

分类号: F273

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210720108



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 碳交易机制下考虑排碳谎报的双
渠道供应链定价与减排决策研究

论 文 作 者 宋婷婷

指 导 教 师 张云丰 教授

学 科 (专 业) 管理科学与工程(管)

研 究 方 向 物流与供应链管理

论文提交日期: 2024 年 5 月 31 日

分类号: F273
密 级: 公开

单位代码: 10363
学 号: 2210720108

碳交易机制下考虑排碳谎报的双渠道供应链定价与减排决策研究

Research on Dual-Channel Supply Chain Pricing and Emission Reduction
Decision-making Considering Carbon Emission False Reporting under
Carbon Trading Mechanisms

学生姓名: 宋婷婷

指导教师: 张云丰 教授

专 业: 管理科学与工程(管)

研究方向: 物流与供应链管理

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后果由本人承担。

学位论文作者签名：



日期：2024 年 5 月 31 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：宋婷婷

日期：2024 年 5 月 31 日

指导教师签名：张云丰

日期：2024 年 5 月 31 日

碳交易机制下考虑排碳谎报的双渠道供应链定价与减排决策研究

摘 要

为应对日益严峻的环境问题，许多国家纷纷制定和实施温室气体减排政策。碳交易机制作为一种市场驱动的碳排放控制策略，已得到广泛的认可。然而，该机制的有效实施依赖于企业碳排放数据的准确披露，这可能导致企业资源成本、商业计划等敏感信息的泄露，从而削弱其竞争优势，影响企业参与碳排放信息披露的积极性。换言之，碳交易政策的推进存在着碳信息不对称的困难，可能会造成企业间的谎报行为。

在双渠道供应链中，渠道参与者之间的信息流通常呈现出不对称性特征。此种信息不对称，加之个体对于私有信息的保有以及对利润最大化的追求动机，往往会导致在双渠道供应链中频繁发生信息的不真实报告行为。此外，政府补贴作为激励低碳创新的手段，在信息不对称的情境下，其不同策略对供应链最优决策影响各异。同时，随着消费者环保意识的增强，企业在承担社会责任方面面临更高要求，而在信息不对称的情况下，不同的企业社会责任(CSR)策略亦对供应链决策产生差异化影响。因此，在碳交易机制的背景下，探究双渠道供应链中碳信息不对称现象下，政府补贴与 CSR 对制造商谎报行为及供应链成员最优决策的影响具有重要的现实意义。

本文在碳交易机制背景下，建立一个由单一制造商和单一零售商组成的二级双渠道低碳供应链，考虑双渠道制造商对产品初始碳排放量信息进行谎报，构建了制造商主导的谎报模型，从环境效益、经济效益和社会效益角度分析了制造商谎报行为对双渠道供应链成员最优决策的影响；其次，在碳交易机制的背景下引入碳补贴政策，考虑政府对制造商进行碳减排量补贴

或碳减排成本补贴，构建了制造商主导的谎报且碳减排量补贴模型(SR 模型)、谎报且碳减排成本补贴模型(SD 模型)，探讨了制造商的谎报行为对补贴效果的影响以及政府补贴对制造商谎报决策的影响。最后，将企业社会责任因素引入双渠道供应链中，与初始碳排放量信息不对称同时考虑，构建了制造商谎报行为下仅制造商承担 CSR 模型(MC 模型)、仅零售商承担 CSR 模型(RC 模型)以及制造商和零售商同时承担 CSR 模型(CC 模型)，比较了不同 CSR 承担策略对制造商谎报行为以及供应链关键指标的影响。根据以上研究内容，本文主要研究结论如下：

(1) 制造商的谎报决策与碳交易价格、谎报系数密切相关。若碳交易价格低于阈值，则制造商会选择“低报”，而当碳交易价格高于阈值时，制造商会选择“高报”。不论碳交易价格如何，制造商“高报”(“低报”)时的社会福利均小于(大于)“实报”。惩罚措施和激励措施在满足特定的条件时能够有效约束制造商的谎报行为。若碳交易价格较低或初始碳排放量较小，则惩罚措施效果更好；否则，反之。惩罚措施和激励措施的社会福利均与消费者线下渠道偏好系数负相关，且大多数情况下激励措施优于惩罚措施。

(2) 制造商的谎报行为对两种补贴策略下的碳减排量、市场总需求以及制造商利润带来或消极或积极的影响，主要取决于碳交易价格的高低。在制造商谎报行为下，两种补贴策略下的销售价之间的大小关系比较复杂，当两种补贴系数满足一定条件时，存在 SR 模型销售价始终大于 SD 模型的情况。在制造商“高报”的情况下，碳减排成本补贴策略对环境效益和经济效益的积极影响更大。若政府以环境效益最大化为目标，则应选择碳减排成本补贴策略；若以社会效益最大化为目标，则碳减排量补贴策略是政府更合适的选择。

(3) 无论在何种 CSR 承担策略下，CSR 承担水平并不会影响制造商的谎报决策，制造商“低报”时的社会福利并非一定大于“实报”情形，而“高报”

时的社会福利一定小于“实报”情形。在制造商谎报行为下，制造商谎报且仅零售商承担 CSR 模型的碳减排量和市场总需求最大，制造商谎报且同时承担 CSR 模型次之。当碳交易价格较高时，销售价随着制造商承担 CSR 比例的增加而下降。

关键词：双渠道供应链，碳交易机制，谎报行为，政府补贴，企业社会责任

RESEARCH ON DUAL-CHANNEL SUPPLY CHAIN PRICING AND EMISSION REDUCTION DECISION-MAKING CONSIDERING CARBON EMISSION FALSE REPORTING UNDER CARBON TRADING MECHANISM

ABSTRACT

In order to cope with the increasingly severe environmental problems, many countries have formulated and implemented greenhouse gas emission reduction policies. Carbon trading scheme has been widely recognized as a market-driven carbon emission control strategy. However, the effective implementation of this mechanism depends on the accurate disclosure of carbon emission data of enterprises, which may lead to the disclosure of sensitive information such as resource costs and business plans of enterprises, thus weakening their competitive advantages and affecting the enthusiasm of enterprises to participate in the disclosure of carbon emission information. In other words, the promotion of carbon trading policy has the difficulty of carbon information asymmetry, which may cause the cheating behavior among enterprises.

In a dual-channel supply chain, the information flow between channel participants usually presents an asymmetric feature. This kind of information asymmetry, coupled with the individual's retention of private information and the pursuit of profit maximization motivation, often leads to the frequent occurrence of false information reporting behavior in the dual-channel supply chain. In addition, government subsidies, as a means to encourage low-carbon innovation,

have different impacts on the optimal decision-making of supply chain in the context of information asymmetry. At the same time, with the increasing environmental awareness of consumers, enterprises are facing higher requirements in terms of social responsibility, and in the case of information asymmetry, different corporate social responsibility (CSR) strategies also have a differentiated impact on supply chain decision-making. Therefore, in the context of carbon trading mechanism, it is of great practical significance to explore the effects of government subsidies and CSR on manufacturers' misreporting behavior and optimal decision-making of supply chain members under the asymmetry of carbon information in dual-channel supply chains.

Under the background of carbon trading mechanism, this paper establishes a two-level dual-channel low-carbon supply chain consisting of a single manufacturer and a single retailer. Considering that dual-channel manufacturers lie about the initial carbon emission information of products, a manufacturer-led lying model is constructed. From the perspectives of environmental benefit, economic benefit and social benefit, the influence of manufacturers' misreporting on the optimal decision of dual-channel supply chain members is analyzed. Secondly, the carbon subsidy policy is introduced in the context of carbon trading mechanism. Considering the government's carbon emission reduction subsidy or carbon emission reduction cost subsidy to manufacturers, the manufacturer-led false and carbon emission reduction subsidy model (SR model) and false and carbon emission reduction cost subsidy model (SD model) are constructed. The influence of manufacturers' misreporting on subsidy effect and government subsidy on manufacturers' misreporting decision are discussed. Finally, the CSR factor is introduced into the dual-channel supply chain and considered together with the initial carbon emission information asymmetry, and the manufacturer-only CSR model (MC model), the retailer-only CSR model (RC model), and the simultaneous CSR model of the manufacturer and retailer (CC model) are constructed under the manufacturer's misreporting behavior, and the impacts of

the different CSR assumption strategies on the manufacturer's misreporting behavior and key indicators in the supply chain are compared. and key supply chain metrics. According to the above research content, the main research conclusions of this paper are as follows:

(1) Manufacturers' misreporting decisions are closely related to carbon trading prices and misreporting coefficients. If the carbon trading price is below the threshold, the manufacturer will choose to "underquote", and when the carbon trading price is above the threshold, the manufacturer will choose to "overquote". Regardless of the price of carbon traded, the social benefits of "over-reporting" ("under-reporting ") by manufacturers are smaller (greater) than those of "under-reporting". Punishment and incentive measures can effectively restrain manufacturers' misreporting behavior when certain conditions are met. If the carbon trading price is lower or the initial carbon emissions are smaller, the penalty measures are more effective. Otherwise, vice versa. The social welfare of punishment measures and incentive measures are negatively correlated with consumers' offline channel preference coefficient, and incentive measures are better than punishment measures in most cases.

(2) The negative or positive effects of manufacturers' misreporting on carbon emission reduction, total market demand and manufacturers' profits under the two subsidy strategies mainly depend on the level of carbon trading prices. Under the manufacturer's misreporting behavior, the size relationship between the sales price under the two subsidy strategies is complicated. When the two subsidy coefficients meet certain conditions, there is a situation that the sales price of SR model is always greater than that of SD model. In the case of "overreporting" by manufacturers, the carbon reduction cost subsidy strategy has a greater positive impact on environmental and economic benefits. If the government aims to maximize the environmental benefits, it should choose the carbon reduction cost subsidy strategy. If the goal is to maximize social benefits, the carbon emission reduction subsidy strategy is a more appropriate choice for the government.

(3) No matter what kind of CSR commitment strategy, the level of CSR commitment does not affect the manufacturer's decision of misreporting. The social welfare of the manufacturer in the case of "underreporting" is not necessarily greater than that in the case of "underreporting", and the social welfare in the case of "overreporting" is definitely smaller than that in the case of "underreporting". Under the manufacturer's misrepresentation behavior, the carbon emission reduction and total market demand of the manufacturer's misrepresentation and only the retailer's commitment to the CSR model are the largest, followed by the manufacturer's misrepresentation and commitment to the CSR model. When the carbon trading price is high, the selling price decreases as the proportion of CSR borne by the manufacturer increases.

KEY WORDS: Dual-channel supply chain, Carbon trading mechanism, Misrepresentation, Government subsidies, Corporate Social Responsibility

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	IV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
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.....	5
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.....	6
第 2 章 文献综述.....	8
2.1 低碳供应链文献研究述评	8
2.1.1 考虑碳交易政策的低碳供应链管理相关研究.....	8
2.1.2 考虑碳补贴政策的低碳供应链管理相关研究.....	9
2.2 双渠道供应链文献研究述评	11
2.3 信息不对称文献研究述评	12
2.4 企业社会责任文献研究述评	13
第 3 章 碳交易机制下考虑奖惩机制的排碳谎报双渠道供应链定价与减排决策研究 .	16
3.1 模型描述	16
3.2 符号说明和基本假设	17
3.3 模型的建立、求解与分析	19
3.3.1 谎报模型(M 模型)	19
3.3.2 实报模型(S 模型)	21
3.3.3 惩罚模型(P 模型)	25
3.3.4 激励模型(I 模型)	28
3.4 数值分析	30

3.4.1 谎报系数和碳交易价格对制造商利润的敏感性分析.....	31
3.4.2 惩罚系数和发现概率对制造商利润及碳减排量的敏感性分析.....	31
3.4.3 区块链技术成本和分担比例对制造商利润及碳减排量的敏感性分析..	32
3.4.4 P 模型与 I 模型社会福利的比较分析	34
3.5 本章小结	37
第 4 章 碳交易机制下考虑补贴与排碳谎报的双渠道供应链定价与减排决策研究....	39
4.1 模型描述	39
4.2 符号说明和基本假设	40
4.3 模型建立与求解	41
4.3.1 制造商谎报且碳减排量补贴模型(SR 模型)	41
4.3.2 制造商实报且碳减排量补贴模型(NR 模型)	42
4.3.3 制造商谎报且碳减排成本补贴模型(SD 模型)	43
4.3.4 制造商实报且碳减排成本补贴(ND 模型)	44
4.4 模型对比分析	47
4.5 数值分析	50
4.5.1 谎报系数对供应链参数的敏感性分析.....	51
4.5.2 碳配额比例对供应链参数的敏感性分析.....	52
4.5.3 补贴系数对供应链参数的敏感性分析.....	53
4.6 本章小结	54
第 5 章 碳交易机制下考虑 CSR 与排碳谎报的双渠道供应链定价与减排决策研究....	57
5.1 模型描述	57
5.2 符号说明和基本假设	58
5.3 模型建立与求解	59
5.3.1 制造商谎报且制造商单独承担 CSR(MC 模型)	59
5.3.2 制造商实报且制造商单独承担 CSR(NMC 模型)	60
5.3.3 制造商谎报且零售商单独承担 CSR(RC 模型)	62
5.3.4 制造商实报且零售商单独承担 CSR(NRC 模型)	64
5.3.5 制造商谎报且同时承担 CSR(CC 模型)	66
5.3.6 制造商实报且同时承担 CSR(NCC 模型)	68
5.4 模型对比分析	72

5.5 数值分析	74
5.5.1 谎报系数对供应链参数的敏感性分析.....	74
5.5.2 碳配额比例对供应链参数的敏感性分析.....	75
5.5.3 CSR 承担水平对供应链参数的敏感性分析	76
5.5.4 制造商 CSR 承担比例对 CC 与 NCC 模型关键参数的影响.....	78
5.6 本章小结	79
第 6 章 结论与展望.....	81
6.1 研究结论	81
6.2 不足与展望	82
参考文献.....	83
附 录.....	90
攻读硕士学位期间发表的学术论文.....	111
致 谢.....	112

第 1 章 绪论

1.1 研究背景和意义

近年来，全球碳排放量持续增长，温室气体浓度升高，导致地表温度上升。气候变化与过量排放的二氧化碳已对人类生存和全球发展构成重大威胁，引发全球高度关注。在第七十五届联合国大会上，习总书记表示，中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，以实现二氧化碳排放的峰值目标，并争取在 2060 年前实现碳中和。这一目标预示着中国未来十年的深度低碳转型，并推动全面的低碳变革。各国政府正出台各种政策以应对日益严重的环境问题，如碳税制度、碳交易机制、碳补贴、政府绿色采购等。通过宏观政策与市场机制的结合，尝试开展减排行动。

碳交易机制作为一种常见的减排机制，在全球范围内得到广泛应用。特别是，欧洲的碳排放交易体系(EU-ETS)是目前全球最大的碳交易市场，它强制限定企业的碳排放总量，并设定了到 2020 年实现 20%-30%的减排目标。中国自 2011 年起在七个地区启动了碳交易试点，这些试点为中国的碳交易市场提供了宝贵的经验。此机制允许企业通过增加减排投资减少碳排放，或通过购买碳配额以遵守总排放限制，同时通过碳市场可以明确企业在行业内的碳排放地位，促使其在采购及生产决策中做出前瞻性调整^[1]。然而，该机制的成效受限于企业碳排放数据准确性和公开程度。数据披露可能泄露企业的资源成本、商业策略等敏感信息，进而影响其竞争力和碳信息披露的意愿。在中国，企业主要通过参与碳披露项目和发布社会责任报告等方式公开碳排放信息。但根据碳披露项目对中国 100 家上市公司的调查显示，不足半数的公司愿意进行碳排放审查，这揭示了碳信息公开方面的挑战^[2]。

碳排放信息的不完全披露增加了企业谎报碳排放量的潜在风险。受到低碳政策导致收益下降和缺乏资金进行减排技术升级的双重压力，部分企业可能会通过伪报碳排放数据以获得市场竞争优势，试图补偿因实施低碳政策而遭受的利润损失。例如，2015 年，大众汽车因谎报碳排放量而备受关注，约有 9.8 万辆汽油车涉及伪造二氧化碳排放数据。2022 年，包括中碳能投科技(北京)有限公司、青岛希诺新能源有限公司在内的四家机构

因碳排放申报数据造假被生态环境部通报。新能源汽车企业利用新能源企业的清洁生产成本和技术的信息进行诈骗。在二手车市场上出现的“次品车”问题等等，这些案例揭示了信息不对称下的欺诈行为。这种信息不对称不仅影响供应链各方的利润，还可能给政府和企业带来重大影响^[3]。因此，探究供应链成员在碳信息不对称条件下的谎报行为具有重要意义。尽管现有研究主要关注供应链中的成本信息和需求信息谎报，关于产品碳排放信息谎报的研究相对不足。本研究不仅探讨了高报和低报初始碳排放情况的谎报行为，从而丰富了关于谎报行为的研究，还提出了应对初始碳排放信息不对称问题的惩罚和激励机制。这些机制旨在为相关政策的制定与完善提供指导，为治理谎报行为提供依据。

此外，在电子商务和移动互联网迅猛发展的背景下，部分消费者的购物习惯正逐渐向网上购物转变。这一趋势促使制造商不仅要维持传统零售渠道，同时也要积极发展线上销售渠道，以便更好的掌握市场动态，并获得更多的市场份额。例如，苹果公司采用线下传统批发和线上直销相结合的双渠道模式来销售其产品。某些品牌影响力较低的制造商为避开像沃尔玛这样大型零售商的市场控制，也会引入在线渠道。然而，渠道冲突一直是双渠道供应链管理中不可回避的问题。通常消费者对线上渠道和线下渠道有不同的偏好。那么，如何在减少渠道冲突的同时实现双渠道供应链高效运作，从而为顾客创造价值等等，是企业所要面临的挑战。因此，包含传统零售和在线直销的双渠道供应链已成为供应链管理领域的一个研究热点。迄今为止，大量学者已经对双渠道供应链体系进行了深入的探讨和研究。然而，这些研究的焦点主要集中在双渠道供应链的价格设定、服务水平决策以及渠道间的协调机制等领域。在低碳政策背景下，针对制造商关于产品初始碳排放谎报行为的研究相对较少。本文以双渠道低碳供应链为研究对象，专注于制造商初始碳排放谎报行为的研究，旨在进一步完善双渠道供应链的相关理论。

在低碳环保政策持续推进和消费者低碳环保意识逐渐增强的背景下，制造企业积极研发和生产低碳产品^[4]。例如，格力、美的等企业研发了无氟变频空调；比亚迪、上汽等企业则推出了新能源汽车。尽管如此，低碳产品的研发和生产投入巨大，这不仅增加了企业的运营成本，还导致低碳产品的销售价格相对较高，从而阻碍了市场的扩张^[5]。政府补贴政策是促进企业研发和生产低碳产品的一种有效激励方式。德国政府长期资助LED技术的发展，而中国自2009年起实施的“节能产品惠民工程”对高效节能产品提供财政补贴，以降低生产商在技术开发和环保零部件采购上的成本^[6]。此外，现有的低碳供应链研究多基于信息对称的假设，但实际情况中，随着低碳政策的广泛实施，碳排

放量、碳配额及碳价格等信息常常被视为企业的敏感信息，从而产生了信息不对称的问题。本研究聚焦于碳交易机制下，引入政府补贴政策，探讨制造商初始碳排放量谎报行为对不同补贴策略以及低碳供应链成员最优决策的影响，具有重要的现实意义。

在追求更良好的社会可持续发展过程中，企业社会责任日益受到重视，企业如何履行社会责任成为公众关注的焦点。1924 年，美国学者谢尔顿(Oliver Sheldon)首次界定了“企业社会责任”(Corporate Social Responsibility, 简称 CSR)，认为企业应增进社区利益，社区利益应超越企业盈利^[7]。2020 年 7 月 21 日，习近平总书记在企业家座谈会上指出：“企业既要有经济责任、法律责任，也要有社会责任、道德责任。”近年来，随着人们生活水平的提高以及思想的进步，企业对待企业社会责任的态度已经从最初的抵触逐渐转变为积极响乃至主动倡导。自 2009 年起，中国企业社会责任报告质量综合指数总体呈现出稳定上升的趋势，2021 年进入世界 500 强的 143 家中国企业中 83.46%发布了企业社会责任报告，在中国企业家协会首次超过半数的企业公布 CSR 报告，且企业对客户、社区和环境等利益相关方履责信息披露水平也不断提升^[8]。本文基于上述背景，将企业社会责任引入双渠道供应链中，研究不同承担企业社会责任策略对制造商谎报行为的影响，有助于进一步完善企业社会责任的相关研究。

1.2 研究内容与研究方法

1.2.1 研究内容

本文以双渠道低碳供应链为研究对象，在制造商为主导者和碳交易机制的背景下采用博弈论方法对制造商谎报产品初始碳排放量行为进行研究。首先，本文在仅考虑碳交易机制的背景下考察制造商的谎报行为，通过比较制造商谎报与“实报”情形下的均衡解明确制造商选择谎报的条件。进一步，从环境、经济与社会三个角度分析了制造商谎报行为对双渠道供应链成员最优决策的影响，并对制造商“高报”行为设计了惩罚与激励措施，评估这两种措施的效果及其优势；其次，考虑到政府补贴政策在促进企业节能减排、减缓企业碳减排成本压力方面的重要作用。本文在碳交易机制的背景下引入政府补贴政策，主要考虑政府对制造商进行碳减排量补贴以及碳减排成本补贴，探讨制造商的谎报行为对补贴效果的影响以及不同补贴策略对制造商谎报决策的影响。比较制造商谎报与“实报”时的均衡解，分析碳配额比例、补贴系数、消费者渠道偏好系数等对制造商谎报行为的影响。最后，考虑到企业的社会责任感是连接企业和消费者群体的重要桥梁，其在市场竞争中的关键作用。本文在碳交易机制以及供应链成员承担企业社会责任

的背景下进一步研究制造商的谎报行为。从环境、经济和社会角度三个角度出发，分析不同企业社会责任承担策略对谎报行为以及对双渠道供应链最优决策的影响。具体内容如下：

第一章：本章旨在详细介绍研究的背景与提出的问题，并阐明本文的理论和现实意义。同时，本章还对在研究过程中应用的研究方法以及本文的创新之处进行系统的总结和概括。

第二章：本章主要是对低碳供应链、双渠道供应链、信息不对称等方面的文献进行总结概括，通过对已有研究成果的回顾和总结，明确本研究与前人工作的差异性，并为后续模型建立与分析提供借鉴和理论支撑。

第三章：本部分主要在碳交易机制下研究制造商谎报产品初始碳排放量对双渠道低碳供应链的影响。首先，详述本部分的模型设定、符号和以及相关假设；然后建立模型并求最优解，比较制造商谎报与实报时的均衡解，探讨碳配额比例系数、谎报系数及消费者渠道偏好等主要因素是如何影响最优解的。针对制造商的“高报”行为设计惩罚机制和激励机制，最后进行数值分析，提出相关建议。

第四章：本部分主要在碳交易机制和政府低碳补贴政策下研究制造商谎报产品初始碳排放量对双渠道低碳供应链的影响。首先，阐述本部分的模型设定、符号和以及相关的假设；然后建立模型并求最优解，同一补贴策略下比较制造商谎报与不谎报时的均衡解以及在制造商谎报行为下比较两种补贴策略下的均衡解，探讨碳配额比例系数、补贴系数、谎报系数及消费者渠道偏好等主要因素如何影响制造商的谎报决策，最后进行数值分析，提出相关建议。

第五章：本部分主要在碳交易机制和供应链成员承担企业社会责任下研究制造商谎报产品初始碳排放量对双渠道低碳供应链的影响。首先，阐述本部分的模型设定、符号和以及相关的假设；然后建立模型并求最优解，探讨碳配额比例、企业社会责任承担水平、谎报系数及消费者渠道偏好等主要因素对供应链最优决策的影响。同一 CSR 承担策略下比较制造商谎报与不谎报时的均衡解以及在制造商谎报行为下比较三种 CSR 承担策略的均衡解，最后进行数值分析，提出相关建议。

第六章：主要对前文的结论进行综合归纳与总结，指出研究过程中的局限性，并对未来的研究方向提出展望。

1.2.2 研究方法

(1) 文献研究法

本文通过广泛查阅关于双渠道供应链、碳交易政策、信息不对称、政府补贴、企业社会责任等方面的相关文献，分析归纳现有研究的贡献与不足，提炼出本文所要研究的问题。此方法不仅为本研究提供了坚实的理论基础，确保了模型构建的科学性与合理性，同时也为理解研究领域的现状与趋势提供了重要视角。

(2) 博弈论方法

本文在掌握解双渠道供应链的基础理论和常用模型的基础上，构建了碳交易机制下存在初始碳排放量信息不对称的双渠道供应链定价与减排决策模型。通过采用 Stackelberg 博弈的理论框架，本研究采用逆向递推法对模型进行求解，揭示了制造商和零售商之间的动态博弈过程及均衡结果。

(3) 对比分析法

本文运用对比分析法，将建立的碳排量信息对称与不对称情形下的模型均衡解进行比较，得出制造商谎报的条件，为企业在面对碳排放信息不对称时的决策制定、政府参与低碳供应链管理的策略制定提供了理论依据和实践参考。

(4) 数值仿真法

通过在 Matlab2019b 软件环境下对模型进行数值仿真，本研究合理设定了模型参数，以模拟不同场景下的均衡结果。此方法使得研究能够具体分析制造商不实报告行为对双渠道供应链均衡结果的影响，从而验证了本研究提出模型的合理性和有效性，增强了研究结果的可信度。

1.3 技术路线与创新点

1.3.1 技术路线

本文的技术路线如下图 1-1 所示：

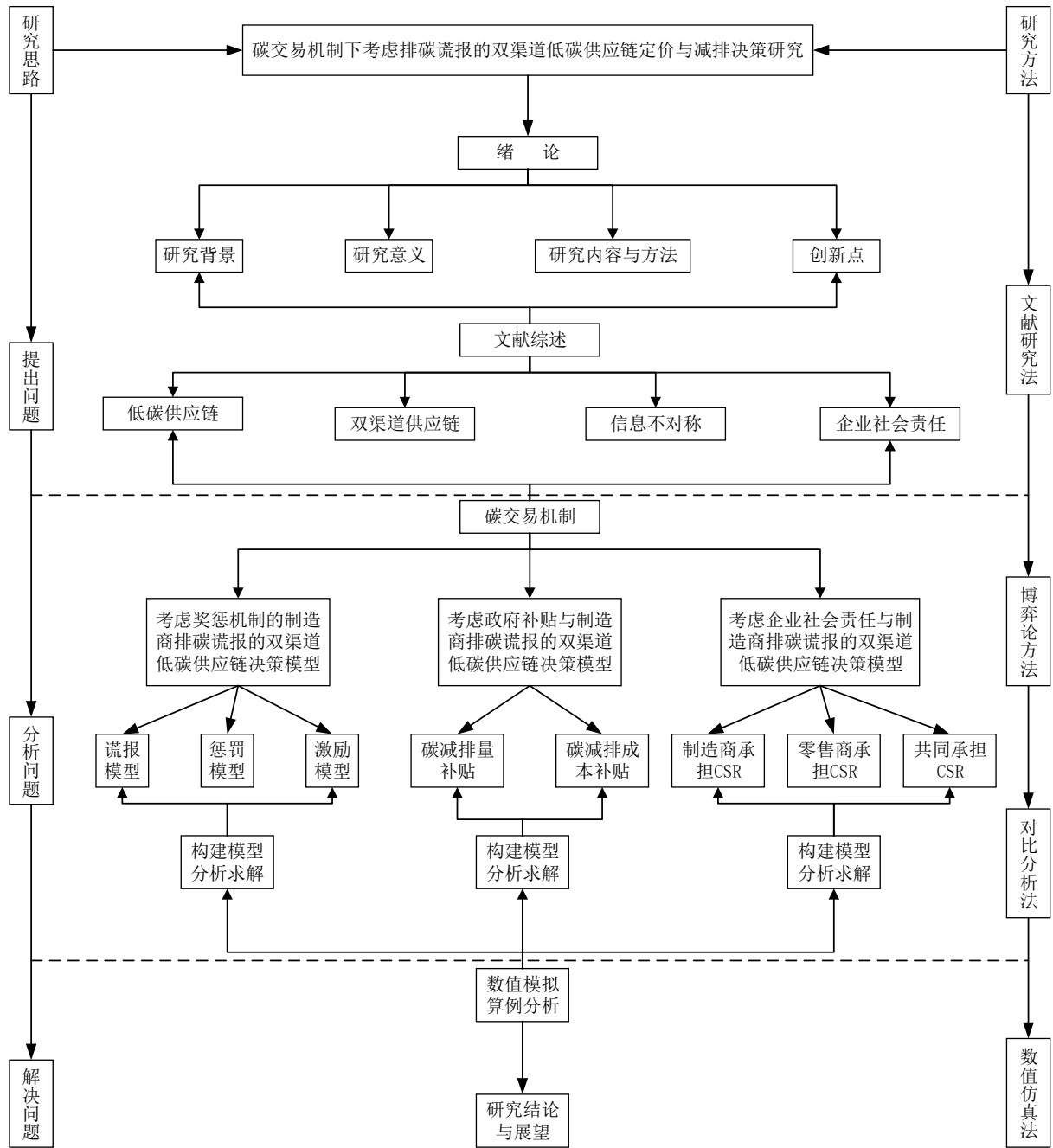


图 1-1 技术路线图

1.3.2 创新点

本文的创新点主要可以概括为以下几个方面：

(1) 在双渠道供应链管理背景下对于谎报行为进行研究。本文将研究焦点聚焦于双渠道供应链管理出现的谎报行为，并以低碳供应链运营过程中出现的实际问题作为切入点。通过对双渠道供应链框架下的谎报行为进行深入分析，本文探讨了此类行为对双渠道供应链最优决策的影响，反映出当前供应链运营实践中的实际情境。

(2) 碳交易政策下制造商的初始碳排放量谎报行为研究。与现有文献相比，本研究

扩展了信息不对称研究的范畴，从成本和需求的信息不对称转向探讨碳排放量信息的不对称问题。本文在碳交易政策框架下，结合政府补贴政策，研究了制造商关于产品初始碳排放量的不实报告行为，以及这一行为在低碳政策影响下对供应链成员决策的具体影响，为制定相关低碳政策提供了理论支撑。

(3) 企业社会责任与制造商谎报行为的关联研究。本文进一步将谎报行为与企业社会责任的承担策略相结合，探讨了不同企业社会责任策略对制造商谎报行为的影响。通过从环境效益、经济效益和社会效益三个维度分析，本研究深入探讨了制造商的谎报行为如何影响供应链各节点企业的最优策略选择，为供应链管理实践提供了更为全面的理论指导。

第 2 章 文献综述

鉴于本文所研究的问题，本章旨在综述国内外在相关领域的主要理论框架及研究进展，归纳现有研究成果及其存在的不足。本部分内容将系统梳理以下四个方面的文献：低碳供应链的相关研究述评；双渠道供应链的相关研究述评；信息不对称问题的相关研究述评；以及企业社会责任的相关研究述评。

2.1 低碳供应链文献研究述评

所谓低碳供应链，可被理解为企业低碳管理与供应链管理相结合的产物^[9]，代表了一种以环境保护为核心考量因素，贯穿产品生命周期全阶段（即从生产、销售至使用过程）的管理模式^[10]，该模式的一个主要目的在于降低整个供应链过程中的碳排放量，对任何组织而言，这都被视为一项战略性的紧迫任务^[11]。诸如碳交易机制、碳补贴、碳税和政府的绿色采购政策等，均为常见的碳排放控制策略。鉴于本文研究内容主要关注碳交易和碳补贴政策，因此，本节对相关文献的综述将专注于分析这两项政策的实施效果与影响。

2.1.1 考虑碳交易政策的低碳供应链管理相关研究

碳交易机制被认为是更符合市场规律的控排手段^[12]，学者们对碳限额与交易机制对供应链减排策略的影响进行了广泛研究。例如，骆瑞玲^[13]和何华^[14]的研究专注于探讨碳限额与交易机制如何影响减排技术的投资决策，其研究结果揭示了低碳技术投资对提高企业利润的潜力。Xu 等^[15]的研究在单一渠道背景下评估了碳限额与交易监管对供应链生产和减排策略的作用。Du 等^[16]则聚焦于碳配额供应商与碳排放企业组成供应链，发现高碳价将对碳排放企业的产品生产产生显著影响。陈晓红等^[17]则从碳交易价格的角度，研究了该机制对供应链碳排放的影响，并分析了不同类型制造商（清洁型、低减排成本中间型、高减排成本中间型、污染型）的最优单位碳排放量。林强等^[18]构建了一种考虑资金约束的制造商与零售商组成的低碳供应链的合作减排决策模型，在碳交易市场和碳配额限制背景下，分析了融资合作减排和技术合作减排时各成员的最优决策、利润及碳

排放量。进一步地,张川等^[19]在碳限额与交易机制及消费者低碳偏好的背景下,探讨了资金约束的制造商与资金充裕的零售商构成的供应链中,不同融资方式(银行贷款、提前支付折扣、提前支付回购)对低碳供应链的减排与定价决策的影响,指出,当碳交易价格较高时,提前支付回购方式能够最大化制造商的碳减排量。

上述研究为碳交易政策对低碳供应链最优决策的影响提供了丰富的理论基础。然而,他们对碳交易政策如何影响双渠道供应链参与者决策的探讨尚显不足。因此不少学者将研究聚焦于双渠道供应链。例如,张令荣等^[20]同时考虑消费者具有低碳和渠道偏好,在碳配额交易政策背景下,建立了包括单一线下渠道减排、双渠道不减排以及双渠道减排在内的决策模型,旨在探讨碳配额交易政策对制造商减排决策的具体影响。该研究表明,双渠道供应链中,碳配额交易价格对碳减排率的影响与单位产品初始碳配额大小密切相关。覃艳华和曹细玉^[21]则通过构建零售商是否加入制造商低碳宣传计划的分散式与集中式决策博弈模型,在碳限额及交易机制下,讨论碳减排技术投入和制造商低碳宣传对供应链利润的影响,分析发现双渠道供应链利润与碳排放交易价格负相关。在此基础上,曹细玉等^[22]进一步探讨了零售商进行低碳宣传,分别构建了有无低碳宣传成本分担的博弈模型,发现双渠道供应链利润与碳排放交易价格呈现 U 形关系。王红春等^[23]则在考虑消费者低碳偏好的前提下,建立了碳限额交易机制下的双渠道供应链集中与分散决策博弈模型,比较了两种情形下碳交易价格对双渠道供应链定价决策的影响。不同于以上研究,陈静等^[24]从一个由供应商、制造商以及零售商组成的三级供应链出发,考虑制造商同时开设双渠道销售低碳产品的情境。通过以产品减排量为状态变量,构建了制造商主导的纵向向上及纵向向下两种合作减排微分博弈模型,进而研究了不同合作方向下供应链成员的最优均衡策略。

通过对现有文献的综合分析,我们发现,大部分研究在探讨碳交易政策对供应链最优策略决策影响的过程中,均假定信息对称的前提条件。然而,随着低碳政策的实施,与碳交易政策相关的信息往往转变为企业内部的敏感信息。出于追求利润最大化的目标,供应链各参与方之间容易出现信息不对称的现象。因此,深入研究碳交易政策背景下的信息不对称问题,对于理解和优化供应链中的决策行为具有至关重要的理论和实践意义。

2.1.2 考虑碳补贴政策的低碳供应链管理相关研究

为推进环境可持续发展,达到改善环境质量的目的,各国政府都把环境质量改善的重点放在低碳产品的开发和推广上。政府补贴对低碳供应链战略的影响一直受到学术界

的广泛关注。部分研究者专注于探讨单一主体受补贴影响的情景。例如, Meng 等^[25]利用 Stackelberg 博弈论的研究方法, 考虑了政府补贴和无政府补贴两种情况, 发现政府补贴能使绿色产品的价格降低, 从而扩大绿色产品的市场规模。Sinayi 等^[26]通过建立博弈模型, 考虑制造商自主进行减排研发时, 研究无政府补贴和依据减排水平的两种补贴方式下供应链的决策问题。Guo 等^[27]考虑到供应中断及政府补贴对闭环供应链的影响, 指出政府通过适当的补贴政策可以激励物品回收。江佳秀等^[28]则从政府碳补贴和企业社会责任(CSR)的角度, 分析了有无政府补贴对供应链减排策略的影响, 得出了政府提供碳补贴能提高供应链成员的利润并增加碳减排程度的结论。韩同银等^[4]探讨了在政府补贴的双渠道供应链中, 零售商公平关切对产品定价、绿色度和社会福利的影响。研究指出, 当产品绿色度低于某个阈值, 政府补贴政策可以激励企业扩大绿色研发和生产投入。Che 等^[29]建立了一个包含低碳减排制造商与零售商在内的双渠道供应链决策模型, 考虑研发补贴和单位产量补贴两种不同的政府补贴方式, 分析不同政府补贴方式对制造商和零售商的影响。曹细玉等^[30]探讨了在碳限额与交易机制背景下, 融入低碳补贴和零售商低碳宣传因素的双渠道供应链联合减排策略问题。研究结果显示, 最优减排率、最优低碳宣传水平与政府补贴比例正相关。

以上研究主要关注了单一主体的政府补贴策略, 尚未深入探讨对不同主体实施补贴的情形。Li 等^[31]针对疫苗供应链环境, 对比了无补贴、补贴制造商以及补贴零售商三种不同情况, 旨在评估不同的政府补贴策略对疫苗制造商和零售商利润的影响。研究结果揭示, 补贴零售商可以提高供应链成员的均衡利润, 而补贴制造商则不能达到这一效果。孙迪等^[32]提出, 无论是对制造商还是消费者实施政府补贴, 都能有效提升绿色产品的市场接受度。Bian 等^[33]在消费者关注环境的背景下, 采用博弈论方法研究对消费者补贴和制造商补贴进行研究, 发现消费者补贴能够带来更大的社会福利。Sun 等^[34]分析了消费者补贴和制造商补贴在电动汽车行业新技术发展上的不同影响, 研究表明消费者补贴在推动电动汽车普及和技术进步方面比制造商补贴更为有效。Wang 等^[35]考量了政府提供三种不同的环保补贴, 即制造商环保设计补贴、零售商销售努力补贴和消费者绿色消费补贴, 构建了由政府、制造商和零售商组成的 Stackelberg 模型, 比较三种补贴方案下的供应链最优决策。

通过对上述两节文献的回顾, 显而易见的是, 在低碳政策环境下的供应链管理问题已逐渐成为学术界关注的焦点。尽管如此, 无论是碳交易政策还是碳补贴政策相关的研究文献, 主流的研究倾向仍然集中在供应链的生产、物流、以及减排等方面, 而在碳信

息的不对称性及其协调机制等方面的研究相对较少。鉴于此,本研究旨在探讨在碳交易机制背景下,制造商的虚假报告行为如何影响双渠道低碳供应链的最优决策。同时,通过引入碳补贴政策,本文进一步分析制造商的虚假报告行为对不同补贴策略的潜在影响。

2.2 双渠道供应链文献研究述评

电子商务的迅速发展促进了传统供应链结构向融合网络直销的双渠道供应链的逐步演化,进而为供应链管理领域引入了新的挑战与机遇。鉴于此,融合线上销售与传统零售模式的双渠道供应链逐渐成为研究焦点。众多学者已就双渠道供应链渠道结构、定价策略、渠道竞争与协调等方面进行了广泛研究。

在渠道结构方面,梁喜等^[36]基于消费者对渠道及低碳产品的偏好,对比分析了三种不同渠道结构中制造商和零售商的最优定价决策与减排策略,同时对两种双渠道的利润分享协调策略进行了探讨。Xu 等^[37]在限额与交易制度的约束下,考察了低碳偏好和渠道替代对双渠道供应链决策和协调的影响。Ji 等^[38]结合限额交易制度与消费者低碳偏好,建立单渠道单减排、双渠道单减排、单渠道联合减排、双渠道联合减排四种详细模型,以确定最佳的减排策略。Huang 等^[39]考察了转售渠道、代理渠道、双渠道三种供应链结构,并探讨了双重目的关注对企业竞合关系的战略影响。在双渠道闭环供应链中,Zheng 等^[40]探究了三种不同的回收渠道结构对制造商的逆向渠道选择和协调机制设计的影响。

在定价策略方面,牛志勇等^[41]探讨了在消费者公平偏好的背景下,多渠道零售商是否选择线上线下同价策略的问题,发现公平偏好一定程度上能够缓和线上线下渠道间的价格竞争。Li 等^[42]针对一个由风险中性供应商和风险厌恶零售商组成的双渠道供应链系统,研究了其定价策略,并提出了一个优化的风险共担契约以缓解供应链中的冲突。Li 等^[43]分析了生产绿色产品的制造商与零售商构成的绿色双渠道供应链在定价与竞争决策上的行为,发现集中决策的零售价格高于分散决策的零售价格。Xiao 等^[44]发现,当线下渠道的预订价格设置较低,且线上渠道提供定制化产品时,引入线上渠道会使线下渠道的批发价格和零售价格上升。余利娥等^[45]考虑消费者对低碳的偏好存在差异,将消费者分为高低两种低碳偏好类型,研究了这种偏好差异对双渠道供应链定价策略的影响。

在渠道竞争与协调方面,陈远高和刘南^[46]在产品差异性明显的条件下,研究了同时存在直销和传统渠道的双渠道供应链系统的协调问题。研究显示,较高的产品差异化水平可以为在斯塔克伯格博弈中处于优势地位的制造商带来更高的利润。David 等^[47]考察了拥有在线渠道的供应商与多个零售商之间的竞争问题,并提出了一种能够有效协调供

供应链的线性数量折扣合同，此合同有助于缓和渠道间的竞争。Baal 等^[48]探究拥有多个分销渠道的零售商如何在不同渠道之间实现协调。Zhang 等^[49]利用批发价格契约协调了需求中断和生产成本中断情况下的双渠道供应链。

通过综合回顾和分析上述文献，可以发现目前学术界对于双渠道供应链研究的角度不尽相同，对于企业实践具有重要的意义。以上学者针对双渠道供应链定价等决策问题做了大量富有成效的工作，但他们忽视了信息不对称对双渠道供应链成员决策的潜在影响。因此，受上述文献的启发，本文在双渠道供应链背景下，特别关注制造商在产品初始碳排放量信息上的不诚实行为，旨在分析这种行为如何影响双渠道低碳供应链的最优决策。

2.3 信息不对称文献研究述评

在供应链管理领域，生产制造和销售等活动均在信息指导下进行，由此信息被各级供应链成员视为关键的生产要素。成员们担心信息的泄露可能会损害其利益，因而倾向于保留信息，利用信息优势以提升自身收益。这种做法普遍导致了供应链中信息不对称的问题，尤其是在成本和需求信息方面。关于成本信息不对称，研究主要集中在生产成本和销售成本的影响上。

姬小利^[50]对在制造商成本信息不对称条件下零售商的收益分享契约设计进行了探讨，并借助实例展示了信息不对称对供应链效率的影响。Cao 等^[51]以成本信息不对称的双渠道供应链为研究对象，探究了在信息不对称条件下最优批发价格契约的设计，并对比分析了信息对称与不对称情境下的均衡利润与策略。Lei 等^[52]在成本信息为供应商所私有的前提下，考察了不同条件下供应链绩效及实现供应链协调所需的契约协调参数。但斌等^[53]在企业应用服务外包的背景下，采用菜单式合约协调成本不对称问题，并指出信息租金与产出方差、成本效率负相关。文悦和王勇^[54]针对双渠道制造商拥有的私有成本信息情境，探讨了电子商务平台的最优服务契约设计问题，并发现成本信息不对称的存在不仅改变了最优契约参数，而且通常对高成本的双渠道制造商、电子商务平台以及供应链整体绩效产生不利影响。

考虑到市场需求的不确定性，需求信息的谎报行为也成为学者研究的热点，如申成霖等^[55]对比分析了需求预测信息对称与不对称情况下供应链的最优决策，并探讨了单一价格契约、收益共享契约以及回购契约对于供应链协调的作用。张欢等^[56]在考虑销售商市场需求信息与制造商生产成本信息均为私有的背景下，通过引入一个不追求利润的利

他代理人构建信息不对称激励模型,并求解出订单量与转移支付的最优组合以揭示双方的私有信息。Yu 等^[57]在排放惩罚背景下,研究了零售商与供应商之间的需求信息不对称问题。他们发现,当消费者的低碳偏好处于低或中等水平时,信息共享能够有效减少全球排放并减少浪费排放。在双渠道供应链的背景下,Wu 等^[58]探究了需求信息共享对制造商和零售商的最优广告支出、定价机制和绩效的影响。Basu 等^[59]将市场需求信息视为零售商的私有信息,在风险中性供应商与风险规避零售商构成的供应链环境下进行研究,发现供应商可以通过设计回购契约来激励零售商共享其私有信息。

环境议题持续受到全球范围内的高度关注,碳信息的公开程度及其披露行为对于促进低碳供应链的全球化发展具有显著影响。因此,碳信息不对称问题也吸引了广大学者关注。杨磊等^[60]探究了碳价格或碳排放量信息不对称的影响。汤春华等^[61]探讨了碳排放配额的信息不对称对供应链的影响,设计并提出了基于委托代理理论的排放权交易合同。Yang 等^[62]的研究指出,在碳排放量及碳价格信息不对称的环境下,制造商与零售商会在不同低碳政策背景下采取不一样的谎报策略。Xia 和 Niu^[63]讨论了碳契约下政府与企业之间在碳减排努力和能力方面的信息不对称问题。他们发现,碳契约能有效促进企业减少碳排放。Ma 等^[64]研究了政府补贴下碳减排水平的信息不对称问题,指出如果补贴政策能有效刺激市场需求,制造商则愿意分享信息以实现较小的削减。周艳菊等^[2]探究了供应链参与者在面对产品初始碳排放信息不对称时的行动,发现不论在何种权力结构下,制造商普遍选择报告较高的碳排放信息。

上述研究详尽的探讨了供应链中的成本信息、需求信息、碳信息不对称等问题。然而,这些研究或是未能充分评估低碳政策在信息不对称条件下对供应链决策的影响,或是仅限于探讨单一渠道供应链中的信息不对称问题。鉴于此,本文在碳交易政策的背景下,对双渠道供应链中的碳信息不对称问题进行了详尽的分析,同时设计了旨在解决这一问题的惩罚机制和激励机制。

2.4 企业社会责任文献研究述评

随着经济全球化的深入发展,企业的经营策略不应仅仅基于可行的经济收益,而应广泛考虑其决策对社会的长期及短期影响。为应对社会压力的增长,众多企业已采纳企业社会责任(CSR)理念,并通过实施行为守则确保整个供应链从原材料供应到最终消费者的每个环节都负有社会责任^[65]。随后,学者们结合 CSR 与供应链管理,从多个角度探讨了 CSR 行为对供应链决策的影响。郑本荣等^[66]探讨了四种不同 CSR 投入情况下的

效果,发现当制造商和零售商同时进行 CSR 投入时,不仅市场需求有显著提升,而且还能实现双方在经济效益上的双赢。Wang 等^[67]将 CSR 细分为内部社会责任和外部社会责任,并指出这两方面的企业社会责任均对绿色供应链产生积极影响。Cruz^[68]在需求不确定的情形下,研究企业 CSR 行为是否能够实现利润最大化和整体风险最小化。Liu 等^[69]分析了在政府补贴与否的条件下,零售商主导供应链中政府补贴对供应链成员利润、CSR 投入水平以及社会福利的影响。研究发现,CSR 投入水平与供应链整体利润呈正相关。唐书传等^[70]在碳总量控制与交易制度下,对由单一制造商和单一零售商构成的二级供应链进行了研究,专注于分析零售商的社会责任关注行为对企业决策和利润(效用)、总消费者剩余以及社会福利的影响。研究表明:随着零售商对社会责任关注度的增加,零售价格、碳减排水平以及产品销量有可能同时提升。兰建义等^[71]针对由单一生鲜供应商和单一生鲜电商组成的生鲜农产品供应链,构建了四种不同 CSR 承担策略博弈模型,分析了企业的 CSR 行为对供应链成员的影响。

上述研究聚焦于单渠道供应链,探讨了 CSR 对供应链整体绩效的影响,不同于以上研究,梁喜等^[72]在原制造商、零售商和专利授权下进行再制造的第三方再制造商构成的双渠道闭环供应链中,构建了以原制造商为领导者且承担 CSR 的博弈模型,探究各供应链成员最优定价策略和对环保的影响,发现当原制造商承担社会责任并提高其承担比例时,不仅能增加消费者总剩余且有助于提高产品绿色度。林志炳等^[73]针对由于产品质量问题导致的消费者退货现象,构建了由制造商和承担 CSR 的零售商组成的双渠道供应链模型,讨论了退货环境下制造商的质量提升策略问题。结果表明,当零售商的 CSR 强度超过某一阈值时,制造商将采取质量提升策略。在双渠道供应链中,梁喜和刘莹^[74]考虑政府对制造商履行的社会责任进行补贴决策,研究集中式和分散式决策下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。应佩佩等^[75]在由两个竞争型二级供应链组成的双渠道供应链中,研究了 3 种企业社会责任缺失(CSI)情形对供应链决策和制造商 CSI 策略选择的影响。Li 等^[76]在考虑消费者效用的基础上,探讨 CSR 系数对双渠道供应链效率和社会福利的影响,研究发现,CSR 系数的高低对不同决策情景下的利润产生不同的影响。

上述文献深入探讨了企业承担企业社会责任(CSR)对单一及双渠道供应链绩效的影响,展现出企业执行 CSR 可以对利益相关者的绩效产生正面或负面的影响。然而,大部分研究并未涉及信息不对称对企业执行 CSR 的潜在影响。本研究受上述文献启发,在此理论基础之上,引入企业社会责任因素至双渠道供应链模型中,并将其与碳排放信息

不对称的问题结合起来，旨在探讨不同 CSR 承担策略如何影响误报行为，以及信息不对称如何影响供应链成员承担 CSR 的决策。

第3章 碳交易机制下考虑奖惩机制的排碳谎报双渠道供应链定价与减排决策研究

由于供应链的各参与方都是独立决策的主体，且上下游企业拥有各自信息优势，信息不对称普遍存在于供应链中，这导致供应链上下游企业在进行低碳减排活动时可能为了追求更高的利润而产生谎报自身碳信息的行为。特别是碳交易政策的引进使碳交易价格、初始碳排量、碳配额比例等信息成为企业私有信息，企业可能通过谎报产品初始碳排量信息来获取更多的免费碳配额。Yan 等^[77]发现制造商的谎报行为虽对供应链的某些参与者有利，但对供应链整体不利，如果不采取适当的遏制和监控措施，这种谎报行为将不可避免地阻碍低碳目标的实现。目前，部分地区对违反碳政策的企业进行罚款处罚。例如，深圳对逾期结转碳配额的企业处以三倍罚款^[2]。2022 年，山东凯翔阳光集团有限公司因谎报、隐瞒碳排放报告、弄虚作假被生态环境部罚款 2.3125 万元。然而，过度的惩罚措施可能会引发企业的抵制情绪，从而影响企业的正常经营和发展。与严厉的惩罚相比，政府通过激励企业遵守规定能够促使更多企业效仿，形成积极的竞争环境。因此，制定有效的激励措施促使企业披露真实碳排放信息至关重要。为了提高供应链的透明度并消除信息不对称的影响，区块链作为一项分布式去中心化的创新技术，凭借其数据不变性、可追溯性和建立信任等优势，被认为是可以有效解决多边信息共享难题的有效工具^[78]。综合上述现实背景，本章考虑双渠道制造商对初始碳排量信息进行谎报并针对制造商高报行为设计惩罚机制和激励机制，以期解决以下问题：(1) 当制造商的碳排放受限时，什么情形下会选择谎报碳排放信息？(2) 制造商谎报碳排放信息是否会引起供应链绩效的全面下降？(3) 惩罚措施和激励措施如何才能有效遏制制造商的谎报行为？(4) 政府如何选择惩罚措施和激励措施？

3.1 模型描述

在碳交易机制下，本章构建一条由单个制造商和单个零售商组成的双渠道供应链。其中，制造商负责研发与生产低碳产品并通过两条渠道进行销售。渠道一是先将低碳产

品以批发价格 w 通过线下渠道提供给零售商，然后零售商再以销售价格 P 将低碳产品售卖给具有低碳偏好的消费者；渠道二是制造商直接通过线上渠道以销售价格 P 将低碳产品售卖给具有低碳偏好的消费者。在低碳产品的双渠道销售过程中，制造商需要决策的变量包括单位产品碳减排量 e 和批发价格 w ，而零售商需要决策的变量为产品销售价格 P 。由于本文关注的是低碳供应链中制造商的谎报行为，为了更突出这一核心问题，我们不考虑渠道间交叉价格的影响。制造商的碳排放受碳交易机制的约束。政府根据制造商公布的单位产品初始碳排放量，按照比例 λ ($0 \leq \lambda \leq 1$) 分配免费的碳排放额度给制造商。如果政府分配的免费碳排放额度不能满足需求，则制造商需要以单位价格 p_e 从碳交易市场购买不足的碳排放额度；否则，制造商可以以同样的价格在碳交易市场出售多余的碳排放额度。在信息不对称的情况下，制造商的初始碳排放量为私有信息。为获取更多的碳排放额度，制造商存在高报初始碳排放量的动机。由于消费者具有低碳偏好，更倾向于购买碳排放量少的产品，因此制造商也有低报初始碳排放量的动机。双渠道供应链结构如图 3-1 所示。

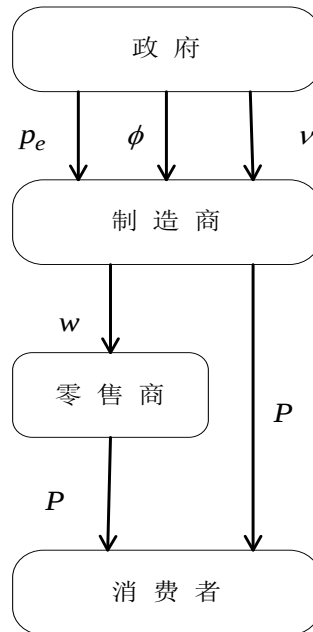


图 3-1 双渠道供应链结构图

3.2 符号说明和基本假设

在本章中，下标 $j = \{m, r\}$ 分别表示制造商和零售商，上标 $i = \{M, S, P, I\}$ 分别表示谎报模型、实报模型、惩罚模型和激励模型，其他符号参数和定义如表 3-1 所示。

表 3-1 参数描述

参数	符号说明
a	低碳产品的潜在市场需求, $a > 0$
α	消费者线下渠道偏好系数, $0 \leq \alpha \leq 1$
β	消费者低碳偏好系数, $0 \leq \beta \leq 1$
k	碳减排成本系数, $k > 0$
ρ	初始碳排放量谎报系数, $\rho > 0$
λ	碳配额比例, $0 \leq \lambda \leq 1$
e_0	单位产品的初始碳排放量
p_e	碳交易市场的单位碳排放权交易价格
η	制造商谎报被发现的概率, $0 \leq \eta \leq 1$
v	谎报被发现的惩罚系数, $v > 1$
c_b	单位产品的区块链技术应用成本, $c_b > 0$
γ	消费者的低碳偏好折扣系数, $0 \leq \gamma \leq 1$
ϕ	政府分担的区块链应用成本比例, $0 \leq \phi \leq 1$
决策变量	符号说明
e^i	单位产品碳减排量
w	单位产品批发价格
P	单位产品销售价格
函数	符号说明
D_c^i	线下渠道的市场需求
D_d^i	线上渠道的市场需求
D^i	总市场需求, $D^i = D_c^i + D_d^i$
π_m^i	制造商利润函数
π_r^i	零售商利润函数
CS^i	消费者剩余函数
GS^i	政府支出函数
SW^i	社会福利函数

为使模型更加清晰, 我们提出如下假设:

假设 1 制造商生产低碳产品过程中需要研发碳减排技术, 支出的碳减排成本与单位产品碳减排量正相关。参考 Ji 等^[79]和 Yang 等^[80]的处理方式, 设定碳减排成本函数为 $C(e) = ke^2/2$ 。其中, k 为碳减排成本系数, e 为单位产品碳减排量。

假设 2 制造商生产单位低碳产品的原材料成本和加工费用为 c 。在不失一般性的前提下, 遵循 Xu 等^[81]和 Wang 等^[82]的做法, 令 $c = 0$, 这样有助于简化模型求解, 且对后续结果的分析没有实质性影响。

假设 3 借鉴周艳菊等^[2]关于制造商谎报因子的设计思路, 如果制造商的初始碳排放量为 e_0 , 则对外公布的初始碳排放量为 ρe_0 。当 $\rho > 1$ 时, 表示制造商高报初始碳排放量 (下称“高报”); 当 $\rho = 1$ 时, 表示制造商不谎报初始碳排放量 (下称“实报”); 当 $0 < \rho < 1$ 时, 表示制造商低报初始碳排放量 (下称“低报”)。

假设 4 本文采用线性需求函数来描述考虑消费者低碳偏好和渠道偏好的供应链渠道需求。为了减少渠道冲突, 假设同一产品在线上和线下渠道的定价相同^[81]。根据张汉江等^[83]的描述可知, 线下渠道的市场需求为 $D_c = \alpha a - P - \beta(\rho e_0 - e)$, 线上渠道的市场需求为 $D_d = (1 - \alpha)a - P - \beta(\rho e_0 - e)$, 制造商面临的市场总需求为 $D = D_c + D_d$ 。为符合实际情况, 我们假设 $\rho e_0 \geq e$ 。

假设 5 消费者剩余是消费者愿意为产品支付的最高价格与他们为该产品实际支付的市场价格之间的差额。参照 Peng 等^[84]的做法, 将线下渠道的消费者剩余表示为 $CS_c = \int_p^{p^{\max}} D_c dp = D_c^2 / 2$, 线上渠道的消费者剩余表示为 $CS_d = \int_p^{p^{\max}} D_d dP = D_d^2 / 2$, 总消费者剩余表示为 $CS = CS_c + CS_d = (D_c^2 + D_d^2) / 2$ 。

假设 6 根据周艳菊等^[85]的设计思路, 将碳交易价格 p_e 视为二氧化碳的净化成本, 用以度量制造商单位碳排放对社会造成的负外部性。政府为治理制造商碳排放支出的成本为 $GS = \lambda \rho e_0 p_e D$ 。社会福利 SW 由制造商利润 π_m 、零售商利润 π_r 、消费者剩余 CS 和政府支出 GS 共同组成, 故有 $SW = \pi_m + \pi_r + CS - GS$ 。

为保证文中模型有实际意义, 碳减排量、市场需求及零售商的边际利润等参数需要满足非负条件, 假设下述不等式得到满足:

对于 M 模型, 有 $\delta_1^M = a(1 - \alpha) - e_0(p_e + \rho(\beta - \lambda p_e)) > 0$ 。

对于 S 模型, 有 $\delta_1^S = a(1 - \alpha) - e_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)) > 0$ 。

对于 P 模型, 有 $\delta_1^P = a(1 - \alpha) - e_0(p_e(1 + (\rho - 1)\lambda\eta\nu) + \rho(\beta - \lambda p_e)) > 0$ 。

对于 I 模型, 有 $\delta_1^I = a(1 - \alpha) - e_0(p_e + (\gamma\beta - \lambda p_e)) - c_b(1 - \phi) > 0$ 。

为了便于化简公式, 令 $A = 3k - 2(\beta + p_e)^2 > 0$, $B = 3k - 2(\gamma\beta + p_e)^2 > 0$ 。

3.3 模型的建立、求解与分析

3.3.1 谎报模型(M 模型)

低碳产品的销售渠道有两种: 第一种是零售商从制造商处以批发价格 w^M 订购低碳

产品再以价格 P^M 销售给消费者，第二种是制造商直接开通线上销售渠道，将低碳产品以价格 P^M 销售给消费者。两种销售渠道的市场需求函数分别表示为：

$$D_c^M = \alpha a - P^M - \beta(\rho e_0 - e^M) \quad (3-1)$$

$$D_d^M = (1 - \alpha)a - P^M - \beta(\rho e_0 - e^M) \quad (3-2)$$

此时，制造商和零售商的利润函数如下：

$$\pi_m^M = w^M D_c^M + P^M D_d^M - 1/2 k (e^M)^2 - p_e ((e_0 - e^M)(D_c^M + D_d^M) - \lambda \rho e_0 (D_c^M + D_d^M)) \quad (3-3)$$

$$\pi_r^M = (P^M - w^M) D_c^M \quad (3-4)$$

制造商作为 Stackelberg 博弈的领导者将优先决策，零售商根据制造商的决策做出最优决策。具体过程如下：制造商首先决定碳减排量 e^M 和批发价 w^M ，然后零售商根据观察到的制造商决策，确定线上和线下渠道的销售价 P^M ，以实现利润最大化。

首先对(3-4)式中的销售价 P^M 求二阶偏导可得： $\frac{\partial^2 \pi_r^M}{\partial (P^M)^2} = -2$ ，由于 $-2 < 0$ 可知 π_r^M 是

关于销售价格 P^M 的凹函数，令 $\frac{\partial \pi_r^M}{\partial P^M} = 0$ 得到：

$$P^M = \frac{\alpha a + \beta(e^M - \rho e_0) + w^M}{2} \quad (3-5)$$

将(3-5)式代入(3-3)式，并求 π_m^M 关于 w^M 和 e^M 的海瑟矩阵，得到：

$$H_1 = \begin{pmatrix} -3/2 & (\beta - 2p_e)/2 \\ (\beta - 2p_e)/2 & (\beta^2 - 2k + 4\beta p_e)/2 \end{pmatrix} \quad (3-6)$$

观察(3-6)式可知 H_1 的一阶顺序主子式小于 0。当二阶顺序主子式满足 $\frac{3k - 2(\beta + p_e)^2}{2} > 0$ ，即 $3k - 2(\beta + p_e)^2 > 0$ 时， $H_1(w^M, e^M)$ 负定， π_m^M 存在唯一最优批发价和最优碳减排量。联立方程 $\frac{\partial \pi_m^M}{\partial w^M} = 0$ 和 $\frac{\partial \pi_m^M}{\partial e^M} = 0$ 求解，得到最优批发价 w^{M*} 和最优碳减排量 e^{M*} 分别为：

$$w^{M*} = e_0 p_e (1 - \lambda \rho) + \frac{(k - 2p_e(\beta + p_e))\delta_1^M}{A} \quad (3-7)$$

$$e^{M*} = \frac{2(\beta + p_e)\delta_1^M}{A} \quad (3-8)$$

将(3-7)式和(3-8)式代入(3-5)式可得：

$$P^{M*} = w^{M*} + \frac{2k\delta_1^M - a(1 - 2\alpha)A}{2A} \quad (3-9)$$

将(3-8)式、(3-9)式分别代入(3-1)式、(3-2)式可得市场总需求量为：

$$D^{M*} = \frac{2k\delta_1^M}{A} \quad (3-10)$$

将(3-7)式至(3-10)式分别代入(3-3)式、(3-4)式可得制造商利润、零售商利润以及社会福利分别为：

$$\pi_m^{M*} = \frac{4k(\delta_1^M)^2 - a^2(1-2\alpha)^2 A}{4A} \quad (3-11)$$

$$\pi_r^{M*} = \frac{(2k\delta_1^M - a(1-2\alpha)A)^2}{4A^2} \quad (3-12)$$

$$SW^{M*} = \frac{\left[4k((\delta_1^M)^2(2A+k) + A\delta_1^M(a(1-2\alpha) - 4\lambda p_{e_0} p_e)) + 3(2k\delta_1^M - a(1-2\alpha)A)^2 - a^2(1-2\alpha)^2 A^2 \right]}{8A^2} \quad (3-13)$$

3.3.2 实报模型(S 模型)

将 M 模型中的均衡解取 $\rho=1$ ，便得到 S 模型的均衡解，如下：

$$w^{S*} = e_0 p_e (1-\lambda) + \frac{(k - 2p_e(\beta + p_e))\delta_1^S}{A} \quad (3-14)$$

$$e^{S*} = \frac{2(\beta + p_e)\delta_1^S}{A} \quad (3-15)$$

$$P^{S*} = w^{S*} + \frac{2k\delta_1^S - a(1-2\alpha)A}{2A} \quad (3-16)$$

$$D^{S*} = \frac{2k\delta_1^S}{A} \quad (3-17)$$

$$\pi_m^{S*} = \frac{4k(\delta_1^S)^2 - a^2(1-2\alpha)^2 A}{4A} \quad (3-18)$$

$$\pi_r^{S*} = \frac{(2k\delta_1^S - a(1-2\alpha)A)^2}{4A^2} \quad (3-19)$$

$$SW^{S*} = \frac{\left[4k((\delta_1^S)^2(2A+k) + A\delta_1^S(a(1-2\alpha) - 4\lambda e_0 p_e)) + 3(2k\delta_1^S - a(1-2\alpha)A)^2 - a^2(1-2\alpha)^2 A^2 \right]}{8A^2} \quad (3-20)$$

制造商谎报的动机在于其谎报行为(“高报”或“低报”)能获得比“实报”时更多的利润，产品销售价直接影响消费者对低碳产品的购买力度。而政府在“双碳”目标的压力下更多的是关注制造商谎报后是否会引起碳减排量的增加以及与社会福利的变化情况。因此，本文从制造商和政府两个视角出发，关注的供应链主要决策指标包括碳减排量、市场总需求、销售价、制造商利润及社会福利。由于社会福利的表达式较为复杂，将通过数值分析进行详细阐述。第四章和第五章选取进行分析的指标同第三章。

推论 3-1 通过计算 M 模型均衡解关于谎报系数的一阶导数，我们得出以下结论：

$$(1) (i) \text{ 若 } 0 \leq p_e \leq \frac{\beta}{\lambda}, \text{ 则 } \frac{\partial e^{M*}}{\partial \rho} \leq 0, \frac{\partial D^{M*}}{\partial \rho} \leq 0, \frac{\partial \pi_m^{M*}}{\partial \rho} \leq 0; (ii) \text{ 若 } \frac{\beta}{\lambda} < p_e, \text{ 则 } \frac{\partial e^{M*}}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial D^{M*}}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial \pi_m^{M*}}{\partial \rho} > 0.$$

$$(2) \text{ 若 } 0 \leq p_e \leq p_e^{12}, \text{ 则 } \frac{\partial P^{M*}}{\partial \rho} \leq 0; \text{ 若 } p_e > p_e^{12}, \text{ 则 } \frac{\partial P^{M*}}{\partial \rho} > 0.$$

$$\text{其中 } p_e^{12} = \frac{-(2(1+\lambda)\beta - \lambda k) + \sqrt{\Delta_{g_1(p_e)}}}{4(1+\lambda)}, \Delta_{g_1(p_e)} = (2(1+\lambda)\beta - \lambda k)^2 + 16\beta k(1+\lambda).$$

证明：见附录 1。

推论 3-1 表明，谎报系数变化对供应链关键参数的影响与碳交易价格相关。当碳交易价格低于特定阈值时，谎报系数增加将导致碳减排量、市场总需求、销售价及制造商利润等供应链关键参数悉数减少或下降。然而，当碳交易价格高于特定阈值时，供应链关键参数对谎报系数变化呈现的反应与之前相反。谎报系数增加，无论是“高报”还是“低报”，制造商从政府获得的免费碳排放额度都会增加，这样有助于制造商减少碳交易支出或增加碳交易收益。由于碳交易价格较低，这一行为带来的收益有限。同时，谎报系数增加对线上和线下的市场需求都会产生消极影响，市场总需求下降较多，制造商和零售商通过下调销售价格来刺激消费。受市场总需求下降影响，制造商利润随之减少，制造商投资碳减排的力度减弱。当碳交易价格较高时，谎报系数增加意味着制造商能够获取较多额外的碳排放权交易收益。虽然市场总需求也受之影响而下降，但制造商可以将获得的额外碳交易收益投资于碳减排，不仅抵消而且还提升了消费者对低碳产品的需求，制造商的利润也相应增加。总体而言，若碳交易价格较低，则制造商提高谎报系数不利于提升自身的利润及碳减排量，且对市场总需求产生消极影响，因此制造商选择“低报”而不会“高报”。若碳交易价格较高，则制造商选择“高报”而不会“低报”。

推论 3-2 通过计算 M 模型均衡解关于消费者线下渠道偏好和碳配额比例的一阶导数，我们得出以下结论：

$$(1) \frac{\partial e^{M*}}{\partial \alpha} < 0; \frac{\partial D^{M*}}{\partial \alpha} < 0; \frac{\partial \pi_m^{M*}}{\partial \alpha} < 0. \text{ 若 } 0 \leq p_e \leq \frac{k}{2\beta} - \beta, \text{ 则 } \frac{\partial P^{M*}}{\partial \alpha} \geq 0; \text{ 若 } p_e > \frac{k}{2\beta} - \beta, \text{ 则 } \frac{\partial P^{M*}}{\partial \alpha} < 0.$$

$$(2) \frac{\partial e^{M*}}{\partial \lambda} > 0; \frac{\partial D^{M*}}{\partial \lambda} > 0; \frac{\partial \pi_m^{M*}}{\partial \lambda} > 0. \text{ 若 } 0 \leq p_e \leq \frac{k}{2\beta} - \beta, \text{ 则 } \frac{\partial P^{M*}}{\partial \lambda} \leq 0; \text{ 若 } p_e > \frac{k}{2\beta} - \beta,$$

则 $\frac{\partial P^{M*}}{\partial \lambda} > 0$ 。

证明：见附录 2。

推论 3-2(1)表明，消费者线下渠道偏好增加会降低碳减排量、市场总需求以及制造商利润。消费者倾向于线下渠道购物表明拥有线上直销渠道的制造商难以及时获取消费者需求信息，从而抑制制造商加大减排努力程度，故造成碳减排量下降，进而引起市场总需求和制造商利润的下降。同时导致产品最终排放量增大，此时如果碳交易价格较高，制造商和零售商将降低销售价以提高消费者购买意愿，弥补碳配额购买成本。而当碳交易价格较低时，制造商和零售商通过提高销售价来增加自身利润。

从推论 3-2(2)可以看出，随着碳配额比例的增加，碳减排量、市场总需求、制造商利润和社会福利等供应链关键参数也随之增加或提升。碳配额比例增加表明政府会发放更多的免费碳排放额度给制造商，也即意味着制造商能够获得更多的碳排放收益，从而加大碳减排投资，增加低碳产品的碳减排量，进而刺激消费者增加低碳产品需求。市场总需求增加导致制造商生产低碳产品的碳排放量随之增加，此时如果碳交易价格较低，制造商和零售商通过降低销售价格促进消费来达到实现利润最大化的目的。而当碳交易价格较高时，需求增加迫使制造商花费更多的支出购买碳排放权，通过降价增加市场需求的好处被抵消，因此，制造商和零售商基于追逐利润考虑提升了销售价格。

推论 3-3 比较 M 模型与 S 模型的碳减排量、市场总需求、销售价以及制造商利润，我们得出以下结论：

(1) (i) 若 $0 \leq p_e < \frac{\beta}{\lambda}$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，或 $p_e > \frac{\beta}{\lambda}$ 且 $\rho > 1$ ，则 $e^{M*} > e^{S*}$ ， $D^{M*} > D^{S*}$ ， $\pi_m^{M*} > \pi_m^{S*}$ ；
 (ii) 若 $0 \leq p_e < \frac{\beta}{\lambda}$ 且 $\rho > 1$ ，或 $p_e > \frac{\beta}{\lambda}$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，则 $e^{M*} < e^{S*}$ ， $D^{M*} < D^{S*}$ ， $\pi_m^{M*} < \pi_m^{S*}$ ；(iii) 若 $p_e = \frac{\beta}{\lambda}$ ，则 $e^{M*} = e^{S*}$ ， $D^{M*} = D^{S*}$ ， $\pi_m^{M*} = \pi_m^{S*}$ 。

(2) (i) 若 $0 \leq p_e < p_e^{21}$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，或 $p_e > p_e^{21}$ 且 $\rho > 1$ ，则 $P^{M*} > P^{S*}$ ；(ii) 若 $p_e > p_e^{21}$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，或 $0 \leq p_e < p_e^{21}$ 且 $\rho > 1$ ，则 $P^{M*} < P^{S*}$ ；(iii) 若 $p_e = p_e^{21}$ ，则 $P^{M*} = P^{S*}$ 。其中

$$p_e^{21} = \frac{(2(1+\lambda)\beta^2 - \lambda k) - \sqrt{\Delta_{g_2(p_e)}}}{-4(1+\lambda)\beta}, \quad \Delta_{g_2(p_e)} = (2(1+\lambda)\beta^2 - \lambda k)^2 + 16(1+\lambda)\beta^2 k。$$

证明：见附录 3。

推论 3-3 表明，碳交易价格存在一个阈值(消费者低碳偏好系数与碳配额比例的比

值), 当其低于该阈值时, 制造商“低报”相较于“实报”的利润水平更高, 低碳产品的碳减排量更多, 市场总需求量更大。如果碳交易价格高于该阈值, 则制造商选择“高报”才能达到同样的效果。因为“低报”初始碳排量一方面会造成产品最终碳排放量较低的假象, 从而刺激需求。另一方面由于碳交易价格较低以及制造商获得的碳配额更为有限, 为迎合市场需求, 制造商将加大减排努力程度。当碳交易价格较低时, 需求增加迫使制造商购买碳排放权的支出增加, 为了缓解成本压力, 制造商和零售商将提高“低报”时的销售价。如果“高报”初始碳排量, 则制造商和零售商通过降低销售价来降低需求下降带来的负向影响。

制造商无论“高报”或“低报”的动机都是为了获得更大的利润, 结合推论 3-3 可知, 阈值越大, 制造商“低报”的可能性越大。由于该阈值等于消费者低碳偏好系数与碳配额比例的比值, 因此为了抑制制造商“高报”, 可以通过加强低碳宣传提升消费者低碳偏好系数或者降低碳配额比例的方式来实现。然而, 制造商“低报”也并不值得提倡。只有当碳交易价格等于消费者低碳偏好系数与碳配额比例的比值时, 制造商选择谎报与“实报”的效果一致, 此时制造商没有谎报的必要性。

以上分析是从环境效益和经济效益出发, 讨论了制造商谎报行为对供应链关键参数的影响。接下来, 本文将视角转向政府, 从社会效益角度出发, 考察制造商的谎报决策如何影响谎报模型与实报模型的社会福利。由于两个模型社会福利的表达式过于复杂, 难以比较, 我们采用数值分析的方式进行对比。参照周艳菊等^[2], 相关参数取值为: $a=100$, $k=35$, $\alpha=0.4$, $\beta=0.6$, $e_0=10$, $\lambda=0.6$, 由图 3-2 可得如下推论 3-4。

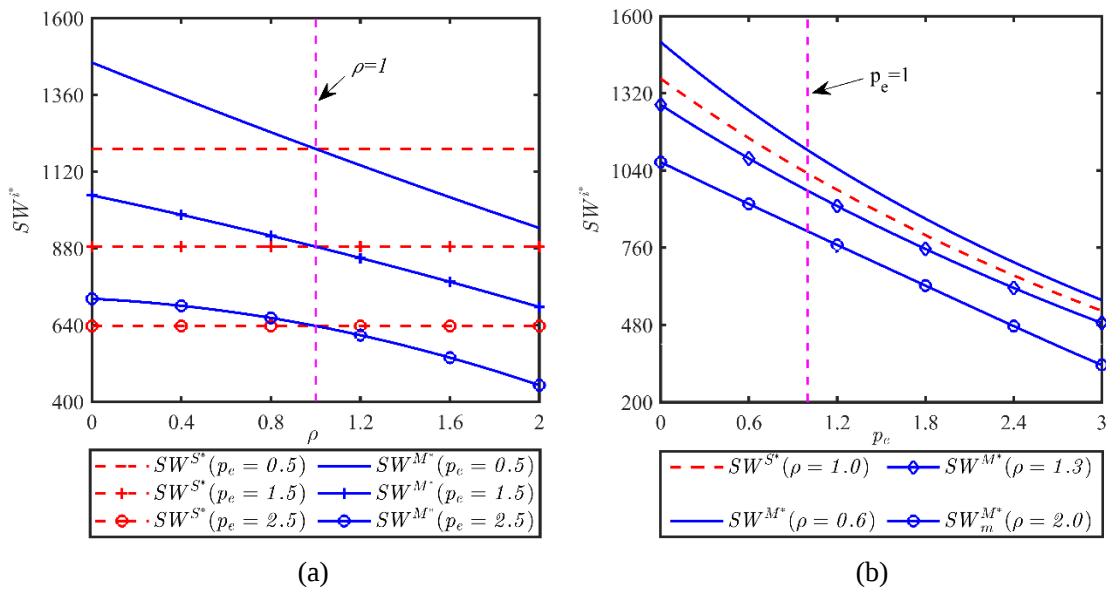


图 3-2 谎报系数和碳配额比例对社会福利的影响

推论 3-4 随着谎报系数的增加，社会福利水平逐渐下降，且制造商“低报”时的社会福利比“实报”时更高，而“高报”时的社会福利会比“实报”时低。在谎报系数既定时，碳交易价格的增加总是可以降低社会福利水平。

由于制造商“低报”降低了政府治理碳排放的成本，并通过减少产品最终碳排放量促进市场需求增加，从而提高了制造商和零售商利润，故制造商“低报”时社会福利更大。制造商“高报”虽然能提升制造商和零售商的利润，但同时增加了政府治理制造商碳排放的支出成本。当“高报”对制造商和零售商利润带来的积极影响小于对政府碳排放治理支出成本带来的负向影响时，便会导致制造商“高报”时的社会福利更小。由此可见，制造商“高报”对社会福利产生较大的不利影响，并触发了碳配额的公平分配问题，阻碍了碳交易市场平稳有序的运行。

3.3.3 惩罚模型(P 模型)

通过上文的分析可知，制造商可能会根据碳排放权交易价格的高低来选择有利于增加自身利润的高报或低报行为。无论是高报还是低报碳初始碳排放量都会给政府部门的精准控碳政策产生不利影响，特别是制造商的高报行为，损坏了碳配额的公平分配以及社会福利，政府部门对制造商的谎报行为进行干预是必不可少的。下面以制造商高报初始碳排放量($\rho > 1$)为例，从政府部门视角考虑如何设计惩罚措施以约束制造商的谎报行为。由于监管制度不够完善，导致并不是制造商的所有谎报行为都能被及时发现。设制造商谎报初始碳排放量且被发现的概率为 η ($0 \leq \eta \leq 1$)，谎报行为一旦被发现，政府将对其高报的初始碳排放量按碳交易市场价值的 v 倍处以罚款。如此，制造商谎报且未被发现时的利润为 $\hat{\pi}_m^P = w^P D_c^P + P^P D_c^P - k(e^P)^2/2 - p_e((e_0 - e^P)(D_c^P + D_d^P) - \rho \lambda e_0(D_c^P + D_d^P))$ ；若政府发现制造商存在谎报行为，则在处以罚款后制造商的利润为 $\hat{\pi}_m^P - v p_e(\rho - 1) \lambda e_0(D_c^P + D_d^P)$ 。因此，制造商的期望利润和零售商的利润分别表示为：

$$\pi_m^P = (1 - \eta) \hat{\pi}_m^P + \eta (\hat{\pi}_m^P - v p_e(\rho - 1) \lambda e_0(D_c^P + D_d^P)) = \hat{\pi}_m^P - \eta v p_e(\rho - 1) \lambda e_0(D_c^P + D_d^P) \quad (3-21)$$

$$\pi_r^P = (P^P - w^P) D_c^P \quad (3-22)$$

制造商和零售商决策过程同 M 模型，对(3-22)式中的销售价 P^P 求二阶偏导可得：

$\frac{\partial^2 \pi_r^P}{\partial (P^P)^2} = -2 < 0$ 。由于 $-2 < 0$ 可知 π_r^P 是关于销售价格 P^P 的凹函数，令 $\frac{\partial \pi_r^P}{\partial P^P} = 0$ 得到：

$$P^P = \frac{a\alpha + \beta(e^P - \rho e_0) + w^P}{2} \quad (3-23)$$

将(3-23)式代入(3-21)式，并求 π_m^P 关于 w^P 和 e^P 的海瑟矩阵，得到：

$$H_2 = \begin{pmatrix} -3/2 & (\beta - 2p_e)/2 \\ (\beta - 2p_e)/2 & (\beta^2 - 2k + 4\beta p_e)/2 \end{pmatrix} \quad (3-24)$$

观察(3-24)式可知 H_2 的一阶顺序主子式小于 0。当二阶顺序主子式满足 $\frac{3k - 2(\beta + p_e)^2}{2} > 0$ ，即 $3k - 2(\beta + p_e)^2 > 0$ 时， $H_2(w^P, e^P)$ 负定， π_m^P 存在唯一最优批发价和最优碳减排量。联立方程 $\frac{\partial \pi_m^P}{\partial w^P} = 0$ 和 $\frac{\partial \pi_m^P}{\partial e^P} = 0$ 求解，得到最优批发价 w^{P*} 和最优碳减排量 e^{P*} 分别为：

$$w^{P*} = e_0 p_e (1 - \lambda \rho + (\rho - 1) \lambda \eta \nu) + \frac{(k - 2p_e(\beta + p_e))\delta_1^P}{A} \quad (3-25)$$

$$e^{P*} = \frac{2(\beta + p_e)\delta_1^P}{A} \quad (3-26)$$

将(3-25)式和(3-26)式代入(3-23)式可得销售价：

$$P^{P*} = w^{P*} + \frac{2k\delta_1^P - a(1 - 2\alpha)A}{2A} \quad (3-27)$$

将 (3-26) 式、(3-27) 式分别代入 $D_c^P = \alpha a - P^P - \beta(\rho e_0 - e^P)$ 和 $D_c^P = (1 - \alpha)a - P^P - \beta(\rho e_0 - e^P)$ 可得市场总需求量：

$$D^{P*} = \frac{2k\delta_1^P}{A} \quad (3-28)$$

将(3-25)式至(3-28)式分别代入(3-21)式、(3-22)式可得制造商利润、零售商利润以及社会福利：

$$\pi_m^{P*} = \frac{4k(\delta_1^P)^2 - a^2(1 - 2\alpha)^2 A}{4A} \quad (3-29)$$

$$\pi_r^{P*} = \frac{(2k\delta_1^P - a(1 - 2\alpha)A)^2}{4A^2} \quad (3-30)$$

$$SW^{P*} = \frac{\left[4k\delta_1^P(\delta_1^P(2A + k) + A(a(1 - 2\alpha) + 4\lambda e_0 p_e(\eta \nu(\rho - 1) - \rho))) - a^2(1 - 2\alpha)^2 A^2 + 3(2k\delta_1^P - a(1 - 2\alpha)A)^2 \right]}{8A^2} \quad (3-31)$$

推论 3-5 通过计算 P 模型均衡解关于发现概率和惩罚系数的一阶导数，我们得出以下结论：

$$(1) (i) \frac{\partial e^{P*}}{\partial \eta} < 0; \quad \frac{\partial D^{P*}}{\partial \eta} < 0; \quad \frac{\partial \pi_m^{P*}}{\partial \eta} < 0. \quad (ii) \frac{\partial e^{P*}}{\partial \nu} < 0; \quad \frac{\partial D^{P*}}{\partial \nu} < 0; \quad \frac{\partial \pi_m^{P*}}{\partial \nu} < 0.$$

(2) 若 $0 \leq p_e < \frac{k}{2\beta} - \beta$, 则 $\frac{\partial P^{P*}}{\partial \eta} > 0$, $\frac{\partial P^{P*}}{\partial v} > 0$; 若 $p_e \geq \frac{k}{2\beta} - \beta$, 则 $\frac{\partial P^{P*}}{\partial \eta} \leq 0$, $\frac{\partial P^{P*}}{\partial v} \leq 0$ 。

证明：见附录 4。

由推论 3-5 可知，制造商“高报”的发现概率以及惩罚系数增加时，碳减排量、市场总需求和制造商利润等供应链关键参数都随之减少或下降。究其原因在于，发现概率和惩罚系数的增加均会导致制造商的“高报”行为被发现后遭受更大的损失，所获利润减少。由此引发的直接后果是，制造商在碳减排上的努力程度降低，这对市场需求产生消极影响。当碳交易价格较高时，发现概率和惩罚系数的增加让制造商遭受较多损失，导致市场总需求下降至远离制造商利润最大化需要达到的需求量。为了减少市场总需求下降带来的损失，制造商和零售商降低销售价格来刺激消费以缓解市场总需求减少带来的压力。若碳交易价格较低，则发现概率和惩罚系数增加导致的制造商损失较小，此时虽然市场总需求也呈下降趋势，但需求量减少有限。价格上涨带来的利润增加能够弥补价格增加引起需求下降导致的利润损失，所以制造商和零售商提高销售价格以达到实现利润最大化的目的。

推论 3-6 当发现概率和惩罚系数满足 $\eta v > 1 - \frac{\beta}{\lambda p_e}$ 时，制造商将不会“高报”。

证明：将 P 模型与 S 模型中的制造商利润作差，可得：

$$\pi_m^{P*} - \pi_m^{S*} = \frac{k(\rho - 1)e_0(\beta + \lambda(\eta v - 1)p_e)(2a(\alpha - 1) + e_0(p_e(2 + (\rho - 1)\lambda\eta v) + (1 + \rho)(\beta - \lambda p_e)))}{3k - 2(\beta + p_e)^2},$$

由于 $2a(\alpha - 1) + e_0(p_e(2 + (\rho - 1)\lambda\eta v) + (1 + \rho)(\beta - \lambda p_e)) < 0$ ，因此，当 $\beta + \lambda(\eta v - 1)p_e > 0$ 时有

$$\pi_m^{P*} - \pi_m^{S*} < 0, \text{ 即满足 } \eta v > 1 - \frac{\beta}{\lambda p_e}。$$

政府制定的惩罚措施若要发挥作用，对制造商产生一定的威慑力，约束制造商的“高报”行为，则发现概率和惩罚系数需要满足一定的条件。若惩罚系数既定，则发现概率越高，制造商“高报”的期望利润越小；若发现概率既定，则惩罚系数越大，制造商“高报”的期望利润也越小。总之，只要发现概率和惩罚系数增加或提升至制造商“高报”获得的期望利润比“实报”时更小，惩罚措施就有效。通过比较 P 模型和 S 模型的(期望)利润，知当 $\eta v > 1 - \beta/\lambda p_e$ 时制造商不谎报的期望利润更大，此时惩罚措施能够约束制造商的“高报”行为。

3.3.4 激励模型(I 模型)

相比于严厉的惩罚,激励措施可以促使企业更愿意合作,并主动公开真实的碳排放数据。通过建立合作关系,政府可以更有效地监管和管理制造商的碳排放,实现更好的环境保护效果。与此同时,区块链技术的不可篡改与实时性能保障政府及时获得制造商准确无误的碳排放信息。鉴于此,我们考虑政府通过分担一定比例(ϕ)的区块链技术应用成本作为激励机制,鼓励制造商采用区块链技术。在未实施区块链时,由于制造商与消费者之间的信息不对称,导致消费者对制造商公布的碳排放信息不完全相信,对碳排放比较敏感,需求随制造商的碳排放增加下降较快。采用区块链技术后,由于区块链技术可以记录和传递产品碳减排信息,能够保证碳减排信息不被恶意篡改,促使消费者对碳排放的敏感程度下降到原来的 γ 倍($0 \leq \gamma \leq 1$),即碳排放敏感系数下降为 $\gamma\beta$ 。此时线下渠道和线上渠道的需求函数分别为:

$$D_c^I = \alpha a - P^I - \gamma\beta(e_0 - e^I) \quad (3-32)$$

$$D_d^I = (1-\alpha)a - P^I - \gamma\beta(e_0 - e^I) \quad (3-33)$$

其中 γ 为消费者低碳偏好的折扣系数。

假设单位产品区块链技术的应用成本为 c_b ,此时制造商、零售商利润函数分别为:

$$\pi_m^I = w^I D_c^I + P^I D_d^I - (1-\phi)c_b D^I - 1/2 k(e^I)^2 - p_e((e_0 - e^I)D^I - \lambda e_0 D^I) \quad (3-34)$$

$$\pi_r^I = (P^I - w^I)D_c^I \quad (3-35)$$

制造商和零售商决策过程同 M 模型,对(3-35)式中的销售价 P^I 求二阶偏导可得:

$\frac{\partial^2 \pi_r^I}{\partial (P^I)^2} = -2 < 0$ 。由于 $-2 < 0$ 可知 π_r^I 是关于销售价格 P^I 的凹函数,令 $\frac{\partial \pi_r^I}{\partial P^I} = 0$ 得到:

$$P^I = \frac{a\alpha + \beta\gamma(e^I - e_0) + w^I}{2} \quad (3-36)$$

将(3-36)式代入(3-34)式,并求 π_m^I 关于 w^I 和 e^I 的海瑟矩阵,得到:

$$H_3 = \begin{pmatrix} -3/2 & (\beta\gamma - 2p_e)/2 \\ (\beta\gamma - 2p_e)/2 & (\beta^2\gamma^2 - 2k + 4\beta\gamma p_e)/2 \end{pmatrix} \quad (3-37)$$

观察(3-37)式可知 H_3 的一阶顺序主子式小于0。当二阶顺序主子式满足 $\frac{3k - 2(\beta\gamma + p_e)^2}{2} > 0$,即 $3k - 2(\beta\gamma + p_e)^2 > 0$ 时, $H_3(w^I, e^I)$ 负定, π_m^I 存在唯一最优批发价和

最优碳减排量。联立方程 $\frac{\partial \pi_m^I}{\partial w^I} = 0$ 和 $\frac{\partial \pi_m^I}{\partial e^I} = 0$ 求解,得到最优批发价 w^{I*} 和最优碳减排量 e^{I*}

分别为:

$$w^{I*} = e_0(p_e + (\gamma\beta - \lambda p_e)) + c_b(1 - \phi) + \frac{(k - 2p_e(\beta + p_e))\delta_1^I}{B} \quad (3-38)$$

$$e^{I*} = \frac{2(\gamma\beta + p_e)\delta_1^I}{B} \quad (3-39)$$

将(3-38)式和(3-39)式代入(3-36)式可得：

$$P^{I*} = w^{I*} + \frac{2k\delta_1^I - a(1 - 2\alpha)B}{2B} \quad (3-40)$$

将(3-39)式、(3-40)式分别代入(3-32)式、(3-33)式可得市场总需求量：

$$D^{I*} = \frac{2k\delta_1^I}{B} \quad (3-41)$$

将(3-38)式至(3-41)式分别代入(3-34)式、(3-35)式可得：

$$\pi_m^{I*} = \frac{4k(\delta_1^I)^2 - a^2(1 - 2\alpha)^2B}{4B} \quad (3-42)$$

$$\pi_r^{I*} = \frac{(2k\delta_1^I - a(1 - 2\alpha)B)^2}{4B^2} \quad (3-43)$$

$$SW^{I*} = \frac{\left[4k\delta_1^I(\delta_1^I(2B + k) + B(a(1 - 2\alpha) - 4(\lambda e_0 p_e + (1 - \phi) c_b))) - a^2(1 - 2\alpha)^2B^2 + 3(2k\delta_1^I - a(1 - 2\alpha)B)^2 \right]}{8B^2} \quad (3-44)$$

推论 3-7 通过计算 I 模型均衡解关于单位产品区块链技术应用成本和政府分担比例的一阶导数，我们得出以下结论：

- (1) (i) $\frac{\partial e^{I*}}{\partial c_b} < 0$; $\frac{\partial D^{I*}}{\partial c_b} < 0$; $\frac{\partial \pi_m^{I*}}{\partial c_b} < 0$ 。 (ii) $\frac{\partial e^{I*}}{\partial \phi} > 0$; $\frac{\partial D^{I*}}{\partial \phi} > 0$; $\frac{\partial \pi_m^{I*}}{\partial \phi} > 0$ 。
- (2) 若 $0 \leq p_e \leq \frac{k}{2\beta\gamma} - \beta\gamma$ ，则 $\frac{\partial P^{I*}}{\partial c_b} \geq 0$, $\frac{\partial P^{I*}}{\partial \phi} \leq 0$ ；若 $p_e > \frac{k}{2\beta\gamma} - \beta\gamma$ ，则 $\frac{\partial P^{I*}}{\partial c_b} < 0$, $\frac{\partial P^{I*}}{\partial \phi} > 0$ 。

证明：见附录 5。

从推论 3-7 中可知，随着单位产品区块链技术成本的增加，碳减排量、市场总需求、制造商利润及社会福利等供应链关键参数都随之减少或降低，而随着政府分担比例的提
升，上述参数都随之增加或升高。单位产品区块链技术成本增加的直接影响是导致制造
商总的生产成本增加，降低了利润水平，减少了碳减排的投入，市场总需求也随之减少。
制造商和零售商为了达到利润最大化水平，结合碳交易价格，通过调节销售价格来实现
需要的市场总需求。政府分担比例的变化与单位产品区块链技术成本变化对供应链关键
参数的影响效果完全相反。政府分担比例增加，则制造商分担比例就降低，意味着制造
商承担的单位产品区块链技术成本减少。

推论 3-8 当政府分担比例满足如下条件时，制造商将选择采用区块链技术：

(1) 当 $\bar{\Omega} \geq 0$ 且 $c_b^2 < 0 < c_b^1 \leq c_b$ 时，若 $0 < \phi < \phi_1$ ，则 $\pi_m^{M*} < \pi_m^{I*}$ ；

(2) 当 $\bar{\Omega} < 0$ 时，(i) 若 $0 < c_b \leq c_b^2 < c_b^1$ 且 $\forall \phi \in [0,1]$ ，则 $\pi_m^{M*} < \pi_m^{I*}$ 。(ii) 若 $0 < c_b^2 < c_b < c_b^1$ 且 $\phi_2 < \phi < 1$ ，则 $\pi_m^{M*} < \pi_m^{I*}$ 。(iii) 若 $0 < c_b^2 < c_b^1 \leq c_b$ 且 $0 < \phi < \phi_1$ ，或 $0 < c_b^2 < c_b^1 \leq c_b$ 且 $\phi_2 < \phi < 1$ ，则 $\pi_m^{M*} < \pi_m^{I*}$ 。

其中 $\bar{\Omega} = B(\delta_1^M)^2 - A(\delta_1^I)^2$ ， $\phi_1 = \frac{c_b - c_b^1}{c_b}$ ， $\phi_2 = \frac{c_b - c_b^2}{c_b}$ ，

$$c_b^1 = a(1-\alpha) - e_0(\beta\gamma + (1-\lambda)p_e) + \frac{\sqrt{AB(\delta_1^M)^2}}{A}, \quad c_b^2 = a(1-\alpha) - e_0(\beta\gamma + (1-\lambda)p_e) - \frac{\sqrt{AB(\delta_1^M)^2}}{A}。$$

证明：见附录 6。

推论 3-8 表明，在满足特定的条件下，如果政府分担比例介于上述给定的范围，或制造商自身承担的成本低于确定的阈值，则制造商采用区块链技术能够获得比谎报时更高的利润水平，此时制造商会选择采用区块链技术，政府的激励措施发挥作用。并且单位产品区块链技术应用成本对政府分担比例的取值有着关键影响。但是，如果推论 3-8 中的特定条件不能实现，那么无论政府分担多少比例区块链技术成本，即便所有的区块链技术成本由政府独自承担，而制造商可免费使用区块链技术，也不足以说服制造商采用区块链技术。原因在于，制造商引入区块链技术后，消费者对碳排放敏感程度下降引起需求增加带来的好处抵不上其从谎报初始碳排放量中获得利益，因此即使制造商可以免费使用区块链技术，也会因为引入区块链技术后将导致碳排放信息透明化造成较大损失而放弃引入。

3.4 数值分析

本节内容旨在通过数值分析方法，从环境效益、经济效益与社会效益三个维度，深入探讨制造商谎报行为对供应链关键参数的潜在影响。进一步地，本节研究将以碳交易价格、单位产品初始碳排放量、碳配额比例以及消费者线下渠道偏好这四个变量作为自变量，全面比较惩罚模型与激励模型在社会福利方面的效果，以期找出最为有效的调控策略。参照周艳菊等^[2]和张令荣等^[86]，相关参数取值为： $a=100$ ， $k=35$ ， $\alpha=0.4$ ， $\beta=0.6$ ， $e_0=10$ ， $p_e=2$ 。文中用红色、蓝色、绿色以及黑色线条分别表示 S 模型、M 模型、P 模型与 I 模型。

3.4.1 谎报系数和碳交易价格对制造商利润的敏感性分析

首先分析制造商的谎报决策，即制造商是否选择谎报以及“高报”还是“低报”。图 3-3(a)表明，对于 M 模型，若碳交易价格较低，则制造商的利润随谎报系数增加而缓慢下降，而当碳交易价格较高时，制造商的利润水平随谎报系数的增加而上升。比较 M 模型和 S 模型可知，如果碳交易价格较低，那么制造商“低报”能获得更多的利润，而“高报”则遭受利润损失。相反，如果碳交易价格较高，制造商“高报”的利润水平更高，“低报”的效果劣于“实报”时的情形。图 3-3(b)显示，制造商“低报”初始碳排放量时的利润水平随着碳交易价格的增加而下降，“高报”则结论相反，且谎报系数越大利润增速越快。当碳交易价格小于 1 时，制造商会选择“低报”，而当碳交易价格大于 1 时，制造商会选择“高报”。如果碳交易价格为 1，则制造商谎报与“实报”的利润水平一致。因此，碳交易价格的合理设置直接影响制造商的谎报决策。

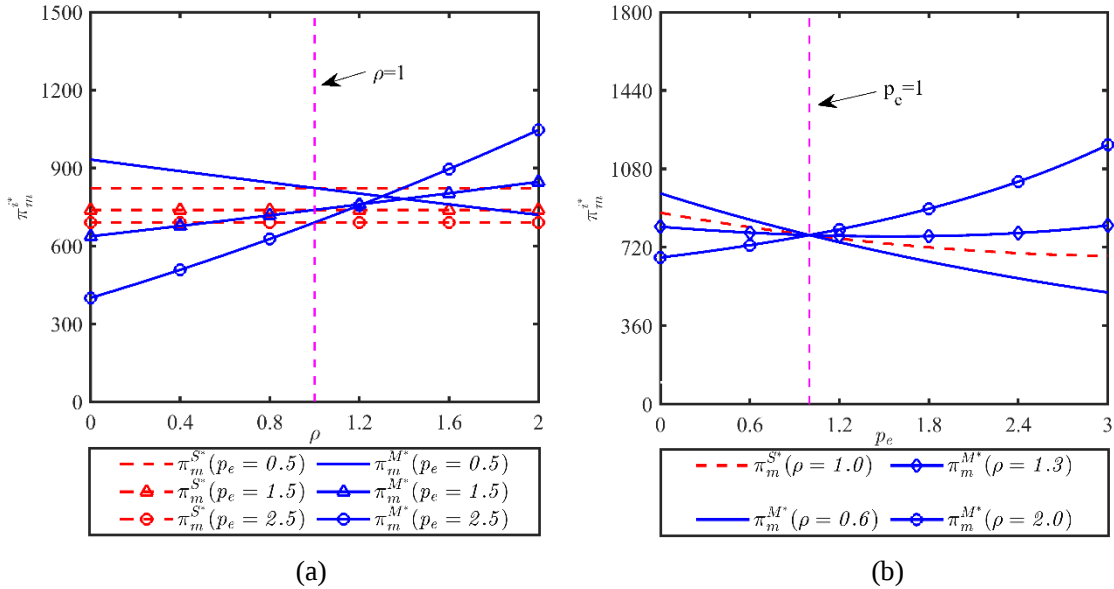


图 3-3 谎报系数和碳交易价格对制造商利润的影响

3.4.2 惩罚系数和发现概率对制造商利润及碳减排量的敏感性分析

鉴于制造商“高报”行为对社会福利的损害(见图 3-2)，政府对制造商谎报的监管与介入显得尤其重要。制造商的谎报系数越大对自身越有利，故根据图 3-3(a)选取谎报系数 $\rho=2$ 来进行分析。依据 2021 年 2 月实行的《碳排放权交易管理办法(试行)》规定，重点排放单位虚报、瞒报温室气体排放报告，处一万元以上三万元以下的罚款。结合罚款上下限的倍数关系，据此考查将惩罚系数设定在 1~3 范围内变动时对制造商利润的影响。如图 3-4(a)所示，惩罚系数的提高会降低制造商的利润水平，且惩罚系数既定时，发现概率越大利润水平越低。原因在于发现概率和惩罚系数的增加会使制造商所缴罚款

增多,导致制造商利润水平逐渐下降。当发现概率较大时,对惩罚系数的限制较为宽松,即惩罚系数纵然较小,也会使得制造商的利润比“实报”时小,如此制造商必定会如实公布碳排放信息。这一结论与实际情况相符,当发现概率较大时,企业通常不会选择谎报。针对发现概率较小的情况,惩罚系数的限制应更为严格,且发现概率越低,就需要越大的惩罚系数与之匹配。因此,政府应加大对企业的核查和处罚力度,以确保制造商选择如实公布碳排放信息。

当制造商因“高报”而被政府处以罚款时,这一措施对环境效益产生如何影响?制造商是否会因此更加重视碳减排,提供更加低碳的绿色产品?接下来,以制造商“实报”时的碳减排量为基准,分析发现概率和惩罚系数对碳减排量的影响。通过图 3-4(b)可知,制造商的碳减排量与惩罚系数呈负相关关系,而惩罚系数既定时,碳减排量与发现概率同样负相关。这表明,制造商因“高报”被发现而面临罚款,为了维持利润水平并减轻成本压力,将倾向于减少碳减排投资,导致碳减排量下降。当发现概率较大或惩罚系数较大时,“高报”时的碳减排量往往比“实报”时小。与此同时,碳减排量的下降抑制了市场需求,进一步造成制造商利润的下降。可见,惩罚措施的实施对环境效益和经济效益均产生了一定的消极影响。

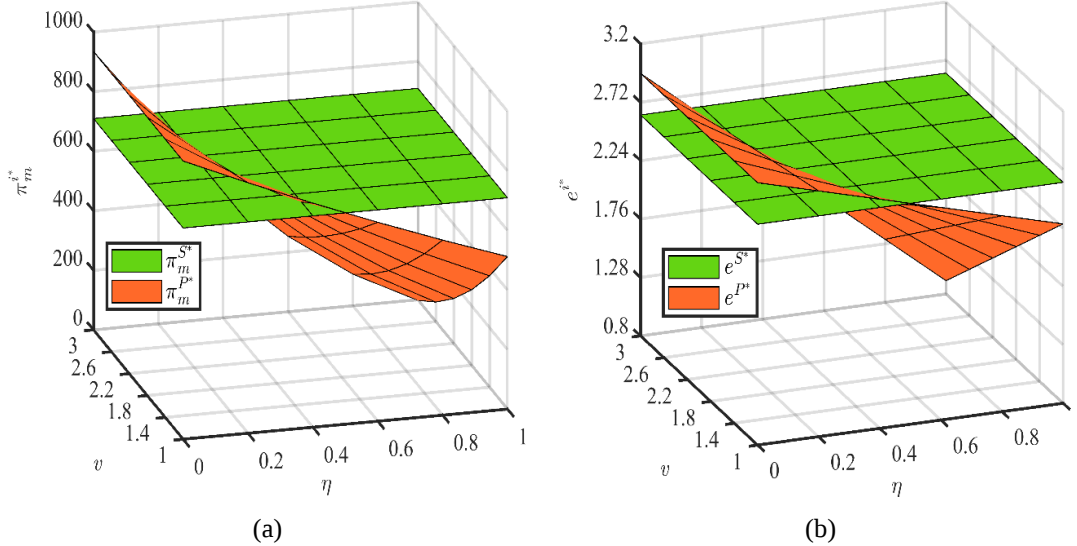


图 3-4 惩罚系数和发现概率对制造商利润及碳减排量的影响

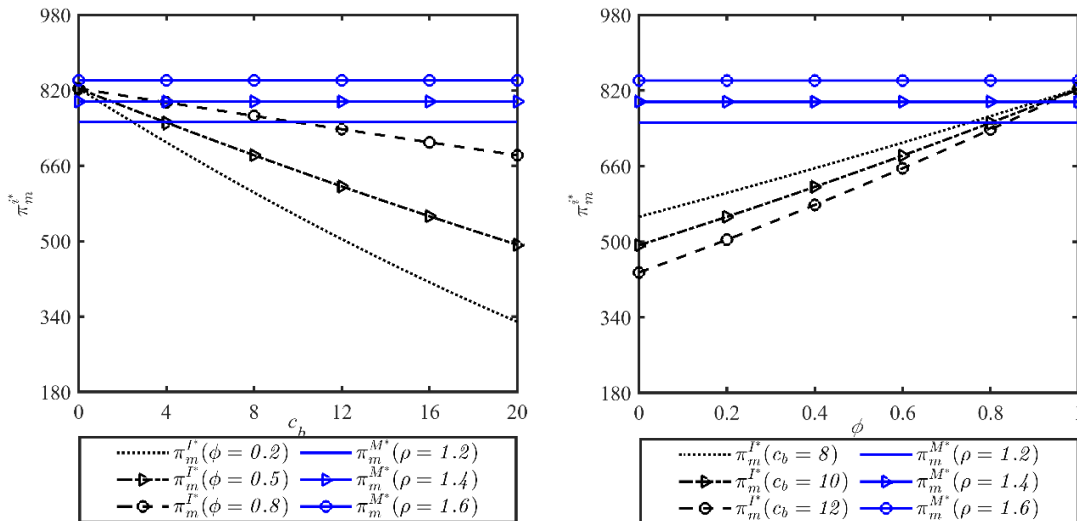
3.4.3 区块链技术成本和分担比例对制造商利润及碳减排量的敏感性分析

惩罚力度较小不足以引起制造商的警示,惩罚措施难以发挥应有的威慑作用。惩罚力度过大又会造成制造商损失较多利润,影响其碳减排投入。因此,合理设置惩罚力度具有一定挑战性。相比之下,激励措施从情感上更易为制造商接受,从而提高其披露真

实碳排放信息的积极性和主动性。下面仍以制造商“高报”为例，考虑政府替制造商分担部分区块链技术成本作为激励，分析制造商对区块链技术的采用决策。虽然引入区块链技术会降低消费者对碳排放的敏感程度，从而增加市场需求，但区块链技术的采用也会增加额外的成本投入。我们首先探讨区块链技术成本对 M 模型和 I 模型中制造商利润的影响。此处选取消费者低碳偏好折扣系数 $\gamma = 0.3$ 。

图 3-5(a)表明，激励措施下制造商的利润与单位产品区块链技术成本负相关，而在相同的区块链技术成本下，制造商的利润会随着政府分担比例的提高而增加。一个有趣的现象是，当制造商的谎报系数较大时，其利润水平始终比激励措施下的利润水平更高，这表明了激励措施存在一定的无效性。尤其是当制造商“高报”带来的正向影响较大时，即使政府承担较多的区块链技术成本，制造商也可能不愿引入区块链技术。这一现象也在一定程度上解释了实际生活中企业报告碳数据不实的原因。在同一谎报系数下，I 模型的制造商利润多于 M 模型所要求的政府分担比例与区块链技术成本正相关。换言之，当区块链技术成本较高时，为激励制造商采用区块链技术，政府分担比例也应相应增加。

为了探究政府分担比例如何影响 I 模型的制造商利润，选择区块链技术成本 $c_b \in [8, 12]$ 来分析政府分担比例从 0 增加到 1 对 M 模型和 I 模型中制造商利润的影响。图 3-5(b)表明，激励措施下制造商的利润与政府分担比例正相关，且在同一政府分担比例下，制造商利润会随着区块链技术成本的增加而降低。若将 I 模型中制造商利润大于 M 模型中制造商利润对应的政府分担比例所满足的范围称为有效区间，则在相同的区块链技术成本下，谎报系数的增加会使政府分担比例的有效区间缩小。针对谎报系数较高的制造商，政府设计激励措施的效果可能会受到限制。此时，采取强制性的惩罚措施可能是政府更为合适的选择。



(a)

(b)

图 3-5 区块链技术成本和分担比例对制造商利润的影响

鉴于制造商“高报”的动机在于获得更多免费碳配额以降低生产成本，区块链技术的引入有效阻止了企业谎报初始碳排放量。因此，在评估是否与政府合作引入区块链技术并如实披露碳排放信息时，制造商会考虑区块链技术对其碳减排量的潜在影响。为了进行更深入的比较分析，下面同时考察区块链技术成本和政府分担比例对 I 模型与 M 模型中碳减排量的影响。通过图 3-6(a)和图 3-6(b)可知，I 模型中的碳减排量与区块链技术成本负相关，而与政府分担比例正相关。特别是在制造商“高报”的情况下，I 模型中的碳减排量始终低于 M 模型的碳减排量。因为尽管政府分担了部分区块链成本，但制造商自身仍需承担较大比例，为了弥补区块链技术成本对自身利润带来的负向影响，制造商将会减少在碳减排方面的投资，从而导致引入区块链技术后的碳减排量小于 M 模型。总体而言，激励措施的实施对环境效益产生了不利影响。

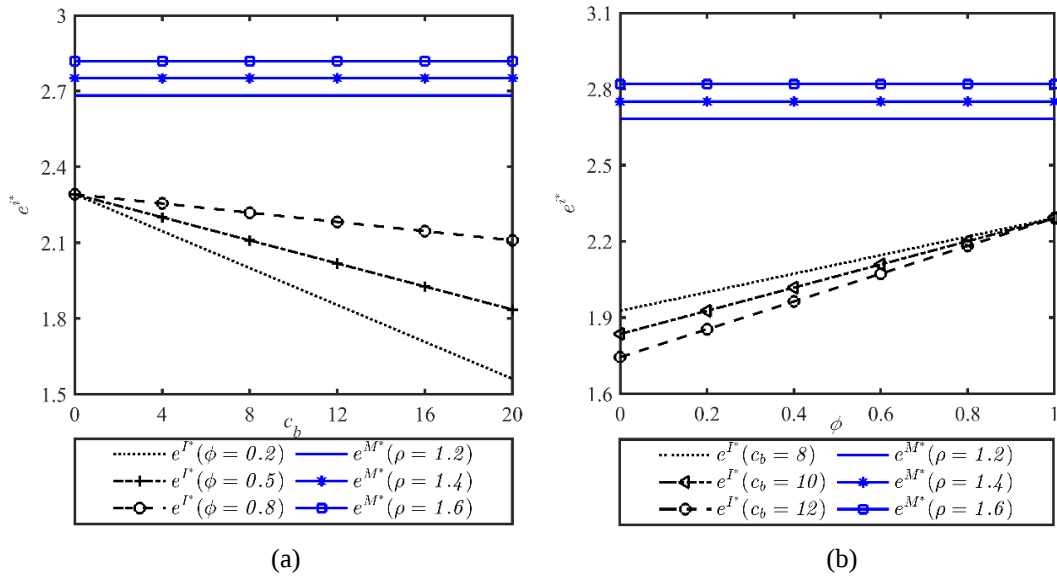


图 3-6 区块链技术成本和政府分担比例对碳减排量的影响

3.4.4 P 模型与 I 模型社会福利的比较分析

尽管惩罚措施和激励措施均可能对环境效益产生一定的负面作用，但考虑到政府的目标是社会福利最大化，且制造商的“高报”行为既不符合道德标准也违反法律规定，政府有必要采取适当的应对措施以保障市场的公平竞争环境。因此，本研究将进一步比较这两种措施下社会福利的差异。为了充分利用推论 3-6 的结论，并赋予本研究更多的现实意义，参照图 3-4(a)，选取发现概率 $\eta=0.3$ 。为确保制造商愿意引入区块链技术，选取政府分担比例 $\phi=0.8$ 及区块链技术成本 $c_b=10$ 。为保证所有模型线上线下渠道的需

求量为正值，在设定上述参数取值后，消费者线下渠道偏好须满足 $0.302 < \alpha < 0.592$ ，故选取 $\alpha \in [0.35, 0.5]$ 。为充分比较 P 模型与 I 模型的社会福利，本研究选择与研究主题密切相关的四个参数进行详细分析：碳交易价格、单位产品初始碳排放量、碳配额比例以及消费者线下渠道偏好系数，具体结果见图 3-7(a)~3-7(d)。

图 3-7(a)揭示了 P 模型和 I 模型的社会福利均与碳交易价格之间存在负相关性。当碳交易价格较高时，P 模型的社会福利水平比 I 模型的更低，甚至出现负值，此时政府应考虑采取激励措施。具体而言，对于 P 模型，在同一碳交易价格下，社会福利与惩罚系数负相关。这说明惩罚措施对社会福利的正向影响不足以抵消其对制造商利润的负向影响，导致 P 模型社会福利的下降。在碳交易价格较高时，政府治理碳排放的成本将相应增加，进而可能导致社会福利降为负值。对于 I 模型，在同一碳交易价格下，社会福利与消费者低碳偏好折扣系数负相关。消费者低碳偏好折扣系数越大，表明消费者对碳排放越不敏感，采用区块链技术后需求的增长非常有限，而高昂的区块链技术成本支出超过需求增长引起的利润增加，从而造成 I 模型社会福利的下降。图 3-7(a)还表明，当且仅当碳交易价格较低且消费者低碳偏好折扣系数较大时，P 模型的社会福利才有可能超过 I 模型。然而，这两个条件与当前的低碳经济趋势基本是相违背的，因此，从社会福利视角来看应优先考虑激励措施。

从图 3-7(b)中可以看出，P 模型和 I 模型的社会福利随着单位产品初始碳排放量的增加而降低。当单位产品初始碳排放量较低时，P 模型的社会福利要大于 I 模型，政府应选择实施惩罚措施；反之，则应选择激励措施。由此可见，单位产品初始碳排放量大小对政府决策实施惩罚措施和激励措施有显著影响。单位产品初始碳排放量逐渐增加会使政府在碳排放治理上的支出增加，从而导致 P 模型和 I 模型的社会福利下降。由于单位产品初始碳排放量不直接影响政府分担区块链技术成本，所以当单位产品初始碳排放量较低(较高)时，P 模型中政府在治理碳排放上的支出小于(大于)I 模型中政府分担区块链技术成本及治理碳排放成本之和，故 P 模型的社会福利大于(小于)I 模型。

通过对图 3-7(c)的观察，发现碳配额比例的增加总是能提高 I 模型的社会福利，而 P 模型的社会福利会随碳配额比例的提高呈倒 U 型变化。由于碳配额比例的增加能够使制造商获得更多碳配额，进而减轻制造商生产成本并激发了制造商加大减排努力的动机，因而促进 I 模型社会福利的增加。当碳配额比例较小时，P 模型政府支出治理碳排放的成本小于制造商缴纳的罚款，因此社会福利上升。然而，随着碳配额比例逐渐增加，政府治理碳排放的成本支出逐渐超过获得的罚款收入，从而造成社会福利逐渐下降。当碳

配额比例较大时，多数情况下 I 模型的社会福利大于 P 模型，但当碳配额比例较小时，P 模型的社会福利也可能高于 I 模型，这意味着政府在制定政策时应视具体情况做出灵活决策。

由图 3-7(d)可知，P 模型和 I 模型的社会福利均与消费者线下渠道偏好系数负相关，且 I 模型的社会福利大于 P 模型。消费者线下渠道偏好系数增大的直接影响是线下需求增加线上需求减少，但市场总需求处于下降趋势，且制造商碳减排投入的积极性受到抑制，政府的碳排放治理成本增加，社会福利水平下降。图 3-7(d)还表明，当消费者倾向于线下渠道进行购物时，政府应考虑采取激励措施。然而，当消费者线上渠道偏好较强时，政府需要综合考虑 P 模型中的惩罚系数以及 I 模型中的消费者低碳偏好折扣系数大小，才能确定应对制造商“高报”的最佳策略。

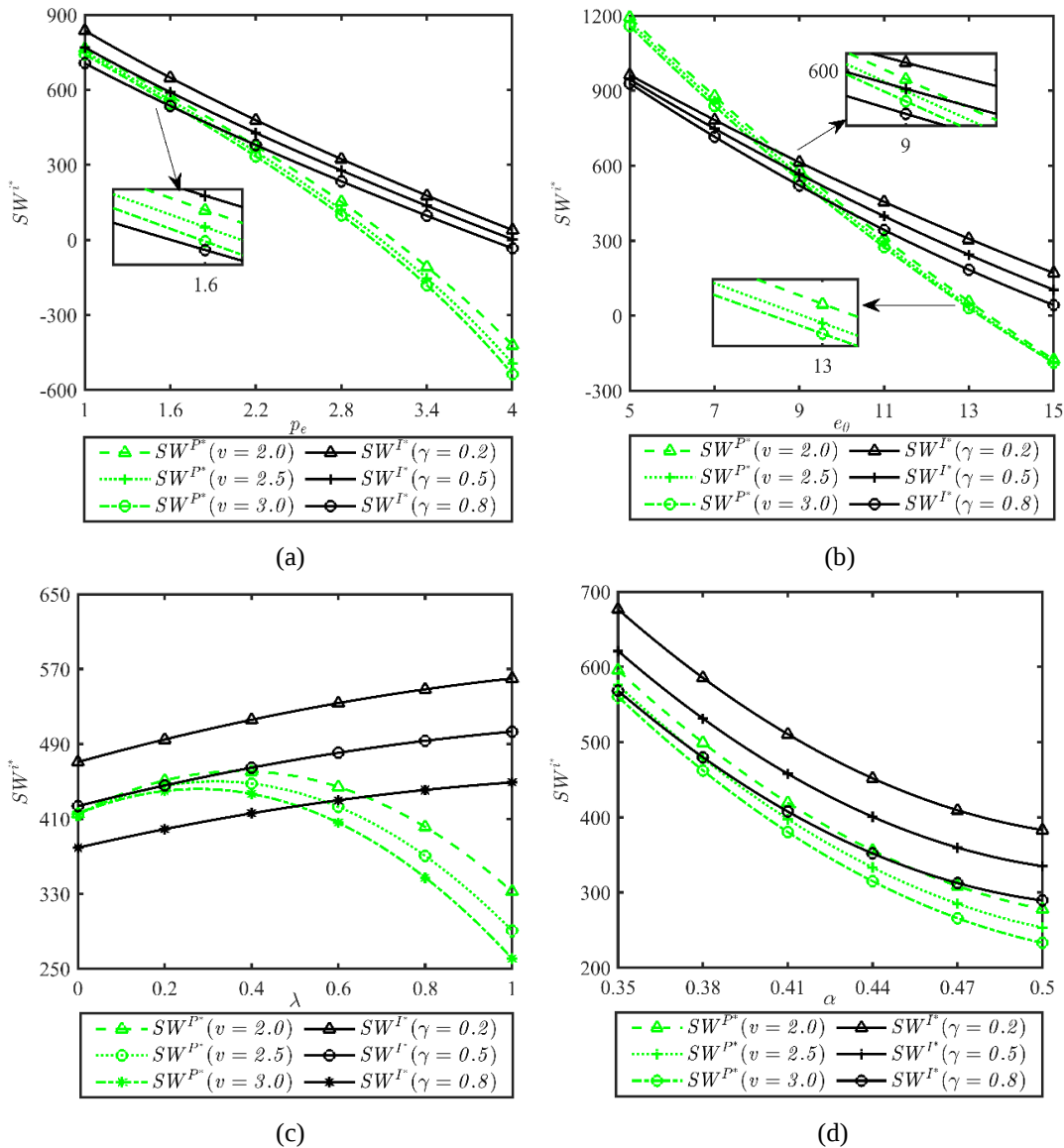


图 3-7 P 模型与 I 模型的社会福利比较

3.5 本章小结

本章在碳交易机制背景下考虑双渠道制造商对产品初始碳排量进行谎报，构建了制造商主导的谎报模型，总结了制造商在面临排碳约束时谎报行为发生的条件，剖析了制造商谎报对供应链绩效的影响方式，设计惩罚措施和激励措施两种机制应对制造商谎报行为。最后通过数值分析比较了两种措施社会福利的大小。从本章的研究中，我们得到以下结论：

(1) 制造商的谎报决策与碳交易价格、谎报系数密切相关。碳交易价格存在阈值，若碳交易价格低于阈值，则制造商会选择“低报”，同时这一行为将促进碳减排量和市场总需求的增加。而当碳交易价格高于阈值时，制造商会选择“高报”。不论碳交易价格如何，制造商“高报”（“低报”）时的社会福利均小于（大于）“实报”。

(2) 惩罚措施和激励措施在满足特定的条件时能够有效约束制造商的谎报行为。对于惩罚措施，需要确保发现概率和惩罚系数的乘积值不小于某一常数。该常数由消费者低碳偏好、碳配额比例及碳交易价格共同决定。对于激励措施，若模型参数满足既定条件，且政府分担比例处于有效区间时激励措施发挥作用；否则，即便政府承担所有的区块链技术成本，也不能阻止制造商谎报。在同一单位产品区块链技术应用成本下，谎报系数的增加会使政府分担比例的有效区间缩小。

(3) 制造商“高报”时，惩罚措施和激励措施分别适用不同的情景。政府设计这两项措施时是以实现社会福利最大化为初衷，因此就社会福利而言，若碳交易价格较低或初始碳排放量较小，则惩罚措施效果更好；否则，反之。当碳配额比例较大时，激励措施优于惩罚措施；当碳配额比例较小且消费者低碳偏好折扣系数较大时，惩罚措施优于激励措施。惩罚措施和激励措施社会福利均与消费者线下渠道偏好系数负相关，且大多数情况下激励措施优于惩罚措施。

通过本章结论，可得如下管理启示：

在政府层面，首先，碳交易价格及碳配额比例的合理设置直接影响制造商的谎报决策，因此政府应通过合理调整碳配额比例实现对碳市场的宏观调控，并根据市场供需状况指导碳市场上碳排放权的交易，以避免碳交易价格过高导致碳市场失衡。其次，鉴于制造商“高报”行为对环境效益造成损害，政府需要加强对企业碳信息报告的监督管理，并对谎报碳排放信息的企业采取惩罚或激励措施，从而遏制信息不实的行为。具体措施可基于企业单位产品的初始碳排放量来定制，对于初始碳排放量较低的情况，应实施惩

罚措施；反之，则应考虑激励措施。最后，由于碳交易价格的阈值等于消费者低碳偏好系数与碳配额比例的比值，政府可以通过提升消费者的低碳偏好系数或降低碳配额比例来抑制制造商的“高报”行为，从而促进低碳经济的发展。

在制造商层面，首先，一旦企业的谎报行为被揭露，不仅会面临政府的严厉惩罚，同时也将严重损害企业声誉，甚至可能导致消费者信任的流失。因此，企业应加强自身的碳信息披露意识，及时准确地披露碳信息，以树立良好的社会形象。其次，消费者对线下渠道的偏好增强不利于碳减排和制造商利润的提高。因此，制造商应该通过提高服务质量和采取优惠机制吸引消费者转向线上购物，以此扩大消费者群体提升企业利润。

第4章 碳交易机制下考虑补贴与排碳谎报的双渠道供应链定价与减排决策研究

低碳产品具有一系列优点，如环保、易维护、可重复使用等。然而，由于低碳产品的研发通常需要大量的资金和精力支持，且研发失败率较高，这使得制造企业生产此类产品的意愿较低。同时，低碳产品的价格通常高于普通产品，这使得消费者对此类产品的购买热情不高，进一步影响了制造商的生产动力。为了解决这一难题，政府通常采取补贴政策来激励制造商生产低碳产品并鼓励消费者购买。这一政策有助于提高低碳产品的市场接受度，促进低碳经济的发展。目前，政府对制造商低碳生产成本以及碳减排量进行补贴是两种常用的政府补贴方式。已有许多学者研究低碳供应链中政府实行碳减排成本补贴及碳减排量补贴，然而，少有学者研究基于信息不对称和碳交易机制背景，考虑政府对双渠道低碳供应链实施补贴政策。

本章在第三章的基础上，将政府补贴考虑在内，分别研究了低碳产品生产过程中初始碳排量信息不对称的条件下政府对制造商分别实施碳减排量补贴以及碳减排成本补贴策略对双渠道供应链最优决策的影响。分析了制造商的谎报行为，以期解决以下问题：(1) 政府补贴策略是否会影响制造商的谎报决策？(2) 制造商的谎报行为对补贴策略的影响如何？(3) 在制造商谎报行为下，哪种补贴策略更优？

4.1 模型描述

在第三章的基础上，本章主要研究政府补贴作为一种外部诱因，考虑政府对制造商碳减排量按一定比例 s ($0 \leq s \leq 1$) 进行补贴以及对碳减排成本按一定比例 t ($0 \leq t \leq 1$) 进行补贴。探讨制造商的谎报决策及补贴策略对销售价、碳减排量、制造商利润以及社会福利的影响。并根据政府不同补贴策略建立了以下两种模型：谎报且碳减排量补贴模型；谎报且碳减排成本补贴模型。由上述两个模型可得出制造商实报情况下对应两种补贴策略的均衡解。双渠道供应链结构如图 4-1 所示。

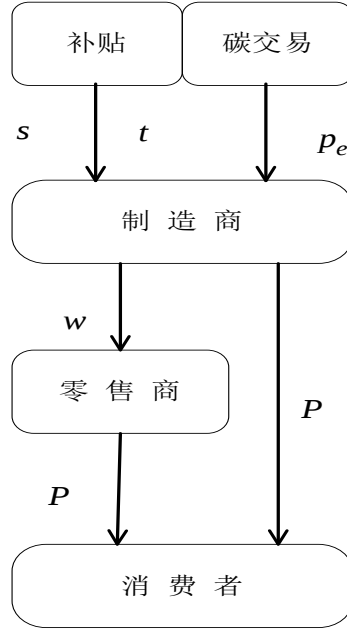


图 4-1 双渠道供应链结构图

4.2 符号说明和基本假设

文中用下标 $j=\{m, r\}$ 分别表示制造商和零售商，上标 $i=\{SR, SD, NR, ND\}$ 分别表示制造商谎报且碳减排量补贴模型、谎报且碳减排成本补贴模型、实报且碳减排量补贴模型以及实报且碳减排成本补贴模型。本章符号说明基本同第三章表 3-1 所示，不再赘述。不同于第三章的参数符号，将在下列假设中予以说明。在第三章假设的基础上补充下列假设：

假设 1 政府为鼓励企业生产低碳产品，将给予一定的财政补贴。假设政府的补贴策略有 2 种：(1) 根据产品的碳减排量对制造商进行补贴。参考文献[87]的处理方法，假设政府补贴金额与单位产品碳减排量成线性关系，单位产品政府补贴金额为 se ，其中 s 为单位产品碳减排量补贴系数 ($0 \leq s \leq 1$)。 (2) 根据产品的研发投入成本对制造商进行补贴。政府将按照一定比例 t 来分担制造商碳减排成本^[87]， t 表示政府补贴系数 ($0 \leq t \leq 1$)。

假设 2 社会福利 SW 由制造商利润 π_m 、零售商利润 π_r 、消费者剩余 CS 、政府总支出 GS 四个部分组成，其中 $GS = GS_1 + GS_2$ ， $GS_1 = \lambda \rho e_0 p_e D$ 表示政府碳排放治理支出， GS_2 表示补贴支出，社会福利函数表示为： $SW = \pi_m + \pi_r + CS - GS$ 。

为保证文中模型有实际意义，假设下述不等式得到满足：
 $\delta_1^* = a(1-\alpha) - e_0(p_e + \rho(\beta - \lambda p_e)) > 0$ ， $\delta_2^* = a(1-\alpha) - e_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)) > 0$ 。

为了便于化简公式，令 $A_1 = 3k - 2(s + \beta + p_e)^2 > 0$ ， $B_1 = 3k(1-t) - 2(\beta + p_e)^2 > 0$ 。

4.3 模型建立与求解

4.3.1 制造商谎报且碳减排量补贴模型 (SR 模型)

政府为鼓励制造商生产低碳产品，将采取碳减排量补贴的方式对制造商进行一定的补贴。两种销售渠道的市场需求函数分别表示为：

$$D_c^{SR} = \alpha a - P^{SR} - \beta(\rho e_0 - e^{SR}) \quad (4-1)$$

$$D_d^{SR} = (1 - \alpha)a - P^{SR} - \beta(\rho e_0 - e^{SR}) \quad (4-2)$$

此时制造商的公开利润、零售商利润如下：

$$\pi_m^{SR} = w^{SR} D_c^{SR} + P^{SR} D_d^{SR} + s e^{SR} D^{SR} - 1/2 k (e^{SR})^2 - p_e [(e_0 - e^{SR}) D^{SR} - \lambda \rho^{SR} e_0 D^{SR}] \quad (4-3)$$

$$\pi_r^{SR} = (P^{SR} - w^{SR}) D_c^{SR} \quad (4-4)$$

制造商首先决策低碳产品的单位碳减排水平 e^{SR} 、批发价格 w^{SR} ，零售商根据观察到的制造商决策结果来确定低碳产品的销售价格 P^{SR} 以获得最大利润。

首先对(4-4)式中的销售价 P^{SR} 求二阶偏导可得： $\frac{\partial^2 \pi_r^{SR}}{\partial (P^{SR})^2} = -2$ ，由于 $-2 < 0$ 可知 π_r^{SR}

是关于销售价格 P^{SR} 的凹函数，令 $\frac{\partial \pi_r^{SR}}{\partial P^{SR}} = 0$ 得到：

$$P^{SR} = \frac{\alpha a + \beta(e^{SR} - \rho e_0) + w^{SR}}{2} \quad (4-5)$$

将(4-5)式代入(4-3)式，并求 π_m^{SR} 关于 w^{SR} 和 e^{SR} 的海瑟矩阵，得到：

$$H_4 = \begin{pmatrix} \frac{-3}{2} & \frac{\beta - 2(s + p_e)}{2} \\ \frac{\beta - 2(s + p_e)}{2} & \frac{\beta(4s + \beta) + 4\beta p_e - 2k}{2} \end{pmatrix} \quad (4-6)$$

观察(4-6)式可知 H_4 的一阶顺序主子式小于 0。当二阶顺序主子式满足 $\frac{3k - 2(s + \beta + p_e)^2}{2} > 0$ ，即 $3k - 2(s + \beta + p_e)^2 > 0$ 时， $H_4(w^{SR}, e^{SR})$ 负定， π_m^{SR} 存在唯一最优批

发价和最优碳减排量。联立方程 $\frac{\partial \pi_m^{SR}}{\partial w^{SR}} = 0$ 和 $\frac{\partial \pi_m^{SR}}{\partial e^{SR}} = 0$ 求解，得到最优批发价 w^{SR*} 和最优碳减排量 e^{SR*} 分别为：

$$w^{SR*} = \frac{e_0 p_e (1 - \lambda \rho) A_1 + (k - 2(s + \beta + p_e)(s + p_e)) \delta_1^*}{A_1} \quad (4-7)$$

$$e^{SR*} = \frac{2(s + \beta + p_e) \delta_1^*}{A_1} \quad (4-8)$$

将(4-7)式和(4-8)式代入(4-5)式可得：

$$P^{SR*} = w^{SR*} + \frac{2k\delta_1^* - a(1-2\alpha)A_1}{2A_1} \quad (4-9)$$

将(4-8)式、(4-9)式分别代入(4-1)式、(4-2)式可得市场总需求量：

$$D^{SR*} = \frac{2k\delta_1^*}{A_1} \quad (4-10)$$

将(4-7)式至(4-10)式分别代入(4-3)式、(4-4)式可得：

$$\pi_m^{SR*} = \frac{4k(\delta_1^*)^2 - a^2(1-2\alpha)^2 A_1}{4A_1} \quad (4-11)$$

$$\pi_r^{SR*} = \frac{(2k\delta_1^* - a(1-2\alpha)A_1)^2}{4(A_1)^2} \quad (4-12)$$

$$SW^{SR*} = \frac{\left[4k\delta_1^*(\delta_1^*(2A_1 + k - 8s(s + \beta + p_e)) + A_1(a(1-2\alpha) - 4\lambda p_e p_e)) - a^2(A_1)^2(1-2\alpha)^2 + 3(2k\delta_1^* - a(1-2\alpha)A_1)^2 \right]}{8(A_1)^2} \quad (4-13)$$

4.3.2 制造商实报且碳减排量补贴模型(NR 模型)

将 SR 模型中的均衡解取 $\rho=1$ ，便得到 NR 模型的均衡解，如下：

$$w^{NR*} = \frac{e_0 p_e(1-\lambda)A_1 + (k - 2(s + \beta + p_e)(s + p_e))\delta_2^*}{A_1} \quad (4-14)$$

$$e^{NR*} = \frac{2(s + \beta + p_e)\delta_2^*}{A_1} \quad (4-15)$$

$$P^{NR*} = w^{NR*} + \frac{2k\delta_2^* - a(1-2\alpha)A_1}{2A_1} \quad (4-16)$$

$$D^{NR*} = \frac{2k\delta_2^*}{A_1} \quad (4-17)$$

$$\pi_m^{NR*} = \frac{4k(\delta_2^*)^2 - a^2(1-2\alpha)^2 A_1}{4A_1} \quad (4-18)$$

$$\pi_r^{NR*} = \frac{(2k\delta_2^* - a(1-2\alpha)A_1)^2}{4(A_1)^2} \quad (4-19)$$

$$SW^{NR*} = \frac{\left[4k\delta_2^*(\delta_2^*(2A_1 + k - 8s(s + \beta + p_e)) + A_1(a(1-2\alpha) - 4\lambda e_0 p_e)) - a^2(A_1)^2(1-2\alpha)^2 + 3(2k\delta_2^* - a(1-2\alpha)A_1)^2 \right]}{8(A_1)^2} \quad (4-20)$$

4.3.3 制造商谎报且碳减排成本补贴模型(SD 模型)

政府为鼓励制造商生产低碳产品，将采取碳减排成本补贴的方式对制造商进行一定的补贴。两种销售渠道的市场需求函数分别表示为：

$$D_c^{SD} = \alpha a - P^{SD} - \beta(\rho e_0 - e^{SD}) \quad (4-21)$$

$$D_d^{SD} = (1 - \alpha)a - P^{SD} - \beta(\rho e_0 - e^{SD}) \quad (4-22)$$

此时制造商的公开利润、零售商利润如下：

$$\pi_m^{SD} = w^{SD} D_c^{SD} + P^{SD} D_d^{SD} - 1/2 k(1-t)(e^{SD})^2 - p_e[(e_0 - e^{SD})D^{SD} - \lambda \rho^{SD} e_0 D^{SD}] \quad (4-23)$$

$$\pi_r^{SD} = (P^{SD} - w^{SD}) D_c^{SD} \quad (4-24)$$

制造商和零售商决策过程同 SR 模型，对(4-24)式中的销售价 P^{SD} 求二阶偏导可得：

$\frac{\partial^2 \pi_r^{SD}}{\partial (P^{SD})^2} = -2$ ，由于 $-2 < 0$ 可知 π_r^{SD} 是关于销售价格 P^{SD} 的凹函数，令 $\frac{\partial \pi_r^{SD}}{\partial P^{SD}} = 0$ 得到：

$$P^{SD} = \frac{a\alpha + \beta(e^{SD} - \rho e_0) + w^{SD}}{2} \quad (4-25)$$

将(4-25)式代入(4-23)式，并求 π_m^{SD} 关于 w^{SD} 和 e^{SD} 的海瑟矩阵，得到：

$$H_5 = \begin{pmatrix} -\frac{3}{2} & \frac{\beta - 2p_e}{2} \\ \frac{\beta - 2p_e}{2} & \frac{\beta^2 + 4\beta p_e - 2k(1-t)}{2} \end{pmatrix} \quad (4-26)$$

观察(4-26)式可知 H_5 的一阶顺序主子式小于 0。当二阶顺序主子式满足 $\frac{3k(1-t) - 2(\beta + p_e)^2}{2} > 0$ ，即 $3k(1-t) - 2(\beta + p_e)^2 > 0$ 时， $H_5(w^{SD}, e^{SD})$ 负定， π_m^{SD} 存在唯一最优批发价和最优碳减排量。联立方程 $\frac{\partial \pi_m^{SD}}{\partial w^{SD}} = 0$ 和 $\frac{\partial \pi_m^{SD}}{\partial e^{SD}} = 0$ 求解，得到最优批发价 w^{SD*} 和最优碳减排量 e^{SD*} 分别为：

$$w^{SD*} = \frac{e_0 p_e (1 - \lambda \rho) B_1 + (k(1-t) - 2p_e(\beta + p_e)) \delta_1^*}{B_1} \quad (4-27)$$

$$e^{SD*} = \frac{2(\beta + p_e) \delta_1^*}{B_1} \quad (4-28)$$

将(4-27)式和(4-28)式代入(4-25)式可得：

$$P^{SD*} = w^{SD*} + \frac{2k(1-t)\delta_1^* - a(1-2\alpha)B_1}{2B_1} \quad (4-29)$$

将(4-28)式、(4-29)式分别代入(4-21)式、(4-22)式可得市场总需求量：

$$D^{SD*} = \frac{2k(1-t)\delta_1^*}{B_1} \quad (4-30)$$

将(4-27)式至(4-30)式分别代入(4-23)式、(4-24)式可得：

$$\pi_m^{SD*} = \frac{4k(1-t)(\delta_1^*)^2 - a^2(1-2\alpha)^2 B_1}{4B_1} \quad (4-31)$$

$$\pi_r^{SD*} = \frac{(2k(1-t)\delta_1^* - a(1-2\alpha)B_1)^2}{4(B_1)^2} \quad (4-32)$$

$$SW^{SD*} = \frac{\left[4k(\delta_1^*)^2((1-t)(2B_1+k) + 4t(\beta+p_e)^2) + 4k(1-t)\delta_1^*B_1(a(1-2\alpha)) \right. \\ \left. - 4\lambda\rho e_0 p_e) - a^2(1-2\alpha)^2(B_1)^2 + 3(2k(1-t)\delta_1^* - a(1-2\alpha)B_1)^2 \right]}{8(B_1)^2} \quad (4-33)$$

4.3.4 制造商实报且碳减排成本补贴(ND 模型)

将 SD 模型中的均衡解取 $\rho=1$ ，便得到 ND 模型的均衡解，如下：

$$w^{ND*} = \frac{e_0 p_e(1-\lambda)B_1 + (k(1-t) - 2p_e(\beta+p_e))\delta_2^*}{B_1} \quad (4-34)$$

$$e^{ND*} = \frac{2(\beta+p_e)\delta_2^*}{B_1} \quad (4-35)$$

$$P^{ND*} = w^{ND*} + \frac{2k(1-t)\delta_2^* - a(1-2\alpha)B_1}{2B_1} \quad (4-36)$$

$$D^{ND*} = \frac{2k(1-t)\delta_2^*}{B_1} \quad (4-37)$$

$$\pi_m^{ND*} = \frac{4k(1-t)(\delta_2^*)^2 - a^2(1-2\alpha)^2 B_1}{4B_1} \quad (4-38)$$

$$\pi_r^{ND*} = \frac{(2k(1-t)\delta_2^* - a(1-2\alpha)B_1)^2}{4(B_1)^2} \quad (4-39)$$

$$SW^{ND*} = \frac{\left[4k(\delta_2^*)^2((1-t)(2B_1+k) + 4t(\beta+p_e)^2) + 4k(1-t)\delta_2^*B_1(a(1-2\alpha)) \right. \\ \left. - 4\lambda e_0 p_e) - a^2(1-2\alpha)^2(B_1)^2 + 3(2k(1-t)\delta_2^* - a(1-2\alpha)B_1)^2 \right]}{8(B_1)^2} \quad (4-40)$$

推论 4-1 制造商初始碳排量谎报系数对供应链参数的影响如下：

(1) 若 $0 < p_e \leq \frac{\beta}{\lambda}$ ，则 $\frac{\partial e^{i*}}{\partial \rho} \leq 0$ ， $\frac{\partial D^{i*}}{\partial \rho} \leq 0$ ， $\frac{\partial \pi_m^{i*}}{\partial \rho} \leq 0$ ；若 $p_e > \frac{\beta}{\lambda}$ ，则 $\frac{\partial e^{i*}}{\partial \rho} > 0$ ， $\frac{\partial D^{i*}}{\partial \rho} > 0$ ，

$\frac{\partial \pi_m^{i*}}{\partial \rho} > 0$ ($i = SR, SD$)。

(2) (i) 若 $0 \leq p_e \leq p_{e1}^1$ ，则 $\frac{\partial P^{SR*}}{\partial \rho} \leq 0$ ；若 $p_e > p_{e1}^1$ ，则 $\frac{\partial P^{SR*}}{\partial \rho} > 0$ 。(ii) 若 $0 \leq p_e \leq p_{e1}^2$ ，则

$$\frac{\partial P^{SD*}}{\partial \rho} \leq 0; \text{ 若 } p_e > p_{e1}^2, \text{ 则 } \frac{\partial P^{SD*}}{\partial \rho} > 0。$$

$$\text{其中 } p_{e1}^1 = \frac{k\lambda - 2\beta(s(2+\lambda) + (1+\lambda)\beta) + \sqrt{16\beta^2(k-s(s+\beta))(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta(s(2+\lambda) + (1+\lambda)\beta))^2}}{4\beta(1+\lambda)},$$

$$p_{e1}^2 = \frac{k\lambda(1-t) - 2\beta^2(1+\lambda) + \sqrt{16k\beta^2(1-t)(1+\lambda) + (2\beta^2(1+\lambda) - k\lambda(1-t))^2}}{4\beta(1+\lambda)}。$$

证明：见附录 7。

推论 4-1 揭示,当碳交易价格小于阈值时,谎报程度的提升总是可以降低碳减排量、市场总需求量以及制造商利润。当碳交易价格高于阈值时,结论相反。此外,补贴策略虽然不会改变谎报系数对碳减排量、市场总需求以及制造商利润的影响,却能够作用于谎报系数对销售价的影响。碳交易价格较低时,制造商获得的碳利润较少,且谎报系数的增加会导致产品最终排放量增加,从而引起市场需求的下降与制造商购买碳排放权成本的增加,制造商利润因此而下降。为减轻成本负担,制造商倾向于减少对碳减排的投资,故碳减排量也随之下降。为减缓谎报系数的增加对市场需求的消极影响,制造商和零售商将降低销售价。

推论 4-2 消费者线下渠道偏好系数对供应链参数的影响如下:

$$(1) \frac{\partial e^{i*}}{\partial \alpha} < 0; \frac{\partial D^{i*}}{\partial \alpha} < 0; \frac{\partial \pi_m^{i*}}{\partial \alpha} < 0 \ (i = SR, SD)。$$

$$(2) (i) \text{ 若 } 0 \leq p_e \leq \frac{k}{2\beta} - s - \beta, \text{ 则 } \frac{\partial P^{SR*}}{\partial \alpha} \geq 0; \text{ 若 } p_e > \frac{k}{2\beta} - s - \beta, \text{ 则 } \frac{\partial P^{SR*}}{\partial \alpha} < 0。 (ii) \text{ 若}$$

$$0 \leq p_e < \frac{k(1-t)}{2\beta} - \beta, \text{ 则 } \frac{\partial P^{SD*}}{\partial \alpha} > 0; \text{ 若 } p_e \geq \frac{k(1-t)}{2\beta} - \beta, \text{ 则 } \frac{\partial P^{SD*}}{\partial \alpha} \leq 0。$$

证明：见附录 8。

推论 4-2 指出,消费者线下渠道偏好的增强会降低模型碳减排量、市场总需求量以及制造商利润。消费者偏好线下渠道的意愿增强意味着线上渠道偏好减弱,从而导致线上渠道需求下降,进而限制了制造商通过线上渠道获取消费者真实需求信息的能力,增加了其在市场竞争中的压力。这种压力抑制了制造商在碳减排方面的投资动力,最终造成碳减排量下降,并进一步引起市场需求和制造商利润的下降。当碳交易价格较低时,制造商获得碳利润较少,制造商和零售商通过提高销售价来实现利润最大化。而当碳交易价格较高时,制造商面临的碳配额购买成本相对增加,为刺激需求,制造商和零售商将采取降低销售价的策略。

推论 4-3 碳配额比例对供应链参数的影响如下：

$$(1) \frac{\partial e^{i*}}{\partial \lambda} > 0; \frac{\partial D^{i*}}{\partial \lambda} > 0; \frac{\partial \pi_m^{i*}}{\partial \lambda} > 0 \quad (i = SR, SD)。$$

$$(2) (i) \text{ 若 } 0 \leq p_e \leq \frac{k}{2\beta} - s - \beta, \text{ 则 } \frac{\partial P^{SR*}}{\partial \lambda} \leq 0; \text{ 若 } p_e > \frac{k}{2\beta} - s - \beta, \text{ 则 } \frac{\partial P^{SR*}}{\partial \lambda} > 0。 (ii) \text{ 若 } 0 \leq p_e < \frac{k(1-t)}{2\beta} - \beta, \text{ 则 } \frac{\partial P^{SD*}}{\partial \lambda} < 0; \text{ 若 } p_e \geq \frac{k(1-t)}{2\beta} - \beta, \text{ 则 } \frac{\partial P^{SD*}}{\partial \lambda} \geq 0。$$

证明：见附录 9。

从推论 4-3 可见，SR 和 SD 模型碳减排量、市场总需求及制造商利润与碳配额比例呈正相关关系。碳配额比例对销售价的影响与碳交易价格密切相关。碳配额比例的增加使制造商获得更多免费碳配额，一方面，制造商在满足碳限额的基础上能够出售过多的剩余碳配额；另一方面，在透支碳配额的情况下，制造商可以减少购入的碳配额，从而减轻碳交易政策对其自身利润的不利影响，进而刺激制造商提高碳减排量。市场需求因此得到提升，推动了制造商利润的增加。当碳交易价格较低时，制造商通过谎报获得的碳利润较少，需求增加导致制造商购买碳排放权的成本上升，为抵消碳排放权购买成本，制造商和零售商通过下调销售价来提高市场需求。

推论 4-4 碳减排量补贴系数对 SR 模型均衡解和利润的影响如下：

$$(1) \frac{\partial e^{SR*}}{\partial s} > 0; \frac{\partial D^{SR*}}{\partial s} > 0; \frac{\partial \pi_m^{SR*}}{\partial s} > 0。$$

$$(2) (i) \text{ 当 } \frac{2(s+\beta+p_e)^2}{3} < k \leq 6\beta^2, \text{ 有 } \frac{\partial P^{SR*}}{\partial s} > 0。 (ii) \text{ 当 } k > \max\{6\beta^2, \frac{2(s+\beta+p_e)^2}{3}\} \text{ 时,}$$

$$(a) \Gamma^1 < 0, \text{ 若 } 0 \leq p_e \leq p_{e1}^3, \text{ 则 } \frac{\partial P^{SR*}}{\partial s} \leq 0; \text{ 若 } p_e > p_{e1}^3, \text{ 则 } \frac{\partial P^{SR*}}{\partial s} > 0。 (b) \Gamma^1 > 0 \text{ 且 } \Gamma^2 < 0, \text{ 有}$$

$$\frac{\partial P^{SR*}}{\partial s} > 0; (c) \Gamma^1 > 0 \text{ 且 } \Gamma^2 > 0, \text{ 若 } 0 \leq p_e < p_{e2}^3 \text{ 或 } p_e > p_{e1}^3, \text{ 则 } \frac{\partial P^{SR*}}{\partial s} > 0; \text{ 若 } p_{e2}^3 \leq p_e \leq p_{e1}^3, \text{ 则}$$

$$\frac{\partial P^{SR*}}{\partial s} > 0。 \quad \text{其中} \quad \Gamma^1 = k(\beta - 2s) + 2\beta(s + \beta)^2, \quad \Gamma^2 = k - 2\beta(s + \beta),$$

$$p_{e1}^3 = \frac{(k - 2\beta(s + \beta)) + \sqrt{k(k - 6\beta^2)}}{2\beta}, \quad p_{e2}^3 = \frac{(k - 2\beta(s + \beta)) - \sqrt{k(k - 6\beta^2)}}{2\beta}。$$

证明：见附录 10。

推论 4-4 阐述了碳减排量补贴系数的增加对 SR 模型中碳减排量、市场总需求以及制造商利润均有积极影响。因为制造商获得政府一定碳减排量补贴时，更加有动力提升碳减排技术，并积极开展低碳产品生产，从而推动消费者购买低碳产品。由此市场总需

求量得以提升，进而使制造商利润得到提高。碳减排量补贴系数对销售价的影响较为复杂，其主要受碳减排成本系数和碳交易价格的影响。

推论 4-5 碳减排成本补贴系数 t 对 SD 模型均衡解和利润的影响如下：

$$\frac{\partial e^{SD*}}{\partial t} > 0; \frac{\partial D^{SD*}}{\partial t} > 0; \frac{\partial \pi_m^{SD*}}{\partial t} > 0。若 $0 \leq p_e \leq 2\beta$ ，则 $\frac{\partial P^{SD*}}{\partial t} \geq 0$ ；若 $p_e > 2\beta$ ，则 $\frac{\partial P^{SD*}}{\partial t} < 0$ 。$$

证明：见附录 11。

推论 4-5 表明，碳减排成本补贴系数的增加对碳减排量、市场总需求量以及制造商利润产生积极影响。由于政府进行一定比例的碳减排成本补贴，故制造商的减排成本压力得以缓解。为提升自身利润，制造商将加大碳减排技术投资力度，为消费者提供更加环保的产品，市场需求因此得以提升，进一步提高制造商利润水平。当碳交易价格较低时，为弥补需求增加导致的碳排放权购买成本增加制造商和零售商将提高销售价。随着碳减排成本系数的增加，制造商获得的补贴增加。在一定程度上能够补偿制造商购买碳排放权的成本，而当碳交易价格较高时，制造商和零售商将采取“薄利多销”策略刺激消费，以便快速提升利润水平。

4.4 模型对比分析

推论 4-6 比较 SR 模型与 NR 模型的碳减排量、市场总需求及制造商利润，得到如下结论：

- (1) 若 $0 \leq p_e < \frac{\beta}{\lambda}$ 且 $0 \leq \rho < 1$ 或 $\frac{\beta}{\lambda} < p_e$ 且 $\rho > 1$ ，则 $e^{SR*} > e^{NR*}$ ， $D^{SR*} > D^{NR*}$ ， $\pi_m^{SR*} > \pi_m^{NR*}$ ；
- (2) 若 $0 \leq p_e < \frac{\beta}{\lambda}$ 且 $\rho > 1$ 或 $\frac{\beta}{\lambda} < p_e$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，则 $e^{SR*} < e^{NR*}$ ， $D^{SR*} < D^{NR*}$ ， $\pi_m^{SR*} < \pi_m^{NR*}$ 。
- (3) 若 $p_e = \frac{\beta}{\lambda}$ ，则 $e^{SR*} = e^{NR*}$ ， $D^{SR*} = D^{NR*}$ ， $\pi_m^{SR*} = \pi_m^{NR*}$ 。

证明：见附录 12。

观察推论 4-6 我们发现，制造商谎报与“实报”时的碳减排量、市场总需求以及制造商利润之间的差异与碳减排量补贴系数无关。若碳交易价格低于某一阈值，则制造商“低报”会提高碳减排量、市场需求以及自身利润，“高报”则产生相反效果。因为在低碳交易价格下，“低报”使制造商获得的碳利润减少，但同时使产品最终排放量下降，很大程度上提高了消费者购买意愿，制造商因此更加积极提升碳减排技术。由此制造商不仅能够获得更多碳减排量补贴且市场需求的增加使自身利润得到提高。而“高报”对市

场需求的负向影响较大，在需求下降的压力下，制造商将减小减排力度，最终导致制造商利润下降。当碳交易价格较高时，制造商“低报”会对碳减排量、市场需求以及自身利润带来不利影响，“高报”则结论相反。其原因是，制造商在碳交易价格较高时“低报”对碳利润的负向影响较大，制造商将降低碳减排努力，从而导致市场需求下降和自身利润水平降低。可见，制造商的谎报行为在碳减排量补贴策略下对碳减排量、市场总需求以及制造商利润带来或消极或积极的影响，主要取决于碳交易价格的高低。

推论 4-7 比较 SR 模型与 NR 模型的销售价，得到如下结论：

(1) 当 $\Delta_{f_4(p_e)} \leq 0$ 时，若 $p_e \geq 0$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，则 $P^{SR*} < P^{NR*}$ ；若 $p_e \geq 0$ 且 $\rho > 1$ ，则 $P^{SR*} > P^{NR*}$ 。

(2) 当 $\Delta_{f_4(p_e)} > 0$ 时，

(i) $k - s(s + \beta) > 0$ ，若 $0 \leq p_e \leq p_{e2}^4$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，或 $p_e > p_{e2}^4$ 且 $\rho > 1$ ，则 $P^{SR*} > P^{NR*}$ ；若 $0 \leq p_e \leq p_{e2}^4$ 且 $\rho > 1$ ，或 $p_e > p_{e2}^4$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，则 $P^{SR*} < P^{NR*}$ 。

(ii) $k - s(s + \beta) \leq 0$ 且 $k\lambda - 2\beta(s(2 + \lambda) + (1 + \lambda)\beta) < 0$ ，若 $p_e \geq 0$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，则 $P^{SR*} < P^{NR*}$ ；若 $p_e \geq 0$ 且 $\rho > 1$ ，则 $P^{SR*} > P^{NR*}$ 。

(iii) $k - s(s + \beta) \leq 0$ 且 $k\lambda - 2\beta(s(2 + \lambda) + (1 + \lambda)\beta) > 0$ ，若 $p_e \in \{[0, p_{e1}^4] \cup (p_{e2}^4, +\infty)\}$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，或 $p_{e1}^4 \leq p_e \leq p_{e2}^4$ 且 $\rho > 1$ ，则 $P^{SR*} < P^{NR*}$ ；若 $p_e \in \{[0, p_{e1}^4] \cup (p_{e2}^4, +\infty)\}$ 且 $\rho > 1$ ，或 $p_{e1}^4 \leq p_e \leq p_{e2}^4$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，则 $P^{SR*} > P^{NR*}$ 。

$$\text{其中 } \Delta_{f_4(p_e)} = 16\beta^2(k - s(s + \beta))(1 + \lambda) + (k\lambda - 2\beta(s(2 + \lambda) + (1 + \lambda)\beta))^2, \\ p_{e1}^4 = \frac{k\lambda - 2\beta(s(2 + \lambda) + (1 + \lambda)\beta) - \sqrt{\Delta_{f_4(p_e)}}}{4\beta(1 + \lambda)}, \quad p_{e2}^4 = \frac{k\lambda - 2\beta(s(2 + \lambda) + (1 + \lambda)\beta) + \sqrt{\Delta_{f_4(p_e)}}}{4\beta(1 + \lambda)}.$$

证明：见附录 13。

推论 4-7 表明，不同于推论 4-6，制造商谎报与“实报”时销售价之间的差异与碳减排量补贴系数存在关联。制造商的谎报行为对碳减排量补贴策略下的销售价影响较为复杂，且这种影响主要与碳交易价格紧密相关。在碳交易价格较低的情况下，制造商不论是选择“低报”还是“高报”，都可能导致销售价的提升或降低。相似地，当碳交易价格较高时，这两种报告行为对销售价的影响也呈现出类似的不确定性。这表明，制造商的谎报行为对于销售价的最终影响依赖于碳减排量补贴系数以及碳交易价格的具体数值。

推论 4-8 比较 SD 模型与 ND 模型碳减排量、市场总需求、销售价及制造商利润，得到如下结论：

- (1) (i) 若 $0 \leq p_e < \frac{\beta}{\lambda}$ 且 $0 < \rho < 1$, 或 $\frac{\beta}{\lambda} < p_e$ 且 $\rho > 1$, 则 $e^{SD*} > e^{ND*}$, $D^{SD*} > D^{ND*}$, $\pi_m^{SD*} > \pi_m^{ND*}$;
 (ii) 若 $0 \leq p_e < \frac{\beta}{\lambda}$ 且 $\rho > 1$, 或 $\frac{\beta}{\lambda} < p_e$ 且 $0 < \rho < 1$, 则 $e^{SD*} < e^{ND*}$, $D^{SD*} < D^{ND*}$, $\pi_m^{SD*} < \pi_m^{ND*}$ 。
 (iii) 若 $p_e = \frac{\beta}{\lambda}$, 则 $e^{SD*} = e^{ND*}$, $D^{SD*} = D^{ND*}$, $\pi_m^{SD*} = \pi_m^{ND*}$ 。

(2) (i) 若 $0 \leq p_e \leq p_{e2}^5$ 且 $0 \leq \rho < 1$, 或 $p_e > p_{e2}^5$ 且 $\rho > 1$, 则 $P^{SD*} > P^{ND*}$; (ii) 若 $0 \leq p_e \leq p_{e2}^5$ 且 $\rho > 1$, 或 $p_e > p_{e2}^5$ 且 $0 \leq \rho < 1$, 则 $P^{SD*} < P^{ND*}$ 。

$$\text{其中 } p_{e2}^5 = \frac{k\lambda(1-t) - 2\beta^2(1+\lambda) + \sqrt{16k\beta^2(1-t)(1+\lambda) + (2\beta^2(1+\lambda) - k(1-t)\lambda)^2}}{4\beta(1+\lambda)}。$$

证明：见附录 14。

推论 4-8 指出，制造商谎报与“实报”时的碳减排量、市场总需求以及自身利润之间的差异与碳减排成本补贴系数无关。制造商的谎报行为对碳减排成本补贴策略下的碳减排量、市场总需求及制造商利润的影响主要与碳交易价格有关。具体而言，制造商在碳交易价格较低(高)时“低报”(“高报”)会提高碳减排量、市场需求及自身利润，“高报”(“低报”)对碳减排量、市场需求及自身利润产生消极影响。我们还发现，碳减排成本补贴系数间接影响制造商谎报与“实报”时销售价之间的差异。

推论 4-9 比较 SR 模型与 SD 模型的碳减排量、市场总需求及制造商利润，得到如下结论：

(1) (i) 当 $2s^2 + 3kt \leq 2\sqrt{6ks}$ 时，对于 $\forall p_e \in [0, +\infty)$ ，则 $e^{SR*} > e^{SD*}$; (ii) 当 $2s^2 + 3kt > 2\sqrt{6ks}$ 时，若 $0 \leq p_e < \min\{y_1, \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}\} - \beta$ ，则 $e^{SR*} < e^{SD*}$; 若 $y_1 - \beta \leq p_e < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} - \beta$ ，则 $e^{SR*} \geq e^{SD*}$ 。

(2) 若 $0 \leq p_e < \min\{\bar{y}, y_4\} - \beta$ ，则 $D^{SR*} > D^{SD*}$ ， $\pi_m^{SR*} > \pi_m^{SD*}$ ；若 $y_4 - \beta \leq p_e < \bar{y} - \beta$ ，则 $D^{SR*} \leq D^{SD*}$ ， $\pi_m^{SR*} \leq \pi_m^{SD*}$ 。

$$\text{其中 } y_1 = \frac{3kt - 2s^2 + \sqrt{(2s^2 + 3kt)^2 - 24ks^2}}{4s}, \quad \bar{y} = \min\left\{\sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}, \sqrt{\frac{3k}{2}} - s\right\}, \quad y_4 = \frac{s(1-t + \sqrt{1-t})}{t}。$$

证明：见附录 15。

推论 4-9 表明，在制造商谎报行为下，当两种补贴系数之间满足特定条件时，SR 模型碳减排量始终优于 SD 模型，否则，碳交易价格显著影响两种补贴策略下的碳减排量。具体而言，当碳交易价格较高 ($y_1 - \beta \leq p_e < (\sqrt{3k(1-t)}/\sqrt{2}) - \beta$) 时，SR 模型碳减排量优于 SD 模型；当碳交易价格较低时，则结论相反。这是因为在高碳交易价格环境下，制造

商面临更高的购买碳排放权的成本，因此更倾向于采用更高效的减排技术以减轻成本压力并获得更多的碳减排补贴。相反，当碳交易价格较低时，碳减排成本补贴对于激励制造商提升减排水平的作用更加明显。此外，碳交易价格的不同水平也会导致两种补贴策略下的市场总需求和制造商利润之间的关系发生变化。

推论 4-10 比较 SR 模型与 SD 模型的销售价，得到如下结论：

(1) 当 $\Delta_{f_2(y)} \leq 0$ 时，有 $P^{SR*} > P^{SD*}$ 。

(2) 当 $\Delta_{f_2(y)} > 0$ 时，(i) $s - 3\beta \geq 0$ ，若 $0 \leq p_e < \min\{\sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}, y_5\} - \beta$ ，则 $P^{SR*} < P^{SD*}$ ；若 $y_5 - \beta \leq p_e < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} - \beta$ ，则 $P^{SR*} > P^{SD*}$ 。(ii) $s - 3\beta < 0$ 且 $\beta(2s^2 - 3kt) - 2ks(1-t) > 0$ ，若 $0 \leq p_e < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} - \beta$ ，则 $P^{SR*} > P^{SD*}$ 。(iii) $s - 3\beta < 0$ 且 $\beta(2s^2 - 3kt) - 2ks(1-t) < 0$ ，若 $0 \leq p_e < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} - \beta < y_6 - \beta$ ，或 $0 \leq p_e < y_6 - \beta < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} - \beta$ ，或 $y_5 - \beta < p_e < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} - \beta$ ，则 $P^{SR*} > P^{SD*}$ ；若 $y_6 - \beta \leq p_e < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} - \beta$ 或 $y_6 - \beta < p_e < y_5 - \beta$ ，则 $P^{SR*} < P^{SD*}$ 。

其中 $\Delta_{f_2(y)} = \beta^2(2s^2 + 3kt)^2 + 4ks^2(k(1-t) - 6\beta^2)$ ， $y_5 = \frac{2ks(1-t) - \beta(2s^2 - 3kt) + \sqrt{\Delta_{f_2(y)}}}{2(kt + 2s\beta)}$ ，

$y_6 = \frac{2ks(1-t) - \beta(2s^2 - 3kt) - \sqrt{\Delta_{f_2(y)}}}{2(kt + 2s\beta)}$ 。

证明：见附录 16。

推论 4-10 表明，在制造商谎报行为下，两种补贴策略下的销售价之间的大小关系比较复杂，当两种补贴系数满足一定条件时，存在 SR 模型销售价始终大于 SD 模型的情况。对比推论 4-9(1)中两种补贴系数所满足的条件可知此时 SR 模型碳减排量始终大于 SD 模型，这表明 SR 模型中制造商投资碳减排较多，因此制造商和零售商通过提高销售价转移成本压力。

4.5 数值分析

在本节中，将通过数值分析方法，系统地考察制造商谎报行为对供应链关键参数的综合作用，分析其在环境效益、经济效益与社会效益三个维度的具体影响。进一步地，本节研究将深入探讨在制造商谎报行为背景下，两种不同的补贴系数如何影响供应链的

关键参数，并据此评估和比较不同补贴策略的优劣。参照周艳菊等^[2]，相关参数取值为：

$$a=100, k=35, \alpha=0.4, \beta=0.6, e_0=10, \lambda=0.6, p_e=2, s=0.5, t=0.5。$$

4.5.1 谎报系数对供应链参数的敏感性分析

图 4-2 揭示了谎报系数对两种补贴策略下碳减排量和销售价的影响。从图 4-2(a)我们发现，无论采取何种补贴策略，制造商的“低报”行为均对碳减排量产生负向影响，“高报”则产生正向影响。这表明制造商“高报”在一定程度上提高了环境效益。在制造商谎报行为下，SR 模型碳减排量小于 SD 模型，究其原因，虽然政府给予一定补贴，但制造商仍需承担较多碳减排成本，直接针对碳减排成本的补贴能够更有效地缓解制造商的成本压力，从而相较于基于碳减排量的补贴，更强烈地激励制造商增加对碳减排的投入，故引起 SD 模型碳减排量更大。由于“低报”时碳减排量下降，所以制造商和零售商将提高销售价以提升自身利润水平。

从图 4-3 可以发现，两种补贴策略下制造商“低报”会降低自身利润，“高报”则提升自身利润，且谎报系数越大，制造商利润越大。从利润最大化角度出发，此时制造商会选择“高报”。此外，SR 模型制造商利润小于 SD 模型，原因是碳减排成本补贴更加刺激制造商提升碳减排技术，从而促进市场需求的增加，最终导致制造商利润提升。图 4-3(b)表明，制造商的“高报”行为会损害社会福利，且随着谎报系数的增加社会福利逐渐下降。由于制造商“高报”对政府支出的碳排放治理成本的消极影响较大，所以导致社会福利逐渐下降。制造商“高报”触及了碳配额的不公平分配，阻碍了碳市场的平稳运行。政府应针对企业可能存在的谎报行为制定惩罚措施，遏制可能存在的此类谎报行为。

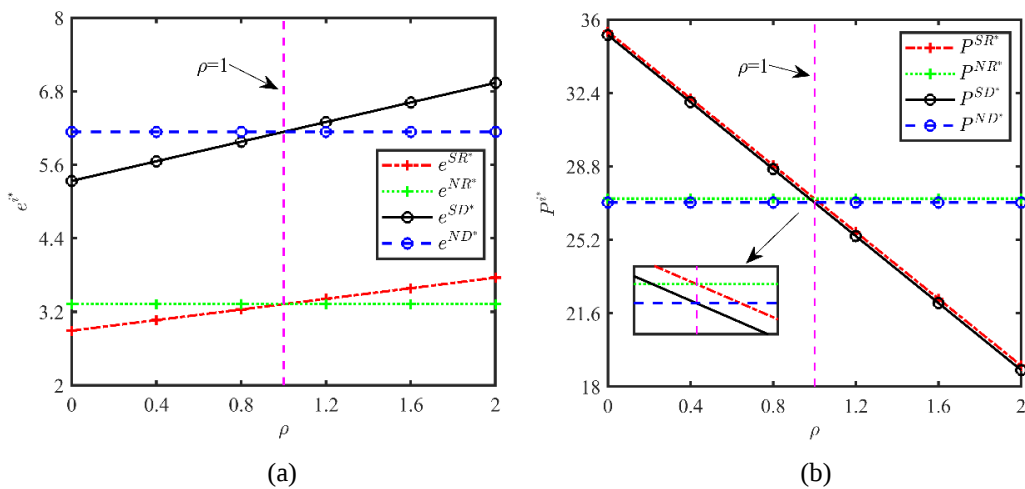


图 4-2 谎报系数对碳减排量和销售价的影响

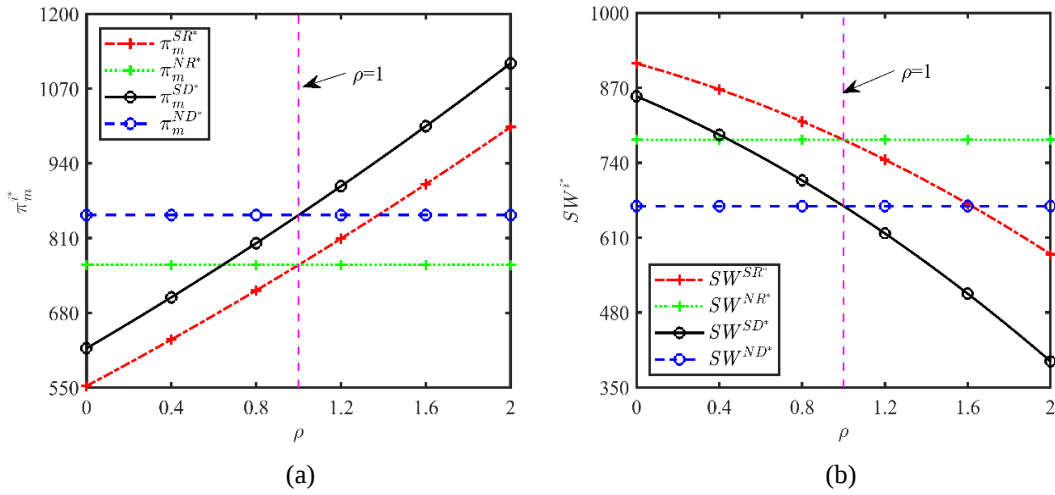


图 4-3 谎报系数对制造商利润和社会福利的影响

4.5.2 碳配额比例对供应链参数的敏感性分析

图 4-4 阐述了碳配额比例与碳排放减少量之间存在正相关关系，同时与销售价格存在负相关关系。碳配额比例的增加意味着制造商获得免费碳配额增多，能够有效降低碳限额政策对制造商的不利影响，从而激励制造商增加碳减排投资。由于政府补贴有限，故制造商和零售商通过下调销售价以刺激市场需求，以此提升利润水平减缓成本压力。不管制造商“低报”还是“高报”，SD 模型碳减排量始终优于 SR 模型，而 SD 模型销售价始终低于 SR 模型。由于 SD 模型投入碳减排成本较大，所以 SD 模型制造商和零售商制定更低的销售价来扩大市场需求。

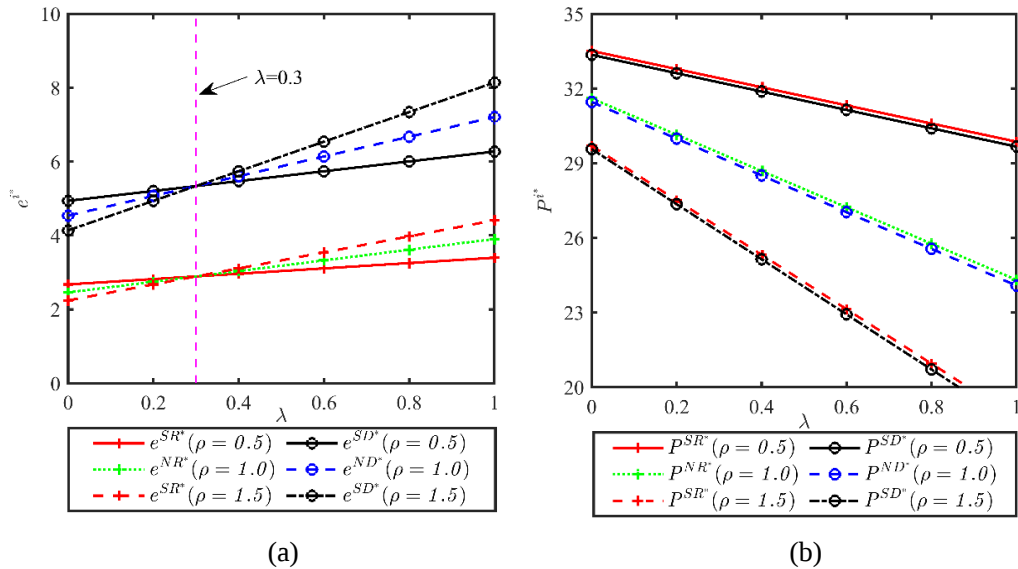


图 4-4 碳配额比例对碳减排量和销售价的影响

图 4-5 表明，无论何种补贴策略，碳配额比例的增加均对制造商利润带来积极影响，且随着碳配额比例系数的增加，制造商的利润呈现出显著的上升趋势。然而，社会福利

与碳配额比例之间并不总是呈正相关关系。具体而言，特别是在 SD 模型中，当制造商“高报”时，社会福利随碳配额比例的提高呈倒 U 型变化。因为碳配额比例的增加以及制造商“高报”对政府治理碳排放支出成本的负向影响较大，最终导致社会福利呈下降趋势。无论制造商的谎报决策如何，SR 模型社会福利均随着碳配额比例的增加而提高。因此，从社会效益角度出发，在制造商谎报行为下，碳减排量补贴优于碳减排成本补贴。

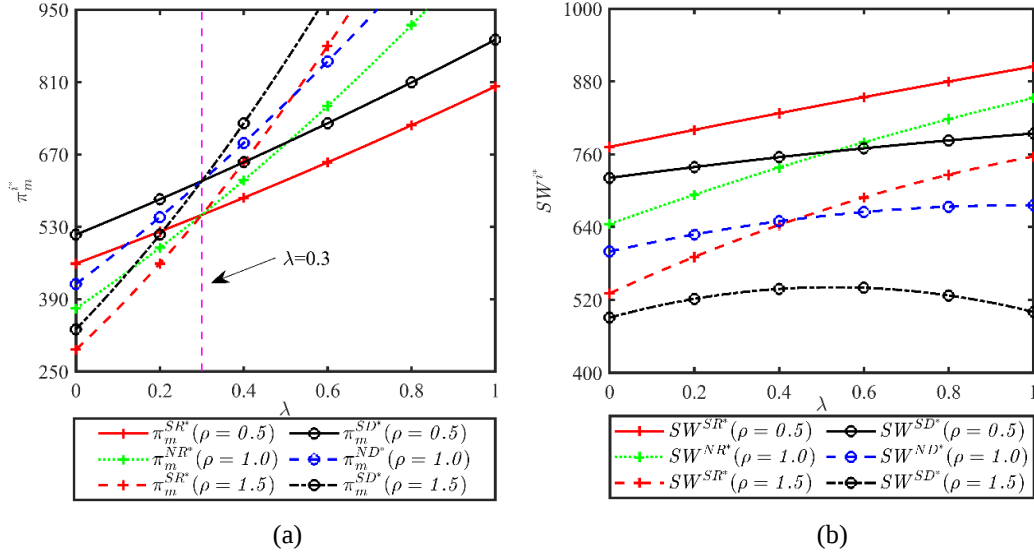


图 4-5 碳配额比例对制造商利润和社会福利的影响

4.5.3 补贴系数对供应链参数的敏感性分析

由于“低报”不涉及碳配额公平分配问题，我们仅考虑制造商“高报”的情况。根据图 4-3(a)选取谎报系数 $\rho=2$ 。根据上述参数数值，为保证线上和线下渠道的市场需求为正值，碳减排成本补贴系数须满足 $0 \leq t < 0.953$ ，我们选取 $t \in [0, 0.8]$ 进行分析。

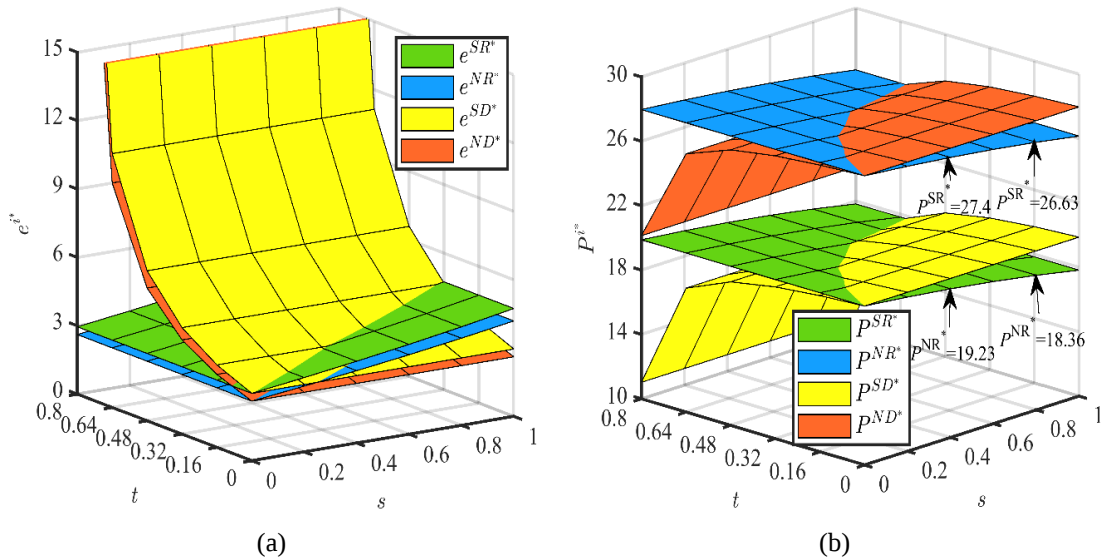


图 4-6 补贴系数对碳减排量和销售价的影响

图 4-6 表明，碳减排量补贴(碳减排成本补贴)系数的增加会提高 SR 与 NR(SD 与 ND)模型碳减排量。补贴系数的增加意味着制造商获得政府补贴增多，在一定程度上缓解了成本压力，有利于激励制造商提高碳减排技术。从图 4-6(a)可以发现，与碳减排量补贴系数的提升相比，碳减排成本补贴系数增加引起碳减排量的提高程度更高。可见碳减排成本补贴策略对环境效益产生了更为显著的正向影响。SR 与 NR(SD 与 ND)模型销售价与碳减排量补贴(碳减排成本补贴)系数负相关(见图 4-6(b))。碳减排成本补贴系数对销售价的影响程度大于碳减排量补贴系数对销售价的影响程度。

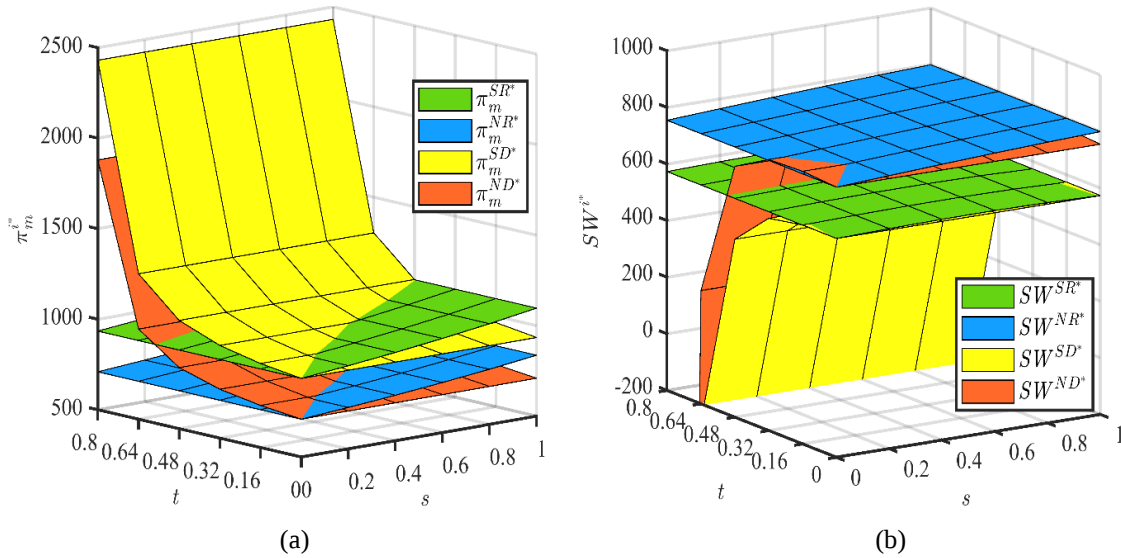


图 4-7 补贴系数对制造商利润和社会福利的影响

观察图 4-7 可以发现，碳减排量补贴(碳减排成本补贴)系数的增加对 SR 与 NR(SD 与 ND)模型制造商利润产生积极影响，其中碳减排成本补贴系数的增加对制造商利润的提高效果更为显著。从经济效益角度出发，碳减排成本补贴策略优于碳减排量补贴策略。然而，从社会效益角度出发，结论相反。具体而言，碳减排成本补贴系数对社会福利的负向影响更为显著，当碳减排成本补贴系数逐渐增加时，社会福利呈下降趋势，甚至出现负值。因为碳减排成本补贴系数的增加导致政府补贴支出过多，从而对社会福利产生较大负向冲击，最终导致社会福利为负。对于 SR 与 NR 模型社会福利来说，随着碳减排量补贴系数的增加，社会福利先缓慢增加后又缓慢下降，但不会出现负值。可见，补贴系数的增加并非总是带来正面效应，政府在实施政策时应当考虑碳减排量补贴策略，以实现社会福利的最大化。

4.6 本章小结

本章在碳交易机制背景下同时考虑双渠道制造商对产品初始碳排量进行谎报以及

政府对制造商给予补贴，构建了制造商主导的谎报且碳减排量补贴模型、谎报且碳减排成本补贴模型，总结了制造商在面临排碳约束时不同谎报决策对供应链绩效的影响，最后通过数值分析从环境效益、经济效益、社会效益剖析了制造商谎报行为下，两种补贴策略的优劣。从本章的研究中，我们得到以下结论：

(1) 无论何种补贴策略均不会影响谎报系数对碳减排量、市场总需求以及制造商利润的影响，但会影响谎报系数对销售价的影响。若碳交易价格低于某一阈值，则制造商“低报”会提高碳减排量、市场需求以及自身利润，“高报”则结论相反。当碳交易价格满足一定条件时，制造商“高报”行为会提高碳减排量和自身利润，但会损害社会福利，且随着谎报系数的增加社会福利逐渐下降。消费者线下渠道偏好的增强会降低两种谎报补贴模型的碳减排量、市场总需求量以及制造商利润。

(2) 制造商的谎报行为对两种补贴策略下的碳减排量、市场总需求以及制造商利润带来或消极或积极的影响，主要取决于碳交易价格的高低。在制造商“高报”的情况下，碳减排成本补贴策略对环境效益和经济效益的积极影响更大。相较于碳减排量补贴策略，碳减排成本补贴系数对碳减排量、制造商利润以及社会福利的影响更为显著。在制造商谎报行为下，两种补贴策略下的销售价之间的大小关系比较复杂，当两种补贴系数满足一定条件时，存在 SR 模型销售价始终大于 SD 模型的情况。

(3) 在碳减排成本补贴策略中，当制造商“高报”时，社会福利随碳配额比例的提高呈倒 U 型变化。不管制造商的谎报决策如何，碳减排量补贴策略下的社会福利均随着碳配额比例的增加而提高。当碳减排成本补贴系数逐渐增加时，SD 和 ND 模型社会福利呈下降趋势，甚至出现负值。对于 SR 与 NR 模型社会福利来说，随着碳减排量补贴系数的增加，社会福利先缓慢增加后又缓慢下降，但不会出现负值。若政府以环境效益最大化为目标，则应选择碳减排成本补贴策略；若以社会效益最大化为目标，则碳减排量补贴策略是政府更合适的选择。

通过本章结论，可得如下管理启示：

在政府层面，首先，政府应对碳交易价格进行合理设置，避免价格过低或过高。其次，政府在选择补贴策略时，应考虑其对社会福利的影响。如果目标是最大化环境效益，应优先选择碳减排成本补贴策略；若目标是最大化社会效益，则应选择碳减排量补贴策略。此外，政府需灵活调整补贴系数，以确保其对环境效益和社会福利的正面影响。

在制造商层面，制造商需根据自身情况选择适宜的补贴策略。在“高报”情况下，碳减排成本补贴策略对环境效益和经济效益的积极影响更大，相较于碳减排量补贴策略，

能更显著提升碳减排量、制造商利润和社会福利。在不同补贴策略下，制造商需调整其生产和销售策略，以优化销售价格和利润。例如，碳减排成本补贴策略下，适当增加碳减排量和碳减排成本补贴系数，可以在提升利润的同时，增加社会福利。

在零售商层面，零售商应与制造商合作，优化补贴策略的实施，确保在碳减排量和市场需求量变化的情况下，能有效提升销售价格和利润，最大化环境效益和经济效益。零售商需关注制造商的谎报行为及其对市场的影响，尤其在碳交易价格较低或较高的情况下，适时调整采购和销售策略，以应对市场需求和碳减排量的变化。

第 5 章 碳交易机制下考虑 CSR 与排碳谎报的双渠道供应链定价 与减排决策研究

在现代经济体系中，企业对快速经济增长和利润最大化的单向追求，已经对自然生态系统以及人类社会结构产生了显著的负面影响。面对这一现实，各界利益相关者强烈呼吁企业对其商业行为承担起更广泛的责任。企业社会责任(CSR)是指企业在追求自身经济利益的同时，亦需考量其商业活动对自然环境及社会福祉的影响。这一概念强调，除了关注经济收益外，企业还应对其运营活动对环境和社会产生的影响负责^[88]。在政府的层层压力和消费者越来越倾向于购买承担社会责任企业的产品^[89]的背景下，越来越多的企业开始逐渐以不同的方式在生产运营中体现自身对社会责任的关注。根据上述文献综述可知大部分文献研究制造商或零售商承担企业社会责任，然而对于供应链上企业社会责任的具体配置的研究较少。基于所述背景，本文将供应链上下游企业对企业社会责任的关注行为引入双渠道低碳供应链的研究中。为保证企业社会责任延伸至整条供应链，本章还将供应链成员对企业社会责任的承担进行划分，在碳交易机制下，构建制造商单独承担 CSR、零售商单独承担 CSR、制造商和零售商同时承担 CSR 三种不同的 CSR 承担模型。以期解决以下问题：(1) CSR 承担水平是否会影响制造商的谎报决策？(2) 制造商承担 CSR 的比例是否越大越好？制造商承担 CSR 的比例如何影响环境效益及社会效益？(3) 在制造商谎报行为下，哪种 CSR 承担策略更优？

5.1 模型描述

本章在第三章的基础上，将企业社会责任引入双渠道供应链，将企业的社会责任刻画为其对部分消费者剩余的关注。在制造商对初始碳排量信息谎报的情况下，考虑制造商单独承担 CSR、零售商单独承担 CSR、制造商和零售商同时承担 CSR 三种情形，研究 CSR 承担水平以及制造商 CSR 承担比例对制造商的谎报决策、碳减排量、销售价以及社会福利等方面的影响。双渠道供应链结构如图 5-1 所示。

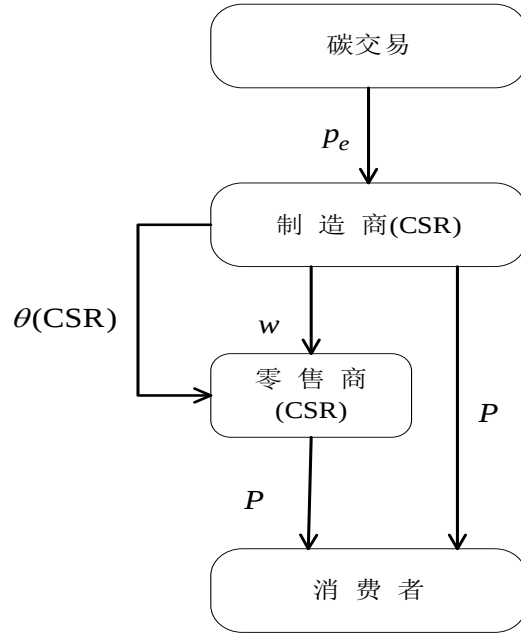


图 5-1 双渠道供应链结构图

5.2 符号说明和基本假设

在本文中，下标 $l = \{m, r\}$ 分别表示制造商和零售商，上标 $i = \{MC, RC, CC\}$ 分别表示制造商谎报行为下仅制造商承担 CSR 模型、仅零售商承担 CSR 模型、制造商和零售商同时承担 CSR 模型，上标 $j = Ni$ ($i = MC, RC, CC$) 分别表示制造商“实报”时仅制造商承担 CSR 模型、仅零售商承担 CSR 模型、制造商和零售商同时承担 CSR 模型。本章符号说明基本同第三章表 3-1 所示，不再赘述。不同于第三章的参数符号，将在下列假设中予以说明。在第三章假设的基础上补充下列假设：

假设 1 根据唐书传等^[70]的研究，本文采用消费者剩余刻画 CSR 水平。制造商或零售商投入的社会责任可表示为 $xCS = x \frac{D_c^2 + D_d^2}{2}$ ，其中 $x(0 \leq x \leq 1)$ 表示 CSR 承担水平， x 越大，制造商和零售商承担的社会责任越大，考虑消费者的剩余越多。当 $x=0$ 时，制造商和零售商追求经济利润最大化；当 $x=1$ 时，制造商和零售商追求社会福利最大化。

假设 2 参照 Panda 等^[90]的研究，制造商和零售商同时承担企业社会责任时，我们假设制造商承担的企业社会责任配置的比例为 $\theta(0 < \theta < 1)$ ，零售商承担的企业社会责任配置的比例为 $1-\theta$ 。假设承担社会责任的企业效用为 $u = \pi + xCS$ ， π 表示该企业的利润，并且该企业以效用最大化为决策目标。

为保证文中模型有实际意义，假设下述不等式得到满足：

$$\delta'_1 = a(1-\alpha) - e_0(p_e + \rho(\beta - \lambda p_e)) > 0, \quad \delta'_2 = a(1-\alpha) - e_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)) > 0。$$

$$\text{MC 模型: } \delta^{MC} = 2k\delta'_1 - a(1-2\alpha)A_2 > 0; \quad \text{NMC 模型: } \delta^{NMC} = 2k\delta'_2 - a(1-2\alpha)A_2 > 0。$$

$$\text{RC 模型: } \delta^{RC} = 2k\delta'_1 - a(1-2\alpha)(B_2 + kx) > 0; \quad \text{NRC 模型: } \delta^{NRC} = 2k\delta'_2 - a(1-2\alpha)(B_2 + kx) > 0。$$

$$\text{CC 模型: } \delta^{CC} = 2k\delta'_1 - a(1-2\alpha)(B_2 + kx(2\theta - 1)) > 0; \quad \text{NCC 模型: } \delta^{NCC} = 2k\delta'_2 - a(1-2\alpha)(B_2 + kx(2\theta - 1)) > 0。$$

$$\text{为了便于化简公式, 令 } A_2 = k(3-x) - 2(\beta + p_e)^2 > 0, \quad B_2 = k(3-2x) - 2(\beta + p_e)^2 > 0。$$

5.3 模型建立与求解

5.3.1 制造商谎报且制造商单独承担 CSR (MC 模型)

考虑制造商单独承担 CSR 并通过两种渠道将低碳产品销售给消费者, 两种销售渠道的市场需求函数分别表示为:

$$D_c^{MC} = \alpha a - P^{MC} - \beta(\rho e_0 - e^{MC}) \quad (5-1)$$

$$D_d^{MC} = (1-\alpha)a - P^{MC} - \beta(\rho e_0 - e^{MC}) \quad (5-2)$$

此时, 制造商的效用函数以及零售商的利润函数如下:

$$u_m^{MC} = w^{MC} D_c^{MC} + P^{MC} D_d^{MC} - 1/2k(e^{MC})^2 - p_e[(e_0 - e^{MC})D^{MC} - \lambda \rho e_0 D^{MC}] + x \frac{(D_c^{MC})^2 + (D_d^{MC})^2}{2} \quad (5-3)$$

$$u_r^{MC} = \pi_r^{MC} = (P^{MC} - w^{MC})D_c^{MC} \quad (5-4)$$

制造商作为 Stackelberg 博弈的领导者将优先决策, 零售商根据制造商的决策做出最优决策。具体过程如下: 制造商首先决定碳减排量 e^{MC} 和批发价 w^{MC} , 然后零售商根据观察到的制造商决策确定销售价 P^{MC} , 以实现利润最大化。

我们对(5-4)式中的销售价 P^{MC} 求二阶偏导可得: $\frac{\partial^2 u_r^{MC}}{(P^{MC})^2} = -2 < 0$, 可知 π_r^{MC} 是关于销

售价格 P^{MC} 的凹函数, 令 $\frac{\partial u_r^{MC}}{\partial P^{MC}} = 0$ 得到:

$$P^{MC} = \frac{w^{MC} + \alpha a - \beta(\rho e_0 - e^{MC})}{2} \quad (5-5)$$

将(5-5)式代入(5-3)式, 并求 u_m^{MC} 关于 w^{MC} 和 e^{MC} 的海瑟矩阵, 得到:

$$H_6 = \begin{pmatrix} \frac{x-3}{2} & \frac{\beta(1-x)-2p_e}{2} \\ \frac{\beta(1-x)-2p_e}{2} & \frac{\beta^2(1+x)+4\beta p_e-2k}{2} \end{pmatrix} \quad (5-6)$$

观察(5-6)式可知 H_6 的一阶顺序主子式小于 0。当二阶顺序主子式满足 $\frac{k(3-x)-2(\beta+p_e)^2}{2} > 0$ ，即 $k(3-x)-2(\beta+p_e)^2 > 0$ 时， $H_6(w^{MC}, e^{MC})$ 负定， π_m^{MC} 存在唯一最优批发价和最优碳减排量。联立方程 $\frac{\partial u_m^{MC}}{\partial w^{MC}} = 0$ 和 $\frac{\partial u_m^{MC}}{\partial e^{MC}} = 0$ 求解，得到最优批发价 w^{MC*} 和最优碳减排量 e^{MC*} 分别为：

$$w^{MC*} = \frac{e_0 p_e (1-\lambda \rho) A_2 + (k(1-x) - 2p_e(\beta + p_e)) \delta'_1}{A_2} \quad (5-7)$$

$$e^{MC*} = \frac{2(\beta + p_e) \delta'_1}{A_2} \quad (5-8)$$

将(5-7)式和(5-8)式代入(5-5)式可得：

$$P^{MC*} = w^{MC*} + \frac{2k\delta'_1 - a(1-2\alpha)A_2}{2A_2} \quad (5-9)$$

将(5-8)式、(5-9)式分别代入(5-1)式、(5-2)式可得市场总需求量：

$$D^{MC*} = \frac{2k\delta'_1}{A_2} \quad (5-10)$$

将(5-7)式至(5-10)式分别代入(5-3)式、(5-4)式可得：

$$u_m^{MC*} = \frac{4k(\delta'_1)^2 - a^2(1-2\alpha)^2 A_2(1-x)}{4A_2} \quad (5-11)$$

$$u_r^{MC*} = \frac{(2k\delta'_1 - a(1-2\alpha)A_2)^2}{4(A_2)^2} \quad (5-12)$$

$$SW^{MC*} = \frac{4k\delta'_1(\delta'_1(2A_2 + k) + A_2(a(1-2\alpha) - 4\lambda\rho e_0 p_e)) - a^2(1-2\alpha)^2(A_2)^2(1-2x) + 3(\delta^{MC})^2}{8(A_2)^2} \quad (5-13)$$

5.3.2 制造商实报且制造商单独承担 CSR (NMC 模型)

将 MC 模型中的均衡解取 $\rho=1$ ，便得到 NMC 模型的均衡解，如下：

$$w^{NMC*} = \frac{e_0 p_e (1-\lambda) A_2 + (k(1-x) - 2p_e(\beta + p_e)) \delta'_2}{A_2} \quad (5-14)$$

$$e^{NMC*} = \frac{2(\beta + p_e) \delta'_2}{A_2} \quad (5-15)$$

$$P^{NMC*} = w^{NMC*} + \frac{2k\delta'_2 - a(1-2\alpha)A_2}{2A_2} \quad (5-16)$$

$$D^{NMC*} = \frac{2k\delta'_2}{A_2} \quad (5-17)$$

$$u_m^{NMC*} = \frac{4k(\delta'_2)^2 - a^2(1-2\alpha)^2 A_2(1-x)}{4A_2} \quad (5-18)$$

$$u_r^{NMC*} = \frac{(2k\delta'_2 - a(1-2\alpha)A_2)^2}{4(A_2)^2} \quad (5-19)$$

$$SW^{NMC*} = \frac{4k\delta'_2(\delta'_2(2A_2 + k) + A_2(a(1-2\alpha) - 4\lambda e_0 p_e)) - a^2(1-2\alpha)^2(A_2)^2(1-2x) + 3(\delta^{NMC})^2}{8(A_2)^2} \quad (5-20)$$

推论 5-1 通过计算 MC 模型均衡解关于谎报系数的一阶导数，我们得出以下结论：

$$(1) (i) \text{ 若 } 0 < p_e \leq \frac{\beta}{\lambda}, \text{ 则 } \frac{\partial e^{MC*}}{\partial \rho} \leq 0; \frac{\partial D^{MC*}}{\partial \rho} \leq 0; \frac{\partial u_m^{MC*}}{\partial \rho} \leq 0; (ii) \text{ 若 } \frac{\beta}{\lambda} < p_e, \text{ 则 } \frac{\partial e^{MC*}}{\partial \rho} > 0; \frac{\partial D^{MC*}}{\partial \rho} > 0; \frac{\partial u_m^{MC*}}{\partial \rho} > 0。$$

$$(2) \text{ 若 } 0 \leq p_e < p_e^{12}, \text{ 则 } \frac{\partial P^{MC*}}{\partial \rho} < 0; \text{ 若 } p_e \geq p_e^{12}, \text{ 则 } \frac{\partial P^{MC*}}{\partial \rho} \geq 0。$$

$$\text{其中 } p_e^{12} = \frac{k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda) + \sqrt{8k\beta^2(2-x)(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2}}{4\beta(1+\lambda)}。$$

证明：见附录 17。

推论 5-1 表明，当制造商单独承担 CSR 时，其承担 CSR 水平并不会影响谎报系数对碳减排量、市场总需求以及制造商效用的影响。谎报系数的提高对上述参数是否产生积极影响主要取决于碳交易价格的高低。当碳交易价格较低时，谎报系数的提高对需求的负向影响较大，从而抑制制造商进行碳减排，最终造成制造商效用的降低。此时为提升消费者购买力度，制造商和零售商将降低销售价。而当碳交易价格较高时，谎报系数的提高对制造商获得免费碳配额的正向影响较大，激励制造商增加减排投资，从而促进市场需求和制造商效用的提升。与此同时，扩大生产规模必然导致生产过程中总的碳排放水平增加，制造商和零售商将提高销售价以降低政府碳限额政策对自身提高产量而带来的额外的碳排放成本。

推论 5-2 通过计算 MC 模型均衡解关于消费者线下渠道偏好系数、碳配额比例以及制造商 CSR 承担水平的一阶导数，我们得出以下结论：

$$\begin{aligned}
 & (1) \text{ (i) } \frac{\partial e^{MC*}}{\partial \alpha} < 0; \frac{\partial D^{MC*}}{\partial \alpha} < 0; \frac{\partial u_m^{MC*}}{\partial \alpha} < 0. \text{ (ii) } \frac{\partial e^{MC*}}{\partial \lambda} > 0; \frac{\partial D^{MC*}}{\partial \lambda} > 0; \frac{\partial u_m^{MC*}}{\partial \lambda} > 0. \text{ (iii) } \\
 & \frac{\partial e^{MC*}}{\partial x} > 0; \frac{\partial D^{MC*}}{\partial x} > 0; \frac{\partial u_m^{MC*}}{\partial x} > 0. \\
 & (2) \text{ 若 } 0 \leq p_e \leq \frac{k}{2\beta} - \beta, \text{ 则 } \frac{\partial P^{MC*}}{\partial \alpha} \geq 0, \frac{\partial P^{MC*}}{\partial \lambda} \leq 0, \frac{\partial P^{MC*}}{\partial x} \leq 0; \text{ 若 } p_e > \frac{k}{2\beta} - \beta, \text{ 则 } \frac{\partial P^{MC*}}{\partial \alpha} < 0, \\
 & \frac{\partial P^{MC*}}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial P^{MC*}}{\partial x} > 0.
 \end{aligned}$$

证明：见附录 18。

推论 5-2 表明，当制造商单独承担 CSR 时，(i) 碳减排量、市场总需求量以及制造商效用均随着消费者线下偏好程度的提高而下降。碳交易价格较低时，消费者线下偏好系数与销售价正相关，否则，呈负相关关系。(ii) 碳配额比例的增加意味着制造商可获得更多免费碳配额，从而激励制造商减排，市场需求因此得到提升。需求增加导致制造商购买碳排放权的成本增加，为了弥补成本，在碳交易价格较低时，制造商和零售商将降低销售价。(iii) 制造商承担 CSR 水平的提高对碳减排量、市场总需求量以及制造商效用产生积极影响。这是因为，当制造商履行企业社会责任时，制造商会主动增加碳减排的投资力度，因此单位产品的碳减排量会增加，并且由于成本的增加，在碳交易价格较低时，制造商和零售商会降低销售价促进市场需求。然而消费者为了支持低碳产品会增加购买力度，最终促进制造商效用的提升。

5.3.3 制造商谎报且零售商单独承担 CSR (RC 模型)

考虑零售商单独承担 CSR，制造商通过线上直销渠道以及传统线下渠道将低碳产品销售给消费者，此时线下线上两个渠道的市场需求函数如下：

$$D_c^{RC} = \alpha a - P^{RC} - \beta(\rho e_0 - e^{RC}) \quad (5-21)$$

$$D_d^{RC} = (1 - \alpha)a - P^{RC} - \beta(\rho e_0 - e^{RC}) \quad (5-22)$$

此时，制造商的利润函数以及零售商的效用函数如下：

$$u_m^{RC} = \pi_m^{RC} = w^{RC} D_c^{RC} + P^{RC} D_d^{RC} - 1/2k(e^{RC})^2 - p_e[(e_0 - e^{RC})D^{RC} - \lambda \rho e_0 D^{RC}] \quad (5-23)$$

$$u_r^{RC} = (P^{RC} - w^{RC})D_c^{RC} + x \frac{(D_c^{RC})^2 + (D_d^{RC})^2}{2} \quad (5-24)$$

制造商和零售商决策过程同 MC 模型，对(5-24)式中的销售价 P^{RC} 求二阶偏导可得：

$$\frac{\partial^2 u_r^{RC}}{(P^{RC})^2} = 2(x-1) < 0, \text{ 可知 } u_r^{RC} \text{ 是关于销售价格 } P^{RC} \text{ 的凹函数，令 } \frac{\partial u_r^{RC}}{\partial P^{RC}} = 0 \text{ 得到：}$$

$$P^{RC} = \frac{w^{RC} + a(\alpha - x) - (1 - 2x)\beta(\rho e_0 - e^{RC})}{2(1 - x)} \quad (5-25)$$

将(5-25)式代入(5-23)式，并求 u_m^{RC} 关于 w^{RC} 和 e^{RC} 的海瑟矩阵，得到：

$$H_7 = \begin{pmatrix} \frac{2x-3}{2(1-x)^2} & \frac{\beta-2(1-x)p_e}{2(1-x)^2} \\ \frac{\beta-2(1-x)p_e}{2(1-x)^2} & \frac{\beta^2(1-2x)+4\beta p_e(1-x)-2k(1-x)^2}{2(1-x)^2} \end{pmatrix} \quad (5-26)$$

观察(5-26)式可知 H_7 的一阶顺序主子式小于 0。当二阶顺序主子式满足 $\frac{k(3-2x)-2(\beta+p_e)^2}{2(1-x)^2} > 0$ ，即 $k(3-2x)-2(\beta+p_e)^2 > 0$ 时， $H_7(w^{RC}, e^{RC})$ 负定， u_m^{RC} 存在唯一最优批发价和最优碳减排量。联立方程 $\frac{\partial u_m^{RC}}{\partial w^{RC}} = 0$ 和 $\frac{\partial u_m^{RC}}{\partial e^{RC}} = 0$ 求解，得到最优批发价 w^{RC*} 和最优碳减排量 e^{RC*} 分别为：

$$w^{RC*} = \frac{e_0 p_e (1 - \lambda \rho) B_2 + (k - 2p_e (\beta + p_e)) \delta'_1 + ax(1 - 2\alpha)(k(1 - x) - \beta(\beta + p_e))}{B_2} \quad (5-27)$$

$$e^{RC*} = \frac{(\beta + p_e)(2\delta'_1 - ax(1 - 2\alpha))}{B_2} \quad (5-28)$$

将(5-27)式和(5-28)式代入(5-25)式可得：

$$P^{RC*} = w^{RC*} + \frac{2k\delta'_1 - a(1 - 2\alpha)(B_2 + kx) + akx(2\alpha + 2x(1 - 2\alpha) - 3)}{2B_2} \quad (5-29)$$

将(5-28)式、(5-29)式分别代入(5-21)式、(5-22)式可得市场总需求量：

$$D^{RC*} = \frac{k(2\delta'_1 - ax(1 - 2\alpha))}{B_2} \quad (5-30)$$

将(5-27)式至(5-30)式分别代入(5-23)式、(5-24)式可得：

$$u_m^{RC*} = \frac{4k\delta'_1(\delta'_1 - ax(1 - 2\alpha)) + a^2(1 - 2\alpha)^2(kx^2 - B_2)}{4B_2} \quad (5-31)$$

$$u_r^{RC*} = \frac{(2+x)(\delta^{RC})^2 + 2akx\delta^{RC}(2\alpha - 3 + (1 - 2\alpha)2x) + x(2k\delta'_1 + a(1 - 2\alpha)B_2)^2}{8(B_2)^2} \quad (5-32)$$

$$SW^{RC*} = \frac{\left[8kB_2(\delta'_1(\delta'_1 - 2\lambda\rho e_0 p_e) - ax(1 - 2\alpha)(\delta'_1 - \lambda\rho e_0 p_e)) + 2a^2(1 - 2\alpha)^2 B_2(kx^2 - B_2) \right] + (3+x)(\delta^{RC})^2 + 2akx\delta^{RC}(2\alpha - 3 + (1 - 2\alpha)2x) + (1+x)(2k\delta'_1 + a(1 - 2\alpha)B_2)^2}{8(B_2)^2} \quad (5-33)$$

5.3.4 制造商实报且零售商单独承担 CSR (NRC 模型)

将 RC 模型中的均衡解取 $\rho=1$ ，便得到 NRC 模型的均衡解，如下：

$$w^{NRC*} = \frac{e_0 p_e (1-\lambda) B_2 + (k-2p_e(\beta+p_e))\delta'_2 + ax(1-2\alpha)(k(1-x)-\beta(\beta+p_e))}{B_2} \quad (5-34)$$

$$e^{NRC*} = \frac{(\beta+p_e)(2\delta'_2 - ax(1-2\alpha))}{B_2} \quad (5-35)$$

$$P^{NRC*} = w^{NRC*} + \frac{2k\delta'_2 - a(1-2\alpha)(B_2 + kx) + akx(2\alpha + 2x(1-2\alpha) - 3)}{2B_2} \quad (5-36)$$

$$D^{NRC*} = \frac{k(2\delta'_2 - ax(1-2\alpha))}{B_2} \quad (5-37)$$

$$u_m^{NRC*} = \frac{4k\delta'_2(\delta'_2 - ax(1-2\alpha)) + a^2(1-2\alpha)^2(kx^2 - B_2)}{4B_2} \quad (5-38)$$

$$u_r^{NRC*} = \frac{(2+x)(\delta^{NRC})^2 + 2akx\delta^{NRC}(2\alpha-3+(1-2\alpha)2x) + x(2k\delta'_2 + a(1-2\alpha)B_2)^2}{8(B_2)^2} \quad (5-39)$$

$$SW^{NRC*} = \frac{\left[8kB_2(\delta'_2(\delta'_2 - 2\lambda p_e p_e) - ax(1-2\alpha)(\delta'_2 - \lambda p_e p_e)) + 2a^2(1-2\alpha)^2 B_2(kx^2 - B_2) \right] + (3+x)(\delta^{NRC})^2 + 2akx\delta^{NRC}(2\alpha-3+(1-2\alpha)2x) + (1+x)(2k\delta'_2 + a(1-2\alpha)B_2)^2}{8(B_2)^2} \quad (5-40)$$

推论 5-3 通过计算 RC 模型均衡解关于谎报系数的一阶导数，我们得出以下结论：

(1) (i) 若 $0 < p_e \leq \frac{\beta}{\lambda}$ ，则 $\frac{\partial e^{RC*}}{\partial \rho} \leq 0$ ； $\frac{\partial D^{RC*}}{\partial \rho} \leq 0$ ； $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \rho} \leq 0$ 。(ii) 若 $p_e > \frac{\beta}{\lambda}$ ，则 $\frac{\partial e^{RC*}}{\partial \rho} > 0$ ；

$\frac{\partial D^{RC*}}{\partial \rho} > 0$ ； $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \rho} > 0$ 。

(2) 若 $0 \leq p_e \leq p_e^{21}$ ，则 $\frac{\partial P^{RC*}}{\partial \rho} \leq 0$ ；若 $p_e > p_e^{21}$ ，则 $\frac{\partial P^{RC*}}{\partial \rho} > 0$ 。

其中 $p_e^{21} = \frac{(k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda)) + \sqrt{16k\beta^2(1-x)(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2}}{4\beta(1+\lambda)}$ 。

证明：见附录 19。

推论 5-3 揭示了当零售商单独承担 CSR 时，其承担 CSR 水平并不会影响谎报系数对碳减排量、市场总需求量以及制造商效用的影响，但零售商承担 CSR 水平会影响谎报系数对销售价的影响。具体来说，当碳交易价格低于阈值时，谎报系数的增加会降低销售价，反之，结论相反。因为零售商承担 CSR 时，更加关注消费者剩余，追求市场需求目标，通过降低销售价来获得更多消费者剩余。此外，通过观察碳交易价格的阈值可

以发现，当零售商承担 CSR 水平提高时，该阈值减小。这说明零售商承担 CSR 水平的提高使谎报系数增加对销售价产生负向影响的条件变得更为严格。因为碳交易价格增大时，制造商谎报行为下的销售价随着谎报系数的增加而提升，这不利于扩大市场需求，从而加深了碳交易政策对制造商谎报行为的影响。

推论 5-4 通过计算 RC 模型均衡解关于消费者线下渠道偏好系数的一阶导数，我们得出以下结论：

- (1) $\frac{\partial e^{RC*}}{\partial \alpha} < 0$; $\frac{\partial D^{RC*}}{\partial \alpha} < 0$; 若 $p_e \geq \frac{k}{2\beta} - \beta$, 则 $\frac{\partial P^{RC*}}{\partial \alpha} \leq 0$; 若 $0 \leq p_e < \frac{k}{2\beta} - \beta$, 则 $\frac{\partial P^{RC*}}{\partial \alpha} > 0$ 。
- (2) (i) 当 $\Delta_{h^3(p_e)} \leq 0$ 时, 若 $0 < \alpha < \frac{1}{2}$, 则 $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} < 0$; 若 $\frac{1}{2} < \alpha < 1$, 则 $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} > 0$ 。(ii) 当 $\Delta_{h^3(p_e)} > 0$ 且 $0 < \alpha < \frac{1}{2}$ 时, (a) $H^1 > 0$, 若 $0 \leq p_e \leq p_e^{32}$, 则 $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} \geq 0$; 若 $p_e > p_e^{32}$, 则 $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} < 0$; (b) $H^1 < 0$ 且 $H^2 < 0$, 若 $p_e \geq 0$, 则 $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} < 0$; (c) $H^1 < 0$ 且 $H^2 > 0$, 若 $0 \leq p_e < p_e^{31}$ 或 $p_e > p_e^{32}$, 则 $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} < 0$; 若 $p_e^{31} \leq p_e \leq p_e^{32}$, 则 $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} \geq 0$ 。
- (iii) 当 $\Delta_{h^3(p_e)} > 0$ 且 $\frac{1}{2} < \alpha < 1$ 时, (a) $H^1 < 0$, 若 $0 \leq p_e \leq p_e^{31}$, 则 $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} \leq 0$; 若 $p_e > p_e^{31}$, 则 $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} > 0$; (b) $H^1 > 0$ 且 $H^2 < 0$, 若 $p_e \geq 0$, 则 $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} > 0$; (c) $H^1 > 0$ 且 $H^2 > 0$, 若 $0 \leq p_e < p_e^{32}$ 或 $p_e > p_e^{31}$, 则 $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} > 0$; 若 $p_e^{32} \leq p_e \leq p_e^{31}$, 则 $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} \leq 0$ 。
- (iv) 当 $\alpha = \frac{1}{2}$ 时, 若 $2e_0(1-\lambda\rho)p_e \geq a - 2e_0\beta\rho$, 则 $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} \geq 0$; 若 $2e_0(1-\lambda\rho)p_e < a - 2e_0\beta\rho$, 则 $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} < 0$ 。其 中
- $$\Delta_{h^3(p_e)} = 4k(2\alpha^2(1-2\alpha)(1-4\alpha+x+x^2(2\alpha-1)) - (1-x)e_0(4a(2\alpha-1)\beta(\rho(1+\lambda)-1) - k(1-x)(1-\lambda\rho)^2e_0)),$$
- $$H^1 = ak(1-4\alpha+x(1+x(2\alpha-1))) + 2a(2\alpha-1)\beta^2 + 2ke_0\beta\rho(1-x),$$
- $$H^2 = 4a\beta(2\alpha-1) + 2k(1-x)(1-\lambda\rho)e_0, \quad p_e^{31} = \frac{-(4a\beta(2\alpha-1) + 2k(1-x)(1-\lambda\rho)e_0) + \sqrt{\Delta_{h^3(p_e)}}}{4a(2\alpha-1)},$$
- $$p_e^{32} = \frac{-(4a\beta(2\alpha-1) + 2k(1-x)(1-\lambda\rho)e_0) - \sqrt{\Delta_{h^3(p_e)}}}{4a(2\alpha-1)}。$$

证明：见附录 20。

推论 5-4 阐明, 当零售商单独承担 CSR 时, 碳减排量、市场总需求量随着消费者线下偏好程度的提高而下降。消费者线下渠道偏好程度越大, 制造商线上渠道市场需求受到的负向影响越大, 导致市场总需求的下降, 从而抑制制造商提高碳减排努力。当碳交易价格较高时, 制造商为购买碳排放权所需支付的成本增加, 所以制造商和零售商以降低销售价作为手段刺激市场需求, 从而达到抵消部分成本的目的。然而, 由于碳减排量下降会造成最终碳排放增加, 所以在碳交易价格较低时制造商和零售商选择提高销售价来最大化自身利润。消费者线下渠道偏好对制造商利润的影响比较复杂, 主要与碳交易价格的取值密切相关。

推论 5-5 通过计算 RC 模型均衡解关于碳配额比例以及零售商 CSR 承担水平的一阶导数, 我们得出以下结论:

$$(1) (i) \frac{\partial e^{RC*}}{\partial \lambda} > 0; \frac{\partial D^{RC*}}{\partial \lambda} > 0; \frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \lambda} > 0. (ii) \frac{\partial e^{RC*}}{\partial x} > 0; \frac{\partial D^{RC*}}{\partial x} > 0; \frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial x} > 0.$$

$$(2) \text{ 若 } p_e \geq \frac{k}{2\beta} - \beta, \text{ 则 } \frac{\partial P^{RC*}}{\partial \lambda} \geq 0, \frac{\partial P^{RC*}}{\partial x} \geq 0; \text{ 若 } 0 \leq p_e < \frac{k}{2\beta} - \beta, \text{ 则 } \frac{\partial P^{RC*}}{\partial \lambda} < 0, \frac{\partial P^{RC*}}{\partial x} < 0.$$

证明: 见附录 21。

推论 5-5 表明, 当零售商单独承担 CSR 时, (i) 碳配额比例的提升减轻了碳交易政策对制造商的不利影响, 有效激励制造商提升碳减排水平, 从而推动低碳产品市场需求。当碳交易价格较高时, 制造商和零售商将提高销售价来减缓高碳交易价格对利润的不利影响, 最终制造商利润得到提升。(ii) 单位产品的碳减排量、市场总需求量及制造商利润都随着零售商承担 CSR 水平的提高而增加。这是因为, 当零售商单独承担社会责任时, 其会加大慈善事业和服务保障的资金投入, 从而导致成本增加, 但是消费者为了支持低碳产品和积极承担 CSR 的零售商, 反而会增加购买力度。消费者对低碳产品的支持会激励制造商加大低碳产品的研发投入, 因此单位产品的碳减排量和市场总需求会增加。需求增加引起最终碳排放水平增加, 所以制造商和零售商在碳交易价格较高时会提升销售价来减轻购买额外碳排放权的成本压力。对于制造商来说, 由零售商承担 CSR 显然对其有益。

5.3.5 制造商谎报且同时承担 CSR (CC 模型)

考虑制造商和零售商同时承担 CSR, 此时线下线上两个渠道的市场需求函数如下:

$$D_c^{CC} = \alpha a - P^{CC} - \beta(\rho e_0 - e^{CC}) \quad (5-41)$$

$$D_d^{CC} = (1 - \alpha)a - P^{CC} - \beta(\rho e_0 - e^{CC}) \quad (5-42)$$

此时，制造商和零售商的效用函数分别如下：

$$u_m^{CC} = w^{CC} D_c^{CC} + P^{CC} D_d^{CC} - 1/2 k (e^{CC})^2 - p_e [(e_0 - e^{CC}) D^{CC} - \lambda \rho e_0 D^{CC}] + \theta x \frac{(D_c^{CC})^2 + (D_d^{CC})^2}{2} \quad (5-43)$$

$$u_r^{CC} = (P^{CC} - w^{CC}) D_c^{CC} + (1 - \theta) x \frac{(D_c^{CC})^2 + (D_d^{CC})^2}{2} \quad (5-44)$$

制造商和零售商决策过程同 MC 模型，对(5-44)式中的销售价 P^{CC} 求二阶偏导可得：

$$\frac{\partial^2 u_r^{CC}}{(P^{CC})^2} = 2x(1 - \theta) - 2 < 0, \text{ 可知 } u_r^{CC} \text{ 是关于销售价格 } P^{CC} \text{ 的凹函数，令 } \frac{\partial u_r^{CC}}{\partial P^{CC}} = 0 \text{ 得到：}$$

$$P^{CC} = \frac{w^{CC} + a(\alpha - x(1 - \theta)) - \beta(\rho e_0 - e^{CC})(1 - 2x(1 - \theta))}{2(1 - x(1 - \theta))} \quad (5-45)$$

将(5-45)式代入(5-43)式，并求 u_m^{CC} 关于 w^{CC} 和 e^{CC} 的海瑟矩阵，得到：

$$H_8 = \begin{pmatrix} -\frac{3 - x(2 - \theta)}{2(1 - x(1 - \theta))^2} & \frac{\beta(1 - x\theta) - 2(1 - x(1 - \theta))p_e}{2(1 - x(1 - \theta))^2} \\ \frac{\beta(1 - x\theta) - 2(1 - x(1 - \theta))p_e}{2(1 - x(1 - \theta))^2} & \frac{\beta^2(1 - 2x + 3x\theta) + 4\beta p_e(1 - x(1 - \theta)) - 2k(1 - x(1 - \theta))^2}{2(1 - x(1 - \theta))^2} \end{pmatrix} \quad (5-46)$$

观察(5-46)式可知 H_8 的一阶顺序主子式小于 0。当二阶顺序主子式满足

$$\frac{k(3 - x(2 - \theta)) - 2(\beta + p_e)^2}{2(1 - x(1 - \theta))^2} > 0, \text{ 即 } k(3 - x(2 - \theta)) - 2(\beta + p_e)^2 > 0 \text{ 时，} H_8(w^{CC}, e^{CC}) \text{ 负定，} u_m^{CC} \text{ 存}$$

在唯一最优批发价和最优碳减排量。联立方程 $\frac{\partial u_m^{CC}}{\partial w^{CC}} = 0$ 和 $\frac{\partial u_m^{CC}}{\partial e^{CC}} = 0$ 求解，得到最优批发价

w^{CC*} 和最优碳减排量 e^{CC*} 分别为：

$$w^{CC*} = \frac{\left[e_0 p_e (1 - \lambda \rho) (B_2 + xk\theta) + (k - 2p_e (\beta + p_e)) \delta'_1 + a(1 - 2\alpha)x(k(1 - x(1 - \theta)^2) - (1 - \theta)\beta(\beta + p_e)) - xk\theta(a(2 - 3\alpha) - (a(1 - \alpha) - \delta'_1)) \right]}{B_2 + xk\theta} \quad (5-47)$$

$$e^{CC*} = \frac{(\beta + p_e)(2\delta'_1 - ax(1 - 2\alpha)(1 - \theta))}{B_2 + xk\theta} \quad (5-48)$$

将(5-47)式和(5-48)式代入(5-45)式可得：

$$P^{CC*} = w^{CC*} + \frac{(2k\delta'_1(1 - 2x(1 - \theta)) - a(1 - 2\alpha)(B_2 - kx(2(1 - \theta)(1 - x(1 - \theta)) - 1)))}{2(B_2 + xk\theta)} \quad (5-49)$$

将(5-48)式、(5-49)式分别代入(5-41)式、(5-42)式可得市场总需求量：

$$D^{CC*} = \frac{k(2\delta'_1 - ax(1 - \theta)(1 - 2\alpha))}{B_2 + xk\theta} \quad (5-50)$$

将(5-47)式至(5-50)式分别代入(5-43)式、(5-44)式可得：

$$u_m^{CC*} = \frac{\left[4k(\delta_1')^2 - a^2(1-2\alpha)^2(B_2 + xk\theta) + ax(1-2\alpha)(ak(\theta(7-10\alpha) + x(1-2\alpha)(1-4\theta + 2\theta^2)) - 4k\delta_1' - 2\theta(2k(a(1-\alpha) - \delta_1') + a(1-2\alpha)x(\beta + p_e)^2)) \right]}{4(B_2 + xk\theta)} \quad (5-51)$$

$$u_r^{CC*} = \frac{\left[2\delta^{CC}(2k\delta_1'(1-2x(1-\theta)) - a(1-2\alpha)(B_2 - kx(2(1-\theta)(1-x(1-\theta)) - 1))) + x(1-\theta)(\delta^{CC})^2 + (2k\delta_1' + a(1-2\alpha)(B_2 + kx(2\theta-1)))^2 \right]}{8(B_2 + xk\theta)^2} \quad (5-52)$$

$$SW^{CC*} = \frac{\left[2\delta^{CC}(2k\delta_1'(1-2x(1-\theta)) - a(1-2\alpha)(B_2 - kx(2(1-\theta)(1-x(1-\theta)) - 1))) + (1+x(1-\theta))(\delta^{CC})^2 + 2(2k\delta_1' + a(1-2\alpha)(B_2 + kx(2\theta-1)))^2 - 8(B_2 + xk\theta)(k\lambda p_e p_e(2\delta_1' - ax(1-\theta)(1-2\alpha))) \right]}{8(B_2 + xk\theta)^2} \quad (5-53)$$

$$+ \frac{\left[4k(\delta_1')^2 - a^2(1-2\alpha)^2(B_2 + xk\theta) + ax(1-2\alpha)(ak(\theta(7-10\alpha) + x(1-2\alpha)(1-4\theta + 2\theta^2)) - 4k\delta_1' - 2\theta(2k(a(1-\alpha) - \delta_1') + a(1-2\alpha)x(\beta + p_e)^2)) \right]}{4(B_2 + xk\theta)}$$

5.3.6 制造商实报且同时承担 CSR (NCC 模型)

将 CC 模型中的均衡解取 $\rho=1$, 便得到 NCC 模型的均衡解, 如下:

$$w^{NCC*} = \frac{\left[e_0 p_e(1-\lambda)(B_2 + xk\theta) + (k-2p_e(\beta + p_e))\delta_2' + a(1-2\alpha)x(k(1-x(1-\theta)^2) - (1-\theta)\beta(\beta + p_e)) - xk\theta(a(2-3\alpha) - (a(1-\alpha) - \delta_2')) \right]}{B_2 + xk\theta} \quad (5-54)$$

$$e^{NCC*} = \frac{(\beta + p_e)(2\delta_2' - ax(1-2\alpha)(1-\theta))}{B_2 + xk\theta} \quad (5-55)$$

$$P^{NCC*} = w^{NCC*} + \frac{(2k\delta_2'(1-2x(1-\theta)) - a(1-2\alpha)(B_2 - xk(2(1-\theta)(1-x(1-\theta)) - 1)))}{2(B_2 + xk\theta)} \quad (5-56)$$

$$D^{NCC*} = \frac{k(2\delta_2' - ax(1-\theta)(1-2\alpha))}{B_2 + xk\theta} \quad (5-57)$$

$$u_m^{NCC*} = \frac{\left[4k(\delta_2')^2 - a^2(1-2\alpha)^2(B_2 + xk\theta) + ax(1-2\alpha)(ak(\theta(7-10\alpha) + x(1-2\alpha)(1-4\theta + 2\theta^2)) - 4k\delta_2' - 2\theta(2k(a(1-\alpha) - \delta_2') + a(1-2\alpha)x(\beta + p_e)^2)) \right]}{4(B_2 + xk\theta)} \quad (5-58)$$

$$u_r^{NCC*} = \frac{\left[2\delta^{NCC}(2k\delta_2'(1-2x(1-\theta)) - a(1-2\alpha)(B_2 - xk(2(1-\theta)(1-x(1-\theta)) - 1))) + x(1-\theta)(\delta^{NCC})^2 + (2k\delta_2' + a(1-2\alpha)(B_2 + xk(2\theta-1)))^2 \right]}{8(B_2 + xk\theta)^2} \quad (5-59)$$

$$\begin{aligned}
 SW^{NCC*} = & \frac{\left[2\delta^{NCC} (2k\delta'_2(1-2x(1-\theta)) - a(1-2\alpha)(B_2 - xk(2(1-\theta)(1-x(1-\theta)) - 1))) + (1+x(1-\theta))(\delta^{NCC})^2 + 2(2k\delta'_2 + a(1-2\alpha)(B_2 + xk(2\theta-1)))^2 \right. \\
 & \left. - 8(B_2 + xk\theta)(k\lambda e_0 p_e(2\delta'_2 - ax(1-\theta)(1-2\alpha))) \right]}{8(B_2 + xk\theta)^2} \\
 & + \frac{\left[4k(\delta'_2)^2 - a^2(1-2\alpha)^2(B_2 + xk\theta) + ax(1-2\alpha)(ak(\theta(7-10\alpha) + x(1-2\alpha)) \right. \\
 & \left. (1-4\theta+2\theta^2)) - 4k\delta'_2 - 2\theta(2k(a(1-\alpha) - \delta'_2) + a(1-2\alpha)x(\beta + p_e)^2) \right]}{4(B_2 + xk\theta)}
 \end{aligned} \quad (5-60)$$

推论 5-6 通过计算 CC 模型均衡解关于谎报系数的一阶导数，我们得出以下结论：

- (1) 若 $0 \leq p_e \leq \frac{\beta}{\lambda}$ ，则 $\frac{\partial e^{CC*}}{\partial \rho} \leq 0$ ； $\frac{\partial D^{CC*}}{\partial \rho} \leq 0$ ； $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \rho} \leq 0$ ；若 $\frac{\beta}{\lambda} < p_e$ ，则 $\frac{\partial e^{CC*}}{\partial \rho} > 0$ ； $\frac{\partial D^{CC*}}{\partial \rho} > 0$ ； $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \rho} > 0$ 。
- (2) 若 $0 \leq p_e \leq p_e^{41}$ ，则 $\frac{\partial P^{CC*}}{\partial \rho} \leq 0$ ；若 $p_e > p_e^{41}$ ，则 $\frac{\partial P^{CC*}}{\partial \rho} > 0$ 。

$$\text{其中 } p_e^{41} = \frac{(k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda)) + \sqrt{8k\beta^2(2-x(2-\theta))(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2}}{4\beta(1+\lambda)}$$

证明：见附录 22。

推论 5-6 揭示，制造商和零售商同时承担 CSR 时，CSR 承担水平仅影响谎报系数对销售价的影响。谎报系数对碳减排量、市场总需求以及制造商效用的影响与碳交易价格的取值紧密相关。制造商的谎报行为在碳交易价格较低的情况下会降低单位产品的碳减排量及自身效用。此时碳交易价格的阈值与消费者低碳偏好和碳配额比例有关，当消费者提高自身环保意识时，碳交易价格阈值增大，即扩大了谎报系数对制造商效用产生消极影响的碳交易价格范围。这在一定程度上抑制了制造商的谎报行为，因此政府应加大低碳宣传力度，提高消费者低碳意识。此外，碳交易价格同时显著影响销售价随谎报系数的变化。观察此时碳交易价格的阈值，可以发现 CSR 承担水平以及制造商承担 CSR 比例的增加均会使碳交易价格阈值增大。这在一定程度上同样防止了制造商通过谎报行为获利，因为此时制造商和零售商为实现企业社会责任目标，追求更大的产品销量，在碳交易价格较低时将降低销售价，但此时如果制造商提高谎报程度，销售价将持续下降，最终导致制造商效用的下降。

推论 5-7 通过计算 CC 模型均衡解关于消费者线下渠道偏好系数的一阶导数，我们得出以下结论：

- (1) $\frac{\partial e^{CC*}}{\partial \alpha} < 0$; $\frac{\partial D^{CC*}}{\partial \alpha} < 0$; 若 $p_e \geq \frac{k}{2\beta} - \beta$, 则 $\frac{\partial P^{CC*}}{\partial \alpha} \leq 0$; 若 $0 \leq p_e < \frac{k}{2\beta} - \beta$, 则 $\frac{\partial P^{CC*}}{\partial \alpha} > 0$ 。
- (2) (i) 当 $\Delta_{h^5(p_e)} \leq 0$ 时, 若 $0 < \alpha < \frac{1}{2}$, 则 $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} < 0$; 若 $\frac{1}{2} < \alpha < 1$, 则 $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} > 0$ 。
- (ii) 当 $\Delta_{h^5(p_e)} > 0$ 且 $0 < \alpha < \frac{1}{2}$ 时, (a) $H^3 > 0$, 若 $0 \leq p_e \leq p_e^{52}$, 则 $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} \geq 0$; 若 $p_e > p_e^{52}$, 则 $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} < 0$ 。(b) $H^3 < 0$ 且 $H^4 < 0$, 若 $p_e \geq 0$, 则 $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} < 0$ 。(c) $H^3 < 0$ 且 $H^4 > 0$, 若 $0 \leq p_e < p_e^{51}$ 或 $p_e > p_e^{52}$, 则 $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} < 0$; 若 $p_e^{51} \leq p_e \leq p_e^{52}$, 则 $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} \geq 0$ 。
- (iii) 当 $\Delta_{h^5(p_e)} > 0$ 且 $\frac{1}{2} < \alpha < 1$ 时, (a) $H^3 < 0$, 若 $0 \leq p_e \leq p_e^{51}$, 则 $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} \leq 0$; 若 $p_e > p_e^{51}$, 则 $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} > 0$ 。(b) $H^3 > 0$ 且 $H^4 < 0$, 若 $p_e \geq 0$, 则 $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} > 0$ 。(c) $H^3 > 0$ 且 $H^4 > 0$, 若 $0 \leq p_e < p_e^{52}$ 或 $p_e > p_e^{51}$, 则 $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} > 0$; 若 $p_e^{52} \leq p_e \leq p_e^{51}$, 则 $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} \leq 0$ 。
- (iv) 当 $\alpha = \frac{1}{2}$ 时, 若 $2e_0 p_e (1 - \lambda \rho) \geq a - 2e_0 \beta \rho$, 则 $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} \geq 0$; 若 $2e_0 p_e (1 - \lambda \rho) < a - 2e_0 \beta \rho$,

则 $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} < 0$ 。 其 中

$$\Delta_{h^5(p_e)} = \left[\begin{aligned} &64k(2a^2(1-2\alpha)(1-x\theta)(1-4\alpha+x(1-\theta(5-8\alpha)) - x^2(1-2\alpha)(1-2(2-\theta)\theta)) + \\ &(1-x(1-\theta))e_0(4a\beta(1-2\alpha)(1-x\theta)(\rho(1+\lambda)-1) + k(1-x(1-\theta))(1-\lambda\rho)^2 e_0) \end{aligned} \right],$$

$$H^3 = a(k(1-4\alpha) - 2\beta^2(1-2\alpha)(1-x\theta) + kx(1-\theta(5-8\alpha) - x(1-2\alpha)(1-2(2-\theta)\theta))) + 2ke_0\beta\rho(1-x(1-\theta)),$$

$$H^4 = 2a\beta(2\alpha-1)(1-x\theta) + ke_0(1-x(1-\theta))(1-\lambda\rho),$$

$$p_e^{51} = \frac{-(2a\beta(2\alpha-1)(1-x\theta) + ke_0(1-x(1-\theta))(1-\lambda\rho)) + \sqrt{\Delta_{h^5(p_e)}}}{4a(2\alpha-1)(1-x\theta)},$$

$$p_e^{52} = \frac{-(2a\beta(2\alpha-1)(1-x\theta) + ke_0(1-x(1-\theta))(1-\lambda\rho)) - \sqrt{\Delta_{h^5(p_e)}}}{4a(2\alpha-1)(1-x\theta)}。$$

证明：见附录 23。

推论 5-7 表明，消费者倾向于线下渠道购物时会抑制制造商进行碳减排活动，进而对市场需求带来消极影响。由于碳减排量下降导致最终碳排放水平提高，所以当碳交易价格较高时制造商和零售商会提高销售价缓解支出购买碳排放权的成本压力。但这同时会降低消费者购买意愿，不利于制造商和零售商企业社会责任目标的实现，所以制造商

应采取策略提高消费者线上渠道偏好。消费者线下渠道偏好对制造商效用的影响较为复杂，主要与消费者线下渠道偏好与碳交易价格有关。

推论 5-8 通过计算 CC 模型均衡解关于碳配额比例、CSR 承担水平、制造商承担 CSR 配置比例的一阶导数，我们得出以下结论：

$$(1) (i) \frac{\partial e^{CC*}}{\partial \lambda} > 0; \frac{\partial D^{CC*}}{\partial \lambda} > 0; \frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \lambda} > 0. (ii) \frac{\partial e^{CC*}}{\partial x} > 0; \frac{\partial D^{CC*}}{\partial x} > 0. (iii) \frac{\partial e^{CC*}}{\partial \theta} < 0; \frac{\partial D^{CC*}}{\partial \theta} < 0.$$

$$(2) \text{ 若 } p_e \geq \frac{k}{2\beta} - \beta, \text{ 则 } \frac{\partial P^{CC*}}{\partial \lambda} \geq 0, \frac{\partial P^{CC*}}{\partial x} \geq 0, \frac{\partial P^{CC*}}{\partial \theta} \leq 0; \text{ 若 } 0 \leq p_e < \frac{k}{2\beta} - \beta, \text{ 则 } \frac{\partial P^{CC*}}{\partial \lambda} < 0, \frac{\partial P^{CC*}}{\partial x} < 0, \frac{\partial P^{CC*}}{\partial \theta} > 0.$$

证明：见附录 24。

推论 5-8 表明，制造商与零售商同时承担 CSR 时，(i) 碳配额比例的提高对碳减排量、市场总需求以及制造商效用产生正向影响。同时，碳配额比例对销售价产生影响，这种影响因碳交易价格的差别而有所不同。当碳交易价格较高时，因需求增加带来生产过程中总的碳排放水平增加，从而导致制造商购买额外碳排放权的成本增加，此时制造商和零售商将提高销售价以实现自身利润最大化。(ii) 碳减排量和市场总需求量会随着供应链整体 CSR 水平的提高而增加。这说明制造商和零售商同时承担 CSR 有利于制造商提升碳减排技术，同时促进环境效益和社会效益的提高。因碳减排投资以及市场需求的增加加剧制造商的成本压力，所以在碳交易价格较高时，制造商和零售商会通过上调销售价转移成本压力。(iii) 制造商的 CSR 承担比例越大，其碳减排量反而越低，市场总需求量越低。这暗示了零售商承担全部 CSR 时，制造商进行碳减排的积极性最大。当碳交易价格较高时，销售价随着制造商承担 CSR 比例的增加而下降。因为制造商承担 CSR 的比例提高时，更加关注消费者剩余。此时需求下降会降低碳交易政策对制造商产生的额外的碳排放成本，因此为了追求更高消费者剩余制造商和零售商会考虑降低销售价刺激需求。

制造商效用关于 CSR 承担水平以及制造商承担 CSR 的比例的一阶导数较为复杂，本文将在数值分析中进行阐述。

5.4 模型对比分析

推论 5-9 比较制造商谎报与“实报”时的碳减排量、市场总需求以及制造商效用，得到如下结论：

- (1) 若 $0 \leq p_e < \frac{\beta}{\lambda}$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，或 $p_e > \frac{\beta}{\lambda}$ 且 $\rho > 1$ ，则 $e^{i*} > e^{Ni*}$ ， $D^{i*} > D^{Ni*}$ ， $u_m^{i*} > u_m^{Ni*}$ ；
- (2) 若 $0 \leq p_e < \frac{\beta}{\lambda}$ 且 $\rho > 1$ ，或 $p_e > \frac{\beta}{\lambda}$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，则 $e^{i*} < e^{Ni*}$ ， $D^{i*} < D^{Ni*}$ ， $u_m^{i*} < u_m^{Ni*}$ ；
- (3) 若 $p_e = \frac{\beta}{\lambda}$ ，则 $e^{i*} = e^{Ni*}$ ， $D^{i*} = D^{Ni*}$ ， $u_m^{i*} = u_m^{Ni*}$ ($i = MC, RC, CC$)。

证明：见附录 25。

推论 5-9 揭示，不管哪种承担 CSR 策略，CSR 承担水平均并不会影响制造商的谎报决策。当碳交易价格较低时，制造商“低报”会提升自身效用，“高报”损害自身效用，此时制造商会选择“低报”。由于“低报”使产品最终碳排放下降，所以推动市场需求的增加，从而激励制造商加大碳减排投资力度。虽然“低报”在一定程度上提升了环境效益，但对于消费者来说，产品最终碳排放量下降可能仅是假象，制造商的“低报”行为属于不道德行为，故不提倡。当碳交易价格较高时，制造商“高报”对获得碳利润产生的正向影响较大，促进制造商加大碳减排投资，从而使市场需求及自身效用得以提高。

推论 5-10 比较制造商谎报与“实报”时的销售价，得到如下结论：

- (1) 若 $0 \leq p_e < p_e^{61}$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，或 $p_e > p_e^{61}$ 且 $\rho > 1$ ，则 $P^{MC*} > P^{NMC*}$ ；若 $0 \leq p_e < p_e^{61}$ 且 $\rho > 1$ ，或 $p_e > p_e^{61}$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，则 $P^{MC*} < P^{NMC*}$ ；若 $p_e = p_e^{61}$ ，则 $P^{MC*} = P^{NMC*}$ 。
- (2) 若 $0 \leq p_e < p_e^{71}$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，或 $p_e > p_e^{71}$ 且 $\rho > 1$ ，则 $P^{RC*} > P^{NRC*}$ ；若 $0 \leq p_e < p_e^{71}$ 且 $\rho > 1$ ，或 $p_e > p_e^{71}$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，则 $P^{RC*} < P^{NRC*}$ ；若 $p_e = p_e^{71}$ ，则 $P^{RC*} = P^{NRC*}$ 。
- (3) 若 $0 \leq p_e < p_e^{81}$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，或 $p_e > p_e^{81}$ 且 $\rho > 1$ ，则 $P^{CC*} > P^{NCC*}$ ；若 $0 \leq p_e < p_e^{81}$ 且 $\rho > 1$ ，或 $p_e > p_e^{81}$ 且 $0 \leq \rho < 1$ ，则 $P^{CC*} < P^{NCC*}$ ；若 $p_e = p_e^{81}$ ，则 $P^{CC*} = P^{NCC*}$ 。其中

$$p_e^{61} = \frac{k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda) + \sqrt{8k(2-x)\beta^2(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2}}{4\beta(1+\lambda)},$$

$$p_e^{71} = \frac{k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda) + \sqrt{16k(1-x)\beta^2(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2}}{4\beta(1+\lambda)},$$

$$p_e^{81} = \frac{k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda) + \sqrt{8k(2-x(2-\theta))\beta^2(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2}}{4\beta(1+\lambda)}。$$

证明：见附录 26。

推论 5-10 表明，不管哪种 CSR 承担策略，制造商谎报与“实报”时的销售价之间的差异均与碳交易价格和谎报系数的取值有密切关系。具体而言，制造商在碳交易价格较低时“低报”会提高产品销售价，“高报”则结论相反。由于“低报”促进市场需求的增加，制造商和零售商为实现最大化自身效用将提升销售价。“高报”对市场需求带来负向影响，为降低这种负向影响，制造商和零售商将下调销售价刺激消费者提高购买力度。通过观察碳交易价格的阈值，可以发现 CSR 承担水平会影响其大小。CSR 承担水平以及制造商 CSR 承担比例的提升均会使碳交易价格阈值增大，且在同一 CSR 承担水平下，MC 模型与 CC 模型碳交易价格阈值均高于 RC 模型。

推论 5-11 比较 MC 模型、RC 模型、CC 模型的碳减排量、市场总需求及销售价，得到如下结论：

- (1) $e^{MC*} < e^{CC*} < e^{RC*}$ ； $D^{MC*} < D^{CC*} < D^{RC*}$ ；
- (2) 若 $p_e \geq \frac{k}{2\beta} - \beta$ ，则 $P^{MC*} \leq P^{CC*} \leq P^{RC*}$ ；若 $0 \leq p_e < \frac{k}{2\beta} - \beta$ ，则 $P^{MC*} > P^{CC*} > P^{RC*}$ 。

证明：见附录 27。

由推论 5-2、5-5 以及 5-8 可知无论哪种 CSR 承担策略，碳减排量都会随着 CSR 承担水平的提高而提高，但不同策略下碳减排量随着 CSR 承担水平的敏感度不同。推论 5-11 表明，RC 策略下碳减排量和市场总需求最大，其次是 CC 策略，最后是 MC 策略。并且，制造商的谎报行为不影响三种 CSR 承担策略碳减排量、市场总需求和销售价之间的差异。这体现了当承担 CSR 程度相同时，零售商单独承担 CSR 比制造商单独承担 CSR 以及两者同时承担 CSR 更有利于增加单位产品的碳减排量。原因在于零售商更能准确捕捉顾客需求的心理和特征变化，从而通过承担 CSR 在最大程度上扩张市场份额，创造更多经济利益，促进制造商加大碳减排活动，使得在 RC 模型下碳减排量和市场总需求量达到最大。当碳交易价格较高时，RC 模型销售价最高，其次是 CC 模型，最后是 MC 模型；当碳交易价格较低时，结论相反。因为 RC 模型中碳减排量最大势必引起制造商投资碳减排成本增加，且市场需求也最大，导致最终碳排放增加。因此 RC 模型中在碳交易价格较高时制造商和零售商通过提高销售价来缓解成本压力。

由于三种 CSR 承担策略下制造商效用的比较过于复杂，本文将在下节数值分析中予以说明。

5.5 数值分析

在本节中，将通过数值分析手段，全面考察制造商谎报行为对供应链关键参数的潜在影响，涉及环境效益、经济效益与社会效益三个层面对影响效应的深入剖析。进一步地，本节研究将特别关注在制造商谎报行为存在的背景下，CSR 承担水平及其在供应链中的分配比例如何影响供应链参数，进而评估不同 CSR 承担策略的有效性。相应结果如图所示，参照周艳菊等^[2]和梁喜等^[72]，相关参数取值为 $a=100$ ， $k=35$ ， $\alpha=0.4$ ， $\beta=0.6$ ， $e_0=10$ ， $\lambda=0.6$ ， $p_e=2$ ， $x=0.6$ ， $\theta=0.5$ 。

5.5.1 谎报系数对供应链参数的敏感性分析

如图 5-2 所示，不管哪种 CSR 承担策略，制造商“低报”时会降低碳减排量，“高报”则提升碳减排量，且在同一谎报系数下，RC 模型碳减排量最大，CC 模型次之，这验证了推论 5-11 中的结论。在碳交易价格固定的情况下，碳减排量与谎报系数正相关，说明制造商的谎报行为促进了环境效益的提升。但销售价与谎报系数呈负相关关系，因为谎报系数的增加对市场需求带来不利影响较大，制造商和零售商为了实现企业社会责任目标，将降低销售价以扩大市场份额。不管制造商的谎报决策如何，MC 模型销售价始终最高，由图 5-2(a)可知此时 MC 模型的碳减排量最小，对市场需求的冲击较大，MC 模型制造商和零售商将提高销售价来提高自身效用。

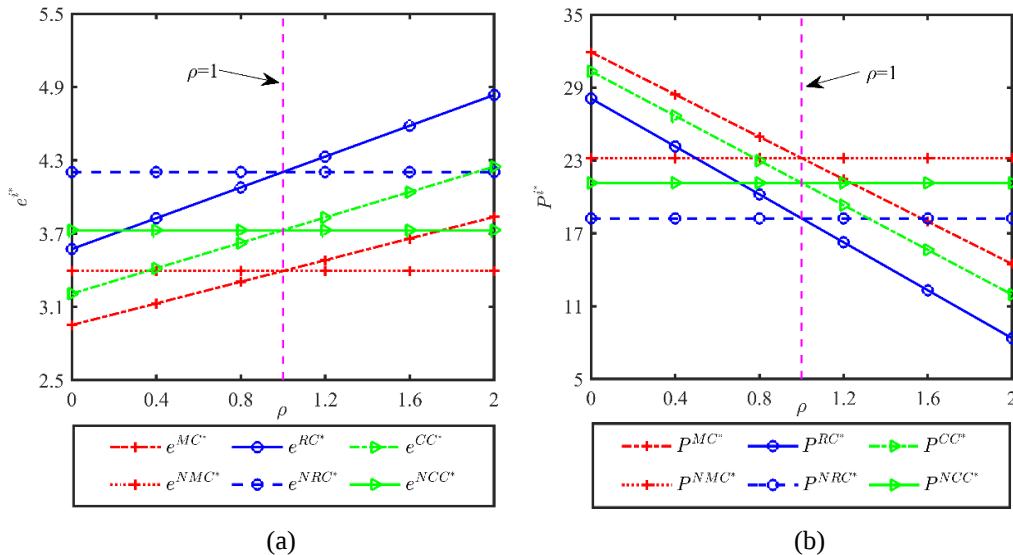


图 5-2 谎报系数对碳减排量和销售价的影响

图 5-3 揭示了谎报系数的增加对制造商效用与社会福利的影响，具体而言，制造商效用与谎报系数呈正相关关系，而社会福利与谎报系数呈负相关关系。这表明，制造商的谎报行为可能会提升自身效用但会损害社会福利，从社会效益角度出发，政府应制定

相关措施对企业进行监管。当制造商“低报”时，三种 CSR 承担策略下的制造商效用之间的差异较为复杂，而当制造商“高报”时，仅零售商承担 CSR 策略下的制造商效用最大。“高报”对制造商获得免费碳配额的正向影响较大，故推动其提高碳减排水平，从而引起市场需求的增加，最终使制造商自身效用得到提升。与制造商效用不同，不管制造商的谎报策略如何，仅零售商承担 CSR 策略下的社会福利最大。制造商谎报系数的增加导致政府支出治理碳排放的成本增加，故导致社会福利逐渐下降。

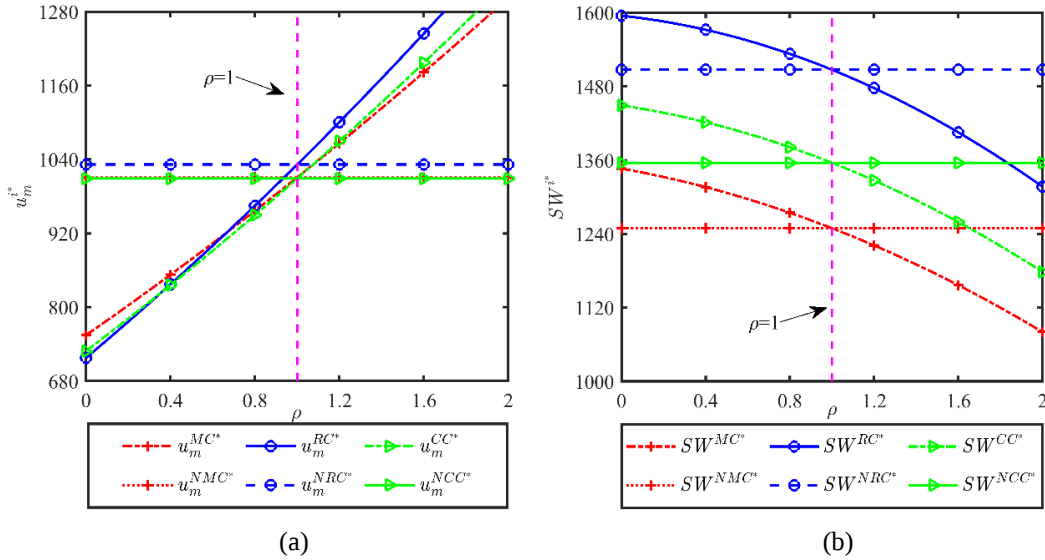


图 5-3 谎报系数对制造商效用和社会福利的影响

5.5.2 碳配额比例对供应链参数的敏感性分析

如图 5-4 所示，碳配额比例的增加会提高碳减排量，但会降低销售价。不管哪种 CSR 承担策略，当碳配额比例小于 0.3 时，制造商“低报”均会提高碳减排量。因为碳配额比例较小时，制造商“低报”获得的免费碳配额减少，为减少购入碳排放权，制造商将积极进行碳减排活动，碳减排量因此得到提升。销售价随着碳配额比例的提高而下降，这是因为制造商获得的免费碳配额有限，制造商和零售商通过降低销售来提升市场需求，以达到补偿碳减排量增大带来的碳减排成本支出的目的。

图 5-5 表明，不管哪种 CSR 承担策略，制造商效用和社会福利均与碳配额比例呈正相关关系。当碳配额比例小于 0.3 时，不管制造商的谎报决策如何，均存在 MC 模型制造商效用最大，CC 模型次之。而当碳配额比例大于 0.3 时，不存在上述结论。当碳配额比例较小时，制造商获得的碳配额较少，同时制造商承担 CSR 会更加关注消费者剩余，所以会提高碳减排水平，一是有利于满足消费者低碳偏好进而增加产品需求；二是扩大生产规模必然导致生产过程中总的碳排放水平增加，提高碳减排量能够降低生产过程中

的碳排放量，从而降低政府碳限额政策对自身提高产量而带来的额外的碳排放的成本。从图 5-5(b)中可以发现三种 CSR 承担策略下，均存在制造商“低报”时的社会福利均并非一定大于“实报”，而“高报”时的社会福利一定小于“实报”的情况。碳配额比例的增加会导致政府支付的碳排放治理成本增加，但对制造商效用的正向影响较大，所以最终社会福利随着碳配额比例的增加而提高。

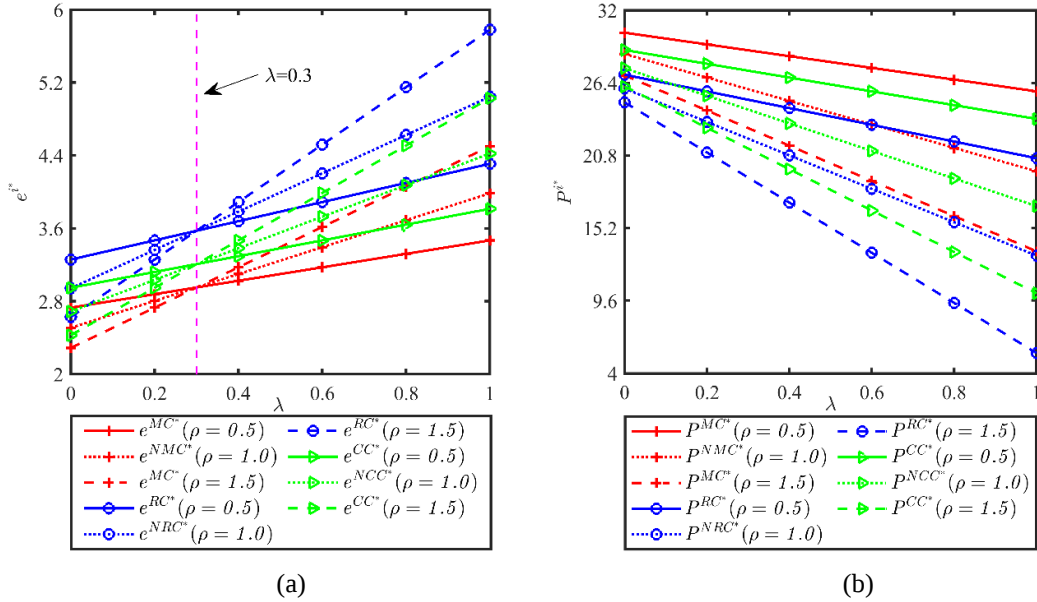


图 5-4 碳配额比例对碳减排量和销售价的影响

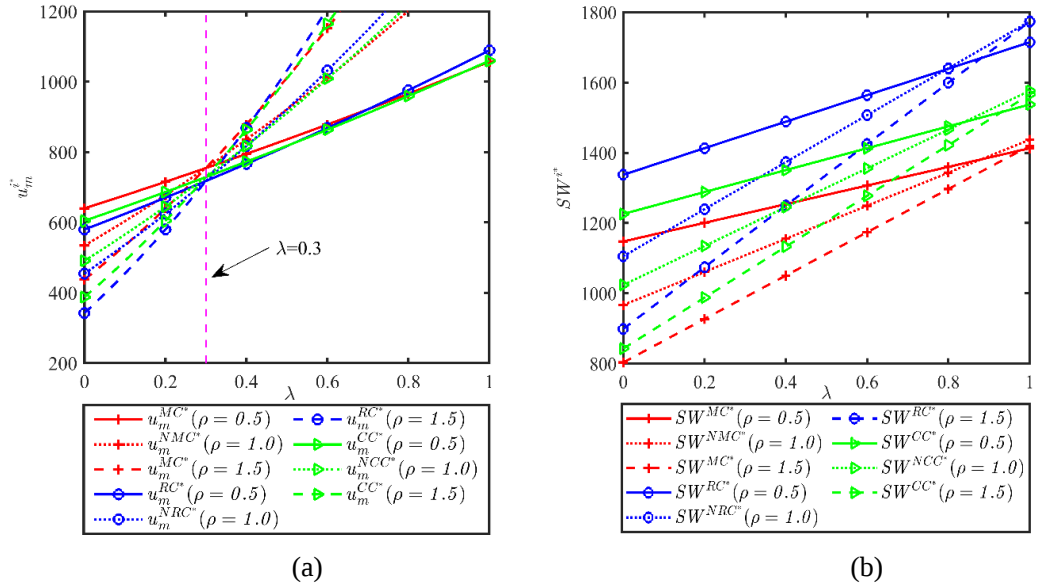


图 5-5 碳配额比例对制造商效用和社会福利的影响

5.5.3 CSR 承担水平对供应链参数的敏感性分析

为保证所有模型的销售价为正值，在给定上述参数数值后，CSR 承担水平须满足 $0 \leq x < 0.777$ ，本章选取 $x \in [0, 0.7]$ 。

由图 5-6 可知，三种 CSR 承担策略下，单位产品的碳减排量都随着制造商和零售商承担社会责任水平的提高而增加，但销售价随之反向变动。仅零售商承担 CSR 时的碳减排量最优，其原因是当零售商承担 CSR 时，更加关注消费者，因此零售商为实现 CSR 目标会降低产品的销售价。消费者为支持低碳产品和积极承担社会责任的零售商，会增加购买力度。消费者对低碳产品的支持会激励制造商加大碳减排的研发投入，因此单位产品的碳减排量会增加。可见企业更具企业社会责任感时能够创造更多的环境效益。

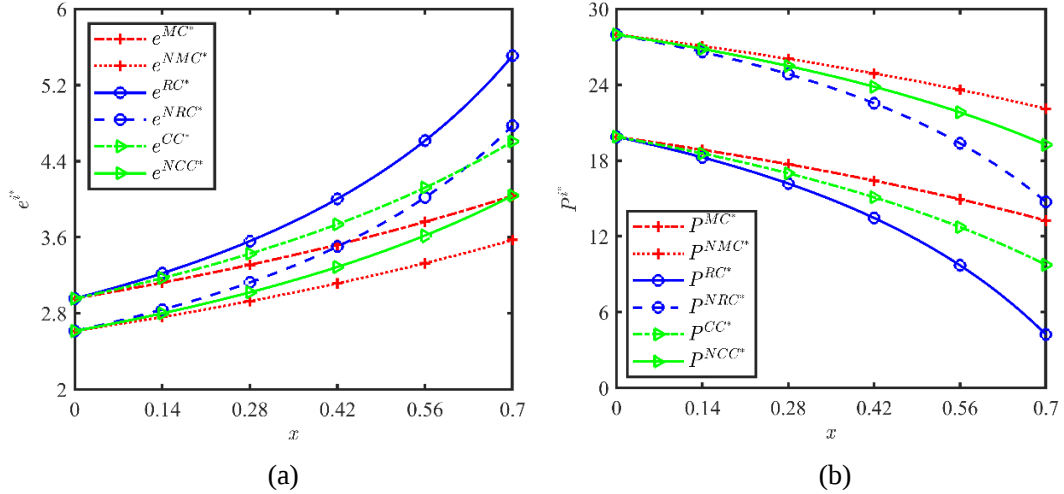


图 5-6 CSR 承担水平对碳减排量和销售价的影响

如图 5-7 所示，CSR 承担水平的提高对制造商效用以及社会福利均产生积极影响。企业承担社会责任有利于提升消费者群体对低碳产品的接受度，是经济效益、社会效益最大化和环境可持续性的推动力。同一 CSR 承担策略下，制造商谎报时的效用显著大于“实报”时的效用，随着 CSR 承担水平的不断提高，RC 模型的制造商效用逐渐最大。然而，制造商谎报时的社会福利却小于“实报”时的社会福利，且无论制造商谎报还是“实报”，RC 模型下的社会福利最大，CC 模型次之。

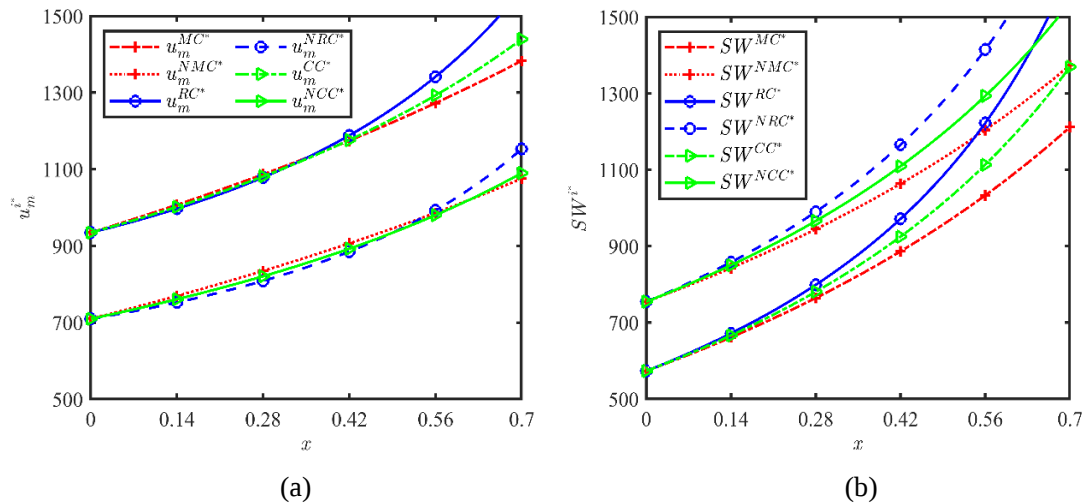


图 5-7 CSR 承担水平对制造商效用和社会福利的影响

5.5.4 制造商 CSR 承担比例对 CC 与 NCC 模型关键参数的影响

由图 5-8 可知，制造商和零售商同时承担 CSR 时，单位产品的碳减排量随着制造商承担 CSR 比例的增加而下降，这说明制造商承担 CSR 较多时不利于制造商加大碳减排技术的研发投入，造成碳减排量的下降。制造商承担的 CSR 越多，制造商和零售商会通过提高销售价来弥补低碳技术研发投入成本带来的利润损失。相较于“高报”，制造商“低报”时获得的碳配额较少，所以“低报”时销售价大于“高报”。

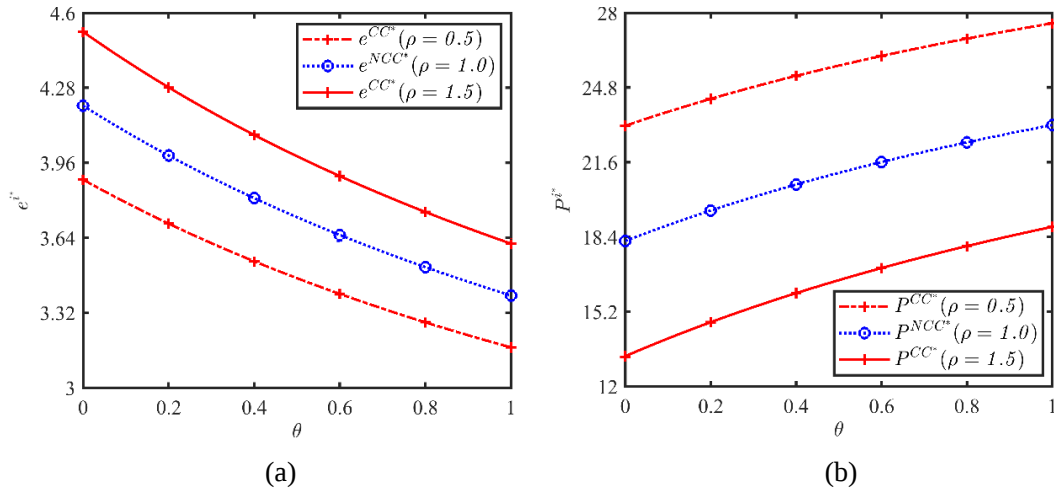


图 5-8 制造商 CSR 承担比例对碳减排量和销售价的影响

如图 5-9 所示，制造商“低报”和“实报”时，其效用随着制造商承担 CSR 比例的增大先缓慢下降，后又缓慢增加。而制造商“高报”时自身效用随 CSR 承担比例的增加而持续下降。由前文的分析可知，制造商承担 CSR 的比例增加不利于制造商创造更多环境效益，市场需求因此受到负向影响，故出现制造商效用逐渐下降的情况。当制造商承担比例逐渐增大时，制造商和零售商同时 CSR 逐渐变为仅制造商承担 CSR 的情况，因此其效用出现缓慢增加的情况。由于制造商“高报”对需求的负向影响较大，故不会出现制造商效用缓慢增加的情况。不管制造商谎报还是“实报”，制造商承担 CSR 比例的增加会对社会福利产生消极影响。

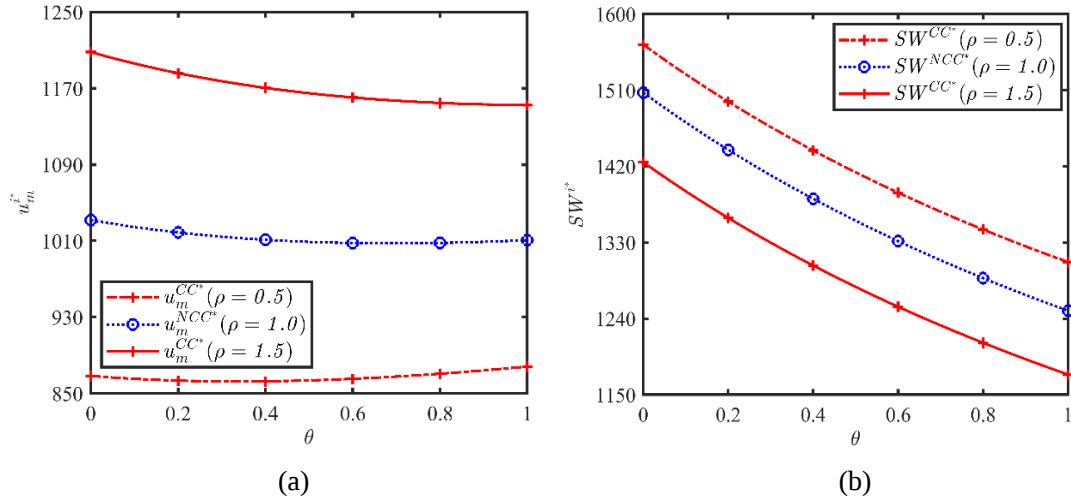


图 5-9 制造商 CSR 承担比例对制造商效用和社会福利的影响

5.6 本章小结

本章在碳交易机制背景下同时考虑双渠道制造商对产品初始碳排量进行谎报以及供应链成员承担企业社会责任，构建了制造商主导的谎报行为下仅制造商承担 CSR 模型、仅零售商承担 CSR 模型以及制造商和零售商同时承担 CSR 模型，在同一 CSR 承担策略下总结了制造商在面临排碳约束时不同谎报决策对供应链绩效的影响，同时在制造商谎报行为下比较了三种承担 CSR 策略的优劣。最后通过数值分析从环境效益、经济效益、社会效益剖析了制造商谎报行为下，三种承担 CSR 策略的差异。从本章的研究中，我们得到以下结论：

(1) 碳交易价格显著影响制造商的谎报决策，其影响程度与消费者对低碳产品的偏好以及碳配额的分配比例密切相关。具体而言，随着消费者环保意识的提升，所需的碳交易价格阈值随之增加，从而提高了制造商选择“高报”碳排放量策略的成本门槛。因此，政府应加强低碳宣传活动，以提升公众的低碳意识。当碳交易价格较高时，销售价随着制造商承担 CSR 比例的增加而下降。

(2) 无论在哪种 CSR 承担策略下，(i) CSR 承担水平仅影响谎报系数对销售价的影响，不会影响谎报系数对碳减排量、市场总需求以及制造商效用的影响；(ii) 碳配额比例、CSR 承担水平的提升对碳减排量、市场总需求以及制造商效用均产生积极影响；(iii) CSR 承担水平均并不会影响制造商的谎报决策；(iv) 制造商“低报”时的社会福利均并非一定大于“实报”情形，而“高报”时的社会福利一定小于“实报”情形。

(3) 不管制造商谎报还是“实报”，(i) 制造商的 CSR 承担比例越大，其碳减排量反而越低，市场总需求量越低；(ii) 制造商承担 CSR 比例的增加会对社会福利产生消极影

响。制造商“低报”和“实报”时，其效用随着制造商承担 CSR 比例的增大先缓慢下降，后又缓慢增加。而制造商“高报”时自身效用随 CSR 承担比例的增加而持续下降。(iii) RC 模型下的社会福利最大，CC 模型次之。

(4) 在制造商谎报行为下，RC 策略下碳减排量和市场总需求最大，其次是 CC 策略。并且，制造商的谎报行为不影响三种 CSR 承担策略碳减排量、市场总需求和销售价之间的差异。随着 CSR 承担水平的不断提高，RC 模型的制造商效用逐渐最大。零售商单独承担 CSR 策略能够创造更多的环境效益、经济效益和社会效益。

通过本章结论，可得如下管理启示：

在政府层面，首先，政府应加强低碳宣传活动，以提升公众的低碳意识。其次，政府应合理分配碳配额比例，以激励企业提高碳减排量，并增强其市场竞争力和社会效用。最后，政府应设置合理的碳交易价格，合理的碳交易价格能够有效引导制造商实报碳排放量，进而提升整体社会福利。

在制造商层面，首先，碳配额比例和 CSR 承担水平的提升对碳减排量、市场总需求以及制造商效用均产生积极影响。制造商应积极提高碳减排意识，采取有效措施降低碳排放，以获得更大的市场需求和效用。其次，制造商的 CSR 承担比例越大，其碳减排量反而越低，市场总需求量越低。因此，制造商应合理控制 CSR 承担比例，避免因过高的 CSR 承担比例导致自身效用和市场需求的下降。最后，由于零售商单独承担 CSR 时能够创造更多的经济效益，制造商应与已经承担或有意愿承担 CSR 的零售商建立合作伙伴关系，或提供激励措施来鼓励零售商承担 CSR，如增强品牌曝光的机会或优先供货等。

在零售商层面，首先，零售商单独承担 CSR 策略能够创造更多的环境效益、经济效益和社会效益。因此，零售商应积极承担 CSR，提升自身在市场中的地位 and 影响力。其次，零售商应密切关注市场需求变化，灵活调整销售策略，以适应不同 CSR 承担策略下的市场环境。最后，随着 CSR 承担水平的不断提高，RC 模型的制造商效用逐渐最大。零售商应与制造商合作，共同承担 CSR，提高自身效用和市场竞争力，从而实现双赢。

第 6 章 结论与展望

6.1 研究结论

本文在碳交易机制背景下,建立一个由单一制造商和单一零售商组成的二级双渠道低碳供应链,考虑双渠道制造商对产品初始碳排放量信息进行谎报,构建了制造商主导的谎报模型,从环境效益、经济效益和社会效益角度分析了制造商谎报行为对双渠道供应链成员最优决策的影响;其次,在碳交易机制的背景下引入政府补贴政策,考虑政府对制造商进行碳减排量补贴或碳减排成本补贴,构建了制造商主导的谎报且碳减排量补贴模型、谎报且碳减排成本补贴模型,探讨了制造商的谎报行为对补贴效果的影响以及政府补贴对制造商谎报决策的影响。最后,将企业社会责任因素引入双渠道供应链中,与初始碳排放量信息不对称联合考虑,构建了制造商主导的谎报行为下仅制造商承担 CSR 模型、仅零售商承担 CSR 模型以及制造商和零售商同时承担 CSR 模型,比较了不同 CSR 承担策略对制造商谎报行为的影响以及对供应链关键参数的影响。根据以上研究内容,本文主要研究结论如下:

(1) 制造商的谎报决策与碳交易价格、谎报系数密切相关。若碳交易价格低于阈值,则制造商会选择“低报”,同时这一行为将促进碳减排量和市场总需求的增加。而当碳交易价格高于阈值时,制造商会选择“高报”。不论碳交易价格如何,制造商“高报”(“低报”)时的社会福利均小于(大于)“实报”情形。惩罚措施和激励措施在满足特定的条件时能够有效约束制造商的谎报行为。政府设计这两项措施时是以实现社会福利最大化为初衷,因此就社会福利而言,若碳交易价格较低或初始碳排放量较小,则惩罚措施效果更好;否则,反之。

(2) 制造商的谎报行为对两种补贴策略下的碳减排量、市场总需求以及制造商利润带来或消极或积极的影响,主要取决于碳交易价格的高低。在制造商“高报”的情况下,碳减排成本补贴策略对环境效益和经济效益的积极影响更大。消费者线下渠道偏好的增强会降低两种谎报补贴模型的碳减排量、市场总需求量以及制造商利润。碳减排成本补贴系数的增加,使 SD 和 ND 模型社会福利呈下降趋势,甚至出现负值。而碳减排量补

贴系数的增加,使 SR 与 NR 模型社会福利先缓慢增加后又缓慢下降,但不会出现负值。若政府以环境效益最大化为目标,则应选择碳减排成本补贴策略;若以社会效益最大化为目标,则碳减排量补贴策略是政府更合适的选择。

(3) 无论在哪种 CSR 承担策略下,CSR 承担水平并不会影响制造商的谎报决策,制造商“低报”时的社会福利均并非一定大于“实报”,而“高报”时的社会福利一定小于“实报”。在制造商谎报行为下,RC 模型下碳减排量和市场总需求最大,CC 模型次之。并且,制造商的谎报行为不影响三种 CSR 承担策略碳减排量、市场总需求和销售价之间的差异。不管制造商谎报还是“实报”,RC 模型下的社会福利最大,CC 模型次之。制造商承担 CSR 比例的增加会对碳减排量、市场总需求、制造商效用及社会福利产生消极影响。

6.2 不足与展望

本文的研究仍存在一些局限性,根据这些局限性提出进一步研究方向:

(1) 本研究建立的供应链模型假定制造商作为主导方,然而这一设定仅代表现实情形中的一种可能。企业所在行业的特性及其自身实力共同影响供应链的构成及主导权归属。据此,进一步探究具备不同结构和主导权分布的供应链博弈模型,通过对比分析,可揭示不同情境下对制造商谎报策略以及供应链成员决策行为的具体影响。

(2) 本文仅考虑了政府对制造商进行补贴,在实际生活中,政府补贴的对象可以是零售商或者消费者。如果政府对零售商或消费者进行补贴是否会对制造商的谎报决策造成影响?在谎报模型之中加入政府对零售商或消费者补贴可作为未来研究的方向。

(3) 本文仅考虑了企业以提高社会福利为目标而承担企业社会责任的行为,没有考虑企业的 CSR 行为对产品需求、企业形象的建立带来的积极影响,因此在未来的研究中可以考虑 CSR 投入对于相关决策的影响。

参考文献

- [1] 郝旺强. 碳交易规制下考虑社会偏好与信息不对称的供应链减排研究[D]. 天津财经大学, 2016.
- [2] 周艳菊, 吴龙健. 碳限额交易机制下碳信息不对称对供应链的影响研究[J]. 工业工程与管理, 2017, 22(4):68-78.
- [3] 王欢欢. 考虑信息不对称和政府补贴的低碳供应链运营决策研究[D]. 天津大学, 2020.
- [4] 韩同银, 刘丽, 金浩. 考虑政府补贴和公平关切的双渠道绿色供应链决策研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(4):194-204.
- [5] Mitra S, Data P P. Adoption of green supply chain management practices and their impact on performance: An exploratory study of Indian manufacturing firms[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(7):2085-2107.
- [6] 曹裕, 李青松, 胡韩莉. 不同政府补贴策略对供应链绿色决策的影响研究[J]. 管理学报, 2019, 16(2):297-305+316.
- [7] 周敏, 刘倩. 企业社会责任的起源与发展综观[J]. 煤炭经济管理新论, 2008, (0):1-6.
- [8] 谭浪. 不同权力结构下企业社会责任对低碳供应链的碳减排与定价决策的影响分析[D]. 重庆大学, 2022.
- [9] Zhu Q H, Sarkis J. Relationships between operational practices and performance among early adopters of green supply chain management practices in Chinese manufacturing enterprises[J]. Journal of Operations Management, 2004, 22(3):265-289.
- [10] Zsidisin G A, Siferd S P. Environmental purchasing: a framework for theory development [J]. European Journal of Purchasing & Supply Management, 2001, 7(1):61-73.
- [11] Jabbour C J C, Neto A S, Gobbo J A, et al. "Eco-innovations in more sustainable supply chains for a low-carbon economy: A multiple case study of human critical success factors in Brazilian leading companies"[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 164:245-257.
- [12] Dobos I. Production-inventory control under environmental constraints[J]. International Journal of Production Economics, 1998, 56(57):123-131.
- [13] 骆瑞玲, 范体军, 夏海洋. 碳排放交易政策下供应链碳减排技术投资的博弈分析[J]. 中国管理科学, 2014, 22(11):44-53.
- [14] 何华, 马常松, 吴忠和. 碳限额与交易机制考虑绿色技术投入和定价策略研究[J]. 中

- 国管理科学, 2016, 24(5):74-84.
- [15] Xu X X, He P, Xu H, et al. Supply chain coordination with green technology under cap-and-trade regulation[J]. International Journal of Production Economics, 2016, 183:433-442.
- [16] Du S, Ma F, Fu Z, et al. Game-theoretic analysis for an emission-dependent supply chain in a 'cap-and-trade' system[J]. Annals of Operations Research, 2015, 228(1):135-149.
- [17] 陈晓红, 曾祥宇, 王傅强. 碳限额交易机制下碳交易价格对供应链碳排放的影响[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(10):2562-2571.
- [18] 林强, 赵震铮, 霍宝, 等. 考虑碳交易政策的零售商合作减排策略: 融资减排或技术减排[J/OL]. 系统工程理论与实践, 2024, 1-20.
- [19] 张川, 马慧敏, 郭振. 碳限额与交易机制和消费者低碳偏好下的供应链减排及融资策略[J]. 控制与决策, 2023, 38(11):3271-3278.
- [20] 张令荣, 徐航, 李云凤. 碳配额交易背景下双渠道供应链减排决策研究[J]. 管理工程学报, 2023, 37(2):90-98.
- [21] 覃艳华, 曹细玉. 碳限额及交易下制造商低碳宣传的双渠道供应链决策与协调[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2022, 56(4):613-622.
- [22] 曹细玉, 覃艳华, 王静, 等. 碳限额及交易下零售商低碳宣传的双渠道供应链决策与协调[J]. 数学的实践与认识, 2021, 51(7):280-289.
- [23] 王红春, 高吉彤, 郭循帆. 碳交易机制下双渠道供应链定价决策研究[J]. 价格理论与实践, 2022, (7):109-112+203.
- [24] 陈静, 赵灿红, 高歌, 等. 碳限额及交易背景下双渠道供应链纵向合作动态减排研究[J/OL]. 中国管理科学, 2024, 1-15.
- [25] Meng Q, Li M, Liu W, et al. Pricing policies of dual-channel green supply chain: Considering government subsidies and consumers' dual preferences[J]. Sustainable Production and Consumption, 2021, 26(6):1021-1030.
- [26] Sinayi M, Rasti-Barzoki M. A game theoretic approach for pricing, greening, and social welfare policies in a supply chain with government intervention[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 196:1443-1458.
- [27] Guo J, He L, Gen M. Optimal strategies for the closed-loop supply chain with the consideration of supply disruption and subsidy policy[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 128:886-893.

- [28] 江佳秀, 何新华, 胡文发. 考虑碳补贴和企业社会责任的三级供应链减排策略[J]. 系统工程, 2022, 40(1):97-106.
- [29] 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(5):1-9.
- [30] 曹细玉, 覃艳华, 王静, 等. 碳限额及交易下低碳补贴和低碳宣传成本分摊的双渠道供应链联合减排策略[J]. 工业工程, 2022, 25(1):28-36.
- [31] Li B, Guo H Y, Peng S X. Impacts of production, transportation and demand uncertainties in the vaccine supply chain considering different government subsidies[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 169, 108169.
- [32] 孙迪, 余玉苗. 绿色产品市场中政府最优补贴政策的确定[J]. 管理学报, 2018, 15(1):118-126.
- [33] 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.
- [34] Sun X H, Liu X L, Wang Y, et al. The effects of public subsidies on emerging industry: An agent-based model of the electric vehicle industry[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2019, 140:281-295.
- [35] Wang Y, Wang Z, Li B Y, et al. The choice of subsidy policy for incentivizing product design for environment[J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 175, 108883.
- [36] 梁喜, 张余婷. 基于消费者偏好的低碳双渠道供应链定价与减排策略[J]. 运筹与管理, 2020, 29(12):107-117.
- [37] Xu L, Wang C X, Zhao J J. Decision and coordination in the dual-channel supply chain considering cap-and-trade regulation[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 197(1):551-561.
- [38] Ji J N, Zhang Z Y, Yang L. Carbon emission reduction decisions in the retail-/dual-channel supply chain with consumers' preference[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 141:852-867.
- [39] Huang S, Gao Y Q, Wang Y. Supply chain channel structure with online platform and dual-purpose firms[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2023, 180, 103363.
- [40] Zheng B R, Chu J, Jin L. Recycling channel selection and coordination in dual sales channel closed-loop supply chains[J]. Applied Mathematical Modelling, 2021, 95:484-502.

- [41] 牛志勇, 黄沛, 王军. 公平偏好下多渠道零售商线上线下同价策略选择分析[J]. 中国管理科学, 2017, 25(3):147-155.
- [42] Li B, Hou P W, Chen P. Pricing strategy and coordination in a dual channel supply chain with a risk-averse retailer[J]. International Journal of Production Economics, 2016, 178(4):154-168.
- [43] Li B, Zhu M, Jiang Y. Pricing policies of a competitive dual-channel green supply chain[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112(20):2029-2042.
- [44] Xiao T, Chio T M, Cheng T M. Product variety and channel structure strategy for a retailer-Stackelberg supply chain[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 233(1):114-124.
- [45] 余利娥, 施国洪, 陈敬贤. 基于低碳偏好差异的双渠道供应链定价策略[J]. 统计与决策, 2019, 35(1):43-47.
- [46] 陈远高, 刘南. 存在差异性产品的双渠道供应链协调研究[J]. 管理工程学报, 2011, 25(2):239-244.
- [47] David A, Adida E. Competition and coordination in a two-channel supply chain[J]. Production & Operational Management, 2015, 24(8):1358-1370.
- [48] Baal S V. Should retailers harmonize marketing variables across their distribution channels? An investigation of cross-channel effects in multi-channel retailing [J]. Journal of Retailing & Consumer Services, 2014, 21(6):1038-1046.
- [49] Zhang P, Xiong Y, Xiong Z. Coordination of a dual-channel supply chain after demand or production cost disruptions[J]. International Journal of Production Research, 2015, 53(10):3141-3160.
- [50] 姬小利. 生产成本信息不对称下的供应链契约设计问题研究[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2006(1):64-67.
- [51] Cao E B, Ma Y J, Wan C, et al. Contracting with asymmetric cost information in a dual-channel supply chain[J]. Operations Research Letters, 2013, 41(4):410-414.
- [52] Lei Q S, Chen J, Wei X Y, et al. Supply chain coordination under asymmetric production cost information and inventory inaccuracy[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 170:204-218.
- [53] 但斌, 唐国锋, 宋寒. 成本信息不对称下的应用服务外包菜单式合约[J]. 中国管理科学, 2013, 27(4):196-204.
- [54] 文悦, 王勇. 双渠道制造商成本信息不对称下电商平台最优服务契约设计[J]. 中国管

- 理科学, 2022, 30(5):248-262.
- [55] 申成霖, 侯文华, 张新鑫. 基于信息共享视角的时间竞争型供应链决策[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 2(30):257-263.
- [56] 张欢, 刘洋. 双边信息不对称下供应链契约研究[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(6):1570-1580.
- [57] Yu Y G, Zhou S J, Shi Y. Information sharing or not across the supply chain: the role of carbon emission reduction[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 137, 101915.
- [58] Wu J H, Zong Y, Liu X. Cooperative Advertising in Dual-Channel Supply Chain Under Asymmetric Demand Information[J]. International Journal of Electronic Commerce, 2023, 27(1):100-128.
- [59] Basu P, Liu Q D, Stallaert J. Supply chain management using put option contracts with information asymmetry[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(6):1772-1796.
- [60] 杨磊. 碳信息不对称下的供应链谎报决策与协调研究[J]. 中国管理科学, 2016, 24(4):111-120.
- [61] 汤春华, 曹二保, 殷悦. 配额信息不对称时排放依赖型供应链契约[J]. 系统管理学报, 2017, 26(2):356-360.
- [62] Yang L, Ji J, Zheng C. Impact of asymmetric carbon information on supply chain decisions under low-carbon policies[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2016, 1369589.
- [63] Xia J, Niu W J. Pushing carbon footprint reduction along environment with carbon-reducing information asymmetry. Journal of Cleaner Production, 2020, 249, 119376.
- [64] Ma C, Yang H G, Zhang W P, Huang S. Low-carbon consumption with government subsidy under asymmetric carbon emission information. Journal of Cleaner Production, 2021, 318, 128423.
- [65] Pedersen E R, Andersen M. Safeguarding corporate social responsibility (CSR) in global supply chains: how codes of conduct are managed in buyer-supplier relationships[J]. Journal of Public Affairs, 2006, 6:228-240.
- [66] 郑本荣, 杨超, 杨珺. CSR 投入对闭环供应链定价与协调决策的影响[J]. 中国管理科学, 2018, 26(10):64-78.
- [67] Wang C, Zhang Q, Zhang W. Corporate social responsibility, green supply chain management and firm performance: The moderating role of big-data analytics capability[J].

- Research in Transportation Business and Management, 2020, 37(9):100557.
- [68] Cruz J M. Mitigating global supply chain risks through corporate social responsibility[J]. International Journal of Production Research, 2013,51(13):3995-4010.
- [69] Liu Y, Quan B T, Xu Q, et al. Corporate social responsibility and decision analysis in a supply chain through government subsidy[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 208:436-447.
- [70] 唐书传, 刘云志, 肖条军. 考虑社会责任的供应链定价与碳减排决策[J]. 中国管理科学, 2020, 28(4):99-108.
- [71] 兰建义, 时启超, 冯中伟等. 生鲜电商供应链企业社会责任分担策略选择研究[J/OL]. 中国管理科学, 2024, 1-15.
- [72] 梁喜, 魏承莉. 考虑社会责任的绿色双渠道供应链决策[J]. 控制工程, 2021, 28(9): 1797-1806.
- [73] 林志炳, 林锡桦, 陈莫凡. 考虑退货和企业社会责任下的双渠道供应链产品质量策略研究[J]. 系统科学与数学, 2022, 42(8):2062-2074.
- [74] 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(5):29-37.
- [75] 应佩佩, 刘斌. 考虑企业社会责任缺失的双渠道供应链决策模型[J]. 中国管理科学, 2016, 24(S1):626-633.
- [76] Li S, Li M, Zhou N. Pricing and coordination in a dual-channel supply chain with a socially responsible manufacturer[J]. Plos One, 2020, 15(7):1-15
- [77] Yan B, Wang T, Liu Y P, et al. Decision analysis of retailer-dominated dual-channel supply chain considering cost misreporting[J]. International Journal of Production Economics, 2016, 178:34-41.
- [78] Pournader M, Shi Y Y, Seuring S, et al. Blockchain applications in supply chains, transport and logistics: a systematic review of the literature[J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(7):2063-2081.
- [79] Ji J N, Zhang Z Y, Yang L. Carbon emission reduction decisions in the retail-/dual-channel supply chain with consumers' preference[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 141:852-867.
- [80] Yang M, Zhang T, Zhang Y H. Optimal pricing and green decisions in a dual-channel supply chain with cap-and-trade regulation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(19):28208-28225.

- [81] Xu X P, Zhang M Y, Dou G W, et al. Coordination of a supply chain with an online platform considering green technology in the blockchain era[J]. *International Journal of Production Research*, 2023, 61(11):3793-3810.
- [82] Wang R F, Wang S Q, Yan S L. Pricing and coordination strategies of dual channels considering consumers' channel preferences[J]. *Sustainability*, 2021, 13(20):11191.
- [83] 张汉江, 张佳雨, 赖明勇. 低碳背景下政府行为及供应链合作研发博弈分析[J]. *中国管理科学*, 2015, 23(10): 57-66.
- [84] Peng Q Y, Wang C X, Xu L. Emission abatement and procurement strategies in a low-carbon supply chain with option contracts under stochastic demand[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 144:106502.
- [85] 周艳菊, 胡凤英, 周正龙. 碳税政策下制造商竞争的供应链定价策略和社会福利研究[J]. *中国管理科学*, 2019, 27(7):94-105.
- [86] 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.
- [87] 贺勇, 陈志豪, 廖诺. 政府补贴方式对绿色供应链制造商减排决策的影响机制[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(6):87-98.
- [88] Jobber D, Ellis-Chadwick. *Principles and practice of marketing*[M]. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2012.
- [89] Ageron B, Gunasekaran A, Spalanzani A. Sustainable Supply Management: An Empirical Study[J]. *International Journal Production Economics*, 2012, 140(11):168-182.
- [90] Panda S, Modak N M. Exploring the effects of social responsibility on coordination and profit division in a supply chain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 139:25-40.

附录

附录 1

推论 3-1 的证明：对 M 模型均衡解求关于谎报系数的一阶偏导可得：(1)

$$\frac{\partial e^{M*}}{\partial \rho} = \frac{2e_0(\beta + p_e)(\lambda p_e - \beta)}{A} ; \quad \frac{\partial D^{M*}}{\partial \rho} = \frac{2ke_0(\lambda p_e - \beta)}{A} ; \quad \frac{\partial \pi_m^{M*}}{\partial \rho} = \frac{2ke_0(\lambda p_e - \beta)\delta_1^M}{A} ;$$

$$\frac{\partial CS^M}{\partial \rho} = \frac{2k^2e_0(\lambda p_e - \beta)\delta_1^M}{A^2} \circ (\text{i}) \text{若 } 0 < p_e \leq \frac{\beta}{\lambda}, \text{ 则 } \frac{\partial e^{M*}}{\partial \rho} \leq 0, \frac{\partial D^{M*}}{\partial \rho} \leq 0, \frac{\partial \pi_m^{M*}}{\partial \rho} \leq 0; (\text{ii}) \text{若 } \frac{\beta}{\lambda} < p_e,$$

$$\text{则 } \frac{\partial e^{M*}}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial D^{M*}}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial \pi_m^{M*}}{\partial \rho} > 0 \circ$$

$$(2) \quad \frac{\partial P^{M*}}{\partial \rho} = \frac{e_0(2(1+\lambda)p_e(\beta + p_e) - k(2\beta + \lambda p_e))}{A}, \quad \text{记}$$

$g_1(p_e) = 2(1+\lambda)p_e(\beta + p_e) - k(2\beta + \lambda p_e) = 2(1+\lambda)p_e^2 + (2(1+\lambda)\beta - \lambda k)p_e - 2\beta k$ ，则 $g_1(p_e)$ 与 $\partial P^{M*}/\partial \rho$ 有相同的单调性。显然， $g_1(p_e)$ 是关于 p_e 的一元二次函数且开口向上， $g_1(p_e)$ 的判别式 $\Delta_{g_1(p_e)} = (2(1+\lambda)\beta - \lambda k)^2 + 16\beta k(1+\lambda) > 0$ ，此时 $g_1(p_e)$ 的图像与横坐标有 2 个交点，

$$\text{分别为 } p_e^{11} = \frac{-(2(1+\lambda)\beta - \lambda k) - \sqrt{\Delta_{g_1(p_e)}}}{4(1+\lambda)} < 0 \text{ 和 } p_e^{12} = \frac{-(2(1+\lambda)\beta - \lambda k) + \sqrt{\Delta_{g_1(p_e)}}}{4(1+\lambda)} > 0 \circ \text{ 由于 } p_e \geq 0,$$

因此，当 $0 \leq p_e \leq p_e^{12}$ 时，有 $\frac{\partial P^{M*}}{\partial \rho} \leq 0$ ；当 $p_e > p_e^{12}$ 时，有 $\frac{\partial P^{M*}}{\partial \rho} > 0$ 。

附录 2

推论 3-2 的证明：对 M 模型均衡解分别求关于消费者线下渠道偏好系数和碳配额

$$\text{比例的一阶偏导可得：(1) } \frac{\partial e^{M*}}{\partial \alpha} = \frac{-2a(\beta + p_e)}{A} < 0 ; \quad \frac{\partial D^{M*}}{\partial \alpha} = \frac{-2ak}{A} < 0 ;$$

$$\frac{\partial \pi_m^{M*}}{\partial \alpha} = \frac{-a(2k\delta_1^M - a(1-2\alpha)A)}{A} < 0 ; \quad \frac{\partial e^{M*}}{\partial \lambda} = \frac{2e_0p_e(\beta + p_e)\rho}{A} > 0 ; \quad \frac{\partial D^{M*}}{\partial \lambda} = \frac{2ke_0p_e\rho}{A} > 0 ;$$

$$\frac{\partial \pi_m^{M*}}{\partial \lambda} = \frac{2ke_0p_e\rho\delta_1^M}{A} > 0 \circ$$

$$(2) \quad \frac{\partial P^{M*}}{\partial \alpha} = \frac{a(k - 2\beta(\beta + p_e))}{A}, \quad \frac{\partial P^{M*}}{\partial \lambda} = \frac{e_0p_e(2\beta(\beta + p_e) - k)\rho}{A} \circ \text{ 当 } k - 2\beta(\beta + p_e) \geq 0, \text{ 即}$$

$$0 \leq p_e \leq \frac{k}{2\beta} - \beta \text{ 时, } \frac{\partial P^{M*}}{\partial \alpha} \geq 0, \frac{\partial P^{M*}}{\partial \lambda} \leq 0; \text{ 当 } k - 2\beta(\beta + p_e) \leq 0, \text{ 即 } p_e > \frac{k}{2\beta} - \beta \text{ 时, } \frac{\partial P^{M*}}{\partial \alpha} < 0,$$

$$\frac{\partial P^{M*}}{\partial \lambda} > 0。$$

附录 3

推论 3-3 的证明：(1) $e^{M*} - e^{S*} = \frac{2e_0(\beta + p_e)(\beta - \lambda p_e)(1 - \rho)}{A}$ ，
 $D^{M*} - D^{S*} = \frac{2ke_0(\beta - \lambda p_e)(1 - \rho)}{A}$ ， $\pi_m^{M*} - \pi_m^{S*} = \frac{ke_0(\beta - \lambda p_e)(1 - \rho)(\delta_1^M + \delta_1^S)}{A}$ 。若 $0 \leq p_e < \frac{\beta}{\lambda}$ ，(i)
 当 $0 \leq \rho < 1$ 时，则有 $e^{M*} > e^{S*}$ ， $D^{M*} > D^{S*}$ ， $\pi_m^{M*} > \pi_m^{S*}$ ；(ii) 当 $\rho > 1$ 时，则有 $e^{M*} < e^{S*}$ ， $D^{M*} < D^{S*}$ ，
 $\pi_m^{M*} < \pi_m^{S*}$ 。若 $p_e > \frac{\beta}{\lambda}$ ，(i) 当 $0 \leq \rho < 1$ 时，则有 $e^{M*} < e^{S*}$ ， $D^{M*} < D^{S*}$ ， $\pi_m^{M*} < \pi_m^{S*}$ ；(ii) 当 $\rho > 1$
 时，则有 $e^{M*} > e^{S*}$ ， $D^{M*} > D^{S*}$ ， $\pi_m^{M*} > \pi_m^{S*}$ 。若 $p_e = \frac{\beta}{\lambda}$ ，则有 $e^{M*} = e^{S*}$ ， $D^{M*} = D^{S*}$ ， $\pi_m^{M*} = \pi_m^{S*}$ 。

$$(2) \quad P^{M*} - P^{S*} = \frac{e_0(k(2\beta + \lambda p_e) - 2\beta p_e(1 + \lambda)(\beta + p_e))(1 - \rho)}{A}, \quad \text{记}$$

$g_2(p_e) = k(2\beta + \lambda p_e) - 2\beta p_e(1 + \lambda)(\beta + p_e) = 2k\beta + (k\lambda - 2\beta^2(1 + \lambda))p_e - 2\beta(1 + \lambda)p_e^2$ ，则 $g_2(p_e)$ 与
 $P^{M*} - P^{S*}$ 有相同的单调性。显然， $g_2(p_e)$ 是关于 p_e 的一元二次函数且开口向下， $g_2(p_e)$
 的判别式 $\Delta_{g_2(p_e)} = (2(1 + \lambda)\beta^2 - \lambda k)^2 + 16(1 + \lambda)\beta^2 k > 0$ ，此时 $g_2(p_e)$ 的图像与横坐标有 2 个交

点，分别为 $p_e^{21} = \frac{(2(1 + \lambda)\beta^2 - \lambda k) - \sqrt{\Delta_{g_2(p_e)}}}{-4(1 + \lambda)\beta} > 0$ 和 $p_e^{22} = \frac{(2(1 + \lambda)\beta^2 - \lambda k) + \sqrt{\Delta_{g_2(p_e)}}}{-4(1 + \lambda)\beta} < 0$ 。由于

$p_e \geq 0$ ，因此，若 $0 \leq p_e < p_e^{21}$ ，(i) 当 $0 \leq \rho < 1$ 时，则有 $P^{M*} > P^{S*}$ 。(ii) 当 $\rho > 1$ 时，则有
 $P^{M*} < P^{S*}$ 。若 $p_e > p_e^{21}$ ，(i) 当 $0 \leq \rho < 1$ 时，则有 $P^{M*} < P^{S*}$ 。(ii) 当 $\rho > 1$ 时，则有 $P^{M*} > P^{S*}$ 。
 若 $p_e = p_e^{21}$ ，则有 $P^{M*} = P^{S*}$ 。

附录 4

推论 3-5 的证明：对 P 模型均衡解求关于发现概率和惩罚系数的一阶偏导可得：(1)

$$\frac{\partial e^{P*}}{\partial \eta} = \frac{2\lambda v e_0 p_e (1 - \rho)(\beta + p_e)}{A} < 0; \quad \frac{\partial D^{P*}}{\partial \eta} = \frac{2k\lambda v e_0 p_e (1 - \rho)}{A} < 0; \quad \frac{\partial \pi_m^{P*}}{\partial \eta} = \frac{2k\lambda v e_0 p_e \delta_1^P (1 - \rho)}{A} < 0。$$

$$\frac{\partial e^{P*}}{\partial v} = \frac{2\lambda \eta e_0 p_e (1 - \rho)(\beta + p_e)}{A} < 0; \quad \frac{\partial D^{P*}}{\partial v} = \frac{2k\lambda \eta e_0 p_e (1 - \rho)}{A} < 0; \quad \frac{\partial \pi_m^{P*}}{\partial v} = \frac{2k\lambda \eta e_0 p_e \delta_1^P (1 - \rho)}{A} < 0;$$

$$(2) \quad \frac{\partial P^{P*}}{\partial \eta} = \frac{\lambda v e_0 p_e (\rho - 1)(k - 2\beta(\beta + p_e))}{A}, \quad \frac{\partial P^{P*}}{\partial v} = \frac{\eta \lambda e_0 p_e (\rho - 1)(k - 2\beta(\beta + p_e))}{A}。 \quad \text{当}$$

$k - 2\beta(\beta + p_e) > 0$ ，即 $0 \leq p_e < \frac{k}{2\beta} - \beta$ 时， $\frac{\partial P^{P*}}{\partial \eta} > 0$ ， $\frac{\partial P^{P*}}{\partial v} > 0$ ；当 $k - 2\beta(\beta + p_e) \leq 0$ ，即

$$p_e \geq \frac{k}{2\beta} - \beta \text{ 时, } \frac{\partial P^{P^*}}{\partial \eta} \leq 0, \quad \frac{\partial P^{P^*}}{\partial v} \leq 0。$$

附录 5

推论 3-7 的证明：对 I 模型均衡解求关于单位产品区块链技术应用成本以及政府分担比例的一阶导数可得：(1) $\frac{\partial e^{I^*}}{\partial c_b} = \frac{-2(\beta\gamma + p_e)(1-\phi)}{B} < 0$ ； $\frac{\partial D^{I^*}}{\partial c_b} = \frac{-2k(1-\phi)}{B} < 0$ ； $\frac{\partial \pi_m^{I^*}}{\partial c_b} = -\frac{2k\delta_1^I(1-\phi)}{B} < 0$ ； $\frac{\partial e^{I^*}}{\partial \phi} = \frac{2c_b(\beta\gamma + p_e)}{B} > 0$ ； $\frac{\partial D^{I^*}}{\partial \phi} = \frac{2kc_b}{B} > 0$ ； $\frac{\partial \pi_m^{I^*}}{\partial \phi} = \frac{2kc_b\delta_1^I}{B} > 0$ ；

(2) $\frac{\partial P^{I^*}}{\partial c_b} = \frac{(k - 2\beta\gamma(\beta\gamma + p_e))(1-\phi)}{B}$ ，当 $k - 2\beta\gamma(\beta\gamma + p_e) < 0$ ，即 $p_e > \frac{k}{2\beta\gamma} - \beta\gamma$ 时， $\frac{\partial P^{I^*}}{\partial c_b} < 0$ ， $\frac{\partial P^{I^*}}{\partial \phi} > 0$ ；当 $k - 2\beta\gamma(\beta\gamma + p_e) \geq 0$ ，即 $0 \leq p_e \leq \frac{k}{2\beta\gamma} - \beta\gamma$ 时， $\frac{\partial P^{I^*}}{\partial c_b} \geq 0$ ， $\frac{\partial P^{I^*}}{\partial \phi} \leq 0$ 。

附录 6

推论 3-8 证明：将 M 模型与 I 模型制造商利润作差可得：

$$\pi_m^{M^*} - \pi_m^{I^*} = \frac{k[-c_b^2\phi^2A - (2Ac_b(a(1-\alpha) - e_0(\beta\gamma + (1-\lambda)p_e) - c_b))\phi + g(c_b)]}{AB}, \quad \text{其中}$$

$g(c_b) = -c_b^2A + 2Ac_b(a(1-\alpha) - e_0(\beta\gamma + (1-\lambda)p_e)) + \bar{\Omega}$ ， $\bar{\Omega} = B(\delta_1^M)^2 - A(\delta_1^I)^2$ 。显然， $g(c_b)$ 是关于 c_b 的开口向下的一元二次函数， $g(c_b)$ 对称轴大于 0， $g(c_b)$ 的判别式 $\Delta_{g(c_b)} = 4AB(\delta_1^M)^2 > 0$ ，

$$\text{令 } \bar{\Delta} = AB(\delta_1^M)^2。 \text{ 令 } g(c_b) = 0 \text{ 解得 } c_b^1 = a(1-\alpha) - e_0(\beta\gamma + (1-\lambda)p_e) + \frac{\sqrt{AB(\delta_1^M)^2}}{A} \text{ 和 } c_b^2 = a(1-\alpha) - e_0(\beta\gamma + (1-\lambda)p_e) - \frac{\sqrt{AB(\delta_1^M)^2}}{A}。$$

我们假设 $G(\phi) = -c_b^2\phi^2A - (2Ac_b(a(1-\alpha) - e_0(\beta\gamma + (1-\lambda)p_e) - c_b))\phi + g(c_b)$ ， $G(\phi)$ 是关于 ϕ 的开口向下的一元二次函数， $G(\phi)$ 的判别式 $\Delta_{G(\phi)} = 4c_b^2AB(\delta_1^M)^2 > 0$ ，令 $G(\phi) = 0$ 解得

$$\phi_1 = \frac{c_b - c_b^1}{c_b}, \quad \phi_2 = \frac{c_b - c_b^2}{c_b}, \quad \text{且 } \phi_1 < \phi_2。 G(\phi) \text{ 的对称轴为 } \frac{c_b - (a(1-\alpha) - e_0(\beta\gamma + (1-\lambda)p_e))}{c_b}。$$

(1) 当 $\bar{\Omega} \geq 0$ 时，此时满足 $c_b^2 \leq 0 < c_b^1$ ，讨论如下：

(i) 若 $0 < c_b < c_b^1$ ，则 $g(c_b) > 0$ ；此时满足 $\phi_1 < 0 < 1 < \phi_2$ 。当 $0 < \phi < 1$ 时，恒有 $G(\phi) > 0$ ，即 $\pi_m^{M^*} > \pi_m^{I^*}$ 。

(ii) 若 $c_b \geq c_b^1$ ，则 $g(c_b) \leq 0$ 且 $G(\phi)$ 对称轴大于 0，此时满足 $0 < \phi_1 < 1 < \phi_2$ 。若 $0 < \phi < \phi_1$ ，则 $G(\phi) < 0$ ， $\pi_m^{M^*} < \pi_m^{I^*}$ ； $\phi_1 \leq \phi < 1$ ，则 $G(\phi) \geq 0$ ，即 $\pi_m^{M^*} \geq \pi_m^{I^*}$ 。

(2)当 $\bar{\Omega} < 0$ 时, 此时满足 $0 < c_b^2 < c_b^1$, 讨论如下:

(i)若 $0 < c_b \leq c_b^2$, 则 $g(c_b) \leq 0$ 且 $G(\phi)$ 对称轴小于 0。此时满足 $\phi_1 < \phi_2 \leq 0$, 故当 $0 < \phi < 1$ 时, 恒有 $G(\phi) < 0$, $\pi_m^{M*} < \pi_m^{I*}$ 。

(ii)若 $c_b^2 < c_b < c_b^1$, 则 $g(c_b) > 0$ 。此时满足 $\phi_1 < 0 < \phi_2 < 1$, 若 $0 < \phi < \phi_2$, 则 $G(\phi) > 0$, $\pi_m^{M*} > \pi_m^{I*}$; 若 $\phi_2 < \phi < 1$, 则 $G(\phi) < 0$, $\pi_m^{M*} < \pi_m^{I*}$ 。

(iii)若 $c_b \geq c_b^1$, 则 $g(c_b) \leq 0$ 且 $G(\phi)$ 对称轴大于 0。此时满足 $0 \leq \phi_1 < \phi_2 < 1$, 若 $0 < \phi < \phi_1$ 或 $\phi_2 < \phi < 1$, 则 $G(\phi) < 0$, $\pi_m^{M*} < \pi_m^{I*}$; $\phi_1 \leq \phi \leq \phi_2$, 则 $G(\phi) \geq 0$, 即 $\pi_m^{M*} \geq \pi_m^{I*}$ 。

附录 7

推论 4-1 证明: (1) $\frac{\partial e^{SR*}}{\partial \rho} = \frac{2e_0(s+\beta+p_e)(\lambda p_e - \beta)}{A_1}$; $\frac{\partial D^{SR*}}{\partial \rho} = \frac{2ke_0(\lambda p_e - \beta)}{A_1}$;

$\frac{\partial \pi_m^{SR*}}{\partial \rho} = \frac{2ke_0(\lambda p_e - \beta)\delta_1^*}{A_1}$; $\frac{\partial e^{SD*}}{\partial \rho} = \frac{2e_0(\beta+p_e)(\lambda p_e - \beta)}{B_1}$; $\frac{\partial D^{SD*}}{\partial \rho} = \frac{2ke_0(1-t)(\lambda p_e - \beta)}{B_1}$;

$\frac{\partial \pi_m^{SD*}}{\partial \rho} = \frac{2k\delta_1^*e_0(1-t)(\lambda p_e - \beta)}{B_1}$; 由 $e^{SR*} > 0$ 、 $e^{SD*} > 0$ 可得 $\delta_1^* > 0$ 。(i) 若 $p_e > \frac{\beta}{\lambda}$, 则 $\lambda p_e - \beta > 0$, $\frac{\partial e^{i*}}{\partial \rho} > 0$, $\frac{\partial D^{i*}}{\partial \rho} > 0$, $\frac{\partial \pi_m^{i*}}{\partial \rho} > 0$; (ii) 若 $0 < p_e \leq \frac{\beta}{\lambda}$, 则 $\lambda p_e - \beta \leq 0$, $\frac{\partial e^{i*}}{\partial \rho} \leq 0$, $\frac{\partial D^{i*}}{\partial \rho} \leq 0$, $\frac{\partial \pi_m^{i*}}{\partial \rho} \leq 0$ 。

(2) $\frac{\partial P^{SR*}}{\partial \rho} = \frac{e_0(2\beta(s(s+\beta)-k)+(2\beta(s(2+\lambda)+(1+\lambda)\beta)-k\lambda)p_e+2\beta(1+\lambda)p_e^2)}{A_1}$, 记

$f_1(p_e) = 2\beta(1+\lambda)p_e^2 + (2\beta(s(2+\lambda)+(1+\lambda)\beta)-k\lambda)p_e + 2\beta(s(s+\beta)-k)$, $f_1(p_e)$ 与 $\partial P^{SR*}/\partial \rho$ 有相同的单调性。显然, $f_1(p_e)$ 是关于 p_e 的开口向上的一元二次函数, $f_1(p_e)$ 的判别式 $\Delta_{f_1(p_e)} = 16\beta^2(k-s(s+\beta))(1+\lambda) + (k\lambda-2\beta(s(2+\lambda)+(1+\lambda)\beta))^2 > 0$ 。 $f_1(p_e)$ 的图像与横坐标有

2 个交点, 分别为 $p_{e1}^1 = \frac{k\lambda-2\beta(s(2+\lambda)+(1+\lambda)\beta)+\sqrt{\Delta_{f_1(p_e)}}}{4\beta(1+\lambda)} > 0$ 和

$p_{e2}^1 = \frac{k\lambda-2\beta(s(2+\lambda)+(1+\lambda)\beta)-\sqrt{\Delta_{f_1(p_e)}}}{4\beta(1+\lambda)} < 0$ 。由于 $p_e \geq 0$, 故若 $0 \leq p_e \leq p_{e1}^1$, 则 $f_1(p_e) \leq 0$,

$\frac{\partial P^{SR*}}{\partial \rho} \leq 0$; 若 $p_e > p_{e1}^1$, 则 $f_1(p_e) > 0$, $\frac{\partial P^{SR*}}{\partial \rho} > 0$ 。

$\frac{\partial P^{SD*}}{\partial \rho} = \frac{e_0(2\beta p_e(\beta+p_e)(1+\lambda)-k(1-t)(2\beta+\lambda p_e))}{B_1}$, 记

$f_2(p_e) = 2\beta p_e(\beta+p_e)(1+\lambda)-k(1-t)(2\beta+\lambda p_e) = 2\beta(1+\lambda)p_e^2 + (2\beta^2(1+\lambda)-k\lambda(1-t))p_e - 2k\beta(1-t)$, $f_2(p_e)$ 与 $\partial P^{SD*}/\partial \rho$ 有相同的单调性。显然, $f_2(p_e)$ 是关于 p_e 的开口向上的一元二次函数,

$f_2(p_e)$ 的判别式 $\Delta_{f_2(p_e)} = 16k\beta^2(1-t)(1+\lambda) + (2\beta^2(1+\lambda) - k\lambda(1-t))^2 > 0$, $f_2(p_e)$ 图像与横坐标

有 2 个交点 , 分别为 $p_{e1}^2 = \frac{k\lambda(1-t) - 2\beta^2(1+\lambda) + \sqrt{\Delta_{f_2(p_e)}}}{4\beta(1+\lambda)} > 0$ 和

$p_{e2}^2 = \frac{k\lambda(1-t) - 2\beta^2(1+\lambda) - \sqrt{\Delta_{f_2(p_e)}}}{4\beta(1+\lambda)} < 0$ 。由于 $p_e \geq 0$, 故若 $0 \leq p_e \leq p_{e1}^2$, 则 $f_2(p_e) \leq 0$, $\frac{\partial P^{SD*}}{\partial \rho} \leq 0$;

若 $p_e > p_{e1}^2$, 则 $f_2(p_e) > 0$, $\frac{\partial P^{SD*}}{\partial \rho} > 0$ 。

附录 8

推论 4-2 证明: (1) $\frac{\partial e^{SR*}}{\partial \alpha} = \frac{-2a(s+\beta+p_e)}{A_1} < 0$; $\frac{\partial D^{SR*}}{\partial \alpha} = \frac{-2ak}{A_1} < 0$;

$\frac{\partial \pi_m^{SR*}}{\partial \alpha} = \frac{-a(2k\delta_1^* - a(1-2\alpha)A_1)}{A_1} < 0$; $\frac{\partial e^{SD*}}{\partial \alpha} = \frac{-2a(\beta+p_e)}{B_1} < 0$; $\frac{\partial D^{SD*}}{\partial \alpha} = \frac{-2ak(1-t)}{B_1} < 0$;

$\frac{\partial \pi_m^{SD*}}{\partial \alpha} = \frac{-a(2k(1-t)\delta_1^* - a(1-2\alpha)B_1)}{B_1} < 0$ 。

(2) $\frac{\partial P^{SR*}}{\partial \alpha} = \frac{a(k-2\beta(s+\beta+p_e))}{A_1}$, 当 $k-2\beta(s+\beta+p_e) \geq 0$, 即 $0 \leq p_e \leq \frac{k}{2\beta} - s - \beta$ 时 ,

$\frac{\partial P^{SR*}}{\partial \alpha} \geq 0$; 当 $k-2\beta(s+\beta+p_e) < 0$, 即 $p_e > \frac{k}{2\beta} - s - \beta$ 时 , $\frac{\partial P^{SR*}}{\partial \alpha} < 0$ 。

$\frac{\partial P^{SD*}}{\partial \alpha} = \frac{a(k(1-t)-2\beta(\beta+p_e))}{B_1}$, 当 $k(1-t)-2\beta(\beta+p_e) \leq 0$, 即 $p_e \geq \frac{k(1-t)}{2\beta} - \beta$ 时 , $\frac{\partial P^{SD*}}{\partial \alpha} \leq 0$;

当 $k(1-t)-2\beta(\beta+p_e) > 0$, 即 $0 \leq p_e < \frac{k(1-t)}{2\beta} - \beta$ 时 , $\frac{\partial P^{SD*}}{\partial \alpha} > 0$ 。

附录 9

推论 4-3 证明: (1) $\frac{\partial e^{SR*}}{\partial \lambda} = \frac{2\rho e_0 p_e (s+\beta+p_e)}{A_1} > 0$; $\frac{\partial D^{SR*}}{\partial \lambda} = \frac{2k\rho e_0 p_e}{A_1} > 0$;

$\frac{\partial \pi_m^{SR*}}{\partial \lambda} = \frac{2ke_0 p_e \rho \delta_1^*}{A_1} > 0$; $\frac{\partial e^{SD*}}{\partial \lambda} = \frac{2e_0 p_e (\beta+p_e) \rho}{B_1} > 0$; $\frac{\partial D^{SD*}}{\partial \lambda} = \frac{2k(1-t)e_0 p_e \rho}{B_1} > 0$;

$\frac{\partial \pi_m^{SD*}}{\partial \lambda} = \frac{2k(1-t)e_0 p_e \rho \delta_1^*}{B_1} > 0$ 。

(2) $\frac{\partial P^{SR*}}{\partial \lambda} = \frac{\rho e_0 p_e (2\beta(s+\beta+p_e)-k)}{A_1}$, 当 $k-2\beta(s+\beta+p_e) \geq 0$, 即 $0 \leq p_e \leq \frac{k}{2\beta} - s - \beta$ 时 ,

$\frac{\partial P^{SR*}}{\partial \lambda} \leq 0$; 当 $k-2\beta(s+\beta+p_e) < 0$, 即 $p_e > \frac{k}{2\beta} - s - \beta$ 时 , $\frac{\partial P^{SR*}}{\partial \lambda} > 0$ 。

$$\frac{\partial P^{SD*}}{\partial \lambda} = \frac{e_0 p_e (2\beta(\beta + p_e) - k(1-t))\rho}{A}, \text{ 当 } k(1-t) - 2\beta(\beta + p_e) \leq 0, \text{ 即 } p_e \geq \frac{k(1-t)}{2\beta} - \beta \text{ 时, } \frac{\partial P^{SD*}}{\partial \alpha} \leq 0,$$

$$\frac{\partial P^{SD*}}{\partial \lambda} \geq 0; \text{ 当 } k(1-t) - 2\beta(\beta + p_e) > 0, \text{ 即 } 0 \leq p_e < \frac{k(1-t)}{2\beta} - \beta \text{ 时, } \frac{\partial P^{SD*}}{\partial \alpha} > 0, \frac{\partial P^{SD*}}{\partial \lambda} < 0。$$

附录 10

$$\text{推论 4-4 证明: (1) } \frac{\partial e^{SR*}}{\partial s} = \frac{2(3k + 2(s + \beta + p_e)^2)\delta_1^*}{(A_1)^2} > 0; \quad \frac{\partial D^{SR*}}{\partial s} = \frac{8k(s + \beta + p_e)\delta_1^*}{(A_1)^2} > 0;$$

$$\frac{\partial \pi_m^{SR*}}{\partial s} = \frac{4k(s + \beta + p_e)(\delta_1^*)^2}{(A_1)^2} > 0。$$

$$(2) \quad \frac{\partial P^{SR*}}{\partial s} = \frac{2(k(\beta - 2(s + p_e)) + 2\beta(s + \beta + p_e)^2)\delta_1^*}{(A_1)^2}, \quad \text{记}$$

$$f_3(p_e) = k(\beta - 2(s + p_e)) + 2\beta(s + \beta + p_e)^2 = 2\beta p_e^2 - 2(k - 2\beta(s + \beta))p_e + k(\beta - 2s) + 2\beta(s + \beta)^2,$$

$f_3(p_e)$ 与 $\partial P^{SR*}/\partial s$ 有相同的单调性。显然, $f_3(p_e)$ 是关于 p_e 的开口向上的一元二次函数,

$f_3(p_e)$ 的判别式 $\Delta_{f_3(p_e)} = 4k(k - 6\beta^2)$, 讨论如下:

$$(i) \text{ 当 } \frac{2(s + \beta + p_e)^2}{3} < k \leq 6\beta^2 \text{ 时, } \Delta_{f_3(p_e)} \leq 0, \text{ 此时对于 } \forall p_e \in [0, +\infty), \text{ 有 } f_3(p_e) > 0,$$

$$\frac{\partial P^{SR*}}{\partial s} > 0。$$

$$(ii) \text{ 当 } k > \max\{6\beta^2, \frac{2(s + \beta + p_e)^2}{3}\} \text{ 时, } \Delta_{f_3(p_e)} > 0, f_3(p_e) \text{ 的图像与横坐标有 2 个交点,}$$

$$\text{分别为 } p_{e1}^3 = \frac{(k - 2\beta(s + \beta)) + \sqrt{k(k - 6\beta^2)}}{2\beta} \text{ 和 } p_{e2}^3 = \frac{(k - 2\beta(s + \beta)) - \sqrt{k(k - 6\beta^2)}}{2\beta}, f_3(p_e) \text{ 的对称}$$

$$\text{轴为 } p_e^2 = \frac{k - 2\beta(s + \beta)}{2\beta}。 \text{ 令 } \Gamma^1 = k(\beta - 2s) + 2\beta(s + \beta)^2, \Gamma^2 = k - 2\beta(s + \beta), \text{ 讨论如下:}$$

$$(a) \text{ 当 } \Gamma^1 < 0 \text{ 时, 满足 } p_{e2}^3 < 0 < p_{e1}^3, \text{ 由于 } p_e \geq 0, \text{ 所以若 } 0 \leq p_e \leq p_{e1}^3, \text{ 则 } f_3(p_e) \leq 0, \frac{\partial P^{SR*}}{\partial s} \leq 0;$$

$$\text{若 } p_e > p_{e1}^3, \text{ 则 } f_3(p_e) > 0, \frac{\partial P^{SR*}}{\partial s} > 0。$$

$$(b) \text{ 当 } \Gamma^1 > 0, \Gamma^2 > 0 \text{ 时, } f_3(p_e) \text{ 对称轴大于 0, 此时满足 } 0 < p_{e2}^3 < p_{e1}^3, \text{ 若 } 0 \leq p_e < p_{e2}^3 \text{ 或 } p_e > p_{e1}^3, \text{ 则 } f_3(p_e) > 0, \frac{\partial P^{SR*}}{\partial s} > 0; \text{ 若 } p_{e2}^3 \leq p_e \leq p_{e1}^3, \text{ 则 } f_2(p_e) > 0, \frac{\partial P^{SR*}}{\partial s} > 0。$$

$$(c) \text{ 当 } \Gamma^1 > 0, \Gamma^2 < 0 \text{ 时, } f_3(p_e) \text{ 对称轴小于 0, 此时满足 } p_{e2}^2 < p_{e1}^2 < 0, \text{ 由于 } p_e \geq 0, \text{ 故对于 } \forall p_e \in [0, +\infty), \text{ 有 } f_2(p_e) > 0, \frac{\partial P^{SR*}}{\partial s} > 0。$$

附录 11

推论 4-5 证明：(1) $\frac{\partial e^{SD*}}{\partial t} = \frac{6k(\beta + p_e)\delta_1^*}{(B_1)^2} > 0$; $\frac{\partial D^{SD*}}{\partial t} = \frac{4k(\beta + p_e)^2 \delta_1^*}{(B_1)^2} > 0$;

$$\frac{\partial \pi_m^{SD*}}{\partial t} = \frac{2k(\beta + p_e)^2 (\delta_1^*)^2}{(B_1)^2} > 0 .$$

(2) $\frac{\partial P^{SD*}}{\partial t} = \frac{2k(2\beta - p_e)(\beta + p_e)\delta_1^*}{(B_1)^2}$, 当 $2\beta - p_e \geq 0$, 即 $0 \leq p_e \leq 2\beta$ 时, $\frac{\partial P^{SD*}}{\partial t} \geq 0$; 当

$2\beta - p_e < 0$, 即 $p_e > 2\beta$ 时, $\frac{\partial P^{SD*}}{\partial t} < 0$.

附录 12

推论 4-6 证明： $e^{SR*} - e^{NR*} = \frac{2e_0(\beta - \lambda p_e)(s + \beta + p_e)(1 - \rho)}{A_1}$, $D^{SR*} - D^{NR*} = \frac{2ke_0(\beta - \lambda p_e)(1 - \rho)}{A_1}$,

$\pi_m^{SR*} - \pi_m^{NR*} = \frac{ke_0(\beta - \lambda p_e)(1 - \rho)(\delta_1^* + \delta_2^*)}{A_1}$. (1)若 $0 \leq p_e < \frac{\beta}{\lambda}$, $0 \leq \rho < 1$ 或 $\frac{\beta}{\lambda} < p_e$, $\rho > 1$, 则 $e^{SR*} > e^{NR*}$,

$D^{SR*} > D^{NR*}$, $\pi_m^{SR*} > \pi_m^{NR*}$; (2)若 $0 \leq p_e < \frac{\beta}{\lambda}$, $\rho > 1$ 或 $\frac{\beta}{\lambda} < p_e$, $0 \leq \rho < 1$, 则 $e^{SR*} < e^{NR*}$, $D^{SR*} < D^{NR*}$,

$\pi_m^{SR*} < \pi_m^{NR*}$. (3)若 $p_e = \frac{\beta}{\lambda}$, 则 $e^{SR*} = e^{NR*}$, $D^{SR*} = D^{NR*}$, $\pi_m^{SR*} = \pi_m^{NR*}$.

附录 13

推论 4-7 的证明： $P^{SR*} - P^{NR*} = \frac{e_0(k(2\beta + \lambda p_e) - 2\beta(s + \beta + p_e)(s + (1 + \lambda)p_e))(1 - \rho)}{A_1}$, 记

$f_4(p_e) = -2\beta(1 + \lambda)p_e^2 + (k\lambda - 2\beta(s(2 + \lambda) + (1 + \lambda)\beta))p_e + 2\beta(k - s(s + \beta))$, $f_4(p_e)$ 是关于 p_e 的开口向下的二次函数 , $f_4(p_e)$ 的判别式 $\Delta_{f_4(p_e)} = 16\beta^2(k - s(s + \beta))(1 + \lambda) + (k\lambda - 2\beta(s(2 + \lambda) + (1 + \lambda)\beta))^2$, 讨论如下 ;

(1)当 $\Delta_{f_4(p_e)} \leq 0$ 时, 对于 $\forall p_e \in [0, +\infty)$, 有 $f_4(p_e) < 0$, 此时若 $0 \leq \rho < 1$, 则 $P^{SR*} < P^{NR*}$; 若 $\rho > 1$, 则 $P^{SR*} > P^{NR*}$.

(2) 当 $\Delta_{f_4(p_e)} > 0$ 时, $f_4(p_e)$ 的图像与横坐标有 2 个交点, 分别为

$$p_{e1}^4 = \frac{k\lambda - 2\beta(s(2 + \lambda) + (1 + \lambda)\beta) - \sqrt{\Delta_{f_4(p_e)}}}{4\beta(1 + \lambda)} \text{ 和 } p_{e2}^4 = \frac{k\lambda - 2\beta(s(2 + \lambda) + (1 + \lambda)\beta) + \sqrt{\Delta_{f_4(p_e)}}}{4\beta(1 + \lambda)}$$
 , 讨论

如下:

(i)当 $k - s(s + \beta) > 0$ 时, 满足 $p_{e1}^4 < 0 < p_{e2}^4$, 若 $0 \leq p_e \leq p_{e2}^4$, 则 $f_4(p_e) \geq 0$, 1)若 $0 \leq \rho < 1$,

则 $P^{SR*} > P^{NR*}$; 2) 若 $\rho > 1$, 则 $P^{SR*} < P^{NR*}$ 。若 $p_e > p_{e2}^4$, 则 $f_4(p_e) < 0$, 1) 若 $0 \leq \rho < 1$, 则 $P^{SR*} < P^{NR*}$; 2) 若 $\rho > 1$, 则 $P^{SR*} > P^{NR*}$ 。

(ii) 当 $k - s(s + \beta) \leq 0$ 且 $k\lambda - 2\beta(s(2 + \lambda) + (1 + \lambda)\beta) < 0$ 时, $f_4(p_e)$ 对称轴为负, 满足 $p_{e1}^4 < p_{e2}^4 < 0$, 对于 $\forall p_e \in [0, +\infty)$, 有 $f_4(p_e) < 0$, 此时若 $0 \leq \rho < 1$, 则 $P^{SR*} < P^{NR*}$; 若 $\rho > 1$, 则 $P^{SR*} > P^{NR*}$ 。

(iii) 当 $k - s(s + \beta) \leq 0$ 且 $k\lambda - 2\beta(s(2 + \lambda) + (1 + \lambda)\beta) > 0$ 时, $f_4(p_e)$ 对称轴为正, 满足 $0 < p_{e1}^4 < p_{e2}^4$, 若 $0 \leq p_e < p_{e1}^4$ 或 $p_e > p_{e2}^4$, 则 $f_4(p_e) < 0$, 1) 若 $0 \leq \rho < 1$, 则 $P^{SR*} < P^{NR*}$; 2) 若 $\rho > 1$, 则 $P^{SR*} > P^{NR*}$ 。若 $p_{e1}^4 \leq p_e \leq p_{e2}^4$, 则 $f_4(p_e) \geq 0$, 1) 若 $0 \leq \rho < 1$, 则 $P^{SR*} > P^{NR*}$; 2) 若 $\rho > 1$, 则 $P^{SR*} < P^{NR*}$ 。

附录 14

推论 4-8 的证明: (1) $e^{SD*} - e^{ND*} = \frac{2e_0(\beta + p_e)(\beta - \lambda p_e)(1 - \rho)}{B_1}$, $D^{SD*} - D^{ND*} = \frac{2ke_0(1-t)(\beta - \lambda p_e)(1 - \rho)}{B_1}$, $\pi_m^{SD*} - \pi_m^{ND*} = \frac{ke_0(1-t)(\beta - \lambda p_e)(1 - \rho)(\delta_1^* + \delta_2^*)}{B_1}$ 。(i) 若 $0 \leq p_e < \frac{\beta}{\lambda}$ 且 $0 < \rho < 1$ 或 $\frac{\beta}{\lambda} < p_e$ 且 $\rho > 1$, 则 $e^{SD*} > e^{ND*}$, $D^{SD*} > D^{ND*}$, $\pi_m^{SD*} > \pi_m^{ND*}$; (ii) 若 $0 \leq p_e < \frac{\beta}{\lambda}$ 且 $\rho > 1$ 或 $\frac{\beta}{\lambda} < p_e$ 且 $0 < \rho < 1$, 则 $e^{SD*} < e^{ND*}$, $D^{SD*} < D^{ND*}$, $\pi_m^{SD*} < \pi_m^{ND*}$ 。(iii) 若 $p_e = \frac{\beta}{\lambda}$, 则 $e^{SD*} = e^{ND*}$, $D^{SD*} = D^{ND*}$, $\pi_m^{SD*} = \pi_m^{ND*}$ 。

$$(2) \quad P^{SD*} - P^{ND*} = \frac{e_0(k(1-t)(2\beta + \lambda p_e) - 2\beta p_e(1 + \lambda)(\beta + p_e))(1 - \rho)}{B_1}, \quad \text{记}$$

$f_5(p_e) = -2\beta(1 + \lambda)p_e^2 + (k\lambda(1-t) - 2\beta^2(1 + \lambda))p_e + 2k(1-t)\beta$, 显然, $f_5(p_e)$ 是关于 p_e 的开口向下的二次函数, $f_5(p_e)$ 的判别式 $\Delta_{f_5(p_e)} = 16k\beta^2(1-t)(1 + \lambda) + (2\beta^2(1 + \lambda) - k(1-t)\lambda)^2 > 0$,

$f_5(p_e)$ 的图像与横坐标有 2 个交点, 分别为 $p_{e1}^5 = \frac{k\lambda(1-t) - 2\beta^2(1 + \lambda) - \sqrt{\Delta_{f_5(p_e)}}}{4\beta(1 + \lambda)} < 0$ 和

$p_{e2}^5 = \frac{k\lambda(1-t) - 2\beta^2(1 + \lambda) + \sqrt{\Delta_{f_5(p_e)}}}{4\beta(1 + \lambda)} > 0$ 。所以 (i) 若 $0 \leq p_e \leq p_{e2}^5$, 则 $f_5(p_e) \geq 0$, 此时若 $0 \leq \rho < 1$,

则 $P^{SD*} > P^{ND*}$, 若 $\rho > 1$, 则 $P^{SD*} < P^{ND*}$ 。(ii) 若 $p_e > p_{e2}^5$, 则 $f_5(p_e) < 0$, 此时若 $0 \leq \rho < 1$, 则 $P^{SD*} < P^{ND*}$, 若 $\rho > 1$, 则 $P^{SD*} > P^{ND*}$ 。

附录 15

推论 4-9 的证明：将 SR 模型与 SD 模型的碳减排量作差可得：(1)

$$e^{SR*} - e^{SD*} = \frac{2\delta_1^* f(\beta + p_e)}{A_1 B_1}, \quad f(\beta + p_e) = 2s(\beta + p_e)^2 + (2s^2 - 3kt)(\beta + p_e) + 3ks(1-t), \quad \text{令 } y = \beta + p_e,$$

则 $f(y) = 2sy^2 + (2s^2 - 3kt)y + 3ks(1-t)$ 。 $f(y)$ 与 $e^{SR*} - e^{SD*}$ 有相同的单调性。显然， $f(y)$ 是关于 y 的开口向上的一元二次函数， $f(y)$ 的判别式 $\Delta_{f(y)} = (2s^2 + 3kt)^2 - 24ks^2$ ， 由

$$3k(1-t) - 2y^2 > 0 \quad \text{以及} \quad 3k - 2(s+y)^2 > 0 \quad \text{可知} \quad 0 < y < \bar{y} = \min\left\{\sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}, \sqrt{\frac{3k}{2}} - s\right\},$$

$$\left(\sqrt{\frac{3k}{2}} - s\right) - \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} = \frac{\sqrt{3k} - \sqrt{2}s}{\sqrt{2}} - \frac{\sqrt{3k(1-t)}}{\sqrt{2}}, \quad (\sqrt{3k} - \sqrt{2}s)^2 - (\sqrt{3k(1-t)})^2 = 2s^2 + 3kt - 2\sqrt{6ks}$$

讨论如下：

(i) 当 $\Delta_{f(y)} \leq 0$ ，即 $2s^2 + 3kt \leq 2\sqrt{6ks}$ 时， $\sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} > \sqrt{\frac{3k}{2}} - s$ ，故 $\bar{y} = \sqrt{\frac{3k}{2}} - s$ 。若 $0 < y < \bar{y}$

($0 \leq p_e < \sqrt{\frac{3k}{2}} - s - \beta$)，则恒有 $f(y) > 0$ ， $e^{SR*} > e^{SD*}$ 。

(ii) 当 $\Delta_{f(y)} > 0$ ，即 $2s^2 + 3kt > 2\sqrt{6ks}$ 时， $\sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} < \sqrt{\frac{3k}{2}} - s$ ，故 $\bar{y} = \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}$ 。 $f(y)$ 的

图像与横坐标有 2 个交点，分别为 $y_1 = \frac{3kt - 2s^2 + \sqrt{(2s^2 + 3kt)^2 - 24ks^2}}{4s} > 0$ 和

$$y_2 = \frac{3kt - 2s^2 - \sqrt{(2s^2 + 3kt)^2 - 24ks^2}}{4s} < 0. \quad \text{若} \quad 0 < y \leq \min\left\{y_1, \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}\right\}$$

($0 \leq p_e \leq \min\left\{y_1, \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}\right\} - \beta$)，则 $f(y) \leq 0$ ， $e^{SR*} \leq e^{SD*}$ ；若 $y_1 < y < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}$

($y_1 - \beta < p_e < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} - \beta$)，则 $f(y) > 0$ ， $e^{SR*} > e^{SD*}$ 。

$$(2) \quad D^{SR*} - D^{SD*} = \frac{4k\delta_1^* f_1(\beta + p_e)}{A_1 B_1}, \quad \pi_m^{SR*} - \pi_m^{SD*} = \frac{2k(\delta_1^*)^2 f_1(\beta + p_e)}{A_1 B_1},$$

$f_1(\beta + p_e) = -t(\beta + p_e)^2 + 2s(1-t)(\beta + p_e) + s^2(1-t)$ ，令 $y = \beta + p_e$ ，则

$f_1(y) = -ty^2 + 2s(1-t)y + s^2(1-t)$ 。 $f_1(y)$ 与 $D^{SR*} - D^{SD*}$ ， $\pi_m^{SR*} - \pi_m^{SD*}$ 有相同的单调性。显然，

$f_1(y)$ 是关于 y 的开口向下的一元二次函数， $f_1(y)$ 的判别式 $\Delta_{f_1(y)} = 4s^2(1-t) > 0$ ， $f_1(y)$ 的图

像与横坐标有 2 个交点，分别为 $y_3 = \frac{s(1-t-\sqrt{1-t})}{t} < 0$ 和 $y_4 = \frac{s(1-t+\sqrt{1-t})}{t} > 0$ 。由于

$0 < y < \bar{y} = \min\left\{\sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}, \sqrt{\frac{3k}{2}} - s\right\}$ ，所以若 $0 < y < \min\{\bar{y}, y_4\}$ ($0 \leq p_e < \min\{\bar{y}, y_4\} - \beta$)，则

$f_1(y) > 0$ ，即 $D^{SR*} > D^{SD*}$ ， $\pi_m^{SR*} > \pi_m^{SD*}$ ；若 $y_4 \leq y < \bar{y}$ ($y_4 - \beta \leq p_e < \bar{y} - \beta$)，则 $f_1(y) \leq 0$ ，即 $D^{SR*} \leq D^{SD*}$ ， $\pi_m^{SR*} \leq \pi_m^{SD*}$ 。

附录 16

推 论 4-10 的 证 明： $P^{SR*} - P^{SD*} = \frac{2\delta_1^* f_2(\beta + p_e)}{A_1 B_1}$ ，

$f_2(\beta + p_e) = (\beta + p_e)^2(kt + 2s\beta) + (\beta + p_e)(\beta(2s^2 - 3kt) - 2ks(1-t)) - ks(1-t)(s - 3\beta)$ ，令 $y = \beta + p_e$ ，则 $f_2(y) = y^2(kt + 2s\beta) + y(\beta(2s^2 - 3kt) - 2ks(1-t)) - ks(1-t)(s - 3\beta)$ 。 $f_2(y)$ 与 $P^{SR*} - P^{SD*}$ 有相同的单调性。显然， $f_2(y)$ 是关于 y 的开口向上的一元二次函数， $f_2(y)$ 的判别式 $\Delta_{f_2(y)} = \beta^2(2s^2 + 3kt)^2 + 4ks^2(k(1-t) - 6\beta^2)$ ，且 $0 < y < \bar{y} = \min\{\sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}, \sqrt{\frac{3k}{2}} - s\}$ ，讨论如下：

(1) 当 $\Delta_{f_2(y)} \leq 0$ 时， $\sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} > \sqrt{\frac{3k}{2}} - s$ ，故 $\bar{y} = \sqrt{\frac{3k}{2}} - s$ 。若 $0 < y < \bar{y}$ ($0 \leq p_e < \sqrt{\frac{3k}{2}} - s - \beta$)，则恒有 $f_2(y) > 0$ ， $P^{SR*} > P^{SD*}$ 。

(2) 当 $\Delta_{f_2(y)} > 0$ 时， $\sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} < \sqrt{\frac{3k}{2}} - s$ ，故 $\bar{y} = \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}$ 。 $f_2(y)$ 的图像与横坐标有 2 个交点，分别为 $y_5 = \frac{2ks(1-t) - \beta(2s^2 - 3kt) + \sqrt{\Delta_{f_2(y)}}}{2(kt + 2s\beta)}$ 和 $y_6 = \frac{2ks(1-t) - \beta(2s^2 - 3kt) - \sqrt{\Delta_{f_2(y)}}}{2(kt + 2s\beta)}$ 。

(i) 当 $s - 3\beta \geq 0$ 时，满足 $y_6 < 0 < y_5$ 。若 $0 < y < \min\{\sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}, y_5\}$ ($0 \leq p_e < \min\{\sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}, y_5\} - \beta$)，则 $f_2(y) < 0$ ， $P^{SR*} < P^{SD*}$ ；若 $y_5 \leq y < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}$ ($y_5 - \beta \leq p_e < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} - \beta$)，则 $f_2(y) > 0$ ， $P^{SR*} > P^{SD*}$ 。

(ii) 当 $s - 3\beta < 0$ 且 $\beta(2s^2 - 3kt) - 2ks(1-t) > 0$ 时， $f_2(y)$ 对称轴为负值，此时满足 $y_6 < y_5 < 0$ 。若 $0 < y < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}$ ($0 \leq p_e < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} - \beta$)，则恒有 $f_2(y) > 0$ ， $P^{SR*} > P^{SD*}$ 。

(iii) 当 $s - 3\beta < 0$ 且 $\beta(2s^2 - 3kt) - 2ks(1-t) < 0$ 时， $f_2(y)$ 对称轴为正值，此时满足 $0 < y_6 < y_5$ 。

(a) 若 $\sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} < y_6 < y_5$ ，则 $0 < y < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}$ ($0 \leq p_e < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} - \beta$) 时，恒有 $f_2(y) > 0$ ， $P^{SR*} > P^{SD*}$ 。

(b) 若 $y_6 < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} < y_5$, 则 $0 < y < y_6$ ($0 \leq p_e < y_6 - \beta < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} - \beta$) 时, 有 $f_2(y) > 0$, $P^{SR*} > P^{SD*}$; $y_6 < y < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}$ ($y_6 - \beta \leq p_e < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} - \beta$) 时, 有 $f_2(y) < 0$, $P^{SR*} < P^{SD*}$ 。

(c) 若 $y_6 < y_5 < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}$, 则 $0 < y < y_6$ ($0 \leq p_e < y_6 - \beta < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} - \beta$) 或 $y_5 < y < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}}$ ($y_5 - \beta < p_e < \sqrt{\frac{3k(1-t)}{2}} - \beta$) 时, 有 $f_2(y) > 0$, $P^{SR*} > P^{SD*}$; $y_6 < y < y_5$ ($y_6 - \beta < p_e < y_5 - \beta$) 时, 有 $f_2(y) < 0$, $P^{SR*} < P^{SD*}$ 。

附录 17

推论 5-1 的证明: (1) $\frac{\partial e^{MC*}}{\partial \rho} = \frac{2e_0(\beta + p_e)(\lambda p_e - \beta)}{A_2}$; $\frac{\partial D^{MC*}}{\partial \rho} = \frac{2ke_0(\lambda p_e - \beta)}{A_2}$;
 $\frac{\partial u_m^{MC*}}{\partial \rho} = \frac{2ke_0(\lambda p_e - \beta)\delta'_1}{A_2}$; (i) 若 $\frac{\beta}{\lambda} < p_e$, 则 $\frac{\partial e^{MC*}}{\partial \rho} > 0$; $\frac{\partial D^{MC*}}{\partial \rho} > 0$; $\frac{\partial u_m^{MC*}}{\partial \rho} > 0$; (ii) 若 $0 \leq p_e \leq \frac{\beta}{\lambda}$,
 则 $\frac{\partial e^{MC*}}{\partial \rho} \leq 0$; $\frac{\partial D^{MC*}}{\partial \rho} \leq 0$; $\frac{\partial u_m^{MC*}}{\partial \rho} \leq 0$ 。

(2) $\frac{\partial P^{MC*}}{\partial \rho} = \frac{2e_0(2\beta p_e(1+\lambda)(\beta + p_e) - k(\beta(2-x) + \lambda p_e))}{2A_2}$, 记
 $h^1(p_e) = 2k(x-2)\beta e_0 + 2(2\beta^2(1+\lambda) - k\lambda)e_0 p_e + 4\beta(1+\lambda)e_0 p_e^2$, 则 $h^1(p_e)$ 与 $\partial P^{MC*}/\partial \rho$ 有相同的单调性。显然, $h^1(p_e)$ 是关于 p_e 的开口向上的一元二次函数, $h^1(p_e)$ 的判别式 $\Delta_{h^1(p_e)} = 4(8k(2-x)\beta^2(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2)e_0^2 > 0$, 此时 $h^1(p_e)$ 的图像与横坐标有 2 个交点, 分别为 $p_e^{11} = \frac{k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda) - \sqrt{8k\beta^2(2-x)(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2}}{4\beta(1+\lambda)} < 0$ 和 $p_e^{12} = \frac{k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda) + \sqrt{8k\beta^2(2-x)(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2}}{4\beta(1+\lambda)} > 0$ 。由于 $p_e \geq 0$, 因此, 当 $0 \leq p_e < p_e^{12}$ 时, 有 $\frac{\partial P^{MC*}}{\partial \rho} < 0$; 当 $p_e \geq p_e^{12}$ 时, 有 $\frac{\partial P^{MC*}}{\partial \rho} \geq 0$ 。

附录 18

推论 5-2 的证明: (1) $\frac{\partial e^{MC*}}{\partial \alpha} = \frac{-2a(\beta + p_e)}{A_2} < 0$; $\frac{\partial D^{MC*}}{\partial \alpha} = \frac{-2ak}{A_2} < 0$;
 $\frac{\partial u_m^{MC*}}{\partial \alpha} = \frac{akx^2(1-2\alpha) - 2ax(1-2\alpha)(2k - (\beta + p_e)^2) - (2k\delta'_1 - a(1-2\alpha)(A_2 + kx))}{A_2}$; 假 设

$h^1(x) = akx^2(1-2\alpha) - 2ax(1-2\alpha)(2k - (\beta + p_e)^2) - (2k\delta'_1 - a(1-2\alpha)(A_2 + kx))$, $h^1(x)$ 是关于 x 的一元二次函数, 由 $k(3-x) - 2(\beta + p_e)^2 > 0$ 可得 $0 < x < x^{MC} = \frac{3k - 2(\beta + p_e)^2}{k}$, 且 $h^1(x^{MC}) = -2k\delta'_1 < 0$ 。对称轴为 $x^0 = \frac{2k - (\beta + p_e)^2}{k} > 0$, 且 $x^0 - x^{MC} = \frac{(\beta + p_e)^2 - k}{k} > 0$, 即 $x^0 > x^{MC}$ 。 $\Delta_{h^1(x)} = 4a(1-2\alpha)\Delta'$, $\Delta' = a(1-2\alpha)(2k - (\beta + p_e)^2)^2 + k(2k\delta'_1 - a(1-2\alpha)(A_2 + kx))$, 讨论如下:

(i) 当 $0 < \alpha < 1/2$ 时, $1-2\alpha > 0$, $h^1(x)$ 开口向上, $\Delta' > 0$, 所以 $\Delta_{h^1(x)} > 0$ 。令 $h^1(x) = 0$ 解得

$$x_1^1 = \frac{a(1-2\alpha)(2k - (\beta + p_e)^2) + \sqrt{a(1-2\alpha)\Delta'}}{ak(1-2\alpha)} \text{ 和 } x_2^1 = \frac{a(1-2\alpha)(2k - (\beta + p_e)^2) - \sqrt{a(1-2\alpha)\Delta'}}{ak(1-2\alpha)}。所以$$

满足 $x_2^1 < 0 < x^{MC} < x_1^1$, 故当 $0 < x < x^{MC}$ 时, 恒有 $h^1(x) < 0$, $\frac{\partial u_m^{MC*}}{\partial \alpha} < 0$ 。

(ii) 当 $1/2 < \alpha < 1$ 时, $1-2\alpha < 0$, $h^1(x)$ 开口向下,

(a) 若 $\Delta' \geq 0$, 则 $\Delta_{h^1(x)} \leq 0$ 。当 $0 < x < x^{MC}$ 时, 恒有 $h^1(x) < 0$, $\frac{\partial u_m^{MC*}}{\partial \alpha} < 0$ 。

(b) 若 $\Delta' < 0$, 则 $\Delta_{h^1(x)} > 0$ 。因为 $h^1(x^{MC}) < 0$ 且 $x^0 > x^{MC}$, 所以此时满足 $0 < x^{MC} < x_1^1 < x_2^1$ 。当 $0 < x < x^{MC}$ 时, 恒有 $h^1(x) < 0$, $\frac{\partial u_m^{MC*}}{\partial \alpha} < 0$ 。

(iii) 当 $\alpha = 1/2$ 时, $f^1(x) = k(2e_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)\rho) - a) < 0$, 故 $\frac{\partial u_m^{MC*}}{\partial \alpha} < 0$ 。综上所述, $\frac{\partial u_m^{MC*}}{\partial \alpha} < 0$ 。

$$\frac{\partial e^{MC*}}{\partial \lambda} = \frac{2\rho e_0 p_e (\beta + p_e)}{A_2} > 0 \quad ; \quad \frac{\partial D^{MC*}}{\partial \lambda} = \frac{2k\rho e_0 p_e}{A_2} > 0 \quad ; \quad \frac{\partial u_m^{MC*}}{\partial \lambda} = \frac{2k\rho e_0 p_e \delta'_1}{A_2} > 0 \quad ;$$

$$\frac{\partial e^{MC*}}{\partial x} = \frac{2k(\beta + p_e)\delta'_1}{(A_2)^2} > 0 \quad ; \quad \frac{\partial D^{MC*}}{\partial x} = \frac{2k^2\delta'_1}{(A_2)^2} > 0 \quad ;$$

$$\frac{\partial u_m^{MC*}}{\partial x} = \frac{k^2 h^2(x) - 4ka^2(3-x)(1-2\alpha)^2(\beta + p_e)^2 + 4a^2(1-2\alpha)^2(\beta + p_e)^4}{4(A_2)^2} \quad ,$$

$h^2(x) = a^2 x^2(1-2\alpha)^2 - 6xa^2(1-2\alpha)^2 + a^2(13 - 44\alpha + 40\alpha^2) - 4e_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)\rho)(a(1-\alpha) + \delta'_1)$ 。假设 $H(k) = k^2 h^2(x) - 4ka^2(3-x)(1-2\alpha)^2(\beta + p_e)^2 + 4a^2(1-2\alpha)^2(\beta + p_e)^4$, $H(k)$ 是关于 k 的一元二次函数, $\Delta_{H(k)} = -64a^2(1-2\alpha)^2(\beta + p_e)^4(\delta'_1)^2 < 0$ 。由 $\Delta_{H(k)} < 0$ 可得 $h^2(x) > 0$, $H(k)$ 开口向

上, 故当 $k > \frac{2(\beta + p_e)^2}{3-x}$ 时, 恒有 $H(k) > 0$, 即 $\frac{\partial u_m^{MC*}}{\partial x} > 0$ 。

$$(2) \frac{\partial P^{MC*}}{\partial \alpha} = \frac{a(k - 2\beta(\beta + p_e))}{A_2}, \frac{\partial P^{MC*}}{\partial \lambda} = \frac{\rho e_0 p_e (2\beta(\beta + p_e) - k)}{A_2}, \frac{\partial P^{MC*}}{\partial x} = \frac{k(2\beta(\beta + p_e) - k)\delta'_1}{(A_2)^2}。$$

当 $k - 2\beta(\beta + p_e) \geq 0$, 即 $0 \leq p_e \leq \frac{k}{2\beta} - \beta$ 时, $\frac{\partial P^{MC*}}{\partial \alpha} \geq 0$, $\frac{\partial P^{MC*}}{\partial \lambda} \leq 0$, $\frac{\partial P^{MC*}}{\partial x} \leq 0$; 当 $k - 2\beta(\beta + p_e) < 0$, 即 $p_e > \frac{k}{2\beta} - \beta$ 时, $\frac{\partial P^{MC*}}{\partial \alpha} < 0$, $\frac{\partial P^{MC*}}{\partial \lambda} > 0$, $\frac{\partial P^{MC*}}{\partial x} > 0$ 。

附录 19

推论 5-3 的证明: (1) $\frac{\partial e^{RC*}}{\partial \rho} = \frac{2e_0(\beta + p_e)(\lambda p_e - \beta)}{B_2}$; $\frac{\partial D^{RC*}}{\partial \rho} = \frac{2ke_0(\lambda p_e - \beta)}{B_2}$;
 $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \rho} = \frac{ke_0(\lambda p_e - \beta)(2\delta'_1 + \alpha x(2\alpha - 1))}{B_2}$; 若 $p_e > \frac{\beta}{\lambda}$, 则 $\lambda p_e - \beta > 0$, $\frac{\partial e^{RC*}}{\partial \rho} > 0$; $\frac{\partial D^{RC*}}{\partial \rho} > 0$;
 $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \rho} > 0$; 若 $0 < p_e \leq \frac{\beta}{\lambda}$, 则 $\lambda p_e - \beta \leq 0$, $\frac{\partial e^{RC*}}{\partial \rho} \leq 0$; $\frac{\partial D^{RC*}}{\partial \rho} \leq 0$; $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \rho} \leq 0$ 。

(2) $\frac{\partial P^{RC*}}{\partial \rho} = \frac{e_0(2\beta p_e(1 + \lambda)(\beta + p_e) - k(2\beta(1 - x) + \lambda p_e))}{B_2}$, 记

$h^2(p_e) = 2\beta(1 + \lambda)p_e^2 - (k\lambda - 2\beta^2(1 + \lambda))p_e - 2k\beta(1 - x)$, $h^2(p_e)$ 与 $\partial P^{RC*}/\partial \rho$ 有相同的单调性。显然, $h^2(p_e)$ 是关于 p_e 的开口向上的一元二次函数, $h^2(p_e)$ 的判别式 $\Delta_{h^2(p_e)} = 16k\beta^2(1 - x)(1 + \lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1 + \lambda))^2 > 0$, 所以 $h^2(p_e)$ 的图像与横坐标有 2 个交点, 分别为 $p_e^{21} = \frac{(k\lambda - 2\beta^2(1 + \lambda)) + \sqrt{\Delta_{h^2(p_e)}}}{4\beta(1 + \lambda)} > 0$ 和 $p_e^{22} = \frac{(k\lambda - 2\beta^2(1 + \lambda)) - \sqrt{\Delta_{h^2(p_e)}}}{4\beta(1 + \lambda)} < 0$ 。由于 $p_e \geq 0$, 所以若 $0 \leq p_e \leq p_e^{21}$, 则 $h^2(p_e) \leq 0$, $\frac{\partial P^{RC*}}{\partial \rho} \leq 0$; 若 $p_e > p_e^{21}$, 则 $h^2(p_e) > 0$, $\frac{\partial P^{RC*}}{\partial \rho} > 0$ 。

附录 20

推论 5-4 的证明: (1) $\frac{\partial e^{RC*}}{\partial \alpha} = \frac{-2a(1 - x)(\beta + p_e)}{B_2} < 0$; $\frac{\partial D^{RC*}}{\partial \alpha} = \frac{-2ak(1 - x)}{B_2} < 0$; (2)
 $\frac{\partial P^{RC*}}{\partial \alpha} = \frac{a(1 - x)(k - 2\beta(\beta + p_e))}{B_2}$, 当 $k - 2\beta(\beta + p_e) \leq 0$, 即 $p_e \geq \frac{k}{2\beta} - \beta$ 时, 有 $\frac{\partial P^{RC*}}{\partial \alpha} \leq 0$; 当 $k - 2\beta(\beta + p_e) > 0$, 即 $0 \leq p_e < \frac{k}{2\beta} - \beta$ 时, 有 $\frac{\partial P^{RC*}}{\partial \alpha} > 0$ 。

$$(3) \quad \frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} = \frac{a \left[2a(2\alpha - 1)p_e^2 + (4a\beta(2\alpha - 1) + 2k(1 - x)(1 - \lambda\rho)e_0)p_e + ak(1 - 4\alpha + x(1 + x(2\alpha - 1))) + 2a(2\alpha - 1)\beta^2 + 2ke_0\beta\rho(1 - x) \right]}{B_2} , \quad \text{令}$$

$h^3(p_e) = \left[2a(2\alpha - 1)p_e^2 + (4a\beta(2\alpha - 1) + 2k(1 - x)(1 - \lambda\rho)e_0)p_e + ak(1 - 4\alpha + x(1 + x(2\alpha - 1))) + 2a(2\alpha - 1)\beta^2 + 2ke_0\beta\rho(1 - x) \right]$, $h^3(p_e)$ 与 $\partial u_m^{RC*}/\partial \alpha$ 有相同

的单调性。显然， $h^3(p_e)$ 是关于 p_e 的一元二次函数， $h^3(p_e)$ 的判别式

$$\Delta_{h^3(p_e)} = 4k(2a^2(1-2\alpha)(1-4\alpha+x+x^2(2\alpha-1))-(1-x)e_0(4a(2\alpha-1)\beta(\rho(1+\lambda)-1)-k(1-x)(1-\lambda\rho)^2e_0))$$

$$, \quad \text{令} \quad H^1 = ak(1-4\alpha+x(1+x(2\alpha-1))) + 2a(2\alpha-1)\beta^2 + 2ke_0\beta\rho(1-x) \quad ,$$

$H^2 = 4a\beta(2\alpha-1) + 2k(1-x)(1-\lambda\rho)e_0$ ，讨论如下：

(i) 当 $\Delta_{h^3(p_e)} \leq 0$ 时，若 $0 < \alpha < 1/2$ ，则 $h^3(p_e)$ 开口向下，此时当 $p_e \geq 0$ 时，恒有 $h^3(p_e) < 0$ ，

$$\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} < 0; \text{若 } 1/2 < \alpha < 1, \text{ 则 } h^3(p_e) \text{ 开口向上，此时当 } p_e \geq 0 \text{ 时，恒有 } h^3(p_e) > 0, \frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} > 0。$$

(ii) 当 $\Delta_{h^3(p_e)} > 0$ 时， $h^3(p_e)$ 的图像与横坐标有 2 个交点，分别为

$$p_e^{31} = \frac{-(4a\beta(2\alpha-1) + 2k(1-x)(1-\lambda\rho)e_0) + \sqrt{\Delta_{h^3(p_e)}}}{4a(2\alpha-1)} \quad \text{和}$$

$$p_e^{32} = \frac{-(4a\beta(2\alpha-1) + 2k(1-x)(1-\lambda\rho)e_0) - \sqrt{\Delta_{h^3(p_e)}}}{4a(2\alpha-1)}。$$

(a) 若 $0 < \alpha < 1/2$ ，则 $h^3(p_e)$ 开口向下，1) $H^1 > 0$ ，此时满足 $p_e^{31} < 0 < p_e^{32}$ ，所以 $0 \leq p_e \leq p_e^{32}$ 时，

有 $h^3(p_e) \geq 0$ ， $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} \geq 0$ ； $p_e > p_e^{32}$ 时，有 $h^3(p_e) < 0$ ， $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} < 0$ 。2) $H^1 < 0$ 且 $H^2 < 0$ ，此时满

足 $p_e^{31} < p_e^{32} < 0$ ，故当 $p_e \geq 0$ 时，恒有 $h^3(p_e) < 0$ ， $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} < 0$ ；3) $H^1 < 0$ 且 $H^2 > 0$ ，此时满足

$0 < p_e^{31} < p_e^{32}$ ，所以 $0 \leq p_e < p_e^{31}$ 或 $p_e > p_e^{32}$ 时，有 $h^3(p_e) < 0$ ， $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} < 0$ ； $p_e^{31} \leq p_e \leq p_e^{32}$ 时，有

$$h^3(p_e) \geq 0, \quad \frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} \geq 0。$$

(b) 若 $1/2 < \alpha < 1$ ，则 $h^3(p_e)$ 开口向上，1) $H^1 < 0$ ，此时满足 $p_e^{32} < 0 < p_e^{31}$ ，所以 $0 \leq p_e \leq p_e^{31}$ 时，

有 $h^3(p_e) \leq 0$ ， $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} \leq 0$ ； $p_e > p_e^{31}$ 时，有 $h^3(p_e) > 0$ ， $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} > 0$ 。2) $H^1 > 0$ 且 $H^2 < 0$ ，此时满

足 $p_e^{32} < p_e^{31} < 0$ ，故当 $p_e \geq 0$ 时，恒有 $h^3(p_e) > 0$ ， $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} > 0$ ；3) $H^1 > 0$ 且 $H^2 > 0$ ，此时满足

$0 < p_e^{32} < p_e^{31}$ ，所以 $0 \leq p_e < p_e^{32}$ 或 $p_e > p_e^{31}$ 时，有 $h^3(p_e) > 0$ ， $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} > 0$ ； $p_e^{32} \leq p_e \leq p_e^{31}$ 时，有

$$h^3(p_e) \leq 0, \quad \frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} \leq 0。$$

(iii) 当 $\alpha = \frac{1}{2}$ 时， $h^3(p_e) = k(1-x)(2e_0(1-\lambda\rho)p_e + 2e_0\beta\rho - a)$ ，若 $2e_0(1-\lambda\rho)p_e + 2e_0\beta\rho - a \geq 0$ ，则

$h^3(p_e) \geq 0$, $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} \geq 0$; 若 $2e_0(1-\lambda\rho)p_e + 2e_0\beta\rho - a < 0$, 则 $h^3(p_e) < 0$, $\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} < 0$ 。

附录 21

推论 5-5 的证明：(1) $\frac{\partial e^{RC*}}{\partial \lambda} = \frac{2\rho e_0 p_e (\beta + p_e)}{B_2} > 0$; $\frac{\partial D^{RC*}}{\partial \lambda} = \frac{2k\rho e_0 p_e}{B_2} > 0$;

$$\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \lambda} = \frac{k\rho e_0 p_e (2\delta'_1 + a\alpha(2\alpha - 1))}{B_2} > 0$$

;

$$\frac{\partial e^{RC*}}{\partial \alpha} = \frac{(\beta + p_e)(a(k(1+2\alpha) + 2(1-2\alpha)(\beta + p_e)^2) - 4ke_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)\rho))}{(B_2)^2} > 0$$

； 由 于

$$2a(1-\alpha) - 2e_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)\rho) > 0$$

， 所 以 $a(1+2\alpha) - a(4\alpha - 1) - 2e_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)\rho) > 0$ ，

$$\Rightarrow ak(1+2\alpha) - 2ke_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)\rho) > ak(4\alpha - 1)$$

，

$$\Rightarrow ak(1+2\alpha) > ak(4\alpha - 1) + 2ke_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)\rho)$$

，

$$\Rightarrow ak(1+2\alpha) - 4ke_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)\rho) > ak(4\alpha - 1) - 2ke_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)\rho)$$

，

$$\Rightarrow ak(1+2\alpha) + 2a(1-2\alpha)(\beta + p_e)^2 - 4ke_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)\rho)$$

$> ak(4\alpha - 1) + 2a(1-2\alpha)(\beta + p_e)^2 - 2ke_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)\rho) > 0$ ， 所 以 $\frac{\partial e^{RC*}}{\partial \alpha} > 0$ 。

$$\frac{\partial D^{RC*}}{\partial \alpha} = \frac{k(a(k(1+2\alpha) + 2(1-2\alpha)(\beta + p_e)^2) - 4ke_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)\rho))}{(B_2)^2} > 0$$

；

$$\frac{\partial u_m^{RC*}}{\partial \alpha} = \frac{k(a\alpha(2\alpha - 1) + 2\delta'_1)\delta^{RC}}{2B_2} > 0$$

； 由 $e^{RC*} > 0$ 可知 $a\alpha(2\alpha - 1) + 2\delta'_1 > 0$ ， 故 $\frac{\partial \pi_m^{RC*}}{\partial \alpha} > 0$ 。

(2) $\frac{\partial P^{RC*}}{\partial \lambda} = \frac{\rho e_0 p_e (2\beta(\beta + p_e) - k)}{B_2}$ ，

$$\frac{\partial P^{RC*}}{\partial \alpha} = \frac{(2\beta(\beta + p_e) - k)(a(k(1+2\alpha) + 2(1-2\alpha)(\beta + p_e)^2) - 4ke_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)\rho))}{2(B_2)^2}$$

； 当

$$2\beta(\beta + p_e) - k \geq 0$$

， 即 $p_e \geq \frac{k}{2\beta} - \beta$ 时， 有 $\frac{\partial P^{RC*}}{\partial \lambda} \geq 0$ ， $\frac{\partial P^{RC*}}{\partial \alpha} \geq 0$ ； 当 $2\beta(\beta + p_e) - k < 0$ ， 即

$$0 \leq p_e < \frac{k}{2\beta} - \beta$$

时， 有 $\frac{\partial P^{RC*}}{\partial \lambda} < 0$ ， $\frac{\partial P^{RC*}}{\partial \alpha} < 0$ 。

附录 22

推论 5-6 的证明：(1) $\frac{\partial e^{CC*}}{\partial \rho} = \frac{2e_0(\beta + p_e)(\lambda p_e - \beta)}{B_2 + \alpha k \theta}$ ； $\frac{\partial D^{CC*}}{\partial \rho} = \frac{2ke_0(\lambda p_e - \beta)}{B_2 + \alpha k \theta}$ ；

$$\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \rho} = \frac{ke_0(\lambda p_e - \beta)(2\delta'_1 - a x(1-2\alpha)(1-\theta))}{B_2 + xk\theta}; \text{若 } \frac{\beta}{\lambda} < p_e, \text{ 则 } \lambda p_e - \beta > 0, \frac{\partial e^{CC*}}{\partial \rho} > 0; \frac{\partial D^{CC*}}{\partial \rho} > 0;$$

$$\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \rho} > 0; \text{若 } 0 \leq p_e \leq \frac{\beta}{\lambda}, \text{ 则 } \lambda p_e - \beta \leq 0, \frac{\partial e^{CC*}}{\partial \rho} \leq 0; \frac{\partial D^{CC*}}{\partial \rho} \leq 0; \frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \rho} \leq 0。$$

$$(2) \quad \frac{\partial P^{CC*}}{\partial \rho} = \frac{e_0(2\beta p_e(1+\lambda)(\beta + p_e) - k(\beta(2(1-x) + x\theta) + \lambda p_e))}{B_2 + xk\theta}, \quad \text{记}$$

$h^4(p_e) = 2\beta(1+\lambda)p_e^2 + (2\beta^2(1+\lambda) - k\lambda)p_e - k\beta(2-x(2-\theta))$, $h^4(p_e)$ 与 $\partial P^{CC*}/\partial \rho$ 有相同的单调性。显然, $h^4(p_e)$ 是关于 p_e 的开口向上的一元二次函数, $h^4(p_e)$ 的判别式 $\Delta_{h^4(p_e)} = 8k\beta^2(2-x(2-\theta))(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2 > 0$, 所以 $h^4(p_e)$ 的图像与横坐标有 2 个

交点, 分别为 $p_e^{41} = \frac{(k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda)) + \sqrt{\Delta_{h^4(p_e)}}}{4\beta(1+\lambda)} > 0$ 和 $p_e^{42} = \frac{(k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda)) - \sqrt{\Delta_{h^4(p_e)}}}{4\beta(1+\lambda)} < 0$ 。由于

$p_e \geq 0$, 所以若 $0 \leq p_e \leq p_e^{41}$, 则 $h^4(p_e) \leq 0$, $\frac{\partial P^{CC*}}{\partial \rho} \leq 0$; 若 $p_e > p_e^{41}$, 则 $h^4(p_e) > 0$, $\frac{\partial P^{CC*}}{\partial \rho} > 0$ 。

附录 23

推论 5-7 的证明: (1) $\frac{\partial e^{CC*}}{\partial \alpha} = \frac{-2a(1-x(1-\theta))(\beta + p_e)}{B_2 + xk\theta} < 0$; $\frac{\partial D^{CC*}}{\partial \alpha} = \frac{-2ak(1-x(1-\theta))}{B_2 + xk\theta} < 0$;

$\frac{\partial P^{CC*}}{\partial \alpha} = \frac{a(1-x(1-\theta))(k - 2\beta(\beta + p_e))}{B_2 + xk\theta}$; 当 $k - 2\beta(\beta + p_e) \leq 0$, 即 $p_e \geq \frac{k}{2\beta} - \beta$ 时, 有 $\frac{\partial P^{CC*}}{\partial \alpha} \leq 0$;

当 $k - 2\beta(\beta + p_e) > 0$, 即 $0 \leq p_e < \frac{k}{2\beta} - \beta$ 时, 有 $\frac{\partial P^{CC*}}{\partial \alpha} > 0$ 。

(2)

$$\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} = \frac{a \left[2a(2\alpha - 1)(1 - x\theta)p_e^2 + 2p_e(2a\beta(2\alpha - 1)(1 - x\theta) + ke_0(1 - x(1 - \theta))(1 - \lambda\rho)) + a(k(1 - 4\alpha) - 2\beta^2(1 - 2\alpha)(1 - x\theta) + kx(1 - \theta(5 - 8\alpha) - x(1 - 2\alpha)(1 - 2(2 - \theta)\theta))) + 2ke_0\beta\rho(1 - x(1 - \theta)) \right]}{B_2 + xk\theta};$$

$$\text{令 } h^5(p_e) = \left[\begin{array}{l} 2a(2\alpha - 1)(1 - x\theta)p_e^2 + 2p_e(2a\beta(2\alpha - 1)(1 - x\theta) + ke_0(1 - x(1 - \theta))(1 - \lambda\rho)) + a(k(1 - 4\alpha) - 2\beta^2(1 - 2\alpha)(1 - x\theta) + kx(1 - \theta(5 - 8\alpha) - x(1 - 2\alpha)(1 - 2(2 - \theta)\theta))) + 2ke_0\beta\rho(1 - x(1 - \theta)) \end{array} \right],$$

$h^5(p_e)$ 与 $\partial u_m^{CC*}/\partial \alpha$ 有相同的单调性。显然, $h^5(p_e)$ 是关于 p_e 的一元二次函数, $h^5(p_e)$ 的

判别式 $\Delta_{h^5(p_e)} = \left[\begin{array}{l} 64k(2a^2(1 - 2\alpha)(1 - x\theta)(1 - 4\alpha + x(1 - \theta(5 - 8\alpha))) - x^2(1 - 2\alpha)(1 - 2(2 - \theta)\theta)) + \\ (1 - x(1 - \theta))e_0(4a\beta(1 - 2\alpha)(1 - x\theta)(\rho(1 + \lambda) - 1) + k(1 - x(1 - \theta))(1 - \lambda\rho)^2 e_0) \end{array} \right]$, 令

$$H^3 = a(k(1 - 4\alpha) - 2\beta^2(1 - 2\alpha)(1 - x\theta) + kx(1 - \theta(5 - 8\alpha) - x(1 - 2\alpha)(1 - 2(2 - \theta)\theta))) + 2ke_0\beta\rho(1 - x(1 - \theta))$$

, $H^4 = 2a\beta(2\alpha - 1)(1 - x\theta) + ke_0(1 - x(1 - \theta))(1 - \lambda\rho)$, 讨论如下:

(i) 当 $\Delta_{h^5(p_e)} \leq 0$ 时, 若 $0 < \alpha < 1/2$, 则 $h^5(p_e)$ 开口向下, 此时当 $p_e \geq 0$ 时, 恒有 $h^5(p_e) < 0$, $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} < 0$; 若 $1/2 < \alpha < 1$, 则 $h^5(p_e)$ 开口向上, 此时当 $p_e \geq 0$ 时, 恒有 $h^5(p_e) > 0$, $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} > 0$ 。

(ii) 当 $\Delta_{h^5(p_e)} > 0$ 时, $h^5(p_e)$ 的图像与横坐标有 2 个交点, 分别为

$$p_e^{51} = \frac{-(2a\beta(2\alpha-1)(1-x\theta) + ke_0(1-x(1-\theta))(1-\lambda\rho)) + \sqrt{\Delta_{h^5(p_e)}}}{4a(2\alpha-1)(1-x\theta)} \quad \text{和}$$

$$p_e^{52} = \frac{-(2a\beta(2\alpha-1)(1-x\theta) + ke_0(1-x(1-\theta))(1-\lambda\rho)) - \sqrt{\Delta_{h^5(p_e)}}}{4a(2\alpha-1)(1-x\theta)}。$$

(a) 若 $0 < \alpha < 1/2$, 则 $h^5(p_e)$ 开口向下, 1) $H^3 > 0$, 此时满足 $p_e^{51} < 0 < p_e^{52}$, 所以 $0 \leq p_e \leq p_e^{52}$ 时, 有 $h^5(p_e) \geq 0$, $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} \geq 0$; $p_e > p_e^{52}$ 时, 有 $h^5(p_e) < 0$, $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} < 0$ 。2) $H^3 < 0$ 且 $H^4 < 0$,

此时满足 $p_e^{51} < p_e^{52} < 0$, 故当 $p_e \geq 0$ 时, 恒有 $h^5(p_e) < 0$, $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} < 0$; 3) $H^3 < 0$ 且 $H^4 > 0$, 此

时满足 $0 < p_e^{51} < p_e^{52}$, 所以 $0 \leq p_e < p_e^{51}$ 或 $p_e > p_e^{52}$ 时, 有 $h^5(p_e) < 0$, $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} < 0$; $p_e^{51} \leq p_e \leq p_e^{52}$

时, 有 $h(p_e) \geq 0$, $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} \geq 0$ 。

(b) 若 $1/2 < \alpha < 1$, 则 $h^5(p_e)$ 开口向上, 1) $H^3 < 0$, 此时满足 $p_e^{52} < 0 < p_e^{51}$, 所以 $0 \leq p_e \leq p_e^{51}$ 时,

有 $h^5(p_e) \leq 0$, $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} \leq 0$; $p_e > p_e^{51}$ 时, 有 $h^5(p_e) > 0$, $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} > 0$ 。2) $H^3 > 0$ 且 $H^4 < 0$, 此时

满足 $p_e^{52} < p_e^{51} < 0$, 故当 $p_e \geq 0$ 时, 恒有 $h^5(p_e) > 0$, $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} > 0$; 3) $H^3 > 0$ 且 $H^4 > 0$, 此时满

足 $0 < p_e^{52} < p_e^{51}$, 所以 $0 \leq p_e < p_e^{52}$ 或 $p_e > p_e^{51}$ 时, 有 $h^5(p_e) > 0$, $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} > 0$; $p_e^{52} \leq p_e \leq p_e^{51}$ 时,

有 $h^5(p_e) \leq 0$, $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} \leq 0$ 。

(iii) 当 $\alpha = \frac{1}{2}$ 时, $h^5(p_e) = 4k(1-x(1-\theta))(2e_0p_e(1-\lambda\rho) - a + 2e_0\beta\rho)$, 若

$2e_0p_e(1-\lambda\rho) - a + 2e_0\beta\rho \geq 0$, 则 $h^5(p_e) \geq 0$, $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} \geq 0$; 若 $2e_0p_e(1-\lambda\rho) - a + 2e_0\beta\rho < 0$, 则

$h^5(p_e) < 0$, $\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \alpha} < 0$ 。

附录 24

推论 5-8 的证明：(1) $\frac{\partial e^{CC*}}{\partial \lambda} = \frac{2\rho e_0 p_e (\beta + p_e)}{B_2 + xk\theta} > 0$; $\frac{\partial D^{CC*}}{\partial \lambda} = \frac{2k\rho e_0 p_e}{B_2 + xk\theta} > 0$;

$$\frac{\partial u_m^{CC*}}{\partial \lambda} = \frac{k\rho e_0 p_e (2\delta'_1 - \alpha x(1-2\alpha)(1-\theta))}{B_2 + xk\theta} > 0 ;$$

$$\frac{\partial e^{CC*}}{\partial x} = \frac{\left[(\beta + p_e)(a(k(1+\theta+2\alpha(1-2\theta))+2(1-2\alpha)) - (\beta + p_e)^2(1-\theta)) - 2k(2-\theta)e_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)\rho) \right]}{(B_2 + xk\theta)^2} > 0 ; \quad \text{由 于}$$

$$\begin{aligned} & ak(1+\theta+2\alpha(1-2\theta)+2a(1-2\alpha)(\beta+p_e)^2(1-\theta)-2k(2-\theta)e_0(p_e+(\beta-\lambda p_e)\rho) \\ & = [ak(1+2\alpha)+2a(1-2\alpha)(\beta+p_e)^2-4ke_0(p_e+(\beta-\lambda p_e)\rho)] , \text{ 并且由推论 5-5} \\ & -\theta[ak(4\alpha-1)+2a(1-2\alpha)(\beta+p_e)^2-2ke_0(p_e+(\beta-\lambda p_e)\rho)] \end{aligned}$$

$$\text{可 知 } \left[\begin{array}{l} ak(1+2\alpha)+2a(1-2\alpha)(\beta+p_e)^2-4ke_0(p_e+(\beta-\lambda p_e)\rho) > \\ ak(4\alpha-1)+2a(1-2\alpha)(\beta+p_e)^2-2ke_0(p_e+(\beta-\lambda p_e)\rho) \end{array} \right] , \quad \text{所 以}$$

$$ak(1+\theta+2\alpha(1-2\theta)+2a(1-2\alpha)(\beta+p_e)^2(1-\theta)-2k(2-\theta)e_0(p_e+(\beta-\lambda p_e)\rho) > 0 , \quad \text{所 以}$$

$$\frac{\partial e^{CC*}}{\partial x} > 0 .$$

$$\frac{\partial D^{CC*}}{\partial x} = \frac{k(a(k(1+2\alpha(1-2\theta)+\theta)+2(1-2\alpha)(\beta+p_e)^2(1-\theta))-2k(2-\theta)e_0(p_e+(\beta-\lambda p_e)\rho))}{(B_2 + xk\theta)^2} > 0 ;$$

$$\frac{\partial e^{CC*}}{\partial \theta} = \frac{-x(\beta+p_e)(2\delta'_1 - \alpha x(1-\theta)(1-2\alpha))}{(B_2 + xk\theta)^2} < 0 ; \quad \frac{\partial D^{CC*}}{\partial \theta} = \frac{-kx(2\delta'_1 - \alpha x(1-\theta)(1-2\alpha))}{(B_2 + xk\theta)^2} < 0 ;$$

$$(2) \quad \frac{\partial P^{CC*}}{\partial \lambda} = \frac{\rho e_0 p_e (2\beta(\beta+p_e) - k)}{B_2 + xk\theta} ,$$

$$\frac{\partial P^{CC*}}{\partial x} = \frac{\left[(2\beta(\beta+p_e) - k)(a(k(1+2\alpha(1-2\theta)+\theta)+2(1-2\alpha)) - (\beta + p_e)^2(1-\theta)) - 2k(2-\theta)e_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)\rho) \right]}{2(B_2 + xk\theta)^2} ,$$

$$\frac{\partial P^{CC*}}{\partial \theta} = \frac{x(k - 2\beta(\beta+p_e))(2\delta'_1 - \alpha x(1-\theta)(1-2\alpha))}{2(B_2 + xk\theta)^2} . \text{ 当 } 2\beta(\beta+p_e) - k \geq 0 , \text{ 即 } p_e \geq \frac{k}{2\beta} - \beta \text{ 时, 有}$$

$$\frac{\partial P^{CC*}}{\partial \lambda} \geq 0 , \quad \frac{\partial P^{CC*}}{\partial x} \geq 0 , \quad \frac{\partial P^{CC*}}{\partial \theta} \leq 0 ; \text{ 当 } 2\beta(\beta+p_e) - k < 0 , \text{ 即 } 0 \leq p_e < \frac{k}{2\beta} - \beta \text{ 时, 有 } \frac{\partial P^{CC*}}{\partial \lambda} < 0 ,$$

$$\frac{\partial P^{CC*}}{\partial x} < 0 , \quad \frac{\partial P^{CC*}}{\partial \theta} > 0 .$$

附录 25

推论 5-9 的证明：(1) $e^{MC*} - e^{NMC*} = \frac{2e_0(\beta+p_e)(1-\rho)(\beta-\lambda p_e)}{A_2}$;

$$D^{MC*} - D^{NMC*} = \frac{2ke_0(1-\rho)(\beta - \lambda p_e)}{A_2} ; \quad u_m^{MC*} - u_m^{NMC*} = \frac{ke_0(1-\rho)(\beta - \lambda p_e)(\delta'_1 + \delta'_2)}{A_2}$$

$$e^{RC*} - e^{NRC*} = \frac{2e_0(\beta + p_e)(1-\rho)(\beta - \lambda p_e)}{B_2} ; \quad D^{RC*} - D^{NRC*} = \frac{2ke_0(1-\rho)(\beta - \lambda p_e)}{B_2} ;$$

$$u_m^{RC*} - u_m^{NRC*} = \frac{ke_0(1-\rho)(\beta - \lambda p_e)(\delta'_1 + \delta'_2 - \alpha x(1-2\alpha))}{B_2} 。 由 e^{NRC*} > 0 和 e^{RC*} > 0 , 可知$$

$$a(1-\alpha) - e_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)) > \frac{1}{2}\alpha x(1-2\alpha) , \quad a(1-\alpha) - e_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)\rho) > \frac{1}{2}\alpha x(1-2\alpha) , \quad 故$$

$$2a(1-\alpha) - e_0((\beta - \lambda p_e)(1+\rho) + 2p_e) > \alpha x(1-2\alpha) 。 e^{CC*} - e^{NCC*} = \frac{2e_0(\beta + p_e)(1-\rho)(\beta - \lambda p_e)}{B_2 + xk\theta} ;$$

$$D^{CC*} - D^{NCC*} = \frac{2ke_0(1-\rho)(\beta - \lambda p_e)}{B_2 + xk\theta} ; \quad u_m^{CC*} - u_m^{NCC*} = \frac{ke_0(1-\rho)(\beta - \lambda p_e)\delta^{CC}}{B_2 + xk\theta} 。 由 e^{NCC*} > 0 和$$

$$e^{CC*} > 0 , \quad 可 \quad 知 \quad a(1-\alpha) - e_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)) > \frac{1}{2}\alpha x(1-2\alpha)(1-\theta) ,$$

$$a(1-\alpha) - e_0(p_e + (\beta - \lambda p_e)\rho) > \frac{1}{2}\alpha x(1-2\alpha)(1-\theta) , \quad 故$$

$$2a(1-\alpha) - e_0((\beta - \lambda p_e)(1+\rho) + 2p_e) > \alpha x(1-2\alpha)(1-\theta) 。 若 0 \leq p_e < \frac{\beta}{\lambda} , 0 \leq \rho < 1 或 p_e > \frac{\beta}{\lambda} , \rho > 1 ,$$

$$则 e^{i*} > e^{Ni*} , \quad D^{i*} > D^{Ni*} , \quad u_m^{i*} > u_m^{Ni*} ; 若 0 \leq p_e < \frac{\beta}{\lambda} , \rho > 1 或 p_e > \frac{\beta}{\lambda} , 0 \leq \rho < 1 , 则 e^{i*} < e^{Ni*} ,$$

$$D^{i*} < D^{Ni*} , \quad u_m^{i*} < u_m^{Ni*} ; 若 p_e = \frac{\beta}{\lambda} , 则 e^{i*} = e^{Ni*} , \quad D^{i*} = D^{Ni*} , \quad u_m^{i*} = u_m^{Ni*} 。$$

附录 26

$$推论 5-10 的证明: P^{MC*} - P^{NMC*} = \frac{e_0(\rho-1)(2\beta p_e(1+\lambda)(\beta + p_e) - k((2-x)\beta + \lambda p_e))}{A_2} ; 记$$

$$h^6(p_e) = 2\beta p_e(1+\lambda)(\beta + p_e) - k((2-x)\beta + \lambda p_e) = 2\beta(1+\lambda)p_e^2 + (2\beta^2(1+\lambda) - k\lambda)p_e - k(2-x)\beta ,$$

显然, $h^6(p_e)$ 是关于 p_e 的开口向上的一元二次函数, $h^6(p_e)$ 的判别式

$$\Delta_{h^6(p_e)} = 8k(2-x)\beta^2(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2 > 0 , \quad 令 \quad h^6(p_e) = 0 \quad 解 \quad 得$$

$$p_e^{61} = \frac{k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda) + \sqrt{8k(2-x)\beta^2(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2}}{4\beta(1+\lambda)} > 0 \quad 和$$

$$p_e^{62} = \frac{k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda) - \sqrt{8k(2-x)\beta^2(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2}}{4\beta(1+\lambda)} < 0 。 此时当 0 \leq p_e < p_e^{61} 时 ,$$

$$h^6(p_e) < 0 , 当 p_e > p_e^{61} 时, h^6(p_e) > 0 。 所以当 0 \leq p_e < p_e^{61} 时, 若 0 < \rho < 1 , 则 P^{MC*} > P^{NMC*} ,$$

若 $\rho > 1$, 则 $P^{MC*} < P^{NMC*}$; 当 $p_e > p_e^{61}$ 时, 若 $0 < \rho < 1$, 则 $P^{MC*} < P^{NMC*}$, 若 $\rho > 1$, 则 $P^{MC*} > P^{NMC*}$, 当 $p_e = p_e^{61}$ 时, 有 $P^{MC*} = P^{NMC*}$ 。

$$P^{RC*} - P^{NRC*} = \frac{e_0(\rho-1)(2\beta p_e(1+\lambda)(\beta+p_e) - k(2(1-x)\beta + \lambda p_e))}{B_2}, \quad \text{记}$$

$$h^7(p_e) = 2\beta p_e(1+\lambda)(\beta+p_e) - k(2(1-x)\beta + \lambda p_e) = 2\beta(1+\lambda)p_e^2 + (2\beta^2(1+\lambda) - k\lambda)p_e - 2k(1-x)\beta,$$

显然, $h^7(p_e)$ 是关于 p_e 的开口向上的一元二次函数, $h^7(p_e)$ 的判别式

$$\Delta_{h^7(p_e)} = 16k(1-x)\beta^2(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2 > 0, \quad \text{令 } h^7(p_e) = 0 \quad \text{解得}$$

$$p_e^{71} = \frac{k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda) + \sqrt{16k(1-x)\beta^2(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2}}{4\beta(1+\lambda)} > 0 \quad \text{和}$$

$$p_e^{72} = \frac{k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda) - \sqrt{16k(1-x)\beta^2(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2}}{4\beta(1+\lambda)} < 0. \quad \text{此时当 } 0 \leq p_e < p_e^{71} \text{ 时,}$$

$$h^7(p_e) < 0, \quad \text{当 } p_e > p_e^{71} \text{ 时, } h^7(p_e) > 0. \quad \text{所以当 } 0 \leq p_e < p_e^{71} \text{ 时, 若 } 0 \leq \rho < 1, \text{ 则 } P^{RC*} > P^{NRC*},$$

若 $\rho > 1$, 则 $P^{RC*} < P^{NRC*}$; 当 $p_e > p_e^{71}$ 时, 若 $0 \leq \rho < 1$, 则 $P^{RC*} < P^{NRC*}$, 若 $\rho > 1$, 则 $P^{RC*} > P^{NRC*}$;

当 $p_e = p_e^{71}$ 时, 有 $P^{RC*} = P^{NRC*}$ 。

$$P^{CC*} - P^{NCC*} = \frac{e_0(\rho-1)(2\beta(1+\lambda)p_e^2 + (2\beta^2(1+\lambda) - k\lambda)p_e - k\beta(2-x(2-\theta)))}{B_2 + xk\theta}, \quad \text{记}$$

$$h^8(p_e) = 2\beta(1+\lambda)p_e^2 + (2\beta^2(1+\lambda) - k\lambda)p_e - k\beta(2-x(2-\theta)), \quad \text{显然, } h^8(p_e) \text{ 是关于 } p_e \text{ 的开口向上的一元二次函数, } h^8(p_e) \text{ 的判别式 } \Delta_{h^8(p_e)} = 8k(2-x(2-\theta))\beta^2(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2 > 0,$$

令 $h^8(p_e) = 0$ 解得 $p_e^{81} = \frac{k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda) + \sqrt{8k(2-x(2-\theta))\beta^2(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2}}{4\beta(1+\lambda)} > 0$ 和

$$p_e^{82} = \frac{k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda) - \sqrt{8k(2-x(2-\theta))\beta^2(1+\lambda) + (k\lambda - 2\beta^2(1+\lambda))^2}}{4\beta(1+\lambda)} < 0. \quad \text{此时当 } 0 \leq p_e < p_e^{81} \text{ 时,}$$

$$h^8(p_e) < 0, \quad \text{当 } p_e > p_e^{81} \text{ 时, } h^8(p_e) > 0. \quad \text{所以当 } 0 \leq p_e < p_e^{81} \text{ 时, 若 } 0 \leq \rho < 1, \text{ 则 } P^{CC*} > P^{NCC*},$$

若 $\rho > 1$, 则 $P^{CC*} < P^{NCC*}$; 当 $p_e > p_e^{81}$ 时, 若 $0 \leq \rho < 1$, 则 $P^{CC*} < P^{NCC*}$, 若 $\rho > 1$, 则 $P^{CC*} > P^{NCC*}$;

当 $p_e = p_e^{81}$ 时, 有 $P^{CC*} = P^{NCC*}$ 。

附录 27

$$\text{推论 5-11 的证明: } e^{MC*} - e^{RC*} = \frac{-x(\beta + p_e)\delta^{MC}}{A_2 B_2} < 0; \quad e^{MC*} - e^{CC*} = \frac{-x(1-\theta)(\beta + p_e)\delta^{MC}}{A_2 (B_2 + xk\theta)} < 0;$$

$$e^{RC*} - e^{CC*} = \frac{x\theta(\beta + p_e)\delta^{MC}}{B_2(B_2 + xk\theta)} > 0, \text{ 故 } e^{MC*} < e^{CC*} < e^{RC*}。$$

$$D^{MC*} - D^{RC*} = \frac{-xk\delta^{MC}}{A_2B_2} < 0; \quad D^{MC*} - D^{CC*} = \frac{-xk(1-\theta)\delta^{MC}}{A_2(B_2 + xk\theta)} < 0; \quad D^{RC*} - D^{CC*} = \frac{xk\theta\delta^{MC}}{B_2(B_2 + xk\theta)} > 0,$$

故 $D^{MC*} < D^{CC*} < D^{RC*}$ 。

$$P^{MC*} - P^{RC*} = \frac{x(k - 2\beta(\beta + p_e))\delta^{MC}}{2A_2B_2}, \text{ 当 } k - 2\beta(\beta + p_e) \leq 0, \text{ 即 } p_e \geq \frac{k}{2\beta} - \beta \text{ 时, 有 } P^{MC*} \leq P^{RC*};$$

当 $k - 2\beta(\beta + p_e) > 0$, 即 $0 \leq p_e < \frac{k}{2\beta} - \beta$ 时, 有 $P^{MC*} > P^{RC*}$ 。

$$P^{MC*} - P^{CC*} = \frac{x(1-\theta)(k - 2\beta(\beta + p_e))\delta^{MC}}{2A_2(B_2 + xk\theta)}, \text{ 当 } k - 2\beta(\beta + p_e) \leq 0, \text{ 即 } p_e \geq \frac{k}{2\beta} - \beta \text{ 时, 有}$$

$P^{MC*} \leq P^{CC*}$; 当 $k - 2\beta(\beta + p_e) > 0$, 即 $0 \leq p_e < \frac{k}{2\beta} - \beta$ 时, 有 $P^{MC*} > P^{CC*}$ 。

$$P^{RC*} - P^{CC*} = \frac{-x\theta(k - 2\beta(\beta + p_e))\delta^{MC}}{2B_2(B_2 + xk\theta)}, \text{ 当 } k - 2\beta(\beta + p_e) \leq 0, \text{ 即 } p_e \geq \frac{k}{2\beta} - \beta \text{ 时, 有 } P^{RC*} \geq P^{CC*};$$

当 $k - 2\beta(\beta + p_e) > 0$, 即 $0 \leq p_e < \frac{k}{2\beta} - \beta$ 时, 有 $P^{RC*} < P^{CC*}$ 。综上所述, 若 $p_e \geq \frac{k}{2\beta} - \beta$, 则

$P^{MC*} \leq P^{CC*} \leq P^{RC*}$; 若 $0 \leq p_e < \frac{k}{2\beta} - \beta$, 则 $P^{MC*} > P^{CC*} > P^{RC*}$ 。

攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1] Yunfeng Zhang, Tingting Song, Jingting Ma, Ying Qin. Manufacturer's green financing and CER decisions under the carbon tax policy and capital constraints[J]. Complexity, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1155/1970/6634332>
- [2] 宋婷婷, 张云丰. 考虑消费者渠道和低碳双重偏好的供应链定价和减排决策[J]. 长春理工大学学报(社会科学版), 2023. (已录用)

致 谢

文末搁笔，思绪繁杂。朝来庭下，光阴如箭。始于 2021 年金秋，终于 2024 年盛夏，三年时光，如白驹过隙，已经接近尾声。但这是结束亦是开始。回首三年研究生时光，百感交集。但心中最多的仍是感激，在这一段人生旅程的重要里程碑即将画上句点之际，我满心感激地向那些在我硕士学位求学过程中给予我无限支持与帮助的师朋亲友表达我的深深谢意。

桃李不言，下自成蹊。2017 年秋，初入安徽工程大学，意气风华，满怀希冀。校园之行，幸遇良师。我必须要向我的导师——张云丰教授，致以最诚挚的感谢。何其有幸，得师于您！从研一时期帮助我们修改小论文并投稿，研二时期每周讨论研究进展、把控研究进度，再到研三时倾尽所能的点播与指导毕业论文的撰写。张老师常常为我们牺牲休息时间、工作至深夜。三年的求学之路，不论是传道授业、未来规划还是生活琐事，感谢您的体谅、包容和关怀。回首一条条消息，这些点点滴滴记录着您的心血，也是您在学术研究上对我的辛勤栽培和耐心教导，让我养成了一丝不苟的研学习惯，让我面对未来的考验，能够更加严谨、稳重、乐观、坚韧。除了学业上的帮助之外，我还清楚记得当我家庭发生变故时，您给予我很多鼓励和开导，我很感谢当时您跟我说的那些话，让我有更多动力坚持走下去自己选择的路。感谢张老师的言传身教与无私帮助，让我度过充实而顺利的硕士生涯。

愿岁并谢，与长友兮。诚挚地感谢课题组的师弟师妹们，特别要感谢我的同门，与你们的深入交流与讨论让我受益良多，使我的学术之路更加充实与精彩。同时，也要深深感谢我的舍友，在我困难时伸出援手，在我心情低落时陪伴我倾诉，不仅给予了我物质上的帮助，更是为我的生活增添了无限乐趣和温暖。感谢你们，与我同行，愿我们的友情如同恒星，长久不息。

春晖寸草，难以回报。亲爱的家人，我无法用言语表达我对你们的感激。在我追求学术梦想的道路上，是您们的理解、鼓励和无私的爱让我能够无后顾之忧，勇往直前。你们的支持是我最坚强的后盾，也是我不断前进的动力。我会继续努力，终有一天，我会有能力报答你们！愿我的家人平安健康。

道阻且长，行则将至。我还要感谢可能不够聪明，但始终尽力去坚持、去热爱、去保持乐观的自己。一路走来，煎熬过、崩溃过、迷茫过，但都从未放弃，跌跌撞撞的努力前进着，正是那些刻苦拼搏的日夜，无数自我治愈、自我坚持的时刻，使之成长为现在内心强大、乐观、从容的我自己，也是最好的充满希望的我自己。前路漫漫亦灿灿，愿依旧保持热忱之心，始终努力向上。

凡是过往，皆为序章。始终相信努力与真诚，永远不缺再出发的勇气与信心，奔赴下一片山海。再见了，安徽工程大学！

致谢人：宋婷婷

2024年3月23日