

文章编号: 1671-9352(2024)01-0100-15 DOI: 10.6040/j.issn.1671-9352.0.2023.049

碳配额与交易监管下基于区块链技术的平台供应链网络运营决策

史聪, 张桂涛*, 张萧, 林帅成

(青岛大学商学院, 山东 青岛 266071)

摘要:在碳配额与交易监管下,基于Nash非合作博弈与变分不等式理论,考虑碳排放权初始分配环节中供应商存在谎报碳配额行为与绿色信息敏感型消费者对产品核实需求,构建应用与未应用区块链技术的2种平台供应链网络均衡模型,对比研究应用区块链技术前后各平台供应链成员的均衡决策及区块链应用阈值。利用修正收缩投影算法对模型进行求解,并通过数值算例可得:应用区块链技术可避免碳交易量不一致的情况,进一步减少资源的浪费并提高供应链利润;供应商谎报碳配额的行为在一定程度上能提高供应链整体利润,但抑制了供应链获得更高利润的能力;在一定的区块链运营成本阈值内,供应链成员才有采用区块链技术的动机。

关键词:区块链技术;碳配额与交易政策;碳配额谎报行为;绿色信息敏感;平台供应链网络均衡

中图分类号:F272.3 **文献标志码:**A

引用格式:史聪,张桂涛,张萧,等.碳配额与交易监管下基于区块链技术的平台供应链网络运营决策[J].山东大学学报(理学版),2024,59(1):100-114,123.

Platform supply chain network operation decision based on blockchain technology under cap-and-trade regulation

SHI Cong, ZHANG Guitao*, ZHANG Xiao, LIN Shuaicheng

(School of Business, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, China)

Abstract: Under the cap-and-trade regulation, based on Nash non-cooperative game theory and variational inequality theory, considering supplier's misrepresentation of carbon caps during the initial allocation and the demand of green information sensitive consumers for product verification, two platform supply chain network equilibrium models with and without blockchain technology are constructed. Then this paper explores and compares the equilibrium conditions of supply chain members and blockchain technology application thresholds before and after the application of blockchain technology. The modified contraction projection algorithm is used to solve the problem and some numerical examples are given to show that: the application of blockchain technology can avoid the inconsistency of carbon emission trading volume, further reduce the waste of resources and improve the profit of the supply chain. The supplier's misrepresentation of the carbon cap can to some extent improve the overall profit of the supply chain, but it inhibits the ability of the supply chain to achieve higher profits. Within a certain threshold of blockchain technology operating costs, supply chain members have the motivation to adopt blockchain technology.

Key words: blockchain technology; cap-and-trade regulation; misrepresentation of carbon cap; green information sensitivity; platform supply chain network equilibrium

收稿日期:2023-02-14; 网络出版时间:2023-11-13 11:27:56

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/37.1389.N.20231109.1611.006

基金项目:国家社会科学基金资助项目(19BGL091)

第一作者简介:史聪(1999—),男,硕士研究生,研究方向为供应链管理. E-mail: ssc0748@126.com

*通信作者简介:张桂涛(1975—),男,教授,博士生导师,博士,研究方向为物流供应链管理. E-mail: zhangguitao@qdu.edu.cn

0 引言

近年来,产品的绿色信息、碳排放权信息(碳配额、碳交易价格)受到消费者与企业的广泛关注;但由于政府无法完全知晓企业的减排能力和历史碳排放量等“私人信息”,因此造成了企业申报碳排放量时存在谎报行为,进而导致政府配额分配过量,碳交易市场动荡,碳交易价格出现溢价现象^[1]。例如中碳能投科技(北京)有限公司等企业谎报碳排放数据被处罚^[2]。同时在产品交易过程中,部分消费者可能会对产品的绿色信息进行核实,但目前核实时间长,效率低,影响消费者进行购买决策,因此,如何解决碳排放权初始分配环节中的企业碳谎报行为,满足消费者信息核实需求是需要迫切解决的问题。具有去中心化功能的区块链技术,作为一种新型的分布式数据库可以聚合上下游企业信息,打通数据孤岛来帮助解决这些挑战。

碳配额与交易监管政策下,企业谎报相关碳信息以谋取高额利润的行为已有学者进行研究。针对供应链上下游企业之间的碳信息不对称问题,杨磊等^[3]研究了不同类型企业在拥有碳信息优势下的谎报决策;周艳菊等^[4]分析了制造商谎报初始碳排放信息对供应链绩效的影响,并引入惩罚机制进行协调;结合定价契约,张令荣等^[5]讨论了不同权力结构下谎报碳排放量对供应链绩效的影响。针对企业谎报碳配额信息的问题,陆菊春等^[6]结合演化博弈探索了政府监管行为与企业逆向选择导致碳配额超量行为的稳定策略。此外,鲜有文献探索碳配额与交易监管下企业谎报碳数据使得发放的碳配额溢出对平台供应链网络均衡决策的影响,且少有文献通过应用区块链技术来抑制该谎报行为,因此本文在供应商谎报碳配额下,应用区块链技术抑制该谎报行为,并重点对比分析区块链技术应用前后各平台供应链成员的均衡决策问题。

区块链技术与大数据一样,都是数字时代企业运营管理的基础技术之一^[7]。如今,区块链技术在保障信息透明中的作用在多个方面广泛研究,如产品质量信息、金融信息、产品绿色信息、碳交易市场信息等^[8-11]。在碳交易市场中,邹梓琛等^[11]构建并对比分析有无采用区块链的供应链决策模型,研究了碳感知敏感消费者占比对区块链成本阈值的影响。考虑产品信息不对称的背景下,王君等^[12]使用信号博弈探讨了采取区块链技术的阈值问题。本文结合变分不等式理论,考虑多个竞争性企业来探讨平台供应链网络的区块链应用阈值问题。

近年来,随着消费者低碳意识的不断提高,部分消费者越来越关注产品的减排信息,产品是否为低碳生产将成为消费者购买与否的重要指标^[13-15],因此,学者们也对消费者的低碳偏好进行了深入的研究。孙嘉轶等^[16]认为低碳偏好消费者比例的增大,有利于提高回收率和碳减排率;蒋雷勇等^[17]结合差异化碳减排政策,研究了低碳偏好对供应链最优减排和最优定价的影响;Sun等^[18]发现消费者的低碳偏好在一定范围内对供应链减排有促进作用;然而,学者们主要侧重于研究消费者购买产品时产品低碳属性对购买选择的影响,忽略了产品购买后低碳消费者(绿色信息敏感型消费者)可能对产品信息进行确认核实,因此,考虑消费者的绿色信息敏感对供应链网络均衡的影响具有一定的现实意义。

综上所述,本文针对碳排放权初始分配环节中的企业碳谎报行为,引入“全碳链”服务中心代替传统碳交易中心,考虑制造商同时生产绿色产品和普通产品来面向绿色信息敏感差异的消费者群体,分别构建应用与未应用区块链技术2种平台供应链网络均衡模型。通过数值算例比较分析碳配额与交易监管与消费者绿色信息敏感背景下,区块链技术带来的经济效益与运营成本增加的耦合作用对各成员均衡决策的影响,并进一步探讨供应链成员的区块链应用阈值问题,为区块链技术在低碳供应链网络中的应用实践提供决策支撑。

1 模型描述与假设

考虑由多个竞争的供应商、多个竞争的2类制造商(高排放型、低排放型)、电商平台、“全碳链”服务中心和需求市场组成的多级平台供应链网络,如图1所示。其中,2类制造商利用原材料生产新产品,同时进行废旧品回收再制造过程。由于投资了碳减排技术,因此低排放型制造商生产绿色产品,而高排放型制造商生产普通产品。另外,本文考虑消费者更喜欢购买绿色产品,且对绿色信息敏感,消费者将花一些时间检查产品是否为绿色产品。鉴于区块链技术可以解决碳排放权初始分配环节中的企业碳谎报行为,本文构建2种模型,即未应用区块链技术(N模型)和应用区块链技术(B模型)对比分析平台供应链网络均衡决策。特

别的是,N模型中,“全碳链”服务中心将退化为传统的碳交易中心,且碳谎报行为可能失败并被政府惩罚。

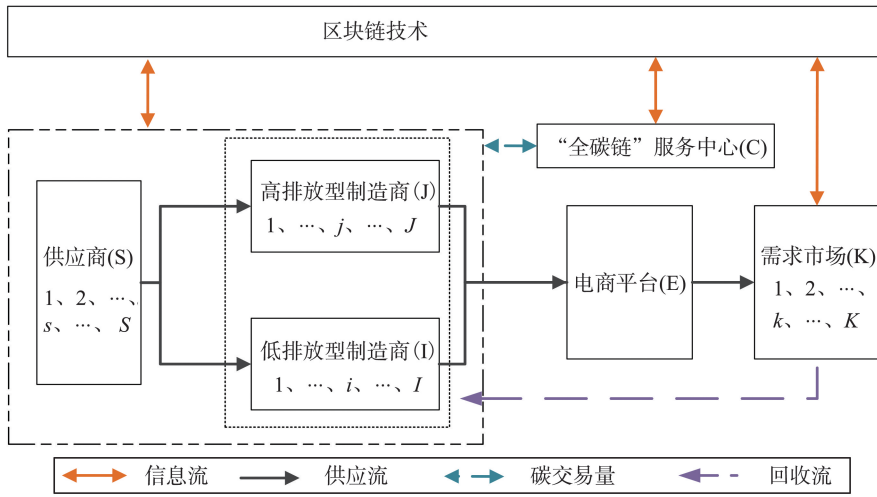


图1 平台供应链网络结构图

Fig.1 Structure diagram of platform supply chain network

考虑到所建模型的一般性,本文作如下假设。

假设 1 购买绿色产品的信息敏感型消费者将对绿色产品进行核实,若出现假冒伪劣,将退回产品,此时低排放型制造商将获得零利润^[19]。

假设 2 新产品与再制造产品同质,市场售价一致,但再制造过程碳排放量会更低^[20]。

假设 3 现行的碳配额免费分配方法主要有基准线法和历史排放法。历史排放法完全以企业过去的碳排放数据为依据分配,而基准线法是将行业内不同类型企业的单位产品碳排放量进行排序,并通过划基准线进行分配^[21-22]。我国目前主要采用基于历史排放的免费分配方式;但由于政府和企业之间存在信息的不完全和不对称,因此本文假设供应商在申报碳排放数据时存在谎报部分数据的行为,此时碳交易价格也将出现溢价^[1,6]。

假设 4 供应商与高排放型制造商需要购买碳排放额,低排放型制造商出售多余的碳排放额,各企业在“全碳链”服务中心进行碳交易,与传统的碳交易中心功能类似^[20]。

假设 5 区块链技术提高了产品信息与检测技术的可信度,若供应链未应用区块链技术,供应商的碳配额与碳交易的溢价程度将会高于应用区块链技术的情况,而正品的检验概率则相反,即 $C_s^N > C_s^B$, $\vartheta^N > \vartheta^B$, $h^B > h^N$ 。

假设 6 模型中涉及到的生产和交易成本函数与实际生产活动相符,均为连续可微凸函数^[23]。

文中涉及到的符号说明如表 1—3 所示,其中 $X=B, N$ 。

表 1 基本参数
Table 1 Basic parameters

符号	含义
s	第 s 个供应商, $s=1, 2, \dots, S$
j	第 j 个高排放型制造商, $j=1, 2, \dots, J$
i	第 i 个低排放型制造商, $i=1, 2, \dots, I$
e	电商平台
c	“全碳链”服务中心
k	需求市场, $k=1, 2, \dots, K$
C_s^x	政府免费给供应商发放的碳配额
C_y	政府免费给 2 类制造商发放的碳配额, $y=j, i$
α_{z1}	生产单位原材料或新产品的碳排放量, $z=s, j, i$
α_{y2}	回收再制造环节单位产品的碳排放量, $y=j, i$
ε	供应商与 2 类制造商交易时“全碳链”服务中心收取的单位碳交易佣金
ω	单位碳交易价格

续表

符号	含义
η	原材料转化率, $\eta \in (0, 1)$
μ	最低回收率, $\mu \in (0, 1)$
β	理论再制造率, $\beta \in (0, 1)$
ϕ	供应商碳谎报失败的概率, $\phi \in (0, 1)$
r	减排技术投资系数
δ	电商平台收取的佣金率, $\delta \in (0, 1)$
t	检测信息花费的时间
s_c	服务水平的影响因子
h^X	检测出正品的概率, $h^X \in (0, 1]$
ϑ^X	单位碳交易价格的溢价程度, $\vartheta^X \in [1, 2]$
c^B	单位区块链运营成本;参考 Yang 等 ^[24] 和 Niu 等 ^[25] 的研究,本文认为区块链技术为供应商和制造商提供每件产品的信息追踪认证,并收取单位服务费(也指每件产品额外的区块链运营成本),在本文中,供应链各方需支付各自的区块链运营费用
F	政府对企业单位碳配额谎报的惩罚成本
θ	消费者中对绿色产品、绿色信息感知敏感的比例, $\theta \in (0, 1)$
τ	消费者对平台服务水平的偏好, $\tau \in (0, 1)$
γ	消费者的低碳偏好, $\gamma \in (0, 1)$
g	消费者对检测时间的敏感程度, $g \in (0, 1)$
a	一个布尔变量, $a=1$ (应用区块链技术), $a=0$ (未应用区块链技术)

表 2 决策变量
Table 2 Decision variables

符号	含义
q_{sy}^X	供应商与 2 类制造商原材料的交易量, $y=j, i, Q_1^{1X} = (q_{sj}^X)_{Sj \times 1} \in R_+^{Sj}, Q_2^2 = (q_{si}^X)_{Si \times 1} \in R_+^{Si}$
q_{yk}^{vX}	2 类制造商利用原材料生产的产品数量, $y=j, i, q_1^{vX} = (q_{jk}^{vX})_{Jk \times 1} \in R_+^{Jk}, q_2^{vX} = (q_{ik}^{vX})_{Ik \times 1} \in R_+^{Ik}$
q_{yk}^X	2 类制造商销售给需求市场 k 的总产品供给量, $y=j, i, Q_2^{1X} = (q_{jk}^X)_{Jk \times 1} \in R_+^{Jk}, Q_2^{2X} = (q_{ik}^X)_{Ik \times 1} \in R_+^{Ik}$
q_{ky}^X	2 类制造商从需求市场 k 回收的产品数量, $y=j, i, Q_3^{1X} = (q_{kj}^X)_{Jk \times 1} \in R_+^{Jk}, Q_3^{2X} = (q_{ki}^X)_{Ik \times 1} \in R_+^{Ik}$
t_z^X	供应商与 2 类制造商的碳交易量, $z=s, j, i, t_1^X = (t_s^X)_{S \times 1} \in R_+^S, t_2^X = (t_j)_{J \times 1} \in R_+^J, t_3^X = (t_i)_{I \times 1} \in R_+^I$
e_i^X	低排放型制造商的碳减排量, $\hat{E}^X = (e_i^X)_{I \times 1} \in R_+^I$
s_c^X	平台提供的服务水平, $S^X = (s_c^X)_{E \times 1} \in R_+^E$
p_k^X	消费者支付给两类制造商的单位产品价格, $y=j, i, P_1^X = (p_k^{jX})_{K \times 1} \in R_+^K, P_2^X = (p_k^{iX})_{K \times 1} \in R_+^K$

表 3 函数符号
Table 3 Function symbols

符号	含义
$c_s^y = c_s^y(q_{sy}^X)$	供应商承担的与 2 类制造商的交易成本, $y=j, i$
$\hat{c}_s^y = \hat{c}_s^y(q_{sy}^X)$	2 类制造商承担的与供应商的交易成本, $y=j, i$
$c_{yk} = c_{yk}(q_{yk}^X)$	2 类制造商承担的与需求市场的交易成本, $y=j, i$
$\hat{c}_{yk} = \hat{c}_{yk}(q_{yk}^X)$	需求市场承担的与 2 类制造商的交易成本, $y=j, i$
$f_s = f_s(q_{sy}^X)$	供应商生产原材料的生产成本, $y=j, i$
$f_y = f_y(q_{yk}^{vX})$	2 类制造商生产新产品的生产成本, $y=j, i$
$c_k = c_k(q_{ky}^X)$	2 类制造商处理回收产品的处理成本, $y=j, i$
$f_y = f_y(q_{ky}^N, \beta)$	2 类制造商再制造过程中的再制造成本, $y=j, i$
$c_e = c_e(s_c^X, s_c)$	电商平台的基础服务投资成本
$w_e = w_e(q_{jk}^X, q_{ik}^X, s_c^X)$	电商平台的流量收益
$c_z^t = c_z^t(t_z^X)$	由“全碳链”服务中心承担的与供应商与 2 类制造商的碳交易成本, $z=s, j, i$
$d_k^X(q_{yk}^X)$	需求市场对 2 类制造商生产产品的需求量, $y=j, i$
ρ_{sy}^X	供应商与 2 类制造商之间的单位原材料价格, $y=j, i$
ρ_{yk}^X	2 类制造商生产的新产品的单位零售价格, $y=j, i$
ρ_{ky}^X	2 类制造商回收废旧产品的单位价格, $y=j, i$

2 模型构建

区块链技术可以帮助企业上传真实的碳排放数据信息,减少消费者检查产品是否为绿色产品的时间。本文考虑 B 模型(应用区块链技术,即 $a=1$ 时)和 N 模型(未应用区块链技术,即 $a=0$ 时)2 种模型,推导 2 种模型下各企业的最优行为及其均衡条件,旨在获得区块链技术的应用阈值,进一步探究区块链技术对供应链运营决策的影响,有效实现多级平台供应链网络均衡。

2.1 B 模型下供应链成员及整体的最优行为及其均衡条件

2.1.1 B 模型下供应商的最优行为及其均衡条件

供应商 s 通过向两类制造商出售原材料以谋求利润最大化。 $\sum_{s=1}^S (\rho_{sj}^{B*} q_{sj}^B + \rho_{si}^{B*} q_{si}^B)$ 为交易过程中获得的收益; $c_s^j(q_{sj}^B)$ 、 $c_s^i(q_{si}^B)$ 是交易过程中承担的交易成本; $f_s(q_{sj}^B)$ 、 $f_s(q_{si}^B)$ 为原材料的生产成本; $\vartheta^B \omega t_s^B$ 与 εt_s^B 分别表示购买碳排放额的成本和支付的佣金; $c^B(q_{sj}^B + q_{si}^B)$ 表示区块链运营成本; $\phi(C_s^N - C_s^B)F$ 为谎报失败的惩罚成本,则供应商 s 的利润最大化目标为

$$\pi_s^* = \max \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \left[\rho_{sj}^{B*} q_{sj}^B + \rho_{si}^{B*} q_{si}^B - c_s^j(q_{sj}^B) - c_s^i(q_{si}^B) - f_s(q_{sj}^B) - f_s(q_{si}^B) \right], \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \alpha_s \sum_{j=1}^J q_{sj}^B + \alpha_s \sum_{i=1}^I q_{si}^B - C_s^B - t_s^B = 0, \quad (2)$$

$$\forall s, j, i, \quad \rho_{sj}^B \geq 0, \rho_{si}^B \geq 0, q_{sj}^B \geq 0, q_{si}^B \geq 0, t_s^B \geq 0. \quad (3)$$

式(2)表示仅当供应商 s 碳排放量超过政府规定的碳配额时,才会购买碳排放额;式(3)表示变量非负性约束。

不同的供应商是非合作的竞争关系,根据 Nash 非合作博弈,所有的供应商的最优条件可表示为如下变分不等式,即确定 $(Q_1^{1B*}, Q_1^{2B*}, t_1^B, \lambda_1^B) \in \Omega^{SB}$, 满足

$$\begin{aligned} & \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \left[(\partial c_s^j(q_{sj}^{B*}) + \partial f_s(q_{sj}^{B*})) / \partial q_{sj}^B + ac^B - \rho_{sj}^{B*} + \alpha_s \lambda_s^* \right] (q_{sj}^B - q_{sj}^{B*}) \\ & + \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \left[(\partial c_s^i(q_{si}^{B*}) + \partial f_s(q_{si}^{B*})) / \partial q_{si}^B + ac^B - \rho_{si}^{B*} + \alpha_s \lambda_s^* \right] (q_{si}^B - q_{si}^{B*}) \\ & + \sum_{s=1}^S [\vartheta^B \omega + \varepsilon - \lambda_s^{B*}] (t_s^B - t_s^{B*}) + \sum_{s=1}^S [C_s^B + t_s^{B*} - \alpha_s \sum_{j=1}^J q_{sj}^{B*} - \alpha_s \sum_{i=1}^I q_{si}^{B*}] (\lambda_s^B - \lambda_s^{B*}) \geq 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$\forall (Q_1^{1B}, Q_1^{2B}, t_1^B, \lambda_1^B) \in \Omega^{SB}$, 其中 $\Omega^{SB} = R_+^{SJ+SI+S} \times R^S$ 。 λ_s^B 为约束(2)对应的拉格朗日乘子,且 $\lambda_1^B = (\lambda_s^B)_{S \times 1} \in R^S$ 。

2.1.2 B 模型下高排放型制造商的最优行为及其均衡条件

高排放型制造商 j 向市场提供由原材料制造的新产品及回收再制品以谋求利润最大化。 $\sum_{k=1}^K (1-\delta)\rho_{jk}^{B*} q_{jk}^B$ 为扣除平台佣金后获得的收益; $\sum_{k=1}^K c_{jk}(q_{jk}^B)$ 为交易过程中的交易成本; $f_j(q_{jk}^{vB})$ 为新产品制造的生产成本; $\sum_{k=1}^K \rho_{kj}^{B*} q_{kj}^B$ 为回收废旧产品的成本; $c_j(q_{kj}^B)$ 和 $f_j(\beta, q_{kj}^B)$ 分别表示废旧产品的检验与处理成本; $\vartheta^B \omega t_j^B$ 和 εt_j^B 分别表示购买碳排放额的成本和支付的佣金; $\sum_{s=1}^S (\rho_{sj}^{B*} q_{sj}^B + \hat{c}_s(q_{sj}^B))$ 表示从供应商采购原材料的成本与交易成本; $c^B q_{jk}^B$ 为区块链运营成本,则高排放型制造商 j 的利润最大化目标为

$$\begin{aligned} \pi_j^* = \max \left\{ \sum_{k=1}^K \left[(1-\delta)\rho_{jk}^{B*} q_{jk}^B - c_{jk}(q_{jk}^B) - f_j(q_{jk}^{vB}) - \rho_{kj}^{B*} q_{kj}^B - c_j(q_{kj}^B) - f_j(q_{kj}^B, \beta) - ac^B q_{jk}^B \right] \right. \\ \left. - \vartheta^B \omega t_j^B - \varepsilon t_j^B - \sum_{s=1}^S (\rho_{sj}^{B*} q_{sj}^B + \hat{c}_s(q_{sj}^B)) \right\}, \quad (5) \end{aligned}$$

$$\text{s.t. } \sum_{k=1}^K q_{jk}^{\text{vB}} \leq \eta \sum_{s=1}^S q_{sj}^{\text{B}}, \quad (6)$$

$$\mu \sum_{k=1}^K q_{jk}^{\text{B}} \leq \sum_{k=1}^K q_{kj}^{\text{B}}, \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K q_{jk}^{\text{B}} \leq \sum_{k=1}^K q_{jk}^{\text{vB}} + \beta \sum_{k=1}^K q_{kj}^{\text{B}}, \quad (8)$$

$$\alpha_{j1} \sum_{k=1}^K q_{jk}^{\text{B}} + \beta \alpha_{j2} \sum_{k=1}^K q_{kj}^{\text{B}} - C_j - t_j^{\text{B}} = 0, \quad (9)$$

$$\forall j, k, \rho_j^{\text{B}} \geq 0, \rho_k^{\text{B}} \geq 0, q_{jk}^{\text{B}} \geq 0, q_{jk}^{\text{vB}} \geq 0, q_{kj}^{\text{B}} \geq 0, q_{sj}^{\text{B}} \geq 0, t_j^{\text{B}} \geq 0. \quad (10)$$

式(6)表示新产品制造量不大于原材料的转化量;式(7)表示实际回收量不小于政府规定的最低量;式(8)表示产品交易量不大于新制造产品和再制造产品总量;式(9)表示高排放行制造商 j 碳排放量超过政府规定的碳配额时,才会购买碳排放额;式(10)为变量非负性约束。

不同的高排放型制造商也是非合作的竞争关系,根据 Nash 非合作博弈,所有的高排放型制造商的最优条件可表示为如下变分不等式,即确定 $(\mathbf{Q}_1^{\text{B}*}, \mathbf{q}_1^{\text{vB}*}, \mathbf{Q}_2^{\text{B}*}, \mathbf{Q}_3^{\text{B}*}, \mathbf{t}_2^{\text{B}*}, \xi_1^{\text{B}*}, \xi_1^{2\text{B}*}, \xi_1^{3\text{B}*}, \lambda_2^{\text{B}*}) \in \Omega^{\text{JB}}$, 满足

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S \left[\partial(\hat{c}_s(q_{sj}^*)) / \partial q_{sj}^{\text{B}} + \rho_{sj}^{\text{B}*} - \eta \xi_{1j}^{\text{B}*} \right] (q_{sj}^{\text{B}} - q_{sj}^{\text{B}*}) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[\partial(f_j(q_{jk}^{\text{vB}*})) / \partial q_{jk}^{\text{vB}} + \xi_{1j}^{\text{B}*} - \xi_{3j}^{\text{B}*} \right] (q_{jk}^{\text{vB}} - q_{jk}^{\text{vB}*}) \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[\partial(c_{kj}(q_{kj}^{\text{B}*})) / \partial q_{kj}^{\text{B}} - (1-\delta)\rho_{jk}^{\text{B}*} + ac^{\text{B}} + \mu \xi_{2j}^{\text{B}*} + \xi_{3j}^{\text{B}*} + \alpha_{j1} \lambda_j^{\text{B}*} \right] (q_{kj}^{\text{B}} - q_{kj}^{\text{B}*}) \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[\partial(c_j(q_{kj}^{\text{B}*}) + f_j(q_{kj}^{\text{B}*}, \beta)) / \partial q_{kj}^{\text{B}} + \rho_{kj}^{\text{B}*} - \xi_{2j}^{\text{B}*} - \beta \xi_{3j}^{\text{B}*} + \beta \alpha_{j2} \lambda_j^{\text{B}*} \right] (q_{kj}^{\text{B}} - q_{kj}^{\text{B}*}) \\ & + \sum_{j=1}^J [\vartheta^{\text{B}} \omega + \varepsilon - \lambda_j^{\text{B}*}] (t_j - t_j^{\text{B}*}) + \sum_{j=1}^J \left[\eta \sum_{s=1}^S q_{sj}^{\text{B}*} - \sum_{k=1}^K q_{jk}^{\text{vB}*} \right] (\xi_{1j}^{\text{B}} - \xi_{1j}^{\text{B}*}) \\ & + \sum_{j=1}^J \left[\sum_{k=1}^K q_{kj}^{\text{B}*} - \mu \sum_{k=1}^K q_{jk}^{\text{B}*} \right] (\xi_{2j}^{\text{B}} - \xi_{2j}^{\text{B}*}) + \sum_{j=1}^J \left[\sum_{k=1}^K q_{jk}^{\text{vB}*} + \beta \sum_{k=1}^K q_{kj}^{\text{B}*} - \sum_{k=1}^K q_{jk}^{\text{B}*} \right] (\xi_{3j}^{\text{B}} - \xi_{3j}^{\text{B}*}) \\ & + \sum_{j=1}^J \left[C_j + t_j^{\text{B}*} - \alpha_{j1} \sum_{k=1}^K q_{jk}^{\text{B}*} - \beta \alpha_{j2} \sum_{k=1}^K q_{kj}^{\text{B}*} \right] (\lambda_j^{\text{B}} - \lambda_j^{\text{B}*}) \geq 0, \quad (11) \end{aligned}$$

$\forall (\mathbf{Q}_1^{\text{B}}, \mathbf{q}_1^{\text{vB}}, \mathbf{Q}_2^{\text{B}}, \mathbf{Q}_3^{\text{B}}, \mathbf{t}_2^{\text{B}}, \xi_1^{\text{B}}, \xi_1^{2\text{B}}, \xi_1^{3\text{B}}, \lambda_2^{\text{B}}) \in \Omega^{\text{B}}$, 其中 $\Omega^{\text{B}} = \mathbf{R}_+^{\text{SJ}+3\text{JK}+4\text{J}} \times \mathbf{R}^{\text{J}}$ 。且 $\xi_1^{\text{B}}, \xi_1^{2\text{B}}, \xi_1^{3\text{B}}, \lambda_2^{\text{B}}$ 分别为约束式(6)–(9)对应的拉格朗日乘子,其中 $\xi_1^{\text{B}} = (\xi_{1j}^{\text{B}})_{j \times 1} \in \mathbf{R}_+^{\text{J}}$, $\xi_1^{2\text{B}} = (\xi_{2j}^{\text{B}})_{j \times 1} \in \mathbf{R}_+^{\text{J}}$, $\xi_1^{3\text{B}} = (\xi_{3j}^{\text{B}})_{j \times 1} \in \mathbf{R}_+^{\text{J}}$, $\lambda_2^{\text{B}} = (\lambda_j^{\text{B}})_{j \times 1} \in \mathbf{R}^{\text{J}}$ 。

2.1.3 B 模型下低排放型制造商的最优行为及其均衡条件

$\sum_{k=1}^K (1-\delta)\rho_{ik}^{\text{B}*} q_{ik}^{\text{B}}, \sum_{k=1}^K c_{ik}(q_{ik}^{\text{B}}), f_i(q_{ik}^{\text{vB}}), \sum_{k=1}^K \rho_{ki}^{\text{B}*} q_{ki}^{\text{B}}, c_i(q_{ki}^{\text{B}}), f_i(\beta, q_{ki}^{\text{B}}), \vartheta^{\text{B}} \omega t_i^{\text{B}}, \varepsilon t_i^{\text{B}}, c^{\text{B}} q_{ik}^{\text{B}}, \sum_{s=1}^S (\rho_{si}^{\text{B}*} q_{si}^{\text{B}} + \hat{c}_s(q_{si}^{\text{B}}))$ 与相关约束的说明与高排放型制造商类似。此外, $0.5re_i^2$ 表示碳减排技术投资成本,则低排放型制造商 i 的利润最大化目标为

$$\begin{aligned} \pi_i^* = \max \left\{ \sum_{k=1}^K [(1-\delta)h^{\text{B}} \rho_{ik}^{\text{B}*} q_{ik}^{\text{B}} - c_{ik}(q_{ik}^{\text{B}}) - f_i(q_{ik}^{\text{vB}}) - \rho_{ki}^{\text{B}*} q_{ki}^{\text{B}} - c_i(q_{ki}^{\text{B}}) - f_i(q_{ki}^{\text{B}}, \beta) + \vartheta^{\text{B}} \omega t_i^{\text{B}} - \varepsilon t_i^{\text{B}} - 0.5re_i^2] \right. \\ \left. - \sum_{s=1}^S (\rho_{si}^{\text{B}*} q_{si}^{\text{B}} + \hat{c}_s(q_{si}^{\text{B}})) - ac^{\text{B}} q_{ik}^{\text{B}} \right\}, \quad (12) \end{aligned}$$

$$\text{s.t. } \sum_{k=1}^K q_{ik}^{\text{vB}} \leq \eta \sum_{s=1}^S q_{si}^{\text{B}}, \quad (13)$$

$$\mu \sum_{k=1}^K q_{ik}^{\text{B}} \leq \sum_{k=1}^K q_{ki}^{\text{B}}, \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^K q_{ik}^{\text{B}} \leq \sum_{k=1}^K q_{ik}^{\text{vB}} + \beta \sum_{k=1}^K q_{ki}^{\text{B}}, \quad (15)$$

$$\alpha_{i1} \sum_{k=1}^K q_{ik}^{\text{B}} + \beta \alpha_{i2} \sum_{k=1}^K q_{ki}^{\text{B}} + t_i^{\text{B}} - C_i - e_i^{\text{B}} = 0, \quad (16)$$

$$\forall i, k, \rho_{ik}^B \geq 0, \rho_{ki}^B \geq 0, q_{ik}^B \geq 0, q_{ik}^{vB} \geq 0, q_{ki}^B \geq 0, q_{ki}^{vB} \geq 0, t_i^B, e_i^B \geq 0. \quad (17)$$

不同的低排放型制造商也是非合作的竞争关系,根据 Nash 非合作博弈,所有的低排放型制造商的最优条件可表示为如下变分不等式,即确定 $(Q_1^{2B*}, q_2^{vB*}, Q_2^{2B*}, Q_3^{2B*}, t_3^{B*}, \hat{E}^{B*}, \xi_2^{1B*}, \xi_2^{2B*}, \xi_2^{3B*}, \lambda_3^{B*}) \in \Omega^{1B}$, 满足

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S \left[\partial(\hat{c}_s(q_{si}^{B*})/\partial q_{si}^B) + \rho_{si}^{B*} - \eta \xi_{1i}^{B*} \right] (q_{si}^B - q_{si}^{B*}) + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \left[\partial(f_i(q_{ik}^{vB*})) / \partial q_{ik}^{vB} + \xi_{1i}^{B*} - \xi_{3i}^{B*} \right] (q_{ik}^{vB} - q_{ik}^{vB*}) \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \left[\partial c_{ik}(q_{ik}^{B*}) / \partial q_{ik}^B - (1-\delta) h^B \rho_{ik}^{B*} + ac^B + \mu \xi_{2i}^{B*} + \xi_{3i}^{B*} + \alpha_{i1} \lambda_i^{B*} \right] (q_{ik}^B - q_{ik}^{B*}) \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \left[\partial(c_i(q_{ki}^{B*}) + f_i(q_{ki}^{B*}, \beta)) / \partial q_{ki}^B + \rho_{ki}^{B*} - \xi_{2i}^{B*} - \beta \xi_{3i}^{B*} + \beta \alpha_{i2} \lambda_i^{B*} \right] (q_{ki}^B - q_{ki}^{B*}) \\ & + \sum_{i=1}^I \left[\varepsilon - \vartheta^B \omega + \lambda_i^{B*} \right] (t_i^B - t_i^{B*}) + \sum_{i=1}^I [r e_i^{B*} - \lambda_i^{B*}] (e_i^B - e_i^{B*}) + \sum_{i=1}^I \left[\eta \sum_{s=1}^S q_{si}^{B*} - \sum_{k=1}^K q_{ik}^{vB*} \right] (\xi_{1i}^B - \xi_{1i}^{B*}) \\ & + \sum_{i=1}^I \left[\sum_{k=1}^K q_{ki}^{B*} - \mu \sum_{k=1}^K q_{ik}^{B*} \right] (\xi_{2i}^B - \xi_{2i}^{B*}) + \sum_{i=1}^I \left[\sum_{k=1}^K q_{ik}^{vB*} + \beta \sum_{k=1}^K q_{ki}^{B*} - \sum_{k=1}^K q_{ik}^{B*} \right] (\xi_{3i}^B - \xi_{3i}^{B*}) \\ & + \sum_{i=1}^I \left[C_i + e_i^{B*} - \alpha_{i1} \sum_{k=1}^K q_{ik}^{B*} - \beta \alpha_{i2} \sum_{k=1}^K q_{ki}^{B*} - t_i^{B*} \right] (\lambda_i^B - \lambda_i^{B*}) \geq 0, \end{aligned} \quad (18)$$

$\forall (Q_1^{1B}, q_2^{vB}, Q_3^{1B}, Q_2^{2B}, t_3^B, \hat{E}^B, \xi_2^{1B}, \xi_2^{2B}, \xi_2^{3B}, \lambda_3^B) \in \Omega^{1B}$, 其中 $\Omega^{1B} = R_+^{SI+3IK+5I} \times R^I$. $\xi_2^{1B}, \xi_2^{2B}, \xi_2^{3B}, \lambda_3^B$ 分别为约束式(13)—(16)对应的拉格朗日乘子,且 $\xi_2^{1B} = (\xi_{1i}^B)_{i \times 1} \in R_+^I$, $\xi_2^{2B} = (\xi_{2i}^B)_{i \times 1} \in R_+^I$, $\xi_2^{3B} = (\xi_{3i}^B)_{i \times 1} \in R_+^I$, $\lambda_3^B = (\lambda_i^B)_{i \times 1} \in R^I$.

2.1.4 B 模型下电商平台的最优行为及其均衡条件

电商平台 e 采用代售模式,向制造商收取一定比例的推荐技术服务佣金 $\sum_{k=1}^K \left[\delta \left(\sum_{j=1}^J \rho_{jk}^{B*} q_{jk}^{B*} + \sum_{i=1}^I h^B \rho_{ik}^{B*} q_{ik}^B \right) \right]$, 并有一定的网络流量收入 $w_e(q_{jk}^B, q_{ik}^B, s_e^B)$, 同时产生服务技术投资成本 $c_e(s_e^B, s_c)$. 电商平台 e 的利润最大化目标为

$$\pi_e^* = \max \left\{ \sum_{k=1}^K \delta \left[\sum_{j=1}^J \rho_{jk}^{B*} q_{jk}^B + h^B \sum_{i=1}^I \rho_{ik}^{B*} q_{ik}^B \right] + w_e(q_{jk}^B, q_{ik}^B, s_e^B) - c_e(s_e^B, s_c) \right\}, \quad (19)$$

$$\forall j, i, k, \rho_{jk}^B \geq 0, \rho_{ik}^B \geq 0, q_{jk}^B \geq 0, q_{ik}^B \geq 0, s_e^B \geq 0. \quad (20)$$

式(20)为变量非负性约束. 不同的电商平台也是非合作的竞争关系,根据 Nash 非合作博弈,电商平台最优条件可表示为如下的变分不等式,即确定 $(Q_2^{1B*}, Q_2^{2B*}, S^{B*}) \in \Omega^{EB}$, 满足

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[-\partial w_e(q_{jk}^{B*}, q_{ik}^{B*}, s_e^{B*}) / \partial q_{jk}^B - \delta \rho_{jk}^{B*} \right] (q_{jk}^B - q_{jk}^{B*}) \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \left[-\partial w_e(q_{jk}^{B*}, q_{ik}^{B*}, s_e^{B*}) / \partial q_{ik}^B - \delta h^B \rho_{ik}^{B*} \right] (q_{ik}^B - q_{ik}^{B*}) \\ & + \left[\partial c_e(s_e^{B*}, s_c) / \partial s_e - \partial w_e(q_{jk}^{B*}, q_{ik}^{B*}, s_e^{B*}) / \partial s_e^B \right] (s_e^B - s_e^{B*}) \geq 0, \end{aligned} \quad (21)$$

$\forall (Q_2^{1B}, Q_2^{2B}, S^{B*}) \in \Omega^{EB}$, 其中 $\Omega^{EB} = R_+^{IK+IK+E}$.

2.1.5 B 模型下需求市场的最优行为及其均衡条件

设 $d_k^j(p_k^{jB*})$ 、 $d_k^i(p_k^{iB*})$ 分别为高排放型制造商 j、低排放型制造商 i 的产品需求函数. 在回收过程中, 2 类制造商的回收量必须满足如下条件, 即产品回收总量不大于总供给量:

$$\text{s. t.} \quad \sum_{k=1}^K q_{kj}^B \leq \sum_{k=1}^K q_{jk}^B, \quad (22)$$

$$\sum_{k=1}^K q_{ki}^B \leq \sum_{k=1}^K q_{ik}^B. \quad (23)$$

消费市场中的消费者的均衡条件, 可描述为:

$$\rho_{jk}^{B*} + \hat{c}_{jk}(q_{jk}^{B*}) \begin{cases} = p_k^{jB}, & q_{jk}^{B*} > 0, \\ > p_k^{jB}, & q_{jk}^{B*} = 0. \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} d_k^j(p_k^{jB*}) = \sum_{j=1}^J q_{jk}^{B*}, & p_k^{jB*} \geq 0, \\ d_k^j(p_k^{jB*}) \leq \sum_{j=1}^J q_{jk}^{B*}, & p_k^{jB*} = 0. \end{cases} \quad (25)$$

$$c_k(q_{kj}^{B*}) \begin{cases} = \rho_{kj}^{B*}, & q_{kj}^{B*} \geq 0, \\ \geq \rho_{kj}^{B*}, & q_{kj}^{B*} = 0. \end{cases} \quad (26)$$

$$h^B \rho_{ik}^{B*} + \hat{c}_{ik}(q_{ik}^{B*}) \begin{cases} = p_k^{iB}, & q_{ik}^{B*} > 0, \\ > p_k^{iB}, & q_{ik}^{B*} = 0. \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} d_k^i(p_k^{iB*}) = \sum_{i=1}^I q_{ik}^{B*}, & p_k^{iB*} \geq 0, \\ d_k^i(p_k^{iB*}) \leq \sum_{i=1}^I q_{ik}^{B*}, & p_k^{iB*} = 0. \end{cases} \quad (28)$$

$$c_k(q_{ki}^{B*}) \begin{cases} = \rho_{ki}^{B*}, & q_{ki}^{B*} \geq 0, \\ \geq \rho_{ki}^{B*}, & q_{ki}^{B*} = 0. \end{cases} \quad (29)$$

式(24)表示对于普通产品,仅在消费者愿意支付的价格 p_k^j 、产品的价格和交易成本之和相等时,交易才会发生;式(25)表示对于普通产品,消费者愿意支付的价格若为正,则需求量等于总的购买量;式(26)表示若回收过程发生,则交易成本等于制造商愿意支付的价格。式(27)—(29)的说明与上述类似。

为了使供应链达到均衡,上列条件都必须同时满足,即确定 $(\mathbf{Q}_3^{1B*}, \mathbf{Q}_2^{1B*}, \mathbf{Q}_3^{2B*}, \mathbf{Q}_2^{2B*}, \mathbf{p}^{1B*}, \mathbf{p}^{2B*}, \lambda_4^{1B*}, \lambda_4^{2B*}) \in \Omega^{KB}$, 满足

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \left[c_k(q_{kj}^{B*}) - \rho_{kj}^{B*} + \lambda_k^{jB*} \right] (q_{jk}^B - q_{jk}^{B*}) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[\rho_{jk}^{B*} + \hat{c}_{jk}(q_{jk}^{B*}) - p_k^{jB*} - \lambda_k^{jB*} \right] (q_{jk}^B - q_{jk}^{B*}) \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \left[c_k(q_{ki}^{B*}) - \rho_{ki}^{B*} + \lambda_k^{iB*} \right] (q_{ki}^B - q_{ki}^{B*}) + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \left[h^B \rho_{ik}^{B*} + \hat{c}_{ik}(q_{ik}^{B*}) - p_k^{iB*} - \lambda_k^{iB*} \right] (q_{ik}^B - q_{ik}^{B*}) \\ & + \sum_{k=1}^K \left[\sum_{j=1}^J q_{jk}^{B*} - d_k^j(p_k^{jB*}) \right] (p_k^{jB} - p_k^{jB*}) + \sum_{k=1}^K \left[\sum_{i=1}^I q_{ik}^{B*} - d_k^i(p_k^{iB*}) \right] (p_k^{iB} - p_k^{iB*}) \\ & + \sum_{j=1}^J \left(\sum_{k=1}^K q_{jk}^{B*} - \sum_{k=1}^K q_{kj}^{B*} \right) (\lambda_k^{jB} - \lambda_k^{jB*}) + \sum_{i=1}^I \left(\sum_{k=1}^K q_{ik}^{B*} - \sum_{k=1}^K q_{ki}^{B*} \right) (\lambda_k^{iB} - \lambda_k^{iB*}) \geq 0, \end{aligned} \quad (30)$$

$\forall (\mathbf{Q}_3^{1B}, \mathbf{Q}_2^{1B}, \mathbf{Q}_3^{2B}, \mathbf{Q}_2^{2B}, \mathbf{p}^{1B}, \mathbf{p}^{2B}, \lambda_4^{1B}, \lambda_4^{2B}) \in \Omega^{KB}$, 其中 $\Omega^{KB} = R_+^{2JK+2IK+4K}$ 。 λ_4^{1B} 、 λ_4^{2B} 分别是约束式(22)、(23)对应的拉格朗日乘子, $\lambda_4^{1B} = (\lambda_k^{jB})_{K \times 1} \in R_+$, $\lambda_4^{2B} = (\lambda_k^{iB})_{K \times 1} \in R_+$ 。

2.1.6 B 模型下“全碳链”服务中心的最优行为及其均衡条件

“全碳链”服务中心 c 的本质是对有碳排放额需求的企业提供碳交易服务。通过应用区块链技术,服务中心 c 可为企业提供透明的碳配额与稳定的碳交易价格,同时向交易双方收取单位的佣金以实现利润最大化。“全碳链”服务中心 c 的利润最大化目标为

$$\pi_c^* = \max \left[\sum_{s=1}^S (\varepsilon_s^{B*} - c_s^t(t_s^{B*})) + \sum_{j=1}^J (\varepsilon_j^{B*} - c_j^t(t_j^{B*})) + \sum_{i=1}^I (\varepsilon_i^{B*} - c_i^t(t_i^{B*})) - ac^B(t_s^{B*} + t_j^{B*} + t_i^{B*}) \right], \quad (31)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{s=1}^S t_s^B + \sum_{j=1}^J t_j^B \leq \sum_{i=1}^I t_i^B, \quad (32)$$

$$\forall s, j, i, \quad t_s^B \geq 0, t_j^B \geq 0, t_i^B \geq 0. \quad (33)$$

式(32)表示碳排放权购买量不大于供应量。式(33)为变量的非负性约束,则“全碳链”服务中心的最优行为可表示为如下变分不等式,即确定 $(\mathbf{t}_1^{B*}, \mathbf{t}_2^{B*}, \mathbf{t}_3^{B*}, \lambda_5^{B*}) \in \Omega^{TB}$, 满足

$$\begin{aligned} & \sum_{s=1}^S \left[\partial c_s^t(t_s^{B*}) / \partial t_s^B - \varepsilon + ac^B + \lambda_c^{B*} \right] (t_s^B - t_s^{B*}) + \sum_{j=1}^J \left[\partial c_j^t(t_j^{B*}) / \partial t_j^B - \varepsilon + ac^B + \lambda_c^{B*} \right] (t_j^B - t_j^{B*}) \\ & + \sum_{i=1}^I \left[\partial c_i^t(t_i^{B*}) / \partial t_i^B - \varepsilon + ac^B - \lambda_c^{B*} \right] (t_i^B - t_i^{B*}) + \left(\sum_{i=1}^I t_i^B - \sum_{j=1}^J t_j^B - \sum_{s=1}^S t_s^B \right) (\lambda_c^B - \lambda_c^{B*}) \geq 0, \end{aligned} \quad (34)$$

$\forall (t_1^B, t_2^B, t_3^B, \lambda_5^B) \in \Omega^{TB}$, 其中 $\Omega^{TB} = R_+^{S+J+1} + R$ 。 λ_5^B 是约束(32)对应的拉格朗日乘子且 $\lambda_5^B = (\lambda_c^B)_{1 \times 1} \in R$ 。

2.1.7 B模型中平台供应链网络的最优行为及其均衡条件

变分不等式(4)、(11)、(18)、(21)、(30)和(34)的总和同时满足时,将达到应用区块链技术下平台供应链网络的均衡,即确定 $(Q_1^{1B*}, Q_1^{2B*}, q_1^{VB*}, q_2^{VB*}, Q_2^{1B*}, Q_2^{2B*}, Q_3^{1B*}, Q_3^{2B*}, t_1^B, t_2^B, t_3^B, E^{B*}, S^{B*}, \xi_1^{1B*}, \xi_2^{1B*}, \xi_1^{2B*}, \lambda_2^B, \lambda_3^B, \lambda_4^{1B*}, \xi_2^{2B*}, \xi_1^{3B*}, \xi_2^{3B*}, \lambda_1^B, \lambda_4^{2B*}, \lambda_5^B, p^{1B*}, p^{2B*}) \in \Omega^B$, 满足

$$\begin{aligned} & \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \left[\partial(c_s^j(q_{sj}^{B*}) + f_s(q_{sj}^{B*}) + \hat{c}_s(q_{sj}^{B*})) / \partial q_{sj}^B + c^B + \alpha_s \lambda_s^{B*} - \eta \xi_{1j}^{B*} \right] (q_{sj}^B - q_{sj}^{B*}) \\ & + \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \left[\partial(c_s^i(q_{si}^{B*}) + f_s(q_{si}^{B*}) + \hat{c}_s(q_{si}^{B*})) / \partial q_{si}^B + c^B + \alpha_s \lambda_s^{B*} - \eta \xi_{1i}^{B*} \right] (q_{si}^B - q_{si}^{B*}) \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[\partial(f_j(q_{jk}^{VB*})) / \partial q_{jk}^{VB} + \xi_{1j}^{B*} - \xi_{3j}^{B*} \right] (q_{jk}^{VB} - q_{jk}^{VB*}) + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \left[\partial(f_i(q_{ik}^{VB*})) / \partial q_{ik}^{VB} + \xi_{1i}^{B*} - \xi_{3i}^{B*} \right] (q_{ik}^{VB} - q_{ik}^{VB*}) \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[\partial(c_{jk}(q_{jk}^{B*}) - \partial w_e(q_{jk}^{B*}, q_{ik}^{B*}, s_e^{B*})) / \partial q_{jk}^B + \hat{c}_{jk}(q_{jk}^{B*}) + \mu \xi_{2j}^{B*} + \xi_{3j}^{B*} + \alpha_{j1} \lambda_j^{B*} - p_k^{jB*} - \lambda_k^{jB*} + c^B \right] (q_{jk}^B - q_{jk}^{B*}) \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \left[\partial(c_{ik}(q_{ik}^{B*}) - w_e(q_{jk}^{B*}, q_{ik}^{B*}, s_e^{B*})) / \partial q_{ik}^B + \hat{c}_{ik}(q_{ik}^{B*}) + \mu \xi_{2i}^{B*} + \xi_{3i}^{B*} + \alpha_{i1} \lambda_i^{B*} - p_k^{iB*} - \lambda_k^{iB*} + c^B \right] (q_{ik}^B - q_{ik}^{B*}) \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[\partial(c_j(q_{kj}^{B*}) + f_j(q_{kj}^{B*}, \beta)) / \partial q_{kj}^B + c_k(q_{kj}^{B*}) - \xi_{2j}^{B*} - \beta \xi_{3j}^{B*} + \beta \alpha_{j2} \lambda_j^{B*} + \lambda_k^{jB*} \right] (q_{kj}^B - q_{kj}^{B*}) \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \left[\partial(c_i(q_{ki}^{B*}) + f_i(q_{ki}^{B*}, \beta)) / \partial q_{ki}^B + c_k(q_{ki}^{B*}) - \xi_{2i}^{B*} - \beta \xi_{3i}^{B*} + \beta \alpha_{i2} \lambda_i^{B*} + \lambda_k^{iB*} \right] (q_{ki}^B - q_{ki}^{B*}) \\ & + \sum_{s=1}^S \left[\partial^B \omega + \partial c_s^t(t_s^{B*}) / \partial t_s^B + \lambda_c^{B*} - \lambda_s^{B*} + c^B \right] (t_s^B - t_s^{B*}) + \sum_{j=1}^J \left[\partial^B \omega + \partial c_j^t(t_j^{B*}) / \partial t_j^B + \lambda_c^{B*} - \lambda_j^{B*} + c^B \right] (t_j^B - t_j^{B*}) \\ & + \sum_{i=1}^I \left[\partial c_i^t(t_i^{B*}) / \partial t_i^B - \partial^B \omega + \lambda_i^{B*} - \lambda_c^{B*} + c^B \right] (t_i^B - t_i^{B*}) + \sum_{i=1}^I \left[r e_i^{B*} - \lambda_i^{B*} \right] (e_i^B - e_i^{B*}) \\ & + \left[\partial(c_e(s_e^{B*}, s_c) - \partial w_e(q_{jk}^{B*}, q_{ik}^{B*}, s_e^{B*})) / \partial s_e^B \right] (s_e^B - s_e^{B*}) + \sum_{j=1}^J \left[\eta \sum_{s=1}^S q_{sj}^{B*} - \sum_{k=1}^K q_{jk}^{VB*} \right] (\xi_{1j}^B - \xi_{1j}^{B*}) \\ & + \sum_{i=1}^I \left[\eta \sum_{s=1}^S q_{si}^{B*} - \sum_{k=1}^K q_{ik}^{VB*} \right] (\xi_{1i}^B - \xi_{1i}^{B*}) + \sum_{j=1}^J \left[\sum_{k=1}^K q_{kj}^{B*} - \mu \sum_{k=1}^K q_{jk}^{VB*} \right] (\xi_{2j}^B - \xi_{2j}^{B*}) \\ & + \sum_{i=1}^I \left[\sum_{k=1}^K q_{ki}^{B*} - \mu \sum_{k=1}^K q_{ik}^{VB*} \right] (\xi_{2i}^B - \xi_{2i}^{B*}) + \sum_{j=1}^J \left[\sum_{k=1}^K q_{jk}^{VB*} + \beta \sum_{k=1}^K q_{kj}^{B*} - \sum_{k=1}^K q_{jk}^{B*} \right] (\xi_{3j}^B - \xi_{3j}^{B*}) \\ & + \sum_{i=1}^I \left[\sum_{k=1}^K q_{ik}^{VB*} + \beta \sum_{k=1}^K q_{ki}^{B*} - \sum_{k=1}^K q_{ik}^{B*} \right] (\xi_{3i}^B - \xi_{3i}^{B*}) + \sum_{s=1}^S \left[C_s^B + t_s^B - \alpha_s \sum_{j=1}^J q_{sj}^{B*} - \alpha_s \sum_{i=1}^I q_{si}^{B*} \right] (\lambda_s^B - \lambda_s^{B*}) \\ & + \sum_{j=1}^J \left[C_j + t_j^B - \alpha_{j1} \sum_{k=1}^K q_{jk}^{B*} - \beta \alpha_{j2} \sum_{k=1}^K q_{kj}^{B*} \right] (\lambda_j^B - \lambda_j^{B*}) + \sum_{i=1}^I \left[C_i + e_i^{B*} - \alpha_{i1} \sum_{k=1}^K q_{ik}^{B*} - \beta \alpha_{i2} \sum_{k=1}^K q_{ki}^{B*} - t_i^{B*} \right] (\lambda_i^B - \lambda_i^{B*}) \\ & + \sum_{j=1}^J \left(\sum_{k=1}^K q_{jk}^{B*} - \sum_{k=1}^K q_{kj}^{B*} \right) (\lambda_k^{jB} - \lambda_k^{jB*}) + \sum_{i=1}^I \left(\sum_{k=1}^K q_{ik}^{B*} - \sum_{k=1}^K q_{ki}^{B*} \right) (\lambda_k^{iB} - \lambda_k^{iB*}) \\ & + \left(\sum_{i=1}^I t_i^{B*} - \sum_{j=1}^J t_j^B - \sum_{s=1}^S t_s^{B*} \right) (\lambda_c^B - \lambda_c^{B*}) + \sum_{k=1}^K \left[\sum_{j=1}^J q_{jk}^{B*} - d_k^i(p_k^{B*}) \right] (p_k^{jB} - p_k^{B*}) \\ & + \sum_{k=1}^K \left[\sum_{i=1}^I q_{ik}^{B*} - d_k^i(p_k^{iB*}) \right] (p_k^{iB} - p_k^{iB*}) \geq 0, \end{aligned} \quad (35)$$

$\forall (Q_1^{1B}, Q_1^{2B}, q_1^{VB}, q_2^{VB}, Q_2^{1B}, Q_2^{2B}, Q_3^{1B}, Q_3^{2B}, t_1^B, t_2^B, t_3^B, E^B, S^B, \xi_1^{1B}, \xi_2^{1B}, \xi_1^{2B}, \xi_2^{2B}, \xi_1^{3B}, \xi_2^{3B}, \lambda_1^B, \lambda_2^B, \lambda_3^B, \lambda_4^B, \lambda_4^B, \lambda_5^B, p^{1B}, p^{2B}) \in \Omega^B$, 其中 $\Omega^B = \Omega^{SB} \times \Omega^{VB} \times \Omega^{IB} \times \Omega^{EB} \times \Omega^{KB} \times \Omega^{TB}$ 。

2.2 N模型中平台供应链网络的最优行为及其均衡条件

下面将推导N模型,确定 $(Q_1^{1N*}, Q_1^{2N*}, q_1^{VN*}, q_2^{VN*}, Q_2^{1N*}, Q_2^{2N*}, Q_3^{1N*}, Q_3^{2N*}, t_1^N, t_2^N, t_3^N, E^{N*}, S^{N*}, \xi_1^{1N*}, \xi_2^{1N*}, \xi_1^{2N*}, \xi_2^{2N*}, \xi_1^{3N*}, \xi_2^{3N*}, \lambda_1^N, \lambda_2^N, \lambda_3^N, \lambda_4^{1N*}, \lambda_4^{2N*}, \lambda_5^N, p^{1N*}, p^{2N*}) \in \Omega^N$, 满足

$$\begin{aligned}
 & \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \left[\partial(c_s^j(q_{sj}^{N*}) + f_s(q_{sj}^{N*}) + \hat{c}_s(q_{sj}^{N*})) / \partial q_{sj}^N + \alpha_s \lambda_s^{N*} - \eta \xi_{1j}^{N*} \right] (q_{sj}^N - q_{sj}^{N*}) \\
 & + \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \left[\partial(c_s^i(q_{si}^{N*}) + f_s(q_{si}^{N*}) + \hat{c}_s(q_{si}^{N*})) / \partial q_{si}^N + \alpha_s \lambda_s^{N*} - \eta \xi_{1i}^{N*} \right] (q_{si}^N - q_{si}^{N*}) \\
 & + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[\partial(f_j(q_{jk}^{vN*})) / \partial q_{jk}^{vN} + \xi_{1j}^{N*} - \xi_{3j}^{N*} \right] (q_{jk}^{vN} - q_{jk}^{vN*}) + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \left[\partial(f_i(q_{ik}^{vN*})) / \partial q_{ik}^{vN} + \xi_{1i}^{N*} - \xi_{3i}^{N*} \right] (q_{ik}^{vN} - q_{ik}^{vN*}) \\
 & + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[\partial(c_{jk}(q_{jk}^{N*}) - \partial w_e(q_{jk}^{N*}, q_{ik}^{N*}, s_e^{N*})) / \partial q_{jk}^N + \hat{c}_{jk}(q_{jk}^{N*}) + \mu \xi_{2j}^{N*} + \xi_{3j}^{N*} + \alpha_{j1} \lambda_j^{N*} - p_k^{iN*} - \lambda_k^{jN*} \right] (q_{jk}^N - q_{jk}^{N*}) \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \left[\partial(c_{ik}(q_{ik}^{N*}) - w_e(q_{jk}^{N*}, q_{ik}^{N*}, s_e^{N*})) / \partial q_{ik}^N + \hat{c}_{ik}(q_{ik}^{N*}) + \mu \xi_{2i}^{N*} + \xi_{3i}^{N*} + \alpha_{i1} \lambda_i^{N*} - p_k^{iN*} - \lambda_k^{iN*} \right] (q_{ik}^N - q_{ik}^{N*}) \\
 & + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[\partial(c_j(q_{kj}^{N*}) + f_j(q_{kj}^{N*}, \beta)) / \partial q_{kj}^N + c_k(q_{kj}^{N*}) - \xi_{2j}^{N*} - \beta \xi_{3j}^{N*} + \beta \alpha_{j2} \lambda_j^{N*} + \lambda_k^{jN*} \right] (q_{kj}^N - q_{kj}^{N*}) \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \left[\partial(c_i(q_{ki}^{N*}) + f_i(q_{ki}^{N*}, \beta)) / \partial q_{ki}^N + c_k(q_{ki}^{N*}) - \xi_{2i}^{N*} - \beta \xi_{3i}^{N*} + \beta \alpha_{i2} \lambda_i^{N*} + \lambda_k^{iN*} \right] (q_{ki}^N - q_{ki}^{N*}) \\
 & + \sum_{s=1}^S \left[\vartheta^N \omega + \partial c_s^t(t_s^{N*}) / \partial t_s^N + \lambda_c^{N*} - \lambda_s^{N*} \right] (t_s^N - t_s^{N*}) + \sum_{j=1}^J \left[\vartheta^N \omega + \partial c_j^t(t_j^{N*}) / \partial t_j^N + \lambda_c^{N*} - \lambda_j^{N*} \right] (t_j^N - t_j^{N*}) \\
 & + \sum_{i=1}^I \left[\partial c_i^t(t_i^{N*}) / \partial t_i^N - \vartheta^N \omega + \lambda_i^{N*} - \lambda_c^{N*} \right] (t_i^N - t_i^{N*}) + \sum_{i=1}^I \left[r e_i^{N*} - \lambda_i^{N*} \right] (e_i^N - e_i^{N*}) \\
 & + \left[\partial(c_e(s_e^{N*}, s_c) - \partial w_e(q_{jk}^{N*}, q_{ik}^{N*}, s_e^{N*})) / \partial s_e^N \right] (s_e^N - s_e^{N*}) + \sum_{j=1}^J \left[\eta \sum_{s=1}^S q_{sj}^{N*} - \sum_{k=1}^K q_{jk}^{vN*} \right] (\xi_{1j}^N - \xi_{1j}^{N*}) \\
 & + \sum_{i=1}^I \left[\eta \sum_{s=1}^S q_{si}^{N*} - \sum_{k=1}^K q_{ik}^{vN*} \right] (\xi_{1i}^N - \xi_{1i}^{N*}) + \sum_{j=1}^J \left[\sum_{k=1}^K q_{kj}^{N*} - \mu \sum_{k=1}^K q_{jk}^{N*} \right] (\xi_{2j}^N - \xi_{2j}^{N*}) \\
 & + \sum_{i=1}^I \left[\sum_{k=1}^K q_{ki}^{N*} - \mu \sum_{k=1}^K q_{ik}^{N*} \right] (\xi_{2i}^N - \xi_{2i}^{N*}) + \sum_{j=1}^J \left[\sum_{k=1}^K q_{jk}^{vN*} + \beta \sum_{k=1}^K q_{kj}^{N*} - \sum_{k=1}^K q_{jk}^{N*} \right] (\xi_{3j}^N - \xi_{3j}^{N*}) \\
 & + \sum_{i=1}^I \left[\sum_{k=1}^K q_{ik}^{vN*} + \beta \sum_{k=1}^K q_{ki}^{N*} - \sum_{k=1}^K q_{ik}^{N*} \right] (\xi_{3i}^N - \xi_{3i}^{N*}) + \sum_{s=1}^S \left[C_s^N + t_s^{N*} - \alpha_s \sum_{j=1}^J q_{sj}^{N*} - \alpha_s \sum_{i=1}^I q_{si}^{N*} \right] (\lambda_s^N - \lambda_s^{N*}) \\
 & + \sum_{j=1}^J \left[C_j + t_j^{N*} - \alpha_{j1} \sum_{k=1}^K q_{jk}^{N*} - \beta \alpha_{j2} \sum_{k=1}^K q_{kj}^{N*} \right] (\lambda_j^N - \lambda_j^{N*}) \\
 & + \sum_{i=1}^I \left[C_i + e_i^{N*} - \alpha_{i1} \sum_{k=1}^K q_{ik}^{N*} - \beta \alpha_{i2} \sum_{k=1}^K q_{ki}^{N*} - t_i^{N*} \right] (\lambda_i^N - \lambda_i^{N*}) + \sum_{j=1}^J \left(\sum_{k=1}^K q_{jk}^{N*} - \sum_{k=1}^K q_{kj}^{N*} \right) (\lambda_k^{jN} - \lambda_k^{iN*}) \\
 & + \sum_{i=1}^I \left(\sum_{k=1}^K q_{ik}^{N*} - \sum_{k=1}^K q_{ki}^{N*} \right) (\lambda_k^{iN} - \lambda_k^{jN*}) + \left(\sum_{i=1}^I t_i^{N*} - \sum_{j=1}^J t_j^{N*} - \sum_{s=1}^S t_s^{N*} \right) (\lambda_c^N - \lambda_c^{N*}) \\
 & + \sum_{k=1}^K \left[\sum_{j=1}^J q_{jk}^{N*} - d_k^j(p_k^{jN*}) \right] (p_k^{jN} - p_k^{jN*}) + \sum_{k=1}^K \left[\sum_{i=1}^I q_{ik}^{N*} - d_k^i(p_k^{iN*}) \right] (p_k^{iN} - p_k^{iN*}) \geq 0, \tag{36}
 \end{aligned}$$

$\forall (Q_1^{1N}, Q_1^{2N}, q_1^{vN}, q_2^{vN}, Q_2^{1N}, Q_2^{2N}, Q_3^{1N}, Q_3^{2N}, t_1^N, t_2^N, t_3^N, \hat{E}^N, S^N, \xi_1^{1N}, \xi_2^{1N}, \xi_1^{2N}, \xi_2^{2N}, \xi_1^{3N}, \xi_2^{3N}, \lambda_1^N, \lambda_2^N, \lambda_3^N, \lambda_4^N, \lambda_4^N, \lambda_5^N, p^{1N}, p^{2N}) \in \Omega^N$, 其中 $\Omega^N = \Omega^{SN} \times \Omega^{IN} \times \Omega^{vN} \times \Omega^{EN} \times \Omega^{KN} \times \Omega^{TN}$ 。

式(36)的推导与式(35)类似,不再给出。

3 数值算例

针对碳排放权初始分配环节中的企业碳谎报行为,本文考虑由 2 个供应商、2 个高排放型制造商、2 个低排放型制造商、1 个电商平台、1 个“全碳链”服务中心、2 个需求市场构成的平台供应链网络进行数值分析。本章具体分析供应商谎报碳配额与单位区块链运营成本对供应链成员均衡决策的影响,对比研究有无区块链技术下平台供应链网络的均衡决策。通过比较 2 种模型下的均衡解,进一步得出区块链技术的应用阈值,以及区块链技术如何影响该平台供应链网络的运营决策。结合 MATLAB,设计修正投影算法,设置迭代步长为 0.01,终止条件为 10^{-8} 求解模型。其余参数设置为: $\delta=0.1$, $\theta=0.55$, $\varepsilon=1$, $\omega=5$, $\beta=0.9$, $\eta=0.9$, $\mu=$

0.34, $\phi=0.6, F=10, C_j=2.2, C_i=7, \alpha_{s1}=0.9, \alpha_{j1}=0.8, \alpha_{j2}=0.1, \alpha_{i1}=0.5, \alpha_{i2}=0.08, t=2, s_c=1, m=2, r=2, g=0.8, \tau_j=0.5, \tau_i=0.7, \lambda=0.5$ 。相关函数设定如下: $c_s^{jX}(q_{sj}^X)=0.5(q_{sj}^X)^2+1.5q_{sj}^X, c_s^{iX}(q_{si}^X)=0.5(q_{si}^X)^2+1.5q_{si}^X, f_s(Q_s^j)=0.5(q_{sj}^X)^2+1.2q_{sj}^X, f_s(Q_s^i)=0.5(q_{si}^X)^2+1.2q_{si}^X, \hat{c}_s^j(q_{sj}^X)=0.5(q_{sj}^X)^2+0.3q_{sj}^X, \hat{c}_s^i(q_{si}^X)=0.5(q_{si}^X)^2+0.3q_{si}^X, c_{jk}^X(q_{jk}^X)=0.5(q_{jk}^X)^2+1.5q_{jk}^X, c_{ik}^X(q_{ik}^X)=0.5(q_{ik}^X)^2+1.5q_{ik}^X, \hat{c}_{jk}^X(q_{jk}^X)=0.1(q_{jk}^X)^2+1.3, \hat{c}_{ik}^X(q_{ik}^X)=0.1(q_{ik}^X)^2+1.3, f_j(q_{jk}^{vX})=(q_{jk}^{vX})^2+0.2q_{jk}^{vX}, f_i(q_{ik}^{vX})=(q_{ik}^{vX})^2+0.2q_{ik}^{vX}, c_k^X(q_{kj}^X)=1.5(q_{kj}^X)^2+3, c_k^X(q_{ki}^X)=1.5(q_{ki}^X)^2+3, c_e^X(s_e^X, s_c)=0.5m(s_e^X-s_c)^2, c_s^{iX}(t_s^X)=0.01(t_s^X)^2, c_j^{iX}(t_j^X)=0.05(t_j^X)^2, c_i^{iX}(t_i^X)=0.03(t_i^X)^2, f_j^X(q_{kj}^X, \beta)=0.5(\beta q_{kj}^X)^2+\beta q_{kj}^X+2, f_i^X(q_{ki}^X, \beta)=0.5(\beta q_{ki}^X)^2+\beta q_{ki}^X+2, w_e=0.05(\sum_i \sum_k q_{ik}^X)^2+0.03(\sum_j \sum_k q_{jk}^X)^2+0.9(s_e^X)^2+10, d_k^{jX}=(1-\theta)A-2p_k^{jX}-p_{3-k}^{jX}+0.15p_k^{iX}+0.1p_{3-k}^{iX}+\tau_j s_e^X, d_k^{iX}=\theta A-2p_k^{iX}-p_{3-k}^{iX}+0.15p_k^{jX}+0.1p_{3-k}^{jX}+\tau_i s_e^X+\gamma e_i^X-(1-a)gt$ 。

3.1 供应商谎报 C_s 对供应链均衡影响的对比分析

本节研究该供应链网络中未应用区块链技术(N模型)时, 供应商谎报碳配额 C_s 对各成员决策变量与利润的影响, 并与应用区块链(B模型)时的均衡结果进行比较。N模型中, 令 $C_j=2.2, C_i=7, h^N=0.8, \vartheta^N=1.5, C_s^N=6:0.1:6.6$ 。B模型中, 令 $C_j=2.2, C_i=7, h^B=1, \vartheta^B=1, C_s^B=5$ 。均衡结果如表4所示。

分析可知, 与应用区块链技术比较, 供应商在无区块链时为了自身的利润谎报碳配额最终会损害供应链整体的利润。N模型中, 随着 C_s^N 逐渐增大, 供应商与2类制造商的交易量 q_{sj}^{N*}, q_{si}^{N*} 都有不同程度的提高。显然, 由于供应商拥有更高碳排放权, 有更多的原材料能够提供, 因此2类供应商的交易量 q_{jk}^{N*}, q_{ik}^{N*} , 回收量 q_{kj}^{N*}, q_{ki}^{N*} 也逐渐增大, 但与B模型相比, 供应商谎报的碳配额 C_s^N 并没有促进自身和两类制造商的交易量、回收量的增加。应用区块链技术可以确保碳排放权初始分配环节中, 企业申报碳数据等信息真实, 相应的碳排放量估计将更加准确和可信。结合表4, 在B模型中, 碳交易情况会更加的合理, 即 $t_s^{B*}+t_j^{B*}=t_i^{B*}$, 相比于N模型下 $t_s^{N*}+t_j^{N*}<t_i^{N*}$, 说明应用区块链技术避免政府碳配额资源的浪费。

表4 供应商谎报 C_s 情形对 N、B 模型均衡结果的影响
Table 4 Impact of supplier misreporting C_s on the equilibrium results of N and B models

参数	C_s^X	q_{sj}^{X*}	q_{si}^{X*}	q_{jk}^{X*}	q_{ik}^{X*}	q_{jk}^{vX*}	q_{ik}^{vX*}	q_{kj}^{X*}	q_{ki}^{X*}	t_s^{X*}	t_j^{X*}	t_i^{X*}
B 模型	5.000 0	1.541 0	3.304 2	1.998 4	4.28 5	1.386 9	2.973 8	0.679 5	1.456 9	3.721 3	1.364 4	5.085 7
	6.000 0	1.277 2	3.108 3	1.656 3	4.030 9	1.149 5	2.797 4	0.563 2	1.370 5	1.893 9	0.754 2	5.285 9
	6.100 0	1.277 4	3.108 4	1.656 5	4.031 1	1.149 6	2.797 6	0.563 2	1.370 6	1.794 4	0.754 6	5.285 7
	6.200 0	1.277 5	3.108 6	1.656 8	4.031 3	1.149 8	2.797 7	0.563 3	1.370 6	1.695 0	0.755 0	5.285 5
N 模型	6.300 0	1.277 7	3.108 7	1.657 0	4.031 5	1.149 9	2.797 9	0.563 4	1.370 7	1.595 6	0.755 4	5.285 3
	6.400 0	1.277 9	3.108 9	1.657 2	4.031 7	1.150 1	2.798 0	0.563 4	1.370 8	1.496 2	0.755 8	5.285 1
	6.500 0	1.278 0	3.109 1	1.657 4	4.031 9	1.150 2	2.798 2	0.563 5	1.370 9	1.396 8	0.756 2	5.284 9
	6.600 0	1.278 2	3.109 2	1.657 6	4.032 1	1.150 4	2.798 3	0.563 6	1.370 9	1.297 4	0.756 5	5.284 7
参数	C_s^X	p_k^{jX*}	p_k^{iX*}	s_c^{X*}	e_i^{X*}	π_s^{X*}	π_j^{X*}	π_i^{X*}	π_c^{X*}	π_c^{X*}	π^{X*}	
B 模型	5.000 0	28.782 0	38.941 0	10.000 0	2.396 9	25.587 6	33.103 8	165.993 0	8.156 5	102.443 0	335.254 0	
	6.000 0	28.895 0	37.778 0	10.000 0	2.341 4	37.224 8	28.948 4	107.379 0	14.062 9	80.300 8	267.915 0	
	6.100 0	28.895 0	37.777 4	10.000 0	2.341 4	37.460 3	28.953 1	107.386 0	13.871 8	80.307 0	267.978 0	
	6.200 0	28.895 0	37.777 2	10.000 0	2.341 4	37.695 8	28.957 7	107.394 0	13.680 4	80.313 1	268.041 0	
N 模型	6.300 0	28.894 0	37.777 1	10.000 0	2.341 4	37.931 2	28.962 3	107.402 0	13.488 5	80.319 2	268.103 0	
	6.400 0	28.894 0	37.769 0	10.000 0	2.341 4	38.166 7	28.966 9	107.410 0	13.296 3	80.325 3	268.165 0	
	6.500 0	28.894 0	37.776 0	10.000 0	2.341 5	38.402 0	28.972 0	107.420 0	13.104 0	80.331 0	268.230 0	
	6.600 0	28.894 0	37.776 7	10.000 0	2.341 5	38.637 7	28.976 1	107.426 0	12.910 6	80.337 5	268.287 0	

就 N 模型而言, 供应商谎报碳配额力度加大能够在一定程度上提高自身与供应链的利润, 但与 B 模型相比, B 模型中供应链成员(除供应商、“全碳链”服务中心)的利润都有大幅的提高, 且供应链利润远高于 N 模型, 说明碳谎报行为极大地损害了2类制造商和电商平台的利润, 不利于供应链的长期稳定发展。此外,

当供应商谎报的碳配额越多时,政府的惩罚成本也就越多,在一定程度上抑制了供应商继续谎报的行为。此时,为了维护供应链成员的利润,稳定碳市场的运行机制,促进企业积极参与碳交易,供应链成员可以考虑引入区块链技术,采用技术手段遏制谎报行为。

3.2 区块链运营成本 c^B 对供应链均衡的对比分析

本节研究单位区块链运营成本 c^B 对 B 模型供应链均衡结果的影响,并与 N 模型对比。N 模型中,令 $C_s^N = 6.2, C_j = 2.2, C_i = 7, h^N = 0.8, \vartheta^N = 1.5$ 。B 模型中,令 $C_s^B = 5, C_j = 2.2, C_i = 7, h^B = 1, \vartheta^B = 1, c^B = 0.3:0.2:1.9$ 。2 种模型的供应链均衡结果如图 2—4 所示。

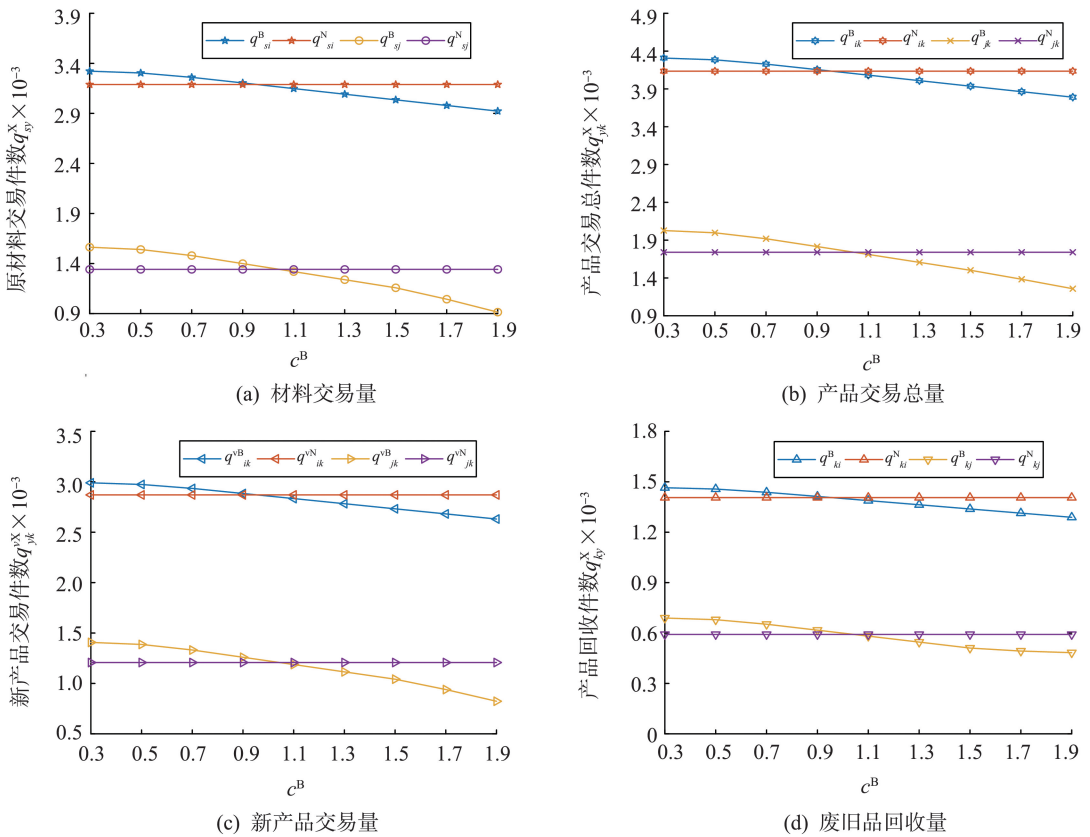


图 2 区块链运营成本 c^B 对供应链成员产品交易量的影响

Fig.2 Impact of blockchain operating cost c^B on product trading volume of supply chain members

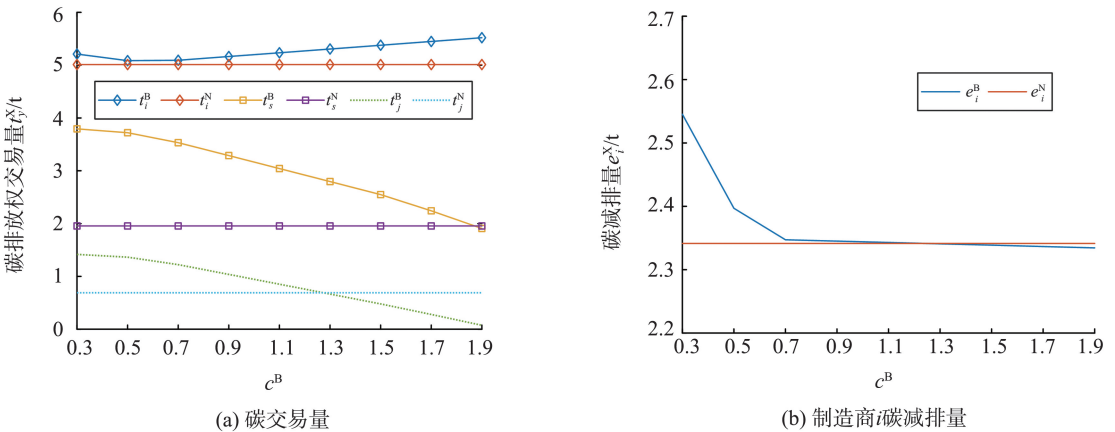


图 3 区块链运营成本 c^B 对供应链成员碳交易量的影响

Fig.3 Impact of blockchain operating cost c^B on carbon trading volume of supply chain members

由图 2(a)—(d) 可以看出, B 模型中,随着单位区块链运营成本 c^B 的不断升高,各决策方的产品交易量 ($q_{si}^{B*}, q_{sj}^{B*}, q_{ik}^{B*}, q_{jk}^{B*}, q_{ki}^{B*}, q_{kj}^{B*}$) 均呈下降趋势。特别是,当 c^B 超过一定阈值(大约 1.1)时,产品的交易量小于 N 模型中的交易量。此时,因应用区块链技术带来的碳配额信息透明、需求扩增等经济收益

无法抵消区块链运营成本的增加,所以使得供应商、2 类制造商失去了应用区块链技术的动机。

结合图 3(a)、(b),可以发现,随着 c^B 的增加,低排放型制造商的碳交易量先减再增,而供应商、高排放型制造商及供应链整体的碳交易量均呈下降趋势。对于低排放制造商而言, c^B 的不断增加,生产成本的变化使得其不得不降低自己的生产量以提高自身碳排放额出售量;对于供应商而言,通过谎报碳配额能够极大地降低碳排放额购买量,从而降低碳交易成本;对于高排放制造商而言,当 $c^B > 1.3$ 时,碳排放额购买量低于 N 模型中的购买量,但此时应用区块链技术并不是最优决策,即其利润低于 N 模型时的利润。政府可考虑提供一定的区块链技术补贴激励企业应用区块链技术。

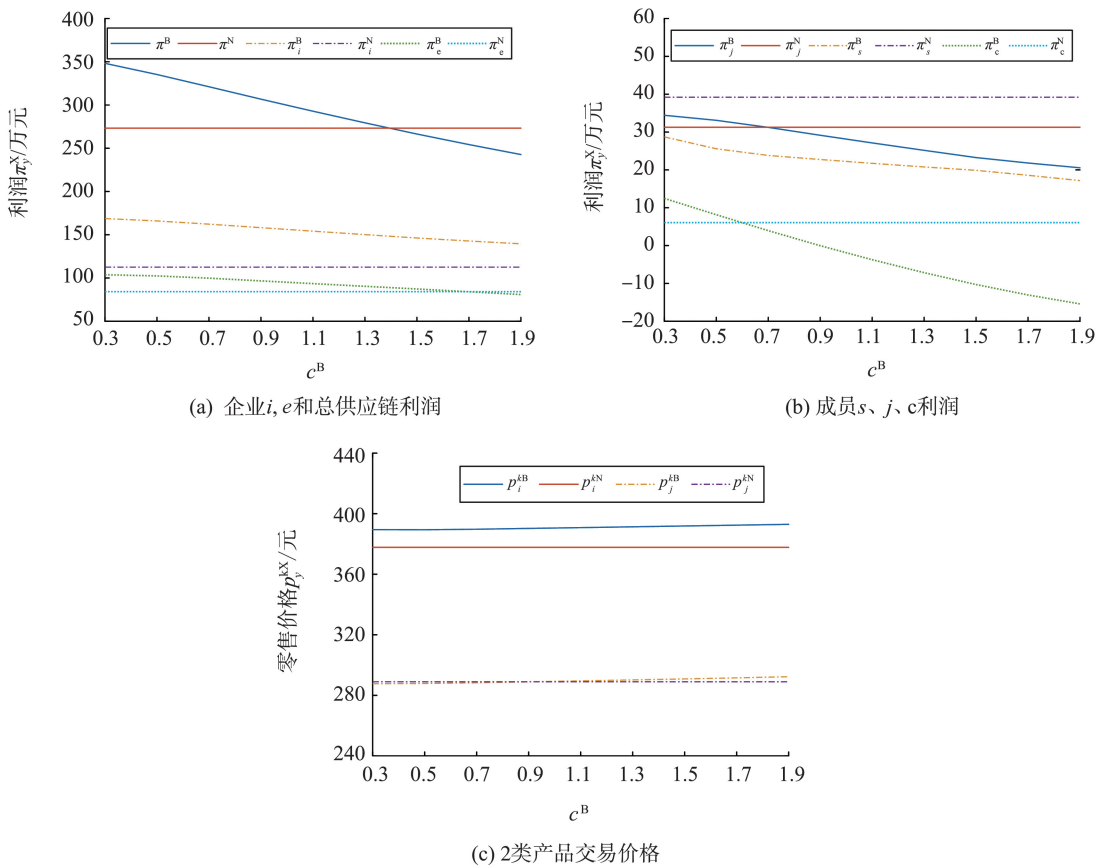


图 4 区块链运营成本 c^B 对供应链成员利润的影响

Fig.4 Impact of blockchain operating cost c^B on the profits of supply chain members

结合图 4(a)—(c), B 模型中,尽管供应链中各成员利润的变化与 c^B 的增加呈负相关,但应用区块链技术对供应链整体带来的收益是可观的,特别是,当单位区块链运营成本 $c^B < 1.4$ 时, B 模型中的供应链的总利润始终大于 N 模型。对于低排放型制造商和电商平台的来说,由于特殊的企业定位(消费者对低排放型制造商生产的绿色产品有一定的偏好,而平台是制造商与消费者之间唯一的交易渠道),因此使得他们在应用区块链技术时,有较低的区块链应用条件(见图 4(a)),即应用区块链技术在经济角度来说是更好的选择。相比之下,由图 4(b)可以发现高排放型制造商、供应商以及“全碳链”服务中心的区块链应用条件均较高(只有区块链运营成本较低时,应用区块链技术对他们更有利)。这归因于供应商和高排放型制造商都是高排放型企业,生产的普通产品处于市场劣势地位,导致产品交易量降低,碳交易量也随之降低,最终导致高排放型企业和“全碳链”服务中心的收益下降,若区块链技术运营成本相对较低,选择应用区块链对他们来说更有价值,因此,政府可以考虑对高排放型企业(尤其是供应商)提供适当区块链运营补贴,激励他们应用区块链技术。

总的来说,在一定的区块链运营成本阈值内($c^B < 1.4$),应用区块链技术对整个供应链的利润有所提升。考虑到高排放型制造商与“全碳链”服务中心的区块链应用条件较高,政府应该出台一些补贴政策,以保证供应链的长久发展。

4 结论

本文为探索区块链技术在抑制碳排放权初始分配环节中的企业碳谎报行为,满足消费者信息核实需求,提高供应链中各成员的利润的影响,针对由多个竞争的供应商、多个竞争的高排放型制造商、多个竞争的低排放型制造商、电商平台、“全碳链”服务中心组成的多级平台供应链网络,基于变分不等式理论建立了有无区块链技术的2种供应链网络均衡模型,进一步对比研究供应商谎报碳配额以及单位区块链运营成本对整个供应链网络均衡决策的影响。研究结果如下:

(1) 与未应用区块链技术相比,应用区块链技术时企业申报的碳配额等信息将更透明,碳交易价格将更加合理,避免了出现碳排放额交易量不一致的情况,减少了资源的浪费,同时供应商、2类制造商的产品交易量与回收量的提高,从而使得供应链整体的利润上升。

(2) 未应用区块链技术时,供应商谎报碳配额能提高自身和供应链整体的利润,此时供应商有继续谎报碳配额的动力,但与应用区块链技术相比,碳谎报行为极大地降低了其他成员的利润并损害了供应链的整体盈利能力。

(3) 受区块链运营成本的限制,区块链技术存在一定的应用阈值,供应链成员应结合应用阈值合理决策是否采用区块链技术。当单位区块链运营成本 $c^B < 1.4$ 时,采用区块链技术对供应链成员来说更有利;当 $c^B > 1.4$ 时,强行应用区块链技术反而会降低利润,不利于供应链的长期发展。

根据分析得出以下管理学启示:

(1) 政府应建立合理的碳配额评估机制,在提高惩罚成本的同时采用柔性方式抑制企业的碳谎报行为,保障供应链上游企业发挥带头作用,提高供应链整体绩效。

(2) 在供应链的竞争中,高排放型企业总是处于劣势,只能获得低利润,考虑到消费者日益增长的低碳意识,供应商与高排放型制造商可积极投资减排技术,降低自身的碳排放量,刺激消费需求,从而助力企业与供应链利润上升新的台阶。

(3) 企业和供应链成员可积极应用区块链技术,在抑制谎报行为、提高利润的同时推动碳市场充分发挥优化配置碳排放资源的作用,保障碳市场的稳定发展。

(4) 政府可考虑对区块链应用能力较弱的企业提供适当的补贴,激励企业积极应用区块链技术,保障供应链发展的可持续。

本文研究所得拓展了区块链技术在抑制碳排放权初始分配环节中碳谎报行为的应用实践,弥补了现有文献对平台供应链网络中碳谎报行为研究的空白,可为现实中平台供应链网络应用区块链技术提供一定的理论指导。本文仍存在一定的不足,例如区块链技术应用带来的积极效益较为单一,回收产品的过程中也可能存在质量信息谎报行为等,未来可向这些方向进一步研究。

参考文献:

- [1] 齐旭. 碳交易:区块链初试牛刀[N/OL]. 中国电子报, 2022-07-12[2022-12-20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1737472368539899401&wfr=spider&for=pc>.
QI Xu. Carbon emission trading; blockchain's first try[N/OL]. China Electronics News, 2022-07-12[2022-12-20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1737472368539899401&wfr=spider&for=pc>.
- [2] 中国青年报. 在碳排放报告上弄虚作假,四家机构被生态环境部通报[N/OL]. (2022-03-04)[2023-06-20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1727262476917282097&wfr=spider&for=pc>.
China Youth Daily. Four institutions have been notified by the Ministry of Ecology and Environment for falsification in carbon emission reports[N/OL]. (2022-03-04)[2023-06-20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1727262476917282097&wfr=spider&for=pc>.
- [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.
YANG Lei, ZHENG Chenshi, JI Jingna. Misreporting decisions and coordination in supply chain under asymmetric carbon information[J]. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(4):111-120.
- [4] 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.

- ZHOU Yanju, WU Longjian. Supply chain analysis under carbon information asymmetry based on carbon cap-and-trade[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2017, 22(4):68-78.
- [5] 张令荣,刘笑言,王锋,等. 碳配额交易政策下闭环供应链谎报决策与协调研究[J]. *管理工程学报*, 2023, 37(4):196-205.
ZHANG Lingrong, LIU Xiaoyan, WANG Feng, et al. Research on misreporting strategies and coordination of closed-loop supply chain under cap-and-trade policy[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2023, 37(4):196-205.
- [6] 陆菊春,张瑞雪. 碳排放权初始分配中防范企业逆向选择的演化博弈[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2016, 18(4):28-35.
LU Juchun, ZHANG Ruixue. Evolutionary game analysis to prevent enterprise adverse selection in the initial allocation of carbon emission rights[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2016, 18(4):28-35.
- [7] XU Xiaoping, CHOI T M. Supply chain operations with online platforms under the cap-and-trade regulation: impacts of using blockchain technology[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 155:102491.
- [8] LIU Jianguo, ZHAO Huida, CHEN Jihong. Blockchain-driven win-win strategy of economy and environment in the asymmetric competitive supply chain[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 176:108978.
- [9] TSAI C H. Supply chain financing scheme based on blockchain technology from a business application perspective[J]. *Annals of Operations Research*, 2023, 320(1):441-472.
- [10] WANG Jun, ZHANG Qian, HOU Pengwen. Combating deceptive counterfeits with blockchain technology under asymmetric information[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2022:1-13.
- [11] 邹梓琛,刘名武,林强,等. 低碳感知差异下制造商嵌入区块链的两产品供应链决策[J/OL]. *计算机集成制造系统*:1-23 [2023-06-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20230410.1502.020.html>.
ZOU Zichen, LIU Mingwu, LIN Qiang, et al. Blockchain-embedded two-product supply chain decision making for manufacturers with low carbon perception differences [J/OL]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*: 1-23 [2023-06-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20230410.1502.020.html>.
- [12] 王君,张倩,侯棚文. 质量信息不对称下零售商基于区块链技术的信息揭示策略[J]. *管理工程学报*, 2023, 37(4):153-164.
WANG Jun, ZHANG Qian, HOU Pengwen. Retailer's information acquisition strategy based on blockchain technology under quality information asymmetry[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2023, 37(4):153-164.
- [13] 杨仕辉,余敏. 碳配额不同分配机制下供应链碳减排优化策略[J]. *经济与管理评论*, 2016, 32(6):35-42.
YANG Shihui, YU Min. Optimal carbon emission reduction decisions in supply chain under different allocation mechanism of carbon quota[J]. *Review of Economy and Management*, 2016, 32(6):35-42.
- [14] XIA Liangjie, GUO Tingting, QIN Juanjuan, et al. Carbon emission reduction and pricing policies of a supply chain considering reciprocal preferences in cap-and-trade system[J]. *Annals of Operations Research*, 2018, 268(1):149-175.
- [15] 普华永道. 《2021年全球消费者洞察调研》中国报告[EB/OL]. (2022-11-01) [2023-01-01]. <https://www.pwccn.com/zh/industries/retail-and-consumer/publications/consumer-insights-survey-2021-china-report.html>.
Pricewaterhouse Coopers. 2021 *Global Consumer Insight Survey China Report* [EB/OL]. (2022-11-01) [2023-01-01]. <https://www.pwccn.com/zh/industries/retail-and-consumer/publications/consumer-insights-survey-2021-china-report.html>.
- [16] 孙嘉轶,杨露,姚锋敏. 考虑低碳偏好及碳减排的闭环供应链回收及专利授权策略[J]. *运筹与管理*, 2022, 31(9):120-127.
SUN Jiayi, YANG Lu, YAO Fengmin. Recovery and patent authorization strategy for closed-loop supply chain considering low carbon preference and carbon emission reduction[J]. *Operations Research and Management Science*, 2022, 31(9):120-127.
- [17] 蒋雷勇,孙立成. 异质性减排政策下考虑消费者低碳偏好的供应链决策研究[J]. *工业工程*, 2022, 25(3):164-172.
JIANG Leiyong, SUN Licheng. A research on supply chain decision taking into account consumers' low carbon preference under heterogeneous emission reduction policies[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2022, 25(3):164-172.
- [18] SUN Licheng, CAO Xiaoxiao, ALHARTHI M, et al. Carbon emission transfer strategies in supply chain with lag time of emission reduction technologies and low-carbon preference of consumers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 264:121664.
- [19] QIAN X H, CHAN F T S, ZHANG J H, et al. Channel coordination of a two-echelon sustainable supply chain with a fair-minded retailer under cap-and-trade regulation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244:118715.