始随着减排投资成本的指数增长而急剧下降。

比较图 4-1 和图 4-2,可以看出,谎报系数的增加并未对应用区块链前后的总体社会福利变化带来明显影响,应用区块链后,企业无法谎报,所以谎报系数的变化对应用区块链后的社会福利没有影响;应用区块链前,谎报系数的增加也没有对社会福利造成明显影响,这说明政府技术补贴对于抑制企业谎报效果不佳,主要作用是在区块链技术下,激励企业增加减排投资。

4.4.2 最优碳减排水平分析

本文为了说明从政府角度看,四个模型的优劣,既要对社会福利进行分析,也要对碳减排水平进行分析,参考最优社会福利的算例分析结果,我们先对谎报系数进行取值,分析政府补贴对于碳减排水平的影响。

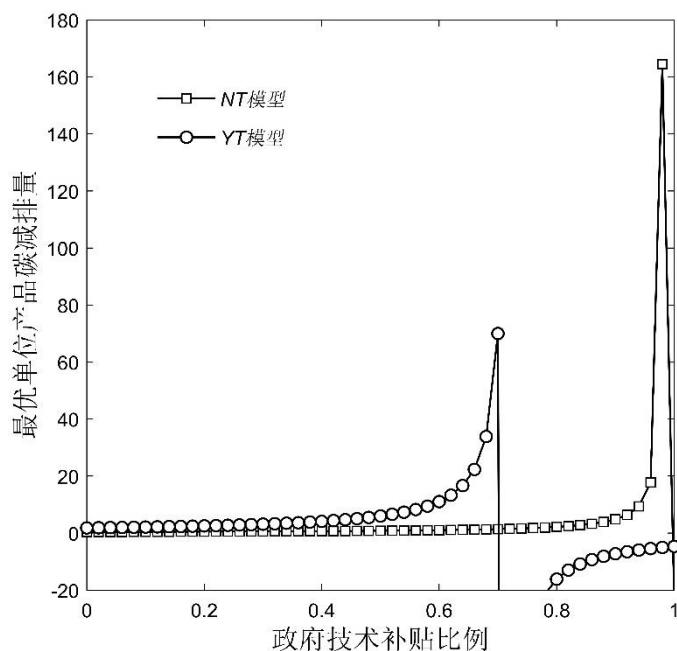


图 4-4 $i=1.5$, 技术补贴比例对最优单位产品碳减排量的影响

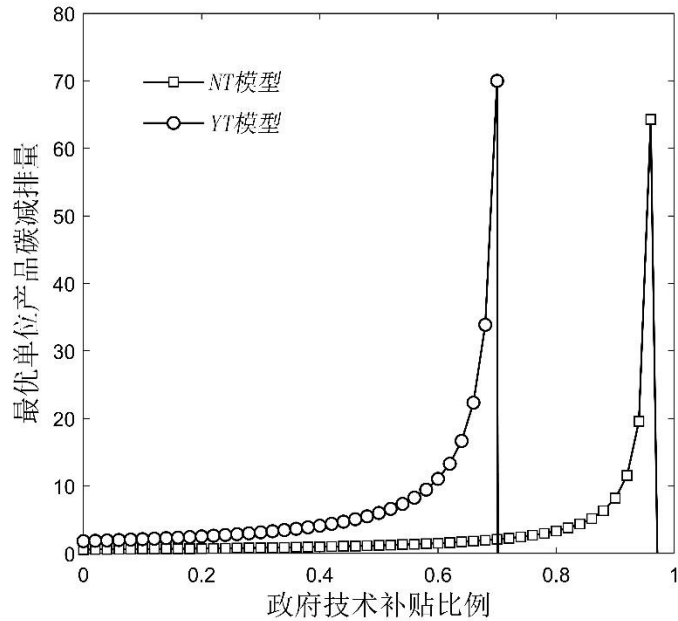


图 4-5 $i=2$ ，技术补贴比例对最优单位产品碳减排量的影响

如图 4-3 和图 4-4 所示，应用区块链前后的政府技术补贴比例都存在一个有效补贴范围，应用区块链后的有效补贴点小于应用区块链前的有效补贴点，其原因是应用区块链前，企业存在碳谎报行为，因此政府的补贴并没有完全用于减排投资，并且企业有可能通过碳谎报骗取补贴的行为，因此应用区块链对于补贴机制具有重要意义。在这个有效补贴范围内，应用区块链前后的最优单位产品碳减排量都是逐渐增加的，且增加幅度不断变大，应用区块链前的最优单位产品碳减排量小于应用区块链后的最优单位产品碳减排量，因此，在补贴比例不变的情况下，引入区块链对于政府实现碳目标有重要作用。

4.5 本章小结

本章在第三章的基础上，引入了政府技术补贴政策，制造商进行减排技术投资，政府以其总减排投资成本的一定比例进行补贴，目的是为了缓解制造商的减排压力，进而激励企业进一步减排，基于此，本章构建了采用区块链前后的二级供应链模型，重点分析了政府技术补贴比例对于最优社会福利和最优单位产品减排量的影响，得出以下结论：

(1) 未采用区块链时，政府无法严密监管企业的碳排放，企业不会因为政府补贴而增加碳减排投资，因此，政府技术补贴不能有效激励企业进行减排投资。

(2) 未采用区块链时，高排放企业无法通过增加谎报系数来增加利润，低排放企业可以通过增加谎报系数来增加利润，从经济角度看，高排放企业的谎报系数一定低于低排放企业。

(3) 未采用区块链时，最优社会福利随政府技术补贴的增加而增加的增幅较小，其原因是政府补贴并没有用于企业的减排投资，而是被企业作为收益算在利润当中，所以总体社会福利并没有明显增加。

(4) 采用区块链时，企业无法谎报单位产品减排量，此时的政府技术补贴能够有效激励企业进行减排投资，因此总社会福利和单位产品减排量会随着补贴比例增加而明显增加。

综上所述，政府在采用减排技术补贴政策时，应当搭配区块链技术，这套政策组合能够有效遏制企业谎报碳信息，增加企业减排积极性，完成政府的碳目标，但是区块链的应用成本存在一个阈值，政府需要根据实际情况决定是否要分担部分区块链应用成本以鼓励企业“上链”。参考第三章研究结论，政府可以通过调节碳税、监管机制并承担部分区块链应用成本，引导企业应用区块链，此时再运用技术补贴政策，激励企业进行碳减排投资，实现社会福利最大化。

第 5 章 碳税政策下考虑区块链技术的产量补贴策略研究

5.1 问题描述与假设

5.1.1 问题描述

第 4 章研究了技术补贴机制对于制造商减排决策、谎报决策和“上链”决策的影响，进而研究了政府的补贴和监管策略，本章更改补贴方式，引入产量补贴机制，研究产量补贴对于制造商减排决策、谎报决策和“上链”决策的影响，确定最优的政府补贴和监管策略。

参考第 4 章，本章构建一个由单一制造商和单一零售商组成的两级供应链，制造商为主导者，零售商为跟随者，制造商通过技术改进实现碳减排，制造商可选择是否应用区块链，区块链平台由政府建设， G 是区块链平台的建设总成本， N 为区块链平台使用周期，区块链平台的单周期成本为 G/N 。制造商可以应用区块链技术，也可以不应用区块链技术，制造商一旦应用区块链技术，消费者能够完全信任制造商所公布的碳减排结果，即消费者绿色信任度 $b=1$ ，若不应用区块链技术，消费者对制造商所公布的碳减排结果不完全信任，即 $0 < b < 1$ ，政府有相应的监管和惩罚机制，政府的监管力度用 $\lambda(0 < \lambda < 1)$ ，制造商一旦被发现谎报，要缴纳数额 s (依据相关法律法规数额)的罚款， s 与第 3 章罚款数额大小相同，制造商的谎报系数为 $i(i \geq 1)$ ，谎报的是单位产品碳减排量，政府给予企业产量补贴，对其生产的每单位低碳产品补贴一定金额。

5.1.2 符号说明与假设

本章涉及的符号说明如表 5-1 所示：

表 5-3 符号说明

符号	含义	符号	含义
a	潜在市场需求	μ	单位产量补贴数额
t	碳税税率	b	消费者绿色信任度 ($0 < b \leq 1$)
w	低碳产品批发价	β	消费者低碳偏好
p	低碳产品零售价	λ	政府监管力度 ($0 < \lambda < 1$)
e_0	单位产品初始碳排放量	s	碳谎报惩罚金
τ	单位产品碳减排量	k	碳减排成本系数

本章的模型假设如下：

假设 1 制造商和零售商关于市场信息完全对称，制造商生产低碳产品产量与市场需求量相等^[59]。

假设 2 碳排放只产生于生产环节，制造商的减排投资也是针对设备和工艺，对产品单位生产成本无影响，设生产成本为 0，参考文献 Wang 等^[60]人的减排成本设置方式，减排成本为 $\frac{1}{2}k\tau^2$ 。

假设 3 政府针对制造商所上报的总碳排放量征收碳税，政府征收的碳税税额为 $tq(e_0 - i\tau)$ 。

假设 4 市场需求由市场潜在需求，产品零售价，碳减排量，消费者低碳偏好和消费者信任度共同决定，低碳产品市场需求 $D = a - p + b\beta i\tau$ ， i 为谎报系数，制造商谎报减排量时， $i > 1$ ；制造商不谎报减排量时， $i = 1$ 。

假设 5 政府的收益为社会福利，包括生产者剩余、消费者剩余、环境改善以及政府财政支出，生产者剩余为供应链总利润，消费者剩余为 $CS = \int_p^{\hat{p}} Ddp = \frac{D^2}{2}$ ， $\hat{p}$ 为消费者愿意支付的最高价格，即产品需求为 0 时的价格，政府支出为财政补贴、监管成本及区块链建设成本支出等，环境改善为 τDt ，表示总的环境改善程度^[3]。

5.2 未采用区块链技术的产量补贴模型（NQ 模型）

未采用区块链时，制造商有可能谎报碳减排量，谎报系数 $i \geq 1$ ，其制造商的谎报行为有概率 λ 被发现，若被发现，将被处以惩罚金 s 的罚款；产品的社会需求函数为： $D^{NQ} = a - p + b\beta i\tau$ ；社会福利包括生产者剩余、消费者剩余、财政补贴支出、环境改善。

制造商的期望利润函数为：

$$\pi_m^{NQ} = (w - c)D^{NQ} - \frac{1}{2}k\tau^2 - (e_0 - i\tau)D^{NQ}t - \lambda s + \mu D^{NQ} \quad (5.1)$$

零售商的利润函数为：

$$\pi_r^{NQ} = (p - w)D^{NQ} \quad (5.2)$$

社会福利函数为：

$$\begin{aligned} \pi_g^{NQ} &= \pi_m^{NQ} + \pi_r^{NQ} + CS + EB - GS \\ &= (p - c)D^{NQ} - \frac{1}{2}k\tau^2 + \frac{D^{NQ2}}{2} + \tau D^{NQ} \end{aligned} \quad (5.3)$$

命题 5-1 NQ 模型中存在最优批发价 w^{NQ*} ，最优零售价 p^{NQ*} ，最优单位碳减排量 τ^{NQ*} ，最优产量补贴金额 μ^{NQ*} ，使得制造商利润，零售商利润和社会福利最大化。

最优批发价：

$$w^{NQ*} = \frac{a(2k - i^2tZ) + (2k - bi^2\beta Z)(c - \mu) - t(-2k + bi^2\beta Z)e_0}{4k - i^2Z^2} \quad (5.4)$$

最优零售价：

$$p^{NQ*} = \frac{a(3k - i^2tZ) + (k - bi^2\beta Z)(c - \mu) + t(k - bi^2\beta Z)e_0}{4k - i^2Z^2} \quad (5.5)$$

最优单位减排量：

$$\tau^{NQ*} = \frac{iZY}{4k - i^2Z^2} \quad (5.6)$$

制造商最优利润：

$$\pi_m^{NQ*} = \frac{a^2k + c^2k - 8ks\lambda + 2i^2st^2\lambda + 4bi^2st\beta\lambda + 2b^2i^2s\beta^2\lambda - 2ck\mu + k\mu^2 + 2ak(\mu - c) + kte_0(te_0 - 2(a - c + \mu))}{2(4k - i^2Z^2)} \quad (5.7)$$

零售商最优利润：

$$\pi_r^{NQ*} = \frac{k^2Y^2}{(-4k + i^2Z^2)^2} \quad (5.8)$$

最优社会福利：

$$\pi_g^{NQ*} = \frac{kY((a - c)(7k - iZ(3it - 2 + bi\beta)) - \mu(k + iZ(it - 2 - bi\beta)) + te_0(k + iZ(it - 2 - bi\beta)))}{2(4k - i^2Z^2)^2} \quad (5.9)$$

其中 $Y = a - c + \mu - te_0$ ， $Z = t + b\beta$ 。证明见附录 18。

推论 5-1 NQ 模型中，(1) $\frac{\partial \pi_m^{NQ*}}{\partial i} > 0$ ， $\frac{\partial \pi_m^{NQ*}}{\partial \mu} > 0$ ， $\frac{\partial \pi_r^{NQ*}}{\partial i} > 0$ ， $\frac{\partial \pi_r^{NQ*}}{\partial \mu} > 0$ ； $\frac{\partial \tau^{NQ*}}{\partial \mu} > 0$ ；(2) 当 $k < \frac{bi^2\beta(t+b\beta)^2}{4(2t+b\beta)}$ 时， $\frac{\partial \tau^{NQ*}}{\partial t} > 0$ ；(3) 当 $k > \frac{bi^2\beta(t+b\beta)^2}{4(2t+b\beta)}$ 时，若 $0 < e_0 < \frac{(4k+i^2(t+b\beta)^2)(a-c+\mu)}{4k(2t+b\beta)-bi^2\beta(t+b\beta)^2}$ ，则 $\frac{\partial \tau^{NQ*}}{\partial t} > 0$ ；若 $e_0 > \frac{(4k+i^2(t+b\beta)^2)(a-c+\mu)}{4k(2t+b\beta)-bi^2\beta(t+b\beta)^2}$ ，则 $\frac{\partial \tau^{NQ*}}{\partial t} < 0$ 。

证明见附录 19。

推论 5-1 表明，在 NQ 模型中，制造商利润和零售商利润都随着谎报系数的增加而增加，随着单位产品补贴金额的增加而增加；单位产品碳减排量随着单位产品补贴金额的增加而增加；在单位产品减排量和碳税税率的变化关系中，碳减排成本系数和单位产品初始碳减排量分别存在一个阈值；当碳减排成本系数小于这个阈值时，单位产品减排量随着碳税的增加而增加；当减排成本系数大于这个阈值时，出现两种情况：高排放制造商的单位产品减排量随着碳税税率的增加而减小，低排放制造商的单位产品减排量随着碳税税率的增加而增加。其原因是当碳减排成本系数较小时，当碳税税率增加，制造商首先考虑的是增加碳减排投资；当减排成本系数较大时，对于低排放制造商，其初始碳排放量较低，增加减排投资所减少的碳税与缴纳碳税相比占比较大，减排投资的效果较好；对于高排放制造商，其初始碳排放量较高，增加减排投资所减少的碳税与缴纳碳税相比占比较小，减排投资的效果较差。

推论 5-2 NQ 模型中，(1) 当 $0 < e_0 < \frac{i^2(t+b\beta)(a-c+\mu)}{4k-bi^2\beta(t+b\beta)}$ 时， $\frac{\partial \pi_m^{NQ*}}{\partial t} > 0$ ；(2) 当 $e_0 > \frac{i^2(t+b\beta)(a-c+\mu)}{4k-bi^2\beta(t+b\beta)}$ 时， $\frac{\partial \pi_m^{NQ*}}{\partial t} < 0$ 。

证明见附录 20。

推论 5-2 表明，在 NQ 模型中，单位产品初始碳排放量存在一个阈值，当单位产品初始碳排放量小于这个阈值时，可被视为低排放制造商，此时制造商利润随着碳税的增加而增加；当单位产品初始碳排放量大于这个阈值时，可被视为高排放制造商，此时制造商利润随着碳税的增加而减小；其原因是：对于低排放制

造商，其初始碳排放量较低，增加减排投资所减少的碳税与缴纳碳税相比占比较大，减排投资的效果较好；对于高排放制造商，其初始碳排放量较高，增加减排投资所减少的碳税与缴纳碳税相比占比较小，减排投资的效果较差；随着碳税税率的增加，高排放企业的碳税成本增加明显。

推论 5-3 NQ 模型中，(1)当 $0 < e_0 < \frac{2i^2(t+b\beta)(a-c+\mu)}{4k+i^2(t-b\beta)(t+b\beta)}$ 时， $\frac{\partial \pi_r^{NQ*}}{\partial t} < 0$ ；(2)当 $e_0 > \frac{2i^2(t+b\beta)(a-c+\mu)}{4k+i^2(t-b\beta)(t+b\beta)}$ 时， $\frac{\partial \pi_r^{NQ*}}{\partial t} > 0$ 。

证明见附录 21。

推论 5-3 表明，在 NQ 模型中，单位产品初始碳排放量存在一个阈值，当单位产品初始碳排放量小于这个阈值时，零售商利润随着碳税的增加而减小；当单位产品初始碳排放量大于这个阈值时，零售商利润随着碳税的增加而增加；由于零售商不是供应链的主导者，因此，零售商利润受到制造商的决策的影响较大，制造商的初始减排技术水平一定程度上影响了零售商的利润；当制造商是低排放企业时，碳税税率增加，制造商会选择增加减排投资，此时制造商利润增加，但是碳税税率的增加使得制造商提高产品批发价，零售商的利润空间被压缩，此时零售商的利润减小；当制造商是高排放企业时，碳税税率增加，制造商会选择增加谎报系数，零售商受到谎报系数增加所带来的利润增加，却不用分担谎报所带来的法律风险，因此零售商的利润随着碳税的增加而增加。

5.3 采用区块链技术的产量补贴模型（ YQ 模型）

区块链平台由政府搭建， G 是区块链平台的建设总成本， N 为区块链平台使用周期，区块链平台的单周期成本为 G/N 。应用区块链后，制造商无法谎报碳减排量，消费者完全信任产品减排信息，于是产品需求量为： $D^{YQ} = a - p + \beta\tau$ ，此时政府的监管成本可以忽略不计。制造商和零售商使用区块链平台会产生期间费用，制造商的单期期间费用为 C_m ，零售商的单期期间费用为 C_r 。

制造商和零售商的利润函数为：

$$\pi_m^{YQ} = (w - c)D^{YQ} - \frac{1}{2}k_1\tau^2 + \mu D^{YQ} - (e_0 - \tau)D^{YQ}t - C_m \quad (5.10)$$

$$\pi_r^{YQ} = (p - w)D^{YQ} - C_r \quad (5.11)$$

社会福利函数为：

$$\begin{aligned}\pi_g^{YQ} &= \pi_m^{YQ} + \pi_r^{YQ} + CS + EB - GS \\ &= (p - c)D^{YQ} - C_m - C_r + \frac{D^{YQ^2}}{2} + \tau D^{YQ} - \frac{1}{2}k_1\tau^2 - \frac{G}{N}\end{aligned}\quad (5.12)$$

命题 5-2 YQ 模型中存在最优批发价 w^{YQ*} ，最优零售价 p^{YQ*} ，最优单位碳减排量 τ^{YQ*} ，最优产量补贴金额 μ^{YQ*} ，使得制造商利润，零售商利润和社会福利最大化。

最优批发价：

$$w^{YQ*} = \frac{a(2k - t(t + \beta)) + (2k - \beta(t + \beta))(c - \mu) - t(-2k + \beta(t + \beta))e_0}{4k - (t + \beta)^2} \quad (5.13)$$

最优零售价：

$$p^{YQ*} = \frac{a(3k - t(t + \beta)) + (k - \beta(t + \beta))(c - \mu) + t(k - \beta(t + \beta))e_0}{4k - (t + \beta)^2} \quad (5.14)$$

最优单位减排量：

$$\tau^{YQ*} = \frac{(t + \beta)(-a + c - \mu + te_0)}{-4k + (t + \beta)^2} \quad (5.15)$$

制造商最优利润：

$$\pi_m^{YQ*} = \frac{k(a - c + \mu - te_0)^2}{8k - 2(t + \beta)^2} - C_m \quad (5.16)$$

零售商最优利润：

$$\pi_r^{YQ*} = \frac{k^2(a - c + \mu - te_0)^2}{(-4k + (t + \beta)^2)^2} - C_r \quad (5.17)$$

最优社会福利：

$$\begin{aligned}\pi_g^{YQ*} &= \frac{kY((a - c)(7k - Z(3t + \beta - 2)) + (-k - (t - \beta - 2)Z)\mu + te_0(k + (t - \beta - 2)Z))}{2(-4k + Z^2)^2} \\ &\quad - C_m - C_r - \frac{G}{N}\end{aligned}\quad (5.18)$$

证明见附录 22。

推论 5-4 在 YQ 模型中, (1) $\frac{\partial \pi_m^{YQ*}}{\partial \mu} > 0$, $\frac{\partial \pi_r^{YQ*}}{\partial \mu} > 0$, $\frac{\partial \tau^{YQ*}}{\partial \mu} > 0$ 。(2) 当 $k < \frac{\beta(t+\beta)^2}{4(2t+\beta)}$ 时, $\frac{\partial \tau^{YQ*}}{\partial t} > 0$; (3) 当 $k > \frac{\beta(t+\beta)^2}{4(2t+\beta)}$ 时, 若 $0 < e_0 < \frac{(4k+(t+\beta)^2)(a-c+\mu)}{4k(2t+\beta)-\beta(t+\beta)^2}$, 则 $\frac{\partial \tau^{YQ*}}{\partial t} > 0$; 若 $e_0 > \frac{(4k+(t+\beta)^2)(a-c+\mu)}{4k(2t+\beta)-\beta(t+\beta)^2}$, 则 $\frac{\partial \tau^{YQ*}}{\partial t} < 0$ 。

证明见附录 23。

推论 5-4 表明, 在 YQ 模型中, 制造商利润和零售商利润都随着政府单位产品补贴金额的增加而增加, 单位产品碳减排量随着单位产品补贴金额的增加而增加; 在单位产品减排量和碳税税率的变化关系中, 碳减排成本系数和单位产品初始碳减排量分别存在一个阈值; 当碳减排成本系数小于这个阈值时, 单位产品减排量随着碳税的增加而增加; 当减排成本系数大于这个阈值时, 出现两种情况: 高排放制造商的单位产品减排量随着碳税税率的增加而减小, 低排放制造商的单位产品减排量随着碳税税率的增加而增加。其原因是当碳减排成本系数较小时, 当碳税税率增加, 制造商首先考虑的是增加碳减排投资; 当减排成本系数较大时, 对于低排放制造商, 其初始碳排放量较低, 增加减排投资所减少的碳税与缴纳碳税相比占比较大, 减排投资的效果较好; 对于高排放制造商, 其初始碳排放量较高, 增加减排投资所减少的碳税与缴纳碳税相比占比较小, 减排投资的效果较差。

推论 5-5 YQ 模型中, (1) 当 $0 < e_0 < \frac{(t+\beta)(a-c+\mu)}{-4k+\beta(t+\beta)}$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{YQ*}}{\partial t} > 0$; (2) 当 $e_0 > \frac{(t+\beta)(a-c+\mu)}{-4k+\beta(t+\beta)}$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{YQ*}}{\partial t} < 0$ 。

证明见附录 24。

推论 5-5 表明, 在 YQ 模型中, 单位产品初始碳排放量存在一个阈值, 当单位产品初始碳排放量小于这个阈值时, 可被视为低排放制造商, 此时制造商利润随着碳税的增加而增加; 当单位产品初始碳排放量大于这个阈值时, 可被视为高排放制造商, 此时制造商利润随着碳税的增加而减小; 其原因是: 对于低排放制造商, 其初始碳排放量较低, 增加减排投资所减少的碳税与缴纳碳税相比占比较大, 减排投资的效果较好; 对于高排放制造商, 其初始碳排放量较高, 增加减排投资所减少的碳税与缴纳碳税相比占比较小, 减排投资的效果较差。

推论 5-6 在 YQ 模型中, (1)当 $0 < e_0 < \frac{2(t+\beta)(a-c+\mu)}{4k+t^2-\beta^2}$ 时, $\frac{\partial \pi_r^{YQ*}}{\partial t} < 0$; (2)当 $e_0 > \frac{2(t+\beta)(a-c+\mu)}{4k+t^2-\beta^2}$ 时, $\frac{\partial \pi_r^{YQ*}}{\partial t} > 0$ 。

证明见附录 25。

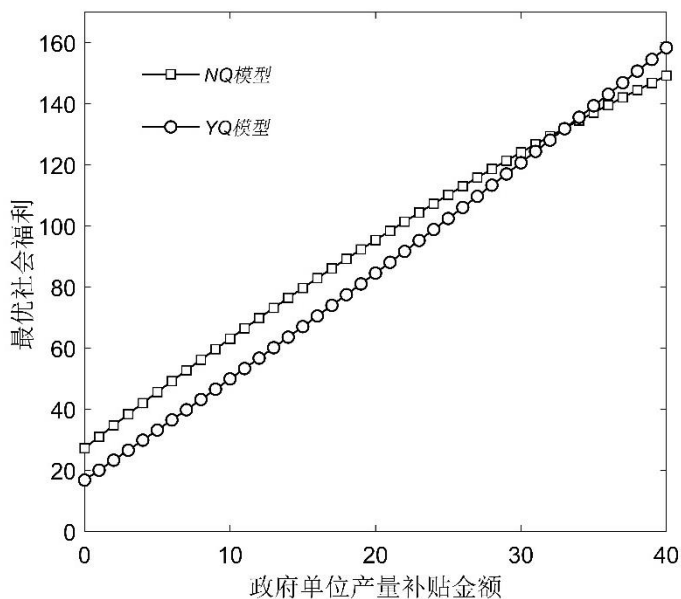
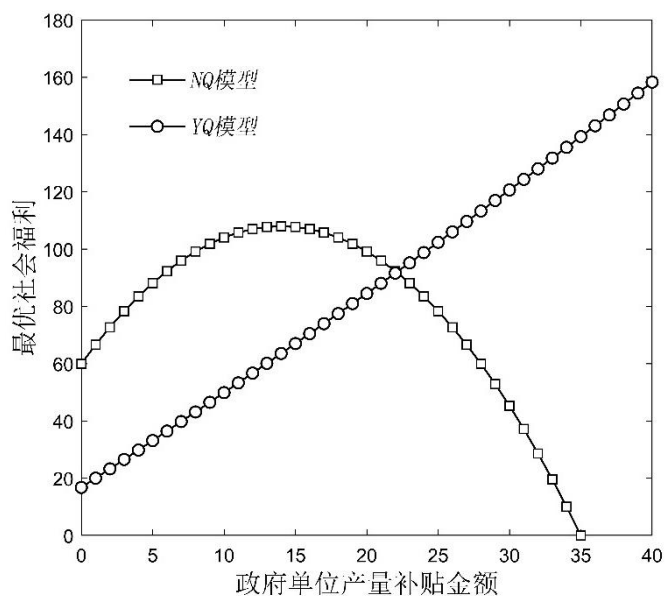
推论 5-6 表明, 在 YQ 模型中, 单位产品初始碳排放量存在一个阈值, 当单位产品初始碳排放量小于这个阈值时, 零售商利润随着碳税的增加而减小; 当单位产品初始碳排放量大于这个阈值时, 零售商利润随着碳税的增加而增加; 由于零售商不是供应链的主导者, 因此, 零售商利润受到制造商的决策的影响较大, 制造商的初始减排技术水平一定程度上影响了零售商的利润, 当制造商是低排放企业时, 碳税税率增加, 制造商会选择增加减排投资, 提高需求量, 此时制造商利润增加, 但是碳税税率的增加使得制造商提高产品批发价, 零售商的利润空间被压缩, 此时零售商的利润减小; 当制造商是高排放企业时, 碳税税率增加, 制造商能够通过减排投资有效减少所缴纳的碳税, 减排投资使得需求量的增加, 零售商的利润增加, 此时的批发价并没有明显上涨, 因此零售商的利润随着碳税税率增加而增加。

5.4 算例分析

为了更加直观的说明在引入和不引入区块链技术两种情况下, 技术补贴和产量补贴对政府决策的影响, 本小节运用 Matlab 对部分结论进行算例分析。假设 $a=10$, $c=1$, $k=2$, $b=0.5$, $\beta=0.5$, $e_0=2$, $t=1$, $C_m=3$, $C_r=2$, $G=6$, $N=12$ 。

5.4.1 最优社会福利分析

本章的研究重点在于政府补贴策略对于供应链谎报行为和社会福利的影响, 所以在分析各个因素对社会福利的影响时, 重点关注补贴政策和谎报行为对于社会福利的影响, 以社会福利的变化衡量社会效益、供应链成员的谎报行为以及政府的补贴政策的制定策略; 基于此, 我们分析两个模型下, 政府技术补贴比例和单位产量补贴金额对于社会福利的影响。

图 5-6 $i=1.5$ 时，单位产量补贴金额对最优社会福利的影响图 5-7 $i=2$ 时，单位产量补贴金额对最优社会福利的影响

如图 5-1 和图 5-2 所示， $i=1.5$ 时，应用区块链前后的最优社会福利都随着单位产品补贴金额的增加而增加， $i=2$ 时，应用区块链前的最优社会福利随着单位产品补贴金额的增加先增加后减少，应用区块链后的最优社会福利单位产品补贴金额的增加而增加。其原因是：当谎报系数较小时，企业谎报的碳减排量较小，政府给予的补贴大部分能够用于企业的减排投资；当谎报系数较大时，企业谎报的碳减排量较大，政府给予的补贴小部分能够用于企业的减排投资；并且企业的减排成本是指数增加的，谎报系数较大时，补贴用于减排投资的部分不足以抵消

减排成本增长的部分，此时企业的减排决策的决策点会提前，于是决策点之后的政府补贴并未用于减排，因此社会福利开始下降。

5.4.2 最优碳减排水平分析

参考最优社会福利的算例分析结果，我们对谎报系数进行取值，分析政府补贴对于碳减排水平的影响。

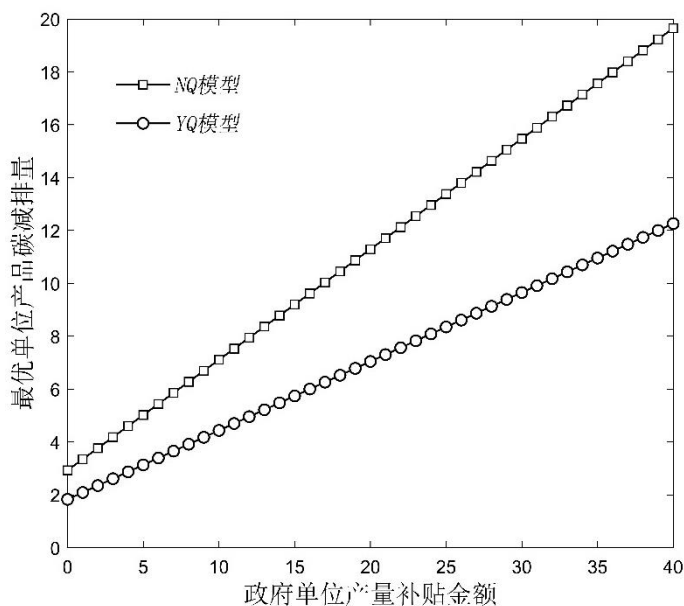


图 5-8 $i=1.5$ ，单位产量补贴金额对最优单位产品碳减排量的影响

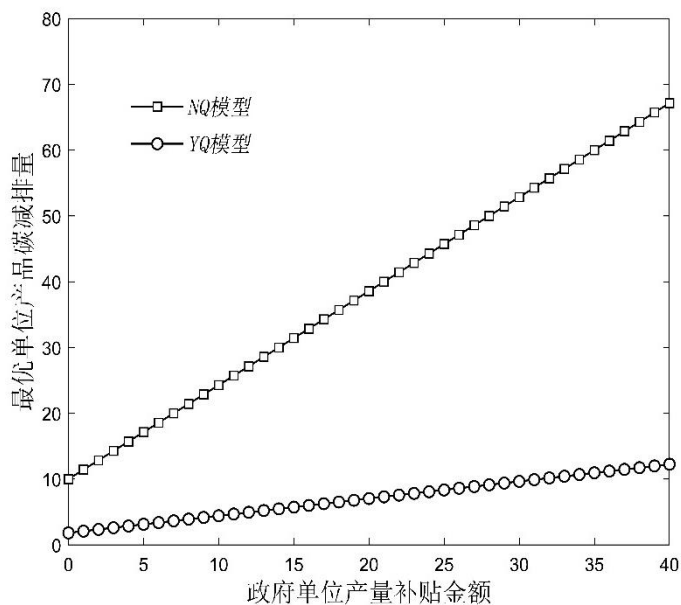


图 5-9 $i=2$ ，单位产量补贴金额对最优单位产品碳减排量的影响

如图 5-3 和图 5-4 所示，应用区块链前后，最优单位产品碳减排量都是随着补贴金额逐渐增大的，且相同政府补贴金额下，应用区块链前的单位产品碳减排

量更大,增幅也更大,其原因一是应用区块链前的单位产品碳减排量包括谎报部分,应用区块链后无法谎报单位产品碳减排量,导致应用区块链前的单位产品碳减排量大于应用区块链后的单位产品碳减排量;二是产量补贴对于能够激励企业减排的原因是产量补贴与低碳产品的产量呈正相关,而企业的产量与需求量一致,在一定限度内,企业会通过增加碳减排投资来增加需求量,进而获得更多的产量补贴,产量补贴反过来激励企业进一步增加减排投资,如此反复,直到企业投资的部分和政府补贴无法弥补减排投资成本。

5.5 本章小结

本章引入政府产量补贴政策,制造商进行减排技术投资,政府对其每单位低碳产品进行补贴,目的是为了缓解制造商的减排压力,进而激励企业进一步减排,基于此,本章构建了应用区块链前后的供应链二级模型,重点分析了政府技术单位产量补贴金额对于最优社会福利和最优单位产品减排量的影响,得出以下结论:

(1) 在政府补贴相同的情况下,区块链技术的应用对于制造商的减排决策没有明显影响;在减排成本系数较小时,制造商的单位产品减排量会随着碳税的增加而增加;在减排成本系数较大时,低排放制造商的单位产品减排量会随着碳税的增加而增加,高排放制造商的单位产品减排量会随着碳税的增加而减少。

(2) 在政府补贴相同的情况下,制造商和零售商的利润随碳税的变化情况都受到制造商初始碳排放影响,对于低排放制造商,制造商利润随着碳税增加而增加,零售商利润随着碳税增加而减少;对于高排放制造商,制造商利润随着碳税增加而减少,零售商利润随着碳税增加而增加。

(3) 社会福利随着政府单位产量补贴金额的变化存在一个分界点,在这个分界点之前,应用区块链前的社会福利比应用区块链后的社会福利大,分界点之后,应用区块链前的社会福利比应用区块链后的社会福利小,并且谎报系数越大,分界点越靠前。

(4) 应用区块链前,产量补贴更能够激励企业进行减排投资,产量补贴鼓励制造商生产更多低碳产品,而制造商的产量与需求量相等,所以制造商需要通过减排刺激需求量增加,在应用区块链前,制造商可以通过谎报增加部分需求量,

这部分需求增加了制造商的补贴，于是在需求量和补贴的双重影响下，制造商真实的减排投资大于应用区块链后的减排投资。

综上所述，产量补贴在应用区块链前更能有效激励制造商进行减排投资，虽然在应用区块链前，制造商会存在碳谎报行为，但真实的碳减排投资大于应用区块链后的碳减排投资，因此区块链和产量补贴不能作为一套政策组合用于鼓励企业加大碳减排投资。

第6章 结论与展望

6.1 研究结论

本研究在政府碳税、监管机制及技术补贴政策的框架下，探讨了制造商和零售商在低碳供应链中基于碳减排决策的博弈行为。通过构建制造商主导的 Stackelberg 博弈模型，结合区块链技术，分析了碳税、监管机制、技术补贴政策等对企业减排行为、诚信经营及供应链利润的影响。本研究的结论从政府政策制定者的视角出发，提出了政府引导低碳发展和促进企业诚信经营的有效路径，并探讨了区块链技术与补贴政策的配合使用。研究得出以下主要结论：

（1）政府的监管力度和惩罚力度是影响企业是否诚信经营的核心因素。如果政府对企业碳减排信息的谎报行为惩罚力度过小或过大，企业有可能选择通过谎报单位碳减排量来提高利润。为了促使企业真实报告碳减排量，政府需要设定一个合理的惩罚力度范围，从而使企业在遵循真实减排的过程中获益。因此，惩罚力度需要制定合理，既不能过大企业经营困难，难以度过减排期，也不能过小以至于无法有效遏制谎报行为。

（2）碳税政策与区块链技术的结合对企业诚信经营具有积极的引导作用。政府通过调节碳税、惩罚力度及监管力度，可以有效迫使企业选择诚信减排，进而推动企业采用区块链技术记录碳减排信息。区块链技术不仅能够提高碳排放数据的透明度，减少企业的碳排放信息造假，还能对企业所有需要披露的信息进行监管，助力政府更全面地监控企业的经营行为。

（3）技术补贴政策在应用区块链技术之前对企业减排投资的激励作用较弱。尽管政府提供技术补贴，企业往往并不愿意增加减排投资，因为区块链技术尚未介入，政府的监管力度不足以迫使企业改变现有的碳减排策略。特别是在应用区块链技术之前，企业可以通过谎报碳减排量增加利润，补贴政策的实际效果有限，补贴资金更多被企业用于增加利润而非实际减排投资。

（4）应用区块链技术后，企业不再能够通过谎报减排量来提高利润。因此，政府的技术补贴能够直接激励企业进行减排投资，从而提高社会福利和单位产品

减排量。区块链技术的引入消除了谎报行为,使企业的减排投资更加真实和有效,从而带来较大的社会福利增幅。换言之,区块链不仅提升了碳减排的透明度,还有效促使企业在减少碳排放的过程中增加实际投入,进而推动整个社会实现更好的环境效益。

(5) 在引入产量补贴政策时,研究发现,政府对每单位低碳产品进行的补贴在应用区块链技术之前更能够激励企业进行减排投资。虽然企业仍然会通过谎报碳减排量来增加利润,但补贴政策鼓励制造商生产更多低碳产品,推动企业通过增加产量来刺激需求。实际上,这种补贴政策能够有效激励企业加大减排投资,尽管区块链技术尚未完全应用,谎报行为仍然存在。然而,产量补贴政策在应用区块链技术之后的效果不如预期。在区块链技术的约束下,企业不再能够通过谎报减排量增加需求量,因此,产量补贴政策的效果会大打折扣。更重要的是,在应用区块链技术后,补贴政策难以与区块链技术有效结合,导致社会福利和单位减排量的提升不如预期。这表明,政府在制定激励政策时需要综合考虑碳税、监管机制、补贴政策及区块链技术的协同作用,才能实现最佳的政策效果。

(6) 结合技术补贴和产量补贴政策,政府可以通过调整补贴比例来平衡企业减排投资的激励与其所承担的成本。在补贴比例适当时,尤其是当政府采取区块链监管时,企业的减排投资意愿将明显提高,从而推动社会福利的最大化。区块链技术在这种情况下发挥了至关重要的作用,它消除了企业通过谎报减排量获取补贴的机会,确保了补贴政策的精准落实和有效执行。

(7) 尽管本研究提出了政府通过碳税、补贴政策、监管机制与区块链技术相结合的多重策略来促进企业减排,但在现实中,政府政策的制定面临诸多挑战。如何把握碳税的适当范围、如何平衡监管力度与惩罚力度、如何精确设定补贴政策等都需要通过科学分析和实践反馈进行调整。此外,企业在面对减排压力时,可能会根据自身利益作出不同反应,这使得政策的实施效果具有一定的不确定性。因此,政府需要不断优化政策工具,以确保政策的长效性和可持续性。

6.2 研究展望

针对于低碳供应链的碳谎报行为,有许多可以研究的问题,例如:碳限额与碳交易制度下,碳谎报行为对供应链和社会福利的影响,政府在碳限额和碳交易

制度下如何治理企业的碳谎报行为等。就本文而言，仍有许多值得深入研究的方面：

（1）在本文模型的基础上考虑政府的监管成本，即监管机制的实施成本，将其纳入到社会福利之中，此时应该如何设计监管成本？或许可以将监管成本与企业的谎报系数和企业社会责任联系起来。

（2）是否可以加入谎报企业黑白名单机制，将信誉纳入到企业的收益之中，这样是否能够更好的鼓励企业诚信上报碳减排量，并且可以将监管成本与黑白名单联系起来，设置一个黑白名单的监管力度系数，黑名单严格监管，白名单宽松监管等。

（3）可以加入举报机制，供应链其他成员有机会掌握制造商谎报的证据，可以选择举报，同时可以加入零售商的社会责任因素，使其更接近现实情况。

参考文献

- [1] BabichV, Hilary G.OM Forum—Distributed ledgers and operations: What operations management researchers should know about blockchain technology[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2020,22(2): 223-240.
- [2] Yang T J, Li C M, Yue X P, et al. Decisions for Blockchain Adoption and Information Sharing in a Low Carbon Supply Chain[J]. Mathematics , 2022,10(13):2233
- [3] 张令荣, 彭博, 程春琪. 基于区块链技术的低碳供应链政府补贴策略研究[J]. 中国管理科学,2023,31(10):49-60.
- [4] 张宁, 王毅, 康重庆等. 能源互联网中的区块链技术: 研究框架与典型应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2016,36(15): 4011-4023.
- [5] Tapscott D, Tapscott A. How Blockchain Will Change Organizations[J]. Mit Sloan Management Review, 2017, 58(2):10-13.
- [6] Wang C X, Wang W, Huang R B. Supply chain enterprise operations and government carbon tax decisions considering carbon emissions [J]. Cleaner Production, 2017, 271-280.
- [7] 李冬冬, 杨晶玉. 基于政府补贴的企业最优减排技术选择研究[J]. 中国管理学, 2019, 27(07): 177-185.
- [8] Saberi S, Kouhizadeh M, Sarkis J, et al. Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(7): 2117-2135.
- [9] Du M, Chen Q, Xiao J, et al. Supply chain finance innovation using blockchain[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2020, 67(4): 1045-1058.
- [10] 唐丹, 庄新田. 基于区块链债转平台的供应链融资决策[J]. 系统工程, 2019, 37(06): 58-66.
- [11] Dong L, Qiu Y, Xu F. Blockchain-Enabled Deep-Tier Supply Chain Finance[J]. Available at SSRN, 2021.
- [12] 李健, 朱士超, 李永武. 基于综合集成方法论的区块链驱动下供应链金融决策研究[J]. 管理评论, 2020, 32(07): 302-314.

- [13] Zhang T L, Li J J, JIANG X. Analysis of supply chain finance based on blockchain[J]. Procedia Computer Science, 2021, 187: 1-6.
- [14] 闫妍, 张锦. 基于区块链技术的供应链主体风险规避研究[J]. 工业工程与管理, 2018, 23(06): 33-42.
- [15] 刘亮, 李斧头. 考虑零售商风险规避的生鲜供应链区块链技术投资决策及协调[J]. 管理工程学报, 2022,36(01): 159-171.
- [16] 林木西, 张紫薇. “区块链+生产”推动企业绿色生产——对政府之手的新思考[J]. 经济学动态, 2019(05): 42-56.
- [17] Kshetri N. Blockchain's roles in meeting key supply chain management objectives[J]. International Journal of Information Management, 2018, 39: 80-89.
- [18] 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.
- [19] 张令荣, 王锋, 刘笑言. 碳交易与区块链技术下双产品低碳供应链减排决策研究[J/OL]. 管理工程学报, 1-12[2025-03-22]. <https://doi.org/10.13587/j.cnki.jieem.2025.04.016>.
- [20] Korpela K, Hallikas J, Dahlberg T. Digital supply chain transformation toward blockchain integration[C].proceedings of the 50th Hawaii international conference on system sciences. 2017. MLA
- [21] 孙中苗, 徐琪, 史保莉. 区块链技术驱动下不同消费者类型的供应链最优定价决策[J]. 管理学报, 2021, 18(09): 1382-1391.
- [22] R Tan, Li Y, Zhang J , et al. Application of Blockchain Technology to the Credit Management of Supply Chain[C]International Conference on Frontiers in Cyber Security. Springer, Singapore, 2020.
- [23] Manupati V K , Schoenherr T , Ramkumar M. A block chain-based approach for a multi-echelon sustainable supply chain [J]. International Journal of Production Research,2019.
- [24] 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/OL].中国管理科学.<https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.1755>.
- [25] 徐春秋,赵道致,原白云. 政府补贴政策下产品差别定价与供应链协调机制[J]. 系统工程, 2014,32(03): 78-86.

- [26] 生延超. 创新投入补贴还是创新产品补贴:技术联盟的政府策略选择[J].中国管理科学, 2008(6):184-192.
- [27] Che C , Chen Y , Zhang X , et al. The Impact of Different Government Subsidy Methods on Low-Carbon Emission Reduction Strategies in Dual-Channel Supply Chain[J]. Complexity, 2021, 2021(5):1-9.
- [28] Lim J S, Kim Y G. Combining carbon tax and R&D subsidy for climate change mitigation[J]. Energy economics, 2012, 34: S496-S502.
- [29] 曹细玉, 张杰芳. 碳减排补贴与碳税下的供应链碳减排决策优化与协调[J]. 运筹与管理, 2018, 27(4):61-65.
- [30] 王道平, 王婷婷, 张博卿. 政府补贴下供应链合作减排的微分博弈[J]. 运筹与管理, 2019,28(5):46-55.
- [31] 贺勇, 陈志豪, 廖诺. 政府补贴方式对绿色供应链制造商减排决策的影响机制[J]. 中国管理科学,2022,30(06):87-98.
- [32] 史成东, 刘飞. 政府规制对不同权力结构闭环供应链定价决策的影响研究[J]. 经济论坛, 2021(08): 43-55.
- [33] Brown D P, Eckert A, Eckert H. Carbon pricing with an output subsidy under imperfect competition: The case of Alberta's restructured electricity market[J]. Resource and Energy Economics, 2018, 52: 102-123.
- [34] Galinato G I , Yoder J K . An integrated tax-subsidy policy for carbon emission reduction[J]. Resource & Energy Economics, 2010, 32(3):0-326.
- [35] Bajona C , Kelly D L . Trade and the environment with pre-existing subsidies: A dynamic general equilibrium analysis[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2012,3(64):253-278.
- [36] Nie P Y, Wang C, Yang Y C. Comparison of energy efficiency subsidies under market power[J]. Energy Policy, 2017, 110: 144-149.
- [37] 聂佳佳,李伟琛.需求波动下政府补贴对低碳产品选择的影响[J].工业工程,2018,21(01):22-29.
- [38] Yang D, Chen Z, Nie P. Output subsidy of renewable energy power industry under asymmetric information[J]. Energy, 2016, 117: 291-299.
- [39] 徐朗,汪传旭,罗珈.技术溢出与产品差异对政府补贴和制造商减排决策的影响[J].商业研究,2017(06):34-42.

- [40] Kesavayuth D,Zikos V. R&D versus output subsidies in mixed markets[J]. Economics Letters, 2013, 118(2):293–296.
- [41] 卢亚丽.社会福利视角下的产业链研发政府补贴方式[J]. 系统管理学报, 2017, 026(006): 1055-1060,1070.
- [42] Lee S H , Muminov T , Tomaru Y . Partial Privatization and Subsidization in a Mixed Duopoly: R&D versus Output Subsidies[J]. MPRA Paper, 2017, 58(2):163-177.
- [43] Alamsyah D P, Febriani R. Green customer behaviour: Impact of green brand awareness to green trust[C]Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020, 1477(7): 072022.
- [44] Wasaya A, Saleem M A, Ahmad J, et al. Impact of Green trust and green perceived quality on green purchase intentions: A moderation study[J]. Environment, Development and Sustainability, 2021: 1-18.
- [45] 盛光华, 解芳. 中国消费者绿色购买行为的心理特征研究[J]. 社会科学战线, 2019(03): 74-82.
- [46] Dhir A, Sadiq M, Talwar S, et al. Why do retail consumers buy green apparel? A knowledge-attitude behaviour-context perspective[J]. Journal of Retailing and Consumer Services, 2021, 59: 102398.
- [47] Ahmad W, Zhang Q. Green purchase intention: Effects of electronic service quality and customer green psychology[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 267: 122053.
- [48] Suhartanto D, Kartikasari A, Hapsari R, et al. Predicting young customers' intention to repurchase green plastic products: incorporating trust model into purchase intention model[J]. Journal of Asia Business Studies, 2021,15(3): 441-456.
- [49] Li G X, Yang L F, Zhang B J, et al. How do environmental values impact green product purchase intention? The moderating role of green trust[J]. Environmental science and pollution research international, 2021, 28(33) : 46020-46034.
- [50] 林强, 刘名武, 王晓斐. 嵌入区块链信息传递功能的绿色供应链决策[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(01): 355-368.
- [51] 曹裕, 胡韩莉, 李青松. 成本分担契约下绿色供应链的环境标签策略选择研究[J]. 中国管理科学, 2022,30(10):119-129.

- [52] 杨磊, 郑晨诗. 基于碳信息不对称的两级供应链谎报行为[J]. 工业工程, 2014, 17(06): 70-76.
- [53] 刘景月. 中国碳交易政策的绿色发展效应研究[D]. 湖南大学, 2021.
- [54] 戈乐, 杨玉香, 邱俊. 考虑碳信息披露的供应链减排技术授权策略[J/OL]. 系统管理学报, 1-30[2025-03-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1977.n.20240911.1842.004.html>.
- [55] 杨磊, 郑晨诗, 纪静娜. 碳信息不对称下的供应链谎报决策与协调研究[J]. 中国管理科学, 2016, 24(04): 111-120.
- [56] 陈晓红, 杨柠屹, 周艳菊. 新能源车供应链中社会责任与碳信息公示的策略选择研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(12): 247-256.
- [57] Hsueh C F. Improving corporate social responsibility in a supply chain through a new revenue sharing contract[J]. International Journal of Production Economics. 2014. 151: 214-222.
- [58] 路正南, 衣珊珊. 考虑碳税政策下的闭环供应链定价策略研究[J]. 生态经济, 2019, 35(09): 75-80+144.
- [59] 姜跃, 韩水华, 陈哲. 基于零售商公平偏好的供应链减排与定价决策[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2024, 37(01): 123-128.
- [60] 李凤, 程春龙, 郭烨锋. 考虑零售商企业社会责任的低碳供应链政府补贴策略[J]. 山东大学学报(理学版), 2024, 59(01): 85-99.
- [61] Wang Y , Yu Z , Jin M ,et al. Decisions and Coordination of Retailer-led Low-carbon Supply Chain under Altruistic Preference[J]. European Journal of Operational Research, 2021, 293(1).

附录

附录 1

命题 3-1 证明:

根据逆向求解法, 对式(3-2)求关于 p 的一阶导和二阶导, $\frac{\partial^2 \pi_r^{NN}}{\partial p^2} < 0$, 式(3-

2)关于 p 是严格的凹函数, 存在最优解, 令 $\frac{\partial \pi_r^{NN}}{\partial p} = 0$, 得到 $p^{(1)} = \frac{1 + w\gamma + b\beta\theta\tau}{2\gamma}$,

将 $p^{(1)}$ 代入到式(3-1), 求式(3-1)关于 w 和 τ 的二阶偏导, 得到式(3-1)关于 w 和 τ 的 Hessian 矩阵:

$$H(w, \tau) = \begin{pmatrix} -\gamma & \frac{b\beta\theta}{2} \\ \frac{b\beta\theta}{2} & -k \end{pmatrix}$$

由于 $\frac{\partial^2 \pi_m^{NN}}{\partial w^2} = -\gamma < 0$, $|H(w, \tau)| = k\gamma - \frac{1}{4}b^2\beta^2\theta^2$, 当 $4k\gamma > b^2\beta^2\theta^2$ 时, 式(1)存在

最优的 w 和 τ , 令 $\frac{\partial \pi_m^{NN}}{\partial w} = 0$, $\frac{\partial \pi_m^{NN}}{\partial \tau} = 0$, 联立求得 w^{NN*} 和 τ^{NN*} , 代入

$p^{(1)} = \frac{1 + w\gamma + b\beta\theta\tau}{2\gamma}$, 得到最优的零售价 $p^{NN*} = \frac{3(k + bt\beta\theta^2)}{4k\gamma - b^2\beta^2\theta^2}$, 将 w^{NN*} 、 τ^{NN*} 和 p^{NN*}

代入到式(3-1)和式(3-2), 得到制造商和零售商的最优利润, 证毕。

附录 2

推论 3-1 证明:

对 τ^{NN*} 求关于 t 的一阶导, 得到 $\frac{\partial \tau}{\partial t} = \frac{a(4k + (t + \mu)^2) + (\mu(t + \mu)^2 - 4k(2t + \mu))e_0}{(-4k + (t + \mu)^2)^2}$, 分母

大于零, 判断分子与 0 的关系即可, 把

$f(e_0) = a(4k + (t + \mu)^2) + (\mu(t + \mu)^2 - 4k(2t + \mu))e_0$ 看作关于 e_0 的一元一次方程, 求解

得到 $e_0 = \frac{a(4k + (t + \mu)^2)}{4k(2t + \mu) - \mu(t + \mu)^2}$, 分子大于零, 由于 $4k > (t + \mu)^2, t > 0$ (模型存

在最优解的条件), 所以 $4k(2t+\mu)-\mu(t+\mu)^2 > 0$, 即该方程的解大于 0, 单调递

减, 所以当 $0 < e_0 < \frac{a(4k+(t+\mu)^2)}{4k(2t+\mu)-\mu(t+\mu)^2}$ 时, $\frac{\partial \tau}{\partial t} > 0$; 当 $e_0 > \frac{a(4k+(t+\mu)^2)}{4k(2t+\mu)-\mu(t+\mu)^2}$

时, $\frac{\partial \tau}{\partial t} < 0$; 证毕。

附录 3

推论 3-2 证明:

对 π_m^{NN*} 求关于 t 的一阶导, 得到 $\frac{\partial \pi_m^{NN*}}{\partial t} = \frac{k(a-te_0)(a(t+\mu)+(-4k+\mu(t+\mu))e_0)}{(-4k+(t+\mu)^2)^2}$, 分母

大于零, 分子中 $k(a-te_0) > 0$, 判断 $a(t+\mu)+(-4k+\mu(t+\mu))e_0$ 与 0 的关系即可, 由于将 $f(e_0)=a(t+\mu)+(-4k+\mu(t+\mu))e_0$ 看作关于 e_0 的一次函数, 求 $f(e_0)=0$ 得:

$$e_0 = \frac{a(t+\mu)}{4k-\mu(t+\mu)}, \text{ 由于 } 4k > (t+\mu)^2, \mu > 0, \text{ 因此 } e_0 = \frac{a(t+\mu)}{4k-\mu(t+\mu)} > 0,$$

$-4k+\mu(t+\mu) < 0$, 因此 $f(e_0)$ 是单调递减的, 所以当 $e_0 < \frac{a(t+\mu)}{4k-\mu(t+\mu)}$ 时,

$\frac{\partial \pi_m^{NN*}}{\partial t} > 0$; 当 $e_0 > \frac{a(t+\mu)}{4k-\mu(t+\mu)}$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{NN*}}{\partial t} < 0$ 。证毕。

附录 4

推论 3-3 证明:

对 π_r^{NN*} 求关于 t 的一阶导, 得到 $\frac{\partial \pi_r^{NN*}}{\partial t} = \frac{2k^2(a-te_0)(2a(t+\mu)+(-4k-t^2+\mu^2)e_0)}{(4k-(t+\mu)^2)^3}$, 分母

大于零, 分子中 $2k^2(a-te_0) > 0$, 判断 $2a(t+\mu)+(-4k-t^2+\mu^2)e_0$ 与 0 的关系即

可, 由于将 $f(e_0)=2a(t+\mu)+(-4k-t^2+\mu^2)e_0$ 看作关于 e_0 的一次函数, 求

$$f(e_0)=0 \text{ 得: } e_0 = \frac{2a(t+\mu)}{4k+t^2-\mu^2}, \text{ 由于 } 4k > (t+\mu)^2, \mu > 0, \text{ 因此}$$

$e_0 = \frac{2a(t+\mu)}{4k+t^2-\mu^2} > 0$, $-4k-t^2+\mu^2 < 0$, 因此 $f(e_0)$ 是单调递减的, 所以当

$e_0 < \frac{2a(t+\mu)}{4k+t^2-\mu^2}$ 时, $\frac{\partial \pi_r^{NN*}}{\partial t} > 0$; 当 $e_0 > \frac{2a(t+\mu)}{4k+t^2-\mu^2}$ 时, $\frac{\partial \pi_r^{NN*}}{\partial t} < 0$ 。证毕。

附录 5

命题 3-2 证明:

根据逆向求解法, 对式(3-11)求关于 p 的一阶导和二阶导, $\frac{\partial^2 \pi_r^{NC}}{\partial p^2} < 0$, 式(3-

11)关于 p 是严格的凹函数, 存在最优解, 令 $\frac{\partial \pi_r^{NC}}{\partial p} = 0$, 得到

$$p^{(2)} = \frac{1 + w\gamma + (1+i)b\beta\theta\tau}{2\gamma}, \text{ 将 } p^{(2)} \text{ 代入到式(10), 求式(10)关于 } w \text{ 和 } \tau \text{ 的二阶偏}$$

导, 得到式(10)关于 w 和 τ 的 Hessian 矩阵:

$$H(w, \tau) = \begin{pmatrix} -\gamma & \frac{1}{2}\theta((1+i)(b\beta - t\gamma) + itv\gamma\lambda) \\ \frac{1}{2}\theta((1+i)(b\beta - t\gamma) + itv\gamma\lambda) & \frac{1}{2}(-2k - 2b(1+i)t\beta\theta^2(-1-i+iv\lambda)) \end{pmatrix}$$

由于 $\frac{\partial^2 \pi_m^{NN}}{\partial w^2} = -\gamma < 0$, $|H(w, \tau)| = \frac{1}{4}(4k\gamma - (b(1+i)\beta\theta + t\gamma\theta(1+i-iv\lambda))^2)$, 当

$4k\gamma > (b(1+i)\beta\theta + t\gamma\theta(1+i-iv\lambda))^2$ 时, 式(3-10)存在最优的 w 和 τ , 令 $\frac{\partial \pi_m^{NC}}{\partial w} = 0$,

$\frac{\partial \pi_m^{NN}}{\partial \tau} = 0$, 联立求得 w^{NC*} 和 τ^{NC*} , 代入 $p^{(2)} = \frac{1 + w\gamma + (1+i)b\beta\theta\tau}{2\gamma}$, 得到最优零售价

p^{NC*} , 将 w^{NC*} 、 τ^{NC*} 和 p^{NC*} 代入到式(3-10)和式(3-11), 得到制造商和零售商的最优利润, 证毕。

附录 6

推论 3-4 证明:

对 w^{NC*} 求关于 v 的一阶偏导得到: $\frac{\partial \pi_m^{NC*}}{\partial v} = \frac{(i-1)kt\lambda(tv\lambda + i(t-tv\lambda + \mu))(a-t_0)^2}{(-4k + (tv\lambda + i(t-tv\lambda + \mu))^2)^2}$

分母大于 0, 因为 $i > 1$, 所以 $(-1+i)kt\lambda(-a+t_0)^2 < 0$, 需要判断分子中下面式子与 0 的关系: $tv\lambda + i(t-tv\lambda + \mu)$, 将其看作关于 v 的一次函数 $f(v)$, 求 $f(v)=0$ 得

$$v = \frac{i(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda}, \text{ 由于 } v > 1, \text{ 判断 } v = \frac{i(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda} \text{ 和 } 1 \text{ 的关系, 作差比较可得}$$

$\frac{t\lambda + i(t-t\lambda + \mu)}{(-1+i)t\lambda}$, 分母大于 0, 判断分子与 0 的关系, 将 $g(t) = t\lambda + i(t-t\lambda + \mu)$ 看

作关于 t 的一次函数, 求解 $g(t)=0$ 得: $t = \frac{i\mu}{-i-\lambda+i\lambda} < 0$, 则 $g(t)$ 是单调递增, 当

$t > 0$ 时恒大于 0 的函数，因此 $v = \frac{i(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda} > 1$ ，由此分析可得：当

$1 < v < \frac{i(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda}$ 时， $\frac{\partial \pi_m^{NC*}}{\partial v} > 0$ ；当 $v > \frac{i(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda}$ 时， $\frac{\partial \pi_m^{NC*}}{\partial v} < 0$ ；零售商利润的证

明过程与以上过程相似，结果相反。证毕。

附录 7

推论 3-5 证明：

$$\pi_m^{NN*} - \pi_m^{NC*} = \frac{k(a-te_0)}{4k-(t+\mu)^2} - \frac{k(a-te_0)}{4k-(tv\lambda+i(t-tv\lambda+\mu))^2}, \text{ 比较 } (t+\mu)^2 \text{ 和}$$

$(tv\lambda+i(t-tv\lambda+\mu))^2$ 的大小，即可比较出 π_m^{NN*} 和 π_m^{NC*} 的大小，展开后提取 v 作为自变量得到的函数令其为 0 并求解：

$$-(-1+i)^2 t^2 \lambda^2 v^2 + 2(-1+i)it\lambda(t+\mu)v - (-1+i^2)(t+\mu)^2 = 0, \text{ 得到 } v \text{ 的两个解：}$$

$$v_1 = \frac{t+\mu}{t\lambda}, \quad v_2 = \frac{(1+i)(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda}, \text{ 已知： } i > 1, t > 0, \mu > 0, 0 < \lambda < 1, \text{ 所以}$$

$$-(-1+i)^2 t^2 \lambda^2 < 0, \quad 1 < v_1 < v_2 \text{ 因此这个关于 } v \text{ 的函数开口向下，} v \text{ 还需要满足模型}$$

$$\text{存在最优解的前提条件： } 4k - (tv\lambda + i(t-tv\lambda + \mu))^2 > 0, \text{ 将 } 4k - (tv\lambda + i(t-tv\lambda + \mu))^2$$

展开后提取 v 作为自变量得到的函数令其为 0 并求解：因此，当

$$\frac{t+\mu}{t\lambda} < v < \frac{(1+i)(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda} \text{ 时， } \pi_m^{NN*} > \pi_m^{NC*}; \text{ 当 } 1 < v < \frac{t+\mu}{t\lambda} \text{ 或 } v > \frac{(1+i)(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda} \text{ 时，}$$

$$\pi_m^{NN*} < \pi_m^{NC*}; \quad v \text{ 的取值还需满足 } (tv\lambda + i(t-tv\lambda + \mu))^2 > 0, \text{ 将}$$

$$f(v) = (tv\lambda + i(t-tv\lambda + \mu))^2 \text{ 看作一个关于 } v \text{ 的开口向下的二次函数，求得其对称}$$

$$\text{轴为： } v = (-1+i)^3 it^3 \lambda^3 (t+\mu) > 0, \quad \Delta > 0, \text{ 求解 } f(v) = 0 \text{ 得到 } v \text{ 的两个解：}$$

$$v_1 = \frac{-2\sqrt{k} + i(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda}, v_2 = \frac{2\sqrt{k} + i(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda}, \text{ 由于 } 4k - (t+\mu)^2 > 0, \text{ 所以 } v_1 < 0 \text{ 由于 } v > 1$$

$$\text{是模型假设，所以排除 } v_1; \text{ 作商比较 } v_2 \text{ 和 } \frac{(1+i)(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda} \text{ 的大小得：}$$

$$\frac{(1+i)(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda} < v_2, \text{ 所以当 } \frac{(1+i)(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda} < v < \frac{2\sqrt{k} + i(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda} \text{ 时， } \pi_m^{NN*} < \pi_m^{NC*}; \text{ 证毕。}$$

附录 8

推论 3-6 证明:

$$\pi_r^{NN*} - \pi_r^{NC*} = \frac{k^2(a - te_0)^2}{(4k - (t + \mu)^2)^2} - \frac{k^2(a - te_0)^2}{(4k - (tv\lambda + i(t - tv\lambda + \mu))^2)^2}, \text{ 比较 } (t + \mu)^2 \text{ 和}$$

$(tv\lambda + i(t - tv\lambda + \mu))^2$ 的大小, 即可比较出 π_r^{NN*} 和 π_r^{NC*} 的大小, 展开后提取 v 作为自变量得到的函数令其为 0 并求解:

$$-(-1+i)^2 t^2 \lambda^2 v^2 + 2(-1+i)it\lambda(t+\mu)v - (-1+i^2)(t+\mu)^2 = 0, \text{ 得到 } v \text{ 的两个解:}$$

$$v_1 = \frac{t + \mu}{t\lambda}, \quad v_2 = \frac{(1+i)(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda}, \text{ 已知: } i > 1, t > 0, \mu > 0, 0 < \lambda < 1, \text{ 所以}$$

$$-(-1+i)^2 t^2 \lambda^2 < 0, \quad 1 < v_1 < v_2 \text{ 因此这个关于 } v \text{ 的函数开口向下, 当}$$

$$\frac{t + \mu}{t\lambda} < v < \frac{(1+i)(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda} \text{ 时, } \pi_r^{NN*} > \pi_r^{NC*}; \text{ 当 } 1 < v < \frac{t + \mu}{t\lambda} \text{ 或 } v > \frac{(1+i)(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda} \text{ 时,}$$

$$\pi_r^{NN*} < \pi_r^{NC*}; \quad v \text{ 的取值还需满足 } (tv\lambda + i(t - tv\lambda + \mu))^2 > 0, \text{ 将}$$

$$f(v) = (tv\lambda + i(t - tv\lambda + \mu))^2 \text{ 看作一个关于 } v \text{ 的开口向下的二次函数, 求得其对称}$$

$$\text{轴为: } v = (-1+i)^3 it^3 \lambda^3 (t+\mu) > 0, \quad \Delta > 0, \text{ 求解 } f(v) = 0 \text{ 得到 } v \text{ 的两个解:}$$

$$v_1 = \frac{-2\sqrt{k} + i(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda}, v_2 = \frac{2\sqrt{k} + i(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda}, \text{ 由于 } 4k - (t+\mu)^2 > 0, \text{ 所以 } v_1 < 0 \text{ 由于 } v > 1$$

$$\text{是模型假设, 所以排除 } v_1; \text{ 比较 } v_2 \text{ 和 } \frac{(1+i)(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda} \text{ 的大小得: } \frac{(1+i)(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda} < v_2, \text{ 所}$$

$$\text{以当 } \frac{(1+i)(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda} < v < \frac{2\sqrt{k} + i(t+\mu)}{(-1+i)t\lambda} \text{ 时, } \pi_r^{NN*} < \pi_r^{NC*}; \text{ 证毕。}$$

附录 9

命题 3-3 证明:

$$\text{根据逆向求解法, 对式(3-18)求关于 } p \text{ 的一阶导和二阶导, } \frac{\partial^2 \pi_r^Y}{\partial p^2} = -2\gamma < 0,$$

$$\text{式(3-18)关于 } p \text{ 是严格的凹函数, 存在最优解, 令 } \frac{\partial \pi_r^Y}{\partial p} = 0, \text{ 得到}$$

$p^{(3)} = \frac{1+w\gamma+\beta\theta\tau+\gamma C_r}{2\gamma}$ ，将 $p^{(3)}$ 代入到式(3-17)，求式(3-17)关于 w 和 τ 的二阶偏

导，得到式(3-17)关于 w 和 τ 的 Hessian 矩阵：

$$H(w, \tau) = \begin{pmatrix} -\gamma & \frac{(\beta-t\gamma)\theta}{2} \\ \frac{(\beta-t\gamma)\theta}{2} & t\beta\theta^2 - k \end{pmatrix}$$

由于 $\frac{\partial^2 \pi_m^Y}{\partial w^2} = -\gamma < 0$ ， $|H(w, \tau)| = k\gamma - \frac{1}{4}(\beta+t\gamma)^2 \theta^2$ ，当 $4k\gamma > (\beta+t\gamma)^2 \theta^2$ 时，式(3-17)存在最优的 w 和 τ ，令 $\frac{\partial \pi_m^Y}{\partial w} = 0$ ， $\frac{\partial \pi_m^Y}{\partial \tau} = 0$ ，联立求得 w^{Y*} 和 τ^{Y*} ，代入 $p^{(3)} = \frac{1+w\gamma+\beta\theta\tau+\gamma C_r}{2\gamma}$ ，得到最优零售价 p^{NC*} ，将 w^{Y*} 、 τ^{Y*} 和 p^{Y*} 代入到式(17)和式(18)，得到制造商和零售商的最优利润 π_m^{Y*} 和 π_r^{Y*} ，证毕。

附录 10

命题 4-1 证明：

根据逆向求解法，对式(4.4)求关于 p 的一阶导和二阶导， $\frac{\partial^2 \pi_r^{NT}}{\partial p^2} < 0$ ，式

(4.4)关于 p 是严格的凹函数，存在最优解，令 $\frac{\partial \pi_r^{NT}}{\partial p} = 0$ ，得到

$p^{(1)} = \frac{1}{2}(a+w+bi\beta\tau)$ ，将 $p^{(1)}$ 代入到式(4.3)，求式(4.3)关于 w 和 τ 的二阶偏导，

得到式(4.3)关于 w 和 τ 的 Hessian 矩阵：

$$H(w, \tau) = \begin{pmatrix} -1 & \frac{bi\beta}{2} \\ \frac{bi\beta}{2} & (\theta-1)k \end{pmatrix}$$

由于 $\frac{\partial^2 \pi_m^{NT}}{\partial w^2} = -1 < 0$ ， $|H(w, \tau)| = k(1-\theta) - \frac{1}{4}b^2i^2\beta^2$ ，当 $4k(1-\theta) > b^2i^2\beta^2$ 时，式

(3)存在最优的 w 和 τ ，令 $\frac{\partial \pi_m^{NT}}{\partial w} = 0$ ， $\frac{\partial \pi_m^{NT}}{\partial \tau} = 0$ ，联立求得 w^{NT*} 和 τ^{NT*} ，代入

$p^{(1)} = \frac{1+w\gamma+b\beta\theta\tau}{2\gamma}$ ，得到最优的零售价

$$p^{NT*} = \frac{b^2 i^2 \beta^2 (c - it + te_0) + (\theta - 1)(3a + c - it + te_0)k}{b^2 i^2 \beta^2 + 4(\theta - 1)k}, \text{ 将 } w^{NT*}, \tau^{NT*} \text{ 和 } p^{NT*} \text{ 代入到式(4.3)}$$

和式(4.4), 得到制造商和零售商的最优利润。证毕。

附录 11

推论 4-1 证明:

分别求 π_m^{NT*} , π_r^{NT*} 关于 t 和 θ 的一阶偏导, 可得:

$$\frac{\partial \pi_m^{NT*}}{\partial t} = \frac{(\theta - 1)(i - e_0)(a - c + it - te_0)k}{b^2 i^2 \beta^2 + 4(-1 + \theta)k}, \quad \frac{\partial \pi_m^{NT*}}{\partial \theta} = \frac{b^2 i^2 \beta^2 (a - c + it - te_0)^2 k}{2(b^2 i^2 \beta^2 + 4(-1 + \theta)k)^2},$$

$$\frac{\partial \pi_r^{NT*}}{\partial t} = \frac{2(-1 + \theta)^2 (i - e_0)(a - c + it - te_0)k_1^2}{(b^2 i^2 \beta^2 + 4(-1 + \theta)k)^2},$$

$$\frac{\partial \pi_r^{NT*}}{\partial \theta} = \frac{2b^2 i^2 \beta^2 (-1 + \theta)(a - c + it - te_0)^2 k^2}{(b^2 i^2 \beta^2 + 4(-1 + \theta)k)^3}, \text{ 已知: } 0 < \theta < 1, a - c + it - te_0 < 0,$$

$$b^2 i^2 \beta^2 + 4(-1 + \theta)k < 0, i < e_0, \text{ 由已知可得: } \frac{\partial \pi_m^{NT*}}{\partial t} < 0, \frac{\partial \pi_m^{NT*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial \pi_r^{NT*}}{\partial \theta} > 0;$$

$$\text{当 } e_0 > i \text{ 时, } \frac{\partial \pi_r^{NT*}}{\partial t} > 0; \text{ 当 } e_0 < i \text{ 时, } \frac{\partial \pi_r^{NT*}}{\partial t} < 0。$$

$$\text{求 } \tau^{NT*} \text{ 关于 } t \text{ 的一阶偏导得: } \frac{\partial \tau^{NT*}}{\partial t} = \frac{bi\beta(-i + e_0)}{b^2 i^2 \beta^2 + 4(-1 + \theta)k}, \text{ 由已知易证: 当}$$

$$e_0 > i \text{ 时, } \frac{\partial \tau^{NT*}}{\partial t} < 0; \text{ 当 } e_0 < i \text{ 时, } \frac{\partial \tau^{NT*}}{\partial t} > 0。 \text{证毕。}$$

附录 12

推论 4-2 证明:

求 π_m^{NT*} 关于 i 的一阶偏导可得:

$$\frac{\partial \pi_m^{NT*}}{\partial i} = \frac{(-1 + \theta)(a - c + it - te_0)k(b^2 i \beta^2 (-a + c + te_0) + 4t(-1 + \theta)k)}{(b^2 i^2 \beta^2 + 4(-1 + \theta)k)^2}, \text{ 已知: } 0 < \theta < 1,$$

$$a - c + it - te_0 < 0, b^2 i^2 \beta^2 + 4(-1 + \theta)k < 0, i < e_0, \text{ 根据已知条件可知:}$$

$$b^2 i \beta^2 (-a + c + te_0) + 4t(-1 + \theta)k \text{ 与 } 0 \text{ 的大小关系决定整体与 } 0 \text{ 的关系, 由于}$$

$$b^2 i^2 \beta^2 + 4(-1 + \theta)k < 0, \text{ 所以当 } 0 < e_0 < \frac{a - c}{t} - \frac{4(-1 + \theta)k}{b^2 i \beta^2} \text{ 时, } \frac{\partial \pi_m^{NT*}}{\partial i} > 0; \text{ 当}$$

$$e_0 > \frac{a - c}{t} - \frac{4(-1 + \theta)k}{b^2 i \beta^2} \text{ 时, } \frac{\partial \pi_m^{NT*}}{\partial i} < 0。 \text{证毕。}$$

附录 13

推论 4-3 证明:

求 π_r^{NT*} 关于 i 的一阶偏导可得:

$$\frac{\partial \pi_m^{NT*}}{\partial i} = \frac{2(-1+\theta)^2(a-c+it-te_0)k^2(b^2i\beta^2(-2a+2c-it+2te_0)+4t(-1+\theta)k)}{(b^2i\beta^2+4(-1+\theta)k)^3}, \text{ 已知:}$$

$0 < \theta < 1$, $a-c+it-te_0 < 0$, $b^2i\beta^2+4(-1+\theta)k < 0$, $i < e_0$, 根据已知条件可知:

$b^2i\beta^2(-2a+2c-it+2te_0)+4t(-1+\theta)k$ 与 0 的大小关系决定整体与 0 的关系, 可

证: 所以当 $e_0 < \frac{i}{2} + \frac{a-c}{t} - \frac{2(-1+\theta)k}{b^2i\beta^2}$ 时, $\frac{\partial \pi_r^{NT*}}{\partial i} > 0$; 当 $e_0 > \frac{i}{2} + \frac{a-c}{t} - \frac{2(-1+\theta)k}{b^2i\beta^2}$

时, $\frac{\partial \pi_r^{NT*}}{\partial i} < 0$ 。证毕。

附录 14

命题 4-2 证明:

根据逆向求解法, 对式(4.13)求关于 p 的一阶导和二阶导, $\frac{\partial^2 \pi_r^{YT}}{\partial p^2} < 0$, 式

(4.13)关于 p 是严格的凹函数, 存在最优解, 令 $\frac{\partial \pi_r^{YT}}{\partial p} = 0$, 得到

$p^{(1)} = \frac{1}{2}(a+w+\beta\tau)$, 将 $p^{(1)}$ 代入到式(4.12), 求式(4.12)关于 w 和 τ 的二阶偏导,

得到式(4.12)关于 w 和 τ 的 Hessian 矩阵:

$$H(w, \tau) = \begin{pmatrix} -1 & \frac{1}{2}(\beta-t) \\ \frac{1}{2}(\beta-t) & t\beta+k(-1+\theta) \end{pmatrix}$$

由于 $\frac{\partial^2 \pi_m^{NT}}{\partial w^2} = -1 < 0$, $|H(w, \tau)| = k(1-\theta) - \frac{1}{4}(t+\beta)^2$, 当 $4k(1-\theta) > (t+\beta)^2$ 时,

式(21)存在最优的 w 和 τ , 令 $\frac{\partial \pi_m^{YT}}{\partial w} = 0$, $\frac{\partial \pi_m^{YT}}{\partial \tau} = 0$, 联立求得 w^{YT*} 和 τ^{YT*} , 代入

$p^{(1)} = \frac{1+w\gamma+b\beta\theta\tau}{2\gamma}$, 得到最优的零售价

$$p^{YT*} = \frac{2c(\beta(t+\beta)+k(-1+\theta))+a(t^2-\beta^2+2k(-1+\theta))+2t(\beta(t+\beta)+k(-1+\theta))e_0}{2((t+\beta)^2+4k(-1+\theta))} - \frac{1}{2}a,$$

将 w^{YT*} 、 τ^{YT*} 和 p^{YT*} 代入到式(4.12)和式(4.13)，得到制造商和零售商的最优利润，证毕。

附录 15

推论 4-4 证明：

求 π_m^{YQ*} ， π_r^{YQ*} 关于 θ 的一阶偏导可得：

$$\frac{\partial \pi_m^{YT*}}{\partial \theta} = \frac{k(t+\beta)^2(-5a+c+te_0)(-a+c+te_0)}{2((t+\beta)^2+4k(-1+\theta))^2},$$

$$\frac{\partial \pi_r^{YT*}}{\partial \theta} = \frac{2k^2(t+\beta)^2(-1+\theta)(-a+c+te_0)^2}{((t+\beta)^2+4k(-1+\theta))^3}, \text{ 已知: } 0 < \theta < 1, -a+c+te_0 < 0,$$

$(t+\beta)^2+4k(-1+\theta) < 0$ ，由已知可证： $\frac{\partial \pi_m^{YT*}}{\partial \theta} > 0$ ， $\frac{\partial \pi_r^{YT*}}{\partial \theta} > 0$ ；求 τ^{YT*} 关于 t 的一阶

偏导得：

$$\frac{\partial \tau^{YT*}}{\partial t} = \frac{2k^2(-1+\theta)^2(-a+c+te_0)(2(a-c)(t+\beta)+(-t^2+\beta^2+4k(-1+\theta))e_0)}{((t+\beta)^2+4k(-1+\theta))^3}, \text{ 由已知}$$

条件可得： $2(a-c)(t+\beta)+(-t^2+\beta^2+4k(-1+\theta))e_0$ 与 0 的大小关系决定 $\frac{\partial \tau^{YT*}}{\partial t}$ 与 0

的大小关系，因此，由已知可证：当 $k < \frac{\beta(t+\beta)^2}{4(2t+\beta)(1-\theta)}$ 时， $\frac{\partial \tau^{YT*}}{\partial t} > 0$ ；

当 $k > \frac{\beta(t+\beta)^2}{4(2t+\beta)(1-\theta)}$ 时，若 $0 < e_0 < \frac{(a-c)(4k(\theta-1)-(t+\beta)^2)}{\beta(t+\beta)^2+4k(2t+\beta)(\theta-1)}$ ，则 $\frac{\partial \tau^{YT*}}{\partial t} > 0$ ；

若 $e_0 > \frac{(a-c)(4k(\theta-1)-(t+\beta)^2)}{\beta(t+\beta)^2+4k(2t+\beta)(\theta-1)}$ ，则 $\frac{\partial \tau^{YT*}}{\partial t} < 0$ 。证毕。

附录 16

推论 4-5 证明：

求 π_m^{YT*} 关于 t 的一阶偏导可得：

$$\frac{\partial \pi_m^{YT*}}{\partial t} = \frac{k(-1+\theta)(-5a^2-6ac+c^2)(t+\beta)+(3a-c)(4k+t^2-\beta^2-4k\theta)e_0+t(\beta(t+\beta)+4k(-1+\theta))e_0^2}{((t+\beta)^2+4k(-1+\theta))^2}$$

，已知： $0 < \theta < 1$ ， $-a+c+te_0 < 0$ ， $(t+\beta)^2+4k(-1+\theta) < 0$ ，根据已知条件可

知： $-(5a^2-6ac+c^2)(t+\beta)+(3a-c)(4k+t^2-\beta^2-4k\theta)e_0+t(\beta(t+\beta)+4k(-1+\theta))e_0^2$

与 0 的大小关系决定整体与 0 的关系，所以当 $x_1 < e_0 < x_2$ 时， $\frac{\partial \pi_m^{YT*}}{\partial t} < 0$ ；当

$0 < e_0 < x_1$ ，或 $e_0 > x_2$ 时， $\frac{\partial \pi_m^{YT*}}{\partial t} > 0$ 。其中，

$$x_1 = \frac{-\sqrt{(c-3a)^2(\beta^2+4kB-t^2)^2+4(a-c)(5a-c)tZ(\beta Z+4kB)}+3a(\beta^2+4kB-t^2)+c(t^2-\beta^2-4kB)}{2t(\beta Z+4kB)}$$

$$x_2 = \frac{\sqrt{(c-3a)^2(\beta^2+4kB-t^2)^2+4(a-c)(5a-c)tZ(\beta Z+4kB)}+3a(\beta^2+4kB-t^2)+c(t^2-\beta^2-4kB)}{2t(\beta Z+4kB)}$$

证毕。

附录 17

推论 4-6 证明：

求 π_r^{YT*} 关于 t 的一阶偏导可得：

$$\frac{\partial \pi_r^{YT*}}{\partial t} = \frac{2k^2(-1+\theta)^2(-a+c+te_0)(2(a-c)(t+\beta)+(-t^2+\beta^2+4k(-1+\theta))e_0)}{((t+\beta)^2+4k(-1+\theta))^3}, \text{ 已知:}$$

$0 < \theta < 1$ ， $-a+c+te_0 < 0$ ， $(t+\beta)^2+4k(-1+\theta) < 0$ ，根据已知条件可知：

$2(a-c)(t+\beta)+(-t^2+\beta^2+4k(-1+\theta))e_0$ 与 0 的大小关系决定整体与 0 的关系，可

证：所以当 $0 < e_0 < \frac{2(a-c)(t+\beta)}{t^2-\beta^2+4k(1-\theta)}$ 时， $\frac{\partial \pi_r^{YT*}}{\partial t} > 0$ ；当 $e_0 > \frac{2(a-c)(t+\beta)}{t^2-\beta^2+4k(1-\theta)}$ 时，

$$\frac{\partial \pi_r^{YT*}}{\partial t} < 0。证毕。$$

附录 18

命题 5-1 证明：

根据逆向求解法，对式(5.2)求关于 p 的一阶导和二阶导， $\frac{\partial^2 \pi_r^{NQ}}{\partial p^2} < 0$ ，式

(5.2)关于 p 是严格的凹函数，存在最优解，令 $\frac{\partial \pi_r^{NQ}}{\partial p} = 0$ ，得到

$$p^{(1)} = \frac{1}{2}(a+w+bi\beta\tau)，将 p^{(1)} 代入到式(5.1)，求式(5.1)关于 w 和 \tau 的二阶偏导，$$

得到式(5.1)关于 w 和 τ 的 Hessian 矩阵：

$$H(w, \tau) = \begin{pmatrix} -1 & \frac{bi\beta - it}{2} \\ \frac{bi\beta - it}{2} & bi^2t\beta - k \end{pmatrix}$$

由于 $\frac{\partial^2 \pi_m^{NQ}}{\partial w^2} = -1 < 0$, $|H(w, \tau)| = k(1 - \theta) - \frac{1}{4}b^2i^2\beta^2$, 当 $4k(1 - \theta) > b^2i^2\beta^2$ 时, 式

(5.1) 存在最优的 w 和 τ , 令 $\frac{\partial \pi_m^{NQ}}{\partial w} = 0$, $\frac{\partial \pi_m^{NQ}}{\partial \tau} = 0$, 联立求得 w^{NQ*} 和 τ^{NQ*} , 代入

$$p^{(1)} = \frac{1 + w\gamma + b\beta\theta\tau}{2\gamma}, \text{ 得到最优的零售价}$$

$$p^{NQ*} = \frac{a(3k - i^2t(t + b\beta)) + (k - bi^2\beta(t + b\beta))(c - \mu) + t(k - bi^2\beta(t + b\beta))e_0}{4k - i^2(t + b\beta)^2}, \text{ 将 } w^{NQ*}, \tau^{NQ*}$$

和 p^{NQ*} 代入到式(5.1)和式(5.2), 得到制造商和零售商的最优利润, 证毕。

附录 19

推论 5-1 证明:

分别求 π_m^{NQ*} , π_r^{NQ*} 关于 i 和 μ 的一阶偏导以及 τ^{NT*} 关于 μ 的一阶偏导可得:

$$\frac{\partial \pi_m^{NT*}}{\partial i} = \frac{ik(t + b\beta)^2(a - c + \mu - te_0)^2}{(-4k + i^2(t + b\beta)^2)^2}, \quad \frac{\partial \pi_m^{NT*}}{\partial \mu} = \frac{k(a - c + \mu - te_0)}{4k - i^2(t + b\beta)^2},$$

$$\frac{\partial \pi_r^{NT*}}{\partial i} = -\frac{4ik^2(t + b\beta)^2(a - c + \mu - te_0)^2}{(-4k + i^2(t + b\beta)^2)^3}, \quad \frac{\partial \pi_r^{NT*}}{\partial \mu} = \frac{2k^2(a - c + \mu - te_0)}{(-4k + i^2(t + b\beta)^2)^2},$$

$$\frac{\partial \tau^{NQ*}}{\partial \mu} = \frac{i(t + b\beta)}{4k - i^2(t + b\beta)^2} \text{ 已知: } 0 < \theta < 1, \quad a - c + \mu - te_0 < 0, \quad -4k + i^2(t + b\beta)^2 < 0,$$

$$\text{由已知可证: } \frac{\partial \pi_m^{NQ*}}{\partial i} > 0, \quad \frac{\partial \pi_m^{NQ*}}{\partial \mu} > 0, \quad \frac{\partial \pi_r^{NQ*}}{\partial i} > 0, \quad \frac{\partial \pi_r^{NQ*}}{\partial \mu} > 0, \quad \frac{\partial \tau^{NQ*}}{\partial \mu} > 0;$$

求 τ^{NT*} 关于 t 的一阶偏导得:

$$\frac{\partial \tau^{NT*}}{\partial t} = \frac{i((4k + i^2(t + b\beta)^2)(a - c + \mu) + (bi^2\beta(t + b\beta)^2 - 4k(2t + b\beta))e_0)}{(-4k + i^2(t + b\beta)^2)^2}, \text{ 由已知可}$$

证: 当 $k < \frac{bi^2\beta(t + b\beta)^2}{4(2t + b\beta)}$ 时, $\frac{\partial \tau^{NQ*}}{\partial t} > 0$; 当 $k > \frac{bi^2\beta(t + b\beta)^2}{4(2t + b\beta)}$ 时, 若

$0 < e_0 < \frac{(4k + i^2(t + b\beta)^2)(a - c + \mu)}{4k(2t + b\beta) - bi^2\beta(t + b\beta)^2}$, 则 $\frac{\partial \tau^{NQ*}}{\partial t} > 0$; 若

$e_0 > \frac{(4k + i^2(t + b\beta)^2)(a - c + \mu)}{4k(2t + b\beta) - bi^2\beta(t + b\beta)^2}$, 则 $\frac{\partial \tau^{NQ*}}{\partial t} < 0$ 。证毕。

附录 20

推论 5-2 证明:

求 π_m^{NQ*} 关于 t 的一阶偏导可得:

$$\frac{\partial \pi_m^{NQ*}}{\partial t} = \frac{k(a - c + \mu - te_0)(i^2(t + b\beta)(a - c + \mu) + (-4k + bi^2\beta(t + b\beta))e_0)}{(-4k + i^2(t + b\beta)^2)^2}, \text{ 已知:}$$

$0 < \theta < 1$, $a - c + \mu - te_0 < 0$, $-4k + i^2(t + b\beta)^2 < 0$, 根据已知条件可知:

$i^2(t + b\beta)(a - c + \mu) + (-4k + bi^2\beta(t + b\beta))e_0$ 与 0 的大小关系决定整体与 0 的关系,

所以当 $0 < e_0 < \frac{i^2(t + b\beta)(a - c + \mu)}{4k - bi^2\beta(t + b\beta)}$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{NQ*}}{\partial t} > 0$; 当 $e_0 > \frac{i^2(t + b\beta)(a - c + \mu)}{4k - bi^2\beta(t + b\beta)}$ 时,

$\frac{\partial \pi_m^{NQ*}}{\partial t} < 0$ 。证毕。

附录 21

推论 5-3 证明:

求 π_r^{NQ*} 关于 t 的一阶偏导可得:

$$\frac{\partial \pi_r^{NQ*}}{\partial t} = -\frac{2k^2(a - c + \mu - te_0)(-2i^2(t + b\beta)(a - c + \mu) + (4k + i^2(t - b\beta)(t + b\beta))e_0)}{(4k - i^2(t + b\beta)^2)^3}, \text{ 已}$$

知: $0 < \theta < 1$, $a - c + \mu - te_0 < 0$, $-4k + i^2(t + b\beta)^2 < 0$, 根据已知条件可知:

$-2i^2(t + b\beta)(a - c + \mu) + (4k + i^2(t - b\beta)(t + b\beta))e_0$ 与 0 的大小关系决定整体与 0 的

关系, 可证: 所以当 $0 < e_0 < \frac{2i^2(t + b\beta)(a - c + \mu)}{4k + i^2(t - b\beta)(t + b\beta)}$ 时, $\frac{\partial \pi_r^{NQ*}}{\partial t} < 0$; 当

$e_0 > \frac{2i^2(t + b\beta)(a - c + \mu)}{4k + i^2(t - b\beta)(t + b\beta)}$ 时, $\frac{\partial \pi_r^{NQ*}}{\partial t} > 0$ 。证毕。

附录 22

命题 5-2 证明:

根据逆向求解法，对式(5.11)求关于 p 的一阶导和二阶导， $\frac{\partial^2 \pi_r^{YQ}}{\partial p^2} < 0$ ，式

(5.11)关于 p 是严格的凹函数，存在最优解，令 $\frac{\partial \pi_r^{YQ}}{\partial p} = 0$ ，得到

$$p^{(4)} = \frac{1}{2}(a + w + \beta\tau), \text{ 将 } p^{(4)} \text{ 代入到式(5.10), 求式(5.10)关于 } w \text{ 和 } \tau \text{ 的二阶偏导,}$$

得到式(5.10)关于 w 和 τ 的 Hessian 矩阵:

$$H(w, \tau) = \begin{pmatrix} -1 & \frac{(\beta-t)}{2} \\ \frac{(\beta-t)}{2} & t\beta-k \end{pmatrix}$$

由于 $\frac{\partial^2 \pi_m^{YQ}}{\partial w^2} = -1 < 0$ ， $|H(w, \tau)| = \frac{1}{4}(4k - (t + \beta)^2)$ ，当 $4k > (t + \beta)^2$ 时，式(30)存

在最优的 w 和 τ ，令 $\frac{\partial \pi_m^{YQ}}{\partial w} = 0$ ， $\frac{\partial \pi_m^{YQ}}{\partial \tau} = 0$ ，联立求得 w^{YQ*} 和 τ^{YQ*} ，代入

$$p^{(4)} = \frac{1 + w\gamma + b\beta\theta\tau}{2\gamma}, \text{ 得到最优的零售价}$$

$$p^{YQ*} = \frac{a(3k - t(t + \beta)) + (k - \beta(t + \beta))(c - \mu) + t(k - \beta(t + \beta))e_0}{4k - (t + \beta)^2}, \text{ 将 } w^{YQ*}, \tau^{YQ*} \text{ 和 } p^{YQ*} \text{ 代}$$

入到式(5.10)和式(5.11)，得到制造商和零售商的最优利润，证毕。

附录 23

推论 5-4 证明:

求 π_m^{YQ*} ， π_r^{YQ*} ， τ^{YQ*} 关于 μ 的一阶偏导可得： $\frac{\partial \pi_m^{YQ*}}{\partial \mu} = \frac{2k(a - c + \mu - te_0)}{8k - 2(t + \beta)^2}$ ，

$$\frac{\partial \pi_r^{YQ*}}{\partial \mu} = \frac{2k^2(a - c + \mu - te_0)}{(-4k + (t + \beta)^2)^2}, \quad \frac{\partial \tau^{YQ*}}{\partial \mu} = -\frac{t + \beta}{-4k + (t + \beta)^2}, \text{ 已知: } 0 < \theta < 1,$$

$$a - c + \mu - te_0 < 0, \quad -4k + (t + \beta)^2 < 0, \text{ 由已知可证: } \frac{\partial \pi_m^{YQ*}}{\partial \mu} > 0, \quad \frac{\partial \pi_r^{YQ*}}{\partial \mu} > 0,$$

$$\frac{\partial \tau^{YQ*}}{\partial \mu} > 0; \text{ 求 } \tau^{YQ*} \text{ 关于 } t \text{ 的一阶偏导得:}$$

$$\frac{\partial \tau^{YQ*}}{\partial t} = \frac{(4k + (t + \beta)^2)(a - c + \mu) + (\beta(t + \beta)^2 - 4k(2t + \beta))e_0}{(-4k + (t + \beta)^2)^2}, \text{ 由已知可证: 当}$$

$k < \frac{\beta(t+\beta)^2}{4(2t+\beta)}$ 时, $\frac{\partial \tau^{YQ*}}{\partial t} > 0$; 当 $k > \frac{\beta(t+\beta)^2}{4(2t+\beta)}$ 时, 若

$0 < e_0 < \frac{(4k+(t+\beta)^2)(a-c+\mu)}{4k(2t+\beta)-\beta(t+\beta)^2}$, 则 $\frac{\partial \tau^{YQ*}}{\partial t} > 0$; 若 $e_0 > \frac{(4k+(t+\beta)^2)(a-c+\mu)}{4k(2t+\beta)-\beta(t+\beta)^2}$, 则

$\frac{\partial \tau^{YQ*}}{\partial t} < 0$ 。证毕。

附录 24

推论 5-5 证明:

求 π_m^{YQ*} 关于 t 的一阶偏导可得:

$$\frac{\partial \pi_m^{YQ*}}{\partial t} = \frac{k(a-c+\mu-te_0)((t+\beta)(a-c+\mu)+(-4k+\beta(t+\beta))e_0)}{(-4k+(t+\beta)^2)^2}, \text{ 已知: } 0 < \theta < 1,$$

$a-c+\mu-te_0 < 0$, $-4k+(t+\beta)^2 < 0$, 根据已知条件可知:

$(t+\beta)(a-c+\mu)+(-4k+\beta(t+\beta))e_0$ 与 0 的大小关系决定整体与 0 的关系, 所以

当 $0 < e_0 < \frac{(t+\beta)(a-c+\mu)}{-4k+\beta(t+\beta)}$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{YQ*}}{\partial t} > 0$; 当 $e_0 > \frac{(t+\beta)(a-c+\mu)}{-4k+\beta(t+\beta)}$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{YQ*}}{\partial t} < 0$ 。

附录 25

推论 5-6 证明:

求 π_r^{YQ*} 关于 t 的一阶偏导可得:

$$\frac{\partial \pi_r^{YQ*}}{\partial t} = \frac{2k^2(a-c+\mu-te_0)(2(t+\beta)(a-c+\mu)+(-4k-t^2+\beta^2)e_0)}{(4k-(t+\beta)^2)^3}, \text{ 已知: } 0 < \theta < 1,$$

$a-c+\mu-te_0 < 0$, $-4k+(t+\beta)^2 < 0$, 根据已知条件可知:

$2(t+\beta)(a-c+\mu)+(-4k-t^2+\beta^2)e_0$ 与 0 的大小关系决定整体与 0 的关系, 可证:

所以当 $0 < e_0 < \frac{2(t+\beta)(a-c+\mu)}{4k+t^2-\beta^2}$ 时, $\frac{\partial \pi_r^{YQ*}}{\partial t} < 0$; 当 $e_0 > \frac{2(t+\beta)(a-c+\mu)}{4k+t^2-\beta^2}$ 时,

$\frac{\partial \pi_r^{YQ*}}{\partial t} > 0$ 。证毕。

攻读学位期间发表的学术论文

《碳税政策下考虑供应链碳谎报行为的政府策略研究》，长春理工大学学报，已录用，拟定刊 4/5 期。

致谢

时光荏苒，三年的研究生生涯即将画上句号。回首这段求学之路，我深感幸运与感激。在此，我谨向所有帮助和支持我的人致以最诚挚的谢意。

首先，我要感谢我的导师张云丰教授。张老师学识渊博、治学严谨，在学术研究和论文写作中给予了我悉心的指导。张老师不仅是我学术道路上的引路人，更是我人生道路上的榜样，他的教诲将使我受益终身。

其次，我要感谢师姐和同窗好友们。在科研过程中，他们给予了我无私的帮助和鼓励，与我分享了宝贵的经验和建议。无论是学术讨论还是生活琐事，他们的陪伴让我在研究生阶段感受到了温暖与支持。

此外，我要感谢我的家人。他们始终默默支持我的学业，给予我无尽的关爱与理解。正是他们的鼓励和包容，让我能够全身心投入到学术研究中，顺利完成学业。

最后，我要感谢母校提供的优质学习资源和平台，让我在学术道路上不断成长。这段研究生经历不仅让我收获了知识，更让我学会了如何面对挑战、追求卓越。

谨以此致谢，献给所有帮助过我的人。未来的道路上，我将继续努力，不负众望。