

分类号: F273

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210720130



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 政府补贴下产出不确定性制造商
的融资与碳减排策略

论 文 作 者 孙利君

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: 2024 年 6 月 3 日

分类号: F273

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2210720130

题 目 政府补贴下产出不确定性制造商的融资与碳减排策略

英文并列

题 目 FINANCING AND CARBON EMISSION REDUCTION
STRATEGIES FOR THE MANUFACTURER WITH OUTPUT
UNCERTAINTY UNDER GOVERNMENT SUBSIDIES

学生姓名:	<u>孙利君</u>
指导教师:	<u>张云丰 教授</u>
专 业:	<u>管理科学与工程</u>
研究方向:	<u>物流与供应链管理</u>

论文答辩日期: 2024 年 5 月 29 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名：孙利军

日期：2024 年 6 月 3 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：孙利君

指导教师签名：张云丰

日期：2024 年 6 月 3 日

日期：2024 年 6 月 3 日

政府补贴下产出不确定性制造商的融资与 碳减排策略

摘 要

近年来,低碳发展的重要性越来越被世界各国政府、企业和消费者所认可。各国政府和地区纷纷出台低碳政策,推动企业减少碳排放,政府补贴作为有效促进碳减排的政策被广泛应用。同时公众对环保的意识不断提高,使消费者倾向购买低碳产品。在政府规定和市场需求双重压力下,越来越多企业主动投资减排。然而,低碳产品投资成本高、周期长,导致企业面临资金短缺问题。除生产投入和碳减排投资所产生的高额成本外,产出不确定性也会影响制造商的经营决策,进一步加剧了制造商资金短缺的风险。在这种情况下,如何选择适当的融资策略,在减排与定价决策中取得经济效益和环境效益的双赢,是一个值得深入研究的实际问题。解决这一问题不仅可以拓展供应链管理理论研究,还有助于实现经济发展与环境保护的平衡目标。因此,本文针对政府补贴的供应链,研究具有产出不确定性制造商的融资与减排等运作决策。主要研究内容和结论如下:

首先,本文基于单个供应商和单个资金约束制造商构建的二级供应链的 Stackelberg 博弈模型。在此模型中,研究了制造商在债权融资、股权融资和投贷联动融资下的最优决策,并对比分析了不同融资模式下的最优(期望)利润。研究发现,产出不确定性(政府补贴)与碳减排量、原材料采购量和供应链成员(期望)利润是负(正)相关关系。然而,产出不确定性并不总是不利于销售价格。制造商需综合考虑碳

减排成本、产出不确定性以及股权融资比例等因素帮助其做出融资决策。无论从经济效益还是从环境效益的角度，在不同的股权融资比例范围内，供应链成员的目标达到统一。

其次，进一步讨论资金约束制造商同时生产低碳产品(具有产出不确定性)和传统产品时不同融资模式的最优决策，并比较不同融资模式的优缺点，帮助制造商选择最优融资模式。最后在供应链成员利益冲突时，利用改进的 Nash 讨价还价博弈模型进行协调。研究表明，与政府补贴的影响不同，产出不确定性与碳减排量、低碳产品的原材料采购量、供应链成员的(期望)利润水平负相关，与传统产品的原材料采购量正相关。股权融资在三种融资模式中具有相对优势，主要体现在碳减排量、低碳产品市场需求、供应商利润等参数皆为最佳，但不能确保制造商利润水平最高。运用改进 Nash 讨价还价博弈模型能够有效协调供应链，并存在一个最优利润分配比例使供应链完美协调。

最后，将区块链技术引入到制造商的融资与减排决策中，用于提高供应链的产出不确定性的预测能力，得到不同融资模式的最优决策。研究表明，制造商碳减排量、原材料采购量和供应链双方成员的(期望)利润与产出不确定性(区块链技术应用程度和政府补贴)均呈负(正)相关关系。当股权融资比例较低时，碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链(期望)利润都是在股权融资模式下最优；当股权融资比例较高时，则是在投贷联动融资模式中最优。产出不确定性、区块链平台建设费用和股权融资比例都会影响制造商融资模式的选择；随着股权融资比例的增加，供应链成员的偏好逐渐从股权融资模式转向投贷联动融资模式。

关键词：供应链金融，低碳供应链，政府补贴，产出不确定性，区块链

FINANCING AND CARBON EMISSION REDUCTION STRATEGIES FOR THE MANUFACTURER WITH OUTPUT UNCERTAINTY UNDER GOVERNMENT SUBSIDIES

ABSTRACT

In recent years, the importance of low-carbon development has been increasingly recognized by governments, enterprises, and consumers around the world. Governments and regions around the world have introduced low-carbon policies to encourage enterprises to reduce carbon emissions, and government subsidies have been widely used as an effective policy to promote carbon reduction. Meanwhile, the public's increasing awareness of environmental protection makes them inclined to purchase low-carbon products. Under the double pressure of government regulations and market demand, more and more enterprises take the initiative to invest in emission reduction. However, the high investment cost and long cycle of low-carbon products have caused enterprises to face the problem of capital shortage. In addition to the high costs incurred by production inputs and carbon emission reduction investments, output uncertainty also affects manufacturers' business decisions, further exacerbating the risk of manufacturers' capital shortages. Under such circumstances, how to choose appropriate financing strategies to achieve a win-win situation in terms of economic and environmental benefits in emission reduction and pricing decisions is a practical issue that deserves in-depth study. Solving this problem not only expands the theoretical research on supply chain management but also helps to realize the balanced goal of economic development and environmental protection. Therefore, this paper

investigates operational decisions such as financing and abatement for manufacturers with output uncertainty for the government-subsidized supply chain. The main research content and conclusions are as follows:

Firstly, this study is based on a Stackelberg game model of a secondary supply chain constructed by a single supplier and a single financially constrained manufacturer. In this model, the manufacturers' optimal decisions under debt financing, equity financing, and investment and loan financing are investigated, and the optimal (expected) profits under different financing modes are comparatively analyzed. It is found that output uncertainty (the government subsidy) is negatively (positively) related to carbon emission reduction, raw material procurement, and supply chain members' (expected) profit. However, output uncertainty is not always detrimental to the sales price. The manufacturer needs to consider a combination of carbon abatement costs, output uncertainty, and equity financing rate to make financing decisions. Supply chain members' objectives reach unity within the range of different equity financing rate, both from the perspective of economic and environmental benefits.

Secondly, the optimal decisions of different financing models are further discussed in the context of a capital-constrained manufacturer producing both the low-carbon product (with output uncertainty) and the traditional product, and the advantages and disadvantages of the different financing models are compared to help the manufacturer choose the optimal financing model. Finally, the improved Nash bargaining game model is used to coordinate the conflicting interests of supply chain members. The study shows that unlike the influence of government subsidies, output uncertainty is negatively correlated with the amount of carbon emission reduction, the amount of raw material purchased for the low-carbon product, and the (expected) profit level of supply chain members, and positively correlated with the amount of raw material

purchased for the traditional product. Equity financing has a relative advantage among the three financing modes, which is mainly reflected in the fact that parameters such as carbon emission reduction, market demand for the low-carbon product, and supplier's profit are all optimal, but it does not ensure the highest level of profit for the manufacturer. Using the improved Nash bargaining game model can effectively coordinate the supply chain and there exists an optimal profit-sharing ratio to make the supply chain perfectly coordinated.

Lastly, blockchain technology is introduced into the manufacturer's financing and emission reduction decisions, which is used to improve the predictive ability of the supply chain's output uncertainty and to obtain the optimal decision for different financing models. The study shows that manufacturers' carbon emission reduction, raw material procurement, and both supply chain members' (expected) profits are negatively (positively) correlated with output uncertainty (the degree of blockchain technology application and the government subsidy). Carbon emission reduction, raw material purchase, sales price, and supply chain (expected) profits are all optimal in the equity financing model when the equity financing ratio is low, and in the investment and loan financing model when the equity financing ratio is high. Output uncertainty, blockchain platform construction cost, and equity financing ratio all affect the choice of manufacturer's financing modes. With the increase in the proportion of equity financing, the preference of supply chain members gradually shifts from the equity financing mode to the investment and loan financing mode.

Author: Lijun Sun (Management Science and Engineering)

Supervised by Yunfeng Zhang

KEY WORDS: supply chain finance, low-carbon supply chain, government subsidies, output uncertainty, blockchain

目录

摘 要	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与研究意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 研究内容与研究方法	3
1.2.1 研究内容	3
1.2.2 研究方法	4
1.3 技术路线与创新点	5
1.3.1 技术路线	5
1.3.2 创新点	5
第 2 章 文献综述	7
2.1 政府补贴下供应链管理的相关研究	7
2.2 供应链金融的相关研究	8
2.3 产出不确定性供应链管理的相关研究	10
2.4 区块链环境下供应链管理的相关研究	11
第 3 章 政府补贴下考虑低碳产品产出不确定性的制造商融资与碳减排策略 ...	13
3.1 模型准备	13
3.1.1 模型描述	13
3.1.2 符号定义	14
3.1.3 模型假设	14
3.2 模型构建与分析	15
3.2.1 债权融资(DF 模式)	15
3.2.2 股权融资(EF 模式)	18
3.2.3 投贷联动融资(IF 模式)	20
3.3 模型比较与分析	22
3.4 数值算例	24

3.4.1 产出不确定性对供应链关键参数的敏感性分析	24
3.4.2 政府低碳补贴对供应链关键参数的敏感性分析	25
3.5 本章小结	27
第 4 章 政府补贴下考虑产出不确定性与异质性产品的制造商融资与碳减排策略.....	28
4.1 模型准备	28
4.1.1 模型描述	28
4.1.2 符号定义	29
4.1.3 模型假设	29
4.2 模型构建与分析	30
4.2.1 债权融资(DF 模式)	30
4.2.2 股权融资(EF 模式)	33
4.2.3 投贷联动融资(IF 模式)	35
4.3 模型比较与分析	38
4.3.1 协调机制	40
4.3.2 合作决策	41
4.3.3 改进 Nash 讨价还价博弈模型	41
4.4 数值算例	43
4.4.1 产出不确定性对供应链关键参数的敏感性分析	43
4.4.2 政府低碳补贴对供应链关键参数的敏感性分析	45
4.4.3 议价能力和股权分红比例对制造商期望利润的影响	46
4.5 本章小结	47
第 5 章 政府补贴下考虑产出不确定性与区块链技术应用的制造商融资与碳减排策略	49
5.1 模型准备	49
5.1.1 模型描述	49
5.1.2 符号定义	49
5.1.3 模型假设	50
5.2 模型构建与分析	51
5.2.1 债权融资(DF 模式)	51
5.2.2 股权融资(EF 模式)	54

5.2.3 投贷联动融资(IF 模式).....	56
5.3 模型比较与分析	59
5.4 数值算例	61
5.4.1 产出不确定性对供应链关键参数的敏感性分析	61
5.4.2 政府低碳补贴对供应链关键参数的敏感性分析	63
5.4.3 区块链技术应用程度对供应链关键参数的敏感性分析	64
5.5 本章小结	65
第 6 章 总结与展望	67
6.1 研究总结	67
6.2 研究展望	69
参考文献	70
附录	77
攻读硕士学位期间发表的学术论文	101
致谢	102

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与研究意义

1.1.1 研究背景

近年来,全球经济的高速增长和过度消费已经对环境造成巨大的伤害,诸如全球变暖、空气污染、土地荒漠化等都是环境恶化的特征。世界各国已将绿色低碳发展作为发展经济的重要目标之一,并纷纷设定了减排目标。比如,中国提出于 2030 年前达到碳排放峰值,并且争取在 2060 年前实现碳中和的减排目标。联合国环境规划署(UNEP)负责人查尔斯(Charles)强调,可持续供应链将在未来十年成为世界上绝无仅有的供应链模式(中国-欧盟可持续供应链高层论坛, 2016)^[1]。为了鼓励企业减少碳排放,世界多国政府和地区采取了包括碳减排补贴、税收优惠和政府优先采购等措施,而碳减排补贴被认为对企业减排具有普遍有效性^[2]。此外,公众环保意识的提高已成为推动企业加强节能减排的重要因素,消费者也越来越关注产品的环保性且愿意支付更高的价格。因此,企业应该积极响应公众需求,不断推出环保型产品,并加大投入研发力度,努力实现可持续发展。如格力、海尔、美的等制造企业不仅在产品设计和制造过程中注重节能减排,还积极开发多元化的环保产品,如节能空调、环保冰箱、智能家居等,为社会和消费者提供更环保、更节能的产品。

越来越多的国家认为,发展低碳经济是缓解全球变暖,改善生态环境,促进社会协调发展的有效手段。由于我国中小型企业数量众多,为了开发和生产低碳产品,需要投入大量资金。然而,由于投入量大、耗时长等原因,制造商往往面临无法按时付清款项的问题。Barkley 等以美国 3459 家中小企业为研究对象,发现仅有一半的中小企业有充足的流动资金来维持企业运营,47%的中小企业存在难以支撑企业运营、需要申请融资等问题。通过向银行等金融机构申请贷款来获取生产经营所需资金是中企业的常规手段。不过,部分制造商由于资产和信誉不足、财务状况不稳定等原因导致其难以获得金融机构的债权融资,从而迫使企业只能积极寻找其他融资途径来缓解资金困境,即在内源性融资不足时,通过外源性融资方式缓解融资困境,股权融资便是其融资手段之一。然而,上述两种融资

方式中,资金提供方都承担着较大的风险,使得他们提供资金的意愿受到一定程度影响。投贷联动融资作为近年来新兴起的一种融资模式,不仅可以拓宽企业的融资渠道,还能降低银行与投资机构的风险,使其迅速成为企业开拓市场备选的融资途径之一。

在实际生产活动中,许多制造商的生产过程常常会受到原材料质量、生产人员水平、机械设备故障以及自然因素等影响,导致无法完全根据预先的方案进行生产,致使产出低于预期目标。在各行业的生产过程中,产出不确定性是普遍存在的。例如,在农业领域,农产品的产量常常受天气、季节等因素的影响,导致产出具有不确定性的特点,最终导致供需不匹配、资源浪费等问题,而且对制造商的运营决策和盈利能力造成影响,也会波及整个供应链中的相关企业。

1.1.2 研究意义

随着气候变化和消费者低碳偏好影响力的日益增强,制造商面临市场需求和政府规制两方面的压力,推动更多制造商投入到绿色产品的研发与生产中。同时,产品通常伴随着产出不确定性的特征,这一背景为我们进行本文的理论研究提供了实践基础,并具有重要的应用意义。此外,供应链成员的资金充足是过去对低碳供应链管理的研究中普遍存在的假设。但实际情况下,资金短缺是很多制造商遇到的重大难题。尤其是随着低碳生产需求增加,制造商需要更多资金投入。这种情况导致制造商在与供应链上下游的交易中不能按时结付款项,影响了供应链双方成员的最优策略。所以,对不同融资模式均衡解的研究和比较分析有一定的理论与实际意义。据以上研究的背景所述,建立数学模型来最优化制造商的融资与减排决策,实现制造商利润最大化的目的,并且研究不同条件下基于产出不确定性的制造商融资与减排决策问题有着重要的现实以及理论意义。从理论上来说,本文在低碳供应链中加入产出不确定性和资金约束等现实条件,在一定程度上丰富了供应链金融管理领域的相关研究。

从现实意义上来说,部分制造商因为低碳生产需要大量资金,导致无法偿还与供应链上下游企业的采购款项。受政府碳排放和产出不确定性两方面的压力,资金紧缺成为制造商面临的挑战,而供应链金融的兴起为解决制造商融资问题提供了新途径。本文对债权融资、股权融资以及投贷联动融资三种不同融资模式下制造商的最优均衡解进行研究,并为供应链制造商的销售价格、碳减排量及融资策略提出一些建议,从而可以增强供应链的竞争实力,进而使其可在市场竞争中

得到优势。

1.2 研究内容与研究方法

1.2.1 研究内容

基于制造商资金约束和低碳生产的现实背景,构建由资金充足供应商和资金约束制造商组成的两级供应链。通过分析各因素之间的关系,提出了更符合实际情况的假设,并构建了 Stackelberg 动态博弈模型。我们进一步探讨异质性产品或区块链技术的应用条件下,供应链成员决策的变化。也分别得到不同条件下,供应链成员在债权融资、股权融资和投贷联动融资的策略下的最优原材料采购量、碳减排量和销售价格,并比较三种融资策略下的最优(期望)利润,探讨产出不确定性对供应链减排和融资策略的影响。最后,通过数值算例验证了理论结果。具体的研究内容如下:

第一章是绪论。旨在明确本文的研究背景、研究意义和研究目的,界定本文研究的问题与范围,明确本文的研究对象,指出研究思路、研究内容、研究方法以及技术路线。

第二章是文献综述。概括了国内外关于政府补贴、资金约束、产出不确定性和区块链在供应链运作方面的研究成果。结合实际情况,确定本文的主要研究内容,弥补以往理论研究的不足之处,为企业在减排与融资方面提供理论参考。

第三章是政府补贴下考虑低碳产品产出不确定性的制造商融资与碳减排策略。该章节构建由单个充裕资金的供应商与单个资金约束的制造商构成的低碳供应链构成,并将制造商生产中的产出不确定性引入供应链中。通过建立 Stackelberg 博弈模型,确定供应链成员在债权融资、股权融资和投贷联动融资模式下的最优均衡解,并通过比较得出最佳融资策略,同时探析产出不确定性、消费者低碳偏好和政府补贴系数对供应链原材料采购量和碳减排量等决策以及供应链成员利润的影响。

第四章是政府补贴下考虑产出不确定性与异质性产品的制造商融资与碳减排策略。在第三部分的基础上,制造商同时生产低碳产品和传统产品。由于低碳产品生产过程中引入先进的碳减排技术,因此,制造商在生产低碳产品时往往面临更高的产出不确定性。而普通产品的生产则使用相对成熟的技术,因此产出也相对稳定。本章节也是由单一供应商和单一制造商组成的供应链,探讨在债权融资、股权融资和投贷联动融资三种融资模式下制造商的最优减排决策,并分析产

出不确定性对生产异质性产品的制造商产生的变化,最后通过数值仿真验证理论结论的正确性。

第五章是政府补贴下考虑产出不确定性与区块链技术应用的制造商融资与碳减排策略。由于区块链技术在供应链中的运用可以提升数据透明性和可追溯性,制造商能够更及时地响应产出不确定性,优化生产计划并提高整体供应链的效率和韧性。将区块链技术引入制造商的生产过程中,虽然不能提高制造商生产力,但增强了对产出不确定性的预测能力。因此,本章节依旧是由一个供应商和一个引入区块链技术的资金约束的制造商组成的供应链系统,制造商生产低碳产品的过程仍存在产出不确定性。同时分析制造商在债权融资、股权融资和投贷联动融资三种融资模式下的最优均衡解,探讨产出不确定性、区块链技术应用程度等因素对供应链的碳减排量、原材料采购量、销售价格以及供应链成员的(期望)利润的影响。

第六章是总结与展望。本章节对整体工作和取得的成果进行归纳分析,同时剖析研究中出现的问题和不足之处。在此基础上,我们对未来的研究方向进行展望。

1.2.2 研究方法

本文通过对大量国内外与供应链相关的文献资料进行查阅,结合对政府补贴、资金约束、产出不确定性、区块链技术等相关供应链的研究文献进行归纳分析,明确本文的理论基础,将研究主题确定为政府补贴下产出不确定性且资金约束制造商的减排和融资决策。在构建本文的研究方案时,主要采取定性与定量相结合的方法,同时将理论和实际相结合,运用博弈论中的 Stackelberg 模型,在不同的供应链条件下,对制造商资金受限的低碳供应链中供应链各成员的决策行为进行探究和分析,具体方法为:

(1) 文献分析法

本文在查阅并归纳分析国内外大量文献资料的基础上,对政府补贴下的供应链、供应链金融、产出不确定性和区块链技术等方面的研究状况进行梳理,设计出在不同供应链下,资金受限制制造商在面对产出不确定性时的低碳供应链融资模型。

(2) 定量分析与定性分析相结合

本文研究主要分为定量分析和定性分析两种,定性分析主要针对本文背景下

的低碳供应链中各个决策变量和参数对供应链各成员利润与碳减排效果的影响。定量分析重点是在不同供应链情境下,运用 Stackelberg 博弈理论,采用逆向归纳法进行求解,得出三种融资模式下的均衡解。通过敏感性分析计算,探究产出不确定性对碳减排量、原材料采购量等决策变量和供应链成员(期望)利润的影响。将定量分析与定性分析相结合,帮助资金受限的制造商根据不同情境科学地选择融资模式。

(3) 数值仿真法

首先根据实际情况,对所建立的决策模型涉及到的变量和参数合理赋值,再利用 MATLAB 对博弈模型进行仿真计算,并绘制图形。以便于对理论结果进行真实有效性的验证,最后基于数值结果与图形趋势进行相关分析。

1.3 技术路线与创新点

1.3.1 技术路线

本文技术路线图如图 1-1 所示。

1.3.2 创新点

本文采用多学科结合的研究方法,结合供应链管理与优化、博弈论、经济学和金融学等理论,对供应链上各成员的运营决策和制造商减排和融资决策进行深入分析,保证了研究的可靠性。与以往低碳供应链与供应链金融相关研究相比,本文研究内容的特色主要体现在以下几个方面:

(1) 考虑在产出不确定性影响下的供应链的融资与减排问题。过去的供应链运作管理文献通常忽略生产中的问题,即假设产出是确定的。然而,产品的生产每一个步骤都会受到各种因素的影响,某个环节的失误或者是不可抗力的因素都会使产出量和预期目标存在误差,这必将对整个供应链造成影响。因此,本文将产出不确定性与供应链金融相结合,研究具有重要的现实与理论意义。

(2) 本文对现有制造商生产单一产品具有产出不确定性的成果进行拓展,探讨了制造商生产两种异质产品对供应链决策的影响。此外,本文将区块链技术与产出不确定性结合,研究其在供应链金融中的作用,以期望对解决产出不确定性的中小企业融资困难的现状提供理论支持。

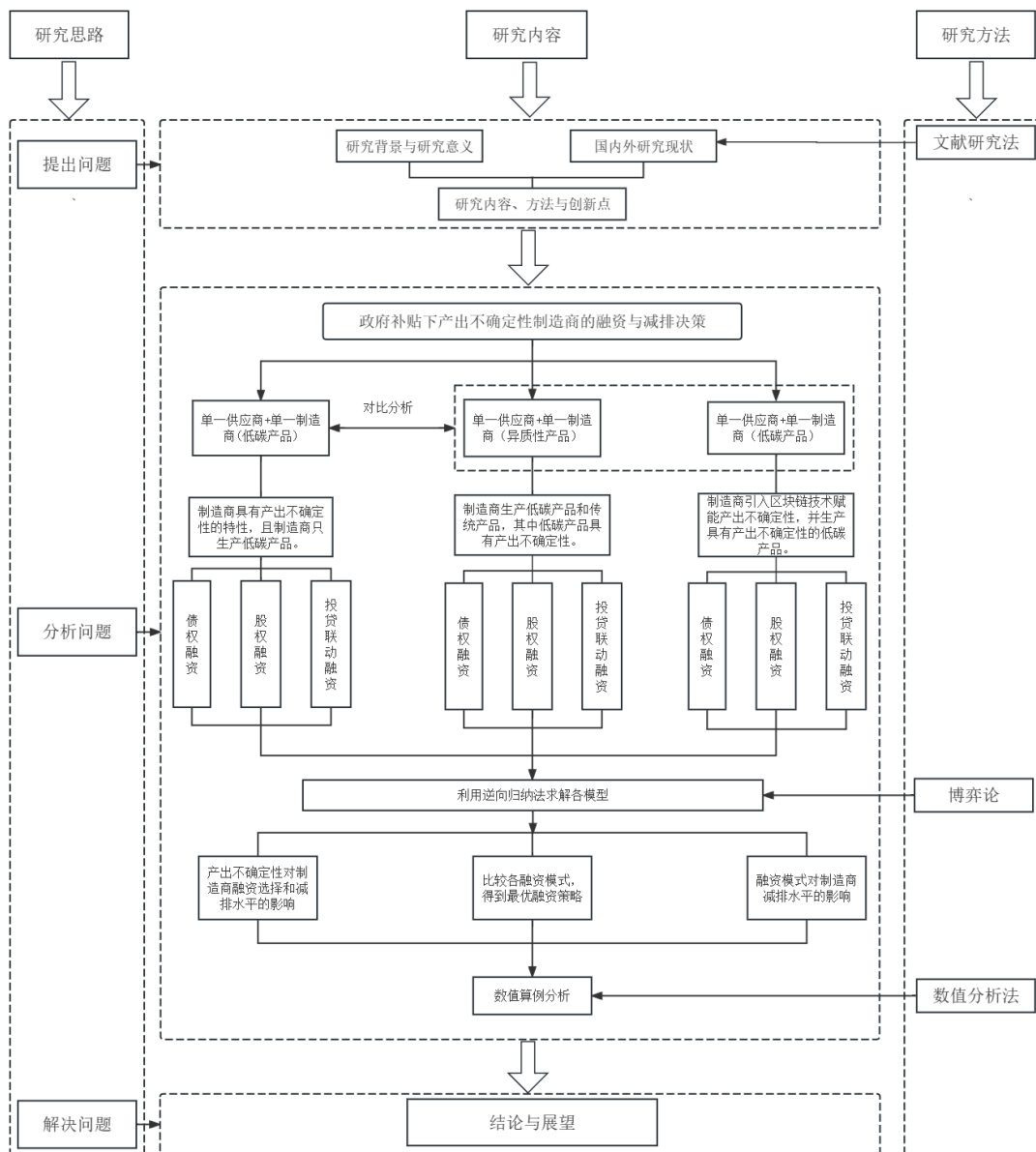


图 1-1 技术路线图

第 2 章 文献综述

1983 年和 1984 年，发表在《哈佛商业评论》的两篇论文可以被视为供应链管理研究的里程碑，为后续学术界对供应链进行深入探讨奠定了基础^[3,4]。随着全球化和数字化的发展，供应链管理领域的研究内容日益丰富和多样化。除了传统的库存管理、供应链定价、供应链协调契约等方面，现代供应链管理研究还拓展到新兴领域，如供应链金融、低碳供应链等，反映了学者们对于不断变化的商业环境和消费者需求的关注。而本文研究与政府补贴的供应链、供应链金融、产出不确定性供应链以及区块链环境下的供应链相关。

2.1 政府补贴下供应链管理的相关研究

低碳产业的发展过程中，难免会面临低碳材料供给不足、低碳技术创新研发成本高等带来的制约，这常需要政府通过减税、补贴、优先采购等政策来减轻资金压力，进而激励和推动低碳供应链的健康持续发展。基于低碳发展现实背景，He 等^[5]设计了两个分散的决策模型来分析补贴碳减排成本和企业社会责任对碳排放的交互影响，并建立成本分担契约模型来协调企业的碳排放行为。Li 等^[6]研究基于碳减排水平的政府补贴对低碳供应链(LCSC)中不同主体的影响。张子元等^[7]研究了政府对制造商进行补贴后，供应链各方在利他偏好方面的互动对于绿色供应链决策以及收益的影响。Bi 等^[8]研究了消费者具有环境识别能力时，政府采用补贴政策来鼓励企业实施绿色减排技术。Li 等^[9]分析了政府补贴对供应链绿色技术投资和绿色营销协调的影响。Meng 等^[10]考虑消费者绿色偏好与渠道偏好，探讨了政府低碳产品补贴下双渠道供应链的产品协同定价政策。邱俊等^[11]基于补贴和碳税政策，分别构建制造商主导和零售商主导的 Stackelberg 博弈模型，研究不同情形下的低碳供应链减排决策问题。梁喜等^[12]在双渠道供应链背景下，研究政府补贴比率和制造商谎报因子对供应链和社会福利的影响。

上述学者只是从政府补贴单一对象和单一的补贴政策下对供应链进行研究，还有其他学者从不同的补贴方式入手。尚春燕等^[13]以补贴制造商研发成本还是生产成本为目标，对双渠道绿色供应链决策结果进行差异性比较和分析。Chen 等^[14]也研究了生产补贴和研发补贴模式，发现政府不应该同时使用这两种补贴。双

渠道背景下, Che 等^[15]分析政府补贴减排研发或单位产品减排量下的供应链最优决策问题。Meng 等^[16]将消费者分为绿色和非绿色两类, 比较了三种绿色创新补贴情景的环境效益、经济效益和社会福利。Yuan 等^[17]基于动态博弈理论和委托代理理论, 分析了不同政府补贴策略对供应链成员的影响。陈晓等^[18]针对零售商存在竞争情形, 分析不同补贴策略对于绿色供应链的影响。

此外, 还有学者对不同的补贴对象进行比较, 如尚文芳等^[19]在不同的补贴对象下, 分析产品的绿色程度、销售努力、最优补贴比例、各定价策略的影响因素以及各个成员利润的变化趋势。王道平等^[20]研究了政府分别对制造商和零售商实施低碳补贴情形下考虑持股合作战略的供应链减排决策与动态协调。Bian 等^[21]对消费者补贴和制造商补贴两种环境补贴进行比较, 发现前者比后者产生更低的减排和更高的消费数量。Liu 等^[22]基于消费者对企业社会责任产品的偏好, 考虑企业社会责任和政府补贴, 分析不同权力结构和不同补贴对象下的决策。Xiao 等^[23]考虑在产品市场上与再制造商竞争的仅生产新产品的原始制造商, 研究了针对再制造商、消费者以及再制造商和消费者共享的三种补贴策略。张川等^[24]综合考虑政府补贴与规模效应, 对动力电池闭环供应链分别进行了不补贴, 补贴零售商, 补贴制造商和补贴第三方回收商 4 种情况下的成员最优决策与协调研究。

可见, 学者们并未考虑低碳技术研发引致产出不确定, 以及政府补贴政策下产出不确定对低碳供应链决策行为的影响。低碳技术研发可能面临技术突破、市场需求变化等不确定性因素, 而政府补贴政策的调整、实施效果、市场反应等也会对产出不确定性产生影响。这些不确定性会影响企业在供应链中的采购、生产和物流等决策行为。其次, 以上低碳供应链的相关研究均在供应链成员资金充足的低碳供应链背景下, 本文在此基础上, 考虑到制造商碳减排成本和初始资金不足的情景, 以研究补贴政策下低碳供应链上制造商的融资以减排决策。

2.2 供应链金融的相关研究

充足的资金是确保供应链可持续性发展的关键, 但资金短缺会使制造商面临供应链中断甚至破产的风险。供应链金融是缓解制造商融资难题, 提高供应链运行效率和风险控制能力, 促进供应链整体健康发展的有效途径。供应链融资按其资金来源可以分为内部融资与外部融资。内部融资就是指供应链内上下游企业之间以影响账款回收期为手段的而进行的资金拆借和让渡, 它是一种以贸易信用为

基础的融资方式；而外部融资则是指供应链外部商业银行和投资机构为资金短缺的企业提供的融资服务。

学者们对供应链内外部融资模式开展了深入的研究和比较。Buzacott 等^[25]最早在供应链系统中引入融资策略，分析银行借贷融资模式对于其运营策略产生的影响。Kouvelis 等^[26]等以资金约束为前提，探讨了实施银行借贷后供应链绩效表现问题。Wu 等^[27]探讨了对于银行融资和商业信用融资都适用的最优碳排放水平并设计契约协调供应链。秦娟娟等^[28]在有无碳限额或银行融资情况下，针对碳排放与资金双重约束的低碳与普通两种可替代产品的生产决策问题进行研究。王文利等^[29]以股权和债权两种融资模式对制造商最优融资以及供应商最优生产决策进行分析，并对供应链绩效进行对比。Tang 等^[30]考虑原始设备制造商 (OEM) 将生产外包给资本受限的合同制造商 (CM)，并研究 CM 的融资策略 (银行贷款或 OEM 股权融资) 和侵占市场的决策。除了单纯的内外部融资外，还有学者将不同的融方式进行比较。谭乐平等^[31]将担保换股权融资策略加入到低碳供应链当中，对碳限额政策下受资金约束的制造商，供应商以及商业银行联合构成的供应链均衡决策问题进行了研究。张小娟等^[32]对比分析延迟付款和借贷支付两种融资的优缺点，认为延迟付款模式更受零售商欢迎。Huang 等^[33]分别讨论了贸易信用融资、信用担保融资及回购担保融资的均衡策略和银行的融资决策。Lin 等^[34]研究了三种融资策略 (银行融资、带有回购条款的担保契约和带有批发价格折扣条款的担保契约) 对供应链的影响。

以上文献从一个单一融资策略的角度比较供应链性能。随着市场竞争的加剧，单一的融资策略已无法满足企业的需求。李鑫等^[35]建立零售商投贷联动融资下的批发价契约或收益共享契约模型，探讨了供应链契约结构的选择机理和供应链运作效率的改善空间。张克勇等^[36]探讨低碳供应链面临采购资金约束时，在链内、外及组合融资条件下使供应链绩效最优的融资策略。Zhuo 等^[37]考虑风险规避零售商采用两种混合融资模式 (银行信贷和股权融资混合或贸易信贷和股权融资混合) 下的供应链成员的融资和订购决策。Ding 等^[38]研究供应商在银行贷款、制造商预付款融资和混合融资模型下的融资与协调问题，结果表明供应商的最佳决策是只选择两种融资来源中的一个，而不是组合。Qin 等^[39]考虑外生零售价格，建立平台融资模式、供应商信用融资模式和混合融资模式下的优化模型，考察了制造商的减排、产量和融资策略。

以上低碳供应链金融相关研究结果证实了通过传统供应链金融手段与低碳供应链相结合可以帮助供应链成员突破资金困境,并且研究了在不同的约束性碳减排政策下供应链运营策略。本研究在此基础上,基于现实情景,提出了制造商资金受限的低碳供应链中制造商具有产出不确定性的情形,并将政府补贴和消费者低碳偏好纳入考虑。分析产出不确定性对供应链运营策略的影响,并将不同情景下的制造商融资选择进行对比分析,以期为制造商融资模式选择提供参考建议,在理论上丰富低碳供应链金融研究内容。

2.3 产出不确定性供应链管理的相关研究

供应链上下游成员在产品生产过程中都会面临产出不确定性的现象,现实生活中产出不确定现象是非常普遍的。例如在农产品行业,产出受到气候、地理位置等因素的影响。在实际的生产销售活动中,受自然灾害、原材料质量、设备故障及其他不可控因素的干扰,常常导致产品的产出不确定,从而影响整个供应链的绩效。

学者们已关注到这一现象,对产出不确定下供应链企业的优化决策问题展开研究。Peng 等^[40]以供应商与制造商共同构成的低碳供应链为研究对象,讨论在产出不确定性环境中的供应链协调问题。蔡建湖等^[41]讨论了产出不确定环境下的最优定价和投入决策问题以及供应商供货承诺行为对零售商竞争的影响。在政府补贴和产出不确定下,张涑贤等^[42]探讨不同契约(批发价格契约、两部定价契约和数量折扣契约)对产品绿色度及供应链绩效的影响。Zou 等^[43]讨论了制造商面对产出不确定和消费者具有低碳偏好时的融资和订货决策。林志炳^[44]以两个对称性供应商与一个制造商为研究对象,探讨了制造商产出不确定性对供应链的影响。许民利等^[45]研究了由原始制造商和产出不确定的第三方再制造商组成的闭环供应链系统。Maria 等^[46]构建一个内生进入的两阶段博弈模型,研究了在供应商相同的市场中,产出不确定对企业数量、总供给、消费者剩余和社会福利的影响。

上述学者主要关注了单个供应链成员面临产出不确定的情形,还有一些学者则研究了产需同时不确定的情形。如刘家国等^[47]针对产出和需求不确定性导致的残值或补货问题,构建两种不同现货市场补货策略模型,研究随机环境下最优原材料投入量—成品订货量决策行为及供应链协调。Li^[48]考虑到再制造率和再制造产品需求随机,分析了先再制造后定价和先定价后再制造两种决策顺序下的定

价问题。Chen 等^[49]讨论了产出不确定的损失厌恶型供应商向面临随机需求的零售商销售产品，并引入期权契约发展合作共享模式。Xie 等^[50]结合需求和产出不确定的情况，探讨了产出不确定和相对议价能力对回购契约绩效的影响。陈崇萍等^[51]研究两个存在产出不确定性和供应中断的供应商时，制造商如何进行双源采购决策。Zhao 等^[52]探讨了在产出和需求都存在不确定性的情况下，再制造商与零售商如何协同工作，发现收益共享合同可以有效地调整再制造供应链。Zare 等^[53]考虑一个面临产量不确定的供应商和多个随机需求的零售商组成的供应链，运用 Stackelberg 博弈结构分析供应链内的供应风险分担机制。蹇明等^[54]研究了供应商与制造商均产出不确定，而零售商需求不确定的三级供应链协调模型，证明回购契约和产出风险分担组合契约之间存在协调性。

上述成果主要集中在产出不确定情境下的供应链运作与协调，鲜有文献考虑制造商在产出不确定和低碳投资双重因素影响下所面临的运营与融资决策问题。此外，产出不确定性使本就不富裕的制造商雪上加霜。而以上研究均在供应链成员资金充足的背景下，探讨产出不确定性对供应链成员的影响，并未考虑由于产出不确定性使供应链成员陷入资金短缺的困境。

2.4 区块链环境下供应链管理的相关研究

在当今数字化时代，区块链技术逐渐成为供应链管理领域的热门话题。区块链作为一种去中心化、可追溯、安全可靠的技术，为供应链管理带来了全新的可能性。从供应链透明度、数据共享、合约执行到防止欺诈和串通，区块链在提高供应链效率和可信度方面发挥着重要作用。目前国内外很多学者已经将区块链技术应用到供应链管理中，发现区块链可以充分实现信息的双边共享、有效解决信息不对称问题，还可以改善供应链上下游成员间信息流动问题。Babich 等^[55]回顾了区块链技术在供应链管理中的优劣以及在三个研究主题中的应用。Risso 等^[56]描述了区块链在供应链管理中的当前技术水平，并确定需要探索的主要差距。Chio^[57]研究区块链下的奢侈品定价决策问题，发现了区块链系统优于传统追溯系统的条件。Pun 等^[58]针对欺骗性假冒产品，研究区块链披露产品质量信息，验证了区块链可以帮助消费者确认产品的真实性。Niu 等^[59]研究发现区块链可以解决再制造供应链中的风险规避质量缺失问题，利用区块链增加消费者对再制造产品的信任程度。谭春桥等^[60]构建传统模式和区块链技术模式，研究生鲜农产品供应链的定价和信息披露策略。此外，Zhang 等^[61]从信息透明性及消费者隐私泄露角

度分析了区块链技术的引入对竞争零售商战略定价的影响。

还有学者讨论了区块链对低碳供应链的影响。如张令荣等^[62]探讨了区块链技术下政府对低碳供应链的最优补贴策略。Xu 等^[63]研究了政府补贴对绿色供应链决策的影响及制造商投资区块链的条件。林强等^[64]将区块链的技术效应特征嵌入低碳供应链决策模型,研究零售商提供的不同激励契约下制造商实施区块链对碳减排、定价策略及企业利润的影响。梁喜等^[65]引入区块链技术共享产品信息,构建回收的闭环供应链模型。Jiang 等^[66]研究了不同渠道模式下供应链碳减排和区块链投资的联合策略。Li 等^[67]研究了区块链和公平偏好在可持续供应链绿色投资决策中的相互作用。区块链技术正引发供应链金融变革,有助于改善供应链金融的效率和安全性,推动供应链金融行业向着更加智能化和可持续发展方向发展。如 Choi 等^[68]讨论时尚产品供应链的融资问题,并比较了传统金融模式和区块链供应链金融模式。刘露等^[69]通过建立生产商、分销商和零售商的三级供应链,分析区块链信用传递技术对供应链金融的影响。唐丹等^[70]从不同主体的效益差异角度入手,对比分析区块链债转平台模式与传统供应链融资模式。

以上学者从区块链记录和共享供应链信息,实现产品溯源和透明度,防止假冒伪劣产品,优化供应链管理,改善供应链金融服务等多个角度进行研究。然而,他们并未深入研究区块链技术引入后如何影响具有产出不确定性的供应链融资决策问题。本文旨在探讨区块链技术对产出不确定的预测作用,研究区块链技术的应用程度对供应链上的企业融资的影响。

第3章 政府补贴下考虑低碳产品产出不确定性的制造商融资与碳减排策略

在实现“双碳”目标的过程中,制造商为了减少碳排放常常需要进行低碳投资。然而,这些投资往往需要付出相当大的成本,无论是碳减排技术的研发还是碳减排设备的购买,都会对制造商的财务造成一定的压力。为了鼓励企业减少碳排放,世界多国政府和地区采取了多种措施,包括碳减排补贴、税收优惠和政府优先采购等。碳减排补贴被认为普遍有效,可以帮助制造商降低碳减排成本,并鼓励制造商积极开展碳减排生产。然而,对于制造商来说,碳减排投资通常需要支付高额的成本,这加剧了它们的融资难题。近年来,供应链金融在缓解低碳制造企业的财务困境方面发挥了重要作用。制造商可以寻求供应链金融手段来支持低碳投资,以确保顺利开展碳减排生产并响应国家可持续发展的号召。此外,制造商的生产过程通常具有产出不确定性,这意味着原材料可能无法完全利用。基于以上背景,本章探讨了在政府补贴政策的背景下,资金受限制造商的融资决策和减排决策,考察不同融资模式下,产出不确定性变化对减排与供应链成员利润的影响,并比较了三种不同融资模式,以为制造商寻求最优的融资模式。

3.1 模型准备

3.1.1 模型描述

在一条由单一供应商和单一制造商组成的两级低碳供应链中,供应商和制造商之间开展 Stackelberg 博弈。其中,供应商是博弈的领导者,而制造商是博弈的追随者。处于领导地位的供应商先行决定批发价格,制造商根据供应商给定的批发价格以及出于对产出不确定性的考虑,向供应商采购原材料并加工成低碳产品,随后决策销售价格并向市场出售,以满足具有低碳偏好的消费者的需求。另外,制造商的生产过程往往存在着各种不确定性因素,如生产设备和技术、员工素质,科学地生产计划等,这给制造商带来挑战和风险,进一步加剧制造商资金短缺的窘境。制造商的初始资金为零,意味着制造商的生产和减排所需要的全部资金都需要通过融资获取。供应商的原材料成本为一次性固定投入,后期销售给制造商无变动成本增加,因此可视作生产成本为零。

自有资金无法满足正常生产活动的小型生产企业,可以采取三种途径解决资金不足问题:第一种是债权融资,如直接向银行贷款,并在生产—销售周期结束后偿还本金和利息。尽管银行融资是应对财务困难最方便最快捷的方式,但由于其严格的信贷标准和复杂的申请程序,往往导致融资企业难以获得融资援助。第二种是股权融资,即向投资者出售公司的所有权份额以换取资金。与债权融资不同,企业不需要还本付息。例如,京东上市之前经历了七轮股权融资,这些资金帮助京东快速提升了电商平台市场份额,最终创造了 1000 亿元的营收。除此之外,投贷联动融资是一种创新的融资模式,即投资者和银行合作,商业银行通过“债+股”的方式投资企业,形成“股”与“贷”结合的联动融资模式。

3.1.2 符号定义

文中使用的主要符号及其含义见表 3-1.

表 3-1 符号说明及其含义

参 数	含 义
a	消费者购买低碳产品的初始价格
b	两种产品的产量敏感系数
λ	消费者低碳偏好系数
x	产出不确定性的随机变量
k	制造商的碳减排成本系数
r	债权融资利率
η	股权融资比例
μ	投贷联动融资比例
θ	政府的碳减排成本补贴系数
决策变量	含 义
e^i	单位低碳产品碳减排量
ω^i	供应商的原材料批发价格
p^i	不同融资模式下低碳产品的销售价格
q^i	不同融资模式下低碳产品的原材料采购量
函 数	含 义
π_m^i, π_s^i	不同融资模式下的制造商和供应商利润
$E[\pi_m^i]$	不同融资模式下的制造商期望利润

备注: 上标 $i = DF, EF, IF$ 分别为债权融资、股权融资、投贷联动融资模型。

3.1.3 模型假设

本章基于以下假设建立博弈模型:

假设 1 参考 Peng 等^[40]的研究, 制造商的计划产量为 q , 实际产量为 qx 。其中, x 是描述制造商产出不确定性的随机变量, 且 x 满足 $E(x)=1$ 和 $Var(x)=\sigma^2$ 。方差越大, 产出不确定性越大。

假设 2 消费者具有低碳偏好, 倾向于购买低碳产品, 并愿意为低碳产品支付溢价价格。因此, 低碳产品的需求不仅与销售价格有关, 还与产品的碳减排量相关。为方便分析, 记反需求函数为 $p=a-bqx+\lambda e$ 。

假设 3 供应商仅为制造商提供原材料, 其原材料的产生的碳排放较小而忽略不计。借鉴 Xu 等^[71]和 Sun 等^[72]的处理方法, 设定制造商的碳减排技术投资成本与单位产品碳减排量之间满足 $C(e)=ke^2/2$, 且有 $C'(e)>0$ 和 $C''(e)>0$ 成立, 即碳减排成本是随单位产品碳减排量的增加而加速上升的。其中, $0\leq e\leq e_0$, e_0 为生产单位传统产品的碳排放量, k 是碳减排成本系数。

假设 4 为鼓励制造商投资碳减排技术并减少温室气体排放, 政府对低碳产品实施减排补贴, 补贴数额根据制造商投资碳减排技术的成本固定比例而定。与邢鹏等^[73]的设置一致, 设政府的碳减排成本补贴系数为 $\theta(0\leq\theta\leq1)$, 则补贴数额为 $\theta ke^2/2$ 。

3.2 模型构建与分析

3.2.1 债权融资(DF 模式)

债权融资 (DF 模式) 指的是企业通过向债权人发行债券或者向银行等机构借贷资金, 以筹集经营所需的资金。银行融资是债权融资的一种方式, 尤其是对于中小微企业来说, 银行融资是其获得资金的主要方式之一。在 DF 模式下, 期初, 制造商需要向银行申请其用于生产运营的资金, 即贷款额为 $L^{DF}=\omega^{DF}q^{IF}+\frac{1}{2}(1-\theta)k(e^{DF})^2$, 并按照 r 支付利息。制造商获取资金后进行生产活动; 在销售季结束时, 制造商需要按照合同约定偿还本息和, 即 $L^{DF}(1+r)$ 。此时制造商和供应商的利润函数:

$$\pi_m^{DF}=p^{DF}q^{DF}x-(\omega^{DF}q^{DF}+(1-\theta)k(e^{DF})^2/2)(1+r) \quad (3.1)$$

$$\pi_s^{DF}=\omega^{DF}q^{DF} \quad (3.2)$$

上述式(3.1)中右端第 1 项为制造商的销售收入, 第 2 项为制造商必须偿还的贷款本息和; 式(3.2)中右端项表示供应商的销售收入, 由于原材料的生产成

本为 0，因此销售收入等于利润。考虑到制造商的产出具有不确定性，结合反需求函数可知制造商的期望利润函数为：

$$E[\pi_m^{DF}] = (a + \lambda e^{DF})q^{DF} - b(1 + \sigma^2)(q^{DF})^2 - (\omega^{DF}q^{DF} + (1 - \theta)k(e^{DF})^2/2)(1 + r) \quad (3.3)$$

命题 3.1 在 DF 模式中，制造商的碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员的利润分别为：

$$e^{DF*} = \frac{a\lambda}{2A}, \quad q^{DF*} = \frac{ak(1+r)(1-\theta)}{2A}, \quad p^{DF*} = \frac{a(bk(1+r)(1-\theta)(3+4\sigma^2) - \lambda^2)}{2A},$$

$$E[\pi_m^{DF*}] = \frac{a^2k(1+r)(1-\theta)}{8A}, \quad \pi_s^{DF*} = \frac{a^2k(1-\theta)}{4A}。$$

其中 $A = 2bk(1+r)(1-\theta)(1+\sigma^2) - \lambda^2$ ，证明见附录 3-A。

推论 3.1 在 DF 模式中，消费者低碳偏好系数和碳减排成本补贴系数对供应链关键参数的影响如下：

$$(1) \quad \frac{\partial e^{DF*}}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial q^{DF*}}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \lambda} > 0。$$

$$(2) \quad \frac{\partial e^{DF*}}{\partial \theta} > 0, \quad \frac{\partial q^{DF*}}{\partial \theta} > 0, \quad \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \theta} > 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \theta} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \theta} > 0。$$

证明见附录 3-B。

推论 3.1(1)表明，随着消费者低碳偏好的增加，碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员利润均随之增加。消费者低碳偏好系数的增加使消费者更偏向购买低碳产品，促使低碳产品的需求增加。制造商为了满足消费者的低碳偏好，会加大在减少碳排放方面的投入和努力。由于生产低碳产品往往需要更高的技术投入和成本，加上消费者对低碳产品愿意支付更高的价格，制造商将这部分成本转嫁到产品价格上，导致销售价格增加。然而，销售价格上涨并不会为制造商造成负面影响，反而使制造商从中获利。供应商作为上游企业，受益于原材料采购量的增加，间接实现最大化利润。

推论 3.1(2)表明，政府碳减排成本补贴系数对碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员利润均有积极影响。政府补贴为制造商提供更好的市场环境和发展机会，降低了制造商的生产成本。为了获得更多的资金支持，制造商愿意努力减排，进而使碳减排量呈上升趋势，提高市场竞争力。然而，即使政府给予制造商一定的资金，但低碳产品的高额成本和消费者对低碳产品的认可，共同使得制造商提高销售价格。这是一个在追求环保可持续发展和维持企业经济利益之

间的平衡取舍。此外，政府补贴可以鼓励供应链成员采取更多的低碳环保措施，从而实现经济效益和环境效益的双赢。

推论 3.2 在 DF 模式中，产出不确定性对供应链关键参数的影响如下：

$$\frac{\partial e^{DF*}}{\partial \sigma^2} < 0, \frac{\partial q^{DF*}}{\partial \sigma^2} < 0, \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \sigma^2} = \begin{cases} \leq 0, & \text{if } k^{DF} < k \leq k_1 \\ > 0, & \text{if } k > k_2 \end{cases}, \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \sigma^2} < 0, \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \sigma^2} < 0。$$

其中 $k^{DF} = \frac{\lambda^2}{2b(1+r)(1-\theta)(1+\sigma^2)}$, $k_1 = \frac{\lambda^2}{b(1+r)(1-\theta)}$ 。证明见附录 3-C。

由推论 3.2 可知，随着低碳产品产出不确定性的增加，碳减排量、原材料采购量、供应链成员随之减少。对于制造商而言，低碳产品产出不确定性越大，制造商生产单位低碳产品的生产成本越高，这进一步加剧制造商资金压力。由于碳减排的边际成本快速上升，因此制造商会通过减少碳减排量来降低碳减排投资额度来缓解财务压力。随着低碳产品产出不确定性的持续增加，单位低碳产品的生产成本也不断上升，即使销售价格上升时也无法弥补成本的快速上涨，因此制造商利润随之下降。同时，制造商的原材料订购数量下降使得供应商利润也随之下降。

推论 3.2 也表明销售价格受到碳减排成本系数的影响。当碳减排成本系数较低时，销售价格与产出不确定性呈负相关关系；当碳减排成本系数较高时，销售价格与产出不确定性是正相关关系。这是因为碳减排成本系数较低时，制造商的减排成本相对较低且稳定。这意味着制造商在生产过程中能够更好地预测和控制成本，企业能够提供具有竞争力的价格，抑制产出不确定性的负面影响。然而，碳减排成本系数较高时，意味着制造商在生产过程中面临更大的成本波动和不确定性，导致制造商需要提高销售价格以保持利润的稳定性。

推论 3.3 在 DF 模式中，融资利率对供应链关键参数的影响如下：

$$\frac{\partial e^{DF*}}{\partial r} < 0, \frac{\partial q^{DF*}}{\partial r} < 0, \frac{\partial p^{DF*}}{\partial r} < 0, \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial r} < 0, \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial r} < 0。$$

证明见附录 3-D。

由推论 3.3 可知，随债权融资利率的增加，碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员利润均随之下降。融资利率上升意味着制造商的融资成本增加，使得制造商决策更加谨慎。融资利率的上涨不利于制造商大规模采购原材料，为实现利润最大化目标，制造商也会相应地降低对碳减排成本的投资，最终导致碳

减排量的下降。因此，制造商的产品在市场上并不具有优势，为吸引消费者，不得不降低销售价格。显然，融资利率的负面效应最终使得制造商和供应商的利润表现出下降趋势。

3.2.2 股权融资(EF 模式)

股权融资(EF 模式)的核心在于将企业的一部分股权售予投资者以获取所需的资金。该融资方式通常适用于企业初创期或需要大量资金进行扩张的情形。与债权融资不同，选择股权融资的制造商不需要在期末偿还本金和利息，而是向投资机构分红，但是会失去一部分股权控制权。在 EF 模式下，制造商首先需要确定融资需求，即融资金额为 $L^{EF} = \omega^{EF} q^{EF} + \frac{1}{2}(1-\theta)k(e^{EF})^2$ ，并与金融机构商议各自义务。期末，制造商按照事先约定给予第三方机构分红，其股权分红比例为 $\eta(0 < \eta < 1)$ 。此时，制造商和供应商的利润函数分别如下：

$$\pi_m^{EF} = (1-\eta)(p^{EF} q^{EF} x - \omega^{EF} q^{EF} - (1-\theta)k(e^{EF})^2 / 2) \quad (3.4)$$

$$\pi_s^{EF} = \omega^{EF} q^{EF} \quad (3.5)$$

与债权融资相似，将反需求函数代入，得到：

$$E[\pi_m^{EF}] = (1-\eta)((a + \lambda e^{EF})q^{EF} - b(1-\alpha)(1+\sigma^2)(q^{EF})^2 - (\omega^{EF} q^{EF} + (1-\theta)k(e^{EF})^2 / 2)) \quad (3.6)$$

命题 3.2 在 EF 模式中，制造商的碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员的利润分别为：

$$e^{EF*} = \frac{a\lambda}{2B}, \quad q^{EF*} = \frac{ak(1-\theta)}{2B}, \quad p^{EF*} = \frac{a(bk(1-\theta)(3+4\sigma^2) - \lambda^2)}{2B},$$

$$E[\pi_m^{EF*}] = \frac{a^2k(1-\theta)(1-\eta)}{8B}, \quad \pi_s^{EF*} = \frac{a^2k(1-\theta)}{4B}.$$

其中 $B = 2bk(1-\theta)(1+\sigma^2) - \lambda^2$ ，证明见附录 3-E。

从命题 3.2 可以看出，在 EF 模式中，碳减排量原材料采购量及其销售价格、供应商利润均与股权分红比例无关，只有制造商的期望利润与股权分红比例负相关。此融资模式下，制造商无需支付融资利息，只需在销售期末向第三方机构出让事先约定比例的利润。因此，股权分红比例越高，越不利于制造商。此外，制造商没有期末偿还资金的压力，相当于制造商融资负担降低，且第三方机构为制造商承担了风险。

推论 3.4 在 EF 模式中，消费者低碳偏好系数和碳减排成本补贴系数对供应

链关键参数的影响如下：

$$(1) \frac{\partial e^{EF*}}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial q^{EF*}}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial \pi_s^{EF*}}{\partial \lambda} > 0。$$

$$(2) \frac{\partial e^{EF*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial q^{EF*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \theta} < 0, \frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \theta} > 0。$$

证明见附录 3-F。

由推论 3.4(1)可知，消费者低碳偏好系数与碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员利润呈正相关关系。消费者低碳偏好系数的增加反映了消费者对环保问题的日益重视，更倾向于选择低碳产品。这种意识的增强导致制造商加大在减排、原材料采购和供应链管理方面的投入，从而实现更多的碳减排量和原材料采购量，同时也提高产品的销售价格和供应链成员利润。总之，这种现象反映了社会对环保和可持续发展的关注，也反映了企业的积极响应和投入。

推论 3.4(2)表明，碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员利润随政府补贴系数的增加而增加。政府通过提供补贴来激励企业采取更多的碳减排措施。随着补贴系数的增加，企业可以获得更多的经济激励，从而更积极地投入到减排工作中。这也刺激制造商加大原材料的采购量，以保持盈利水平。此外，政府补贴可以帮助制造商弥补因生产低碳产品而增加的成本，降低产品售价上涨的压力，同时保持产品的竞争力。因此，政府补贴使得供应链成员都可以享受到补贴带来的成本减少和销售增长的好处，继而增加利润。

推论 3.5 在 EF 模式中，产出不确定性对供应链关键参数的影响如下：

$$\frac{\partial e^{EF*}}{\partial \sigma^2} < 0, \frac{\partial q^{EF*}}{\partial \sigma^2} < 0, \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \sigma^2} = \begin{cases} \leq 0, & \text{if } k^{EF} < k \leq k_2 \\ 0, & \text{if } k > k_2 \end{cases}, \frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \sigma^2} < 0, \frac{\partial \pi_s^{EF*}}{\partial \sigma^2} < 0。$$

$$\text{其中 } k^{EF} = \frac{\lambda^2}{2b(1-\theta)(1+\sigma^2)}, \quad k_2 = \frac{\lambda^2}{b(1-\theta)}, \quad \text{证明见附录 3-G。}$$

由推论 3.5 可知，碳减排量、原材料采购量、供应链成员利润与产出不确定性呈负相关关系。从风险角度来看，产出不确定性越高，越不利于制造商低碳产品生产的合格率。虽然期初制造商利用股权融资获得资金用于生产和碳减排，但考虑到产出不确定性增加所带来的不稳定性上升，制造商会选择减少原材料采购量和对碳减排的投资。同样地，EF 模式下产出不确定性对销售价格的影响仍受到碳减排成本系数的影响。低碳减排成本意味着制造商可以更容易地降低产品的总成本。因此，即使面临产出不确定性，企业也可以通过稳定的成本来降低销售

价格以吸引消费者，保持其利润率。高碳减排成本意味着企业需要承担更高的生产成本，致使制造商的利润空间受到挤压。因此，制造商倾向于提高销售价格以弥补成本的波动带来的风险，并保障利润。

3.2.3 投贷联动融资(IF 模式)

投贷联动融资(IF 模式)是银行与投资机构(如私募基金、券商等)等金融服务方共同为中小企业提供融资服务的一种融资方式。IF 模式下，制造商需要根据自身情况选择合适的金融机构提交申请，并与合作者达成协议，明确双方的权利和义务。假设制造商的股权融资比例为 μ ($0 < \mu < 1$)，则债权融资比例为 $1 - \mu$ ，债权融资额度为 $L^F = (1 - \mu)(\omega^F q^F + \frac{1}{2}(1 - \theta)k(e^F)^2)$ 。销售周期结束后，制造商按照协议履行分红和还款义务。制造商股权融资的分红比例为 η ，债权融资需要偿还的利息为 $L^F r$ 。股权融资比例和股权分红比例相互独立。此时，制造商和供应商的利润函数如下：

$$\pi_m^{IF} = (1 - \eta)(p^F q^F x - (1 - \mu)(\omega^F q^F + (1 - \theta)k(e^F)^2 / 2)(1 + r)) \quad (3.7)$$

$$\pi_s^{IF} = \omega^F q^F \quad (3.8)$$

与前两个模型类似，制造商的期望利润函数为：

$$E[\pi_m^{IF}] = (1 - \eta)((a + \lambda e)q^F - b(1 - \alpha)(1 + \sigma^2)(q^F)^2 - (1 - \mu)(\omega^F q^F + (1 - \theta)k(e^F)^2 / 2)(1 + r)) \quad (3.9)$$

命题 3.3 在 IF 模式中，制造商的碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员利润分别为：

$$e^{IF*} = \frac{a\lambda}{2C}, \quad q^{IF*} = \frac{ak(1 - \mu)(1 - \theta)(1 + r)}{2C}, \quad p^{IF*} = \frac{a(bk(1 + r)(1 - \mu)(1 - \theta)(3 + 4\sigma^2) - \lambda^2)}{2C},$$

$$E[\pi_m^{IF*}] = \frac{a^2 k(1 - \theta)(1 + r)(1 - \mu)(1 - \eta)}{8C}, \quad \pi_s^{IF*} = \frac{a^2 k(1 - \theta)}{4C}。$$

其中 $C = 2bk(1 + r)(1 - \mu)(1 - \theta)(1 + \sigma^2) - \lambda^2$ ，证明见附录 3-H。

推论 3.6 在 IF 模式中，消费者低碳偏好系数和碳减排成本补贴系数对供应链关键参数的影响如下：

$$(1) \quad \frac{\partial e^{IF*}}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial q^{IF*}}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \lambda} > 0;$$

$$(2) \quad \frac{\partial e^{IF*}}{\partial \theta} > 0, \quad \frac{\partial q^{IF*}}{\partial \theta} > 0, \quad \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \theta} > 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \theta} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \theta} > 0。$$

证明见附录 3-I。

推论 3.6 表明消费者低碳偏好和政府补贴系数对碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员利润均产生积极影响，这与推论 3.1 和推论 3.4 的结论一致。消费者在购买决策中越来越重视环保因素，愿意为环保产品支付更高的价值。这种消费者行为促进了制造商不断推动减少碳排放，也反映了低碳产品需求增加。由于市场需求的驱动，促使制造商对原材料的采购。而低碳产品的高价值提高了销售价格，从而获得更高的利润。

此外，政府补贴作为直接的激励政策，降低碳减排成本，致使制造商有能力加大减排和原材料采购，以满足低碳生产的需求。但制造商实施减排措施时仍需要投入大量资金，导致制造商将成本转嫁给消费者。显而易见，消费者低碳偏好和政府补贴都可以促进整个供应链成员积极采取环保措施，提高生产效率和降低成本，进而增加利润。因此，消费者低碳偏好和政府补贴的积极影响可以推动企业和整个供应链逐步转向低碳、环保的方向，有助于实现可持续发展目标。

推论 3.7 在 IF 模式中，产出不确定性对供应链关键参数的影响如下：

$$\frac{\partial e^{IF*}}{\partial \sigma^2} < 0, \quad \frac{\partial q^{IF*}}{\partial \sigma^2} < 0, \quad \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \sigma^2} = \begin{cases} \leq 0, & \text{if } k^{IF} < k \leq k_3 \\ > 0, & \text{if } k > k_3 \end{cases}, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \sigma^2} < 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \sigma^2} < 0.$$

$$\text{其中 } k^{IF} = \frac{\lambda^2}{2b(1+r)(1-\theta)(1-\mu)(1+\sigma^2)}, \quad k_3 = \frac{\lambda^2}{b(1+r)(1-\mu)(1-\theta)}.$$

证明见附录 3-J。

推论 3.7 表明，产出不确定性变化对模型决策变量、供应链成员利润的影响方式与推论 3.2 和 3.5 一致。低碳产品产出不确定性增加，制造商出于降低成本考虑会选择降低碳减排投资，碳减排量也随之减少。产出不确定性增加，引起低碳产品的生产成本上涨，制造商减少原材料采购量，最终导致低碳产品供给数量减少。较低的碳减排成本意味着制造商可以以较低的成本生产并提供符合标准的产品，这种成本优势使得制造商具有竞争力，即使面对产出不确定性的增加也不会影响制造商的采取低价策略。相反，高碳减排成本使得制造商在面对产出不确定性时更加谨慎，无法提供具有竞争力的价格。因此，即使制造商通过提高销售价格转移生产成本给消费者，但制造商和供应商的利润还是受生产成本增加、供给数量减少等因素影响而减少。

推论 3.8 在 IF 模式中，融资利率对供应链关键参数的影响如下：

$$\frac{\partial e^{IF*}}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial q^{IF*}}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial p^{IF*}}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial r} < 0。$$

证明见附录 3-K。

推论 3.8 呈现了融资利率对供应链关键参数的影响,其结果与推论 3.3 一致。融资利率的变化会影响到制造商的利息支出,改变制造商的生产与碳减排成本,进一步影响到制造商的采购决策与碳减排技术投资,碳减排量、原材料采购量与销售价格也随之相应调整。显而易见,利率增加会引起制造商融资成本增加,导致制造商期望利润减少。作为主导者的供应商并未参与到制造商的融资活动中,但其利润直接受到制造商采购决策的影响,故而融资利率间接影响到供应商利润。因此,面对利率波动,企业应建立完善的风险管理机制,优化融资结构,同时加强与金融机构的沟通合作,提高自身盈利能力和寻求政策支持,以应对利率风险并调价利率带来的压力。

3.3 模型比较与分析

结合上述的分析,本节对三种融资模型的均衡解及供应链成员的利润进行对比分析,探讨制造商的最佳融资策略。同时本节旨在为制造商提供有价值的见解,以便为企业提供理论支撑。

推论 3.9 不同融资模式下的均衡状态满足:

当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时, $e^{DF*} < e^{IF*} \leq e^{EF*}$, $q^{DF*} < q^{IF*} \leq q^{EF*}$, $p^{DF*} < p^{IF*} \leq p^{EF*}$; 当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时, $e^{DF*} < e^{EF*} < e^{IF*}$, $q^{DF*} < q^{EF*} < q^{IF*}$, $p^{DF*} < p^{EF*} < p^{IF*}$ 。

其中 $\bar{\mu} = \frac{r}{1+r}$ 。证明见附录 3-L。

推论 3.9 表明,当股权融资比例较低时,碳减排量、原材料采购量和销售价格都是在 EF 模式下最优;当股权融资比例较高时,则是在 IF 模式中最优。股权融资比例意味着制造商与投资机构共同承担风险,并且不需要承担固定的负债压力,使得制造商能更灵活地应对市场波动,减少产出不确定性的不利影响,调整碳减排量、原材料采购量和销售价格以适应市场需求,实现最优化。然而,股权融资比例较高时,单纯的股权融资模式使得投资机构风险过高。此时,投资机构寻求与银行合作,共同为制造商提供资金是一种有效途径,并能稳定供应链。推论 3.9 也表明,碳减排量、原材料采购量和销售价格始终在 DF 模式下最低。相比较另外两种融资模式,DF 模式不仅限制制造商的资金流动性,也使制造商独

自承担风险，导致制造商需要谨慎考虑其行为。制造商应综合考虑碳减排、原材料采购和销售价格，制定可持续发展战略，多元融资支持，以实现环境、社会和经济效益的平衡，迈向可持续发展。

推论 3.10 不同融资模式下制造商期望利润和供应商利润满足：

(1) i) 在 $k^{DF} < k < k_4$ 时，若 $(\sigma^2)^{DF} < \sigma^2 \leq \sigma_1^2$ ，则 $E[\pi_m^{DF*}] \leq E[\pi_m^{EF*}]$ ；若 $\sigma^2 > \sigma_1^2$ ，则 $E[\pi_m^{DF*}] > E[\pi_m^{EF*}]$ 。在 $k \geq k_4$ 时，则 $E[\pi_m^{DF*}] > E[\pi_m^{EF*}]$ 。

ii) 在 $k^{IF} < k < k_5$ 条件下，若 $(\sigma^2)^{IF} < \sigma^2 \leq \sigma_2^2$ ，则 $E[\pi_m^{DF*}] \leq E[\pi_m^{IF*}]$ ；若 $\sigma^2 > \sigma_2^2$ ，则 $E[\pi_m^{DF*}] > E[\pi_m^{IF*}]$ 。在 $k \geq k_5$ 时，则 $E[\pi_m^{DF*}] > E[\pi_m^{IF*}]$ 。

iii) 当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时， $E[\pi_m^{IF*}] \leq E[\pi_m^{EF*}]$ ；当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时， $E[\pi_m^{IF*}] > E[\pi_m^{EF*}]$ 。

(2) 当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时， $\pi_s^{DF*} < \pi_s^{IF*} \leq \pi_s^{EF*}$ ；当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时， $\pi_s^{DF*} < \pi_s^{EF*} < \pi_s^{IF*}$ 。

$$\text{其中 } (\sigma^2)^{DF} = \frac{-2bk(1+r)(1-\theta) + \lambda^2}{2bk(1+r)(1-\theta)}, \quad (\sigma^2)^{IF} = \frac{-2bk(1+r)(1-\mu)(1-\theta) + \lambda^2}{2bk(1+r)(1-\mu)(1-\theta)},$$

$$\sigma_1^2 = \frac{2bk\eta(1+r)(1-\theta) - (r+\eta)\lambda^2}{-2bk\eta(1+r)(1-\theta)}, \quad \sigma_2^2 = \frac{-2bk\eta(1+r)(1-\mu)(1-\theta) + (\mu(1-\eta) + \eta)\lambda^2}{2bk\eta(1+r)(1-\mu)(1-\theta)},$$

$$k_4 = \frac{(r+\eta)\lambda^2}{2b\eta(1+r)(1-\theta)}, \quad k_5 = \frac{(\mu(1-\eta) + \eta)\lambda^2}{2b\eta(1+r)(1-\theta)(1-\mu)}。 \text{证明见附录 3-M。}$$

由推论 3.10 可知，碳减排成本系数和产出不确定性共同影响制造商的选择。当碳减排成本系数和产出不确定性均较低时，制造商倾向于 EF 或 IF 模式；当碳减排成本系数较低而产出不确定性较高，或碳减排成本系数较高时，制造商则选择 DF 模式。EF 或 IF 模式能够通过股权融资或投贷联动融资方式来实现风险的分担，相对于 DF 模式更能降低制造商独自承担的风险，对于产出不确定性较低的制造商而言，这种分担风险的方式更有吸引力。然而，较低的碳减排成本系数意味着生产成本相对较低，但高的产出不确定性增加制造商的风险和成本。此时，制造商面临着产出不确定性和碳减排成本增加的双重压力，需要更加稳定和可控的资金来源。债权融资模式可以让制造商以固定利率从银行获得资金，这有助于维持资金稳定性，并有效管理碳减排成本的压力。

推论 3.10 表明，制造商对于 EF 或 IF 模式的选择受到股权融资比例的影响。与供应商的选择一致，即在股权融资比例低于阈值时选择 EF 模式，反之选择 IF 模式。股权融资比例较低时，制造商在 IF 模式中利用股权融资获得的资金并不多，但制造商仍要分出利润的一部分交付第三方金融机构，还要在期末偿还本息。

而 EF 模式下，第三方机构承担全部风险，使得制造商不必担心还款问题，更能集中在生产运营上，进而获得更大的利益。供应商也借助东风，更偏向于 EF 模式。然而，随着股权融资比例的增加，制造商利用债权融资的资金逐渐较少。此时，IF 模式逐渐进入供应链成员的视线，并未其带来更高的利润。这种多元的融资方式增加了制造商的选择，可以有效分散融资风险，降低融资成本。

3.4 数值算例

本小节结合数值算例来讨论部分参数对低碳供应链系统关键决策变量的影响方式。通过对这些参数的数值分析，制造商可以更好地了解其对低碳供应链系统的影响方式，从而做出合理的决策。相关参数设置如下： $a=100$ ， $b=1$ ， $d=0.5$ ， $\lambda=1$ ， $k=10$ ， $r=0.2$ ， $\eta=0.3$ ， $\mu=0.5$ ， $\theta=0.8$ ， $\sigma^2=0.6$ 。

3.4.1 产出不确定性对供应链关键参数的敏感性分析

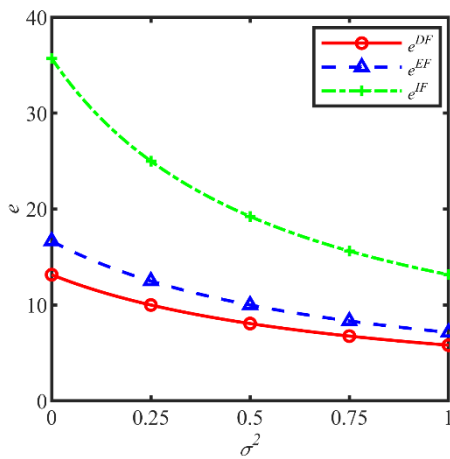


图 3-1 σ^2 对 e 的敏感性分析

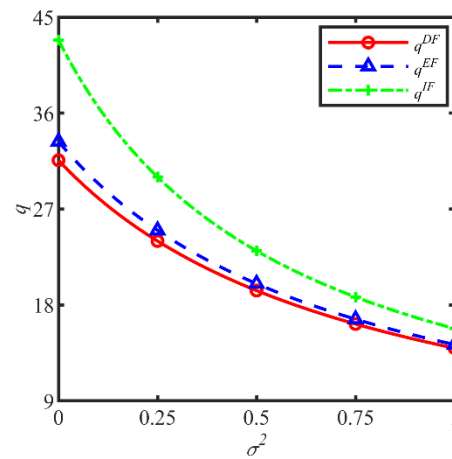


图 3-2 σ^2 对 q 的敏感性分析

从图 3-1—3-5 可知，随着产出不确定性的提高，碳减排量、原材料采购量、供应链成员利润都随之减少，而销售价格不断上升。产出不确定性给制造商带来了一定的挑战性，制造商要获得满足市场需求的产品数量就需要付出更多的成本。产出不确定性越高，制造商生产合格产品的预期成本越高，这加重了制造商的负担，迫使制造商将缩减对碳减排技术的投资和减少原材料的采购，进而导致供应商利润下降。与此同时，由于消费者对低碳产品的偏好，制造商可以通过提高销售价格向消费者转嫁部分成本以实现自身利益最大化的目标。因此，产出不确定性越高，碳减排量、原材料采购量越低，而销售价格越高。尽管销售价格上升，但由于原材料采购量下降、成本增加以及供应链效率下降等因素，制造商的利润仍下降。产出不确定性的提高对整个供应链产生的影响超过了销售价格上升所带

来的利益。

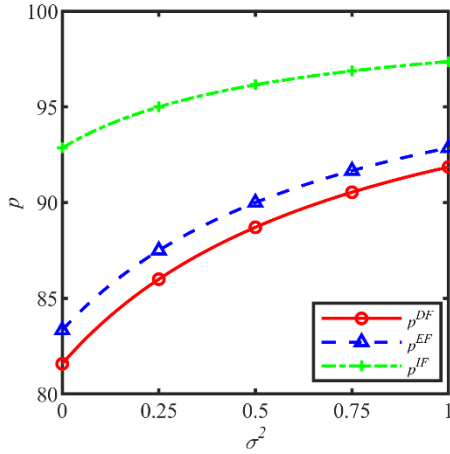


图 3-3 σ^2 对 p 的敏感性分析

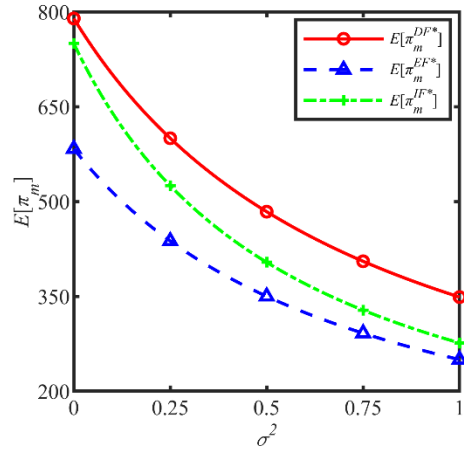


图 3-4 σ^2 对 $E[\pi_m]$ 的敏感性分析

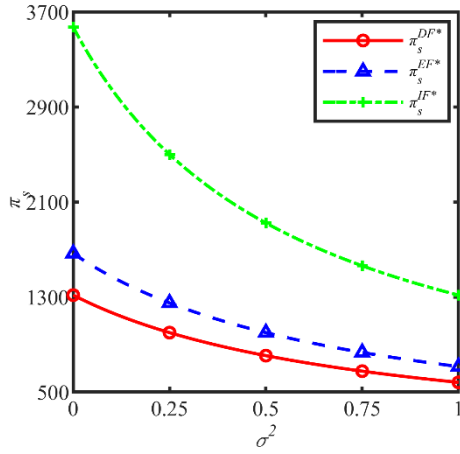


图 3-5 σ^2 对 π_s 的敏感性分析

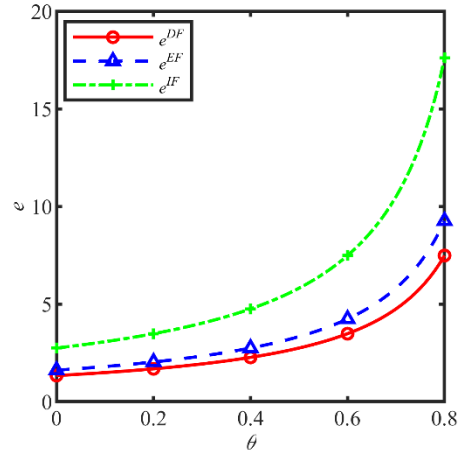


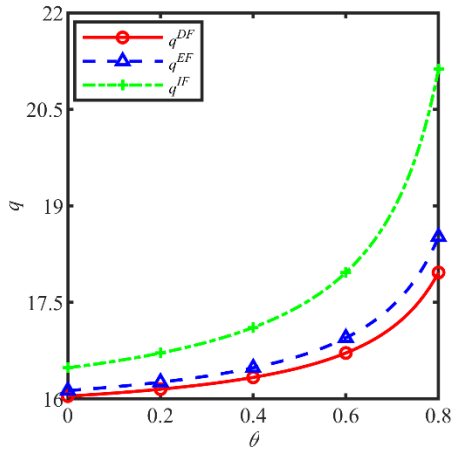
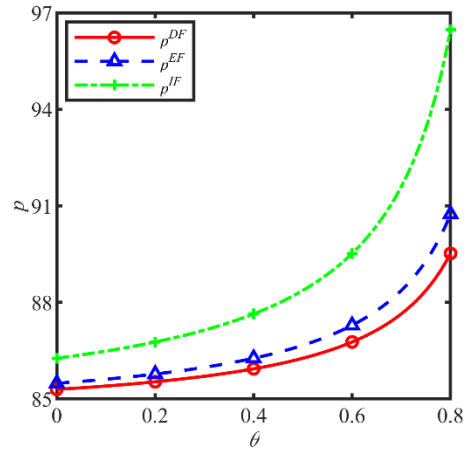
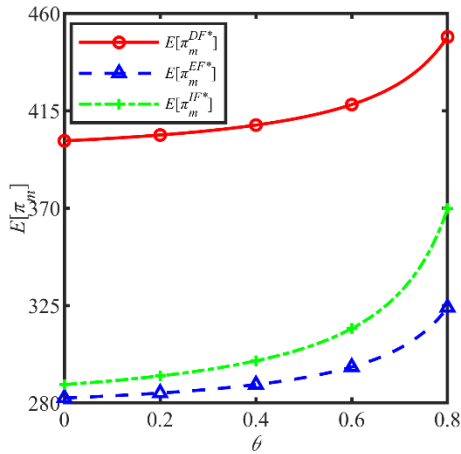
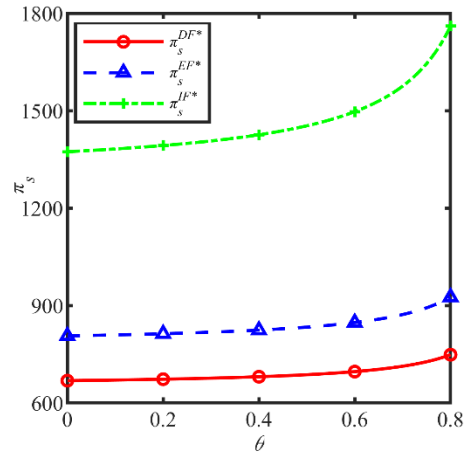
图 3-6 θ 对 e 的敏感性分析

另一方面，比较三种融资模式发现，制造商倾向于选择 DF 模式。相比较另外两种融资模式，产出不确定性对 DF 模型下的原材料采购量的敏感性变化的影响最小，表明制造商在 DF 模式下仍能保持相对稳定的产品供给量。同时，制造商的销售价格的敏感性变化在 DF 模式中最大，说明销售价格易受产出不确定性的影响，最终导致制造商期望利润在 DF 模式中处于最高水平。然而，供应商倾向于选择 IF 模式。此时，处于领导地位的供应商，迫使制造商退而求其次也选择 IF 模式。从环境效益上看，IF 模式也是制造商的最佳选择。因此，制造商在选择融资模式时需要综合考虑各种因素，以确保选择最适合的融资方式。

3.4.2 政府低碳补贴对供应链关键参数的敏感性分析

图 3-7—3-10 表明了政府补贴与碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员的利润均是正相关关系。政府补贴可以降低制造商实施碳减排措施的成本，

鼓励企业采取更多的环保举措。当政府提供更多补贴时，制造商更有动力投入资金来减少碳排放，从而增加碳减排量。政府补贴相当于增加制造商的资金，促使制造商加大原材料采购量以占据更多的市场份额。政府补贴也间接的影响消费者的行为，促使消费者愿意为低碳产品买单。因此，政府补贴的上升可以带动整个供应链上下游企业的发展。供应商可以获得更多订单，制造商可以获得更好的销售价格，从而提高了整个供应链的利润水平。供应链各个环节的利润增加也会促进合作伙伴间的良性互动和发展。


 图 3-7 θ 对 q 的敏感性分析

 图 3-8 θ 对 p 的敏感性分析

 图 3-9 θ 对 $E[\pi_m]$ 的敏感性分析

 图 3-10 θ 对 π_s 的敏感性分析

有趣的是，政府补贴对碳减排量、原材料采购量和销售价格的变化都是在 IF 模式下最高的，但制造商利润却是在 DF 模式下最高。出现这种差异化的原因是因为政府补贴虽然有利于制造商期望利润增长，但高碳减排成本系数和高股权融资比例下，制造商仍需要谨慎考虑融资模式的选择。这种情况使得制造商和供应商的利益出现冲突，出于环境效益和经济效益的双重考虑，制造商牺牲一部分利

润去选择 IF 模式是最佳的选择。显而易见，制造商面临多种融资模式选择时，需要结合多种因素帮助其作出合理的决策。

3.5 本章小结

本章将政府补贴碳减排成本机制引入具有产出不确定性制造商的两级供应链系统，对比分析了三种融资模式(债权融资、股权融资和投贷联动融资)下的碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员的(期望)利润。结合经济效益与环境效益帮助制造商选择合适的融资方式。主要结论如下：

(1) 与政府补贴和消费者低碳偏好对供应链关键参数的正向影响不同，产出不确定性(政府补贴)对碳减排量、原材料采购量和供应链成员(期望)利润产生负(正)向影响。产出不确定性对销售价格的影响与碳减排成本系数有关。具体而言，当碳减排成本系数较低时，销售价格与产出不确定性呈负相关关系；当碳减排成本系数较高时，销售价格与产出不确定性是正相关关系。定价作为直接影响制造商期望利润的因素，需要综合考虑多方面的因素，不断的市场监测和反馈，以便及时调整和优化定价策略。

(2) 无论从经济效益还是从环境效益的角度，在不同的股权融资比例范围内，供应链成员的目标达到统一。即当股权融资比例较低时，碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链(期望)利润都是在 EF 模式下最优；当股权融资比例较高时，则是在 IF 模式中最优。制造商在面临多种融资模式的选择时，需全面考量碳减排成本、产出不确定性以及股权融资比例等因素对其决策的影响。

(3) 绝大多数情形下，产出不确定性或政府补贴对主要决策变量的敏感性变化在投贷联动融资模式下的影响最大。结合具体的股权融资比例和碳减排成本系数，发现制造商和供应商会出现利益冲突。此时，制造商应重新选择合适的融资模式，以维持供应链的稳定性。

第4章 政府补贴下考虑产出不确定性与异质性产品的制造商融资与碳减排策略

低碳发展不可一蹴而就，在中国、加纳、澳大利亚和美国等国家，导致碳排放量增加的主要原因是电力等高耗能和碳密集型产业^[74]。企业作为曾经导致气候变化的主要缔造者，如今主动承担碳减排重任、向消费者提供低碳产品是其义不容辞的社会责任。然而，企业的生产转型不可能一蹴而就，往往需要经历漫长的变革过程，其间新产品的开发与传统产品的生产销售则经常在市场上并存。此外，它也能满足消费者的需求，提升企业的社会责任形象，增强市场竞争力，成为企业实现可持续发展的有效战略。与生产传统产品运用的娴熟技术不同，企业为生产低碳产品而开发绿色生产技术本身具有复杂性与不稳定性，并且由于绿色生产技术的相对不成熟造成产出具有不确定性。这些不确定因素的存在，使得制造商在提供低碳产品的同时还需要提供传统产品以维持市场稳定，进一步增加了低碳产品与传统产品在市场上共存的可能性。

4.1 模型准备

4.1.1 模型描述

本文研究对象为单一制造商和单一供应商组成的二级供应链。其中，制造商从供应商处采购原材料分别加工成具有低碳属性的低碳产品和不具有低碳属性的传统产品。低碳产品在生产过程中需要引入先进的碳减排技术，并导致产出具有一定的不确定性^[75]。传统产品的加工则使用相对成熟的技术，产出稳定。制造商的初始资金为零，意味着制造商的生产和减排所需要的全部资金都需要通过融资获取。与第三章类似，制造商有三种融资模式可供选择，不再赘述。

在单一制造商和单一供应商组成的供应链中，供应商控制着原材料的供给，比如在智能手机制造业中，拥有核心技术和专利的供应商在供需关系中处于强势的地位。此时，供应商是双方开展 Stackelberg 博弈的主导者，而制造商是博弈的跟随者。双方的博弈顺序为：供应商首先决策原材料的批发价格，随后制造商结合产出不确定性、贷款利率等因素决策低碳产品和传统产品的销售价格以及低碳产品的减排量。双方决策完成后，制造商向第三方申请生产与减排所需资金，向

供应商采购原材料并加工两种产品进行销售，销售周期结束后制造商偿还贷款或分红。

4.1.2 符号定义

文中使用的主要符号及其含义见表 4-1.

表 4-1 符号说明及其含义

参 数	含 义
a	消费者购买两种产品的初始价格
b	两种产品的产量敏感系数
d	两种产品之间的相互替代系数
λ	消费者低碳偏好系数
x	产出不确定性的随机变量
k	制造商的碳减排成本系数
r	债权融资利率
η	股权融资比例
μ	投贷联动融资比例
θ	政府的碳减排成本补贴系数
φ	利润分配比例
决策变量	含 义
e^i	单位低碳产品碳减排量
ω^i	供应商的原材料批发价格
p_j^i	不同融资模式下两种产品的销售价格
q_j^i	不同融资模式下两种产品的原材料采购量
函 数	含 义
π_m^i, π_s^i	不同融资模式下的制造商和供应商利润
$E[\pi_m^i], E[\pi_{sc}^i]$	不同融资模式下的制造商和供应链系统期望利润

备注：上标 $i = DF, EF, IF, C, N$ 分别为债权融资、股权融资、投贷联动融资、合作决策以及改进的 Nash 讨价还价模型；下标 $j = t, d$ 分别为低碳产品和传统产品。

4.1.3 模型假设

本章基于以下假设建立博弈模型：

假设 1 生产低碳产品需要开发碳减排技术，并导致其产出具有不确定性^[75]。参照 Zou 等^[43]的描述方式，以 x 表示产出不确定性，它具有均值 μ 和方差 σ^2 ，且满足 $E(x)=1$ 和 $Var(x)=\sigma^2$ 。给定低碳产品的原材料采购量为 q_t ，实际产出为 $q_t x$ 。方差越大，表示产出不确定性越大。

假设 2 消费者具有低碳偏好，参考 Xia 等^[76]的研究，消费者对低碳产品和

传统产品的逆需求函数分别表示为 $p_t = a - bq_t x - dq_d + \lambda e$ 和 $p_d = a - bq_d - dq_t x$ 。其中， a 表示不考虑碳减排时消费者购买两种产品愿意接受的最高价格， b 表示两种产品的产量敏感系数， $d(0 < d < b)$ 表示两种产品之间的相互替代系数。

本章其他假设与 3.1.3 相同，不再赘述。

4.2 模型构建与分析

4.2.1 债权融资(DF 模式)

在 DF 模式中，制造商在组织生产前，需要向银行申请企业用于生产运营的全部资金，包括原材料采购成本和投资碳减排技术的资金，即贷款额为 $L^{DF} = \omega^{DF}(q_t^{DF} + q_d^{DF}) + (1 - \theta)k(e^{DF})^2 / 2$ ，并约定贷款利率为 r ；在销售季结束后，制造商按照合同约定偿还本息和 $L^{DF}(1 + r)$ 。由于制造商的违约风险不是本文的讨论重点，因而，此处设定制造商在融资期末无论出于何种考虑都会正常偿还贷款本息和。此时，制造商和供应商的利润函数分别为：

$$\pi_m^{DF} = (p_t^{DF} q_t^{DF} x + p_d^{DF} q_d^{DF}) - (\omega^{DF}(q_t^{DF} + q_d^{DF}) + (1 - \theta)k(e^{DF})^2 / 2)(1 + r) \quad (4.1)$$

$$\pi_s^{DF} = \omega^{DF}(q_t^{DF} + q_d^{DF}) \quad (4.2)$$

上述式(4.1)中右端第 1 项为制造商的销售收入，第 2 项为制造商必须偿还的贷款本息和；式(4.2)中右端项表示供应商的销售收入，由于原材料的生产成本为 0，因此销售收入等于利润。考虑到制造商的产出具有不确定性，结合低碳产品和传统产品的市场需求函数可知制造商的期望利润函数表示为：

$$E[\pi_m^{DF}] = a(q_t^{DF} + q_d^{DF}) - 2dq_t^{DF} q_d^{DF} - b(q_d^{DF})^2 - b(q_t^{DF})^2(1 + \sigma^2) + \lambda e^{DF} q_t^{DF} - (\omega^{DF}(q_t^{DF} + q_d^{DF}) + (1 - \theta)k(e^{DF})^2 / 2)(1 + r) \quad (4.3)$$

命题 4.1 在 DF 模式中，制造商的碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员的利润分别为：

$$e^{DF*} = \frac{a\lambda(b-d)}{2A}, \quad q_t^{DF*} = \frac{ak(1+r)(b-d)(1-\theta)}{2A}, \quad q_d^{DF*} = \frac{aB}{4A}, \quad p_t^{DF*} = \frac{aC}{4A},$$

$$p_d^{DF*} = \frac{3a}{4}, \quad E[\pi_m^{DF*}] = \frac{a^2 D}{16A}, \quad \pi_s^{DF*} = \frac{a^2 D}{8(1+r)A}。$$

其中 $A = 2k(1+r)(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2) - d^2) - b\lambda^2$ ， $B = 2k(1+r)(1-\theta)(b(1+\sigma^2) - d) - \lambda^2$ ， $C = 2k(1+r)(1-\theta)(b(3b + (4b-d)\sigma^2) - 3d^2) - (2b+d)\lambda^2$ ， $D = 2k(1+r)(1-\theta)(b(2+\sigma^2) - 2d) - \lambda^2$ 。证明见附录 4-A。

推论 4.1 在 DF 模式中, 消费者低碳偏好系数和碳减排成本补贴系数对供应链关键参数的影响如下:

$$(1) \frac{\partial e^{DF*}}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial q_t^{DF*}}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial q_d^{DF*}}{\partial \lambda} < 0, \frac{\partial p_t^{DF*}}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial p_d^{DF*}}{\partial \lambda} = 0, \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \lambda} > 0。$$

$$(2) \frac{\partial e^{DF*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial q_t^{DF*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial q_d^{DF*}}{\partial \theta} < 0, \frac{\partial p_t^{DF*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial p_d^{DF*}}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \theta} > 0。$$

证明见附录 4-B。

由推论 4.1(1)可知, 碳减排量、低碳产品的原材料采购量及其销售价格、制造商期望利润和供应商利润与消费者低碳偏好系数均正相关, 而传统产品的原材料采购量与消费者低碳偏好系数负相关, 传统产品的销售价格不受消费者低碳偏好系数的影响。消费者低碳偏好体现了市场对低碳产品的喜好程度, 进而促进制造商的低碳投入。消费者低碳偏好越强烈, 则越倾向购买低碳产品, 并且愿意支付更高的价格。消费者低碳偏好的增加, 促使低碳产品市场需求增加。虽然制造商高碳减排投资增加了成本, 但消费者对低碳产品的偏好有利于制造商提高产品销售价格, 从而形成良好的低碳经济循环。与此同时, 随着消费者低碳偏好的升高, 其对传统产品的市场需求下降, 且销售价格不受消费者低碳偏好的影响, 制造商会降低对传统产品的原材料采购。由于消费者低碳偏好作用的边际收益高于边际成本, 因此制造商期望利润随之增加。对于供应商, 总的市场需求增加促使供应商的利润增加。

由推论 4.1(2)可知, 随着碳减排成本补贴系数的增加, 碳减排量、低碳产品的原材料采购量及其销售价格、供应链成员利润都随之增加, 而传统产品的原材料采购量却随之下降, 但其销售价格保持不变。这是因为政府给予制造商碳减排成本补贴, 使制造商的财务压力减小。随着政府补贴力度增加, 制造商更有动力进行碳减排投入, 从而使得碳减排量增加。受低碳补贴的影响, 制造商对两种产品分配时更关注低碳产品, 以提高其市场竞争力。低碳产品的市场需求增加会抑制传统产品的市场需求, 导致传统产品的市场需求下降。碳排放量是影响产品销售价格的重要因素之一, 政府补贴力度的加大间接提高了低碳产品的销售价格, 但并不影响传统产品的销售价格, 制造商也从中得到了好处。总体上, 两种产品的原材料总采购量也受益于碳减排成本补贴系数的提升, 使得供应商利润呈上升趋势。

推论 4.2 在 DF 模式中，产出不确定性对供应链关键参数的影响如下：

$$\frac{\partial e^{DF*}}{\partial \sigma^2} < 0, \quad \frac{\partial q_t^{DF*}}{\partial \sigma^2} < 0, \quad \frac{\partial q_d^{DF*}}{\partial \sigma^2} > 0, \quad \frac{\partial p_t^{DF*}}{\partial \sigma^2} = \begin{cases} \leq 0, & \text{if } \underline{k}^{DF} < k \leq \bar{k}^{DF} \\ > 0, & \text{if } k > \bar{k}^{DF} \end{cases}, \quad \frac{\partial p_d^{DF*}}{\partial \sigma^2} = 0,$$

$$\frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \sigma^2} < 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \sigma^2} < 0。$$

其中 $\underline{k}^{DF} = \frac{b\lambda^2}{2(1+r)(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)}$, $\bar{k}^{DF} = \frac{b\lambda^2}{(1+r)(1-\theta)(b^2-d^2)}$ 。证明见附录

4-C。

由推论 4.2 可知，随着产出不确定性的增强，碳减排量、低碳产品的原材料采购量及供应链成员的利润将随之减少或降低，传统产品的原材料采购量随之增加且其销售价格不受产出不确定性变化的影响。碳减排技术的引入导致产出不确定性，对于制造商而言，产出不确定性越强，风险就越大。为规避风险，制造商通过减少碳减排技术投入加以应对，此时，碳减排量必然下降。考虑到消费者的低碳偏好特征，低碳产品的市场需求将会减少，低碳产品的原材料采购量也随之减少。同时，部分消费需求转移到传统产品，致使传统产品的原材料采购量增加。产出不确定性增强，制造商的期望利润首先受到冲击，会持续减少。而且，由于产出不确定性增强对低碳产品的负向作用大于对传统产品的正向作用，进而导致供应商的利润水平也会不断下降。

推论 4.2 表明，产出不确定性对低碳产品销售价格的影响并非始终正相关，而是受到碳减排成本系数影响。当碳减排成本系数较小时，产出不确定性增强会引起低碳产品的销售价格下降。只有在碳减排成本系数较大情形下，并超过特定阈值时，低碳产品的销售价格才会随着产出不确定性的增强而上涨。其原因在于，如果碳减排成本系数较小，加大碳减排力度引致低碳产品市场需求增加带来的好处可以补偿产出不确定性增强和碳减排成本增加带来的负向影响，此时制造商为实现最优状态甚至可以降低低碳产品销售价格。当碳减排成本系数较大时，碳减排成本的负向作用大于需求增加的正向作用，制造商通过提高销售价格来补偿碳减排成本，而产出不确定性进一步加大了负向作用。

推论 4.3 在 DF 模式中，融资利率对供应链关键参数具有下列性质：

$$\frac{\partial e^{DF*}}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial q_t^{DF*}}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial q_d^{DF*}}{\partial r} > 0, \quad \frac{\partial p_t^{DF*}}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial p_d^{DF*}}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial r} < 0。$$

证明见附录 4-D。

由推论 4.3 可知，随债权融资利率的增加，碳减排量、低碳产品采购量及其售价、供应链成员利润均随之下降，而传统产品采购量随之增加，且其售价不会改变。随着融资利率的上升，制造商需要支付的利息也随之上升，这增加了制造商的成本，进而导致制造商期望利润下降，甚至会导致期末无法偿还本息而面临破产的风险。融资利率的负面效应，削弱了制造商对总采购量和碳减排投资的欲望，间接导致供应商利润减少。制造商在面临资金与成本的双重制约下，会减少对低碳产品的采购。而制造企业的目的是实现利润最大化，这促使制造商会加大对传统产品的采购。与此同时，定价策略可以直观的表现出企业的盈利水平。制造商双线生产时，因为市场上低碳产品的风险较高，一方面制造商选择降价销售以避免产品的堆积；另一方面，制造商的降价行为会促使消费者买单，打开品牌知名度，占据市场份额。虽然传统产品的销售渠道和消费群体都相对稳定，但制造商也不会盲目的抬高产品售价，而是稳定产品价格以维护顾客群体。

4.2.2 股权融资(EF 模式)

EF 模式下，制造商在组织生产前，先向第三方机构提交融资申请 $L^{EF} = \omega^{EF}(q_t^{EF} + q_d^{EF}) + (1-\theta)k(e^{EF})^2/2$ ，等待第三方投资机构审核后发放资金给制造商。销售周期结束后，制造商按照事先约定给予第三方机构分红，其股权分红比例为 $\eta(0 < \eta < 1)$ 。此过程中制造商和供应商都追求利润最大化的经营目标。此时，制造商和供应商的利润函数分别如下：

$$\pi_m^{EF} = (1-\eta)(p_t^{EF} q_t^{EF} x + p_d^{EF} q_d^{EF} - \omega^{EF}(q_t^{EF} + q_d^{EF}) - (1-\theta)k(e^{EF})^2/2) \quad (4.4)$$

$$\pi_s^{EF} = \omega^{EF}(q_t^{EF} + q_d^{EF}) \quad (4.5)$$

与债权融资相似，将低碳产品和传统产品的市场需求函数代入，得到：

$$E[\pi_m^{EF}] = (1-\eta)(a(q_t^{EF} + q_d^{EF}) - 2dq_t^{EF}q_d^{EF} - b(q_d^{EF})^2 - b(q_t^{EF})^2(1+\sigma^2) + \lambda e^{EF}q_t^{EF} - (\omega^{EF}(q_t^{EF} + q_d^{EF}) + (1-\theta)k(e^{EF})^2/2)) \quad (4.6)$$

命题 4.2 在 EF 模式中，制造商的碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员的利润分别为：

$$e^{EF*} = \frac{a\lambda(b-d)}{2E}, \quad q_t^{EF} = \frac{ak(b-d)(1-\theta)}{2E}, \quad q_d^{EF*} = \frac{aF}{4E}, \quad p_t^{EF*} = \frac{aG}{4E}, \quad p_d^{EF*} = \frac{3a}{4},$$

$$E[\pi_m^{EF*}] = \frac{a^2(1-\eta)H}{16E}, \quad \pi_s^{EF*} = \frac{a^2H}{8E}。$$

其中 $E = 2k(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2) - d^2) - b\lambda^2$ ， $F = 2k(1-\theta)(b(1+\sigma^2) - d) - \lambda^2$ ，

$G = 2k(1-\theta)(b(3b + (4b-d)\sigma^2) - 3d^2) - (2b+d)\lambda^2$, $H = 2k(1-\theta)(b(2 + \sigma^2) - 2d) - \lambda^2$ 。证明见附录 4-E。

推论 4.4 在 EF 模式中, 消费者低碳偏好系数和碳减排成本补贴系数对供应链关键参数的影响如下:

$$(1) \frac{\partial e^{EF*}}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial q_t^{EF*}}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial q_d^{EF*}}{\partial \lambda} < 0, \frac{\partial p_t^{EF*}}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial p_d^{EF*}}{\partial \lambda} = 0, \frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial \pi_s^{EF*}}{\partial \lambda} > 0。$$

$$(2) \frac{\partial e^{EF*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial q_t^{EF*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial q_d^{EF*}}{\partial \theta} < 0, \frac{\partial p_t^{EF*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial p_d^{EF*}}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \theta} > 0。$$

证明见附录 4-F。

推论 4.4(1)可知, 消费者低碳偏好系数对主要决策变量以及供应链双方利润的影响与推论 4.1(1)一致。市场上低碳产品和传统产品共存, 消费者低碳偏好增加导致低碳产品需求增加, 则传统产品的需求下降。因此, 制造商可以通过增加低碳产品的投入来获取更多的收益。其他条件不变的情况下, 由于加大了低碳减排技术投资, 制造商的成本也随之增加, 制造商将提高低碳产品售价以抵消部分成本。虽然人们越来越倾向于环保产品, 但传统产品已经在市场上占据了一席之地, 并不会对其价格造成影响。供应商两种产品的总供给也会随着消费者低碳偏好系数的增加而增加, 从而使供应商利润也随之增加。因此, 消费者低碳偏好使制造商和供应商之间实现双赢。

由推论 4.4(2)可知, 政府碳减排成本补贴比例对碳减排量、低碳产品采购量及其售价、供应链成员利润都有积极的影响, 对传统产品采购量产生消极影响, 而其售价保持不变。“双碳”政策的颁布, 促使政府加强对企业减排的监管。补贴政策作为一项有效的激励政策, 可以促使制造商更加关注低碳生产。一方面, 通过提高政府补贴比重, 使制造商生产重心转向低碳产品的研发与投入, 从而强化企业的市场地位。另一方面, 政府补贴也会对消费者的消费方式产生影响, 使得消费者更喜欢购买低碳产品, 最终导致传统产品的市场份额逐渐减少。低碳投资成本会分摊到每一个低碳产品, 即使传统产品处于不利位置, 制造商也不会改变传统产品售价, 以最大限度地弥补成本费用。所以, 政府补贴的作用下, 制造商期望利润呈上升趋势。另外, 政府还可以采取多项措施加强对碳排放数据质量的监管, 如提高减排标准、加强环境检测、落实治理方案等, 确保制造商发挥最优减排效果。

推论 4.5 在 EF 模式中，产出不确定性对供应链关键参数的影响如下：

$$\frac{\partial e^{EF*}}{\partial \sigma^2} < 0, \quad \frac{\partial q_t^{EF*}}{\partial \sigma^2} < 0, \quad \frac{\partial q_d^{EF*}}{\partial \sigma^2} > 0, \quad \frac{\partial p_t^{EF*}}{\partial \sigma^2} = \begin{cases} \leq 0, & \text{if } \underline{k}^{EF} < k \leq \bar{k}^{EF} \\ > 0, & \text{if } k > \bar{k}^{EF} \end{cases}, \quad \frac{\partial p_d^{EF*}}{\partial \sigma^2} = 0,$$

$$\frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \sigma^2} < 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{EF*}}{\partial \sigma^2} < 0.$$

其中 $\underline{k}^{EF} = \frac{b\lambda^2}{2(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)}$, $\bar{k}^{EF} = \frac{b\lambda^2}{(b^2-d^2)(1-\theta)}$ 。证明见附录 4-G。

从推论 4.5 可以看出，受产出不确定性的影响，制造商对两种产品的销售价格采取不同的定价策略。就低碳产品而言，产出不确定性与其销售价格的单调关系与碳减排成本系数相关，且存在特定阈值使得单调关系在阈值上下呈现相反的状态。如果碳减排成本系数较小，制造商可以通过生产更加低碳的产品和降低销售价格“双管齐下”的方式增加市场需求、扩大市场份额。然而，如果碳减排成本系数较大，碳减排成本过高，“薄利多销”策略便很难奏效，此时制造商被迫提高销售价格以便补偿碳减排成本。产出不确定性对制造商的期望利润始终起负向作用，但产出不确定性变化并不是导致销售价格提高与降低的本质原因。而对于传统产品，产出不确定性的变化并不影响其销售价格。

由推论 4.5 可知，产出不确定性对碳减排量、低碳产品的原材料采购量以及供应链成员利润产生负向影响，对传统产品的原材料采购量产生正向影响。产出不确定性增强不利于低碳产品的生产，制造商会减少低碳产品原材料的采购，增加传统产品原材料的采购，这削弱了制造商对碳减排技术的投资，从而导致碳减排量减少。尽管制造商在不同情形下采取不同的定价策略以便实现利益最大化，但仍然无法抵消碳减排成本与产出不确定性带来的负向影响，最终致使制造商期望利润受损。与此同时，制造商采购的两种产品原材料数量也受到产出不确定性的负向影响，间接导致了供应商的利润减少。

4.2.3 投贷联动融资(IF 模式)

资金受到约束的制造商在生产前向金融服务方提交申请，并在通过审批后与金融服务方签订融资协议。假设制造商的股权融资比例为 μ ($0 < \mu < 1$)，则债权融资比例为 $1-\mu$ ，债权融资额度为 $L^F = (1-\mu)(\omega^{IF}(q_t^{IF} + q_d^{IF}) + (1-\theta)k(e^{IF})^2/2)$ 。销售周期结束后，制造商按照协议履行分红和还款义务。制造商股权融资的分红比例为 η ，债权融资需要偿还的利息为 $L^F r$ 。股权融资比例和股权分红比例相互独立。

此时，制造商和供应商的利润函数如下：

$$\pi_m^{IF} = (1-\eta)(p_t^{IF} q_t^{IF} x + p_t^{IF} q_d^{IF} - (\omega^{IF} (q_t^{IF} + q_d^{IF}) + (1-\theta)k(e^{IF})^2/2)(1+(1-\mu)r)) \quad (4.7)$$

$$\pi_s^{IF} = \omega^{IF} (q_t^{IF} + q_d^{IF}) \quad (4.8)$$

与前两个模型类似，制造商的期望利润函数为：

$$E[\pi_m^{IF}] = (1-\eta)(a(q_t^{IF} + q_d^{IF}) - 2dq_t^{IF} q_d^{IF} - b(q_d^{IF})^2 - b(q_t^{IF})^2(1+\sigma^2) + \lambda e q_t^{IF} - (\omega^{IF} (q_t^{IF} + q_d^{IF}) + (1-\theta)k(e^{IF})^2/2)(1+(1-\mu)r)) \quad (4.9)$$

命题 4.3 在 IF 模式中，制造商的碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员利润分别为：

$$e^{IF*} = \frac{a\lambda(b-d)}{2I}, \quad q_t^{IF*} = \frac{ak(b-d)(1-\theta)(1+r(1-\mu))}{2I}, \quad q_d^{IF*} = \frac{aJ}{4I}, \quad p_t^{IF*} = \frac{aK}{4I},$$

$$p_d^{IF*} = \frac{3a}{4}, \quad E[\pi_m^{IF*}] = \frac{a^2(1-\eta)L}{16I}, \quad \pi_s^{IF*} = \frac{a^2L}{8(1+r(1-\mu))I}。$$

其中 $I = 2k(1-\theta)(1+r(1-\mu))(b^2(1+\sigma^2) - d^2) - b\lambda^2$ ， $J = 2k(1-\theta)(1+r(1-\mu))(b(1+\sigma^2) - d) - \lambda^2$ ， $K = 2k(1-\theta)(1+r(1-\mu))(b(3b + (4b-d)\sigma^2) - 3d^2) - (2b+d)\lambda^2$ ， $L = 2k(1-\theta)(1+r(1-\mu))(b(2+\sigma^2) - 2d) - \lambda^2$ 。证明见附录 4-H。

推论 4.6 在 IF 模式中，消费者低碳偏好系数和碳减排成本补贴系数对供应链关键参数的影响如下：

$$(1) \quad \frac{\partial e^{IF*}}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial q_t^{IF*}}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial q_d^{IF*}}{\partial \lambda} < 0, \quad \frac{\partial p_t^{IF*}}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial p_d^{IF*}}{\partial \lambda} = 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \lambda} > 0。$$

$$(2) \quad \frac{\partial e^{IF*}}{\partial \theta} > 0, \quad \frac{\partial q_t^{IF*}}{\partial \theta} > 0, \quad \frac{\partial q_d^{IF*}}{\partial \theta} < 0, \quad \frac{\partial p_t^{IF*}}{\partial \theta} > 0, \quad \frac{\partial p_d^{IF*}}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \theta} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \theta} > 0。$$

证明见附录 4-I。

由推论 4.6(1)可知，随着消费者低碳偏好系数的升高，碳减排量、低碳产品采购量及其售价、供应链成员利润都随之升高，而传统产品采购量随之下降，且其售价不受消费者低碳偏好的影响。消费者低碳偏好导致需求增加是促进制造商进行减排投资的根本动力，因而会对碳减排量产生直接影响。虽然减排量提高增加了制造商的成本，但价格提高带来的收益更大。事实上，越来越多的消费者注重产品的低碳性，制造商应努力向低碳型企业转型；政府也可以多宣传低碳生活、培养绿色环保理念。与此同时，由于传统产品培养了一批忠实用户，制造商应合理分配两种产品的采购量，同时制造商倾向于不改变传统产品的售价以实现利益最大化目标。因此，消费者低碳偏好有助于制造商减排投资，从而实现经济效益

与环境效益的“两不误、双丰收”。

由推论 4.6(2)可知, 政府补贴比例与碳减排量、低碳产品采购量及其售价、供应链双方利润均成正比, 与传统产品采购量成反比, 且其售价不变。这表明政府补贴对供应链整体是有利的。政府对碳减排技术的补贴相当于增加了制造商的收入, 并且政府的高额补贴可以弥补制造商因提高减排量所产生的成本, 这促使制造商增加低碳产品的采购量, 反过来抑制了传统产品的采购量。同时, 制造商为实现利益最大化的目标, 合理制定两种产品的售价。虽然政府补贴不利于传统产品的采购, 但由于人们消费水平的提高和相对低廉的成本, 使制造商并不畏惧低碳产品的入侵。因此, 制造商在传统产品的定价上保持不变, 并且政府补贴政策促进了供应链的和谐发展。这种方式可以有效推动低碳技术发展, 遏制碳排放, 进一步实现“双碳”目标。

推论 4.7 在 IF 模式中, 产出不确定性对供应链关键参数的影响如下:

$$\frac{\partial e^{IF*}}{\partial \sigma^2} < 0, \quad \frac{\partial q_t^{IF*}}{\partial \sigma^2} < 0, \quad \frac{\partial q_d^{IF*}}{\partial \sigma^2} > 0, \quad \frac{\partial p_t^{IF*}}{\partial \sigma^2} = \begin{cases} \leq 0, & \text{if } \underline{k}^{IF} < k \leq \bar{k}^{IF} \\ > 0, & \text{if } k > \bar{k}^{IF} \end{cases}, \quad \frac{\partial p_d^{IF*}}{\partial \sigma^2} = 0,$$

$$\frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \sigma^2} < 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \sigma^2} < 0。$$

$$\text{其中 } \underline{k}^{IF} = \frac{b\lambda^2}{2(1-\theta)(1+r(1-\mu))(b^2(1+\sigma^2)-d^2)}, \quad \bar{k}^{IF} = \frac{b\lambda^2}{(1-\theta)(1+r(1-\mu))(b^2-d^2)}。$$

证明见附录 4-J。

从推论 4.7 可以看出, 产出不确定性变化对供应链关键参数的影响与推论 4.2、推论 4.5 一致。囿于篇幅原因, 这里不再对其产生影响的作用方式重复赘述。产出不确定性加大了制造商的生产难度, 对企业发展产生不利影响。针对低碳和传统等不同类型的产品, 具有低碳偏好的消费者愿意为其支付的价格也不同。产出不确定性引起生产成本增加, 从而降低了制造商的碳减排投入与低碳产品原材料采购量, 间接影响其替代产品(传统产品)的生产与销售。制造商在保持市场份额的基础上将合理分配低碳产品的原材料采购量与调整销售价格, 争取提高市场竞争力。即便低碳产品定价较高, 制造商也有可能因成本增加而减少低碳产品的原材料采购, 转而将重心转移至传统产品以提高销售收入的做法。不过, 随着低碳观念的普及和消费者低碳意识的增强, 低碳产品的市场需求将会迎来快速增长。虽然低碳产品的定价比较复杂, 但也意味着有更大的弹性空间, 而产出不确定性会对供应链成员利润产生负向作用, 需要努力减弱其影响。

推论 4.8 在 IF 模式中，融资利率对供应链关键参数的影响如下：

$$\frac{\partial e^{IF*}}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial q_t^{IF*}}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial q_d^{IF*}}{\partial r} > 0, \quad \frac{\partial p_t^{IF*}}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial p_d^{IF*}}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial r} < 0。$$

证明见附录 4-K。

由推论 4.8 可知，债权融资利率对碳减排量、低碳产品采购量及其售价、供应链成员的利润产生消极影响，而对传统产品采购量产生积极影响，且对其售价没有影响。IF 模型下，制造商须向债权机构(银行)融资，导致其单位生产成本增加，使其也没有多余的空间支付高额的减排费用。因此，资金约束制造商会适当降低对低碳产品的碳减排和采购。因为低碳产品与传统产品具有替代性，制造商会相应增加传统产品的订购数量。受融资利率的影响，加上制造商必须考虑自身成本的情况，导致两种产品的总采购量整体上呈下降趋势。与此同时，制造商为了维持自己在市场中的竞争优势，对于产品的定价要充分考虑市场情况，并了解消费者的接受度。当传统产品已在市场中占据一席之地时，如果外界环境不发生变化，产品的供给与需求处于相对静止的状态，那么制造商提高售价反而会影响产品的销量。而低碳产品作为一种新生物品，其生产成本远高于传统产品，消费者对其信任度也不高。因此，制造商会降低价格，开拓市场。其他条件相同的情况下，作为主导者的供应商并未参与到制造商的融资活动中，但其利润直接受到制造商采购决策的影响，故而融资利率间接影响到供应商利润。

4.3 模型比较与分析

本部分对三种融资模式的均衡解及供应链成员利润进行比较，分析不同融资模式的优劣势，为中小企业开展融资业务提供理论支持。同时，本部分还剖析了对供应链各个成员最有利的融资模式，为下文实施供应链协调奠定基础。

推论 4.9 不同融资模式下的均衡状态满足：

$$e^{DF*} < e^{IF*} < e^{EF*}, \quad q_t^{DF*} < q_t^{IF*} < q_t^{EF*}, \quad q_d^{EF*} < q_d^{IF*} < q_d^{DF*}, \quad p_t^{DF*} < p_t^{IF*} < p_t^{EF*}, \\ p_d^{DF*} = p_d^{EF*} = p_d^{IF*}。$$

证明见附录 4-L。

推论 4.9 表明，碳减排量、低碳产品的原材料采购量及其销售价格均在 EF 模式下最高，在 DF 模式下最低。一方面，在 EF 模式中，制造商通过第三方机构承担其破产的风险，且第三方机构给予的资金支持使得制造商达到资金充裕的状态，制造商有能力增加对低碳产品的生产研发。然而，DF 模式却相反。由商

业银行提供的融资缓解了制造商的资金压力，但期末制造商需要偿还本息，这使得制造商对低碳产品采取保守策略。与另两种融资模式相比，IF 模式中制造商以更小的风险实现融资。另一方面，由于市场中消费者具有低碳偏好，这激发制造商生产低碳产品的动机。在此情况下，即使资金存在约束，制造商仍会选择合适的融资方式，投资低碳产品。因此，EF 模式下制造商会加大对碳减排技术的投入，增加低碳产品的原材料采购，同时提高低碳产品的销售价格以转移低碳产品的部分成本。低碳背景下，经济效益并不是衡量一个企业价值的唯一指标。越来越多的企业开始注重企业责任，并逐步向低碳型企业转型。因此，股权融资最有利于制造商实现企业的社会价值。

由推论 4.9 也可看到，DF 模式中传统产品的原材料采购量最高，而 EF 模式中最低，这与低碳产品的结论正好相反。同时，传统产品的销售价格三个模型中相等且保持不变。低碳产品和传统产品之间具有替代性，制造商出于对成本和资金的考量，会合理安排两种产品的原材料采购。随着低碳产品的引入，使得产品之间的竞争更加激烈，对传统产品的销售产生一定的冲击，但制造商不必为了提高传统产品销量而降价或打折销售。其主要原因在于制造商可以满足消费者的需求，并且低碳产品为制造商带来了高收益。因此，当市场上同时出现两种或多种产品时，企业应根据自身情况以及产品间的替代性动态调整价格，以满足消费者的需求，从而增加收益。

推论 4.10 不同融资模式下制造商期望利润和供应商利润满足：

$$(1) E[\pi_m^{DF*}] > E[\pi_m^{IF*}], E[\pi_m^{EF*}] > E[\pi_m^{IF*}], \pi_s^{DF*} < \pi_s^{IF*} < \pi_s^{EF*}.$$

(2) i) 当 $M > 0$ 时，

若满足 $0 < \eta \leq \eta^{DE}$ 且 $\underline{\sigma}^2 < \sigma^2 \leq \overline{\sigma}^2$ ，则 $E[\pi_m^{DF*}] \leq E[\pi_m^{EF*}]$ ；若满足 $\eta^{DE} < \eta < 1$ ，或 $0 < \eta \leq \eta^{DE}$ 且 $\sigma^2 > \overline{\sigma}^2$ 时，则 $E[\pi_m^{DF*}] > E[\pi_m^{EF*}]$ 。

ii) 当 $M \leq 0$ 时，

若满足 $\underline{\sigma}^2 < \sigma^2 \leq \overline{\sigma}^2$ ，则 $E[\pi_m^{DF*}] \leq E[\pi_m^{EF*}]$ ；若满足 $\sigma^2 > \overline{\sigma}^2$ ，则 $E[\pi_m^{DF*}] > E[\pi_m^{EF*}]$ 。

$$\text{其中 } M = 2k(b-d)(3b+d)(1+r)(1-\theta) - (2+r)b\lambda^2, \quad \underline{\sigma}^2 = \frac{2k(1-\theta)(b^2-d^2) - b\lambda^2}{2b^2k(1-\theta)},$$

$$\overline{\sigma}^2 = \frac{bk\eta(1-\theta)M + \sqrt{\Delta}}{4b^3k^2\eta(1+r)(1-\theta)^2}, \quad \Delta = b^2k^2\eta(1-\theta)^2(4k(1+r)(1-\theta)(b-d)^2(k\eta(1+r)(1-\theta)(b-d)^2$$

$$+bkr\lambda^2(2-\eta))+\eta b^2r^2\lambda^4), \eta^{DE} = \frac{2kr\lambda^2(1-\theta)(b-d)^2}{(4k(b-d)(1-\theta)-\lambda^2)(2k(1+r)(1-\theta)(b^2-d^2)-b\lambda^2)}。证$$

明见附录 4-M。

由推论 4.10(1)可知, 供应商利润在 EF 模式下最高, 其次是 IF 模式, DF 模式最低。如果制造商选择向第三方机构借款并为其分红的融资方式, 可以使供应商获得更多的收益。主要是因为第三方机构参与的融资方式使制造商承担的资金压力相对较小, 使制造商有动力扩大生产运营。结合推论 4.9, 在 EF 下, 制造商的原材料总采购量最高, 而且 EF 模式下的批发价格也是最高的。两者共同作用, 使得供应商的利润在 EF 模式中最高。推论 4.10(1)也表明, 当制造商面临融资困难时, 不会轻易选择 IF 模式, 银行或者第三方机构单独提供融资的方式都优于 IF 模式。由此可见, 投贷联动这一新型的融资方式, 并不一定会成为首选。主要是因为双方共同参与融资时, 分割了彼此的利润, 而且制造商需要承受来自两方的指导, 这进一步削弱了制造商的盈利空间。因此, 如果供应链双方都不愿意接受 IF 模式, 那么这种融资方式难以推广。

对于制造商而言, EF 模式并不总是制造商的最优选择, 它受到股权分红比例和产出不确定性的双重影响。推论 4.10(2)表明, 当满足 $M > 0$ 时, 若股权分红比例和产出不确定性都处于较低水平, 则 EF 模式是制造商的最优融资模式, 因为这两者都有利于提升制造商的利润水平; 若股权分红比例较高或虽然股权分红比例较低但产出不确定性较高都会导致制造商在 EF 模式中获得比在 DF 模式中更少的期望利润。当满足 $M < 0$ 时, 如果产出不确定性低于特定阈值, 则制造商在 EF 模式中的期望利润更大; 否则, 则相反。由于供应商在 EF 模式中的利润水平最高, 因此供应商希望制造商能够选择 EF 模式融资且可能利用其在供应链的领导地位给制造商施加压力, 而制造商选择 EF 模式的条件取决于股权分红比例和产出不确定性都不能高于特定阈值。

4.3.1 协调机制

结合三种融资模式的比较结果可知, 任何一种融资模式都不具有绝对优势。DF 和 IF 模式下的碳减排量、低碳产品供给以及供应商利润水平等指标都不够理想。虽然 EF 模式下制造商提供的传统产品数量最少、低碳产品价格最高, 但制造商提供的低碳产品碳排放量最少、供给数量最多, 供应商的利润水平最高, 且制造商也有较高的概率获得最大期望利润。因此, 相较于其他两种融资模式, EF

模式具有相对优势，也更易为供应链成员企业接受。下面以 EF 模式为例探究供应链最优状态的实现过程。首先，分析双方合作条件下 EF 供应链的最优决策，然后，设计协调机制改善供应链成员间关系以达到供应链协调的目的。

4.3.2 合作决策

独立决策时，供应链成员各自以利益最大化作为目标。在双方合作条件下，将供应链系统看作一个整体进行决策，可有效消除“双重边际效应”的影响，从而使供应链系统获得更大的期望利润。参照邹清明等^[75]的处理方式，在双方合作条件下供应链不存在资金约束。制造商与供应商共同确定碳减排水平与供给量，使供应链系统期望利润最大化。供应链系统的利润函数表示为：

$$\pi_{sc}^C = p_t^C \varepsilon q_t^C + p_d^C q_d^C - (1-\theta)k(e^C)^2/2 \quad (4.10)$$

进一步可将供应链系统的期望利润表示为：

$$E[\pi_{sc}^C] = a(q_t^C + q_d^C) - 2dq_t^C q_d^C - b(q_d^C)^2 - b(q_t^C)^2(1+\sigma^2) + \lambda e q_t^C - k(1-\theta)(e^C)^2/2 \quad (4.11)$$

命题 4.4 合作决策下的最优均衡解和供应链系统期望利润为：

$$e^{C*} = \frac{a\lambda(b-d)}{2E}, \quad q_t^{C*} = \frac{ak(b-d)(1-\theta)}{2E}, \quad q_d^{C*} = \frac{aF}{4E}, \quad E[\pi_{sc}^{C*}] = \frac{a^2H}{4E}。$$

推论 4.11 合作决策与独立决策相比：

$$e^{C*} = e^{EF*}, \quad q_t^{C*} = q_t^{EF*}, \quad q_d^{C*} = q_d^{EF*}, \quad E[\pi_{sc}^{C*}] = E[\pi_{sc}^{EF*}] + \frac{a^2H(1+\eta)}{16E}。$$

证明见 4-N。

推论 4.11 表明，独立决策下的碳减排量、两种产品的原材料采购量都与合作决策下相等，但独立决策下供应链系统的期望利润小于合作决策。主要是因为股权融资下制造商向第三方机构申请融资却不用偿还资金和利息，而是在销售周期结束后分红，这种融资模式给予制造商较大的选择空间。此时，制造商更专注于在产品的生产和销售上，以便于获取最大利润。因此，制造商的决策选择与其资金充足时的状况是一致的。由于期末制造商需要将净收益的一部分给予第三方机构，这导致供应链系统的期望利润达不到合作决策下的最佳情形。

4.3.3 改进 Nash 讨价还价博弈模型

由推论 4.11 可知，独立决策下制造商的均衡解已达到合作决策下的均衡解水平，这已满足供应链完美协调的前提条件。因此，本小节仅考虑供应链双方的利润关系，借助 Nash 讨价还价博弈模型来协调供应链，并以上标 N 标注。制造

商和供应商以独立决策的最优期望利润 $E[\pi_m^{EF*}]$ 和 π_s^{EF*} 为各自的谈判起点, 对合作决策下供应链系统的期望利润 $E[\pi_{sc}^{C*}]$ 的分配比例 $\varphi(0 < \varphi < 1)$ 进行谈判。换言之, 为防止制造商和供应商的谈判破裂, 必须确保改进 Nash 讨价还价博弈模型中制造商和供应商的期望利润都不小于独立决策下的最优期望利润, 从而实现供应链协调。

根据改进 Nash 讨价还价博弈模型, 假设参数 β 代表制造商的议价能力, $1-\beta$ 则为供应商的议价能力, 那么制造商和供应商的期望利润分别为 $E[\pi_m^{N*}] = (1-\varphi)E[\pi_{sc}^{C*}]$ 和 $\pi_s^{N*} = \varphi E[\pi_{sc}^{C*}]$, 双方就利润分配比例 φ 达成一致, 从而使谈判的目标函数达到最大:

$$\max\{E[\pi_m^{N*}] - E[\pi_m^{EF*}]\}^\beta \{\pi_s^{N*} - \pi_s^{EF*}\}^{(1-\beta)} \quad (4.12)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} E[\pi_m^{N*}] - E[\pi_m^{EF*}] \geq 0 \\ \pi_s^{N*} - \pi_s^{EF*} \geq 0 \\ E[\pi_m^{N*}] + \pi_s^{N*} = E[\pi_{sc}^{C*}] \end{cases} \quad (4.13)$$

根据 Jeuland 等^[76]得出有关 Nash 讨价还价问题最优解的计算公式, 得到使式(4.13)满足最大值时, 制造商和供应商的最优期望利润分别为:

$$E[\pi_m^{N*}] = \beta(E[\pi_{sc}^{C*}] - E[\pi_m^{EF*}] - \pi_s^{EF*}) + E[\pi_m^{EF*}] \quad (4.14)$$

$$\pi_s^{N*} = (1-\beta)(E[\pi_{sc}^{C*}] - E[\pi_m^{EF*}] - \pi_s^{EF*}) + \pi_s^{EF*} \quad (4.15)$$

显然, 由式(4.14)和(4.15)可知, $E[\pi_m^{N*}]$ 与 β 正相关, π_s^{N*} 与 β 负相关, 表明在改进 Nash 讨价还价博弈模型下, 随制造商议价能力的增强, 制造商能够更好地掌控谈判的进程与结果, 从而使其分得的期望利润增加, 而供应商分得的期望利润减少。许多因素影响供应链双方成员谈判能力, 比如交易对双方的重要程度、企业的信誉和实力状况、行业竞争状况等。而本文中供应商是博弈的领导者, 它具有较强的谈判能力。因此, 供应商会仔细观察制造商的谈判能力选择是否愿意参与协调。

推论 4.12 存在最优利润分配比例 $\varphi^* = (3 + \eta - \beta(1 + \eta))/4$ 使供应链完美协调。

$$\text{此时, } E[\pi_m^{N*}] = \frac{(1 + \beta - (1 - \beta)\eta)a^2H}{16E}, \quad \pi_s^{N*} = \frac{(3 - \beta + (1 - \beta)\eta)a^2H}{16E}。$$

证明见 4-O。

由推论 4.12 可知, 最优分配比例 φ^* 与制造商谈判能力 β 和股权分红比例 η 有关, 且分配比例 φ^* 与谈判能力 β 负相关, 与股权分红比例 η 正相关。利润分配

比例会影响制造商和供应商之间的合作关系。如果分配比例不合理，供应商会感到不满意，进而导致缺货或延迟交货。此时，供应商可能会放弃协调，并采取不利于制造商的行动。相反，如果分配比例公平合理，供应商和制造商之间的合作关系可能会更加稳固。因此，合理的利润分配比例的设计既需要考虑长期合作的稳定性，还需要维护供应链成员之间的利益平衡。

4.4 数值算例

为帮助理解文中相关结论，下面通过一个算例来演示部分参数对供应链关键参数的敏感性分析。各参数取值为 $a=100$ ， $b=1$ ， $d=0.5$ ， $\lambda=1$ ， $k=10$ ， $r=0.2$ ， $\eta=0.3$ ， $\mu=0.5$ ， $\theta=0.8$ ， $\sigma^2=0.6$ 。

4.4.1 产出不确定性对供应链关键参数的敏感性分析

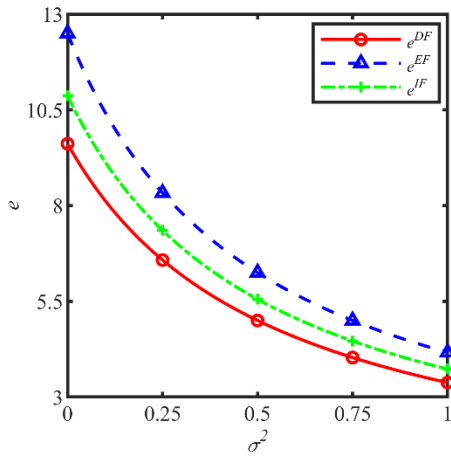


图 4-1 σ^2 对 e 的敏感性分析

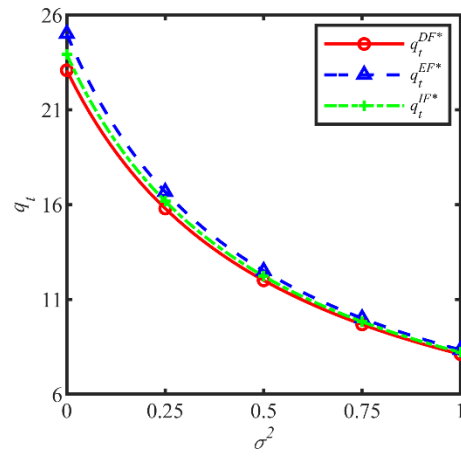


图 4-2 σ^2 对 q_t 的敏感性分析

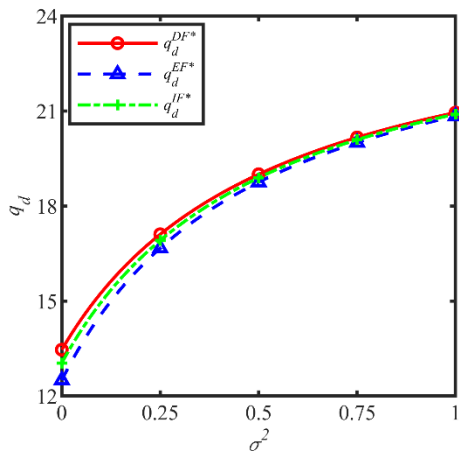


图 4-3 σ^2 对 q_d 的敏感性分析

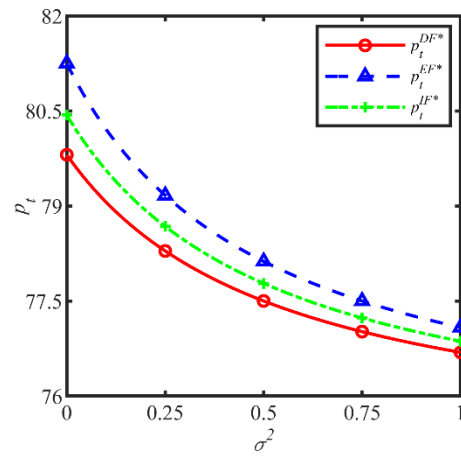
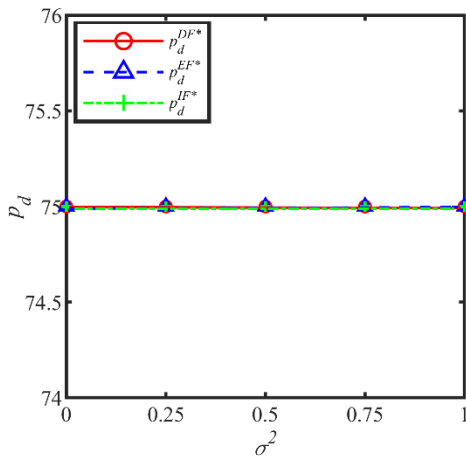
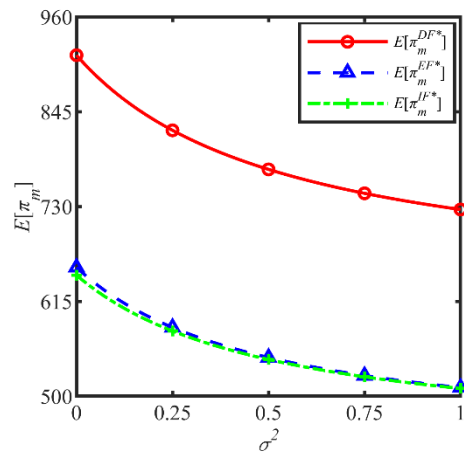
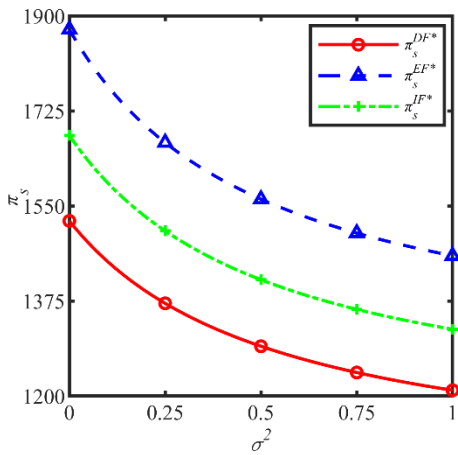
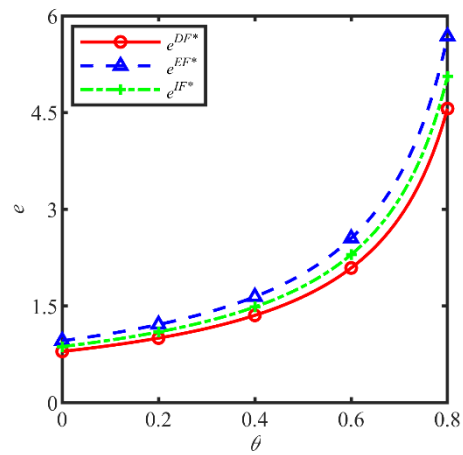


图 4-4 σ^2 对 p_t 的敏感性分析

从图 4-1—图 4-7 可知，产出不确定性与碳减排量、低碳产品的原材料采购

量及其销售价格、供应链成员利润负相关，与传统产品的原材料采购量正相关且对其销售价格没有影响。这与推论 4.2、4.5、4.7 的结论一致。不同的融资模式受产出不确定性影响的程度不同，且 EF 模式受产出不确定性的影响最大。产出不确定性对三种融资模式之间的原材料采购量的敏感性高于对低碳产品的销售价格敏感性。在 EF 模式中，制造商虽然也需要融资缓解资金压力，但制造商没有固定的利息负担，只需在期末按照经营情况向第三方机构分红。这使得制造商获得足够资金运营的同时也大大减小了风险，此时制造商决策达到资金无约束时的状态。


 图 4-5 σ^2 对 p_d 的敏感性分析

 图 4-6 σ^2 对 $E[\pi_m]$ 的敏感性分析

 图 4-7 σ^2 对 π_s 的敏感性分析

 图 4-8 θ 对 e 的敏感性分析

由图 4-6 可以看出，DF 模式下制造商的期望利润明显大于另外两种模式，而且制造商的期望利润满足推论 7 的情形。一方面，DF 模式下制造商虽收取了部分利息，但支出远不及股权分红比例的金额(股权分红比例对制造商期望利润

产生负向影响)。另一方面, 股权分红比例的融资模式使得制造商的决策行为更加冒进, 制造商的单位成本也相应增多。不同于制造商, 供应商利润的来源受制造商采购量的直接影响, 而产出不确定性会影响制造商的采购量, 进而导致供应商利润随产出不确定性的增加而减少。由图 4-7 可知, 供应商利润明显在 EF 模式中最优。此时, 只考虑自己利益最大化的情况下, 供应商会拒绝为制造商提供原材料, 所以制造商只能被迫选择 EF 模式。

4.4.2 政府低碳补贴对供应链关键参数的敏感性分析

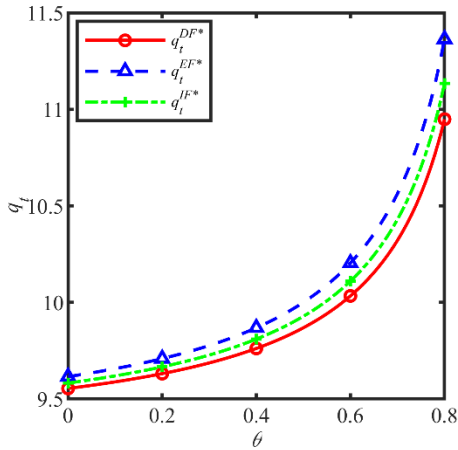


图 4-9 θ 对 q_t 的敏感性分析

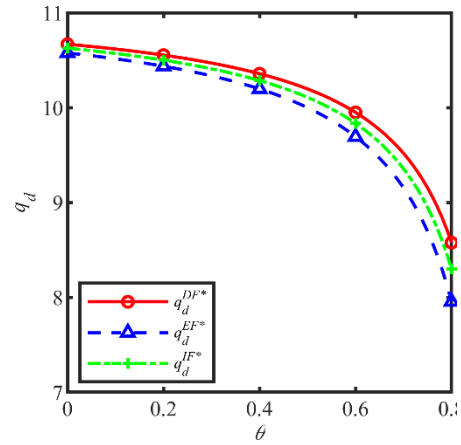


图 4-10 θ 对 q_d 的敏感性分析

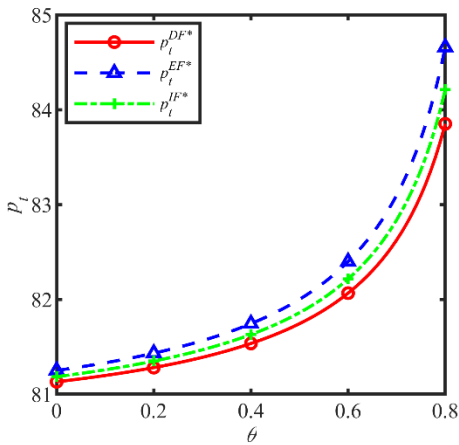


图 4-11 θ 对 p_t 的敏感性分析

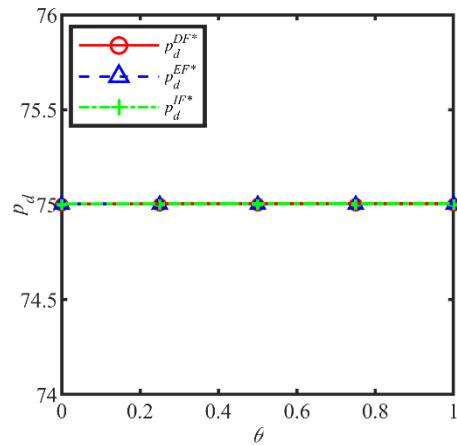


图 4-12 θ 对 p_d 的敏感性分析

图 4-8—图 4-14 主要描述了碳减排成本补贴系数对模型决策变量以及供应链成员利润的影响, 即随着碳减排成本补贴系数的增加, 碳减排量、低碳产品的原材料采购量及其销售价格、供应链成员利润也随之增加, 而传统产品的原材料采购量随之下降。这与产出不确定性的影响正好相反。相同的是, 传统产品的销售价格仍保持不变。产出不确定性本身具有不稳定性, 加剧了制造商运营的压力, 不利于制造商的发展。政府低碳补贴给予制造商一定的资金支持, 缓解了制造商

的融资压力，还可以促进制造商进行低碳生产，积极推动供应链绿色发展。由于市场需求相对稳定，低碳产品供给的增加必然导致传统产品的供给减少。虽然政府补贴低碳产品，一定程度上可以缓解制造商生产的压力，但是碳减排投资、产出不确定性等原因仍旧增加了制造商的边际成本，所以制造商会提高低碳产品的销售价格以获取最大收益。

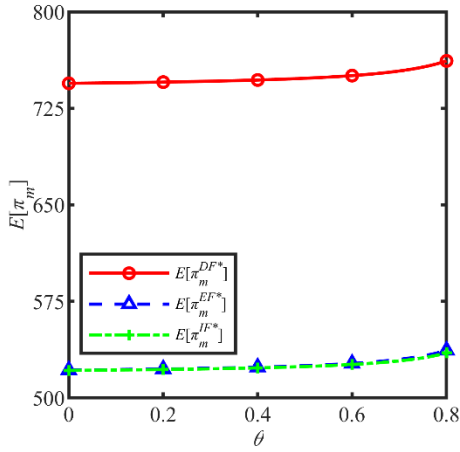


图 4-13 θ 对 $E[\pi_m]$ 的敏感性分析

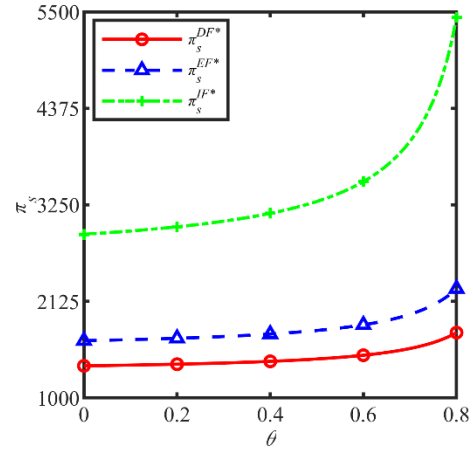


图 4-14 θ 对 π_s 的敏感性分析

由图 4-13 可知，DF 模式下的制造商期望利润明显高于另两种融资模式。主要原因在于债权融资利率和股权分红比例对制造商期望利润的影响不同。相比较债权融资，股权融资没有定期偿还的财务压力，财务风险小，但融资成本比较高。投贷联动融资模式本质上是股债结合的融资方式，可以使企业在获得同样资金支持的情况下失去最少的股份，同时也可以动态的调整两者比例以满足企业的需求，但其融资成本也相对较高。因此，DF 模式下制造商的期望利润相对较高。

4.4.3 议价能力和股权分红比例对制造商期望利润的影响

由推论 4-12 可知，协调后制造商的期望利润与其议价能力和股权分红比例有关。因此，此处分析议价能力和股权分红比例对 EF 模型下制造商期望利润的影响，如图 4-15。

从图 4-15 可以看出，无论制造商的议价能力如何，制造商在 EF 模式中获得期望利润总是比在 DF 模式中获得的更多，且两种模式中获得的期望利润差值随着议价能力的提升而越大越大。在 EF 模式中，制造商议价能力越强，自然越有利于制造商获得更多的期望利润，也就能够获得比 DF 模式下越来越多的期望利润。在给定制造商议价能力的条件下，推论 7 表明制造商的期望利润与股权分红比例负相关，因而股权分红比例越高，制造商的期望利润就越低，图 15 也验证

了这一结论。此外，在极端情形下，比如股权分红比例较高而制造商的议价能力较低时，可能会引起制造商的期望利润比 DF 模式中更低，那么，此时制造商就有可能拒绝协调，从而选择 DF 模式融资。这一现象的现实意义在于，供应商作为博弈的主导者，是供应链中强势的一方，但如果供应商的力量过于强大，过度挤压了制造商的生存空间，以至于制造商在供应链中没有话语权，则有可能导致两败俱伤。

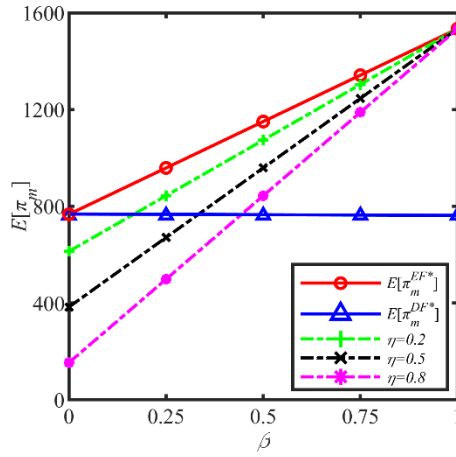


图 4-15 β 和 η 对 $E[\pi_m]$ 的敏感性分析

4.5 本章小结

本文考虑由一个制造商和一个供应商组成的二级低碳供应链，为研究政府补贴机制下，同时生产两种产品（低碳产品和传统产品）的制造商面对低碳产出不确定性时的融资与碳减排决策问题，分别建立了分散决策下制造商融资模型（债权融资、股权融资和投贷联动融资）。在此基础上，利用 Nash 讨价还价模型对供应链进行协调，并给出满足帕累托改进条件下供应链成员的最优利润分配比例。最后验证了政府碳减排成本补贴比例系数和制造商的产出不确定性对低碳供应链最优决策及相关利润的影响。主要得出以下结论：

(1) 与政府补贴的影响不同，产出不确定性与碳减排量、低碳产品的原材料采购量、供应链成员的（期望）利润水平负相关，与传统产品的原材料采购量正相关。产出不确定性对传统产品的销售价格不产生影响，但对低碳产品的销售价格有影响，且影响方式与碳减排成本系数大小相关。

(2) 制造商同时生产低碳产品与传统产品时，碳减排量、低碳产品的原材料采购量及其销售价格均在 EF 模式下最高，在 DF 模式下最低，而传统产品的原材料采购量却正好相反且传统产品的销售价格保持不变。因此，考虑到不同绩效

指标的比较，EF 模式与 DF 模式各有一定的优势。

(3) 供应商在 EF 模式中的利润水平最高，但制造商的选择受到产出不确定性和股权分红比例的影响。处于供应链领导地位的供应商会迫使制造商选择 EF 模式，导致制造商的期望利润受损。通过改进 Nash 讨价还价博弈模型能够有效协调供应链，并存在一个最优利润分配比例使供应链完美协调。

第5章 政府补贴下考虑产出不确定性与区块链技术应用的 制造商融资与碳减排策略

中小企业是我国市场经济中最为活跃的主体,但它们常常面临资金短缺的问题。而且一些企业易受外部环境变化、生产技术不成熟和原材料紧缺等因素的影响,这使得它们面临着产出不确定性的风险。最终导致制造商在融资方面陷入更大的困境,从而制约了企业发展。在这种情况下,通过供应链金融,制造商可以更好地利用供应链中的资源和信息,实现资金的有效调配和利用。此外,区块链技术在供应链中的运用可以提升数据透明性和可追溯性,降低信息篡改和欺诈风险,从而减少交易纠纷并增进各方信任。通过实时监控和智能合约自动执行,制造商能够更及时地响应产出不确定性,优化生产计划并提高整体供应链的效率和韧性。基于以上背景,本章探索了引入区块链技术后,产出不确定性变化对减排与供应链成员利润的影响。同时,比较了三种融资模式下的碳减排量、原材料采购量、销售价格以及供应链成员利润,以便为制造商寻求合适的融资模式。

5.1 模型准备

5.1.1 模型描述

与前两章相同,本章研究对象为单一制造商和单一供应商组成的二级供应链。制造商从供应商处采购原材料加工成具有低碳属性的低碳产品。产出不确定性受到多种因素的影响,为了减少产出不确定性的负面影响,本章引入区块链技术用于提高制造商对产出不确定性的预测能力。可供制造商选择的融资模式有多种。其中,供应商是博弈的领导者,而制造商是博弈的追随者。处于领导地位的供应商先行决定批发价格,制造商根据供应商给定的批发价格以及出于对产出不确定性、融资利率等因素的考虑,决策原材料采购量和碳减排量,以满足具有低碳偏好的消费者的需求。双方决策完成后,制造商向第三方申请生产与减排所需资金,向供应商采购原材料并加工产品进行销售,销售周期结束后制造商偿还贷款或分红。

5.1.2 符号定义

文中使用的主要符号及其含义见表 5-1.

表 5-1 符号说明及其含义

参 数	含 义
a	消费者购买低碳产品的初始价格
b	两种产品的产量敏感系数
λ	消费者低碳偏好系数
α	区块链技术的应用程度
x	产出不确定性的随机变量
X	应用区块链技术后产出不确定性的随机变量
c	区块链平台建设费用
k	制造商的碳减排成本系数
r	债权融资利率
η	股权融资比例
μ	投贷联动融资比例
θ	政府的碳减排成本补贴系数
决策变量	含 义
e^i	单位低碳产品碳减排量
ω^i	供应商的原材料批发价格
p^i	不同融资模式下低碳产品的销售价格
q^i	不同融资模式下低碳产品的原材料采购量
函 数	含 义
π_m^i, π_s^i	不同融资模式下的制造商和供应商利润
$E[\pi_m^i]$	不同融资模式下的制造商期望利润

备注：上标 $i = DF, EF, IF$ 分别为债权融资、股权融资、投贷联动融资模型。

5.1.3 模型假设

本章基于以下假设建立博弈模型：

假设 1 产出不确定性受到多种因素的影响, 引入区块链技术并不能直接提高制造商生产力。参考李健^[79]等的研究, 将应用区块链技术后产出波动的随机变量表示为 $X = \alpha\mu + (1-\alpha)x$, 其中 $\alpha \in [0,1]$, x 表示产出不确定性的随机变量。 α 越大, 表示应用区块链技术的程度越高。因此, 应用区块链技术后的均值和方差变为 $E(X)=1$, $Var(X)=(1-\alpha)\sigma^2$ 。

假设 2 假设制造商的计划产量为 q , 实际产量为 qX 。其中, X 是描述区块链技术应用后, 制造商产出不确定性的随机变量。方差越大, 产出不确定性越大。

假设 3 消费者具有低碳偏好, 并愿意为低碳产品支付溢价价格。因此, 低碳产品的需求不仅与销售价格有关, 还与产品的碳减排量相关。为方便分析, 记

反需求函数为 $p = a - bqX + \lambda e$ 。

本章其他假设与 3.1.3 相同，不再赘述。

5.2 模型构建与分析

5.2.1 债权融资(DF 模式)

在 DF 模式下，制造商在组织生产前，需要向银行申请企业用于生产运营的资金，即贷款额为 $L^{DF} = \omega^{DF} q^{DF} + \frac{1}{2}(1-\theta)k(e^{DF})^2 + c$ ，并按照 r 收取利息；制造商获取资金后展开生产并交付产品；在销售季结束时，制造商需要按照合同约定偿还本金和利息 $L^{DF}(1+r)$ 。此时制造商和供应商的利润函数：

$$\pi_m^{DF} = p^{DF} q^{DF} X - (\omega^{DF} q^{DF} + (1-\theta)k(e^{DF})^2 / 2 + c)(1+r) \quad (5.1)$$

$$\pi_s^{DF} = \omega^{DF} q^{DF} \quad (5.2)$$

上述式(5.1)中右端第 1 项为制造商的销售收入，第 2 项为制造商必须偿还的贷款本息和；式(5.2)中右端项表示供应商的销售收入，由于原材料的生产成本为 0，因此销售收入等于利润。考虑到制造商的产出具有不确定性，结合反需求函数可知制造商的期望利润函数为：

$$E[\pi_m^{DF}] = (a + \lambda e^{DF}) q^{DF} - b(1-\alpha)(1+\sigma^2)(q^{DF})^2 - (1+r) (\omega^{DF} q^{DF} + (1-\theta)k(e^{DF})^2 / 2 + c) \quad (5.3)$$

命题 5.1 在 DF 模式中，制造商的碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员的利润分别为：

$$e^{DF*} = \frac{a\lambda}{2A}, \quad q^{DF*} = \frac{ak(1+r)(1-\theta)}{2A}, \quad p^{DF*} = \frac{a(bk(1+r)(1-\theta)(4(1-\alpha)(1+\sigma^2)-1)-\lambda^2)}{2A},$$

$$E[\pi_m^{DF*}] = \frac{a^2k(1+r)(1-\theta)}{8A} - c(1+r), \quad \pi_s^{DF*} = \frac{a^2k(1-\theta)}{4A}。$$

其中 $A = 2bk(1+r)(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2) - \lambda^2$ 。证明见附录 5-A。

推论 5.1 在 DF 模式中，消费者低碳偏好系数和碳减排成本补贴系数对供应链关键参数的影响如下：

$$(1) \quad \frac{\partial e^{DF*}}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial q^{DF*}}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \lambda} = \begin{cases} \geq 0, & \text{if } 0 < \alpha \leq \bar{\alpha} \\ < 0, & \text{if } \bar{\alpha} < \alpha < 1 \end{cases}, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \lambda} > 0。$$

$$(2) \quad \frac{\partial e^{DF*}}{\partial \theta} > 0, \quad \frac{\partial q^{DF*}}{\partial \theta} > 0, \quad \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \theta} = \begin{cases} \geq 0, & \text{if } 0 < \alpha \leq \bar{\alpha} \\ < 0, & \text{if } \bar{\alpha} < \alpha < 1 \end{cases}, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \theta} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \theta} > 0。$$

其中 $\bar{\alpha} = \frac{1+2\sigma^2}{2(1+\sigma^2)}$ 。证明见附录 5-B。

从推论 5.1(1)可知，消费者低碳偏好系数与碳减排量、原材料采购量、制造商期望利润和供应商利润都是正相关的。这表明，市场上消费者对于低碳产品的偏好上升，促使制造商增加原材料采购和减排投资，占据市场份额。此外，销售价格并不是单一变化的，与区块链技术的应用程度有关。当区块链应用程度较低时，销售价格随消费者低碳偏好的增加而增加。反之，区块链技术的应用程度较高时，销售价格随消费者低碳偏好的增加而下降。这是因为区块链技术应用程度较低，导致信息获取成本高，最终将成本转嫁给消费者。而随着区块链应用程度上升，提高透明度，降低交易成本，增强消费者信任，并促进市场竞争，最终导致销售价格下降。由于消费者低碳偏好作用的边际收益远大于边际成本，因此制造商期望利润随之增加，供应商也受益于消费者低碳偏好。

从推论 5.1(2)可知，政府碳减排成本补贴对供应链关键参数的影响与消费者低碳偏好的影响相同。政府直接对制造商的减排成本进行补贴，相当于增加制造商的资金，使制造商加大力度减排，提高原材料采购量。同样地，补贴系数对销售价格的影响也受到区块链应用程度的影响。由于区块链应用程度较低，市场信息透明度低，政府补贴可以提高销售价格以最大化补贴带来的好处。然而，随着区块链技术应用程度的提高，提升了市场透明度和效率，政府补贴有助于减低成本，导致销售价格随政府补贴系数的增加而下降。显而易见，政府补贴力度的加大对制造商和供应商有积极的影响。

推论 5.2 在 DF 模式中，产出不确定性和区块链技术应用程度对供应链关键参数的影响如下：

$$(1) \frac{\partial e^{DF*}}{\partial \sigma^2} < 0, \quad \frac{\partial q^{DF*}}{\partial \sigma^2} < 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \sigma^2} < 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \sigma^2} < 0;$$

$$\frac{\partial e^{DF*}}{\partial \alpha} > 0, \quad \frac{\partial q^{DF*}}{\partial \alpha} > 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \alpha} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \alpha} > 0。$$

$$(2) \text{ 若 } 0 < \alpha \leq \bar{\alpha}, \text{ 则 } k^{DF} < k \leq \bar{k}_1, \quad \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \sigma^2} \leq 0, \quad \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \alpha} \geq 0; \text{ 或者 } k > \bar{k}_1, \quad \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \sigma^2} > 0,$$

$$\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \alpha} < 0。 \text{ 若 } \bar{\alpha} < \alpha < 1, \text{ 则 } \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \sigma^2} > 0, \quad \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \alpha} < 0。$$

$$\text{其中 } k^{DF} = \frac{\lambda^2}{2b(1+r)(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2)}, \quad \bar{k}_1 = \frac{\lambda^2}{b(1+r)(1-\theta)}。 \text{ 证明见附录 5-C。}$$

推论 5.2(1)表明, 产出不确定性与碳减排量、原材料采购量、制造商期望利润和供应商利润是负相关关系, 而区块链应用程度对其的影响恰恰相反。由于制造商生产过程具有波动性, 产出不确定性越大, 越不利于制造商对原材料的采购, 这也进一步降低了碳减排量。同时, 产出不确定性的存在, 促使制造商偏向于保守策略。因此, 供应商受制于制造商采购量, 进而导致供应商与产出不确定呈负相关关系。与之相反的是, 区块链技术应用程度的增加可以提高供应链的透明度、效率和信任度, 有助于促进碳减排措施的实施, 优化原材料采购。同时, 区块链技术可以更有效的管理原材料管理, 制造商可以实现更高的运营效率, 从而提高期望利润。这种技术不仅有助于实现环境目标, 还能提升供应链整体的经济性能。

推论 5.2(2)表明, 销售价格对产出不确定性和区块链技术应用程度的敏感性变化都受到区块链应用程度和碳减排补贴系数的双重影响。当区块链技术应用程度和碳减排成本均处于较低水平时, 销售价格随产出不确定性的增加而下降; 其余情形下则是销售价格随产出不确定性的增加而增加。在前一种情形下, 企业缺乏区块链技术和高效的碳减排技术。因此, 制造商通过降价来保持其在市场上的竞争力。然而, 企业可以利用其高效的碳减排技术或者区块链技术作为差异化因素, 通过提高价格来强化其环保品牌形象, 吸引那些愿意为可持续产品支付溢价的消费者。对于区块链技术应用而言, 区块链技术提高了交易的透明度和安全性, 即便碳减排成本技术处于较低水平, 企业也可以通过提高销售价格来反映其投资于技术创新和提升供应链管理效率的成本。而随着碳减排成本系数的增加, 而区块链技术的应用程度还不足以显著降低这些成本或提高运营效率。因此, 销售价格随着区块链技术应用的增加而逐渐下降。有趣的是, 随着企业采用高级别的区块链技术, 市场上的竞争变得更加激烈。为了保持竞争力, 企业需要降低价格来吸引消费者。

推论 5.3 在 DF 模式中, 融资利率对供应链关键参数的影响如下:

$$\frac{\partial e^{DF*}}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial q^{DF*}}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial p^{DF*}}{\partial r} = \begin{cases} \leq 0, & \text{if } 0 < \alpha \leq \bar{\alpha} \\ > 0, & \text{if } \bar{\alpha} < \alpha < 1 \end{cases}, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial r} < 0。$$

证明见附录 5-D。

推论 5.3 表明, 随债权融资利率的增加, 碳减排量、原材料采购量和供应链成员利润均随之下降。随着融资利率的增加, 其融资成本也会增加, 导致资金成本上升。这会增加制造商的经营压力, 间接导致制造商减少对原材料的采购。同

时，迫于利率增加的负面作用，制造商的减排动力被抑制。供应商以降低批发价的策略刺激制造商加大购买力度，但最终仍受到融资利率的负面影响。推论 5.3 也表明，当区块链技术的应用程度低于阈值时，融资利率上升引起销售价格下降；反之，结论相反。这是因为区块链技术应用程度较低时，供应链中各个环节之间的信息流动不够透明和高效。银行会更加谨慎审核融资资格，采取高融资利率会压低制造商的销售价格。而当区块链技术的应用程度高于阈值时，各个参与方之间的信任度得以提升。消费者更愿意购买经过区块链认证的产品，这使得企业可以通过提高产品价值和品牌溯源来支持提高销售价格，从而弥补融资成本的增加。

5.2.2 股权融资(EF 模式)

在股权融资中，投资者通过购买公司股权来获得对企业的所有权和未来利润的分享权。EF 模式下，制造商需要确定融资需求，即融资金额为 $L^{EF} = \omega^{EF} q^{EF} + \frac{1}{2}(1-\theta)k(e^{EF})^2 + c$ ，并与金融机构商议各自义务。期末，制造商按照事先约定给予第三方机构分红，其股权分红比例为 $\eta(0 < \eta < 1)$ 。此时，制造商和供应商的利润函数分别如下：

$$\pi_m^{EF} = (1-\eta)(p^{EF} q^{EF} X - \omega^{EF} q^{EF} - (1-\theta)k(e^{EF})^2 / 2 - c) \quad (5.4)$$

$$\pi_s^{EF} = \omega^{EF} q^{EF} \quad (5.5)$$

与债权融资相似，将反需求函数代入，得到：

$$E[\pi_m^{EF}] = (1-\eta)((a + \lambda e^{EF})q^{EF} - b(1-\alpha)(1+\sigma^2)(q^{EF})^2 - (\omega^{EF} q^{EF} + (1-\theta)k(e^{EF})^2 / 2 + c)) \quad (5.6)$$

命题 5.2 在 EF 模式中，制造商的碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员的利润分别为：

$$e^{EF*} = \frac{a\lambda}{2B}, \quad q^{EF*} = \frac{ak(1-\theta)}{2B}, \quad p^{EF*} = \frac{a(bk(1-\theta)(4(1-\alpha)(1+\sigma^2)-1)-\lambda^2)}{2B},$$

$$E[\pi_m^{EF*}] = (1-\eta)(\frac{a^2k(1-\theta)}{8B} - c), \quad \pi_s^{EF*} = \frac{a^2k(1-\theta)}{4B}.$$

其中 $B = 2bk(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2) - \lambda^2$ ，证明见附录 5-E。

推论 5.4 在 EF 模式中，消费者低碳偏好系数和碳减排成本补贴系数对供应链关键参数的影响如下：

$$(1) \quad \frac{\partial e^{EF*}}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial q^{EF*}}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \lambda} = \begin{cases} \geq 0, & \text{if } 0 < \alpha \leq \bar{\alpha} \\ < 0, & \text{if } \bar{\alpha} < \alpha < 1 \end{cases}, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{EF*}}{\partial \lambda} > 0.$$

$$(2) \frac{\partial e^{EF*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial q^{EF*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \theta} = \begin{cases} \geq 0, & \text{if } 0 < \alpha \leq \bar{\alpha} \\ < 0, & \text{if } \bar{\alpha} < \alpha < 1 \end{cases}, \frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \theta} > 0。$$

证明见附录 5-F。

推论 5.4 表明，消费者低碳偏好或政府补贴系数对关键参数的影响与 5.3 一致。消费者低碳偏好高意味着市场对低碳产品的需求增加，制造商为了满足这一需求会投入更多资源和资金生产低碳产品。因此，推动了制造商对原材料的采购和减排量，提升供应链成员的利润，促使供应链向更环保可持续的方向发展。由于区块链技术引入使得销售价格需要考虑其影响。随区块链技术应用程度的上升，销售价格由最初受消费者低碳偏好的负向作用逐渐转向正向影响。

政府补贴可以被视为一种额外的收入来源，这有利于制造商加大减排和原材料采购力度。此外，由于政府补贴数额与减排量成正比，那么制造商积极减排以获取更多的补贴，这也将直接提高制造商的期望利润。当区块链应用程度较低时，政府补贴系数的增加将会导致销售价格随之增加。反之，当区块链技术的应用程度较高时，政府补贴系数的增加将会导致销售价格随之下降。这背后的原因是由于市场上的竞争和消费者对于该技术的认知程度不同，从而影响了制造商的定价决策。

推论 5.5 在 EF 模式中，产出不确定性和区块链技术应用程度对供应链关键参数的影响如下：

$$(1) \frac{\partial e^{EF*}}{\partial \sigma^2} < 0, \frac{\partial q^{EF*}}{\partial \sigma^2} < 0, \frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \sigma^2} < 0, \frac{\partial \pi_s^{EF*}}{\partial \sigma^2} < 0。$$

$$\frac{\partial e^{EF*}}{\partial \alpha} > 0, \frac{\partial q^{EF*}}{\partial \alpha} > 0, \frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \alpha} > 0, \frac{\partial \pi_s^{EF*}}{\partial \alpha} > 0。$$

$$(2) \text{ 若 } 0 < \alpha \leq \bar{\alpha}, \text{ 则 } k^{EF} < k \leq \bar{k}_2, \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \sigma^2} \leq 0, \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \alpha} \geq 0; \text{ 或者 } k > \bar{k}_2, \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \sigma^2} > 0,$$

$$\frac{\partial p^{EF*}}{\partial \alpha} < 0。 \text{ 若 } \bar{\alpha} < \alpha < 1, \text{ 则 } k > \bar{k}_2, \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \sigma^2} > 0, \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \alpha} < 0。$$

$$\text{其中 } k^{EF} = \frac{\lambda^2}{2b(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2)}, \bar{k}_2 = \frac{\lambda^2}{b(1-\theta)}, \text{ 证明见附录 5-G。}$$

由推论 5.5 可知，产出不确定性对供应链整体上产生消极的影响。这是因为在不确定产出环境下，制造商更倾向于采取保守的生产策略，这就导致制造商减少对低碳的投资。同时，制造商寻求提高供应链的适应性和灵活性，而不是锁定大量原材料采购，以便能够快速响应市场变化。因此，供应链成员受到产出不确

定性的不利影响。此外，产出不确定性对销售价格的影响受到区块链技术应用程度和碳减排成本系数的共同作用。区块链技术应用程度和碳减排系数较低时，制造商缺乏足够的资源来应对产出不确定性带来的风险。因此，制造商会选择以更低的销售价格来吸引消费者，以获取最大化利润。然而，在区块链技术应用程度较低而碳减排成本技术较高或者区块链技术应用程度较高时，制造商面临的成本压力增加。面对产出不确定性的增加时，制造商需要通过提高销售价格来弥补成本增加带来的损失。

推论 5.5 也表明区块链技术的应用程度对供应链整体上产生积极的影响。区块链技术可以看作一种环境激励机制，鼓励制造商加大碳减排。区块链技术应用程度越高，供应链越透明，制造商越有信心采购更多的原材料。同时，由于区块链技术的应用使有助于提高品牌声誉和消费者信任，提高竞争力，从而增加销售和利润。同样地，制造商需要结合区块链技术应用程度和碳减排成本系数来灵活调整定价策略。当两者都处于较低水平时，区块链技术并不能大幅度提高效率，制造商仍旧选择以较高的价格销售产品。然而，碳减排成本系数上升后价格反而下降。这是由于减排量逐渐增加，制造商会调整销售价格以保持竞争力。

5.2.3 投贷联动融资(IF 模式)

IF 模式下，制造商需要根据自身情况选择合适的金融机构提交申请，并与合作者达成协议，明确双方的权利和义务。假设制造商的股权融资比例为 μ ($0 < \mu < 1$)，则债权融资比例为 $1 - \mu$ ，债权融资额度为 $L^F = (1 - \mu)(\omega^F q^F + \frac{1}{2}(1 - \theta)k(e^F)^2 + c)$ 。销售周期结束后，制造商按照协议履行分红和还款义务。制造商股权融资的分红比例为 η ，债权融资需要偿还的利息为 $L^F r$ 。股权融资比例和股权分红比例相互独立。此时，制造商和供应商的利润函数如下：

$$\pi_m^F = (1 - \eta)(p^F q^F X - (1 - \mu)(\omega^F q^F + (1 - \theta)k(e^F)^2 / 2 + c)(1 + r)) \quad (5.7)$$

$$\pi_s^F = \omega^F q^F \quad (5.8)$$

与前两个模型类似，制造商的期望利润函数为：

$$E[\pi_m^F] = (1 - \eta)((a + \lambda e)q^F - b(1 - \alpha)(1 + \sigma^2)(q^F)^2 - (1 - \mu)(\omega^F q^F + (1 - \theta)k(e^F)^2 / 2 + c)(1 + r)) \quad (5.9)$$

命题 5.3 在 IF 模式中，制造商的碳减排量、原材料采购量、销售价格和供

应链成员利润分别为：

$$e^{IF*} = \frac{a\lambda}{2C}, q^{IF*} = \frac{ak(1-\mu)(1-\theta)(1+r)}{2C}, p^{IF*} = \frac{a(bk(1+r)(1-\mu)(1-\theta)(4(1-\alpha)(1+\sigma^2)-1)-\lambda^2)}{2C},$$

$$E[\pi_m^{IF*}] = \frac{a^2k(1-\theta)(1+r)(1-\mu)(1-\eta)}{8C} - c(1+r)(1-\mu)(1-\eta), \pi_s^{IF*} = \frac{a^2k(1-\theta)}{4C}。$$

其中 $C = 2bk(1+r)(1-\alpha)(1-\mu)(1-\theta)(1+\sigma^2) - \lambda^2$ ，证明见附录 5-H。

推论 5.6 在 IF 模式中，消费者低碳偏好系数和碳减排成本补贴系数对供应链关键参数的影响如下：

$$(1) \frac{\partial e^{IF*}}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial q^{IF*}}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \lambda} = \begin{cases} \geq 0, & \text{if } 0 < \alpha \leq \bar{\alpha} \\ < 0, & \text{if } \bar{\alpha} < \alpha < 1 \end{cases}, \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \lambda} > 0。$$

$$(2) \frac{\partial e^{IF*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial q^{IF*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \theta} = \begin{cases} \geq 0, & \text{if } 0 < \alpha \leq \bar{\alpha} \\ < 0, & \text{if } \bar{\alpha} < \alpha < 1 \end{cases}, \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \theta} > 0。$$

证明见附录 5-I。

推论 5.6 的结论与推论 5.1 和 5.4 的结论一致，不再详细阐述。消费者低碳偏好直接表明了消费者对产品的态度，系数越高意味着消费者更倾向于购买低碳产品。为了迎合这一需求，制造商会增加碳减排量和原材料采购。但制造商并不会盲目的提高产品销售价格来缓解成本压力。而是在区块链技术应用程度较高时选择降低销售价格。在这种情况下，区块链技术高度运用到供应链中，使得制造商将重心放在如何在竞争市场中脱颖而出上，而降价是直接的行为表达。

政府补贴是直接降低企业碳减排成本，鼓励企业积极减排的有效措施。随着政府补贴力度增加，制造商更有动力进行减排投资，从而碳减排量升高。通常而言，政府补贴往往也会激励制造商增加对原材料的采购。同时，制造商可以在减排投入较小的情况下实现更大的减排效益，提高竞争力，进而增加利润空间。然而，当区块链技术的应用程度较高时，政府补贴系数的增加会导致销售价格下降。政府补贴导致减排成本的降低，制造商将这一优势转化为销售价格的下降，进而吸引更多消费者选择其产品。这有助于扩大市场份额并提升销售量，进而弥补降价带来的利润减少。

推论 5.7 在 IF 模式中，产出不确定性和区块链技术应用程度对供应链关键参数的影响如下：

$$(1) \frac{\partial e^{IF*}}{\partial \sigma^2} < 0, \frac{\partial q^{IF*}}{\partial \sigma^2} < 0, \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \sigma^2} < 0, \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \sigma^2} < 0。$$

$$\frac{\partial e^{IF*}}{\partial \alpha} > 0, \quad \frac{\partial q^{IF*}}{\partial \alpha} > 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \alpha} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \alpha} > 0。$$

$$(2) \text{ 若 } 0 < \alpha \leq \bar{\alpha}, \text{ 则 } k^{IF} < k \leq \bar{k}_3, \quad \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \sigma^2} \leq 0, \quad \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \alpha} \geq 0; \text{ 或者 } k > \bar{k}_3, \quad \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \sigma^2} > 0, \\ \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \alpha} < 0。 \text{ 若 } \bar{\alpha} < \alpha < 1, \text{ 则 } k > k^{IF}, \quad \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \sigma^2} > 0, \quad \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \alpha} < 0。$$

$$\text{其中 } k^{IF} = \frac{\lambda^2}{2b(1+r)(1-\alpha)(1-\theta)(1-\mu)(1+\sigma^2)}, \quad \bar{k}_3 = \frac{\lambda^2}{b(1+r)(1-\mu)(1-\theta)}, \text{ 证明见附录 5-J。}$$

推论 5.7 中，产出不确定性或区块链技术应用程度对主要决策变量的与供应链双方利润的影响与推论 5.2 和 5.5 一致。由于不确定性增加，制造商会减少对碳减排的投资，以降低成本和风险，从而导致减排量下降。在这种情况下，制造商更注重成本控制，精细化管理原材料采购。同时，供应链的稳定性和可靠性受到不确定的影响，进而对利润造成负面影响。为了维持盈利能力，制造商可能需要采取更多的措施来应对不确定性带来的挑战。

区块链技术的应用增强了供应链各方之间的信任，有助于建立更稳定和长期的合作关系。随着区块链技术应用程度的提高，消费者对产品更加了解，这进一步激励制造商减排量。加上区块链技术对供应链的效率和可靠性的提升，使得这制造商增加对原材料的采购。此外，供应商通过与制造商建立稳定的合作伙伴关系，可以获得更稳定的订单量，提高利润。区块链技术应用程度和碳减排成本的对销售价格的影响是复杂的。当区块链技术应用程度较低而碳减排成本技术较高时，制造商可以提供更具吸引力、成本效益更高的产品，同时也能够推动区块链技术的应用和可持续发展的实现。

推论 5.8 在 IF 模式中，融资利率对供应链关键参数的影响如下：

$$\frac{\partial e^{IF*}}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial q^{IF*}}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial p^{IF*}}{\partial r} = \begin{cases} \leq 0, & \text{if } 0 < \alpha \leq \bar{\alpha} \\ > 0, & \text{if } \bar{\alpha} < \alpha < 1 \end{cases}, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial r} < 0。$$

证明见附录 5-K。

推论 5.8 表明，随着融资利率的增加，碳减排量、原材料采购量和供应链成员的利润随之下降。融资利率的增加会对制造商整体经营造成压力，导致制造商降低对减排的要求。同时，企业的还款压力的增加导致财务风险也会相应增加，进而减少原材料采购量。因此，供应链成员的利润空间被挤压。有趣的是，区块

链技术的应用程度低于阈值时,制造商在利用区块链技术提高效率和降低成本方面受限,无法抵消融资成本的增加,降低产品价格是维持市场份额和吸引客户的策略。反之,制造商会选择调整销售价格以提高利润水平,而不是简单地压低价格来应对融资利率的增加。

5.3 模型比较与分析

结合上述的分析,本节对三种融资模型的均衡解及供应链成员的利润进行对比分析,探讨制造商的最佳融资策略。同时本节旨在为制造商提供有价值的见解,以便为企业提供理论支撑。

推论 5.9 不同融资模式下的均衡状态满足:

(1) 当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时, $e^{DF*} < e^{IF*} \leq e^{EF*}$, $q^{DF*} < q^{IF*} \leq q^{EF*}$; 当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时, $e^{DF*} < e^{EF*} < e^{IF*}$, $q^{DF*} < q^{EF*} < q^{IF*}$ 。

(2) 当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 且 $0 < \alpha \leq \bar{\alpha}$ 时, $p^{DF*} \leq p^{IF*} \leq p^{EF*}$; 当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 且 $\bar{\alpha} < \alpha < 1$ 时, $p^{EF*} \leq p^{IF*} < p^{DF*}$; 当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 且 $0 < \alpha \leq \bar{\alpha}$ 时, $p^{DF*} \leq p^{EF*} \leq p^{IF*}$; 当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 且 $\bar{\alpha} < \alpha < 1$ 时, $p^{IF*} < p^{EF*} < p^{DF*}$ 。

其中 $\bar{\mu} = \frac{r}{1+r}$ 。证明见附录 5-L。

推论 5.9(1)表明,当股权融资比例低于阈值时,碳减排量和原材料采购量在 EF 模型下最优;反之,则是在 IF 模型下最优。当股权融资比例高于阈值时,说明企业更依赖于股权融资来获取资金,相对较少依赖债权融资。在这种情况下,企业的财务风险较低。因此,企业更有能力扩大生产规模、增加减排量,以满足市场需求。因此,IF 模式下碳减排量和原材料采购量最优。相反,股权融资比例低于阈值时,制造商大部分是利用银行融资模式(DF 模式)来获取资金。而银行通常更注重企业的抵押品和财务状况,而对环境因素的考虑相对较少。而 EF 模式下制造商无还款压力,这更有资金支撑制造商的减排和采购。股权融资比例的变化影响制造商在不同模式下对碳减排量和原材料采购量的重视程度。因此,企业需要根据自身的融资结构和战略目标来灵活调整在不同模式下的经营重点,以最大化融资能力和企业长期发展的利益。

推论 5.9(2)表明销售价格的最优模式选择受到股权融资比例和区块链技术应用程度的综合影响。当股权融资比例和区块链技术应用程度较低时,EF 模式对制造商更有吸引力。因为 EF 模式下,制造商没有期末偿还资金的压力。这使得

制造商融资负担降低，而且第三方机构为制造商承担了风险。在这种情况下，制造商敢于采取高价策略。当区块链技术应用程度较高时，较高的区块链技术应用建立良好的透明度和信任度，促使消费者更愿意支付更高的价格。此时，DF 模式下制造商更积极地将成本转嫁给消费者。而当股权融资比例较高而区块链技术应用程度较低时，制造商为回报投资者利润最大化的目标，更倾向于使用风险较低的融资模式。此时，IF 模式成为制造商定价的最高选择。因此，企业应根据自身的融资情况、技术水平和利润追求来制定最优销售价格，以在市场竞争中取得最大的利益。

推论 5.10 不同融资模式下制造商期望利润和供应商利润满足：

(1) i) 当 $(\sigma^2)^{EF} < \sigma^2 \leq \sigma_1^2$ 时，则 $E[\pi_m^{DF*}] < E[\pi_m^{EF*}]$ ；当 $\sigma^2 > \sigma_1^2$ 时，若 $0 < c \leq c_1$ ， $E[\pi_m^{DF*}] \geq E[\pi_m^{EF*}]$ ，若 $c_1 < c < c^{DF}$ ， $E[\pi_m^{DF*}] < E[\pi_m^{EF*}]$ 。

ii) 当 $(\sigma^2)^{IF} < \sigma^2 \leq \sigma_2^2$ 时，则 $E[\pi_m^{DF*}] < E[\pi_m^{IF*}]$ ；当 $\sigma^2 > \sigma_2^2$ 时，若 $0 < c \leq c_2$ ， $E[\pi_m^{DF*}] \geq E[\pi_m^{IF*}]$ ，若 $c_2 < c < c^{DF}$ ， $E[\pi_m^{DF*}] < E[\pi_m^{IF*}]$ 。

iii) 当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时， $E[\pi_m^{IF*}] \leq E[\pi_m^{EF*}]$ ；当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时， $E[\pi_m^{IF*}] > E[\pi_m^{EF*}]$ 。

(2) 当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时， $\pi_s^{DF*} < \pi_s^{IF*} \leq \pi_s^{EF*}$ ；当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时， $\pi_s^{DF*} < \pi_s^{EF*} < \pi_s^{IF*}$ 。

其中 $(\sigma^2)^{EF} = \frac{-2bk(1-\alpha)(1-\theta) + \lambda^2}{2bk(1-\alpha)(1-\theta)}$ ， $(\sigma^2)^{IF} = \frac{-2bk(1+r)(1-\mu)(1-\alpha)(1-\theta) + \lambda^2}{2bk(1+r)(1-\mu)(1-\alpha)(1-\theta)}$ ，

$$\sigma_1^2 = -1 + \frac{(r+\eta)\lambda^2}{-2bk\eta(1+r)(1-\alpha)(1-\theta)} \quad , \quad \sigma_2^2 = -1 + \frac{(\mu(1-\eta)+\eta)\lambda^2}{2bk\eta(1+r)(1-\alpha)(1-\mu)(1-\theta)} \quad ,$$

$$c^{DF} = \frac{a^2k(1-\theta)}{8A} \quad , \quad c_1 = \frac{a^2k(1-\theta)(2bk\eta(1+r)(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2) - (r+\eta)\lambda^2)}{8AB(r+\eta)} \quad ,$$

$$c_2 = \frac{a^2k(1-\theta)(2bk\eta(1+r)(1-\alpha)(1-\mu)(1-\theta)(1+\sigma^2) - (\mu(1-\eta)+\eta)\lambda^2)}{8BC(\mu(1-\eta)+\eta)} \quad . \text{证明见附录 5-M.}$$

推论 5.10(1)表明制造商的融资模式选择受到多种因素的影响。当产出不确定性较低，或产出不确定性和和区块链平台建设费用均较高时，平台会选择 EF 或 IF 模式作为融资方式。只有在产出不确定性较高而区块链平台建设费用较低时，制造商才会选择 DF 模式。产出不确定性较低意味着制造商具有较高的生产效率和质量稳定性，不容易受到外部因素的影响而产生波动。DF 模式下制造商承担更多的风险，而且具有较大的还款压力。然而，EF 和 IF 模式下第三方机构会共享制造商的风险。尤其是在产出不确定性较高且区块链平台建设费用都较高

时，制造商更不会选择 DF 模式。相反，只有在产出不确定性较高而区块链平台建设费用较低时，制造商才可能选择 DF 模式作为融资方式。因为这种情况下债权融资可以提供相对稳定的资金来源，帮助企业应对市场波动性，同时避免因第三方机构的股权融资而失去控制权。

推论 5.10 也表明制造商对于 EF 或 IF 模式的选择受到股权融资比例的影响，供应商的选择也是如此。当股权融资比例低于阈值时，双方都选择 EF 模式；反之，IF 模式则是更优选。股权融资比例较低意味着制造商大部分资金来源于银行。这种情况下，制造商的资金压力和风险较大。然而，EF 模式下进一步分散制造商的风险，而且制造商可以更多地保留经营决策权，更灵活地调整经营策略和降低成本，以最大化利润。供应商也从中受益。而当股权融资比例高于阈值时，单纯的股权融资模式使制造商更为容易丧失自主权。此时，IF 模式更具优势，帮助制造商实现更高的利润。结合推论 5.9 可知，在股权融资比例的变化范围内，供应链在经济效益和环境效益上目标一致，有利于供应链稳定。

5.4 数值算例

为更加清楚的分析模型以及阐述相关的结论，本小节将采用算例分析部分参数对低碳供应链系统主要决策变量的敏感性变化。根据本研究的假设，相关参数的具体取值为： $a=100$ ， $b=1$ ， $d=0.5$ ， $\lambda=1$ ， $k=10$ ， $r=0.2$ ， $\eta=0.3$ ， $\mu=0.5$ ， $\theta=0.8$ ， $\sigma^2=0.6$ ， $\alpha=0.5$ ， $c=100$ 。

5.4.1 产出不确定性对供应链关键参数的敏感性分析

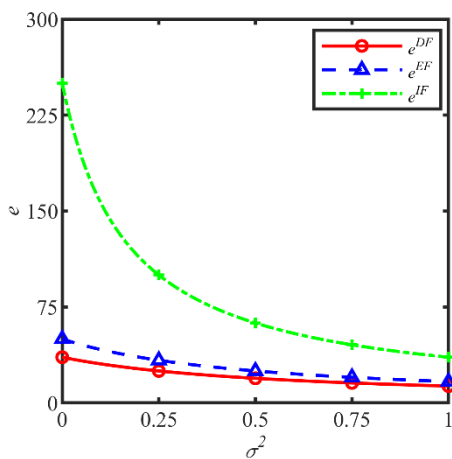


图 5-1 σ^2 对 e 的敏感性分析

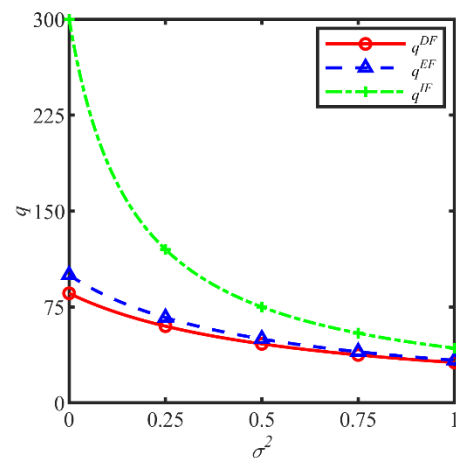


图 5-2 σ^2 对 q 的敏感性分析

从图 5-1—5-5 可知，不同的模型受产出不确定性影响的程度不同，而 IF 模型受到产出不确定性的影响最大。与 IF 模式不同，DF 模式下制造商的财务结构

相对稳定。无论产出如何变化，借款金额和还款计划都是预先确定的。尽管需要支付利息，但企业可以根据其经营计划在期限内稳定地偿还借款。EF 模式下，股权融资增加了企业的资本结构的稳定性，并且不需要支付固定的利息费用，使得制造商更专注于长期发展。然而，IF 模式下，银行和第三方投资者共同构成制造商的资金来源，这意味着企业需要承担更多的债务压力和利息费用。因此，企业需要更加谨慎地处理风险，调整经营策略，以降低不确定性带来的负面影响。

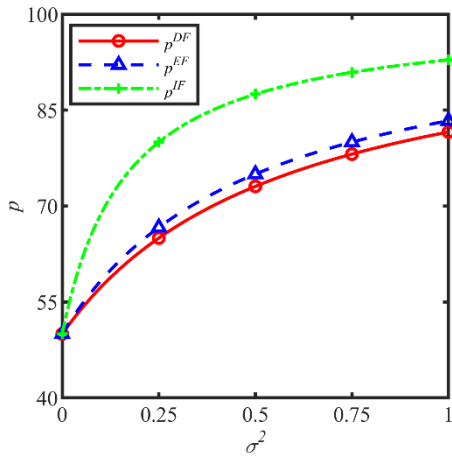


图 5-3 σ^2 对 p 的敏感性分析

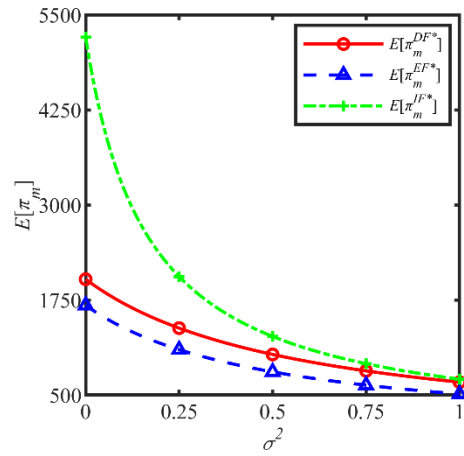


图 5-4 σ^2 对 $E[\pi_m]$ 的敏感性分析

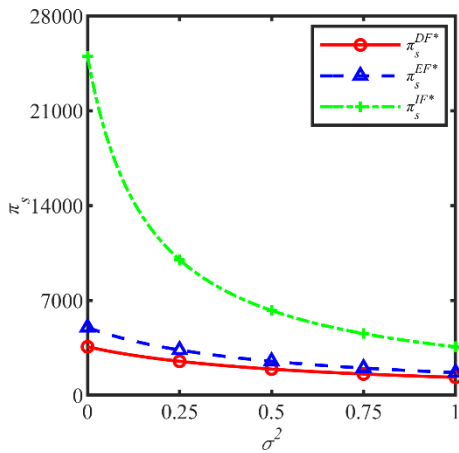


图 5-5 σ^2 对 π_s 的敏感性分析

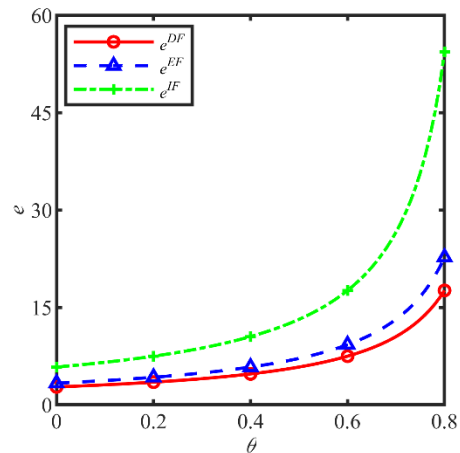


图 5-6 θ 对 e 的敏感性分析

图 5-1—5-5 也表明，虽然产出不确定性对 IF 模式的影响最强，但 IF 模式始终是最优的选择。这是因为 DF 模式使得制造商财务压力较大，EF 模式使得制造商受制于第三方机构，影响制造商利润积累。这都使得制造商面对产出不确定性时采取相对保守的策略。然而，IF 模式与银行和第三方机构达成协议，共同分担制造商资金来源，分散制造商的风险，使得制造商在 IF 模式下拥有更多的灵活性。因此，企业应该综合考虑自身的情况和市场环境，采取综合性的措施来管理产出不确定性和财务风险，以确保企业的稳健发展。

5.4.2 政府低碳补贴对供应链关键参数的敏感性分析

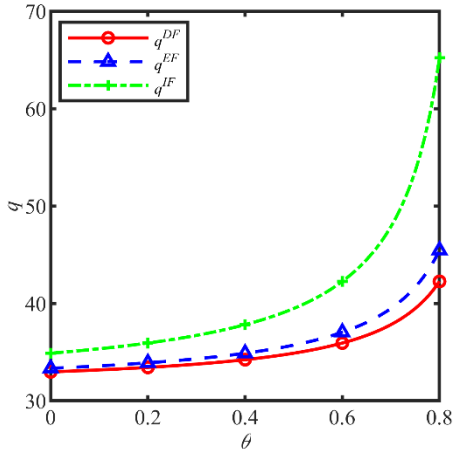


图 5-7 θ 对 q 的敏感性分析

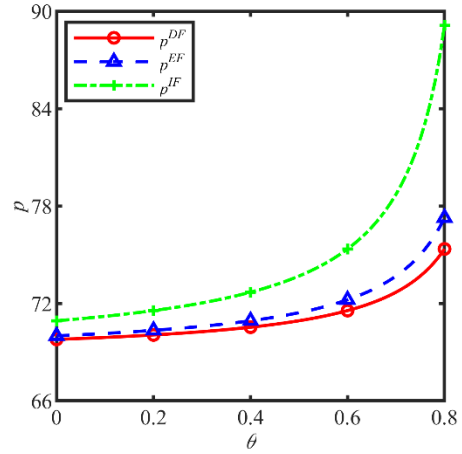


图 5-8 θ 对 p 的敏感性分析

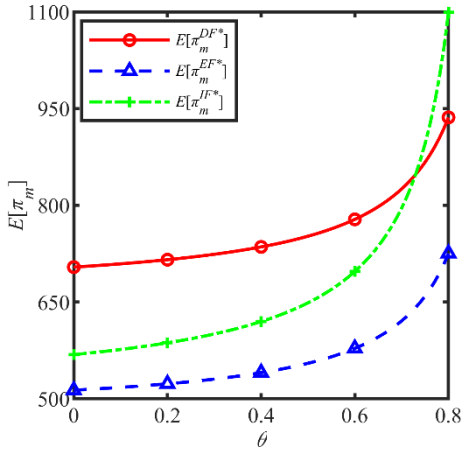


图 5-9 θ 对 $E[\pi_m]$ 的敏感性分析

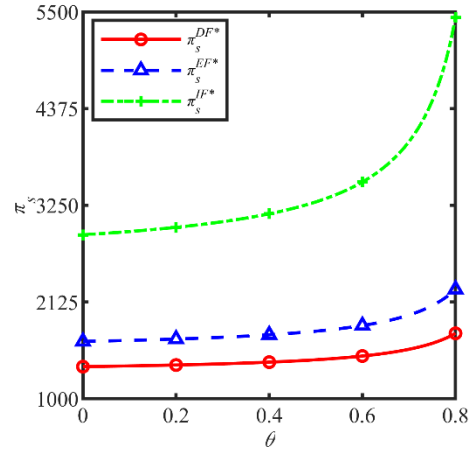


图 5-10 θ 对 π_s 的敏感性分析

图 5-6—5-10 表明，同一变量（碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员利润）下，仍然是 IF 模式受政府补贴的敏感性变化最大。IF 模式下，涉及到了多方借款方，政府补贴系数的变化会对资金流动和制造商决策产生更为直接和复杂的影响。制造商需要考虑如何合理分配不同借款方之间的利益，以应对政府补贴系数变化所带来的影响。这种复杂的资金流动和决策调整使得企业更加敏感于政府补贴系数的变化。相比之下，DF 模式或 IF 模式下借款方是单一的，政府补贴系数的变化对制造商的融资成本影响相对独立和稳定，决策相对简单。企业在面对政府补贴时，应该审查成本结构、多元化融资渠道、提升资源利用效率，并积极寻求政府支持和合作，以适应并减轻政府政策变化所带来的影响。

由图 5-9 可知，制造商的期望利润只有在政府补贴系数极高的情况下选择 IF 模式，其余情况下制造商都更倾向于 DF 模式。因为政府补贴系数极高时，政府补贴能够显著降低制造商的碳减排成本。极高的政府补贴使制造商借助其正向作

用，大幅度扩张以增加期望利润。DF 模式下，政府补贴可以为制造商提供更有利的融资条件，降低企业的融资成本，从而减少了企业的财务负担。但随着政府补贴系数逐渐增加，IF 模式更有竞争力。然而，供应商始终选择 IF 模式。这是因为供应商并不参与制造商的融资过程，但不同的融资模式使得制造商的采购策略不同。结合图 5-7，原材料采购量在 IF 中处于优势地位，进而影响供应商的选择。因此，制造商选择融资模式时应考虑政府补贴系数的影响，并根据具体情况做出相应的选择，以最大化期望利润。

5.4.3 区块链技术应用程度对供应链关键参数的敏感性分析

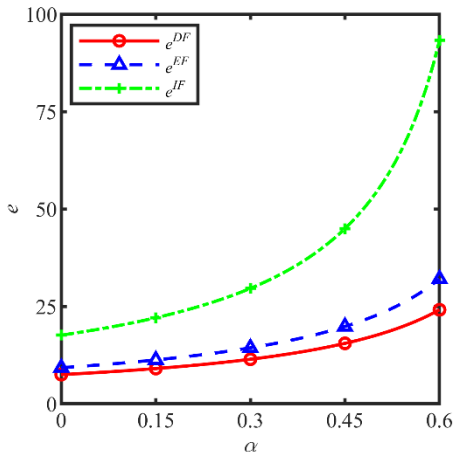


图 5-11 α 对 e 的敏感性分析

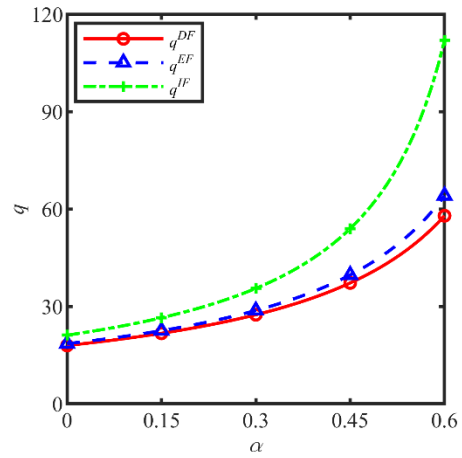


图 5-12 α 对 q 的敏感性分析

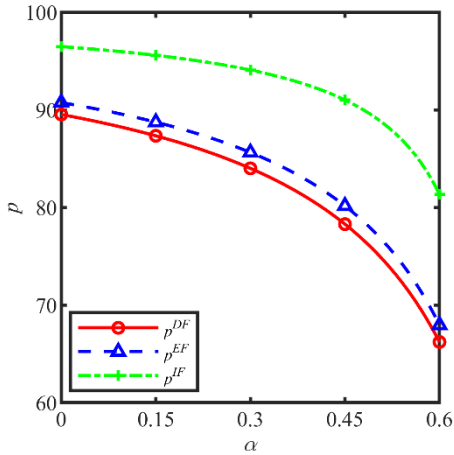


图 5-13 α 对 p 的敏感性分析

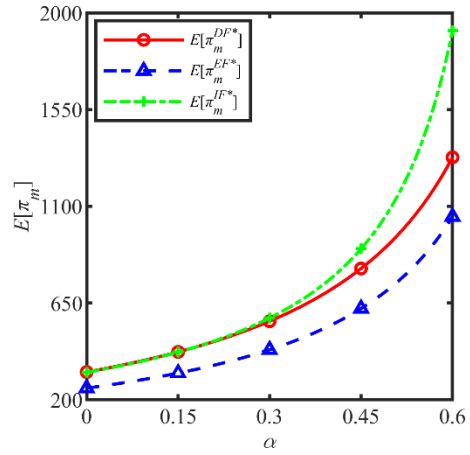


图 5-14 α 对 $E[\pi_m]$ 的敏感性分析

图 5-11—5-15 表明，除销售价格外，区块链技术应用程度其余参数的敏感性变化仍然是在 IF 模式下最大。这与产出不确定性和政府补贴系数的影响不同。IF 模式下，各个成员之间的交易和信息流动比较复杂，需要更多的协调和管理。为了保证供应链的稳定和透明度，引入区块链技术可以提高数据共享和交易可追溯性，帮助成员更好地协作和管理供应链。相比之下，制造商在 DF 模式下直接

与银行进行融资,导致了数据共享和透明度受到限制。销售价格通常受市场需求、竞争等因素影响更大,区块链技术的应用程度对于定价策略的影响相对较小。因此区块链对三种融资模式下的销售价格的敏感性变化较为接近。

图 5-14 表明,随着区块链技术应用程度的提高,制造商融资模式的选择逐渐从 DF 模式转向 IF 模式。DF 模式下供应链结构相对稳定,借助区块链技术使制造商更好掌握市场需求,进一步调整生产和定价策略,以实现利润最大化。然而,IF 模式为制造商提供更广泛的融资选择,分散制造商的风险。同时,区块链技术应用程度的提高,进一步扩大了 IF 模式的优势,最终使得 IF 模式成为制造商的最佳选择。同样地,区块链技术应用程度对原材料采购量的影响在 IF 模式下显著优于另外两种模式,使得供应商始终倾向 IF 模式。因此,制造商应该积极适应区块链技术的发展趋势,与供应链中的合作伙伴共同探索创新解决方案,以进一步提升供应链的可靠性、透明度和效率,从而实现更优化的利润。

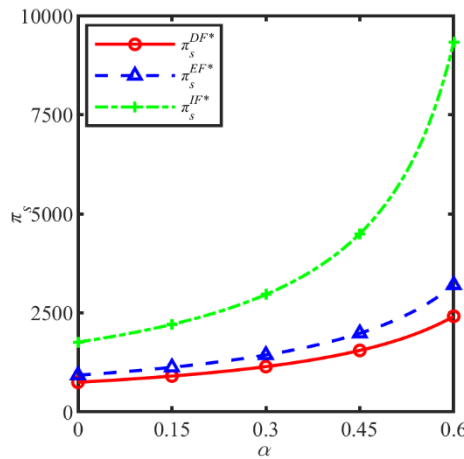


图 5-15 α 对 π_s 的敏感性分析

5.5 本章小结

本章在区块链背景下,利用区块链技术对制造商低碳产出的不确定性进行刻画,研究产出不确定性制造商的融资与减排问题。进一步探索了区块链环境下产出不确定性的变化对碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员(期望)利润的影响,同时也探讨区块链技术应用程度对主要决策变量的影响。得到如下结论:

(1) 制造商碳减排量、原材料采购量和供应链成员的(期望)利润与产出不确定性(区块链技术应用程度和政府补贴)均呈负(正)相关关系。而产出不确定性或区块链技术应用程度对销售价格的影响受到区块链技术应用程度和减排成本系数

的综合作用，政府补贴对销售价格的影响只依赖区块链技术的应用程度。

(2) 产出不确定性、区块链平台建设费用和股权融资比例都会影响制造商融资模式的选择，故而制造商采取融资策略时需要充分考虑各个因素的影响，以实现利润最大化目标。此外，随着股权融资比例的增加，供应链成员的偏好逐渐从 EF 模式转向 IF 模式。在不同的股权融资比例范围内，无论从环境效益还是经济效益，供应链成员的目标始终一致，这有利于供应链稳定和发展。

(3) 不同的模式下的关键参数，受产出不确定性或政府补贴系数影响的程度不同，但产出不确定性或政府补贴系数对 IF 模式下的关键参数的敏感性变化的影响最大。然而，除销售价格外，区块链技术应用程度其余参数的敏感性变化仍然是在 IF 模式下最大。

第 6 章 总结与展望

6.1 研究总结

“双碳”目标下，制造商为实现“节能降碳”往往需要进行低碳投资。低碳发展不仅是应对环境变化的重要措施，也是企业可持续发展的关键途径。然而，制造商为生产低碳产品而开发绿色生产技术时，通常面临技术的复杂性与不稳定性等挑战，从而导致企业资金紧张且产出具有不确定性。与此同时，政府补贴和供应链金融成为推动制造商低碳发展转型的重要支撑力量，为制造商的低碳发展提供有力保障。因此，本文建立一个单一制造商和单一供应商组成的二级供应链，结合政府的减排补贴、产出不确定条件和区块链技术的背景，分别构建债权融资、股权融资和投贷联动融资三种融资模式下的 Stackelberg 博弈模型，得到不同融资模式下的碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员(期望)利润均衡解。通过理论分析和数值算例，得出以下主要结论：

(1) 政府补贴下考虑低碳产品产出不确定性的制造商融资与碳减排策略。针对具有产出不确定性的制造商在面对资金约束时，得到债权融资、股权融资和投贷联动融资模式的偏好。研究表明： a) 产出不确定性(政府补贴)与碳减排量、原材料采购量和供应链成员利润是负(正)相关的。 b) 与政府补贴和消费者低碳偏好对销售价格的正向影响不同，产出不确定性对销售价格的影响与碳减排成本系数有关。 c) 股权分红比例低于阈值时，股权融资模式下碳减排量、原材料采购量和销售价格最优；反之，投贷联动融资模式更优。 d) 制造商在面临多种融资模式的选择时，都需要综合考虑碳减排成本系数、产出不确定性以及股权融资比例等因素。然而，在不同的股权融资比例范围内，供应链成员往往能够就环境和经济效益的目标达成一致，从而选择相同的融资策略。

(2) 政府补贴下考虑产出不确定性与异质性产品的制造商融资与碳减排策略。为顺应低碳发展，研究企业在转型阶段下的融资模式选择。首先构建具有资金约束的制造商生产异质性产品(低碳产品和传统产品)的不同融资模型，帮助制造商选择合适的融资模式。其次，当供应链成员存在利益冲突时，运用改进 Nash 讨价还价博弈模型协调供应链。研究表明： a) 产出不确定性与碳减排量、低碳

产品的原材料采购量、供应链成员的(期望)利润水平负相关,与传统产品的原材料采购量正相关。这与政府补贴下的结论恰恰相反。b) 传统产品的销售价格不受产生不确定性的影响,但对低碳产品的销售价格的影响变化取决于碳减排成本系数。c) 股权融资模式下碳减排量、低碳产品原材料采购量及其销售价格均最高,而债权融资模式下则均为最低。相反地,传统产品的原材料采购量在股权融资模式下最低,在债权融资模式下最高,而其销售价格则保持不变。d) 股权融资模式下供应商利润最大化,制造商选择受产出不确定性和股权分红影响。利用改进 Nash 博弈模型达到供应链的完美协调。

(3) 政府补贴下考虑产出不确定性与区块链技术应用的制造商融资与碳减排策略。针对产出不确定这一挑战,企业可以利用区块链技术来提高对产出不确定性的预测能力。因此,进一步对不同的融资模式进行研究与分析,以期帮助制造商明确融资模式。研究表明: a) 碳减排量、原材料采购量和供应链成员的利润与产出不确定性(区块链技术应用程度和政府补贴)均呈负(正)相关关系。b) 产出不确定性或区块链技术应用程度对销售价格的影响受到区块链技术应用程度和减排成本系数的综合作用。c) 当股权分红比例较低时,股权融资模式表现出优越性,使得碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链期望利润均达到最优;而当股权融资比例提高时,投贷联动融资模式则成为最佳选择。d) 制造商在选择融资模式时,需综合考虑产出不确定性、区块链平台建设费用及股权融资比例等因素,以实现利润最大化。此外,随着股权融资比例的增加,供应链成员的偏好逐渐从股权融资模式转向投贷联动融资模式。

本文的研究能够带来以下管理启示:

(1) 由于三种融资模式中没有绝对占优的融资模式,导致制造商在选择融资模式时,应综合考虑碳减排成本系数、产出不确定性以及股权融资比例等因素,选择既能满足资金需求又能促进碳减排的最优融资模式。此外,作为供应链领导者的供应商和倡导低碳生产和消费的政府部门应通过政策引导制造商选择合适的融资模式。当供应链成员出现利益冲突时,供应商需要积极与制造商协调利润分配,确保供应链的连续性和稳定性,提高整个供应链的竞争力。

(2) 产出不确定性对供应链绩效指标的影响基本上是灾难性的。引入区块链技术后提高了产出不确定性的预测能力,也加大了制造商的减排力度,使制造商收益颇丰。因此,制造商可以通过技术创新来提高生产效率,同时降低能源消耗

和碳排放量。这不仅可以增强企业的核心竞争力，减少其对供应链造成的伤害，还可以满足市场对低碳、环保产品的需求。此外，制造商还可以加大绿色技术的研发投入、建立更准确的需求预测模型、完善生产计划和控制系统等手段来弱化低碳产品供给过程中的不确定性。

(3) 碳减排成本补贴对减少碳排放、丰富低碳产品供给、增加供应链成员利润有正向影响。在财政资金允许的条件下政府可以提高企业碳减排的补贴力度以及开展绿色消费补贴。政府部门和供应链企业通过加大绿色宣传力度，推广低碳环保生活，营造绿色消费氛围，提升消费者低碳偏好，也有利于刺激制造商减少碳排放和增加低碳产品供给。此外，制造商应密切关注政府补贴政策，并充分利用补贴资金来推动低碳技术和产品的研发。通过营销策略和品牌建设来引导消费者购买低碳产品，满足市场需求并推动低碳经济的发展。

6.2 研究展望

本文分析了不同情境下，产出不确定性对制造商融资和减排行为以及低碳供应链运作的影响，分析了补贴政策、产出不确定性、区块链技术应用程度对碳减排量、原材料采购量、销售价格和供应链成员(期望)利润的影响，并帮助制造商对比不同融资模式的优劣。但本文的研究仍存在一些局限性：

(1) 本文并未考虑供应链成员面对产出不确定性时的风险态度，未来可将供应链成员的相关行为或态度偏好纳入低碳供应链运营决策模型，以开展更为深入的研究。

(2) 本文设定供应商作为供应链的领导者，而现实中供应链各成员与市场的接触程度不同，在监测市场信息时，制造商比供应商更接近产品市场，了解的市场信息更全面，掌握更多的市场主动权。后续可以考虑制造商占据供应链领导地位的情形。

(3) 本文考虑的是信息完全对称的情形，而现实中不乏有些企业为了获得融资，会选择隐藏一些信息，如对碳减排的投资、降低产出不确定性的技术。后续可以研究信息不对称下的制造商融资与减排决策。

参考文献

- [1] Yuan S, Li J, Su X. Impact of government subsidy strategies on supply chains considering carbon emission reduction and marketing efforts[J]. Sustainability, 2022, 14(5): 3111.
- [2] Fogarty J J, Sagerer S. Exploration externalities and government subsidies: The return to government[J]. Resources Policy, 2016, 47: 78-86.
- [3] Kraljic P. Purchasing must become supply management[J]. Harvard Business Review, 1983, 61(5): 109-117.
- [4] Shapiro R D. Get leverage from logistics[J]. Harvard Business Review, 1984, 62(3): 119-126.
- [5] He X H, Jiang J, Hu W F. Cross effects of government subsidies and corporate social responsibility on carbon emissions reductions in an omnichannel supply chain system[J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 175: 108872.
- [6] Li B, Geng Y, Xia X Q, et al. The Impact of Government Subsidies on the Low-Carbon Supply Chain Based on Carbon Emission Reduction Level[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(14): 7603.
- [7] 张子元, 傅端香. 考虑互惠利他偏好和政府补贴的绿色供应链最优决策研究[J]. 工业工程, 2020, 23(5): 149-157.
- [8] Bi G B, Jin M Y, Ling L Y, et al. Environmental subsidy and the choice of green technology in the presence of green consumers[J]. Annals of Operations Research, 2017, 255(1-2): 547-568.
- [9] Li Z M, Pan Y C, Yang W, et al. Effects of government subsidies on green technology investment and green marketing coordination of supply chain under the cap-and-trade mechanism[J]. Energy Economics, 2021, 101: 105426.
- [10] Meng Q F, Li M W, Liu W Y, et al. Pricing policies of dual-channel green supply chain: Considering government subsidies and consumers' dual preferences[J]. Sustainable Production and Consumption, 2021, 26: 1021-1030.
- [11] 邱俊, 杨玉香. 考虑低碳政策和权力结构的低碳供应链减排决策比较研究[J/OL]. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.5946.TP.20230607.1708.014.html>, 2024-03-20.
- [12] 梁喜, 刘莹. 考虑社会责任和政府补贴的双渠道供应链决策与协调[J]. 工业

- 工程, 2022, 25(05): 29-37.
- [13] 尚春燕, 关志民, 米力阳. 考虑双重消费偏好的绿色供应链政府补贴策略分析[J]. 系统工程, 2020, 38(5): 93-102.
- [14] Chen J Y, Dimitrov S, Pun H. The impact of government subsidy on supply chain's sustainability innovation[J]. Omega, 2019, 86: 42-58.
- [15] Che C, Chen Y, Zhang X G, et al. The Impact of Different Government Subsidy Methods on Low-Carbon Emission Reduction Strategies in Dual-Channel Supply Chain[J]. Complexity, 2021, 2021: e6668243.
- [16] Meng Q C, Wang Y T, Zhang Z, et al. Supply chain green innovation subsidy strategy considering consumer heterogeneity[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 281: 125199.
- [17] Yuan X G, Zhang X Q, Zhang D L. Research on the Dynamics Game Model in a Green Supply Chain: Government Subsidy Strategies under the Retailer's Selling Effort Level[J]. Complexity, 2020, 2020: 1-15.
- [18] 陈晓, 孙喜梅. 考虑零售商竞争的绿色供应链补贴策略[J]. 物流技术, 2022, 41(09): 93-98+109.
- [19] 尚文芳, 滕亮亮. 考虑政府补贴和销售努力的零售商主导型绿色供应链博弈策略[J]. 系统工程, 2020, 38(2): 40-50.
- [20] 王道平, 常静雅. 政府补贴下考虑持股合作战略的供应链减排动态协调研究[J/OL]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1250>, 2024-03-20.
- [21] Bian J S, Zhang G Q, Zhou G H. Manufacturer vs. Consumer subsidy with green technology investment and environmental concern[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 287: 832-843.
- [22] Liu Y, Ren W W, Xu Q, et al. Decision analysis of supply chains considering corporate social responsibility and government subsidy under different channel power structures[J]. Annals of Operations Research, 2022, 315: 1841-1869.
- [23] Xiao L, Wang X J, Kwai-Sang Chin, et al. Competitive strategy in remanufacturing and the effects of government subsidy[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2017, 26(04): 417-432.
- [24] 张川, 陈宇潇. 政府补贴下考虑规模效应的动力电池梯次利用闭环供应链决策与协调[J]. 运筹与管理, 2021, 30(12): 72-77+91.
- [25] Buzacott J A, Zhang R Q. Inventory management with asset-based financing[J].

- Management Science, 2004, 50(9): 1274-1292.
- [26] Kouvelis P, Zhao W H. The newsvendor problem and price-only contract when bankruptcy costs exist[J]. Production and Operations Management, 2011, 20(6): 921-936.
- [27] Wu D D, Yang L, Olson D L. Green supply chain management under capital constraint[J]. International Journal of Production Economics, 2019, 215: 3-10.
- [28] 秦娟娟, 李婧. 碳交易机制下资金约束制造商替代产品的最优生产策略研究[J]. 运筹与管理, 2021, 30(5): 88-94.
- [29] 王文利, 甄焯, 张钦红. 面向资金约束供应商的供应链内部融资--股权还是债权?[J]. 管理科学学报, 2020, 8 23(5): 89-101.
- [30] Tang T, Xu H, Ke G Y, et al. Analyzing financing and encroachment strategies for a capital-constrained contract manufacturer[J]. International Journal of Production Economics, 2022, 254: 108638.
- [31] 谭乐平, 宋平, 杨琦峰. 担保换股权下低碳供应链的融资决策均衡[J]. 系统工程, 2021, 39(5): 56-68.
- [32] 张小娟, 王勇. 零售商资金约束的双渠道供应链决策[J]. 控制与决策, 2014, 29(2): 299-306.
- [33] Hang J, Yang W S, Tu Y L. Financing mode decision in a supply chain with financial constraint[J]. International Journal of Production Economics, 2020, 220:107441.
- [34] Lin Q, He J Y. Supply chain contract design considering the supplier's asset structure and capital constraints[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 137:106044.
- [35] 李鑫, 于辉. 零售商投贷联动融资的供应链契约结构分析[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(4): 933-950.
- [36] 张克勇, 李春霞, 姚建明, 等. 零售商采购资金约束下的低碳供应链融资决策研究[J]. 运筹与管理, 2021, 30(8): 108-116.
- [37] Zhuo W, Peng J, Zhen Z, et al. Mixed financing modes for capital-constrained supply chain with risk-averse members[J]. RAIRO-Operations Research, 2022, 56(3): 1223-1258.
- [38] Ding W, Wan G. Financing and coordinating the supply chain with a capital-

- constrained supplier under yield uncertainty[J]. *International Journal of Production Economics*, 2020, 230: 107813.
- [39] Qin J J, Fu H P, Wang Z P, et al. Financing and carbon emission reduction strategies of capital-constrained manufacturers in E-commerce supply chains[J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 241: 108271.
- [40] Peng H, Pang T, Cong J. Coordination contracts for a supply chain with yield uncertainty and low-carbon preference[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 205: 291-302.
- [41] 蔡建湖, 蒋飞颖, 薛婷婷, 等. 产出不确定环境下考虑供货承诺的定价与投入决策模型[J]. *控制与决策*, 2017, 32(9): 1664-1671.
- [42] 张涑贤, 王少峰. 考虑政府补贴和产出不确定的绿色供应链契约分析[J]. *生态经济*, 2020, 36(11): 66-74.
- [43] Zou T J, Zou Q M, Hu L Q. Joint decision of financing and ordering in an emission-dependent supply chain with yield uncertainty[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 152: 106994.
- [44] 林志炳. 考虑产出不确定的供应链绿色制造策略研究[J]. *软科学*, 2021, 35(3): 123-128+144.
- [45] 许民利, 王竟竟, 简惠云. 专利保护与产出不确定下闭环供应链定价与协调[J]. *管理工程学报*, 2021, 35(3): 119-129.
- [46] Maria C. Jansen, Osman Y. Özaltın. Optimal production in a competitive market under yield uncertainty[J]. *Optimization Letters*, 2018, 12(07): 1487-1502.
- [47] 刘家国, 王军进, 周锦霞, 等. 不确定性环境下不同补货策略的供应链契约协调研究[J]. *中国管理科学*, 2019, 27(9): 68-79.
- [48] Li X, Li Y, Cai X Q. Remanufacturing and pricing decisions with random yield and random demand[J]. *Computers & Operations Research*, 2015, 54: 195-203.
- [49] Chen B, Xie W Y, Hang F Y, et al. Collaboration and sharing in a retailer-led supply chain with yield uncertainty and loss aversion[J]. *European Journal of Industrial Engineering*, 2021, 15(03): 381-404.
- [50] Xie L, Ma J H, Goh M. Supply chain coordination in the presence of uncertain yield and demand[J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 59(14): 4342-4358.
- [51] 陈崇萍, 陈志祥. 供应商产出随机与供应中断下的双源采购决策[J]. *中国管*

- 理科学, 2019, 27(6): 113-122.
- [52] Zhao S L, Zhu Q H. Remanufacturing supply chain coordination under the stochastic remanufacturability rate and the random demand[J]. *Annals of Operations Research*, 2017, 257: 661-695.
- [53] Zare M, Esmaceli M, He Y J. Implication of risk-sharing strategies on supply chains with multiple retailers and under random yield[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 216: 413-424.
- [54] 蹇明, 王永龙. 产出不确定性的三级供应链风险分担组合契约设计[J]. *运筹与管理*, 2017, 26(7): 74-81.
- [55] Babich V, 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.
- [56] Risso L A, Ganga G M D, Godinho Filho M, et al. Present and future perspectives of blockchain in supply chain management: a review of reviews and research agenda[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 179: 109195.
- [57] Choi T M. Blockchain-technology-supported platforms for diamond authentication and certification in luxury supply chains[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 128: 17-29.
- [58] Pun H, Swaminathan J M, Hou P. Blockchain Adoption for Combating Deceptive Counterfeits[J]. *Production and Operations Management*, 2021, 30(4): 864-882.
- [59] Niu B, Xu H, Chen L. Creating all-win by blockchain in a remanufacturing supply chain with consumer risk-aversion and quality untrust[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, 163: 102778.
- [60] 谭春桥, 曾雨晴. 基于区块链技术的 O2O 生鲜农产品供应链两阶段定价策略研究[J]. *管理学报*, 2023, 20(6): 904-915.
- [61] Zhang Z, Ren D, Lan Y, et al. Price competition and blockchain adoption in retailing markets[J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 300(2): 647-660.
- [62] 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.
- [63] Xu J, Duan Y. Pricing and greenness investment for green products with government subsidies: When to apply blockchain technology?[J]. Electronic Commerce Research and Applications, 2022, 51: 101108.
- [64] 林强, 刘名武, 邹梓琛. 不同激励契约下嵌入区块链的供应链碳减排与定价决策[J/OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20230410.1458.016.html>, 2024-02-17.
- [65] 梁喜, 胡鑫. 考虑区块链和产品回收的绿色供应链定价决策[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(11): 3851-3868.
- [66] Jiang Y, Liu C. Research on carbon emission reduction and blockchain investment under different dual-channel supply chains[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(43): 65304-65321.
- [67] Li Q, Ma M, Shi T, et al. Green investment in a sustainable supply chain: The role of blockchain and fairness[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 167: 102908.
- [68] Choi T M. Supply chain financing using blockchain: Impacts on supply chains selling fashionable products[J]. Annals of operations research, 2023, 331(1): 393-415.
- [69] 刘露, 李勇建, 姜涛. 基于区块链信用传递功能的供应链融资策略[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(05): 1179-1196.
- [70] 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.
- [71] Xu L, Xie F, Yuan Q, et al. Pricing and carbon footprint in a two-echelon supply chain under cap-and-trade regulation[J]. International Journal of Low-carbon Technologies, 2019: 212-221.
- [72] Sun H, Yang J. Optimal decisions for competitive manufacturers under carbon tax and cap-and-trade policies[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 156, 107244.
- [73] 邢鹏, 周翠萍, 李超君. 考虑政府补贴的绿色供应链创新努力策略研究[J/OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220803.1843.006.html>, 2023-04-02.

- [74] Sarkodie S A, Strezov V. Empirical study of the environmental Kuznets curve and environmental sustainability curve hypothesis for Australia, China, Ghana and USA[J]. *Journal of cleaner production*, 2018, 201: 98-110.
- [75] Lu F, Xu H, Chen P, et al. Joint pricing and production decisions with yield uncertainty and downconversion[J]. *International Journal of Production Economics*, 2018, 197: 52-62.
- [76] Xia T, Wang Y, Lv L, et al. Financing decisions of low-carbon supply chain under chain-to-chain competition[J]. *International Journal of Production Research*, 2022: 1-24.
- [77] 邹清明, 刘春, 邹霆钧. 资金约束下产出不确定的低碳供应链的融资与协调研究[J]. *运筹与管理*, 2022, 31(12): 76-85.
- [78] Jeuland A P, Shugan S M. Managing Channel Profits[J]. *Marketing Science*, 1983, 2(3): 239-272.
- [79] 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(7): 302-314.

附录

3-A

用逆向归纳法求解该 Stackelberg 博弈模型, 对式(3.3)分别 $E[\pi_m^{DF}]$ 求关于 e^{DF} , q^{DF} 的偏函数, 有 $\frac{\partial^2 E[\pi_m^{DF}]}{\partial (q^{DF})^2} = -2b(1+\sigma^2) < 0$, 则 $E[\pi_m^{DF}]$ 是关于 q^{DF} 的凹函数, 令 $\frac{\partial E[\pi_m^{DF}]}{\partial q^{DF}} = 0$, 解得 $q^{DF} = \frac{a + \lambda e^{DF} - \omega^{DF}(1+r)}{2b(1+\sigma^2)}$ 。同理可得 $e^{DF} = \frac{\lambda q^{DF}}{k(1+r)(1-\theta)}$ 。 $E[\pi_m^{DF}]$ 的海瑟矩阵为 $H(e^{DF}, q^{DF}) = \begin{pmatrix} -k(1+r)(1-\theta) & \lambda \\ \lambda & -2b(1+\sigma^2) \end{pmatrix}$ 。因此, $|H(e^{DF}, q^{DF})| = 2bk(1+r)(1-\theta)(1+\sigma^2) - \lambda^2$, 令 $A = 2bk(1+r)(1-\theta)(1+\sigma^2) - \lambda^2$ 。当满足 $|H(e^{DF}, q^{DF})| > 0$ 时, $E[\pi_m^{DF}]$ 是关于 e^{DF} , q^{DF} 的凹函数。 $\frac{\partial E[\pi_m^{DF}(e^{DF}, q^{DF})]}{\partial e^{DF}} = 0$ 和 $\frac{\partial E[\pi_m^{DF}(e^{DF}, q^{DF})]}{\partial q^{DF}} = 0$, 联合解得 $e^{DF*} = \frac{\lambda(a - \omega^{DF}(1+r))}{2A}$, $q^{DF*} = \frac{k(1+r)(1-\theta)(a - \omega^{DF}(1+r))}{2A}$ 。将 e^{DF*} , q^{DF*} 表达式代入式(3.2)并对其求关于 ω^{DF} 的二阶导数, 得到 $\frac{\partial^2 \pi_s^{DF}}{\partial (\omega^{DF})^2} = -\frac{2k(1+r)^2(1-\theta)}{A} < 0$, 故 π_s^{DF} 是 ω^{DF} 的凹函数。令 $\frac{\partial \pi_s^{DF}}{\partial \omega^{DF}} = 0$, 解得 $\omega^{DF*} = \frac{a}{2(1+r)}$ 。随后依次可得到 $e^{DF*} = \frac{a\lambda}{2A}$, $q^{DF*} = \frac{ak(1+r)(1-\theta)}{2A}$, $p^{DF*} = \frac{a(bk(1+r)(1-\theta)(3+4\sigma^2) - \lambda^2)}{2A}$, $E[\pi_m^{DF*}] = \frac{a^2k(1+r)(1-\theta)}{8A}$, $\pi_s^{DF*} = \frac{a^2k(1-\theta)}{4A}$ 。

3-B

(1) 对于消费者低碳偏好系数:

$$\begin{aligned} \frac{\partial e^{DF*}}{\partial \lambda} &= \frac{a(2bk(1+r)(1-\theta)(1+\sigma^2) + \lambda^2)}{2A^2} > 0, & \frac{\partial q^{DF*}}{\partial \lambda} &= \frac{ak\lambda(1+r)(1-\theta)}{A^2} > 0, \\ \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \lambda} &= \frac{abk\lambda(1+r)(1-\theta)(1+2\sigma^2)}{A^2} > 0, & \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \lambda} &= \frac{a^2k\lambda(1+r)(1-\theta)}{4A^2} > 0, \\ \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \lambda} &= \frac{a^2k\lambda(1-\theta)}{2A^2} > 0. \end{aligned}$$

(2) 对于政府补贴:

$$\frac{\partial e^{DF*}}{\partial \theta} = \frac{ak\lambda(1+r)(1+\sigma^2)}{A^2} > 0, \quad \frac{\partial q^{DF*}}{\partial \theta} = \frac{ak\lambda^2(1+r)}{2A^2} > 0,$$

$$\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \theta} = \frac{abk\lambda^2(1+r)(1+2\sigma^2)}{2A^2} > 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \theta} = \frac{a^2k\lambda^2(1+r)}{8A^2} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \theta} = \frac{a^2k\lambda^2}{4A^2} > 0.$$

3-C

$$\frac{\partial e^{DF*}}{\partial \sigma^2} = -\frac{abk\lambda(1+r)(1-\theta)}{A^2} < 0, \quad \frac{\partial q^{DF*}}{\partial \sigma^2} = -\frac{abk^2(1+r)^2(1-\theta)^2}{A^2} < 0,$$

$$\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \sigma^2} = \frac{abk(1+r)(1-\theta)(bk(1+r)(1-\theta)-\lambda^2)}{A^2}, \quad \text{显而易见, } \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \sigma^2} \text{ 的单调性与 } bk(1+r)(1-\theta)-\lambda^2 \text{ 有关。}$$

假设 $f(k) = bk(1+r)(1-\theta)-\lambda^2$, 则令 $f(k)=0$, 解得 $k_1 = \frac{\lambda^2}{b(1+r)(1-\theta)}$ 。接下来进一步与 k^{DF} (由 $E[\pi_m^{DF}]$ 的海瑟矩阵获得) 进行比较

$$\left(k^{DF} = \frac{\lambda^2}{2b(1+r)(1-\theta)(1+\sigma^2)} \right), \quad \text{则 } k^{DF} - k_1 = -\frac{\lambda^2(1+2\sigma^2)}{2b(1+r)(1-\theta)(1+\sigma^2)} < 0. \quad \text{则当}$$

$$k^{DF} < k \leq k_1 \text{ 时, } \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \sigma^2} \leq 0; \text{ 当 } k > k_1 \text{ 时, } \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \sigma^2} > 0. \quad \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \sigma^2} = -\frac{ba^2k^2(1+r)^2(1-\theta)^2}{4A^2} < 0,$$

$$\frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \sigma^2} = -\frac{a^2k^2b(1+r)(1-\theta)^2}{2A^2} < 0.$$

3-D

$$\frac{\partial e^{DF*}}{\partial r} = \frac{abk\lambda(1-\theta)(1+\sigma^2)}{A^2} > 0, \quad \frac{\partial q^{DF*}}{\partial r} = -\frac{ak\lambda^2(1-\theta)}{2A^2} < 0,$$

$$\frac{\partial p^{DF*}}{\partial r} = -\frac{abk\lambda^2(1-\theta)(1+2\sigma^2)}{2A^2} < 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial r} = -\frac{a^2k\lambda^2(1-\theta)}{8A^2} < 0,$$

$$\frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial r} = -\frac{a^2bk^2(1-\theta)^2(1+\sigma^2)}{2A^2} < 0.$$

3-E

用逆向归纳法求解该 Stackelberg 博弈模型, 对式(3.6)分别 $E[\pi_m^{EF}]$ 求关于 e^{EF} ,

q^{EF} 的偏函数, 有 $\frac{\partial^2 E[\pi_m^{EF}]}{\partial (q^{EF})^2} = -2b(1-\eta)(1+\sigma^2) < 0$, 则 $E[\pi_m^{EF}]$ 是关于 q^{EF} 的凹函数,

令 $\frac{\partial E[\pi_m^{EF}]}{\partial q^{EF}} = 0$, 解得 $q^{EF} = \frac{a + \lambda e^{EF} - \omega^{EF}}{2b(1+\sigma^2)}$ 。同理可得 $e^{EF} = \frac{\lambda q^{EF}}{k(1-\theta)}$ 。 $E[\pi_m^{EF}]$ 的海瑟矩

阵 为 $H(e^{EF}, q^{EF}) = \begin{pmatrix} -k(1-\eta)(1-\theta) & (1-\eta)\lambda \\ (1-\eta)\lambda & -2b(1-\eta)(1+\sigma^2) \end{pmatrix}$ 。 因 此 ,

$|H(e^{EF}, q^{EF})| = (1-\eta)^2(2bk(1-\theta)(1+\sigma^2) - \lambda^2)$, 令 $B = 2bk(1-\theta)(1+\sigma^2) - \lambda^2$ 。当满足

$|H(e^{EF}, q^{EF})| > 0$, 即 $B > 0$ 时, $E[\pi_m^{EF}]$ 是关于 e^{EF} , q^{EF} 的凹函数。 $\frac{\partial E[\pi_m^{EF}(e^{EF}, q^{EF})]}{\partial e^{EF}} = 0$

和 $\frac{\partial E[\pi_m^{EF}(e^{EF}, q^{EF})]}{\partial q^{EF}} = 0$ ，联合解得 $e^{EF*} = \frac{\lambda(a - \omega^{EF})}{2B}$ ， $q^{EF*} = \frac{k(1-\theta)(a - \omega^{EF})}{2B}$ 。将 e^{EF*} ， q^{EF*} 表达式代入式(3.5)并对其求关于 ω^{EF} 的二阶导数，得到 $\frac{\partial^2 \pi_s^{EF}}{\partial (\omega^{EF})^2} = -\frac{2k(1-\theta)}{B} < 0$ ，故 π_s^{EF} 是 ω^{EF} 的凹函数。令 $\frac{\partial \pi_s^{EF}}{\partial \omega^{EF}} = 0$ ，解得 $\omega^{EF*} = \frac{a}{2}$ 。随后依次可得到 $e^{EF*} = \frac{a\lambda}{2B}$ ， $q^{EF*} = \frac{ak(1-\theta)}{2B}$ ， $p^{EF*} = \frac{a(bk(1-\theta)(3+4\sigma^2) - \lambda^2)}{2B}$ ， $E[\pi_m^{EF*}] = \frac{a^2k(1-\theta)(1-\eta)}{8B}$ ， $\pi_s^{EF*} = \frac{a^2k(1-\theta)}{4B}$ 。

3-F

(1) 对于消费者低碳偏好系数：

$$\begin{aligned} \frac{\partial e^{EF*}}{\partial \lambda} &= \frac{a(2bk(1-\theta)(1+\sigma^2) + \lambda^2)}{2B^2} > 0, & \frac{\partial q^{EF*}}{\partial \lambda} &= \frac{ak\lambda(1-\theta)}{B^2} > 0, \\ \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \lambda} &= \frac{abk\lambda(1-\theta)(1+2\sigma^2)}{A^2} > 0, & \frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \lambda} &= \frac{a^2k\lambda(1-\eta)(1-\theta)}{4B^2} > 0, \\ \frac{\partial \pi_s^{EF*}}{\partial \lambda} &= \frac{a^2k\lambda(1-\theta)}{2B^2} > 0. \end{aligned}$$

(2) 对于政府补贴：

$$\begin{aligned} \frac{\partial e^{EF*}}{\partial \theta} &= \frac{abk\lambda(1+\sigma^2)}{B^2} > 0, & \frac{\partial q^{EF*}}{\partial \theta} &= \frac{ak\lambda^2}{2B^2} > 0, & \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \theta} &= \frac{abk\lambda^2(1+2\sigma^2)}{2B^2} > 0, \\ \frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \theta} &= \frac{a^2k\lambda^2(1-\eta)}{8B^2} > 0, & \frac{\partial \pi_s^{EF*}}{\partial \theta} &= \frac{a^2k\lambda^2}{4B^2} > 0. \end{aligned}$$

3-G

(1) 对于产出不确定性：

$$\begin{aligned} \frac{\partial e^{EF*}}{\partial \sigma^2} &= -\frac{abk\lambda(1-\alpha)(1-\theta)}{B^2} < 0, & \frac{\partial q^{EF*}}{\partial \sigma^2} &= -\frac{abk^2(1-\alpha)(1-\theta)^2}{B^2} < 0, \\ \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \sigma^2} &= \frac{abk(1-\alpha)(1-\theta)(bk(1-\theta) - \lambda^2)}{B^2}, \text{ 显而易见, 假设 } f(k) = bk(1-\theta) - \lambda^2, \text{ 则令 } \\ f(k) &= 0, \text{ 解得 } \bar{k}_2 = \frac{\lambda^2}{b(1-\theta)}. \text{ 则 } k^{EF} - \bar{k}_2 = -\frac{\lambda^2(2(1-\alpha)(1+\sigma^2) - 1)}{2b(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2)}. \text{ 可以看到与 } \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \sigma^2} \\ \text{的求解类似, 则 } k^{EF} &< \bar{k}_2, \text{ 进一步地, 对于 } k^{EF} < k \leq \bar{k}_2, \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \sigma^2} \leq 0; \text{ 或者 } k > \bar{k}_2, \\ \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \sigma^2} &> 0. \frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \sigma^2} &= -\frac{ba^2k^2(1-\theta)^2(1-\alpha)(1-\eta)}{4B^2} < 0, & \frac{\partial \pi_s^{EF*}}{\partial \sigma^2} &= -\frac{a^2k^2b(1-\alpha)(1-\theta)^2}{2B^2} < 0. \end{aligned}$$

3-H

用逆向归纳法求解该 Stackelberg 博弈模型, 对式(3.9)分别 $E[\pi_m^{IF}]$ 求关于 e^{IF} , q^{IF} 的偏函数, 有 $\frac{\partial^2 E[\pi_m^{IF}]}{\partial (q^{IF})^2} = -2b(1-\eta)(1+\sigma^2) < 0$, 则 $E[\pi_m^{IF}]$ 是关于 q^{IF} 的凹函数, 令 $\frac{\partial E[\pi_m^{IF}]}{\partial q^{IF}} = 0$, 解得 $q^{IF} = \frac{a + \lambda e^{IF} - \omega^{DF}(1+r)(1-\mu)}{2b(1+\sigma^2)}$ 。同理可得 $e^{IF} = \frac{\lambda q^{IF}}{k(1+r)(1-\theta)(1-\mu)}$ 。

$E[\pi_m^{IF}]$ 的海瑟矩阵为 $H(e^{IF}, q^{IF}) = \begin{pmatrix} -k(1+r)(1-\mu)(1-\eta)(1-\theta) & (1-\eta)\lambda \\ (1-\eta)\lambda & -2b(1-\eta)(1+\sigma^2) \end{pmatrix}$ 。

因此, $|H(e^{IF}, q^{IF})| = (1-\eta)^2(2bk(1+r)(1-\mu)(1-\theta)(1+\sigma^2) - \lambda^2)$, 令 $C = 2bk(1+r)(1-\mu)(1-\theta)(1+\sigma^2) - \lambda^2$ 。当满足 $|H(e^{IF}, q^{IF})| > 0$ 时, $E[\pi_m^{IF}]$ 是关于 e^{IF} , q^{IF} 的凹函数。 $\frac{\partial E[\pi_m^{IF}(e^{IF}, q^{IF})]}{\partial e^{IF}} = 0$ 和 $\frac{\partial E[\pi_m^{IF}(e^{IF}, q^{IF})]}{\partial q^{IF}} = 0$, 联合解得 $e^{IF*} = \frac{\lambda(a - \omega^{DF}(1+r)(1-\mu))}{2C}$, $q^{IF*} = \frac{k(1+r)(1-\theta)(1-\mu)(a - \omega^{DF}(1+r)(1-\mu))}{2C}$ 。将 e^{IF*} , q^{IF*} 表达式代入式 (3.8) 并对其求关于 ω^{IF} 的二阶导数, 得到 $\frac{\partial^2 \pi_s^{IF}}{\partial (\omega^{IF})^2} = -\frac{2k(1+r)^2(1-\mu)^2(1-\theta)}{C} < 0$, 故 π_s^{IF} 是 ω^{IF} 的凹函数。令 $\frac{\partial \pi_s^{IF}}{\partial \omega^{IF}} = 0$, 解得 $\omega^{IF*} = \frac{a}{2(1+r)(1-\mu)}$ 。随后依次可得到 $e^{IF*} = \frac{a\lambda}{2C}$, $q^{IF*} = \frac{ak(1-\mu)(1-\theta)(1+r)}{2C}$, $p^{IF*} = \frac{a(bk(1+r)(1-\mu)(1-\theta)(3+4\sigma^2) - \lambda^2)}{2C}$, $E[\pi_m^{IF*}] = \frac{a^2k(1-\theta)(1+r)(1-\mu)(1-\eta)}{8C}$, $\pi_s^{IF*} = \frac{a^2k(1-\theta)}{4C}$ 。

3-I

(1) 对于消费者低碳偏好系数:

$$\begin{aligned} \frac{\partial e^{IF*}}{\partial \lambda} &= \frac{a(2bk(1+r)(1-\theta)(1-\mu)(1+\sigma^2) + \lambda^2)}{2C^2} > 0, \quad \frac{\partial q^{IF*}}{\partial \lambda} = \frac{ak\lambda(1+r)(1-\mu)(1-\theta)}{C^2} > 0, \\ \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \lambda} &= \frac{abk\lambda(1+r)(1-\mu)(1-\theta)(1+2\sigma^2)}{C^2} > 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \lambda} = \frac{a^2k\lambda(1+r)(1-\mu)(1-\eta)(1-\theta)}{4C^2} > 0, \\ \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \lambda} &= \frac{a^2k\lambda(1-\theta)}{2C^2} > 0. \end{aligned}$$

(2) 对于政府补贴:

$$\begin{aligned}\frac{\partial e^{IF*}}{\partial \theta} &= \frac{abk\lambda(1+r)(1-\mu)(1+\sigma^2)}{C^2} > 0, & \frac{\partial q^{IF*}}{\partial \theta} &= \frac{ak\lambda^2(1+r)(1-\mu)}{2C^2} > 0, \\ \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \theta} &= \frac{abk\lambda^2(1+r)(1-\mu)(1+2\sigma^2)}{2C^2} > 0, & \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \theta} &= \frac{a^2k\lambda^2(1+r)(1-\mu)(1-\eta)}{8C^2} > 0, \\ \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \theta} &= \frac{a^2k\lambda^2}{4C^2} > 0.\end{aligned}$$

3-J

$$\begin{aligned}\frac{\partial e^{IF*}}{\partial \sigma^2} &= -\frac{abk\lambda(1+r)(1-\mu)(1-\theta)}{C^2} < 0, & \frac{\partial q^{IF*}}{\partial \sigma^2} &= -\frac{abk^2(1+r)^2(1-\mu)^2(1-\theta)^2}{C^2} < 0, \\ \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \sigma^2} &= \frac{abk(1+r)(1-\mu)(1-\theta)(bk(1+r)(1-\mu)(1-\theta)-\lambda^2)}{C^2},\end{aligned}$$

显而易见，假设 $f(k) = bk(1+r)(1-\mu)(1-\theta) - \lambda^2$ ，则令 $f(k) = 0$ ，解得 $k_3 = \frac{\lambda^2}{b(1+r)(1-\mu)(1-\theta)}$ 。则

$$k^{IF} - k_3 = \frac{\lambda^2(2(1-\alpha)(1+\sigma^2)-1)}{2b(1+r)(1-\alpha)(1-\mu)(1-\theta)(1+\sigma^2)}, \text{ 则 } k^{IF} < k_3. \text{ 进一步地, 对于 } k^{IF} < k \leq k_3,$$

$$\frac{\partial p^{IF*}}{\partial \sigma^2} \leq 0; \text{ 或者 } k > k_3, \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \sigma^2} > 0. \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \sigma^2} = -\frac{ba^2k^2(1+r)^2(1-\mu)^2(1-\theta)^2(1-\eta)}{4C^2} < 0,$$

$$\frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \sigma^2} = -\frac{a^2k^2b(1+r)(1-\mu)(1-\theta)^2}{2C^2} < 0.$$

3-K

$$\begin{aligned}\frac{\partial e^{IF*}}{\partial r} &= -\frac{abk\lambda(1-\mu)(1-\theta)(1+\sigma^2)}{C^2} < 0, & \frac{\partial q^{IF*}}{\partial r} &= -\frac{ak\lambda^2(1-\mu)(1-\theta)}{2C^2} < 0, \\ \frac{\partial p^{IF*}}{\partial r} &= -\frac{abk\lambda^2(1-\mu)(1-\theta)(1+2\sigma^2)}{2C^2} < 0, & \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial r} &= -\frac{a^2k\lambda^2(1-\theta)(1-\mu)(1-\eta)}{8C^2} < 0, \\ \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial r} &= -\frac{a^2bk^2(1-\mu)(1-\theta)^2(1+\sigma^2)}{2C^2} < 0.\end{aligned}$$

3-L

由命题 3.1—3.3 条件可知：

$$\frac{e^{DF*}}{e^{EF*}} = \frac{B}{A} < 1, \quad \frac{e^{DF*}}{e^{IF*}} = \frac{C}{A} < 1, \quad \frac{e^{IF*}}{e^{EF*}} = \frac{B}{C}, \quad B - C = 2bk(1-\theta)(1+\sigma^2)(\mu - r(1-\mu)).$$

显而易见， $B - C$ 大小与 $\mu - r(1-\mu)$ 大小有关，故假设 $f(\mu) = \mu - r(1-\mu)$ 。令 $f(\mu) = 0$ ，

可得： $\bar{\mu} = \frac{r}{1+r}$ ，且 $0 < \bar{\mu} < 1$ 。因此，当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时， $B \leq C$ ，则 $\frac{e^{IF*}}{e^{EF*}} \leq 1$ ；当 $\bar{\mu} < \mu < 1$

时， $B > C$ ，则 $\frac{e^{IF*}}{e^{EF*}} > 1$ 。综上：当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时， $e^{DF*} < e^{IF*} \leq e^{EF*}$ ；当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时，

$$e^{DF*} < e^{EF*} < e^{IF*}.$$

$$\frac{q^{DF*}}{q^{EF*}} = \frac{(1+r)B}{A} < 1, \quad \frac{q^{DF*}}{q^{IF*}} = \frac{C}{(1-\mu)A} < 1, \quad \frac{q^{IF*}}{q^{EF*}} = \frac{(1+r)(1-\mu)B}{C},$$

$(1+r)(1-\mu)B - C = (\mu - r(1-\mu))\lambda^2$ 。同理可得，当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时， $(1+r)(1-\mu)B \leq C$ ，则

$\frac{q^{IF*}}{q^{EF*}} \leq 1$ ；当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时， $(1+r)(1-\mu)B > C$ ，则 $\frac{q^{IF*}}{q^{EF*}} > 1$ 。综上：当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时，

$q^{DF*} < q^{IF*} \leq q^{EF*}$ ；当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时， $q^{DF*} < q^{EF*} < q^{IF*}$ 。

$$p^{DF*} - p^{EF*} = -\frac{abkr\lambda^2(1-\theta)(1+2\sigma^2)}{2AB} < 0, \quad p^{DF*} - p^{IF*} = -\frac{abk\mu\lambda^2(1+r)(1-\theta)(1+2\sigma^2)}{2BC} < 0,$$

$p^{IF*} - p^{EF*} = -\frac{abk\lambda^2(1-\theta)(\mu - r(1-\mu))(1+2\sigma^2)}{2AB}$ ，结合之前的证明可知，当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$

时， $p^{IF*} - p^{EF*} \leq 0$ ；当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时， $p^{IF*} - p^{EF*} > 0$ 。综上可知：当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时，

$p^{DF*} < p^{IF*} \leq p^{EF*}$ ；当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时， $p^{DF*} < p^{EF*} < p^{IF*}$ 。

3-M

(1) 比较三个模型下制造商期望利润大小：

$$E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{EF*}] = \frac{a^2k(1-\theta)(2bk(1+r)\eta(1-\theta)(1+\sigma^2) - (r+\eta)\lambda^2)}{8AB}, \text{ 显而易见,}$$

$E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{EF*}]$ 的取值与 $2bk\eta(1+r)(1-\theta)(1+\sigma^2) - (r+\eta)\lambda^2$ 的取值有关，则设

$f(\sigma^2) = 2bk\eta(1+r)(1-\theta)(1+\sigma^2) - (r+\eta)\lambda^2$ ，令 $f(\sigma^2) = 0$ ，解得：

$$\sigma_1^2 = \frac{2bk\eta(1+r)(1-\theta) - (r+\eta)\lambda^2}{-2bk\eta(1+r)(1-\theta)}。进一步地，假设 $g(k) = 2bk\eta(1+r)(1-\theta) - (r+\eta)\lambda^2$ ，$$

可得到： $k_4 = \frac{(r+\eta)\lambda^2}{2b\eta(1+r)(1-\theta)}$ ，且 $k_4 > k^{DF}$ 。所以，当 $k^{DF} < k < k_4$ 时， $\sigma_1^2 > 0$ 且

$\sigma_1^2 > (\sigma^2)^{DF}$ 。因此，在 $k^{DF} < k < k_4$ 条件下，若 $(\sigma^2)^{DF} < \sigma^2 \leq \sigma_1^2$ ，则

$E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{EF*}] \leq 0$ ；若 $\sigma^2 > \sigma_1^2$ ，则 $E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{EF*}] > 0$ 。当 $k \geq k_4$ 时， $g(k) \geq 0$ ，

而 $f(\sigma^2) = 2bk\eta(1+r)(1-\theta)\sigma^2 + g(k)$ ，则 $f(\sigma^2) > 0$ 恒成立，故 $E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{EF*}] > 0$ 。

$$E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{IF*}] = \frac{a^2k(1+r)(1-\theta)(2bk(1+r)(1-\mu)\eta(1-\theta)(1+\sigma^2) - (\mu+\eta(1-\mu))\lambda^2)}{8AC},$$

同理可得 $\sigma_2^2 = \frac{-2bk\eta(1+r)(1-\mu)(1-\theta) + (\mu(1-\eta) + \eta)\lambda^2}{2bk\eta(1+r)(1-\mu)(1-\theta)}$ 。进一步地，假设

$$g(k) = -2bk\eta(1+r)(1-\mu)(1-\theta) + (\mu(1-\eta) + \eta)\lambda^2, \text{ 可得到: } k_5 = \frac{(\mu(1-\eta) + \eta)\lambda^2}{2b\eta(1+r)(1-\theta)(1-\mu)},$$

且 $k_5 > k^{IF}$ 。所以，当 $k^{IF} < k < k_5$ 时， $\sigma_2^2 > 0$ ；同理， $\sigma_2^2 > (\sigma^2)^{IF}$ 。因此，在 $k^{IF} < k < k_5$

条件下，若 $(\sigma^2)^{IF} < \sigma^2 \leq \sigma_2^2$ ，则 $E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{IF*}] \leq 0$ ；若 $\sigma^2 > \sigma_2^2$ ，则 $E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{IF*}] > 0$ 。当 $k \geq k_5$ 时， $E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{IF*}] \geq 0$ 。

$$E[\pi_m^{IF*}] - E[\pi_m^{EF*}] = \frac{a^2 k \lambda^2 (1-\theta)(\mu-r(1-\mu))(1-\eta)}{8BC}, \text{ 显而易见, } E[\pi_m^{IF*}] - E[\pi_m^{EF*}] \text{ 的}$$

取值只受到 $\mu-r(1-\mu)$ 的影响。根据之前所求，当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时， $E[\pi_m^{IF*}] - E[\pi_m^{EF*}] \leq 0$ ；当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时， $E[\pi_m^{IF*}] - E[\pi_m^{EF*}] > 0$ 。

(2) 比较三个模型下供应商利润大小：

$$\pi_s^{DF*} - \pi_s^{EF*} = -\frac{bra^2 k^2 (1+\sigma^2)(1-\theta)^2}{2AB} < 0, \quad \pi_s^{DF*} - \pi_s^{IF*} = -\frac{b\mu a^2 k^2 (1+r)(1+\sigma^2)(1-\theta)^2}{2AC} < 0,$$

$$\pi_s^{IF*} - \pi_s^{EF*} = -\frac{ba^2 k^2 (1+\sigma^2)(1-\theta)^2 (\mu-r(1-\mu))}{2BC}, \text{ 显然, } \pi_s^{IF*} - \pi_s^{EF*} \text{ 取值只受 } \mu-r(1-\mu) \text{ 的}$$

影响。因此，当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时， $\pi_s^{IF*} - \pi_s^{EF*} \leq 0$ ；当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时， $\pi_s^{IF*} - \pi_s^{EF*} > 0$ 。综上：

当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时， $\pi_s^{DF*} < \pi_s^{IF*} \leq \pi_s^{EF*}$ ；当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时， $\pi_s^{DF*} < \pi_s^{EF*} < \pi_s^{IF*}$ 。

4-A

对式(4.3)求 $E[\pi_m^{DF}]$ 关于 e^{DF} ， q_t^{DF} ， q_d^{DF} 的偏函数，有 $\frac{\partial^2 E[\pi_m^{DF}]}{\partial (q_t^{DF})^2} = -2b(1+\sigma^2) < 0$ ，

则 $E[\pi_m^{DF}]$ 是关于 q_t^{DF} 的凹函数，令 $\frac{\partial E[\pi_m^{DF}]}{\partial q_t^{DF}} = 0$ ，解得

$$q_t^{DF} = \frac{a + \lambda e^{DF} - \omega^{DF}(1+r) - 2dq_d^{DF}}{2b(1+\sigma^2)}。 \text{ 同理可得 } q_d^{DF} = \frac{a - \omega^{DF}(1+r) - 2dq_t^{DF}}{2b},$$

$e^{DF} = \frac{\lambda q_t^{DF}}{k(1+r)(1-\theta)}$ 。 $E[\pi_m^{DF}]$ 的海瑟矩阵为

$$H(e^{DF}, q_t^{DF}, q_d^{DF}) = \begin{pmatrix} -k(1+r)(1-\theta) & \lambda & 0 \\ \lambda & -2b(1+\sigma^2) & -2d \\ 0 & -2d & -2b \end{pmatrix}。 \text{ 因此, } H(e^{DF}, q_t^{DF}, q_d^{DF}) \text{ 的一阶}$$

顺序主子式为 $H_1 = -k(1+r)(1-\theta) < 0$ ，二阶顺序主子式为

$H_2 = 2bk(1+\sigma^2)(1+r)(1-\theta) - \lambda^2$ ，三阶顺序主子式为

$H_3 = 4k(1+r)(1-\theta)(d^2 - b^2(1+\sigma^2)) + 2b\lambda^2$ 。当满足 $H_2 > 0$ 且 $H_3 < 0$ 时， $E[\pi_m^{DF}]$ 是关于

e^{DF} ， q_t^{DF} ， q_d^{DF} 的凹函数。令 $\frac{\partial E[\pi_m^{DF}(q_t^{DF}, q_d^{DF}, e^{DF})]}{\partial e^{DF}} = 0$ 、 $\frac{\partial E[\pi_m^{DF}(q_t^{DF}, q_d^{DF}, e^{DF})]}{\partial q_t^{DF}} = 0$ 和

$$\frac{\partial E[\pi_m^{DF}(q_t^{DF}, q_d^{DF}, e^{DF})]}{\partial q_d^{DF}} = 0, \text{ 联合解得 } e^{DF} = \frac{\lambda(b-d)(a - \omega^{DF}(1+r))}{2k(1+r)(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2) - d^2) - b\lambda^2},$$

$$q_t^{DF} = \frac{k(1+r)(b-d)(1-\theta)(a-\omega^{DF}(1+r))}{2k(1+r)(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)-b\lambda^2}, \quad q_d^{DF} = \frac{(2k(1+r)(b(1+\sigma^2)-d)(1-\theta)-\lambda^2)(a-\omega^{DF}(1+r))}{2k(1+r)(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)-b\lambda^2}.$$

将 e^{DF} , q_t^{DF} , q_d^{DF} 表达式代入式(4.2)并对其求关于 ω^{DF} 的二阶导数, 得到

$$\frac{\partial^2 \pi_s^{DF}}{\partial (\omega^{DF})^2} = \frac{k(1+r)(\lambda^2 - 2k(1+r)(1-\theta)(b(2+\sigma^2)-2d))}{2k(1+r)(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)-b\lambda^2} < 0, \text{ 故 } \pi_s^{DF} \text{ 是 } \omega^{DF} \text{ 的凹函数。令}$$

$$\frac{\partial \pi_s^{DF}}{\partial \omega^{DF}} = 0, \text{ 解得 } \omega^{DF*} = \frac{a}{2(1+r)}, \text{ 并令 } A = 2k(1+r)(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)-b\lambda^2 > 0,$$

$$B = 2k(1+r)(1-\theta)(b(1+\sigma^2)-d)-\lambda^2 > 0, \quad C = 2k(1+r)(1-\theta)(b(3b+(4b-d)\sigma^2)-3d^2)-(2b+d)\lambda^2 > 0,$$

$$D = 2k(1+r)(1-\theta)(b(2+\sigma^2)-2d)-\lambda^2 > 0. \text{ 随后依次可得到 } e^{DF*} = \frac{a\lambda(b-d)}{2A},$$

$$q_t^{DF*} = \frac{ak(1+r)(b-d)(1-\theta)}{2A}, \quad q_d^{DF*} = \frac{aB}{4A}, \quad p_t^{DF*} = \frac{aC}{4A}, \quad p_d^{DF*} = \frac{3a}{4}, \quad E[\pi_m^{DF*}] = \frac{a^2 D}{16A},$$

$$\pi_s^{DF*} = \frac{a^2 D}{8(1+r)A}.$$

4-B

(1) 对于消费者低碳偏好系数:

$$\begin{aligned} \frac{\partial e^{DF*}}{\partial \lambda} &= \frac{a(b-d)(2k(1+r)(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)+b\lambda^2)}{2A^2} > 0, \\ \frac{\partial q_t^{DF*}}{\partial \lambda} &= \frac{abk\lambda(b-d)(1+r)(1-\theta)}{A^2} > 0, \quad \frac{\partial q_d^{DF*}}{\partial \lambda} = -\frac{2adk\lambda(b-d)(1+r)(1-\theta)}{A^2} < 0, \\ \frac{\partial p_t^{DF*}}{\partial \lambda} &= \frac{ak\lambda(b-d)(1+r)(1-\theta)(b^2(1+2\sigma^2)-d^2)}{A^2} > 0, \quad \frac{\partial p_d^{DF*}}{\partial \lambda} = 0, \\ \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \lambda} &= \frac{a^2 k\lambda(b-d)^2(1+r)(1-\theta)}{A^2} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \lambda} = \frac{a^2 k\lambda(b-d)(1-\theta)}{2A^2} > 0. \end{aligned}$$

(2) 对于政府补贴:

$$\begin{aligned} \frac{\partial e^{DF*}}{\partial \theta} &= \frac{ak\lambda(b-d)(1+r)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)}{A^2} > 0, \quad \frac{\partial q_t^{DF*}}{\partial \theta} = \frac{abk\lambda^2(b-d)(1+r)}{2A^2} > 0, \\ \frac{\partial q_d^{DF*}}{\partial \theta} &= -\frac{adk\lambda^2(b-d)(1+r)}{2A^2} < 0, \quad \frac{\partial p_t^{DF*}}{\partial \theta} = \frac{ak\lambda^2(b-d)(1+r)(b^2(1+2\sigma^2)-d^2)}{2A^2} > 0, \\ \frac{\partial p_d^{DF*}}{\partial \theta} &= 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \theta} = \frac{a^2 k\lambda^2(b-d)^2(1+r)}{8A^2} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \theta} = \frac{a^2 k\lambda^2(b-d)}{4A^2} > 0 \end{aligned}$$

4-C

$$\frac{\partial e^{DF*}}{\partial \sigma^2} = -\frac{ab^2 k\lambda(b-d)(1+r)(1-\theta)}{A^2} < 0, \quad \frac{\partial q_t^{DF*}}{\partial \sigma^2} = -\frac{ab^2 k^2(b-d)(1+r)^2(1-\theta)^2}{A^2} < 0,$$

$$\frac{\partial q_d^{DF*}}{\partial \sigma^2} = \frac{abdk^2(b-d)(1+r)^2(1-\theta)^2}{A^2} > 0, \quad \frac{\partial p_t^{DF*}}{\partial \sigma^2} = \frac{abk(b-d)(1+r)(1-\theta)(k(b^2-d^2)(1+r)(1-\theta)-b\lambda^2)}{A^2},$$

设 $f(k) = k(b^2 - d^2)(1+r)(1-\theta) - b\lambda^2$ ，由此可见 $f(k)$ 是一次函数，且单调递增。令

$$f(k) = 0, \quad \text{解得: } \bar{k}^{DF} = \frac{b\lambda^2}{(1+r)(1-\theta)(b^2-d^2)}, \quad \text{且 } \underline{k}^{DF} < k < \bar{k}^{DF}, \quad \text{其中}$$

$$\underline{k}^{DF} = \frac{b\lambda^2}{2(1+r)(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)}。 \text{则当 } \underline{k}^{DF} < k \leq \bar{k}^{DF} \text{ 时, } f(k) \leq 0 \left(\frac{\partial p_t^{DF*}}{\partial \sigma^2} \leq 0 \right); \text{ 当}$$

$$k > \bar{k}^{DF} \text{ 时, } f(k) > 0 \left(\frac{\partial p_t^{DF*}}{\partial \sigma^2} > 0 \right)。 \frac{\partial p_d^{DF*}}{\partial \sigma^2} = 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \sigma^2} = -\frac{a^2 k^2 b(b-d)^2(1+r)^2(1-\theta)^2}{4A^2} < 0,$$

$$\frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \sigma^2} = -\frac{a^2 k^2 b(b-d)^2(1+r)(1-\theta)}{2A^2} < 0。$$

4-D

$$\frac{\partial e^{DF*}}{\partial r} = -\frac{ak\lambda(b-d)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)}{A^2} < 0, \quad \frac{\partial q_t^{DF*}}{\partial r} = -\frac{abk\lambda^2(b-d)(1-\theta)}{2A^2} < 0,$$

$$\frac{\partial q_d^{DF*}}{\partial r} = \frac{adk\lambda^2(b-d)(1-\theta)}{2A^2} > 0, \quad \frac{\partial p_t^{DF*}}{\partial r} = -\frac{ak\lambda^2(b-d)(1-\theta)(b^2(1+2\sigma^2)-d^2)}{2A^2} < 0,$$

$$\frac{\partial p_d^{DF*}}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial r} = -\frac{a^2 k\lambda^2(b-d)^2(1-\theta)}{8A^2} < 0,$$

$$\frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial r} = \frac{a^2(-4k^2(1+r)^2(1-\theta)^2(b^2(1+\sigma^2)-d^2)(b(2+\sigma^2)-2d)+\lambda^2(4k(1-\theta)(1+r)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)-b\lambda^2))}{8(1+r)^2 A^2}$$

设 $f(r) = -4k^2 r^2(1-\theta)^2(b^2(1+\sigma^2)-d^2)(b(2+\sigma^2)-2d) - 4kr(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)(2k(1-\theta)(b(2+\sigma^2)-2d)-\lambda^2) - 4k^2(1-\theta)^2(b^2(1+\sigma^2)-d^2)(b(2+\sigma^2)-2d) + \lambda^2(4k(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)-b\lambda^2)$ ， $f(r)$ 是一元二次函数，且开口向下。则

$$\Delta = -16a^2 k^2 \lambda^4 (b-d)^2 (1-\theta)^2 (b^2(1+\sigma^2)-d^2) < 0, \quad \text{因此 } f(r) < 0 \text{ 恒成立, 故 } \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial r} < 0。$$

4-E

对式 (4.6) 求 $E[\pi_m^{EF}]$ 关于 q_t^{EF} ， q_d^{EF} ， e^{EF} 的二阶导数，有

$$\frac{\partial^2 E[\pi_m^{EF}]}{\partial (q_t^{EF})^2} = -2b(1-\eta)(1+\sigma^2) < 0, \quad \text{则 } E[\pi_m^{EF}] \text{ 是关于 } q_t^{EF} \text{ 的凹函数, 令 } \frac{\partial E[\pi_m^{EF}]}{\partial q_t^{EF}} = 0, \text{ 解}$$

$$\text{得 } q_t^{EF} = \frac{a + \lambda e^{EF} - \omega^{EF} - 2dq_d^{EF}}{2b(1+\sigma^2)}。 \text{同理可得 } q_d^{EF} = \frac{a - \omega^{EF} - 2dq_t^{EF}}{2b}, \quad e^{EF} = \frac{\lambda q_t^{EF}}{k(1-\theta)}。 E[\pi_m^{EF}]$$

$$\text{的海瑟矩阵为 } H(e^{EF}, q_t^{EF}, q_d^{EF}) = \begin{pmatrix} -k(1-\eta)(1-\theta) & (1-\eta)\lambda & 0 \\ (1-\eta)\lambda & -2b(1-\eta)(1+\sigma^2) & -2d(1-\eta) \\ 0 & -2d(1-\eta) & -2b(1-\eta) \end{pmatrix}。 \text{因此,}$$

$H(e^{EF}, q_t^{EF}, q_d^{EF})$ 的一阶顺序主子式为 $H_1 = -K(1-\eta)(1-\theta) < 0$ ，二阶顺序主子式为 $H_2 = (1-\eta)^2(2bk(1+\sigma^2)(1-\theta) - \lambda^2)$ ，三阶顺序主子式为 $H_3 = (1-\eta)^3(4k(1-\theta)(d^2 - b^2(1+\sigma^2)) + 2b\lambda^2)$ 。当满足 $H_2 > 0$ 且 $H_3 < 0$ 时， $E[\pi_m^{EF}]$ 关于 q_t^{EF} ， q_d^{EF} ， e^{EF} 的凹函数。令 $\frac{\partial E[\pi_m^{EF}(e^{EF}, q_t^{EF}, q_d^{EF})]}{\partial q_t^{EF}} = 0$ ， $\frac{\partial E[\pi_m^{EF}(e^{EF}, q_t^{EF}, q_d^{EF})]}{\partial q_d^{EF}} = 0$ 和

$$\frac{\partial E[\pi_m^{EF}(e^{EF}, q_t^{EF}, q_d^{EF})]}{\partial e^{EF}} = 0, \quad \text{联合解得 } e^{EF} = \frac{\lambda(b-d)(a-\omega^{EF})}{2k(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)-b\lambda^2},$$

$$q_t^{EF} = \frac{k(b-d)(1-\theta)(a-\omega^{EF})}{2k(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)-b\lambda^2}, \quad q_d^{EF} = \frac{(2k(b(1+\sigma^2)-d)(1-\theta)-\lambda^2)(a-\omega^{EF})}{2k(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)-b\lambda^2}.$$

将 q_t^{EF} ， q_d^{EF} ， e^{EF} 表达式代入式(4.5)并对其求关于 ω^{EF} 的二阶导数，得到

$$\frac{\partial^2 \pi_s^{EF}}{(\omega^{EF})^2} = \frac{k(\lambda^2 - 2k(1-\theta)(b(2+\sigma^2)-2d))}{2k(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)-b\lambda^2} < 0, \quad \text{故 } \pi_s^{EF} \text{ 是 } \omega^{EF} \text{ 的凹函数。令 } \frac{\partial \pi_s^{EF}}{\partial \omega^{EF}} = 0,$$

解得 $\omega^{EF*} = \frac{a}{2}$ ，并令 $D = 2k(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)-b\lambda^2$ ， $E = 2k(1-\theta)(b(1+\sigma^2)-d)-\lambda^2$ ，

$F = 2k(1-\theta)(b(3b+(4b-d)\sigma^2)-3d^2)-(2b+d)\lambda^2$ ， $G = 2k(1-\theta)(b(2+\sigma^2)-2d)-\lambda^2$ 。随

后依次可得到 $e^{EF*} = \frac{a\lambda(b-d)}{2E}$ ， $q_t^{EF*} = \frac{ak(b-d)(1-\theta)}{2E}$ ， $q_d^{EF*} = \frac{aF}{4E}$ ，同时可得 $p_t^{EF*} = \frac{aG}{4E}$ ，

$$p_d^{EF*} = \frac{3a}{4}, \quad E[\pi_m^{EF*}] = \frac{a^2(1-\eta)H}{16E}, \quad \pi_s^{EF*} = \frac{a^2H}{8E}.$$

4-F

(1) 对于消费者低碳偏好系数：

$$\frac{\partial e^{EF*}}{\partial \lambda} = \frac{a(b-d)(2k(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)+b\lambda^2)}{2E^2} > 0, \quad \frac{\partial q_t^{EF*}}{\partial \lambda} = \frac{abk\lambda(b-d)(1-\theta)}{E^2} > 0,$$

$$\frac{\partial q_d^{EF*}}{\partial \lambda} = -\frac{adk\lambda(b-d)(1-\theta)}{E^2} < 0, \quad \frac{\partial p_t^{EF*}}{\partial \lambda} = \frac{ak\lambda(b-d)(1-\theta)(b^2(1+2\sigma^2)-d^2)}{E^2} > 0, \quad \frac{\partial p_d^{EF*}}{\partial \lambda} = 0,$$

$$\frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \lambda} = \frac{a^2k\lambda(b-d)^2(1-\eta)(1-\theta)}{E^2} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{EF*}}{\partial \lambda} = \frac{a^2k\lambda(b-d)(1-\theta)}{2E^2} > 0.$$

(2) 对于政府补贴：

$$\frac{\partial e^{EF*}}{\partial \theta} = \frac{ak\lambda(b-d)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)}{E^2} > 0, \quad \frac{\partial q_t^{EF*}}{\partial \theta} = \frac{abk\lambda^2(b-d)}{2E^2} > 0,$$

$$\frac{\partial q_d^{EF*}}{\partial \theta} = -\frac{adk\lambda^2(b-d)}{2E^2} < 0, \quad \frac{\partial p_t^{EF*}}{\partial \theta} = \frac{ak\lambda^2(b-d)(b^2(1+2\sigma^2)-d^2)}{2E^2} > 0, \quad \frac{\partial p_d^{EF*}}{\partial \theta} = 0,$$

$$\frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \theta} = \frac{a^2k\lambda^2(b-d)^2(1-\eta)}{8E^2} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \theta} = \frac{a^2k\lambda^2(b-d)^2}{4E^2} > 0.$$

4-G

$$\begin{aligned} \frac{\partial e^{EF*}}{\partial \sigma^2} &= -\frac{ab^2k\lambda(b-d)(1-\theta)}{E^2} < 0, & \frac{\partial q_t^{EF*}}{\partial \sigma^2} &= -\frac{ab^2k^2(b-d)(1-\theta)^2}{E^2} < 0, \\ \frac{\partial q_d^{EF*}}{\partial \sigma^2} &= \frac{abdk^2(b-d)(1-\theta)^2}{E^2} > 0, & \frac{\partial p_t^{EF*}}{\partial \sigma^2} &= \frac{abk(b-d)(1-\theta)(k(b^2-d^2)(1-\theta)-b\lambda^2)}{E^2}, \end{aligned}$$

设 $f(k) = k(b^2-d^2)(1-\theta)-b\lambda^2$ ，由此可见 $f(k)$ 是一次函数，且单调递增。令 $f(k)=0$ ，解得： $\bar{k}^{EF} = \frac{b\lambda^2}{(1-\theta)(b^2-d^2)}$ ，且 $\underline{k}^{EF} < k < \bar{k}^{EF}$ ，其中 $\underline{k}^{EF} = \frac{b\lambda^2}{2(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)}$ 。则当 $\underline{k}^{EF} < k \leq \bar{k}^{EF}$ 时， $f(k) \leq 0$ ($\frac{\partial p_t^{EF*}}{\partial \sigma^2} \leq 0$)；当 $k > \bar{k}^{EF}$ 时， $f(k) > 0$ ($\frac{\partial p_t^{EF*}}{\partial \sigma^2} > 0$)。

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_d^{EF*}}{\partial \sigma^2} &= 0, & \frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \sigma^2} &= -\frac{a^2k^2b(b-d)^2(1-\eta)(1-\theta)^2}{4G^2} < 0, \\ \frac{\partial \pi_s^{EF*}}{\partial \sigma^2} &= -\frac{a^2k^2b(b-d)^2(1-\theta)^2}{2G^2} < 0. \end{aligned}$$

4-H

对式 (4.9) 分别 $E[\pi_m^{IF}]$ 求关于 e^{IF} ， q_t^{IF} ， q_d^{IF} 的偏函数，有

$$\frac{\partial^2 E[\pi_m^{IF}]}{\partial (q_t^{IF})^2} = -2b(1-\eta)(1+\sigma^2) < 0$$

，则 $E[\pi_m^{IF}]$ 是关于 q_t^{IF} 的凹函数，令 $\frac{\partial E[\pi_m^{IF}]}{\partial q_t^{IF}} = 0$ ，解得

$$q_t^{IF} = \frac{a + \lambda e^{IF} - \omega^{IF}(1+r(1-\mu)) - 2dq_d^{IF}}{2b(1+\sigma^2)}。$$

同理可得 $q_d^{IF} = \frac{a - \omega^{IF}(1+r(1-\mu)) - 2dq_t^{IF}}{2b}$ ，

$$e^{IF} = \frac{\lambda q_t^{IF}}{k(1+r(1-\mu))(1-\theta)}。$$

$E[\pi_m^{IF}]$ 的海瑟矩阵为

$$H(e^{IF}, q_t^{IF}, q_d^{IF}) = \begin{pmatrix} -k(1-\eta)(1+r(1-\mu))(1-\theta) & (1-\eta)\lambda & 0 \\ (1-\eta)\lambda & -2b(1-\eta)(1+\sigma^2) & -2d(1-\eta) \\ 0 & -2d(1-\eta) & -2b(1-\eta) \end{pmatrix}。$$

因此， $H(e^{IF}, q_t^{IF}, q_d^{IF})$ 的一阶顺序主子式为 $H_1 = -k(1-\eta)(1+r(1-\mu))(1-\theta) < 0$ ，二阶顺序主子式为 $H_2 = (1-\eta)^2(2bk(1+\sigma^2)(1-\theta)(1+r(1-\mu)) - \lambda^2)$ ，三阶顺序主子式为 $H_3 = (1-\eta)^3(4k(1+r(1-\mu))(1-\theta)(d^2 - b^2(1+\sigma^2)) + 2b\lambda^2)$ 。当满足 $H_2 > 0$ 且 $H_3 < 0$ 时， $E[\pi_m^{IF}]$ 是关于 e^{IF} ， q_t^{IF} ， q_d^{IF} 的凹函数。令 $\frac{\partial E[\pi_m^{IF}(e^{IF}, q_t^{IF}, q_d^{IF})]}{\partial q_t^{IF}} = 0$ ，

$$\frac{\partial E[\pi_m^{IF}(e^{IF}, q_t^{IF}, q_d^{IF})]}{\partial q_d^{IF}} = 0 \quad \text{和} \quad \frac{\partial E[\pi_m^{IF}(e^{IF}, q_t^{IF}, q_d^{IF})]}{\partial e^{IF}} = 0，$$

联合解得

$$q_t^{IF} = \frac{k(1+r(1-\mu))(b-d)(1-\theta)(a - \omega^{IF}(1+r(1-\mu)))}{2k(1+r(1-\mu))(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2) - d^2) - b\lambda^2}, \quad q_d^{IF} = \frac{(2k(1+r(1-\mu))(b(1+\sigma^2) - d)(1-\theta) - \lambda^2)(a - \omega^{IF}(1+r(1-\mu)))}{2k(1+r(1-\mu))(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2) - d^2) - b\lambda^2},$$

$e^{IF} = \frac{\lambda(b-d)(a-\omega^{IF}(1+r(1-\mu)))}{2k(1+r(1-\mu))(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)-b\lambda^2}$ 。将 e^{IF} ， q_t^{IF} ， q_d^{IF} 表达式代入式(4.8)并对

其求关于 ω^{IF} 的二阶导数，得到

$$\frac{\partial^2 \pi_s^{IF}}{\partial (\omega^{IF})^2} = \frac{(1+r(1-\mu))(\lambda^2 - 2k(1+r(1-\mu))(1-\theta)(b(2+\sigma^2)-2d))}{2k(1+r(1-\mu))(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)-b\lambda^2} < 0, \text{ 故 } \pi_s^{IF} \text{ 是 } \omega^{IF} \text{ 的凹}$$

函数。令 $\frac{\partial \pi_s^{IF}}{\partial \omega^{IF}} = 0$ ，解得 $\omega^{IF*} = \frac{a}{2(1+r(1-\mu))}$ ，并令

$$I = 2k(1-\theta)(1+r(1-\mu))(b^2(1+\sigma^2)-d^2)-b\lambda^2 > 0, \quad J = 2k(1-\theta)(1+r(1-\mu))(b(1+\sigma^2)-d)-\lambda^2 > 0,$$

$$K = 2k(1-\theta)(1+r(1-\mu))(b(3b+(4b-d)\sigma^2)-3d^2)-(2b+d)\lambda^2 > 0,$$

$$L = 2k(1-\theta)(1+r(1-\mu))(b(2+\sigma^2)-2d)-\lambda^2 > 0。随后依次可得到 $e^{IF*} = \frac{a\lambda(b-d)}{2I}$,$$

$$q_t^{IF*} = \frac{ak(b-d)(1-\theta)(1+r(1-\mu))}{2I}, \quad q_d^{IF*} = \frac{aJ}{4I}, \text{ 同时可得 } p_t^{IF*} = \frac{aK}{4I}, \quad p_d^{IF*} = \frac{3a}{4},$$

$$E[\pi_m^{IF*}] = \frac{a^2(1-\eta)L}{16I}, \quad \pi_s^{IF*} = \frac{a^2L}{8(1+r(1-\mu))I}。$$

4-1

(1) 对于消费者低碳偏好系数:

$$\frac{\partial e^{IF*}}{\partial \lambda} = \frac{a(b-d)(2k(1+r(1-\mu))(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)+b\lambda^2)}{2I^2} > 0,$$

$$\frac{\partial q_t^{IF*}}{\partial \lambda} = \frac{abk\lambda(1+r(1-\mu))(b-d)(1-\theta)}{I^2} > 0, \quad \frac{\partial q_d^{IF*}}{\partial \lambda} = -\frac{2adk\lambda(1+r(1-\mu))(b-d)(1-\theta)}{I^2} < 0,$$

$$\frac{\partial p_t^{IF*}}{\partial \lambda} = \frac{ak\lambda(b-d)(1-\theta)(1+r(1-\mu))(b^2(1+2\sigma^2)-d^2)}{I^2} > 0, \quad \frac{\partial p_d^{IF*}}{\partial \lambda} = 0,$$

$$\frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \lambda} = \frac{a^2k\lambda(b-d)^2(1+r(1-\mu))(1-\eta)(1-\theta)}{I^2} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \lambda} = \frac{a^2k\lambda(b-d)(1-\theta)}{2I^2} > 0。$$

(2) 对于政府补贴:

$$\frac{\partial e^{IF*}}{\partial \theta} = \frac{ak\lambda(1+r(1-\mu))(b-d)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)}{I^2} > 0,$$

$$\frac{\partial q_t^{IF*}}{\partial \theta} = \frac{abk\lambda^2(1+r(1-\mu))(b-d)}{2I^2} > 0, \quad \frac{\partial q_d^{IF*}}{\partial \theta} = -\frac{adk\lambda^2(1+r(1-\mu))(b-d)}{2I^2} < 0,$$

$$\frac{\partial p_t^{IF*}}{\partial \theta} = \frac{ak\lambda^2(1+r(1-\mu))(b-d)(b^2(1+2\sigma^2)-d^2)}{2I^2} > 0, \quad \frac{\partial p_d^{IF*}}{\partial \theta} = 0,$$

$$\frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \theta} = \frac{a^2k\lambda^2(b-d)^2(1+r(1-\mu))(1-\eta)}{8I^2} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \theta} = \frac{a^2k\lambda^2(b-d)^2}{4I^2} > 0。$$

4-J

$$\begin{aligned} \frac{\partial e^{IF*}}{\partial \sigma^2} &= -\frac{ab^2k\lambda(1+r(1-\mu))(b-d)(1-\theta)}{I^2} < 0, \quad \frac{\partial q_t^{IF*}}{\partial \sigma^2} = -\frac{ab^2k^2(1+r(1-\mu))^2(b-d)(1-\theta)^2}{I^2} < 0, \\ \frac{\partial q_d^{IF*}}{\partial \sigma^2} &= \frac{2abdk^2(1+r(1-\mu))^2(b-d)(1-\theta)^2}{I^2} > 0, \\ \frac{\partial p_t^{IF*}}{\partial \sigma^2} &= \frac{abk(b-d)(1-\theta)(1+r(1-\mu))(k(b^2-d^2)(1+r(1-\mu))(1-\theta)-b\lambda^2)}{I^2}, \text{ 设 } f(k) = k(b^2-d^2)(1-\theta) \\ &\quad (1+r(1-\mu))-b\lambda^2, \text{ 由此可见 } f(k) \text{ 是一次函数, 且单调递增。令 } f(k)=0, \text{ 解得:} \\ \bar{k}^{IF} &= \frac{b\lambda^2}{(1-\theta)(1+r(1-\mu))(b^2-d^2)}, \quad \text{且} \quad \underline{k}^{IF} < k < \bar{k}^{IF}, \quad \text{其中} \\ \underline{k}^{IF} &= \frac{b\lambda^2}{2(1-\theta)(1+r(1-\mu))(b^2(1+\sigma^2)-d^2)}. \text{ 则当 } \underline{k}^{IF} < k \leq \bar{k}^{IF} \text{ 时, } f(k) \leq 0 \left(\frac{\partial p_t^{IF*}}{\partial \sigma^2} \leq 0 \right); \\ \text{当 } k > \bar{k}^{IF} \text{ 时, } f(k) > 0 \quad \left(\frac{\partial p_t^{IF*}}{\partial \sigma^2} > 0 \right). \quad \frac{\partial p_d^{IF*}}{\partial \sigma^2} &= 0, \\ \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \sigma^2} &= -\frac{a^2k^2b(1+r(1-\mu))^2(b-d)^2(1-\eta)(1-\theta)^2}{4I^2} < 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \sigma^2} = -\frac{a^2k^2b(b-d)^2(1-\theta)^2(1+r(1-\mu))}{2I^2} < 0. \end{aligned}$$

4-K

$$\begin{aligned} \frac{\partial e^{IF*}}{\partial r} &= -\frac{ak\lambda(b-d)(1-\theta)(1-\mu)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)}{I^2} < 0, \quad \frac{\partial q_t^{IF*}}{\partial r} = -\frac{abk\lambda^2(1-\mu)(b-d)(1-\theta)}{2I^2} < 0, \\ \frac{\partial q_d^{IF*}}{\partial r} &= \frac{adk\lambda^2(1-\mu)(b-d)(1-\theta)}{I^2} > 0, \quad \frac{\partial p_t^{IF*}}{\partial r} = -\frac{ak\lambda^2(b-d)(1-\theta)(1-\mu)(b^2(1+\sigma^2)-d^2)}{2I^2} < 0, \\ \frac{\partial p_d^{IF*}}{\partial r} &= 0, \quad \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial r} = -\frac{a^2k\lambda^2(b-d)^2(1-\mu)(1-\eta)(1-\theta)}{8I^2} < 0, \\ \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial r} &= \frac{a^2(1-\mu)(-4k^2(1-\theta)^2(1+r(1-\mu))^2(b^2(1+\sigma^2)-d^2)(b(2+\sigma^2)-2d)+\lambda^2(4k(1-\theta)(1+r(1-\mu))(b^2-d^2)-b\lambda^2))}{8(1+r(1-\mu))I^2}, \end{aligned}$$

设 $f(r) = -4k^2(1-\theta)^2(1+r(1-\mu))^2(b^2(1+\sigma^2)-d^2)(b(2+\sigma^2)-2d) + \lambda^2(4k(1-\theta)(1+r(1-\mu))(b^2-d^2)-b\lambda^2)$

且 $f(r)$ 是关于 r 的一元二次函数, 开口向下。则

$\Delta = -16k^2\lambda^4(b-d)^2(1-\theta)^2(1-\mu)^4(b^2(1+\sigma^2)-d^2) < 0$, 故 $f(r) < 0$ 恒成立。因此,

$$\frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial r} < 0.$$

4-L

由命题 4.1—4.3 条件可知:

$$(1) \quad \frac{e^{DF*}}{e^{EF*}} = \frac{E}{A} < 1, \quad \frac{e^{EF*}}{e^{IF*}} = \frac{I}{E} > 1, \quad \frac{e^{DF*}}{e^{IF*}} = \frac{I}{A} < 1, \text{ 故有 } e^{DF*} < e^{IF*} < e^{EF*}.$$

$$(2) \frac{q_t^{DF*}}{q_t^{EF*}} = \frac{(1+r)E}{A} < 1, \quad \frac{q_t^{DF*}}{q_t^{IF*}} = \frac{(1+r)I}{(1+r(1-\mu))A} < 1, \quad \frac{q_t^{EF*}}{q_t^{IF*}} = \frac{I}{(1+r(1-\mu))E} > 1, \text{ 故有}$$

$$q_t^{DF*} < q_t^{IF*} < q_t^{EF*}。$$

$$(3) \frac{q_d^{DF*}}{q_d^{EF*}} = \frac{BE}{AF} > 1, \quad \frac{q_d^{DF*}}{q_d^{IF*}} = \frac{BI}{AJ} > 1, \quad \frac{q_d^{EF*}}{q_d^{IF*}} = \frac{FI}{EJ} < 1, \text{ 故有 } q_d^{EF*} < q_d^{IF*} < q_d^{DF*}。$$

$$(4) \frac{p_t^{DF*}}{p_t^{EF*}} = \frac{CE}{AG} < 1, \quad \frac{p_t^{DF*}}{p_t^{IF*}} = \frac{CI}{AK} < 1, \quad \frac{p_t^{EF*}}{p_t^{IF*}} = \frac{GI}{EK} > 1, \text{ 故有 } p_t^{DF*} < p_t^{IF*} < p_t^{EF*}。$$

$$(5) p_d^{DF*} = p_d^{EF*} = p_d^{IF*} = \frac{3a}{4}。$$

4-M

(1) 比较三个模型下制造商期望利润和供应商利润的大小:

$$E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{IF*}] = \frac{a^2}{16} \cdot \frac{DE - A(1-\eta)L}{AE}, \text{ 即 } E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{IF*}] \text{ 的大小与分子}$$

$DE - A(1-\eta)L$ 一致。设 $f(\sigma^2) = DE - A(1-\eta)L = -4\eta k^2(1+r)(1+r(1-\mu))(1-\theta)^2(b^2(1+\sigma^2) - d^2)$
 $(b(1+\sigma^2) - d)(b(2+\sigma^2) - 2d) - \lambda^2(b\eta\lambda^2 - 2k(1-\theta)(b^2((3+2\sigma^2)(r+\mu)\eta + r\mu(1+\eta(2+\sigma^2)))$
 $- ((1+r)\eta - r\mu)d^2)$, 可知 $f(\sigma^2)$ 是关于 σ^2 的一元二次函数, 且开口向上。

$$\Delta = 4\eta b^2 k^2 (1-\theta)^2 (4\eta k^2 (1+r)^2 (1+r(1-\mu))^2 (1-\theta)^2 (b-d)^4 + 4bkr\lambda^2 (1+r)(1+r(1-\mu))$$

$$(1-\theta)(2-\eta)(b-d)^2 + \eta b^2 r^2 \mu^2 \lambda^4 > 0, \quad \text{令 } f(\sigma^2) = 0, \quad \text{解得:}$$

$$\sigma_{1,2}^2 = \frac{bk\eta(1-\theta)R \pm \sqrt{\Delta}}{-4\eta k^2 b^3 (1+r)(1+r(1-\mu))(1-\theta)^2}, \quad R = 2k(b-d)(3b+d)(1+r)(1+r(1-\mu))(1-\theta) - (2+r(2-\mu))b\lambda^2。$$

易知 $\sigma_2^2 < \sigma_1^2 < (\sigma^2)^{DI}$, 则满足 $\sigma^2 \in ((\sigma^2)^{DI}, +\infty)$ 时, $f(\sigma^2) > 0$ 恒成立, 即

$$E[\pi_m^{DF*}] > E[\pi_m^{IF*}]。$$

$$\frac{E[\pi_m^{EF*}]}{E[\pi_m^{IF*}]} = \frac{HI}{EL} > 1, \text{ 即 } E[\pi_m^{EF*}] > E[\pi_m^{IF*}]。$$

$$\pi_s^{DF*} - \pi_s^{EF*} = \frac{a^2}{8} \cdot \frac{(1+r)AG - DE}{(1+r)AE}, \text{ 即 } \pi_s^{DF*} - \pi_s^{EF*} \text{ 的大小与分子 } (1+r)AG - DE \text{ 单调}$$

性一致。设 $f(\sigma^2) = (1+r)AG - DE = -r(4k^2(1+r)(1-\theta)^2(b^2(1+\sigma^2) - d^2)(b(2+\sigma^2) - 2d) + \lambda^2(b\lambda^2$
 $- 2k(2+r)(1-\theta)(b^2(1+\sigma^2) - d^2)))$ 。可知 $f(\sigma^2)$ 是关于 σ^2 的一元二次函数, 且开口向

$$\Delta = 4b^2 k^2 (1-\theta)^2 (4k^2 (1+r)^2 (1-\theta)^2 (b-d)^4 - 4bk\lambda^2 (1+r)(1-\theta)(2+r)(b-d)^2 + b^2 r^2 \lambda^4),$$

若 $\Delta < 0$, 则 $f(\sigma^2) < 0$ 恒成立。当 $\Delta > 0$ 时, 令 $f(\sigma^2) = 0$, 解得: $\sigma_{1,2}^2 = \frac{-bk(1-\theta)N \pm \sqrt{\Delta}}{4k^2 b^3 (1+r)(1-\theta)^2},$

$N = 2k(b-d)(3b+d)(1+r)(1-\theta) - (2+r)b\lambda^2$ 。易知 $\sigma_1^2 < \sigma_2^2 < (\sigma^2)^D$ ，则满足 $\sigma^2 \in ((\sigma^2)^D, +\infty)$ 时， $f(\sigma^2) < 0$ 恒成立，因此 $\pi_s^{DF*} < \pi_s^{EF*}$ 。同理可证得： $\pi_s^{DF*} < \pi_s^{IF*}$ ， $\pi_s^{EF*} > \pi_s^{IF*}$ 。综上： $\pi_s^{DF*} < \pi_s^{IF*} < \pi_s^{EF*}$

(2) 比较 DF 模型和 EF 模型下的制造商期望利润：

$E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{EF*}] = \frac{a^2}{16} \cdot \frac{BE - A(1-\eta)F}{AE}$ ，即 $E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{EF*}]$ 的大小与分子 $BE - A(1-\eta)F$ 单调性一致。设 $f(\sigma^2) = BE - A(1-\eta)F = 4\eta k^2(1+r)(1-\theta)^2(b^2(1+\sigma^2) - d^2)(b(2+\sigma^2) - 2d) + \lambda^2(b\eta\lambda^2 - 2k(1-\theta)(b^2(r+\eta(3+r)) + (2+r)\eta\sigma^2) - (\eta - r(1-\eta))d^2 - 2bd(r+\eta)))$ ，可知 $f(\sigma^2)$ 是关于 σ^2 的一元二次函数，且开口向上。 $\Delta = 4\eta b^2 k^2(1-\theta)^2(4\eta k^2(1+r)^2(1-\theta)^2(b-d)^4 + 4bkr\lambda^2(1+r)(1-\theta)(2-\eta)(b-d)^2 + \eta b^2 r^2 \lambda^4) > 0$ ，令 $f(\sigma^2) = 0$ ，解得： $\sigma_{1,2}^2 = \frac{2bk\eta(1-\theta)M \pm \sqrt{\Delta}}{8\eta k^2 b^3(1+r)(1-\theta)^2}$ ， $M = 2k(b-d)(3b+d)(1+r)(1-\theta) - (2+r)b\lambda^2$ 。(1) 当 $M > 0$ 且 $\eta^{DE} = \frac{2kr\lambda^2(1-\theta)(b-d)^2}{(4k(b-d)(1-\theta) - \lambda^2)(2k(1+r)(1-\theta)(b^2 - d^2) - b\lambda^2)} < \eta < 1$ 时，易知 $\sigma_1^2 < \sigma_2^2 < 0$ ，因此 $f(\sigma^2) > 0$ 恒成立。故当 $M > 0$ 且 $0 < \eta < \eta^{DE}$ 时，易知 $\sigma_1^2 < 0 < \underline{\sigma}^2 < \sigma_2^2 = \overline{\sigma}^2$ ，即若 $\underline{\sigma}^2 < \sigma^2 \leq \overline{\sigma}^2$ ，则 $f(\sigma^2) \leq 0$ ($E[\pi_m^{DF*}] \leq E[\pi_m^{EF*}]$)，若 $\sigma^2 > \overline{\sigma}^2$ ，则 $f(\sigma^2) > 0$ ($E[\pi_m^{DF*}] > E[\pi_m^{EF*}]$)；(2) 当 $M \leq 0$ 时，在 $0 < \eta < 1$ 范围内，若 $\underline{\sigma}^2 < \sigma^2 \leq \overline{\sigma}^2$ ，则 $f(\sigma^2) \leq 0$ ($E[\pi_m^{DF*}] \leq E[\pi_m^{EF*}]$)，若 $\sigma^2 > \overline{\sigma}^2$ ，则 $f(\sigma^2) > 0$ ($E[\pi_m^{DF*}] > E[\pi_m^{EF*}]$)。

4-L

$$e^{C*} = e^{EF*} = \frac{a\lambda(b-d)}{2E}, \quad q_t^{C*} = q_t^{EF*} = \frac{ak(b-d)(1-\theta)}{2E}, \quad q_d^{C*} = q_d^{EF*} = \frac{aF}{4E},$$

$$E[\pi_{sc}^{C*}] = E[\pi_{sc}^{EF*}] + \frac{a^2 H(1+\eta)}{16E}。$$

4-N

将 $E[\pi_m^{N*}] = (1-\phi)E[\pi_{sc}^{C*}]$ 和 $\pi_s^{N*} = \phi E[\pi_{sc}^{C*}]$ 代入式(4.14)和(4.15)，并结合命题 4.2 和命题 4.4 中均衡解代入，可得最优分配比例为： $\phi^* = \frac{1}{4}(3+\eta - \beta(1+\eta))$ 。此时，

$$E[\pi_m^{N*}] = \frac{(1+\beta - (1-\beta)\eta)a^2 H}{16E}, \quad \pi_s^{N*} = \frac{(3-\beta + (1-\beta)\eta)a^2 H}{16E}。而 \quad \frac{\partial \phi^*}{\partial \eta} = \frac{1-\beta}{4} > 0,$$

$$\frac{\partial \varphi^*}{\partial \beta} = -\frac{1+\eta}{4} < 0。$$

5-A

用逆向归纳法求解该 Stackelberg 博弈模型, 对式(5.3)分别 $E[\pi_m^{DF}]$ 求关于 e^{DF} , q^{DF} 的偏函数, 有 $\frac{\partial^2 E[\pi_m^{DF}]}{\partial (q^{DF})^2} = -2b(1-\alpha)(1+\sigma^2) < 0$, 则 $E[\pi_m^{DF}]$ 是关于 q^{DF} 的凹函数, 令 $\frac{\partial E[\pi_m^{DF}]}{\partial q^{DF}} = 0$, 解得 $q^{DF} = \frac{a + \lambda e^{DF} - \omega^{DF}(1+r)}{2b(1-\alpha)(1+\sigma^2)}$ 。同理可得 $e^{DF} = \frac{\lambda q^{DF}}{k(1+r)(1-\theta)}$ 。 $E[\pi_m^{DF}]$ 的海瑟矩阵为 $H(e^{DF}, q^{DF}) = \begin{pmatrix} -k(1+r)(1-\theta) & \lambda \\ \lambda & -2b(1-\alpha)(1+\sigma^2) \end{pmatrix}$ 。因此, $|H(e^{DF}, q^{DF})| = 2bk(1+r)(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2) - \lambda^2$, 令 $A = 2bk(1+r)(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2) - \lambda^2$ 。当满足 $|H(e^{DF}, q^{DF})| > 0$ 时, $E[\pi_m^{DF}]$ 是关于 e^{DF} , q^{DF} 的凹函数。 $\frac{\partial E[\pi_m^{DF}(e^{DF}, q^{DF})]}{\partial e^{DF}} = 0$ 和 $\frac{\partial E[\pi_m^{DF}(e^{DF}, q^{DF})]}{\partial q^{DF}} = 0$, 联合解得 $e^{DF*} = \frac{\lambda(a - \omega^{DF}(1+r))}{2A}$, $q^{DF*} = \frac{k(1+r)(1-\theta)(a - \omega^{DF}(1+r))}{2A}$ 。将 e^{DF*} , q^{DF*} 表达式代入式(5.2)并对其求关于 ω^{DF} 的二阶导数, 得到 $\frac{\partial^2 \pi_s^{DF}}{\partial (\omega^{DF})^2} = -\frac{k(1+r)(1-\theta)}{A} < 0$, 故 π_s^{DF} 是 ω^{DF} 的凹函数。令 $\frac{\partial \pi_s^{DF}}{\partial \omega^{DF}} = 0$, 解得 $\omega^{DF*} = \frac{a}{2(1+r)}$ 。随后依次可得到 $e^{DF*} = \frac{a\lambda}{2A}$, $q^{DF*} = \frac{ak(1+r)(1-\theta)}{2A}$, $p^{DF*} = \frac{a(bk(1+r)(1-\theta)(4(1-\alpha)(1+\sigma^2)-1)-\lambda^2)}{2A}$, $E[\pi_m^{DF*}] = \frac{a^2k(1+r)(1-\theta)}{8A} - c(1+r)$, $\pi_s^{DF*} = \frac{a^2k(1-\theta)}{4A}$ 。

5-B

(1) 对于消费者低碳偏好系数:

$\frac{\partial e^{DF*}}{\partial \lambda} = \frac{a(2bk(1+r)(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2)+\lambda^2)}{2A^2} > 0$, $\frac{\partial q^{DF*}}{\partial \lambda} = \frac{ak\lambda(1+r)(1-\theta)}{A^2} > 0$, $\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \lambda} = -\frac{abk\lambda(1+r)(1-\theta)(1-2(1-\alpha)(1+\sigma^2))}{A^2}$, 可以看到 $\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \lambda}$ 的单调性与 $1-2(1-\alpha)(1+\sigma^2)$ 大小相反。由此, 假设 $f(\alpha) = 1-2(1-\alpha)(1+\sigma^2)$ 是关于 α 的单调递增函数。令 $f(\alpha) = 0$, 则解得 $\bar{\alpha} = \frac{1+2\sigma^2}{2(1+\sigma^2)}$, 且 $0 < \bar{\alpha} < 1$ 。因此, 当 $0 < \alpha \leq \bar{\alpha}$ 时, $f(\alpha) \leq 0$,

则 $\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \lambda} \geq 0$; 当 $\bar{\alpha} < \alpha < 1$ 时, $f(\alpha) > 0$, 则 $\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \lambda} < 0$ 。 $\frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \lambda} = \frac{a^2 k \lambda (1+r)(1-\theta)}{4A^2} > 0$,

$$\frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \lambda} = \frac{a^2 k \lambda (1-\theta)}{4A^2} > 0。$$

(2) 对于政府补贴:

$$\frac{\partial e^{DF*}}{\partial \theta} = \frac{ak\lambda(1-\alpha)(1+r)(1+\sigma^2)}{A^2} > 0, \quad \frac{\partial q^{DF*}}{\partial \theta} = \frac{ak\lambda^2(1+r)}{2A^2} > 0,$$

$\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \theta} = \frac{abk\lambda^2(1+r)(2(1-\alpha)(1+\sigma^2)-1)}{2A^2}$, 类似于 $\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \lambda}$, 我们可以得到结论。即当

$0 < \alpha \leq \bar{\alpha}$ 时, 则 $\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \theta} \geq 0$; 当 $\bar{\alpha} < \alpha < 1$ 时, 则 $\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \theta} < 0$ 。 $\frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \theta} = \frac{a^2 k \lambda^2 (1+r)}{8A^2} > 0$,

$$\frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \theta} = \frac{a^2 k \lambda^2}{4A^2} > 0。$$

5-C

(1) 对于产出不确定性:

$$\frac{\partial e^{DF*}}{\partial \sigma^2} = -\frac{abk\lambda(1+r)(1-\alpha)(1-\theta)}{A^2} < 0, \quad \frac{\partial q^{DF*}}{\partial \sigma^2} = -\frac{abk^2(1-\alpha)(1+r)^2(1-\theta)^2}{A^2} < 0,$$

$\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \sigma^2} = \frac{abk(1+r)(1-\alpha)(1-\theta)(bk(1+r)(1-\theta)-\lambda^2)}{A^2}$, 显而易见, $\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \sigma^2}$ 的单调性与

$bk(1+r)(1-\theta)-\lambda^2$ 有关。假设 $f(k) = bk(1+r)(1-\theta)-\lambda^2$, 则令 $f(k) = 0$, 解得

$\bar{k}_1 = \frac{\lambda^2}{b(1+r)(1-\theta)}$ 。接下来进一步与 k^{DF} (由 $E[\pi_m^{DF}]$ 的海瑟矩阵获得) 进行比较

($k^{DF} = \frac{\lambda^2}{2b(1+r)(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2)}$), 则 $k^{DF} - \bar{k}_1 = -\frac{\lambda^2(2(1-\alpha)(1+\sigma^2)-1)}{2b(1+r)(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2)}$ 。可以

看到与 $\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \lambda}$ 的求解类似, 则当 $0 < \alpha < \bar{\alpha}$ 时, $k^{DF} < \bar{k}_1$, 进一步地, 对于 $k^{DF} < k \leq \bar{k}_1$,

$\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \sigma^2} \leq 0$; 或者 $k > \bar{k}_1$, $\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \sigma^2} > 0$ 。当 $\bar{\alpha} \leq \alpha < 1$, 则 $\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \sigma^2} > 0$ 。

$$\frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \sigma^2} = -\frac{ba^2k^2(1+r)^2(1-\theta)^2(1-\alpha)}{4A^2} < 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \sigma^2} = -\frac{a^2k^2b(1+r)(1-\alpha)(1-\theta)^2}{2A^2} < 0。$$

(2) 对于区块链应用程度:

$$\frac{\partial e^{DF}}{\partial \alpha} = -\frac{abk\lambda(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2)}{A^2} < 0, \quad \frac{\partial q^{DF*}}{\partial \alpha} = \frac{abk^2(1+r)^2(1-\theta)^2(1+\sigma^2)}{A^2} > 0,$$

$\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \alpha} = -\frac{abk(1+r)(1-\theta)(1+\sigma^2)(bk(1+r)(1-\theta)-\lambda^2)}{A^2}$, 可以看到与 $\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \sigma^2}$ 求解过程一

致。可得到结论：当 $0 < \alpha < \bar{\alpha}$ 时，对于 $k^{DF} < k \leq \bar{k}_1$ ， $\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \alpha} \geq 0$ ；或者 $k > \bar{k}_1$ ， $\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \alpha} < 0$ 。

当 $\bar{\alpha} \leq \alpha < 1$ ，则 $\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \alpha} < 0$ 。 $\frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \alpha} = \frac{ba^2k^2(1+r)^2(1-\theta)^2(1+\sigma^2)}{4A^2} > 0$ ，

$$\frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \sigma^2} = \frac{a^2k^2b(1+r)(1+\sigma^2)(1-\theta)^2}{2A^2} > 0。$$

5-D

$$\frac{\partial e^{DF*}}{\partial r} = \frac{abk\lambda(1-\theta)(1+\sigma^2)}{A^2} > 0， \quad \frac{\partial q^{DF*}}{\partial r} = -\frac{ak\lambda^2(1-\theta)}{2A^2} < 0，$$

$\frac{\partial p^{DF*}}{\partial r} = \frac{abk\lambda^2(1-\theta)(2(1-\alpha)(1+\sigma^2)-1)}{2A^2}$ ，可以看到与 $\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \lambda}$ 的求解类似，则当

$0 < \alpha \leq \bar{\alpha}$ 时， $\frac{\partial p^{DF*}}{\partial r} \leq 0$ ；当 $\bar{\alpha} < \alpha < 1$ 时， $\frac{\partial p^{DF*}}{\partial r} > 0$ 。 $\frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial r} = -\frac{a^2k\lambda^2(1-\theta)}{8A^2} - c < 0$ ，

$$\frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial r} = -\frac{a^2bk^2(1-\alpha)(1-\theta)^2(1+\sigma^2)}{4A^2} < 0。$$

5-E

用逆向归纳法求解该 Stackelberg 博弈模型，对式(5.6)分别 $E[\pi_m^{EF}]$ 求关于 e^{EF} ，

q^{EF} 的偏函数，有 $\frac{\partial^2 E[\pi_m^{EF}]}{\partial (q^{EF})^2} = -2b(1-\eta)(1-\alpha)(1+\sigma^2) < 0$ ，则 $E[\pi_m^{EF}]$ 是关于 q^{EF} 的凹函

数，令 $\frac{\partial E[\pi_m^{EF}]}{\partial q^{EF}} = 0$ ，解得 $q^{EF} = \frac{a + \lambda e^{EF} - \omega^{EF}}{2b(1-\alpha)(1+\sigma^2)}$ 。同理可得 $e^{EF} = \frac{\lambda q^{EF}}{k(1-\theta)}$ 。 $E[\pi_m^{EF}]$ 的

海瑟矩阵为 $H(e^{EF}, q^{EF}) = \begin{pmatrix} -k(1-\eta)(1-\theta) & (1-\eta)\lambda \\ (1-\eta)\lambda & -2b(1-\eta)(1-\alpha)(1+\sigma^2) \end{pmatrix}$ 。因此，

$$|H(e^{EF}, q^{EF})| = (1-\eta)^2(2bk(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2) - \lambda^2)， \quad \text{令 } B = 2bk(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2) - \lambda^2。$$

当满足 $|H(e^{EF}, q^{EF})| > 0$ ，即 $B > 0$ 时， $E[\pi_m^{EF}]$ 是关于 e^{EF} ， q^{EF} 的凹函数。

$$\frac{\partial E[\pi_m^{EF}(e^{EF}, q^{EF})]}{\partial e^{EF}} = 0 \quad \text{和} \quad \frac{\partial E[\pi_m^{EF}(e^{EF}, q^{EF})]}{\partial q^{EF}} = 0， \quad \text{联合解得 } e^{EF*} = \frac{\lambda(a - \omega^{EF})}{2B}，$$

$q^{EF*} = \frac{k(1-\theta)(a - \omega^{EF})}{2B}$ 。将 e^{EF*} ， q^{EF*} 表达式代入式(5.5)并对其求关于 ω^{EF} 的二阶导

数，得到 $\frac{\partial^2 \pi_s^{EF}}{\partial (\omega^{EF})^2} = -\frac{2k(1-\theta)}{B} < 0$ ，故 π_s^{EF} 是 ω^{EF} 的凹函数。令 $\frac{\partial \pi_s^{EF}}{\partial \omega^{EF}} = 0$ ，解得 $\omega^{EF*} = \frac{a}{2}$ 。

随后依次可得到 $e^{EF*} = \frac{a\lambda}{2B}$ ， $q^{EF*} = \frac{ak(1-\theta)}{2B}$ ， $p^{EF*} = \frac{a(bk(1-\theta)(4(1-\alpha)(1+\sigma^2)-1) - \lambda^2)}{2B}$ ，

$$E[\pi_m^{EF*}] = (1-\eta)\left(\frac{a^2k(1-\theta)}{8B} - c\right), \quad \pi_s^{EF*} = \frac{a^2k(1-\theta)}{4B}。$$

5-F

(1) 对于消费者低碳偏好系数:

$$\begin{aligned} \frac{\partial e^{EF*}}{\partial \lambda} &= \frac{a(2bk(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2) + \lambda^2)}{2B^2} > 0, & \frac{\partial q^{EF*}}{\partial \lambda} &= \frac{ak\lambda(1-\theta)}{B^2} > 0, \\ \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \lambda} &= \frac{abk\lambda(1-\theta)(1-2(1-\alpha)(1+\sigma^2))}{A^2}, \text{ 类似于 } \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \lambda}. \text{ 因此, 当 } 0 < \alpha \leq \bar{\alpha} \text{ 时, 则} \\ \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \lambda} &\geq 0; \text{ 当 } \bar{\alpha} < \alpha < 1 \text{ 时, 则 } \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \lambda} < 0. \quad \frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \lambda} = \frac{a^2k\lambda(1-\eta)(1-\theta)}{4B^2} > 0, \\ \frac{\partial \pi_s^{EF*}}{\partial \lambda} &= \frac{a^2k\lambda(1-\theta)}{2B^2} > 0. \end{aligned}$$

(2) 对于政府补贴:

$$\begin{aligned} \frac{\partial e^{EF*}}{\partial \theta} &= \frac{abk\lambda(1-\alpha)(1+\sigma^2)}{B^2} > 0, \quad \frac{\partial q^{EF*}}{\partial \theta} = \frac{ak\lambda^2}{2B^2} > 0, \quad \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \theta} = \frac{abk\lambda^2(1-2(1-\alpha)(1+\sigma^2))}{2B^2}, \\ \text{类似于 } \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \lambda}, \text{ 我们可以得到结论. 即当 } 0 < \alpha \leq \bar{\alpha} \text{ 时, 则 } \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \theta} &\geq 0; \text{ 当 } \bar{\alpha} < \alpha < 1 \text{ 时,} \\ \text{则 } \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \theta} &< 0. \quad \frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \theta} = \frac{a^2k\lambda^2(1-\eta)}{8B^2} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{EF*}}{\partial \theta} = \frac{a^2k\lambda^2}{4B^2} > 0. \end{aligned}$$

5-G

(1) 对于产出不确定性:

$$\begin{aligned} \frac{\partial e^{EF*}}{\partial \sigma^2} &= -\frac{abk\lambda(1-\alpha)(1-\theta)}{B^2} < 0, & \frac{\partial q^{EF*}}{\partial \sigma^2} &= -\frac{abk^2(1-\alpha)(1-\theta)^2}{B^2} < 0, \\ \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \sigma^2} &= \frac{abk(1-\alpha)(1-\theta)(bk(1-\theta) - \lambda^2)}{B^2}, \text{ 显而易见, 假设 } f(k) = bk(1-\theta) - \lambda^2, \text{ 则令} \\ f(k) &= 0, \text{ 解得 } \bar{k}_2 = \frac{\lambda^2}{b(1-\theta)}. \text{ 则 } k^{EF} - \bar{k}_2 = -\frac{\lambda^2(2(1-\alpha)(1+\sigma^2) - 1)}{2b(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2)}. \text{ 可以看到与 } \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \lambda} \\ \text{的求解类似, 则当 } 0 < \alpha < \bar{\alpha} \text{ 时, } k^{EF} < \bar{k}_2, \text{ 进一步地, 对于 } k^{EF} < k \leq \bar{k}_2, \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \sigma^2} &\leq 0; \\ \text{或者 } k > \bar{k}_2, \quad \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \sigma^2} &> 0. \text{ 当 } \bar{\alpha} \leq \alpha < 1, \text{ 则 } \frac{\partial p^{EF*}}{\partial \sigma^2} > 0. \\ \frac{\partial E[\pi_m^{EF*}]}{\partial \sigma^2} &= -\frac{ba^2k^2(1-\theta)^2(1-\alpha)(1-\eta)}{4B^2} < 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{EF*}}{\partial \sigma^2} = -\frac{a^2k^2b(1-\alpha)(1-\theta)^2}{2B^2} < 0. \end{aligned}$$

(2) 对于区块链应用程度:

$$\frac{\partial e^{EF*}}{\partial \alpha} = \frac{abk\lambda(1-\theta)(1+\sigma^2)}{B^2} > 0, \quad \frac{\partial q^{DF*}}{\partial \alpha} = \frac{abk^2(1-\theta)^2(1+\sigma^2)}{B^2} > 0,$$

$\frac{\partial p^{DF*}}{\partial \alpha} = -\frac{abk(1-\theta)(1+\sigma^2)(bk(1-\theta)-\lambda^2)}{B^2}$ ，可以看到与 $\frac{\partial p^{EF*}}{\partial \sigma^2}$ 求解过程一致。可得到

结论：当 $0 < \alpha < \bar{\alpha}$ 时，对于 $k^{EF} < k \leq \bar{k}_2$ ， $\frac{\partial p^{EF*}}{\partial \alpha} \leq 0$ ；或者 $k > \bar{k}_2$ ， $\frac{\partial p^{EF*}}{\partial \alpha} < 0$ 。当 $\bar{\alpha} \leq \alpha < 1$ ，

则 $\frac{\partial p^{EF*}}{\partial \alpha} < 0$ 。 $\frac{\partial E[\pi_m^{DF*}]}{\partial \alpha} = \frac{ba^2k^2(1+r)^2(1-\theta)^2(1+\sigma^2)}{4A^2} > 0$ ，

$\frac{\partial \pi_s^{DF*}}{\partial \sigma^2} = \frac{a^2k^2b(1+r)(1+\sigma^2)(1-\theta)^2}{2A^2} > 0$ 。

5-H

用逆向归纳法求解该 Stackelberg 博弈模型，对式(5.9)分别 $E[\pi_m^{IF}]$ 求关于 e^{IF} ，

q^{IF} 的偏函数，有 $\frac{\partial^2 E[\pi_m^{IF}]}{\partial (q^{IF})^2} = -2b(1-\alpha)(1-\eta)(1+\sigma^2) < 0$ ，则 $E[\pi_m^{IF}]$ 是关于 q^{IF} 的凹函数，

令 $\frac{\partial E[\pi_m^{IF}]}{\partial q^{IF}} = 0$ ，解得 $q^{IF} = \frac{a + \lambda e^{IF} - \omega^{DF}(1+r)(1-\mu)}{2b(1-\alpha)(1+\sigma^2)}$ 。同理可得

$e^{IF} = \frac{\lambda q^{IF}}{k(1+r)(1-\theta)(1-\mu)}$ 。 $E[\pi_m^{IF}]$ 的海瑟矩阵为

$H(e^{IF}, q^{IF}) = \begin{pmatrix} -k(1+r)(1-\mu)(1-\eta)(1-\theta) & (1-\eta)\lambda \\ (1-\eta)\lambda & -2b(1-\alpha)(1-\eta)(1+\sigma^2) \end{pmatrix}$ 。因此，

$|H(e^{IF}, q^{IF})| = (1-\eta)^2(2bk(1+r)(1-\alpha)(1-\mu)(1-\theta)(1+\sigma^2) - \lambda^2)$ ，令

$C = 2bk(1+r)(1-\alpha)(1-\mu)(1-\theta)(1+\sigma^2) - \lambda^2$ 。当满足 $|H(e^{IF}, q^{IF})| > 0$ 时， $E[\pi_m^{IF}]$ 是关于

e^{IF} ， q^{IF} 的凹函数。 $\frac{\partial E[\pi_m^{IF}(e^{IF}, q^{IF})]}{\partial e^{IF}} = 0$ 和 $\frac{\partial E[\pi_m^{IF}(e^{IF}, q^{IF})]}{\partial q^{IF}} = 0$ ，联合解得

$e^{IF*} = \frac{\lambda(a - \omega^{DF}(1+r)(1-\mu))}{2C}$ ， $q^{IF*} = \frac{k(1+r)(1-\theta)(1-\mu)(a - \omega^{IF}(1+r)(1-\mu))}{2C}$ 。将 e^{IF*} ，

q^{IF*} 表达式代入式 (5.8) 并对其求关于 ω^{IF} 的二阶导数，得到

$\frac{\partial^2 \pi_s^{IF}}{\partial (\omega^{IF})^2} = -\frac{2k(1+r)^2(1-\mu)^2(1-\theta)}{C} < 0$ ，故 π_s^{IF} 是 ω^{IF} 的凹函数。令 $\frac{\partial \pi_s^{IF}}{\partial \omega^{IF}} = 0$ ，解得

$\omega^{IF*} = \frac{a}{2(1+r)(1-\mu)}$ 。随后依次可得到 $e^{IF*} = \frac{a\lambda}{2C}$ ， $q^{IF*} = \frac{ak(1-\mu)(1-\theta)(1+r)}{2C}$ ，

$p^{IF*} = \frac{a(bk(1+r)(1-\mu)(1-\theta)(4(1-\alpha)(1+\sigma^2)-1)-\lambda^2)}{2C}$ ， $E[\pi_m^{IF*}] = \frac{a^2k(1-\theta)}{8C} - c(1+r)(1-\mu)(1-\eta)$ ，

$\pi_s^{IF*} = \frac{a^2k(1-\theta)}{4C}$ 。

5-I

(1) 对于消费者低碳偏好系数:

$$\begin{aligned}\frac{\partial e^{IF*}}{\partial \lambda} &= \frac{a(2bk(1+r)(1-\alpha)(1-\theta)(1-\mu)(1+\sigma^2)+\lambda^2)}{2C^2} > 0, \quad \frac{\partial q^{IF*}}{\partial \lambda} = \frac{ak\lambda(1+r)(1-\mu)(1-\theta)}{C^2} > 0, \\ \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \lambda} &= \frac{abk\lambda(1+r)(1-\mu)(1-\theta)(1-2(1-\alpha)(1+\sigma^2))}{C^2}, \text{ 类似于 } \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \lambda}. \text{ 因此, 当 } 0 < \alpha \leq \bar{\alpha} \\ \text{时, 则 } \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \lambda} &\geq 0; \text{ 当 } \bar{\alpha} < \alpha < 1 \text{ 时, 则 } \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \lambda} < 0. \quad \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \lambda} = \frac{a^2k\lambda(1+r)(1-\mu)(1-\eta)(1-\theta)}{4C^2} > 0, \\ \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \lambda} &= \frac{a^2k\lambda(1-\theta)}{2C^2} > 0.\end{aligned}$$

(2) 对于政府补贴:

$$\begin{aligned}\frac{\partial e^{IF*}}{\partial \theta} &= \frac{abk\lambda(1+r)(1-\alpha)(1-\mu)(1+\sigma^2)}{C^2} > 0, \quad \frac{\partial q^{IF*}}{\partial \theta} = \frac{ak\lambda^2(1+r)(1-\mu)}{2C^2} > 0, \\ \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \theta} &= \frac{abk\lambda^2(1+r)(1-\mu)(1-2(1-\alpha)(1+\sigma^2))}{2C^2}, \text{ 类似于 } \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \lambda}, \text{ 我们可以得到结论. 即} \\ \text{当 } 0 < \alpha \leq \bar{\alpha} \text{ 时, 则 } \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \theta} &\leq 0; \text{ 当 } \bar{\alpha} < \alpha < 1 \text{ 时, 则 } \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \theta} < 0. \\ \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \theta} &= \frac{a^2k\lambda^2(1+r)(1-\mu)(1-\eta)}{8C^2} > 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \theta} = \frac{a^2k\lambda^2}{4C^2} > 0.\end{aligned}$$

5-J

(1) 对于产出不确定性:

$$\begin{aligned}\frac{\partial e^{IF*}}{\partial \sigma^2} &= -\frac{abk\lambda(1+r)(1-\mu)(1-\alpha)(1-\theta)}{C^2} < 0, \quad \frac{\partial q^{IF*}}{\partial \sigma^2} = -\frac{abk^2(1+r)^2(1-\mu)^2(1-\alpha)(1-\theta)^2}{C^2} < 0, \\ \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \sigma^2} &= \frac{abk(1+r)(1-\alpha)(1-\mu)(1-\theta)(bk(1+r)(1-\mu)(1-\theta)-\lambda^2)}{C^2}, \text{ 显而易见, 假设} \\ f(k) &= bk(1+r)(1-\mu)(1-\theta)-\lambda^2, \text{ 则令 } f(k)=0, \text{ 解得 } \bar{k}_3 = \frac{\lambda^2}{b(1+r)(1-\mu)(1-\theta)}. \text{ 则} \\ k^{IF} - \bar{k}_3 &= \frac{\lambda^2(2(1-\alpha)(1+\sigma^2)-1)}{2b(1+r)(1-\alpha)(1-\mu)(1-\theta)(1+\sigma^2)}. \text{ 可以看到与 } \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \lambda} \text{ 的求解类似, 则当} \\ 0 < \alpha < \bar{\alpha} \text{ 时, } k^{IF} < \bar{k}_3, \text{ 进一步地, 对于 } k^{IF} < k \leq \bar{k}_3, \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \sigma^2} &\leq 0; \text{ 或者 } k > \bar{k}_3, \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \sigma^2} > 0. \\ \text{当 } \bar{\alpha} \leq \alpha < 1, \text{ 则 } \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \sigma^2} &> 0. \quad \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \sigma^2} = -\frac{ba^2k^2(1+r)^2(1-\mu)^2(1-\theta)^2(1-\alpha)(1-\eta)}{4C^2} < 0, \\ \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \sigma^2} &= -\frac{a^2k^2b(1+r)(1-\mu)(1-\alpha)(1-\theta)^2}{2C^2} < 0.\end{aligned}$$

(2) 对于区块链应用程度:

$$\begin{aligned}\frac{\partial e^{IF*}}{\partial \alpha} &= \frac{abk\lambda(1+r)(1-\mu)(1+\sigma^2)(1-\theta)}{C^2} > 0, \quad \frac{\partial q^{IF*}}{\partial \alpha} = \frac{abk^2(1+r)^2(1-\mu)^2(1+\sigma^2)(1-\theta)^2}{C^2} > 0, \\ \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \alpha} &= -\frac{abk(1+r)(1-\mu)(1-\theta)(bk(1+r)(1-\mu)(1-\theta)-\lambda^2)}{C^2}, \text{ 同理, 当 } 0 < \alpha < \bar{\alpha} \text{ 时, 对于} \\ k^{IF} < k \leq \bar{k}_3, \quad \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \alpha} &\geq 0; \text{ 或者 } k > \bar{k}_3, \quad \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \alpha} < 0. \text{ 当 } \bar{\alpha} \leq \alpha < 1, \text{ 则 } \frac{\partial p^{IF*}}{\partial \alpha} < 0. \\ \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial \alpha} &= \frac{ba^2k^2(1+r)^2(1-\mu)^2(1-\theta)^2(1+\sigma^2)(1-\eta)}{4C^2} > 0, \\ \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial \alpha} &= \frac{a^2k^2b(1+r)(1-\mu)(1+\sigma^2)(1-\theta)^2}{2C^2} > 0.\end{aligned}$$

5-K

(1) 对于融资利率:

$$\begin{aligned}\frac{\partial e^{IF}}{\partial r} &= -\frac{abk\lambda(1-\alpha)(1-\mu)(1-\theta)(1+\sigma^2)}{C^2} < 0, \quad \frac{\partial q^{IF*}}{\partial r} = -\frac{ak\lambda^2(1-\mu)(1-\theta)}{2C^2} < 0, \\ \frac{\partial p^{IF*}}{\partial r} &= \frac{abk\lambda^2(1-\mu)(1-\theta)(2(1-\alpha)(1+\sigma^2)-1)}{2C^2}, \text{ 可以看到与 } \frac{\partial p^{DF*}}{\partial \lambda} \text{ 的求解类似, 则当} \\ 0 < \alpha \leq \bar{\alpha} \text{ 时, } \quad \frac{\partial p^{IF*}}{\partial r} &\leq 0; \text{ 当 } \bar{\alpha} < \alpha < 1 \text{ 时, } \quad \frac{\partial p^{IF*}}{\partial r} > 0. \\ \frac{\partial E[\pi_m^{IF*}]}{\partial r} &= -(1-\mu)(1-\eta)\left(\frac{a^2k\lambda^2(1-\theta)}{8C^2} + c\right) < 0, \quad \frac{\partial \pi_s^{IF*}}{\partial r} = -\frac{a^2bk^2(1-\mu)(1-\alpha)(1-\theta)^2(1+\sigma^2)}{4C^2} < 0.\end{aligned}$$

5-L

由命题 5.1—5.3 条件可知:

$$\frac{e^{DF*}}{e^{EF*}} = \frac{B}{A} < 1, \quad \frac{e^{DF*}}{e^{IF*}} = \frac{C}{A} < 1, \quad \frac{e^{IF*}}{e^{EF*}} = \frac{B}{C}, \quad B-C = 4bk(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2)(\mu-r(1-\mu)).$$

显而易见, $B-C$ 大小与 $\mu-r(1-\mu)$ 大小有关, 故假设 $f(\mu) = \mu-r(1-\mu)$ 。令 $f(\mu) = 0$,

可得: $\bar{\mu} = \frac{r}{1+r}$, 且 $0 < \bar{\mu} < 1$ 。因此, 当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时, $B \leq C$, 则 $\frac{e^{IF*}}{e^{EF*}} \leq 1$; 当 $\bar{\mu} < \mu < 1$

时, $B > C$, 则 $\frac{e^{IF*}}{e^{EF*}} > 1$ 。综上: 当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时, $e^{DF*} < e^{IF*} \leq e^{EF*}$; 当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时,

$$e^{DF*} < e^{EF*} < e^{IF*}.$$

$$\frac{q^{DF*}}{q^{EF*}} = \frac{(1+r)B}{A} < 1, \quad \frac{q^{DF*}}{q^{IF*}} = \frac{C}{(1-\mu)A} < 1, \quad \frac{q^{IF*}}{q^{EF*}} = \frac{(1+r)(1-\mu)B}{C},$$

$(1+r)(1-\mu)B-C = (\mu-r(1-\mu))\lambda^2$ 。同理可得, 当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时, $(1+r)(1-\mu)B \leq C$, 则

$\frac{q^{IF*}}{q^{EF*}} \leq 1$; 当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时, $(1+r)(1-\mu)B > C$, 则 $\frac{q^{IF*}}{q^{EF*}} > 1$ 。综上: 当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时,

$q^{DF*} < q^{IF*} \leq q^{EF*}$ ；当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时， $q^{DF*} < q^{EF*} < q^{IF*}$ 。

$$p^{DF*} - p^{EF*} = \frac{abkr\lambda^2(1-\theta)(1-2(1-\alpha)(1+\sigma^2))}{2AB}, \text{ 类似于 5-B 证明, 我们可以得到}$$

结论。当 $0 < \alpha \leq \bar{\alpha}$ 时， $p^{DF*} - p^{EF*} \leq 0$ ；当 $\bar{\alpha} < \alpha < 1$ 时， $p^{DF*} - p^{EF*} > 0$ 。

$$p^{DF*} - p^{IF*} = \frac{abk\mu\lambda^2(1+r)(1-\theta)(1-2(1-\alpha)(1+\sigma^2))}{2BC}, \text{ 同理可得, 当 } 0 < \alpha \leq \bar{\alpha} \text{ 时,}$$

$p^{DF*} - p^{IF*} \leq 0$ ；当 $\bar{\alpha} < \alpha < 1$ 时， $p^{DF*} - p^{IF*} > 0$ 。

$$p^{IF*} - p^{EF*} = -\frac{abk\lambda^2(1-\theta)(\mu-r(1-\mu))(1-2(1-\alpha)(1+\sigma^2))}{2AB}, \text{ 结合之前的证明可知,}$$

当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 且 $0 < \alpha \leq \bar{\alpha}$ 时， $p^{IF*} - p^{EF*} \leq 0$ ；当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 且 $\bar{\alpha} < \alpha < 1$ 时， $p^{IF*} - p^{EF*} < 0$ ；

当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 且 $\bar{\alpha} < \alpha < 1$ 时， $p^{IF*} - p^{EF*} > 0$ ；当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 且 $0 < \alpha < \bar{\alpha}$ 时， $p^{IF*} - p^{EF*} \geq 0$ 。

综上：当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 且 $0 < \alpha \leq \bar{\alpha}$ 时， $p^{DF*} \leq p^{IF*} \leq p^{EF*}$ ；当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 且 $\bar{\alpha} < \alpha < 1$ 时， $p^{DF*} < p^{EF*} \leq p^{IF*}$ ；当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 且 $\bar{\alpha} < \alpha < 1$ 时， $p^{EF*} < p^{IF*} < p^{DF*}$ ；当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 且 $0 < \alpha \leq \bar{\alpha}$ 时， $p^{IF*} \leq p^{EF*} \leq p^{DF*}$ 。

5-M

(1) 比较三个模型下制造商期望利润大小：

$$E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{EF*}] = \frac{a^2k(1-\theta)(2bk(1+r)(1-\alpha)\eta(1-\theta)(1+\sigma^2) - (r+\eta)\lambda^2)}{8AB} - c(r+\eta),$$

将 $E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{EF*}]$ 看成关于 c 的一元一次函数，求得根值为

$$c_1 = \frac{a^2k(1-\theta)(2bk\eta(1+r)(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2) - (r+\eta)\lambda^2)}{8AB(r+\eta)}。 \text{ 显而易见, } \bar{c}_1 \text{ 的取值与}$$

$2bk\eta(1+r)(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2) - (r+\eta)\lambda^2$ 的取值有关，则设

$f(\sigma^2) = 2bk\eta(1+r)(1-\alpha)(1-\theta)(1+\sigma^2) - (r+\eta)\lambda^2$ ，令 $f(\sigma^2) = 0$ ，解得：

$$\sigma_1^2 = \frac{-2bk\eta(1+r)(1-\alpha)(1-\theta) + (r+\eta)\lambda^2}{-2bk\eta(1+r)(1-\alpha)(1-\theta)}, \text{ 且 } 0 < (\sigma^2)^{EF} < \sigma_1^2。 \text{ 因此, 当 } (\sigma^2)^{EF} < \sigma^2 \leq \sigma_1^2$$

时， $c_1 \leq 0$ ，则 $E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{EF*}] < 0$ ；当 $\sigma^2 > \sigma_1^2$ 时， $0 < c_1 < c^{DF}$ ，若 $0 < c \leq c_1$ ，

$E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{EF*}] \geq 0$ ，若 $c_1 < c < c^{DF}$ ， $E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{EF*}] < 0$ 。

$$E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{IF*}] = \frac{a^2k(1+r)(1-\theta)(2bk(1+r)(1-\alpha)(1-\mu)\eta(1-\theta)(1+\sigma^2) - (\mu+\eta(1-\mu))\lambda^2)}{8AC} - c(1+r)(\mu(1-\eta)+\eta),$$

同理可得 $c_2 = \frac{a^2k(1-\theta)(2bk\eta(1+r)(1-\alpha)(1-\mu)(1-\theta)(1+\sigma^2) - (\mu(1-\eta)+\eta)\lambda^2)}{8BC(\mu(1-\eta)+\eta)}$ 。接下来，

又可得到 $\sigma_2^2 = \frac{-2bk\eta(1+r)(1-\alpha)(1-\mu)(1-\theta) + (\mu(1-\eta) + \eta)\lambda^2}{2bk\eta(1+r)(1-\alpha)(1-\mu)(1-\theta)}$, 且 $0 < (\sigma^2)^{IF} < \sigma_2^2$ 。因此,

当 $(\sigma^2)^{IF} < \sigma \leq \sigma_2^2$ 时, $c_2 \leq 0$, 则 $E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{IF*}] \leq 0$; 当 $\sigma^2 > \sigma_2^2$ 时, $0 < c_2 < c^{DF}$, 若 $0 < c \leq c_2$, $E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{IF*}] \geq 0$, 若 $c_2 < c < c^{DF}$, $E[\pi_m^{DF*}] - E[\pi_m^{IF*}] < 0$ 。

$$E[\pi_m^{IF*}] - E[\pi_m^{EF*}] = (\mu - r(1-\mu))(1-\eta)(c + \frac{a^2 k \lambda^2 (1-\theta)}{BC}) , \quad \text{显 而 易 见} ,$$

$E[\pi_m^{IF*}] - E[\pi_m^{EF*}]$ 的取值只受到 $\mu - r(1-\mu)$ 的影响。根据之前所求, 当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时, $E[\pi_m^{IF*}] - E[\pi_m^{EF*}] \leq 0$; 当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时, $E[\pi_m^{IF*}] - E[\pi_m^{EF*}] > 0$ 。

(2) 比较三个模型下供应商利润大小:

$$\pi_s^{DF*} - \pi_s^{EF*} = -\frac{bra^2 k^2 (1-\alpha)(1+\sigma^2)(1-\theta)^2}{2AB} < 0 , \quad \pi_s^{DF*} - \pi_s^{IF*} = -\frac{b\mu a^2 k^2 (1+r)(1-\alpha)(1+\sigma^2)(1-\theta)^2}{2AC} < 0 ,$$

$$\pi_s^{IF*} - \pi_s^{EF*} = \frac{ba^2 k^2 (1-\alpha)(1+\sigma^2)(1-\theta)^2 (\mu - r(1-\mu))}{2BC} , \quad \text{显 然} , \quad \pi_s^{IF*} - \pi_s^{EF*} \text{ 取 值 只 受}$$

$\mu - r(1-\mu)$ 的影响。因此, 当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时, $\pi_s^{IF*} - \pi_s^{EF*} \leq 0$; 当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时, $\pi_s^{IF*} - \pi_s^{EF*} > 0$ 。

综上: 当 $0 < \mu \leq \bar{\mu}$ 时, $\pi_s^{DF*} < \pi_s^{IF*} \leq \pi_s^{EF*}$; 当 $\bar{\mu} < \mu < 1$ 时, $\pi_s^{DF*} < \pi_s^{EF*} < \pi_s^{IF*}$ 。

攻读硕士学位期间发表的学术论文

孙利君, 张云丰. 碳限额与交易机制下考虑产出不确定性的制造商融资和减排决策. 绍兴文理学院学报(已录用)

张云丰, 孙利君, 刘伟华, 龚本刚. 低碳补贴下产出不确定性制造商的融资与减排决策及协调研究. 系统工程理论与实践(终审)

致谢

时光荏苒，岁月如梭，硕士三载，将终其篇。回首往昔，感激之情涌于胸，谨以此文，谢诸公之厚爱、支持与助我者。

首谢吾师，张云丰先生。师之治学严谨，学术深厚，吾受益良多。在师之悉心教诲下，吾得研学之要，亦悟应对困难与挑战之道。师之言传身教，使吾深悟学术之真谛。于此，吾向师致以最崇之敬与最诚之谢。

次谢吾亲。求学之路，亲为吾之坚强后盾。亲之支持与鼓励，使吾于困境中勇往直前。亲之爱与关怀，如春日之阳，温暖吾心。吾深知，无论行至何处，亲皆为吾之依靠。

又谢同窗好友。共历挑战与机遇，同享欢笑与泪水。友之陪伴与支持，使吾于学术之道上不再孤单。共成长、共进步，此段经历，乃吾人生之宝贵财富。

末谢母校之培养与包容。于此地，吾度人生之美好时光，获宝贵之知识与经验。母校之优美环境、浓厚学术氛围，使吾深爱此土。吾将铭记母校之教诲，继续前行，为实现梦想而努力。

硕士生涯之终，乃新人生阶段之始。吾将怀感恩之心，迎未来之挑战与机遇。愿吾辈皆能于人生之道上渐行渐渐远，成就辉煌之未来。