

不同激励契约下嵌入区块链的供应链碳减排与定价决策

林强^{1,2}, 刘名武^{1,3*}, 邹梓琛¹

(1.重庆交通大学 经济与管理学院, 重庆 400074;

2.重庆第二师范学院 经济与工商管理学院, 重庆 400067;

3.重庆口岸物流管理与航运经济研究中心, 重庆 400074)

摘要: 制造商利用区块链技术记录和传递产品碳减排信息将提升消费者对低碳产品的信任和消费偏好。本文将区块链的技术效应特征嵌入低碳供应链决策模型, 研究零售商提供的不同激励契约下制造商实施区块链对碳减排、定价策略及企业利润的影响。研究表明: 制造商实施区块链后的产品批发价格在无激励契约和成本分担契约下大于未实施区块链情形, 但在收益共享契约下小于未实施区块链情形。制造商实施区块链后的产品零售价格在不同激励契约下均大于未实施区块链情形。无论制造商是否实施区块链, 单位产品碳减排量在收益共享契约下最大, 而产品批发价格和零售价格在收益共享契约下最小。仅当区块链应用成本小于一定阈值时, 制造商实施区块链才能够提升单位产品碳减排量和自身利润。制造商实施区块链的成本条件阈值在收益共享契约下最大, 在无激励契约下最小。制造商实施区块链若能改善自身利润, 则一定能够改善零售商利润。消费者低碳偏好与价格敏感程度之间的关系影响供应链碳减排、定价策略以及制造商实施区块链的成本条件。

关键词: 低碳供应链; 碳减排; 区块链; 成本分担契约; 收益共享契约

中图分类号: F274

文献标识码: A

Carbon emission reduction and pricing decisions of supply chain embedded in blockchain under different incentive contracts

LIN Qiang^{1,2}, LIU Mingwu^{1,3*}, ZOU Zichen¹

(1. School of Economics and Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of Economics and Business Administration, Chongqing University of Education, Chongqing 400067, China;

3. Research Center of Port Logistics Management and Shipping Economics, Chongqing 400074, China)

Abstract: Blockchain adoption by manufacturers to record and transmit carbon emission reduction information will increase consumers' trust and consumption preference for low-carbon products. In this

paper, the technical effect characteristics of blockchain are embedded in the decision-making model of

收稿日期: 2022-12-26; 修订日期: 2023-03-19。Received 26 Dec. 2022; accepted 19 Mar. 2023.

基金项目: 重庆市教委人文社会科学研究资助项目(22SKGH460); 重庆市社会科学规划资助项目(2020YBGL68)。

Foundation items: Project supported by the Chongqing Municipal Education Commission Humanities and Social Science Research Foundation, China(No.22SKGH460), and the Chongqing Municipal Social Science Planning, China(No.2020YBGL68).

low-carbon supply chain, and the impact of manufacturers' implementation of blockchain on carbon emission reduction, pricing strategy and corporate profits under different incentive contracts provided by retailers is studied. The results show that the wholesale price in blockchain adoption scenarios is higher than that without blockchain under no incentive contract and cost-sharing contract, but smaller than that without blockchain under the revenue-sharing contract. However, the retail price with the adoption of blockchain is higher than that without blockchain in all cases. Regardless of whether the manufacturer implements blockchain or not, the carbon emission reduction level is the largest, while the wholesale and retail prices are the smallest under the revenue-sharing contract. Only when the cost of blockchain application is less than a certain threshold, the adoption of blockchain can improve the carbon emission reduction level and manufacturers' profit. The cost threshold for manufacturers to implement blockchain is maximum under the revenue-sharing contract and minimum in the absence of incentive contract. If blockchain adoption by manufacturers improves their own profits, it will certainly improve retailers' profits. The relationship between low-carbon preference and price sensitivity of consumers affects carbon emission reduction level, pricing strategies, and the cost conditions for manufacturers to implement blockchain.

Keywords: low-carbon supply chain; carbon emission reduction; blockchain; cost-sharing contract; revenue-sharing contract

0 引言

党的二十大报告指出，推动经济社会发展绿色化、低碳化是实现高质量发展的关键环节。2022年8月，工业和信息化部、国家发展改革委、生态环境部印发《工业领域碳达峰实施方案》，明确提出构建绿色低碳供应链。绿色低碳转型成为制造企业高质量发展的必由之路。然而，制造企业在低碳转型中面临碳减排成本高和消费者对低碳产品信任不充分双重压力。针对制造商碳减排成本高的问题，零售商利用成本分担或收益共享等激励契约能够有效缓解制造商成本压力，激励制造商积极开展碳减排，并提升供应链整体绩效^[1]。针对消费者对低碳产品信任不充分问题，随着数字化技术的发展，制造商可采用区块链技术记录和传递产品碳减排信息，进而增强消费者对低碳产品的信任和偏好^[2, 3]。区块链作为一种分布式去中心化技术，能够有效解决多边信息共享问题，具有数据不可篡改、可溯源、建立信任等优势^[4]。诸如 eBay、天猫国际、京东等跨境电商平台均采用区块链进行产品溯源，建立客户信任并改善产品质量形象。区块链的技术特征及优势使其在促进企业碳减排方面具有较大潜力^[5]。例如，区块链公司 Circulor 为全球高性能电动汽车品牌 Polestar 提供区块链解决

方案以跟踪供应链全过程的碳排放数据。深圳排放权交易所与中国能源区块链实验室共建基于区块链的绿色碳减排资产数字化交易平台以激励企业节能减排。但是，制造商实施区块链将进一步增加自身成本压力，成为制造商实施区块链的主要障碍之一^[6]。制造商实施区块链如何影响供应链碳减排与定价策略？制造商实施区块链的成本条件是什么？零售商的激励行为如何影响制造商区块链投资策略？在区块链赋能制造业低碳转型背景下，研究以上问题具有重要的理论与实践意义。

与本文密切相关的研究主要包括两个方面：一是供应链合作碳减排决策研究。供应链企业间常采用激励契约、纵向持股以及与节能服务公司合作等方式优化供应链碳减排与企业绩效^[1]。本文属于激励契约视角下供应链合作碳减排决策研究。在这一细分研究领域，程粟粟和张帆^[7]在罚款分担契约下研究了供应链减排技术选择策略。杨惠霄和欧锦文^[8]在碳税政策下研究了收益共享与谈判权力对供应链碳减排决策的影响。崔春岳等^[9]在碳交易机制下设计了能够实现两阶段供应链协调的收益共享契约机制。刘振等^[10]在碳交易机制下研究了资金约束型制造商与低碳服务商之间收益共享契约的达成条件。Wang 等^[11]基于制造商单独开展碳减排、制造商和零售商同时开展碳减排两种情形，对比分析了单向成本分担契约与双向成本分担契约对供应链决策及利润的影响。Li 等^[12]在低碳制造商主导下对比分析了零售商提供的成本分担与收益共享契约对供应链决策及利润的影响。Yang 等^[13]基于碳税政策、Liu 等^[14]从不同主导力量视角进一步研究了零售商提供的成本分担和收益共享契约下供应链碳减排决策问题。上述文献研究表明，供应链企业间通过构建合适的激励契约能够优化碳减排决策和企业绩效。但现有文献还存在两点不足：一是均假设消费者完全信任低碳产品，缺乏研究消费者对低碳产品信任度对供应链决策的影响。消费者可能因为不完全掌握或不便于验证产品碳减排信息而对低碳产品产生质疑并削弱低碳产品市场需求，进而影响企业决策。二是未在供应链激励契约下探讨区块链对供应链碳减排与定价策略的影响。以上两个方面正是本文要解决的问题。

二是嵌入区块链的供应链决策研究。区块链能够有效解决供应链管理中信息共享、信息溯源与信任建立等诸多痛点问题^[15]。越来越多的文献围绕供应链透明度^[16]、供应链安全和弹性^[17]、可持续供应链^[18]以及供应链决策优化^[19]等方面探讨区块链赋能下的供应链管理问题。本文属于区块链赋能供应链决策优化方面的研究。学者们将区块链在产品信息披露、溯源与认证等方面的效用特征嵌入供应链决策模型，基于不同运作场景研究区块链对供应链决策的影响及区块链投资决策问题。Choi 等^[20]研究了区块链改善产品数据质量视角下时装供应链订货决策问题。Liu 等^[21]基于渠道竞争背景研究了区块链技术下生鲜供应链销售模式选择问题。谭春桥等^[22]研究了区块链赋能疫苗信息溯源下疫苗供应链定价策略问题。刘亮和李斧头^[23]研究了具有风险规避特征零售商的区块链投资决策与生

鲜供应链协调问题。胡韩莉等^[24]研究了强弱品牌竞争下区块链对产品质量与定价策略的影响以及区块链采纳策略。Niu 等^[25]在税收差异下研究了拥有直销渠道的跨国公司参与跨境电商平台区块链的条件。Shen 等^[26]研究了品牌公司利用区块链打击仿冒者情形下的均衡策略以及区块链使品牌公司受益的条件。Ji 等^[27]在制造商竞争且存在区块链技术敏感消费者情形下研究了区块链投资决策问题。上述文献没有探讨不同激励契约下区块链对供应链成员决策的差异化影响，也未涉及供应链碳减排决策问题。

区块链能够有效解决消费者对低碳产品信任不充分问题，并将在促进制造业绿色低碳发展和供应链绿色低碳转型方面发挥积极作用^[28]。制造商实施区块链在提高消费者对低碳产品信任度的同时也将影响供应链碳减排和定价策略。目前，仅有少量文献结合消费者态度和区块链技术应用双重视角研究区块链对低碳供应链决策的影响。张令荣等^[29]探讨了区块链技术下政府对低碳供应链的最优补贴策略。Xu 和 Duan^[30]研究了政府补贴对绿色供应链决策的影响及制造商投资区块链的条件。Jiang 和 Liu^[31]研究了不同渠道模式下供应链碳减排和区块链投资的联合策略。Li 等^[32]研究了区块链和公平偏好在可持续供应链绿色投资决策中的相互作用。Xu 等^[33]在渠道竞争下研究表明，制造商实施区块链能够改善产品绿色度并促进供应链协调，但他们考虑的是利用区块链改善消费者低碳偏好水平（而非消费者对低碳产品的信任度），且模型中没有考虑区块链应用成本。林强等^[34]在批发价格契约下研究了区块链对绿色供应链决策的影响，并从价值增值和潜在市场规模削弱程度视角探讨了绿色供应链实施区块链的条件。上述文献大多基于渠道竞争、政府补贴等视角探讨区块链对绿色或低碳供应链决策的影响，没有涉及供应链企业利用激励契约进行合作减排问题。与上述文献不同，本文侧重从不同激励契约视角研究区块链对供应链碳减排与定价策略的差异化影响。

综上所述，本文研究嵌入区块链的供应链碳减排与定价策略问题，对比分析不同激励契约下制造商实施区块链对碳减排、定价策略及企业利润的差异化影响。本文的创新之处：一是定量分析了消费者对低碳产品的质疑对供应链决策及利润的影响；二是对比分析不同激励契约下区块链对供应链碳减排与定价策略的差异化影响；三是进一步分析制造商实施区块链的成本条件。本文研究能够为企业在区块链技术环境下优化碳减排和定价策略以及区块链投资决策提供理论借鉴。

1 模型描述与假设

建立一个制造商和一个零售商组成的两级低碳供应链决策模型，主要考虑制造商自主开展碳减排决策。假设消费者是低碳偏好的且愿意为低碳产品支付更高的价格。消费者由于无法准确掌握并核实制造商真实的碳减排信息，因而不完全信任低碳产品。为增加消费者对低碳产品的信任和偏

好，制造商利用区块链记录和传递产品碳减排信息。制造商作为供应链主导者先决定单位产品碳减排量 e 和批发价格 w ，零售商在观察到制造商决策后确定产品零售价格 p 。制造商实施区块链不影响产品单位生产成本及销售成本，参考文献[33, 34]，为简化模型计算，假设制造商未实施与实施区块链两种情形下的生产成本和销售成本都为 0。模型进一步假设如下：

(1) 区块链应用成本。制造商实施区块链将产生额外的技术应用成本，包括基础设施设备的投入成本、人力成本等。参考文献[25, 34]对区块链成本的刻画，假设制造商单位产品区块链应用成本为 c 。

(2) 碳减排成本。制造商碳减排成本与单位产品碳减排量和成本系数有关。参考文献[12, 32]，假设制造商碳减排成本为 $C(e) = \frac{1}{2}he^2$ ，其中 h 为碳减排成本系数，代表特定的技术经济特征。

(3) 低碳产品市场需求函数。遵循现有文献普遍做法，假设低碳产品市场需求与零售价格 p 、单位产品碳减排量 e 和消费者低碳偏好程度 k 线性相关^[12, 31, 34]。消费者低碳偏好程度表明单位产品碳减排量增加 1 个单位时低碳产品需求的增加量，该增加量是消费者确认单位产品碳减排量为真时的结果。如果消费者怀疑制造商单位产品碳减排量的真实性，那么产品需求的增加量则介于 $0-k$ 之间。因此，假设制造商实施区块链后的市场需求函数为 $D^B = a - bp + ke$ ，制造商未实施区块链时的市场需求函数为 $D^N = a - bp + k(1-\gamma)e$ 。其中， a 为产品潜在市场规模， b 为产品价格弹性系数， γ 为消费者对单位产品碳减排量的质疑程度。

(4) 供应链激励契约。制造商开展碳减排和实施区块链对零售商均有正向溢出效应。为激励制造商积极开展碳减排和实施区块链，零售商可向制造商提供成本分担或收益共享两种激励契约。成本分担契约下，零售商分担制造商碳减排和区块链应用成本的比例为 ϕ ；收益共享契约下，零售商分享给制造商的收益比例为 λ 。全文模型符号及说明见表 1。

表 1 模型符号及说明

符号	说明
w	产品批发价格
e	单位产品碳减排量
p	产品零售价格
D^N	制造商未实施区块链情形下低碳产品市场需求函数
D^B	制造商实施区块链情形下低碳产品市场需求函数
c	制造商单位产品区块链应用成本
γ	制造商未实施区块链时消费者对单位产品碳减排量的质疑程度
a	产品潜在市场规模
b	产品价格弹性系数
k	消费者低碳偏好程度
h	制造商碳减排成本系数

ϕ	成本分担契约下零售商分担制造商成本的比例
λ	收益共享契约下零售商分享给制造商的收益比例
π_m	制造商的利润函数
π_r	零售商的利润函数
上标 NN、NC、NR	分别表示制造商未实施区块链且无激励契约、成本分担契约、收益共享契约情形
上标 BN、BC、BR	分别表示制造商实施区块链且无激励契约、成本分担契约、收益共享契约情形

2 制造商未实施区块链情形下的决策

2.1 无激励契约 (NN 模型)

该情形下制造商仅投资碳减排技术并承担全部碳减排成本。制造商的利润函数为

$$\pi_m^{NN} = wD^N - \frac{1}{2}he^2 \quad (1)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_r^{NN} = (p-w)D^N \quad (2)$$

制造商和零售商的利润函数关于各自决策变量的二阶导数均为负，可判定二者均存在唯一均衡策略，如定理 1。

定理 1 制造商未实施区块链且无激励契约情形下，制造商批发价格为 $w^{NN*} = \frac{2ah}{4bh - k^2(1-\gamma)^2}$ 、单位产品碳减排量为 $e^{NN*} = \frac{ak(1-\gamma)}{4bh - k^2(1-\gamma)^2}$ 、利润为 $\pi_m^{NN*} = \frac{a^2h}{2[4bh - k^2(1-\gamma)^2]}$ ；产品市场需求为 $D^{NN*} = \frac{abh}{4bh - k^2(1-\gamma)^2}$ ；零售商零售价格为 $p^{NN*} = \frac{3ah}{4bh - k^2(1-\gamma)^2}$ 、利润为 $\pi_r^{NN*} = \frac{a^2bh^2}{[4bh - k^2(1-\gamma)^2]^2}$ 。

性质 1 制造商未实施区块链且无激励契约情形下，消费者对单位产品碳减排量质疑程度 γ 对供应链均衡结果的影响有：

$$\frac{\partial e^{NN*}}{\partial \gamma} < 0, \quad \frac{\partial w^{NN*}}{\partial \gamma} < 0, \quad \frac{\partial p^{NN*}}{\partial \gamma} < 0, \quad \frac{\partial D^{NN*}}{\partial \gamma} < 0, \quad \frac{\partial \pi_m^{NN*}}{\partial \gamma} < 0, \quad \frac{\partial \pi_r^{NN*}}{\partial \gamma} < 0。$$

在制造商未实施区块链且无激励契约下，制造商单位产品碳减排量和批发价格、零售商零售价格、低碳产品市场需求以及制造商和零售商利润均随着消费者对单位产品碳减排量质疑程度的增大而减小。因此，低碳供应链有动力通过实施区块链增加消费者对低碳产品的信任水平。当零售商提供成本分担或收益共享契约时，消费者质疑对供应链均衡结果的影响效应保持不变，下文不再赘述。

2.2 成本分担契约 (NC 模型)

该情形下，零售商主动分担制造商部分碳减排成本以激励制造商积极开展碳减排。决策顺序是：

零售商先确定成本分担比例，制造商随后确定单位产品碳减排量和批发价格，零售商最后确定零售价格。制造商的利润函数为

$$\pi_m^{NC} = wD^N - \frac{1}{2}(1-\phi)he^2 \quad (3)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_r^{NC} = (p-w)D^N - \frac{1}{2}\phi he^2 \quad (4)$$

定理 2 制造商未实施区块链且零售商提供成本分担契约情形下，制造商批发价格为

$$w^{NC*} = \frac{a[8bh - k^2(1-\gamma)^2]}{2b[8bh - 3k^2(1-\gamma)^2]}、单位产品碳减排量为 $e^{NC*} = \frac{2ak(1-\gamma)}{8bh - 3k^2(1-\gamma)^2}$ 、利润为$$

$$\pi_m^{NC*} = \frac{a^2[8bh - k^2(1-\gamma)^2]}{8b[8bh - 3k^2(1-\gamma)^2]}；产品市场需求为 $D^{NC*} = \frac{a[8bh - k^2(1-\gamma)^2]}{4[8bh - 3k^2(1-\gamma)^2]}$ ；零售商成本分担比例为$$

$$\phi^{NC*} = \frac{k^2(1-\gamma)^2}{8bh}、产品零售价格为 $p^{NC*} = \frac{3a[8bh - k^2(1-\gamma)^2]}{4b[8bh - 3k^2(1-\gamma)^2]}$ 、利润为 $\pi_r^{NC*} = \frac{a^2[8bh + k^2(1-\gamma)^2]}{16b[8bh - 3k^2(1-\gamma)^2]}$ 。$$

2.3 收益共享契约（NR 模型）

该情形下，零售商主动分享部分收益给制造商以激励制造商积极开展碳减排。决策顺序是：零售商先确定收益分享比例，制造商随后确定单位产品碳减排量和批发价格，零售商最后确定零售价格。制造商的利润函数为

$$\pi_m^{NR} = wD^N - \frac{1}{2}he^2 + \lambda pD^N \quad (5)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_r^{NR} = [(1-\lambda)p - w]D^N \quad (6)$$

定理 3 制造商未实施区块链且零售商提供收益共享契约情形下，制造商批发价格为

$$w^{NR*} = \frac{a[2bh - k^2(1-\gamma)^2]}{4b^2h}、单位产品碳减排量为 $e^{NR*} = \frac{ak(1-\gamma)}{2[2bh - k^2(1-\gamma)^2]}$ 、利润为$$

$$\pi_m^{NR*} = \frac{a^2h}{4[2bh - k^2(1-\gamma)^2]}；产品市场需求为 $D^{NR*} = \frac{abh}{2[2bh - k^2(1-\gamma)^2]}$ ；零售商收益共享比例为$$

$$\lambda^{NR*} = \frac{k^2(1-\gamma)^2}{2bh}、产品零售价格为 $p^{NR*} = \frac{a[3bh - k^2(1-\gamma)^2]}{2b[2bh - k^2(1-\gamma)^2]}$ 、利润为 $\pi_r^{NR*} = \frac{a^2h}{8[2bh - k^2(1-\gamma)^2]}$ 。$$

命题 1 当制造商未实施区块链时，比较有激励契约情形下的均衡结果，有：

$$(1) w^{NR*} < w^{NN*} < w^{NC*}、p^{NR*} < p^{MN*} < p^{NC*}、e^{NR*} > e^{NC*} > e^{NN*}、\lambda^{NR*} > \phi^{NC*}。$$

$$(2) D^{NR*} > D^{NC*} > D^{NN*}、\pi_m^{NR*} > \pi_m^{NC*} > \pi_m^{NN*}、\pi_r^{NR*} > \pi_r^{NC*} > \pi_r^{NN*}。$$

命题 1 表明，制造商未实施区块链时，有激励契约下零售商最优收益分享比例大于最优成本分担比例。收益共享契约下的产品批发价格和零售价格均最小，无激励契约下次之，成本分担契约下最大。收益共享契约下的单位产品碳减排量最大，成本分担契约下次之，无激励契约下最小。这与零售商利用激励契约促进制造商积极开展碳减排并促使制造商降低批发价格的初衷一致。基于此，收益共享契约下的市场需求、制造商利润和零售商利润均最大，成本分担契约下次之，无激励契约下最小。以上结论与现有相关文献研究结论保持一致。

3 制造商实施区块链情形下的决策

3.1 无激励契约（BN 模型）

该情形下，制造商开展碳减排的同时采用区块链技术记录和传递产品碳减排信息，提高产品碳减排信息的透明度和真实性，并通过“碳标签”为消费者提供查询和验证的便利，进而提升消费者对低碳产品的信任和偏好。由于零售商未提供任何激励契约，制造商承担全部碳减排及区块链应用成本。制造商的利润函数为

$$\pi_m^{BN} = (w - c)D^B - \frac{1}{2}he^2 \quad (7)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_r^{BN} = (p - w)D^B \quad (8)$$

制造商和零售商的利润函数关于各自决策变量的二阶导数均为负，可判定二者均存在唯一均衡策略，如定理 4。

定理 4 制造商实施区块链但无激励契约情形下，制造商批发价格为 $w^{BN*} = \frac{2ah + c(2bh - k^2)}{4bh - k^2}$ 、单位产品碳减排量为 $e^{BN*} = \frac{(a - bc)k}{4bh - k^2}$ 、利润为 $\pi_m^{BN*} = \frac{(a - bc)^2 h}{2(4bh - k^2)}$ ；产品市场需求为 $D^{BN*} = \frac{(a - bc)bh}{4bh - k^2}$ ；零

售商零售价格为 $p^{BN*} = \frac{3ah + c(bh - k^2)}{4bh - k^2}$ 、利润为 $\pi_r^{BN*} = \frac{(a - bc)^2 bh^2}{(4bh - k^2)^2}$ 。

性质 2 制造商实施区块链但无激励契约下，制造商单位产品区块链应用成本 c 对供应链均衡结果的影响有：

$$\frac{\partial e^{BN^*}}{\partial c} < 0, \frac{\partial w^{BN^*}}{\partial c} > 0, \frac{\partial p^{BN^*}}{\partial c} > 0, \frac{\partial D^{BN^*}}{\partial c} < 0, \frac{\partial \pi_m^{BN^*}}{\partial c} < 0, \frac{\partial \pi_r^{BN^*}}{\partial c} < 0。$$

制造商实施区块链将增加自身成本，故需提高批发价格来补偿区块链应用成本。批发价格的提高导致零售商成本的增加，故零售商也会提高零售价格。批发价格和零售价格的增加对产品市场需求以及单位产品碳减排量也将产生不利影响，进而削弱了制造商和零售商的利润。虽然实施区块链能够提升消费者对低碳产品的信任水平，但制造商仍需平衡区块链应用成本与消费者信任提升带来的收益之间的大小关系，以确定实施区块链的条件。在零售商分担成本或共享收益情形下，区块链应用成本对供应链博弈均衡结果的影响效应保持不变，下文不再赘述。

3.2 成本分担契约（BC 模型）

该情形下，零售商主动分担制造商碳减排和区块链应用成本以激励制造商积极开展碳减排和实施区块链。制造商的利润函数为

$$\pi_m^{BC} = wD^B - (1-\phi)(cD^B + \frac{1}{2}he^2) \quad (9)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_r^{BC} = (p-w)D^B - \phi(cD^B + \frac{1}{2}he^2) \quad (10)$$

定理 5 制造商实施区块链且零售商提供成本分担契约情形下，制造商批发价格为

$$w^{BC^*} = \frac{(8bh-k^2)[4h(a+bc)-3ck^2]}{8bh(8bh-3k^2)}、单位产品碳减排量为 e^{BC^*} = \frac{2k(a-bc)}{8bh-3k^2}、利润为$$

$$\pi_m^{BC^*} = \frac{(a-bc)^2(8bh-k^2)}{8b(8bh-3k^2)}；产品市场需求为 D^{BC^*} = \frac{(a-bc)(8bh-k^2)}{4(8bh-3k^2)}；零售商成本分担比例为 \phi^{BC^*} = \frac{k^2}{8bh}、$$

$$产品零售价格为 p^{BC^*} = \frac{bc(8bh-9k^2)+3a(8bh-k^2)}{4b(8bh-3k^2)}、零售商利润为 \pi_r^{BC^*} = \frac{(a-bc)^2(8bh+k^2)}{16b(8bh-3k^2)}。$$

3.3 收益共享契约（BR 模型）

该情形下，零售商主动分享部分收益给制造商以激励制造商积极开展碳减排和实施区块链。制造商的利润函数为

$$\pi_m^{BR} = (w-c)D^B - \frac{1}{2}he^2 + \lambda pD^B \quad (11)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_r^{BR} = [(1-\lambda)p-w]D^B \quad (12)$$

定理 6 制造商实施区块链且零售商提供收益共享契约情形下，制造商批发价格为

$w^{BR*} = \frac{(a+bc)(2bh-k^2)}{4b^2h}$ 、单位产品碳减排量为 $e^{BR*} = \frac{k(a-bc)}{2(2bh-k^2)}$ 、利润为 $\pi_m^{BR*} = \frac{h(a-bc)^2}{4(2bh-k^2)}$ ；产品市场需求为 $D^{BR*} = \frac{bh(a-bc)}{2(2bh-k^2)}$ ；零售商收益分享比例为 $\lambda^{BR*} = \frac{k^2}{2bh}$ 、产品零售价格为 $p^{BR*} = \frac{a(3bh-k^2)+bc(bh-k^2)}{2b(2bh-k^2)}$ 、零售商利润为 $\pi_r^{BR*} = \frac{h(a-bc)^2}{8(2bh-k^2)}$ 。

命题 2 当制造商实施区块链时，比较有无激励契约情形下的均衡结果，有：

- (1) $w^{BR*} < w^{BN*}$ ；当 $c > c_1$ 时，有 $w^{BR*} > w^{BC*}$ ；反之，有 $w^{BR*} < w^{BC*}$ ；当 $c < c_2$ 时，有 $w^{BC*} > w^{BN*}$ ；反之，有 $w^{BC*} < w^{BN*}$ ；其中， $c_1 = \frac{2a(4bh-k^2)}{bk^2}$ 、 $c_2 = \frac{4ahk^2}{32b^2h^2-16bhk^2+3k^4}$ 。
- (2) $\lambda^{BR*} > \phi^{BC*}$ 、 $p^{BR*} < p^{BN*} < p^{BC*}$ 、 $e^{BR*} > e^{BC*} > e^{BN*}$ 、 $D^{BR*} > D^{BC*} > D^{BN*}$ 。
- (3) $\pi_m^{BR*} > \pi_m^{BC*} > \pi_m^{BN*}$ 、 $\pi_r^{BR*} > \pi_r^{BC*} > \pi_r^{BN*}$ 。

当制造商实施区块链时，有激励契约下零售商最优收益分享比例同样大于最优成本分担比例。不同激励契约下产品零售价格、单位产品碳减排量、市场需求、制造商利润、零售商利润的大小关系与制造商未实施区块链情形下的结果保持一致。但不同激励契约下产品批发价格的大小关系与制造商单位产品区块链应用成本有关，表明制造商实施区块链扰动了自身在不同激励契约下的批发价格策略。

4 不同激励契约下制造商实施区块链前后均衡结果比较分析

命题 3 不同激励契约下，比较实施区块链前后的单位产品碳减排量，可知：

- (1) 无激励契约下，当 $0 < c < c_e^{BN}$ 时，有 $e^{BN*} > e^{NN*}$ ；当 $c > c_e^{BN}$ 时，有 $e^{BN*} < e^{NN*}$ 。
- (2) 成本分担契约下，当 $0 < c < c_e^{BC}$ 时，有 $e^{BC*} > e^{NC*}$ ；当 $c > c_e^{BC}$ 时，有 $e^{BC*} < e^{NC*}$ 。
- (3) 收益共享契约下，当 $0 < c < c_e^{BR}$ 时，有 $e^{BR*} > e^{NR*}$ ；当 $c > c_e^{BR}$ 时，有 $e^{BR*} < e^{NR*}$ 。

其中， $c_e^{BN} = \frac{a\gamma[4bh+k^2(1-\gamma)]}{b[4bh-k^2(1-\gamma)^2]}$ 、 $c_e^{BC} = \frac{a\gamma[8bh+3k^2(1-\gamma)]}{b[8bh-3k^2(1-\gamma)^2]}$ 、 $c_e^{BR} = \frac{a\gamma[2bh+k^2(1-\gamma)]}{b[2bh-k^2(1-\gamma)^2]}$ 。

在不同激励契约下，均存在一个区块链应用成本条件，即只有当制造商实施区块链的成本小于一定阈值时，制造商实施区块链才能够提高单位产品碳减排量。易知， $c_e^{BR} > c_e^{BC} > c_e^{BN}$ ，即收益共享契约下制造商实施区块链后单位产品碳减排量能够获得提升的成本条件阈值最大，成本分担契约下次之，而无激励契约下最小。这就意味着，在制造商实施区块链时，零售商的激励行为能够增大单

位产品碳减排量提升的可能性或空间，且收益共享契约下单位产品碳减排量提升的可能性或空间最大。

命题 4 不同激励契约下，比较实施区块链前后的批发价格和零售价格，可知：

- (1) 无激励契约下，对于满足模型内在约束的 $c > 0$ ，有 $w^{BN*} > w^{NN*}$ 、 $p^{BN*} > p^{NN*}$ 。
- (2) 成本分担契约下，对于满足模型内在约束的 $c > 0$ ，有 $w^{BC*} > w^{NC*}$ 、 $p^{BC*} > p^{NC*}$ 。
- (3) 收益共享契约下，对于满足模型内在约束的 $c > 0$ ，有 $p^{BR*} > p^{NR*}$ 。当 $0 < c < c_w^{BR}$ 时，有

$w^{BR*} < w^{NR*}$ ；当 $c > c_w^{BR}$ 时，有 $w^{BR*} > w^{NR*}$ 。其中， $c_w^{BR} = \frac{ak^2\gamma(2-\gamma)}{b(2bh-k^2)}$ 。

在无激励契约及成本分担契约下，制造商实施区块链后都将提高产品批发价格，而零售商也将提高产品零售价格。在收益共享契约下，仅当制造商实施区块链的成本大于一定阈值时，制造商才会提高产品批发价格，而零售商必然提高产品零售价格。这就意味着，在制造商实施区块链后，无论制造商是否提高批发价格，零售商都将提高零售价格。

命题 5 不同激励契约下，比较实施区块链前后的零售商利润，可知：

- (1) 无激励契约下，当 $0 < c < c_r^{BN}$ 时，有 $\pi_r^{BN*} > \pi_r^{NN*}$ ；当 $c > c_r^{BN}$ 时，有 $\pi_r^{BN*} < \pi_r^{NN*}$ 。
- (2) 成本分担契约下，当 $0 < c < c_r^{BC}$ 时，有 $\pi_r^{BC*} > \pi_r^{NC*}$ ；当 $c > c_r^{BC}$ 时，有 $\pi_r^{BC*} < \pi_r^{NC*}$ 。
- (3) 收益共享契约下，当 $0 < c < c_r^{BR}$ 时，有 $\pi_r^{BR*} > \pi_r^{NR*}$ ；当 $c > c_r^{BR}$ 时，有 $\pi_r^{BR*} < \pi_r^{NR*}$ 。

其中， $c_r^{BN} = \frac{a\gamma k^2(2-\gamma)}{b[4bh-k^2(1-\gamma)^2]}$ 、 $c_r^{BC} = \frac{a}{b} \left(1 - \frac{\sqrt{(8bh-3k^2)[8bh+k^2(1-\gamma)^2]}}{\sqrt{(8bh+k^2)[8bh-3k^2(1-\gamma)^2]}}\right)$ 、 $c_r^{BR} = \frac{a}{b} \left(1 - \frac{\sqrt{2bh-k^2}}{\sqrt{2bh-k^2(1-\gamma)^2}}\right)$ 。

在不同激励契约下，制造商实施区块链并不一定会改善零售商利润。只有当区块链应用成本小于一定阈值条件时，零售商利润才能够获得改善。易知， $c_r^{BR} > c_r^{BC}$ ，即收益共享契约下制造商实施区块链后零售商利润获得改善的成本条件阈值大于成本分担契约情形。由于无法直观比较 c_r^{BR} 与 c_r^{BN} 、 c_r^{BC} 与 c_r^{BN} 之间的大小关系，下文将通过数值算例进一步分析不同激励契约下零售商利润获得改善的成本条件的差异。

命题 6 不同激励契约下，比较实施区块链前后的制造商利润，可知：

- (1) 无激励契约下，当 $0 < c < c_m^{BN}$ 时，有 $\pi_m^{BN*} > \pi_m^{NN*}$ ；当 $c > c_m^{BN}$ 时，有 $\pi_m^{BN*} < \pi_m^{NN*}$ 。

(2) 成本分担契约下, 当 $0 < c < c_m^{BC}$ 时, 有 $\pi_m^{BC*} > \pi_m^{NC*}$; 当 $c > c_m^{BC}$ 时, 有 $\pi_m^{BC*} < \pi_m^{NC*}$ 。

(3) 收益共享契约下, 当 $0 < c < c_m^{BR}$ 时, 有 $\pi_m^{BR*} > \pi_m^{NR*}$; 当 $c > c_m^{BR}$ 时, 有 $\pi_m^{BR*} < \pi_m^{NR*}$ 。

$$\text{其中, } c_m^{BN} = \frac{a}{b} \left(1 - \frac{\sqrt{4bh - k^2}}{\sqrt{4bh - k^2(1-\gamma)^2}}\right), \quad c_m^{BC} = \frac{a}{b} \left(1 - \frac{\sqrt{(8bh - 3k^2)[8bh - k^2(1-\gamma)^2]}}{\sqrt{(8bh - k^2)[8bh - 3k^2(1-\gamma)^2]}}\right), \quad c_m^{BR} = \frac{a}{b} \left(1 - \frac{\sqrt{2bh - k^2}}{\sqrt{2bh - k^2(1-\gamma)^2}}\right)。$$

在不同激励契约下, 均存在一个区块链应用成本条件, 即当实施区块链的成本小于一定阈值时, 制造商实施区块链才能够改善自身利润, 否则将削弱制造商利润。易知, $c_m^{BR} > c_m^{BC} > c_m^{BN}$, 即无激励契约下实施区块链后制造商利润获得改善的成本条件阈值最小, 而收益共享契约下最大。这就意味着, 当制造商实施区块链时, 无激励契约下制造商利润增大的可能性或空间最小, 收益共享契约下制造商利润增大的可能性或空间最大。

命题 6 事实上给出了不同激励契约下制造商实施区块链的成本条件。当制造商实施区块链能够使自身利润获得改善时, 是否一定能够使零售商利润获得改善? 易知, $c_m^{BC} < c_r^{BC}$ 、 $c_m^{BR} = c_r^{BR}$ 。也即, 当零售商提供激励契约时, 制造商实施区块链若能改善自身利润, 则一定能够改善零售商利润。由于无法直观比较无激励契约下 c_m^{BN} 与 c_r^{BN} 的大小关系, 下文通过数值算例进行比较分析。

5 数值算例分析

本节通过数值算例进一步分析, (1) 不同激励契约下制造商实施区块链对产品碳减排量、批发价格、零售价格的影响; (2) 不同激励契约下制造商实施区块链改善自身和零售商利润的成本条件。消费者低碳偏好程度越大, 制造商越有动力进行碳减排投资和实施区块链, 但产品价格因素同样对消费者购买意愿产生重要影响, 且二者对消费者购买意愿的影响作用相反。为此, 下文分“低低碳偏好高价格敏感 ($k < b$)”和“高低碳偏好低价格敏感 ($k > b$)”两种情况进行讨论。

在分析制造商实施区块链对供应链成员决策的影响时, 令 $0 \leq c \leq 20$ 、 $\gamma = 0.5$, 观察单位产品区块链应用成本对供应链成员决策的影响, 并与未实施区块链情形 (消费者对单位产品碳减排量半信半疑) 下的结果进行对比。在分析制造商实施区块链的成本条件时, 令 $0 < \gamma < 1$, 以便观察制造商实施区块链改善自身和零售商利润的成本条件阈值与消费者对单位产品碳减排量质疑程度之间的变动关系。不失一般性, 模型中其他参数取值设定为 $a = 1000$ 、 $b_H = 40$ 、 $b_L = 35$ 、 $h = 70$ 、 $k_H = 40$ 、 $k_L = 35$ 。

5.1 制造商实施区块链对单位产品碳减排量的影响

图 1 表明, 不同激励契约下, 区块链应用成本越大, 单位产品碳减排量越小; 只有当单位产品

区块链应用成本小于一定值时，制造商实施区块链后的单位产品碳减排量才大于未实施情形。无论制造商是否实施区块链，单位产品碳减排量在收益共享契约下最大，在无激励契约下最小； $k > b$ 情形的单位产品碳减排量大于 $k < b$ 情形。

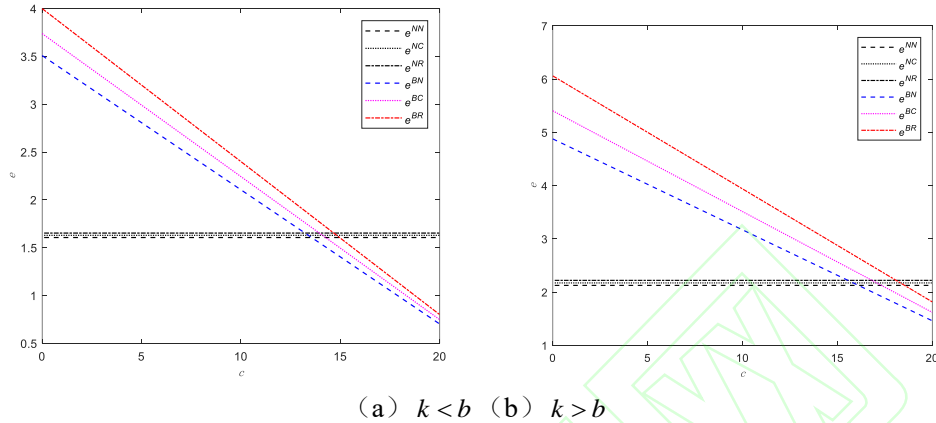
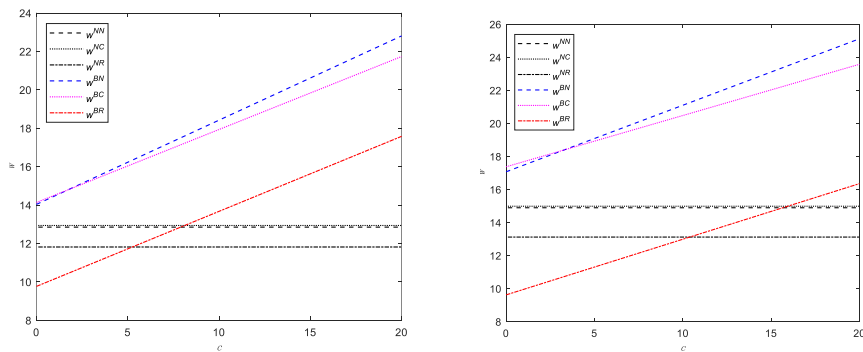


图 1 区块链应用成本对单位产品碳减排量的影响

5.2 制造商实施区块链对产品定价策略的影响

(1) 制造商实施区块链对产品批发价格的影响

图 2 表明，不同激励契约下，区块链应用成本越大，产品批发价格越大；无激励契约和成本分担契约下制造商实施区块链后的批发价格始终大于未实施情形。仅当区块链应用成本大于一定值时，收益共享契约下制造商实施区块链后的批发价格才大于未实施情形。制造商未实施区块链时，批发价格在成本分担契约下最大，在收益共享契约下最小；制造商实施区块链时，收益共享契约下的批发价格同样最小，但无激励契约与成本分担契约下批发价格的大小关系受区块链应用成本的影响。不同激励契约下，制造商未实施区块链时， $k > b$ 情形的产品批发价格大于 $k < b$ 情形；制造商实施区块链时，无激励契约和成本分担契约下 $k > b$ 情形的产品批发价格大于 $k < b$ 情形，但收益共享契约下， $k > b$ 情形的产品批发价格却小于 $k < b$ 情形。这就表明，当消费者低碳偏好程度大于价格敏感程度时，收益共享契约对促使制造商降低批发价格更有效。

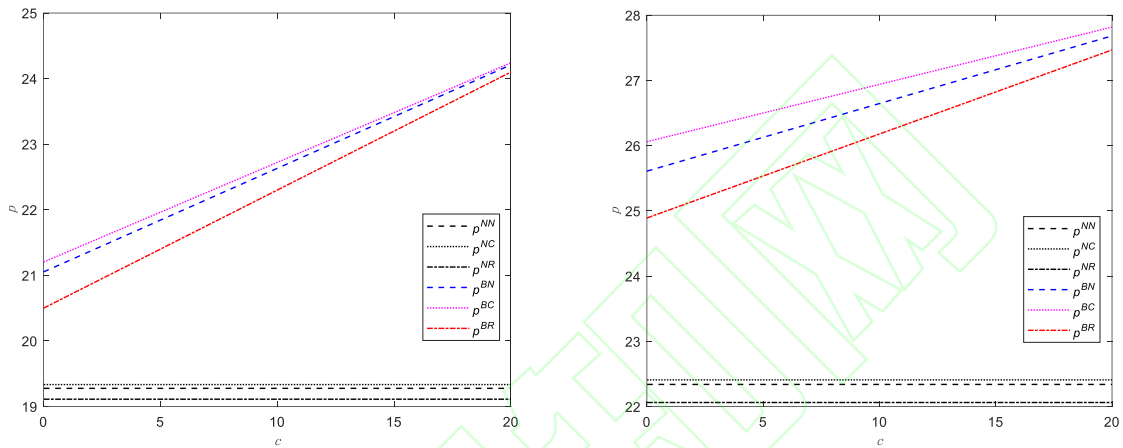


(a) $k < b$ (b) $k > b$

图2 区块链应用成本对产品批发价格的影响

(2) 制造商实施区块链对产品零售价格的影响

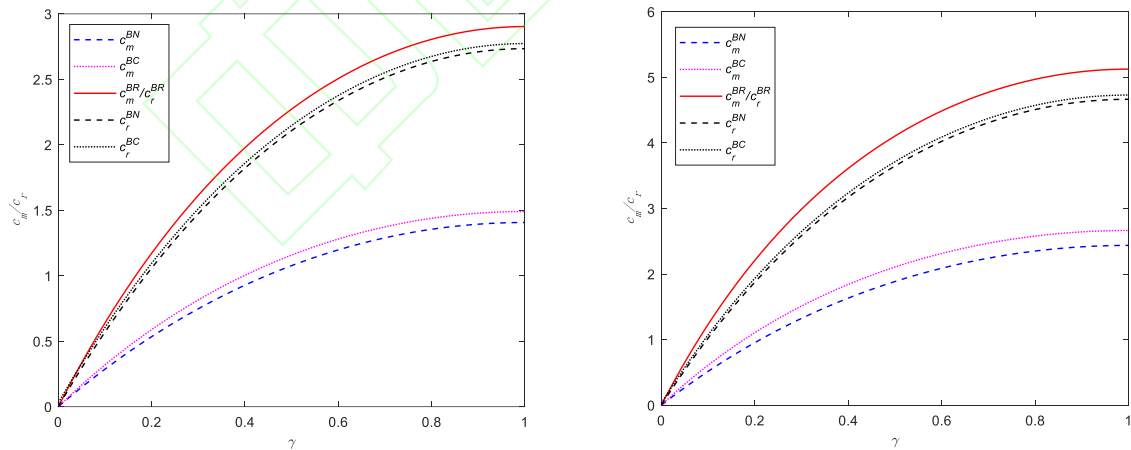
图3表明,不同激励契约下,区块链应用成本越大,产品零售价格越大;制造商实施区块链后的零售价格大于未实施情形。无论制造商是否实施区块链,零售价格在收益共享契约下最小,在成本分担契约下最大; $k > b$ 情形下的产品零售价格明显大于 $k < b$ 情形。



(a) $k < b$ (b) $k > b$

图3 区块链应用成本对产品零售价格的影响

5.3 制造商实施区块链改善自身和零售商利润的成本条件



(a) $k < b$ (b) $k > b$

图4 制造商实施区块链改善自身和零售商利润的成本条件阈值

图4中收益共享契约下制造商实施区块链改善自身和零售商利润的成本条件阈值一致,故在图中共用一条线。图4表明,不同激励契约下制造商实施区块链改善自身和零售商利润的成本条件阈

值均随着消费者对单位产品碳减排量质疑程度的增大而增大，且成本条件阈值在收益共享契约下最大，在无激励契约下最小。这表明，零售商的激励行为能够增加制造商实施区块链的可能性或获利空间，且收益共享契约下制造商实施区块链的可能性或获利空间更大。 $k > b$ 情形下，不同激励契约下制造商实施区块链的成本条件阈值均大于 $k < b$ 情形。这意味着，当消费者的低碳偏好程度高于价格敏感程度时，低碳产品市场需求旺盛，制造商对区块链应用成本的容忍度更高。由于不同激励契约下，制造商实施区块链改善自身利润的成本条件阈值小于或等于零售商利润获得改善的成本条件阈值，故制造商实施区块链若能提升自身利润，则也能够提升零售商利润。

6 结束语

本文在零售商提供的不同激励契约下探讨了制造商实施区块链对低碳供应链成员决策及利润的影响，分析了制造商实施区块链的成本条件，主要研究结论如下：

(1) 不同激励契约下，仅当区块链应用成本小于一定阈值时，制造商实施区块链才能提高单位产品碳减排量。无激励契约和成本分担契约下，制造商实施区块链后的产品批发价格始终大于未实施区块链情形；收益共享契约下，仅当区块链应用成本大于一定阈值时，制造商实施区块链后的产品批发价格才大于未实施情形。不同激励契约下，制造商实施区块链后的产品零售价格始终大于未实施区块链情形。无论制造商是否实施区块链，单位产品碳减排量在收益共享契约下最大，而产品批发价格和零售价格在收益共享契约下最小。

(2) 不同激励契约下，仅当区块链应用成本小于一定阈值时，制造商才愿意实施区块链。制造商实施区块链的成本条件阈值在收益共享契约下最大，在无激励契约下最小。制造商实施区块链若能够改善自身利润，则一定能够改善零售商利润。

(3) 消费者低碳偏好与价格敏感程度之间的关系影响供应链碳减排、定价策略以及制造商实施区块链的成本条件。不同激励契约下，消费者对产品低碳属性更敏感时，单位产品碳减排量和零售价格更大；但收益共享契约下的批发价格却在消费者低碳偏好程度高于价格敏感程度情形下更小。消费者对产品低碳属性更敏感时，实施区块链后的制造商和零售商利润获得改善的可能性或空间更大。

根据本文主要研究结论并结合现状，提出三点对策建议：

(1) 企业应充分评估实施区块链的必要性和可行性。制造商应充分调研和评估消费者对低碳产品的信任度和消费意愿，评估实施区块链的成本、技术难度及增值空间，为实施区块链提供决策依据。

(2) 低碳供应链成员应加强纵向合作。零售商应结合自身发展现状主动选择分享收益或分担成本的方式激励制造商积极开展碳减排和实施区块链, 优化供应链碳减排和定价策略, 从而实现合作共赢。

(3) 政府应积极培育企业低碳化、数字化转型的良好环境。一是, 对企业区块链技术研发和应用成本进行补贴, 推动区块链技术快速成熟和缓解企业实施区块链的成本压力。二是, 引导全社会持续开展低碳消费理念教育, 提升消费者低碳偏好, 不断壮大低碳产品市场需求规模, 为企业实施区块链和投资碳减排注入市场动力。

本文从制造商主导视角研究了不同激励契约下制造商实施区块链对供应链碳减排、定价策略及企业利润的影响。当零售商主导供应链时, 制造商实施区块链对低碳供应链决策的影响将发生变化。企业自建区块链或租用政府、第三方企业提供的区块链平台亦将影响企业区块链投资策略。因此, 可以从不同供应链权势结构及区块链采用方式视角继续研究。

参考文献:

- [1] LIU Mingwu, LIN Qiang, WANG Xiaofei. Status and trends of operational decision-making of supply chain emission reduction[J]. Journal of UESTC (Social Sciences Edition), 2022, 24 (2): 86-95 (in Chinese).[刘名武, 林强, 王晓斐. 供应链减排运作决策研究现状与发展趋势[J]. 电子科技大学学报 (社科版), 2022, 24 (2): 86-95.]
- [2] BABICH V, HILARY G. OM Forum—Distributed ledgers and operations: What operations management researchers should know about blockchain technology[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2020, 22 (2): 223-240.
- [3] YANG Tianjian, LI Chunmei, YUE Xiongping, et al. Decisions for Blockchain Adoption and Information Sharing in a Low Carbon Supply Chain[J]. Mathematics, 2022, 10 (13): 2233.
- [4] POURNADER M, SHI Yangyan, 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.
- [5] LI Jian, YI Lan, XIAO Yao. Research on information sharing mechanism of emission reduction in supply chain based on blockchain under information asymmetry[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29 (10): 131-139(in Chinese).[李剑, 易兰, 肖瑶. 信息不对称下基于区块链驱动的供应链减排信息共享机制研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29 (10): 131-139.]

- [6] SABERI S, KOUHIAZDEH M, SARKIS J, et al. Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(7): 2117-2135.
- [7] CHENG Susu, ZHANG Fan. Optimal emission-reducing technology selection for green supply chain under penalty-sharing contract[J]. *Soft Science*, 2022, 36 (10): 131-137(in Chinese).[程粟粟, 张帆. 罚款分担契约下绿色供应链最优减排技术选择研究[J]. *软科学*, 2022, 36 (10): 131-137.]
- [8] YANG Huixiao, OU Jinwen. The effect of revenue sharing and bargaining power on carbon emission reduction in a supply chain[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2020, 40 (9): 2379-2390 (in Chinese). [杨惠霄, 欧锦文. 收入共享与谈判权力对供应链碳减排决策的影响[J]. *系统工程理论与实践*, 2020, 40 (9): 2379-2390.]
- [9] CUI Chunyue, ZHANG Lingrong, YANG Zifan, et al. Two-stage supply chain coordination based on revenue sharing contract under carbon cap-and-trade[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29 (7): 214-226(in Chinese).[崔春岳, 张令荣, 杨子凡, 等. 碳配额交易政策下基于收益共享契约的两阶段供应链协调[J]. *中国管理科学*, 2021, 29 (7): 214-226.]
- [10] LIU Zhen, SONG Han, DAI Ying, et al. Revenue sharing contract of low-carbon service supply chain under carbon trading and consumers' low-carbon preference[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2022, 28 (1): 294-306(in Chinese). [刘振, 宋寒, 代应, 等. 碳交易与消费者低碳偏好下低碳服务供应链收益共享契约[J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28 (1): 294-306.]
- [11] WANG Zhongrui, BROWNLEE A E I, WU Qinghua. Production and joint emission reduction decisions based on two-way cost-sharing contract under cap-and-trade regulation[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 146: 106549.
- [12] LI Tao, ZHANG Rong, ZHAO Senlin, et al. Low carbon strategy analysis under revenue-sharing and cost-sharing contracts[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 212: 1462-1477.
- [13] YANG Huixiao, CHEN Wenbo. Retailer-driven carbon emission abatement with consumer environmental awareness and carbon tax: Revenue-sharing versus cost-sharing[J]. *Omega*, 2018, 78: 179-191.
- [14] LIU Guowei, YANG Hengfei, DAI Rui. Which contract is more effective in improving product greenness under different power structures: revenue sharing or cost sharing?[J]. *Computers &*

- Industrial Engineering, 2020, 148: 106701.
- [15] LI Yongjian, CHEN Ting. Blockchain empowers supply chain: Challenge, implementation path and prospect[J]. Nankai Business Review, 2021, 24 (5): 192-201(in Chinese). [李勇建, 陈婷. 区块链赋能供应链: 挑战、实施路径与展望[J]. 南开管理评论, 2021, 24 (5): 192-201.]
- [16] CENTOBELLI P, CERCHIONE R, DEL VECCHIO P, et al. Blockchain technology for bridging trust, traceability and transparency in circular supply chain[J]. Information & Management, 2022, 59 (7): 103508.
- [17] SINGH R K, MISHRA R, GUPTA S, et al. Blockchain Applications for Secured and Resilient Supply Chains: A Systematic Literature Review and Future Research Agenda[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022: 108854.
- [18] ESMAEILIAN B, SARKIS J, LEWIS K, et al. Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 163: 105064.
- [19] DE GIOVANNI P. Blockchain and smart contracts in supply chain management: A game theoretic model[J]. International Journal of Production Economics, 2020, 228: 107855.
- [20] CHOI T M, LUO Suyuan. Data quality challenges for sustainable fashion supply chain operations in emerging markets : Roles of blockchain , government sponsors and environment taxes[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2019, 131: 139-152.
- [21] LIU Yuhong, MA Deqing, HU Jinsong, et al. Sales mode selection of fresh food supply chain based on blockchain technology under different channel competition[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 162: 107730.
- [22] TAN Chunqiao, LIU Ruihuan, ZHAO Chengwei. Pricingstrategy of vaccine supply chain based on blockchain technology[J]. Journal of Industrial Engineering/Engineering Management, 2022, 36(6): 205-220(in Chinese). [谭春桥, 刘瑞环, 赵程伟. 基于区块链技术的疫苗供应链定价策略研究[J]. 管理工程学报, 2022, 36 (6): 205-220.]
- [23] LIU Liang, LI Futou. Investment decision and coordination of blockchain technology in fresh supply chain considering retailers' risk aversion[J]. Journal of Industrial Engineering/ Engineering Management, 2022, 36 (1): 159-171(in Chinese). [刘亮, 李斧头. 考虑零售商风险规避的生鲜供应链区块链技术投资决策及协调[J]. 管理工程学报, 2022, 36 (1): 159-171.]

- [24] HU Hanli, CAO Yu, LI Qingsong. Blockchain technology adoption strategy of companies under strong and weak brand competition[J/OL]. Chinese Journal of Management Science, <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.0607> (in Chinese). [胡韩莉, 曹裕, 李青松. 强弱品牌竞争下企业的区块链技术采纳策略研究 [J/OL]. 中国管理科学, <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.0607>.]
- [25] NIU Baozhuang, MU Zihao, CAO Bin, et al. Should multinational firms implement blockchain to provide quality verification?[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2021, 145: 102121.
- [26] SHEN Bin, DONG Ciwei, MINNER S. Combating copycats in the supply chain with permissioned blockchain technology[J]. Production and Operations Management, 2022, 31 (1): 138-154.
- [27] JI Guojun, ZHOU Shu, LAI K H, et al. Timing of blockchain adoption in a supply chain with competing manufacturers[J]. International Journal of Production Economics, 2022, 247: 108430.
- [28] LIN Muxi, ZHANG Ziwei. “Blockchain+production” promotes the green production of enterprises-New thinking on the hand of governments[J]. Economic Perspectives, 2019, (5): 42-56(in Chinese). [林木西, 张紫薇. “区块链+生产”推动企业绿色生产—对政府之手的新思考[J]. 经济学动态, 2019, (5): 42-56.]
- [29] ZHANG Lingrong, PENG Bo, CHENG Chunqi. Research on government subsidy strategy of low-carbon supply chain based on block-chain technology[J/OL]. Chinese Journal of Management Science, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2835.G3.20210926.1324.002.html>(in Chinese). [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/OL]. 中国管理科学, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2835.G3.20210926.1324.002.html>.]
- [30] XU Jian, DuanYongrui. Pricing and greenness investment for green products with government subsidies: When to apply blockchain technology?[J]. Electronic Commerce Research and Applications, 2022, 51: 101108.
- [31] JIANG Yongchang, LIU Chang. Research on carbon emission reduction and blockchain investment under different dual-channel supply chains[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29 (43): 65304-65321.
- [32] LI Qingying, MA Manqiong, SHI Tianqin, et al. Green investment in a sustainable supply chain:

The role of blockchain and fairness[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, 167: 102908.

[33] XU Xiaoping, ZHANG Mengying, DOU Guowei, et al. Coordination of a supply chain with an online platform considering green technology in the blockchain era[J]. *International Journal of Production Research*, 2021: 1-18.

[34] LIN Qiang, LIU Mingwu, WANG Xiaofei. Research on green supply chain decision-making embedded with information transfer function of blockchain[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20211006.1222.006.html>(in Chinese).[林强, 刘名武, 王晓斐. 嵌入区块链信息传递功能的绿色供应链决策[J/OL]. *计算机集成制造系统*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20211006.1222.006.html>.]

作者简介:

林强 (1988-), 男, 河南信阳人, 副教授, 博士研究生, 研究方向: 物流与供应链管理, E-mail: lqgood_7024@163.com;

+刘名武 (1979-), 男, 安徽无为, 教授, 博士, 研究方向: 物流与供应链管理, 通讯作者, E-mail: liumingwu2007@aliyun.com;

邹梓琛 (1996-), 女, 河南浉池人, 博士研究生, 研究方向: 物流与供应链管理, E-mail: zzc1664396155vip@163.com。