

碳限额下区块链赋能的供应链决策研究

陈晓瑜

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2024年12月23日; 录用日期: 2025年1月14日; 发布日期: 2025年1月24日

摘要

在碳限额政策的背景下, 供应链成员面临平衡碳减排目标与经济效益的挑战。本文基于碳限额政策背景, 构建零售商主导的二级供应链模型, 分析了区块链技术引入前后制造商与零售商的减排与定价决策及经济影响。研究表明, 未引入区块链技术时, 制造商在信息不对称的情况下倾向于谎报碳排放数据以获取更多的碳配额, 从而降低减排成本; 引入区块链技术后, 由于其透明性和不可篡改性, 供应链成员能够准确追踪碳排放数据, 有效解决谎报行为。同时当区块链技术的实施成本低于一定阈值时, 碳减排效果以及供应链各方的整体利润显著提升。

关键词

碳限额, 谎报行为, 区块链技术, 斯塔克尔伯格博弈

Research on Supply Chain Strategies Enabled by Blockchain under the CAP-and-Trade System

Xiaoyu Chen

School of Economics & Management, Tongji University, Shanghai

Received: Dec. 23rd, 2024; accepted: Jan. 14th, 2025; published: Jan. 24th, 2025

Abstract

Under the CAP-and-Trade System policies, members of the supply chain face the challenge of achieving carbon reduction targets while maintaining economic profitability. In the context of CAP-and-Trade System, this paper constructs a two-tier supply chain model dominated by retailers. It analyzes the emission reduction and pricing decisions of manufacturers and retailers, as well as the economic impacts, before and after the introduction of blockchain technology. The findings suggest that, in the absence of blockchain, manufacturers are incentivized to misreport carbon emission data due to information asymmetry, allowing them to acquire additional carbon allowances and

reduce the costs of emissions reductions. However, once blockchain technology is introduced, its transparency and immutability enable accurate tracking of carbon emissions, effectively mitigating misreporting behaviors. Furthermore, when the implementation cost of blockchain technology falls below a certain threshold, both the effectiveness of carbon reduction and the overall profits of supply chain members are significantly enhanced.

Keywords

CAP-and-Trade System, Misreporting, Blockchain Technology, Stackelberg Game

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着工业现代化和经济全球化的快速发展,全球气候变化问题已成为人类社会亟待解决的重大挑战。为实现碳中和目标,各国政府纷纷加强碳排放管理,推动企业采取碳减排行动[1]。碳交易市场作为一种市场化的碳减排机制,通过将碳排放权商品化,促使高排放企业承担额外成本,低排放企业通过出售碳配额获得经济收益,从而激励企业自主减排。2020年中国发布了《碳排放权交易管理办法(试行)》,明确了碳市场的运行规则。2021年,全国碳市场正式启动,并通过优化数据质量管理、调整核算方法、规范数据来源等多方面的措施不断完善其运行机制[2]。截至目前,中国已发展为全球最大的碳交易市场,其在推动企业减排行为、调整产业结构及促进经济增长方面的作用受到广泛关注。

尽管碳交易市场在促进减排和提升供应链绩效方面发挥了重要作用,但其运行过程中仍面临诸多挑战,其中信息不对称问题尤为突出。碳排放数据的透明度不足可能导致企业虚报或隐瞒排放数据,从而削弱市场的效率与公平性[3]。此外,信息不对称还可能误导消费者,增加交易成本,对低碳产品的推广和低碳经济的发展形成制约[4]。为解决这些问题,近年来,区块链技术凭借其去中心化、透明性和不可篡改性等特性,逐渐被应用于供应链管理,尤其是在碳信息管理领域。2023年9月,习近平总书记指出,当前互联网、大数据、云计算、人工智能、区块链等新技术深刻演变,产业数字化、智能化、绿色化转型不断加速,智能产业、数字经济蓬勃发展,极大改变全球要素资源配置方式、产业发展模式和人民生活方式[5]。新兴技术的快速发展,正在深刻重塑全球资源配置方式、产业发展模式和社会生活方式,同时也为推动产业数字化、智能化及绿色化转型提供了新的机遇。

2. 文献综述

国内外对于碳交易市场的供应链策略等研究较为丰富,已有的文献中多专注于不同碳政策、不同行业、供应链成员不同决策模式下的定价减排策略及激励机制。李进等[6]研究了碳限额与交易机制下,供应链在不同决策和竞争强度下的最优减排策略,分析了碳配额和碳价格对供应链减排与盈利的影响。王道平等[7]探讨了供应链成员在内部与外部碳交易市场中的碳配额交易路径选择问题,研究表明内外部碳交易路径的共存可以有效优化供应链的碳减排效益及成员的利润分配。毋博等[8]则关注市场需求和碳交易价格的不确定性,研究了两种碳政策及不同契约形式对供应链碳减排激励机制设计的影响,提出了应对不确定性条件下的优化策略。陈威等[9]以电力供应链为研究对象,分别对祖父法以及基准法两种碳配额分配方式进行讨论。邹清明等[10]考虑产出不确定的情况,研究了贸易信贷与银行信贷下考虑供应商与制造商的双向公平关切的供应链减排与融资策略。张丹露[11]将消费者绿色感知与碳减排水平的动态过

程纳入模型，研究了由制造商、零售商及政府构成的三级供应链。

在研究信息不对称的文献中，针对需求信息不对称的情况，胡晓青等[12]讨论了两种需求信息共享的契约方案，优化双渠道供应链，刘家国等[13]引入零售商公平偏好，研究不同类型信息下零售商公平偏好的影响和供应链成员决策行为。针对成本信息不对称的问题，Wang Miaomiao 等[14]帮助供应链成员更有效地应对不同的碳配额机制下的减排决策，Tian Longmei 等[15]解决了区块链的采用对供应链线上平台定价和企业投资决策的影响。为解决类似信息不对称的情况带来的影响，不少学者开始引入区块链技术以实现信息共享。Yao Cui 等[16]通过分析采购成本透明和订单状态透明，探讨供应链中区块链的引入策略以及如何设计区块链以实现更优的供应链绩效。Baozhuang Niu 等[17]引入区块链识别农产品细菌污染的责任方，帮助供应链各方在污染成本分配上做出更公平的决策，从而缓解因污染责任难以追溯导致的信息不对称问题。Yang Tianjian 等[18]引入区块链解决了供应链中因在增值服务效率和共享合同决策上的不透明性带来的合作效率问题。孙嘉轶等[19]利用区块链解决了供应链中对碳减排率和成本信息不对称的问题，使得企业在碳减排率和利润之间能更有效地平衡。Yu Yugang 等[20]探讨了区块链技术在供应链中应用“智能信用”和需求信息透明化的操作价值，分析了其对零售商和供应商的不同效益及对供应链劳动力需求的溢出效应。

基于上述背景及研究现状，本文以绿色供应链为研究对象，聚焦区块链技术在碳交易市场中的应用，旨在解决碳信息不对称等问题。本研究从三方面展开：第一，探讨碳交易市场中零售商主导的供应链分散决策模式下的减排策略；第二，分析区块链技术对低碳供应链信息透明度的提升作用；第三，研究供应链成员对区块链技术的投资决策及其对供应链绩效的影响。

3. 问题描述与假设

3.1. 问题描述

本文研究了碳限额背景下，由制造商和零售商组成的零售商主导的二级供应链决策行为：零售商首先确定零售价格，制造商根据该定价决定批发价格和碳减排量，以最大化自身利润。政府采用“历史法”分配碳配额，根据制造商的历史排放数据按比例分配碳配额。当制造商碳排放超过配额时，需要购买额外配额；低于配额则可出售剩余配额。因此制造商有动机夸大碳初始排放量，以获取更多配额。区块链技术通过提高信息透明度并降低期间费用，帮助制造商和零售商发布透明的碳排放数据，减少消费者对溯源系统的不信任，优化供应链管理。碳限额背景下的供应链模型如下图 1。

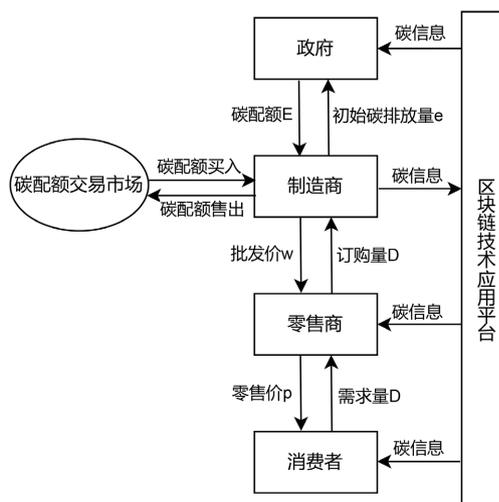


Figure 1. A supply chain structure model with blockchain under the CAP-and-Trade system
图 1. 碳限额背景下引入区块链技术的供应链结构模型

3.2. 基本假设

模型涉及的参数及其描述如表 1 所示。为探讨区块链技术的作用，本文考虑零售商主导的供应链分散决策下引入区块链前后两种情况，其中“ N ”“ B ”分别表示未引入区块链技术和引入区块链技术，“ D ”表示该供应链为分散决策，模型涉及的符号见表 1，基本假设如下：

- 1) 无论是否实施区块链，制造商都存在相同生产成本，为进一步简化模型，本文将生产成本视为 0。
- 2) 假设传统溯源系统的投入成本为 0，企业在生产和销售中存在期间费用 c_M 和 c_R 。当引入区块链技术后，企业期间费用降低，记期间费用优化系数为 γ ，满足 $0 < \gamma \leq 1$ 。
- 3) 假设碳减排投入成本是一次性投入，随单位产品碳减排量 h 的增加而增大，即 $\frac{1}{2}kh^2$ ， k 表示减排努力成本系数。单位产品碳减排量小于单位产品初始碳排放量，即 $h < e$ 。
- 4) 市场需求由低碳产品价格、单位产品碳减排量、消费者对低碳产品的偏好程度与消费者对溯源系统的信任程度共同决定，因此市场需求 $D = a - bp + \theta h - \lambda(1 - z)$ ，其中 $0 < z \leq 1$ 。假设消费者对于价格的敏感系数最高，因此 $b > \theta$ ， $b > \lambda$ 。
- 5) 本文假设初始碳配额分配方法为“历史法”，制造商碳排放总量与产品销量线性相关，低碳减排投资后碳交易成本为 $[(e - h)D - E]t$ ，其中碳交易价格 t 大于 1。

Table 1. Parameters and symbols involved in the supply chain model

表 1. 供应链模型涉及参数符号及说明

符号	说明
a	市场容量参数
z	消费者溯源系统信任水平
θ	消费者对低碳产品的偏好程度
b	价格敏感系数
k	制造商的减排成本系数
c_R	零售商期间成本
c_M	制造商期间成本
γ	区块链对期间费用的影响程度
c_b	区块链技术引入成本
σ	制造商区块链成本分摊系数
λ	溯源水平信任敏感系数
μ	制造商初始碳排放量谎报系数
t	单位碳交易成本
e	单位产品初始碳排放量
E	制造商初始碳配额
w	制造商单位绿色产品的批发价格
p	零售商的销售价格
h	制造商为生产绿色产品付出的单位产品减排量
D	市场需求
π	各参与方的利润
下标 M 、 R	分别表示制造商、零售商
上标 ND 、 BD	分别表示未实施和实施区块链溯源系统下的分散决策

4. 模型建立与分析

4.1. 传统溯源模式下的分散决策模型(ND 模型)

在未引入区块链的情况下，供应链中的参与方仅使用传统的溯源技术，零售商为领导者，制造商为跟随者。斯塔伯格博弈的决策顺序为：1) 零售商首先决策出每单位产品的零售价 p^{ND} 。2) 制造商根据零售商的决策信息确定产品的批发价格 w^{ND} 以及单位产品的减排量 h^{ND} 。令 $p^{ND} = w^{ND} + r^{ND}$ ， r^{ND} 为单位产品利润。供应链中存在信息不对称，制造商会谎报产品的初始碳排放量，谎报系数为 μ 。因此制造商的生产量以及零售商的订购量均为市场需求

$$D^{ND} = a - bp^{ND} + \theta h^{ND} - \lambda(1-z) \quad (1)$$

零售商利润、制造商的公开利润以及实际利润分别为

$$\pi_R^{ND} = (p^{ND} - w^{ND} - c_R)D^{ND} \quad (2)$$

$$\phi_M^{ND} = (w^{ND} - c_M)D^{ND} - \frac{1}{2}kh^{ND2} - ((\mu e - h)D^{ND} - \mu E)t \quad (3)$$

$$\pi_M^{ND} = (w^{ND} - c_M)D^{ND} - \frac{1}{2}kh^{ND2} - ((e - h)D^{ND} - E)t \quad (4)$$

命题 1 在 ND 模型中，制造商和零售商的最优定价和减排决策分别为

$$w^{ND*} = \frac{B(k - t(bt + \theta))}{2A} + (c_M + \mu et) \quad (5)$$

$$h^{ND*} = \frac{B(bt + \theta)}{2A} \quad (6)$$

$$p^{ND*} = \frac{B}{2b} + \frac{B(k - t(bt + \theta))}{2A} + (c_R + c_M + \mu et) \quad (7)$$

此时市场需求为

$$D^{ND*} = \frac{bkB}{2A} \quad (8)$$

制造商和零售商的最优利润分别为

$$\pi_M^{ND*} = Et + \frac{kB(B - 4bet(1 - \mu))}{8A} \quad (9)$$

$$\pi_R^{ND*} = \frac{kB^2}{4A} \quad (10)$$

其中， $A = 2bk - (bt + \theta)^2$ ， $B = a - (1 - z)\lambda - b(c_M + c_R + \mu et)$ 。为确保模型中利润函数关于各决策变量存在唯一最值并且需求非负数，需要满足 $A > 0$ 且 $B > 0$ 。

证明：首先制造商为了使决策行为和谎报信息一致，以公开利润 ϕ_M^{ND} 最大化为目标对单位产品的批发价格 w^{ND} 以及碳减排量 h^{ND} 进行决策。分别求出 ϕ_M^{ND} 关于 w^{ND} 、 h^{ND} 的二阶导数，可得海塞矩阵

$$H_1 = \begin{bmatrix} -2b & -bt + \theta \\ -bt + \theta & -k + 2t\theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

令 $-2b(-k + 2t\theta) > (-bt + \theta)^2$ ，即 $2bk - (bt + \theta)^2 > 0$ ，故 $A > 0$ 时，可得 H_1 是半负定矩阵，即制造商公开利润 ϕ_M^{ND} 是关于 w^{ND} 、 h^{ND} 的凹函数。令一阶导数 $\frac{\partial \phi_M^{ND}}{\partial w^{ND}} = 0$ ， $\frac{\partial \phi_M^{ND}}{\partial h^{ND}} = 0$ ，可得制造商的反应函数为

$$w^{ND}(r^{ND}) = \frac{(k-2t\theta)(a-(1-z)\lambda + b(c_M - r^{ND} + et\mu)) + (bt-\theta)(c_M\theta + t(-a + br^{ND} + \lambda(1-z) + e\theta\mu))}{2bk - (bt + \theta)^2} \quad (12)$$

$$h^{ND}(r^{ND}) = \frac{(bt + \theta)(a - (1-z)\lambda - b(c_M + r^{ND} + et\mu))}{2bk - (bt + \theta)^2} \quad (13)$$

将公式(12)(13)代入零售商利润函数公式(2), 然后求 r^{ND} 的二阶导数, 易证 $\frac{\partial^2 \pi_R^{ND}}{\partial r^{ND^2}} = \frac{-2b^2k}{2bk - (bt + \theta)^2} < 0$,

因此 ϕ_M^{ND} 是关于 r^{ND} 的凹函数。令一阶导数为 0, 得到最优单位产品利润为 r^{ND*} , 进一步可得 w^{ND*} 、 h^{ND*} 、 p^{ND*} 、 D^{ND*} 以及最优利润 π_R^{ND*} 、 π_M^{ND*} 。由于市场需求 $D^{ND*} > 0$, 故 $a - (1-z)\lambda - b(c_M + c_R + \mu et) > 0$, 即 $B > 0$ 。

4.2. 引入区块链技术的分散决策模型(BD 模型)

引入区块链溯源系统的情形下, 一方面供应链的透明度和信任度显著提升, 制造商无法谎报碳信息, 消费者的信任程度大幅提升, 此时 $\mu = 1$, $z = 1$ 。另一方面, 区块链技术降低了供应链成员在生产销售过程中的期间费用, 影响系数为 γ 。假设制造商与零售商共同分担区块链成本, 制造商承担的区块链成本比例为 δ 。斯塔伯格博弈的决策顺序与 ND 模型相同。此时, 制造商的生产量以及零售商的订购量为

$$D^{BD} = a - bp^{BD} + \theta h^{BD} \quad (14)$$

因此, 零售商利润、制造商的利润分别为

$$\pi_R^{BD} = (p^{BD} - w^{BD} - \gamma c_R - (1-\delta)c_b) D^{BD} \quad (15)$$

$$\pi_M^{BD} = (w_{BD} - \gamma c_M - \delta c_b) D^{BD} - \frac{1}{2} kh^{BD^2} - ((e-h)D^{BD} - E)t \quad (16)$$

命题 2 在 BD 模型中, 制造商和零售商的最优定价和减排决策分别为

$$w^{BD*} = \frac{(k-t(bt+\theta))S}{2A} + \gamma c_M + et + \delta c_b \quad (17)$$

$$h^{BD*} = \frac{(bt+\theta)S}{2A} \quad (18)$$

$$p^{BD*} = \frac{S}{2b} + \frac{(k-t(bt+\theta))S}{2A} + \gamma(c_R + c_M) + et + c_b \quad (19)$$

此时市场需求为

$$D^{BD*} = \frac{bkS}{2A} \quad (20)$$

制造商和零售商的最优利润分别为

$$\pi_M^{BD*} = Et + \frac{kS^2}{8A} \quad (21)$$

$$\pi_R^{BD*} = \frac{kS^2}{4A} \quad (22)$$

其中 $A = 2bk - (bt + \theta)^2$, $S = a - b(\gamma(c_M + c_R) + c_b + et)$ 。

证明: 在第二阶段中制造商以自身利润 π_M^{BD} 最大化为目标对单位产品的批发价格 w^{BD} 以及碳减排量

h^{BD} 进行决策。分别求出 π_M^{BD} 关于 w^{BD} 、 h^{BD} 的二阶导数可得海塞矩阵。

$$H_2 = \begin{bmatrix} -2b & -bt + \theta \\ -bt + \theta & -k + 2t\theta \end{bmatrix} \quad (23)$$

由于 $2bk - (bt + \theta)^2 > 0$ ，令一阶导数 $\frac{\partial \pi_M^{BD}}{\partial w^{BD}} = 0$ ， $\frac{\partial \pi_M^{BD}}{\partial h^{BD}} = 0$ ，得到制造商的反应函数并代入零售商利润函数公式(15)，然后求其关于 r^{BD} 的二阶导数，易证 $\frac{\partial^2 \pi_R^{BD}}{\partial r^{BD^2}} < 0$ 。令 $\frac{\partial \pi_R^{BD}}{\partial r^{BD}} = 0$ ，得到最优单位产品利润 r^{BD*} ，进一步可得 w^{BD*} 、 h^{BD*} 、 p^{BD*} 、 D^{BD*} 以及最优利润 π_R^{BD*} 、 π_M^{BD*} 。由于市场需求 $D^{BD*} > 0$ ，故 $a - b(\gamma(c_M + c_R) + c_b + et) > 0$ ，即 $S > 0$ 。

4.3. 均衡结果分析

推论 1 在未引入区块链的模型中，随着碳初始排放量谎报系数的提高，批发价格、销售价格逐渐增大，碳减排量、市场需求以及分散决策的零售商的利润逐渐减小。存在一个阈值

$\mu_0 = \frac{a - b(c_M + c_R - 2et) - (1 - z)\lambda}{3bet}$ ，满足 $\mu_0 > 1$ 。当 $0 < \mu < \mu_0$ 时，制造商利润随谎报系数的增大而增大，当 $\mu_0 < \mu < \frac{a - b(c_M + c_R) - (1 - z)\lambda}{bet}$ 时，制造商利润随谎报系数的增大而减小。

证明：分别计算批发价格、销售价格、碳减排量、市场需求量、供应链成员利润关于谎报系数 μ 的偏导，由于 $bt > \theta$ 且 $A > 0$ ，得 $\frac{\partial w^{ND*}}{\partial \mu} > 0$ ， $\frac{\partial p^{ND*}}{\partial \mu} > 0$ ， $\frac{\partial h^{ND*}}{\partial \mu} < 0$ ， $\frac{\partial D^{ND*}}{\partial \mu} < 0$ ， $\frac{\partial \pi_R^{ND*}}{\partial \mu} < 0$ 。由于市场需求一定大于 0，因此 $D^{ND*} = \frac{bkB}{2A} > 0$ ，解得 $\mu < \frac{a - b(c_M + c_R) - (1 - z)\lambda}{bet}$ 。令 $\frac{\partial \pi_M^{ND*}}{\partial \mu} = \frac{bekt(B - 3bet(\mu - 1))}{4A} = 0$ ，可得 $\mu_0 = \frac{a - b(c_M + c_R - 2et) + (-1 + z)\lambda}{3bet}$ 。由于 $\frac{\partial \pi_M^{ND*}}{\partial \mu}$ 关于 μ 是减函数，所以当 $0 < \mu < \mu_0$ 时， $\frac{\partial \pi_M^{ND*}}{\partial \mu} > 0$ ；当 $\mu_0 \leq \mu < \frac{a - b(c_M + c_R) - (1 - z)\lambda}{bet}$ 时， $\frac{\partial \pi_M^{ND*}}{\partial \mu} \leq 0$ 。

推论 1 表明，制造商通过谎报碳初始排放量获得额外碳配额减少碳交易成本，同时也增加了制造商的批发成本，零售商的销售成本也随之增加。高价格削弱了绿色产品的市场竞争力，使得市场需求量逐步减少，零售商的利润随之下滑。对于制造商而言，在谎报系数较低时，通过谎报获得额外的碳配额显著降低了减排成本和碳交易成本从而提升了利润；然而随着谎报系数进一步提高，市场需求显著降低，制造商的利润空间随之降低。

推论 2 在未引入区块链技术的情况下，制造商为了追求更高的利润，存在谎报碳初始排放量的动机，并且谎报的碳初始排放量高于真实碳信息。

证明：当制造商不谎报碳初始排放量时，谎报因子 $\mu = 1$ 。此时制造商的利润为 $\pi_{M0}^{ND*} = Et + \frac{kB^2}{8A}$ 。有 $\pi_M^{ND*} - \pi_{M0}^{ND*} = \frac{kbet(\mu - 1)(2a - 2(1 - z)\lambda - b(2(c_M + c_R) + et(3\mu - 1)))}{8A}$ 。该函数是一个关于谎报因子 μ 开口向下的二次函数，可以解得 $\mu \in \left[1, \frac{2a - 2b(c_M + c_R) + bet - 2(1 - z)\lambda}{3bet} \right]$ 时， $\pi_M^{ND*} - \pi_{M0}^{ND*} > 0$ ，即制造商谎报碳初始排放量后的利润高于公开真实碳信息的利润。

推论 3 无论是否引入区块链技术，随着消费者绿色偏好度以及溯源系统信任水平的提高，批发价格、

销售价格随之降低, 碳减排量、市场需求量、零售商利润以及制造商利润均随之提高。随着碳减排成本的增大, 批发价格及销售价格随之提高; 碳减排量、市场需求量、零售商利润以及制造商利润随之减小。

证明: 分别计算批发价格、销售价格、碳减排量、市场需求量、供应链成员利润关于消费者绿色偏好系数的偏导, 可得 $\frac{\partial w^{ND*}}{\partial \theta} = \frac{(2k\theta - t(bt + \theta)^2)B}{2A^2}$, $\frac{\partial p^{ND*}}{\partial \theta} = \frac{(2k\theta - t(bt + \theta)^2)B}{2A^2}$, $\frac{\partial h^{ND*}}{\partial \theta} = \frac{(2bk + (bt + \theta)^2)B}{2A^2}$, $\frac{\partial D^{ND*}}{\partial \theta} = \frac{bk(bt + \theta)B}{A^2}$, $\frac{\partial \pi_R^{ND*}}{\partial \theta} = \frac{k(bt + \theta)B^2}{2A^2}$, $\frac{\partial \pi_M^{ND*}}{\partial \theta} = \frac{k(bt + \theta)B(B + 4bet(\mu - 1))}{4A^2}$ 。由 $A > 0$ 得 $(bt + \theta)^2 < 2bk$, 因此 $2k\theta - t(bt + \theta)^2 < 2k(\theta - bt) < 0$ 。又由于 $B > 0$, 由假设(5) (6)可知 $bt > \theta$, 所以 $\frac{\partial w^{ND*}}{\partial \theta} < 0$, $\frac{\partial p^{ND*}}{\partial \theta} < 0$, $\frac{\partial h^{ND*}}{\partial \theta} > 0$, $\frac{\partial D^{ND*}}{\partial \theta} > 0$, $\frac{\partial \pi_R^{ND*}}{\partial \theta} > 0$, $\frac{\partial \pi_M^{ND*}}{\partial \theta} > 0$ 。同理可证其他参数的单调性。

推论 3 表明, 未实施区块链技术时, 消费者对绿色产品的需求会随着绿色偏好和溯源系统信任的增加而增加。需求增长带来的规模效应促使制造商扩大生产, 分摊碳减排固定成本, 降低单位生产成本, 从而使产品的批发与零售价格下降。制造商通过增加碳减排量满足消费者需求, 扩大销售规模, 提升供应链利润。然而, 碳减排成本上升时, 生产成本增加, 价格上调, 价格敏感型消费者退出市场进而降低需求。高减排成本的边际效应抑制制造商减排力度, 削弱消费者购买意愿, 对整体经济效益产生负面影响。引入区块链技术不会改变最优决策变量和利润关于绿色偏好度及碳减排成本的单调性。

推论 4 引入区块链技术后, 随着期间费用影响系数以及区块链成本的提高, 批发价格、销售价格逐渐提高, 碳减排量、市场需求量、零售商利润以及制造商利润随之减小。区块链成本分摊系数只影响制造商的最优批发价格。

证明: 分别计算批发价格、销售价格、碳减排量、市场需求量、供应链成员利润关于期间费用影响系数以及区块链投入成本的偏导, 可得 $\frac{\partial w^{BD*}}{\partial \gamma} > 0$, $\frac{\partial p^{BD*}}{\partial \gamma} > 0$, $\frac{\partial h^{BD*}}{\partial \gamma} > 0$, $\frac{\partial D^{BD*}}{\partial \gamma} > 0$, $\frac{\partial \pi_R^{BD*}}{\partial \gamma} > 0$, $\frac{\partial \pi_M^{BD*}}{\partial \gamma} > 0$; $\frac{\partial w^{BD*}}{\partial c_b} > 0$, $\frac{\partial p^{BD*}}{\partial c_b} > 0$, $\frac{\partial h^{BD*}}{\partial c_b} > 0$, $\frac{\partial D^{BD*}}{\partial c_b} > 0$, $\frac{\partial \pi_R^{BD*}}{\partial c_b} > 0$, $\frac{\partial \pi_M^{BD*}}{\partial c_b} > 0$ 。另外由于 $w^{BD*} = \frac{(k - t(bt + \theta))S}{2A} + \gamma c_M + et + \delta c_b$, 因此只有制造商的最优批发价格受到分摊系数 σ 的影响。

推论 4 表明, 区块链对期间费用的影响程度越小, 区块链投入成本越高, 则参与者面临的期间费用和区块链运营成本越高。制造商与零售商通过提高批发价格以及销售价格以维持利润。高销售价格降低了绿色产品对价格敏感消费者的吸引力, 需求量随之减少, 进一步削弱制造商的减排动力。区块链成本分摊系数直接作用于制造商的成本结构, 对其最优批发价格产生影响, 但不改变零售商的定价策略。

4.4. 区块链溯源系统投入决策分析

引入区块链技术虽然可以减少信息不对称和数据不准确所带来的成本浪费, 但也会产生技术投入成本。企业是否引入区块链技术关键在于经济效益和环境效益的综合评估。从经济效益来看, 若实施区块链能提升制造商与零售商利润, 企业更倾向于引入。从环境效益来看, 企业需评估区块链是否有助于促进碳减排量的提升, 同时增强社会责任形象, 响应环保政策。因此, 制造商需要在实施区块链技术后同时实现单位产品碳减排量以及利润的提升, 零售商仅需要考虑实施区块链技术后实现自身利润的提升。

命题 3 当区块链投入成本满足 $0 < c_b < \min(c_{bM}, c_{bR}, c_{bH})$ 时, 生产商和零售商都会考虑引入区块链技术。此时, 单位产品碳减排量以及制造商和零售商各自的利润同时提升。

$$c_{bM} = \frac{a}{b} - et - \gamma(c_M + c_R) - \frac{1}{b} \sqrt{B(B + 4bet(\mu - 1))} \quad (24)$$

$$c_{bR} = \frac{\lambda(1-z)}{b} + (1-\gamma)(c_M + c_R) + et(\mu-1) \tag{25}$$

$$c_{bH} = \frac{\lambda(1-z)}{b} + (1-\gamma)(c_M + c_R) + et(\mu-1) \tag{26}$$

其中, $\mu \in \left[1, \frac{2a-2b(c_M+c_R)+bet-2(1-z)\lambda}{3bet} \right]$ 。

由命题 3 可以得到分散决策下制造商和零售商投入区块链技术的成本阈值。当区块链溯源系统的成本小于该成本阈值时, 制造商和零售商将选择投入区块链溯源系统。由公式(25)(26)可得 $c_{bR} = c_{bH}$, 因此在实施区块链技术后, 若满足单位产品碳减排量得到提升, 则零售商利润也一定提升。

推论 5 成本阈值与成本优化系数 γ 和溯源系统信任水平 z 为负相关, 成本阈值关于谎报因子 μ 的变化趋势与 c_{bM} 关于谎报因子 μ 的变化趋势一致。

证明: 分别计算三个成本阈值关于谎报因子、期间费用影响系数以及区块链投入成本的偏导, 可得 $\frac{\partial c_{bM}}{\partial \mu} = \frac{-et(B-2bet(\mu-1))}{\sqrt{B(B+4bet(-1+\mu))}}$, $\frac{\partial c_{bM}}{\partial \gamma} < 0$, $\frac{\partial c_{bM}}{\partial z} < 0$; $\frac{\partial c_{bR}}{\partial \mu} > 0$, $\frac{\partial c_{bR}}{\partial \gamma} < 0$, $\frac{\partial c_{bR}}{\partial z} < 0$; $\frac{\partial c_{bH}}{\partial \mu} > 0$, $\frac{\partial c_{bH}}{\partial \gamma} < 0$, $\frac{\partial c_{bH}}{\partial z} < 0$, c_{bM} 、 c_{bR} 、 c_{bH} 皆关于成本优化系数 γ 和溯源系统的信任水平 z 负相关。对于谎报因子 μ , 易证在 $\mu \in \left[1, \frac{2a-2b(c_M+c_R)+bet-2(1-z)\lambda}{3bet} \right]$ 时, $\frac{\partial c_{bM}}{\partial \mu} < \frac{\partial c_{bR}}{\partial \mu}$ 。

由推论 5 可知, 期间费用影响系数越小, 实施区块链技术后减少的运营成本越多, 此时利润越大, 区块链技术的引入成本阈值也就越大。消费者对溯源系统的信任水平越高, 表示区块链技术的引入对于市场影响的程度越小, 此时制造商和零售商实施区块链溯源系统的意愿也就越低, 可以接受的成本阈值就越小。总体而言, 区块链技术引入的成本阈值主要取决于制造商的区块链引入阈值。

5. 算例分析

本节通过数值算例分析各参数对区块链投入成本阈值的影响以及区块链技术引入对各个决策变量以及供应链利润的影响。相关参数设置如下: 市场容量 $a = 500$; 消费者敏感系数分别为价格敏感系数 $b = 6$, 溯源水平信任敏感系数 $\lambda = 5$, 消费者绿色偏好 $\theta = 5$; 制造商及零售商期间费用 $c_M = 16$, $c_R = 10$; 单位产品碳减排成本 $k = 100$, 碳初始排放量 $e = 12$, 碳交易价格 $t = 4$ 。将上述参数代入博弈模型分析。

5.1. 区块链溯源系统投入决策分析

区块链投入成本阈值与谎报因子有关, 令溯源系统信任水平 $z = 0.6$, 两者关系如图 2 所示。随谎报因子的增大, 制造商和零售商的成本阈值呈现出不同的变化趋势。制造商的成本阈值在谎报因子增大时先下降后上升, 而零售商的成本阈值则呈现持续增长的态势。首先, 制造商的谎报行为在短期内可以通过提高碳配额等手段来提升自身的利润。然而, 随着谎报因子超过一定阈值, 市场需求将受到影响, 从而导致制造商的利润逐步下降。这是因为消费者和监管机构对谎报行为的敏感性增强, 导致市场需求减少, 同时提高了对碳排放溯源的要求, 从而影响了制造商的利润空间。其次, 零售商的成本阈值随着谎报因子的增加逐渐上升。这是因为制造商的谎报行为直接威胁到零售商的盈利能力。由于谎报行为对产品质量和供应链透明度的影响, 零售商面临较高的市场风险, 尤其是在消费者对产品信息的信任度降低时。为了规避这些风险, 零售商更倾向于投入区块链技术, 以提升供应链的透明度和信任度, 从而抑制谎报行为对利润的负面影响。由图 2 可知在任一谎报因子下, 制造商的成本阈值始终低于零售商的成本

阈值, 这意味着整个供应链是否能投入区块链溯源服务, 最终取决于制造商接受的区块链成本。如果制造商能够预见到谎报带来的负面后果, 并权衡区块链投资的成本效益, 他们更可能参与到区块链溯源系统的建设中。因此, 区块链投入的可行性不仅仅取决于初期投入成本, 还受到市场参与者行为模式的影响。对于零售商来说, 区块链是提升供应链透明度和减少风险的有效工具, 而对于制造商来说, 如何平衡短期利益与长期投入的回报, 将成为决定是否采用区块链技术的关键因素。

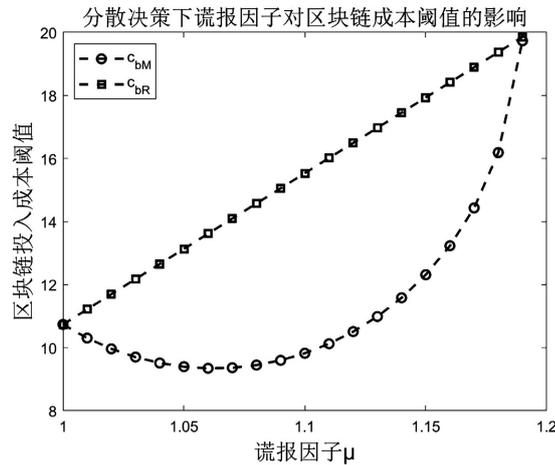


Figure 2. Impact of the misreporting factor on the threshold of blockchain costs
图 2. 谎报因子对区块链投入成本阈值的影响

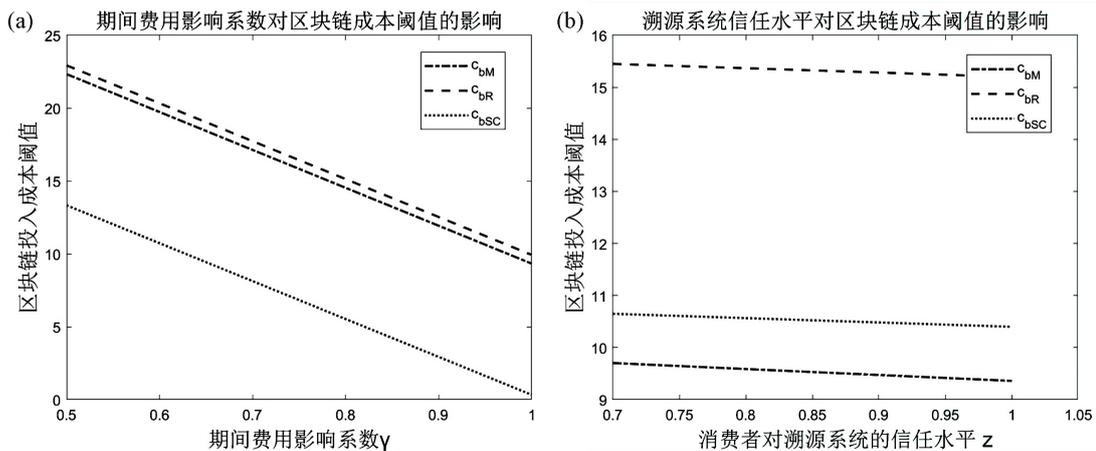


Figure 3. Impact of periodic cost factor and system trust level on the threshold of blockchain costs
图 3. 期间费用影响系数及溯源系统信任水平对区块链投入成本阈值的影响

令谎报因子 $\mu = 1.1$, 再分别令 $z = 0.6$, $\gamma = 0.6$, 作出如图 3(a), 图 3(b)所示的期间费用影响系数、溯源系统信任水平与区块链成本阈值的关系图, 可见两参数与区块链溯源系统投入成本阈值均为线性负相关。期间费用影响系数越大, 消费者对现有溯源系统越信任, 实施区块链溯源系统的意愿就越低, 供应链成员能够接受的成本阈值就越小。期间费用影响系数代表了在供应链中, 由于溯源系统带来的各项费用(如运营成本、技术支持费用等)对制造商和零售商决策的影响。当消费者对现有溯源系统的信任水平较高时, 供应链成员认为现有的溯源机制已经足够透明和可靠, 因此, 他们不愿意承担额外的区块链技术投入成本。这种心理和行为模式的根源在于“信任经济”理论, 即在信任较高的环境下, 参与方倾向于减少不必要的投资, 从而降低了溯源系统的成本接受阈值。同时, 溯源系统的信任水平也直接影响区

区块链技术的实施意愿。当消费者对现有供应链透明度和信息真实性已经具备较高信任时，即便引入区块链技术能够进一步提高溯源精度，其带来的额外成本也未必能够获得市场的广泛接受。因此，在此情境下，区块链溯源系统的成本接受阈值较低。

此外，在期间费用影响系数和溯源系统的信用水平任一取值下，都有 $c_{bM} < c_{bR}$ 。因此在供应链中，当 $c_b < c_{bM}$ 时，制造商和零售商同时投入区块链溯源系统。在此时，区块链的透明度和信任效应能够为供应链带来显著的价值提升，尽管投入成本较高，但其带来的长期效益(如减少欺诈、提升品牌信任等)足以覆盖短期成本，促使各方参与。区块链溯源系统的成功推广需要通过提升信任机制和降低实施成本，最终实现供应链各方的共同受益。

5.2. 区块链溯源系统引入的影响分析

引入区块链溯源技术前，令溯源系统信任水平 $z = 0.6$ ，作出谎报因子与供应链成员利润的关系图。由图 4 可知，对于制造商而言，由于谎报碳初始排放量可以获得额外的碳配额，因此随着谎报因子的增大，制造商利润首先会呈现上升的趋势。然而，随着谎报因子的持续增大，制造商的销售价格和批发价格会随之上涨。这一过程中，价格的提高逐渐影响到市场需求，特别是消费者对高价产品的需求敏感度增加，从而导致需求下降。此时，制造商的利润开始出现下降趋势，表明过度的谎报行为最终会通过抑制市场需求，反作用于制造商自身的盈利能力。对于零售商而言，由于制造商的谎报行为导致了市场需求的下降，零售商面临的主要挑战是销售量的持续下滑。零售商的利润主要依赖于销售数量和单品的价格，在制造商通过提高价格而减少市场需求的情况下，零售商的利润不断下降。此外，零售商通常缺乏直接控制碳排放和价格定价的能力，因此只能被动地受到制造商决策的影响。随着市场需求逐渐降低，零售商不得不调整其定价策略和库存管理，但这些措施往往不足以完全弥补因需求下降带来的利润损失。从供应链整体角度来看，制造商和零售商之间的博弈凸显了信息不对称和市场信任的核心问题。制造商通过谎报碳排放量来获取短期利益，虽然这在初期看似有利于其利润增长，但其长期效果是通过价格上涨影响市场需求，最终损害整个供应链的效益。而零售商则在这一过程中处于相对弱势地位，无法有效控制制造商的行为，导致其长期利润受损。

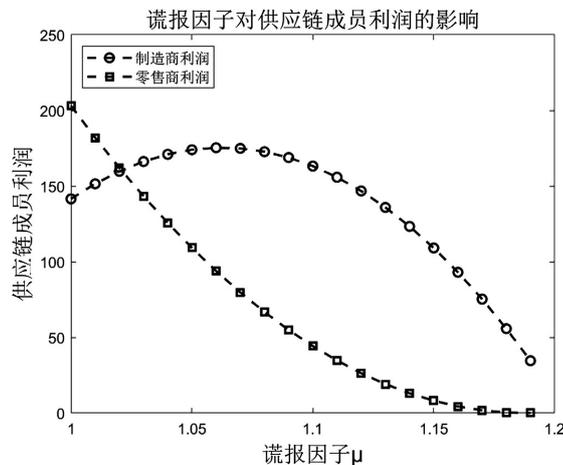


Figure 4. Impact of the misreporting factor on supply chain profit

图 4. 谎报因子对供应链利润的影响

区块链技术的引入提高了供应链透明度和信任度，但其成本增加对决策变量和市场需求产生负面影响。令期间费用影响系数 $\gamma = 0.6$ ，如图 5(a)所示，引入区块链后，批发和销售价格均上升，这一现象源于

区块链技术所带来的供应链成本增加。区块链技术通过提高供应链的透明度和追溯能力，虽然可以减少信息不对称和降低潜在的信任成本，但其引入需要一定的技术投资和运营维护费用。这些额外的成本在一定程度上转嫁到供应链的各个环节，首先表现为制造商通过提高批发价格来转移部分成本。为了保持利润，制造商不仅提高批发价格，还可能通过减少碳减排量来降低自身的运营成本。这一过程中，制造商选择在某种程度上牺牲环保效益以弥补增加的区块链成本。零售商为维持利润，将批发价格上涨传导至销售价格，从而抑制市场需求。批发价格仅受区块链成本分担系数的影响。图 5(b)显示，随着制造商成本分担系数增加，制造商将区块链成本转嫁到批发价格中，导致批发价格随成本分担系数的上升而增加。

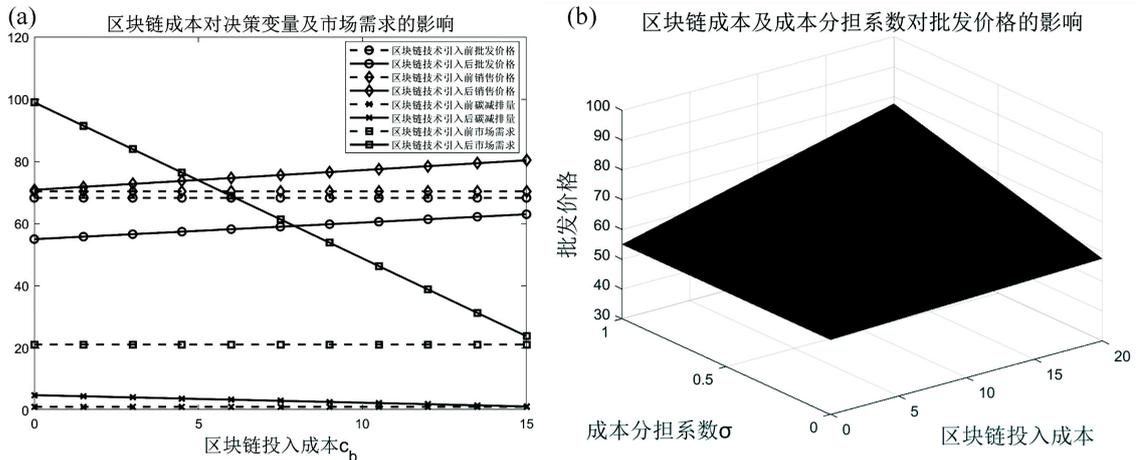


Figure 5. Impact of the blockchain costs and cost sharing coefficient on decision variables and market demand
图 5. 区块链投入成本及成本分担系数对决策变量及市场需求的影响

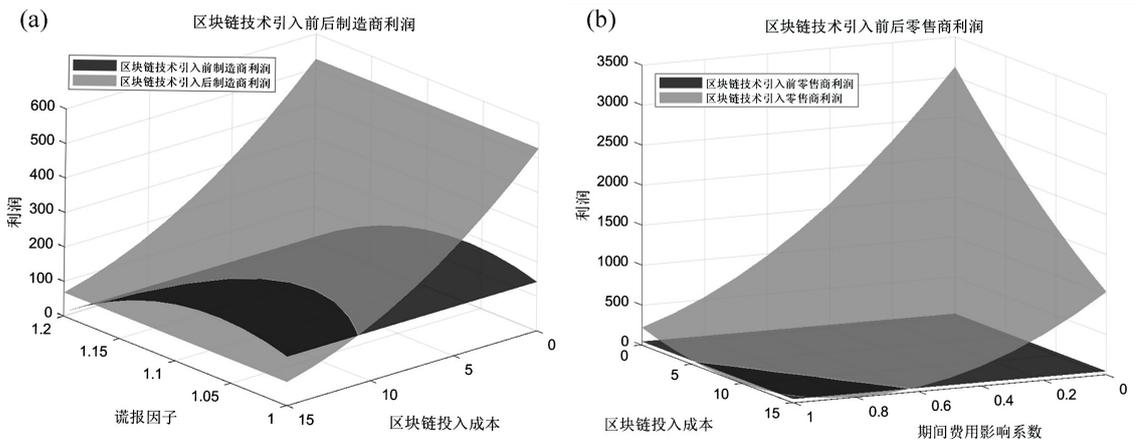


Figure 6. Profits of manufacturers and retailers before and after the introduction of blockchain
图 6. 区块链技术引入前后制造商及零售商利润

图 6 展示了区块链技术引入前后制造商和零售商利润的变化。可见，引入区块链后，当区块链投入成本较小时，制造商以及零售商利润显著高于引入前利润。这一变化反映了区块链技术对供应链透明度和效率的提升作用。通过引入区块链，供应链各环节的信息流动更加顺畅，减少了信息不对称和冗余成本，从而推动了整体利润的增长。图中引入前后两个曲面的交线即为制造商与零售商引入区块链技术的阈值。由图可见在同一谎报因子下，制造商对于区块链技术的引入阈值更低，符合命题 3 结论。总体而言，区块链技术能提高供应链利润空间，然而，随着成本的上升，区块链技术的净效益逐渐减少，最终

达到一定的利润阈值，超过此成本后，引入区块链不再是一个有利的选择。

6. 结论

本文研究了由制造商和零售商组成的二级供应链结构。在碳限额的背景下，构建了以零售商为主导的二级供应链是否引入区块链技术的两种博弈模型。同时对区块链技术的引入阈值进行分析，并研究了引入区块链溯源系统对企业定价、减排决策和利润的影响。

研究表明，在未引入区块链溯源系统的情况下，制造商因追求利润最大化而存在谎报碳初始排放量的动机。引入区块链溯源系统后，制造商谎报排放量的问题能够得到有效解决。同时，在区块链成本满足特定阈值的条件下，供应链成员的整体利润可显著提升。区块链成本阈值主要受制造商引入区块链成本阈值的限制，若区块链技术的引入能够带来制造商利润的增加，则必然会促进零售商利润以及碳减排量的提升。然而，随着区块链溯源成本的上升，供应链成员的利润空间可能受到一定影响。

根据以上研究内容可得到启示：(1) 制造商应在评估成本和收益的基础上，积极引入区块链溯源系统，以解决碳排放量信息不透明的问题，并避免因谎报排放量而可能带来的声誉和法律风险。(2) 零售商应与制造商加强协作，共同承担区块链溯源系统的部署和运行成本，以提升供应链整体的经济效益和环境效益。(3) 供应链成员应在引入区块链技术前，充分评估其成本阈值和潜在收益，确保技术投入能够带来显著的经济效益和环境效益，更好地平衡环境责任与经济利益，在碳限额政策下实现可持续发展。

参考文献

- [1] 陈云. 全球气候变化背景下“双碳”战略与经济发展对立论的批判及其重构[J]. 当代经济管理, 2023, 45(2): 17-24.
- [2] 杜建国. 我国全面启动碳交易市场[J]. 生态经济, 2018, 34(3): 10-13.
- [3] 杨磊, 郑晨诗, 纪静娜. 碳信息不对称下的供应链谎报决策与协调研究[J]. 中国管理科学, 2016, 24(4): 111-120.
- [4] 盛光华, 解芳. 中国消费者绿色购买行为的心理特征研究[J]. 社会科学战线, 2019(3): 74-82.
- [5] 丁洁, 童元松, 王光伟. 区块链赋能绿色供应链金融发展的机制与路径研究[J]. 西南金融, 2023(10): 31-41.
- [6] 李进, 江赫奇, 丁圣琪, 等. 碳限额与交易机制下竞争供应链减排策略与政策设计[J/OL]. 中国管理科学: 1-14. <http://www.zggkx.com/CN/abstract/abstract19112.shtml>, 2024-11-27.
- [7] 王道平, 殷悦, 朱梦影. 基于不同碳配额交易路径的供应链减排决策研究[J]. 运筹与管理, 2024, 33(5): 35-41.
- [8] 毋博, 周建亨. 需求和碳交易价格不确定性下的供应链碳减排激励[J/OL]. 中国管理科学: 1-15. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.2686>, 2024-11-10.
- [9] 陈威, 彭皓, 黄义, 等. 碳配额与区块链情景下的电力供应链低碳投资策略[J/OL]. 系统管理学报: 1-30. <https://link.cnki.net/urlid/31.1977.n.20241009.1308.002>, 2024-11-27.
- [10] 邹清明, 刘春, 曹裕. 碳交易机制下考虑公平关切产出不确定的低碳供应链减排与融资策略研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(9): 248-259.
- [11] 张丹露, 李峰, 梁樑, 等. 碳交易背景下考虑消费者动态绿色感知的碳减排决策研究[J/OL]. 中国管理科学: 1-23. <http://www.zggkx.com/CN/abstract/abstract19216.shtml>, 2024-11-27.
- [12] 胡晓青, 蔡建湖, 孙海宁, 等. 需求信息不对称背景下双渠道供应链信息甄别模型[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(1): 379-395.
- [13] 刘家国, 张鑫, 李健. 需求不确定环境下零售商公平偏好机制与行为策略研究[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(7): 1794-1805.
- [14] Wang, M., Wu, J., Chen, X. and Zhu, X. (2023) Grandfathering or Benchmarking? The Performance of Implementing Blockchain Technology in a Low-Carbon Supply Chain. *Energy*, **284**, Article ID: 128691. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128691>
- [15] Tian, L. and Hu, B. (2023) The Impacts of Blockchain Adoption on Pricing and Efforts Decisions in Online Game Supply Chains with Information Asymmetry. *International Journal of Production Economics*, **266**, Article ID: 109030. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.109030>
- [16] Cui, Y., Gaur, V. and Liu, J. (2024) Supply Chain Transparency and Blockchain Design. *Management Science*, **70**, 3245-

-
3263. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2023.4851>
- [17] Niu, B., Shen, Z. and Xie, F. (2021) The Value of Blockchain and Agricultural Supply Chain Parties' Participation Confronting Random Bacteria Pollution. *Journal of Cleaner Production*, **319**, Article ID: 128579. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128579>
- [18] Yang, T., Li, C., Yue, X. and Zhang, B. (2022) Decisions for Blockchain Adoption and Information Sharing in a Low Carbon Supply Chain. *Mathematics*, **10**, Article No. 2233. <https://doi.org/10.3390/math10132233>
- [19] 孙嘉轶, 路阳阳, 滕春贤. 区块链技术对低碳供应链合作策略影响研究[J/OL]. 中国管理科学: 1-15. <http://www.zggkx.com/CN/abstract/abstract18736.shtml>, 2024-11-27.
- [20] Yu, Y., Luo, Y. and Shi, Y. (2022) Adoption of Blockchain Technology in a Two-Stage Supply Chain: Spillover Effect on Workforce. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **161**, Article ID: 102685. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102685>